

## 中文摘要

汽车半轴是汽车后桥的主要零件,在汽车运行中,半轴承受着整个车身及货物的重量及传递扭矩等多种复杂的交变应力。汽车半轴传统摆辗工艺为:压力机预锻,摆辗终成形。而将加热坯料在摆辗机上实现预锻、终锻连续成形的工艺设想能降低投资和能耗,提高生产率。

本文以汽车半轴为研究对象,首先通过金属塑性成形的基本原理,分析汽车半轴摆动辗压的变形机理及主要摆辗参数;再设置不同的摆辗参数,采用数值模拟软件 DEFORM-3D 模拟了汽车半轴成形全过程,分析成形过程中的应力场、应变场、速度场及温度场的变化和分布规律,得出最佳摆辗倾角  $\gamma$  为  $3^\circ$ , 每转进给量  $s$  的取值范围为  $5\text{mm/r} < s < 7\text{mm/r}$ ; 最后选用数值模拟优化的工艺参数,在摆辗机上进行汽车半轴摆辗成形实验。对试样进行金相组织研究和力学性能的测定,并与传统摆辗工艺试样作比较,得出:一次加热连续摆辗成形的汽车半轴试件内部晶粒度较小,组织更加均匀,硬度、强度和韧性都有所提高。

通过数值模拟和试验研究,证实了将加热坯料在摆辗机上实现预锻、终锻连续成形的工艺是可行的。

关键词:摆辗新工艺;有限元;数值模拟;试验研究



---

**ABSTRACT**

Half shaft is one of the most important parts of back-axles. When automobiles run, half-shafts subject to the whole weight of the body of vehicles and cargos, and complicated alternate stresses such as transfer torque etc. Now the forming processes of half-shafts by rotary forging techniques can be divided into two steps: preforming by presses and finish forging by rotary-forging machine. But applying this process can raise equipment investment and energy consumption. The technics with the one-heated blanks forged continuously in rotary forging machine may overcome the shortcomings of the traditional techniques. The new technology has not been utilized in the production of half shafts and its theory needs to be further verified and improved.

In this paper, the deformation mechanisms of half shafts during one-heat rotary forging processes has been investigated with Principles of Metal Forming and FEM numerical simulation. The forming processes of half shafts by rotary-forging method has been studied and analyzed by establishing the FEM simulative mechanics model, and then simulated the deformation processes by DEFORM-3D. The distribution of the stress, strain, velocity and temperature during the forming process were simulated through the variation of pivot angle and feed rate per turn. Through the comparison of the pre-forging schemes, the best pivot angle of  $3^\circ$  and the range of the feed rate per turn of from 5mm/r to 7mm/r were determined. In the last, half shafts were produced based on the simulation results in the lab. At the same time, these shaft shafts were compared with the ones which were forged with conventional techniques, the result was microstructure grains were smaller and moer symmetrical, the intensity, hardness and tenacity were reinforced.

Through analyzing and studing the results of experiment, the feasibility that The technics with the one-heated blanks forged continuously in rotary forging machine was confirmed.

**Key Words:** Rotary-forging new process; Finite-element method (FEM);

Numerical simulatio; Experimental investigation

## 目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究及应用现状.....	3
1.3 研究内容及研究方法.....	6
第二章 摆辗成形理论分析.....	7
2.1 摆辗的变形机制分析.....	7
2.1.1 摆动辗压的工作原理.....	7
2.1.2 摆动辗压机摆头的运动轨迹分析.....	7
2.1.3 摆辗的变形机制.....	9
2.2 几个重要的摆辗工艺参数.....	11
2.2.1 接触面积系数 $\lambda$ .....	11
2.2.2 每转进给量 $s$ .....	12
2.2.3 摆头倾角 $\gamma$ .....	13
2.2.4 摆头转速 $n$ .....	13
2.2.5 摆头电机功率 $N$ .....	13
2.3 摆辗的变形特性分析.....	14
2.3.1 金属的塑性及变形.....	14
2.3.2 厚件回转体工件的变形.....	15
2.3.3 薄件回转体工件的变形.....	16
2.4 汽车半轴摆辗的成形特点.....	17
2.5 本章小结.....	18
第三章 汽车半轴摆辗数值模拟.....	19
3.1 汽车半轴摆辗成形新工艺流程.....	19
3.2 半轴摆辗成形有限元模型的建立.....	20
3.2.1 模拟计算的有限元模型.....	20
3.2.2 汽车半轴成形过程的模拟设计.....	21
3.3 预锻成形的模拟与结果分析.....	21
3.3.1 摆辗倾角的选择.....	21
3.3.2 每转进给量的选择.....	30
3.4 终锻成形的模拟与结果分析.....	38

## 目 录

3.5 本章小结 .....	41
第四章 汽车半轴摆辗实验研究 .....	43
4.1 实验方案 .....	44
4.1.1 汽车半轴摆辗成形传统工艺实验方案 .....	44
4.1.2 汽车半轴摆辗成形新工艺实验方案 .....	46
4.2 摆辗模具设计 .....	47
4.2.1 液压机预锻模设计 .....	47
4.2.2 摆辗机模具设计 .....	47
4.2.3 模具的热处理工艺 .....	49
4.3 实验结果与分析 .....	50
4.3.1 汽车半轴摆辗件外形分析 .....	50
4.3.2 金相组织分析 .....	50
4.3.3 硬度分析 .....	52
4.4 本章小结 .....	53
第五章 结 论 .....	54
参考文献 .....	55
攻读硕士期间参加的项目和发表的论文 .....	59
致 谢 .....	61

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究背景和意义

半轴是汽车传动系统中的一个重要零部件。从结构上主要分花键、杆部和法兰盘 3 个部分。两端分别与半轴齿轮和车轮连接。其中花键输入扭矩，杆部传递扭矩，法兰盘输出扭矩。汽车在开动、行驶和停止过程中，半轴不但因受到交变弯扭应力的作用而容易引起疲劳断裂，而且还时常因受到冲击载荷和不规则的脉动载荷而引起半轴开裂，所以半轴是汽车重要构件中失效频率最高的零件之一。加之汽车工业的发展和汽车市场的繁荣，半轴的产量也越来越大，同时人们对汽车性能的高要求和安全意识的加强，半轴的质量也得提高。

影响半轴质量和产量的因素很多，如半轴的原材料，加工方式，热处理等。按照加工方式，半轴类锻件的生产有两种工艺：一是锤上胎模锻成形，二是压力机上预锻，摆辗机摆辗终锻成形。平锻机上成形是比较成熟的半轴锻造工艺，但也有它的不足之处，此工艺是以半轴的最小杆部直径来确定毛坯的直径，在锻造过程中需要变形的毛坯高径比大，为了防止失稳现象的发生，需要聚料、预锻、终锻等多个工步，锻造机组庞大，设备投资费用很高，模具结构复杂且寿命短，生产的锻件在长度方向的尺寸精度较低。

摆辗机摆辗成形是一种连续局部加载回转成型塑性加工工艺，用局部变形代替了整体变形。目前，汽车半轴摆辗成形的常规工艺分为两种：

一是将坯料整体加热，然后杆部拔长预制坯，预锻成型后再局部加热，最后摆辗终锻成形。

二是将与半轴杆部直径相同的坯料局部加热，然后在压力机局部预锻，预锻成型后再局部加热，最后摆辗终锻成形。

摆动辗压工艺与挤压加工相比较，被挤压工件沿模具表面径向流动的摩擦力相当大。挤压时产生的应力（表面挤压力）在被挤压工件的中心最大，在被挤压工件的边缘处最小。最大的挤压应力与摩擦力的大小有关。在传统的挤压变形加工中，最大的挤压应力可以是需要挤压应力的好几倍。摆辗锻造是使上锻模作轨道盘旋运动，让金属坯件在两块锻模之间锻压成形。这种加工方法的特点是可以用比较小的压力获得大的变形度。由于轨道运动，成形压力集中在上锻模的一小块面积上。这一小块面积以某种样式稳定地移过整个被加工的表面。因此，只要消耗很少的能量并且不损失多少材料就能得到精密的零件。所以，即使只是小批量锻造几百个零件也是有利的。飞边通常是靠冲裁来消除的。按照形状和应用上的不同要求，摆辗的零件通过相应的机械加工后，就被装

配到车辆、机器或仪表上去。

在摆动辗压锻造中，当锻造模具的下模支撑被锻造工件承受上模的锻造冲击力时，上模同时还做着圆周回转运动。锻造工件的金属材料在这种摆动辗压过程中快速的延展流动，使得每次锻造时工件只有部分受到锻造力的作用。锻造时的摩擦力也明显比挤压加工小，被锻造的金属材料可以在较小的摩擦阻力下沿径向流动（滚动—滑动摩擦取代了纯滑动摩擦），最大的应力也仅超过工件的屈服应力。由于摆辗锻造时接触的面积较小，摩擦力较小，因此摆辗锻造力仅为挤压时的十几分之一。

摆动辗压工艺是一种使用较少的、适合于大批量锻件生产的锻造工艺技术，在摆动辗压工艺中，将热锻和冷锻两种锻造工艺结合在一起可以锻造大型工件。由于上模的摆动运动可以保证被锻工件在较大的成形时百分之百地不出现裂纹。在一定条件下，采用特殊的制造技术和机床结构设计后，可以将摆辗机制造成分级锻造生产设备：每一个锻造行程只完成一定范围内的工件锻造，整个工件全部的锻造任务将在若干个摆动循环中完成<sup>[1-3]</sup>。与传统的锻压加工相比，摆动辗压具有下列优点：

1) 减小设备吨位。摆辗是以连续局部变形代替常规锻造工艺的整体变形，单重能力大，设备投资费用少。

2) 产品质量好，生产效率高。摆动辗压能使锻件坯料变形均匀，金属纤维流动更合理，且在摆辗过程中有加工硬化的产生，大大提高了成品零件的机械性能。同时，表面质量和加工精度也大大提高，冷摆辗成形的机械零件的精度可在0.03~0.1mm，热摆辗精度可达0.1~0.5，成形后零件的表面粗糙度可达Ra0.08~Ra0.2，因此可以减少机加工，节约材料。

3) 摆动辗压适合加工薄而形状复杂的回转体锻件，而采用锤锻工艺加工此类零件就很难控制成形过程。

4) 劳动环境好，劳动强度低，摆动辗压时机器噪声和震动小；易于实现机械化、自动化。

5) 摆辗模具的寿命高，摆辗工艺与传统锻造工艺相比，其轧制单位压力小许多，摆头与工件局部接触，并且模具上的某区域收间歇性载荷，所以整个模具更加耐磨，失效慢，寿命长。

因此与汽车半轴常规锻造工艺相比，摆辗工艺生产的锻件质量好；生产效率高，节约能源及材料；减少设备投资费用；工作环境好，占地面积小。

以上介绍的热摆辗锻造汽车半轴的工艺从加热火次上可以看出其大多为二次加热加工工艺，即第一次加热后在常规锻压机上拔长或镦粗制坯，然后再加热一次坯件于摆

辗机上摆辗成形。如前所述,在一定条件下,采用特殊的制造技术和机床结构设计后,可以将摆辗机制造成分级锻造生产设备:每一个锻造行程只完成一定范围内的工件锻造,整个工件全部的锻造任务将在若干个摆动循环中完成。所以能将坯料加热一次,在摆辗机上完成预锻、终锻两工步。

我国的汽车半轴摆辗生产多为二次加热锻造工艺,工艺理论相对成熟,在汽车半轴的生产过程中创造了极大的经济价值。但与一次加热锻造工艺相比,二次加热锻造工艺所存在的种种缺陷:

- 1) 二次加热加工容易引起金属材料的过烧而导致锻件的失效。
- 2) 二次加热加热后导致金属组织结构晶粒粗大,后续热处理无法细化锻件的晶粒,使锻件无法达到技术要求。
- 3) 二次加热锻造是锻件表面氧化皮脱落严重,不仅造成环境污染和能源浪费,更影响了锻件表面质量,从而限制了其在锻造场合的广泛应用。

而一次加热锻造工艺不但能热锻出满足技术条件要求的锻件,还能避免二次加热锻造工艺过程中所出现的种种缺陷。尤其是在提倡社会主义可持续发展战略的今天,节省能耗和原材料是企业发展的目标之一,正好,一次加热摆辗锻造汽车半轴与二次加热锻造工艺相比较,充分体现出了节约燃料和原材料的优点。

### 1.2 国内外研究及应用现状

摆辗成形技术最早于 1906 年由美国 Midvale 钢铁公司副总裁 Slick 开发的,他研制出了摆头倾角为  $10.7^\circ$  的 I 型轴向轧机<sup>[4]</sup>。该机摆头自传,工件转动并无摆动动作,主要用于钢锭开坯锻造,代替大型锻压设备。1928 年英国人 Massey 设计了一种摆头公转的轴向辗压机,并获得专利<sup>[5]</sup>。随着对轴向辗压机的深入研究,到 1967 年,波兰人马尔辛尼克(Marcinik)教授设计了摆头兼具公转、章动和公转+章动的冷成型辗压机,并且经过理论研究和实验分析,得出了摆辗时接触面积系数的计算公式<sup>[5]</sup>。

随着摆动辗压成形技术的问世,世界上许多工业发达国家都对该技术进行更深层次的研究和开发。

从设备方面来看,上世纪 60 年代末前苏联研制出椎体模自转+平动,锻件做平动的球面运动压力机<sup>[5]</sup>。1970 年,前联邦德国研制出锥体模自转+直线,工件做旋转运动的轴向模轧机,同年,波兰华沙工业大学的马尔辛尼克教授研制成功了用于冷精摆辗的四轨迹的 PXW 型摆动模轧机<sup>[5]</sup>。1972 年,日本研制出锥体模公转——自转,工件做直线运动的回转锻造机<sup>[5]</sup>,1979 年,瑞士研制出锥体模可以做公转,章动,摆动,工件做直线运动的轨道冷成形压力机<sup>[5]</sup>。美国在斯里克轧机的基础上不断改进其自动化程度,用

来服务于热轧制生产,同时还不断从其他国家进口比较先进的摆辗机,既用来生产大型热轧制锻坯和多种冷精压零件,又对这些机器做进一步的研究,以提高其性能和精度!德国的瓦格纳公司也研制出 AGW 型摆辗机系列<sup>[5]</sup>。

我们中国的摆辗技术史可以追溯到上世纪 60 年代末,因为此时这种新型压力加工技术才在世界范围内真正进入实用性阶段<sup>[6]</sup>。国内从事金属塑性成形研究的学者根据摆动辗压的工作原理和实际生产的要求,自主研发了多种不同型号,不同功用的摆辗机。最初武汉汽车齿轮厂试制成功第一台 120kN 立式摆辗试验机。上海电机锻造厂自行设计制造成第一台卧式摆辗机<sup>[7]</sup>。哈尔滨工业大学与哈尔滨汽车齿轮厂共同设计和制造了 HNJ—400 型立式摆辗机,该机可以辗压生产直径达 400mm 的大锻件。武汉汽车齿轮厂的 DN—100 型卧式摆辗机用以加工带长轴的法兰零件<sup>[8]</sup>。沈阳第一锻造厂在哈尔滨工业大学和清华大学的指导下设计了一台 200 吨的立式摆动辗压机,于 1982 年投入正常生产,先后加工出十多种产品<sup>[6]</sup>。1984 年中国兵器工业 59 研究所从波兰引进具有 4 种运动轨迹的 PXWP—100C 摆辗机后就致力于摆辗机的传动原理、结构及零部件的研究,取得了丰硕的成果,并根据生产需求,1998 年该所设计了 BY630 型摆动辗压机,1994 年投料制作,该设备已经完成了安装、调试,这是我国第一台具有 4 种运动轨迹的摆辗机<sup>[9]</sup>。

目前,世界上许多国家利用此技术来冷、温、热摆辗多种机械零件。据资料显示,国外汽车锻件如行星齿轮、各种法兰、半轴齿轮、端面齿轮、齿条、异形杆类件以及各种环类间与薄壁盘形件等,比较广泛的采用了摆辗工艺。近年来我国对摆辗的研究有了较大的发展,已能采用摆辗工艺生产汽车后桥半轴、大直径薄壁圆盘法兰、铜锣、扬声器导磁体、端面齿轮、各种齿轮坯、各种薄壁圆盘类及饼类锻件。汽车用行星伞齿轮、后桥被动齿轮、半轴伞齿轮和钢质同步器环等锻件的冷摆辗生产在工艺上也取得了较大的进展。另外,摆辗铆接技术的发展给摆辗技术提供了新的应用领域,目前全国已有成百上千台摆辗铆接机正常运行<sup>[10]</sup>。

工艺和设备的发展是相辅相成的。根据锻件的材料、形状、尺寸、用途、表面粗糙度、力学物理性能要求等制定出不同的摆辗工艺,用于指导新型摆辗机的生产或者对已有摆辗设备的改进。国内相关学者对汽车半轴热摆辗成形的原理和规律做了大量的研究工作和实验分析,取得了丰硕的成果。1989 年,鞍钢技术中心的侯华兴通过几何解析得出了摆辗机成形工件最佳半径的取值范围<sup>[11]</sup>。1995 年,山西省机电设计院的研究人员对摆动辗压的工艺参数做了分析,通过对摆辗机的改进设计,生产出解放 CA—10B 后桥半轴<sup>[12]</sup>。1996 年,鞍钢职工工学院的侯华兴对摆动辗压过程中摆头上任一点的速度

进行了理论分析<sup>[13]</sup>。1997年,沈阳天利锻压机械有限公司的方东、周明锋,辽源平岗截齿厂的富钟玺和鞍山精密锻压件厂的邹林联合研究了摆辗工艺与模锻工艺的优缺点并做了比较,得出摆动辗压生产半轴的成本比模锻工艺的成本要低20%<sup>[14]</sup>。1998年,武汉汽车工业大学的张孟得出了摆动辗压力矩的计算方法<sup>[15]</sup>。1999年,中国兵器工业第五九研究所的韩济才对汽车半轴的不同制坯工艺进行了研究<sup>[16]</sup>。同年,中国兵器工业第59研究所对材料为45钢的NHR汽车半轴制坯工艺做了对比研究,采用局部约束的制坯方法,避免了长径比过大的坯料在预锻过程中产生失稳、折叠、裂纹等缺陷<sup>[17]</sup>。2001年,重庆工学院的黄虹对摆动辗压成形件高度尺寸精度进行了分析,具体得出了摆头锥顶偏移摆辗中心的距离和摆角之间的关系,得出了合理的摆辗角范围:进行冷精密摆辗成形复杂件时,摆辗角 $\gamma=0^{\circ}\sim 2^{\circ}$ <sup>[18]</sup>。2002年,武汉理工大学的程培元计算出了摆动辗压接触面积率的简化表达式,通过与波兰的马尔辛尼克公式、日本的久保胜司公式和中国的张孟公式作对比,程培元公式更简单,更精确一点<sup>[19]</sup>。2004年,井冈山学院的李和平根据汽车半轴锻件头部(法兰盘)尺寸与杆部直径相差悬殊这一事实,合理设计出制坯模具<sup>[20]</sup>。2007年井冈山技术学院的李和平,袁昕研究了BJ-130汽车半轴摆辗新工艺,初步分析了汽车半轴通过棒料聚料后再温摆辗成形工艺的可行性<sup>[21]</sup>。

摆动辗压锻造是模锻的一种,既然是模锻,就离不开对摆辗机模具的研究,国内外相关研究人员通过不懈努力,根据摆动辗压的工作原理和特点,研制出了不同的模具材料,得出模具设计加工的要点,模具热处理的方法以及怎样提高模具的寿命等。这使得摆动辗压工艺更加完善。

