



Y1851282

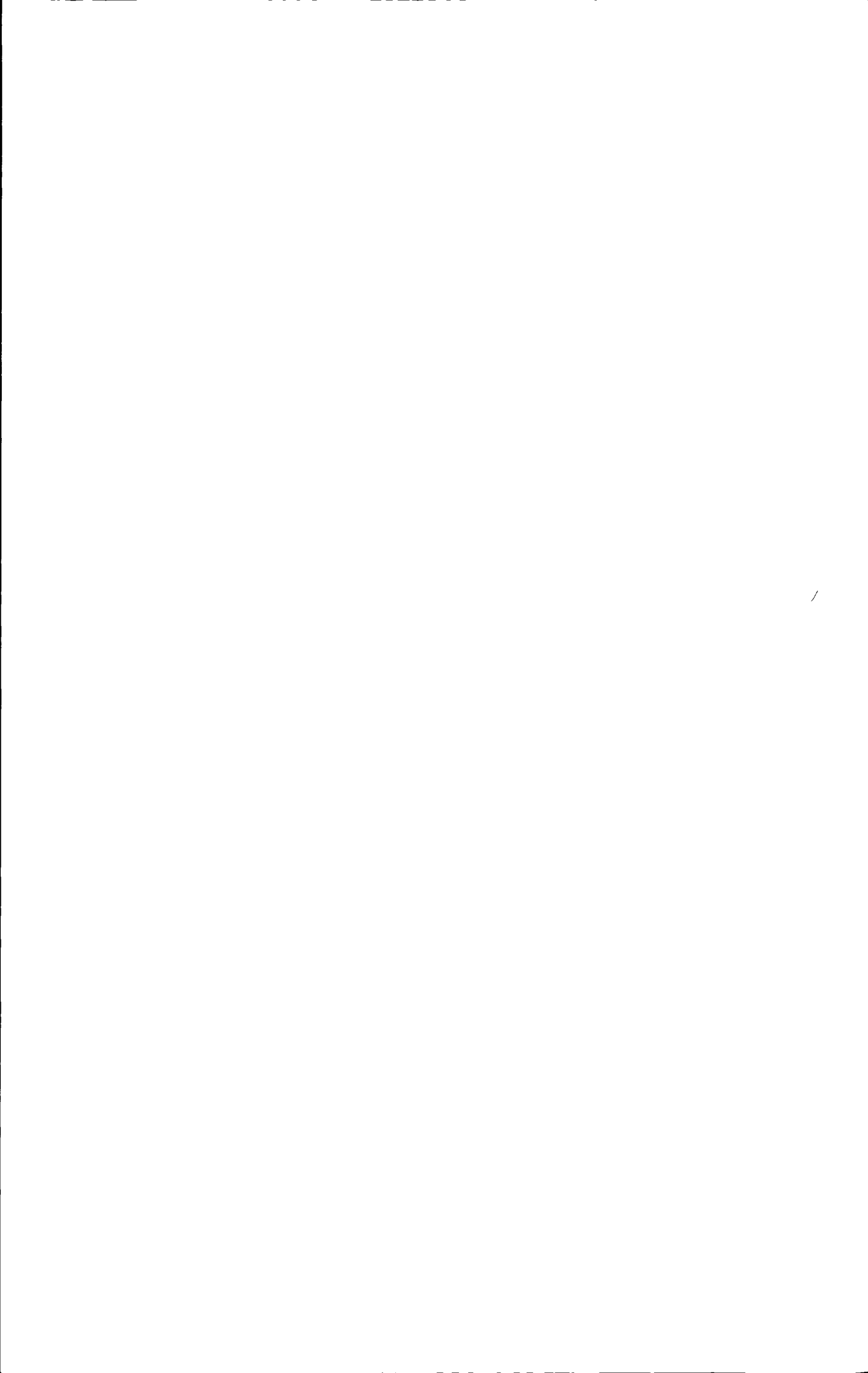
**Dissertation Submitted to Zhejiang University of Technology
for the Degree of Master**

**Dynamic Parameters Research of Hydrodynamic
Suspension Polishing for Mould**

Candidate: Hou Haipeng

Advisor: Prof. Ji Shiming, Prof. Hong Tao

**College of Mechanical Engineering
Zhejiang University of Technology
Dec 2010**



浙江工业大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：侯海鹏

日期：2010年12月21日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本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和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密 ，在 _____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 。

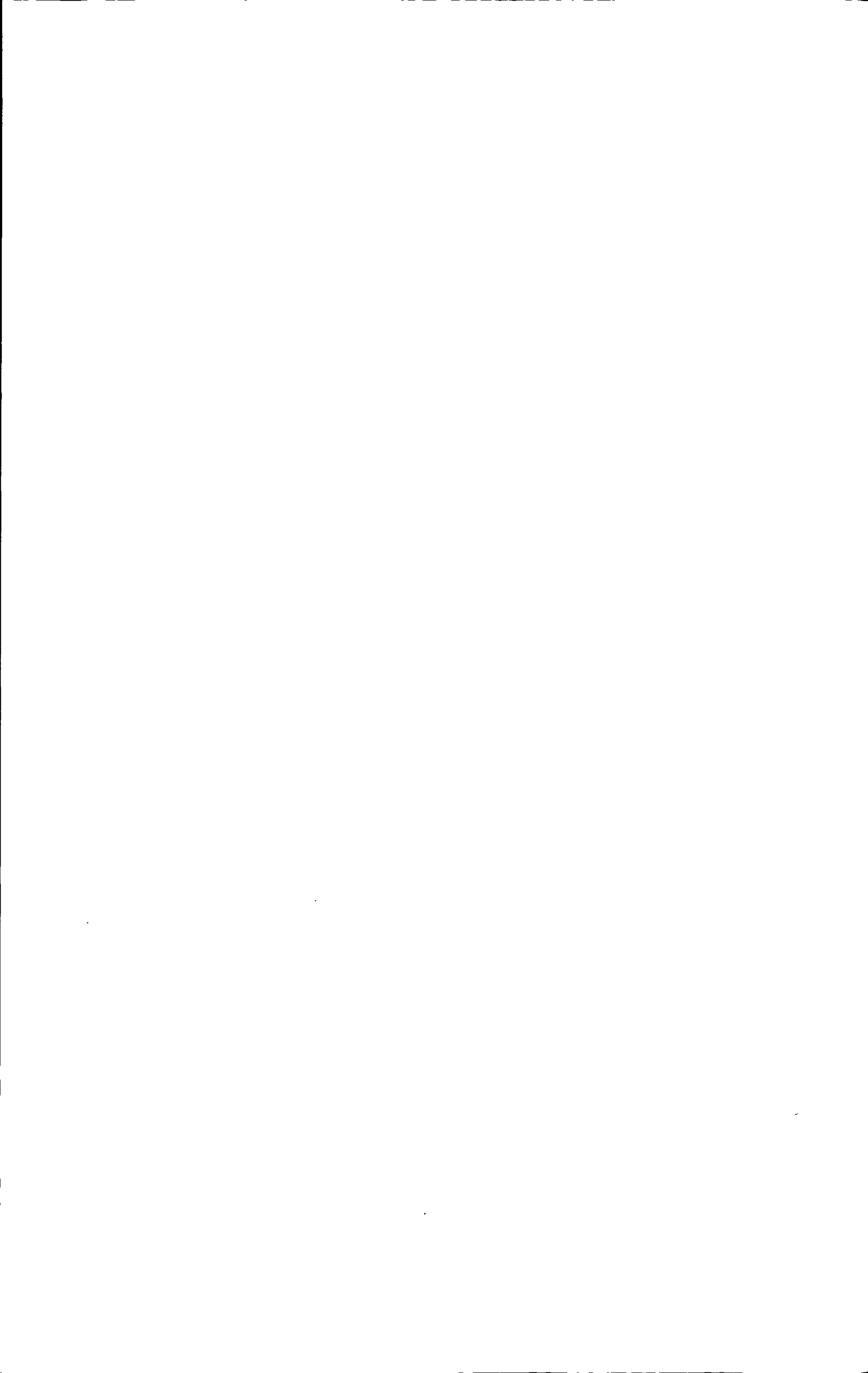
(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：侯海鹏

日期：2010年12月21日

导师签名：[Signature]

日期：2010年12月21日



模具液流悬浮抛光动态参数研究

摘 要

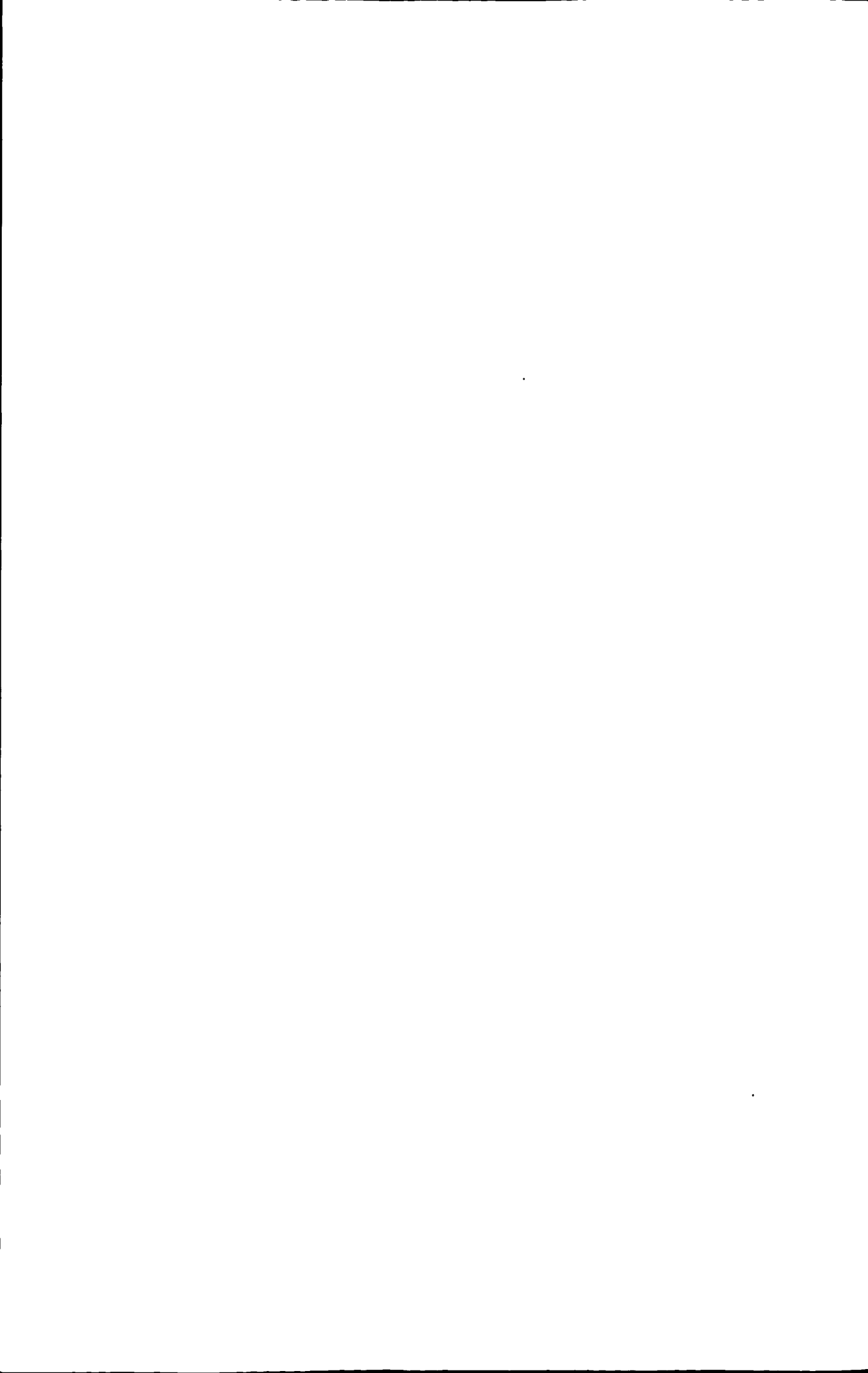
模具作为生产相应零件、产品的关键工具，其自身的精度及表面质量对产品品质有着重要的决定作用。精密的模具加工技术有效应用于加工中心制造，并且是发动机制造的最重要方法之一。目前模具特别是复杂型腔的加工主要以手工打磨的方式为主，生产效率低，并且质量难以稳定。本文根据弹性发射理论并结合液流动压原理，进行了模具液流悬浮抛光的理论及动态参数试验研究，为基于液流悬浮方法进行模具自动化抛光提供了重要工艺参数。主要工作内容如下：

1、从磨粒剪切和宏观作用角度对液流悬浮抛光进行了机理分析。一方面磨粒对工件表面的撞击导致了材料的塑性变形，并在一定作用时间后使其表面粗糙度降低；另一方面，从摩擦学角度分析了液流悬浮下材料去除的模型，材料去除效率与液流动压和流场在抛光表面切向速度梯度有着直接关系。该速度梯度不仅与加工间隙有关，且是 Z 的变化函数；而液流动压力基本呈抛物线分布。另外本文对抛光区进行了 CFD 仿真分析，结果与理论分析基本吻合。

2、试验研究了液流动压力与抛光工具转速和加工间隙的关系。在一定的加工间隙下，液流动压力随着转速的提高逐渐增大，但都存在极值，并且在加工间隙差别比较大时，极致出现的转速也不相同；对于转速在 3500rpm 以下，加工间隙对液流动压力影响并不明显；但当转速提高到 5000rpm 以上时，液流动压力随着间隙的扩大有明显降低，并带有一定的波动。

3、试验研究了抛光中动态参数，包括最小加工间隙、抛光工具转速及液流动压力对表面粗糙的影响。最小加工间隙的减小或转速的增大有利于提高抛光效率，但液流动压力只是在某一区域与工件表面粗糙度的变化形成了单调关系。另外通过拟合分析获得了试验条件下 $Ra(h_0, n)$ 的解析函数，其 $R^2_{adjusted} = 0.9837$ ，具有较高的精度。从粗糙度随时间变化关系的角度出发，简要分析了抛光过程中材料去除过程。对于粗糙面而言，材料去除效率比较高，随着表面质量的提高，材料去除效率降低，最终到达一个稳定的阶段。

关键词：模具，液流悬浮，抛光，精密加工



A STUDY ON DYNAMIC PARAMETERS OF HYDRODYNAMIC SUSPENSION POLISHING FOR MOULD

ABSTRACT

Mould is an important tool to manufacture relative parts and products, the precision and surface finish of mould have an important influence in product quality. The mould precision machining technique has been as the one of most important application for machining centre and engine. At present, most mould, especial complicated mould, is finished by hand-polished, and which leads to lower productivity and unstable quality. In this paper, the theory and dynamic parameters of hydrodynamic suspension polishing for metal mould were studied, and which provided key technological data for automatic polishing. The main content is as following:

1. The principle of hydrodynamic suspension machining was analyzed from abrasive shear and the whole activity. On the one hand, material removal and roughness decrease were appeared because abrasives hit the surface of part in the period of active time; On the other hand, the model of material removal was researched by the view of tribology, and which approved that the efficiency of material removal had the direct bearing on fluid pressure and the tangential velocity gradient on part surface in flow field. The velocity gradient along machining clearance did not only have something with machining clearance but also change with Z. And the distribution of fluid pressure similar with a parabola form. In addition, flow field of polishing was simulated by CFD, and the results supported the theory analysis.

2. The relationship between fluid pressure and polishing tool speed with machining clearance was researched by experiments. This showed that fluid pressure increased along with rotational speed increased, and the maximum was appeared in different speed based on machining clearance. Compared with below 3500rpm that clearance had little influence in fluid pressure, fluid pressure was decreased along with the clearance enlarged, and some fluctuation was existed.

3. The detailed experiments that the relationship of roughness and dynamic parameters including the minimum machining clearance, polishing tool rotational speed and fluid pressure during polishing were carried out, and the data was analyzed. The polishing

ABSTRACT

efficiency was raised along with the minimum clearance decreased or rotational speed increased, and a monotonic one between the fluid pressure and the change of part surface roughness was only satisfied in part of data range. Moreover, the analytic expression of $Ra(h_0, n)$ according to the experimental data was obtained by means of two-element polynomial curve fitting, and $R^2_{adjusted} = 0.9837$ with high fitting precision. The material removal was analyzed briefly from the standpoint of the roughness variable against time. The process of material removal included two stages that the removal efficiency was higher appeared for rougher surface but reduced with polishing, and tended to stable finally.

Key Words: mould, hydrodynamic suspension, polishing, precision machining

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 课题研究意义.....	2
1.2 国内外超精密加工的发展现状.....	3
1.2.1 超精密加工方法及进展.....	3
1.2.2 模具超精密加工中存在的主要问题.....	9
1.3 本文研究的主要内容.....	10
第 2 章 模具液流悬浮抛光理论研究.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 液流悬浮抛光机理分析.....	12
2.2.1 磨粒剪切材料去除分析.....	12
2.2.2 液流悬浮抛光宏观作用分析.....	13
2.3 液流动压分析.....	14
2.4 液流悬浮抛光区数值模拟.....	15
2.4.1 模型建立.....	16
2.4.2 表面压力分布.....	17
2.4.3 速度场仿真分析.....	18
2.5 本章小结.....	20
第 3 章 模具液流悬浮抛光系统.....	23
3.1 模具液流悬浮抛光系统工作原理.....	23
3.2 系统模块设计.....	24
3.2.1 定位模块.....	24
3.2.2 抛光工具模块.....	26
3.2.3 测力夹具模块.....	27
3.2 表面测量仪器.....	30
3.3 工件及抛光液配置.....	31
第 4 章 模具液流悬浮动态参数试验研究.....	35

4.1 引言.....	35
4.2 模具液流悬浮抛光动压力实验研究.....	35
4.2.1 液流动压力与抛光工具转速关系实验研究.....	35
4.2.2 液流动压力与抛光间隙关系实验研究.....	37
4.2.3 液流动压力综合分析.....	38
4.3 动态参数对抛光效果的影响规律.....	39
4.3.1 加工间隙对抛光效果的影响.....	39
4.3.2 抛光工具转速对抛光效果的影响.....	41
4.3.3 动态参数与工件抛光表面粗糙度关系分析.....	43
4.4 材料去除试验研究.....	46
4.4.1 材料去除试验.....	46
4.4.2 材料去除分析.....	48
4.5 本章小结.....	48
第5章 总结与展望.....	51
5.1 总结.....	51
5.2 展望.....	52
参考文献.....	53
致谢.....	57
攻读学位期间参加的科研项目和成果.....	59

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

1.1.1 研究背景

模具作为制造业之母，在机械、电子、汽车、军工等领域应用十分广泛，通过模具而生产的高复杂度零部件是传统机加工无法比拟的；另外其高生产率及材料利用率也使其具有巨大的经济优势。但没有较好的模具精度就无法铸造出精密的模具件，特别是精密仪器，加工中心甚至是汽车发动机都将成为瓶颈^[1-2]。从目前我国进口设备来看，特别是发动机，不难发现精密模具对于我国制造业意义重大。可以说模具行业发展 1 亿元，可以带动相关产业 100 亿元。模具制造的工艺水平，直接影响到产品的市场竞争力及产品结构调整速度^[3-4]。

