



国防科技图书出版基金

轴类零件冷滚压 精密成形理论与技术

Theory and Technology on Cold Rolling
Precision Forming of Shaft Parts

宋建丽 刘志奇 李永堂 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

轴类零件冷滚压 精密成形理论与技术

Theory and Technology on Cold Rolling
Precision Forming of Shaft Parts

宋建丽 刘志奇 李永堂 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

轴类零件冷滚压精密成形理论与技术/宋建丽,刘志奇,
李永堂编著. —北京:国防工业出版社,2013.9

ISBN 978-7-118-08453-5

I. ①轴... II. ①宋... ②刘... ③李... III. ①轴 -
零部件 - 冷加工 - 滚压成型 IV. ①TG386

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 188671 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

开本 710 × 1000 1/16 印张 14½ 字数 272 千字

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 85.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

总 序

2012年,太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际,我校的专家学者推出了这套学术丛书,以此献礼,共襄盛举。

60年前,伴随着新中国的成立,伟业初创,百废待兴,以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起,太原科技大学应运而生。60年来,几代科大人始终心系民族振兴大业,胸怀制造强国梦想,潜心教书育人,勇担科技难题,积极服务社会,为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场,涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一,今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主,“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明,多学科协调发展的教学研究型大学,成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围,众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘,硕果累累。这套丛书的编撰出版,定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义
2012年6月

前 言

随着我国综合国力的快速增长,机械制造业进入一个迅猛发展阶段。航空航天、汽车、风电、石油化工、国防工业和重大装备制造业对高强度、高精度轴类零件,如螺纹、空心螺纹、丝杠、花键、螺杆等的需求量日益增加,性能要求不断提高,这些零件传递系统动力,对装备的安全运行起关键作用。花键、螺纹等轴类零件传统的加工方法以金属切削方法为主,生产效率低,浪费材料和能源;由于金属纤维被切断而造成制件力学性能和表面质量差,难以满足各行各业发展的需要。

冷滚压精密成形技术是利用塑性成形原理,在室温下对金属坯料进行连续滚压成形,生产具有复杂特征的轴类零件,是一种少无切削的先进制造技术。与传统的金属切削加工工艺相比,该技术可提高生产率 30 倍~40 倍,大大改善零件成形组织和综合力学性能,节约材料 15%~30%,降低生产成本 30% 左右,在高强度、高精度复杂轴类零件生产中受到越来越多的关注,具有广阔的应用前景和社会经济效益。

轴类零件冷滚压成形是一种连续的局部变形过程,变形机理复杂,国内外在花键、螺纹类零件冷滚压精密成形工艺理论和力学分析方面的研究较少,现有的成形工艺和生产基本上依靠经验,缺乏系统的理论指导,制约了这种高效、节能的少无切削技术的推广和应用。

本书编著者课题组和青岛生建机械厂冷滚轧技术研究开发中心成立了冷滚压精密成形联合实验室,对轴类零件冷滚压成形工艺、理论和设备进行了系统深入的研究。本书是在国家自然科学基金项目(No. 50675145)、山西省科技攻关项目(No. 2006031147)、山西省出国留学人员重点项目(No. 200678)和青岛生建机械厂冷滚轧技术研究开发中心企业合作项目等研究成果的基础上,结合作者多年来在冷滚压精密成形技术与装备等方面的理论和工程实践编写而成。

本书主要以花键和螺纹类零件为研究对象,详细介绍了冷滚压精密成形技术的理论、工艺和设备。全书共分 10 章。第 1 章讲述了冷滚压精密成形技术的国内外现状和发展趋势。第 2 章讲述了花键冷滚压精密成形的原理,对成形过

程进行了力学分析。第3章介绍了花键冷滚压成形工艺参数设计与计算,包括花键冷滚压精密成形过程的接触面积、滚压力与滚压力矩和滚压成形工件坯料直径等。第4章对花键冷滚压精密成形过程进行了有限元建模和数值模拟分析。第5章主要讲述了花键冷滚压精密成形时齿部的金属塑性变形及流动规律,冷滚压成形精度、缺陷及成形质量控制方法。第6章分析了螺纹冷滚压精密成形工艺与原理。第7章讲述了螺纹冷滚压成形工艺参数,包括工件毛坯计算、滚压力、滚压速度和进给量的选择及空心薄壁螺纹件的冷滚压加工最小壁厚条件等。第8章对螺纹冷滚压成形过程的滚压力、速度场和应力、应变场进行了数值模拟,对螺纹件失效过程进行了分析。第9章分析了螺纹冷滚压精密成形金属流动规律及优化参数的确定。第10章阐述了冷滚压精密成形机床与模具的设计及设备力能参数的测定,对国内外主要冷滚压设备生产企业,产品性能、特点和技术参数进行了简要介绍。希望本书能为从事轴类零件冷滚压成形工艺研究和生产的科研及技术人员提供一定的理论参考和借鉴。