因此,采用摆动辗压工艺生产汽车半轴在国内形成了一定的规模,据不完全统计,采用此工艺生产汽车半轴的有如下企业<sup>[5]</sup>:武汉汽车齿轮厂用100吨摆辗机生产130型半轴;开封汽车配件厂,大连汽车配件厂和秦皇岛汽车配件厂都用200吨摆辗机生产CA—10B型半轴;沈阳第一锻造厂用200吨摆辗机生产东风20型半轴;云南个旧市齿轮厂用160吨摆辗机生产BJ—130半轴;恒力汽车配件有限公司用160吨摆辗机生产汽车半轴;上海电机锻造厂也用摆辗机生产汽车半轴。

根以上资料显示,国内专家已对摆辗工艺做了大量金属形变的研究和设备改造设计,这为本课题的研究提供了大量的理论知识,但是前些年对摆辗锻造半轴类锻件的研究主要是集中在二次加热锻造工艺的终锻摆辗环节,近些年来对摆辗的研究又倾向于冷摆辗。所以缺乏对一次加热摆辗工艺做出系统的研究。

鉴于此,本课题旨在利用金属塑性成形原理,通过摆辗机工作原理,进行数值模拟和实验研究,分析不同摆辗工艺参数对一次加热连续摆辗成形汽车半轴的影响,通过对

比获得最优的摆辗新工艺参数，以数值模拟最优参数组合为指导，在摆辗机上进行汽车半轴成形的实验研究，以此验证新工艺的可行性。此项研究将会为提高汽车半轴产品质量和生产效率，节约生产成本，提高经济效益做出巨大贡献，具有很大的研究价值和发展前景。

### 1.3 研究内容及研究方法

#### 研究内容

以汽车半轴为研究对象，通过一次加热连续摆辗成形工艺，对汽车半轴的成形规律进行理论分析、数值模拟和实验研究。

首先通过金属塑性成形的基本原理，分析汽车半轴摆动辗压的变形机理及主要摆辗参数，再采用数值模拟的方法，设置不同的摆辗倾角、不同每转压下量模拟汽车半轴一次加热连续摆辗成形过程，分析模拟结果，得出最佳参数。最后，用数值模拟的分析结果作为指导和参考进行实验，对实验结果进行研究分析，最终验证汽车半轴一次加热连续摆辗成形新工艺的可行性。

#### 研究方法：

1) 通过对摆辗理论分析，确定影响汽车半轴摆辗成形的工艺参数，然后用 pro/E 建立几何模型，将模型导入 DEFORM 软件中通过参数设置建立摆辗工艺的有限元数学模型和热力学模型，用迭代法对两种模型进行热力耦合，使其在 DEFORM 软件中模拟成形。

2) 通过在 DEFORM 软件中模拟成形的结果，可以得出汽车半轴在成形过程中的受力、变形及温度场变化的变化情况。

3) 分析汽车半轴在预锻和终锻摆辗模拟过程中，不同的摆角和每转进给量对金属流动情况、变形区应力、应变状况等及法兰盘的充填情况的影响，得出合理的摆角，每转进给量，优化工艺参数，为后续的摆辗工艺试验提供依据和参考。

4) 用数值模拟最优参数为指导进行实验，再对实验结果进行研究分析，验证汽车半轴件摆辗新工艺的可行性。

## 第二章 摆辗成形理论分析

摆辗是一种连续局部加载变形过程，摆头与坯料之间的相对运动状态实际是一个螺旋式送进过程，其变形情况复杂，模具既有摆动又有平动，接触区内既有滚动又有滑动。所以，在改进摆辗加工汽车半轴的方法之前，必须先考虑摆辗机本身的变形机理和变形特性。这样才能合理准确地设计工艺过程，并为设备的设计和使用提供一些参考。

### 2.1 摆辗的变形机制分析

#### 2.1.1 摆动辗压的工作原理

摆动辗压就是利用  $180^\circ - 2\gamma$  的锥体模具局部连续加压力于工件表面并做摆动的塑性加工方法，其工作原理<sup>[5] [6]</sup>如简图 2-1 所示，摆辗凸模 1 的圆锥母线沿锻坯 2 的端面进行滚辗，凸模的中心线 OZ 绕摆辗机的中心线 ON 旋转，同时放在凹模 3 内的锻坯 2 在油缸活塞 4 的推动下做轴向移动。这样，锻坯的上端面沿着空间螺旋面连续地逐步成形。

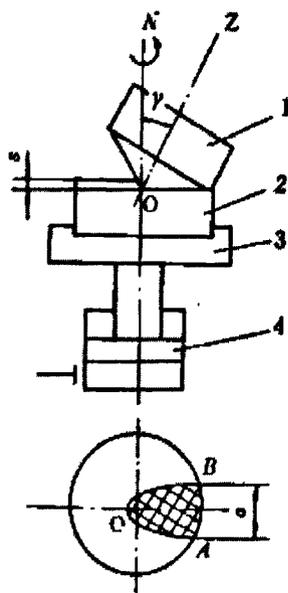


图 2-1 摆动辗压工作原理示意图

1.摆辗凸模 2.锻坯 3.凹模 4.油缸活塞

Fig. 2-1 principle illustration of a rotary forging process

#### 2.1.2 摆动辗压机摆头的运动轨迹分析

摆头的基本运动形式<sup>[5]</sup>可以分为 3 类：进动、转动、章动。如图 2-2 所示：

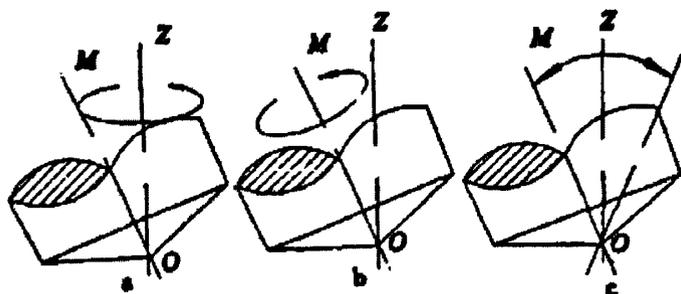


图 2-2 摆头运动的 3 种基本形式

a 进动      b 转动      c 章动

Fig. 2-2 three kind of basic form which the rolling mill shakes the head

进动就是摆头中心线  $OM$  绕机身主轴中心线  $OZ$  旋转；转动就是摆头绕自身中心线  $OM$  旋转；而章动则是摆头轴心线  $OM$  绕机身主轴中心线  $OZ$  来回摆动。由这 3 种基本运动形式可以将摆头的运动形式组合为 4 种：进动+转动、进动+章动、转动+章动、进动+转动+章动。另外，摆头可以同时无进动、无转动、无章动。这样摆头的运动形式就有 8 种。而最后一种运动形式实际跟锤或压力机上模的运动形式相同，在摆动辗压机上用这种锻造方式生产锻件是极其少见的。

根据 7 种不同的运动形式，摆头在工件上的运动轨迹可以分为 4 种：直线形、圆形、螺旋形和多叶玫瑰形。如图 2-3 所示：

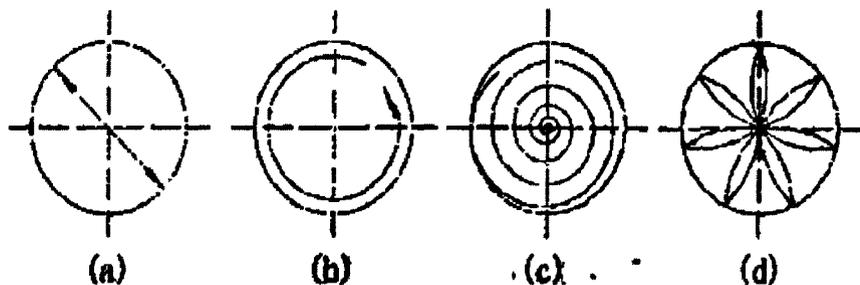


图 2-3 摆辗机摆头的四中运动轨迹

(a) 直线      (b) 圆      (c) 螺旋线      (d) 玫瑰线

Fig. 2-3 Suspends four kind of paths which the rolling mill shakes the head

摆头要实现以上四种运动轨迹，那么摆辗机摆头传动原理可以简化如图<sup>[24]</sup>2-4：

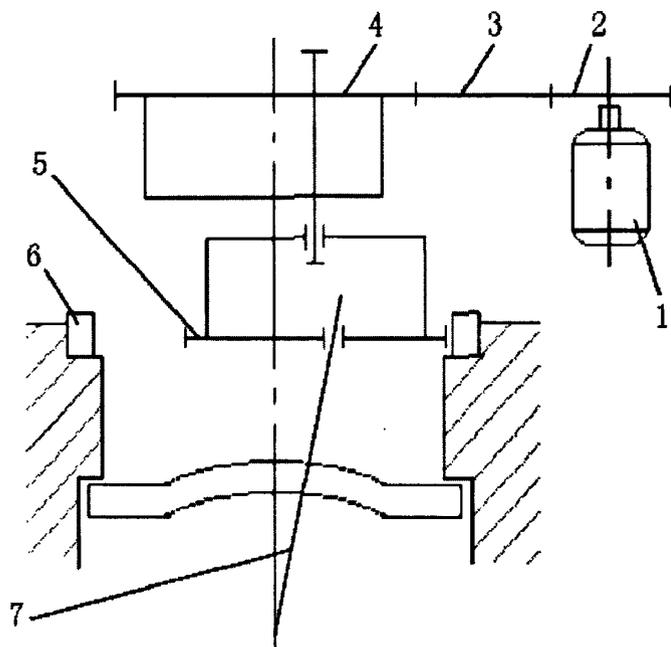


图 2-4 摆辗机传动原理

1 电机；2, 3 齿轮；4, 5 偏心轮；6 内齿轮；7 摆杆

Fig. 2-4 Operating principles of rotary forging machine

其工作原理如下：电动机 1 所产生的力矩通过齿轮 2、3 传递给外偏心轮 4 使之旋转，同时通过内齿轮 6（变速箱）将电动机 1 所产生的力矩传递给内偏心轮 5 使之转动，通过变速箱的调节，可以调节偏心轮 5 的转速和转向。若内外偏心轮同速同向，则摆杆尾柄的运动轨迹为圆；若同速反向旋转，运动轨迹为直线；若同向不同速，运动轨迹为螺旋形；若反向不同速旋转，运动轨迹为多叶玫瑰形。

利用这种方法，可以针对不同的锻件，通过适当的配置调节两个偏心轮的转速和转向获得最有利于锻件成形的摆头运动轨迹。

### 2.1.3 摆辗的变形机制

半轴类锻件属于盘类件，在摆动辗压过程中，摆头与工件任何时刻只是部分接触。所以，锻件的加工表面被分为接触区和非接触区两部分（如图<sup>[5]</sup>2-5 所示）。

画有箭头的表示摆头与工件的接触区域，直接承受模具的压力而发生塑性变形，此区域称为主动变形区。主动变形区内的箭头表示工件在受到摆头压力时该区上表面金属的流动趋势，大致可以分为两部分：工件上表面边缘部分金属径向外流，这样半径有增大的趋势，其余部分金属以径向流动为主。接触区内金属径向流动会受到非接触区内金属的阻碍，它们之间就会产生相互作用力，接触区内的金属对非接触区内的金属施加的力迫使非接触区内的金属发生变形，因此非接触区也叫被动变形区。

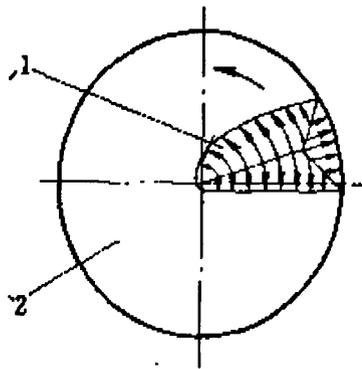


图 2-5 摆辗辘粗时锥体模接触面金属流动趋势示意图

1.主动变形区      2.被动变形区

Fig. 2-5 The contact face metal flowing tendency schematic drawing for rolling upset

(1) 主动变形区变形

主动变形区的金属在摆辗过程中既有径向流动又有切向流动，如果在摆辗前将工件上端面刻上正交网格，经摆辗后，正交网格就会变成 S 形网格（如图<sup>[5]</sup>2-6 所示）。

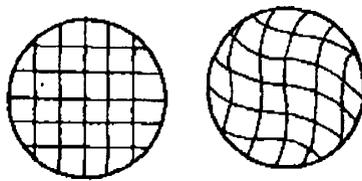


图 2-6 工件加工表面的网格变形

Fig. 2-6 The work piece processing surface grid distorts

主动变形区的应变关系为：

$$\begin{aligned} \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z &= 0 \\ \varepsilon_r + \varepsilon_\theta &= -\varepsilon_z \end{aligned} \tag{2-1}$$

$$\because \varepsilon_z < 0, \varepsilon_r > 0 \quad \therefore \varepsilon_\theta > 0$$

(2) 被动变形区的变形

主动变形区的金属径向流动就相当于一个楔劈对被动变形区施加侧压力，所以被动变形区产生阻力来阻碍主动变形区金属的流动。其阻力的大小将随着主动变形区的变形量而变化，其值与加工工件的相对厚度和轴向轧制的相对进给量有关。

在主动变形区侧压力的作用下，被动变形区的变形有三种情况：1) 小弹性变形；2) 大弹性变形，发生弹性失稳，以至于翘曲起皱；3) 在主动变形区的对面产生塑性变形，

形成塑性铰。

## 2.2 几个重要的摆辗工艺参数

由于摆动辗压工艺过程的金属变形机理非常复杂。表征该工艺过程特性的运动参数除了摆头的运动轨迹以外，接触面积系数、摆头倾角、每转进给量、摆辗力和摆辗力的分布也是重要参数。在摆头的各种运动轨迹中，最常用的是圆形运动轨迹。为了简化研究对象，在不作特别说明的情况下，都是以研究圆形轨迹为例。

### 2.2.1 接触面积系数 $\lambda$

接触面积系数<sup>[6]</sup>就是摆头与坯料的接触面积与坯料的截面积之比，这个值是很难确定的，因为摆头与坯料的接触面是一个变螺距的螺旋面。但是在研究的过程中，由于螺距很小，可以把螺旋面近似的看成平面。波兰马尔辛尼克教授提出的公式为：

$$\lambda = 0.45\sqrt{s/(2R \tan \gamma)} \quad (2-2)$$

式中： $s$ ——每转进给量 (mm/r)；

$\gamma$ ——摆角；( $^{\circ}$ )

$R$ ——毛坯的原始半径 (mm)。

然而，在摆辗过程中，坯料在高度方向被压缩，直径增大，摆头与坯料的接触面积还包括如图 2-7 所示的圆外虚线部分。

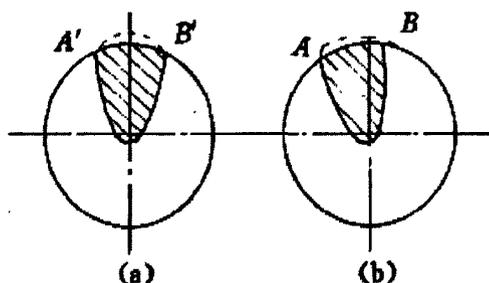


图 2-7 摆头与坯料接触区域边缘轮廓形状

(a) 初始阶段      (b) 成形阶段

Fig. 2-7 Shapes of rolling head and contacting zone

所以计算出的接触面积系数往往偏小，针对这样的情况，国内许多研究人员对接触面积系数重新作了分析研究。最典型的有胡亚民公式：

$$\lambda = \frac{4}{3\pi} \theta^2 \left(1 + \frac{1}{\theta}\right)^2 \quad (2-3)$$

式中： $\theta = \frac{s}{2R \tan \gamma}$ ,  $\gamma \neq 0$

还有程培元公式为：

$$\lambda = 0.63Q^{\frac{1}{2}} - 0.124Q^{\frac{1}{3}} \quad (2-4)$$

式中： $Q = \frac{1}{2} \frac{S}{R} \cot \gamma$

从上面的公式可以看出，接触面积系数由摆动辗压时的每转进给量  $s$ ，摆头摆角  $\gamma$  和坯料的横截面半径  $R$  所决定的。

### 2.2.2 每转进给量 $s$

每转进给量<sup>[1-5]</sup>就是摆头转一周后滑块的上升量，其公式为：

$$s = 60v/n \quad (2-5)$$

式中： $v$ ——滑块的进给速度 (mm/sec)；

$n$ ——摆头转速 (r/min)。

由公式 2-4 可以看出，每转压下量等同于进给速度。它对力能的影响作用，可以由  $s$  与接触面积系数  $\lambda$  的关系曲线图 2-8<sup>[5]</sup>来说明。

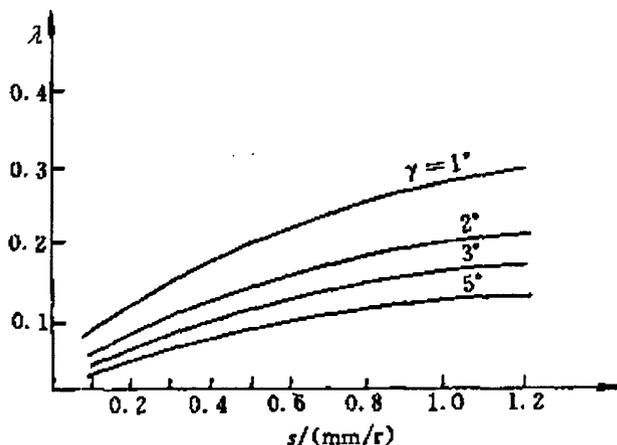


图 2-8 每转压下量  $s$  与接触面积率  $\lambda$  的关系

Fig.2-8 Each extension depress measures  $s$  and the contacted area rate relations

图中曲线表明，接触面积率  $\lambda$  随每转进给量  $s$  的增加而增加。接触面积率  $\lambda$  越大，接触面积越大，根据摆辗力公式可以得出摆辗力也增大。然而，按公式计算出的每转进给量并不符合实际生产过程中摆头的每转进给量。因为在摆辗成形阶段，随着坯料不断地被辗压，塑性变形程度不断增加，所需要的摆辗力越来越大，滑块的进给速度就会越来越慢。所以，滑块的工作速度  $v$  不是常数，而是一个变量，它呈逐渐减小的趋势，并且其衰减程度也不一样，受材料加工温度、硬化程度、模具形状等多种因素的影响，故测定滑块的真实工作速度，精确计算摆头的每转进给量是相当困难的。

文献<sup>[1]</sup>给出了摆辗成形阶段，摆头每转进给量的表达式：

$$s = 60\Delta H / (t \cdot n) \quad (2-6)$$

式中:  $\Delta H$ ——变形量或坯料压下高度 (mm);

$t$ ——摆头与坯料后的辗压时间 (s)。

### 2.2.3 摆头倾角 $\gamma$

摆头倾角<sup>[6]</sup>简称摆角, 它是摆头轴线与摆辗机主轴线之间的夹角, 用  $\gamma$  表示。  $\gamma$  的大小直接影响到接触面积系数  $\lambda$  的大小。一般情况下,  $\gamma$  越小, 金属容易轴向流动,  $\gamma$  越大, 金属容易径向流动。分析接触面积系数公式也可以得出以下结论:  $\gamma$  越大, 接触面积越小, 金属容易变形, 轴向力减小, 径向力和切向力增大, 总的辗压力减小。也就是说  $\gamma$  越大越省力。但如果  $\gamma$  过大, 会使金属变形不均匀, 蘑菇效应更强, 使摆辗件上端面的不平度加大。