目前只有少数大的模具公司使用了自动化研磨抛光机，原因主要是价格昂贵，其次是这种机器适用范围较小，主要用于研磨抛光模具切削表面，对于其他像清角、沟槽、模具试模、等异型曲面仍需采用手工研磨抛光^[5]。从目前国内对模具型腔表面抛光技术和装置研究的现状来看，对模具型腔进行精整加工的主要研究工作集中在磁力研抛法^[6]。磁力研磨虽然在国外许多领域都已有较多的应用，但在国内真正的实际应用还非常少。其原因是真正达到寿命长、性能稳定要求的磁性磨粒仍很少，加工工艺及参数的确定对操作者存在很大的依赖性，并且研磨运动轨迹和工作间隙的影响会导致曲面区域研磨量不均匀等等，这些都已成为制约磁力研磨技术应用的关键问题^[7-9]。

近年来，游离磨粒借助流体动压力实现的超精密加工技术越来越受到人们的重视，很多研究人员对此进行了相关的研究，提出了一些特种抛光技术，例如：动压浮起平面研磨、浮动抛光、弹性发射加工等，被广泛应用在陶瓷、玻璃、半导体等电子元件、光学元件的超精密加工中^[10]。游离磨粒借助流体动压力实现的强化抛光技术与现有的抛光加工技术相比，具有以下优势：（1）将抛光和强化加工工序相结合，在实现型腔表面精整加工的同时，可提高模具型腔的疲劳强度，从而达到强化工件的效果；（2）可根据加工件表面形状和粗糙度要求进行工艺参数调控，改善抛光品质和抛光效率，可实现超精密加工的要求；（3）装备易实现自动化，加工效率较高，受工件外形的限制较少，适合

复杂型腔及其沟槽、异形曲面和清角等一些难处理部位的表面强化和抛光加工。因而具有更宽的工艺范围、更高的加工效率、更好的加工表面粗糙度和抗疲劳强度、更低的加工成本，具有很好的实用价值和推广意义。可以预言，随着这一技术的发展和完善，其应用将更为广泛^[11-12]。

本文是以浙江省科技厅项目—“精密模具复杂型腔强化抛光技术的研究与开发”（项目编号 2008C21113）为依托，以浙江模具产业为背景开展工作的。浙江省模具产业近10年发展迅猛，已经远远超过了全国平均水平，仅次于广东省。然而浙江省模具规模虽然很大，但诸多棘手问题也是层出不穷：（1）模具精度低，精密模具市场份额不到30%（2005年）^{[1-3][5]}；（2）使用寿命短，过早的模具报废造成成本增加；（3）生产效率低并且对于复杂模具主要依赖进口，绝大多数模具企业合模及表面抛光装备都是空白。可以看出，精密的高品质模具正阻碍着浙江模具产业的前进步伐。

1.1.2 课题研究意义

本文主要研究光滑模具表面加工技术，旨在通过液流悬浮抛光的方法，来减小模具材料表面的粗糙度。据统计，模具表面抛光约占整个模具制造时间的50%，随着粗糙度的降低，制造成本也是指数增长，可见抛光作为模具的最后工序，对模具的精度、使用寿命等品质方面有着重要的意义。

本文将对液流悬浮抛光设备进行初步开发，为未来应用研究做准备。本文重点研究了与抛光工艺密切相关的动态参数。包括理论研究和实验研究，一方面从理论上推动了液流悬浮抛光技术的模具材料的作用分析，证明该方法的有效性，对试验研究进行指导；另一方面对与抛光效果相关的参数数据进行深度分析，分析结果将成为未来自适应液流悬浮抛光系统工艺决策数据库的重要依据，对未来自动化抛光，特别是在减小人为因素影响方面提高抛光装备的科技含量，为实现模具高品质产业化抛光有着重要的推动作用。

所谓的高品质模具要求模具具有较高的精度，较长的使用寿命，特别是具有复杂型腔的模具，其表面加工工艺难度大，更是难以达到理想品质。目前，对复杂模具中的异形面、沟槽、清角等部位的光整过程仍旧以手工打磨抛光为主，这也导致了加工效率低下，成本过高、严重影响相应产品市场竞争力。可以说，研究一种高适应能力的模具抛光工艺及装备势在必行，本课题无论从经济上还是学术上都极富意义，通过对关键技术的试验研究，获得一套模具特别是具有复杂型腔的模具抛光工艺，进而研制相应的加工

设备。从而使浙江甚至我国精密模具制造业水平更进一步^[13-14]。

1.2 国内外超精密加工的发展现状

近年来国内外超精密加工方法层出不穷，很多方法是综合了多个领域（例如：机械化学抛光），并且开发了多种应用设备，其型号更是种类繁多。但这些设备大多应用范围有限，在加工机理研究和分析方面不能深入，很多只是单凭现场的加工经验，其加工效果中人为因素影响很大。从目前所研究的精密加工技术特别是抛光技术来看，大多还停留在试验阶段，真正的应用设备也是故障频发，很难升级^[15-17]。但是已经有抛光系统建立了工艺数据库，根据试验中获得的各种抛光因素影响曲线，建立智能决策系统，通过数据库中信息的不断增多和学习模式的开启，已经将很多理论和经验进行了工艺上的结合。

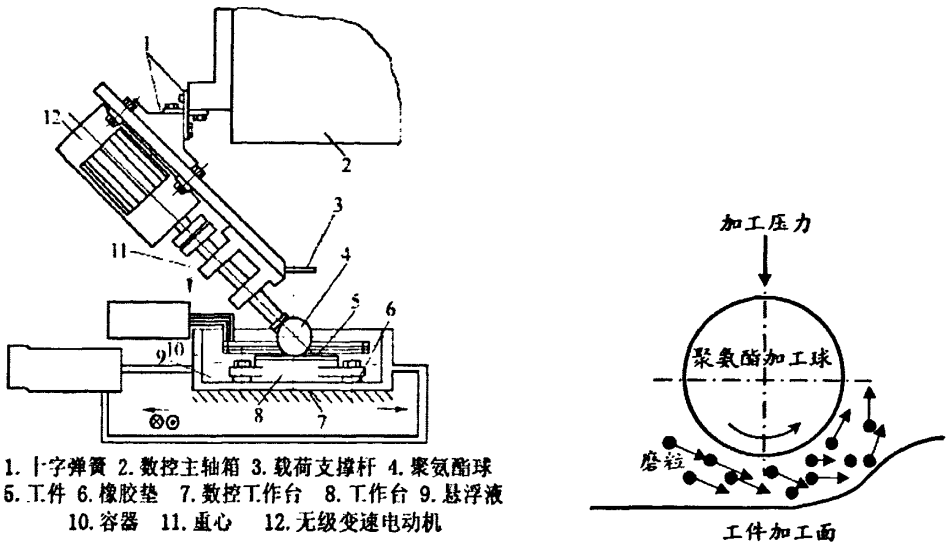
另外，目前超精密加工设备大多十分昂贵，一方面因为试验机向商业机转变过程中对一些不重要参数盲目参考，研发人员没有详细列出各个量（特别是每个自由度的传动系统）在实际使用中的要求，从而造成科技成果转化时的浪费。另一方面，对于大多新型精密加工技术来说，其技术核心通常是在于加工工具不同，而后台的定位系统、工作台等于常规设备相似，但目前很多新型的精密加工设备不注重对现有机床的改造，从而提高了开发成本及生产周期^{[16][18]}。

1.2.1 超精密加工方法及进展

1、弹性发射加工（Elastic Emission Machine, EEM）

弹性发射加工是由日本大阪大学 Yuzo Mori 等在 1976 年提出的一种原子级材料去除方法。其加工原理及装置如图 1-1 所示。EEM 是利用聚氨酯加工球高速旋转带动液体流动，液体中含有大量的磨粒，从而使磨粒在离心力的作用下不断撞击工件表面，与工件表面产生微小摩擦并产生材料去除的效果^[19-20]。

整个加工过程中聚氨酯加工球头与被加工工件表面全部置于抛光液之中。磨粒与工件材料的不同影响着材料去除率和表面粗糙度。实际中，工件材料往往是确定的，磨粒根据材料的不同来选择合适的材料与粒度（一般是硬质粉末），加工过程中通过控制聚氨酯球头的转速和球头与加工表面的距离（一般是微米级）来调整加工的动态特性，从而获得理想的加工效果。



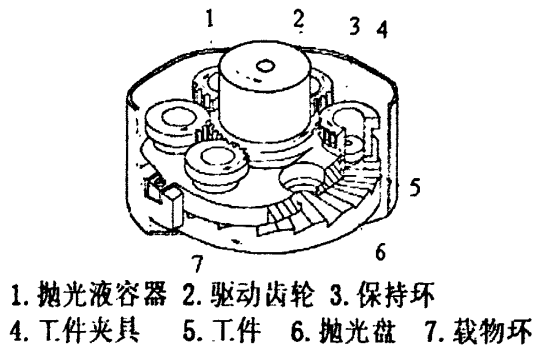
1. 十字弹簧 2. 数控主轴箱 3. 载荷支撑杆 4. 聚氨酯球
5. 工件 6. 橡胶垫 7. 数控工作台 8. 工作台 9. 悬浮液
10. 容器 11. 重心 12. 无级变速电动机

图 1-1 EEM 装置及原理示意图^[15]

与传统的加工方法相比，弹性发射加工有两个主要的特点：(1) 加工过程中受温度等环境因素影响非常小，选择适当的加工条件如磨料材料、介质粘度、抛光球转速、加工时间参数和工件材料，可以获得纳米级表面粗糙度表面，并且表面没有热损伤层；(2) EEM 系统对设备刚度要求较低，但对进给位置精度有极高的要求，而选用球形抛光头，使加工效率低下。

2、动压浮离抛光 (Hydrodynamic-type Polishing)

动压浮离抛光是 Watanabe 等利用动压轴承的原理开发的一种非接触式精密加工技术^{[15][21]}，如图 1-2 所示。



1. 抛光液容器 2. 驱动齿轮 3. 保持环
4. 工件夹具 5. 工件 6. 抛光盘 7. 载物环

图 1-2 动压浮离装置示意图^[15]

在抛光盘的圆周方向设置一些倾斜的平面，加工工程中，抛光盘旋转带动抛光液并产生一定的液动压力，使工件浮在抛光盘的表面，此时在抛光盘与工件之间充满了旋转

的抛光磨料，并对工件产生材料去除的作用。由于整个加工中没有磨具磨损与摩擦热产生，标准面也不会发生变化，所以可以多次获得精密工件表面。试验中利用该方法对 75mm 直径硅晶片进行加工，获得了 Ra1nm 的表面粗糙度及 0.3 μ m 的平面度。利用液流动压是该方法的一个优点，但系统通常只适用于一些特点简单的块状、圆柱等进行加工，而无法适用于模具。

3、磁流变抛光 (Magnetorheological Finishing, MRF)

磁流变抛光是磁场辅助型抛光的一种，由 KORDONSKY 等在 20 世纪 90 年代初提出的一种超精密加工方法。磁流变抛光结合了流体动力学和电磁学的理论，利用磁流变液（由基液、磁性磨粒和稳定剂组成）在磁场中的流变特性来对工件进行抛光。该磁流变液通常是由高导磁率、低磁滞性的微小软磁性颗粒和非导磁性液体混合而成的悬浮体，由于这种悬浮体在磁场的作用下的流变是瞬间并且可逆的，其流变后的剪切屈服强度和磁场强度有着稳定的对应关系^{[15][22]}。其加工装置如图 1-3 所示。

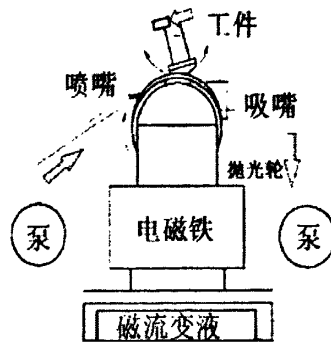


图 1-3 磁流变抛光装置示意图^[15]

磁流变液经泵装载后喷射在高速旋转的抛光轮上，并在抛光轮下方置于磁极，从而使工件与抛光轮之间形成一个高梯度磁场。在该磁场作用下，磁流变液凝结成为粘塑性 Bingham 介质，并且在抛光轮带动下，使工件表面的接触区产生一定的剪切力，从而产生材料去除的效果。2006 年孙希威等利用磁流变抛光加工了口径 20 mm、R41.3 mm 的 K9 玻璃球面工件，获得了粗糙度为 8.441 nm、面形精度为 57.911 nmPV 的光滑表面^[15]。

目前磁流变抛光技术主要应用于玻璃材料。抛光中磁流变液的粘度及方向取向可以通过外加磁场强弱的调节来控制，但控制起来比较复杂，特别是对于不对称结构很难达到材料均匀性去除。

4、气囊抛光 (Gasbag Polishing)

气囊抛光技术是由 Zeeko 公司的 D.D.Walker 等人和伦敦光学实验室 2000 年联合提出, 基于 SBCT (Spinning-Bulged-Complaint Tool) 抛光工具的新型抛光技术, 并开发了 IRP 系列高精度抛光设备, 成功应用于光学器件的曲面抛光。气囊抛光中采用不同抛光工具实现了较高的材料去除率和较小的表面粗糙度值。通过控制气囊压力、接触区面积和驻留时间, 使其适用于不同形状的表面抛光^[24-25]。如图 1-4 所示。与传统的抛光相比, 气囊抛光工具的接触面为柔性体, 并且可以根据被抛表面粗糙度及曲率的不同在线调整通气压力; 抛光工具可以和工件形成较大仿形接触, 从而保证了多曲率下的接触吻合度, 在曲面抛光应用中有较好的抛光效果。

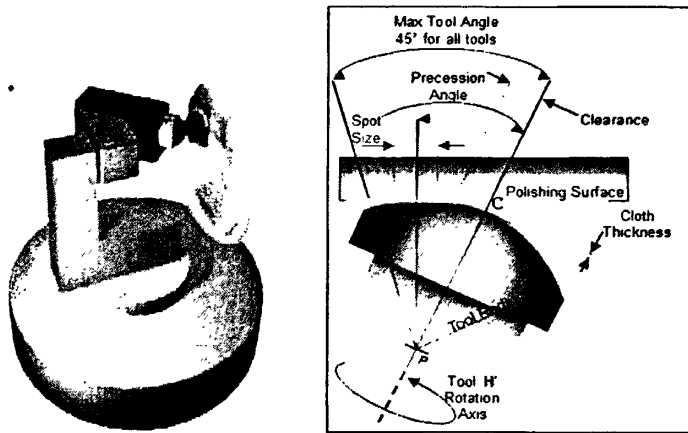
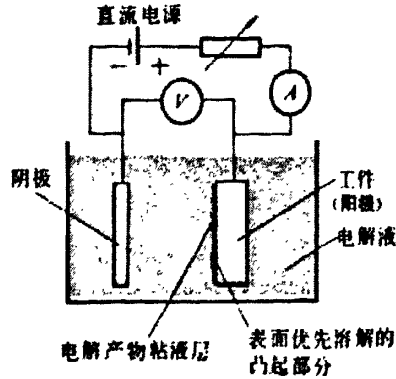


图 1-4 气囊抛光示意图^[25]

国内哈尔滨工业大学高波、袁哲俊等人在 D.D.Walker 基础上首先对气囊抛光进行了研究, 研制了气囊抛光工具, 并对 BK7 玻璃进行抛光试验, 取得了 Ra1.249nm 的超光滑表面^[25]。浙江工业大学针对模具加工业进行了气囊抛光的研究, 获得了镜面级模具表面。气囊抛光由于采用了柔性的加工球头, 使加工表面在不同曲率下抛光工具得以匹配, 实现了复杂表面的超精密加工效果^[26-27]。但由于结构上的限制, 气囊抛光较适合于较大曲率半径的外表面抛光, 并且要频繁涂抹研磨膏。

5、电解抛光 (Electrolytic Polishing)

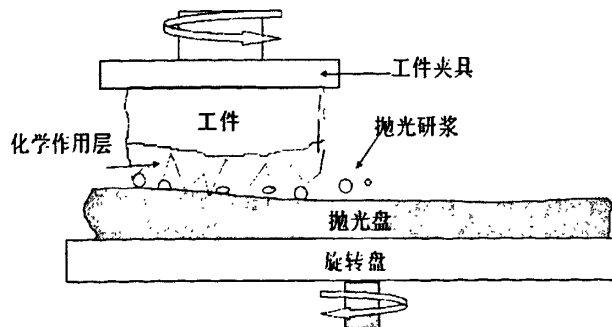
电解抛光又称电化学抛光, 1930 年法国电话公司 Jacquet 首次提出了电解抛光技术, 并进行了系统研究^[15]。电解抛光是以不溶性金属为阴极, 以被抛工件为阳极, 并将其同时放入电解槽内, 通过直流电源产生有选择性的阳极溶解, 从而使工件表面亮度增加, 如图 1-5 所示。

图 1-5 电解抛光原理^[17]

目前,解释电解抛光较合理的理论是薄膜理论。薄膜理论认为,由于待加工表面凹凸不平,在电解抛光过程中,靠近金属工件阳极的表面形成一层薄厚不均匀的粘性薄膜。由于电解液不断流动,在靠近工件表面凹陷的地方扩散得较慢,形成的膜较厚,而在凸起位置薄膜较薄。由于工件表面各处的电流密度存在较大差异,凸起的地方电流密度较大,使金属较快地溶解于电解液中,而凹陷部分则溶解的较慢,最终使得粗糙的表面变得平整并达到抛光的目的。2003年 HUANG 等[60]对工具钢进行电解抛光试验,获得 Ra30~50 nm 的光滑表面^[28]。电解抛光通常需要消耗较长的时间,并且根据材料特性的不同抛光效果有较大差异。

6、化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing CMP)

化学机械抛光是将物之间化学反应和磨粒机械磨削相结合的抛光方法。抛光液的化学腐蚀作用使待加工表面形成机械表面损伤层,为磨粒磨削创造有利条件。加工过程如图 1-6 所示。

图 1-6 化学机械抛光示意图^[29]

目前化学机械抛光方法主要应用在硅片加工领域,将二氧化硅溶入氢氧化钠溶液中,小部分反应生成了硅酸钠($\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$),大部分二氧化硅微粉分散在氢氧化钠溶液中形成二氧化硅胶体,该胶体对硅有腐蚀作用,生成硅酸钠。在工件与研磨盘的运动下,胶体同时有了对晶片表面机械损伤层磨削的作用。化学机械抛光对设备要求较低,材料去除率比传统的机械磨粒流抛光效率有所提高,并能使工件表面获得较好的粗糙度^[29]。

7、激光抛光(Laser Polishing)

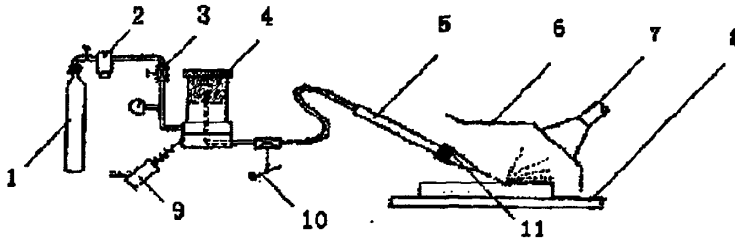
激光抛光是利用激光与材料表面的相互作用进行加工,其遵循激光与材料作用的普遍规律。激光与材料相互作用会产生热效应和光化学效应,所以激光抛光也分热抛光和冷抛光。热抛光通常采用连续波长激光源,如波长10.6 μm 的 CO_2 激光器,通过熔化和蒸发等过程实现表面材料去除。热抛光由于产生的热应力大,被抛光表面容易出现裂纹,抛光效果往往不理想。冷抛光通常采用短脉冲短波长紫外准分子激光器或飞秒脉冲激光器,由于脉冲宽度很窄,热效应可以忽略,材料去除主要通过光化学的分解作用,即材料吸收光子后,其化学键被打断或晶格结构被破坏,使表面材料剥离。冷抛光不会产生裂纹,适合于超精密抛光。作为一种非接触式抛光,激光抛光不仅能加工平面,还能对各种曲面进行加工,而且对环境污染很小,方便实现局部抛光,非常适用于脆性材料和超硬材料的精抛,具有很好的发展前景。但目前激光抛光还处于发展阶段,存在着设备及加工成本高、检测技术难和精度控制技术要求高等缺点^[30-31]。UDREA等人^[32]利用 CO_2 激光器对光纤端面进行了抛光试验,得到 $\text{Ra}100\text{ nm}$ 的表面粗糙度。

