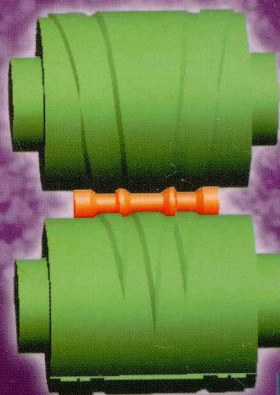


2010年度宁波市自然科学学术著作出版资金资助出版

楔横轧多楔同步轧制 理论与应用

束学道 著



科学出版社

中国轻工业出版社官方微信订阅号：qingchubooks

楔形轧多楔同步轧制 理论与应用

王德成 著



中国轻工业出版社

2010 年度宁波市自然科学学术著作出版资金资助出版

楔横轧多楔同步轧制 理论与应用

束学道 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

楔横轧多楔同步轧制是一种成形大型长轴类零件的新工艺、新技术,是楔横轧技术的延伸和发展。

本书是一本全面阐述楔横轧多楔同步轧制技术的专著,主要内容包括楔横轧多楔同步轧制基本理论、楔横轧多楔同步轧制模具设计、多台阶轴楔横轧多楔同步轧制技术、长轴类零件楔横轧多楔同步轧制技术、铁道车轴楔横轧多楔同步轧制技术、楔横轧多楔同步轧制轧机设计。

本书可供从事金属塑性加工技术冶金轧制、机械锻造研究的科研工作者、技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

楔横轧多楔同步轧制理论与应用/束学道著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029564-4

I. ①楔… II. ①束… III. ①同步轧制 IV. ①TG335.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 227038 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年2月第一次印刷 印张:12 1/4

印数:1—1 500 字数:234 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着交通工业的飞速发展,重型车轴、汽车半轴、铁道车轴等大型长轴类零件的需求量与日俱增,专业化大批量生产大型长轴类零件将成为满足市场需求的主要手段。传统锻造工艺生产这些轴类零件存在生产效率低、材料利用率低、投资大、成本高等缺点而难以实现专业化、经济化大批量生产;采用楔横轧单楔轧制,由于受辊面长度的限制,无法在现有设备上成形,如利用现有工艺技术生产重制设备则存在设备庞大、投资大及不能实现经济化生产等问题。因此,开发新的工艺技术成形大型长轴类零件是时代所需、与时俱进。

楔横轧多楔同步轧制技术是模具上具有内楔和外楔的多对楔同时对轧件进行径向压下和轴向延伸的塑性成形。同单楔楔横轧工艺相比,其具有显著节省辊面,减小设备重量,生产效率高、节材、降低成本等优点,是适合专业化、经济化大批量生产长轴类零件的有效工艺手段。以铁道车轴 RD2 轴为例,在相同工艺参数下,采用单楔轧制车轴的轧辊直径为 $\phi 2500\text{mm}$;采用多楔轧制,则轧辊直径为 $\phi 1600\text{mm}$ 。因此,楔横轧多楔同步轧制是近净成形大型长轴类零件的最佳工艺。

对于多楔同步轧制技术,国内外对此研究相对较少,至今没有系统完善的理论,在一定程度上阻碍了多楔轧制技术在工业生产上的推广和应用。由于楔横轧多楔同步轧制技术是成形大型长轴类零件的最佳工艺,对此进行系统研究并加以推广具有重要的理论意义和应用价值。著者及其研究团队经过多年的研究工作,从理论与实践相结合中对楔横轧多楔同步轧制进行了系统的研究,理清了楔横轧多楔同步轧制一些关键的科学问题,如多楔轧制稳定条件和端面移动量规律、长轴类零件轧制光滑过渡问题、多楔模具设计、多楔轧制变形机理和力能参数规律等,将这些成果用于多楔同步轧制汽车半轴和铁道车轴上,并进行相应的设备研制。著者在上述研究工作的基础上撰写了本书。

本书共分 7 章,第 1 章介绍楔横轧多楔同步轧制特点和国内外研究现状;第 2 章介绍楔横轧多楔同步轧制基本理论;第 3 章介绍楔横轧多

楔同步轧制模具设计;第4章介绍多台阶轴楔横轧多楔同步轧制技术;第5章介绍长轴类零件楔横轧多楔同步轧制技术;第6章介绍铁道车轴楔横轧多楔同步轧制技术;第7章介绍楔横轧多楔同步轧制轧机设计。