### 2.2.4 摆头转速 $n$

生产同一件锻件, 且在摆辗过程中, 每转进给量相同, 如果摆头转速  $n$ <sup>[6]</sup> 越大, 摆头电机功率和生产效率越高, 同时摆头转速影响摆辗机的轮廓尺寸、摆辗件的质量。根据摆辗工艺的影响因素来看, 摆头每分钟旋转次数与滑块的进给速度共同影响摆辗件的成型性能。只要摆头旋转的次数数值完全相等就会产生等效或近似等效的成形效果, 因此, 在摆头每分钟旋转次数少的情况下, 可以延长辗压时间。国产的 400 吨摆辗机转速有取 96r/min 的, 徐州特种锻压机床厂制造的 DTW99-100A 摆辗锻造机的摆头转速为 200r/min, 而日本的 MCOF 型 400 吨摆辗机摆头转速达 500 r/min。对于热摆辗, 高转速能够缩短摆辗成形时间, 使坯料在模腔中的滞留时间缩短, 对延长模具的使用寿命和摆辗件的成形效果有好处。

### 2.2.5 摆头电机功率 $N$

$$N = \frac{Mn}{975\eta} \quad (\text{kW}) \quad (2-7)$$

式<sup>[1]</sup>中:  $M = \frac{1}{2} R^2 s \sigma_s / 100^\circ$  ;

$M$ ——传动力矩 (Nm);

$R$ ——摆辗件最大半径 (mm);

$s$ ——每转压下量 (mm);

$\sigma_s$ ——材料屈服强度 (MPa);

$n$ ——摆头转速 (r/min);

$\eta$ ——传动效率;

摆辗力  $P$  的计算

$$P = \lambda \pi R^2 \sigma_s K \quad (\text{N}) \quad (2-8)$$

式中： $P$ —摆辗机的成形力 (N)；

$\lambda$ —接触面积系数；

$R$ —摆辗件最大半径 (mm)

$K$ —摆辗系数，自由摆辗时取  $K=1.5-1.9$ ，在模具型槽中摆辗时取  $K=2-3$

$\sigma_s$ —终锻温度时的屈服极限。

## 2.3 摆辗的变形特性分析

### 2.3.1 金属的塑性及变形

金属的塑性<sup>[25]</sup>，是指金属在外力作用下，能稳定地发生永久变形而不被破坏其完整性的能力。塑性反映金属或合金承受塑性变形的能力，它是金属的一种重要的加工性能。金属的塑性不是固定不变的，它受许多因素的影响，大致包括以下两个方面：一是金属的内在因素，如晶体结构、化学成分、组织状态等；二是变形的的外部条件，即工艺过程，如变形温度、变形速率、变形的力学状态等。塑性决定于变性条件，所以不应该把塑性看成某种材料的性质，而应当把塑性看成是某种材料的状态。对金属或合金塑性的研究其目的在于选择合适的变形方法，确定好的变形温度、变性条件来获得所需的变形量，以便使金属或合金能顺利地实现成型过程。

金属或合金在外力作用下，若其整体运动受到阻碍，则在金属内部就会产生内力，其内力使金属或合金内部的原子离开平衡位置而处于不稳定状态，此时，由于原子间距的改变，造成了原子间出现了相互作用的吸引力和排斥力的不平衡，使偏离的原子趋向于恢复到原来的平衡位置，一旦去除外力，在原子间的相互作用力作用下原子又回复到原来的平衡位置，这是金属体的外形也就回复到原来的形状和尺寸，这就是弹性变形的发生和消失过程。产生弹性变形的实质，就是所施加的外力或能量还不足以使原子越过半个原子间距的距离。当弹性变形继续增加，原子偏离原始的平衡位置越来越远，且偏离平衡位置的原子也越来越多，当有大量的原子多次而定向的转移到一个新的平衡位置，这是即使去除外力，原子也不能恢复到原始的位置了，这就是塑性变形。所以塑性变形的实质是外力或能量足以使原子越过半个原子间距，或者说金属内的一部分原子相对另一部分原子产生相对移动，即从一个平衡位置转移到另一个新的平衡位置的过程。

摆辗半轴类锻件属于金属的热塑性变形。从微观上分析，金属的热塑性变形机理主要有以下几种：晶内滑移，晶内孪生，晶界滑移和扩散蠕变。

在通常情况下，晶内滑移是热变形的机理。高温时原子间距离加大，原子的热振动和扩散速度加快，位错的活动变得活跃起来，滑移、攀移、交滑移和位错结点脱锚

比低温时容易；滑移系增多，改善了各晶粒之间的变形协调性；同时在热变形状态下，晶界对位错运动的阻碍作用相对减弱，位错有可能进入晶界。

孪生多发生在高温高速变形时；晶界滑移和扩散蠕变只发生在高温变形的时候。

### 2.3.2 厚件回转体工件的变形

摆辗锻造回转体工件，当坯料变形部分的厚度  $H$  大于或等于半径  $R$ （即  $H/D \geq 0.5$ ， $D$  为工件坯料的直径）时，摆辗锻造过程中不会产生塑性铰。在辗压时的变形情况可以分为一下三种，如图 2-9 所示（资料在锥齿轮摆动辗压工艺过程的研究上 P13）

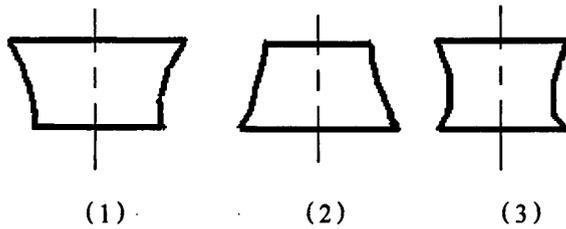


图2-9 厚件变形情况

(1) 上蘑菇形                      (2) 下蘑菇形                      (3) 滑轮形

Fig. 2-9 Favor piece of deformation condition

(1) 当工件的高径比很大，相对进给量  $Q$  小，则摆辗上模的接触面积小，总压力也就小，坯料上表面受力情况相当于一个楔劈，当压力传递到坯料远离摆头的横截面时，此截面全部受力，这种楔劈形式的受力大大减弱，以至于坯料远离摆头处单位面积压力小于屈服强度而不产生塑性变形。又因为摆动辗压过程中上模在工件表面做滚动或滚动+滑动，摩擦力小，这使得工件表面的金属易于流动。因此，形成靠近上模的坯料变形大，远离上模的坯料变形小的上蘑菇形，如图 2-9 (1) 所示。

(2) 在相对进给量很大的时候，上模与坯料的接触面积大，接触压力随之增大，所以上模与坯料之间的摩擦力也增大，这会严重阻碍坯料表面金属的流动。所以开始辗压时，上接触区发生塑性变形，上模与坯料的接触面积增大，继而坯料粘合在上模上，成为上模的延伸部分，则坯料在下模接触区的部分开始发生塑性变形，而且下模与坯料开始部分接触，它们之间的摩擦力小，坯料与下模接触的部分变形快，易形成下蘑菇形，如图 2-9 (2) 所示。

(3) 而当坯料处于以下情况时，易形成滑轮形。如图 2-9 (3) 所示，当坯料的变形部分高径比较小，且辗压时有失稳现象的发生时，坯料产生了轴向弯曲，使得坯料与下模也是部分接触，这部分金属单位面积压力增大，达到了材料的屈服极限，因而产生了塑性变形，形成了上下模相对应的上下塑性变形区，坯料两头变形快，中间变形慢，形成了滑轮形<sup>[16]</sup>。

2.3.3 薄件回转体工件的变形

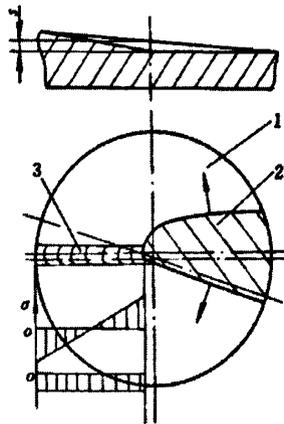


图 2-10 塑性铰及其受力状态

1.被动变形区 2.主动变形区 3.塑性铰

Fig. 2-10 Plastic hinge and stressful condition

当工件很薄时，在主动变形区变形金属的侧压力的作用下被动变形区发生弹性失稳。假设侧压力的合力作用点在  $R/2$  ( $R$  为工件瞬时半径)，以  $R/2$  处的弧长代表薄片的长度，其两端是主动变形区，即塑性变形区，相当于铰接，根据欧拉公式存在如下关系：

$$P_k = \frac{\pi^2 EJ}{L^2} \quad (2-9)$$

式中  $P_k$ ——薄片两侧的作用力；

$E$ ——材料的弹性模量；

$J$ ——最小惯性矩， $J = h^2 b / 12$ ， $h$  为薄片的厚度， $b$  为薄片的宽度。圆盘件时  $b = R - s / (2R \tan \gamma) = R(1 - Q)$ ， $Q = s / (2R \tan \gamma)$  叫相对进给量， $R$  为工件瞬时半径；

假设主动变形区作用在被动变形区上的侧压力均布，单位面积上的作用力为  $\sigma_0$ ，则：

$$\sigma_0 = \frac{P_k}{F_s} \quad (2-10)$$

式中  $F_s$ ——侧压力作用的面积，圆盘件时  $F_s = (R + S / \tan \gamma) h = (1 + Q) R h$ ；

将  $b$ 、 $L$ 、 $\alpha_n$  值分别代入 (2-5) 式得  $P_k$  值，再代入 (2-6) 式可得：

$$\sigma_0 = \frac{\pi^2 E \left( \frac{h}{R} \right)^2 (1 - Q)}{12(1 + Q) \left[ \pi - \frac{1}{2} \cos^{-1}(1 - 4Q) \right]^2} \quad (2-11)$$

一般摆动辗压时相对进给量  $Q \leq 0.4$ , (2-2) 式可简化成:

$$\sigma_0 = E \left( \frac{h}{R} \right)^2 (0.096 - 0.03Q) \quad (2-12)$$

式 (2-8) 表明被动变形区阻碍主动变形区的阻力不仅和材料的弹性模量成正比, 而且和工件的相对厚度有关, 即与  $(h/R)^2$  成正比。当工件的相对厚度达到某一特定值而使工件被动变形区发生翘曲 (或弹性失稳) 之前, 在主动变形区的反对称处, 即断面系数最小的地方, 作用应力达到了材料的屈服强度, 该处呈现塑性状态 (图 2-8), 这就是所谓塑性铰<sup>[5]</sup>。

辗压薄件时, 在主动变形区的对面形成塑性铰链。塑性铰链的外侧变厚 (即  $\varepsilon_2 > 0$ ), 内侧变薄 ( $\varepsilon_2 < 0$ )。塑性铰以外的是弹性变形区。有塑性铰链时, 侧压力<sup>[5]</sup>为:

圆盘件: 
$$\sigma_0 = 2K \times 0.414e^{-3.5Q} \quad (2-13)$$

式中  $e=2.71828$ ;  $K$ ——工件材料的纯剪切塑性变形抗力;  $Q$ ——相对进给量,  $Q=s/(2Rtg\gamma)$ 。

辗压厚件, 被动变形区为弹性变形, 则侧压力  $\sigma_0 = 2K$ 。

## 2.4 汽车半轴摆辗的成形特点

本论文以汽车半轴为研究对象, 图 2-11 为本课题所采用的汽车半轴件示意图。

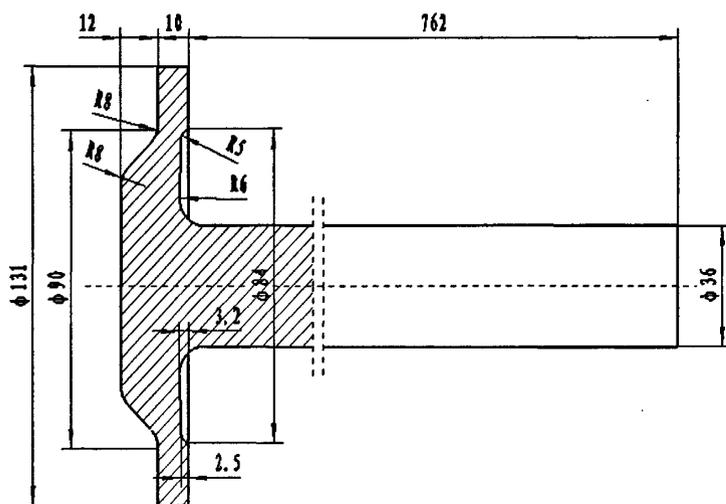


图 2-11 汽车后桥半轴锻件简图

Fig. 2-11 Tractor rear axle of car rear axle forging schematic drawing

图 2-12 所示为本实验中, 根据锻件图, 使用 UG 软件制作的汽车半轴法兰盘实体造型。

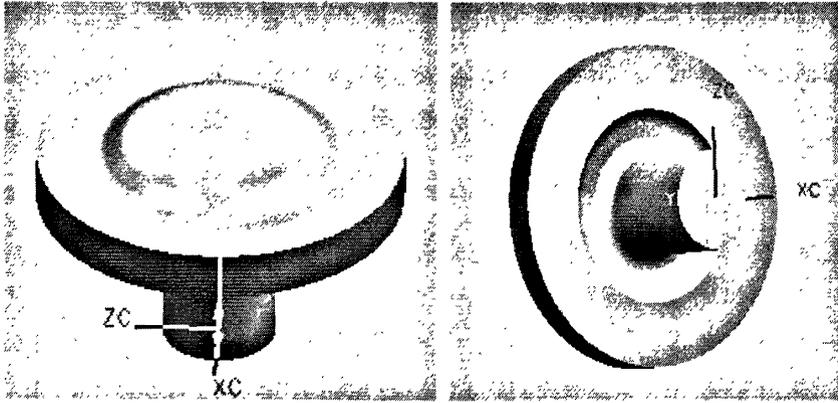


图 2-12 半轴法兰实体造型图

Fig. 2-12 Rear axle flange entity modelling chart

由以上两图可以看出，汽车半轴法兰盘部与杆部直径相差悬殊，用与杆部直径相同的坯料锻造汽车半轴，变形部分的金属锻比大，加之盘部中央有凸台，摆辗成形过程将十分复杂。因此在摆辗锻造成形汽车半轴时，成形过程起初是自由锻、随着聚料越来越多，变形坯料受模具型腔的影响，这时就是模锻过程，所以一次加热摆辗汽车后桥半轴是自由锻、模锻相结合的过程，坯料填充模具型腔的过程就是金属流动和受力最复杂的过程，摆辗的复合镦粗挤辗特征在此过程中得以体现。

## 2.5 本章小结

本章分析了摆辗的变形机制和变形特性，同时分析了影响汽车半轴摆辗成形的重要摆辗工艺参数，为汽车半轴摆辗成形的数值模拟和试验研究提供了理论根据。

## 第三章 汽车半轴摆辗数值模拟

## 3.1 汽车半轴摆辗成形新工艺流程

图 3-1 为一次加热连续摆辗成形汽车半轴工作原理图。该成形方法的工艺流程如下：首先，选用和半轴杆部直径相等的原材料 ( $\Phi 36\text{mm}$ )，根据金属塑性成形体积不变原则计算变形棒料长度，加上杆部长度，就是坯料的总长度，机器下料。根据金属锻造温度范围的规定（半轴所用材料为 45 钢，其始锻温度为  $1150^{\circ}\text{C}$ ，终端温度为  $800^{\circ}\text{C}$ ），对棒料进行局部加热。然后，进行装料，使坯料 4 从下模 2 伸出的长度与坯料的直径的比值达到摆辗成形的最佳高径比要求 ( $H/d$  在  $0.7\sim 1$  时)。开始摆辗，滑块 5 推动加热的坯料以速度  $V_1$  向摆头（凸模）方向进给，同时摆头以一定转速  $n$  绕主轴线旋转，而凹模 2 和模座 3 固定不动。这一过程就是预锻。当预锻结束后，调节动力系统，使滑块 5，模座 3 和凹模 2 以一样的速度  $V_2$  向摆头方向运动，待上下模闭合，法兰盘的成形结束。最后，进行精整辗压，滑块停止不动，摆头再转动几圈，以使法兰盘表面平整，棱角处充填饱满。

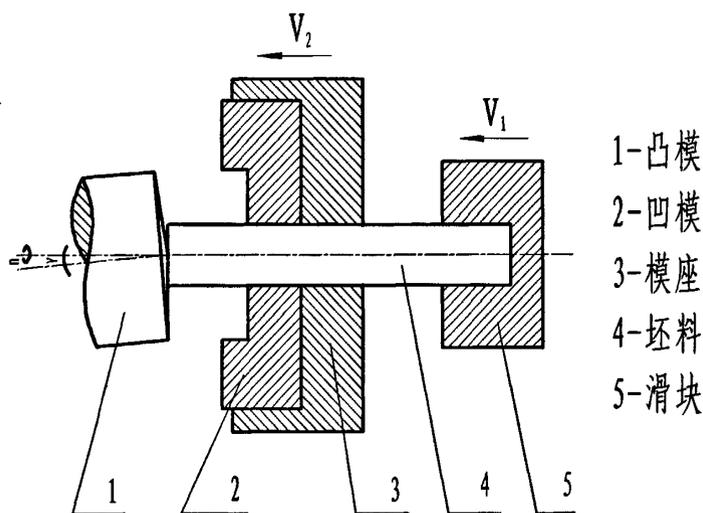


图 3-1 摆辗成形工作原理图

Fig. 3-1 The rear axle flange suspends the rolling finite element mode

## 摆辗工艺参数选择

摆辗工艺的工艺参数如第二章所述，包括摆辗机摆头倾角  $\gamma$ ，摆头转速  $n$ ，每转进给量  $s$ ，摆头运动轨迹，初始高径比  $H/D$ ；热加工工艺还涉及到坯料的加热温度  $T$ 。这些参数不仅决定摆辗锻造机的技术规格，而且还影响产品质量和生产效率。

本数值模拟中，工艺参数的选择将依照摆动辗压理论，首先确定坯料坯料为 45 钢，

在模拟设置时,在材料库中将代表 45 钢的材料参数加在几何模型中。其次是初始高径比  $H/D$ ,根据已有研究成果证明,采用摆辗对坯料进行预锻成形时,初始高径比( $H/D$ )控制在  $0.8\sim 1.0$ <sup>[2]</sup>范围内,预锻成形效果理想。所以本次数值模拟设定初始高径比  $H/D$  为 0.8。

每转压下量  $s$  的选择,每转压下量的大小直接关系到摆辗力大小及摆头电机功率的大小,同时决定着锻件质量的好坏和生产率的高低。根据公式 2-4 每转压下量等同于进给速度,每转压下量  $s$  越大,坯料的进给速度越快,完成摆辗成形的时间就相应缩短,大大减小了热摆辗过程中坯料的热量损失。因此在设备吨位允许的情况下,应尽量增大  $S$  值。所以在本次模拟实验中, $s$  值分别拟定为 2mm/r,4mm/r,6mm/r,8mm/r。

摆头倾角  $\gamma$  的确定。一般情况下, $\gamma$  越小,金属容易轴向流动, $\gamma$  越大,金属容易径向流动。分析接触面积系数公式也可以得出以下结论: $\gamma$  越大,接触面积越小,金属容易变形,轴向力减小,径向力和切向力增大,总的辗压力减小。也就是说  $\gamma$  越大越省力。但如果  $\gamma$  过大,会使金属变形不均匀,蘑菇效应更强,使摆辗件上端面的不平度加大。

实际生产中,利用  $\gamma$  角的变化,可以实现不同工艺的摆辗加工,当然,加工同一种锻件,也可以尝试用不同的  $\gamma$  角。本模拟实验中分别取摆头倾角  $\gamma=3^\circ、5^\circ、8^\circ、10^\circ$ 。

本模拟试验研究中取摆头转速  $n=200\text{r/min}$ 。摆头运动轨迹为圆形。

材料的加热温度设定,因为是 45 钢,根据锻压手册,坯料加热最高温度为  $1150\sim 1200^\circ\text{C}$ <sup>[5]</sup>,为避免过烧,本模拟实验以加热至  $1150^\circ\text{C}$  为宜。在锻件加工过程中为避免模具与坯料之间温度差过大而影响锻件的质量,同时为了延长模具寿命,还应对模具进行预热,预热温度为  $250^\circ\text{C}$ 。