8、磨料喷射加工(Abrasive Jet Machining)

磨料喷射加工是一种利用磨料的高速射流对材料进行冲刷来光整工件表面的。其加工原理是将气体或液态与磨粒混合,用高压射流的方式,使磨粒高速冲击摩擦工件表面,使表层部分材料去除。如图1-7,表示了磨料喷射加工的主要工艺流程。经净化的空气压缩后进入混料室与磨粒进行混合,气体压力主要通过节流阀3控制,混入磨料的多少可以通过调节激振器的振动频率和幅度来控制。

磨料喷射加工根据混合介质不同分为气流磨料喷射加工和液流喷射加工,液流喷射加工一般材料去除率较高,经加压系统加压在喷嘴处可以形成100~400MPa,速度在500~900m/s的束流,而气流喷射加工时压力和流速要小的多,材料去除率也大大减小,但可以获得更高质量的表面。磨料喷射加工时加工面积和材料去除深度取决于束流直径、喷射速度、喷射角度等参数。该方法主要用来对高硬度材料,如陶瓷、玻璃等进行

切割、表面修饰。通常情况下，采用液流喷射由于材料去除率较大很难达到光整表面的目的，利用气流磨料喷射时可以选择不同尺度的磨粒来改变加工效果。



1-压缩气瓶 2-过滤器 3-压力阀 4-混料室 5-手把
6-防尘罩 7-吸尘器 8-工件 9-激振器 10-踏板开关 11-喷嘴

图 1-7 磨料喷射加工示意图^[33]

磨粒喷射加工属于冷加工，并且不会出现热损伤层，但加工后工件表面会有散乱纹理，粗糙度通常也只能到 $Ra0.15\mu m$ 左右，另外磨粒喷射加工很容易使工件表面出现月牙形洼坑，所以喷嘴的控制有加大难度^[33]。

1.2.2 模具超精密加工中存在的主要问题

模具作为制造业领域中重要加工工具，一方面需求量非常大，另一方面对模具的精度要求越来越高，但并不是所有的超精密加工方法都适用于金属模具加工。模具的超精密加工有着特殊的要求，不仅因为其金属的特性，另一方面源于其复杂的结构。目前，包括上述精密加工技术已经有很多方法可以应用于金属模具的超精密加工，但又都有各自的局限性，没有通用型或者十分理想的模具超精密加工方法，主要存在以下问题：

1. 模具加工设备的进给量实际控制精度普遍偏低，特别是非柔性加工方法，很少能到达纳米级，导致加工后模具粗糙度一致性不高。
2. 对于具有型腔的模具表面的超精密加工，大多数数控加工工具仍旧无法进入型腔加工，对于沟槽、清角、异形面等大多还是以手工加工为主。
3. 先进的测控技术没能很好的服务于目前模具抛光设备，特别是加工中的在线监测、轨迹规划及最优控制应用还很少。
4. 目前模具的超精密加工、采用非接触式或柔性加工方法加工大多可以达到纳米级抛光，但加工效率普遍偏低，成本较高。

1.3 本文研究的主要内容

本文是对模具液流悬浮抛光进行的基础性研究,重点研究了模具液流悬浮抛光中的动态参数的变化,以及动态参数对抛光效果的影响。这里动态参数是指通常加工过程中用于控制和改变的参数,包括抛光工具的转速、加工最小间隙(抛光工具表面与工件表面的最小距离)以及液流动压(工件表面压强分布或工件表面受到的法向作用力),动态参数是相对于抛光液、抛光头结构、磨料等参数来说的。具体内容如下:

5. 对液流悬浮抛光机理进行研究,该部分将分别从微观和宏观角度进行材料去除的理论分析,并分析影响材料去除的因素;
6. 对液流动压进行分析,特别是转速和加工间隙对其影响规律;
7. 对模具液流悬浮抛光系统进行 CFD 仿真分析,通过数据提取,重点研究动态参数在抛光区域中的分布,以及相互影响。
8. 针对模具工件,设计可以对动态参数进行在线测控的液流悬浮抛光系统,一方面保证较小的间隙误差,另一方面尽量提高抛光工具转速变化范围。
9. 对模具液流悬浮抛光进行试验研究,包括液流动压力与转速和间隙的关系,动态参数对抛光效果的影响,以及简单的材料去除率分析。对实验数据进行分析,找出动态参数与表面粗糙度或材料除去率之间的变化关系,为液流悬浮抛光工艺设计数据库做准备。

第 2 章 模具液流悬浮抛光理论研究

2.1 引言

模具液流悬浮抛光理论研究是实现加工工艺指导的技术源泉。其中机理的研究是液流悬浮抛光方法的本质，是获得抛光中各参数与抛光效果之间关系的重要依据，特别是对控制动态参数，实现抛光效果预测，指导工艺构建，技术创新有着重要意义。

液流悬浮抛光是结合了弹性发射理论和液流动压原理，以软质材料作抛光工具，与工件表面保持微米级间隙，含有磨粒的抛光液在高速旋转的抛光工具带动下，喷射到工件上实现加工效果的。如图 2-1 所示。抛光液通常是在抛光基液内加入适当的活性剂和磨料微粒；在加工间隙区通过抛光工具带动，形成高速动压液流，进而形成一种超细磨粒对工件表面冲刷和弹性发射共同作用下材料去除。

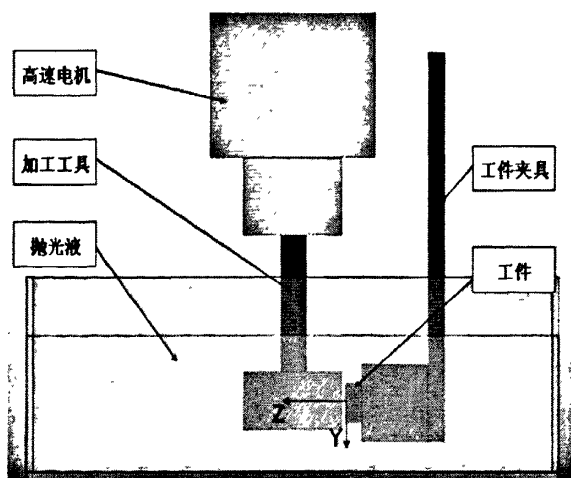


图 2-1 液流悬浮抛光原理图

液流悬浮抛光是一个极其复杂的过程，特别是加工区，抛光液及磨粒对工件表面材料的作用涉及到多种物理化学作用。但实现工件表面抛光，最终是要有工件表面材料的去除，本文从材料去除角度出发，研究了磨粒对工件表面剪切材料去除模型及液流动压作用下，结合摩擦理论，对材料宏观去除进行了理论研究。

2.2 液流悬浮抛光机理分析

2.2.1 磨粒剪切材料去除分析

在抛光过程中,由于抛光工件的高速旋转,流体将磨粒带入楔形区。假设加工区流体为层流,流体对磨粒作用力可以分解为水平剪切方向 F_t 和垂直压入方向 F_n ,工件对磨粒的反作用力为 R ,磨粒一方面在工件表面滑动,另一方面绕接触点 O 转动,如图 2-2 所示。根据牛顿第二定律,有如下关系^[34-37]:

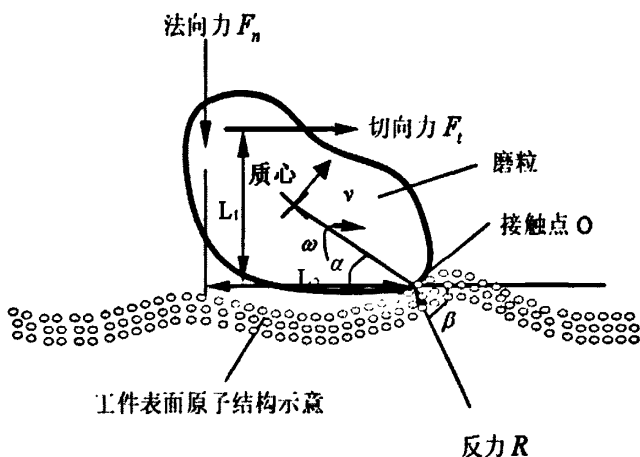


图 2-2 单颗磨粒受力分析^[34]

$$F_t - m_p r \omega^2 \cos(\alpha) - R \cos(\beta) = m_p r \dot{\omega} \sin(\alpha), \quad (2-1)$$

$$-F_n - m_p r \omega^2 \sin(\alpha) + R \sin(\beta) = m_p r \dot{\omega} \cos(\alpha), \quad (2-2)$$

$$F_t L_1 - F_n L_2 = I_o \dot{\omega}, \quad \omega = \frac{v}{r} \quad (2-3)$$

其中, m_p 为磨粒质量; w 为磨粒相对接触点的角速度; r 为磨粒质心与接触点 O 之间的距离; I_o 为磨粒在 O 点的转动惯量; L_1 与 L_2 为切向力和法向力的作用力臂。对上式进行变换,则反力 R 的两个分量 R_x 和 R_y 为:

$$R_x = R \cos(\beta) = F_t - m_p r \omega^2 \cos(\alpha) - m_p r \sin(\alpha) \frac{F_t L_1 - F_n L_2}{I_o} \quad (2-4)$$

$$R_y = R \sin(\beta) = F_n - m_p r \omega^2 \sin(\alpha) + m_p r \cos(\alpha) \frac{F_t L_1 - F_n L_2}{I_o} \quad (2-5)$$

当磨粒对工件表面的剪切力 $-R_x$ 大于工件表面层原子之间的作用力时，磨粒就获得了足够的能量用于破坏工件材料原子结合能，工件材料便被去除。且随着 $-R_x$ 的增大，材料的去除率也会提高；对于相对粗糙的表面而言，其峰谷明显，由于磨粒与峰顶接触面积小，接触有较大应力，就有明显的塑性变形。一定作用时间以后，工件表面粗糙度降低，从而达到抛光的效果。

2.2.2 液流悬浮抛光宏观作用分析

根据弹性发射抛光原理和动压理论，液流悬浮抛光是以高速旋转的弹性工具带动抛光液，对工件表面进行不断的机械冲击和弹性发射的作用效应。理论模型如图 2-3 所示。抛光过程中，大量连续的磨粒对工件表面的冲击能量来自于高速旋转的抛光工件，可以说抛光工具与工件是一种软接触^[38-40]。

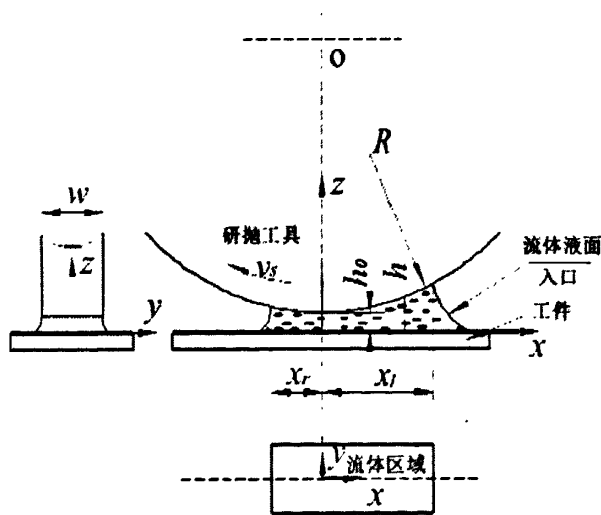


图 2-3 液流悬浮抛光理论模型^[39]

根据 Preston 提出的材料去除原理，接触区某一点材料去除率可以表示为：

$$W(x, y) = K \cdot P(x, y) \cdot V(x, y) \quad (2-6)$$

其中， K 是和加工条件相关的系数，包括抛光液粘度、密度（忽略温度影响）和被加工材料属性的影响， P 为该点表面压强， V 为抛光工具和工件间的相对速度。

考虑到液流悬浮抛光中实际与工件发生摩擦的是抛光液在靠近被抛面的液流层，根据非接触润滑动压加工理论，该速度项与接触液流层的速度梯度有关^[41-42]。设抛光工件表面为 A ，抛光表面中心位置为坐标原点。则抛光表面的材料去除率为：

$$M = K \cdot \iint_A p(x, y) \frac{\partial u_f}{\partial z} dx dy + c \quad (2-7)$$

式中, u_f 为流体在 x 方向的速度, p 为流体在抛光区形成的液流动压, c 表示只有作用于工件表面的能量达到一定值时, 材料才会发生去除作用。由上式可知, 加工中液流动压及接触层的剪切速度梯度对材料的去除有着重要的作用。由于实际的材料去除还与抛光表面初始质量有关, 则该去除率只表示材料表面质量稳定后的关系。

2.3 液流动压分析

根据托尔发现的油楔效应, 液流动压可以使润滑状态下的滑动轴承建立起承载油膜。接着雷诺指出在滑动轴承中, 滑块的运动在油膜中产生了剪应力, 并且把油带入了润滑间隙, 进而产生了油膜压力。雷诺研究了该状态下流体动力学问题, 并指出当粘性流体以一定的速度在收敛性的缝隙(工件与工具间形成收敛楔)中运动时, 就会产生液流动压^[43-45]。

为了对抛光液流动压进行求解, 对图 2-3 所示理论模型进行假设^{[38][43]}: 1、设抛光液为连续不可压缩的牛顿流体, 流动状态为层流; 2、忽略温度和压力对抛光液粘度的影响, 加工液是线性流体, 且相对于粘性力, 忽略其惯性分量和粘压效应; 3、抛光工具表面为理想光滑表面; 4、沿流体膜厚 h 方向 (Z 向), 压力 p 恒定。

基于以上假设, Navier-Stokes 方程可以简化为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_f}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial^2 u_f}{\partial z^2} \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v_f}{\partial z^2} \quad (2-9)$$

式中, u_f 、 v_f 分别为流体在 x 、 y 方向上的速度; μ 为流体动力粘度。对式 (2-8)

和 (2-9) 积分, 取边界条件: $\begin{cases} z=0, u_f=0; & z=h_0, u_f=U \\ z=0, v_f=0; & z=h_0, v_f=0 \end{cases}$, 并将 u_f 和 v_f 代入流体

连续方程 $\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} + \frac{\partial w_f}{\partial z} = 0$, 得液流悬浮抛光流场分布模型如下:

$$\left\{ \begin{aligned} u_f &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(z-h) + \frac{U}{h} z \\ v_f &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z(z-h) \\ w_f &= \frac{z^2}{4\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{z^2}{2\mu} \left(\frac{h}{2} - \frac{z}{3} \right) \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) - \frac{z^2}{2h^2} \frac{\partial h}{\partial x} U \end{aligned} \right. \quad (2-10)$$

其中，U 为抛光工具线速度；h 为抛光工具与工件表面间的距离； w_f 为流体在 z 方向上的速度。设抛光工具半径为 R，最小间隙(x=0 处)为 h_0 ，则有 $h(x) = h_0 + x^2 / (2R)$ 。

由 Reynolds 方程可知抛光区液流动压表示为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2-11)$$

忽略重力及惯性力影响，动压力沿工件厚度方向（Y 向）无变化。则：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6\mu U \frac{h-h_m}{h^3} \quad \left(\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ 时, } h=h_m \right) \quad (2-12)$$

通过求解式 (2-11) 可以得到液流动压沿 X 方向的分布，如图 2-4 所示^{[43][46]}。

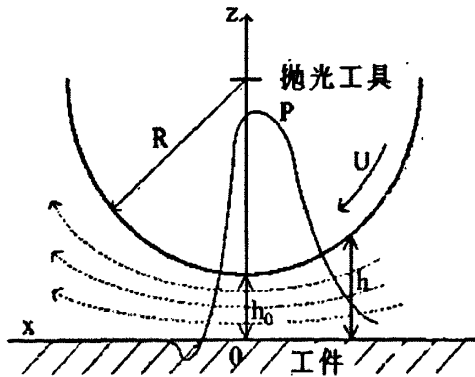


图 2-4 抛光区液流动压分布^[43]

2.4 液流悬浮抛光区数值模拟

由于流场理论分析中存在大量偏微分方程，特别是压力分布函数目前尚未有解析解^[38]，但动态参数对抛光区及材料去除有着重要的影响。为了进一步研究液流悬浮抛光中动态参数对抛光区流场的影响，利用有限元方法进行计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics CFD）分析。

本文使用 FLUENT 软件对模型进行了 CFD 仿真分析，FLUENT 软件是目前国内外最

流行的商业软件之一，集成了PloyFlow和Fluent Dynamical International(FID)的全部技术后台，包含了非耦合隐式算法、耦合隐式算法和耦合显式算法，能够精确的模拟层流和湍流（包含Spalart-Allmaras模型、k- ϵ 模型组、k- ω 模型组、大涡模拟模型（LES）组、雷诺应力模型（RSM）组以及最新的V2F模型分离和涡模拟（DES）等，适用于牛顿流体和非牛顿流体。网格方面采用了动态网格技术，解决了边界运动的问题，另外还支持不连续网格、滑动网格和混合网格等。

2.4.1 模型建立

在模具液流悬浮抛光中，内部流动的抛光液主要有磨粒和抛光基液组成，磨粒属于固体颗粒范畴，因此流动属于多相流问题，但考虑磨粒粒径通常在几百纳米甚至几十纳米尺度，与基液混合后，可以近似看成一种流体。另外抛光液工作时在抛光工具高速带动下有很好的均匀性，这也意味着抛光液浓度分布基本稳定。根据上述分析，这里将整个抛光液看成一种流体介质，问题简化为单相流。