衷心感谢西安交通大学张大伟博士、太原科技大学齐会萍副教授和青岛生建机械厂冷滚轧技术研究开发中心郑全刚所长对本书的撰写做出的贡献与支持。本书在撰写过程中,广泛汲取了国内外相关领域的研究成果和网络文献的精华,在此一并对作者表示感谢。由于作者水平有限,书中不足及错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

感谢国防科技图书出版基金评审委员会对本书提出的宝贵意见和大力支持,感谢国防工业出版社唐应恒主任和肖姝责任编辑的辛勤工作。

作者

2013年6月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 冷滚压精密成形技术概述	1
1.2 轴类零件加工技术现状	2
1.2.1 花键轴的切削加工	3
1.2.2 花键轴的塑性成形	4
1.2.3 螺纹类零件的加工方法	10
1.3 轴类零件冷滚压精密成形技术研究进展	11
1.3.1 花键轴加工技术现状	11
1.3.2 花键轴冷滚压成形理论研究	13
1.3.3 花键轴冷滚压表面改性研究	14
1.3.4 螺纹类零件冷滚压成形国内外发展现状	15
1.4 轴类零件冷滚压精密成形技术的发展趋势	17
第 2 章 花键冷滚压精密成形原理及力学分析	19
2.1 花键轴冷滚压精密成形原理及过程	19
2.2 受力分析	20
2.3 花键冷滚压齿部成形过程分析	21
2.3.1 分齿咬入条件	21
2.3.2 旋转条件	21
2.3.3 分齿几何条件	24
2.4 双面无侧隙啮合	25
2.4.1 成形过程的接触区	25
2.4.2 接触点位置	27
2.5 接触点的滑动	31
2.5.1 主动侧接触点的滑动运动	31
2.5.2 从动侧接触点的滑动运动	32

2.5.3	工件齿面金属流动	33
2.6	花键冷滚压精密成形力学分析	34
2.6.1	应力分析基本假设	34
2.6.2	应力分析塑性成形理论基础	35
2.6.3	初始滚压滑移线场与应力分析	39
2.6.4	稳定滚压滑移线场与应力分析	41
2.7	成形过程接触面上的平均压力	43
第3章	花键冷滚压精密成形工艺参数	47
3.1	花键轴冷滚压精密成形过程的接触面积	47
3.1.1	计算模型	47
3.1.2	成形过程的滚压轮和工件齿廓方程	48
3.1.3	接触边界条件	53
3.1.4	接触面积计算	54
3.1.5	主要子程序算法	54
3.2	滚压力与滚压力矩	63
3.2.1	滚压力与滚压力矩的理论计算	63
3.2.2	成形过程的滚压力与滚压力矩分析	64
3.3	滚压成形工件坯料直径的计算	68
3.3.1	理论计算公式	68
3.3.2	齿根圆以上单齿截面积	68
3.3.3	齿根过渡圆弧半径	70
第4章	花键冷滚压成形过程数值模拟	72
4.1	有限元模型的建立及边界条件	72
4.1.1	有限元模型	72
4.1.2	模拟参数与约束条件	72
4.2	滚压过程的数值模拟	73
4.2.1	塑性变形区域	73
4.2.2	端面凸起	74
4.2.3	应力、应变场	75
4.3	理论分析与数值模拟对比	76
4.3.1	接触面上单位压力	76

4.3.2	滚压成形过程滚压力	79
第5章	花键轴冷滚压成形金属流动规律及成形质量	81
5.1	花键轴冷滚压精密成形齿部金属流动规律	81
5.1.1	试件毛坯与成形参数	81
5.1.2	齿廓材料的流动分析	82
5.2	花键轴冷滚压成形精度	83
5.3	花键轴冷滚压成形零件表面质量	85
5.3.1	成形零件表面粗糙度	85
5.3.2	成形零件齿面硬度	86
5.3.3	冷滚压成形花键齿部组织特征	88
5.3.4	冷滚压精密成形花键轴齿面强化机理	89
5.4	花键轴冷滚压成形误差与缺陷	90
5.4.1	齿距累积误差的产生与控制	90
5.4.2	花键轴冷滚压精密成形缺陷分析	94
5.5	花键轴冷滚压精密成形质量控制方法	96
5.5.1	冷滚压毛坯设计	96
5.5.2	滚压轮对刀和牙位调整	97
5.5.3	合理选择工艺参数	98
第6章	螺纹冷滚压成形原理与工艺分析	100
6.1	螺纹冷滚压成形原理	100
6.1.1	螺纹的两滚丝轮滚压	101
6.1.2	螺纹的三滚丝轮滚压	101
6.2	三滚丝轮滚压的螺纹直径条件	102
6.3	螺纹的冷滚压成形过程	103
6.4	工件与滚丝轮之间的相对运动	105
6.4.1	轴向运动关系	105
6.4.2	工件与滚丝轮之间的旋转运动关系	106
6.4.3	滚丝轮与工件间的相对滑动	108
第7章	螺纹冷滚压成形工艺参数	109
7.1	螺纹冷滚压前的毛坯	109