## 3.2 半轴摆辗成形有限元模型的建立

汽车半轴摆辗成形是热加工过程,坯料一方面有热量的产生,另一方面又有热量的损失,热能是金属成形很重要的影响因素,分析传热与变形的关系称之为热机耦合,通过迭代的方法可以实现高精度的热机耦合分析。DEFORM-3D 是一套基于有限元的工艺仿真系统。DEFORM 软件提供了三种迭代计算方法:Direct、Newton-Raphson、和 Explicit。同时该软件提供了丰富的材料库。

### 3.2.1 模拟计算的有限元模型

模拟先是利用倾角分别为  $3^\circ、5^\circ、8^\circ、10^\circ$  的锥体模自身的轴线绕机床主轴线连续旋转并对坯料施加压力而达到汽车半轴摆辗成形之目的,倾角分别为  $3^\circ、5^\circ、8^\circ、10^\circ$  的摆头装配在摆辗机上模座上。通过用不同摆辗倾角来摆辗汽车半轴,对比分析成形结

果, 选出最佳的摆辗倾角  $\gamma$ 。当最佳摆辗倾角  $\gamma$  选定后, 再调整摆辗过程中的每转进给量  $s$ , 分别设置每转进给量  $s$  为  $2\text{mm/r}$ 、 $4\text{mm/r}$ 、 $6\text{mm/r}$ 、 $8\text{mm/r}$ , 通过用不同每转进给量来摆辗汽车半轴, 对比分析成形效果的影响, 选出最佳的每转进给量  $s$ 。本模拟实验对模型机构的设计进行了部分简化, 即将前、后滑块分别简化成了下模 2 和滑块 5。其中, 下模装配在下模座 3 上, 由于摆动辗压时锻件毛坯与上模接触的一面容易充满型腔, 而与下模接触的一面不易充满型腔, 所以在设计模具时采用汽车半轴法兰盘的上平面为分模面, 如图 3-2 所示。



图 3-2 上下模具设计中锻件的分模面

Fig.3-2 About in mold design forging minute modular surface

### 3.2.2 汽车半轴成形过程的模拟设计

由第一章介绍的研究内容和研究方法可知, 汽车半轴的成形过程要经历两个阶段:

第一阶段自由锻成形。摆头以额定转速旋转, 下模 2 保持静止不动, 与摆头的轴向距离由初始高径比决定, 坯料 4 在滑块 5 的推动下以速度  $v_y$  持续向上进给, 直至将法兰盘所需的坯料全部送入上下模腔之间。称此过程为预锻。

第二阶段是模锻成形。此阶段摆头转速不变, 调整摆辗机液压系统, 使坯料 4 在下滑块 5 和下模 2 的共同带动下以速度  $v_z$  继续向摆头方向进给, 直到上下模具合模, 法兰盘终锻成形。

## 3.3 预锻成形的模拟与结果分析

半轴锻件成形过程模拟采用基于热机耦合的刚粘塑性有限元法。

### 3.3.1 摆辗倾角的选择

1. 参数设置: 锻件材料取 45 钢, 在 DEFORM 软件前处理时将材料库中 45 钢的本构关系和热物性参数加到几何模型上。原始坯料尺寸为  $\Phi 36\text{mm} \times 250\text{mm}$  的圆柱体棒料, 在 DEFORM 软件前处理时设其为塑性材料, 摆头、下模和滑块均设为刚性材料, 忽略其弹性形变。摆辗时坯料的初始高径比  $H/D$  取 0.75, 摆头转速为  $20.95\text{rad/sec}$  (即摆头转速为  $200\text{r/min}$ )。预锻进给速度  $V_1$ :  $20\text{mm/sec}$ , 坯料初始加工温度取  $1150^\circ\text{C}$ ; 模具预热温度为  $250^\circ\text{C}$ , 坯料与模具接触面的换热系数取  $3\text{kw}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。

网格划分采用四节点四面体, 棒料几何模型被离散为 1487 个节点和 5877 个单元,

在模拟过程中单元和节点数目将随变形量的增加自动重划分。

摩擦系数采用常剪切摩擦模型来确定，摆头与坯料之间为滚动摩擦，摩擦系数设定为 0.1；下模与坯料间摩擦系数设定为 0.3。

变形抗力与变形温度、变形程度和变形速度的关系函数：

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (3-1)$$

式中  $\sigma$ ——应力

$\varepsilon$ ——应变

$\dot{\varepsilon}$ ——应变速率

$T$ ——变形温度

模拟在三维坐标系中进行，机身主轴为 Z 轴，摆头绕 Z 轴的运动轨迹为圆形，预锻过程中坯料的总进给量为 163mm，设定滑块的进给步长为 1.63mm，总步数为 100，每十步保存一次。摆头的摆角分别为 3°、5°、8°、10°，模拟汽车半轴的一次加热摆动辗压成形。

## 2. 不同摆角下的锻件变形规律

图 3-3 和图 3-4 分别为坯料分别进给不同不同摆辗倾角下坯料金属的流动情况。由摆动辗压原理可知：摆辗的锻压方式是倾斜  $\gamma$  角的摆头在坯料表面局部连续加压，其压力中心不在坯料的中心点上，而是偏离坯料中心，在中心至圆周约  $2/3R$  处。因此，摆辗出的锻件，其径向流动变形及切向流动变形大于轴向压缩变形，且随着坯料的进给量越大越明显，如上两组图示。

由图 3-3 可以看出，当摆辗倾角  $\gamma=3^\circ$  时，坯料与摆头接触的面上金属的径向并不明显，而坯料与下模模膛处的变形很明显，说明此过程中金属易于轴向流动，而当  $\gamma=10^\circ$  时，坯料的变形部分形成一个倒锥形，可以看出坯料与摆头接触的面上金属的径向流动相当明显，说明此过程中金属易于径向流动。由图 3-4 也可以看出，在预锻结束时，随着摆头倾角的增加，法兰盘锥形的厚度越来越薄，外径越来越大。

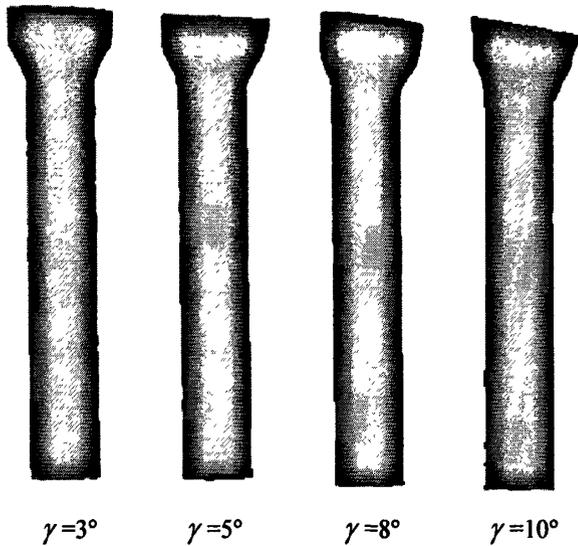
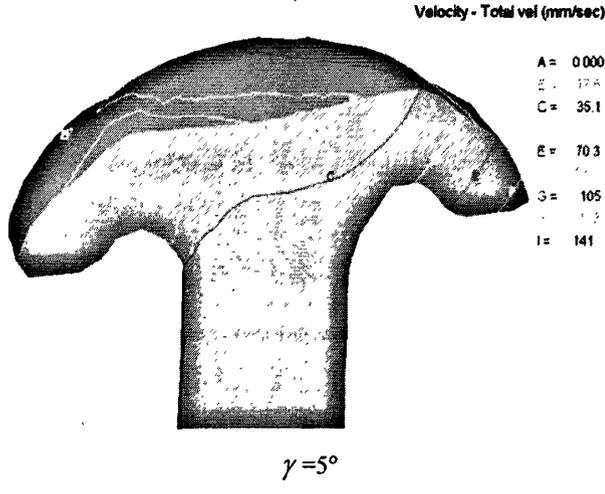
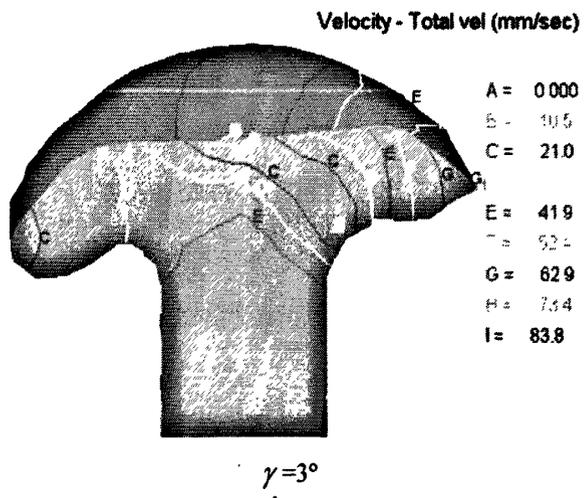


图 3-3 坯料进给时不同摆角下的金属流动情况

Fig.3-3 Metal flow tendency when 23.562rad under different speed metal mobile situation



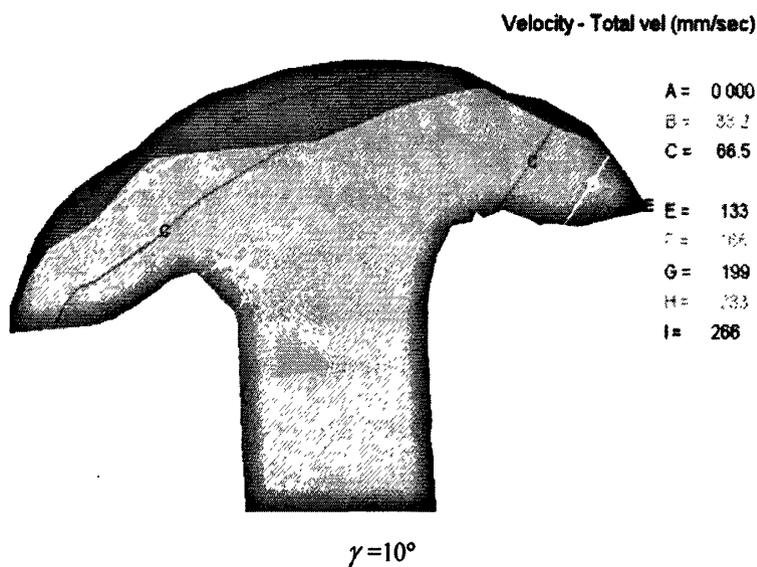
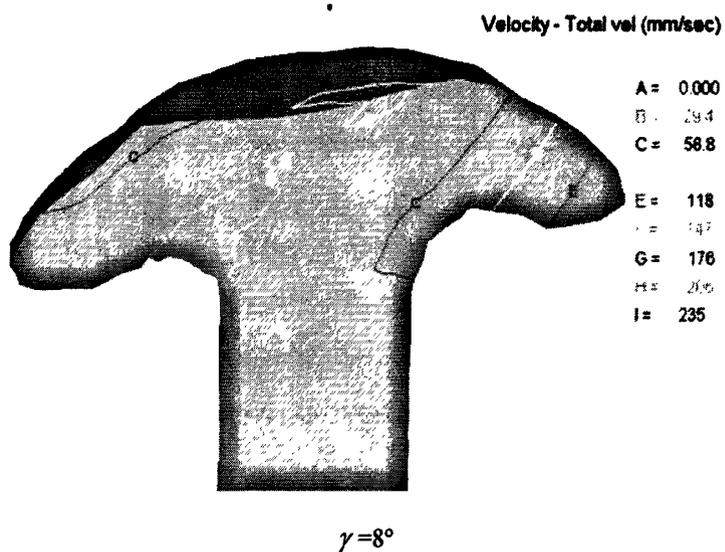


图 3-4 预锻结束时不同摆角下金属速度场分布

Fig.3-4 The different metal speed field distribution when in advance the conclusion

### 3. 预锻轴向力与摆角的关系

由图 3-5、3-6 可以得出：

(1) 预锻时，轴向力随行程的增加而增大。因为预锻是一个聚料的过程，这段时间内上模与下模的距离不变，棒料在摆头辗压作用下 R 不断增大。将接触面积系数公式

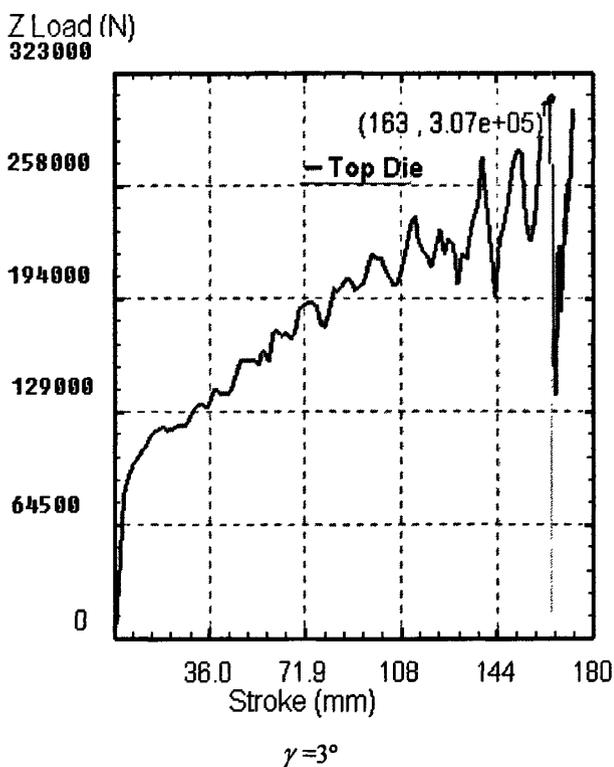
(2-2) 代入摆辗力计算公式 (2-8) 可得:

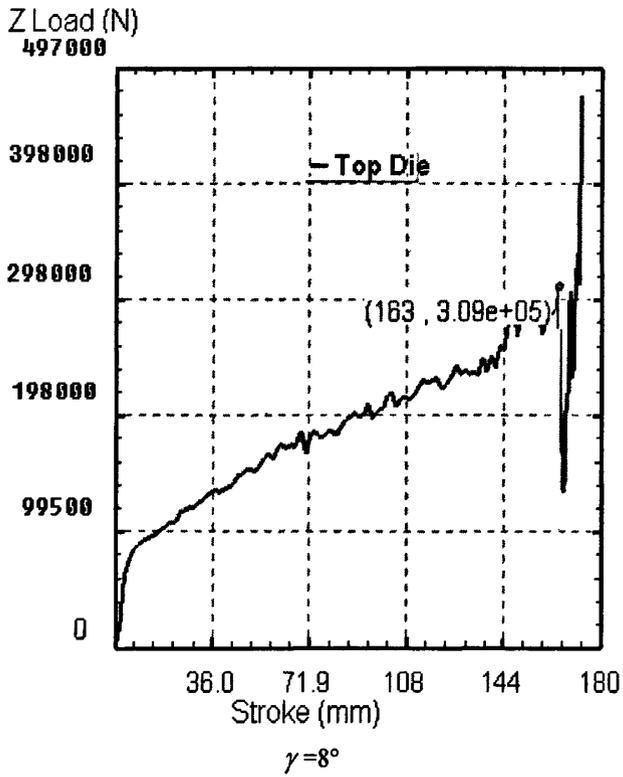
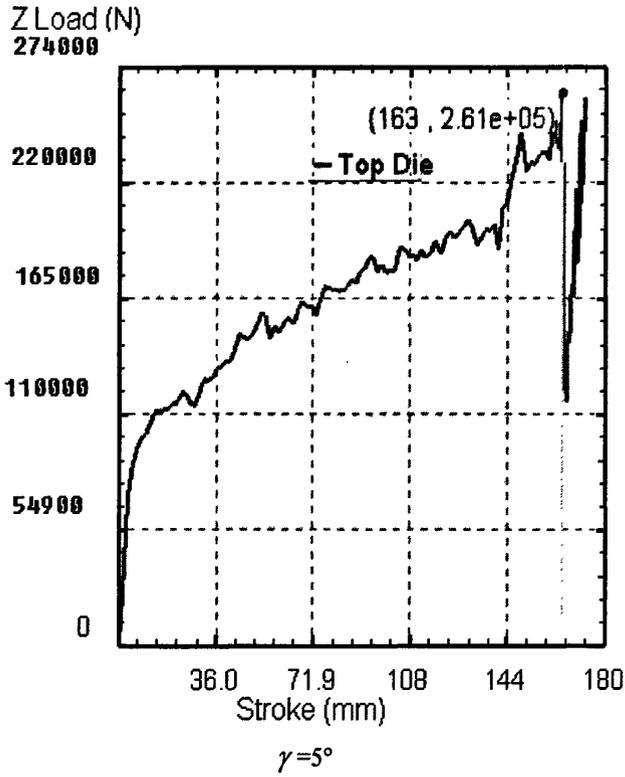
$$P = 0.4246\pi \sqrt{\frac{SR^3}{2 \tan \gamma}} \sigma_s K \quad (3-2)$$

由公式 (3-2) 可知  $P$  随的  $R$  增大而增大, 且在摆辗过程中, 每转进给量不变, 则咬入角  $\alpha$  也不变, 轴向力  $F = P \cos \alpha + P \mu \sin \alpha$ 。再将公式 (3-2) 代入轴向力公式, 不难看出轴向力  $F$  随  $R$  的增大而增大, 这就说明模拟结果与理论分析的结果是一致的。

(2) 摆角  $\gamma$  越大, 轴向力愈小, 这与已经得出的实验结论是相符的。

图 3-5 是摆角  $\gamma$  分别为  $3^\circ, 5^\circ, 8^\circ, 10^\circ$  时, 模拟摆辗过程所得到的轴向力-行程曲线图。