本书的研究内容分别得到了国家自然科学基金项目“楔横轧多楔轧制变形机理研究”(项目编号:50205004)和“楔横轧多楔精密成形长轴类零件理论研究”(项目编号:50475175)的资助。

在著者完成国家自然科学基金项目研究过程中,得到北京科技大学零件轧制中心胡正寰院士的悉心指导,在此表示衷心而诚挚的感谢;感谢北京科技大学零件轧制中心所有老师和实验室人员在项目完成过程中给予的指导和帮助;感谢国家自然科学基金委员会给予的支持;感谢邢习东博士、赵静博士和李传民博士在基金项目研究中所做的大量工作。此外,对参与项目研究工作的彭文飞博士生、闫波博士生,以及李连鹏硕士、赵鹏硕士、刘家玉硕士、聂广占硕士、左汪明硕士等一并表示衷心的感谢。感谢宁波市自然科学学术著作出版资金资助及宁波大学科研起动经费给予的支持。在本书的撰写过程中,宁波大学肖旻、魏新红硕士生给予了很多帮助,在此表示衷心的感谢。

由于对楔横轧多楔同步轧制技术系统研究国外值得借鉴的方法和技术相对较少,该项技术中某些理论与实际问题还在认识之中,本书涉及的内容很可能认识不够全面、准确,甚至有不妥之处,殷切希望读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 轴类零件特种轧制技术的特点	1
1.2 楔横轧多楔同步轧制工艺的优点	3
1.3 楔横轧多楔同步轧制研究现状	4
1.4 楔横轧多楔同步轧制技术发展趋势	6
参考文献	6
第 2 章 楔横轧多楔同步轧制基本理论	9
2.1 楔横轧多楔同步轧制基本原理	9
2.2 楔横轧多楔同步轧制旋转条件	10
2.3 轴向移动量规律	12
2.3.1 轴向移动量计算方法	12
2.3.2 轴向移动量规律	18
参考文献	22
第 3 章 楔横轧多楔同步轧制模具设计	23
3.1 楔横轧多楔同步轧制模具设计的基本原则	23
3.2 楔横轧多楔同步轧制模具设计步骤	23
3.2.1 确定外楔的起楔位置	23
3.2.2 确定外楔的起楔形状	25
3.2.3 确定偏转角 θ	27
3.2.4 确定内楔展宽长度 L_1	31
3.2.5 确定过渡角 γ	33
3.2.6 分配多楔轧制等直径段	33
3.2.7 确定外楔宽度 W	35
3.3 楔横轧多楔同步轧制铁道车轴的模具设计	36
3.3.1 毛坯与坯料尺寸的确定	36
3.3.2 模具型腔设计	37
3.3.3 多楔轧车轴模具图	39
参考文献	40
第 4 章 多台阶轴楔横轧多楔同步轧制技术	41

4.1	多台阶轴楔横轧多楔同步轧制变形机理	41
4.1.1	多楔轧制过程应变场	41
4.1.2	多楔轧制过程应力场	46
4.1.3	多楔轧制过程位移场	52
4.2	工艺参数对应力应变影响规律	53
4.2.1	工艺参数对楔横轧多楔轧制应力影响	53
4.2.2	工艺参数对楔横轧多楔轧制应变影响	55
4.3	工艺参数对力能参数的影响规律	59
4.3.1	力能参数的有限元法计算	59
4.3.2	模具工艺参数对多楔楔横轧力能参数影响理论分析	60
4.4	轧制力实验测试	67
4.4.1	测试结果及分析	67
4.4.2	测试结果与有限元模拟比较	70
	参考文献	72
第5章	长轴类零件楔横轧多楔同步轧制技术	74
5.1	长轴类零件楔横轧多楔同步轧制变形机理	74
5.1.1	模拟工艺参数的确定	74
5.1.2	轧制过程中轧件内部应力-应变	75
5.1.3	轧制过程中金属轴向速度场	88
5.2	特征点的应力-应变	90
5.2.1	径向特征点的应力-应变	91
5.2.2	轴向特征点的应力-应变	93
5.2.3	过渡角对外楔起楔位置附近中心点应力场的影响	96
5.3	长轴类零件楔横轧多楔同步轧制接口质量	97
5.3.1	轧件表面接口质量缺陷的产生机理	97
5.3.2	工艺参数对轧件接口质量的影响	101
5.4	长轴类零件楔横轧多楔同步轧制力能参数变化规律	111
5.4.1	工艺参数对力能参数的影响规律	111
5.4.2	轧制参数对力能参数的影响规律	116
5.4.3	力能参数影响因素综合	123
5.5	轧件接口质量实验研究	125
5.5.1	轧件接口质量随工艺参数变化规律实验测试	125
5.5.2	轧件接口质量良好的参数选取	127
	参考文献	128
第6章	铁道车轴楔横轧多楔同步轧制技术	129

