



Nanjing University of Aeronautics and Astronautics  
The Graduate School  
College of Mechanical and Electrical Engineering

**Basic Research on Hybrid Processing of  
Laser Beam Machining Combined with Jet  
Electrochemical Machining**

A Thesis in

Mechanical Engineering

by

Zhang Hua

Advised by

Prof. Xu Jiawen

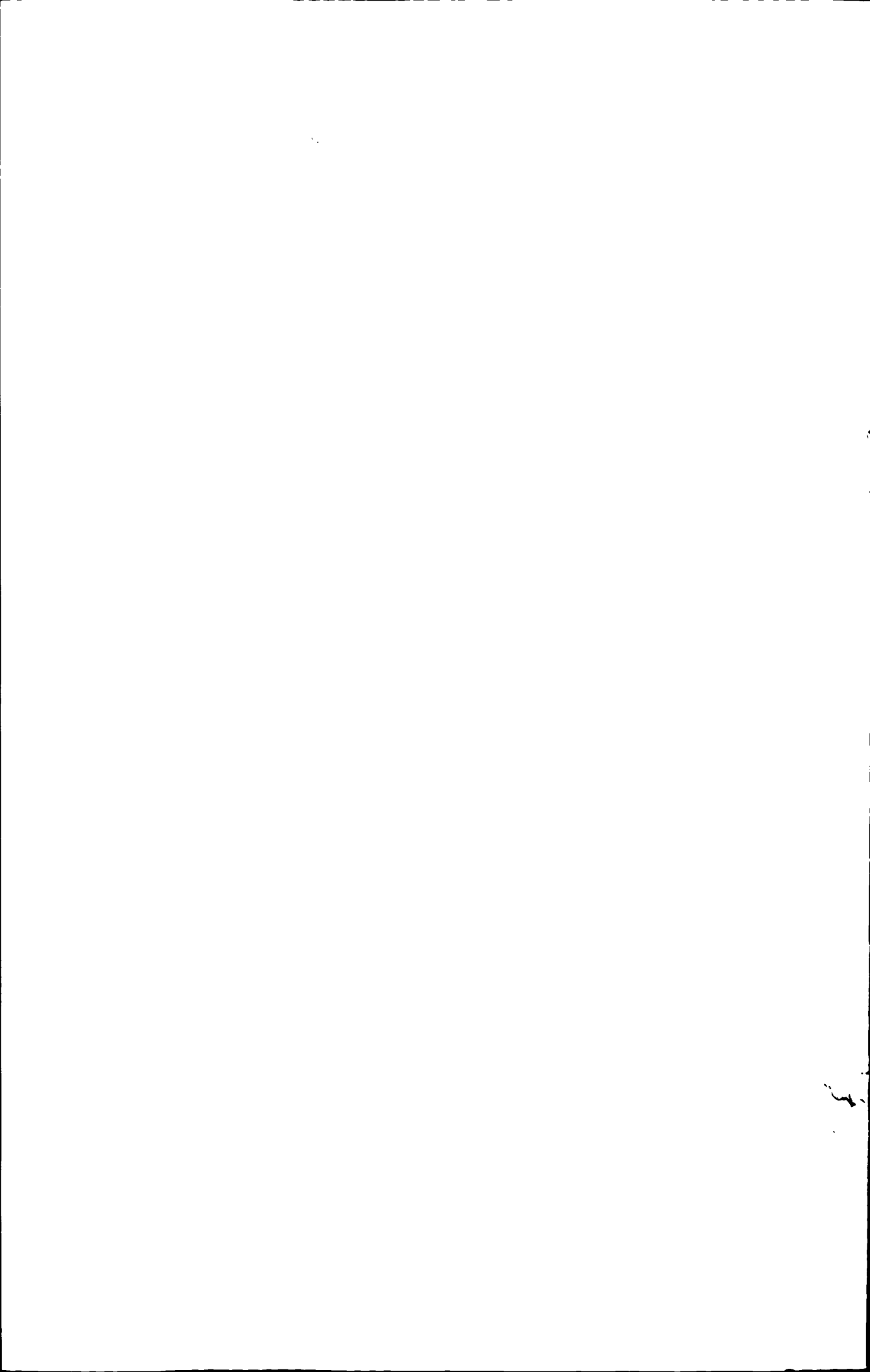
Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

October, 2009




## 承诺书

本人声明所呈交的博士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

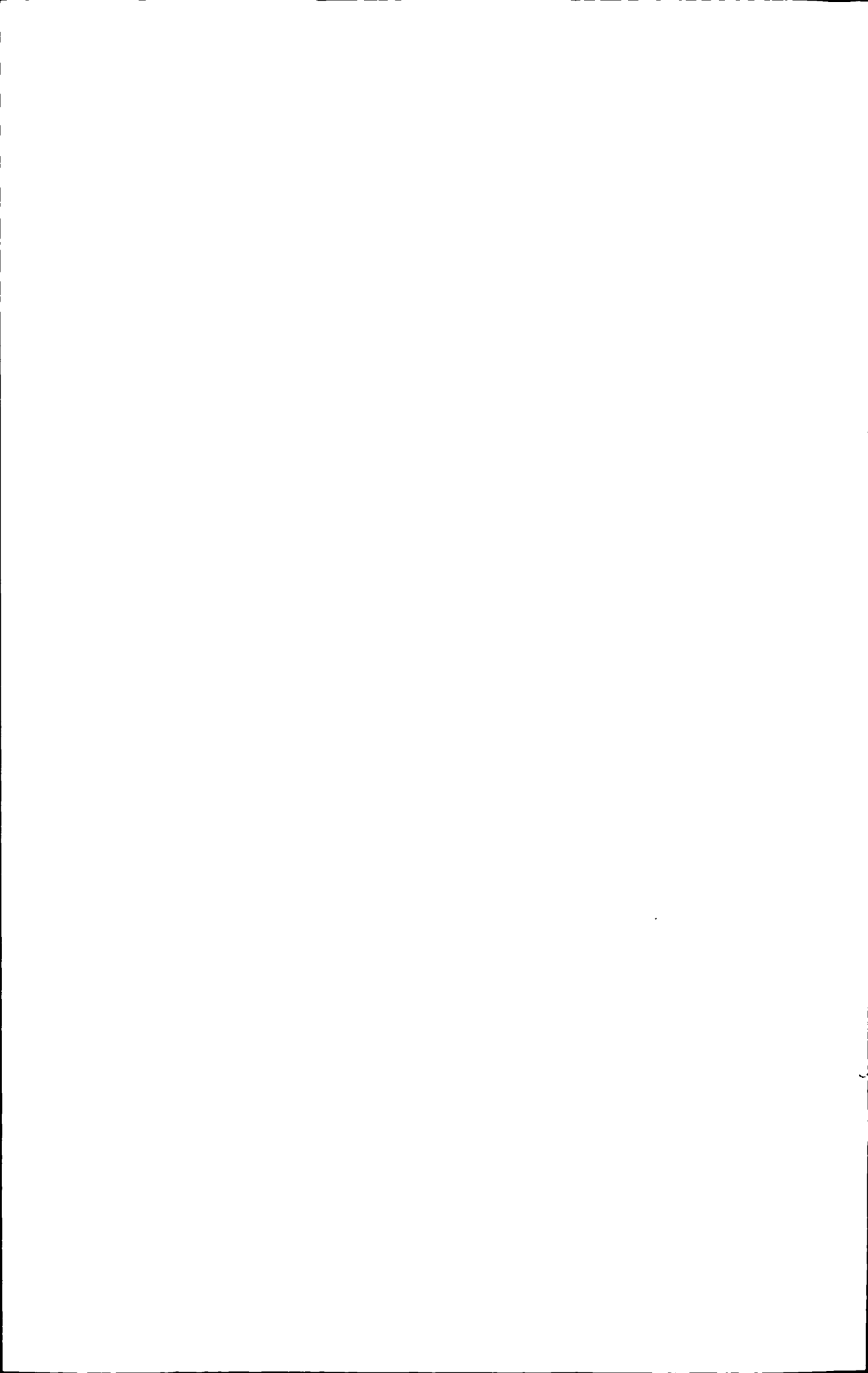
本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名：



日期：2009年2月



## 摘 要

随着现代制造业的发展,集成创新成为制造业技术创新的重点。喷射液束电解—激光复合加工正是基于制造技术集成创新理念而提出的一项将电解加工与激光加工进行复合的新型加工方法。该方法通过施加与聚焦激光束同轴的带负电喷射电解液束形成工具阴极,并和激光束共同作用于工件,其加工原理是以激光加工为主快速去除材料,同时被阴极化的喷射电解液束对加工区的冲刷、冷却和电解作用在线去除激光加工所产生的再铸层。该方法涉及激光在电解液中的衰减特性、激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应以及激光作用材料的热物理过程和喷射电解液束作用材料的电解过程之间的交互作用等有待研究的学科交叉知识点。

本文以实现喷射液束电解—激光复合加工技术为主要目的,进行了以下研究工作:

1. 根据水溶液对激光的吸收、散射的理论分析,采用自行设计制造的装置实验研究了激光在电解液中的衰减特性及电解液浓度和温度的影响,为设计喷射液束电解—激光复合加工试验系统提供了重要的理论与试验依据。

2. 根据激光在液体中作用于金属靶材产生的力学效应的理论分析,基于压电加速度传感器测振原理,通过对电解液中悬臂梁不锈钢靶材在激光作用后的振动测试,研究了电解液中激光作用于金属靶材的力学效应,分析了喷射液束电解—激光复合加工中激光热—力效应去除材料的作用机理,揭示了激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应有利于排除金属熔化物而减薄再铸层。

3. 基于喷射液束电解—激光复合加工特点的分析,总结出了该加工方法对试验系统的总体技术要求。根据这些技术要求以及激光在电解液中的衰减特性和力学效应的研究结果,研制了符合喷射液束电解—激光复合加工条件的试验系统,并对关键部件——喷射装置进行了分析和优化设计。

4. 根据对激光加工热—力作用机理和电解加工电化学反应机理的分析,基于温度场和电场理论,建立了喷射液束电解—激光复合加工二维数学模型,利用时域上独立计算,空域上边界迭加变换的方法,采用有限元分析软件进行了数值模拟并进行了试验验证,揭示了喷射液束电解—激光复合加工的作用机理,为后续试验研究奠定了基础。

5. 采用自行研制的试验系统,利用纳秒红外激光、毫秒绿光激光对不锈钢材料、镍基高温合金材料进行了喷射液束电解—激光复合加工的试验研究,证实了喷射液束电解—激光复合加工的可行性,复合加工在保持激光加工相对高的加工效率的前提下,使再铸层厚度减薄至  $5\mu\text{m}$  以下,而且加工表面无热影响区,加工精度更好。在此基础上,根据不同工艺参数的对比试验结果,总结出了该复合加工的基本工艺规律。

通过上述理论分析和试验研究,表明了喷射液束电解—激光复合加工可以实现激光加工与电解加工的复合,能够获得优质高效的加工效果,该加工方法为航空发动机热端部件气膜冷却孔的加工提供了新的技术途径。

**关键词:** 激光加工, 喷射液束电解, 激光衰减, 激光力学效应, 再铸层

低、加工稳定性差、工具制作难等缺点。

因此,根据技术集成创新的研究思路,从有效去除激光加工中再铸层的角度出发,提出喷射液束电解—激光复合加工方法,它以激光加工为主,将其与电解加工进行复合,相互扬长避短,将可能产生高表面质量、高效的综合加工效果。



图 1.5 涡轮叶片排气边对流冷却孔<sup>[47]</sup>

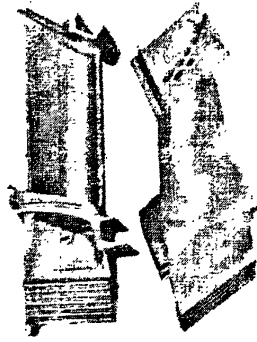


图 1.6 叶身型面气膜冷却孔<sup>[47]</sup>

## 1.2 激光加工再铸层去除方法研究现状

激光加工再铸层产生的原因归结为其热加工作用机理。在激光加工过程中,激光焦点所照射的材料上形成上万摄氏度的高温,使材料瞬间熔化和气化;随着熔体温度继续升高,同时还由于激光脉冲的热冲击作用,材料的气化物、同时还夹带着熔化物从熔体底部以极高的压力向外喷射,且伴随着爆炸和冲击,于是被加工材料被去除。在这个过程中,被气化的那部分材料喷射出,而熔化的材料大部分被夹带喷射出,还有紧靠基材的一部分,在熔化后又随着激光照射的停止而很快凝固、结晶,这部分紧靠基材先熔化、后又立即凝固、结晶的一层称作再铸层<sup>[43-45]</sup>。对于激光打孔,随着打孔向深度进行,深层向外的喷射物也会部分附着在已打好的孔壁上并迅速凝固,也形成再铸层的一部分。再铸层是在温度急剧变化的条件下形成的:

- 1) 从时域上看,从金属熔融液态的上千摄氏度在极短时间内降至室温,降温速度极快;
- 2) 从空域上看,沿再铸层厚度方向 0.01mm~0.1mm 数量级尺寸范围内,从金属的熔化温度到基材温度而形成极高温度梯度。

时域、空域温度的急剧变化正是由激光加工机理所决定的,或者说是伴随着激光加工的物理过程所产生的。针对激光加工再铸层这个固有的缺陷,国内外学者对去除再铸层方法进行了大量研究,主要包括:后续光整处理<sup>[42-43, 48-49]</sup>、优化激光加工工艺参数<sup>[48, 50-66]</sup>、加工零件预处理<sup>[67-71]</sup>、辅助气体喷射激光加工<sup>[72-74]</sup>、水下激光加工<sup>[75-85]</sup>、化学辅助激光加工<sup>[86]</sup>、水射流引导激光加工<sup>[87-110]</sup>、超声辅助激光加工<sup>[111-112]</sup>等。

### 1.2.1 激光加工后续光整处理

去除再铸层的常用方法是激光加工后续光整处理,它不是在激光加工过程中,而是在激光



加工后将已经产生的再铸层通过特殊光整加工方法，如磨粒流加工、化学研磨去除再铸层。

磨粒流加工去除再铸层的原理是选用低粘度或中低粘度的基体和微细粒度磨料所组成的流动性大的磨流介质，在较高挤压力下往复通过细小孔而去除孔壁的再铸层<sup>[42-43]</sup>。用磨粒流对激光加工出的小孔再加工，减薄或去除激光加工所产生的再铸层，不仅可以清除引起疲劳破坏的隐患，而且磨粒流加工去毛刺并倒圆，从而改善零件的表面完整性。但是使用磨粒流去除再铸层时存在两个问题，一是斜孔两端存在去除不掉的死角；二是磨粒流易沿着阻力较小的大直径孔挤出，造成直径较大的孔被磨大，直径较小的孔再铸层去除不掉。

化学研磨去除再铸层的原理是：在几种化学药品按比例配制的电解液中，基材与再铸层之间存在电位差，即再铸层的腐蚀电位低于基材的腐蚀电位，在这种情况下，再铸层与基材之间形成微电池效应，作为阴极的再铸层受到电解液的腐蚀而被溶解去掉<sup>[48-49]</sup>。北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室对  $Ni_3Al$  基铸造高温合金的激光旋切打孔进行了化学研磨处理，如图 1.7 所示，化学研磨后再铸层明显被去除<sup>[48]</sup>。

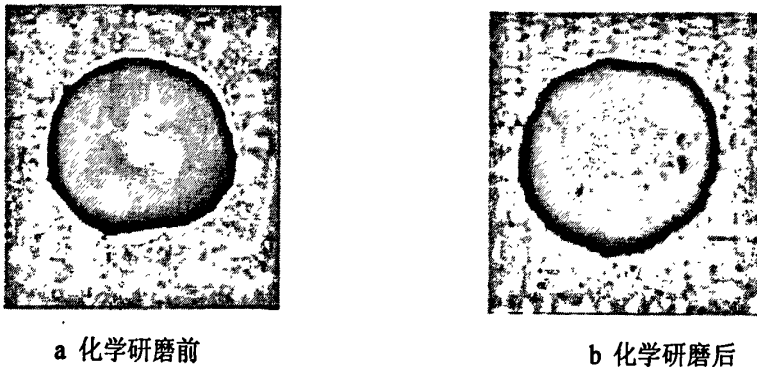


图 1.7  $Ni_3Al$  材料激光打孔化学研磨处理前后的形貌比较<sup>[48]</sup>

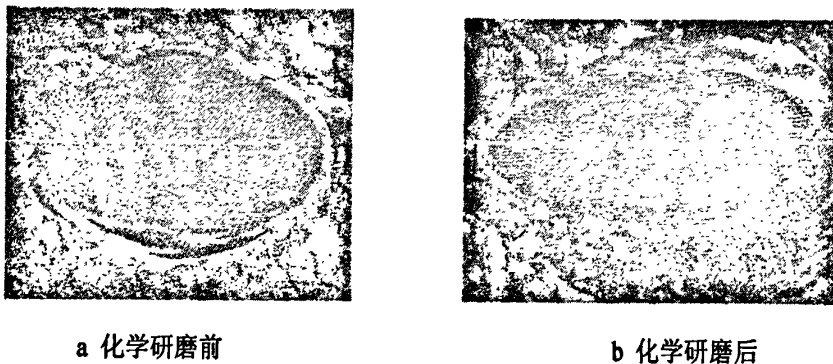


图 1.8 DZ125 材料激光打孔化学研磨处理前后的形貌比较<sup>[49]</sup>

中科院金属腐蚀与防护国家重点实验室对镍基超合金 DZ125 的激光打孔进行了化学研磨后续处理，处理前后的形貌比较如图 1.8 所示，化学研磨处理后，孔边缘的溅射物被去除，孔的轮廓更为圆整<sup>[49]</sup>。化学研磨方法的优点是可大批量去除激光打孔的再铸层，去除均匀、时间快而且比较经济。但它的一个缺点是通用性差，不同的工件材料需要配制不同成分的电解液。

## 1.2.2 优化激光加工工艺参数

由激光加工的热作用加工机理可知，减少再铸层的厚度，需要减小激光热作用影响区域，增加材料气化比例，材料熔融范围尽量小，而且熔融的物质应尽可能地去除。影响再铸层的激光加工因素主要有：能量、频率、脉宽和波长。

### 1.2.2.1 优化激光脉冲能量

曼彻斯特理工大学激光加工研究中心 L. Li 等研究了激光峰值功率对激光打孔的影响<sup>[50]</sup>。该中心利用闪光灯泵浦 Nd:YAG 激光对 2mm 厚度的低碳钢片进行了不同峰值功率的打孔研究，结果如图 1.9 所示。显然，在同样脉冲宽度条件下，峰值功率越高，即脉冲能量越大，加工小孔的再铸层相应越薄。

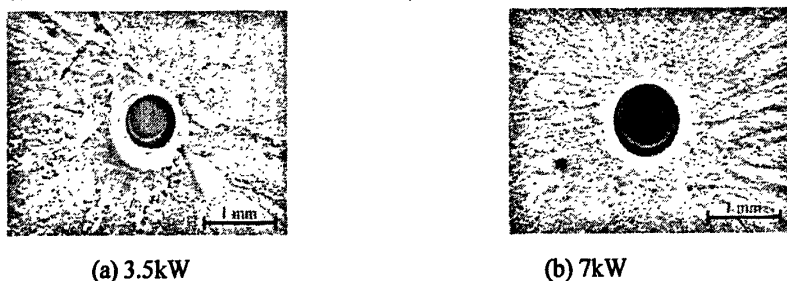


图 1.9 不同峰值功率的 1ms 激光加工低碳钢材料小孔形貌的比较<sup>[50]</sup>

在国内，北京航空制造工程研究所张晓兵等利用  $TEM_{00}$  模激光输出的声光调 Q YAG 激光器，针对  $Ni_3Al$  材料，选用了脉宽为 250ns、不同脉冲能量的单脉冲激光进行了打孔对比研究<sup>[48]</sup>，得出了相似的结论。结果显示 160mJ、320mJ、500mJ 脉冲能量的激光在 2mm 厚的试件上打孔的再铸层最大厚度依次分别为 60 $\mu$ m、40 $\mu$ m、15 $\mu$ m。

### 1.2.2.2 优化激光脉冲频率

北京工业大学激光工程研究院利用自行研制的声光调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器(脉宽 200ns 重复频率 5~50kHz，脉冲峰值功率 400kW)对铜和镍基高温合金进行了打孔研究<sup>[51]</sup>。图 1.10



图 1.10 不同频率的 200ns 激光加工铜片小孔入口形貌的比较<sup>[51]</sup>

是采用三种不同频率的 200ns 激光对 2.5mm 厚的铜片打孔的入口形貌。结果表明, 频率相对越低, 脉间时间越长, 有利于减薄再铸层。

### 1.2.2.3 优化激光脉宽

图 1.11 是北京工业大学激光工程研究院采用两种不同脉宽的脉冲激光对 2.5mm 厚的镍基高温合金打孔的入口形貌<sup>[51]</sup>。显然, 自由振荡脉冲激光打孔的入口存在熔池效应, 孔壁附有明显的再铸层, 而调 Q 脉冲激光脉宽更短, 功率密度更高, 致使更多材料以气化方式被去除, 不存在熔池效应, 入口轮廓光滑, 孔壁再铸层明显减少。

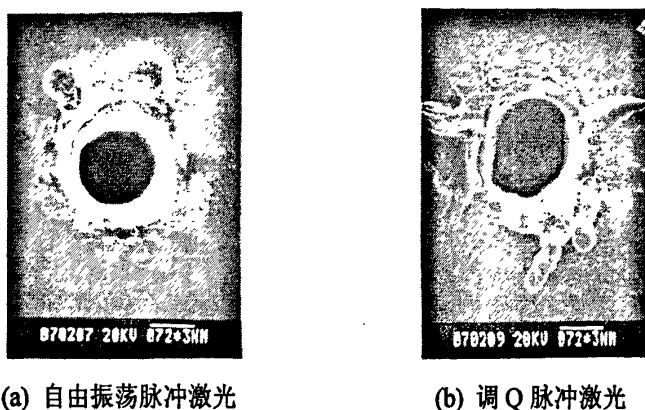


图 1.11 不同脉宽激光加工镍基高温合金的小孔入口形貌的比较<sup>[51]</sup>

美国 GE 公司陈向力博士利用 Q 开关和锁模技术对传统的 Nd:YAG 激光器进行调 Q 处理, 得到脉宽在几百纳秒到几百皮秒之间、功率密度达到  $10^8 \sim 10^9 \text{W/cm}^2$  左右的激光, 利用该激光对高温镍基合金 N5 进行了打孔研究, 与 ms 级脉宽的 Nd:YAG 激光打孔相比, 调 Q 激光打孔的质量明显改观<sup>[52-53]</sup>。

20 世纪 90 年代初, 随着宽带可调谐激光晶体和自锁模技术的出现, 激光技术得到了突飞猛进的发展, 以掺钛蓝宝石为代表的飞秒 ( $10^{-15}\text{s}$ ) 激光器进入加工领域<sup>[54]</sup>。飞秒激光的超快速时间和超高峰值特性将其能量全部、快速、准确地集中在限定的作用区域, 实现对几乎所有材料的非热熔性冷处理, 获得传统激光加工无法比拟的高精度、低损伤等独特优势<sup>[55-60]</sup>。

德国汉诺威激光中心 B.N. Chichkov 研究小组利用三种不同脉宽的激光 (纳秒级、皮秒级、飞秒级) 在真空靶室中对  $100\mu\text{m}$  厚的钢片进行了打孔研究<sup>[56]</sup>。这三种激光技术参数分别为: 脉宽 3.3ns、脉冲能量 1mJ、能量密度  $4.2 \text{J/cm}^2$ ; 脉宽 80ps、脉冲能量  $900\mu\text{J}$ 、能量密度  $3.7 \text{J/cm}^2$  和脉冲能量  $120\mu\text{J}$ 、脉宽 200fs、能量密度  $0.5 \text{J/cm}^2$ 。经过  $10^4$  个脉冲照射后, 三种激光的加工结果具有显著的差异, 如图 1.12 所示。纳秒激光和皮秒激光去除材料是通过熔化和气化, 由于气化过程的反冲压力导致了液相材料的向外膨胀, 从而造成环绕加工位置边缘的“冠状物”存在, 大大降低了加工质量; 而对于飞秒激光加工, 金属表面没有材料熔化的痕迹, 孔的边缘也显得较为光滑。



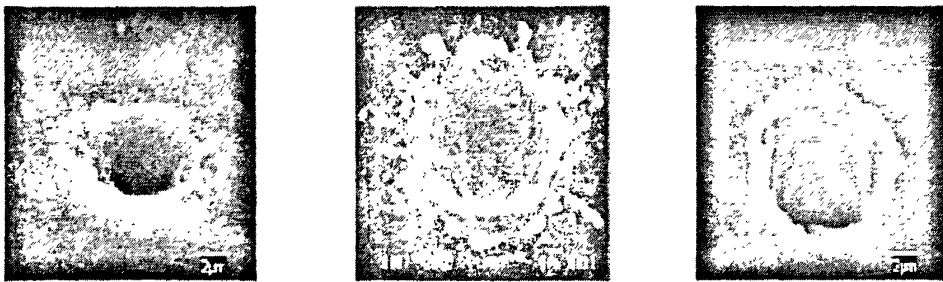
(a) 纳秒激光

(b) 皮秒激光

(c) 飞秒激光

图 1.12 不同脉宽激光加工钢片的小孔形貌的比较<sup>[56]</sup>

加拿大国家研究理事会 (NRC of Canada) X.Zhu 等利用 60fs 的钛宝石激光器对 25 $\mu\text{m}$  厚的铝片进行了打孔试验, 并与相同脉冲能量的 50ps、10ns 的激光进行了对比打孔研究<sup>[57-58]</sup>。图 1.13 是三种不同脉宽激光打孔的形貌图, 单脉冲能量统一为 2.7 $\mu\text{J}$ , 每次作用三个脉冲。皮秒和纳秒的加工表面存在明显的金属熔化凝固层, 而飞秒激光加工的加工表面熔化物很少。



(a) 60fs

(b) 50ps

(c) 10ns

图 1.13 不同脉宽激光加工铝片的小孔形貌的比较<sup>[58]</sup>

北京理工大学理学院应用物理系李呈德等利用美国 Clark MXR 公司的 CPA 2010 型飞秒激光器对 220 $\mu\text{m}$  厚的 NiTi 形状记忆合金进行了切割试验研究<sup>[59]</sup>, 飞秒激光的脉宽为 150fs, 波长为 775nm, 平均功率为 1W, 频率为 1kHz。图 1.14 是该飞秒激光在 NiTi 形状记忆合金上加工出的宽度为 40 $\mu\text{m}$  的高表面质量、无再铸层的细缝。

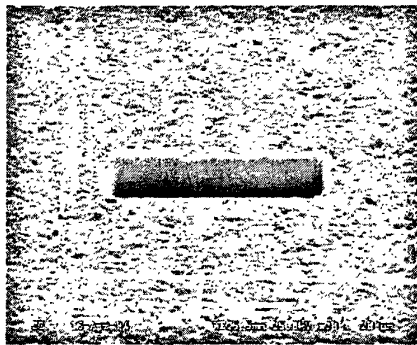


图 1.14 飞秒激光在 NiTi 形状记忆合金上加工的细缝<sup>[59]</sup>

新加坡制造技术研究院 H.Huang 等利用脉宽 150fs, 频率 1kHz 的飞秒激光对 2.54mm 厚的

Nitinol 材料进行了加工, 加工表面仍有大约  $7\mu\text{m}$  厚的再铸层和小于  $70\mu\text{m}$  厚的热影响层<sup>[60]</sup>。

总体而言, 激光脉宽越短, 加工效果越好, 再铸层越薄。飞秒激光以其超短时间和极高峰值功率的特点, 可使材料近乎完全气化而不出现材料的熔融, 从加工机理的层面上解决激光加工的再铸层问题。但是, 飞秒激光器能量小, 而且存在快速“老化”问题, 其频率稳定性、重复精度随使用时间的增加而降低很快, 即其使用寿命短, 成本高。目前, 飞秒激光加工主要还局限于实验室研究阶段, 其应用前景首先还是在微电子、光子器件和光通讯、激光医疗和生物工程等领域的超精密加工。

#### 1.2.2.4 优化激光波长

英国拉夫堡大学 Muray A.J. 和 Tyrer J.R. 利用  $\text{CO}_2$  激光和 Nd:YAG 激光进行了打孔对比实验<sup>[61]</sup>, 后者与前者相比具有更高的峰值功率, 对比打孔结果发现后者产生的再铸层和热影响区明显减薄,  $\text{CO}_2$  激光产生的热破坏几乎是 Nd:YAG 激光产生的热破坏的两倍。分析原因认为: 随着激光波长的增加, 材料对激光的吸收能力下降, 激光辐射的光子的能量下降, 这导致了热影响区热剪应力的增大和再铸层及微裂纹的产生。所以, 具有较低光子能量和较长波长的  $\text{CO}_2$  激光比 Nd:YAG 激光产生更大的热破坏, 即产生的再铸层更厚, 微裂纹更多。

英国利物浦大学 W. O'Neill 对调 Q 二极管泵浦 Nd:YAG 激光器分别二次倍频、三次倍频获得波长 532nm 和 355nm 的激光, 利用 1064nm、532nm、355nm 的激光对 0.25mm 厚的铜片和 0.2mm 厚的 M2 工具钢进行了激光加工对比试验研究<sup>[62-63]</sup>。图 1.15 是三种不同波长的激光在铜片上打孔的 SEM 图。由图可以看出随着激光波长的缩短, 材料对激光的吸收率增加, 激光作用下材料更多在气化状态下被去除, 而熔化物随之减少, 从而减薄了再铸层。

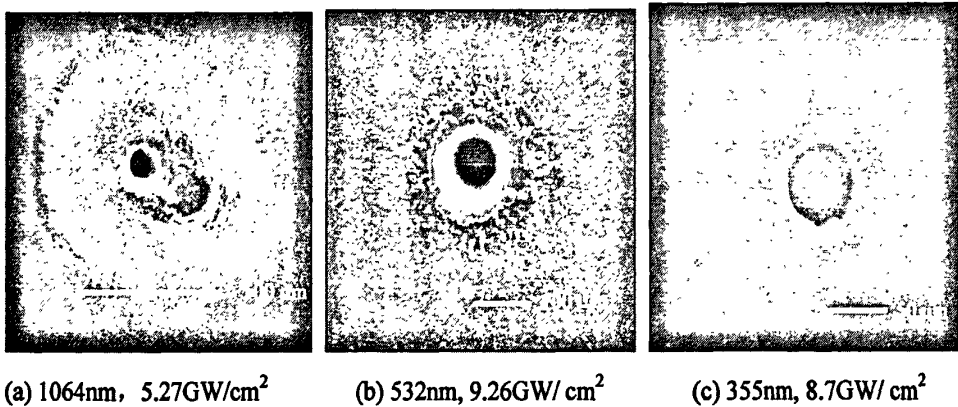


图 1.15 不同波长激光加工铜片的小孔形貌的比较<sup>[62]</sup>

中国科技大学结构分析重点实验室吴气虹博士等对波长位于 1064nm~266nm 波段的激光进行了打孔研究<sup>[64]</sup>。加工的材料是高温合金 iconel718。研究结果同样印证了激光波长越短, 加工质量越高, 再铸层越薄。

GE 公司陈向力博士利用波长为 1064nm 的 Nd:YAG 激光和 532nm 的二次谐波激光对高温

合金进行了打孔试验<sup>[65]</sup>,后者与前者相比具有更高的峰值功率,试验结果显示短波长的激光打孔产生的再铸层和热影响区明显减少。

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 Chang J.J 等利用波长处于绿光波段、脉宽 30~40ns 的铜蒸汽绿光激光对金属和陶瓷进行了打孔、开槽的研究<sup>[66]</sup>,结果表明绿光激光加工的表面无明显的热影响区。

总之,对激光工艺参数的优化,无论是提高单脉冲能量、调整脉冲频率,还是减小脉宽,缩短波长,其目的就是提高激光功率密度,增加材料气化比例,减少材料熔化,从而减薄再铸层。但是,从激光加工本身而言,对工艺参数的优化不能从根本上解决再铸层问题。

### 1.2.3 加工零件预处理

对加工零件的预处理方法有:激光加工前对加工零件进行局部预热、加工表面覆盖保护膜以及加工零件背面粘附易气化物等。

英国拉夫堡大学 Muray A.J. 和 Tyrer J.R. 为了减少陶瓷材料激光打孔过程中产生的再铸层、热应力、微裂纹,采用了陶瓷零件进行局部预热的方法<sup>[67-68]</sup>。这种预热的方法可以有效降低激光辐照结束后材料加工区的温度梯度,从而有利于减少再铸层上的微裂纹。研究表明,在高温炉中加热零件后激光打孔,可以使再铸层上的微裂纹与空气中激光打孔相比减少一半。在 1300℃ 时进行激光打孔,再辅以特制的等离子体弧对加工区进行局部加热,则再铸层的微裂纹平均降低 14%。

英国曼彻斯特理工大学 D.K.Y. Low 和 L. Li 等利用一种嵌入陶瓷微粒的硅橡胶合成物作为加工零件的防溅射复合掩膜 (ASCC, anti-splatter composite coating),可以有效减少激光加工入口周围的溅射物和再铸层<sup>[69-70]</sup>。图 1.16 比较了对镍铬钛合金 (Nimonic 263) 防溅射复合掩膜激光打孔与传统激光打孔的加工效果。显然,加工零件表面施加掩膜后,避免了激光打孔中的金属熔化飞溅物粘附在入口周围,减少了入口处的再铸层,提高了激光加工质量。

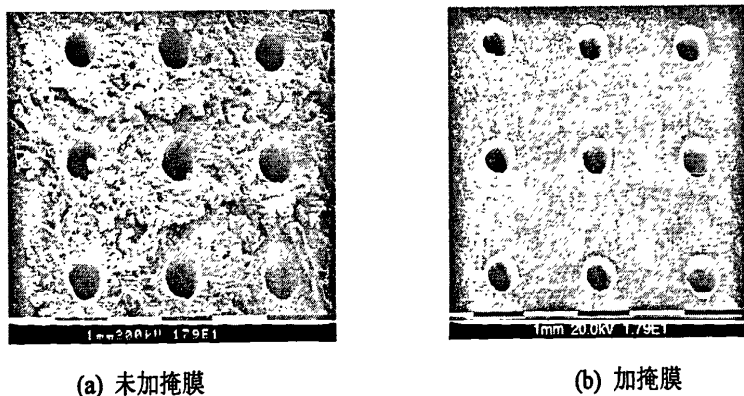


图 1.16 镍铬钛合金防溅射复合掩膜激光打孔与传统激光打孔效果的比较<sup>[69]</sup>

另外,可把气化温度低于被加工材料熔化温度的物质贴附在被加工工件的背面,当由于激

光辐射的作用而形成孔的时候,这种易熔物质开始气化,并形成蒸气。这些蒸气经过所形成的孔时,阻止了熔化金属的反向流动,从而减少熔化金属在孔壁的再凝固。目前使用的该材料主要有石蜡、甘油、二甲苯、雪松油等<sup>[71]</sup>。

但是,加工表面覆盖保护膜和加工背面粘附易气化物仅仅能够减少激光打孔入口和出口处的金属熔化物,难以消除孔内壁的再铸层;对加工零件的局部预热处理更多的效果是减少了激光加工表面再铸层上的微裂纹,而再铸层的去除效果并不明显。

#### 1.2.4 辅助气体喷射激光加工

辅助气体喷射已经成功应用于激光切割中减薄再铸层、改善切割表面质量。台湾成功大学制造工程研究所陈馨亮教授利用平均功率 1.4kW 的  $\text{CO}_2$  激光对 3mm 厚的低碳钢进行了辅助氧气喷射激光切割研究<sup>[72]</sup>。图 1.17 比较了三种不同氧气喷射压力下激光切割低碳钢的切缝,结果表明一定范围内提高辅助气体压力有助于提高切缝质量。

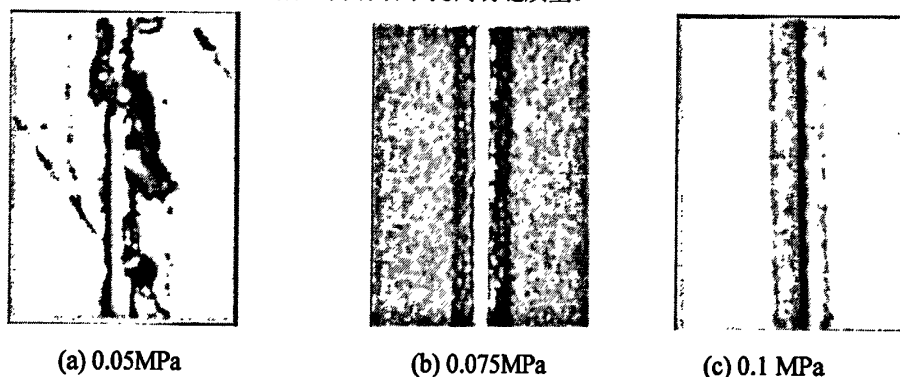


图 1.17 不同辅助氧气压力下  $\text{CO}_2$  激光切割低碳钢的切缝形貌比较 (切割速度 30mm/s)<sup>[72]</sup>

北京工业大学国家产学研激光技术中心左铁钊与德国柏林工业大学光学研究所 Th.Beck、H.Weber 等研究了辅助气体对激光打孔的影响<sup>[73]</sup>。研究表明:与激光切割相似,辅助气体在激光打孔中也主要起着两个方面的作用,即将液态金属吹出工件,并冷却工件。但是在激光打孔中,气体吹除液态金属的方向和光束的传输方向是相反的,所以只有部分气体被用于吹除液态金属,其利用效率比激光切割低,很难将液态金属完全吹除出小孔。不同的辅助气体对不同材料打孔时对孔壁的粘滞物的去除能力是不相同的。对于不锈钢,较快地去除孔壁粘滞物的气体顺序为氩气、氮气和氧气,而对于低碳钢则相反。另外小直径喷嘴打孔比大直径喷嘴打孔的质量更好,采用小直径喷嘴可以获得更高重复性、更小锥度、更薄再铸层及更少热影响区的打孔效果,并且可节省辅助气体的用量,减少加工成本。

英国剑桥大学工程系 A.H. Khan 教授等利用二极管泵浦 Nd:YAG 纳秒激光对厚度 200 $\mu\text{m}$  的 316L 不锈钢片进行了辅助气体喷射激光打孔研究<sup>[74]</sup>。气体喷嘴的孔径分别 200 $\mu\text{m}$ 、300 $\mu\text{m}$  和 500 $\mu\text{m}$ 。图 1.18 是三种喷嘴条件下辅助气体喷射激光打孔与传统空气中激光打孔的加工效果对比图,图(a)是无气体辅助下的激光打孔,图(b)、(c)、(d)是不同直径喷嘴条件下的辅助喷射氧

气激光打孔。由图可以看出，与传统的空气中激光打孔相比，辅助氧气喷射激光打孔的入口的熔化物更少，而小直径喷嘴打孔的效果最好，孔口的溅射物基本被去除，再铸层明显减少。

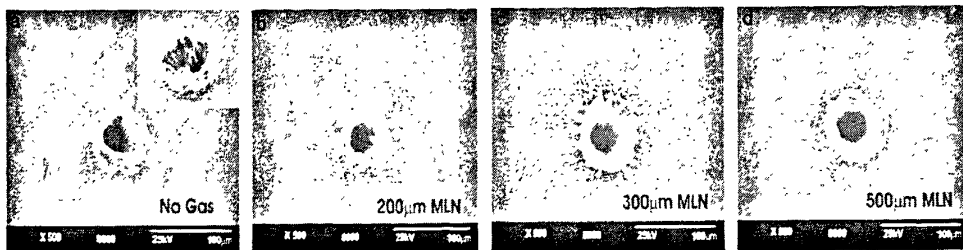


图 1.18 不同加工条件下纳秒激光对 316L 不锈钢的打孔形貌比较<sup>[74]</sup>  
(激光能量密度  $328.5\text{J}/\text{cm}^2$ ，辅助气体为氧气，压力  $0.8\text{MPa}$ )

### 1.2.5 水下激光加工

水下激光加工与传统空气中激光相比，是改变了加工材料周围的介质。以水代替空气是利用水对材料加工区的有效冷却以及迅速带走金属熔滴的作用来减少再铸层<sup>[75-76]</sup>。

1988 年，日本东芝公司制造工程实验室 Noboru Morita 等为减少激光加工陶瓷出现的再铸层和微裂纹，利用调 Q Nd:YAG 激光产生的脉宽  $100\text{ns}$ 、频率  $1\text{kHz}$ 、峰值功率  $50\text{kW}$  的激光对氮化硅陶瓷进行了水下打孔研究<sup>[77]</sup>。研究表明，空气中激光打孔加工表面出现  $20\mu\text{m}$  厚的再铸层，并且再铸层上分布有微裂纹；而水下激光打孔的加工表面没有发现再铸层和微裂纹，但在高频率  $50\text{kHz}$  激光加工时，仍然存在熔化物凝固层。

