

胡成亮◎著

刘全坤◎导师

直齿轮冷锻成形工艺及 精度控制研究

**ZHICHILUN LENGDUAN
CHENGXING GONGYI JI
JINGDU KONGZHI YANJIU**

HUBING BOSHI WENCONG

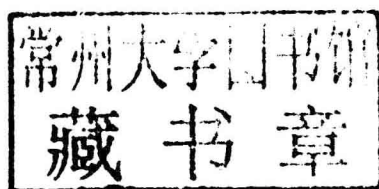


合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

斜
齿
直
齿
博
士
文
丛

直齿轮冷锻成形工艺及 精度控制研究

胡成亮 著 刘全坤 导师



合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

直齿轮冷锻成形工艺及精度控制研究/胡成亮著. —合肥:合肥工业大学出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-5650-0483-4

I. ①直… II. ①胡… III. ①齿轮—冷锻—成形—研究②齿轮精度—精度控制—研究 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 216145 号

直齿轮冷锻成形工艺及精度控制研究

胡成亮 著 刘全坤 导师

责任编辑 张择瑞

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2012 年 10 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2012 年 10 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电 话	总 编 室:0551—2903038	印 张	11.75
	市场营销部:0551—2903163	字 数	180 千字
网 址	www. hfutpress. com. cn	印 刷	合肥工业大学印刷厂
E-mail	hfutpress@163. com	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0483-4

定价: 30.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐枋巍

副主任委员：刘光复 赵 韩

委 员：（按姓氏笔画为序）

刘全坤	刘光复	陈心昭
陈翌庆	罗建平	祖方道
赵 韩	徐枋巍	徐科军
梁昌勇		

出版编辑委员会

主任委员：刘心报

委 员：高 隽 陈翌庆 黄 康

李克明 孟宪余

史维芳 权 怡

出版说明

为贯彻教育部《关于实施研究生教育创新计划 加强研究生创新能力培养 进一步提高培养质量的若干意见》(教研[2005]1号)文件精神,培养研究生创新意识、创新能力,提高研究生培养质量,合肥工业大学设立了研究生科技创新基金,以支持和资助研究生的教育创新活动,为创新人才的成长创造条件。学校领导高度重视研究生教育创新,出版的《斛兵博士文丛》就是创新基金资助的项目之一。

《斛兵博士文丛》入选的博士学位论文是合肥工业大学 2008 届部分优秀的博士学位论文。为提高学位论文的出版质量,《斛兵博士文丛》以注重创新为出版原则,充分展示我校博士研究生在基础与应用研究方面的成绩。

《斛兵博士文丛》的出版,得到了相关兄弟院校和有关专家的大力支持,也得到了研究生导师和研究生的热情支持,我们谨此表示感谢,希望今后能继续得到他们的支持与帮助。

我们力求把这项工作做好,但由于我们经验不足和学识水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者给予批评指正。

合肥工业大学研究生学位论文出版编辑委员会

2011 年 11 月

总 序

胡锦涛总书记指出,为完成“十二五”时期经济社会发展的目标任务,在激烈的国际竞争中赢得发展的主动权,最根本的是靠科学技术,最关键的是大力提高自主创新能力。“提高自主创新能力,建设创新型国家”已明确写进了党的十七大报告。而创新型国家的建设靠人才,人才的培养靠教育。博士生教育与我国科学技术的进步与发展,与社会经济的发展有着直接而密切的联系,是国家创新体系的重要组成部分,研究生尤其是博士研究生培养质量如何,将集中体现一所高校的教育和科研水平。

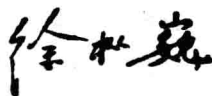
博士论文的研究工作一般都能体现本领域学科发展的前沿性和某些行业多元发展的战略性,应具有一定的创新性。为鼓励广大研究生,特别是博士研究生选择具有重大意义的科技前沿课题进行研究,进一步提高研究生的创新意识、创新精神、创新能力,激励、调动我校博士研究生及其指导教师进一步重视提高博士学位论文质量和争创优秀博士学位论文的主动性和积极性,展示我校博士研究生的学术水平,学校经过精心筹划,编辑出版了《斛兵博士文丛》。