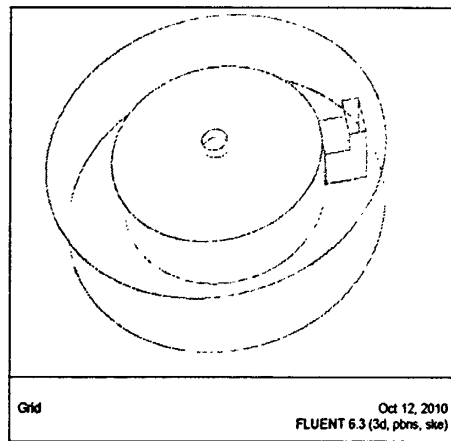


图 2-4 液流悬浮抛光仿真模型

根据图 2-1 液流悬浮抛光原理，在 FLUENT/GAMBIT 环境下建立物理模型如图 2-5 所示。设定必要参数如下：

流体动力粘度 $\mu=0.05\text{Pa} \cdot \text{s}^{[44]}$ ；

抛光液容器： $\phi 80\text{mm} \times 20\text{mm}$ ；

抛光工具： $\phi 50\text{mm} \times 15\text{mm}$ ；

工件表面： $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ；

对模型进行网格划分，并进行 CFD 求解^[48-49]。

2.4.2 表面压力分布

设定抛光工具转速为6000RPM，调整间隙，计算工件表面压力如图2-5所示。

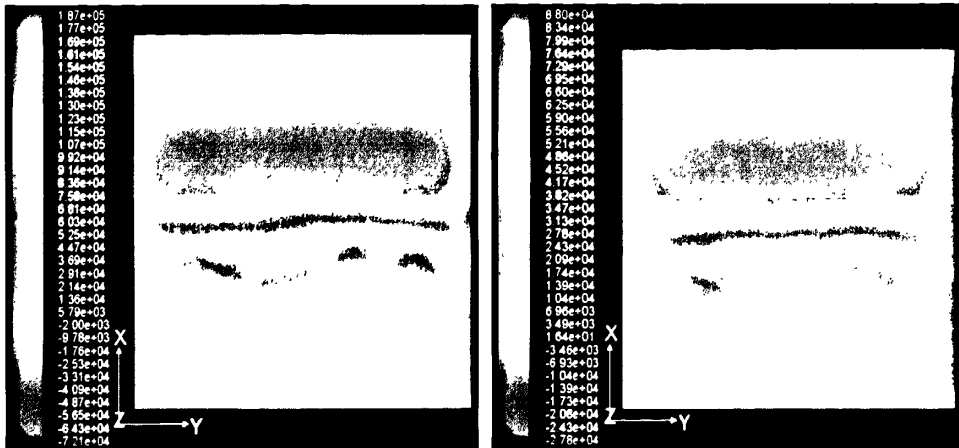


图 2-5a 最小间隙为 50um 时压力分布图

图 2-5b 最小间隙为 100um 时压力分布图

从图 2-5 中可以看出，沿工件间隙变化方向（X 向）动压力变化较大，且在工件边缘区，基本没有动压力形成，而在 Y 向，抛光保持了相同的加工间隙，动压力基本相同。有些局部的变化，是由于建模中由于工件及夹具的作用，导致了某些小区域流场的紊乱，破坏了层流，但这更符合加工实际环境。从 50um 和 100um 对照来看，局部紊乱对大间隙时影响较小。并且当最小间隙为 100um 时，动压力有效作用域明显扩大，能量趋于分散。设定最小间隙（ h_0 ）为 50um，改变抛光工件转速，计算工件表面压力如图 2-6 所示。

从图 2-6 可以看出，改变转速对动压力分布影响不大，只是在数值上有所增加。并且转速的增加有利于流场接近理想流场，基本属于层流。由于沿 Y 方向压力相同，为了更好的分析压力分布与转速和间隙间的关系，沿工件 X 方向中心线对压力值进行数据提取，结果如图 2-7 所示。

从图中可以明显看出工件表面液流动压沿 X 轴方向压力变化，与理论值（图 2-4）基本一致，最大压力出现在入液流口处，最小间隙之前，且在出口处有负压带。不同之处在于仿真分析了更为真实的物理环境，受模型结构约束，但总体分布趋势一致。从最小间隙来看，100um 在液流入口区趋于平缓，而 59um 变化明显，说明压力能量分布对最小间隙比较敏感；从转速变化来看，压力最大值对转速比较敏感。另外，转速和间隙的变化都没有影响到压力极致点，在 $x=-1.456\text{mm}$ 处，可以说同时到达了压力最大值。

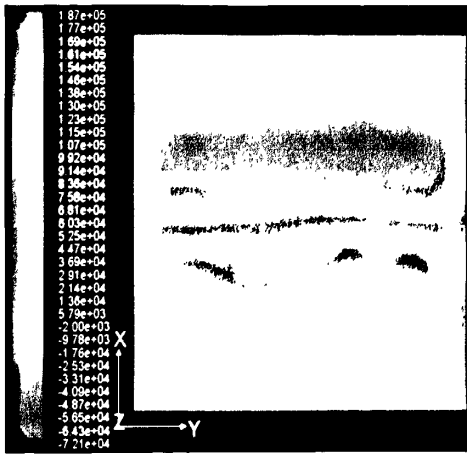


图 2-6a 转速为 6000RPM 时压力分布图

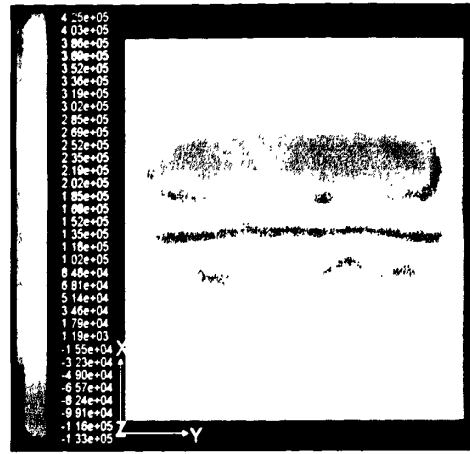


图 2-6b 转速为 12000RPM 时压力分布图

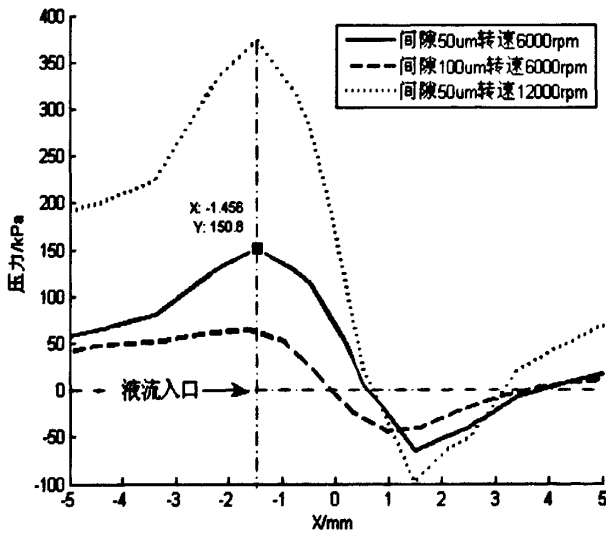


图 2-7 沿工件表面 X 方向压力

2.4.3 速度场仿真分析

根据液流悬浮抛光的宏观作用分析，流场特别是抛光区流场对材料去除有着重要作用，利用 CFD 仿真分析，获取流场矢量信息将对研究磨粒流动有着重要意义。根据理论模型，设流场为层流，磨粒悬浮沿 Y 向无运动，则 XZ 面流场表征了沿间隙变化方向流场运动规律。设置转速为 6000RPM，加工间隙为 100um，计算流场分布如图 2-8 所示。

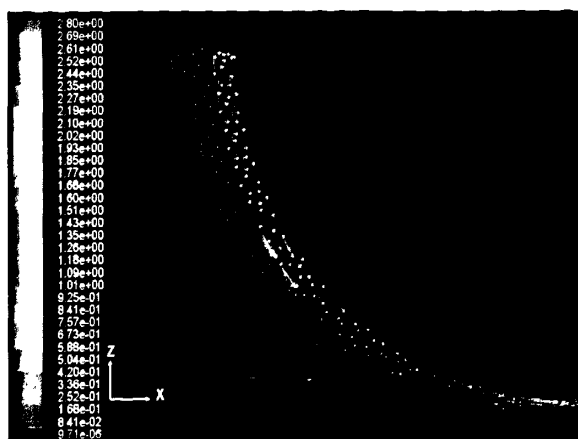


图 2-8a 抛光间隙区入口部分流场分布

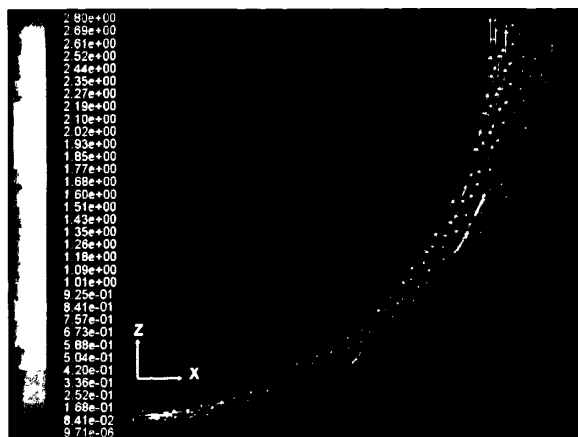


图 2-8b 抛光间隙区出口部分流场分布

从图中可以看出，在抛光最小间隙附近，流场流速较大，并且没有紊乱；而在离工件边缘区域，间隙比较大时，流速很快衰减，并且在出口处有局部的涡流，这也是出口形成负压的主要原因。在入口处速度在垂直于工件表面方向有较大分量，这样导致了在液流到达最小间隙前就形成了较大液流动压。

在 XZ 面上，详细分析间隙区流场变化，对间隙中心线上速度幅值进行数据提取，结果如图 2-9 所示。

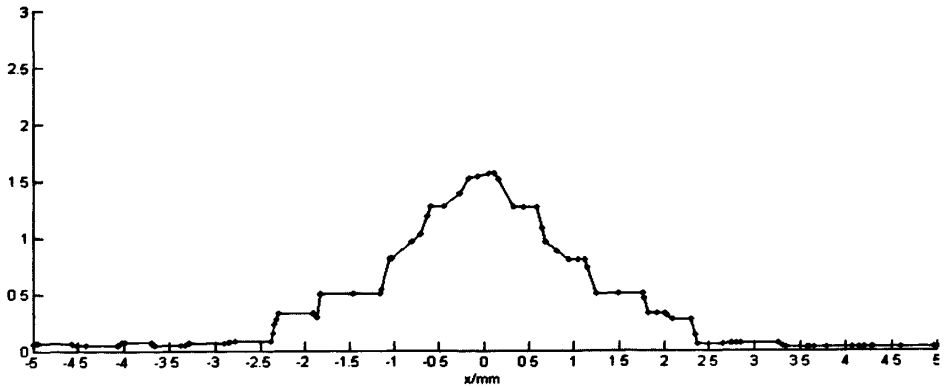


图 2-9 加工间隙中心线上流速幅值

对比图 2-7 中间隙为 100 μm 时液流动压的变化, 流速与压力在幅值关系上基本一致, 说明流场运动对工件表面压力有着重要影响。由于材料去除与工具表面 X 方向速度梯度有着重要关系, 对 50 μm 中心线进行 X 方向速度提取, 如图 2-10 所示。

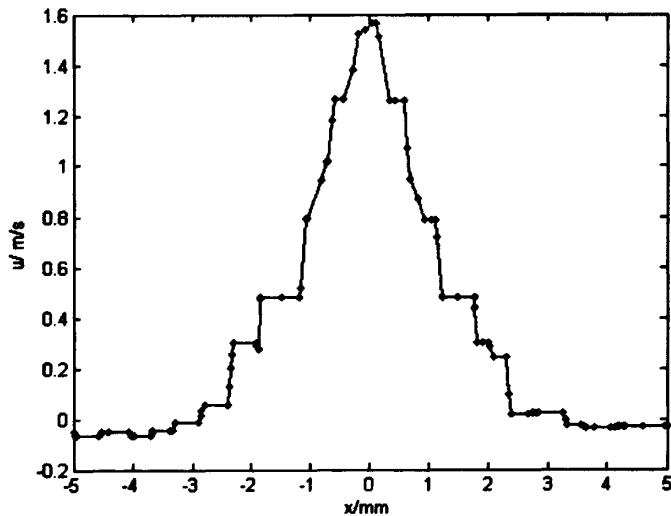


图 2-10 加工间隙中心线上 X 向流速

对于图 2-10 与图 2-9, X 向流速与流场幅值分布基本相同, 在间隙比较小的地方, X 向流速与流场总的幅值基本相同, 说明此时流向确实平行于工件表面流过; 在间隙较大处, 流场与压力场差异较大, 结合材料去除理论分析, 该部分在抛光时有较小的材料去除效率, 甚至没有抛光效果。

2.5 本章小结

本章从微观和宏观上对液流悬浮抛光进行了机理分析。一方面磨粒对工件表面的作用力使材料发生塑性变形，在一段作用时间后使其表面粗糙度降低；另一方面，结合 Preston 方程，分析了在液流悬浮下材料除去的模型，材料除去效率与抛光表面液流动压和流场中平行于抛光表面上速度梯度有着重要关系。

结合油楔效应和动压润滑理论，重点分析了抛光模型中液流动压分布和速度变化关系，说明沿 Z 方向的速度梯度，不仅与加工间隙有关，还是 Z 的变化函数。而压力分布基本为抛物线分布，且有较短负压带。

对模具液流悬浮抛光系统进行了 CFD 仿真分析，重点提取了加工区流场及压力场的分布信息。通过数据分析，绘制了液流动压分布及速度变化关系，另外仿真结果同时表明最大动压力位于液流入口某处。

第3章 模具液流悬浮抛光系统

3.1 模具液流悬浮抛光系统工作原理

根据液流悬浮抛光原理，液流悬浮抛光要求对抛光工具转速及工件与抛光工具表面最小间隙进行控制。本文设计了针对金属模具的液流悬浮抛光系统，如图 3-1 所示。系统采用计算机控制，并实现动态参数的过程监控。

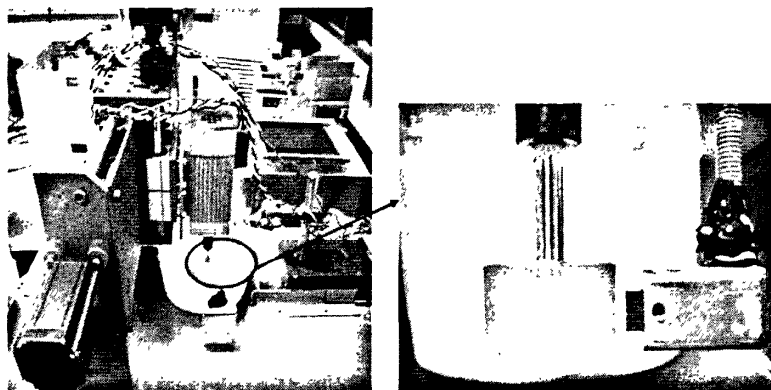


图 3-1 模具液流悬浮抛光系统

系统包括定位模块、抛光工具模块及测力夹具模块。其中定位模块包括数控三维定位装置，实现抛光工具位置调整，特别是对最小间隙的控制；抛光工具安装在主轴电机上，实现抛光工具的转速控制，并通过上位机软件对速度进行监测；测力夹具模块一方面实现工件的定位，另一方面实现对工件表面压力的监测。系统工作原理如图 3-2 所示。

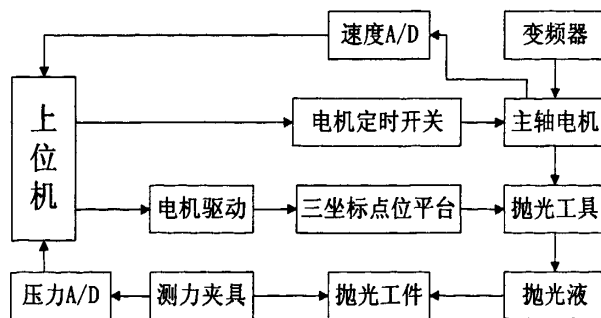


图 3-2 模具液流悬浮抛光系统工作原理

抛光过程中，由上位机输出定位装置位置信号，调整抛光工具到合适位置，并对加工间隙进行微调，确定当前的最小间隙；调节变频器输出频率，并查看上位机显示速度是否为当前需要转速；调整上位机软件时间设定，对抛光时间进行设定。抛光过程中，抛光工具转速及工具表面液流动压力通过上位机实时显示，并可以进行数据保存。

3.2 系统模块设计

3.2.1 定位模块

数控定位系统一方面是对加工工具进行空间定位，另一方面是调整工件与加工工具之间的间隙。如图 3-3 所示

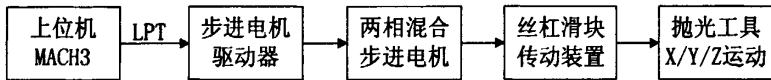


图 3-3 数控定位系统组成

Mach3 CNC 控制软件是由美国 ArtSoft 公司开发的由 Windows 为平台的数控软件。系统版本必须为 WIN XP 或 WIN2000。Mach3 软件使用 PC 电脑的 LPT 或 USB 端口作为 CNC 设备的输入与输出，输出脉冲与方向信号控制步进电机或伺服电机驱动器。从

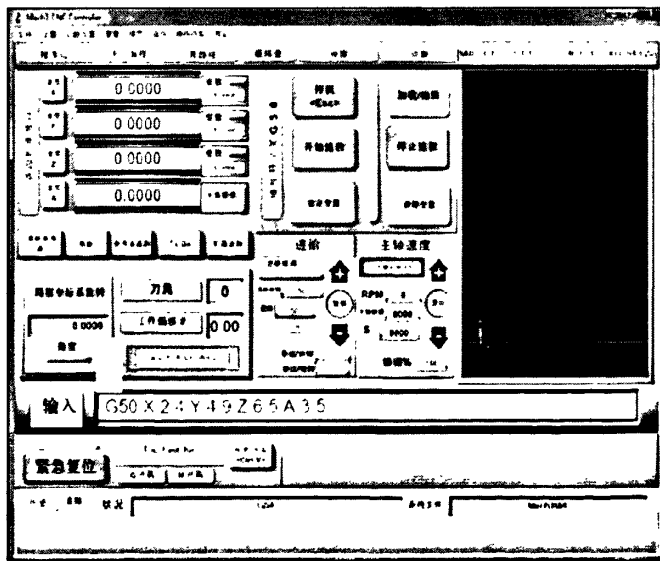


图 3-4 MACH3 运行界面图

而实现控制数控机床。软件支持所有国际标准 G 代码最多控制 6 轴。能 5 轴联动带线形插补功能，能实现复杂零件高精度加工，最高控制精度为 0.0001mm。Mach3 CNC 控制软件是开放式数控系统，直接支持 DXF、BMP、JPG、HPGL 等文件格式输入。系统具有螺距误差补偿,反向间隙补偿,刀具长度补偿,刀尖半径补偿及磨损补偿功能。程序运行界面如图 3-4 所示。步进电机驱动采用研控科技的两相混合式步进电机驱动器 YKA2405。YKA2405MG 是等角度恒力矩细分型高性能步进驱动器，驱动电压 DC16-50V，采用单电源供电。适配电流在 4A 以下各种型号的两相混合式步进电机。该驱动器内部采用双极恒流斩波方式，使电机运行更平稳；驱动电源电压的增加使得电机的高速性能和驱动能力大为提高；而步进脉冲停止超过 100ms 时，线圈电流自动减半，使驱动器的发热可减少 50%，也使得电机的发热减少，性能稳定，适合于 CNC 控制之用。