爱沙尼亚塔林工业大学 Arvi Kruusing 等利用 Nd:YAG 激光对  $0.5\text{mm}$  厚的稀土永磁材料 NdFeB 进行了空气中和水下激光加工研究<sup>[78]</sup>。激光的工艺参数为：脉宽  $180\text{ns}$ 、频率  $1\text{kHz}$ 、峰值功率  $10\text{kW}$ ，加工材料覆盖  $6\text{mm}$  的水层。图 1.19 比较了空气中和水下两种条件下激光切割 NdFeB 材料的切缝截面的形貌。显然，与空气中激光加工相比，水下激光加工可获得更好的表

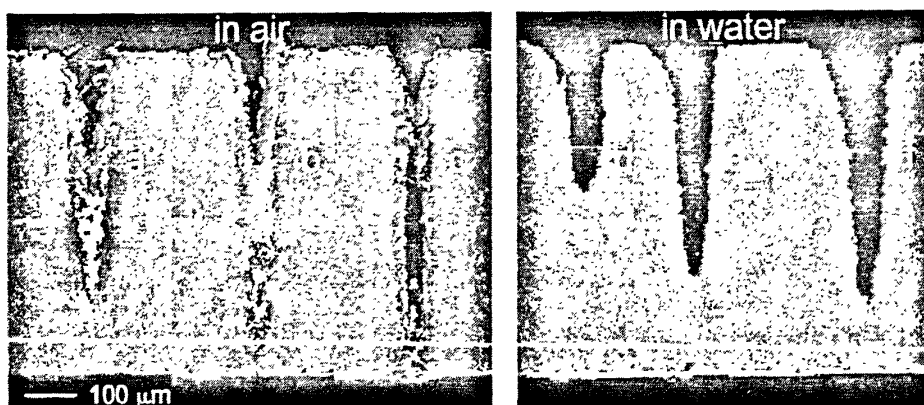


图 1.19 NdFeB 材料的激光空气中和水下加工的截面形貌的比较<sup>[78]</sup>

(扫描速度  $\text{mm/s}$  与往返次数依次为: (a)  $0.8/6$ ; (b)  $0.8/8$ ; (c)  $0.08/8$ ; (d)  $0.08/2$ ; (e)  $0.08/4$  (f)  $0.08/8$ )



面质量，切缝干净，金属熔滴被去除，再铸层明显减少。

德国艾尔兰根—纽伦堡大学 S. ROTH 和 M. Geiger 利用准分子激光器对陶瓷材料和不锈钢进行了水下激光加工研究<sup>[79]</sup>，研究结果同样表明水下激光加工效果优于空气中激光加工。

中国科学院上海光学与精密机械研究所对 Nd:YAG 固体激光器倍频、三倍频激光在空气中和水浴环境下刻蚀硅片进行了研究<sup>[80-81]</sup>。研究表明水浴环境下激光刻槽边缘较光滑且无明显毛刺，表面不平整度小于  $5\mu\text{m}$ ，表面溅射物分布范围远小于空气中激光刻蚀，如图 1.20 所示。

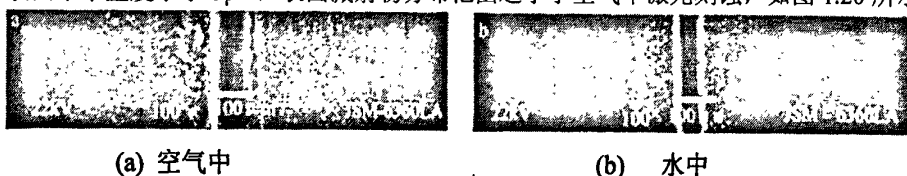


图 1.20 不同条件下倍频 Nd:YAG 激光切割硅片的形貌比较<sup>[80]</sup>

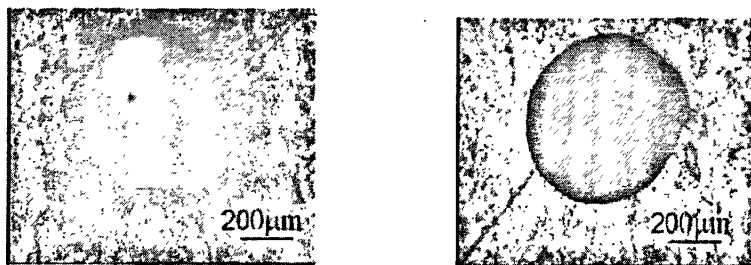
华中科技大学激光技术与工程研究院对短脉冲激光水下打孔进行了研究，采用两种型号 YAG 激光器（纳秒级和毫秒级），对不锈钢、黄铜、紫铜等三种金属进行了水下和空气中的打孔试验<sup>[82]</sup>。实验表明：短脉冲激光（ $10\text{ns}$ ， $15\sim 25\text{mJ}$ ）在水下对金属打孔的效率高于空气中，而且加工的微孔表面质量优于空气中。南京理工大学应用物理系在对激光与水下物质相互作用机理的研究中也得到了相同的结论<sup>[83-85]</sup>。

### 1.2.6 化学辅助激光加工

在水下激光加工的基础上，英国曼彻斯特理工大学激光加工研究中心 L. Li 等采用 NaCl 溶液代替水，创新了一种化学辅助激光加工技术，即利用激光聚焦高温下卤化物对金属材料的热化学作用去除再铸层。该中心利用二极管泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的倍频激光（波长  $532\text{nm}$ 、频率  $25\text{kHz}$ 、平均功率  $2.6\text{W}$ ）对 316L 不锈钢材料进行了化学辅助激光切割和打孔研究<sup>[86]</sup>。图 1.21 与 1.22 分别比较了化学辅助激光加工与传统空气中激光加工的切割和打孔效果。化学辅助激光加工既有水下激光加工的冷却、带走熔滴作用，又有化学溶液的热化学作用，基于以上的复合作用机理，切割、打孔的加工质量都好于空气中激光打孔，表面的溅射物和再铸层被有效去除。



图 1.21 化学辅助激光切割与传统激光切割效果的比较<sup>[86]</sup>



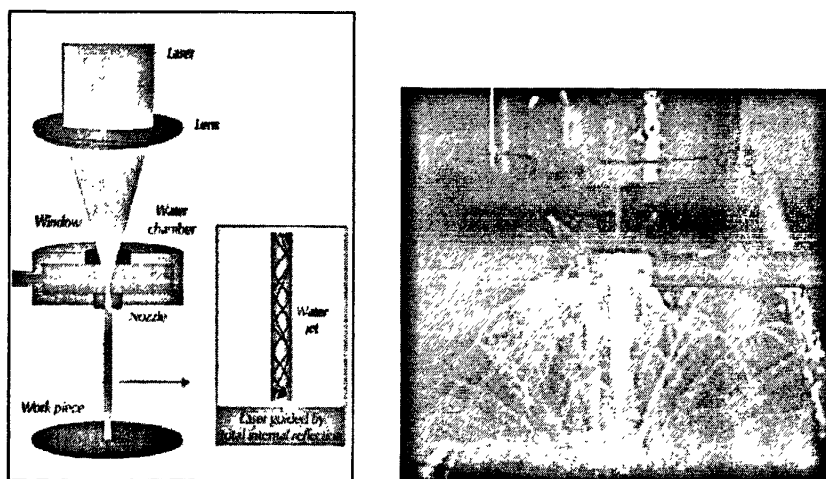
(a) 空气中

(b) 化学溶液中

图 1.22 化学辅助激光打孔与传统激光打孔效果的比较<sup>[86]</sup>

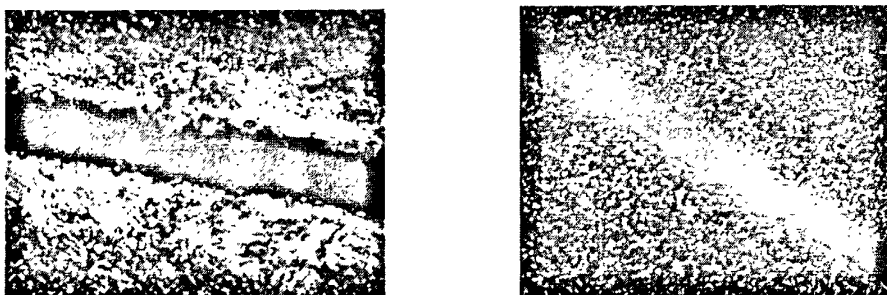
### 1.2.7 水射流引导激光加工

1993年,瑞士联邦技术研究院应用光学研究所(the Institute of Applied Optics of the Swiss Federal Institute of Technology)Bernold Richerzhagen博士发明了水射流引导激光加工技术<sup>[87-88]</sup>,并在1995年获得了国际发明专利。该技术将聚焦激光束导入像“光纤”那样具有传输引导激光作用的高速流动的水束,激光在水与空气界面发生多次全反射后形成横截面能量均匀分布的高能量束作用在工件表面,利用激光和水射流的综合作用去除材料<sup>[89]</sup>。其加工原理和实貌如图1.23所示。水射流引导激光加工以喷射水束代替喷射气体,使得该技术具有独特的加工优势,高速的水射流可以有效冷却加工区并及时排除激光加工中产生的金属熔滴,从而减小热影响区和减薄再铸层,获得高质量的加工效果。

图 1.23 水射流引导激光加工原理示意图及实貌图<sup>[89]</sup>

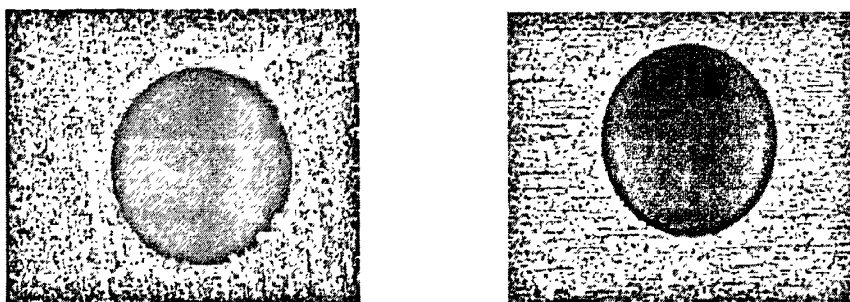
Bernold Richerzhagen博士等人创办的瑞士SYNOVA公司针对水射流引导激光加工技术进行了大量研究<sup>[89-103]</sup>,并将该技术成功应用于半导体和微电子工业中的硅片切割、印刷模板加工、核工业中的薄板切割、医疗器械中的内窥镜切割等多种加工领域。此外,该公司还成功研制出了应用该技术的商业化设备<sup>[103]</sup>。

图 1.24 是 SYNOVA 公司和日本名古屋大学利用水射流引导激光加工技术切割的硅片形貌与传统激光加工的对比图<sup>[89]</sup>。图 1.25 是两种加工技术加工印刷模板的效果对比。由这两图可以看出,与传统激光加工相比,水射流引导激光加工的加工表面干净,没有熔渣堆积,无热影响区。图 1.26 是 SYNOVA 公司研制的水射流引导激光加工设备。



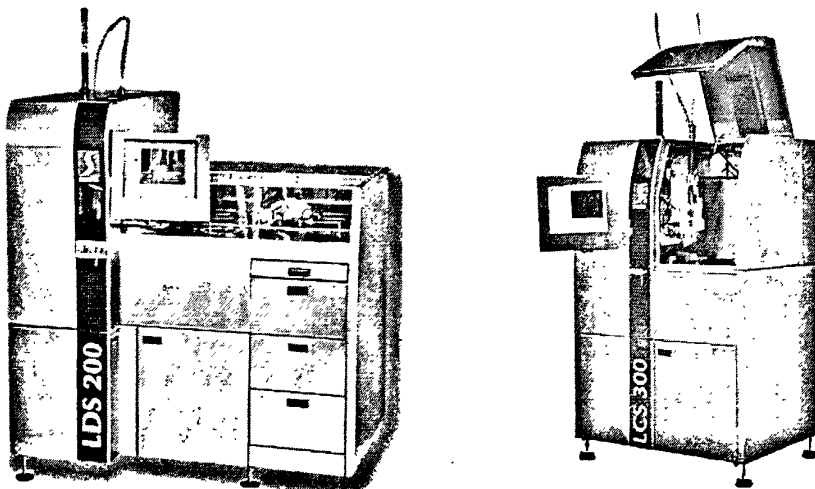
(a) 传统激光加工 (切缝: 0.15mm)      (b) 水射流引导激光加工 (切缝: 0.085mm)

图 1.24 传统激光加工与水射流引导激光加工对硅片切割的比较<sup>[89]</sup>



(a) 传统激光加工      (b) 水射流引导激光加工

图 1.25 传统激光加工与水射流引导激光加工对印刷模板打孔的比较<sup>[89]</sup>



(a) LDS-激光划片系统      (b) LCS-激光切割系统

图 1.26 SYNOVA 公司研制的水射流引导激光加工设备<sup>[103]</sup>

另外, 美国 Southern Methodist 大学机械工程系 R.Kovacevic 等人对水射流引导激光加工技术进行了理论研究, 建立了数学模型, 并通过硅片切槽试验进行了验证<sup>[104]</sup>。

在国内, 哈尔滨工业大学、厦门大学、西华大学等单位<sup>[105-110]</sup>对水射流引导激光加工进行了研究。哈尔滨工业大学机械制造及其自动化系王扬教授等对会聚激光与水束的耦合技术进行了深入研究, 研制了新型的耦合装置和特殊的对准系统, 利用 Lumonics JK702 Nd:YAG 固体脉冲式激光器对硅基晶片进行了水射流引导激光切槽的研究, 结果显示, 切缝加工质量优于空气中激光加工, 几乎无热影响区和微裂纹。厦门大学物理与机电工程学院叶瑞芳等利用轴棱锥产生的无衍射光束具有中心光斑直径小且传播距离远的特性, 设计了一种用轴棱锥替代聚焦透镜的新型水引导激光耦合系统。该系统是基于现有的水引导激光原理, 利用无衍射光束的特性, 扩大了激光与水束的耦合区域, 降低了耦合精密度要求。西华大学机械工程与自动化学院的蔡黎明等人对直径  $125\mu\text{m}$  的砷化镓晶片进行了水射流引导激光切割加工研究, 结果显示晶圆表面基本无碎片、毛刺产生, 较传统的加工方式具有不可比拟的优势。

目前, 水射流引导激光加工技术最主要的应用是在微电子工业中对半导体材料的切割、打孔, 还没有见诸在航空制造工业的金属材料加工中得到应用的报道。

### 1.2.8 超声辅助激光加工

香港理工大学 Yue T.M.等提出了超声辅助激光加工方法, 在激光加工的同时对工件施加超声振动, 可以有效排除金属熔化物, 从而减少再铸层, 图 1.27 是加工装置示意图<sup>[111]</sup>。研究人员对利用 120W 的 Nd:YAG 脉冲激光对铝基复合材料进行了打孔研究, 超声振动频率 20KHz。结果表明, 与传统激光相比, 超声辅助激光加工可以去除再铸层 30~80%, 加工的孔深增加 20%<sup>[112]</sup>。图 1.28 比较了超声辅助激光打孔与传统激光打孔的截面。但是, 超声辅助激光加工由于加工中对零件施加了高频率的振动, 容易对零件、特别是对硬脆材料零件、如陶瓷类零件造成疲劳损伤, 因此, 该加工方法还未能能在工程中广泛应用。

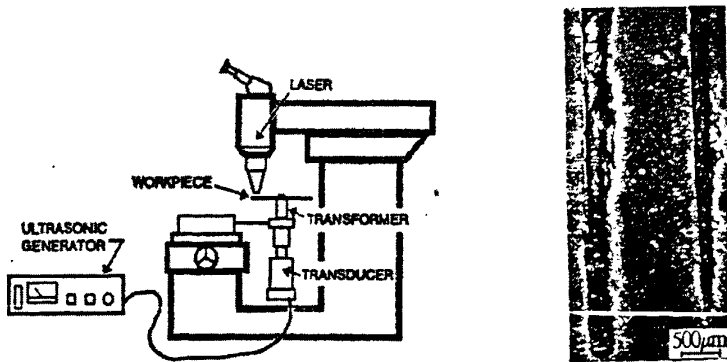


图 1.27 超声辅助激光加工装置示意图<sup>[111]</sup> 图 1.28 激光打孔截面<sup>[111]</sup> (左: 超声; 右: 无超声)

### 1.3 小孔电解加工技术及其发展现状

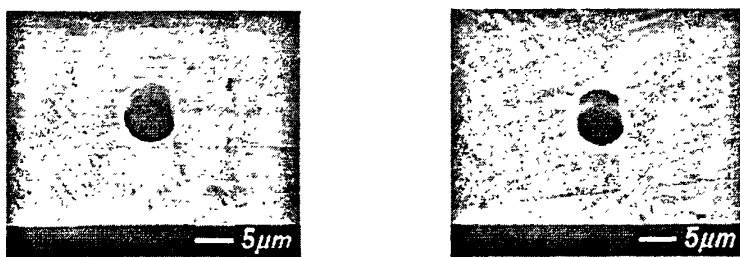
传统的小孔电解加工方法是成型金属管电解，其加工原理是直接由金属工具阴极穿入工件而使之按其形状阳极溶解成形<sup>[47]</sup>。成型金属管电解打孔一般存在杂散腐蚀现象，加工定域性差且加工精度低，加工中工具阴极与工件之间容易发生短路而烧伤工件，另外电解液一般是具有腐蚀性的电解质水溶液，对加工环境、加工零件会产生污染、腐蚀等作用。针对这些缺陷，各国的研究人员进行了电解加工工艺技术的深入研究，创新出了一些新颖的电解加工方法。如脉冲电流电解加工<sup>[113-125]</sup>、电液束加工<sup>[126-136]</sup>、光刻电解加工<sup>[137-143]</sup>、超纯水电解加工<sup>[144-150]</sup>、激光辅助电解加工<sup>[151-159]</sup>等方法。

#### 1.3.1 脉冲电流电解加工

脉冲电流电解加工的基本原理就是以周期间隙供电代替传统的连续供电使工件阳极在电解液中发生周期断续的电化学阳极溶解<sup>[46]</sup>。研究发现，采用高频窄脉冲电源进行电解加工，在电化学、电场、流场诸方面均显著改善了电解加工间隙的物理、化学特性，其结果均导致阳极溶解集中蚀除能力的进一步提高，允许的可加工间隙进一步缩小，平稳间隙均匀化，从而有利于提高电解加工精度和改善表面质量<sup>[46,113-116]</sup>。

近年来，随着电子技术的发展，纳秒级脉冲电源得以实现，进一步促进了超短脉冲电流电解加工在打孔方面的应用研究。2000年，德国弗里茨·哈尔贝尔研究所 Rolf Schuster 等人采用纳秒级超短脉冲电流技术使得电化学反应定域性获得突变性提高，研究者还建立了描述双电层效应的等效模型，对出现的定域性增强现象进行了初步的理论分析，相应的成果在国际顶级期刊 Science 上发表<sup>[117]</sup>。其后，各国研究人员对纳秒脉冲电流电解加工进行了更深入的研究。

韩国汉城国立大学 Se Hyun Ahn<sup>[118]</sup>等研究了利用纳秒级脉冲电源进行电化学微细打孔研究。该研究机构采用直径  $6\mu\text{m}$  的铂电极在不锈钢薄片上加工出直径  $8\mu\text{m}$  厚  $20\mu\text{m}$  的微细孔(图 1.29)，脉冲电源的电压是  $4.2\text{V}$ ，脉宽  $21\text{ns}$ ，脉间  $2\mu\text{s}$ 。可以看到纳秒脉冲电解加工的孔的入口没有杂散腐蚀，加工精度高，锥度极小。



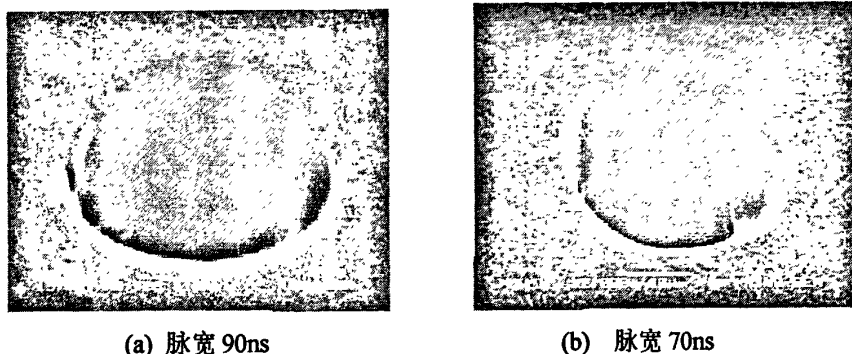
(a) 入口直径  $8\mu\text{m}$

(b) 出口直径  $7.3\mu\text{m}$

图 1.29 纳秒脉冲电解加工的微细孔<sup>[118]</sup>

在国内，南京航空航天大学在朱荻教授带领下，建立了微细电解加工平台系统，对纳秒脉

冲电流电解加工进行了深入研究, 实现了工具电极和工件微细结构的连续加工, 进行了微孔、微槽、微细直写加工<sup>[119-125]</sup>。图 1.30 是选用 3.5V 的脉冲电压幅值, 2MHz 的脉冲频率, 不同脉宽加工出的微孔照片, 工件是厚度 80 $\mu\text{m}$  的镍片。研究结果显示: 加工孔径随着脉冲宽度的缩短而逐渐减小, 孔周围基本无杂散腐蚀。由此证明了纳秒脉冲电流电解加工在提高电化学反应定域性方面的显著特点。



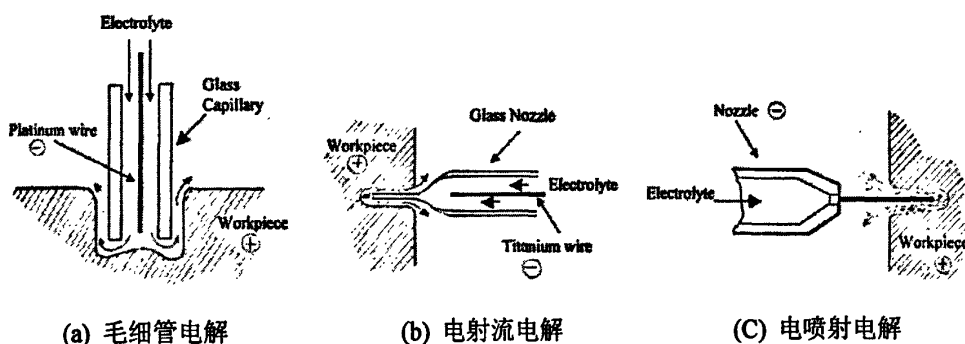
(a) 脉宽 90ns

(b) 脉宽 70ns

图 1.30 不同纳秒脉冲参数电解加工的微孔<sup>[125]</sup>

### 1.3.2 电液束加工技术

电液束加工包括毛细管电解(CD, Capillary Drilling)、电射流电解(ESD, Electro Stream Drilling)、电喷射电解(JED, Jet Electrolytic Drilling)三种不同的加工形式<sup>[47, 126-128]</sup>, 如图 1.31 所示。其加工原理是: 金属阴极仅对电解液束辉光充负电, 使之起工具阴极的作用, 打入工件而使工件按电解液束的形状阳极溶解和化学腐蚀的双重作用而成形<sup>[47]</sup>。



(a) 毛细管电解

(b) 电射流电解

(c) 电喷射电解

图 1.31 电液束加工技术<sup>[126]</sup>

电液束加工具有加工表面完整性好和深径比大等特点, 可以加工其它工艺难以加工的, 即位置特殊、表面质量要求高、无再铸层深小孔, 因此用于加工航空工业中的各种小孔结构, 可满足高质量发动机的需要, 对航空发动机的延寿、性能提高具有重要意义。

与传统电解加工不同, 电液束加工用的电源是高压电源, 其电压高达 300~1000V, 但总电流不大, 一般不高于 4A, 而其电流密度可高达数百安培每平方厘米。电解液一般采用酸性电解

液，常用浓度 10% 左右的  $H_2SO_4$  或者  $HCl$  水溶液。

意大利博洛尼亚大学和都灵理工大学的学者<sup>[129]</sup>在 1981 年对三种不同形式的电液束加工进行了基础研究，主要包括加工电压与电流的关系以及工具孔径与加工孔径之间的比例关系。

印度理工学院的学者 Mohan Sen 重点对电射流电解加工进行了试验研究<sup>[130]</sup>。工具电极是石英玻璃管，其毛细段长度为 25mm、直径仅为 0.36mm，电解液是  $NaNO_3$  和  $H_2SO_4$  的混合水溶液。图 1.32 是在镍基高温合金 263A 材料加工出的小孔，由图可以看出在入口周围仍存在杂散腐蚀和过切现象。另外该学者还利用神经网络和遗传算法对电射流电解加工的加工工艺参数进行了优化分析并通过试验验证<sup>[131]</sup>。

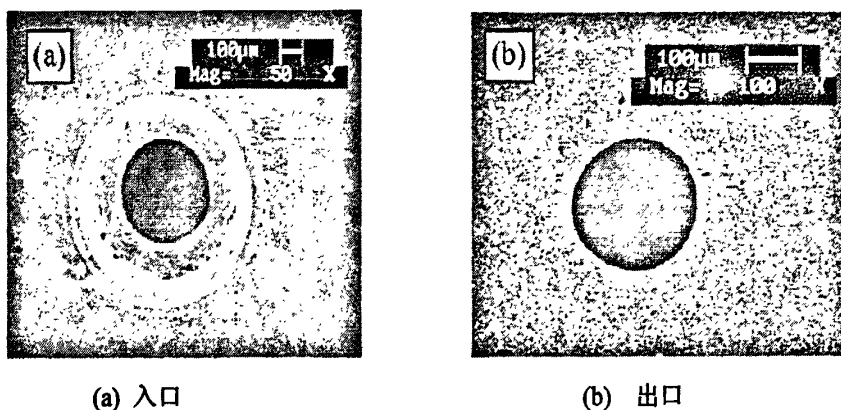


图 1.32 镍基合金材料 263A 电射流电解打孔形貌图<sup>[130]</sup>

东京农工大学的学者 Wataru Natsu 等重点对喷射电解加工技术进行了群坑和微槽加工研究<sup>[132]</sup> (图 1.33)。使用的加工电压为 120V，电解液是 20% 的  $NaNO_3$  水溶液，喷嘴直径为 0.46mm，工件材料为 304 不锈钢。

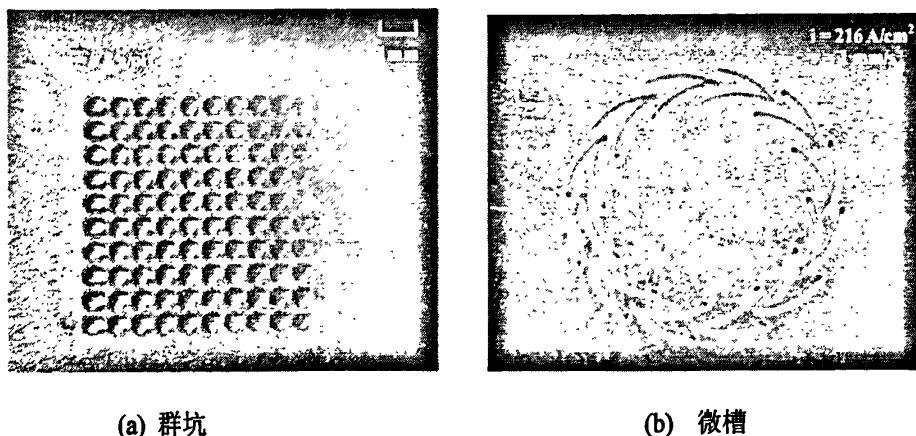
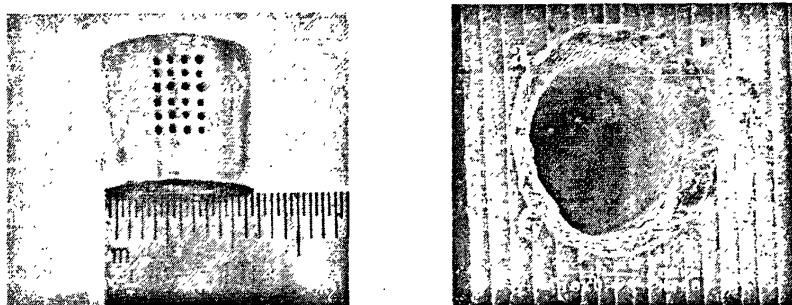


图 1.33 喷射电解加工的群坑和微槽<sup>[132]</sup>

香港理工大学机械工程系利用电喷射电解加工技术在直径 12mm 的  $Ti6Al4V$  材料圆柱面上进行了打孔研究<sup>[133]</sup>。金属喷嘴孔径 300 $\mu m$ ，加工电压 200V，平均电流 45mA。加工结果如图 1.34 所示。由图可以看出，孔的入口仍然存在杂散腐蚀现象并且存在明显的锥度。



(a) 群孔

(b) 单孔

图 1.34 钛合金圆柱面上电喷射电解加工的群孔<sup>[133]</sup>

北京航空工艺研究所<sup>[134-135]</sup>在 90 年代初为解决新机叶片上难加工特殊位置的干涉腮孔、横向椭圆连通孔结构的加工难题,对电射流打孔工艺展开了试验研究,并制造了加工设备,研制了各种玻璃管电极,对各种金属材料 and 高温合金材料进行了电射流加工工艺试验,为新机研制解决了实际难题。另外西安工业大学的李福援教授<sup>[136]</sup>在其研制的磨料水射流装置上进行必要改造,开展了脉冲电射流小孔加工的试验研究,对影响小孔加工质量的各项参数进行了初步试验,研究表明加工间隙为 1mm 时加工的孔的形状精度较高,喷嘴内径直接影响所加工孔径的大小。

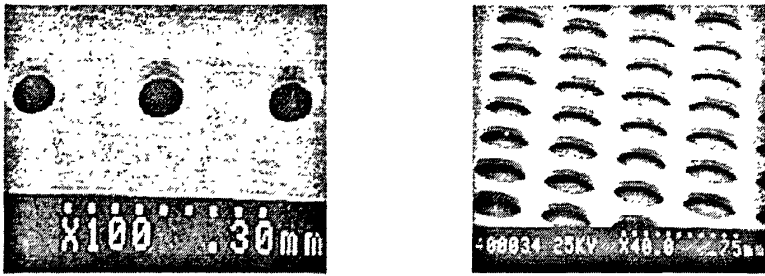
### 1.3.3 光刻电解加工技术

光刻电解加工技术是为了克服电解加工过程中的杂散腐蚀并获得更高的加工精度,将光刻技术与电解加工相结合形成的一种新型电解加工技术。该加工技术的原理是在工件表面(单面或双面)涂敷一层光刻胶,经过光刻显影后,工件上形成具有一定图案的裸露表面,然后通过束流电解加工或浸液电解加工,选择性地溶解未被光刻胶保护的裸露部分,最终加工出所需形状的工件<sup>[137-143]</sup>。

美国 IBM T. J. Watson Research Center 对光刻电解加工技术进行了深入研究<sup>[137-140]</sup>。研究发现光刻电解加工中,光刻胶膜的厚度、加工电源的参数设置、电解液的配方及相关参数的选择等,对加工速度、形状精度、表面质量都有着重要的影响。光刻胶厚度越薄,侧向腐蚀现象越严重,且胶膜易脱落,影响加工结果的形状精度;而光刻胶厚度过大,使工具阴极与工件之间的加工间隙过大,增加了反应的难度,使得电解液难以接触到加工表面,不利于反应的继续进行。另外,光刻胶开口角度对成形过程也有较大的影响:在加工起始阶段,阳极表面电流分布对光刻胶开口角度非常敏感,边界处电流强于中心处。然而,随着加工过程的进行,型腔成形引起沿着电极表面电流的重新分布,边界处电流特性逐渐趋向和中心处一样,表明中间的材料已经完全蚀除。为了提高加工精度,该研究中心还开展了双面掩膜法光刻电解加工的研究,在工件两面都覆盖一层图案完全相同的掩模,从两边方向同时进行溶解。图 1.35(a)为采用单面掩膜法在厚度 25 $\mu\text{m}$  的不锈钢薄片上加工的微孔<sup>[138]</sup>,图 1.35(b)为采用双面掩膜法在厚度 125 $\mu\text{m}$



的不锈钢板上加工的群孔结构<sup>[140]</sup>。可以看出,利用单面掩膜法加工的微器件,侧面具有锥度;双面掩膜加工的孔侧壁垂直度更好,且表面质量很好。



(a) 单面掩模

(b) 双面掩模

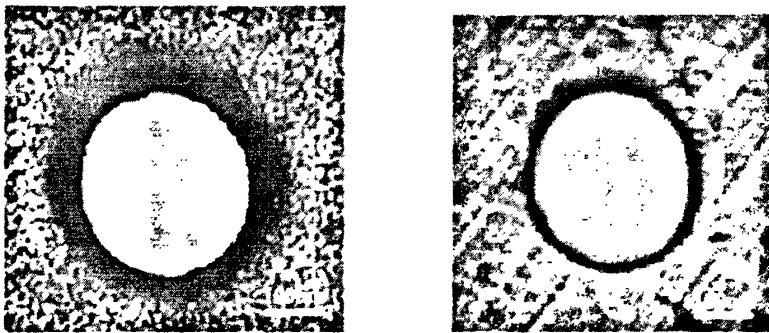
图 1.35 光刻电解加工出的微孔照片<sup>[138,140]</sup>

瑞士、韩国的学者们基于电场理论,针对光刻电解加工建立了二维数学模型,并进行了数值模拟和试验验证<sup>[141,142]</sup>。国内,西安工业大学范植坚教授对光刻胶掩膜微细电化学加工参数进行了试验分析研究<sup>[143]</sup>,研究表明:光刻胶的厚度直接影响加工间隙,胶膜越厚间隙越大,加工效率越低,胶膜越薄,侧向腐蚀越为严重;采用脉冲电源,提高频率,减小脉宽,有利于提高光刻电解加工的精度。

### 1.3.4 超纯水电解加工

超纯水电解加工方法率先由日本学者提出,其加工原理是在常规电解加工原理的基础上,利用超纯水作电解液,并采用强酸性阳离子交换膜来提高超纯水中  $\text{OH}^-$  离子的浓度,使电流密度达到足够去除材料<sup>[144]</sup>。

南京航空航天大学徐家文教授等针对超纯水电解加工进行了深入的理论和试验研究<sup>[145-149]</sup>。研究表明:超纯水在常温条件下离子浓度极低,不能用于电解加工去除材料,通过离子交换促进水解离来提高超纯水中离子浓度后,在实验中加工电流密度达到  $2.3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,已达到实用微细电解加工电流密度的范围,图 1.36 是利用超纯水电解加工在厚度  $100\mu\text{m}$  的不锈钢片上加工的孔的显微照片,由图看出在孔的入口、出口处都存在一圈明显的杂散腐蚀。另外,



(a) 入口

(b) 出口

图 1.36 超纯水电解加工孔的显微照片<sup>[147]</sup>

针对超纯水电解加工中工件表面钝化膜在低电流密度下难以去除以及电解产物不易排除的问题, 采用了对工件施加超声振动的办法, 利用电解液的振动冲击和“负压空化”效应来消除附着在工件表面的钝化膜, 同时改善加工区的状态, 解决微细电解加工过程中电解产物的排出问题, 从而提高加工效率和加工稳定性<sup>[150]</sup>。

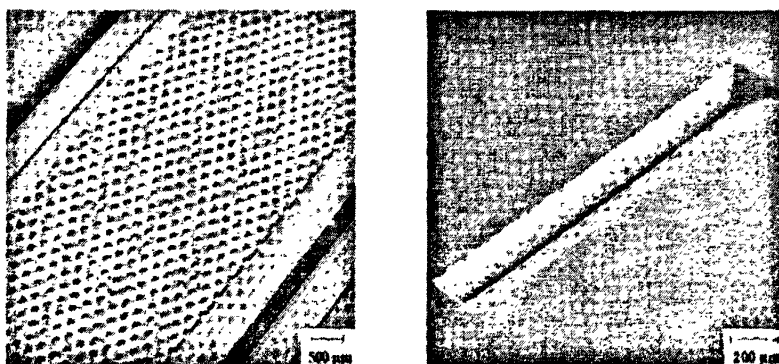
### 1.3.5 激光辅助电解加工

激光辅助电解加工是由美国 IBM 公司研究人员最早提出的新型加工方法, 并获得美国发明专利<sup>[151]</sup>。该加工方法的原理是利用激光聚焦在加工区的加热作用来提高电解加工的域性, 从而获得优质高效的加工效果。

美国 IBM T. J. Watson Research Center 的 M. Datta 等研究人员以氯化钠、硝酸钠溶液为电解液, 对镍和钢等材料进行了喷射微细电解和激光辅助喷射微细电解的比较试验研究<sup>[152]</sup>, 使用的激光器是波长位于绿光波段、平均功率 22W 的连续氩离子激光。结果表明: 激光有助于集中加工区域的电解作用, 有效去除钝化膜, 显著减少过切现象。

法国南锡化工学院 (CNRS) V. Lesuras 等学者以氯化钠为电解液, 利用平均功率 1W、频率 30Hz、波长为 532nm 的激光来辅助喷射电解蚀刻, 并采用不同尺寸的喷嘴, 对镍材料进行打孔试验<sup>[153]</sup>。试验结果表明: 该脉冲激光有利于提高孔的尺寸精度, 孔边缘更为光滑, 孔壁更为垂直; 但是脉冲激光对于加工效率没有明显的促进作用。

德国不来梅粒子束应用技术研究所 (Bremen Inst. of Appl. Beam Technol., Germany) Andreas Stephen 等学者利用最大功率 15W 的连续波 Nd:YAG 激光进行了激光诱导喷射液束电解加工试验<sup>[154-155]</sup>。图 1.37 是利用该技术在镍钛合金片上加工的群坑和 T 型槽。研究结果显示连续波激光有助于提高电解加工速度和加工质量。



(a) 群坑加工

(b) T 型槽加工

图 1.37 激光诱导喷射液束电解加工的微结构<sup>[155]</sup>

俄罗斯新西伯利亚工业大学 (Novosibirsk State Technical University) Igor Iv. Lyskov 教授也作了相似的研究<sup>[156]</sup>, 将激光辐照引入液束小孔加工, 并利用该技术成功加工了电子光学系统

中显像管和超声探伤标准件上的微小孔,加工精度达到 $1\sim 2\mu\text{m}$ ;加工表面无残余应力;表面粗糙度低于 $0.04\mu\text{m}$ 。

格拉斯哥苏格兰大学(Glasgow Caledonian University) P.T. Pajak 教授等利用平均功率 $345\text{mW}$ 的倍频调 Q Nd:YAG 激光进行了激光辅助喷射电解加工技术研究<sup>[157-159]</sup>,分别对镍基合金、钛合金、不锈钢和铝合金等材料进行了打孔和开槽试验。结果表明:由于激光能量高度集中,使得聚焦加工区域的温度比周围温度高 3 到 4 倍,从而提高了电解加工的定域性,减少甚至避免了杂散腐蚀,加工精度得到显著改善(孔的锥度减小 $38\%\sim 65\%$ ),材料去除率提高 $20\%\sim 54\%$ 。

## 1.4 课题来源及本文研究工作

### 1.4.1 课题来源及研究目的

本课题来源于国家自然科学基金“喷射液束电解—激光复合加工技术研究”(50675103)和南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金“喷射液束辅助激光加工基础研究”(BCXJ06-12)。另外本课题还受航空科学基金“精密微细小孔的激光脉冲电解射流复合加工技术研究”(重点实验室类:20080352008)、江苏省自然科学基金“微尺度脉冲电解射流加工技术基础研究”(BK2008394)的资助。

尺寸在 $0.25\text{mm}\sim 1.5\text{mm}$ 之间的型孔、深小孔等结构广泛存在于航空航天、武器装备、汽车、电子、船舶等产品中,其加工质量、精度、效率对产品的性能、质量和成本有很大影响。尤其在航空发动机制造中,涡轮叶片、导向器叶片等热端部件均具有数以万计的孔径在 $0.2\sim 0.8\text{mm}$ 之间的气膜冷却孔,目前其加工方法主要包括:电火花加工、激光加工、电液束加工<sup>[42]</sup>。电火花加工效率较低、电极制造成本高且存在电极损耗、加工表面一般都有变质层,加工过程中容易产生拉弧而烧伤工件。激光加工,其加工效率高、柔性好,易于实现加工过程自动化,并已在航空发动机生产中得到应用。但由于激光加工表面存在再铸层、微裂纹等缺陷,需要后续光整处理。电液束加工具有加工效率高、表面质量好、无再铸层和微裂纹、进出口无毛刺且加工可靠性高、不会发生火花短路等特点。但其存在工具玻璃管电解制作困难,在加工中易破损等缺点,并且加工速度远不及激光打孔。

针对上述情况,本课题在水射流引导激光加工、电液束加工技术以及激光辅助喷射电解加工的基础上提出了一项集成创新的复合加工技术,即喷射液束电解—激光复合加工技术。其加工原理如图 1.38 所示,是将电解加工与激光加工进行复合,以激光加工为主导作用快速去除材料,同时利用与激光束同轴喷射的电解液束对加工区的冷却、冲刷和电解的复合作用在线去除激光加工过程中产生的再铸层,从而获得优质高效的加工效果。