此次入选《斛兵博士文丛》的论著,均为2008年毕业并获得博士学位的优秀博士研究生学位论文。我校的优秀博士学位论文评选工作旨在逐步建立有效的质量监督和激励机制,培养和激励我校在学博士生的创新精神,构建高层次创造性人才脱颖而出的优良氛围。同时优秀博士学位论文代表着我校博士生培养的最高水平,对我校博士生教育起到了示范作用。这套丛书中的论文大体上都有以下几个显著特点:一是选题均为本学科的前沿,具有较大的挑战性;二是论文的创新性突出,或是在理论上或是在方法上有创新;三是论文的成果较为显著,大多都在国际学术刊物上发表了与该论文有关的学术论文。

《斛兵博士文丛》的出版也是我校实施研究生创新工程的一个重要举措。伴随着办学条件的不断改善、人才培养政策的日趋完善和高层次创新型人才成长的良好环境的不断构建,一定能达到多出人才、快出人才、出好人才的目标。

我衷心希望广大研究生发扬我校的优良传统,在严谨求实、开放和谐、充满生机与活力的学术环境中奋发努力、锐意进取、勇于创新,通过自己的辛勤劳动和刻苦钻研写出更好的论文,为进一步提高我校的学术水平作出更大的贡献,为把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学而不懈努力。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师



2011 年 11 月

前 言

齿轮作为一种典型的机械传动零件,在机械行业中大量使用。齿轮精密成形一直是塑性成形领域关注的焦点,如何通过经济的成形方法获得高精度的齿轮零件是齿轮精密加工方向永恒的话题。作者在攻读硕士、博士研究生期间,在导师刘全坤教授的悉心指导下,在前人研究工作的基础上,深入开展了直齿轮冷锻成形工艺及精度控制方面的课题研究工作。

本书是在参阅了许多国内外相关文献基础上,结合作者课题的具体研究工作进行编写的。本书主要涉及直齿轮冷精锻成形工艺设计、模拟分析、工艺参数优化,以及成形精度控制技术等内容。全书共6章:第1章,绪论:主要从基本理论和变形规律、工艺创新和模具设计以及精度预测和控制技术三方面概述直齿轮冷精锻成形技术的研究现状;第2章,采用波形端面凸模的齿轮成形工艺研究:在多方案比较的基础上提出采用波形端面凸模的齿轮成形工艺,结合正交实验和数值模拟进行工艺优化,同时引入浮动凹模进一步降低成形载荷,最后采用灰色关联分析方法和模糊逻辑推理技术实现该工艺的多目标综合优化;第3章,基于刚性平移的齿轮两步成形工艺研究:提出刚性平移流动模式的假设,并通过数值模拟和物理试验证明此假设的正确性,给出了刚性平移预锻齿形的设计方法,并提出一种具体的刚性平移两步成形新工艺,最后以某齿轮零件为例分析了该工艺的可行性;第4章,基于无限多预成形的齿轮挤压工艺构想:在刚性平移两步成形法的研究基础上,提出无限多预成形连续成形的直齿轮挤压工艺设计,给出挤压凹模成形区过渡曲面的详细设计;第5章,基于弹性变形规律的齿轮精度控制研究:建立弹塑性-弹性三维耦合模型,同步计算齿坯的塑性变形、模具的弹性变形和齿件出模后的弹性回复,分别沿齿形曲线与齿高曲线分析模具的弹性扩张规律和齿件的弹性回复规律,分析常用的变位修正法的不足,并根据变形



后齿廓的非渐开线特征提出反变形迭代修正法;第6章,全文总结与研究展望。

本书作者在编写过程中,非常荣幸地获得了合肥工业大学优秀博士学位论文出版基金的资助。正是由于这项资助,本书才得以正式出版,在此表示感谢!