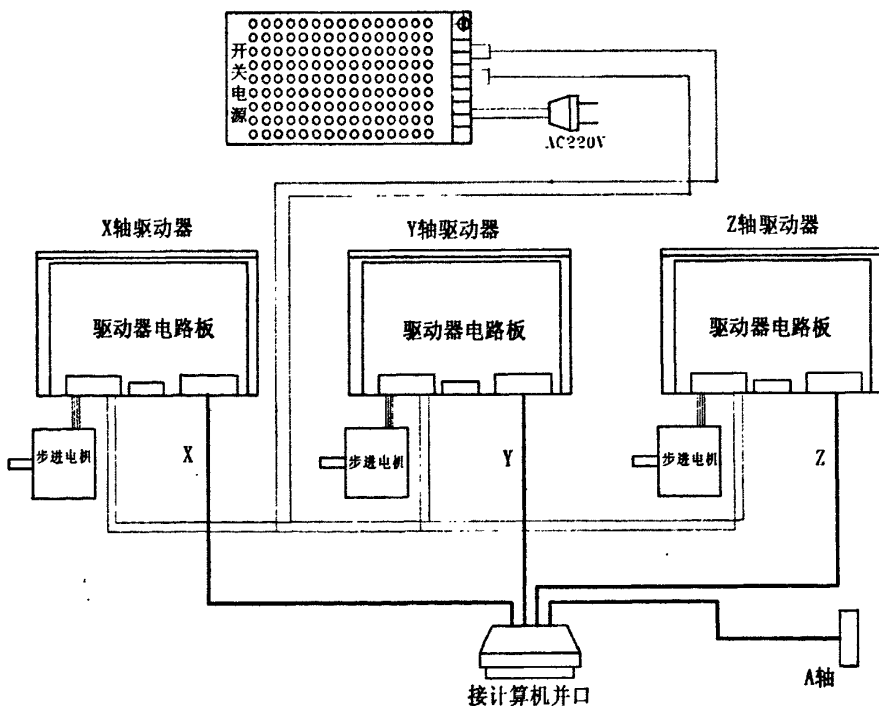


图 3-5 驱动器的连接

该驱动器有以下特点：

设有 12 档等角度恒力矩细分，最高 200 细分；

最高响应频率可达 200Kpps；

步进脉冲停止超过 100ms 时，线圈电流自动减半；

光电隔离信号输入/输出；

驱动电流从 0.1A/相到 4.0A/相连续可调；

出错保护：过热保护、过流、电压过低保护。

YKA2405 两相混合式步进电机驱动器用于直接与计算机并口及步进电机的连接，其连接方式如图 3-5 所示。专用并口线使驱动器受控于 MACH3 软件的控制。试验中设置驱动器为 50 细分；电机选用 YK86HB65 两相混合式步进电机，步距角为 1.8° 。

传动定位平台主要有滚珠丝杠、导轨、滑块及机架组成。其中滚珠丝杠采用台湾上银 HIWIN 精密研磨级滚珠丝杠，丝杠外径 20mm，单头螺距 5mm。根据数控系统的控制及传动关系，加工工具的定位精度为 $1.8/50 \times 5/360 = 0.5\mu\text{m}$ ，即 MACH3 输出单脉冲时，加工工具移动 $0.5\mu\text{m}$ ，完全可以满足液流悬浮抛光对间隙控制精度的要求。

3.2.2 抛光工具模块

模具液流悬浮抛光工具由连接杆与圆柱型聚氨酯抛光头组成。如图 3-6 所示。

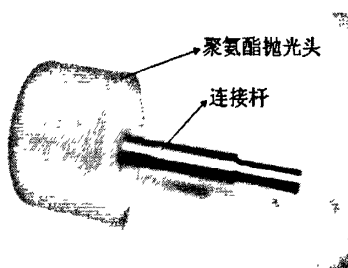


图 3-6 抛光工具

由于抛光工具工作在高速旋转的条件下，并且要求对加工间隙可以进行微米级控制，这就要求抛光工具有极高的加工精度。特别是抛光头的径向跳动及圆柱度误差，将对试验研究有非常严重的影响。试验中采用的电机连接端径向跳动在 $1\mu\text{m}$ 以内，电机与抛光工具用 ER11 夹头连接，再到聚氨酯橡胶同轴度误差及圆柱度误差，最终导致小间隙时抛光头与工件表面发生碰撞。为了提高控制精度，采用了分级配磨的方法，最终达到了试验要求。配磨装置如图 3-7 所示。

配磨过程中，将金刚石锉刀固定在磁性表座上，启动高速电机，调整数控定位系统，将抛光头向锉刀分级进给（逐渐减少进给量），接触摩擦过程中，设定抛光头上下缓慢运动，来减少圆柱度误差和径向跳动。最后用 1000CW 砂纸贴在锉刀表面，对抛光头进行精磨，并达到试验要求。

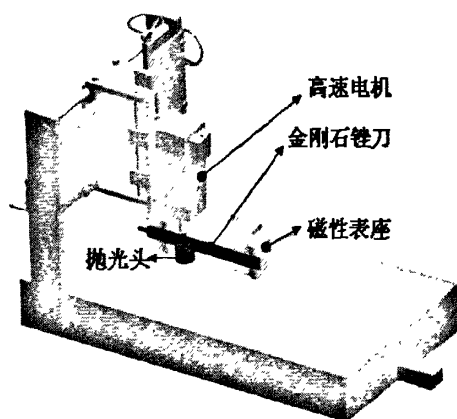


图 3-7 配磨装置示意图

3.2.3 测力夹具模块

根据液流悬浮抛光的原理，磨粒在流场的带动下与工件发生撞击与摩擦，稳定的流场对于加工将产生有利的效果，所以应尽量减少夹具对加工区流场的干扰；另外抛光中工件表面的液流动压力非常小（一般为几 N），所以夹具测力时有较高的灵敏度要求。

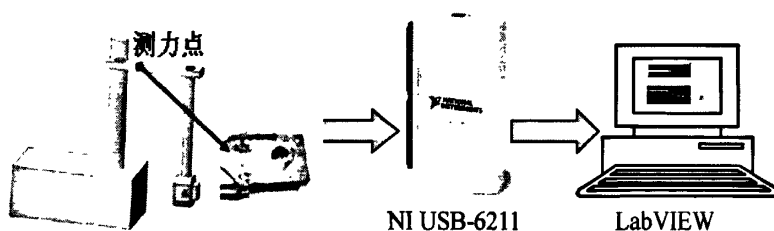


图 3-8 测力夹具系统

为了更好的检测抛光中的状态，特别是对液流动压力的变化，在夹具上安装了液流动压力检测装置。该装置由半导体（扩散硅）应变片作为前端应变传感器，其灵敏度 $K=200$ 。测量方式采用 Wheatstone 电桥差分输入方式，电桥四臂全部采用半导体应变片，以消除温度、振动等共模噪声。根据材料力学分析，将应变片贴在动压力方向最大受力区域，并使其分布到上下两面边沿处，平行布置，当有动压力时（Z 向作用力），上表面 2 个应变片阻值变大，下表面 2 个应变片阻值减小，装置对该方向作用力有很大的灵敏度，而对于 X 向有作用力时，由于上表面 2 个应变片阻值一个增大一个减小，电阻变

化几乎可以抵消，下表面也与上表面相同，实际测试发现 Z 向灵敏度为 X 向灵敏度 20 倍以上，有效避免了抛光时由于液流冲击对动压力测量的干扰。从应变片获取的信号直接经银质屏蔽线接入高速信号采集卡，经放大和模数转换后接入上位机显示。系统如图 3-8 所示。

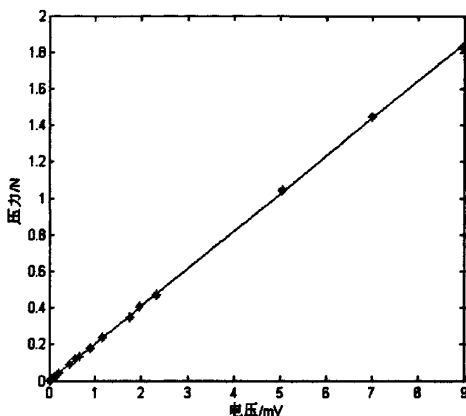


图 3-9 液流监测装置标定曲线

其中高速数据采集卡采用 NI USB-6211 DAQ 装置，属于 NI(National Instruments)公司的 M 系列高速卡。该装置有以下特点：

16 路模拟输入，16 位分辨率，250 kS/s 采样速率；

2 路模拟输出，更新速率 250 kS/s；

2 个 32 位计数器/定时器，时钟频率 0~20MHz。

4 路数字输入、4 路数字输出；

支持 USB 2.0、无需外部供电；

支持 LabVIEW、Visual Studio、Measurement Studio 等多种开发环境。

试验中采用差分信号输入方式，设置模拟输入量程为 $\pm 0.2V$ ，此时绝对精度为 89 μV 。通过 AYU220 分析天平对装置进行标定，标定曲线如图 3-9 所示。

液流动压力检测上位机程序属于模具液流悬浮抛光监测程序的一部分。在 LabVIEW 环境下进行数据集成。包括抛光工具转速监测，工件表面液流动压力监测，抛光定时功能和数据保存功能。如图 3-10 所示。

LabVIEW (Laboratory Virtual instrument Engineering Workbench) 是 NI 公司 1986 年推出的一种图形化的编程语言的开发环境，本文应用的是 LabVIEW8.2 版本。LabVIEW

已经广泛地被工业界、学术界和实验室所应用，被视为一个标准的数据采集和仪器控制软件。LabVIEW 集成了 GPIB、VXI、RS233 和 RS485 等通信接口协议，并内置了 TCP/IP、ActiveX 等标准库，便于其他硬件系统的接入。与 C 和 Basic 语言不同的是，LabVIEW 采用独特的 G 语言图像化编程，各个功能模块封装在一个 vi 里面，非常适合于快速构建测试试验平台。

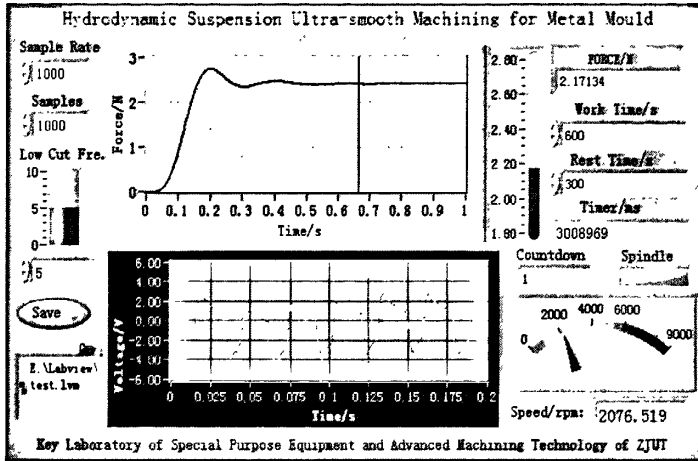


图 3-10a 模具液流悬浮抛光监测程序前面板

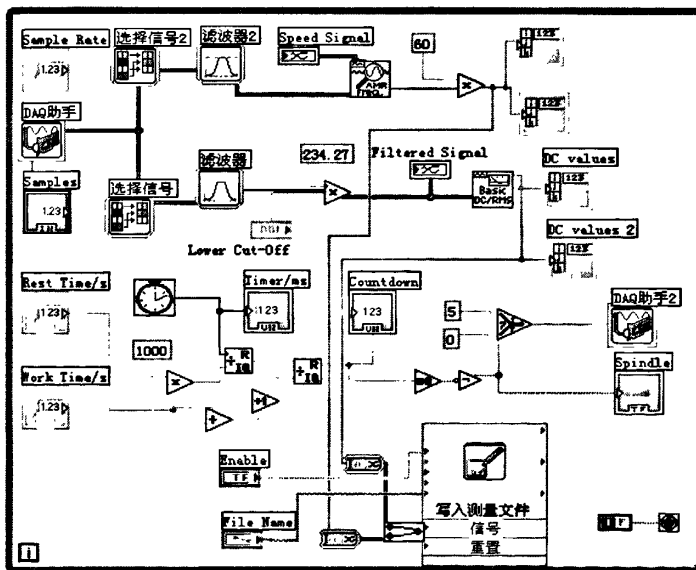


图 3-10b 模具液流悬浮抛光监测程序后面板

在 LabVIEW 开发环境下，设计程序的前面板和后面板，设置速度和压力的数据采集频率均为 1000Hz，压力监测部分设置低通截止频率为 5Hz。数据保存设置连续保存，且各通道一列，取消时间列和头信息。力监测数据不设置绝对零点，需要在分析时自行除去抛光工具静止时值。

3.2 表面测量仪器

1、粗糙度测量仪。试验选用北京时代之峰 TR210 粗糙度仪，如图 3-11 所示。设置取样长度 0.25mm，测量范围 $\pm 20\mu\text{m}$ ，并加入 GAUSS 滤波器。GAUSS 滤波器是目前粗糙度测量中广泛采用的一种滤波方法，还应用于表面结构、轮廓及相位修正。评定参数为轮廓算术平均偏差 Ra 值。

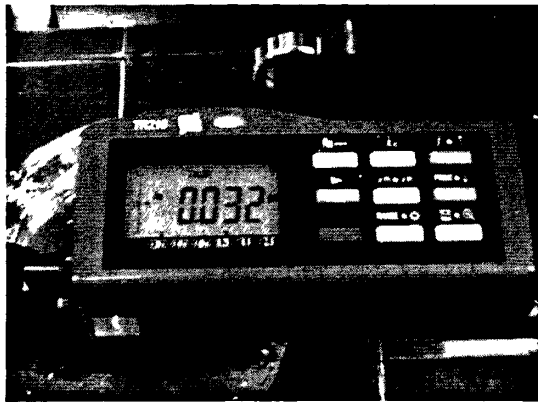


图 3-11 TR210 粗糙度测量仪

Ra 值是目前使用较为广泛的粗糙度标称指标，轮廓算术平均偏差时在一个取样长度内高度（纵坐标）值的算术平均值： $Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$ ，如图 3-12 所示。

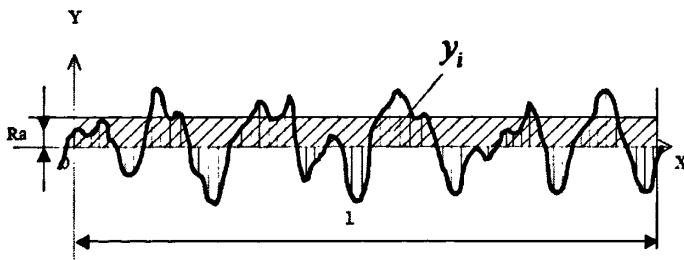


图 3-12 表面粗糙度计算示意图

2、景深显微系统。对于工件表面形貌分布，试验采用了 KEYENCE 公司 VHX-600 型超景深三维显微系统，如图 3-13 所示。该显微系统，最大可以对目标放大 5000 倍，均匀的光线补偿及快速的成像系统，方便对观测表面进行适时显示。另外通过软件或操控小键盘可以方便的对感兴趣的区域进行图像保存。

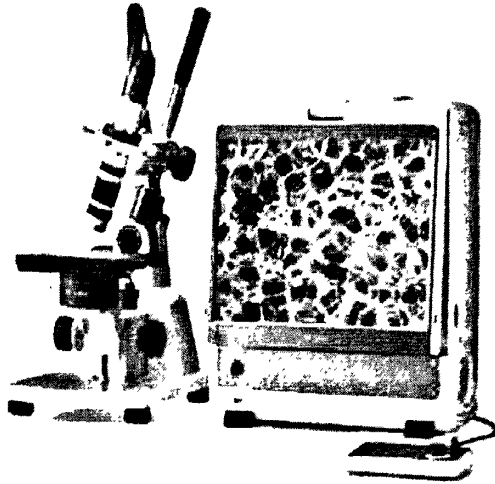


图 3-11 超景深三维显微系统

该仪器具有快速实时深度合成和 3D 显微功能，即可以提取被测表面的高度信息，但该深度为通过移动被测表面后多帧图像的合成，对于几十纳米的高度差表面有较大的误差。但设备提供了 28F/S 动态扫描，分辨率最高可达 5400 万像素，完全可以满足试验工件形貌测量。

3.3 工件及抛光液配置

本实验采用 Cr12 合金工具钢作为试件材料，Cr12 广泛应用于模具及各种冲头，特别是复杂型腔的冷作模具，具有高强度、较好的淬透性和良好的耐磨性。为了获得较好的抛光效果，首先需要对 Cr12 进行预处理，具体过程如图 3-14 所示。

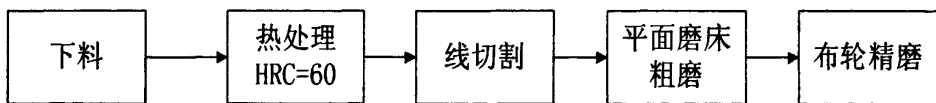


图 3-14 抛光工件预处理流程

模具液流悬浮抛光中，抛光液是影响抛光效果的最关键的部分之一，也是一个技术难点。抛光液主要针对模具钢 Cr12 材料进行配置，主要包括磨料、抛光基液和辅助剂。

根据抛光机理微观分析，磨料颗粒的性质对材料的去除有着十分重要作用。包括磨料的形态及硬度等参数；而从宏观作用机理分析，磨料材料的不同会抛光液对工件的摩擦系数，甚至会改变液流动压力，最终影响材料去除效率和抛光的最终效果。通过对液流悬浮抛光环境的分析，磨料磨粒的选择主要考虑以下几个方面：

- (1) 磨粒材料及组织结构;
 - (2) 磨粒的粒度、硬度及形态;
 - (3) 易于分散, 特别是在水溶液中的团聚要少;
 - (4) 稳定的化学性质, 对 Cr12 模具钢没有腐蚀性, 并容易从工件上清除。
- 对常用磨料进行查阅^[49-53], 如表 3-1 所示。

表 3-1 常用磨料及应用

磨粒	抛光机	适用材料
氧化铝	合成树脂 (聚氨酯、PMMA 等)	
氧化铬	纤维 (尼龙、棉、帆布等)	金属、一般材料
红丹	天然皮革 (鹿皮)	
氧化砂	合成树脂 (发泡聚氨酯、铁氟龙等)	半导体材料
氧化锆	纤维 (聚氨酯树脂含聚酯纤维等)	
氧化铈		
氧化砂	天然树脂 (沥青、焦油等)	光学玻璃、光学结
红丹	合成树脂 (硬质发泡聚氨酯等)	晶
碳化硅		
钻石	软质金属 (铜、锡、铅等)	精密陶瓷
钻石	金属 (铸铁、碳钢等)	钻石

由于本研究针对的是 Cr12 模具钢进行的抛光, 并且抛光工具材料为合成聚氨酯橡胶, 这里选用 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (白刚玉) 作为抛光磨料。白刚玉是金属磨削加工中最常用的研磨材料之一^[54-55], 其磨料特性见表 3-2。

针对液流悬浮抛光的特殊环境, 选用合适的磨料粒度, 通常配置悬浮液所要求的磨料粒度都在 $1\mu\text{m}$ 以下。由于加工间隙通常在几十微米, 所以磨料粒度太大会对抛光工具和工件产生损伤, 工件表面会有严重的划痕; 另外过大的磨粒不利于悬浮, 从而导致抛光液特性不均匀。但磨料粒度也不能选的太小, 抛光效果不明显, 从而导致抛光效率低下。模具液流悬浮抛光属于对金属的精密光整, 本文选用 300nm 白刚玉微粉进行试验研究。

表 3-2 白刚玉磨料性质

物理/化学性质	数值
化学成分 (质量分数)	Al_2O_3 / SiO_2 / Fe_2O_3 (98.5% / 1.2% / 0.15%)
密度 (g/cm^3)	3.92
熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	2050
研磨能力	0.12-0.25
莫氏硬度	9-9.1
显微硬度 (Nmm^{-2})	18000-22000
晶系	六方体
研磨能力 (金刚石为基准)	0.12

虽然选用了氧化铝微粉,但前期试验发现,单纯的氧化铝微粉在纯净水的基液中分散性和稳定性并不好,颗粒容易发生团聚,并损伤工件表面。所以加入一些活性剂是十分必要的。本文选用聚丙烯酸钠(PAA-Na)作为表面活性剂,聚丙烯酸钠具有较高的分子量,无毒无挥发性气味,其溶液粘度高,成膜性好,具有很好的降低表面张力、分散、乳化等作用,另外该容易搅拌时不易起泡,十分适合于液流悬浮抛光^[56-59]。