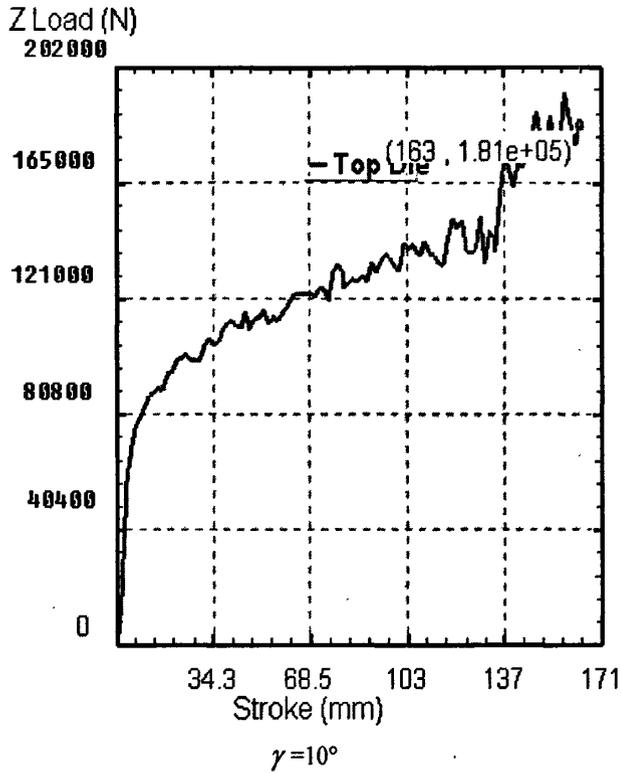


图 3-5 轴向力与行程关系

Fig.3-5 Relation between Zload and stroke

图 3-6 是根据模拟保存结果得出轴向力随行程变化的折线图。

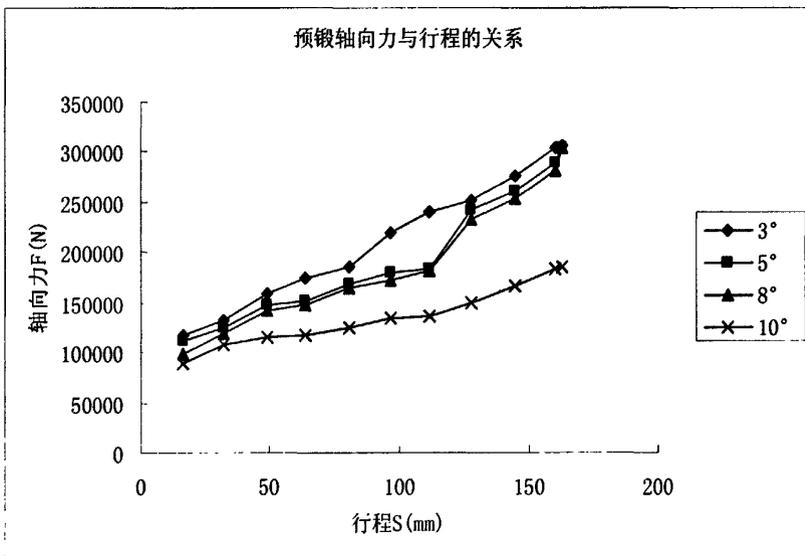
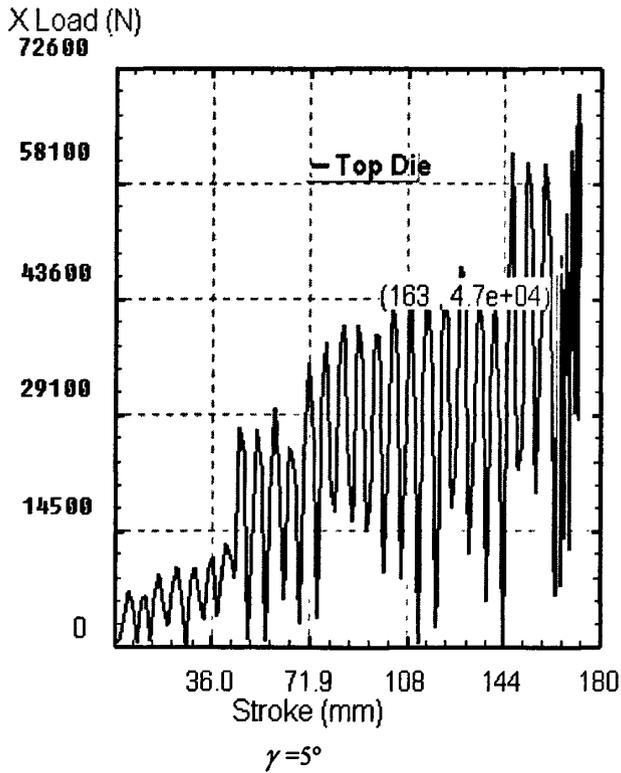
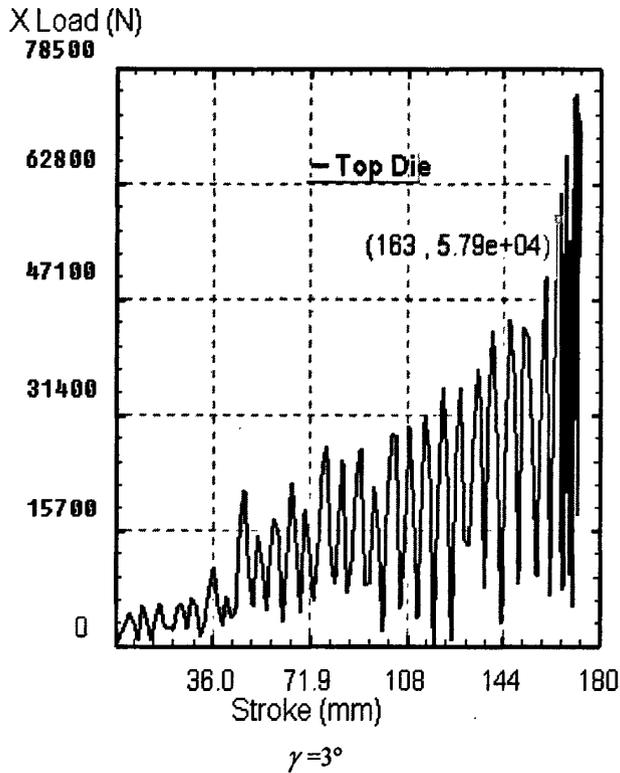


图 3-6 轴向力与行程关系

Fig.3-6 Relation between Zload and stroke

4. 预锻时 X 轴上的径向分力与摆角的关系

图 3-7 是摆角  $\gamma$  分别为  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$  时, 模拟摆动辗压过程所得到的 X 轴上径向分力随行程变化曲线图。



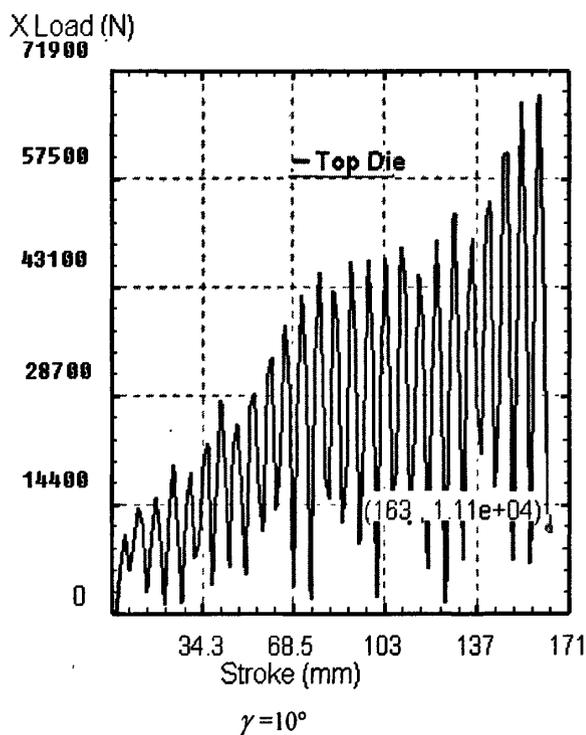
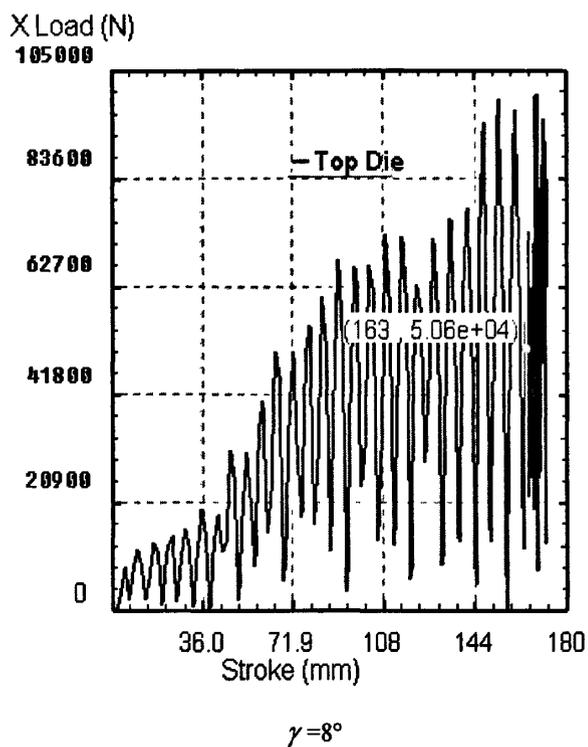


图 3-7 X 轴上径向分力与行程关系

Fig.3-7 Relation between Xload and stroke

图 3-8 是根据模拟保存结果得出 X 轴上的径向分力随行程变化的折线图。

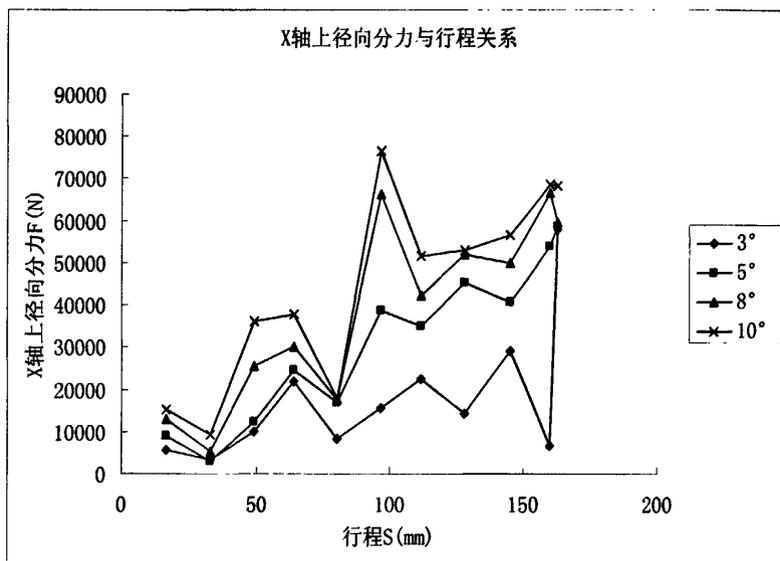


图 3-8 X 轴上径向分力与行程关系

Fig.3-8 Relation between Xload and stroke

由图 3-8 可以得出径向分力随摆角的增大而增大，这也与已经得出的实验结论是相符的。

通过以上的分析可以得出：

(1) 模拟所得出的受力情况与摆辗件受力的理论分析是相符的，说明在摆辗机上实现预锻制坯的构想是可行的。

(2) 在摆辗机上实现预锻制坯，最佳的摆头摆角  $\gamma$  为  $3^\circ$ 。尽管摆角  $\gamma$  越大，轴向力越小，金属更容易径向流动，可是从模拟结果可以看出， $\gamma$  过大，预锻时蘑菇效应更强，金属变形不均匀，而且径向循环载荷增大，更容易引起模具的疲劳破坏！

### 3.3.2 每转进给量的选择

1. 参数设置：锻件材料取 45 钢，在 DEFORM 软件前处理时将材料库中 45 钢的本构关系和热物性参数加到几何模型上。原始坯料尺寸为  $\Phi 36\text{mm} \times 250\text{mm}$  的圆柱体棒料，在 DEFORM 软件前处理时设其为塑性材料，摆头、下模和滑块均设为刚性材料，忽略其弹性形变。摆辗时坯料的初始高径比  $H/D$  取 0.8，摆头转速为  $20.95\text{rad/sec}$ （即摆头转速为  $200\text{r/min}$ ）。坯料初始加工温度设定为  $1150^\circ\text{C}$ ；模具预热温度为  $250^\circ\text{C}$ ，坯料与模具接触面的换热系数取  $3\text{kw}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。

网格划分采用四节点四面体，棒料几何模型被离散为 1487 个节点和 5877 个单元，

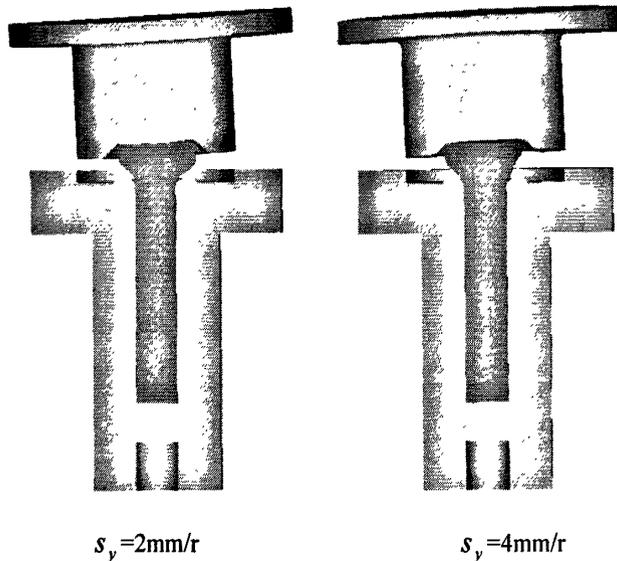
在模拟过程中单元和节点数目将随变形量的增加自动重划分。

摩擦系数采用常剪切摩擦模型来确定，摆头与坯料之间为滚动摩擦，摩擦系数设定为 0.1；下模与坯料间摩擦系数设定为 0.3。

模拟在三维坐标系中进行，机身主轴为 Z 轴，摆头绕 Z 轴的运动轨迹为圆形，预锻过程中坯料的总进给量为 163mm，设定滑块的进给步长为 1.63mm，总步数为 100，每十步保存一次。摆头的摆角为 3°，分别设置每转进给量  $s$  为 2mm/r、4mm/r、6mm/r、8mm/r，模拟汽车后桥半轴的一次加热摆动辗压成形。

## 2.不同每转进给量下锻件的变形规律

由图 3-10 可以明显看出，当坯料进给 95mm 时，随着每转进给量  $s_y$  的增大，变形部分的上蘑菇形逐渐减弱，辗压成形的盘部厚度越厚。这是因为当工件的  $H/D$  比较大，每转进给量  $s_y$  小时，则摆辗上模与坯料的接触面积小，这时，主动变形区相当于一个楔劈，其形状是上宽下窄，所以楔劈对工件上部的影响大于下部；又由于辗压过程中椎体模在工件上做滚动或滚动+滑动，其对工件的摩擦作用较一般的锻造方法小得多，这使得工件表面的金属易于流动。因此，靠近上模的工件表面以变形，变形量沿工件从上至下衰减，造成上部变形大，下部变形小的上蘑菇形；当每转进给量  $s_y$  较大时，接触面积率  $\lambda$  越大，摆辗上模与坯料的接触面积大，它们之间的摩擦作用大，会严重影响工件表面金属的流动，同时，楔劈状受力情况减弱，尽管还是工件上部变形大，下部变形小，但是差距不大，成形部分的下蘑菇形不是很明显。



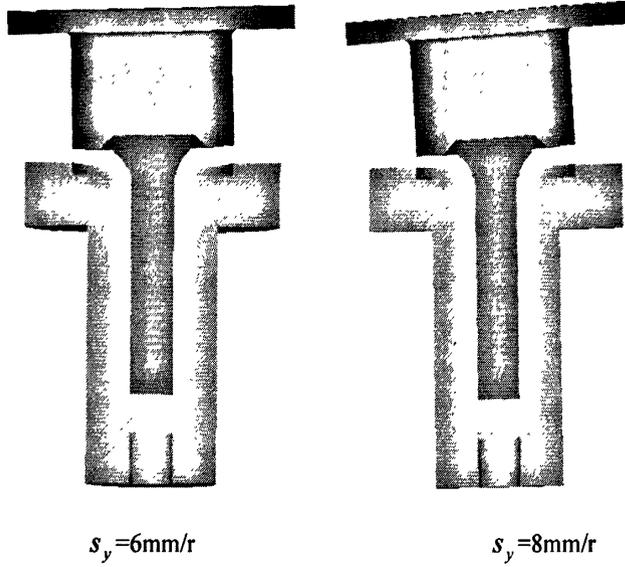
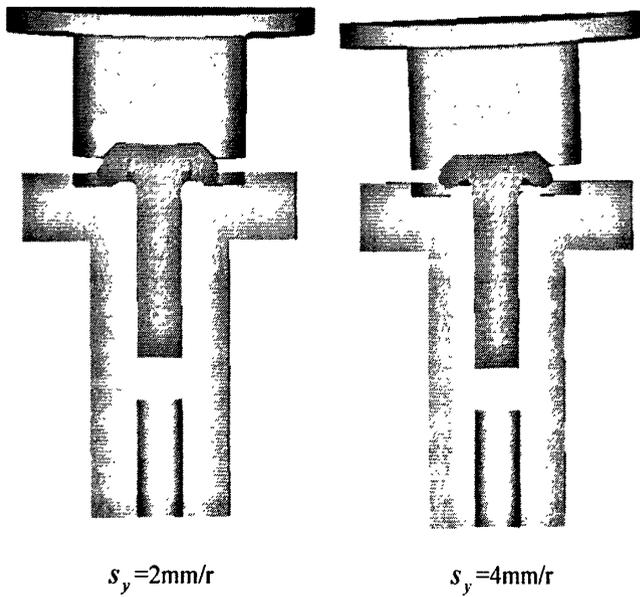


图 3-9 坯料进给 48.4mm 时不同没转进给量下金属的流动情况

Fig.3-9 Metal flow tendency when 48.4mm under different feed per turn



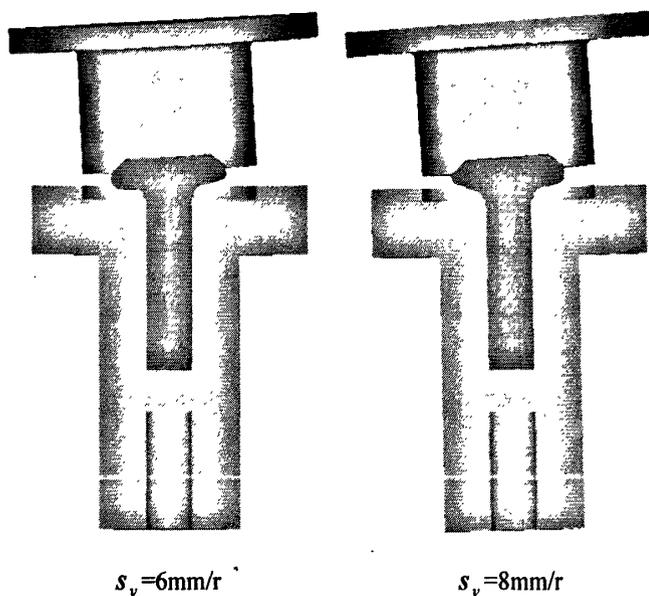


图 3-10 坯料进给 95mm 时不同每转进给量下金属的流动情况

Fig.3-10 Metal flow tendency when 95mm under different feed per turn

图 3-11 为预锻结束时，不同每转进给量下坯料的金属流动情况。

当摆辗预锻工步结束时，成形半轴法兰所需的坯料体积已全部聚集在上、下模具之间。由以下四幅图均可看出：预锻工步结束时坯料成形都成上蘑菇形，这是因为随着坯料对上模环形腔的填充，进而环形上模膛斜壁迫使沿着径向流动的金属向斜下方流动，而且与上模接触部分的金属径向流动速度远远大于盘部与杆部交界处的金属径向流动速度。所以形成了上蘑菇形。

但是随着每转进给量的增加，上蘑菇形有所减弱。当取  $s_y=2\text{mm/r}$  时，由图 3-10 可以看出，在坯料进给量为 95mm 的时候法兰盘部的蘑菇形已经很严重了，其边缘已经接触到下模，随着进给量连续不断的增加，向斜下方流动的金属受到下模膛的阻碍作用，迫使其径向流动，而变形部分的金属流动速度不同，这样有可能在法兰盘预锻时形成折叠情况。