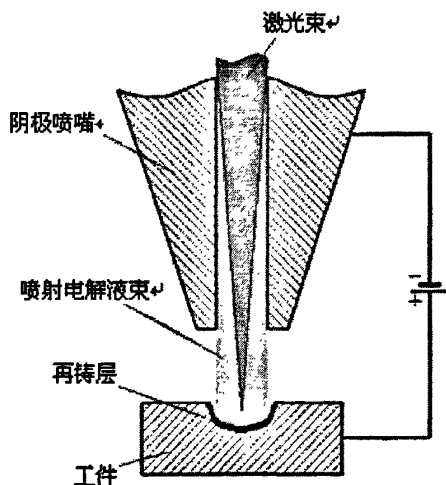


图 1.38 喷射液束电解—激光复合加工原理示意图

#### 1.4.2 本文研究内容

喷射液束电解—激光复合加工是一项加工技术的集成创新，该技术与传统的空气中激光加工不同，激光束需通过一定长度的电解液束聚焦于材料表面，加工周围的介质由空气变成了电解液，这一变化致使激光传输聚焦以及作用材料的机理发生了改变；该技术又将电解加工与激光加工进行复合，两种加工方法共同用于去除材料。上述的技术创新涉及了激光在电解液中的衰减特性、激光在电解液中作用金属靶材产生的力学效应、激光作用材料的热物理过程和喷射电解液束作用材料的电解过程之间的交互作用等一系列还有待研究的跨学科知识交叉点。因此，本文针对喷射液束电解—激光复合加工这一新型复合加工技术进行基础研究，主要包括：

1) 研究激光在电解液中的衰减特性。根据水溶液对激光的吸收、散射的理论分析，采用自行设计制造的装置研究激光在电解液中的衰减特性及电解液浓度和温度的影响，为设计喷射液束电解—激光复合加工试验系统提供重要的理论和试验依据。

2) 研究激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应。根据激光在液体中作用于金属靶材的力学效应的理论分析，基于压电加速度传感器测振原理，通过对电解液中悬臂梁不锈钢靶材在激光作用后的振动测试分析，研究电解液中激光作用靶材的力学效应，进而揭示激光热—力效应在喷射液束电解—激光复合加工机理中的作用。同时，该实验还用于标定透镜在电解液中的焦距偏移量从而获得最小聚焦光斑。

3) 加工试验系统的研制和完善。根据喷射液束电解—激光复合加工的特点以及激光在电解液中的衰减特性和力学效应的研究结果，研制适合喷射液束电解—激光复合加工的试验系统，并对关键部件——喷射装置进行分析和优化设计。

4) 研究喷射液束电解—激光复合加工机理。通过对激光加工热作用机理和电解加工电化作用机理的分析，基于温度场和电场理论，建立喷射液束电解—激光复合加工二维数学模型，

并通过计算机模拟和试验验证,揭示复合加工的作用机理,从理论上探讨该复合加工方法的可行性。

5) 加工试验研究。利用红外纳秒激光、绿光毫秒激光对不锈钢材料、镍基高温合金材料进行喷射液束电解—激光复合加工的试验研究,从试验角度研究喷射液束电解—激光复合加工的可行性并总结分析该加工方法的基本工艺规律。

## 第二章 激光在电解液中的衰减特性研究

喷射液束电解—激光复合加工过程中, 激光束通过电解液束聚焦于工件待加工区。由于电解液一般是中性钠盐水溶液, 其中的水分子、胶体以及悬浮不溶物对激光的吸收和散射作用使得激光在电解液中传输后能量衰减。另外电解液浓度、温度的变化也会直接影响激光在电解液中的衰减。因此, 本章将根据溶液对激光的吸收、散射的理论分析, 采用专门研制的实验装置, 研究激光在电解液中的衰减特性及电解液浓度和温度的影响。

### 2.1 溶液对激光吸收和散射的理论分析

激光在溶液中的能量衰减与溶液浑浊度有密切关系。溶液中含有各种杂质, 按照杂质在水中的存在状态可分为三类, 即溶解物、胶体和悬浮物。溶解杂质是指溶于水的一些分子和离子, 它们与水构成均匀体系, 溶解物微粒的尺度在 1nm 以下; 胶体微粒尺度较溶解物大, 约在 1nm 至 100nm 之间, 在水中相当稳定, 不会自然沉降; 悬浮物微粒尺度在 100nm 至 1mm 之间, 大微粒自然下沉, 小微粒悬浮在水中<sup>[160]</sup>。溶解杂质与水分子对激光以吸收作用为主, 而胶体杂质和悬浮物对激光的散射作用明显。

#### 2.2.1 溶液对激光的吸收

物质对光的吸收与光的波粒二象性有关。光一方面是一种电磁波, 具有波动性。描述波动性的重要参数是波长  $\lambda$ 、频率  $\nu$  和光速  $c$ , 它们的关系是:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2-1)$$

式中,  $\lambda$  是波长 (nm),  $\nu$  是辐射的频率 (Hz),  $c$  是光速 ( $3 \times 10^8$  km/s)。另一方面, 光是一种带有能量的微粒流, 这种微粒流叫光子。单个光子的能量  $E$  决定于光的频率或波长, 其关系是:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2-2)$$

式中,  $h$  是普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34}$  J·s), 从式 (2-2) 可知, 不同波长的光子, 其能量不同, 短波的能量大, 长波的能量小。

激光是具有同一波长的单色光, 即由具有相同能量的光子所组成。当激光照射到物质上时, 物质对激光的吸收的基本粒子是分子, 其吸收原理可由量子理论来解释, 即分子外层的电子受到激光辐照时, 吸收能量发生电子能级跃迁<sup>[161]</sup>。对于不同的分子, 由于其组成和结构不一样, 其外层电子以及能级差也不一样, 其从基态跃迁至激发态时所吸收的光子也不一样, 因此, 由

特定的分子组成的物质对激光的吸收具有选择性, 这导致不同波长的激光在相同溶液中的吸收特性具有很大差异。

溶液对光的吸收程度与该溶液层的厚度、吸光物质的浓度有关。朗伯 (Lambert) 和比尔 (Beer) 分别研究了光的吸收与溶液液层的厚度以及溶液的浓度的定量光系, 其定量关系式分别称为朗伯定律和比尔定律<sup>[161]</sup>。

朗伯定律是指当一束某一波长的单色光通过一定浓度的均匀溶液时, 溶液对光的吸收程度与液层的厚度成正比。该定律表达式是:

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha_x \cdot x] \quad (2-3)$$

式中  $I_0(\lambda)$  为传输前的激光初始辐照强度,  $I_x(\lambda)$  为在固定浓度的溶液中传输了  $x$  路程后的激光辐照强度,  $\alpha_x$  为比例常数, 表示激光在固定浓度溶液中传输 1m 距离后能量衰减的对数值 (自然对数), 单位是  $\text{m}^{-1}$ 。

比尔定律是指当一束波长一定的单色光通过液层厚度一定的、均匀的溶液时, 溶液对光的吸收程度与溶液的浓度成正比。该定律表达式是:

$$I_c(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha_c \cdot \Delta C] \quad (2-4)$$

式中  $I_0(\lambda)$  为在固定厚度的初始浓度溶液中传输后的激光辐照强度,  $I_c(\lambda)$  为在固定厚度的浓度变化后的溶液中传输后的激光辐照强度,  $\alpha_c$  为比例常数, 表示激光在固定厚度溶液中浓度变化  $\Delta C$  后能量衰减的对数值 (自然对数), 单位是  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

朗伯比尔定律是指如果同时考虑溶液的浓度和厚度对光的吸收的影响, 将朗伯定律和比尔定律合并, 浓度影响因子用  $\varphi_{AC}$  表示, 可得:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-(\alpha_x + \varphi_{AC} \cdot \Delta C) \cdot x] \quad (2-5)$$

对于纯水而言, 没有浓度的影响, 可直接利用朗伯定律, 公式 (2-3) 中的  $\alpha_x$  称为朗伯吸收系数 (Lambert absorption coefficient)。朗伯吸收系数与纯水的复数折射率有关, 纯水的实际折射率的复数形式为:

$$m(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad (2-6)$$

式中虚部  $k(\lambda)$  称为消光系数 (Extinction coefficients), 它与吸收系数的关系为<sup>[162]</sup>:

$$\alpha_x = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (2-7)$$

$\alpha_x$  的倒数称为吸收长度 (Absorption length), 可用字母 “ $L$ ” 表示。纯水针对不同波长的激光具有不同的消光系数, 即有不同的吸收长度。通过激光水下传输距离与吸收长度的比值可以方便计算出激光的能量损失, 随着该比值的增加, 激光能量被吸收的越多。如该比值为 0.01 时, 激光能量衰减 1%; 该比值为 0.223 时, 激光能量衰减 20%; 该比值增大到 1 时, 激光衰减增至 63.2%, 因此吸收长度表征了纯水对激光的吸收能力, 吸收长度越长, 纯水对激光的吸收越少。

上世纪 50~70 年代, 美国加州大学圣塔芭芭拉分校 Raymond C Smith、美国罗德岛大学 S.A.

Sullivan、法国里尔理工大学 Jacqueline Lenoble 等很多学者分别对 200nm~200 $\mu$ m 之间不同波段的光波在纯水中的光学常数进行了研究<sup>[163-165]</sup>。1973 年, 美国密苏里州大学堪萨斯分校的学者 George M. Hale 和 Marvin.R. Queery 对这些研究结果进行了系统总结, 详细列出了纯水对于波长在 200nm~200 $\mu$ m 的光波的消光系数表<sup>[166]</sup>。爱沙尼亚塔林工业大学 Arvi Kruusing 利用这些消光系数的原始数据通过公式 (2-7) 计算出了不同波长激光在纯水中的吸收长度, 并以此制作了吸收光谱图<sup>[75]</sup>, 如图 2.1 所示。由图可以看出, 波长在 450nm~570nm 的蓝绿激光在纯水中的吸收长度最长, 达到 10m 以上, 因此蓝绿激光在水中的吸收系数最小, 能量衰减最弱。加州大学圣地亚哥分校、德克萨斯农工大学、澳大利亚西澳大学、荷兰代尔夫特工业大学等高校的学者们对纯水的光学特性和吸收光谱的研究也得到了同样的结论<sup>[167-171]</sup>。另外, 由图 2.1 可以看出 Nd:YAG 固体激光器的 1064nm 红外激光在纯水中的吸收长度在 10mm 数量级, 而 CO<sub>2</sub> 气体激光器的 10.6 $\mu$ m 的远红外激光在纯水中的吸收长度仅有 10 $\mu$ m 数量级。

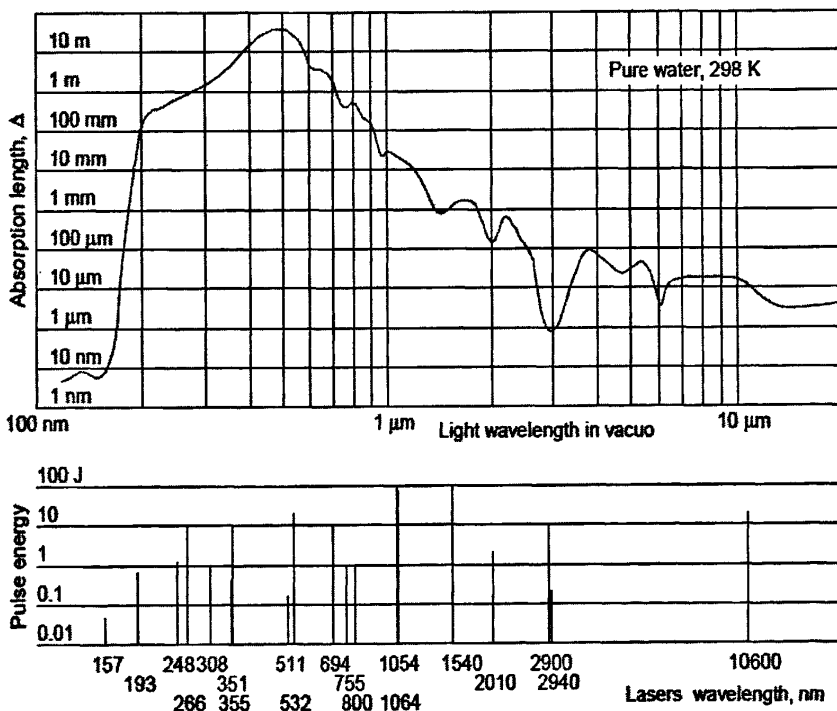


图 2.1 不同波长的激光在纯水中的吸收光谱图<sup>[75]</sup>

## 2.2.2 溶液对激光的散射

物质对光波的散射同样与光的波粒二象性有关, 与吸收不同的是光的散射可由光的波动理论来解释。当一束光通过介质时, 其中一部分光偏离主要的传播方向, 这种现象称为光散射。如果介质是均匀的且透明的, 则从侧面看不到光线。如果介质是不均匀的, 例如高聚物稀溶液、溶胶、悬浮液等, 就可以从侧面看到一道清晰的光径。这种光散射现象的本质是光波的电磁场



与介质中的粒子相互作用的结果<sup>[172]</sup>。当光波射入介质时,在光波电场作用下,粒子产生诱导激化,并以一定的频率作强迫运动,形成振动的偶极子。这些振动的偶极子就成为二次波源,向各个方向发射出电磁波。在纯净的均匀介质中,这些二次波源产生的次波相互干涉的结果,使光线只能在折射方向上传播,而在其他方向上则相互抵消,所以没有散射光出现。但均匀介质中掺入进行着布朗运动的微粒后,就会破坏次波的相关性,而在其他方向上出现散射光。

溶液中存在的微粒的直径范围很宽,从  $10^{-10}\text{m}$  到  $10^{-6}\text{m}$ ,涉及到几个数量级。根据微粒直径的不同,可以分为瑞利 (Rayleigh) 散射和米氏 (Mie) 散射。引入微粒粒径相对入射激光波长的无量纲参数  $q$  ( $q = 2\pi R/\lambda$ ) 来表示微粒的大小。当该值小于 0.3 时激光散射属于瑞利 (Rayleigh) 散射,该值大于 0.3 时,属于米氏 (Mie) 散射。

1871 年 Rayleigh 详细地研究了光散射现象后指出,散射光强度与入射光强度、单位体积内的微粒数目及微粒的体积平方成正比,而与散射光波长的四次方成反比,这就是著名的 Rayleigh 定律<sup>[173]</sup>:

$$\beta_r(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \left( \frac{6 + 3P_n}{6 - 7P_n} \right) \quad (2-8)$$

式中  $\beta_r(\lambda)$  为瑞利散射系数,  $n$  为溶液的折射率,  $N$  为单位体积溶液的微粒数,  $\lambda$  为激光波长,  $P_n$  为散射退偏振因子。

1908 年, Mie 用球形质点为模型详细计算了电磁波的散射,并证明只有当  $2\pi R/\lambda < 0.3$  时 ( $R$  为球体半径,  $\lambda$  为入射光波长), Rayleigh 的  $\lambda^4$  反比定律才是正确的;当  $2\pi r/\lambda$  值较大时,散射强度与波长的依赖关系就不明显。米氏散射系数表达式如下<sup>[174]</sup>:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{N\lambda^2}{4\pi^2} \left( \frac{i_1(\theta) + i_2(\theta)}{2} \right) \quad (2-9)$$

式中,  $\beta_m(\lambda)$  为米氏散射系数,  $\theta$  为散射角,  $i_1(\theta)$ 、 $i_2(\theta)$  为米氏强度分布系数:

$$i_1(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n\pi_n + b_n\tau_n) \right|^2 \quad (2-10)$$

$$i_2(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n\tau_n + b_n\pi_n) \right|^2 \quad (2-11)$$

其中,  $a_n$  和  $b_n$  为米氏系数,是微粒折射率与  $m$  及粒径参数  $q$  的函数,可以用半奇阶的第一类柱贝塞尔函数和第二类柱汉克尔函数表示;  $\pi_n$  和  $\tau_n$  为角度系数,可以用  $\cos\theta$  为参数的勒让德和一阶缔合勒让德函数表示。

### 2.2.3 激光在电解液中衰减的理论分析

通过上述关于溶液对激光的吸收和散射的理论分析,可以知道溶液对激光的吸收与散射是激光波粒二象性的表现,不管是吸收作用还是散射作用都是从微观角度,取决于溶液所含的各种微粒的数目和大小,而与溶液宏观状态没有直接关系。在本文的研究中,激光是通过一定流速的稳定而连续的电解液,因此本文以静态电解液代替实际宏观动态的电解液,来研究激光在电解液中的衰减特性,研究结果同样适用于宏观动态的电解液。

本文所研究的“喷射液束电解—激光复合加工技术”所采用的电解液是中性钠盐溶液,由于溶剂中除了钠盐以外含有其他杂质导致电解液成为非均匀介质。激光在电解液中传输时,由于溶解杂质、水分子的吸收和悬浮微粒的散射使激光能量衰减,衰减的程度与入射激光的波长密切相关,其衰减规律也遵从朗伯比尔定律:

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\mu(\lambda)x] \quad (2-12)$$

式中,  $I_0(\lambda)$  为传输前的激光初始辐照度,  $I_x(\lambda)$  为在液体中传输了  $x$  路程后的激光辐照强度,  $\mu(\lambda)$  为光束衰减系数,表示激光传输 1m 距离后能量衰减的对数值(自然对数),单位是  $\text{m}^{-1}$ 。光束衰减系数  $\mu(\lambda)$ 、吸收系数  $\alpha(\lambda)$  和散射系数  $\beta(\lambda)$  之间的关系为:

$$\mu(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda) \quad (2-13)$$

其中,散射系数  $\beta(\lambda)$  是瑞利散射系数  $\beta_r(\lambda)$  与米氏散射系数  $\beta_m(\lambda)$  的和。

考虑浓度和温度对激光在电解液中衰减的影响,引入浓度影响因子  $\Psi_c$  和温度影响因子  $\Psi_T$ , 则公式 (2-12) 演变为:

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\{-[\mu(\lambda) + \Psi_c(C - C_0) + \Psi_T(T - T_0)]x\} \quad (2-14)$$

由于光散射理论模型是建立在散射粒子是球形的,且各向同性的理想状态,而工程中的散射体,比如本文讨论的含有杂质的电解液,不能简单地视同为理想的化学分析溶液。因此,从工程应用的角度,需要通过实验测试来确定激光在不同成分、不同浓度、不同温度的电解液中的衰减系数,为实际工程应用提供依据。

## 2.2 激光在电解液中的衰减特性实验测试研究

### 2.2.1 实验装置及实验溶液配制

实验装置见图 2.2,采用的激光器分别为长春光机所生产的连续波半导体泵浦绿光激光器 ( $\lambda=532\text{nm}$ ) 和天津拓普仪器有限公司生产的 XGL-1 型脉冲 Nd: YAG 激光器;采用的测试设备包括美国 THORLABS 公司生产的 PM100 型激光功率计(精度: 0.01mW) 和北京光电技术研究所生产的 145C 型激光能量计(精度: 0.1mJ);样本溶液玻璃槽中放入电解液,利用恒温加热器加热控制溶液温度。激光能量计和功率计分别用以测量脉冲红外激光和连续波绿光激光在溶液中传输后的能量值。样本槽选用宜兴晶科光学仪器有限公司生产的石英玻璃制作,单层

厚度为 2mm, 该玻璃对于波长在 300nm~2000nm 波段的激光的透射率在 90%以上。

实验电解液包括  $\text{NaNO}_3$  和  $\text{NaCl}$  溶液。溶剂采用工业纯水, 溶质包括分析纯试剂 (Analytic Reagent, AR) 和工业试剂 (Industrial Reagent, IR), 分别为分析纯氯化钠 (GB1266-86)、分析纯硝酸钠 (GB636-92)、工业硝酸钠 (GBT4553-2002) 以及工业氯化钠 (QB2238.2-2005), 主要成分见表 2.1。浓度 (Concentration, C) 从低到高按 2%、8%、14%、20% 配制。

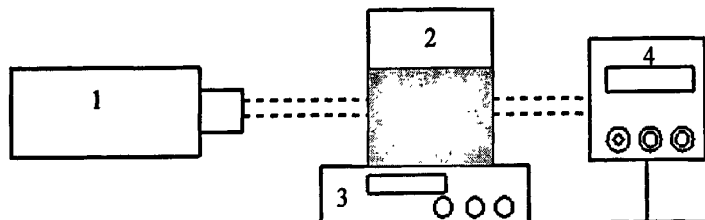


图 2.2 激光在电解液中衰减特性测试实验装置示意图

1. 激光器; 2. 样本溶液玻璃槽 (125×64×160); 3. 恒温加热器; 4. 激光功率计或能量计

表 2.1 激光衰减实验样本钠盐溶剂成分<sup>[175-176]</sup>

分析纯氯化钠 (GB1266-86)		分析纯硝酸钠 (GB636-92)	
成分	指标 (wt %)	成分	指标 (wt %)
NaCl	≥ 99.5	$\text{NaNO}_3$	≥ 99.0
水不溶物	≤ 0.005	水不溶物	≤ 0.004
碘化物 (I)	≤ 0.002	碘酸盐 ( $\text{IO}_3$ )	≤ 0.0005
硫酸盐 ( $\text{SO}_4$ )	≤ 0.002	硫酸盐 ( $\text{SO}_4$ )	≤ 0.003
磷酸盐 ( $\text{PO}_4$ )	≤ 0.001	磷酸盐 ( $\text{PO}_4$ )	≤ 0.0005
钾 (K)	≤ 0.02	钾 (K)	≤ 0.005
钙 (Ca)	≤ 0.005	钙 (Ca)	≤ 0.005
铁 (Fe)	≤ 0.0002	铁 (Fe)	≤ 0.0001
重金属 (以 Pb 计)	≤ 0.0005	重金属 (以 Pb 计)	≤ 0.0005
溴化物 (Br)	0.01	氨 ( $\text{NH}_4$ )	≤ 0.002
工业氯化钠 (QB2238.2-2005)		工业硝酸钠 (GBT4553-2002)	
成分	指标 (wt %)	成分	指标 (wt %)
NaCl	≥ 98.5	$\text{NaNO}_3$	≥ 99.3
水不溶物	≤ 0.01	水不溶物	≤ 0.06
锌 (Zn)	0.00011~0.00014	氯化物	≤ 0.3
碘 (I)	0.00002~0.00005	亚硝酸钠 ( $\text{NaNO}_2$ )	≤ 0.02
铅 (Pb)	0.000002	碳酸钠 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	≤ 0.1
砷 (As)	0.0000005	铁 (Fe)	≤ 0.005

## 2.2.2 实验测试方法

由实验装置可知,测试过程中激光束的传输路径如下:空气 → 石英玻璃(样本槽前壁) → 样本溶液 → 石英玻璃(样本槽后壁) → 空气 → 测试设备,在传输过程中依次存在空气/玻璃、玻璃/溶液、溶液/玻璃、玻璃/空气等界面。激光在上述界面上产生的反射都会对激光能量的测试结果有影响。为消除这些影响,本文在测试中通过 90 度转动样本玻璃槽,来分别测量沿玻璃槽长度方向(121mm)和宽度方向(60mm)的激光传输后的能量,这两种方向上激光束的传输路径除了玻璃槽内的溶液厚度不同以外,其他传输条件相同,因此可以将这两种条件下激光能量测试结果之间的差异的原因归结为样本溶液厚度差(61mm)。用  $x_1$ 、 $x_2$  分别表示玻璃槽长度方向和宽度方向上激光在样本溶液中传输的距离,  $I_1(\lambda)$ 、 $I_2(\lambda)$  分别表示在初始能量相同的情况下,激光在长度方向和宽度方向上通过样本溶液玻璃槽后的测试能量,根据公式(2-12)可以推导出:

$$I_1(\lambda) = I_2(\lambda) \exp[-\mu(\lambda)(x_1 - x_2)] \quad (2-15)$$

将两种不同条件下的测试结果代入公式(2-15)可以得到不同波长的激光在溶液中的衰减系数。

由上一节的内容可知,国际上就纯水对激光的吸收特性已经研究了几十年,得到了一致的结论。因此,选用工业纯水作为样本溶液,通过绿光激光和红外激光在纯水中的衰减特性的测试与国际公认标准值的比较,来验证上述测试方法的可行性。

表 2.2 比较了纯水对两种波长激光(532nm、1064nm)的吸收系数的实验测试值与国际标准值。由表可以看出,实验测试值与国际标准值非常接近,偏差小于 1.5%。由此可以认为本文采用的激光在电解液中衰减特性的测试方法是可行的,满足本文工程实际的要求。

表 2.2 纯水对激光的吸收系数实验测试值与国际标准值的比较

激光波长 (nm)	吸收系数国际标准值 ( $\text{m}^{-1}$ )	吸收系数实验测试值 ( $\text{m}^{-1}$ )	偏差 (%)
532	0.0355	0.036	+1.42
1064	34.2438	34.757	+1.49

## 2.2.3 实验结果与分析

基于实验装置,利用上述测试方法,对 532nm 的绿光激光和 1064nm 的红外激光在不同成分、不同浓度、不同温度下的电解液中的衰减特性进行了测试实验。

### 2.2.3.1 电解液浓度对激光衰减特性的影响

绿光激光在不同浓度的工业钠盐电解液中传输 121mm 的光路照片如图 2.3 所示,随着电解液浓度的增加,光路越来越亮,光路直径逐渐增大且边界不清,即电解液对激光的散射作用越发明显。通过对图 2.3 (a) 与图 2.3 (b) 的比较还可以看出,工业  $\text{NaNO}_3$  电解液对激光的散射

作用强于工业 NaCl 电解液，尤其是高浓度的 NaNO<sub>3</sub> 溶液（20%以上），激光在其中传输距离 121mm 后，几近完全散射而能量也近乎衰竭。

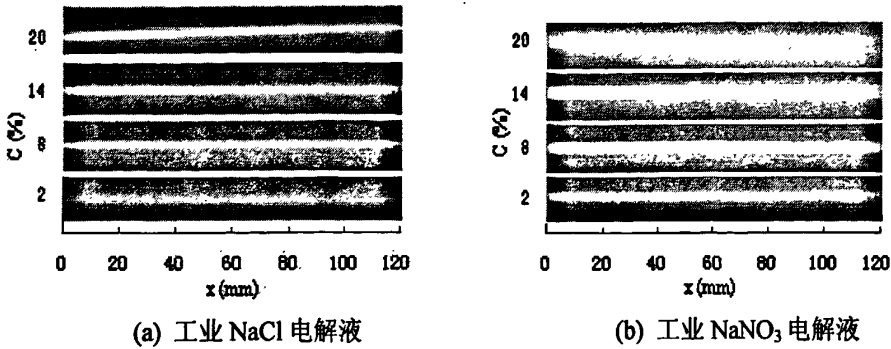


图 2.3 绿光激光 (532nm) 在电解液中的光路

图 2.4、图 2.5 分别显示的是绿光激光和红外激光在室温 (25℃) 下电解液中的衰减系数，图中 AR 表示分析纯试剂配置的电解液；IR 表示工业试剂配置的电解液。图中每个数据点的原始数据，均重复测量三次后取其平均值。根据文献[75]可知，纯水对激光的衰减作用主要是吸收，532nm 绿光激光、1064nm 红外激光在纯水中的吸收系数分别为 0.0355, 34.2438。与纯水相比，从图 2.4~2.5 可以看出：

1) 钠盐电解液对两种波长激光的衰减系数都大于纯水的吸收系数，其原因可解释为除了电解液中水分子的吸收外还包括：直径尺度在 0.1nm 的离子的吸收和瑞利散射；直径尺度 100nm

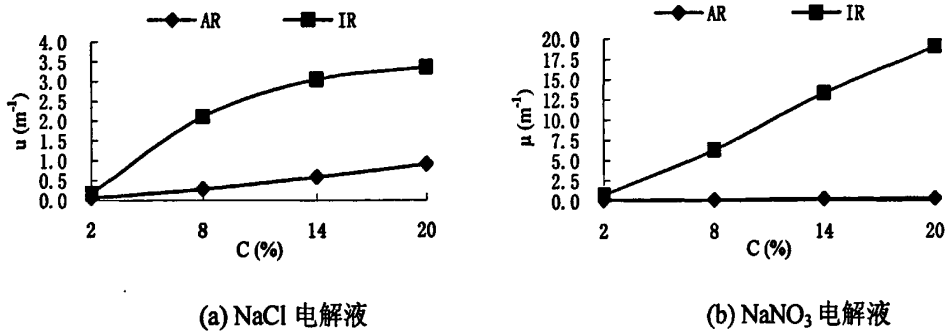


图 2.4 绿光激光 (532nm) 在电解液中的衰减系数

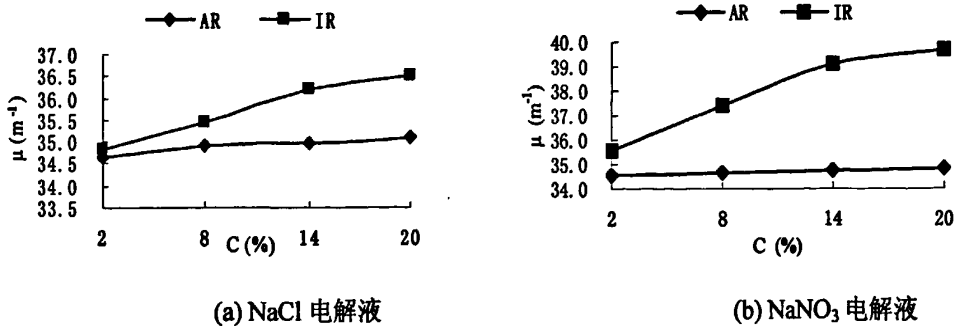


图 2.5 红外激光 (1064nm) 在电解液中的衰减系数

以下的胶体微粒的瑞利散射；直径尺度在 100nm 以上的悬浮微粒的米氏散射以及残存微小气泡的散射。其中水不溶物形成的悬浮微粒的米氏散射是促使衰减系数增加的主要原因。

2) 激光在分析纯试剂配置的电解液中的衰减与在纯水中的衰减相当，电解液浓度对激光衰减影响微弱；激光在工业试剂配置的电解液的衰减与纯水相比更为明显，溶液浓度对激光衰减的影响基本呈线性关系。这一现象与钠盐溶剂的纯度以及所含水不溶物有关，由表 2.1 可知：工业  $\text{NaNO}_3$ 、工业  $\text{NaCl}$ 、分析纯  $\text{NaNO}_3$ 、分析纯  $\text{NaCl}$  的含盐纯度分别为：99.3%、98.5%、99.0%、99.5%；它们的水不溶物最高含量分别为：0.06%、0.01%、0.004%、0.005%。由于分析纯钠盐纯度高，杂质少，水不溶物含量低，因此配置的溶液透明度高，均匀性好，对激光的衰减与纯水相当。工业钠盐杂质多，水不溶物含量较高，配置的溶液中存在胶体微粒、悬浮微粒，溶液浑浊度高，对激光的散射作用导致衰减系数随浓度线性增加。

3) 与纯水相似，绿光激光在分析纯电解液中的衰减系数不到红外激光的 3%，而绿光在工业电解液中的衰减系数也是远低于红外激光，因此绿光激光更适合喷射液束电解—激光复合加工技术的要求，而红外激光则应优先选择相对功率密度更高的纳秒级激光。

4) 与纯水相比，电解液对绿光激光的衰减作用以散射作用为主，而对红外激光仍以吸收作用为主。其中，红外激光在电解液中的衰减系数在  $34.5\text{m}^{-1}$  以上，即激光在电解液中传输 15mm，能量衰减接近 40%，这就要求喷射液束电解—激光复合加工中激光在电解液束中的行程控制在 15mm 以下，以便尽量减少激光在电解液束中传输的能量损耗。

另外，实验采用 400 目混纺滤布对工业  $\text{NaNO}_3$  电解液过滤后，该电解液对激光的衰减作用几乎没有改变，这与溶液中的微粒的直径尺度有关。400 目混纺滤布的孔径为  $38.5\mu\text{m}$ ，由实验结果可说明工业  $\text{NaNO}_3$  电解液中的微粒直径小于滤布孔径，因此过滤后效果不大。对 8% 工业  $\text{NaNO}_3$  溶液采用孔径  $0.45\mu\text{m}$  的定性滤纸过滤后对绿光的衰减系数由 6.307 降至 0.184，定性滤纸过滤效果显著，说明工业  $\text{NaNO}_3$  电解液中的大部分微粒直径在  $0.45\mu\text{m}$ ~ $38.5\mu\text{m}$  之间，对激光的散射属于米氏散射，这也完全印证了工业钠盐电解液的悬浮微粒米氏散射是激光衰减增加的主要原因，图 2.3 的光路图也充分说明了这一点。因此，对工业电解液采用沉淀、精细过滤处理后，可以有效减少电解液对激光的散射作用从而降低衰减系数。

### 2.2.3.2 电解液温度对激光衰减特性的影响

溶液温度对激光水下传输中的能量衰减有一定的影响，丹麦哥本哈根大学<sup>[177]</sup>、美国俄勒冈州立大学<sup>[178]</sup>的学者对可见波段、近红外波段的激光在纯水中的吸收系数的温度影响进行了研究，结果表明温度对吸收系数的影响很弱，波长范围 400~550nm、715~740nm 的激光在纯水中的吸收系数的温度影响因子分别为  $-0.00091 \pm 0.00006 \text{ m}^{-1}\text{C}^{-1}$ ， $-0.0023 \sim -0.0035 \text{ m}^{-1}\text{C}^{-1}$ 。本文的实验利用恒温加热器对样本玻璃槽的电解液液进行加热，控制其温度变化，从而研究温度对激光在电解液中的衰减特性的影响。

表 2.3 列出的是在 30~40℃ 范围内两种不同波长的激光在两种工业钠盐电解液中的衰减特性的温度影响因子。由表中数据可看出温度对电解液中激光衰减的影响比纯水要高出 1~2 个数量级，并且与电解液的浓度有关，浓度越高，温度的影响因子相对增大。电解液温度升高致使激光衰减系数减小的原因可能是：温升导致电解液的折射率虚部减小，由公式 (2-7) 可知吸收系数因此减小；温度升高引起悬浮颗粒的折射率下降，从而减弱颗粒对激光的散射作用；另外，一定范围内的温升可消除溶液中的残存气泡，使散射系数减小。以上的综合作用，使得电解液随温度升高，溶液对激光的衰减作用略微减弱。

通过表 2.3 与图 2.4、图 2.5 的比较，可以看出，电解液温度对激光的衰减影响与浓度相比极小，从工程应用角度，电解液温度对激光衰减的影响可以忽略不计。

表 2.3 电解液中激光衰减温度影响因子

波长λ (nm)	电解液	浓度 C (%)	影响因子 $\Psi_T$ ( $m^{-1}/^{\circ}C$ )
532	工业 NaNO <sub>3</sub>	2	-0.008 ± 0.001
		20	-0.065 ± 0.008
	工业 NaCl	2	-0.007 ± 0.001
		20	-0.034 ± 0.005
1064	工业 NaNO <sub>3</sub>	2	-0.031 ± 0.008
		20	-0.049 ± 0.008
	工业 NaCl	2	-0.020 ± 0.005
		20	-0.027 ± 0.005

### 2.3 本章小结

本章理论分析了溶液中的水分子、悬浮杂质等微粒对激光的吸收和散射作用，在此基础上实验研究了连续波绿光激光和脉冲红外激光在电解液中的衰减特性以及电解液浓度、温度对衰减特性的影响。实验结果表明：绿光激光在电解液中的衰减以悬浮微粒的散射作用为主，而红外激光仍以水分子的吸收作用为主；与红外激光相比，绿光激光更适合喷射液束电解—激光复合加工，而应用红外激光时须控制电解液束的长度在 15mm 以内，且应优先选择更高功率密度的纳秒激光；与电解液浓度相比，温度对激光在电解液中的衰减影响可以忽略不计。

研究结果为喷射液束电解—激光复合加工试验系统的设计提供了重要理论依据，并且有助于优选激光、电解液等相关工艺参数。

本章的相关研究结果已经在《应用激光》、《Optics and Lasers in Engineering》(SCI 源期刊)等学术期刊上发表。

### 第三章 激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应研究

激光加工的效果主要取决于激光对靶材的热效应和力学效应。本文研究的喷射液束电解—激光复合加工与传统空气中激光加工不同，靶材表面的周围环境不是空气而是电解液，在电解液中激光作用于金属靶材的力学效应与喷射液束电解—激光复合加工机理密切相关。因此，本章根据激光在液体中作用于靶材的力学效应的理论分析，基于压电加速度传感器测振原理，通过对电解液中不锈钢悬臂梁靶材脉冲激光作用后的振动测试分析，研究电解液中激光作用于金属靶材的力学效应，并用于激光调焦从而获得激光聚焦最小光斑。

#### 3.1 溶液中激光作用于金属靶材的力学效应的理论分析

##### 3.1.1 激光作用金属靶材冲击波的形成

激光加热材料表面，使得其表面的温度升高，当表面温度达到材料的熔点时，将会发生熔融现象；继续加热到材料表面温度达到气化温度时，表面将发生气化现象，形成大量蒸汽粒子。从热表面逸出的蒸汽粒子服从与表面温度对应的麦克斯韦速度分布，但它们的速度矢量均背离表面，这种非均匀的速度分布，由于蒸汽粒子之间的碰撞而变成均匀的速度分布。这一现象发生在离表面仅几个平均自由程的范围内（其数量级一般为几个微米），这个范围被称为 Knudsen 层<sup>[179]</sup>。随着温度的继续上升，蒸气发生电离，继而形成高温高密度等离子体，蒸气与等离子体吸收激光能量以超音速向外迅速膨胀产生高压，从而形成冲击波，如图 3.1 所示。这种冲击波与爆炸产生的爆轰波相似。根据爆炸动力学理论，由冲击波阵面与波前、波后的物质、冲量和

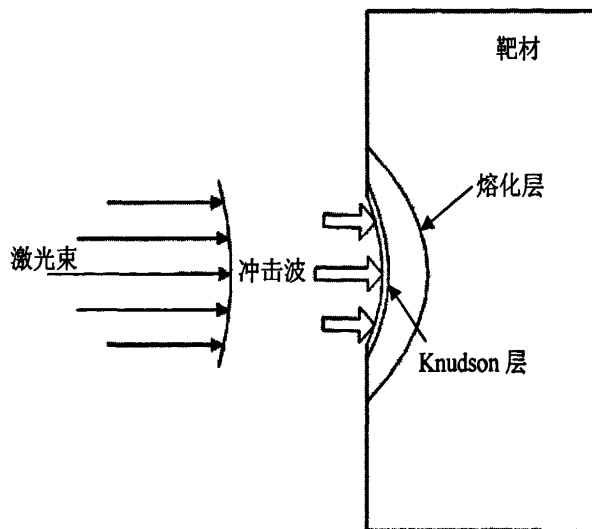


图 3.1 空气中激光作用金属靶材的冲击波的形成示意图



能量守恒关系可以得到冲击波阵面的参量<sup>[180]</sup>:

$$p_k = \frac{1}{k+1} \rho_* D^2 \quad (3-1)$$

$$a_k = \frac{k}{k+1} D \quad (3-2)$$

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1)Q_*} \quad (3-3)$$

其中,  $p_k, a_k$  分别为冲击波阵面上的压力和声速;  $\rho_*$  为冲击波波前介质密度,  $D$  为冲击波波速,  $k$  为汽化物的多方指数,  $Q_*$  为激光能量转化热。从冲击波阵面参量可知, 冲击波压力由波前吸收物的密度和冲击波阵面传播速度  $D$  确定, 而  $D$  只与激光能量密度和材料性质有关, 即冲击波强度由激光能量密度和工件材料确定。

在气化物刚开始膨胀时, 假定气化物的初始压力  $p_0$ 、初始波度  $u_0 = 0$ 、初始声速  $a_0$ 、初始密度  $\rho_0$ 。由于实际状态下气化物进行三维扩散, 因此将其简化为沿工件表面法线方向的一维扩散, 即不考虑气化物的侧向扩散。气化物的一维扩散可由黎曼积分描述<sup>[181]</sup>, 即

$$u = u_0 - \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho a} \quad (3-4)$$

求积分得,

$$u = \frac{2a_0}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \quad (3-5)$$

空气中气化物扩散时, 在气化物与空气的交界面上可以看成  $p$  为一个大气压 ( $p = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ), 则边界上气化物运动速度为<sup>[181]</sup>

$$u_A = \frac{2a_0}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \quad (3-6)$$

假设气化物膨胀过程为等熵过程, 则其状态方程为,

$$p\tau^k = \text{常数} = p_0\tau_0^k \quad (3-7)$$

式中,  $\tau, \tau_0$  分别为气化物扩散过程中某一时刻的体积和初始状态的体积。假设气化物单向扩散的截面积为  $s$ , 气化物的初始厚度为  $\delta_0$ , 则,

$$\tau_0 = s\delta_0 \quad (3-8)$$

气化物扩散时间为  $t$  时, 气化物边界所处的位置  $X$  为

$$X = ut + \delta_0 = \frac{2a_0 t}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] + \delta_0 \quad (3-9)$$

则 t 时刻气化物的体积为,

$$\tau = sX = s \frac{2a_0 t}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] + \delta_0 \quad (3-10)$$

将其代入 (3-7) 可得,

$$p = p_0 \left[ \frac{\tau_0}{\tau} \right]^k = p_0 \left[ \frac{\delta_0}{\delta_0 + \frac{2a_0 t}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]} \right]^k \quad (3-11)$$