6.1 铁路车轴楔横轧多楔同步轧制热力耦合有限元模拟	129
6.1.1 楔横轧多楔同步轧制铁道车轴有限元模型建立	129
6.1.2 热力耦合边界条件的确定	130
6.1.3 热力耦合模拟	130
6.2 铁路车轴楔横轧多楔同步轧制变形机理	132
6.2.1 楔横轧多楔轧制铁道车轴的变形特征	132
6.2.2 轧件截面上的应变场特征	134
6.2.4 轧件截面上的应力场特征	141
6.2.5 轧件上特征点的应力-应变分析	144
6.3 坯料公差引起的拉堵料研究	150
6.3.1 楔横轧多楔轧制铁道车轴拉料研究	151
6.3.2 楔横轧多楔轧制铁道车轴堵料研究	157
6.4 坯料公差引起的拉料堵料实验研究	161
6.4.1 实验安排	161
6.4.2 实验结果与分析	161
6.4.3 实验结论	163
6.5 基于变形均匀性的模具优化实验验证	164
参考文献	165
第7章 楔横轧多楔同步轧制轧机设计	166
7.1 楔横轧多楔同步轧制轧机特点与轧机辊系自位原理	166
7.1.1 楔横轧多楔同步轧制轧机特点	166
7.1.2 轧机辊系自位原理	166
7.2 楔横轧多楔同步轧制轧机自位轧辊系统设计与分析	167
7.2.1 楔横轧多楔同步轧制轧机自位轧辊系统设计	167
7.2.2 楔横轧多楔同步轧制轧机自位轧辊系统分析	169
7.3 轧机整体刚度边界元-有限元耦合算法	172
7.3.1 轧机刚度计算公式	173
7.3.2 轧机刚度边界元-有限元耦合法计算原理	174
7.3.3 汽车半轴楔横轧机刚度计算	174
7.4 压下装置的结构设计	177
7.5 自动导板机构的设计	178
7.6 传动系统的结构设计	181
7.7 半轴轧机总体设计	182
参考文献	184

第 1 章 绪 论

1.1 轴类零件特种轧制技术的特点

楔横轧技术是一种轴类零件成形新工艺、新技术,是先进近净成形制造技术的组成部分,与传统的锻造法生产轴类零件比较,其具有节材显著、生产效率高等优点^[1~3]。该工艺自 20 世纪 60 年代初问世以来,经过几十年的发展,已经成为一种公认的轴类零件成形工艺,在实际生产中得到了日益广泛的应用。

楔横轧根据轧辊的形状可分为三种^[4~6],即弧形楔横轧、辊式楔横轧、板式楔横轧。辊式楔横轧的工作原理如图 1.1 所示,即两个带楔形模具的轧辊,以相同的方向旋转并带动圆柱形轧件旋转,轧件在楔形孔型的作用下,产生径向压缩、轴向延伸,轧制成各种轴类零件。楔横轧轧件的变形主要是径向压缩和轴向延伸。

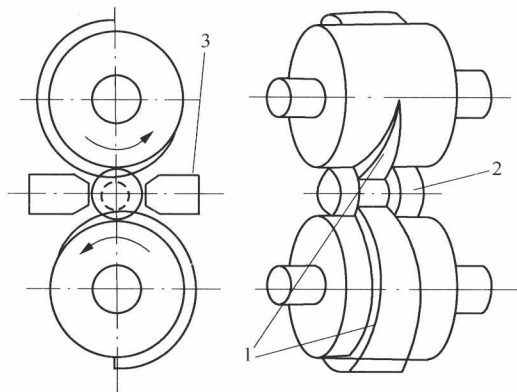


图 1.1 楔横轧工作原理图

1. 轧辊;2. 轧件;3. 导板

应用楔横轧技术可完成各种台阶轴类零件预锻初加工,其中台阶形状可分为直角台阶、斜台阶、圆弧台阶(包括凸圆弧台阶和凹圆台阶)(图 1.2)和窄凹档台阶等,既可以是单台阶也可以是组合台阶,产品如图 1.3 所示。实际生产中,考虑楔横轧模具设计和制造复杂性及成本等因素,楔横轧技术一般适用于年批量大于 3 万~5 万件的轴类零件^[7]。