由于作者水平有限,不当之处,敬请读者斧正。

作 者

2012年8月

摘 要

随着汽车工业等装备制造业的快速发展,社会对齿轮的需求和对精度的要求进一步提高。通过研发齿轮精密成形新技术来高效地生产高精度齿轮,具有重要的现实意义。本文围绕直齿轮冷锻成形的若干关键技术问题,开展直齿轮冷锻成形工艺的实用化研究。

将凸模端面设计成双波形“”,反向凸模端面设计成单波形“”,数值模拟和物理实验表明,该方案既克服了齿轮角隅充不满的缺陷又降低了成形载荷。结合正交实验方法和数值模拟技术,以分流角、凸模成形角、反向凸模成形角和分流距四个模具设计的关键参数作为设计变量,以成形载荷最小为目标,对采用波形端面凸模的成形工艺进行优化,可使成形载荷下降18%。引入浮动凹模结构后,载荷进一步降低,降幅达26%。波形凸模的引入导致齿件上下端面不平,为控制齿件端面的后续加工余量,采用灰色关联分析方法和模糊逻辑推理技术,以成形载荷最小和成形后齿件端面加工余量最小为目标,实现该工艺的多目标综合优化。

提出刚性平移流动模式的假设,并进行数值模拟和物理验证。与常规流动模式相比,该模式下齿轮成形所需变形力能较小。在给出刚性平移预锻齿形设计方法的同时提出刚性平移两步成形法。引入冲挤和约束分流锻造工艺,提出一种具体的刚性平移两步成形新工艺;分析预成形齿高和摩擦系数两个工艺参数对终锻载荷的影响,发现刚性平移流动模式可有效降低对流动充填距离和摩擦的敏感性;对比传统工艺,新工艺可使载荷下降35%,采用不对称模具后,载荷下降42%。借助 Taguchi 方法和数值模拟技术,以凸模和反向凸模上分流凸台的高度、半径和倒角等几何参数为设计变量,并引入实际中易波动且精确难控制的摩擦系数和挤压速度作为噪声因素,完成直齿轮刚性平移终锻工艺优化。

针对 MT51 齿轮件结构复杂且厚度较薄的缺点,根据刚性平移两步成形法,提出先反挤预成形再调面锻挤终成形的两步成形工艺,通过模拟分析,发现工艺可行性较强,为 MT51 齿轮的工艺实践提供参考。

在刚性平移两步成形法研究的基础上,提出无限多预成形连续成形的直齿轮挤压工艺设计,给出挤压凹模成形区过渡曲面的详细设计。数值模拟研究结果表明,基于无限多预成形的齿轮挤压工艺在提高变形均匀性、改善角隅充填性和方便脱模等方面十分有效,有进一步推广应用的價值。

经典厚壁筒理论公式不完全适用于内圈形状复杂的组合凹模,尤其是内圈带有齿形的凹模。本文以厚壁筒理论公式为基础,借助有限元法和黄金分割迭代法对齿行组合凹模的各圈尺寸及过盈量进行优化。

对齿件的弹性变形规律和精度控制进行研究,创建弹塑性-弹性三维耦合模型,同步计算齿坯的塑性变形、模具的弹性变形和齿件出模后的弹性回复。分别沿齿形曲线与齿高曲线分析模具的弹性扩张规律和齿件的弹性回复规律,并将两者综合起来评价齿件的尺寸偏差,同时分析了凹模外径与内径之比、模腔高度以及摩擦对齿件精度的影响。

针对常用的变位修正法的不足,并根据变形后齿廓的非渐开线特征提出反变形迭代修正法及其修模过程。考虑到尺寸偏差沿齿件表面呈空间不均匀分布的特性,给出“两闭环一平台”的理想修模流程的基本设想。以某汽车倒挡齿轮为例,研究模具和齿件弹性变形行为对其精度的影响,比较模拟预测和齿件实测结果可知,两者的分布态势具有较好的一致性。

关键词:直齿轮;冷锻工艺;数值模拟;波形凸模;刚性平移;弹性变形;齿件精度

Abstract

With the high-speed development of automotive industry, the demand and required precision of gear is improved. It is of great practical significance to get high-precision gear with high-efficiency and low-cost through the research and development of novel gear precision forming technology. To put the cold forging process of spur gear into practice, some key technical issues are studied.