### 3.1.2 溶液约束层对激光作用金属靶材冲击波的影响

当靶材表面存在对激光透明的液体约束层时, 激光冲击波压力大大增强, 其原因是除了高速等离子体对靶材的反冲力以外, 对外膨胀的等离子体不断压缩周围溶液介质而形成新的冲击波, 而激光与溶液相互作用产生的空化气泡在靶材表面附近溃灭时还会产生射流冲击力<sup>[182]</sup>, 如图 3.2 所示。

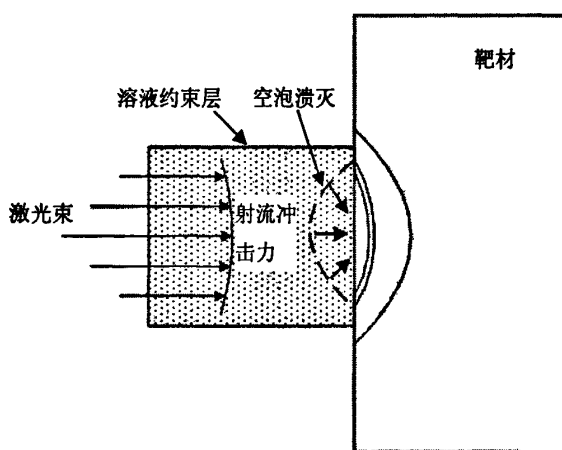


图 3.2 溶液约束层中激光对靶材的射流冲击力的形成示意图

空化是液体受到某种扰动致使其中出现空腔的一种特有流体现象。通常液体中局部压力低于该温度下的饱和蒸汽压或液体中局部温度高于常压下饱和蒸汽温度均将产生空化现象。溶液约束层的激光空化是指激光聚焦于液体中某点, 光能转化为热能, 使得液体气化, 从而出现空泡。空泡在泡内外压差的作用下对外膨胀, 推动周围液体介质对外径向流动。泡内压力随着泡

膨胀不断下降,当降到周围介质的静液压力时,由于液体的惯性作用,气泡将继续膨胀,一直达到最大泡半径。此时由于泡内压力低于周围介质的平衡压力,周围液体开始反向运动,即向中心聚合,同时压缩气泡使之不断压缩,其腔内压力逐步增大。由于聚合液流惯性的作用,气泡被“过度”压缩,使其内部压力再次高于周围的平衡压力,直至腔内压力能阻止气泡压缩而达到新的平衡。至此,气泡膨胀与压缩的第一次循环结束。但此时由于泡内压力比周围介质的静压大,空泡反弹,经历第二次膨胀和压缩过程。通常该过程称为空泡脉动。当液体的密度和惯性均比较大,液体中空泡通常会经历多次这样的脉动过程。随着泡能和泡内含气(汽)量的逐步减少,空泡最终溃灭,并对外辐射出冲击波。空泡在溃灭阶段对外辐射的高压冲击波是源于空泡内部强烈收缩的结果,其能量的变化随入射激光的能量增大而增加<sup>[183]</sup>。

综合以上理论分析,溶液中激光作用于金属靶材的力学效应包括蒸汽粒子和等离子体等气化物对靶材的反冲作用力、气化物压缩周围溶液产生的冲击波以及溶液中空化气泡溃灭所产生的射流冲击力,力学效应的强度与激光的能量密度成正比。

### 3.2 激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应实验测试研究

在激光与液体物质相互作用过程的测试技术研究方面,用以探测液体物质中冲击波的方法主要有光声探测法<sup>[184-186]</sup>、光纤偏转法<sup>[187]</sup>、干涉诊断法<sup>[188-189]</sup>、高速摄影法<sup>[190-191]</sup>以及机械测量法<sup>[192-193]</sup>等。本文从工程应用角度出发,采用机械测量法,设计了不锈钢悬臂梁靶材,利用压电加速度传感器测试振动原理,将冲击波的压力转变为电压信号,从而获得激光在不同厚度电解液约束层中的力学效应的变化。

#### 3.2.1 实验测试装置及测试原理

实验装置见图 3.3。激光器是具有倍频技术的脉冲 Nd:YAG 激光器,可用两种波长激光:红外激光(1064nm)和绿光激光(532nm),脉宽 0.2ms。脉冲激光通过凸透镜(焦距 100mm)聚焦在厚度为 0.5mm 的不锈钢片表面上,聚焦光斑直径 100 $\mu$ m。该不锈钢片垂直固定于石英玻

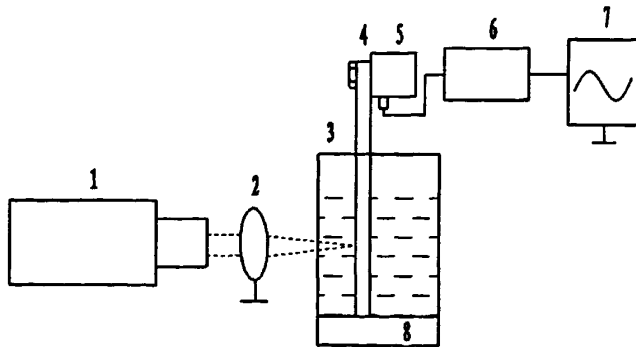


图 3.3 激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应测试实验装置示意图

1. 激光器; 2. 凸透镜; 3. 石英玻璃水槽; 4. 靶材; 5. 压电加速度传感器;
6. 电荷放大器; 7. 示波器; 8. 底座

璃水槽中的底座上，形成一个悬臂梁，悬臂梁的自由端装有压电加速度传感器，探测悬臂梁振动加速度信号，通过电荷放大器在示波器上输出。水槽中的溶液为浓度 18% 的  $\text{NaNO}_3$  电解液。

当脉冲激光聚焦在  $\text{NaNO}_3$  电解液中的不锈钢片的轴线位置上时，会对靶材产生瞬间冲击力，在该冲击力作用下，不锈钢片作垂直于轴线方向的振动，其主要变形形式是弯曲变形，通常称为横向振动。忽略剪切变形和截面绕中心轴转动的影响，振动中梁的轴线始终在对称面内，如图 3.4 所示。图中，悬臂梁总长为  $L_1$ 、激光作用的位置 A 与悬臂梁固定端 O 的距离为  $L_2$ 。不锈钢靶材的自由端 B 装有压电加速度传感器（图 3.5），该传感器主要由压电元件、质量块、预压弹簧、基座及外壳等组成。整个部件在外壳内并由螺栓与靶材固定。

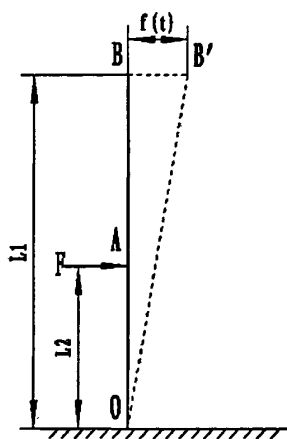


图 3.4 靶材悬臂梁振动示意图



图 3.5 压电加速度传感器

当靶材受到脉冲激光作用的冲击力后，压电加速度传感器与靶材一起振动，压电元件受质量块惯性力的作用，根据牛顿第二定律，此惯性力是加速度的函数，即

$$F = m \cdot a \tag{3-12}$$

式中： $F$  为质量块产生的惯性力； $m$  为质量块的质量； $a$  为加速度。

根据压电元件的压电效应，压电元件产生的电荷与惯性力成正比，由于质量块的质量为定值，因此压电元件产生的电荷与靶材自由端 B 点的加速度也成正比。

根据振动理论，单脉冲激光对悬臂梁不锈钢靶材的瞬间冲击力作用结束后，该悬臂梁可视为具有粘性阻尼的单自由度振动系统，系统做横向衰减振动，其自由端 B 点的运动方程表示为<sup>[194-195]</sup>：

$$f(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \sin(\omega_n t + \varphi) \tag{3-13}$$

式中： $A_0$  为初始最大振幅； $\beta$  为阻尼因数； $\omega_n$  为靶材悬臂梁的固有频率； $\varphi$  为振动初始相位角。B 点在振动中的加速度由  $f(t)$  二次微分可得：

$$a(t) = (\beta^2 A_0 e^{-\beta t} + A_0 e^{-\beta t} \omega_n^2) \sin(\omega_n t + \varphi) - 2\beta A_0 e^{-\beta t} \omega_n \cos(\omega_n t + \varphi) \tag{3-14}$$

如图 3.4 所示，当悬臂梁处于初始最大振幅时，B 点的加速度最大，将这一时刻作为初始

时刻, 即  $t=0$ , 初始相位角  $\varphi$  为  $\pi/2$ , 则由式 (3-14) 可以推导出:

$$a_{\max} = (\beta^2 + \omega_n^2) A_0 \quad (3-15)$$

初始最大振幅  $A_0$  为靶材悬臂梁受瞬间冲击力  $F$  后的最大弯曲变形量, 由材料力学突加载荷构件变形计算可知, 该变形量相当于静载荷  $2F$  作用下的悬臂梁自由端的最大弯曲变形量<sup>[196]</sup>, 即,

$$A_0 = \frac{FL_2^2}{3EI} (3L_1 - L_2) \quad (3-16)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $I$  为截面惯性矩。将式 (3-16) 代入式 (3-15) 可得,

$$a_{\max} = F \cdot (\beta^2 + \omega_n^2) \frac{L_2^2}{3EI} (3L_1 - L_2) \quad (3-17)$$

由于阻尼因数  $\beta$  和固有频率  $\omega_n$  为常数, 冲击力  $F$  与最大加速度成正比, 令

$$K_a = \frac{L_2^2}{6EI} (3L_1 - L_2) (\beta^2 + \omega_n^2), \text{ 则}$$

$$a_{\max} = K_a \cdot F \quad (3-18)$$

当悬臂梁靶材处于初始最大振幅时, 靶材自由端 B 点具有最大加速度, 因而安装在 B 点的压电加速度传感器所测得电荷量最大。设电荷灵敏度为  $S_q$ , 所测电荷与加速度成正比<sup>[197]</sup>, 即

$$q_{\max} = S_q \cdot a_{\max} \quad (3-19)$$

由于压电加速度传感器所测电荷量很小, 因而设置了电荷放大器用以放大从传感器输出的微弱信号。图 3.6 是该电荷放大器的等效电路图, 其中,  $q$  是传感器测得的电荷;  $A$  为电荷放大器开环放大倍数;  $R_a$  为传感器内部电阻;  $R_i$  为电荷放大器的输入电阻;  $C_a$  为传感器内部固有电容;  $C_c$  为连接电线的分布电容;  $C_i$  为电荷放大器的等效电容;  $C_f$  为电荷转换器的反馈电容;  $U_i$  与  $U_o$  分别为电荷放大器的输入与输出电压。

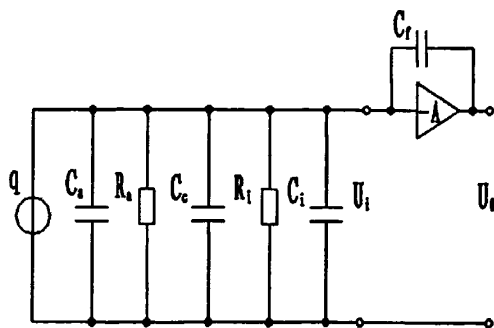


图 3.6 电荷放大器等效电路图

根据电荷放大器基本特性, 可将等效电路图简化并得到电荷放大器的输出电压为

$$U_0 = -\frac{Aq}{C_a + C_c + C_f + (1+A)C_f} \quad (3-20)$$

由于  $A \ll 1$ ，且满足  $(1+A)C_f \ll C_a + C_c + C_f$  时，故式 (3-20) 可表示为：

$$U_0 = -\frac{q}{C_f} \quad (3-21)$$

联立式 (3-18)、(3-19) 和 (3-21) 可得：

$$U_0 = -\frac{S_a K_a F}{C_f} \quad (3-22)$$

由式 (3-22) 可知，当悬臂梁处于最大振幅时，通过压电加速度传感器所测得的电压与激光对靶材的冲击力成正比。

实验使用的靶材是不锈钢薄片，厚度 0.5mm，宽 10mm，高 100mm。弹性模量  $E$  为 198GPa，截面惯性矩  $I$  为  $1.04 \times 10^{-10} \text{m}^4$ ，电荷灵敏度  $S_a$  为  $5.14 \text{pC} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ， $K_a$  为  $1.78 \times 10^2 \text{kg}^{-1}$ ， $C_f$  为 100pF。

### 3.2.2 实验结果与分析

图 3.7、图 3.8 分别显示的是在三种不同条件下单脉冲绿光激光 (532nm) 和红外激光 (1064nm) 作用不锈钢靶材产生的力学效应的测试电信号。三种条件包括：在空气中以及激光在电解液中分别传输 2mm 和 20mm 后作用靶材。测试中激光作用靶材的位置一致 ( $L_2=35\text{mm}$ )，每次采用的激光脉冲能量相同，均为 150mJ。

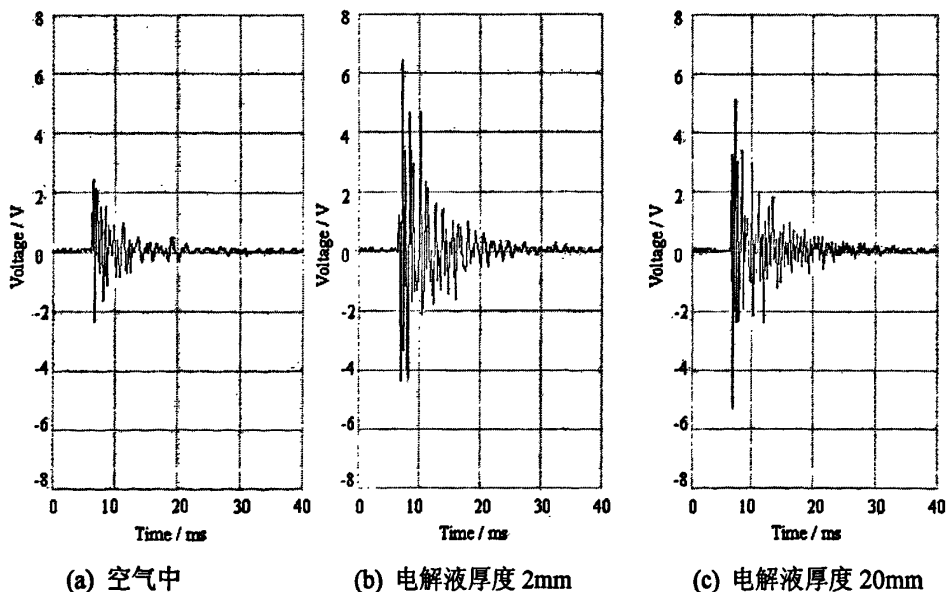


图 3.7 不同条件下绿光激光作用于靶材的力学效应的测试电信号 (单脉冲能量: 150mJ)

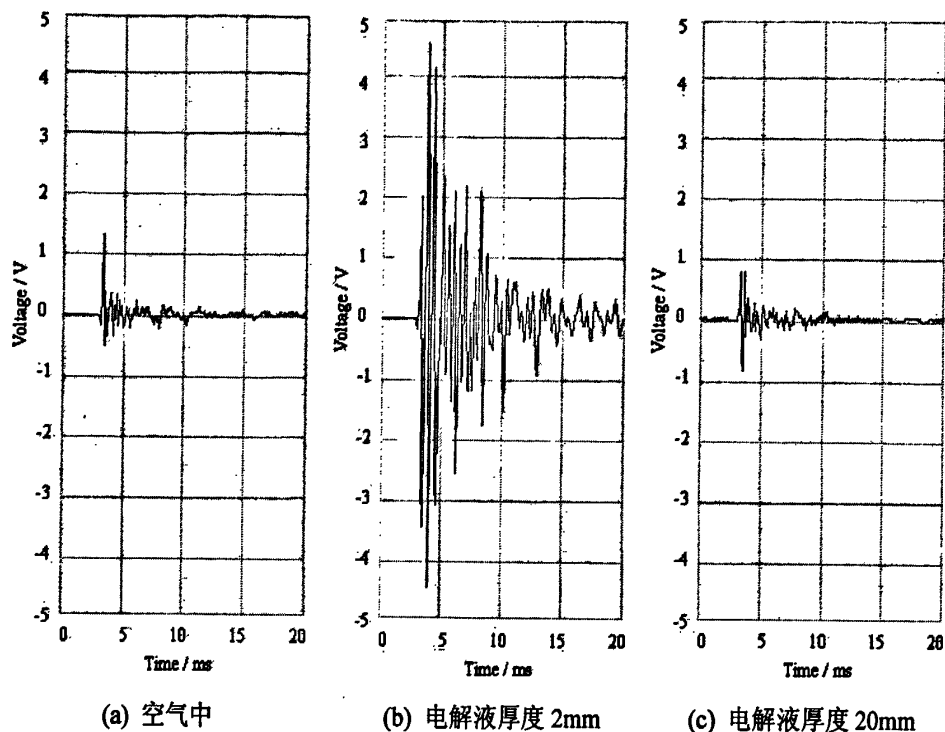


图 3.8 不同条件下红外激光作用于靶材的力学效应的测试电信号 (单脉冲能量: 150mJ)

分别对比图 3.7、图 3.8 的前两图可以得到一致的结论, 即同样脉冲能量条件下, 空气中激光对靶材的冲击力与激光在短距离 (2mm) 的电解液介质中相比, 不到后者的三分之一。出现这一现象的原因可以解释为: 一方面是因为电解液具有不可压缩性, 使得液体中冲击波的压力比空气冲击波压力要大; 另一方面是因为激光聚焦材料表面处的电解液会产生空化现象, 空化气泡的溃灭产生的射流冲击力也增加了激光在电解液中对靶材的力学效应。这一研究结果从力学效应的角度说明: 与传统空气中激光加工相比, 喷射液束电解—激光复合加工中激光作用于金属靶材的更大的冲击力有利于去除金属熔化物, 从而减薄再铸层的厚度。虽然激光在电解液中传输使能量有所衰减而影响激光对靶材的热学效应, 但激光在短距离的电解液介质中作用于靶材的力学效应是空气条件下的 3 倍以上, 因此, 对于喷射液束电解—激光复合加工而言, 在控制激光在电解液束传输距离的前提下, 激光的热—力效应在快速去除工件材料的同时又容易将金属熔化物排除而减薄再铸层, 而工件阳极的电化学溶解作用又能够进一步去除再铸层, 这表明激光的热—力效应以及电解的综合作用是喷射液束电解—激光复合加工去除工件材料的作用机理, 揭示了喷射液束电解—激光复合加工机理的本质。

通过图 3.7(b)与图 3.7(c)的比较可以看出, 绿光激光在电解液中对靶材的作用力在传输距离 20mm 内变化不大; 而图 3.8 中, 红外激光对靶材的作用力随着溶液中传输距离的增加而减小, 从 2mm 到 20mm, 作用力降为初始的 20%。出现这一现象的根本原因是绿光激光在电解液中衰减特性远小于红外激光, 随着电解液厚度增加, 红外激光能量降低, 在靶材表面生成的气化物

的密度随之减少,从而减弱了激光对靶材的冲击力。

另外,通过对比图 3.7 和图 3.8 各自相同条件下不同激光作用于靶材的力学效应可以看出,绿光激光对靶材的冲击力都大于红外激光,这是因为金属靶材对短波激光的吸收率高于长波激光,更高的吸收率可获得更大的激光能量,从而提高材料表面的气化程度,增加蒸气粒子和等离子体的密度,增大空化气泡溃灭的射流冲击力,这些物理现象的综合作用致使波长更短的绿光激光作用于靶材产生的冲击力大于红外激光。以上提到的综合结果,使得绿光激光加工效率相对高些。

图 3.9 为激光在电解液中对靶材的冲击力随传输距离的变化曲线图。图中的纵坐标是靶材表面聚焦光斑单位面积上的压力值。由图可以看出,单脉冲 150mJ 的毫秒级激光在电解液中对靶材的冲击力达到 10MPa 数量级;绿光激光在 20mm 范围内对靶材的力学效应比较稳定,而红外激光对靶材的力学效应随传输距离的增加呈线性递减。综合考虑能量衰减和力学效应,可以推断:可能绿光激光更适合于进行喷射液束电解—激光复合加工,而应用红外激光进行喷射液束电解—激光复合加工,需要将传输距离控制在 15mm 以下才可能获得较高的加工效率。

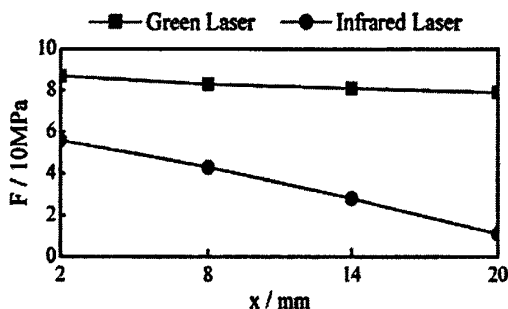


图 3.9 激光在电解液中对靶材的冲击力

### 3.3 激光光束在电解液中的聚焦光斑最小化研究

喷射液束电解—激光复合加工中激光束经历空气中传播、通过聚焦透镜、空气中传播以及电解液中传播四个过程。与传统空气中激光加工相比,由于电解液的折射率大于空气,致使透镜在靶材的聚焦位置偏离透镜的理论聚焦点。为提高加工效率,在透镜焦距一定的条件下,需要将激光在电解液中的聚焦光斑最小化,从而获得最大的功率密度。

本文所使用的激光器是 XGL-1 型激光器,该激光器所发出的激光是以高斯光束的形式在空间传播。沿 Z 轴方向传播的高斯光束的解析表达式如下<sup>[198]</sup>,

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} e^{-i\left\{k\left[z + \frac{x^2+y^2}{2R(z)}\right] - t\theta^{-1} \frac{z}{f}\right\}} \quad (3-23)$$

式中:



$$\begin{cases} \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} \\ R(z) = z + \frac{f^2}{z} \end{cases} \quad (3-24)$$

$z$  轴坐标原点设在光束腰处,  $\omega_0$  为高斯光束的腰斑半径,  $f$  为产生高斯光束的焦参数,  $R(z)$  表示  $z$  坐标处高斯光束等相位面曲率半径,  $\omega(z)$  为  $z$  坐标处高斯光束等相面上的光斑半径。而  $\omega_0$  与  $f$  存在如下关系:

$$f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (3-25)$$

高斯光束在任一  $z$  坐标处, 其横向振幅分布为高斯分布, 光斑半径随  $z$  坐标而变, 即:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \quad (3-26)$$

沿高斯光束轴线每一点的等相位面都可以视为球面, 曲率半径也随  $z$  坐标而变, 即:

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{f}{z}\right)^2\right] = z \left[1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z}\right)^2\right] \quad (3-27)$$

用  $\omega(z)$  和  $R(z)$  定义一个新的高斯光束特征参数, 称之为  $q$  参数:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi\omega^2(z)} \quad (3-28)$$

在高斯光束腰处, 即  $z$  轴坐标原点处, 由式 (3-28) 可得:

$$q(0) = i \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} = if \quad (3-29)$$

可以利用高斯光束的  $q$  参数来研究高斯光束的传输规律, 高斯光束通过焦距为  $F$  薄透镜时, 从  $z_1$  处传输到  $z_2$  处, 其传输规律可统一写为:

$$q_2(z) = \frac{A \cdot q_1(z) + B}{C \cdot q_1(z) + D} \quad (3-30)$$

其中  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  为光学系统的光学变换矩阵。

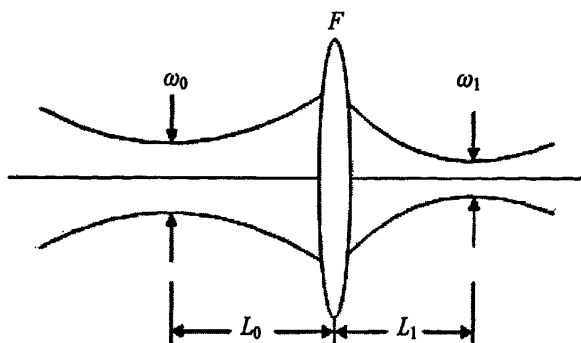


图 3.10 透镜对激光高斯光束的聚焦变换

透镜对激光高斯光束的聚焦变换如图 3.10 所示, 假设入射高斯光束为物光束, 它的腰斑半径为  $\omega_0$  (共焦参数为  $f$ ), 腰到透镜的距离为  $L_0$ , 透镜焦距为  $F$ ; 出射高斯光束为像光束, 它的腰斑半径为  $\omega_1$  (共焦参数为  $f'$ ), 腰到透镜的距离为  $L_1$ ; 高斯光束腰处的  $q$  参数为  $q_0(z)$ , 出射光束腰处的  $q$  参数为  $q_1(z)$ , 则:

$$\begin{cases} q_0(z) = if \\ q_1(z) = if' \end{cases} \quad (3-31)$$

而高斯光束从入射束腰处到出射束腰的光学变换总矩阵为:

$$T = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_1}{F} & \frac{FL_1 + FL_0 - L_1L_0}{F} \\ -\frac{1}{F} & 1 - \frac{L_0}{F} \end{pmatrix} \quad (3-32)$$

由高斯光束传输规律可得:

$$\frac{(1 - \frac{L_1}{F})if + \frac{FL_1 + FL_0 - L_1L_0}{F}}{-i\frac{f}{F} + 1 - \frac{L_0}{F}} = if' \quad (3-33)$$

从等式两边的虚部相等可以得到:

$$f' = \frac{F^2 f}{(L_0 - F) + f^2} \quad (3-34)$$

利用  $\omega_0$  与  $f$  之间的关系式 (3-25), 可将 (3-34) 改写为:

$$\omega_1 = \frac{F}{\sqrt{(L_0 - F)^2 + f^2}} \omega_0 \quad (3-35)$$

由式 (3-35) 可知在透镜焦距确定的情况下, 为了取得较好的聚焦效果, 有两种办法, 一

种是把入射光束的腰放在透镜表面上,即  $L_0 = 0$ , 另外一种是将入射光束的腰放在远离透镜的地方,即  $L_0 \gg F$ 。

本文所用的透镜焦距有两种规格,100mm 和 150mm。试验中为保证激光束与聚焦透镜同轴,将透镜与激光腔固定于同一导轨上,透镜与激光腔前镜的距离可调范围为 0~256mm。

通过式(3-35)计算可知,采用焦距 100mm 透镜时,将透镜固定于导轨末端可获得更小的光斑,而采用焦距 150mm 透镜时,需要将透镜置于激光束的束腰处,才能获得更好的聚焦效果。因此,利用激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应测试实验装置,对两种规格的透镜进行电解液中的焦距标定和束腰位置标定。

对于焦距 100mm 的透镜,首先将其固定于导轨的末端,然后移动固定有靶材的石英玻璃槽,利用相同能量的脉冲激光作用于靶材,通过比较靶材的振动量的电信号大小,可以准确标定透镜的焦距偏移量,从而在加工中获得更小的光斑。结果显示,在 103mm 处靶材振幅最大。

对于焦距 150mm 的透镜,首先标定光束的束腰位置,移动透镜在导轨上位置,移动过程中保证透镜与靶材的距离不变,通过振动信号的比较可以确定透镜的最佳位置;然后在固定透镜于束腰位置的基础上标定透镜在电解液中的焦距偏移量。结果显示,焦距 150mm 的透镜在激光束束腰位置下,在电解液中的焦距偏移量 5mm,即试验中靶材的位置应距 155mm 处可以获得最小光斑。

### 3.4 本章小结

本章理论分析了激光在溶液中作用于靶材的力学效应的形成原因,设计了悬臂梁靶材实验装置,通过固定于靶材自由端的压电加速度传感器测试激光在电解液中对靶材的冲击力。实验结果表明:短距离(2mm)电解液中激光对靶材的冲击力是空气中相同脉冲能量对靶材冲击力的三倍以上;绿光激光在电解液中对靶材的作用力在传输距离 20mm 内变化不大;红外激光对靶材的作用力随着溶液中传输距离的增加而减小,从 2mm 到 20mm,作用力降为初始的 20%。

本章研究结果从力学效应的角度分析了喷射液束电解—激光复合加工中激光热—力效应去除材料的作用机理,揭示了激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应有利于排除金属熔化物而减薄再铸层。另外,通过力学效应的测试实验标定了试验中采用的焦距 100mm、150mm 的透镜在电解液中的焦距偏移量,为下一步加工试验确定了重要加工参数。

本章的相关研究结果已经在《应用激光》(2009, 29(4))上发表。

## 第四章 喷射液束电解—激光复合加工试验系统

为了对喷射液束电解—激光复合加工进行试验研究,需要研制其加工试验系统。本章在前面两章关于激光在电解液中的衰减特性以及激光作用于金属靶材力学效应研究的基础上,深入分析喷射液束电解—激光复合加工的特点,比较它与其他激光、电解加工方法的区别,根据喷射液束电解—激光复合加工的特殊性,研制符合其工艺技术要求的试验系统。

### 4.1 喷射液束电解—激光复合加工的特点

喷射液束电解—激光复合加工与其他激光加工相比,其独特之处在于将电解加工与激光加工进行复合,利用激光对工件的热—力效应快速去除材料,同时利用与激光束同轴喷射的电解液束对加工区的冷却、冲刷和电解的综合作用去除激光加工表面的再铸层。该方法属于加工技术的集成创新,集光能、热能、机械能、电化学能、热化学能等多种能量组合之优点,将具有加工效率高、表面无再铸层、可达性好等良好的加工效果。

喷射液束电解—激光复合加工与传统空气中激光加工不同,以电解液束代替空气,改变了工件表面的加工环境而产生多种加工作用效果的复合:一是在电解液约束层中激光对工件的冲击力更大;二是以喷射电解液束冲刷、冷却加工区代替传统的激光作用的空冷,有利于排除金属熔滴,可以减少孔出入口的溅射物,减小热影响区;三是在“阴极化”的电解液束作用下,工件阳极在脉冲激光束作用同步及其后的阳极溶解可以有效去除孔壁的再铸层。

喷射液束电解—激光复合加工与水下激光加工、化学辅助激光加工不同,后两者是将工件置于静态的纯水或化学溶液中,其冷却作用有限,仅仅是靠加工区的水体的热对流带走熔滴,而喷射液束电解—激光复合加工是利用高速流动不断更新的喷射液束可以有效排除金属熔滴。

喷射液束电解—激光复合加工与水射流引导激光加工不同,水射流引导激光加工将激光束聚焦点偏移至水射流形成之前,高压水射流代替光纤的作用,利用激光在水射流内部与空气界面的全反射,将激光能量和高压水射流的冲击能量一起作用于工件表面,其减少再铸层的作用是靠 5~50MPa 的高压水射流的冲击作用。喷射液束电解—激光复合加工采用的是电解液,由于电解液不如纯水均匀,对激光具有散射作用,因此在加工中激光束是直接聚焦于工件表面,与水射流引导激光相比,减少了激光在液束中的传播距离从而减少了激光能量损失,同时可以获得更小的聚焦光斑进而提高激光能量密度,电解液束的压力也只需 0.5~1.5MPa。

喷射液束电解—激光复合加工与激光辅助喷射电解加工不同,后者的加工原理是利用低能量的连续波激光对加工区的辐照,用以增大加工区与非加工区的温度梯度,从而提高电解加工的定域性,加工中激光束对工件没有去除材料作用,仅仅是一种对工件表面的集中加热的辅助

作用。喷射液束电解—激光复合加工采用的是峰值功率更高的脉冲激光，真正将电解加工与激光加工进行复合，两种加工作用都用于去除材料。

另外，喷射液束电解—激光复合加工与电液束加工不同，后者使用的是 200V 以上的高电压，电解液采用的是硫酸、盐酸、磷酸等酸性溶液，工件在阳极电化学溶解和化学腐蚀的双重作用下成形。喷射液束电解—激光复合加工主要靠激光加工去除材料，电解作用仅仅是用来去除激光加工孔壁 0.01mm~0.1mm 厚度的再铸层，因此采用的电解液是中性钠盐溶液，加工电压是 30V~50V 的低电压，电流密度在  $20\text{A}/\text{cm}^2$  以下。使用中性电解液和低电压可以避免工件非加工区受到杂散腐蚀，同时可以防止酸性水雾对激光器的损害。

根据喷射液束电解—激光复合加工的上述特点，结合激光在电解液中的衰减特性和力学效应的研究结果，可以总结出该加工方法对试验系统的技术要求：

- 1) 喷射电解液束与激光束同轴喷射，作用于工件相同区域。
- 2) 喷射电解液束的长度控制在 15mm 以内。
- 3) 采用具有倍频技术的 Nd:YAG 固体激光器，可使用绿光激光（532nm）和红外激光（1064nm）。
- 4) 采用小流量高压力的水泵，循环、精细过滤电解液。
- 5) 采用输出电压 0~50V、输出电流 0~5A 的稳压稳流电源。
- 6) 采用密封装置，防止电解液溅射而损害激光器及其光学系统。

## 4.2 喷射液束电解—激光复合加工试验系统总体设计

根据喷射液束电解—激光复合加工的特点，本文构建了如图 4.1 所示的复合加工试验系统。该系统主要包括激光系统、电解液系统、电源、机械工作台等。

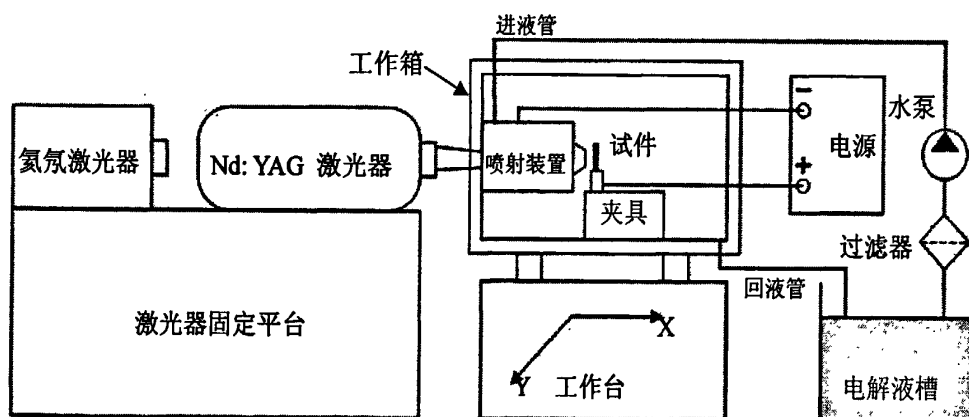


图 4.1 喷射液束电解—激光复合加工试验系统示意图

整个试验系统的调整过程分为如下五步。第一步是工装定位，将喷射装置固定于工作箱内，工件固定于夹具上，调整工作箱的高度，使其与激光头等高；第二步：接通电源，将夹具接直

流电源的正极，喷射装置接直流电源的负极；第三步：校直调整 Nd:YAG 激光，利用氦氛连续波红光激光器来矫直 Nd:YAG 激光器的激光，调整 Nd:YAG 激光器的前后镜，获得良好的激光束；第四步，喷射装置与激光束同轴定位，借助氦氛连续波红光激光，通过控制工作台微调工作箱的空间位置，使得喷射装置的喷嘴孔与 Nd:YAG 激光束处于同轴位置；第五步，启动柱塞泵，使得电解液循环流动，通过调节电解液压力，获得稳定的喷射液束。

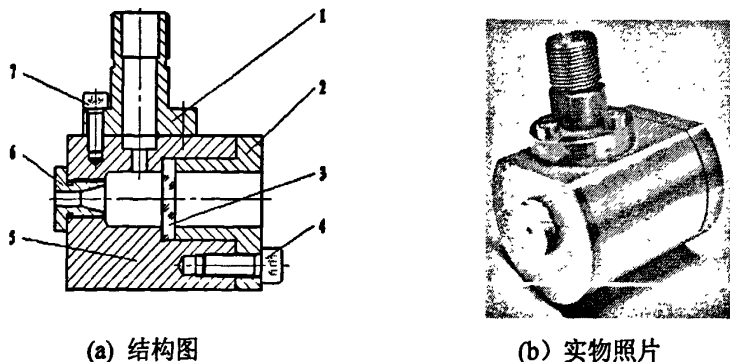
试验系统的运转过程为：电解液束通过过滤装置，由柱塞泵抽送至输液管路，经调节压力后，由进液管输送到喷射装置，电解液由喷嘴喷出形成稳定喷射液束；与激光束同轴安装的喷射装置接直流电源负极而带负电，使得喷射的液束“阴极化”且与激光束同轴喷射；激光束在短距离的喷射电解液束中传输后聚集于工件表面，在激光束的热—力效应下，工件材料被迅速去除；“阴极化”的喷射电解液束在激光加工区使工件发生电化学阳极溶解作用，同时喷射电解液束对激光加工区进行有效冷却和高速冲刷，上述电解液束对加工区的综合作用可以将激光加工过程中所产生的再铸层在线去除，从而实现喷射液束电解—激光复合加工对工件的优质高效的加工目标。

### 4.3 试验系统设计中的关键问题

#### 4.3.1 喷射装置结构设计及优化

喷射装置是喷射液束电解—激光复合加工中使激光束与喷射液束相互耦合的装置，该装置设计的好坏会影响到复合加工的效果。在喷射液束电解—激光复合加工试验系统中，电解液经进液管进入喷射装置，由喷嘴喷出形成与激光束同轴的高速喷射电解液束，共同作用于工件待加工区。根据喷射液束电解—激光复合加工的特点，喷射装置的设计需要考虑耐高压、耐腐蚀、密封性好、喷液腔内流场稳定、喷嘴拆卸更换方便等多种要求。

基于上述对喷射装置的要求，首先设计了一套侧面进液，喷液腔直通型的喷射装置结构，如图 4.2 所示，(a)为结构图，(b)为实物照片。



(a) 结构图

(b) 实物照片

图 4.2 直通型喷液腔结构的喷射装置

1 进液接头；2 压板；3 光学玻璃；4/7 螺钉；5 喷射基座；6 喷嘴

该装置可以保证喷射液束与激光束同轴，电解液通过进液接头进入喷射腔体，从喷嘴6喷出，而激光束从另一端进入喷射装置，透过光学玻璃、喷液腔、喷嘴，与喷射液束同轴作用于工件表面。

该套装置具有以下优点：

1) 采用压板和光学玻璃可以有效地缩短喷射腔体的长度，将激光在电解液束中的传输长度控制在15mm，从而减小了激光在电解液中传输时的能量损失；

2) 整个装置采用不锈钢材料，具有良好的耐腐蚀性和导电能力，能够将喷射液束“阴极化”，且具有一定的强度和刚度；

3) 喷嘴与腔体采用分离式设计，能够方便地拆卸。

但是，该装置存在以下缺陷：

1) 进液管从喷射装置的正上方导入，垂直高压射流对喷射装置的冲击比较大，将引起整个装置的微幅振动。

2) 进液管与喷液腔直接对接，密封性差，且难以保证喷液腔内流场稳定。

3) 激光在电解液束中的行程过长，而且电解液不断扰动的喷液腔直接导致激光在传输中能量锐减。

针对以上缺陷，对喷射装置的结构进行了优化设计，将直通型喷液腔修改成了环型喷液腔，优化后的喷射装置如图4.3所示，(a)为结构图，(b)为实物照片。

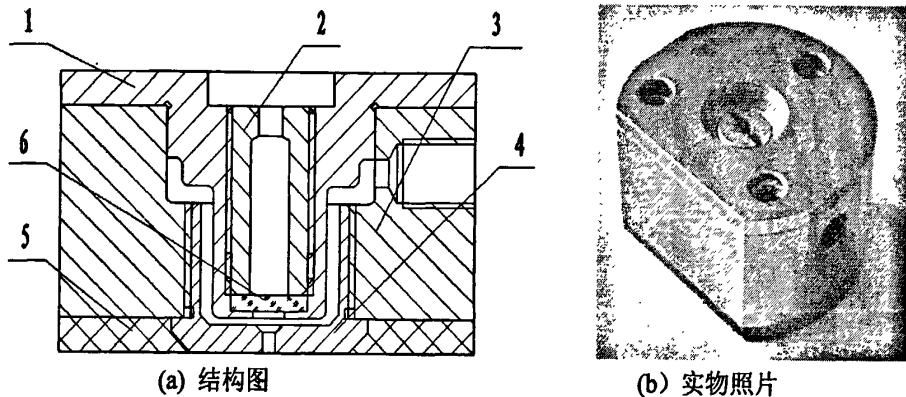


图4.3 环型喷液腔结构的喷射装置

1、压板；2、紧定螺钉；3、喷射基座；4、喷嘴；5、绝缘层；6、光学玻璃

电解液通过侧壁的进液口进入喷射装置，在喷射基座与环形塞形成的环形腔内流动，直至喷嘴，最后由喷嘴喷出。激光束通过紧定螺钉内腔的空气层、光学玻璃、环型腔底部的电解液薄层、喷嘴，与喷射液束同轴地作用到工件表面。