楔横轧技术与其他常用的成形工艺,如锻造及切削工艺相比,具有以下优点:

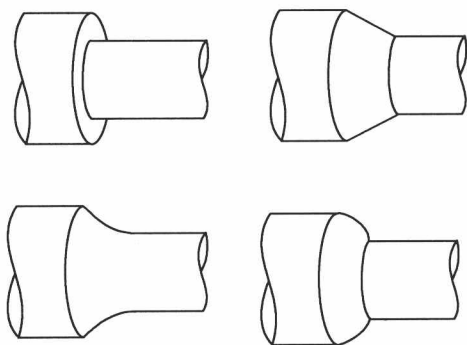
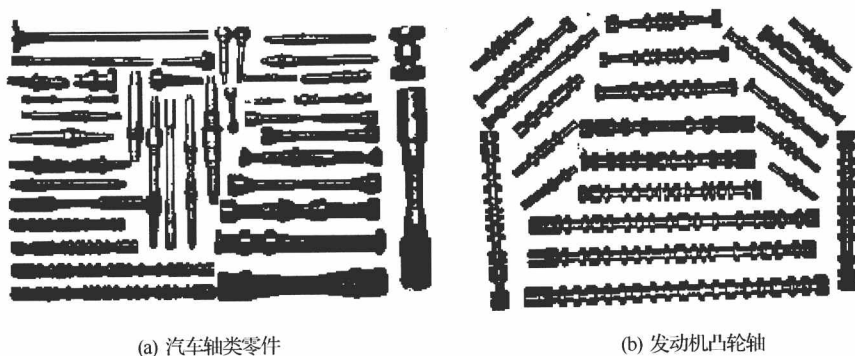


图 1.2 楔横轧零件四种基本台阶



(a) 汽车轴类零件

(b) 发动机凸轮轴

图 1.3 楔横轧零件

(1) 生产效率高。应用楔横轧每分钟生产 6~10 个产品(成对轧制加倍),与锻造、切削相比,其生产效率提高 3~10 倍。

(2) 材料利用率显著提高。锻造后进行机加工的零件,材料利用率平均为 80% 左右。

(3) 产品精度高。热轧件径向尺寸公差可控制在 0.2~0.5mm,长度尺寸公差可控制在 0.1~1mm。采用高刚度轧机或冷轧机,尺寸精度还可提高,甚至可以达到无切削加工。

(4) 产品性能提高。轧制后的零件晶粒可以细化。金属流线保持连续并沿零件外分布,零件的静强度与疲劳强度都有所增加。

(5) 设备小、模具寿命高。同锻造相比,由于其工作载荷不到 10%,设备重量大幅度下降,模具寿命大幅度提高。

(6) 生产人员、厂房面积都大幅度下降。产品成形、精整与切断等工序均在轧辊孔型中连续自动完成,易于实现生产自动化;振动、噪声均较小,劳动条件明显改善。

1.2 楔横轧多楔同步轧制工艺的优点

楔横轧多楔同步轧制是模具上多对楔同时对轧件进行径向压下轴向延伸的塑性成形,楔横轧多楔模具如图 1.4 所示。同单楔楔横轧工艺相比,楔横轧多楔轧制成形工艺是一种先进的长轴类零件净近精密成形技术,具有显著节省辊面、减小设备重量、生产效率高、节材及降低成本等优点,是适合专业化、经济化大批量生产长轴类零件的有效工艺手段^[8]。

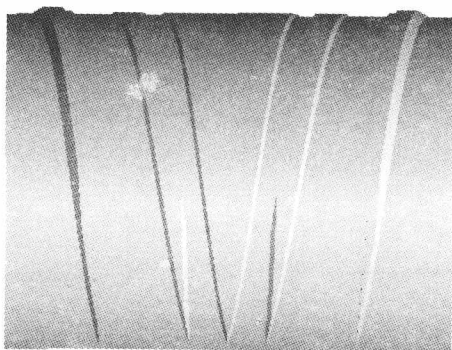


图 1.4 RD2 轴多楔模具

以铁道车轴 RD2 轴为例,图 1.5 为 RD2 轴,采用多楔和单楔轧制该半轴,在相同工艺参数下,其模具展开图如图 1.6 所示。通过比较可知,采用单楔轧制车轴的轧辊直径为 $\phi 2500\text{mm}$,而采用多楔轧制,则轧辊直径为 $\phi 1600\text{mm}$ 。因此,多楔轧制可显著节省辊面、减少设备本体尺寸、降低成本,是近净成形长轴类大型轴类件的最佳工艺^[9]。