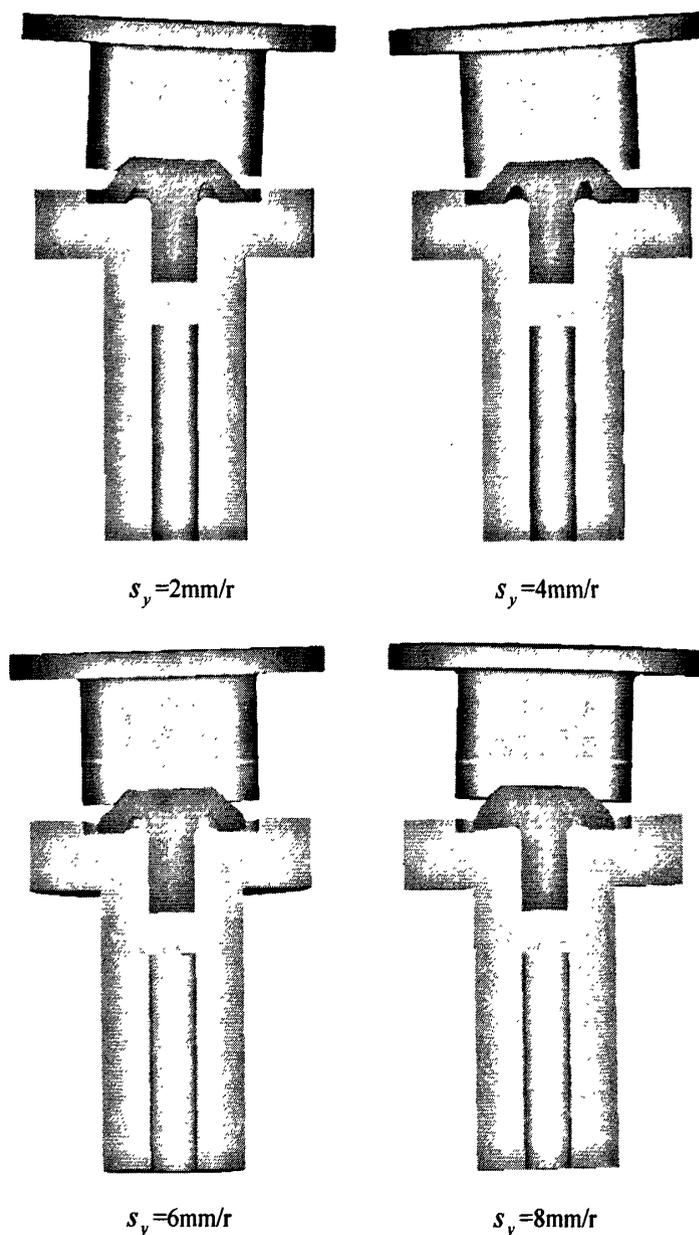


图 3-11 坯料进给 163mm 时不同每转进给量下金属的流动情况

Fig.3-11 Metal flow tendency when 163mm under different feed per turn

$s_y = 4\text{mm/r}$  时锻件蘑菇形状比  $s_y = 2\text{mm/r}$  的锻件蘑菇形状有所减轻,但对于整个锻件来说,还是不够理想。

当取  $s_y = 6\text{mm/r}$  时,由图 3-10 可以看出,预锻成形的盘部蘑菇形状大大减弱,且锻件坯料分布均匀,盘部厚度符合预锻工步所预期的理想效果。

当取  $s_y = 8\text{mm/r}$  时,锻件盘部由于变形速度过大造成圆盘底面粗糙,褶皱剧烈,若

这一现象发生在试验生产中可能会引发裂纹或折叠现象，使产品报废。

图 3-12 为预锻结束时，不同每转进给量下的等效应力分布情况。由图可见，靠近模具与坯料接触区域的等效应力值大于非接触区域，最大应力出现在法兰与杆部连接区域，因为这个区域在整个锻件上的几何形状和外形尺寸发生突变而引起应力显著增大且集中。当预锻速度取  $s_y=8\text{mm/r}$  时其应力分布极不均匀，这也是导致不均匀变形的原因所在。比较以上四幅图，当预锻速度越大时，等效应力反而有所降低，这是因为每转进给量越大，单位时间内金属的变形量就越大，使金属的温度升高得越快，由温升引起的动态再结晶越明显，从而使变形抗力降低。

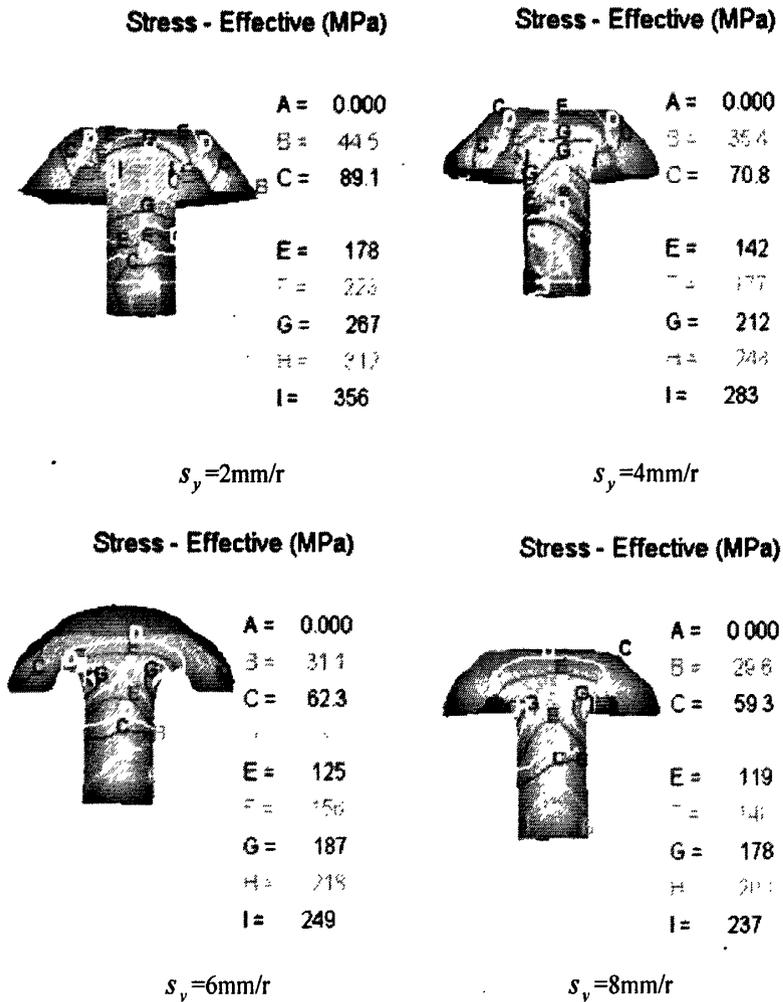


图 3-12 预锻过程结束时不同每转进给量下的等效应力分布

Fig.3-12 Different feed per turn equivalent stress distribution

when in advance the process conclusion under

### 3.不同每转进给量对变形力的影响

由图 3-13、3-14、3-15、3-16 所示, 无论何种速度下, 上模载荷曲线在整个预锻加工过程中基本上是呈脉动式上升的, 这是因为在加工过程中, 以坯料为参照物, 摆头的运动形式为螺旋式进给运动, 且受到偏心力作用有微小波动。从载荷曲线图中可以看出, 随着进给量的增加, 材料迅速达到屈服极限, 这一段载荷曲线的斜率比较大, 当上模对坯料施加的力所产生的应力超过材料的屈服极限后, 坯料开始变形。摆辗初期, 坯料变形量较小, 盘部半径较小, 与摆头的接触面积也小, 成形力和曲线斜率也较小。随着变形量的增加, 锻件内部的位错密度逐渐增加和上模型腔对坯料变形约束, 使得变形抗力逐渐增大, 曲线斜率明显加大。随着变形量的增加, 坯料在加工过程中所产生的热量对坯料与模具和空气之间发生的热传递和热辐射所损失的热量做了补偿, 使坯料还是保持了较高的温度, 回复使加工硬化速度相对减弱, 加之由于摆辗机本身的精度问题, 有微小的震动, 从而使得曲线呈现非线性变化。

由以下四组图片比较可以得出: 摆辗锻造同一型号的半轴, 在其它参数相同的情况下, 每转进给量越大, 预锻过程中出现的最大载荷也越大。当  $s_y=2\text{mm/r}$  时, 上模最大载荷为 318KN; 当  $s_y=4\text{mm/r}$  时, 上模最大载荷为 322KN; 当  $s_y=6\text{m/r}$  时, 上模最大载荷为 361KN; 当  $s_y=8\text{mm/r}$  时, 上模最大载荷为 383KN。根据公式 3-21 可得, 每转压下量  $s$  越大, 坯料与摆头的接触面积率  $\lambda$  增大, 接触面积越大, 从而使接触压力、摆辗力都增大。

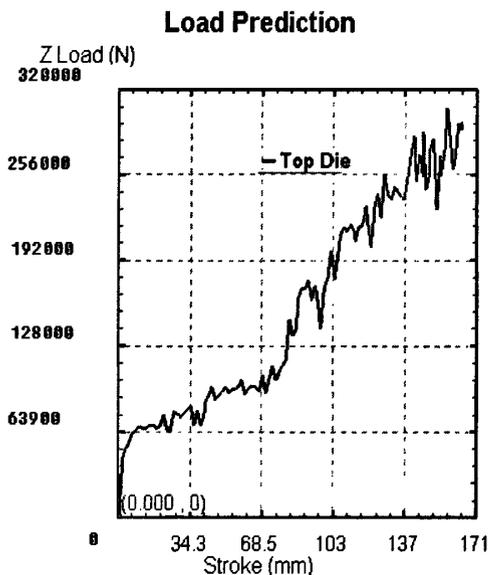


图 3-13  $s_y=2\text{mm/r}$  预锻过程上模载荷曲线

Fig. 3-13 Top die load curve under the preforging at  $s_y=2\text{mm/r}$  speed

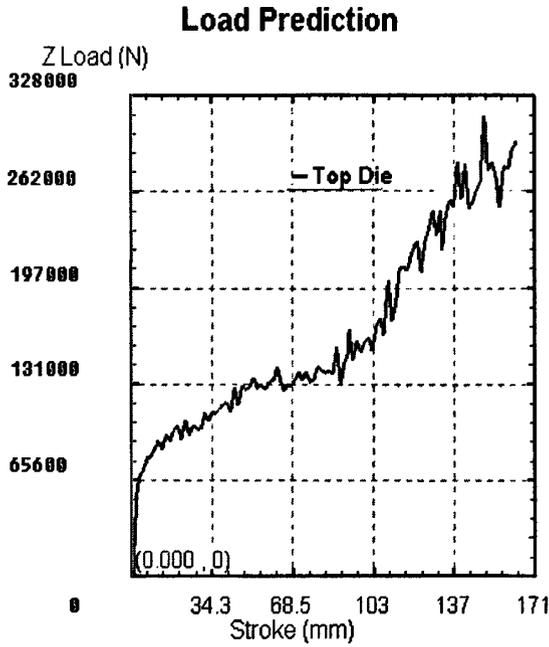


图 3-14  $s_y=4\text{mm/r}$  预锻过程上模载荷曲线

Fig. 3-14 Top die load curve under the preforming at  $s_y=4\text{mm/r}$  speed

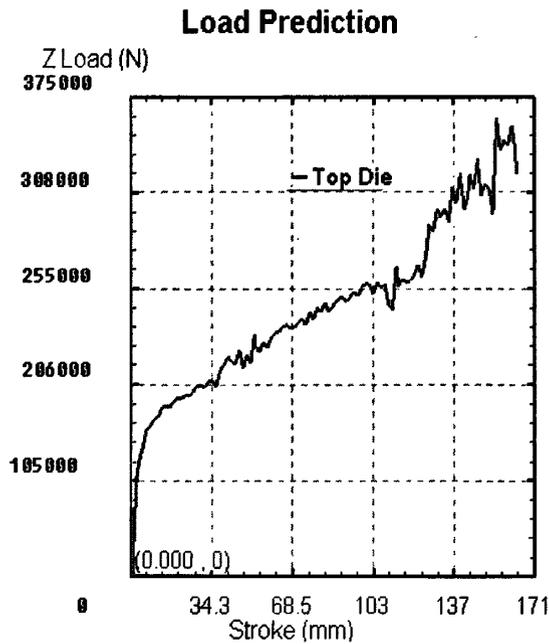
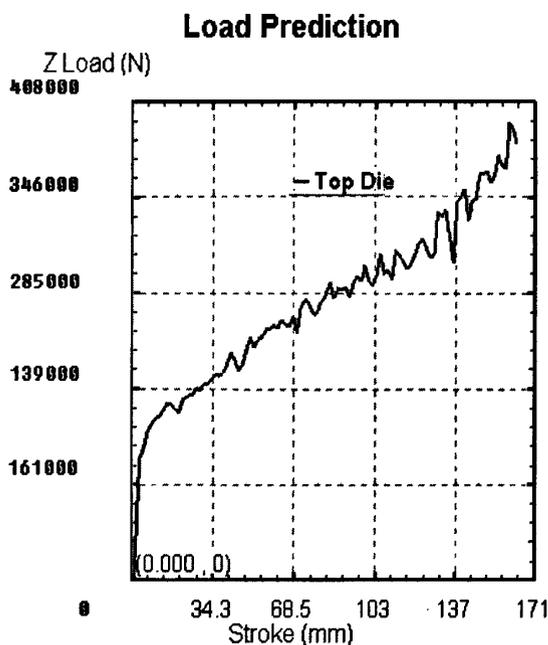


图 3-15  $s_y=6\text{mm/r}$  预锻过程上模载荷曲线

Fig. 3-15 Top die load curve under the preforming at  $s_y=6\text{mm/r}$  speed

图 3-16  $s_y=8\text{mm/r}$  预锻过程上模载荷曲线Fig. 3-16 Top die load curve under the preforming at  $s_y=8\text{mm/r}$  speed

根据模拟结果的综合分析可以得出,通过摆辗机一次加热预锻汽车半轴时,不同的每转进给量会产生不同的结果。如果每转进给量较小,预锻过程中锻件会出现了较为严重的下蘑菇形状,随着进给量连续不断的增加,向斜下方流动的金属受到下模膛的阻碍作用,迫使其径向流动,而变形部分的金属流动速度不同,这样有可能在法兰盘预锻时形成折叠情况,当每转进给量逐渐增大时,这种下蘑菇形状有所改善并渐渐消失,但是,如果每转进给量过大,锻件盘部由于变形速度大造成圆盘底面粗糙,褶皱剧烈,若这一现象发生在试验生产中可能会引发裂纹或折叠现象,使产品报废。从剖面图上可以看出,盘左右高度还存在不一致的现象。因此,预锻时,取每转进给量  $s_y=5\sim 7\text{mm/r}$  为宜。

### 3.4 终锻成形的模拟与结果分析

取摆辗倾角  $\gamma=3^\circ$ , 每转进给量  $s_y=6\text{mm/r}$  的预锻最后一步为终锻起始步。终锻过程中下模的总进给量为  $8\text{mm}$ , 每转进给量  $s_2=6\text{mm/r}$ , 那么拟定时设定滑块的进给步长为  $0.4\text{mm}$ , 总步数为 20, 每两步保存一次。

由图 3-17 可以得出,汽车半轴法兰盘在摆辗机上终锻成形实际上是一个模锻的过程,而且设计的是闭式模锻,随着上下模的逐渐闭合,坯料在模具型腔中流动以填满型腔成形,从图 3-18 可以看出终锻结束时的速度场分布,由于受到上下模的压力及阻碍作用,金属向径向流动,使法兰盘的直径越来越大,直到充满模具型腔。

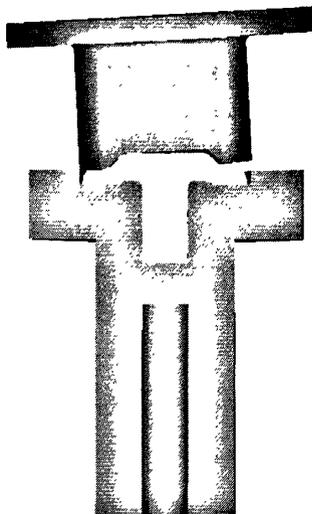


图 3-17 终锻结束时的工件成形效果图

Fig.3-17 The end forging when the conclusion semifinished materials forming effect chart

从图 3-18 可以得出，越靠近盘部边缘，金属的流动速度越大。这是因为靠近盘部边缘的金属受到的约束较少，径向流动的阻力小，这与最小阻力定律是相符合的。由最小阻力定律可知：变形体内的质点，在垂直于外力方向的位移应发生在该点到断面周界的最短法线上<sup>[6]</sup>。

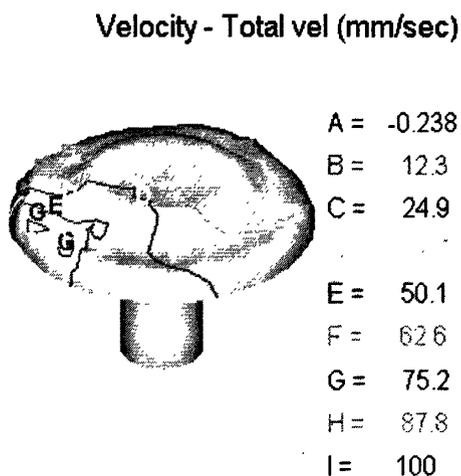


图 3-18 终锻结束时的速度场分布

Fig.3-18 The speed field distribution when the end forging

由图 3-19 与图 3-15 做比较可以得出：坯料在终锻过程中，其辗压力远大于预锻粗阶段的辗压力，这是因为预锻是自由锻，金属受到的约束较少，而终锻是模锻，金属的流动比较复杂。且随着时间的增加，半轴锻件盘部的半径越来越大，上模与盘部的接

触面积也越来越大，辗压力也随之不断增大。

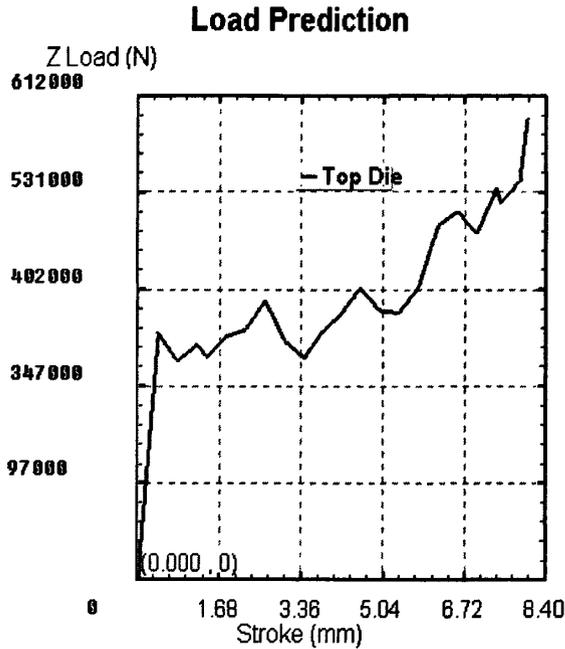


图 3-19 终锻过程上模载荷曲线

Fig.3-19 Top die load curve under the end forging

上模载荷呈波动增大趋势直至辗压结束，摆辗力出现最大值。而在合模的时刻，摆辗力迅速增大（如图 3-19 所示），这是因为采用闭式模摆动辗压汽车半轴，合模时，金属已经填满型腔，摆辗力迅速增大。

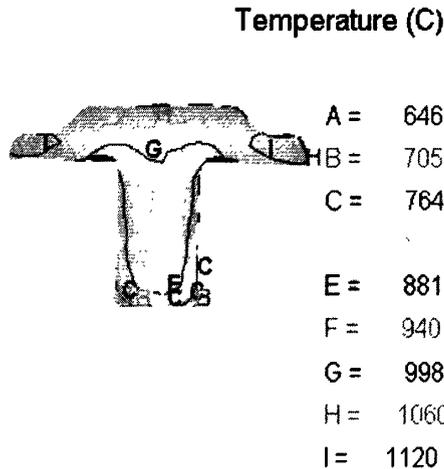


图 3-20 终锻结束后的温度场分布

Fig.3-20 The temperature field distribution when the end forging

锻件在整个辗压过程中，温度场以半轴中心线呈对称分布分布，如图 3-20 所示，其

中形变量较大的区域温度降低的很少，当摆辗结束时，变形量大的部位温度较高，最高达 1120℃，变形量较小部位的金属最高温度只有 940℃，他们之间的温差达 180℃。这是由于在剧烈变形区域内，尽管工件与空气之间的热对流、热辐射以及工件与模具之间的热传导使变形部分有热量损失，但是塑性变形功和摩擦功转化为热能对这部份做了温度补偿，尤其是在摆辗结束是法兰盘部外径区域内，变形是最大的，塑性变形功和摩擦功转化为热能最多，所以是工件温度最高的部分。而在靠近模具且参与变形较少的区域，温度变化幅度明显：工件的最低温度为 646℃，与初始加工温度相比降低了 504℃。这是由于工件与空气之间的热对流、热辐射和模具之间的热传递共同作用的结果。