优化后的喷射装置具有以下特点：

1) 进液管从喷射装置的侧面导入，且固定于工作箱的侧壁上，从而减小了喷射液束对装置的冲击，增强了加工装置的稳定性。

2) 进液管与喷射装置采用螺纹联接, 提高了密封性能。

3) 环型喷液腔改善了腔体内的流场, 有效地减少了激光在电解液束中的传输距离, 降低了激光的能量损耗。

#### 4.3.2 密封装置及夹具设计

根据喷射液束电解—激光复合加工的特点, 必须采用可密封的工作箱, 将喷射装置、工件密封于工作箱内。对工作箱的要求是密封效果好, 透明程度高, 便于观察加工过程, 具有一定承载能力。因此密封装置采用有机玻璃制作, 该材料易于密封, 可在机械联接的基础上通过氯仿粘接, 防水效果好; 同时它具有高度透明性, 而且强度高, 能够承受较大载荷。

本文设计的密封装置内外需要透光、通液和通电, 有机玻璃材料便于加工, 在密封装置的后壁加工有透光孔(激光束)、侧壁加工有通液孔和通电孔。如图 4.4 所示, 有机玻璃的密封装置内装有喷射装置和夹具座, 试件夹持块固定于夹具座上, 密封装置侧壁安装有进液管、回液管以及用于导电的铜螺栓接线柱。

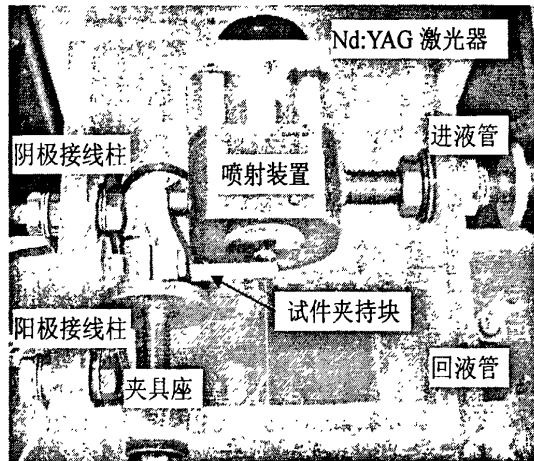


图 4.4 喷射液束电解—激光复合加工试验系统密封装置实物照片

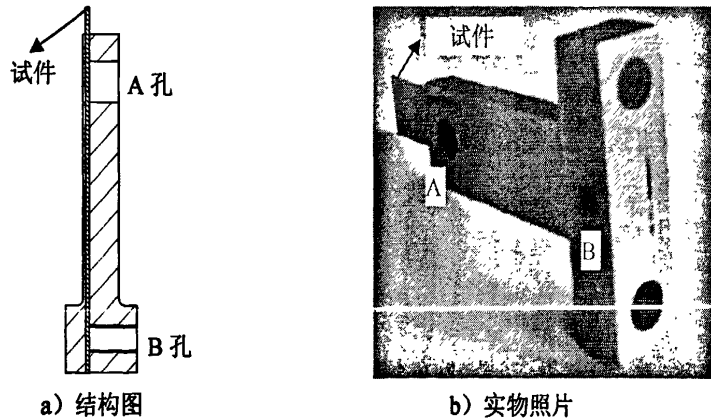


图 4.5 喷射液束电解—激光复合加工试件夹持块



本文设计的试件夹持块如图 4.5 所示。夹持块整体呈 T 型结构，底座上具有两个光孔可通过螺栓与夹具座联接；夹具的一侧开有宽 0.56mm 的细缝，适用于 0.5mm 以下的金属薄片试件的安装，并通过螺钉固定。

#### 4.4 激光系统与电源

激光系统与电源是分别是为喷射液束电解—激光复合加工提供激光加工能量和电化学加工能量的重要系统单元。

激光系统由加工用的脉冲 Nd:YAG 激光器和指示校直用的氦氖激光器所组成。试验加工中使用的激光器是天津拓普仪器有限公司生产的 XGL-1 型脉冲 Nd:YAG 激光器。该激光器采用闪光灯泵浦，具有电光调 Q 和腔外倍频技术，可获得 1064nm/532nm 两种波长，ms/ns 两种脉宽的不同激光。该激光器主机主要构成如图 4.6 所示，包括：主机壳体、激光腔、倍频晶体部（KTP）部、调 Q 晶体部、激光腔前镜部和后镜部等。

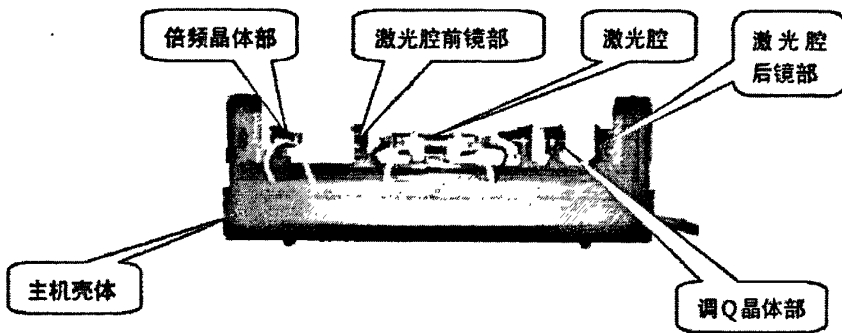


图 4.6 脉冲 Nd:YAG 激光器主机主要构成

脉冲 Nd:YAG 激光器的主要技术指标：

- 1) 输出波长：1064nm, 532nm。
- 2) 最大输出能量：600mJ (1064nm, 不调 Q)，250mJ (1064nm, 调 Q)，100mJ (532nm, 调 Q)。
- 3) 脉冲宽度：20ns (调 Q)，200 $\mu$ s (不调 Q)。
- 4) 重复频率：1Hz、5Hz、10Hz。
- 5) 输入电压：AC220V $\pm$ 10%，50Hz。
- 6) 最高充电电压：1000V。
- 7) 电光晶体：1~5KV (可调)。
- 8) 退压延时：30~500 $\mu$ s

指示校直用的激光器是天津拓普仪器有限公司生产的 GY-11 型氦氖激光器 (图 4.7)。连续波红光氦氖激光器的主要技术指标：

- 1) 输出波长: 632.8nm。
- 2) 输出功率: 1.5mW。
- 3) 输入电压: AC220V $\pm$ 10%, 50Hz。



图 4.7 连续波红光氦氖激光器 ( $\lambda=632.8\text{nm}$ )

喷射液束电解—激光复合加工试验用电源为 YJ63 型稳压稳流电源, 是一种具有高稳定度的低内阻电压源, 同时也可作为高稳定度的高内阻电流源。该电源具有独立的稳压输出的调节旋钮和稳流输出的调节旋钮, 分别控制输出电压和输出电流从 0 至额定值。该电源还具有远距离取样功能, 可以补偿连线上产生的压降, 保证负载两端具有较高的稳定度。

YJ63 型稳压稳流电源的主要技术指标:

- 1) 输入电压: AC220V $\pm$ 10%, 50~60Hz。
- 2) 输出电压: 0~50V。
- 3) 输出电流: 0~5A。
- 4) 稳压时电压稳定度:  $S_V \leq 5 \times 10^{-5} \pm 2.5\text{mV}$ 。
- 5) 稳压时负载稳定度:  $S_L \leq 5 \times 10^{-5} \pm 2.5\text{mV}$ 。
- 6) 稳流时电流稳定度:  $S_I \leq 5 \times 10^{-5} \pm 250\mu\text{A}$ 。
- 7) 稳流时负载稳定度:  $S_L \leq 1 \times 10^{-4} \pm 250\text{mA}$ 。

## 4.5 电解液系统

### 4.5.1 液压泵

根据喷射液束电解—激光复合加工的特点, 本文采用结构紧凑、体积小、重量轻、工作可靠的三缸柱塞泵。其主要技术参数: 工作压力 0~6 MPa(可调节); 额定流量: 10L/min; 液压泵的驱动功率: 1.3kW。

电解液净化系统除了采用柱塞泵自带的净化过滤系统外,增加了外围的精细过滤网罩,网罩外套有 800 目的混纺过滤布,过滤精度达到  $15\mu\text{m}$ ,实现了双层过滤装置,防止加工过程中的金属熔渣和电解产物进入喷射腔体,减少了由杂质引起的激光能量损失,避免了喷嘴堵塞的问题。

#### 4.5.2 电解液

电解液主要分为中性电解液、酸性电解液和碱性电解液。根据喷射液束电解—激光复合加工的特点,优选中性电解液。中性电解液主要有  $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaClO}_3$  三种。

$\text{NaCl}$  属于卤素族盐,其阴离子 ( $\text{Cl}^-$ ) 主要起活化阳极表面作用,可以使阳极表面完全活化,达到高电流密度、高电流效率,因此被称为活性电解液。 $\text{NaCl}$  电解液在直流加工中不具备线性特性,加工精度较低,且对设备腐蚀较严重,加工镍基合金易产生晶间腐蚀。

$\text{NaNO}_3$  和  $\text{NaClO}_3$  属于含盐酸盐,为钝化电解液,对阳极表面起氧化/钝化作用,生成可溶性保护膜,改善阳极溶解的均匀性从而改善表面质量,加工精度较高。

总体而言: $\text{NaCl}$  电解液的优点是高效、稳定、成本低、通用性好,其缺点是加工精度不够高,对设备腐蚀性大; $\text{NaNO}_3$  电解液优点是加工精度较高、对设备腐蚀性小、缺点是加工效率较低; $\text{NaClO}_3$  电解液虽然加工精度高,但使用过程较复杂,干燥状态易燃,未能广泛使用<sup>[46]</sup>。

根据上述分析, $\text{NaNO}_3$  电解液加工精度较高、对设备的腐蚀性小,加工表面质量较好,比较符合喷射液束电解—复合加工的技术要求。而喷射液束电解—激光复合加工中是以激光加工作用为主去除工件材料,电解加工在复合加工中仅仅是用于去除再铸层的作用, $\text{NaNO}_3$  电解液加工效率较低的缺点并不影响它的应用。因此,本文选择  $\text{NaNO}_3$  电解液作为喷射液束电解—激光复合加工的工作电解液。

## 4.6 本章小结

本章通过分析喷射液束电解—激光复合加工的特点,总结了喷射液束电解—激光复合加工对试验系统的技术要求,并针对这些要求构建了加工试验系统。重点研制了喷射装置、密封装置以及试件夹持块等关键零件,选定了激光器、电源、水泵等重要器件,确定了以  $\text{NaNO}_3$  溶液为电解液,为喷射液束电解—激光复合加工研究提供了试验必备条件。

本章关于喷射液束电解—激光复合加工装置的研究成果已申请发明专利并获授权。

## 第五章 喷射液束电解—激光复合加工的机理研究

喷射液束电解—激光复合加工是将电解加工与激光加工进行复合，以喷射液束下激光对工件的热—力效应为主要加工作用去除材料，同时利用喷射液束冲刷、冷却和电解作用在线去除再铸层。因此，喷射液束电解—激光复合加工的机理主要包括激光对材料的热、力作用机理和电解液束对材料的电化学反应机理。本章将通过激光打孔作用机理和电解加工作用机理的分析，基于温度场和电场理论，建立喷射液束电解—激光复合加工数学模型，并通过计算机模拟和试验验证，揭示复合加工的作用机理。

### 5.1 激光打孔机理

激光打孔的过程是一个激光和物质作用的物理过程，其中，存在着许多不同的能量转换过程，包括反射、吸收、气化、辐射和热扩散等，它是由激光光束特性(激光的波长，脉冲宽度，聚焦状态等)和材料诸多的物理特性决定的。将激光聚焦加热工件，在激光焦点附近被照射材料上形成上万摄氏度的高温，使材料瞬时熔化或气化，由于熔体温度的不断升高，同时由于激光脉冲的热冲击作用，材料的气化物夹带着熔化物从熔体底部以极大的压力向外喷射，伴随着爆炸和冲击，于是在被加工零件上形成孔洞。具体过程可以分为以下四个阶段<sup>[36]</sup>：首先是表面加热，聚焦的激光束入射到材料表面，通过菲涅尔吸收机制在材料表面几纳米的厚度内聚集热量，材料吸收激光，激光束的热效应相当于在材料表面的圆形热源，热通量分布由激光束的密度分布决定，传热速度取决于金属表面的吸收率；其次是表面熔化，在激光持续作用下，表面加热到温度接近熔点，材料表面开始熔化；再次是在熔化的基础上，激光的高能量作用下熔化的材料表面开始蒸发，形成蒸气层，即上一章提到的 Knudsen 层，喷出的蒸气粒子加热到一定程度被电离，形成高速膨胀的等离子体；最后，伴随蒸气喷射和等离子体的膨胀，在材料表面产生热冲击力的作用下，大部分材料熔化物向外喷射出来，如图 5.1 所示。

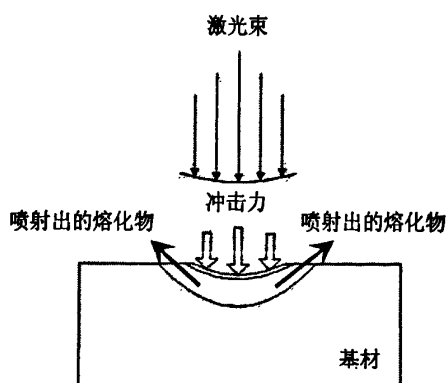


图 5.1 激光作用材料蒸气压力下产生的熔化喷射<sup>[36]</sup>

由上述分析可知,激光打孔的机理是激光对材料的热、力双重效应,高能量密度的激光作用下材料的熔化和气化是热学效应,材料表面气化的蒸气粒子以及蒸气粒子发生电离形成的等离子体向外迅速膨胀形成的对材料的冲击波是力学效应,在这两种效应的作用下,材料大部分以熔化物的状态从激光通道四周排出。

由于激光打孔是一个激光与物质作用的复杂的热—力作用过程,包括激光的技术参数和材料性能范围内的所有作用特性的普遍物理模型是难以建立的。现有的模型一般是从某个特定角度,在一定的理论假设条件下,来描述激光打孔的过程,比如热破坏理论模型<sup>[199]</sup>(Ready,1965)、气体动力学理论模型<sup>[200]</sup>(O.H.Крохин,1970)、熔池动力学理论模型<sup>[36,71]</sup>、温度场理论模型等。

1965年,Ready等人提出了热破坏理论。该理论是属于激光功率密度 $10^6\sim 10^9\text{W/cm}^2$ 的范围之内。根据这种理论的模型,假定:从激光作用区排出的物质是借助于表面气化实现的。对于气化过程的描述是利用在坐标系统里的凝聚相热传导方程式进行,而这坐标系统与正在发生气化的可移动边界有关系。通过该理论估算表明,最佳的气化状态时在比较高的激光功率密度和比较小的脉冲宽度范围内波动。

1970年,O.H.Крохин等人提出了气体动力学模型。这个理论模型描述材料去除的基础是:在处于总能量平衡过程中的凝聚相里,热传导的作用随着辐射通量密度增加而显著降低,而与气化物质运动有密切联系的一些效应,以及气化物质与激光辐射相互作用,在动态过程中起主要作用。该模型利用原子键能与波尔兹曼参数的比值作为气化温度的指标,不仅适用于较低功率密度的激光( $10^6\sim 10^9\text{W/cm}^2$ ),也能解释更高能量密度的激光对材料的作用过程。

熔池动力学理论模型主要的理论假设是把激光作用下材料的熔化部分看成一个熔池。1978年,Shui提出一种连续激光和脉冲激光的组合模型。连续激光维持熔化材料的表面,脉冲激光在一定时间段内提供特定的驱动作用,分析模型假想一个坚硬的活塞向下作用在熔化的表面上充当一个压力的作用。1987年,Chan和Mazumder对表面熔化现象提出一种更切合实际的解释。他们认为熔化发生在脉宽的小片段之中,排除了连续激光的作用。快速的蒸发喷射压力排除液体并引发蒸发。这个特殊模型提出物体的蒸发和熔化时材料去除的主要机制,其中哪一个占优势由材料和激光强度决定。1991年,Zweig提出了一种新的模型,在所打孔的底部,液体的流动呈喷射状;当喷射状的液体到达孔的侧壁时,它被引导到上表面,致使激光打孔过程的典型液体喷射发生。

温度场模型是最常见也是最常用的模型,它把激光束看成热源,把材料看成连续介质,应用宏观热传导方程来描述<sup>[71]</sup>。

温度场常用三种坐标系来描写其空间传播:

$$\text{直角坐标系: } T = T(x, y, z, t) \quad (5-1)$$

$$\text{柱坐标系: } T = T(r, \varphi, z, t) \quad (5-2)$$

$$\text{球坐标系: } T = T(r, \varphi, \theta, t) \quad (5-3)$$

可以根据激光加工光束尺寸大小、材料尺寸和热特性、作用时间等,其温度场可经处理成一维、二维或三维的模型。

激光束对材料导热遵从傅里叶定律,热流矢量 $q$ 和温度梯度 $\nabla T$ 、导热系数 $K$ 成正比,傅里叶定律表达式如下:

$$q = -K\nabla T = -K\left(i\frac{\partial T}{\partial x} + j\frac{\partial T}{\partial y} + k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (5-4)$$

对各向同性材料均匀导热, $K$ 是一常数,与坐标无关。导热方程的一般形式为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q(x, y, z, t) = \rho C\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5-5)$$

对各向同性均匀介质,(5-5)式可以简化为傅里叶方程:

$$\nabla^2 T + q/K = \frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5-6)$$

式中, $\kappa = K/\rho C$ ,为热扩散系数; $\rho$ 为密度; $C$ 为材料热容。

稳定导热时简化为泊松方程:

$$\nabla^2 T + Q/K = \frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5-7)$$

根据激光功率-时间作用谱,可产生不同的激光工艺。影响激光热处理温度场主要有三个因素:功率密度、作用时间、光源尺寸。

激光热源模式根据激光能量的分布,可分为均匀分布的圆形热源和高斯分布的圆形热源。被加工材料假设分为半无限大物体和有限厚平板,针对这两种不同的假设,激光传热的边界条件不同,传热的结果也不同,详细的数值分析如下<sup>[201]</sup>。

假设被加工材料为半无限大物体,在表面热源的作用下,其热传导微分方程和边界条件可写为:

$$\frac{1}{\kappa}\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla^2 T(x, y, z, t) \quad (5-8)$$

$$z = 0, -K\frac{\partial T}{\partial z} = \varepsilon\varphi(\tau)q(x, y) \quad (5-9)$$

$$z = \infty, t = 0, T = 0 \quad (5-10)$$

当加热区的横向尺寸 $r_f$ 远远大于其加热深度 $(\kappa\tau_i)^{1/2}$ 时,则可按一维热传导求解。若激光功率密度在时间上恒定不变且空间分布均匀,则方程组(5-8)~(5-10)有如下解:

$$T(z, t) = \frac{2q_0(\kappa t)^{1/2}}{K}\text{ierfc}\left[\frac{z}{2(\kappa t)^{1/2}}\right] \quad (5-11)$$

式中, $q_0$ 为光斑中心处的最大功率密度乘以被加热材料表面的辐射率 $\varepsilon$ ;ierfc为互补误差函数;

$K$  为导热系数, 且有:

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{\infty} \text{erfc}(s) ds \quad (5-12)$$

其中,  $\text{erfc}(x)$  为误差函数,  $\text{erfc}(x) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \int_x^{\infty} e^{-s^2} ds$ .

当  $z=0$  时, 即在材料表面时, 温度为:

$$T(0, t) = \frac{2q_0}{K} \left(\frac{\kappa t}{\pi}\right)^{1/2} \quad (5-13)$$

此式表明, 对于给定的能量输入  $E = q_0 t$ , 当增加功率密度时, 加热时间或脉冲持续时间必然要缩短。这时, 材料表面的温度会增高, 这就说明使用峰值功率高、持续时间短的脉冲可以更有效地加热表面。

激光与材料相互作用的时间一般都较短, 因为式 (5-11) 意味着热穿透深度为  $(4\kappa t)^{1/2}$ , 可知热穿透深度很小, 加热只是在局部的范围之内。当  $z$  远大于  $(4\kappa t)^{1/2}$  时, 式 (5-11) 中的互补误差函数接近于零, 这表明对于远离材料表面的地方, 温度没有明显提高。因此, 加热时间短将使温度上升只限于表面附近。

若热源的等效功率为  $P_0$ , 其空间分布为高斯分布, 方程组 (5-8) ~ (5-10) 有如下解:

$$T(r, z, t) = \frac{2P_0}{C\rho(4\pi\kappa)^{3/2}} \int_0^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{z^2}{4at} - \frac{r^2}{4a(t+t_0)}\right]}{\sqrt{t(t_0+t)}} dt \quad (5-14)$$

式中,  $t_0$  为热时间常数;  $a$  为激光能量分布因子,  $a = \frac{1}{r^2}$ ; 在  $r$  处,  $q$  值降为  $q_0/e$ 。受热点中心的温度为:

$$T(0, 0, t) = \frac{P_0}{\pi C\rho(4\pi\kappa t_0)^{1/2}} \arctan\left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/2} \quad (5-15)$$

对于高斯分布的热源, 其  $q_0$  与等效功率  $P_0$  的关系为:

$$P_0 = q_0 \pi r^2 = \frac{\pi}{a} q_0 \quad (5-16)$$

假设: 被加工材料为有限厚平板, 在表面热源的作用下, 其热传导微分方程和边界条件可写为:

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla^2 T(x, y, z, t) \quad (5-17)$$

上表面边界条件为:

$$-K \frac{\partial T}{\partial t} = \varepsilon \varphi(t) q(x, y), z = 0 \quad (5-18)$$

下表面有热量损失, 故边界条件为:

$$-K \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_1 T, z = h \quad (5-19)$$

式中,  $h$  为板厚,  $\alpha_1$  为板材下表面的热传导系数, 它决定热损耗率。

对于均匀分布的激光功率来说, 上述方程组的解为:

$$T(z, t) = \frac{2q_0(\kappa t)^{1/2}}{K} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{(2n+1)h-z}{2(\kappa t)^{1/2}} + \operatorname{ierfc} \frac{(2n+1)h+z}{2(\kappa t)^{1/2}} \right\} \quad (5-20)$$

表面温度为:

$$T(0, t) = \frac{q_0 t}{\rho C h} - \frac{q_0 h}{K} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\kappa n^2 \pi^2 t / h^2) \right\} \quad (5-21)$$

激光光源为均匀分布的圆形热源作用下的有限厚平板的温度场分析如下: 设激光束总功率为  $P_0$ , 并聚集在一个圆形面积  $\pi r_f^2$  的光斑上。假定材料所吸收的热量是均匀加热了底面积为  $\pi r_f^2$  和高度为  $h$  的圆柱, 圆柱体内热导率为  $\infty$ , 即圆柱体内各点温度相同。其热量由此圆柱均匀地向周围分布, 采用极坐标表示相应的温度场:

$$T(r, t) = \frac{-\varepsilon P_0}{\pi^2 r_f K h} \int_0^{\infty} [1 - \exp(-\kappa u^2 t)] \times \left[ \frac{J_0(ur)J_1(ur_f) - J_0(ur_f)J_1(ur)}{u^2 [J_0^2(ur_f) + J_0^2(ur)]} \right] du \quad (5-22)$$

式中,  $J_0$  和  $J_1$  分别为一阶和二阶贝塞尔函数。

当  $\frac{r_f^2}{\kappa t} \ll 1$  时, 式(5-22)可简化为:

$$T(r, t) = \frac{\varepsilon P_0}{4\pi K h} \left[ \ln\left(\frac{4\kappa t}{c r^2}\right) + \frac{r_f^2}{2\kappa t} \ln\left(\frac{4\kappa t}{c r^2}\right) + \frac{1}{4\kappa t} (r_f^2 + r^2 - 2r_f^2 \ln \frac{r_f}{r}) \right] \quad (5-23)$$

式中, 常数  $c = 1.781$ 。

当  $\frac{r_f^2}{\kappa t} \ll 1$ , 式(5-22)可改写为:

$$T(r, t) = \frac{\varepsilon P_0}{\pi K h r_f^{1/2}} \left(\frac{\kappa t}{r}\right)^{1/2} \left[ \operatorname{ierfc} \left( \frac{r-r_f}{2(\kappa t)^{1/2}} \right) - \frac{(3r+r_f)(\kappa t)^{1/2}}{4r_f r} \times \operatorname{ierfc} \left( \frac{r-r_f}{2(\kappa t)^{1/2}} \right) + \dots \right] \quad (5-24)$$

激光光源为高斯分布的圆形热源作用下的有限厚平板的温度场分析如下: 由方程组 (5-19) ~ (5-21), 可得解析解如下:



$$T(r,t) = \frac{g_0 d^2}{4hK} \left[ -E_i \left( -\frac{\left(\frac{r}{d}\right)^2}{1 + \frac{4kt}{d^2}} \right) + E_i \left( -\frac{r^2}{d^2} \right) \right] \quad (5-25)$$

式中,  $d = 1.33r_f$ ,  $g_0$  为  $r = 0$  处的热源强度,  $E_i$  是指数积分, 且  $E_i(-x) = \int_{\infty}^x (e^u/u) du$ 。

## 5.2 电解加工机理<sup>[46]</sup>

电解加工又称电化学加工, 是利用阳极溶解的原理并借助于成型阴极将工件按一定的形状和尺寸加工成形的一种加工工艺方法。

图 5.2 为电解过程示意图, 图中显示金属铁电解的过程, 它由电解质溶液、直流电源、连接电源正极的工件阳极、连接电源负极的工具阴极组成。当接通电源后, 电解反应并未开始就发生, 只有当电压升高到临界值(分解电压)后, 电解过程才开始, 在阴极处开始有气泡生成, 在阳极处开始有电解产物出现。

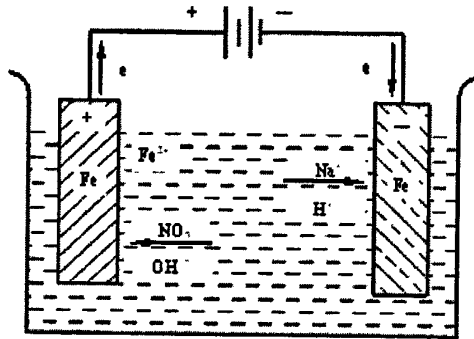
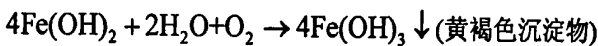
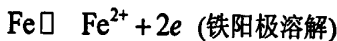


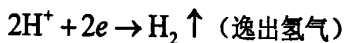
图 5.2 电解过程示意图

对于上述电解过程的电极反应, 即在阴极和阳极的“电极/溶液”界面上发生的电化学反应可用下列电极反应方程式描述:

阳极一侧:



阴极一侧:



由上述方程式可以看出, 在阳极, 铁失去电子被氧化, 发生阳极溶解的氧化反应; 在阴极, 氢离子得到电子被还原, 发生还原反应; 这就是电解加工的阳极溶解原理。

电极加工的理论基础是 1834 年法拉第发现的金属阳极溶解基本定律, 即法拉第定律, 该

定律揭示了电解加工的工艺规律。

对于电解加工，如果阳极只发生阳极溶解而没有其它物质析出，则根据法拉第定律，阳极溶解的金属质量为：

$$M = kQ = kIt \quad (5-26)$$

式中， $M$  为阳极溶解的金属质量； $k$  为单位电量溶解的元素质量，称之为元素的质量电化当量； $Q$  为通过两相界面的电量； $I$  为电流强度； $t$  为加工时间。

由式 (5-26) 可推出阳极溶解的金属体积为：

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{k}{\rho} It = \omega It \quad (5-27)$$

式中， $V$  为阳极溶解金属的体积； $\rho$  为金属的密度； $\omega$  为单位电量溶解的元素体积，即元素的体积电化当量。

实际电解加工过程中阳极金属的溶解量并不和理论的计算量相同，通常是理论计算量会大于实际的溶解量，极少数情况也会发生实际溶解量大于理论计算量的情况。其原因是在理论计算时，采用了“阳极只发生确定原子溶解而没有其它物质析出”这一假设，而实际加工情况是：

- 1) 实际溶解的原子价比计算用的原子价要高或低；
- 2) 除金属溶解外还有一些副反应消耗了一部分电流；
- 3) 金属有时在电解加工过程中由于材料组织不均匀或金属材料与电解液的匹配不当发生剥落而不是完全由金属均匀溶解所致。

为了表示这个实际和理论的差别，引入电流效率概念来表示实际溶解阳极金属所耗用的电量对通过阳极总电量的有效利用率。电流效率  $\eta$  定义为：

$$\eta = \frac{M_{\text{实际}}}{M_{\text{理论}}} \quad (5-28)$$

影响电流效率的因素有：电流密度，电解液的种类、浓度及温度等工艺条件。

由式 (5-27) 和 (5-28) 可以推出实际电解加工中阳极的溶解速度表达式：

$$v_a = \eta \omega i \quad (5-29)$$

式中  $v_a$  为阳极金属被加工表面法线方向上的溶解速度， $i$  为电流密度。这是电解加工工艺计算的一个基本表达式。

电解加工间隙中，阴极与阳极之间具有高速流动的电解液。在直流加工电源的作用下，阴、阳极之间保持一定的电位，间隙电解液中有相应的电流通过，即在间隙电解液中形成了一个电场。由于电解加工的外加电源在所研究的间隙电场之外，因此根据电学理论，将间隙电场视为无源的稳恒电场，假设电解液各向同性，由电场理论可知，其电位分布符合拉普拉斯方程，

即:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5-30)$$

在三维坐标系统中, 式 (5-30) 表示:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5-31)$$

其电流密度可由电场强度来计算:

$$i = \kappa_e E_e \quad (5-32)$$

其中  $\kappa_e$  为电解液的电导率, 电场中各点的电场强度等于该点电位梯度矢量的负值, 即:

$$E_e = -\frac{d\phi}{dn} \quad (5-33)$$

再考虑边界条件: 将阴、阳极表面各视为不同电位的等位面, 即:

$$\begin{cases} \text{阳极面上: } \phi_a = U \\ \text{阴极面上: } \phi_c = 0 \end{cases} \quad (5-34)$$

联立上述方程, 可求得间隙电场中各点的电流密度, 再代入式 (5-29) 可获得各点的电解加工速度。

### 5.3 喷射液束电解—激光复合加工机理

喷射液束电解—激光复合加工是一个集光能、热能、机械能、电化学能、热化学能等多种能量组合作用去除材料的复杂物理过程。其中, 去除材料的作用主要包括激光在电解液约束层中对材料的热—力作用和喷射电解液束作用下材料的电化学阳极溶解作用, 另外高速喷射液束对材料的冲刷、冷却作用也有助于去除材料。

第三章已经对激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应进行了实验研究, 研究表明毫秒级激光在电解液中对金属靶材的冲击力达到 10MPa 数量级, 短距离电解液内激光对金属靶材的冲击力是空气中的三倍以上。在喷射液束电解—激光复合加工中不仅有激光对靶材的瞬时冲击力, 稳定的高速喷射电解液束对材料表面也具有持续的冲击力。

总体而言, 激光在电解液束中传输时能量有所衰减, 对材料的热效应有所减弱, 但激光与电解液束对材料的力学作用高于空气中相同能量激光对材料的作用力。因此, 在控制激光于电解液束中传输距离的前提下, 激光在电解液束中完全可以对材料进行加工。

喷射液束电解—激光复合加工采用低频率 (5Hz) 的脉冲激光, 在 0.2ms 或者更短的 20ns 的单个脉冲激光作用时, 材料表面迅速熔化并气化, 形成蒸气粒子, 并部分电离生成等离子体, 由蒸气粒子、等离子体对材料的反冲作用力、蒸气和等离子体向外迅速膨胀压缩周围电解液而形成的冲击力、材料表面电解液空化气泡溃灭的射流冲击力以及喷射液束对材料表面的持续持

续冲击力等综合力学作用下，蒸气层下方的材料熔化物高速喷射出来。

在单脉冲激光作用的时间内：

从微观物理作用过程分析，在激光聚焦辐照下，金属表面的自由电子由于吸收激光的能量大量被激发，难以满足电解加工中电极反应需要的金属自由电子的定向运动和参与。

从宏观物理作用过程分析，材料表面的蒸气粒子和等离子体的以超音速膨胀压缩周围电解液，致使材料加工表面出现瞬间的缺液区，由于电解液与金属表面瞬间隔离，致使金属/电解液界面上进行电极反应难以进行。

从去除材料的能量作用来分析，在 0.2ms 或者更短的 20ns 时间内，激光作用的能量显然远远大于电化学作用的能量。

综合以上分析，可以认为在单脉冲激光作用时间内以激光作用去除材料，电解加工作用可以忽略。

在脉冲间隔（一个脉冲与下一个脉冲之间的时间窗）时间段内，喷射液束电解加工起主导作用，主要用于去除前一个脉冲激光作用后加工区的再铸层，并用于光饰加工孔壁和孔底。

因此，以一个脉冲开始至下一个脉冲开始为一个周期，在脉冲宽度时间内是激光束在电解液约束层中对材料进行加工；在脉冲间隔时间内是喷射液束电解加工。喷射液束电解—激光复合加工的在一个作用时间周期内的去除材料的过程如图 5.3 所示。

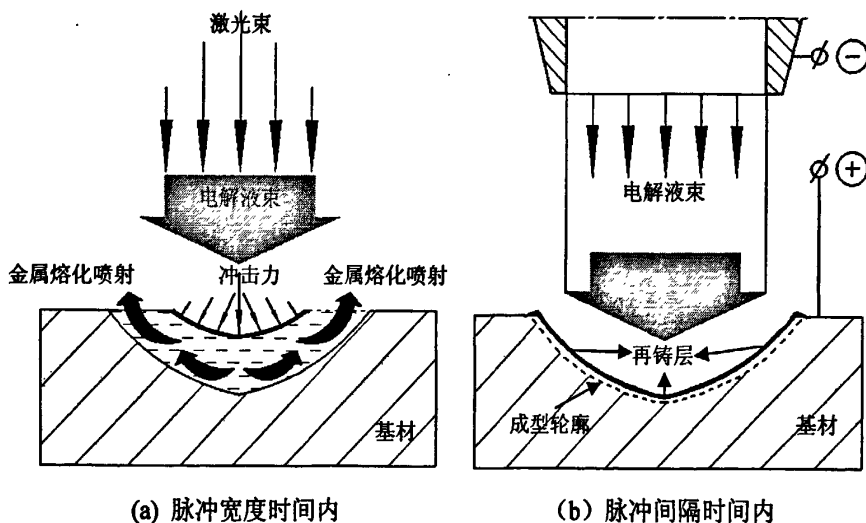


图 5.3 喷射液束电解—激光复合加工作用过程

#### 5.4 喷射液束电解—激光复合加工理论模型

根据对喷射液束电解—激光复合加工机理的分析，可知喷射液束电解—激光复合加工区域既存在脉冲激光作用下的温度场，又始终是个电场。在脉冲宽度时间内，以激光对材料的热—力作用为主，在脉冲间隔时间内，以喷射电解液束作用下材料的电化学阳极溶解作用为主。

按照上述机理分析, 将  $T = 1/f$  ( $f$  为激光重复频率) 作为一个作用周期, 脉冲宽度  $\tau$  时间内, 只考虑激光能量  $E_{\text{Laser}}$  的作用, 而电解作用  $I_{\text{ECM}}$  主要在脉冲间隔时间内体现, 如图 5.4 所示。

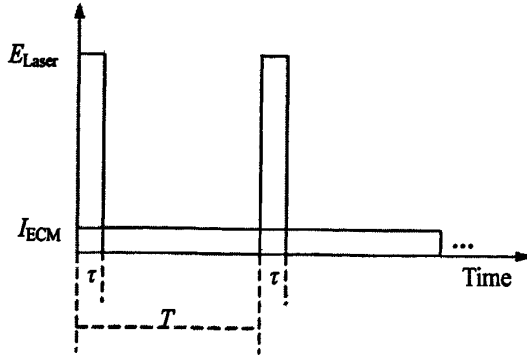


图 5.4 喷射液束电解—激光复合加工中能量作用的有效时间示意图

对于脉冲宽度时间内激光在喷射电解液中对材料的加工, 提出如下假设:

- 1) 加工材料为各向同性均匀介质, 材料的物理热参数为常数, 不随温度变化;
- 2) 材料的去除主要是熔化金属在蒸气粒子、等离子体对材料的反冲作用力、蒸气和等离子体向外迅速膨胀压缩周围电解液而形成的冲击力、材料表面电解液空化气泡溃灭的射流冲击力以及喷射液束的持续压力等综合力学作用下被去除。
- 3) 对于金属的气化去除忽略不计。

将聚焦的激光光束作为热源, 把材料作为连续介质, 热源对于熔化金属的热传导呈线性关系, 建立了二维柱坐标温度场, 如图 5.5 所示。

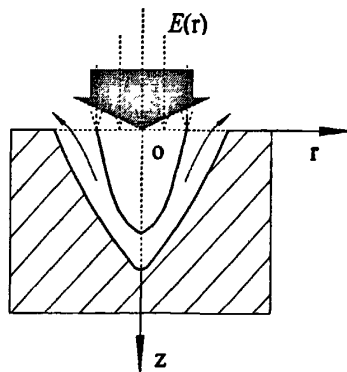


图 5.5 喷射电解液束下激光作用材料的热温度场简化模型

根据本章第一节提到的激光加工温度场理论模型, 建立热传导方程:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \varepsilon \alpha E(r) e^{-\alpha z} \quad (5.36)$$

式中,  $\rho$  为密度;  $C$  为热容;  $K$  为热导率;  $\alpha$  为材料对激光的吸收系数;  $E(r)$  为激光辐照能

量密度。

激光束能量呈高斯分布，在喷射电解液束中传输长度为  $x$ ，激光在电解液中的衰减系数为  $\mu(\lambda)$ ，则：

$$E(r) = E(0)\exp(-r^2/\omega_0^2)\exp[-\mu(\lambda)x] \quad (5.37)$$

由于存在喷射电解液束对加工区的连续冷却，因此加工界面不仅受到激光辐射的加热，同时有对喷射电解液束的对流换热和热辐射。针对上述分析，确定边界条件<sup>[202-204]</sup>：

$$-K\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = h_c(T - T_0) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (5.38)$$

$$T(z=0, t=0) = T_0 \quad (5.39)$$

式 (5.38) 中， $h_c$  为对流换热系数； $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数； $T$  为激光作用后的材料表面温度； $T_0$  为室温。

由式 (5.36) ~ (5.39) 组成了喷射液束电解—激光复合加工脉冲宽度时间内温度场的数学模型。利用有限差分法对上述方程组求解，可得出单脉冲作用下的温度场，以材料的熔化温度等温线为加工孔的截面轮廓。

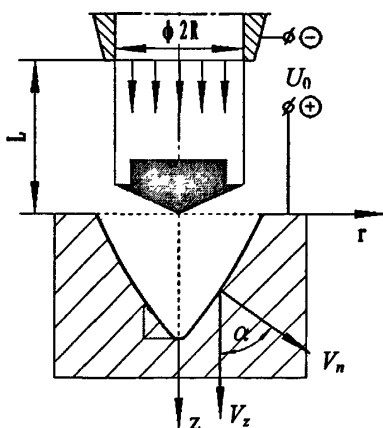


图 5.6 喷射液束电解加工电场简化模型

对于脉冲间隔时间内的喷射电解加工，提出如下假设：

- 1) 加工过程及整个加工间隙中，电解液各向同性，即各处电导率和电流效率都相同，均分别保持为常数；
- 2) 加工过程中，阳极/电解液界面和阴极/电解液界面上的电极电位均分别视为常数；
- 3) 阳极电化学反应服从法拉第定律；
- 4) 加工间隙中的电场视为无源稳恒电流场。

针对喷射液束电解—激光复合加工脉冲间隔时间内的电流场建立了简化模型，如图 5.6 所

示。阴极喷嘴的孔径为  $2R$ ；喷嘴与材料表面固定距离为  $L$ ；直流稳压电源正极接工件、负极与喷嘴相连。

根据本章第二节的电解加工电场理论模型，可知该电场的电位分布符合拉普拉斯方程，即：

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5-40)$$

根据法拉第定律，图 5.6 所示的阳极溶解速度  $V_n$  表示为：

$$V_n = \eta \omega i_a \quad (5-41)$$

$z$  向的边界移动速度  $V_z$  可表示为：

$$V_z = \frac{V_n}{\cos \alpha} \quad (5-42)$$

由几何关系可知，

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial r}\right)^2} \quad (5-43)$$

电流密度与电场强度的关系如下：

$$i_a = \kappa_e E_a \quad (5-44)$$

式中， $\kappa_e$  是电解液电导率。阳极某点电场强度等于该点电位梯度：

$$E_a = |\nabla \phi|_a \quad (5-45)$$

归纳以上关系式可得如下描述电解加工间隙中电位分布的数学模型方程组：

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5-46)$$

$$\text{阳极表面边界条件: } \begin{cases} \phi = U_0 \\ \frac{\partial z_a}{\partial t} = \kappa_e \eta \omega \left| \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_a \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial r}\right)^2} \end{cases} \quad (5-47)$$

$$\text{阴极表面边界条件: } \phi = 0 \quad (5-48)$$

通过上述方程组，可以求出前一个脉冲激光作用后，在脉冲间隔时间内截面轮廓各点电解加工去除量，从而得到喷射液束电解—激光复合加工一个周期时间内的二维加工结果。

喷射液束电解—激光复合加工整个过程实质上是一个激光加工与电解加工反复迭代的过程，通过上述温度场和电场交互进行的计算，最终得到加工结果。

## 5.5 喷射液束电解—激光复合加工的数值模拟与试验验证

根据上节建立的喷射液束电解—激光复合加工理论模型，首先确定温度场模拟和电场模拟的相关参数，包括测定喷射液束电解加工  $\eta\omega-i$  曲线；其次利用有限元软件模拟脉冲激光作用下的温度场和脉冲间隔时间内喷射液束电解的电场，通过对数值结果反复迭代，得到最终的模