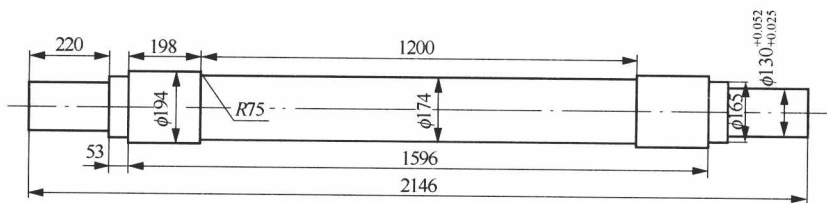


图 1.5 铁道车辆 RD2 轴

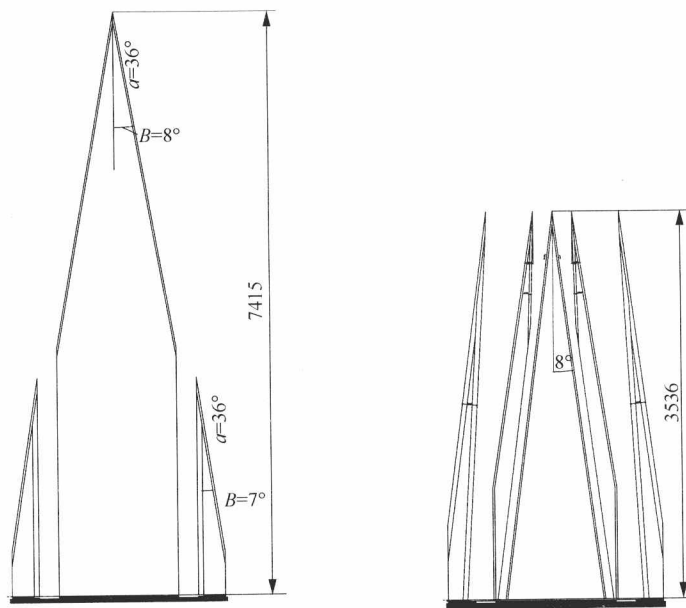


图 1.6 轧制 RD2 车轴的单楔与多楔模具

1.3 楔横轧多楔同步轧制研究现状

随着交通运输业的飞速发展,火车车轴、汽车半轴等长轴类零件需求量与日俱增,专业化大批量生产长轴类零件已成为满足市场需求的主要手段。传统锻造工艺生产长轴类零件存在生产效率低、材料利用率低、投资大、成本高等缺点而难以实现专业化、经济化大批量生产;采用楔横轧单楔轧制技术,由于受辊面长度的限制,无法在现有设备上成形,但重制则设备庞大,投资大,不能实现经济化生产。因此,为了解决大型长轴类零件精密成形难题,开展楔横轧多楔同步轧制技术研究是十分必要的。

1988 年吉林工业大学的张承鉴、任广升、白志斌等多楔轧制阶梯轴的理论进行了分析,推导出多组侧楔与主楔之间的楔展角关系,并应用多楔轧制技术轧制出了质量良好的“东风-12”手扶拖拉机驱动轮半轴^[10]。

1995 年北京科技大学的吴仁东等针对火车车轴直径尺寸大、轴身长的特点,对火车 RD2 轴进行 1:5.5 模拟轧制试验^[11],得到了轧制力等主要轧制参数,结果表明多楔成形火车车轴是可行的,图 1.7 是轧制出的 RD2 轴模型。

在著者申请的两项国家自然科学基金项目的资助下,2001~2007 年期间著者与指导的研究生一起,对楔横轧多楔轧制进行了较系统的研究^[12~56],其中包括:



图 1.7 多楔轧制出的 RD2 轴模型

研究了轧件端面移动量和轧制力的变化规律;分析了成形角、展宽角、断面收缩率与毛坯直径等对楔横轧楔入段、展宽段端面移动量的影响,得到了双楔轧制力、最大端面移动量分别与单楔轧制力、单楔最大端面移动量之间的定量关系,并以 ANSYS/LS-DYNA 8.0 为仿真工具,对典型双楔楔横轧轧制过程进行了模拟;阐述了在轧制过程中轧件内部的应力场、应变场和位移场的信息;描述了多楔楔横轧轧制直角台阶轴时的变形机理和金属流动规律,同时研究了模具的工艺参数对轧件心部等效应力场和应变场的影响规律;针对楔横轧多楔轧制长轴类零件存在过渡段轧件容易产生接口质量的问题,通过有限元模拟及实验分析了轧件接口缺陷的产生机理以及过渡角、成形角、断面收缩率、展宽角和轧件直径对轧件接口质量的影响规律,给出对应断面收缩率下保证轧件接口质量良好的过渡角范围,并且采用多楔技术成形汽车半轴,设计了相应半轴专用轧机。