由图 3-21 可以得出，在摆辗结束时模具的最高温度可达 650℃。这是因为模具与加热坯料接触，通过热传递使模具的温度升高，且模具心部的散热较慢，所以温度最高。但是在实际生产过程中，可以通过喷洒润滑剂和冷却水来降低模具温度，延长模具寿命。

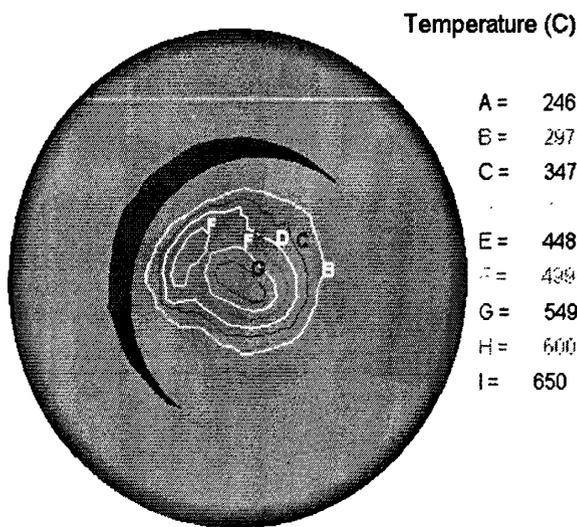


图 3-21 终锻结束后上模的温度场分布

Fig.3-21 The temperature field distribution of the top die when the end forging

### 3.5 本章小结

由预锻成形、终锻成形的数值模拟结果分析可得出如下结论：

1、在汽车半轴摆辗的数值模拟中，通过设定不同的摆头倾角而得出不同的预锻成形结果，对结果对比分析得出摆头倾角取 3° 最为合适。

2、在汽车半轴摆辗的数值模拟中，通过设定不同的每转进给量而得出不同的预锻成形结果，对结果对比分析得出每转进给量取值范围在  $5\text{mm}/r < s_y < 7\text{mm}/r$ ，预锻成形

效果较为理想。

3、通过对不同速度参数组合下法兰成形的数值模拟结果分析可得：选取  $s_y=6\text{mm/r}$ ,  $s_z=6\text{mm/sec}$  是最佳的参数组合，可到较理想的加工效果。（其中， $s_y$ —预锻每转进给量， $s_z$ —终锻每转进给量）

## 第四章 汽车半轴摆辗实验研究

本实验在徐州特种锻压机床厂制造的 DTW99-100A 型摆辗机（如图 4.1 所示）上完成摆辗成形。

下图为 DTW99-100A 型摆辗机图片：

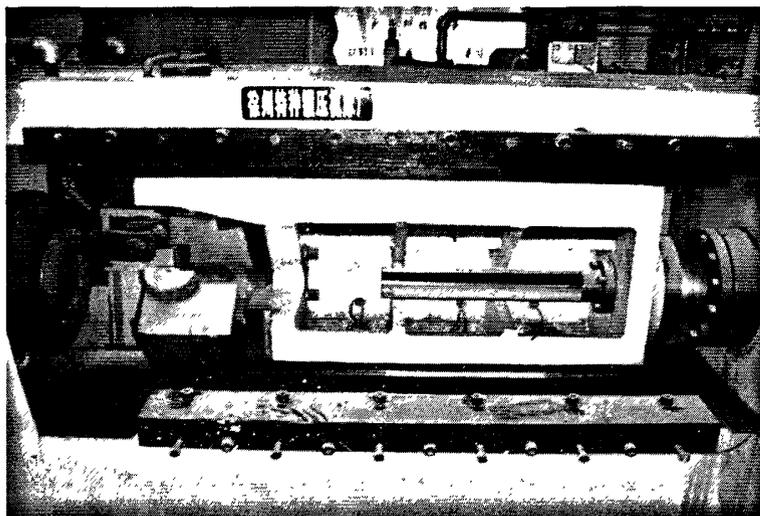


图 4-1 DTW99-100A 型摆辗机图片

Fig.4-1 DTW99-100A suspends the rolling mill picture

设备技术参数：

主缸公称推力	1000kN
电机总功率	59kW
摆头主电机功率	37KW
油泵电机功率	22KW
摆头额定转速	200r/min
滑块最大进给速度	80mm/sec
最大可夹持坯料直径	50mm
热辗成形最大盘径	160mm
摆头摆角	3°
摆头运动轨迹	圆形

根据图 2-12 所示的汽车后桥半轴锻件示意图的几何参数及第三章的有限元模拟分析结果可以看出，DTW99-100A 型摆辗机的设备技术参数能够满足摆辗成形此汽车半轴的要求。

## 4.1 实验方案

### 4.1.1 汽车半轴摆辗成形传统工艺实验方案

汽车半轴是长杆法兰件，杆部直径为 36mm，而法兰盘部直径为 131mm，两部分的直径相差比较大。汽车半轴摆辗成形的传统工艺流程为：下料—加热—液压机模锻制坯—摆辗终成形。本实验是在太原科技大学锻压实验室 100 吨液压机上实现汽车半轴的预锻，在 DTW99—100A 型摆辗锻造机上终锻。

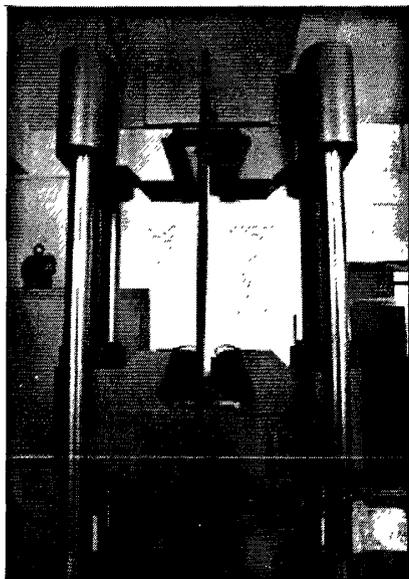


图 4-2 100 吨液压机

Fig. 4-2 100 ton hydropress

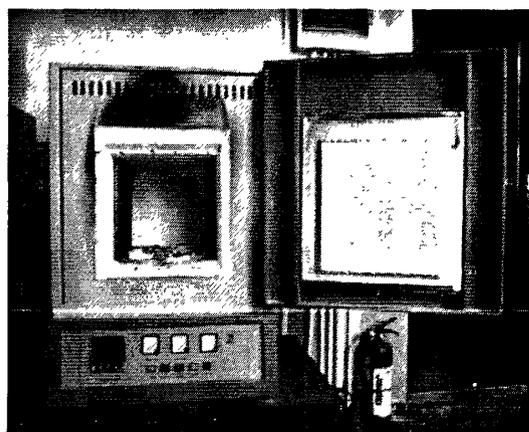


图 4-3 KBF1400 箱式炉

Fig. 4-3 KBF1400 chamber furnace

预锻方案如下：

#### 1. 下料

零件选取圆柱 45 钢作为加工材料，坯料直径  $D=36\text{mm}$ 。根据金属塑性变形体积不变原理加上烧损率 3%，以法兰盘部体积为依据，经计算得出变形坯料的长度 190mm，取杆部长度为 60mm，所以坯料的整个长度为 250mm。

#### 2. 加热

将坯料放入 KBF1400 箱式炉中加热到  $1150^{\circ}\text{C}$  并保温 10min。

#### 3. 预锻

将模具安装在液压机上，调整好位置，固定。由于材料的高径比大， $H/D=5.3$ ，为了防止棒料在锻造过程中失稳现象的发生，所以把预锻过程分为三个工序，三个工序用同一个下模，但要用三个不同的上模。

第一个工序：安装编号为 1 的上模，利用导筒为参照物，调整好上下模的位置，固

定模具；然后将加热的坯料固定在下模上；开动液压机将坯料变形部分锻造成一个高为150mm，上圆直径为38mm，下圆直径为44mm的圆台形工件，最后取下工件放入炉中保温10min，卸下上模1，为第二个工序做准备。

第二个工序：安装编号为2的上模，利用导筒为参照物，调整好上下模的位置，固定模具；然后将第一个工序所生产的工件加热后固定在下模上；开动液压机将此工件变形部分锻造成一个高为100mm，上圆直径为40mm，下圆直径为58.5mm的圆台形工件，最后取下工件放入炉中保温10min，卸下上模2，为第三个工序做准备。

第三个工序：安装编号为3的上模，利用导筒为参照物，调整好上下模的位置，固定模具；然后将第二个工序所生产的工件加热后固定在下模上；开动液压机将此工件变形部分锻造成一个高为60mm，上圆直径为44mm，下圆直径为82mm的圆台形工件，最后取下工件缓冷。预锻示意图如4-4：

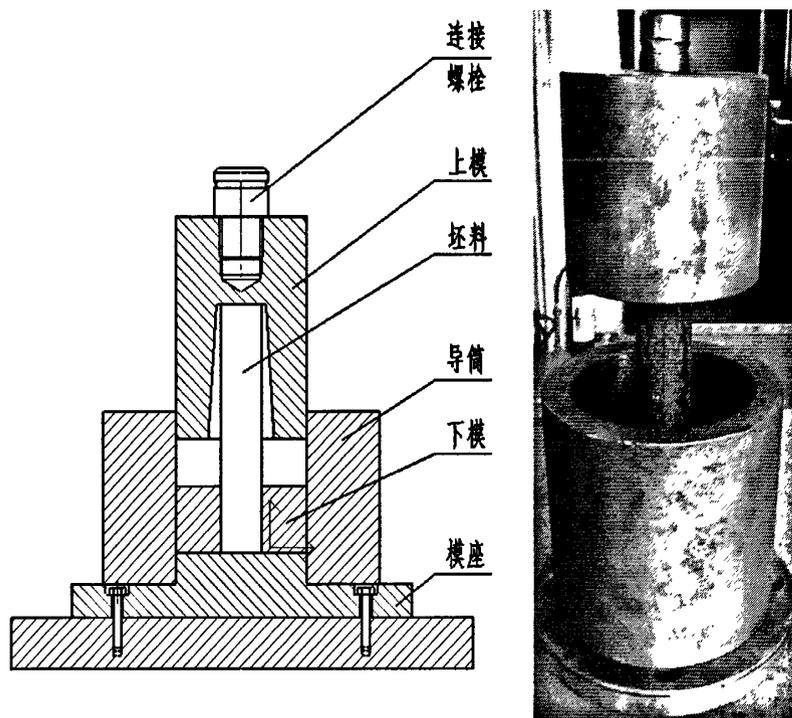


图 4-4 液压机预锻示意图

Fig.4-4 Dummying chart in hydrostatic press

#### 4. 锻造压力 $F$ 的计算

锻造压力  $F$  (kN) 可按下列经验公式进行计算：

$$F = KA \quad (4-1)$$

式中  $A$  ——包括飞边桥部在内的锻件投影面积 ( $\text{cm}^2$ )；

$K$ ——钢种系数，一般取 6.4~7.3，高强度钢材选用大系数。式中系数对于外形简单、圆角较大、筋较厚以及壁较厚的锻件，取小值；对于形状复杂、圆角较小、筋薄而高以及小型锻件，取大值。

$$\begin{aligned}
 \text{本实验锻件的最大投影面积 } A_{\max} &= \pi R_{\max}^2 & (4-2) \\
 &= 3.14 \times 4.1^2 \\
 &= 52.78 \text{ (cm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

取  $K$  值为 7，则：

$$\begin{aligned}
 F &= KA \\
 &= 7 \times 52.78 \\
 &= 369.48 \text{ (kN)} \\
 &\approx 37 \text{ (T)}
 \end{aligned}$$

因此实验室 100 吨液压机满足其锻造压力。

5. 将预锻件加热到 1150℃ 并保温 10min 后，在摆辗机上摆辗终成形。

#### 4.1.2 汽车半轴摆辗成形新工艺实验方案

一次加热连续摆辗新工艺具有独特性：即整个加工工艺是在加热一次的情况下，在一台摆辗机上由长杆坯料连续成形出半轴法兰盘锻件。加工过程中经历两道工序：摆辗坯料预锻成形；摆辗挤压法兰成形。

工艺流程图：

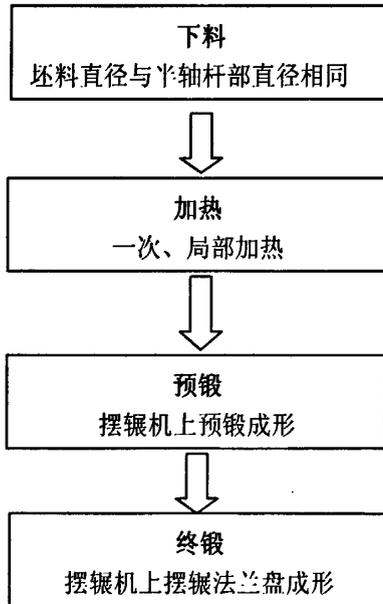


图 4-5 工艺流程

Fig.4-5 Flow chart

汽车半轴摆辗新工艺实验步骤:

1. 在砂轮切割机上切取  $\phi 36\text{mm} \times 250\text{mm}$  的 45 钢, 在磨床上将棒料切口处的毛刺磨掉。
2. 将 3 根下好的棒料放入 KBF1400 箱式炉中, 设定加热时间、加热温度及保温时间, 在 2h 后将棒料加热到  $1150^{\circ}\text{C}$ , 并保温 10min 以使棒料各部的温度均匀。
3. 在加热坯料的同时, 开启摆辗机的液压系统, 调节溢流阀使主缸的液压达到 25MPa, 调节变量泵流量, 使滑块的进给速度为  $20\text{mm}/\text{sec}$  (每转进给量 6mm)。
4. 将炉中加热的一根坯料用火钳取出, 夹在模具上用以预热模具。
5. 模具预热后, 在其型腔内均匀的喷洒润滑剂水剂石墨。
6. 开启电机拖动摆头摆动, 开启液压系统, 将加热到  $1150^{\circ}\text{C}$  的一根棒料用火钳取出, 加入模具中, 连续摆辗成形。

## 4.2 摆辗模具设计

### 4.2.1 液压机预锻模设计

由于坯料的高径比大,  $H/D=5.3$ , 为了防止棒料在锻造过程中失稳现象的发生, 所以把预锻过程分为三个工序, 三个工序用同一个下模, 但要用三个不同的上模。液压机预锻模具如图 4-6、4-7 所示。

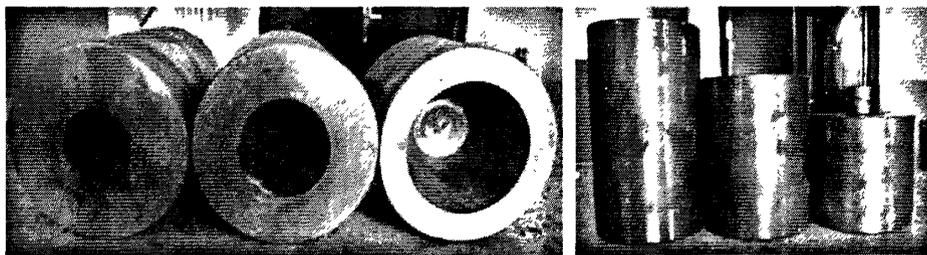


图 4-6 上模实体图

Fig. 4-6 Stereogram of top die

### 4.2.2 摆辗机模具设计

汽车半轴的盘部和干部之间具有过渡部分, 这是轴的结构要求所致, 目的是为了缓和过渡部分应力集中, 过渡越缓, 应力集中就愈小。所以模具也根据半轴的尺寸要求, 过渡半径为  $R=6\text{mm}$ 。

摆辗时合力作用点的位置, 对于杆部来说, 理论偏心距  $e$  距中心大约在  $0.125d \sim 0.35d$  ( $d$  为棒料横截面直径) 范围内, 这样才不失稳<sup>[30]</sup>, 而在摆辗过程中, 盘部的半径不断增大, 实际偏心距  $e_1$  也随之不断增大, 这样杆部就发生塑性弯曲变形的趋势。要阻止杆部发生弯曲变形, 则下模孔径侧壁与杆部的间隙不能太大, 但为了方便取放工件放

宽棒料尺寸公差，又希望间隙取大些，综合以上因素的考虑，取下模的孔径  $d = 36_{+0.13}^{+0.29}$  mm。由图 4-1 所示，DTW99-100A 型摆辗机的下模座均分为二，通过液压缸活塞杆的伸缩来控制下模座的开合，这样设计方便上料和取出摆辗件。所以下模也要均分为二。图 4-9 为下模的实体图。

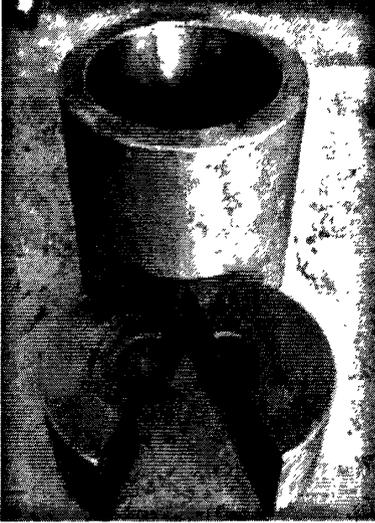


图 4-7 下模和导筒

Fig. 4-7 bottom die and kort nozzle



图 4-8 坯料与预锻件

Fig. 4-8 stock and pre-forging piece

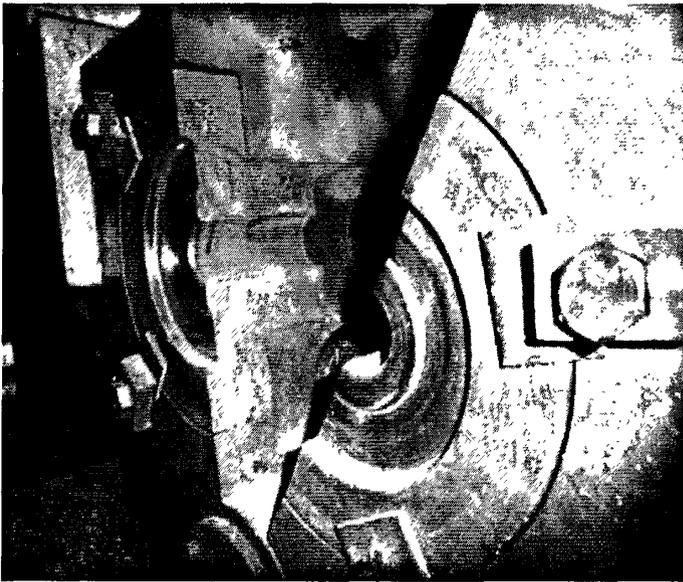


图 4-9 下模实体图

Fig. 4-9 Stereogram of bottom die

上模的摆辗倾角为  $3^\circ$ ，由压环通过螺栓固定在上模座上。图 4-14 为上模的设计图，图 4-15 为上模的实体图。

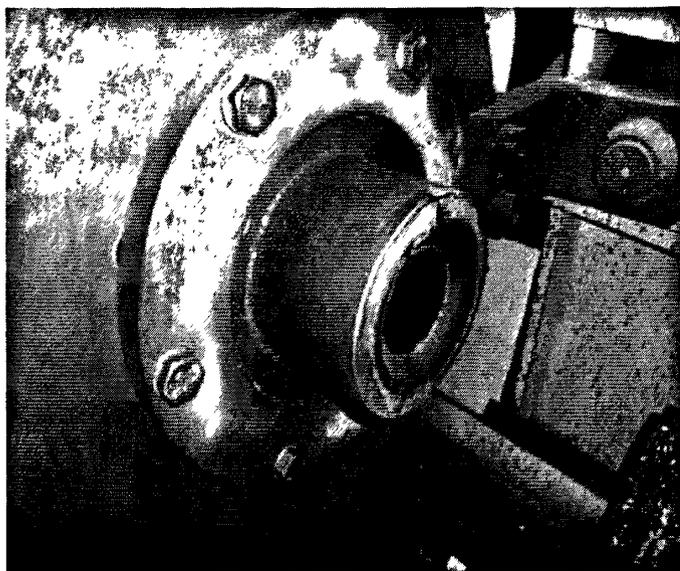


图 4-10 上模实体图

Fig. 4-10 Stereogram of top die

#### 4.2.3 模具的热处理工艺

模具的材质选用 3Cr2W8V，在摆辗过程中，该下模的受力情况：既承受压缩应力和弯曲应力，脱模时也承受一定的拉应力，由于模具与炽热的毛坯接触，通过热传递使模具的温度升高，通过循环油冷，因而承受冷热应力引起的热疲劳和热冲刷。上模锥尖部位从辗压过程开始一直到结束均与高温锻件接触，模具迅速升温，引起模具在工作中回火，从边缘部位向中心越来越显著，造成硬度逐步下降，硬度下降最大值可达 HRC25~30。从而导致上模锥尖部在压力作用下沿金属受力方向产生塑性变形甚至塌陷。