拟结果；最后通过试验验证，对模拟结果与试验结果进行对比分析，从而揭示复合加工的机理。

### 5.5.1 喷射液束电解—激光复合加工数值模拟的参数确定

#### 5.5.1.1 喷射液束电解 $\eta\omega$ — $i$ 关系曲线测定

在数值模拟之前，要确定相关参数，对于喷射液束电解加工而言，用以计算阳极溶解速度的  $\eta$ 、 $\omega$  都是与实际加工过程中工艺条件密切相关的参数，故通常把对  $\eta\omega$  的乘积作为一个工艺数据考虑，将其称为实际体积电化当量。通过试验测得数据并绘出  $\eta\omega$ — $i$  关系曲线，该曲线是喷射液束电解—激光复合加工数值模拟的重要参数。但是，喷射液束电解加工与传统成型阴极进给方式的电解加工不同，目前还没有关于其  $\eta\omega$ — $i$  规律的资料可查。因此，本文对常用的不锈钢材料 1Cr18Ni9Ti 在喷射液束电解加工中的  $\eta\omega$ — $i$  特性曲线进行实验测定。

实验在喷射液束电解—激光复合加工试验系统上进行，采用的喷嘴孔直径为 0.5mm，喷嘴端面绝缘。电解液是质量浓度 18% 的  $\text{NaNO}_3$  溶液，柱塞泵提供的液压为 1MPa。电源为直流稳压稳流电源 (0~50V, 0~5A)。试件采用 0.5mm 厚的不锈钢薄片。

实验利用稳流电源对不同的试件施加不同的加工电流 (0.05A~0.25A)，每个试件在不同位置加工 10 次，每次加工时间相同 (10s)。为确保精确得到电解加工的实际质量，试件在加工前、后都经过 H66025T 超声清洗机的清洗，待晾干后用 METTLER AE240 电子秤进行精确测量。通过试验前、后试件的质量差与试验次数的比值计算，可以得到不同加工参数下的工件的实际去除量  $M_{\text{实际}}$ 。根据实际去除量  $M_{\text{实际}}$ 、相应的加工电流、加工时间以及实际加工的盲孔的孔径可以计算出实际的  $\eta\omega$  并由此得到实际喷射液束电解加工中的  $\eta\omega$ — $i$  特性曲线。图 5.7 是实验测定的喷射液束电解加工的  $\eta\omega$ — $i$  曲线。该曲线与传统电解的  $\eta\omega$ — $i$  曲线相似，在低电流密度区的  $\eta$  较低，随着电流密度的增加，电流效率  $\eta$  也随着增加，并逐渐趋缓，呈水平趋势，这是  $\text{NaNO}_3$  电解液具有的非线性特性。另外，实验结果并没有出现像电液束加工中实际去除量超过理论去除量的情况，这是由于本文喷射液束电解施加的电压远低于一般电液束加工的电压值，在加工中没有出现辉光放电现象，其材料去除仍然遵循法拉第定律。因此，可以利用试验测定的  $\eta\omega$ — $i$  曲线通过法拉第定律来计算低电压喷射液束电解加工的实际去除量。

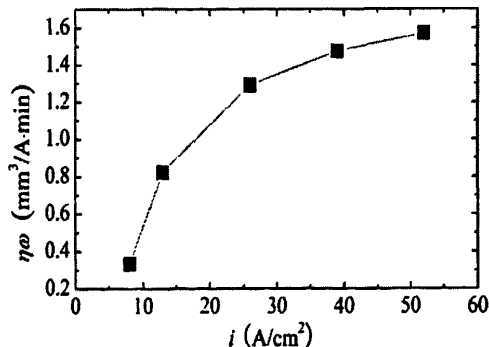


图 5.7 喷射液束电解加工  $\eta\omega$ — $i$  特征曲线关系图



## 5.5.1.2 材料热物理参数与激光光束物理参数

不锈钢材料 1Cr18Ni9Ti 的热物理参数和激光光束的物理参数分别见表 5.1 和表 5.2。不锈钢与电解的对流换热系数  $h_c$  为  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ ；绿光激光在不锈钢表面的辐射率  $\varepsilon$  约为 0.4，红外激光在不锈钢表面的辐射率  $\varepsilon$  约为 0.2，不锈钢对绿光激光的吸收系数在  $10^8 \text{ m}^{-1}$  数量级，而对红外激光的吸收系数在  $10^6 \text{ m}^{-1}$  数量级；质量浓度 18% 的  $\text{NaNO}_3$  电解液的电导率为  $12.2 (\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ 。

表 5.1 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的热物理参数<sup>[205]</sup>

温度 $T/\text{C}$	热导率 $K/\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	热容 $C/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	熔点 $T_m/\text{C}$
20	14.1	502		
200	17.6	523		
400	20.5	607	7900	1400
800	26.4	644		
1200	31.9	669		

表 5.2 激光束物理参数

激光参数	红外激光	绿光激光
波长(nm)	1064	532
脉冲能量 (mJ)	~150	~300
脉宽(ns)	20	$2\times 10^5$
频率(Hz)	10	5
高斯半径 (mm)	0.5	
光斑直径 (mm)	0.1 (F100)	0.15 (F150)

## 5.5.2 喷射液束电解—激光复合加工的数值模拟流程

本文采用 ANSYS 有限元分析软件来进行脉冲激光作用下的温度场模拟和喷射液束电解中的间隙电场模拟。ANSYS 软件的求解器可以对电磁场、温度场、流场等多种物理场进行有限元分析<sup>[204]</sup>。它的后处理器包括一个通用后处理器和一个时间历史后处理器。通用后处理器可以用来查看求解的结果，并对数据进行选择、分类、运算或图形显示；时间历史后处理器可用于

检查在一个时间段内的结果。因此，本论文选用该软件进行喷射液束电解—激光复合加工模型的数值模拟。喷射液束电解—激光复合加工是两种不同能量的加工方法的复合，本文建立的喷射液束电解—激光复合加工模型的显著特点是：时域上，将激光加工的温度场与电解加工的电流场分开独立计算；空域上，每个时间段的激光作用的结果与电解加工的结果进行迭代。该模型数值模拟的流程图如图 5.8 所示。

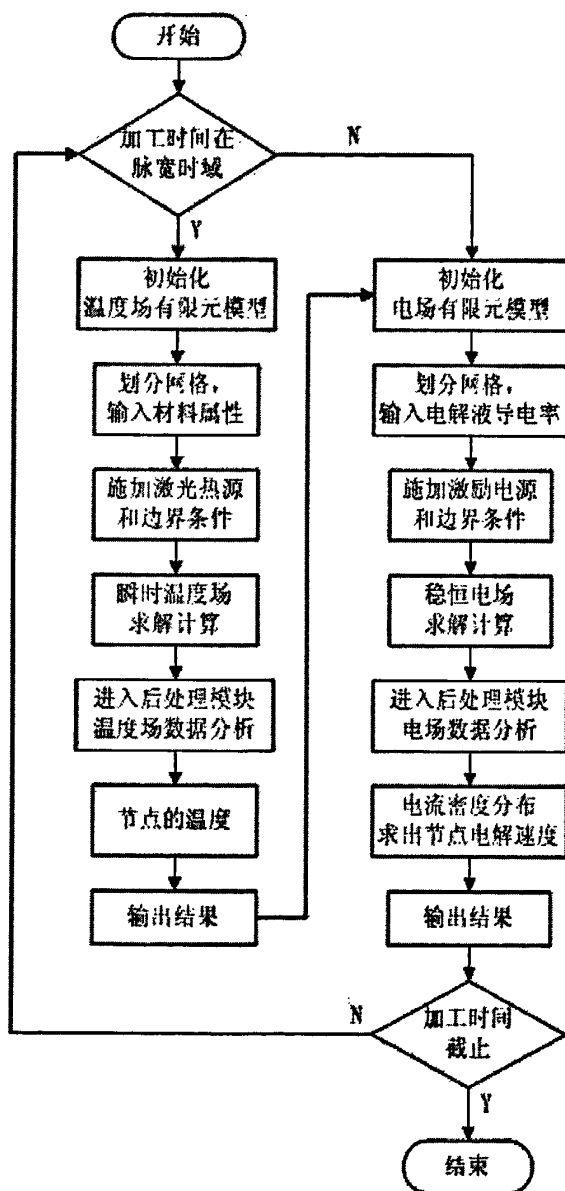


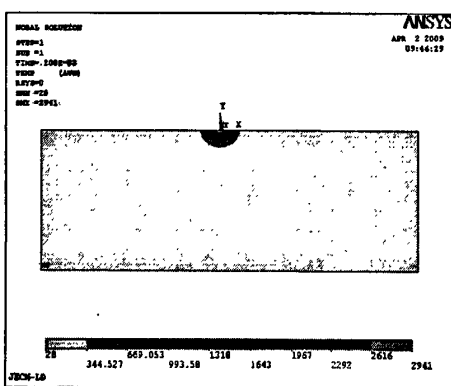
图 5.8 喷射液束电解—激光复合加工数值模拟流程图

本文以毫秒级绿光激光在一个迭代周期的数值模拟为例，来说明喷射液束电解—激光复合加工的模拟过程。

图 5.9 是在 0.2ms 脉冲宽度时间内单脉冲能量 200mJ 的绿光激光作用后的温度场模拟结果, 图 (a) 为云图, 图 (b) 为节点的温度数据表。通过各个节点的温度数据将温度值在熔点温度以上的单元视为已经在激光作用下熔化, 并被去除。因此, 通过温度场的模拟结果可以获得单脉冲激光作用后工件新的边界 (去除材料熔化的部分), 这一新的边界又是接下来脉冲间隔时间内喷射液束电解间隙流场的初始化条件。

图 5.10 是在 0.2ms~0.2s 的脉冲间隔时间内外加电压 40V 的喷射液束电解间隙流场的模拟结果, 图 (a) 为云图, 图 (b) 为节点的电场强度数据表。由喷射液束范围内的各节点的电场强度可以求得各个节点的电流密度, 根据电流密度值从喷射液束电解加工的  $\eta\omega-i$  曲线确定实际体积电化学当量, 然后可以计算出边界每个节点的阳极溶解速度, 再与加工时间相乘可以得到各个节点的实际位移。因此, 通过喷射电解加工间隙电场的模拟结果可以获得脉冲间隔时间内电解加工后工件新的加工边界, 也是下一个脉冲激光作用温度场的初始边界。

依此类推, 将脉冲激光的温度场作用结果和喷射液束电解的间隙电场的作用结果反复迭代, 即可获得最终的二维复合加工结果。

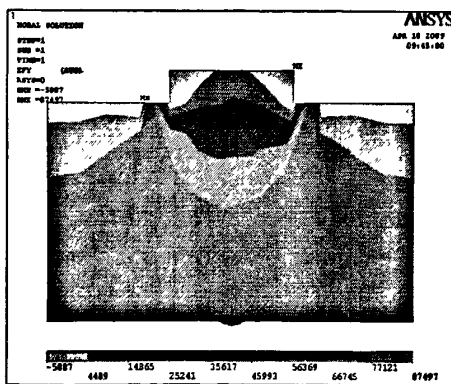


(a) 云图

NODE	TEMP
55	291.62
56	885.05
57	1268.9
58	1687.5
59	2166.3
60	3685.9
61	5127.9
62	5485.0
63	5127.9
64	3686.0
65	2166.0
66	1688.0
67	1269.8
68	884.58
69	291.62

(b) 节点温度数据表

图 5.9 脉冲宽度时间内绿光激光作用下温度场的模拟 (200mJ, 0.2ms)



(a) 云图

NODE	EPX	EPY	EPZ	EPEN
67	-11.327	31238.	0.0000	31238.
69	-15.810	33253.	0.0000	33253.
71	-22.332	35151.	0.0000	35151.
73	-46.783	36482.	0.0000	36482.
75	-231.45	37554.	0.0000	37555.
78	6648.6	26782.	0.0000	27595.
81	-6483.2	25641.	0.0000	26448.
229	4151.7	39801.	0.0000	39251.
230	3454.4	36842.	0.0000	36287.
231	-2896.9	27144.	0.0000	27298.
232	-2563.9	48465.	0.0000	48539.
233	7817.8	51567.	0.0000	52842.
234	-18419.	26392.	0.0000	28374.
235	18263.	29153.	0.0000	30987.
236	4881.2	38216.	0.0000	38496.
237	2887.6	65941.	0.0000	65971.
238	-5668.2	22485.	0.0000	23111.
239	-9545.1	41481.	0.0000	42273.
240	6288.2	22755.	0.0000	23788.

(b) 节点电场强度数据表

图 5.10 脉冲间隔时间内喷射液束电解间隙电场的模拟 (40V, 0.2ms~0.2s)

### 5.5.3 喷射液束电解—激光复合加工的数值模拟结果与试验验证分析

基于上述喷射液束电解—激光复合加工数值模拟的流程，针对毫秒绿光激光和纳秒红外激光的复合加工进行了模拟和试验验证。

图 5.11 为喷射液束电解—绿光激光复合加工数值模拟结果与试验结果的对比图。试验结果是利用 ADE 公司的 MicroXAM3D Profiler 形貌仪测量所得，图 5.12 即是利用该仪器对加工盲孔的扫描所测的形貌图。加工参数如下：绿光激光单脉冲能量 200mJ、频率 5Hz、电解加工电压 40V、喷嘴孔径为 0.5mm、喷嘴与工件加工间隙 0.8mm、加工时间为 10s。

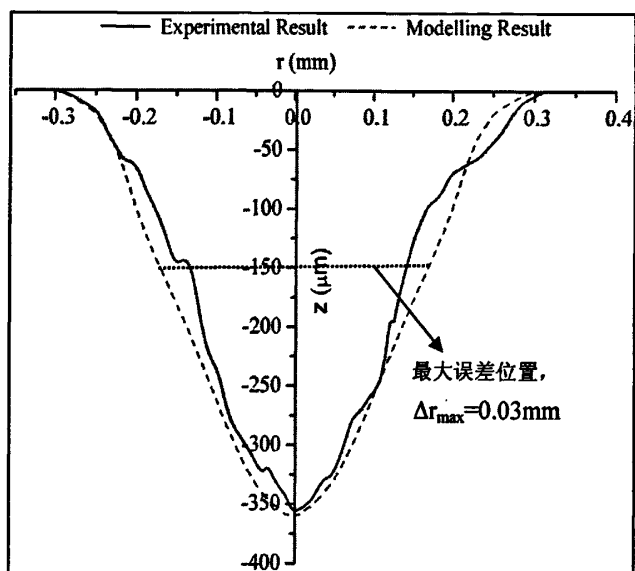


图 5.11 喷射液束电解—绿光激光复合加工数值模拟结果与试验结果对比

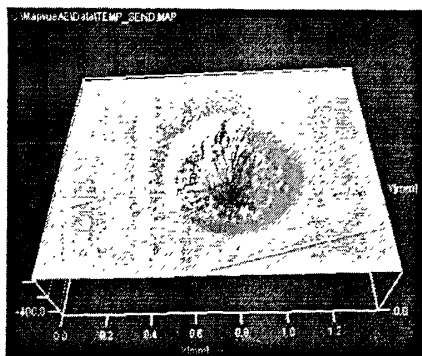


图 5.12 喷射液束电解—绿光激光复合加工试验结果形貌

由图 5.11 可以看出，试验结果与模拟结果在孔底和入口处较好吻合，最大误差出现在孔的中间段，试验结果与模拟结果的平均最大半径误差  $\Delta r_{\max}=0.03\text{mm}$ 。这一现象的直接原因可以解释为激光能量分布的锐化，即激光光斑外围能量衰减比中心能量衰减更为严重。进一步探究激光能量分布变化的原因，可以从喷射液束电解—激光复合加工原理的分析来解释。喷射液束电

解—激光复合加工中，除去第一个脉冲外，其余的脉冲激光作用前，材料表面喷射液束电解下的阳极溶解反应，溶解产物为不溶性沉淀物，这些电解产物大部分被高速喷射液束带走，残存的一些电解产物在喷射液束的压力下分布在加工区的周围，导致高斯分布外围能量相对较低的激光被电解产物的微粒散射而能量会进一步衰减，图 5.13 以示意图的形式说明了电解加工不溶性产物对激光能量分布的影响。这与喷射液束电解—激光复合加工的机理有关，由于采用直流电源，从脉间时间段内的电解加工转到脉宽时间内的激光加工中间没有过渡缓冲时间，使得加工区的残留电解产物影响了激光光斑的能量分布，而这正是导致上述试验结果与模拟结果存在差异的根本原因。

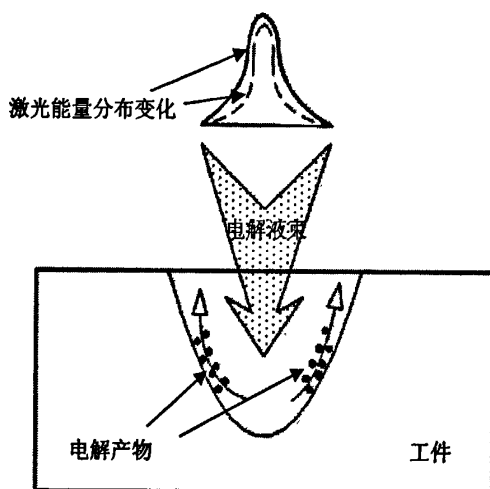


图 5.13 喷射液束电解加工产物对激光能量分布的影响示意图

图 5.14 为喷射液束电解—红外激光复合加工数值模拟结果与试验结果的对比图。加工参数如下：红外激光单脉冲能量 100mJ、频率 10Hz、电解加工电压 30V、喷嘴孔径为 0.7mm、喷嘴与工件加工间隙 1.5mm、加工时间为 10s。

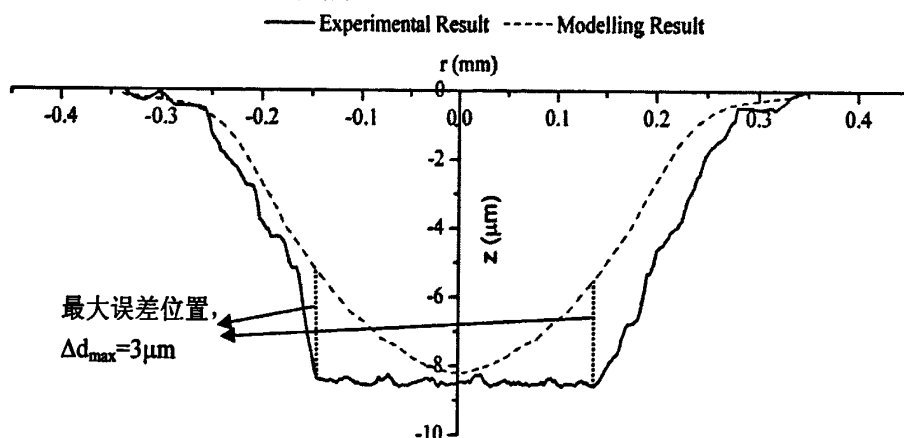


图 5.14 喷射液束电解—红外激光复合加工数值模拟结果与试验结果对比

由图 5.14 可以看出，应用红外纳秒激光 (100mJ, 10Hz) 的喷射液束电解—激光复合加工的盲孔深度很浅，只有 10 $\mu\text{m}$  左右。对比试验结果和模拟结果可以发现，试验结果的孔底比较

平整,且整体轮廓大于模拟结果,试验结果与模拟结果最大孔深误差  $\Delta d_{\max}=3\mu\text{m}$ 。出现这一现象的原因可以解释为:一方面是在喷射液束电解—激光复合加工中喷射液束电解作用不仅仅是去除再铸层,而且进一步去除材料;另一方面是激光作用加工材料有助于提高电解加工的定域性和加工效率,这正是绪论中提到的激光辅助电解加工的原理。

另外,随着加工孔深的增加,孔的侧壁逐渐变陡,即理论模型中孔的截面轮廓线的法向与  $z$  轴的夹角  $\alpha$  逐渐增大,当  $\alpha$  接近  $90$  度时,侧壁的电解加工去除材料量难以用本文建立的理论模型来计算。但是,喷射液束电解与传统的电解加工不同,没有进给的成形工具阴极,侧壁处的电位梯度矢量是指向喷嘴端面,该矢量方向几乎与  $z$  轴平行,这使得侧壁处法向方向上的电场强度较小,该处的电解作用相对较弱。因此,在本文所采用的低电压 ( $30\sim 50\text{V}$ ) 条件下,侧壁的电解加工材料去除量未计入理论值,而在实际加工中,侧壁处的电解作用是存在的,并且是有利于复合加工去除再铸层的。图 5.11 和图 5.14 中孔的入口的数值模拟结果与试验结果的对比也说明了这一点。

根据上述对喷射液束电解—激光复合加工的数值模拟和试验验证分析,揭示了该复合加工的机理是将激光加工和电解加工进行复合,以脉冲宽度时间内的激光作用快速去除材料,辅以脉冲间隔时间内的电解加工去除再铸层。

## 5.6 本章小结

本章在对激光打孔机理和电解加工机理分析的基础上,详细阐述了喷射液束电解—激光复合加工的机理,同时基于温度场和电场理论,建立了喷射液束电解—激光复合加工二维数学模型。根据建立的数学模型,利用有限元分析软件 ANSYS 进行了数值模拟,并与试验结果进行了对比分析,从理论层面揭示了喷射液束电解—激光复合加工的作用机理。

本章的相关研究结果的学术论文已经被《Chinese Journal of Aeronautics》(SCI 源期刊)录用。

## 第六章 喷射液束电解—激光复合加工的工艺试验研究

上一章对喷射液束电解—激光复合加工机理进行了理论研究,建立了数学模型、进行了数值模拟和试验验证,通过上述研究理论上证实了喷射液束电解—激光复合加工的机理是以脉冲激光加工为主快速去除材料,同时利用喷射液束电解加工去除激光加工表面的再铸层。本章分别利用纳秒红外激光、毫秒绿光激光进行喷射液束电解—激光复合加工盲孔试验和通孔试验,从试验角度来研究喷射液束电解—激光复合加工的机理和基本工艺规律,为完善该工艺技术和改进试验装置提供试验依据,为工程应用创建基础条件。

### 6.1 试验参数的确定

根据第二、三章对激光在电解液中的衰减特性的研究以及激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应的研究,由试验系统所使用的 XGL-1 型脉冲 Nd:YAG 激光器选择纳秒红外激光和毫秒绿光激光,对喷射液束电解—激光复合加工工艺进行试验研究。

本文加工试验件的材料选择工程中常用的不锈钢材料 1Cr18Ni9Ti 和镍基高温合金材料 GH3044。其中,1Cr18Ni9Ti 具有优良的抗氧化均匀腐蚀性,具有良好的延性和韧性以及冲压性和拉深性能,该材料广泛应用于航空、航天、化工等各领域<sup>[206]</sup>;GH3044 是固有强化镍基抗氧化合金,在 900℃ 以下具有高的塑性和中等的热强性,并具有优良的抗氧化性和良好的冲压、焊接工艺性能,适宜制造在 900℃ 以下、长期工作的航空发动机主燃烧室和加力燃烧室零部件以及导向叶片等<sup>[207]</sup>,它的化学成分见表 6.1。

根据《航空制造工程手册——发动机叶片工艺》中涡轮工作叶片和涡轮导向器叶片冷却小孔的工艺要求<sup>[42]</sup>,即孔径:  $\phi 0.3 \sim \phi 0.7\text{mm}$ ,孔深: 0.5~5mm 的要求,结合本文采用的平均功率不到 3W 的激光器,确定加工试件的厚度取 0.5mm。

表 6.1 镍基高温合金材料 GH3044 化学成分

元素	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Fe	Mn	Si	P	S
								不大于				
含量, %	≤0.1	23.5~26.5	余	13.0~16.0	≤1.5	≤0.5	0.3~0.7	4	0.5	0.8	0.013	0.013

本文所构建的喷射液束电解—激光复合加工试验系统采用环形腔喷射结构的喷射装置,将激光在电解液束中传输的长度控制在 9mm 左右,从而减少激光在聚焦传输过程中的能量损失。喷嘴端面与工件表面的距离控制在 1.5mm 以内。

根据第四章对喷射液束电解—激光复合加工的特点分析,该加工方法采用的电解加工电源与电液束加工所采用的 200V 以上的高电压电源不同,本文使用的是低压直流电源,输出电压: 0~50V; 输出电流: 0~5A。电解液采用精细过滤后的工业  $\text{NaNO}_3$  电解液,浓度为 18%。红外激光和绿光激光在该电解液中的衰减系数分别为  $34.78\text{m}^{-1}$  和  $3.38\text{m}^{-1}$ 。

## 6.2 喷射液束电解—纳秒红外激光复合加工盲孔试验

基于自行研制的喷射液束电解—激光复合加工试验系统,利用纳秒红外激光对 0.5mm 厚的不锈钢薄片进行了打孔试验,将喷射液束电解—激光复合加工与空气中激光打孔以及喷射液束中激光打孔这三种工艺做对比分析。试验条件为:激光单脉冲能量 100mJ、脉宽 20ns、重复频率 10Hz; 喷射电解液束压力 1.5MPa; 电解加工电压 30V; 喷嘴孔径为 2mm 和 0.7mm 两种规格,喷嘴端面与工件表面距离为 1.5mm; 聚焦透镜焦距 150mm; 加工时间统一为 10s。

图 6.1~图 6.3 分别是空气中激光打孔、喷射液束中激光打孔、以及喷射液束电解—激光复合加工打孔的整体形貌和局部显微放大照片。图 6.4 是空气中激光打孔和喷射液束电解—激光

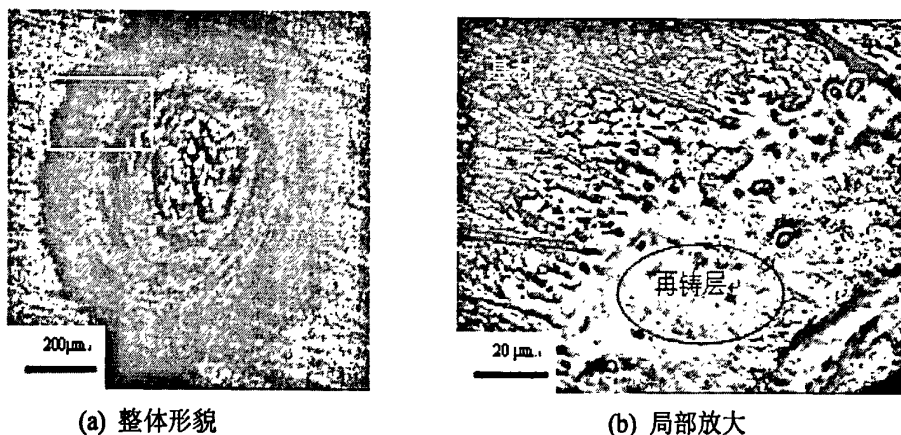


图 6.1 不锈钢材料空气中纳秒红外激光打孔的形貌

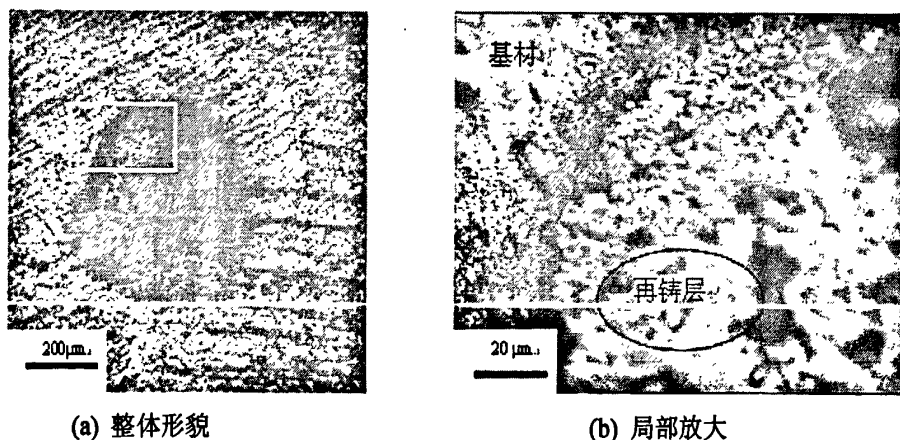


图 6.2 不锈钢材料喷射液束中纳秒红外激光打孔的形貌(喷嘴孔径 2mm)



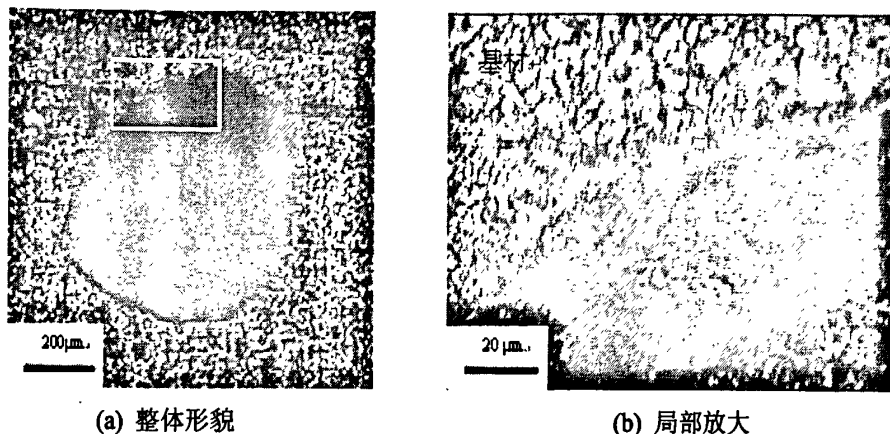


图 6.3 不锈钢材料喷射液束电解—纳秒红外激光复合加工打孔的形貌（喷嘴孔径 2mm）

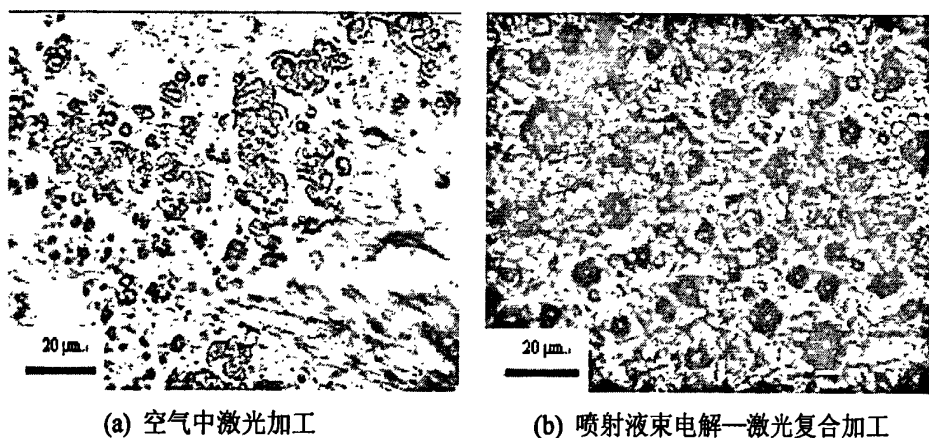


图 6.4 不锈钢材料空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的底部形貌对比

复合加工打孔的底部形貌对比。通过对比图 6.1~图 6.3 以及图 6.4 可以看出：激光在空气中打的孔外围存在明显的热影响区，孔边缘和底部堆积了大量的熔化再凝固金属层，即再铸层；激光在喷射液束中打的孔由于激光在电解液中作用于工件的力学效应以及喷射液束的冲刷和冷却作用，使得孔周围的热影响区明显减少，而孔底仍然存在再铸层；喷射液束电解—激光复合加工打的孔整体轮廓较好，无热影响区，孔边缘、孔底的再铸层基本被去除。

由图 6.3 的整体形貌可以看出直径 2mm 的喷嘴形成的喷射电解液束对工件的电解加工作用不仅去除激光加工区的再铸层，同时对孔周围的基材也存在电解腐蚀作用。因此，改用直径 0.7mm 的喷嘴来控制复合加工中非加工区的电解腐蚀，图 6.5 是采用直径 0.7mm 的喷嘴的喷射液束电解—激光复合加工打孔的整体形貌和局部放大图。

对比图 6.3 和图 6.5 的整体形貌，可以发现，采用直径 0.7mm 喷嘴的喷射液束电解—激光复合加工明显改善了电解杂散腐蚀现象，这是因为小直径喷嘴形成的电解液束对加工区的电解加工面积减小，有利于改善复合加工入口处的表面质量。

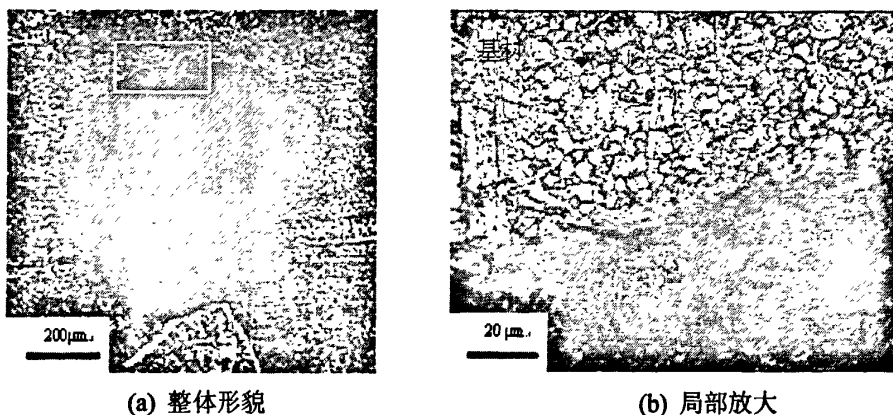


图 6.5 不锈钢材料喷射液束电解—纳秒红外激光复合加工打孔形貌 (喷嘴孔径 0.7mm)

图 6.6 是利用 ADE 公司的 MicroXAM3D Profiler 形貌仪对喷射液束电解—激光复合加工 (JECM-LBM) 与空气中激光打孔 (LBM) 以及喷射液束中激光打孔 (Jet-LBM) 这三种加工工艺打出的孔沿径向扫描所得到的截面图。

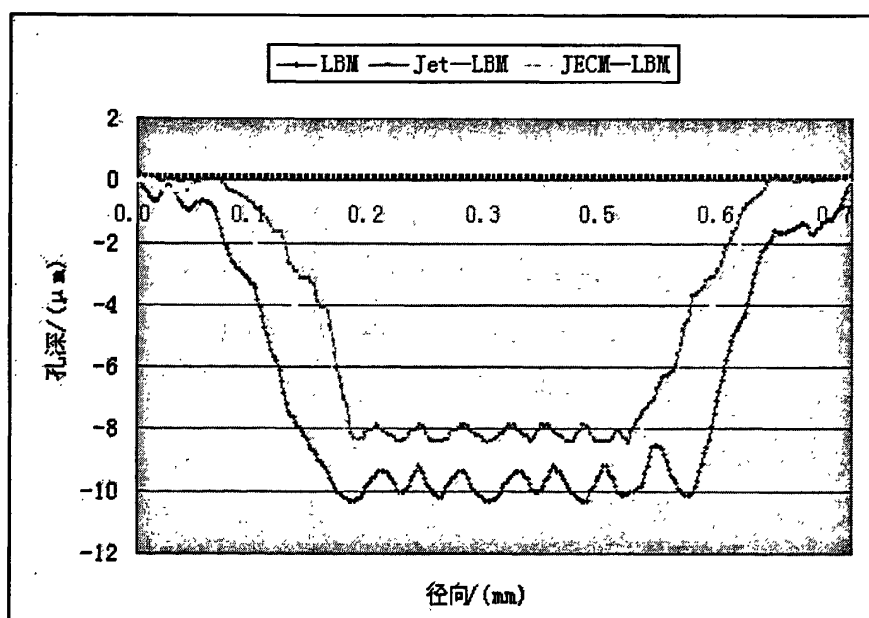


图 6.6 三种不同激光加工工艺打孔形貌径向扫描截面轮廓图

由图 6.6 可看出，空气中激光打出的孔底部凹凸不平，主要原因是孔底再铸层堆积不均；喷射液束中激光打出的孔底仍有不平，而喷射液束电解—激光复合加工工艺打出的孔底轮廓几乎成一直线，表明孔底平缓光滑，从孔深方向的轮廓变化可以判断出再铸层厚度减薄 90% 以上。从截面轮廓比较可看出，激光在空气中打出的孔径、孔深都大于在喷射液束中打的孔，原因是由于激光在电解液中传输能量衰减；而喷射液束电解—激光复合加工打出孔深、孔径略大于喷射液束中激光打的孔，原因可以解释为喷射液束电解的扩孔作用，即加工过程中阳极电化学溶

解作用不仅去除了激光加工出现的再铸层，同时也会进一步溶解基材。这充分说明：在喷射液束电解—激光复合加工过程中，是激光加工占主导作用去除工件材料；电解作用仅起辅助作用，用以在线去除再铸层，同时还光饰加工激光所加工的孔底、孔边。

基于不锈钢材料的加工试验结果，使用相同工艺参数对 0.5mm 厚的镍基高温合金试件进行了空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工的对比试验研究。图 6.7 和图 6.8 分别是镍基高温合金材料空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工的整体形貌和局部显微图片。通过两图的比较，可以明显看出，空气中激光打孔存在明显的再铸层和热影响区，而喷射液束电解—激光复合加工打孔效果较好，没有热影响区，未见再铸层。

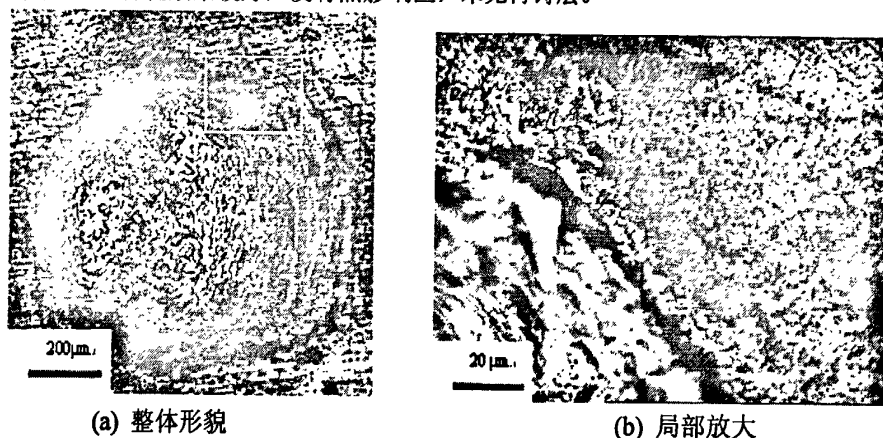


图 6.7 镍基高温合金材料空气中纳秒红外激光打孔形貌

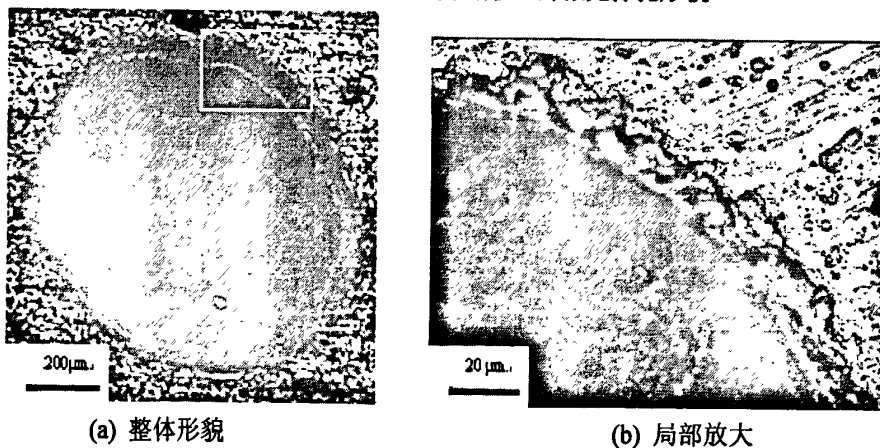


图 6.8 镍基高温合金材料喷射液束电解—激光复合加工打孔形貌（喷嘴孔径 2mm）

上述试验研究通过对喷射液束电解—激光复合加工、空气中激光加工和喷射液束中激光加工这三种加工工艺加工的盲孔的整体形貌、孔边缘形貌、孔底形貌以及孔的截面的轮廓的对比分析，表明喷射液束电解—激光复合加工成功将激光加工与电解加工进行复合，证实了该复合加工的机理是以激光加工的热—力作用机理为主，同时以电解加工的电化学作用机理去除激光加工表面的再铸层。喷射液束电解—纳秒红外激光复合加工打孔的入口周围没有热影响区，没有溅射物，孔的底部没有明显的再铸层，与预先分析的加工效果相同。

### 6.3 喷射液束电解—毫秒绿光激光复合加工通孔试验

由上一节的盲孔加工试验可以看出：喷射液束电解—激光复合加工打孔的效果优于传统空气中激光加工，孔的整体轮廓较好，入口周围无热影响区，无熔化溅射物，孔底的再铸层厚度减薄 90%以上。由于本文采用的激光器能量较低，纳秒红外激光仅能加工出盲孔，本节将利用毫秒绿光激光来进行通孔加工试验，以进一步研究、比较喷射液束电解—激光复合加工和传统激光加工的特性。