A forging process with punch end surface in “” shape and counter punch end surface in “” shape is put forward, the corner filling is improved and the forging load is decreased. A general good agreement is found between simulation and experimental results throughout the study. Firstly, the method of combination of orthogonal experiment design with numeric simulation is used to optimize the forging process with four die design key parameters, and the forging load is decreased 18% compared with the conventional scheme. Secondly, the idea of floating die is introduced and the forging load is decreased 26%. Finally, to control allowance for finish caused by the wave-shaped punches, grey relational analyzing method and fuzzy logic reasoning technique are used to find the optimal group of design parameters for wave-shaped punches which can minimize both the forging load and the allowance for finish.

The hypothesis of rigid-parallel motive flow mode (RPM flow mode) is given, and it is verified by the results of numerical simulation and physical experiment. Compared with the conventional flow mode, the deform force and energy of gear forming in the RPM flow mode is reduced. The

RPM two-step forming method is put forward and the method of design preforming gear profile is introduced in detail. Based on the RPM mode a novel specific gear forging technology is put forward by introduced impact extrusion process and constrained divided-flow technique; The effect on forming load of two process parameters (the height of gear tooth after preforming and friction coefficient) is analyzed, and the sensibility to the flow distance and friction of forming process is reduced effectively; Compared with the conventional forming process, the forming load of novel process is reduced 35%, and the load is reduced 42% after the use of asymmetric die. Design key parameters of the boss on the punch and counter punch including height, radius and chamfer are used as design variables; The coefficient of friction and the extrusion velocity are considered as noise factors because they are liable to fluctuate and hard to control accurately in the practical; The method of combination of the Taguchi method with finite element simulation technique is used to optimize the gear finish-forging process, and the results show that the forming load is decreased and the stability of the finish-forging process is improved.

MT51 gear part is thin and its structure is very complex, a two-step forming process combined backward extrusion preforming with upset extrusion finish-forming is obtained by the RPM two-step method. Results of simulation show that the forming process is feasible and it will guide to produce MT51 gear.

Based on study of the RPM two-step method, the idea of an extrusion process design with consecutive forming by infinite preforming is given, and the transitional surface of extrusion die is designed in detail. The extrusion process can improve deformation uniformity and corner filling effectively, and the gear part can be ejected out easily.

The classical theoretical formula of thick cylinder is not fully applicable to combination die with complex inner shape, especially die with gear-shaped inner. To fully play the potential of inner material, finite element

method and golden section iteration method are used to get the optimal structure size of gear-shaped combination die.

Elastic plastic-elastic three-dimensional(3D) coupled model is built to compute plastic deformation of gear blank, elastic deflection of die and elastic recovery of gear forging. Elastic deformation rules of die and gear forging are analyzed along both tooth profile curve and tooth height curve, and they are used to evaluate the dimensional discrepancy of gear product. The effect on gear accuracy of three parameters (ratio of outer and inner diameter of die, height of die and friction coefficient) is also analyzed.

Firstly, the deficiencies of conventional deflection modify method are discussed. Secondly, anti-deformation iteration modify method (ADIM method) is obtained on the base of the non-involution feature of gear profile after elastic deformation, and the die modified procedure using ADIM method is introduced. Thirdly, considering the uneven distribution character in 3D space of dimensional discrepancy, a basic idea about perfect die modified procedure based on "two-loop and one platform" is proposed. Finally, taking a reverse gear in car as a specific example, the effect on its accuracy of both die and gear forging elastic deformation behaviors is studied in detail. Compared prediction result by simulation with actual measure result, a conclusion can be drawn; there is certain difference in absolute figure between the results, but a general good agreement is found in the distribution and trend between the results.