随着我国铁路运载任务的不断升级,火车轴的需求量也越来越大,实际上,我国已成为一个铁路大国,车轴的需求量也是最多的国家之一,以 RD2 轴为例,每年的需求量已达到 30 万根(合约 11.4 万 t)。我国铁道车轴生产工艺主要有三种:3 吨气锤锻造、快锻水压机锻造和精锻机锻造。前两种无论生产效率,锻造精度与质量上都不及第三种精锻。目前车轴技术水平最高为精锻机生产,精锻机生产车轴的设备与技术均出自奥地利的公司。但设备投资大,我国已引进了 3 台精锻机生产车轴,其产量约 8 万根,占我国产量的 30%左右,即 70%的车轴仍靠前两种落后的工艺生产,存在着材料利用率低、生产环境差、污染重等缺点。即使是目前最高水平的精锻成形车轴,材料损耗也是很大的,即锻造方法成形车轴不是目前最佳工艺。所以,2005~2008 年,著者与指导的李传民博士等人一起对多楔轧制铁道车轴中存在的 key 问题进行了系统研究,为铁道车轴实现轧制生产提供了理论基础^[57~61]。

由于长轴类零件采用楔横轧多楔同步轧制是最佳工艺,本专著从建立楔横轧多楔同步轧制基本理论入手,阐明多楔同步轧制模具设计技术,并对多楔同步轧制技术应用于多台阶轴、长轴类零件、铁道车轴等典型零件在轧制中的 key 问题进行阐述,建立楔横轧多楔同步轧制轧机设计理论。多楔同步轧制技术应用于汽车半轴的生产,标志着多楔轧制技术已趋向成熟。

1.4 楔横轧多楔同步轧制技术发展趋势

目前对于楔横轧多楔轧制零件外形的宏观成形理论已趋于成熟,但这些理论大都是建立在温度场恒定情况下得到的。随着轧制过程温度的变化,多楔轧制过程中的有些规律会更加复杂,特别是轧制过程微观组织的变化规律,进一步研究不同温度场下多楔同步轧制微观组织的变化规律及其与多楔工艺参数间的耦合关系是今后的发展趋势。另外,目前对于多楔同步轧制技术的模具设计,有些设计计算尽管是通过编程完成的,但全设计过程没有将各部分耦合到一起,人工调节参数因素较大、效率低,进一步开发多楔模具参数化设计,直接生成模具二维加工图和三维实体图,对推动楔横轧多楔轧制技术将有很大的促进作用。

对于多楔轧制的设备,由于辊系较长,轧制过程的弹性变形较大,多楔同步轧制的轧机辊系必须要具有自位性能。

为此,著者认为楔横轧多楔同步轧制技术的发展趋势为:

- (1) 考虑温度场下的多楔同步轧制成形规律;
- (2) 楔横轧多楔同步轧制成形微观组织演变规律;
- (3) 楔横轧多楔轧制模具的参数化设计与仿真制造;
- (4) 研究具有自位型和自动化功能多楔同步轧制设备。

参 考 文 献

- [1] 胡正寰,张康生,王宝雨,张巍. 楔横轧理论及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [2] Z. Pater. A study of cross wedge rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 80~81:370~375.
- [3] Z. Pater. Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, (92-93):468~473.
- [4] A. N. 采利克夫, B. C. 斯米尔诺夫. 机器制造中的横轧[M]. 北京:机械工业出版社,1964.
- [5] B. C. 斯米尔诺夫, B. N. 阿尼西福罗夫,等. 机器制造中的横轧[M]. 天津大学机械制造系压力加工教研室译. 北京:机械工业出版社,1964.
- [6] 李东平译. 楔横轧、楔横轧译文集[C]. 长春:吉林工业大学,1982:11~19.
- [7] 胡正寰,张康生,王宝雨,束学道,杨翠苹. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
- [8] 束学道,邢希东,胡正寰. 工艺参数对楔横轧多楔轧制成形机理影响分析. 北京科技大学学报, 2005, 27(2):222~226.
- [9] 束学道,李传民,胡正寰. 多楔同步轧制铁路车轴模具设计关键技术研究[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(2):159~161.
- [10] 张承鉴,任广升,白志斌. 多楔楔横轧理论及工艺[J]. 农业机械学报, 1988, (9):53~59.
- [11] 吴任东. 楔横轧火车车轴工艺方法研究[D]. 北京:北京科技大学,1995.
- [12] 邢希东. 楔横轧多楔轧制变形机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2006.