试验条件为：激光单脉冲能量 200mJ、脉宽 0.2ms、重复频率 5Hz；喷射电解液束压力 1MPa；电解加工电压 40V；喷嘴孔径为 0.5，喷嘴端面与工件表面距离为 0.8mm；聚焦透镜焦距 100mm。

图 6.9 和图 6.10 分别是利用毫秒绿光激光对不锈钢材料 (1Cr18Ni9Ti) 进行空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的入口、出口整体形貌。对比图 6.9 和 6.10 可以看出：激光在空气中打的孔入口和出口外围存在明显的热影响区和呈飞溅状的凝固金属熔滴；而喷射液束电解—激光复合加工打的孔整体轮廓较好，孔入口和出口周围没有热影响区，没有溅射物，只是在入口周围存在电解的过切现象。

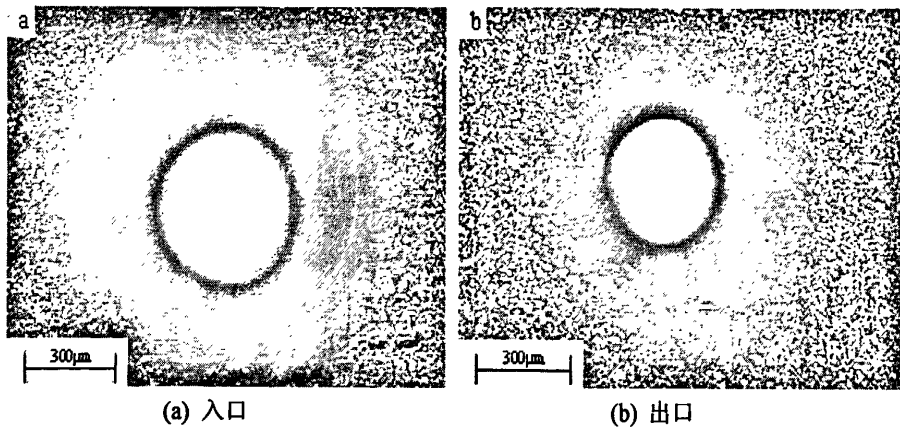


图 6.9 不锈钢材料空气中绿光激光打孔整体形貌 (加工时间为 10s)

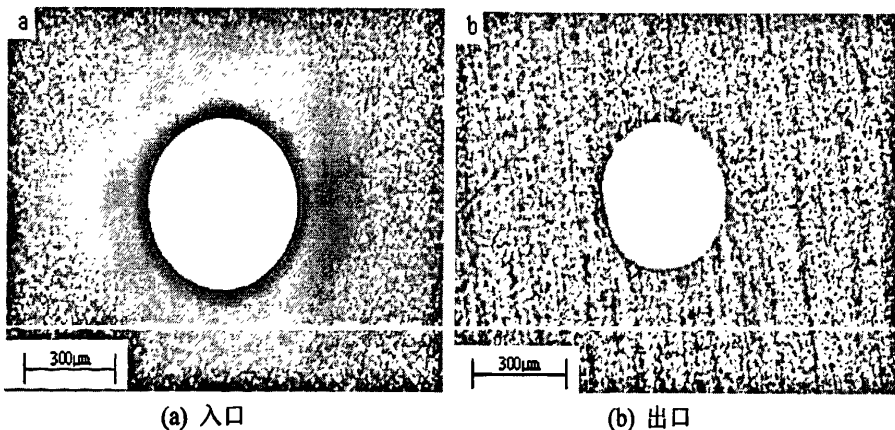


图 6.10 不锈钢材料喷射液束电解—激光复合加工打孔整体形貌 (加工时间为 20s)

图 6.11 是对应图 6.9 和图 6.10 中空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的出口局部形貌对比。由这两种加工方法打孔的出口形貌对比可以看出，喷射液束电解—激光复合加工打孔的品质明显优于空气中激光打孔，孔的出口轮廓光滑，周围没有金属融化堆积物，证明应用毫秒绿光激光的喷射液束电解—激光复合加工中，从加工孔的入口到出口这一范围内，喷射电解液束对加工区的电解作用一直有效，不仅去除再铸层而且具有光饰孔壁的效果，对比图 6.9 和图 6.10 这两种加工工艺打孔的出、入口的圆度也说明了复合加工中电解作用的效果。

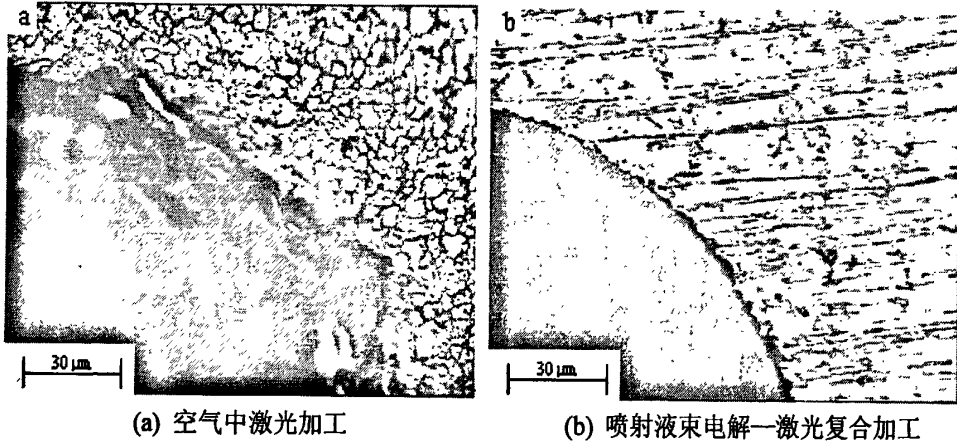


图 6.11 不锈钢材料空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的出口局部形貌对比

图 6.12 是对应图 6.9 和图 6.10 中空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的孔壁局部形貌对比，图中的剖面是利用电火花线切割将加工的孔割开获得的。由于电火花线切割中电极丝与工件产生火花放电，与空气中激光加工相似，其加工表面也具有再铸层，因此切割路线选择偏心的一侧，并采用较好的电参数以控制火花放电对孔壁表明质量的影响，最后取截面积更大的那一面来观察孔壁的形貌，上述措施的根本目的是保护观察面一侧的孔壁，尽量保持其原始形貌，从而可以获得更为准确的观察结果，以便科学地比较分析喷射液束电解—激光复合加工和传统空气中激光加工这两种加工方法的优劣，得出的结论更有说服力和可信度。

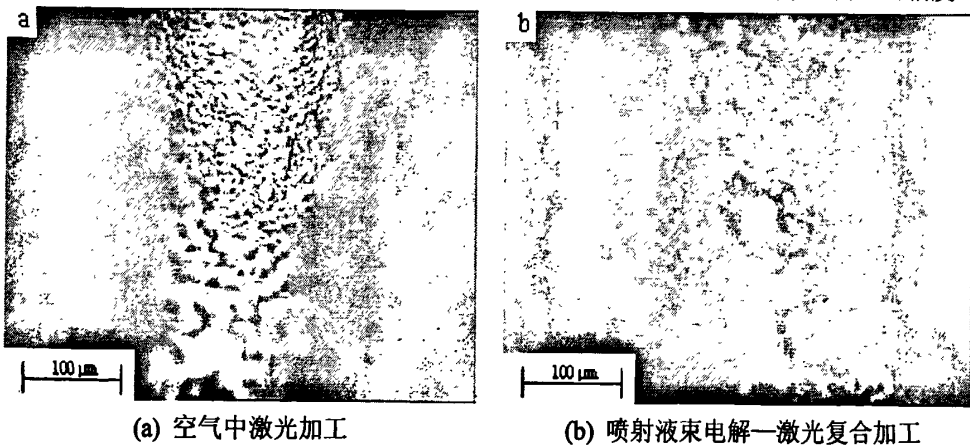


图 6.12 不锈钢材料空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的孔壁局部形貌对比

由图 6.12 可以看出,空气中激光加工打孔的孔壁具有明显的再铸层,而应用绿光激光的喷射液束电解—激光复合加工的孔壁与前文应用纳秒红外激光的盲孔加工的孔底一样,大部分再铸层被去除。

在上述对不锈钢材料的加工试验的基础上,使用相同工艺参数对 0.5mm 厚的镍基高温合金试件进行了试验研究。图 6.13 和图 6.14 分别是镍基高温合金材料空气中激光打孔和喷射液束电解—激光复合加工打孔的入口和出口的整体形貌。

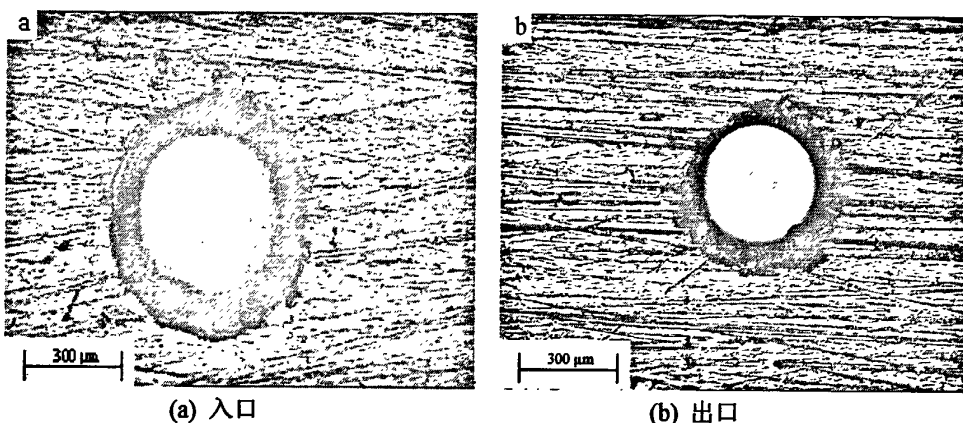


图 6.13 镍基高温合金材料空气中绿光激光打孔整体形貌 (加工时间为 10s)

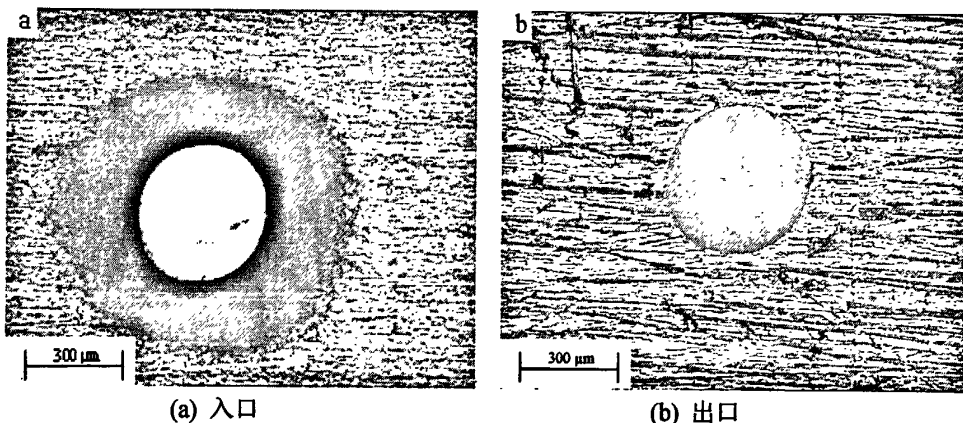


图 6.14 镍基高温合金材料喷射液束电解—激光复合加工打孔整体形貌 (加工时间为 20s)

通过图 6.13 与图 6.14 的比较可以得出与不锈钢材料加工试验相似的结论,即与空气中激光加工相比,喷射液束电解—激光复合加工打孔的质量更好,孔的出、入口的轮廓更光滑,周围没有热影响区,没有溅射物。但是,从入口的形貌来看,电解的过切作用与不锈钢加工相比明显加剧,出现这一现象的主要原因可能是:镍基高温合金材料的实际体积电化当量  $\eta\omega$  比不锈钢高,在相同的电流密度作用下,前者的电解作用效果更显著;另外,因电解液束发散而引起的加工区流场的改变也可能导致上述结果。

以加工效率来比较喷射液束电解—激光复合加工和空气中激光加工,从上述的 0.5mm 厚的

不锈钢和镍基高温合金试件的通孔加工时间来看,前者的效率要低于后者,通过对加工前后的试件质量的测量发现前者的材料去除率是后者的70%左右,这一试验现象表明:绿光激光不仅在电解液束的传输过程中能量存在衰减,同时在加工区残存的电解产物对激光的能量也有弱化作用,这与上一章的理论分析相吻合。

上述内容通过孔的整体形貌和局部形貌的对比,定性分析了喷射液束电解—激光复合加工和传统激光加工的表面质量,结果验证了喷射液束电解—激光复合加工可以获得比传统激光加工更好的加工品质。下面,本文将对0.5mm厚不锈钢试件分别进行喷射液束电解—激光复合加工打孔、空气中激光打孔以及喷射液束中激光打孔,然后再测量这三种方法加工孔壁的再铸层厚度并比较分析,以此来揭示喷射液束电解—激光复合加工去除再铸层的效果。

为了研究上述三种工艺打孔孔壁再铸层的变化,需要制备便于扫描电镜观察的试样。首先,利用相同脉冲能量的绿光激光对0.5mm厚不锈钢试件进行三种不同工艺的打孔,其他相关的工艺参数与上述通孔试验相同;其次利用瑞士AGIE公司的AGIECUT CHALLENGE ECUT 2F慢走丝线切割机将上述加工的孔割开;然后依次采用180#、260#、500#的三氧化二铝水磨砂纸将割开的试样表面磨光以消除线切割留下的加工痕迹,接着使用800#和1000#的金相砂纸磨平表面,并依次利用丙酮和酒精进行超声清洗;最后将试样胶接在金属基座上,利用日本JEOL电子公司的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察测定孔壁的再铸层厚度。

图6.15~图6.17分别是空气中激光打孔、喷射液束中激光打孔、以及喷射液束电解—激光复合加工打孔的孔壁扫描电镜(SEM)照片。

由图6.15可以看出,空气中激光打孔孔壁上粘附有最大厚度达55 $\mu\text{m}$ 、平均厚度约为50 $\mu\text{m}$ 的再铸层,再铸层与基材之间存在明显的界限,并且再铸层上生有微裂纹。与空气中激光加工相比,喷射液束中激光打孔孔壁的再铸层的最大厚度为30 $\mu\text{m}$ 、平均厚度约为20 $\mu\text{m}$ ,再铸层与基材之间的界限清晰可见,如图6.16所示。这一结果证实了激光在电解液中作用与金属靶材的力学效应以及高速喷射的电解液束对加工区的冲刷和冷却的综合作用能够有效减少再铸层。这也与第三章激光在电解液中作用金属靶材的力学效应的研究结果相吻合。

对比图6.16和图6.17可以看出,与喷射液束中激光打孔相比,喷射液束电解—激光复合加工打孔的孔壁未见明显的再铸层,只是在孔壁局部边缘残留少许熔化金属物的凝固痕迹,其尺寸范围也不超过5 $\mu\text{m}$ 。这充分说明:喷射电解液束作用下,工件阳极的电化学溶解作用是喷射液束电解—激光复合加工去除再铸层的最终决定因素。

通过上述对三种不同加工工艺打孔孔壁再铸层厚度的定量分析,全面揭示了喷射液束电解—激光复合加工去除再铸层的效果。

总之,本节喷射液束电解—毫秒绿光激光复合加工通孔的试验研究,通过定性的形貌比较和定量测量再铸层厚度的对比分析,以工艺试验证实了喷射液束电解—激光复合加工的可行性,揭示了其激光加工与电解加工的复合作用机理和加工效果。

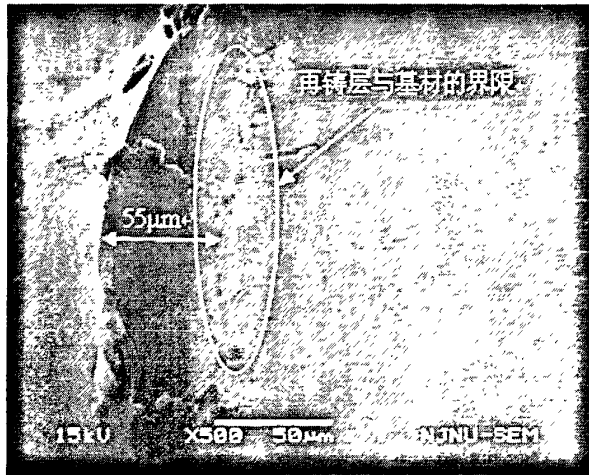


图 6.15 不锈钢空气中激光打孔孔壁的 SEM 照片

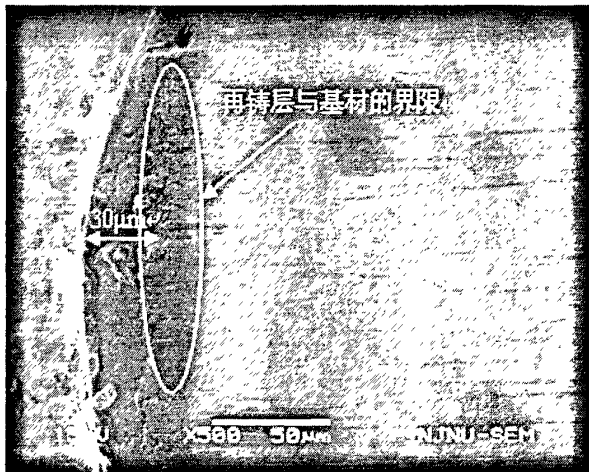


图 6.16 不锈钢喷射液束中激光打孔孔壁的 SEM 照片

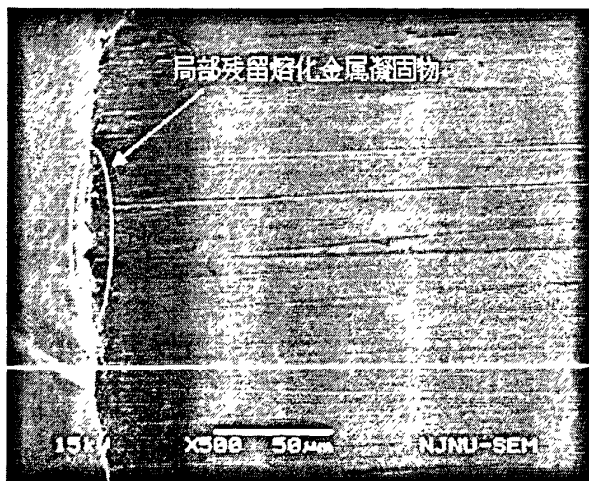


图 6.17 不锈钢喷射液束电解—激光复合加工打孔孔壁的 SEM 照片



## 6.4 喷射液束电解—激光复合加工基本工艺规律

前面两节内容通过试验研究证实了喷射液束电解—激光复合加工的机理是将激光加工和电解加工进行复合，以激光加工的热—力作用快速去除材料，同时以电解加工的电化学阳极溶解作用去除加工表面的再铸层。由此可见，影响喷射液束电解—激光复合加工的工艺参数包括了激光加工参数和电解加工参数，图 6.18 描述了该复合加工的各项工艺参数及其之间的关系。

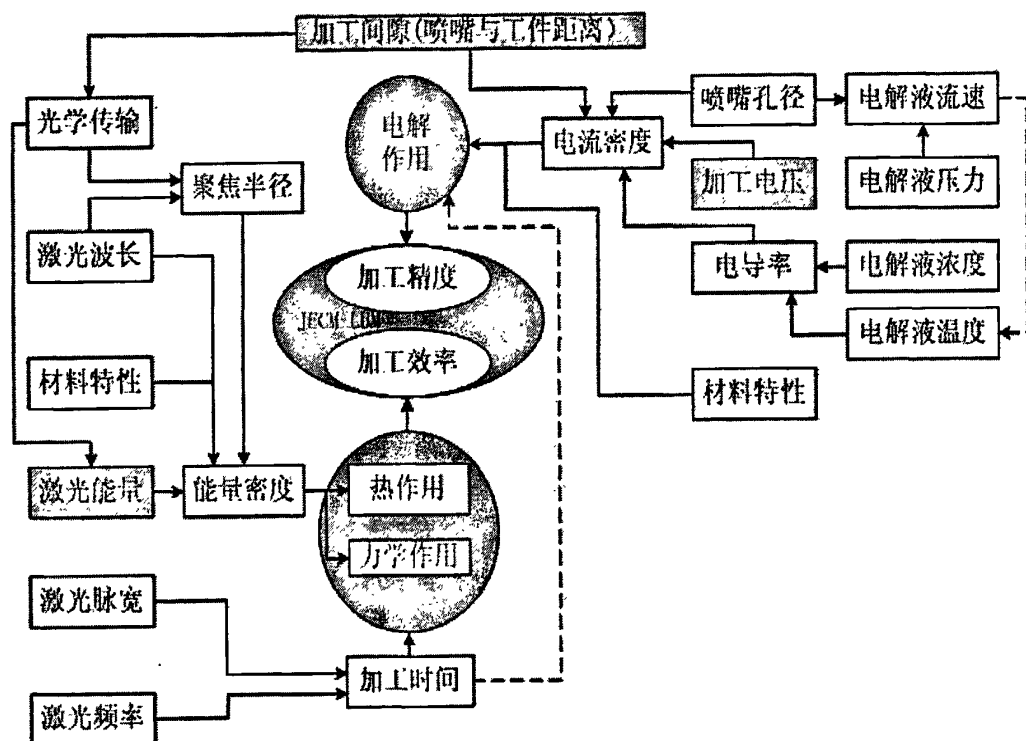


图 6.18 喷射液束电解—激光复合加工工艺参数关系示意图

由图 6.18 可以看出，影响喷射液束电解—激光复合加工效果有两个具体物理参数，一是激光能量密度，它代表了激光加工的作用效果；二是电流密度，它代表了电解加工的作用效果。激光脉冲能量和电解加工电压是上述两个物理参数的决定性加工工艺参数。另外，图 6.18 中的加工间隙指的是喷嘴端面与工件之间的距离，该距离既影响激光在电解液束中传输的能量损失，又影响电解加工的间隙电场分布。因此，本文以 0.5mm 厚不锈钢薄片为加工试件，重点研究激光脉冲能量（Pulse Energy）、电解加工电压（Electrochemical Machining Voltage）、加工间隙（Machining Gap）这三个重要加工参数对加工效果的影响，从而分析总结喷射液束电解—激光复合加工的基本工艺规律。

### 6.4.1 不同工艺参数对加工效率的影响

本文将材料去除率（Material Removal Rate, MRR）作为加工效率的指标，采用以下公式计

算:

$$MRR = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_i}{t} \quad (6-1)$$

其中,  $\Delta m_i$  是第  $i$  次试验所测得的工件材料去除量;  $n$  是试验总次数;  $t$  是加工时间。在整个试验过程中, 试验总次数为 10 次, 加工时间为 10s。

图 6.19 和图 6.20 分别显示了纳秒红外激光和毫秒绿光激光的脉冲能量对喷射液束电解—激光复合加工和空气中激光加工材料去除率的影响。红外激光复合加工的试验条件为: 电解加工电压 30V、加工间隙 1.5mm、喷嘴孔径 0.7mm、电解液压力 1.5MPa。绿光激光复合加工的试验条件为: 电解加工电压 40V、加工间隙 0.8mm、喷嘴孔径 0.5mm、电解液压力 1MPa。

由图 6.19 和图 6.20 可以看出随着脉冲激光能量的增加, 材料去除率呈线性增加趋势, 而对比喷射液束电解—激光复合加工和空气中激光加工材料去除率, 可以发现, 不管是应用纳秒红外激光还是毫秒绿光激光, 喷射液束电解—激光复合加工的材料去除率均小于相同能量下的空

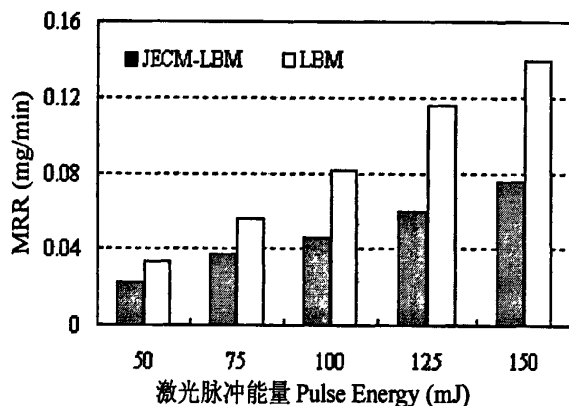


图 6.19 纳秒红外激光脉冲能量对材料去除率的影响

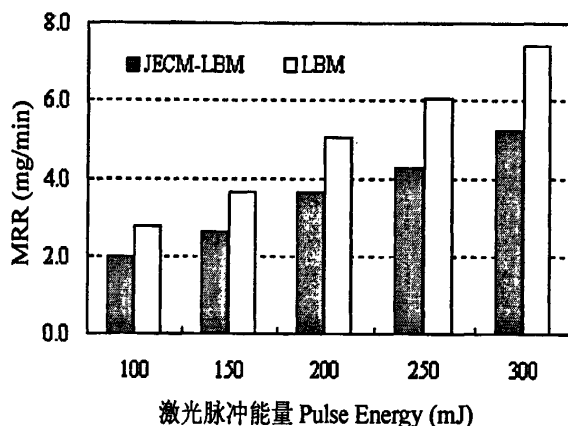
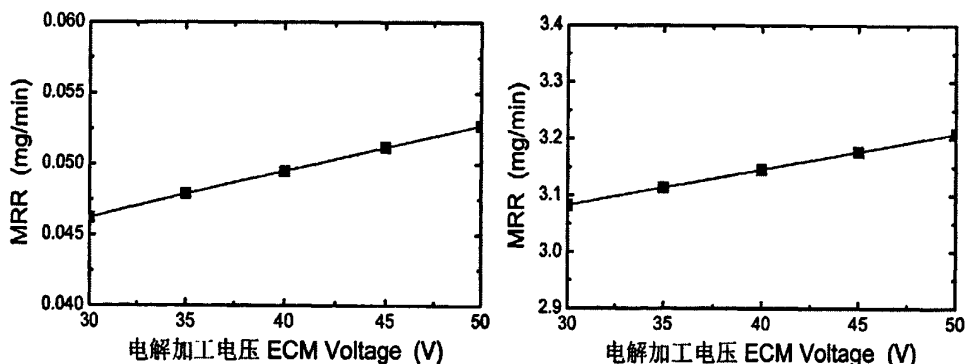


图 6.20 毫秒绿光激光脉冲能量对材料去除率的影响

气中激光加工，这是因为激光在电解液束中传输过程中存在能量衰减。另外，由于绿光激光在电解液中的能量衰减小于红外激光，因此由这两图可以看出单脉冲能量 100mJ 以上绿光激光的复合加工的材料去除率是空气中的 70%左右，而纳秒红外激光不到 50%。另外，由图 6.19 可以看出，随着红外激光能量的增加，复合加工效率与空气中激光加工的效率的比值呈逐渐下降之势，这是因为在低脉冲激光能量的加工条件下，复合加工中电解去除材料的作用与激光去除材料的作用相当，而随着脉冲能量的增加，激光加工的主导作用逐渐体现，因此该比值从最初低能量（50mJ）的 70%降低至 50%。毫秒绿光激光则与纳秒红外激光不同，从低能量到高能量，复合加工与空气中激光加工的效率比值基本稳定在 70%左右，这说明应用绿光激光喷射液束电解—激光复合加工中以激光加工作用为主用于去除材料。

图 6.21 显示了电解加工电压对喷射液束电解—激光复合加工材料去除率的影响。由图可以看出，随着加工电压的增加，电解去除材料的作用加强，材料去除率随之升高，但是增幅很小。在 30~50V 的范围内加工电压对材料去除率的影响远小于激光能量的影响，这充分证明了喷射液束电解—激光复合加工的作用机理。这种现象与加工电流密度的变化也非常吻合，毫秒绿光激光复合加工中，加工电压从 30V 到 50V 的范围内，加工电流密度仅从  $17\text{A}/\text{cm}^2$  增加到  $20\text{A}/\text{cm}^2$ ；而在纳秒红外激光复合加工中，加工电流密度变化极小。这种电流密度变化的差异实质上与加工间隙有关，纳秒红外激光复合加工采用的加工间隙是 1.5mm，而毫秒绿光激光复合加工采用的距离是 0.8mm，由图 6.18 可以看出，随着加工间隙的减小，电解加工电压的变化对材料去除率的影响也随之加大，这是由于加工间隙的缩短增强了电解加工间隙的电场强度，进而增大了电流密度，提高了电解加工的作用。



(a) 纳秒红外激光 (100mJ, 1.5mm)

(b) 毫秒绿光激光 (200mJ, 0.8mm)

图 6.21 电解加工电压对喷射液束电解—激光复合加工材料去除率的影响

图 6.22 是加工间隙对绿光激光的喷射液束电解—激光复合加工材料去除率的影响，激光脉冲能量为 200mJ，电解加工电压为 40V。由图可以看出，随着加工间隙的增加，复合加工的材料去除率随之下降，并且降幅逐渐增大，这一现象与喷射液束电解—激光复合加工机理相吻合，其原因可归结为：一方面激光能量衰减有所增加，另一方面电解加工的电场强度被减弱了。这一双重因素导致加工间隙对材料去除率的影响要高于电解加工电压。

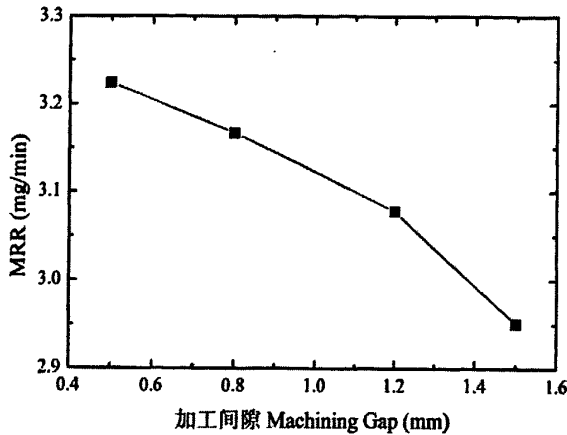


图 6.22 加工间隙对喷射液束电解—绿光激光复合加工材料去除率的影响

上述三种不同工艺参数对喷射液束电解—激光复合加工材料去除率的影响的研究表明：喷射液束电解—激光复合加工的效率低于空气中激光加工，其中绿光激光的复合加工效率为空气中激光加工的 70%左右，而纳秒红外激光复合加工不到空气中激光加工效率的 50%；激光脉冲能量和加工间隙都对复合加工效率具有显著的影响，而电解加工电压对复合加工效率的影响较小。这一结果与该复合加工机理吻合，从对去除材料的作用大小来分析，激光脉冲能量的影响最为突出，电解加工电压的影响最小。而在本文所采用的低能量（平均功率 3W）激光器和低电压电源（50V）的条件下，加工间隙应控制在 1mm 左右，既减少了激光能量损失，又保证了电解加工对加工区的去除再铸层作用。

#### 6.4.2 不同工艺参数对加工精度的影响

对于打孔技术而言，孔的锥度是加工精度的重要指标之一，因此，本文以孔的锥度（Taper）作为加工精度的指标来研究复合加工工艺参数对加工精度的影响。

图 6.23 显示了绿光激光脉冲能量对喷射液束电解—激光复合加工和空气中激光加工打孔锥度的影响。由图可以看出，随着激光脉冲能量的增加，孔的锥度也随之增加，这一现象与激光热—力作用机理有关，过高的功率密度时打孔过程产生过多的蒸气相物质，即蒸汽粒子，这些蒸气粒子对材料加工表面产生强烈的冲击力；激光能量越高，即能量密度越大，在材料加工表面产生的蒸气压力越大，高压蒸气带走的液相物质越多，孔的入口处越大，导致孔的锥度偏大。总体比较而言，喷射液束电解—激光复合加工打孔的锥度要小于空气中激光加工。这可以解释为：一方面是复合加工中激光在传输过程中能量衰减致使作用材料表面的初始能量密度相对较小，从而获得较小的入口；另一方面，电解加工具有对孔壁去除再铸层和光饰的作用，在加工间隙是试件厚度两倍以上条件下，试件的加工表面到背面的区域内的电场强度的相对降幅小于 30%，从而有利于复合加工获得较好的加工精度。综合这两方面因素，表明喷射液束电解—激光复合加工打孔锥度的改善是其复合加工机理决定的。

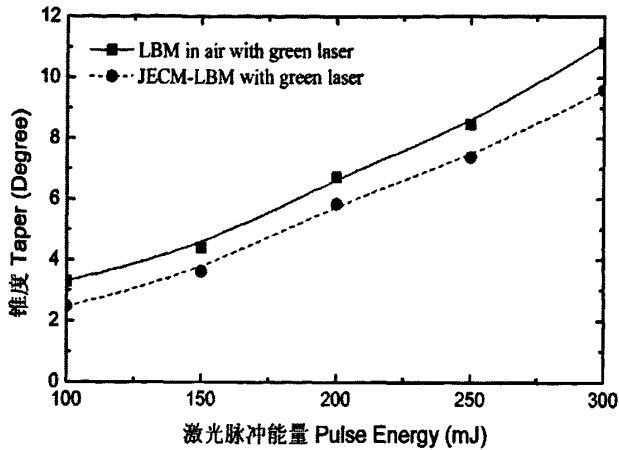
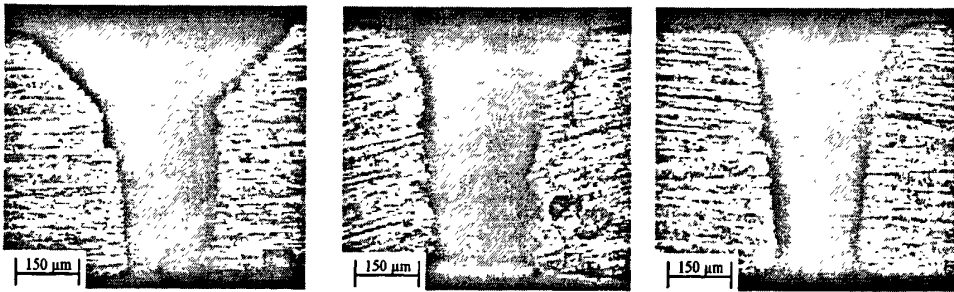


图 6.23 激光脉冲能量对孔锥度的影响 (40V, 1mm)

由上一节的喷射液束电解—激光复合加工通孔试验研究表明,在加工材料的正面入口周围存在电解的过切现象。显然,这与加工间隙和电解加工电压有密切关系,另外喷嘴端面是否绝缘也是重要影响因素。图 6.24 显示了加工间隙分别为 0.5mm 和 1mm 的喷射液束电解—激光复合加工打孔的剖面形貌,图 (a) 中喷嘴端面没有绝缘,图 (b) 和 (c) 中喷嘴端面绝缘。其他试验条件为:绿光激光脉冲能量:150mJ、电解加工电压 50V、电解液压力 1MPa、喷嘴孔径 0.3mm、加工时间 50s。



(a) 0.5mm(未绝缘) (b) 0.5mm (绝缘) (c) 1mm (绝缘)

图 6.24 加工间隙及喷嘴端面绝缘对喷射液束电解—激光复合加工打孔锥度的影响

由图 6.24(a)可以看出喷嘴端面没有绝缘,加工间隙过短,致使电解作用造成入口的过切,导致孔的锥度增大;如图 6.24 (b) 所示,喷嘴端面绝缘后,减小了电解杂散腐蚀,改善了复合加工打孔入口处的锥度;在喷嘴端面绝缘的基础上,将加工间隙从 0.5mm 增加至 1mm 后的复合加工打孔锥度进一步降低,如图 6.24 (c) 所示。通过图 6.24 的对比说明,在喷射液束电解—激光复合加工中,一方面需要复合电解加工的作用在线去除再铸层,另一方面又要控制电解加工的作用范围,需通过对喷嘴端面绝缘以及控制加工间隙的措施防止在其材料加工表面的过切而导致加工孔的锥度偏大。

利用单脉冲能量 200mJ 的绿光激光在加工间隙 1mm 的条件下对 30~50V 的范围内的电解加

工电压对打孔锥度的影响进行了研究, 研究结果如图 6.25 所示。由图可知, 在低电压的范围内, 电解加工对加工孔入口的过切作用变化不大, 因此电解加工电压对复合加工打孔的锥度影响有限, 随着电压的增加, 孔的锥度有微量增幅, 但总体还是保持在一个水平上。

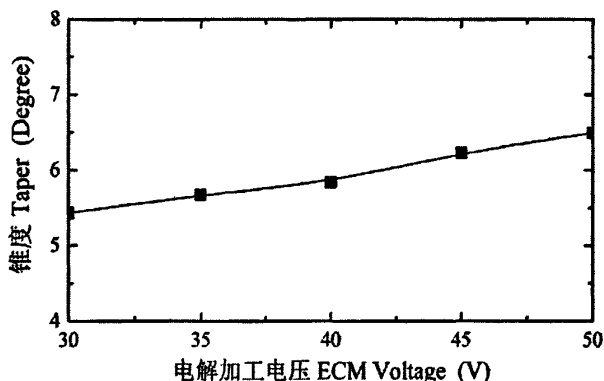


图 6.25 电解加工电压对喷射液束电解—激光复合加工打孔锥度的影响

上述三种不同工艺参数对喷射液束电解—激光复合加工打孔锥度影响的研究表明: 喷射液束电解—激光复合加工打孔的锥度小于空气中激光加工, 激光脉冲能量的增加可导致锥度加大; 加工间隙对打孔锥度的影响的原因是电解加工的过切, 可以通过控制加工间隙的长度来改善复合加工的打孔精度; 在低电压范围内 (30~50V), 由于电解加工作用有限, 其加工电压对打孔锥度影响较小。

### 6.4.3 基本工艺规律总结

根据上述激光脉冲能量、电解加工电压、加工间隙三个工艺参数对加工效率和加工精度影响的研究结果, 可以总结出喷射液束电解—激光复合加工工艺基本工艺规律。

1) 喷射液束电解—激光复合加工机理综合了激光束对材料的热—力作用和喷射电解液束对材料的电化学反应。因此, 该加工的影响因素既包括激光加工工艺参数, 又包括电解加工工艺参数, 所有这些工艺参数对加工的影响最终是通过两个物理量来体现的, 即能量密度和电流密度。

2) 激光脉冲能量和电解加工电压是喷射液束电解—激光复合加工对能量密度和电流密度具有决定意义的加工工艺参数。这两个参数直接影响到喷射液束电解—激光复合加工的效率 and 精度, 增加这两个参数的值一方面可以提高复合加工的效率, 另一方面却降低了加工精度。因此, 在喷射液束电解—激光复合加工中需要根据加工目的, 合理选择工艺参数。

3) 加工间隙是同时影响能量密度和电流密度的工艺参数。加工间隙的缩短既可以减少激光在喷射电解液束中传输的能量损失, 又能够增强电解作用, 从而提高加工效率。但是, 电解作用的过强会导致加工孔入口处的过切而降低加工精度。因此, 在喷射液束电解—激光复合加工中, 应控制加工间隙的范围, 避免过短而影响加工精度, 又避免过长而降低加工效率。

基于上述总结的基本工艺规律, 结合对喷射液束电解—激光复合加工的纳秒红外激光盲孔和

毫秒绿光激光通孔的试验研究结果,比较分析了喷射液束电解—激光复合加工与传统空气中激光加工的优缺点(表 6.2)。由表可知,喷射液束电解—激光复合加工在保持相对较高的加工效率的前提下,可将再铸层厚度减薄至  $5\mu\text{m}$  以下,并且可获得无热影响区的加工表面质量和更好的加工精度。但是由于激光在电解液中传输时存在能量衰减,因此,该复合加工方法优选绿光激光用于打孔、切割等加工,而应用纳秒级红外激光的喷射液束电解—激光复合加工在精密微细制造中能够获得更多的应用。

表 6.2 喷射液束电解—激光复合加工与空气中激光加工的比较

	空气中激光加工	喷射液束电解—激光复合加工
加工表面质量	出、入口的周围堆积溅射物 并存在热影响区 孔壁存在再铸层 ( $50\mu\text{m}$ 以上)	无溅射物, 无热影响区 有效减薄再铸层 ( $5\mu\text{m}$ 以下)
加工精度	存在明显锥度	锥度减小
加工效率	高	约为空气中激光加工效率的 70%
可用激光	无限制	近红外激光, 优选绿光激光
适用材料	无限制	金属
激光光学传输	无能量损失	存在能量损失
加工产物	金属蒸气污染空气, 需要防护	电解产物污染环境, 需要处理

## 6.5 本章小结

本章利用纳秒红外激光、毫秒绿光激光对不锈钢材料、镍基高温合金材料进行了喷射液束电解—激光复合加工的试验研究,通过对打孔形貌的定性比较和对孔壁再铸层厚度的定量对比分析,以工艺试验证实了喷射液束电解—激光复合加工的可行性,揭示了喷射液束电解—激光复合加工的机理。研究表明:喷射液束电解—激光复合加工成功将电解加工与激光加工进行复合,在保持激光加工相对高的加工效率的前提下,使再铸层大大减小,试验中测得再铸层厚度约  $5\mu\text{m}$ ,而且加工表面无热影响区,加工精度更好。在此基础上,通过比较激光脉冲能量、电解加工电压以及加工间隙对加工效率和加工精度的影响,总结出了喷射液束电解—激光复合加工的基本工艺规律,对喷射液束电解—激光复合加工比较传统空气中激光加工的优缺点有了深刻的了解。