综上所述,试验所用抛光液选用了 300nm α - Al_2O_3 白刚玉粉末位置磨料,质量分数为 4%; 并加入 0.1%聚丙烯酸钠作为活性剂; 另外为了提高抛光液的热稳定性及悬浮特性加入了适量乳化剂 TX-40 作为增稠剂, TX-40 为白色固状物,极易溶于水,有良好的化学稳定性。将其加入纯净水中作为抛光基液。整个抛光液制作流程如图 3-15 所示。

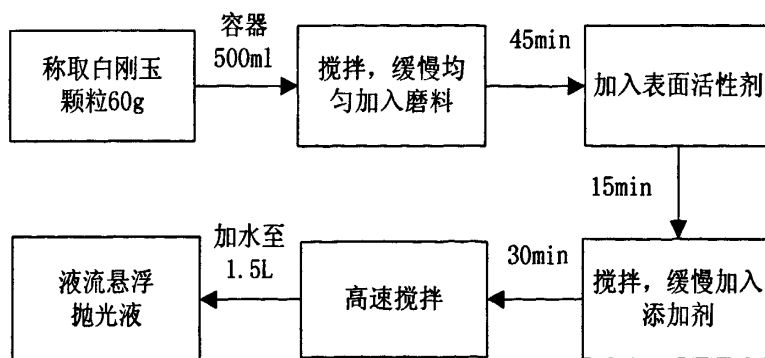


图 3-15 模具液流悬浮抛光液配置流程

第 4 章 模具液流悬浮动态参数试验研究

4.1 引言

通过对模具液流悬浮抛光理论研究,对材料去除机理进行了分析,其中液流动压力和沿工件间隙变化方向流场速度梯度对材料去除效率有着重要影响。从仿真分析可知液流动压力和流场的影响因素较多,特别是动态参数液流动压力和加工区流速有着密切关系,有必要对其进行试验研究。

作为模具的表面光整加工技术,对模具液流悬浮抛光进行工艺研究是必不可少的,当工件和抛光液确定的情况下,改变抛光工具转速和加工间隙将对抛光效果有着重要影响。对于自动化装备而言,速度与位置的控制更容易实现自动化。利用上文中建立的模具液流悬浮抛光系统,对抛光中动态参数进行研究,特别是抛光工具转速对液流动压力的影响规律,加工间隙对动压力的影响规律,以及动态参数对抛光效果的影响,这些研究将成为最终产品化抛光装备的工艺参数的依据。

4.2 模具液流悬浮抛光动压力实验研究

4.2.1 液流动压力与抛光工具转速关系实验研究

对于不同的加工间隙 h_0 ,调节电机变频器输出频率,来改变抛光工具的转速,抛光工具实际转速通过测速装置接入 LabVIEW 上位机程序进行数据采集。并将数据调入 MatLab 进行可视化分析,结果如图 4-1 所示。

从上图可以看出,液流动压力开始随着转速的提高而增加,但并不与理想流场相同,在转速达到一定的时候,动压力出现极值点,并且当转速继续提高时,液流动压力开始下降。试验时观察发现,当转速提高到一定值时,抛光间隙区就会出现空穴、液流不连续现象,这导致了压力无法继续提高。但在液流连续区域,动压力还是随转速的提高而增加,当间隙较小时,增加的比较快,当间隙大于等于 80 μm 时,动压力上升较慢,并且压力值较小。另外试验发现,不同加工间隙时,液流动压力到达极值点时的转速并不相同,通过对各个间隙时最大动压力点的数据提取,得到不同加工最小间隙下,到达最大动压力时的转速,如图 4-2 所示。

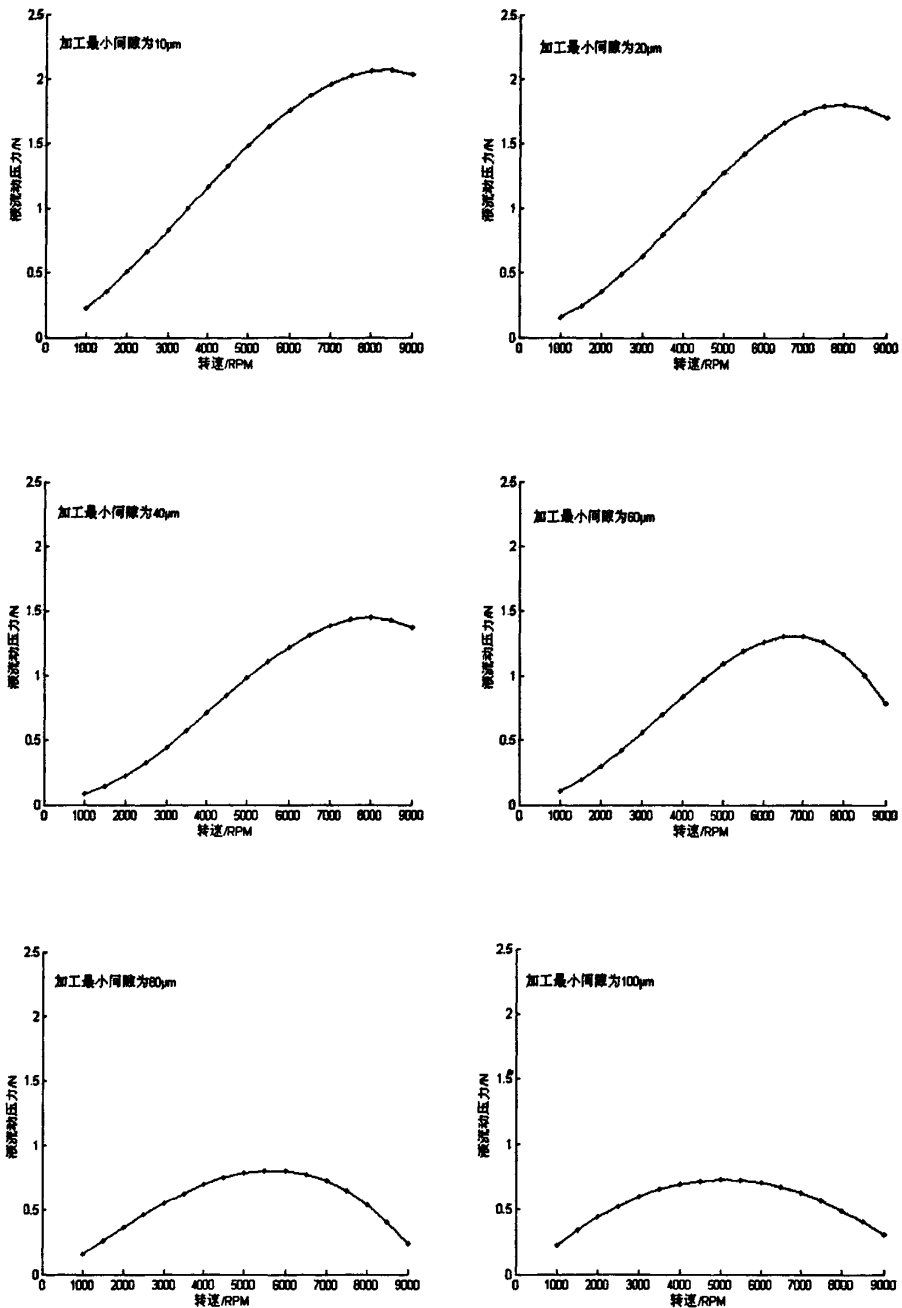


图 4-1 液流动压力与抛光工具转速的关系

由图示可知,当加工间隙在 20 μm 与 40 μm 附近时,动压力出现点基本都在 8000rpm,而当间隙大于或小于该范围时,最大动压力随着间隙的增大有急剧下降的趋势。当加工间隙到达 80 μm 时,转速为 5500RPM 有动压力最大值 0.801N,流场速度比较缓慢,根据对液流悬浮抛光机理的综合分析,大于 80 μm 时区域的 $P \cdot V$ 值较小,抛光材料去除率

极不明显，不将该区域作为对抛光效果的研究对象。

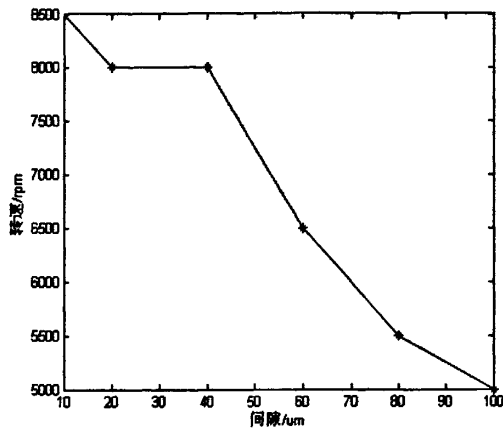


图 4-2 不同加工间隙最大动压力时与抛光工具转速的关系

4.2.2 液流动压力与抛光间隙关系实验研究

在一定的转速下，改变加工间隙，得到加工间隙与液流动压力的关系，如图 4-3 所示。

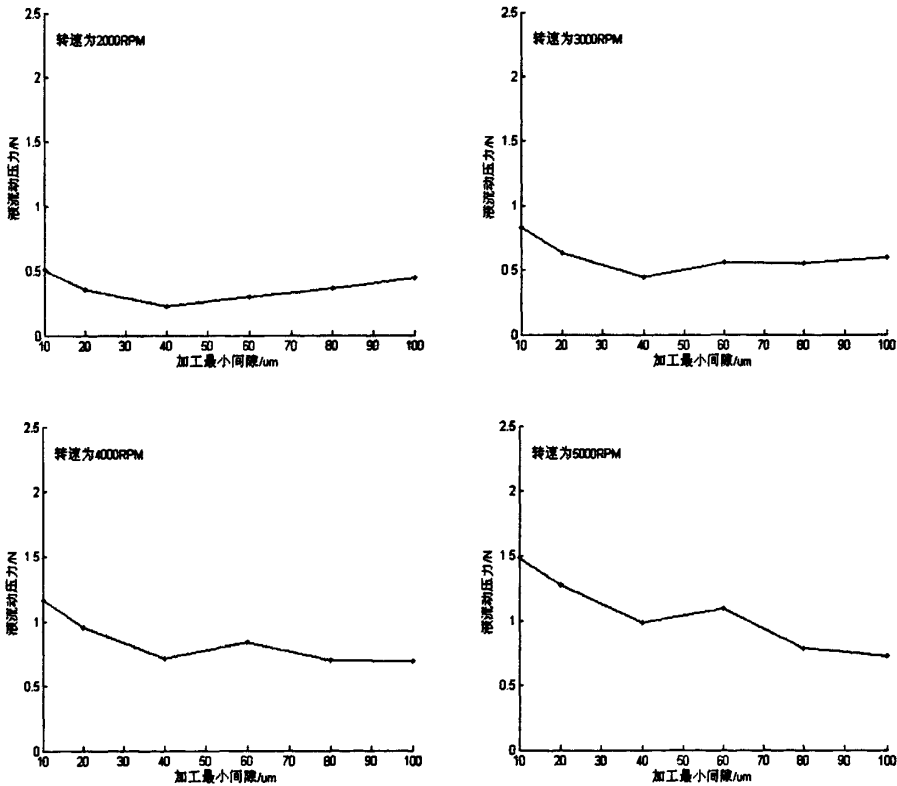


图 4-3 液流动压力与加工最小间隙的关系

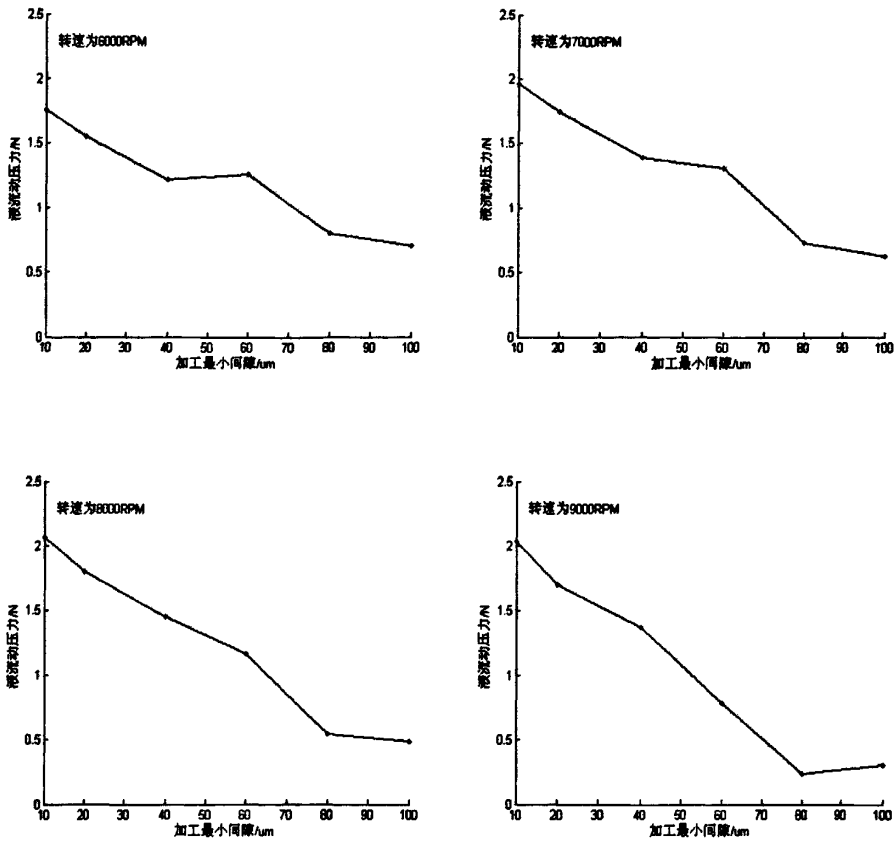


图 4-3 液流动压力与加工最小间隙的关系 (续)

从实验数据可以看出,随着加工间隙的增大,液流动压力逐渐减小,但不同的转速情况下,液流动压力并不是呈直线下降,而是出现了很多变化梯度。分析这主要是由于流场在不同间隙处的连续性不同导致的。在转速较小时,液流动压力变化幅度较小,整体比较平缓;对于转速较高时,特别是当转速达到 6000RPM 以上时,随着间隙的增大,液流动压力迅速下降,并且动压力有很大的变化范围。

4.2.3 液流动压力综合分析

从上述分析可知,液流动压力受抛光工具转速和加工间隙的影响很大。对于一个给定的液流悬浮抛光系统而言,在加工中,通常不会对抛光液浓度,磨料等参数进行调整,忽略温度的变化,则液流动压力唯一由抛光工具转速和最小加工间隙决定,即 $P=P(h_0, n)$, 其中 h_0 为抛光工具与工件表面的最小间隙, n 为抛光工具转速。

对液流动压力与转速和间隙进行综合分析,获得 P 的解析关系,对抛光过程中进行

动态调整加工参数有着重要的指导意义。将实验数据进行整合，如图 4-4 所示。

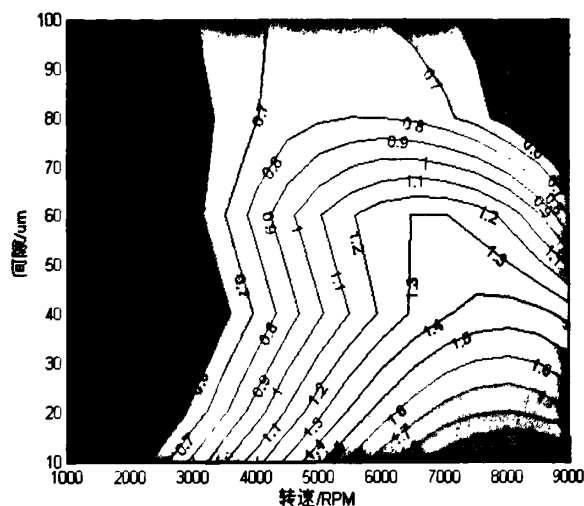


图 4-4 液流动压力综合分析

受流场连续性影响，导致了实际加工间隙和转速与液流动压力的关系复杂化，导致液流动压力分布图上出现了诸多拐点，特别是当间隙在 40um 时，多个转速值出现了不同程度的突变。

4.3 动态参数对抛光效果的影响规律

4.3.1 加工间隙对抛光效果的影响

从加工间隙对液流动压力的影响来看，间隙的改变势必改变磨粒对工件表面撞击的能量，从而影响抛光工件的表面质量。加工间隙变小，沿 X 方向速度梯度就会增大，液流动基本也会增长，根据液流悬浮抛光材料去除机理分析，材料的去除率会显著提高；当间隙较大时，流场梯度不明显，特别是工件表面层 X 向流速削弱严重，液流动压力较小，并且随着转速的提高动压力变化不明显，所以将导致材料去除率大大降低，工件表面粗糙度随时间变化不明显。

为了进一步研究调整间隙的过程中液流动压力对抛光效果的影响，在不同的转速下，改变间隙对抛光效果进行实验研究。实验没有研究各转速下 10um 时的抛光效果，一方面由于抛光液中残有个别没有完全分散的磨料，当间隙过小时，团聚的磨料在间隙区会对工件表面产生划痕，此时的作用力不是液流动压形成的；另一方面，抛光工具高速旋转时，橡胶在离心力的作用下，与工件表面会发生偶然性碰撞，导致工件表面粗糙

度值升高。

实验中抛光液的浓度为4%，工件为材料为Cr12，抛光工具头为直径为40mm的圆柱型聚氨酯橡胶头。分别在不同的转速下，设置不同的最小加工间隙，对工件抛光120min，结果如图4-5所示。

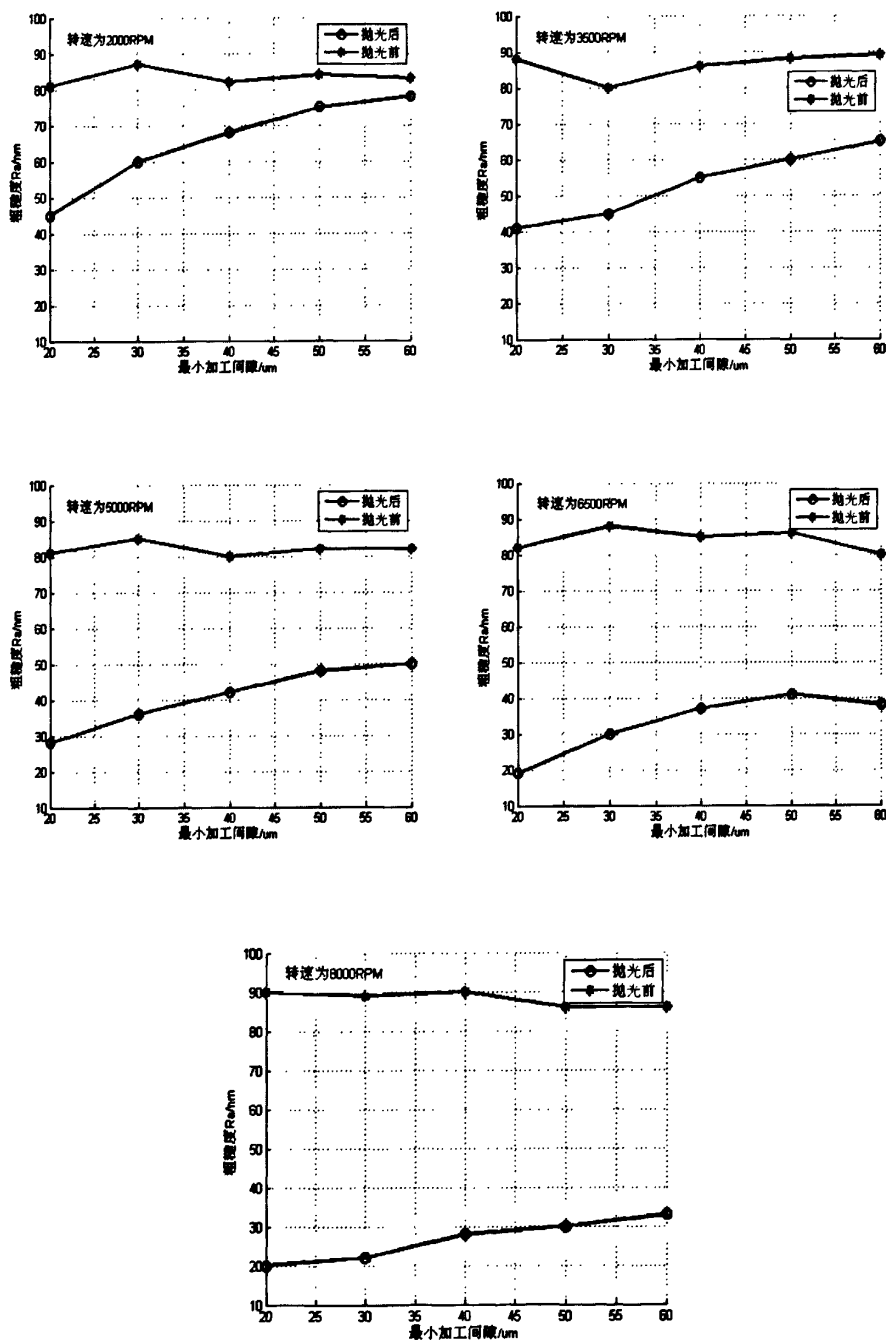


图 4-5 加工间隙对抛光效果的影响

试验中初始工件表面粗糙度为 $Ra=80nm\sim 90nm$ 。从图中可以看出，抛光中所设置的最小间隙对抛光效果有明显的影响，随着间隙的增大，抛光效果降低；在低转速情况下，特别是 2000RPM 时，抛光效果不太明显，特别是间隙扩大到 50 μm ，抛光效果甚微，说明大多磨料无法获得足够的能量来达到工件表面材料的去除。在转速时 8000RPM 时，间隙从 20 μm 到 60 μm 效果都很明显，有较大的材料去除，说明磨料的有效撞击，受加工最小间隙与抛光工具转速影响明显，并和理论分析有着相同的趋势。