为了提高 3Cr2W8V 摆辗成形模具的使用寿命，就要使模具的高温强度和冲击韧度有一个最佳的匹配，因此热处理工艺<sup>[20]</sup>（如图 4-11），在充分预热后，在高温区保温 0.5h 后分级淬火，再经过高温回火完成组织转变和消除应力，低温回火消除残余应力，是模具表层具有高的耐疲劳性，而心部具有良好的冲击韧度。这样处理后的模具达到了高温强度和冲击韧度最佳的匹配，使用寿命得到了提高。

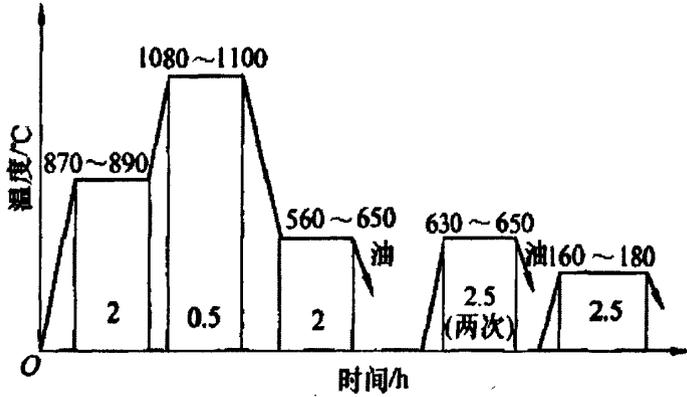


图 4-11 模具的热处理工艺

Fig. 4-11 The treatment cycle curve of die

### 4.3 实验结果与分析

#### 4.3.1 汽车半轴摆辗件外形分析

图 4-12 所示的汽车半轴实体就是在 DTW99-100A 型摆辗机上一次加热连续摆辗成形的。从外观上看出，充型完整，通过测量，满足设计图纸的几何尺寸。法兰盘侧面比较粗糙，因为在锻造过程中，加热的坯料有氧化现象，且比较严重，氧化皮脱落后就形成了粗糙的法兰盘侧面。

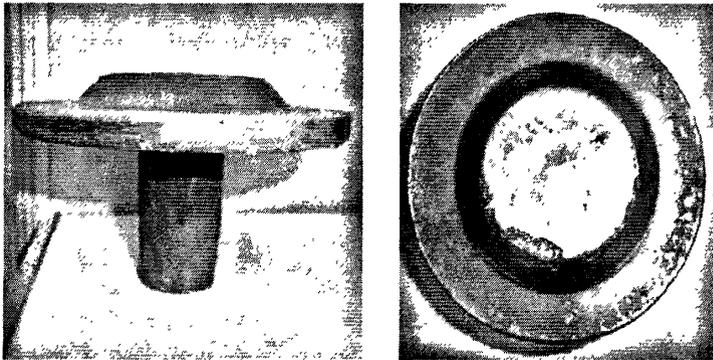


图 4-12 半轴实体图

Fig. 4-12 Stereogram of the rear axle flange

#### 4.3.2 金相组织分析

##### 1. 金相式样

为叙述方便，将一次加热连续摆辗成形的半轴试件编为1<sup>#</sup>，将先在液压机上预锻制坯，再在摆辗机上终锻成形的半轴试件编为2<sup>#</sup>。用 DK7740 型线切割机分别将1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>半轴法兰盘沿径向切割成 60mm×10mm×10mm 的试样，在 BXQ-2 金相试样镶嵌机上进行镶嵌后，分别在 200<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、600<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1000<sup>#</sup>、1200<sup>#</sup> 砂纸上将试件磨平、磨光，

在 MC004-MPD-2W 型双盘台式金相抛光机上抛光, 再用 4%硝酸酒精溶液腐蚀, 通过 VEX-600E 金相显微镜进行金相观察与分析。

## 2. 试件的金相显微组织观察

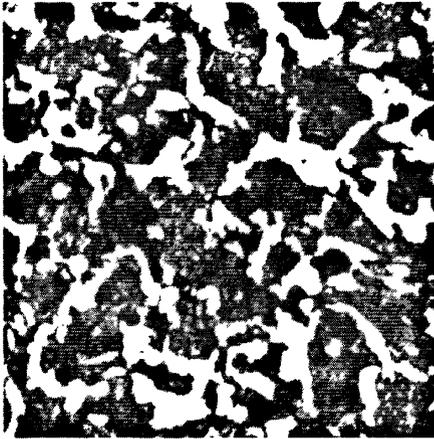


图 4-13 1# 试样金相组织(200×)

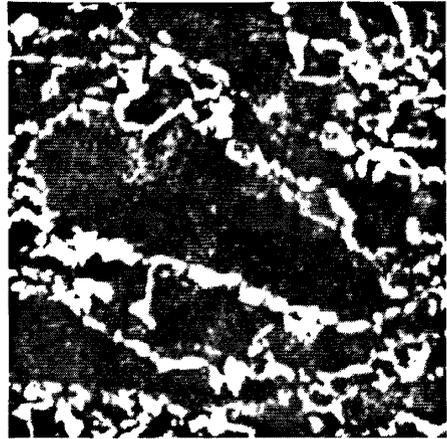


图 4-14 2# 试样金相组织(200×)

Fig. 4-13 Metallurgical structure of sample 1#      Fig. 4-14 Metallurgical structure of sample 2#

图 4-13、4-14 分别是 1# 试样和 2# 试样在 100 倍和 200 倍下的金相组织, 45 钢锻造后的显微组织为: 铁素体+珠光体。从晶粒大小上来看, 1# 试样的晶粒明显比 2# 试样的晶粒小, 而且 1# 试样的组织也比 2# 试样的组织均匀。

晶粒越细小, 晶界面积越大, 在晶界处造成的应力集中变小, 要开动位错源使金属塑性变形就得施加更大的外力, 这就是晶界强化。晶界强化的效果通常用霍尔—佩奇 (Hall-Petch) 公式表示:

$$\sigma_s = \sigma_i + K_1 D^{-1/2} \quad (4-3)$$

式中  $\sigma_i$  为位错滑移的阻力, 又称为内摩擦阻力;  $K_1$  为常数, 一般理解为晶界强化系数;  $D$  为晶粒直径。由式 4-3 可以看出, 晶粒直径  $D$  越小, 强度越高, 相应的耐磨性等机械性能也越好。另一方面, 由于晶粒越小, 使大角度和小角度晶界增多, 晶界能阻止屈服, 使裂纹传播困难, 使裂纹穿越晶界的消耗功增大, 从而使其韧度也得到提高。所以, 晶粒越小, 钢的强度和韧度越高。

晶粒越细小, 在一定体积内的晶粒数目越多, 则在同样变形量下, 变形被分散到更多的晶粒内进行, 同时每个晶粒内的变形也比较均匀, 而不致产生应力集中。此外, 晶粒越细小, 晶界就越多越曲折, 越不利于裂纹的传播, 从而在断裂前可承受较大的塑性变形。

4.3.3 硬度分析

本次实验在布氏硬度计上测量试件硬度，因为布氏硬度一般用于材料较软的时候，如有色金属、热处理之前或退火后的钢铁。

布氏硬度的测定原理是用一定大小的试验力  $F(N)$ ，把直径为  $D(mm)$  的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面，保持规定时间后卸除试验力，用读数显微镜测出压痕平均直径  $d(mm)$ ，然后根据  $d$  从已备好的布氏硬度表中查出 HB 值。

打击点（沿盘部剖面半径距中心）	HB	打击点	HB
5mm	179	35mm	182
15mm	179	45mm	182
25mm	179	55mm	180
平均值	180		

表 4.1 1# 试样硬度值测试结果

Table 4.1 The HB of lining plate sample 1#

打击点（沿盘部剖面半径距中心）	HB	打击点	HB
5mm	174	35mm	179
15mm	179	45mm	179
25mm	170	55mm	170
平均值	175		

表 4.2 2# 试样硬度值测试结果

Table 4.2 The HB of lining plate sample 2#

从表 4.1 和表 4.2 可以对比看出，1# 试样的硬度值比 2# 试样的硬度值大而均匀，1# 试样是坯料加热到 1150℃ 后直接在摆辗机上锻造而成的汽车半轴，2# 试样是先加热到 1150℃，在液压机上制坯，制坯后再放入加热炉中加热到 1150℃，然后在摆辗机上终锻成形的汽车半轴，一次加热摆辗成形的汽车半轴试件在成形过程中有加工硬化的产生，

而且在摆辗锻造结束时温度比较低，硬化过程大于回复再结晶引起的软化过程，所以硬度值较高，而2#试件制坯结束后，又放入炉中加热，摆辗终锻时温度比较高，动态回复使加工硬化减弱，所以硬度值比较低。

#### 4.4 本章小结

1) 通过对比分析汽车半轴摆辗新工艺和传统工艺的实验方案，可以得出新工艺的工序大大减少，有利于控制汽车半轴成形精度，同时降低生产成本和能耗。

2) 采用新工艺摆辗成形的汽车半轴较采用传统工艺摆辗成形的汽车半轴晶粒度小且组织均匀，金属流线好，试件的强度、韧度及硬度都有所提高

## 第五章 结 论

本论文通过对汽车半轴摆辗成形工艺过程的数值模拟和试验研究,得出以下结论:

1) 通过数值模拟得出,一次加热连续摆辗成形汽车半轴的工艺参数为:摆辗倾角为 $3^\circ$ ,每转进给量 $s_y=6\text{mm/r}$ ( $s_y$ 表示预锻每转进给量), $s_z=6\text{mm/r}$ ( $s_z$ 表示终锻每转进给量)。

2) 设定坯料初摆辗温度为 $1150^\circ\text{C}$ ,模拟成形后,变形部分最低温度为 $940^\circ\text{C}$ ,在45钢的终锻温度范围内。

3) 以模拟所得的最佳摆辗参数组合作指导,采用新工艺在摆辗机上试制出汽车半轴,并且与传统摆辗工艺成形的汽车半轴试件相比,前者的晶粒度小且组织均匀,金属流线好;试样的强度、韧性及硬度比后者高,证实了一次加热连续摆辗成形汽车半轴的工艺设想是可行的。

## 参考文献

- [1] 付建华. 汽车半轴一火锻造工艺及设备[J]. 锻压机械, 2002,(3): 39-40
- [2] 毛春燕, 付建华. 汽车半轴摆动辗压成形研究[J]. 试验研究, 2005,(3): 83-85
- [3] 孙继旺, 付建华, 李永堂, 曹建新, 燕扬. 基于Deform-3D的后桥半轴摆辗新工艺分析[J]. 锻压技术, 2009,34(3):183-186
- [4] Slick E.E.The Slick Whell Will, The Iron Age, 1918. No. 9
- [5] 张孟, 胡亚民.摆辗技术[M].北京: 机械工业出版社. 1998
- [6] 胡亚民, 何怀波, 牟小云, 等.摆动辗压工艺及模具设计[M].重庆: 重庆大学出版社.1998
- [7] 孟凡生, 底学进.国内外摆辗机的发展和应用[J].锻压机械, 1994,4:14-17
- [8] 叶兴益.汽车半轴摆辗工艺在我厂的应用[J].金属制成工艺, 1987,No.1
- [9] 胡亚民.摆动辗压的发展态势[J].机械工人(热加工), 1999,(4):13-14
- [10] 王丽莉.摆动辗压技术发展概况[J].有色矿冶, 2002,18(6):42-45
- [11] 侯兴华.摆辗机成形工件最佳半径的理论分析[J].鞍钢技术, 1989,10:25-42
- [12] 付建华, 梁秀春, 王振纲, 张如怀.汽车半轴的热挤辗复合工艺及生产设备[J].山西机械, 1995,(5):56-60
- [13] 侯兴华.摆辗机成形工件最佳半径的理论分析[J].鞍钢技术, 1996,2:43-46
- [14] 方东, 周明锋, 富钟玺, 邹林.摆辗工艺与模锻工艺的比较[J].汽车工艺与材料, 1997, 5:13-15
- [15] 张猛, 张韶华.摆辗力矩计算理论[J].金属成形工艺, 1999,4:4-9
- [16] 韩济才.NHR 汽车半轴摆辗工艺简介[J].机械工人(热加工), 1999,(4):18-19
- [17] 胡亚民, 车路长.我国摆动辗压技术的发展概况[J].锻压技术, 1997,(6):37-39
- [18] 黄虹, 王霞, 胡亚民.摆动辗压成形件高度尺寸精度分析[J]. 锻压技术, 2002,2:36-38
- [19] 程培元, 刘浩.摆动辗压接触面积率的精确计算及其简化表达[J].锻压技术, 2003, 4:32-34
- [20] 李和平, 金曼曼.EQ140 汽车半轴摆辗新工艺及模具设计[J].塑性加工技术, 2004, (6):56-57
- [21] 李和平, 袁昕.汽车半轴摆辗新工艺及模具寿命研究[J].锻压技术, 2007,32(1):75-78
- [22] 刘汉贵, 李祖荣, 朱国瑾.摆辗运动轨迹及调整曲线的分析研究[J].金属成形工艺(模具设计与制造专集), 1995,13(4):90-94

- [23] 王广春, 马新武, 赵国群, 等.摆辗机摆头运动学分析和运动轨迹的数值模拟[J].金属成形工艺, 2000,18(5):17-19
- [24] 郭晓宇. 多轨迹摆辗机运动轨迹的分析[J].机械工程与自动化, 2008,(6):130-131
- [25] 刘全坤.材料成形基本原理[M].北京: 机械工业出版社. 2004
- [26] 胡亚民.我国摆动辗压技术的发展趋势[J].金属成形工艺, 1994,12(5):236-242
- [27] 梁秀春, 王振纲, 付建华, 等.摆辗工艺及设备[J].重型机械, 1995,(5):56-60
- [28] 胡亚民.摆动辗压的发展态势[J].机械工人(热加工), 1999,(4):13-14
- [29] 肖景容.精密模锻[M].北京: 机械工业出版社. 1985
- [30] 方东, 周明锋, 富钟玺, 邹林.摆辗工艺与模锻工艺的比较[J].汽车工艺与材料, 1997, 5,13-15
- [31] 杨清泉.汽车半轴锻造模具热处理工艺的改进[J].金属加工(热加工), 2008,(3):43
- [32] 向会仁.汽车半轴的摆辗与锻锤工艺比较[J].锻压机械, 1997,4:22-27
- [33] 南建平.法兰长杆件摆辗失稳的分析和建议[J].鄂州大学学报, 2008,15(2):28-30
- [34] 周德成.摆动辗压时压力分布及其变形特征的研究 [J].机械工程学报 1999, (10):74-76
- [35] 锻压手册.第1卷.锻造.机械工业出版社 1996
- [36] 裴兴华, 张猛, 胡亚民.摆动辗压[M].北京: 机械工业出版社. 1998
- [37] 向会仁.汽车半轴的摆辗与锻锤工艺比较[J].锻压机械, 1997,4:22-27
- [38] 赵静, 束学道, 胡正寰, 等.汽车半轴成形技术研究现状及展望[J].冶金设 2004, (148):32-34
- [39] 谢水生, 王祖唐.金属塑性成形工步的有限元数值模拟[M].北京: 机械工业出版社, 1989
- [40] Oh S I,Lhoti G D,Altan T.Application of FEM to industrial metal forming processes[M]//Pittman J F T.Numerical methods in industrial forming processes.Swansea,UK:Pineridge Press,1982
- [41] Behrens A, Schafstall H.2D and 3D simulation of complex multistage Forging processesbyuse of adaptive friction coefficient[J].Journal of Materials Processing Technology,1998,80/81:298-303
- [42] Kolmogorov V L,Fedotov V P,Gorshkov A V.Three-dimendional analysis of the stress-strain state in the process of plastic deformation of metals[J].Journal of Materials Processing Technology,1999,95:55-64

- [43] Lee Y K, Lee S R, Lee C H, et al. Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113: 59-63
- [44] Oh S I, Lhoti G D, Altan T. Application of FEM to industrial metal forming processes[M]//Pittman J F T. Numerical methods in industrial forming processes. Swansea, UK: Pineridge Press, 1982
- [45] Oh S I, Lhoti G D, Altan T. ALPID: a general purpose FEM program for metal forming[J]. Proceedings of the 9th NAMRC, 1981: 83-88
- [46] Taupin E, Breitling J, Wu W T, et al. Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments[J]. J Mater Proc Technol, 1996, 59(1/2): 68-78
- [47] Yuan Shijian, Wang Xiaohong, Liu Gang, et al. The precision forming of pin parts by cold-drawing and rotary-forging[J]. Division of Metal Forming, 1999: 252-256
- [48] 陈国学, 胡炜, 耿健. 复杂锻件净成形过程温度场的数值模拟[J]. 塑性工程学报, 1998, (5/4): 59-62
- [49] 张连春, 邓子玉, 曾伟等. 锻造成形过程中温度场的有限元分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2005, 24(3): 19-22
- [50] 刘建生, 陈慧琴, 郭晓霞. 金属塑性加工有限元模拟技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- [51] 甘章源, 周初根. 汽车半轴一火锻造新工艺[J]. 锻压技术, 1999, (6): 11-13
- [52] 赵静. 几种汽车半轴成形技术比较[J]. 山东农机, 2004, (9): 10-11



## 攻读硕士期间参加的项目和发表的论文

### 1、参加的项目

汽车半轴摆辗成形工艺与试验研究

### 2、发表的论文

[1]. 吴溯源, 付建华. 《汽车半轴摆动辗压制坯工艺数值模拟》 热加工工艺  
2010, Vol.39, No.5 (98-99).



## 致 谢

在进行汽车半轴摆辗成形工艺与实验研究过程中得到了我的导师雷步芳教授的大力支持和帮助。同时太原科技大学锻压教研室的李永堂教授、付建华教授、宋建丽教授、刘志奇副教授、齐会萍老师、曹建新老师、杜诗文老师和锻压实验室的王全聪老师、郑晓华老师在本文研究方案的确定和实验研究过程中，给予了我细心、严格的指导。在本文撰写过程中，我不仅在专业知识方面得到了老师们的悉心指导，而且在资料收集方面得到了老师们的大力支持和帮助。老师高尚的品德，严谨的治学态度和敬业的工作精神，是我今后生活和工作的学习榜样。在此，我对老师们致以崇高的敬意和衷心的感谢！

另外在我进行实验研究和撰写论文过程中还得到教研室其他研究生的关心和帮助。在此，我对各位表示诚挚的谢意！