- [13] 赵静. 楔横轧多楔成形长轴类零件关键技术研究[D]. 北京:北京科技大学,2007.
- [14] 李连鹏. 楔横轧接触区力变化规律理论与实验研究[D]. 北京:北京科技大学,2006.
- [15] 赵朋. 大型楔横轧机动态特性理论研究[D]. 北京:北京科技大学,2007.
- [16] 刘家玉. 汽车半轴楔横轧机设计关键问题研究[D]. 北京:北京科技大学,2007.
- [17] 聂广占. 楔横轧大型轴类件成形机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2007.
- [18] 祖汪明. 楔横轧多楔成形汽车半轴理论研究[D]. 北京:北京科技大学,2008.
- [19] Shu Xuedao, Zhao Jing, Hu Zhenghuan. The Stress and strain analysis on transition stage about forming long shafts by multi-wedge cross wedge rolling[C]. Advanced Method and Technologies for Materials Manufacture and Processing, 116~122, Oct. 19~21, 2009, Minsk, Belarus.
- [20] 束学道, 闫波, 邢希东. 楔横轧楔入段端面移动量规律[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 131~134.
- [21] 束学道, 彭文飞, 聂广占, 胡正寰. 楔横轧大型轴类件轧制力规律研究[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(1): 102~104.
- [22] Shu Xuedao, Yan Bo, Nie Guangzhan, Hu Zhenhuan. Study of deformation character to form oversize shaft by cross wedge rolling[C]. 3rd international scientific technical conference, October 15-17, 2008, Minsk, 4: 37~43.
- [23] Shu Xuedao Peng Wenfei Zhao Jing Hu Zhenghuan. Interface quality analysis of process parameters influence on forming long-axis parts in multi-wedge cross wedge rolling[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, September 23~26, 2008, Tianjin, China.
- [24] 赵静, 束学道, 胡正寰. 工艺参数对多楔轧件接口质量的影响规律[J]. 机械工程学报, 2008(44): 11: 209~214.
- [25] 赵静, 束学道, 胡正寰. 楔横轧多楔轧制光轴表面光滑程度规律研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(9): 9010~9011.
- [26] Xing xidong, Shu Xuedao. Finite element analysis of stress and strain in two-wedge cross wedge rolling step-shaft part[J]. Materials Science Forum, 2008, 4575~4578: 255~260.
- [27] 束学道, 祖汪明. 轧辊转速对楔横轧大型轴类件应力应变影响规律研究[J]. 重型机械, 2008, 6, (3): 20~27.
- [28] 祖汪明, 束学道. 质量缩放技术在楔横轧有限元模拟中的应用[J]. 冶金设备, 2008, 6, 169(3): 1~4.
- [29] 闫波, 束学道, 胡正寰. 楔横轧轧制微观组织演变规律研究现状与发展[J]. 中国冶金, 2008, 2, 18(2): 8~10.
- [30] 束学道, 闫波. 轧辊直径对楔横轧大型轴类件应力应变影响分析[J]. 现代制造工程, 2008, 9, 336(9): 1~5.
- [31] Zhao Jing, Shu Xuedao, Hu Zhenghuan. Computer aided design for cross wedge rolling tools of automobile semi-axes[C]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187, 188: 41~45.
- [32] 束学道, 李连鹏, 胡正寰. 工艺参数对楔横轧接触区表面应力影响分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 851~854.
- [33] 赵静, 束学道, 胡正寰. 楔横轧多楔成形汽车半轴力能参数影响因素分析[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(1): 63~66.
- [34] 赵朋, 束学道. 汽车半轴楔横轧机辊系动态特性分析[J]. 现代制造工程, 2007, 316(1): 1~3.
- [35] 束学道, 聂广占. 楔横轧模具脱空对轧制力影响规律研究[J]. 中国冶金, 2007, 17(7): 38~40.
- [36] 束学道, 赵朋. 汽车半轴楔横轧机动态特性[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 21~25.
- [37] 束学道, 聂广占, 胡正寰. 楔横轧特大型轴类件变形特征研究[J]. 冶金设备, 2007, 166(6): 6~10.
- [38] 束学道, 胡正寰, 李连鹏. 楔横轧轧制力矩规律有限元分析与实验测试[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9): 962~964.
- [39] 束学道, 赵静, 胡正寰. H1400 楔横轧机工作机座的结构与设计[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(4): 376~379.