本章的相关研究结果已经在《Optics and Lasers in Engineering》(SCI 源期刊)、《航空学报》、《材料工程》、《中国机械工程》等期刊上发表。

## 第七章 总结与展望

### 7.1 论文总结

激光加工和电解加工作为典型的两种特种加工技术,均在航空航天、武器装备、汽车、电子等制造业中得到广泛应用,尤其是对于航空发动机热端部件数以万计的孔径在0.2mm~0.8mm的气膜冷却孔的加工,这两种加工技术具有各自的优缺点。激光加工效率高且柔性好,易于实现加工过程的自动化、数字化,但激光加工后工件表面存在再铸层的缺陷而影响工件使用的安全可靠;电液束小孔加工具有可达性好、表面质量好、无再铸层,进出口无毛刺等优点,但该技术的玻璃管电极制造困难,加工中容易折断,加工稳定性难以保证。因此,根据技术集成创新的研究思路,从有效去除激光加工中再铸层的角度出发,基于激光加工,将其与电解加工进行复合,探索出一种新型的复合加工技术——喷射液束电解—激光复合加工,以求达到优质、高效的加工效果。

喷射液束电解—激光复合加工是一项集成创新的复合加工方法,将电解加工与激光加工进行复合,在加工过程中,激光束与电解液束同轴共同作用于材料表面,激光对材料的热—力作用和喷射电解液束对材料的电化学阳极溶解作用共同去除材料。该方法与传统空气中激光不同,加工周围的介质由空气变成了电解液;该方法又与传统的电液束加工不同,采用低电压和中性电解液。上述加工环境的变化以及加工作用机理的改变涉及到激光在电解液中的衰减特性、激光在电解液中作用金属靶材产生的力学效应以及激光作用材料的热物理过程和喷射电解液束作用材料的电解过程之间的交互作用等还有待研究的跨学科知识领域。因此,本文在国家自然科学基金、航空科学基金、江苏省自然科学基金以及南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金的资助下,进行了喷射液束电解—激光复合加工的基础研究,取得了以下创新研究成果:

1)首次对激光在中性钠盐溶液中的衰减特性进行了研究,研究结果为喷射液束电解—激光复合加工试验系统的设计提供了重要依据,并有助于优选激光、电解液等相关参数。在理论分析溶液中水分子、悬浮杂质等微粒对激光的吸收和散射作用的基础上,研究了绿光激光和红外激光在中性钠盐电解液中的衰减特性以及电解液浓度、温度的影响。实验结果表明:绿光激光在电解液中的衰减以悬浮微粒的散射作用为主,而红外激光仍以水分子的吸收作用为主;与红外激光相比,绿光激光更适合喷射液束电解—激光复合加工,而应用红外激光时需控制电解液束的长度在15mm以内,且应优先选择更高功率密度的纳秒激光;与电解液浓度相比,温度对激光在电解液中的衰减影响可以忽略不计。

2)首次利用机械测量法研究了激光在电解液中对金属靶材的力学效应,揭示了激光在电解液中作用于靶材的力学效应在喷射液束电解—激光复合加工中的作用。在理论分析激光在溶液



中对金属靶材的力学效应形成原因的基础上,设计了悬臂梁靶材试验装置,通过固定于靶材自由端的压电加速度传感器,测试了激光在电解液中对靶材的冲击力。试验结果表明:短距离(2mm)电解液中激光对靶材的冲击力是空气中相同脉冲能量对靶材冲击力的三倍以上;在绿光激光在电解液中对靶材的作用力在传输距离 20mm 内变化不大;红外激光对靶材的作用力随着溶液中传输距离的增加而减小,从 2mm 到 20mm,作用力降为初始的 20%。上述研究结果从力学效应的角度说明了喷射液束电解—激光复合加工中激光热—力效应去除材料的作用机理,表明了激光在电解液中作用于金属靶材的力学效应有利于排除金属熔化物而减薄再铸层,揭示了其在复合加工的作用。

3) 构建并完善了喷射液束电解—激光复合加工试验系统,满足了该加工方法基础试验的技术要求。在对激光在电解液中的衰减特性以及作用于靶材力学效应研究的基础上,根据喷射液束电解—激光复合加工的特点和技术要求,构建并完善了试验系统,对系统的关键部件——喷射装置进行了设计和优化。

4) 建立了喷射液束电解—激光复合加工数学模型并进行了数值模拟和试验验证,从理论上论证了该复合加工的可行性,揭示了复合加工的作用机理。在分析激光加工热作用机理和电解加工电化学反应机理的基础上,基于温度场理论和电场理论建立了喷射液束电解—激光复合加工数学模型,利用有限元软件进行了数值模拟并进行了试验验证分析。

5) 利用纳秒红外激光、毫秒绿光激光对不锈钢材料、镍基高温合金材料进行了喷射液束电解—激光复合加工的试验研究并总结分析了该加工方法的基本工艺规律。通过对打孔形貌的定性比较和孔壁再铸层厚度的定量对比分析,表明了喷射液束电解—激光复合加工成功将电解加工与激光加工进行复合;在保持激光加工相对高的加工效率的前提下,使再铸层大大减小(厚度  $5\mu\text{m}$  以下),获得无热影响区的高质量加工表面和更好的加工精度;以工艺试验验证了喷射液束电解—激光复合加工的可行性,进一步揭示了喷射液束电解—激光复合加工的机理,为该技术的工程应用研究奠定了基础。

以上创新研究成果已经申请并获授权国家发明专利 1 项,在 SCI 刊源发表或录用英文论文 2 篇,在 EI 刊源发表论文 4 篇。

## 7.2 工作展望

通过本文的理论分析和试验研究,表明喷射液束电解—激光复合加工这一集成创新的加工技术是完全可行的,达到了预先分析的加工效果。但是喷射液束电解—激光复合加工是一个新的研究课题,本文的研究工作作为该加工方法的基础研究,离工程实际应用还有一段距离,还需要对该项技术进行更深入的研究和完善。

1) 在工业激光的应用基础上,从工程实际应用角度出发,进一步改进和完善加工系统,并深入研究喷射液束电解—激光复合加工的工艺规律。

2) 基于试验研究的基础将原有的理论假设条件与实际加工相结合, 使用相应的加工影响因子来进一步改进和完善喷射液束电解—激光复合加工的理论模型, 使之能够定性的分析和指导试验研究。

3) 在借鉴脉冲直流电解加工、超纯水电解加工等加工方法的基础上, 以脉冲电源代替直流电源, 以超纯水代替中性电解液, 逐步提高喷射液束电解—激光复合加工的效率。

## 参考文献

- [1] 路甬祥. 团结奋斗 开拓创新 建设制造强国. 机械工程学报, 2003, 39(1):2-9.
- [2] 杨叔子, 吴波. 先进制造技术及其发展趋势. 机械工程学报, 2003, 39(10):73-78.
- [3] 杨叔子, 吴波, 李斌. 再论先进制造技术及其发展趋势. 机械工程学报, 2006, 42(1):1-5.
- [4] 刘晋春, 赵家齐, 赵万生. 特种加工(第四版). 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 白基成, 郭永丰, 刘晋春. 特种加工技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [6] 孔庆华. 特种加工. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [7] Liu Yonghong, Jia Zhixin, Liu Jinchun. Study on hole machining of non-conducting ceramics by gas-filled electrodischarge and electrochemical compound machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 69(1-3):198-202.
- [8] G. Skrabalsk, M. Zybura-Skarabalak, A. Ruszaj. Building of rules base for fuzzy-logic control of the ECDM process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3):530-535.
- [9] T. Kurita, M. Hattori. A study of EDM and ECM/ECM-lapping complex machining technology. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(14):1804-1810.
- [10] 沈雁鸿. 电解放电复合工艺及其加工表面质量. 新技术新工艺, 1994, (2):17-18.
- [11] 张安洲, 吴荣良. 电解放电复合加工电参数试验研究. 电子工艺技术, 1996, (4):34-37.
- [12] 王建业, 罗干英. 电解电火花复合加工的发展. 电加工, 1997, (5): 15-19.
- [13] 尹占民, 王好臣, 袁光明. 电解放电复合加工工艺研究及其在精密模具制造中的应用. 模具制造, 2002, 9(14):42-45.
- [14] Jia Zhixin, Zhang Jianhua, Ai Xing. Study on a new kind of combined machining technology of ultrasonic machining and electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1997, 37(2):193-199.
- [15] T. B. Thoe, D. K. Aspinwall, N. Killey. Combined ultrasonic and electrical discharge machining of ceramic coated nickel alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 92-93:323-328.
- [16] Yan Cherg Lin, Biing Hwa Yan, Fuang Yuan Huang. Surface modification of Al-Zn-Mg aluminum alloy using the combined process of EDM with USM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(3):359-366.
- [17] Zhao Wansheng, Wang Zhenlong, Di Shichun, et al. Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002,

- 120(1-3):101-106.
- [18] Q.H. Zhang, R. Du, J.H. Zhang, et al. An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(12-13):1582-1588.
- [19] Yuan Feng Chen, Yan Cherng Lin. Surface modifications of Al-Zn-Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(9):4343-4350
- [20] 袁松海, 赵万生, 刘维东, 等. 超声电火花复合加工的研究进展. *航空精密制造技术*, 1998, 34(6):17-20
- [21] 曹明让, 杨世春, 杨胜强, 等. 超声电火花复合加工速度工艺试验研究. *新技术新工艺*, 2007, (3):22-24
- [22] 张云鹏, 赵伟, 孙广标, 等. 超声电火花复合加工钛合金表面质量研究. *电加工与模具*, 2009, (1):22-25
- [23] 竺志大, 王占和, 范仲俊. 超声复合微细电火花加工机理与试验. *新技术新工艺*, 2009, (1):76-80
- [24] 曾传相, 周业为, 谢建. 火花放电辅助下激光破坏材料的研究. *激光技术*, 1998, 22(1):3-7
- [25] 王之桐, 杨明江. 激光诱导放电打孔实验研究. *应用激光*, 2002, 22(1):2-6
- [26] 桥川荣二. 电火花与激光复合精密微细加工系统的开发. *制造技术与机床*, 2004, (2):46-50
- [27] Feng-Tsai Wang, Chen-Siang Hsu, R.F. Shyu, et al. Manufacturing of micro electrodes using ultra sonic aided electrochemical machining. *Design, Test, Integration & Packagin of MEMS/MOEMS*, 2003, 399-401.
- [28] M.S. Hewidy, S.J. Ebeid, T.A. El-Taweel, et al. Modelling the performance of ECM assisted by low frequency vibrations. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 189(1-3):466-472
- [29] A. Ruszaj, M. Zybura, R. Zurek, et al. Some aspects of the electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibrations optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of engineering manufacture*, 2003, 217(10):1365-1371.
- [30] 陈安骏. 超声电解复合加工在微器件制作中的基础研究.[硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [31] 朱永伟, 王占和, 云乃彰. 超声电解复合微细加工装置与试验研究. *机械科学与技术*, 2008, 27(8):986-991.
- [32] T.M. Yue, W.S. Lau, T.W. Chan, et al. Ultrasonic-aided laser machining of Al/Cu based SiCp metal matrix composites. *ASME-Integrated Design and Manufacturing of Composites*, 1994, 64(2):51-55.

- [33] T.M. Yue, T.W. Chan, H.C. Man. Analysis of ultrasonic-aided laser drilling using finite element method. *CIRP-Manufacturing Technology*, 1996, 45(1):169-172.
- [34] 郑启光. 激光先进制造技术. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [35] P.W. French, M. Naeem, K.G. Watkins. Laser percussion drilling of aerospace material using 10kW peak power laser using 400 $\mu$ m optical fibre delivery system. *Proceedings of the International Congress on Laser Applications and Electro-optics*, 2003, 95:1-9.
- [36] 左铁钊 等. 21 世纪的先进制造——激光技术与工程. 北京: 科学出版社, 2007
- [37] A. Giering, M. Beck, J. Bahnmuller. Laser drilling of aerospace and automotive components. *Proceedings of the international congress on laser applications and electro-optics, ICALEO'99, Laser Institute of America, Orlando, FL*, 1999, (87):80-87.
- [38] C.Y. Yeo, S.C. Tam, S. Jana, et al. A technical review of the laser drilling of aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 42(1):15-49.
- [39] 张晓兵. 激光加工涡轮叶片气膜冷却孔的现状与发展趋势. *应用激光*, 2002, 22(4):227-229.
- [40] 刘军. 航空发动机气膜冷却孔的打孔工艺. *航空发动机*, 1995, (2):31-36.
- [41] 刘湘. 高能束流加工技术的现状及发展. *航空制造技术*, 1995(增 1):13-15.
- [42] 郭文有等主编. 航空制造工程手册 发动机叶片工艺分册. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [43] 郭文渊, 王茂才, 张晓兵. 镍基超合金激光打孔再铸层及其控制研究进展. *激光杂志*, 2003, 24(4):1-3.
- [44] 李志友, 于维成, 王理. 激光表面再铸层结构对 DZ22 定向凝固合金疲劳性能的影响. *材料工程*, 1994(8-9):31-32.
- [45] 张晓兵, 李其连, 王健. 激光加工小孔工艺及其孔壁再铸层对 DZ22 高温合金疲劳性能的影响. *航空工艺技术*, 1995(2):20-22.
- [46] 王建业, 徐家文编著. 电解加工原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [47] 余承业主编. 航空制造工程手册 特种加工分册. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [48] 张晓兵. 改善激光加工 Ni<sub>3</sub>Al 基合金小孔质量的研究. *航空制造技术*, 2004, (z1):126-128
- [49] 陈长军, 郭文渊, 王茂才, 等. 镍基超合金再铸层化学研磨去除的实验研究. *燃气涡轮试验与研究*, 2004, 17(3):44-50.
- [50] G.K.L. Ng, L. Li. The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(6):393-402.
- [51] Qiang Li, Yijun Zheng, Zhiyong Wang, et al. A novel high-peak power double AO Q-switches pulse Nd: YAG laser for drilling. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(5):357-362.
- [52] X.L. Chen. Short Pulsed high intensity laser machining. *High temperature material processes*, 2000, 4(2):151-160.

- [53] X.L. Chen, X.B. Liu. Short pulsed laser machining: how short is short enough. *Journal of laser applications*, 1999, 11(6):268-272.
- [54] 孙晓慧, 周常河, 余昶鲲. 飞秒激光加工最新进展. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(9):37-45
- [55] 杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(1). *激光与光电子学进展*, 2004, 41(3):42-57.
- [56] B.N. Chichkov, C. Momma, S.Nolte, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 1996, (63):109-115.
- [57] X. Zhu, D.M. Villeneuve, A.Yu. Naumov, et al. Experimental study of drilling sub-10 $\mu$ m holes in thin metal foils with femtosecond laser pulses. *Applied Surface Science*, 1999, 152(3-4):138-148.
- [58] X.Zhu, A.Yu. Naumov, D.M. Villeneuve, et al. Influence of laser parameters and material properties on micro drilling with femtosecond laser pulses. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 1999, (69 Suppl.):S367-S371.
- [59] Chengde Li, Suwas Nikumb, Franklin Wong. An optimal process of femtosecond laser cutting of NiTi shape memory alloy for fabrication of miniature devices. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(10):1078-1087.
- [60] H. Huang, H.Y. Zheng, G.C. Lim. Femtosecond laser machining characteristics of Nitinol. *Applied Surface Science*, 2004, 228(1-4):201-206.
- [61] A.J. Murray, J.R.Tyrer. Pulsed CO<sub>2</sub> and Nd: YAG laser drilling of PSTZ- A study into the wavelength effects on recast layer microcracking. *Lasers in engineering*, 1999, 9(1):173-178,187
- [62] L. Tunna, A. Kearns, W.O'Neill. Micromachining of copper using Nd: YAG laser radiation at 1064, 532, and 355nm wavelengths. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(3):135-143.
- [63] M.J. Jackson, W. O'Neill. Laser micro-drilling of tool steel using Nd: YAG lasers. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 142(2):517-525.
- [64] Qihong Wu, Yurong Ma, Jiansheng Jie, et al. Hole drilling of inconel 718 by high intensity pulsed ultraviolet laser. *Journal of Laser Applications*, 2003, 15(3): 168-171.
- [65] X.L. Chen, A.L. Ortiz, P.R. Staver, et al. Improved hole drilling using a high peak power Nd: YAG laser at the second harmonic wavelength. *Journal of Laser Applications*, 1997, 9(6): 287-290.
- [66] J.J. Chang, B.E. Warner, E.P. Dragon, et al. Precision micromachining with pulsed green lasers. *Journal of Laser Applications*, 1998, 10(6): 285-291.
- [67] A.J. Murray, J.R.Tyrer. Nd: YAG laser cutting and drilling of PSTZ-Influence of substrate heating temperature on recast layer microcracking. *Journal of Laser Applications*, 1999, 11(3): 128-135.

- [68] A.J. Murray, J.R.Tyrer. Nd: YAG laser drilling of 8.3mm thick partially stabilized tetragonal zirconia-control of recastlayer microcracking using localized heating techniques. *Journal of Laser Applications*, 1999, 11(4): 178-184.
- [69] D.K.Y. Low, L.Li, P.J. Byrd. Spatter prevention during the laser drilling of selected aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 139(1-3):71-76.
- [70] D.K.Y. Low, L.Li, A.G. Corfe, et al. Spatter-free laser percussion drilling of closely spaced array holes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(3):361-377.
- [71] 关振中 主编. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [72] Shang-Liang Chen. The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO<sub>2</sub> laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 199, 88(1-3):57-66.
- [73] 王智勇, 陈铠, 左铁钊. 辅助气体对激光打孔的影响. *激光杂志*, 2000, 21(6):44-46.
- [74] A.H. Khan, S. Celotto, L. Tunna, et al. Influence of microsupersonic gas jets on nanosecond laser percussion drilling. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(6):709-718.
- [75] Arvi Kruusing. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1-general features, steam cleaning and shock processing. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(2):307-327.
- [76] Arvi Kruusing. Underwater and water-assisted laser processing: Part 2-Etching, cutting and rarely used methods. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(2):329-352.
- [77] Noboru Morita, Shuchi Ishida, Yasutomo Fujimori, et al. Pulsed laser processing of ceramics in water. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(23):1965-1966.
- [78] Arvi Kruusing, Seppo Leppavuori, Antti Uusimaki, et al. Micromachining of magnetic materials. *Sensors and actuators A: Physical*, 1999, 74(1-3):45-51.
- [79] S. Roth, M. Geiger. Novel technique for high-quality microstructuring with excimer lasers. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2000, (3933):338-346.
- [80] 凌磊, 楼祺洪, 李抒智, 等. 水浴条件下 YAG 倍频、三倍频激光切割 Si 片比较. *光子学报*, 2005, 34(3):340-342.
- [81] 凌磊, 楼祺洪, 李抒智, 等. 水浴条件下 YAG 倍频激光切割 Si 片的实验研究. *激光技术*, 2004, 28(2):131-132, 143.
- [82] 林锦章. 短脉冲激光水下打孔的研究. [硕士学位论文], 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [83] 徐荣青, 陈笑, 沈中华, 等. 激光水下打靶力学效应的测试与分析. *光电子·激光*, 2004, 15(5):599-603.
- [84] 陈笑, 徐荣青, 沈中华, 等. 激光对水和空气中靶材的作用机制研究. *南京理工大学学报*, 2004, 28(3):248-252.

- [85] 徐荣青, 陈笑, 沈中华, 等. 水中薄片激光打孔反常现象的分析. *高压物理学报*, 2004, 18(2):130-134.
- [86] L. Li, C. Achara. Chemical assisted laser machining for the minimization of recast and heat affected zone. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2004, 53(1):175-178.
- [87] Bernold Richerzhagen. Device for Machining Material with a Laser. 国际专利, WO/1995/032834, 1995.
- [88] Bernold Richerzhagen. Method and apparatus for machining material with a liquid-guided laser beam. 美国专利, US5902499, 1999.
- [89] Bernold Richerzhagen, Muneharu Kutsuna, Haruhiko Okada, et al. Waterjet-guided Laser Processing. *Third International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, 1997, (4380):91-94.
- [90] Bernold Richerzhagen. Chip singulation process with a water jet-guided laser. *Solid State Technology*, 2001, 44(4): S25-S29.
- [91] D. Perrottet, S. Amorosi, B. Richerzhagen. New process for Screen cutting: water-jet guided laser. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, (5961):5-15.
- [92] O. Sibailly, F. Wagner, B. Richerzhagen. Laser micro-machining in microelectronic industry by water jet guided laser. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004, (5339):258-264.
- [93] F. Wagner, A. Spiegel, N. Vago, et al. Water-jet guided laser: Possibilities and potential for singulation of electronic packages. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, (4637):479-486.
- [94] D. Perrottet, S. Amorosi, B. Richerzhagen. Which technology: Conventional dry laser or water jet guided laser? *LIA Today*, 2005, 13(2): 12-13.
- [95] J. Manley, R. Housh, F. Wagner, et al. Water-guided lasers create clean cuts. *Laser Focus World*, 2004, 40(5): S15-S18.
- [96] D. Perrottet, S. Amorosi, R. Housh. Damage-free cutting of medical devices using the water jet guided laser. *Advanced Materials & Processes*, 2005, 163(7): 72-78.
- [97] B. Richerzhagen, R. Housh, J. Manley. New hybrid material process: the water jet guided laser. *The 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2004, (6):370-375.
- [98] D. Perrottet, A. Spiegel, F. Wagner, et al. Particle-free semiconductor cutting using the water jet guided laser. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, (5713):240-246.
- [99] G. Von Koblenki, G. Lackner, D. Perrottet, et al. Water-guided laser speeds up rate of SiC-wafer



- dicing. *Compound Semiconductor*, 2005, 11(5):29-31.
- [100] N. Dushkina, F. Wagner, C. Boillat, et al. Water jet guided lasers versus saw dicing. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2003, (4977):75-85.
- [101] T.A. Mei, R. Housh, A. Brule, et al. Dicing of high-power white LEDs in heat sinks with the water jet-guided laser. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2007, (6486):A1-A7.
- [102] A. Pauchard, K. Lee, N. Vago, et al. Advanced micromachining combining nanosecond lasers with water jet-guided laser technology. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, (7201):A1-A9.
- [103] T. Nilsson, F. Wagner, R. Housh, et al. Scribing of GaN wafer off white LED by water jet guided laser. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004, (5366):200-206.
- [104] C.F. Li, D.B. Johnson, R.Kovacevic. Modeling of waterjet guided laser grooving of silicon. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(9):925-936.
- [105] 初杰成. 水导引激光耦合机理及加工试验研究. [硕士学位论文], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [106] 李灵, 杨立军, 王扬. 水导引激光微细加工中激光与水束光纤耦合技术. *光学精密工程*, 2008, 16(9):1614-1621.
- [107] Ling Li, Yang Wang, Lijun Yang, et al. Experimental research on water-jet guided laser processing. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2007, (6595):25.1-25.6.
- [108] Yang Wang, Ling Li, Lijun Yang, et al. Simulation and experimental research on water-jet guided laser cutting silicon wafer. *International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, 2008, 1-6.
- [109] 叶瑞芳, 沈阳, 王磊, 等. 新型水导引激光耦合系统研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2009, 48(3):369-372.
- [110] 蔡黎明, 雷玉勇, 邴龙健. 水射流导引激光在微细加工中的应用. *微细加工技术*, 2008, (5):60-64.
- [111] W.S. Lau, T.M. Yue, M. Wang. Ultrasonic-Aided Laser Drilling of Aluminium-Based Metal Matrix Composites. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1994, 43(1):177-180
- [112] T.W. Chan, T.M. Yue, H.C. Man. Ultrasonically aided laser drilling of particle reinforced aluminium based composites. *Materials Science and Technology*, 1998, 14(3):1039-1044.

- [113] J. Kozak, K.P. Rajurkar, R. Wof. Modelling and analysis of pulse electrochemical machining (PECM), *Transactions of the ASME*, 1994, 116 (8) : 316-323.
- [114] 王建业. 高频窄脉冲电解加工的机理研究. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2002,30(1):6-11.
- [115] 王建业. 电解加工技术的新发展-高频窄脉冲电流电解加工. 电加工与模具, 1998, (2): 37-41.
- [116] 余承业, 刘正坝, 黄因慧, 等. 脉冲电流电解加工流场特性的研究. 电加工与模具, 1984, (4):1-6.
- [117] Rolf Schuster, Viola Kirchner, Philippe Allongue, et al. Electrochemical Micromachining. *Science*, 2000, 289:98-101.
- [118] Se Hyun Ahn, Shi Hyoung Ryu, Deok Ki Choi, et al. Electro-chemical micro drilling using ultra short pulses. *Precision Engineering*, 2004, 28(2):129-134.
- [119] 朱荻, 王明环, 明平美, 等. 微细电化学加工技术. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2):151-155.
- [120] 张朝阳, 朱荻, 王明环. 纳秒脉冲微细电化学加工的理论及试验. 机械工程学报, 2007,43(1): 208-213.
- [121] 张朝阳, 朱荻, 王明环, 等. 超短脉冲电流微细电解加工技术研究. 中国机械工程, 16(14):1295-1298.
- [122] 张朝阳, 朱荻. 微细电解加工的精度及定域性研究. 机械科学与技术, 2006, 25(2):242-245.
- [123] 张朝阳, 朱荻, 曲宁松, 等. 微米级电化学加工关键技术研究, 2007, 18(4):403-406.
- [124] 张朝阳, 朱荻. 纳秒脉冲电流提高微细电化学加工精度的研究, 2008, 19(14):1716-1719,1723.
- [125] 张朝阳. 纳秒脉冲电流微细电解加工技术. [博士学位论文], 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [126] Mohan Sen, H.S. Shan. A review of electrochemical macro-to micro-hole drilling process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(2):137-152.
- [127] B.Bhattacharyya, J.Munda, M.Malapati. Advancement in electrochemical micro-machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(15):1577-1589.
- [128] J. Kozak, K.P. Rajurkar, R. Balkrishna. Study of Electrochemical Jet Machining Process. *Transaction of the ASME*, 1996, (118):490-499.
- [129] R. Ippolito, G. F. Micheletti. Electron-Jet Drilling – Basic Involved Phenomena. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1981, 30(1):87-90.
- [130] Mohan Sen, H.S. Shan. Analysis of hole quality characteristics in the electro jet drilling

- process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(15):1706-1716.
- [131] Mohan Sen, H.S. Shan. Electro jet drilling using hybrid NNGA approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(1):17-24.
- [132] Wataru Natsu, Tomone Ikeda, Masanori Kunieda. Generating complicated surface with electrolyte jet machining. *Precision Engineering*, 2007, 31(1):33-39.
- [133] Xiong Lu, Yang Leng. Electrochemical micromachining of titanium surfaces for biomedical applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(2):173-178.
- [134] 施文轩, 张明歧, 殷旻. 电液束加工工艺的研究及其发展. *航空制造技术*, 2001, (6):25-27.
- [135] 施文轩, 张明歧, 殷旻, 等. 电射流加工工艺研究和发展. *电加工与模具*, 2001, (1):36-39.
- [136] 李英杰, 李福援, 纪峰, 等. 电液束加工小孔质量的试验研究. *机械科学与技术*, 2007, 26(5):619-622.
- [137] M. Datta, L.T. Electrochemical micromachining tool and process for through-mask patterning of thin metallic films supported by non-conducting or poorly conducting surfaces. 美国专利, US5284554, 1994.
- [138] M. Datta. Fabrication of an Array of Precision Nozzles by Through-Mask Electrochemical Micromachining. *Journal of Electrochemical Society*, 1995, 142(11):3801-3805.
- [139] R.V. Shenoy, M. Datta. Effect of Mask Wall Angle on Shape Evolution during Through-Mask Electrochemical Micromachining. *Journal of Electrochemical Society*, 1996, 143(2):544-549.
- [140] M. Datta. Microfabrication by electrochemical metal removal. *IBM Journal of Research and Development*, 1998, 42(5):655-669.
- [141] A.C. West, C. Madore, M. Matlezz, et al. Shape changes during through mask electrochemical micromachining of thin metal films. *Journal of Electrochemical Society*, 1992, 139(2):499-506.
- [142] G.J. Kwon, H.Y. Sun, H.J. Sohn. Wall profile developments in through mask electrochemical micromachining of invar alloy films. *Journal of Electrochemical Society*, 1995, 142(9):3016-3020.
- [143] 李嘉珩, 马保吉, 范植坚. 光刻胶掩膜微细电化学加工参数的试验研究. *电加工与模具*, 2004, (6):17-20.
- [144] Yuzo Mori, Hidekazu Goto, Kikuzi Hirose, et al. A study on electrochemical machining method in ultra-pure water—increase of hydroxylion in ultra-pure water by catalytic reaction. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2001, 67 ( 6 ):932-936.
- [145] 鲍怀谦, 徐家文. 超纯水电解加工机理及工艺基础. *化工学报*, 2006, 57(3):626-629.
- [146] 鲍怀谦, 徐家文. 基于超纯水微细电解加工过程中水解离机理研究. *宇航材料工艺*, 2006,

- (5):58-60.
- [147] 鲍怀谦, 徐家文. 超纯水微细电解加工可行性研究. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(5):234-237.
- [148] Bao Huai-qian, Xu Jia-wen, Li Ying. Aviation-oriented Micromachining Technology Micro-ECM in Pure Water. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, (5):455-461.
- [149] 鲍怀谦. 超纯水微细电解加工的基础研究. [博士学位论文], 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [150] 鲍怀谦, 徐家文, 王昌田. 超声辅助纯水微细电解加工. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(6):30-32,36.
- [151] M.H. Gelchinski, B. Hills, L.T. Romanikw, et al. Laser-Enhanced Jet-Plating and Jet-Etching: High-Speed Maskless Patterning Method. 美国专利, US4497692, 1985.
- [152] M. Datta, L.T. Romankiw, D.R. Vigliotti, et al. Jet and laser-jet electrochemical micromachining of nickel and steel. *Journal of the Electrochemical Society*, 1989, 136(8):2251-2256.
- [153] V. Lescuras, J.C. Andre, F. Lopicque. Jet electrochemical etching of nickel in a sodium chloride medium assisted by a pulsed laser beam. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1995, 25(10):933-939.
- [154] A. Stephen, G. Sepold, S. Metev, et al. Laser-induced liquid-phase jet-chemical etching of metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3):536-540
- [155] A. Stephen, S. Metev, F. Vollertsen. Principles and applications of laser-induced liquid-phase jet-chemical etching. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2003, (5063):227-232
- [156] Igor Iv. Lyskov. Laser-electrochemical formation of microholes. *Proceedings of The 4th Korea-Russia International Symposium*, 2000, (3):404-406.
- [157] P.T. Pajak, A.K.M. Desilva, D.K. Harrison, et al. Precision and efficiency of laser assisted jet electrochemical machining. *Precision Engineering*, 2006, 30(3):288-298.
- [158] P.T. Pajak, A.K.M. Desilv, J.A. Mcgeough, et al. Modelling the aspects of precision and efficiency in laser-assisted jet electrochemical machining (LAJECM). *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3):512-518.
- [159] A.K.M. Desilva, P.T. Pajak, D.K. Harrison, et al. Modelling and experimental investigation of laser assisted jet electrochemical machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004, 53(1):179-182.
- [160] 陈养渭. 天然水体中激光衰减的现场测量. 舰船科学, 2000, (1):3-7.

- [161] 方韵和. 分析化学. 上海: 同济大学出版社, 1993.
- [162] M. Von Allmen. Laser-Beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1987.
- [163] J. E. Tyler, R. C. Smith, J. W. H. Wilson. Predicted optical properties for clear natural water. *Journal of the Optical Society America*, 1972, (62):83-91.
- [164] S.A. Sullivan. Experimental study of the absorption in dis-tilled water, artificial sea water, and heavy water in the visible region of the spectrum. *Journal of the Optical Society America*, 1963 (53):962-968.
- [165] J. Lenoble, B. Saint-Guilly. On the absorption of ultraviolet rays by distilled water. *C. R. Acad. Sci*, 1955, (240): 954-955.
- [166] George M. Hale, Marvin R. Query. Optical Constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m Wavelength Region. *Applied Optics*, 1973, 12(3):555-563.
- [167] Ramond C. Smith, Karan S. Baker. Optical properties of the clearest natural waters (200-800nm). *Applied Optics*, 1981, 20(2):177-184.
- [168] Frank M. Sogandares, Edward S. Fry. Absorption spectrum (340-640nm) of pure water. I. Photothermal measurements. *Applied Optics*, 1997, 36(33):8699-8709.
- [169] Robin M. Pope, Edward S. Fry. Absorption spectrum (380-700nm) of pure water. II. Integratin cavity measurements. *Applied Optics*, 1997, 36(33):8710-8723.
- [170] Ronald A.J. Litjens, Terence I. Quickenden, et al. Visible and near-ultraviolet absorption spectrum of liquid water. *Applied Optics*, 1999, 38(7):1216-1223.
- [171] H.Buiteveld, J.H.M. Hakvoort, M.Donze. The optical properties of pure water. *SPIE-Ocean Optics XII*, 1994, 2258:174-183.
- [172] 赵泽卿, 陆大年, 杨定超. 光散射技术. 北京: 纺织工业出版社, 1987.
- [173] L. Rayleigh. On the scattering of light by small particles. *Philosophical Magazine*, 1871, (41):447-454.
- [174] Mie. G. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions. *Annals of Physics*, 1908, 25(4):377-445.
- [175] 化学工业部化学试剂质量监测中心. 化学试剂标准大全, 北京: 化学工业出版社, 1995.
- [176] 中国标准出版社第一编辑室. 中国食品工业标准汇编, 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [177] I. Trabjerg, Niels K. Højerslev. Temperature influence on light absorption by fresh water and seawater in the visible and near-infrared spectrum. *Applied Optics*, 1996, 35(15): 2653-2658.
- [178] W. Scott Pegau, Deric Gray J. Ronald et al. Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: dependence on temperature and salinity. *Applied Optics*, 1997,

- 36(24):6035-6046.
- [179] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [180] 李维新. 一维不定常流与冲击波. 北京: 国防科技大学出版社, 2003.
- [181] 吕洪生, 曾新吾. 连续介质力学(中册) 流体力学与爆炸力学. 北京: 国防科技大学出版社, 1999.
- [182] 徐荣青, 陈笑, 陈建平, 等. 激光烧蚀水下金属产生冲击波和空泡效应的研究. 光学学报, 2004, 24(12):1643-1648.
- [183] 陈笑. 高功率激光与水下物质相互作用过程与机理研究. [博士论文]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [184] B. Zysset, J.G. Fujimoto, T.F. Deutsch. Time-resolved measurements of picosecond and nanosecond laser pulses. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1989, 48:139-147.
- [185] J.G. Fujimoto, W.Z. Lin, E.P. Ippen, et al. Time-resolved studies of Nd: YAG laser-induced breakdown. *Investigative ophthalmology & visual science*, 1985, 26:1771-1777.
- [186] A.G. Doukas, A.D. Zweig, J.K. Frisoli, et al. Noninvasive determination of shock wave pressure generated by optical breakdown. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1991, 53:237-245.
- [187] J.P. Chen, X.W. Ni, J. Lu, et al. Laser-induced plasma shock wave and cavity on metal surface underwater. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2000, 25(5):307-311.
- [188] K. Hirsch, E. Brinkmeyer. Investigation of very short cavitation shock waves by coherent optical method. *Proc. SPIE*, 1976, 97:166-171.
- [189] X.W. Ni, J. Lu, A.Z. He. Interferometric diagnosis of laser-produced plasma on an aluminum target. *Microwave and Optical Technology Letter*, 1997, 14(5):271-274.
- [190] W.P. Schiffers, S.J. Shaw, D.C. Emmony. Acoustical and optical tracking of the collapse of a laser-generated cavitation bubble near a solid boundary. *Ultrasonics*, 1998, 36:559-563.
- [191] S.J. Shaw, W.P. Schiffers, D.C. Emmony. Experimental observations of the stress experienced by a solid surface when a laser-created bubble oscillates in its vicinity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 110(4):1822-1827.
- [192] A. Vogel, W. Lauterborn, R. Timm. Optical and acoustic investigation of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1989, 206:299-338.
- [193] 卞保民, 陈笑, 夏铭, 等. 液体中激光等离子体冲击波波前传播特性研究与测试. 物理学报, 2004, 53(2):508-513.
- [194] 屈维德, 唐恒龄. 机械振动手册(第二版). 北京: 机械工业出版社, 2000.

- [195] 振动与冲击手册编辑委员会. 振动与冲击手册(第一卷). 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [196] 邱棣华. 材料力学. 北京: 高等教育社, 2004.
- [197] 黄贤武, 郑筱霞. 传感器原理与应用. 成都: 电子科技大学出版社, 2005.
- [198] 俞宽新, 江铁良, 赵启大. 激光原理与激光技术. 北京: 北京工业大学出版社, 1998.
- [199] J.F. Ready. Effects Due to Absorption of Laser Radiation. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(2):462-468.
- [200] H.H.雷卡林, A.A. 乌格洛夫, A.H. 科科拉著. (王绍水译). 材料的激光加工. 北京: 科学出版社, 1982.
- [201] 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992.
- [202] 俞昌铭. 热传导及其数值分析. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [203] 刘顺发, 陈洪斌. 激光加热物体的三维模型的计算. 光子学报, 2000, 29(3):267-270.
- [204] 魏在福, 查鸿逵, 王润文. 激光加热温度场物理分析. 光学学报, 1994, 14(4):355-359.
- [205] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖, 等. ANSYS 工程应用教程——热与电磁学篇. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [206] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第一卷——结构钢、不锈钢. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [207] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第二卷——变形高温合金、铸造高温合金. 北京: 中国标准出版社, 2002.





## 在学期间的研究成果及发表的学术论文

### 攻读博士学位期间发表（录用）论文情况

1. Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming. Investigation of a novel hybrid process of laser drilling assisted with jet electrochemical machining. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1242-1249. (SCI 收录:000269991700023; EI 收录:20093412269098).
2. Zhang Hua, Xu Jiawen. Modeling and Experimental Investigation of Laser Drilling Assisted with Jet Electrochemical Machining. *Chinese Journal of Aeronautics* (SCI 源期刊, 已录用).
3. Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming. Green Laser Drilling Assisted with Jet Electrochemical Machining of Nickel-based Superalloy. *Key Engineering Materials* (EI 源期刊, 已录用).
4. 张华, 徐家文, 王吉明, 袁立新. 喷射液束电解—激光复合加工工艺试验研究. *航空学报*, 2009, 30(6):1138-1143. (EI 收录: 20092912195693).
5. 张华, 徐家文, 王吉明. 中性盐溶液辅助激光加工试验研究. *中国激光*, 2008, 35(11):1836-1840. (EI 收录:20085011781078).
6. 张华, 徐家文, 王吉明. 镍基高温合金喷射液束电解—激光复合加工试验研究. *材料工程*, 2009, 4: 75-80. (EI 收录: 20091912073162).
7. 张华, 徐家文, 王吉明, 宋强. 激光在中性盐溶液中传输特性的研究. *应用激光*, 2008, 28(4):301-305.
8. 张华, 徐家文, 王吉明, 袁立新. 喷射液束电解—激光复合加工可行性研究. *中国机械工程*, 2009, 20(8):975-978.
9. 张华, 徐家文, 王吉明, 袁立新, 李晒晖. 中性盐溶液中激光力学效应的研究. *应用激光*, 2009, 29(4):309-312.
10. Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming. Laser Drilling Assisted with Jet Electrochemical Machining of Nickel-based Superalloy for the Minimization of Recast and Heat Affected Zone. *Lasers in Engineering* (under review).
11. Zhang Hua, Xu Jiawen. Theoretical and Experimental Investigation of Laser Drilling Assisted with Jet Electrochemical Machining. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* (under review).

### 攻读博士学位期间获授权发明专利情况

徐家文, 赵建社, 张华, 袁立新. 喷射液束电解—激光复合加工方法及其装置. 专利号:

ZL200610041595.0. 授权公告日：2008年5月21日。

#### 攻读博士学位期间参加科研项目情况

1. 参与承担国家自然科学基金项目：“喷射液束电解—激光复合加工技术研究”（2007~2009）。
2. 参与承担航空科学基金项目：“精密微细小孔的激光脉冲电解射流复合加工技术研究”（2009~2010）。
3. 参与承担江苏省自然科学基金项目：“微尺度脉冲电解射流加工技术基础研究”（2008~2010）。

## 附录 博士期间完成的科研项目与取得的成果

### 攻读博士学位期间完成科研项目情况

1. 参与完成“中国燃气涡轮研究院某型新概念叶片试制加工”项目（2005）。
2. 参与完成“上海航天技术研究院 810 所某型减重件试制加工”项目（2006）。
3. 参与完成“湖南株洲 608 所某型关键部件研制加工”项目（2005~2006）。
4. 完成南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目：“喷射电液束辅助激光加工基础研究”（2006-2008）。

### 攻读博士学位期间取得的成果

1. 整体构件组合电加工技术. 国防科技进步二等奖, 2006. 排名 14.