在一定的转速下，调整间隙的同时，液流动压力也随之改变，为了分析液流动压力对抛光效果的影响，这里对试验中液流动压力数据进行提取，分析了不同转速下，工件表面粗糙度变化与液流动压力之间的关系。如图 4-6 所示。

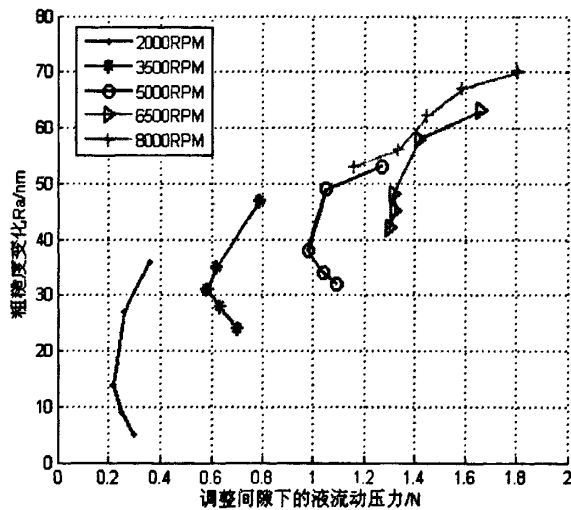


图 4-6 调整间隙下液流动压力与抛光效果的关系

从图中可以看出，在保持转速，调整间隙的方式改变液流动压力时，液流动压力和粗糙度变化量并不是一个单调关系。当转速很小时，液流动压力与抛光效果的相关性很小，只有当速度达到 6500RPM 时，液流动压力才与抛光效果形成明显关系曲线。说明了流场材料去除的复杂性。对于一个抛光系统而言，在这一环境下，通过控制液流动压力来预测粗糙度是不现实的，但对于局部区域，特别是速度大于 6500RPM 时，液流动压力还是可以作为抛光效果有效工艺参数。

4.3.2 抛光工具转速对抛光效果的影响

在某一给定的最小加工间隙条件下，分析不同转速对抛光效果的影响，如图 4-7 所

示。图示给出了在不同的加工间隙下，抛光工具转速与抛光表面粗糙度的变化关系。

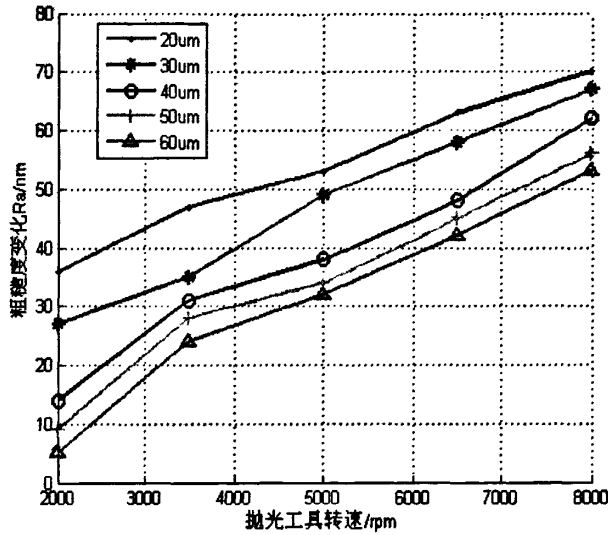


图 4-7 抛光工具转速与抛光效果的关系

抛光效果随着转速的提高愈加明显，但不同的加工间隙，抛光效果变化的快慢也不同，并伴有不同程度的抖动。由于工件初始粗糙度不同，图中引入了干扰成分，对于液流悬浮抛光而言，在不同的粗糙度范围，减小相同的粗糙度量，需要的条件应该是不同的，虽然工件初始粗糙度相差在 10nm 以内，但还是对上面曲线造成了一定的影响，一定程度上降低了曲线的可比性。但就趋势而言，对工艺参考有着很高的意义，特别是当转速超过 3500RPM，曲线整体变化平缓，说明转速的提高会降低初始粗糙对加工效率的影响。从变化曲率来看，当转速较大时，不同的加工间隙，抛光效率基本与转速保持了相同的变化斜率，为简化抛光工艺参数提供了可能。

同样，在调整转速的过程中，液流动压也会随之变化，通过对实验中的液流动压记录分析，获得在一定的加工间隙下，通过调整转速来获得液流动压与抛光效果的关系，如图 4-8 所示。

图示转速并没有与抛光效果形成绝对的单调关系，但在某些区域（液流动压力 <math>< 1.3\text{N}</math>）时，转速与粗糙度变化量表现了很好的相关关系，虽然变化幅度有些抖动，但单调的关系仍可以通过保持某一压力，来预测抛光效果，适用于工艺参数配置的变量。对于加工最小间隙小于 30um 时，这个区间上，液流动压力保持的一个很好的单调性。与图 4-6 对比，分析均得出抛光效果随着动压力的单调变化时出现了紊乱，结合前文的动压力分析，该紊乱仍与流场的不连续性有关，这与理想流场是不同的。

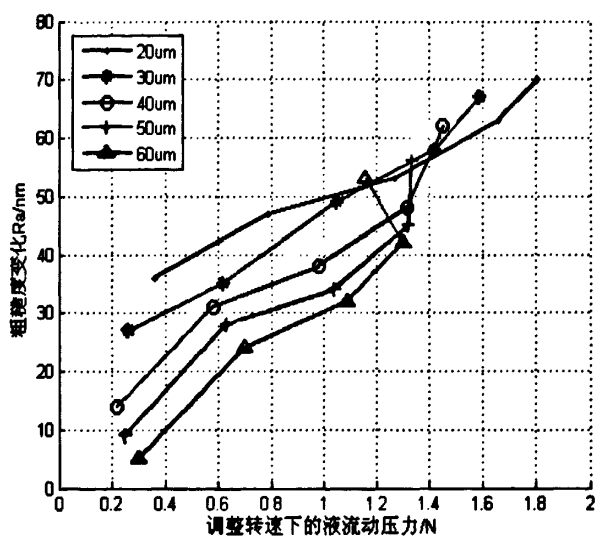


图 4-8 调整转速下液流动压力与抛光效果的关系

4.3.3 动态参数与工件抛光表面粗糙度关系分析

通过上述分析，工件抛光表面与液流动压力并没有一个很好的单调性，另一方面，抛光液流动压力受转速与最小加工间隙影响，并可以通过调整加工间隙与转速来进行给定。所以这里只对最小加工间隙 h_0 与抛光工具转速 n 两个动态参数进行研究。不同抛光工具转速和加工间隙与粗糙度变化量关系如图 4-9 所示。

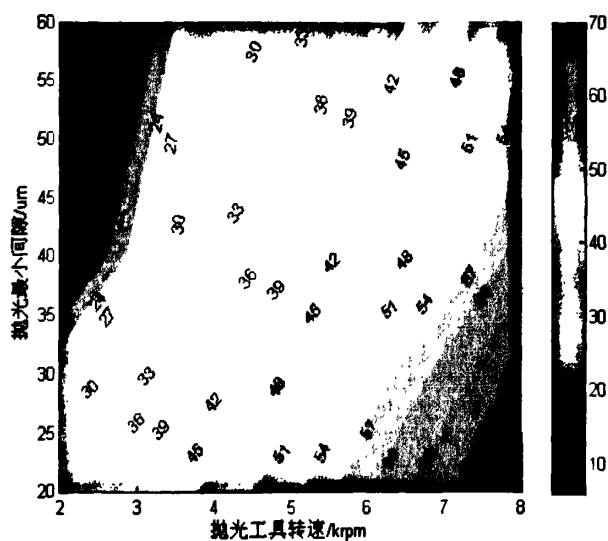


图 4-9 不同转速与间隙下粗糙度变化分布

虽然可以通过粗糙度变化量分布图，来估计某一特定转速和加工间隙的抛光效果，但无法看出个参数间的解析关系，特别是对于控制系统而言，分析目标函数与各动态参数的关系是十分有利的。另外只有获得了 $Ra(h_0, n)$ 的解析解，才便于进行机理分析。本文基于最小二乘法，通过多元多项式拟合来对 $Ra(h_0, n)$ 进行分析。

对于任意一个变化曲线来说，都可以用多项式来进行逼近，即函数的泰勒级数展开，只要所用的多项式的阶次足够高，误差就可以收敛到允许的范围。虽然可以进行最小二乘拟合的函数很多，像指数函数、对数函数、反函数、正弦函数甚至分布函数，但这些都是数据分布与相应函数十分类似时所采用的。对实验数据分布进行分析，如图 4-10 所示。

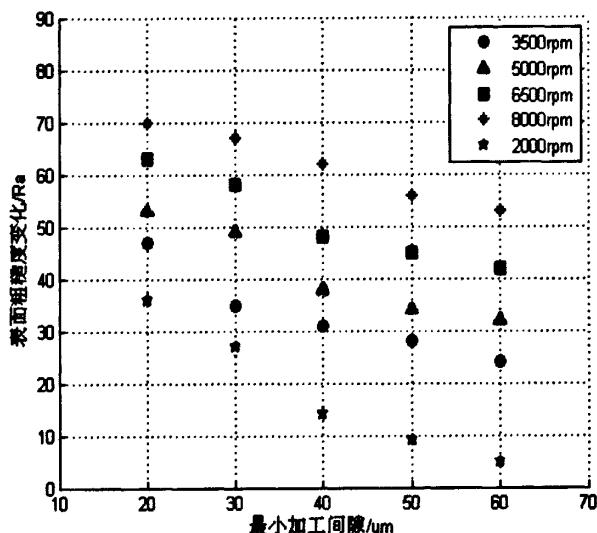
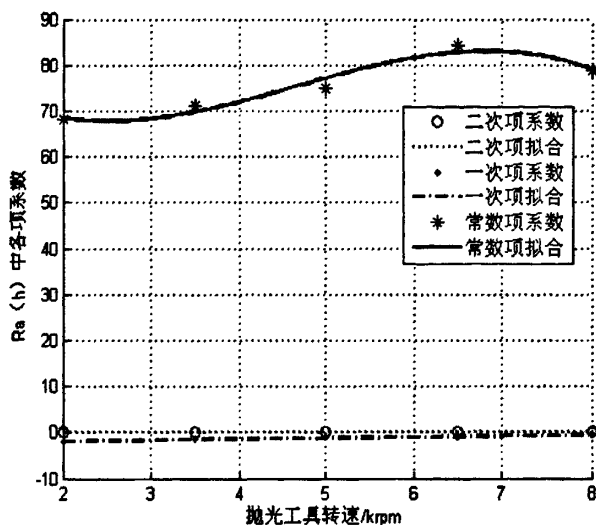


图 4-10 最小加工间隙与粗糙度变化量关系点分布

由于 $Ra(h_0, n)$ 是一个二元变量函数，与单因素分析相比增加了复杂度。对比图 4-10 与图 4-7，明显 $Ra(n)$ 上存在较多较大转折点，而在 $Ra(h_0)$ 上面只是在 30 μm 与 40 μm 之间存在较大的折点，可以采用较低的阶次进行拟合。首先对不同转速的 $Ra(h_0)$ 进行二次多项式进行拟合，拟合曲线有较小误差，虽然此时有确定的拟合系数，但对于多元拟合而言，这并不是全局最优解，只是确定该阶次可以满足要求。

通过初步拟合，获得了不同转速时，不同的二次多项式系数。利用转速对二次多项式的三个系数向量进行二次拟合，为了便于描述，这里将转速单位定义为千转每分 (krpm)。结果如图 4-11 所示。

图 4-11 $Ra(h_0)$ 系数项拟合分析

对于各项系数的拟合，仍然要根据实际的数据分布来选择多项式的阶次，对于二次项系数，基本为一个常数，选择 0 阶多项式；对于一次项基本在一条直线上，选择一阶多项式；对于常数项选择了 3 多项式。如前所述，对于多元函数拟合而言，该方法只是找到合适的多项式阶次。所以 $Ra(h_0, n)$ 可以用下面拟合多项式：

$$Ra(h_0, n) = c1 * h_0^2 + (c2 * n + c3) * h_0 + (c4 * n^3 + c5 * n^2 + c6 * n + c7) \quad (4-1)$$

即： $Ra(h_0, n) = c(1) * h_0^2 + c(2) * h_0 + c(3) * h_0 * n + c(4) * n^3 + c(5) * n^2 + c(6) * n + c(7)$ 其中 c 为系数向量。基于最小二乘法，利用该多项式对 $Ra(h_0, n)$ 进行拟合分析，得：

$c = [0.008 \ -1.4467 \ 0.0453 \ 0.1728 \ -2.8148 \ 19.0496 \ 29.9573]$ ，拟合结果如图 4-12 所示。

对拟合精度进行分析，定义统计量决定系数 R^2 、范数残差 $\|r\|_2^2$ 和决定函数 $R_{adjusted}^2$ (表示了拟合质量) 如下^[60]：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4-2)$$

$$\|r\|_2^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y})^2 \quad (4-3)$$

$$R_{adjusted}^2 = 1 - \frac{m-1}{m-n-1} \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4-4)$$

式(4-2)、(4-3)和(4-4)中, R^2 表示拟合质量与残差的关系; 最小二乘使 $\|r\|_2^2$ 最小; \hat{y} 为已知数据点处拟合函数的值, y_i 为已知数据点处实际值(实验结果), $\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i$, m 为数据点个数, n 为基本函数个数; $\frac{m-1}{m-n-1}$ 项表示了求 R^2 时自由度的大小; $R^2_{adjusted}$ 越接近于1表示拟合质量越好。对所拟合的二元多项式进行 $R^2_{adjusted}$ 计算, 得 $R^2_{adjusted} = 0.9837$ 。说明该表达式有着很好的数据逼近效果, 可以用于系统的动态参数控制, 十分便于对指定抛光效果进行工艺设计。

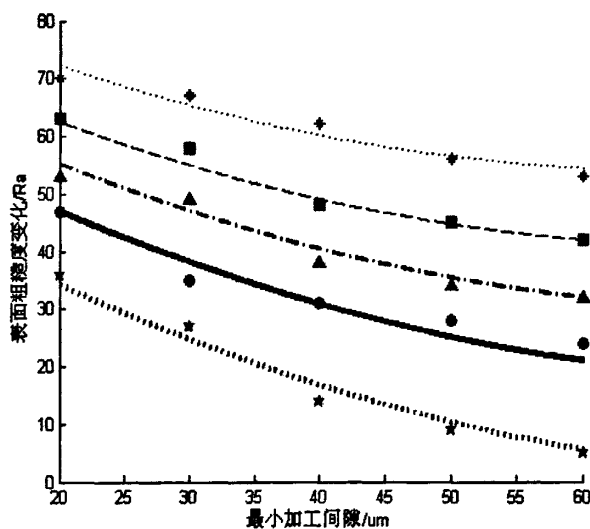


图 4-12 $Ra(h_0, n)$ 拟合结果

4.4 材料去除试验研究

4.4.1 材料去除试验

在液流悬浮抛光作用下, 对工件表面产生材料产生去除效果, 并且使粗糙度发生了改变。根据材料去除机理分析, 表面粗糙度稳定后的材料去除率可以表示为 $M = K \cdot \iint_A p(x, y) \frac{\partial u_f}{\partial z} dx dy + c$ 研究, 对于表面粗糙度减小的过程并不能表征, 但对于该过程, 材料的去除量很大程度上体现在表面粗糙度的变化上。设定抛光工具转速为 8000rpm, 最小加工间隙为 20um, 工件表面粗糙度变化如图 4-13 所示。

从图中可以看出, 在抛光开始阶段, 随着抛光时间的增加, 表面粗糙度快速降低,

但当抛光超过 60min 后，表面粗糙度下降放慢，并在 120min 左右到达极值，之后有轻微上升趋于稳定。

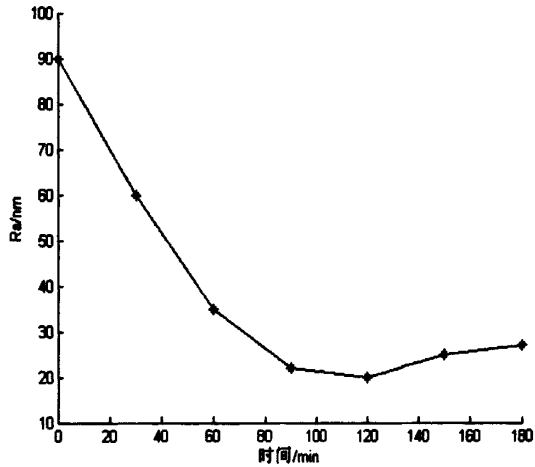


图 4-13 表面粗糙度随抛光时间的变化关系

另外，对于其他抛光工具转速和最小加工间隙也在抛光过程中也进行了一定时间间隔下的粗糙度测量，其变化趋势关系基本一致。对于间隙大于 40 μm 或者转速小于 5000rpm 时，当达到最小粗糙度后，再进行抛光粗糙度的上升极不明显，都稳定在最小值附近。

在抛光过程中，工件表面，特别是最小间隙附近，有着明显的材料去除痕迹，并且有着较好的表面质量，但随着 h 值的增大，材料去除就十分不明显，也基本没有粗糙度变化。如图 4-14 所示，显示了工件材料去除区域及抛光效果。