7.1.1	工件毛坯直径的常用计算公式	109
7.1.2	螺纹冷滚压坯件直径的求解	110
7.1.3	坯件的倒角	113
7.1.4	滚压坯料的材料	113
7.2	螺纹冷滚压参数	116
7.2.1	滚压力	116
7.2.2	滚压速度的选择	124
7.2.3	滚压进给量的选择	124
7.3	空心薄壁螺纹件的冷滚压加工	126
7.3.1	空心螺纹冷滚压	126
7.3.2	空心螺纹件壁厚条件	127
第 8 章	螺纹冷滚压成形过程数值模拟	135
8.1	模拟基本步骤及基本假设	135
8.1.1	螺纹冷滚压数值模拟流程	135
8.1.2	模型的简化	135
8.2	M10 × 1.5 实心螺纹的冷滚压过程模拟	136
8.2.1	模具的载荷和扭矩	137
8.2.2	工件应力状态分析	141
8.3	空心螺纹冷滚压数值模拟	142
8.3.1	滚压力分析	142
8.3.2	速度场	145
8.3.3	工件的应力状态	145
8.3.4	应变场分析	147
8.4	螺纹件失效过程的分析	149
8.4.1	工件内的等效应力变化	149
8.4.2	三滚丝轮对空心螺纹件失稳的修复作用	150
第 9 章	螺纹冷滚压精密成形金属流动规律及参数优化	152
9.1	三轴滚丝机螺纹冷滚压成形	152
9.1.1	工件材料及成形设备	152
9.1.2	螺纹冷滚压成形影响因素	152
9.1.3	空心螺纹壁厚对螺纹成形的影响	153

9.2	螺纹冷滚压成形金属流动规律·····	154
9.3	冷滚压成形及切削加工螺纹硬度分布·····	157
9.4	滚压参数优化·····	159
9.4.1	螺纹冷滚压成形参数正交因素水平及指标的确定·····	159
9.4.2	不同成形条件下的硬化程度·····	160
9.5	最优滚压参数的确定·····	161
第10章	冷滚压精密成形设备·····	164
10.1	概述·····	164
10.2	冷滚压成形机床与模具设计·····	166
10.2.1	设备结构及参数·····	166
10.2.2	主轴同步阻尼减振设计·····	167
10.2.3	液压系统及其建模与仿真·····	168
10.2.4	滚压轮设计·····	174
10.3	力能参数测试系统·····	176
10.3.1	主轴转矩的测量方法·····	176
10.3.2	滑座径向进给力的测量·····	178
10.3.3	数据采集系统·····	178
10.4	工艺参数的确定·····	179
10.4.1	滚压轮转速·····	179
10.4.2	滚压轮进给速度·····	180
10.4.3	滚压时间·····	180
10.4.4	主轴位置控制·····	181
10.5	冷滚压精密成形力能参数·····	181
10.5.1	成形过程动态载荷·····	181
10.5.2	工艺参数对最大成形力的影响·····	183
10.5.3	理论计算与试验结果的对比·····	185
10.6	冷滚压精密成形设备简介·····	186
10.6.1	美国肯尼福公司(Kinefac)冷滚压成形设备·····	186
10.6.2	德国宝飞螺技术有限公司(PROFIROLL [®] , bad duben) 冷滚压成形设备·····	193
10.6.3	青岛生建机械厂冷滚压成形设备·····	199
	参考文献·····	203