Keywords: Spur gear, Cold forging, Numeric simulation, Wave-shaped punch, Rigid-parallel motive (RPM), Elastic deformation, Accuracy of forged gear part

目 录

第 1 章 绪论	(001)
1.1 引言	(001)
1.2 直齿轮冷锻成形基本理论和变形规律的研究概况	(002)
1.3 直齿轮冷锻成形工艺创新及模具设计的发展现状	(008)
1.4 直齿轮冷锻成形精度预测与控制技术的研究进展	(014)
1.5 课题来源及研究内容	(020)
1.5.1 课题来源及研究目标	(020)
1.5.2 课题的主要研究内容	(021)
1.6 本章小结	(022)
第 2 章 采用波形端面凸模的齿轮成形工艺研究	(023)
2.1 二维有限元模拟分析	(023)
2.1.1 二维有限元建模	(024)
2.1.2 模拟结果提取	(025)
2.1.3 方案比较分析	(025)
2.1.4 方案比较结果	(029)
2.2 三维有限元模拟对比	(029)
2.2.1 三维有限元建模	(030)
2.2.2 网格重划分与局部细化	(030)
2.2.3 应力场对比	(031)
2.2.4 应变场对比	(031)
2.2.5 速度场对比	(031)
2.2.6 位移场对比	(034)

2.2.7	成形效果与成形载荷对比	(035)
2.3	物理实验对比验证	(036)
2.3.1	实验模具设计	(036)
2.3.2	实验模具加工	(037)
2.3.3	实验实施过程	(038)
2.3.4	实验结果分析	(038)
2.4	模具形状与模具结构的优化设计	(039)
2.4.1	工艺方案的力学模型分析	(040)
2.4.2	模型形状优化	(041)
2.4.3	浮动凹模结构	(044)
2.4.4	优化结果总结	(047)
2.5	基于灰色关联和模糊逻辑的工艺多目标优化	(047)
2.5.1	优化问题描述	(048)
2.5.2	正交实验安排	(049)
2.5.3	灰色关联系数计算	(049)
2.5.4	模糊逻辑推理系统	(051)
2.5.5	优化结果数据分析	(053)
2.5.6	多目标优化结论	(054)
2.6	本章小结	(055)
第3章	基于刚性平移的齿轮两步成形工艺研究	(057)
3.1	齿轮锻造金属流动规律分析	(057)
3.1.1	径向流动模式分析	(058)
3.1.2	轴向流动模式分析	(060)
3.2	刚性平移流动模式基础研究	(061)
3.2.1	刚性平移预锻齿形设计方法	(061)
3.2.2	刚性平移流动模式假设验证	(062)
3.3	基于刚性平移的两步成形工艺研究	(063)
3.3.1	两步成形工艺方案	(064)
3.3.2	数值模拟与物理实验研究	(064)
3.3.3	与传统工艺方案的对比	(068)

3.3.4	关键工艺参数分析	(068)
3.3.5	不对称模具设计	(070)
3.3.6	两步成形工艺研究结论	(071)
3.4	基于 Taguchi 稳健设计的终锻工艺优化	(072)
3.4.1	Taguchi 稳健设计法	(072)
3.4.2	质量损失函数模型	(073)
3.4.3	三类问题的信噪比	(074)
3.4.4	建立优化目标函数	(075)
3.4.5	稳健设计实验安排	(076)
3.4.6	稳健设计数据分析	(076)
3.4.7	终锻工艺优化结果	(079)
3.5	MT51 齿轮成形工艺分析——刚性平移两步法的 推广应用	(080)
3.5.1	MT51 齿轮零件特征	(080)
3.5.2	工厂初步工艺尝试	(081)
3.5.3	改进工艺的模拟分析	(083)
3.5.4	工艺分析结论	(085)
3.6	本章小结	(086)
第 4 章	基于无限多预成形的齿轮挤压工艺构想	(087)
4.1	基于无限多预成形的齿轮挤压工艺	(087)
4.1.1	无限多预成形的的基本设计思想	(087)
4.1.2	直齿轮挤压新工艺及其脱模方式分析	(088)
4.1.3	直齿轮挤压凹模型腔成形区曲面设计	(089)
4.2	直齿轮挤压新工艺的数值模拟研究	(091)
4.2.1	几何模型和模型转换	(091)
4.2.2	力学模型的选择	(092)
4.2.3	模拟基本参数设置	(093)
4.2.4	数值模拟结果分析	(094)
4.3	本章小结	(098)