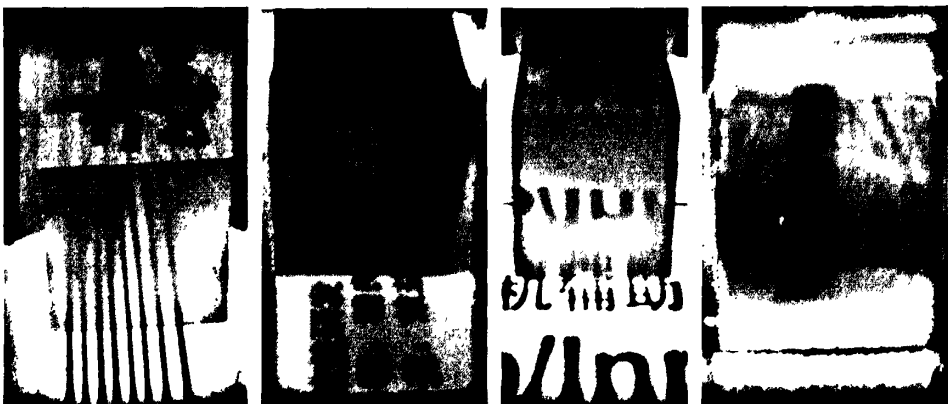


图 4-14 液流悬浮抛光后工件表面情况

4.4.2 材料去除分析

表面粗糙度的变化反应了材料去除效率在抛光过程中的变化，并从中可以发现，开始抛光时，材料去除效率比较高，之后有所下降，最终趋于稳定，为结合机理分析，稳定后材料去除效率可以表示成动压力与转速梯度的相关函数。说明抛光开始时，材料去除效率与时间有关，等工件表面到达一定粗糙度后，就稳定到该参数组合下的抛光终值上。

从材料去除微观作用分析，初始阶段，工件表面峰谷比较明显，磨料的撞击效率比较高，材料去除比较快，随着表面质量的提高，磨料对工件表面的撞击角度受限，破坏表面材料所要求的动能进一步提高，材料去除效率下降。所以材料去除可以分为两部分，一部分是针对粗糙面的材料除去效率，另一部分是粗糙度稳定后材料除去效率。图 4-15 给出了不同阶段时工件表面形貌。

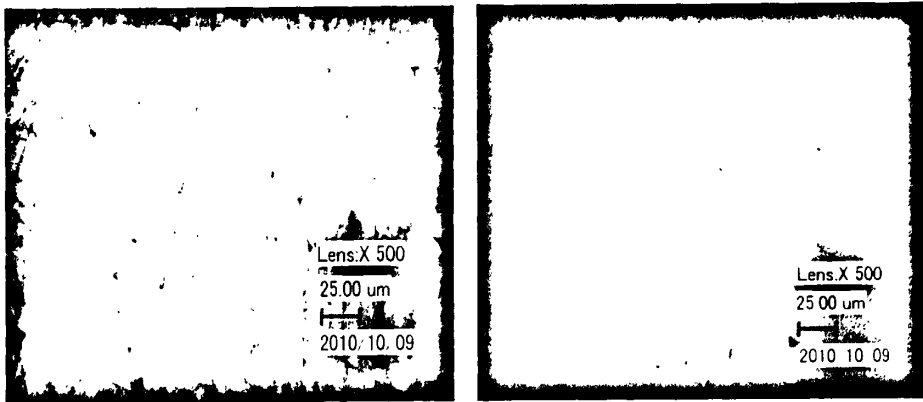


图 4-15 Ra 为 80nm 与 Ra 为 30nm 的被抛工件表面形貌

在对粗糙表面的表光过程中，材料除去效率与当前表面质量有很大关系，从工件表面形貌可以看出当抛光表面粗糙度稳定后，沿液流方向，仍能发现磨料对工件表面左右的划痕。而这些划痕在某种程度上提高了粗糙度的值。从整个抛光过程中分析，随着工件表面峰谷的削弱，工件表面会达到一个最小粗糙度值，之后由于磨料入射方向等原因，导致工件表面沿流场方向出现细微划痕。这也对应了在 120min 之后粗糙度略微上升的原因，但最终稳定在该粗糙度左右。

4.5 本章小结

本章主要以 Cr12 模具钢工件进行了液流悬浮抛光试验研究，并且从不同的角度出发对不同的动态参数对抛光效果的影响进行了详细分析。

1、利用设计的抛光系统，在一定的加工间隙下，调整不同的转速监测到抛光工具与液流动压力之间的关系，液流动压力随着转速的提高也逐渐增大，但都存在极值，并且在加工间隙差别比较大时，极值出现的转速也不相同。

2、分析了最小加工间隙与液流动压力之间的关系，对于转速在 3500rpm 以下，加工间隙对液流动压力影响并不明显；但当转速提高到 5000rpm 以上时，液流动压力随着间隙的扩大而降低，并且伴有一定的波动。

3、对抛光中动态参数，包括抛光工具转速、最小加工间隙及液流动压力对抛光中表面粗糙度的影响进行了详细的试验。在不同的抛光工具转速和最小加工间隙下分析了表面粗糙度的变化量。并且进一步分析了在单一因素变化时，液流动压力对表面粗糙度的影响。最小加工间隙的减小或转速的提高有利于抛光效率，但液流动压力只是在某一区域与材料粗糙度的变化形成了单调关系，整体比较复杂。

4、结合试验结果，对表面粗糙度的影响因素转速及最小加工间隙进行了综合分析，基于最小二乘法，通过二元高阶多项式拟合，获得了试验条件下 $Ra(h_0, n)$ 的解析函数。分析了拟合误差 $R^2_{adjusted} = 0.9837$ ，拟合函数有较高的精度。

5、从粗糙度随时间的变化关系的角度出发，简要的分析了抛光过程中材料去除的过程。可以将材料去除分成两个部分，对于粗糙面而言，材料去除效率比较高，随着表面质量的提高，材料去除效率降低，当达到该参数下，材料的去除效率进入了一个稳定阶段。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

文本对模具液流悬浮抛光进行了理论和实验研究，重点研究了抛光中动态参数的变化关系及对抛光效果的影响，主要包括以下内容：

1、分别从微观和宏观上对液流悬浮抛光进行了机理分析。一方面磨粒对工件表面的撞击导致了材料的塑性变形，并在一定作用时间后使其表面粗糙度降低；另一方面，根据 Preston 方程，得出了在液流悬浮下材料除去的模型，材料除去效率与液流动压和流场中平行于抛光表面上速度梯度有着直接关系。

2、结合液流动压理论，重点分析了抛光模型中液流动压分布和速度变化关系 ($u_f = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(z-h) + \frac{U}{h} z$)，说明沿 z 方向的速度梯度，不仅与加工间隙有关，还是 z 的变化函数。而压力分布 ($\frac{\partial p}{\partial x} = 6\mu U \frac{h-h_m}{h^3}$) 基本为抛物线分布。

3、对模具液流悬浮抛光系统进行了 CFD 仿真分析，重点提取了加工区流场及压力场的分布信息。通过数据分析，绘制了液流动压分布及速度变化关系，与理论分析基本吻合，并且从分析结果说明了最大动压力位于液流入口某处。

4、对模具液流悬浮抛光进行了系统设计，针对抛光中对抛光工件位置精度及转速要求高的特点，设计了沿进给方向的高细分驱动及微回差传动装置，配合高速变频调速系统，提高了抛光系统的稳定性。

5、开发了抛光工具配磨系统。由于液流悬浮抛光对抛光工具径向跳动要求极高，即使对采用精密加工，装配后仍很难达到要求。本文利用试验平台，设计了抛光工具的精密配磨方法，使最终的圆柱型抛光头满足实验要求。

6、基于 LabVIEW 平台，开发了模具悬浮抛光动态参数监测系统，不仅方便对抛光状态进行监测，还方便使在试验过程中抛光工具转速及工件表面压力实时数据保存。

7、试验研究了液流动压力与抛光工具转速和加工间隙的关系。在一定的加工间隙下，调整不同的转速监测到抛光工具与液流动压力之间的关系，液流动压力随着转速的提高也逐渐增大，但都存在极值，并且在加工间隙差别比较大时，极值出现的转速也不

相同；对于转速在 3500rpm 以下，加工间隙对液流动压力影响并不明显；但当转速提高到 5000rpm 以上时，液流动压力随着间隙的扩大而降低，并带有一定的波动。

8、对抛光中动态参数，包括最小加工间隙、抛光工具转速及液流动压力对抛光中表面粗糙度的影响进行了详细的试验，分析了动态参数与表面粗糙度的变化关系。最小加工间隙的减小或转速的增大有利于提高抛光效率，但液流动压力只是在某一区域与材料粗糙度的变化形成了单调关系，整体比较复杂。

9、结合试验结果，对表面粗糙度的影响因素转速及最小加工间隙进行了综合分析，基于最小二乘法，通过二元高阶多项式拟合，获得了试验条件下 $Ra(h_0, n)$ 的解析函数。对拟合误差进行分析得到 $R^2_{adjusted}=0.9837$ ，拟合函数具有较高的精度。

10、从粗糙度随时间的变化关系的角度出发，简要的分析了抛光过程中材料去除的过程。可以将材料去除分成两个部分，对于粗糙面而言，材料去除效率比较高，随着表面质量的提高，材料去除效率降低，当达到该参数下，材料的去除效率进入了一个稳定阶段。

5.2 展望

本文对模具液流悬浮抛光进行了一定的探索性研究，取得了一定的成果，但限于试验条件和时间原因，还有很多问题及未来很有价值的研究方向：

1、本文只是在工件表面粗糙度基本稳定后的条件下，进行了模具液流悬浮的抛光机理分析，通过试验发现材料表面粗糙度稳定前，材料去除率有很大的变化过程，并且与当前的表面质量有很大关系，这一过程的材料去除率有待深入研究。

2、模具液流悬浮抛光中抛光间隙的控制还不够自动化，虽然能根据测力夹具对零位进行监测，但在程序里没有设计出一个自动间隙调整的过程。建议监测到零点后，利用该零点位置，触发位置控制系统，对间隙自动调整。

3、将工件逐渐向型腔模具转变，通过前期对动态参数的研究，建立参数对抛光效果关系数据库，设计抛光策略，对实际模具型腔结构进行应用性研究。

4、把实验数据与理论模型进行结合，构建有物理意义的材料去除与动态参数间的关系函数，并将经验性约束附加给函数的应用对象。

参 考 文 献

- [1] 汤猷则. 我国模具技术、产业结构发展现状及发展趋势分析[A]. 中国机械工程学会编. 2007年中国机械工程学会年会论文集[C]. 北京: 机械工业出版社, 2007, 1-4.
- [2] 曲伟平. 我国模具制造业发展现状、存在的问题及对策[J]. 模具技术, 2006, 5(5): 59-63.
- [3] 七丁, 晓霏. 中国模具工业发展现状与展望—访中国模具工业协会常务副理事长、秘书长曹延安[J]. 航空制造技术, 2008, (8): 12-19.
- [4] 梁辉, 林茂, 张娟娟, 等. 我国沿海地区高端模具行业发展研究[J]. 电加工与模具, 2010, 4(z1): 78-82.
- [5] 陈博. 浙江余姚模具工业发展现状及对策[J]. 模具制造, 2007, 7(1): 1-4.
- [6] 刘胜国. 我国冲压模具技术的现状与发展[J]. 黄石理工学院学报, 2007, 23(1): 12-15.
- [7] 关耀奇. 高精度模具的超精密加工[J]. 湖南工程学院学报, 2003, 13(1): 40-42.
- [8] 于清松, 成晔, 胡世波. 模具型面数控研磨抛光技术研究[J]. 制造技术与机床, 2002, (8): 44-45.
- [9] 肖作义. 磁力研磨光整加工技术的实验研究[J]. 模具制造技术, 2004, 286(12): 47-51.
- [10] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁力研磨在模具型腔精加工的应用[J]. 模具工业, 2003, 263(1): 51-54.
- [11] 冯宝福, 蔡光起, 孙奕澎. 自由曲面模具磁力研磨的实验研究[J]. 吉林化工学院学报, 2005, 22(2): 56-60.
- [12] 熊惟皓, 郑立允, 杨青青. 模具表面处理与表面加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] 河冰强, 郭钟宁, 于兆勤. 流体二维超光滑精密抛光加工装备研制探讨[J]. 机电工程技术, 2004, 33(12): 50-51.
- [14] Hung Tu-Chieh, Su Yaw-Terng. A method for reducing tool wear in a polishing process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(3-4): 413-423.
- [15] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 35-48.
- [16] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [17] 文秀兰, 林宋, 谭昕, 等. 超精密加工技术与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [18] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 35-48.
- [19] Mori Y, Yamauchi K, Endo K, et al. Creation of perfect surfaces[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1): 39-50.
- [20] Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Mechanism of atomic removal in elastic emission machining [J]. Int. J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 1988, 110 (1): 24-28.
- [21] 李长河, 修世超, 蔡光起. 微细游离磨粒借助流体动压力实现的超精密加工技术[J]. 机械设计与制造, 2005, (12): 105-107.
- [22] 袁哲俊. 国内外精密加工技术最新进展[J]. 工具技术, 2008, 42(10): 5-13.
- [23] Kordonsky Y W I, William I, Prokhorov I. Magnetorheological polishing devices and methods[P]. US Patent 5449313, 1995.
- [24] 高波, 谢大纲, 姚英学, 等. 气囊式工具抛光新技术[J]. 光学技术, 2004, 23(3): 333-336.
- [25] 高波. 气囊抛光实验样机的研制及其关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [26] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007,

- 43(8):2-6.
- [27] 计时鸣, 张利, 金明生, 等. 气囊抛光技术及其现状[J]. 机电工程, 2010, 27(5): 1-12
- [28] Huang C A, Lin W, Lin S C. The electrochemical polishing behaviour of P/M high-speed steel (ASP 23) in perchloric-acetic mixed acids [J]. Corrosion Science, 2003, 45(11): 2627-2 638.
- [29] Yasunaga N, Obara A, Tarumi N. Study of mechanochemical effect on wear and its application to surface finishing [J]. Res. Electrotech. Lab, 1977, 776: 50-134.
- [30] 安永畅男, 高木纯一郎. 精密机械加工原理[M]. 中国台北: 全华科技图书股份有限公司, 2004.
- [31] 江超, 王又青, 胡少六. 激光抛光技术的发展与展望[J]. 激光技术, 2002, 26(6): 421-424.
- [32] Udrea M, Orum H, Alaccakir A. Laser polishing of optical fiber end surface[J]. Opt. Eng., 2001, 40(9): 20-26.
- [33] 李长河. 砂轮约束磨粒喷射精密光整加工机理及表面特性的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [34] Yaw-Terng Su, Yui-Chen Kao. An experimental study on machining rate distribution of hydrodynamic polishing process[J]. Wear, 1999, 224(1): 95-105.
- [35] J.D.Gates. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion[J]. Wear, 1998, 214(2): 139-146.
- [36] S.Ciraci, A.Buldu. Atomic-scale study of friction and energy dissipation[J]. Wear, 2003, 245(9): 911-916.
- [37] M.Y.Yang, H.C.Lee. Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small aspherical lens die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116(2-3): 298-304.
- [38] 陈伯贤, 裘祖干, 张慧生. 流体润滑理论及其应用(M). 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [39] 朱崇涛. 液流悬浮超光滑加工机理及抛光动压力的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [40] 周桂如, 马骥, 全永昕. 流体润滑理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [41] 梁冰. 固液两相流泵的边界层理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [42] 欧家庆. 吸附效应对于抛光刀具磨耗之初步研究[D]. 台湾: 国立中山大学, 2004.
- [43] Sun-Kyu Lee, Yuji Miyamoto. Effects of minimizing hydrodynamic pressure in ultra-precision mirror grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004, 44(10): 1031-1036.
- [44] 李长河, 欧阳伟, 丁玉成等. 磨削区流体速度场建模与实验研究[J]. 工艺与检测. 2007, 2: 82-85.
- [45] Ebbrell S, Wooley N.H, Tridimas Y.D, *et.al* The effect of cutting fluid application methods on the grinding process[J], International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(2): 209-223.
- [46] Bo Zhang, Akira Nakajima. Hydrodynamic Fluid Pressure in Grinding Zone During Grinding With Metal-Bonded Diamond Wheels[J]. Journal of Tribology. 2000, 122(3): 603-608.
- [47] Jeong-Du Kim. Motion analysis of power particles in EEM using cylindrical polyurethane wheel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(1): 21-28.
- [48] 高太元, 李明军, 胡利民等. CMP 流场的数值模拟及离心力影响分析[J]. 力学学报, 2008, 40(6): 729-735.
- [49] Morsi S.A, Alexander A.J, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. Fluid Mech. 1972, 55(2): 193-208.
- [50] 张蓉, 钱书琨. 模具材料及表面工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [51] 刘向阳. 光学材料超光滑表面抛光的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003.
- [52] 张立德. 超微粉体制备与应用技术[M]. 北京: 中国石油化工出版社, 2000.
- [53] 闫国进. 天然磨料性能特点及应用[J]. 石材, 2007, 40(12): 40-42.
- [54] Cesarano. Aksay A, Bleier A. Stability of aqueous Al₂O₃ suspensions with Poly (methacrylic acid) polyelectrolyte[J]. American soc., 1988, 71(4): 250-255.

- [55] 赵晓媛. 纳米 Al_2O_3 粉末的制备与防团聚研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [56] 王世荣, 李祥高, 刘东志, 等. 表面活性剂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [57] 刘程, 米裕民. 表面活性剂性质理论与应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2003.
- [58] 王舜, 赵振国, 刘迎清. 表面活性剂的吸附性对水中氧化铝微粉悬浮体稳定性的影[J]. 1998, 34(6): 735-740.
- [59] 温颖萍, 张惠文. 表面活性剂对聚丙烯酸溶液粘度的影响[J]. 日用化学工业. 1999, (5): 11-13.
- [60] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

致 谢

本文的全部研究工作是在计时鸣教授和洪滔教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。计老师平易近人且待人宽厚，博学而富有远见、以及严谨的学术风格给了我很大的教义，特别是思想上有了很大进步。洪老师对人热情并乐于助人，知识渊博并乐于倾囊教授，豁达而又淡定从容的心境使我在科研上孜孜以求，不骄不躁，不气不馁。两位老师在一年的项目（论文）研究期间，为我提供了宽松的科研环境，并在精神和物质上都给了我很大的支持。在此对两位计时鸣教授和洪滔教授表示衷心的感谢和美好的祝福。

论文得以完成，还要特别感谢王超荣同学的相互协作，信任与理解；感谢金明生师兄、张利老师、王忠飞老师、文东辉老师的悉心指导及宝贵建议；感谢何剑敏和於加峰师弟的热情帮助；感谢陈国达、郑高安、唐波、陈承钢、晓风清、翁晓星、张伟东等同门的相互帮助；感谢室友屠胜立、陈立斌和胡永亮的关系与支持。

感谢父母对我读研的支持与生活的疼爱；女友董向平对我的理解与关爱。兄弟朋友对我的鼓励和帮助。感谢所有给予我关心、帮助的单位和个人。

侯海鹏

2010年12月18日

攻读学位期间参加的科研项目和成果

参加的科研项目

- [1] 国家自然科学基金项目:非一致曲率接触变形下的磨粒场形态与模具曲面的气囊抛光机理研究(No.50575208)
- [2] 浙江省科技厅项目:精密模具复杂型腔强化抛光技术的研究与开发(No.2008C21113)

录用和发表的论文

- [1] 模具液流悬浮抛光动态参数研究.侯海鹏,洪滔,计时鸣,王超荣.机电工程.已录用(录用时间:2010年10月29日)