CONTENTS

Chapter 1	Conspectus	1
1.1	Summary of Cold Rolling Precision Forming Technology	1
1.2	Present Status of Shaft Parts Manufacturing Technology	2
1.2.1	Cutting of Spline Shafts	3
1.2.2	Plastic Forming of Spline Shafts	4
1.2.3	Manufacturing Methods of Threads	10
1.3	Research Progress on Cold Rolling Precision Forming Technology of Shaft Parts	11
1.3.1	Present Status of Spline Shaft Manufacturing Technology	11
1.3.2	Theoretical Study on Cold Rolling Forming of Spline Shafts	13
1.3.3	Study on the Surface Modification of Spline Shafts	14
1.3.4	Development Status at home and abroad on Cold Rolling Forming of Treads	15
1.4	Development Trend on Cold Rolling Precision Forming Technology of Shaft Parts	17
Chapter 2	Principle and Mechanical Analysis of Cold Rolling Precision Forming of Spline	19
2.1	Principle and Process of Cold Rolling Precision Forming of Spline	19
2.2	Mechanical Analysis	20
2.3	Forming Process Analysis of Cold Rolling Spline tooth	21
2.3.1	Indexing and Biting Conditions	21
2.3.2	Rotation Conditions	21
2.3.3	Geometrical Biting Conditions	24

2.4	Double-side Engagement without Side Clearance	25
2.4.1	Contact Area of the Forming Process	25
2.4.2	Position of the Contact Point	27
2.5	Sliding of the Contact Point	31
2.5.1	Sliding Motion of the Contact Point on the Driving Side	31
2.5.2	Sliding Motion of the Contact Point on the Follower Side	32
2.5.3	Metal Flow on the Tooth Surface of the Workpiece	33
2.6	Mechanical Analysis on the Cold Rolling Precision Forming of Spline	34
2.6.1	Basic Hypothesis of the Stress Analysis	34
2.6.2	Plastic Forming Theory Foundation of Stress Analysis	35
2.6.3	Slip-lines Field at the Initial Rolling Stage and Stress Analysis	39
2.6.4	Slip-lines Field at the Stable Rolling Stage and Stress Analysis	41
2.7	Average Pressure on the Contact Surface during the Forming Process	43

Chapter 3 Process Parameters of the Cold Rolling

	Precision Forming of Spline	47
3.1	Contact Area of the Cold Rolling Precision Forming of Spline Shafts	47
3.1.1	Calculation Model	47
3.1.2	Tooth Profile Equation of the Rolling Wheel and the Workpiece during the Forming Process	48
3.1.3	Contact Boundary Conditions	53
3.1.4	Contact Area Calculation	54
3.1.5	Main Algorithm of Subroutines	54
3.2	Rolling Force and Rolling Moment	63
3.2.1	Theoretical Calculation of Rolling Force and Rolling Moment	63
3.2.2	Analysis of the Rolling Force and Rolling Moment during Forming Process	64
3.3	Calculation of the Cold Rolling Workpiece Diameter	68

3.3.1	Theoretical Calculation Formulas	68
3.3.2	Single Tooth Section Area Above the Root Circle	68
3.3.3	Radius of the Transition Arc on the Root Circle	70

Chapter 4 Numerical Simulation of Cold Rolling

	Process of Spline	72
4.1	Set up of the FEM Model and Boundary Conditions	72
4.1.1	Finite Element Model	72
4.1.2	Simulation Parameters and Constrains Conditions	72
4.2	Numerical Simulation of the Rolling Process	73
4.2.1	Plastic Deformation Area	73
4.2.2	Convex of the End Surface	74
4.2.3	Stress and Strain Field	75
4.3	Comparison between the Results of Theoretical and the Numerical Simulation	76
4.3.1	Unit Press on the Contact Surface	76
4.3.2	Rolling Force of the Rolling Process	79

Chapter 5 Metal Flow Rules and Forming Quality of Cold

	Rolling Forming of Spline Shafts	81
5.1	Metal Flow Rules of Cold Rolling Spline Tooth	81
5.1.1	Workpiece Billets and Forming Parameters	81
5.1.2	Material Flow Analysis of the Tooth Profile	82
5.2	Precision of Cold Rolling Forming Spline Shafts	83
5.3	Surface Quality of Cold Rolling Forming Parts	85
5.3.1	Surface Roughness of the Formed Parts	85
5.3.2	Hardness of the Formed Tooth Surfaces	86
5.3.3	Microstructure of the Cold Rolling Spline Tooth	88
5.3.4	Strengthening Mechanism of the Cold Rolling Precision Forming Spline Tooth Surface	89
5.4	Error and Defects of Cold Rolling Forming Spline Shafts	90
5.4.1	Generation and Control of the Accumulated Error on the Tooth Pitch	90
5.4.2	Defects Analysis of the Cold Rolling Forming Spline Shafts	94