- [40] 刘家玉,束学道,胡正寰. 汽车半轴楔横轧机辊系特性边界元法分析[J]. 中国机械工程,2006,17(19):89~92.
- [41] 赵静,束学道,胡正寰. 楔横轧多楔成形汽车半轴力能参数影响因素分析[J]. 北京科技大学学报,2007,(1):15~18.
- [42] 赵朋,束学道. 汽车半轴楔横轧机辊系动态特性分析[J]. 现代制造工程,2007,316(1):1~3.
- [43] Shu Xuedao, Li Chuanmin, Zhao Jing and Hu Zhenghuan. Theoretical and experimental study of varying rule of rolling-moment about cross wedge rolling [J]. AFDM2006. Busan, Rorea, Sep. 4 ~ 6, 2006.
- [44] Zhao Jing, Shu Xuedao, Li Chuanmin, and Hu Zhenghuan. Computer aided design for cross wedge rolling tools of automobile semi-axes[C]. AFDM2006. Busan, Rorea, Sep. 4~6, 2006.
- [45] Shu Xuedao, Liu Jiayu. Calculating automobile semi-axle cross wedge rolling mill rigidity by coupled method of bem add fem. Computational methods in engineering [C]. 2nd Asia-Pacific Int. Conf. on Comp. Meth. in Engrg. (ICOME 2006), Hefei, Nov. 14~16, 2006.
- [46] 束学道,李连鹏. 楔横轧接触区表面应力分布规律有限元分析[J]. 现代制造工程,2006,307(4):1~3.
- [47] 赵朋,束学道. 汽车半轴楔横轧机机架动态特性有限元法分析[J]. 重型机械,2006,268(4):34~37.
- [48] Shu Xuedao, Li Lianpeng, Hu Zhenghuan. Analyzing varying rule of surface stress on cross-wedge contact zone by finite element method[C]. The 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT), Chongqing, 2005:251, 252.
- [49] Zhao Jing, Shu Xuedao, Hu Zhenghuan. The simulation of finite element on the process of cross wedge rolling tools forming slandering of automobile semi-axes[C]. The 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT), Chongqing, China, 2005:253, 254.
- [50] 赵静,束学道,胡正寰. 汽车半轴多楔楔横轧成形应力变化规律分析[J]. 重型机械,2005,264(6):31~34.
- [51] 束学道,胡正寰. 大型轴类件楔横轧成形可行性分析[J]. 重型机械,2005,262(4):6~8.
- [52] 束学道,邢希东,李连鹏,胡正寰. 楔横轧轧制力矩变化规律的实验研究[J]. 冶金设备,2005,152(4):1~4.
- [53] 束学道,李连鹏,胡正寰. 基于有限元法分析楔横轧大型轴类件可行性[J]. 塑性工程学报,2005,12(7):151~154.
- [54] 束学道,邢希东,胡正寰. 楔横轧单双楔端面移动量变化规律的实验研究[J]. 冶金设备,2005,15(6):1~4.
- [55] 赵静,束学道,胡正寰. 汽车半轴楔横轧模具计算机辅助设计[J]. 重型机械,2005,260(2):45~48.
- [56] 邢希东,束学道,胡正寰. 多楔楔横轧轧制力在线测试系统[J]. 仪表技术与传感器,2005,263(1):29~31.
- [57] 李传民,楔横轧多楔轧制铁道车轴理论与实验研究[D]. 北京:北京科技大学,2008.
- [58] 李传民,束学道,胡正寰. 铁路车辆用车轴成形方法现状与研究[J]. 冶金设备,2006,160(6):5~8.
- [59] 李传民,束学道,胡正寰. 楔横轧多楔轧制铁路车轴可行性有限元分析[J]. 中国机械工程,2006,17(19):2017~2019.
- [60] 李传民,束学道,胡正寰. 辊径比对楔横轧大小轴中心破坏影响分析[C]. 中国机械工程学会年会文集,2008:458~461.
- [61] Shu Xuedao, Li Chuanmin, Hu Zhenghuan. Theoretical and experimental study of varying rule of rolling-moment about cross-wedge rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187, 188: 752~756.