



先进制造技术创新研究丛书

Research
on **Mechanical Principle**
and **Technology Theory**
of Profile Cold Ring Rolling

异形截面环件冷轧
力学原理和工艺理论研究

钱东升 著



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

先进制造技术创新研究丛书

异形截面环件冷轧力学 原理和工艺理论研究

钱东升 著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书通过理论分析计算、有限元数值模拟和轧制实验测试方法,对沟槽截面环件和台阶截面环件两种应用广泛的典型异形截面环件的冷轧力学原理和工艺理论进行了深入研究,提出了冷轧成形力学条件,揭示了冷轧中环件的运动和变形规律,建立了冷轧工艺设计方法,为异形截面环件冷轧技术的应用和发展提供了理论依据。

图书在版编目(CIP)数据

异形截面环件冷轧力学原理和工艺理论研究/钱东升著. —武汉:武汉理工大学出版社,2012.2

ISBN 978-7-5629-3694-7

I. 异… II. ①钱… III. 环形-零部件-冷轧-轧制-研究 IV. ①TG335.12
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 038344 号

项目负责人:王兆国

责任校对:夏冬琴

出版发行:武汉理工大学出版社有限责任公司

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

印 刷:湖北新华印务有限公司

印 张:11

版 次:2012年6月第1版

印 数:1—2000

责任编辑:陈 硕

装帧设计:翰之林

邮 编:430070

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16

字 数:203千字

印 次:2012年6月第1次印刷

定 价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87523148 87664138 87523238 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

异形截面环件冷轧是在常温下通过轧制使各种具有复杂截面轮廓形状的环件成形的一种先进、高效的塑性回转成形工艺。异形截面环件冷轧过程中,直径扩大与截面轮廓成形并非同步进行,因此其冷轧运动变形规律比矩形截面环件冷轧更复杂。目前异形截面环件冷轧研究较少,其轧制工艺科学理论尚属空白,导致在技术经济上更具优势的异形截面环件冷轧成形技术一直停滞不前,严重制约了异形截面环件生产的节能节材效果和技术经济效益。

本书运用理论分析计算、数值模拟和实验测试相结合的研究手段,对典型异形截面环件冷轧力学原理和工艺理论进行了系统研究。提出了冷轧成形力学条件,揭示了冷轧中环件的运动和变形规律,建立了冷轧工艺设计方法,为异形截面环件冷轧技术的发展应用提供了科学理论依据。

本书的研究工作得到了华林教授的悉心指导,在此对华老师表示真挚的感谢。

本书的研究工作也得到了国家自然科学基金、教育部高等学校博士学科点专项科研基金的资助。本书的出版得到了武汉理工大学出版社的资助。在此,作者表示衷心的感谢。

由于水平有限,对许多理论和技术问题的认识比较浅显,内容难免有错漏之处,诚恳希望读者给予指正。

钱东升
2012年3月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 环件轧制分类和原理	(1)
1.2 环件轧制研究现状	(4)
1.3 课题的来源、目的和意义	(9)
1.4 本文的主要研究内容	(10)
2 沟槽截面环件冷轧条件	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 沟槽截面环件冷轧咬入孔型条件	(13)
2.3 沟槽截面环件冷轧塑性穿透条件	(21)
2.4 本章小结	(30)
3 沟槽截面环件冷轧成形规律	(31)
3.1 引言	(31)
3.2 冷轧中环件的运动规律	(31)
3.3 冷轧中环件的截面几何变化规律	(39)
3.4 冷轧中环件的宽展规律	(43)
3.5 工艺参数和材料参数对冷轧成型的作用规律	(48)
3.6 本章小结	(54)
4 沟槽截面环件冷轧工艺设计	(55)
4.1 引言	(55)
4.2 毛坯设计	(55)
4.3 孔型设计	(64)
4.4 轧制参数设计	(66)
4.5 本章小结	(69)
5 台阶截面环件冷轧条件	(70)
5.1 引言	(70)
5.2 台阶截面环件冷轧接触模式	(71)
5.3 台阶截面环件冷轧条件	(88)
5.4 本章小结	(116)

6 台阶截面环件冷轧成形规律	(117)
6.1 台阶截面环件冷轧运动规律	(117)
6.2 台阶截面环件冷轧截面几何变化规律	(127)
6.3 台阶截面环件冷轧宽展规律	(132)
6.4 工艺参数对环件冷轧成型的作用规律	(144)
6.5 本章小结	(149)
7 台阶截面环件冷轧工艺设计	(150)
7.1 外台阶截面环件冷轧工艺设计	(150)
7.2 内台阶截面环件冷轧工艺设计	(155)
7.3 内凸台截面环件冷轧工艺设计	(159)
7.4 本章小结	(163)
参考文献	(164)

1 绪 论

1.1 环件轧制分类和原理

环件轧制是各种形状和尺寸无缝环形零件的先进制造技术,它是借助于轧制设备——轧环机使环件壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形的连续局部塑性回转成形工艺^[1]。

环件轧制通常按两种方式进行分类:按环件毛坯轧制时的温度可以将其分为冷轧和热轧;按环件毛坯在轧制中的变形方式可以将其分为径向轧制和径轴向轧制。其中,后一种分类方式最能够体现环件轧制特点。下面以这种分类方式为准,简单阐述环件径向轧制和径轴向轧制的工作原理。

1.1.1 环件径向轧制原理

根据轧辊的布置方式可将环件径向轧制分为单导向辊立式轧制和双导向辊卧式轧制,其轧制工作原理如图 1-1 所示^[2]。

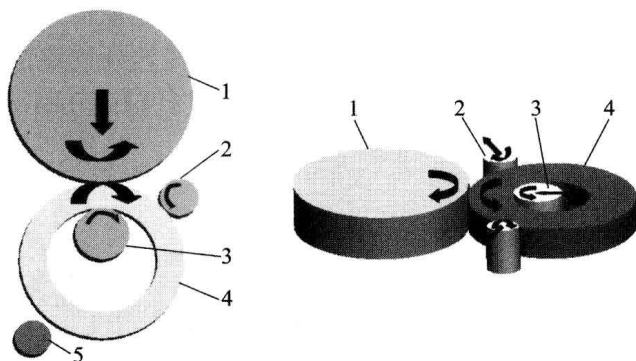


图 1-1 径向轧制基本原理图

(a)单导向辊立式;(b)双导向辊卧式

1—驱动辊;2—导向辊;3—芯辊;4—环件;5—信号辊

图 1-1(a)为在单导向辊立式轧环机上进行环件径向轧制。图中,驱动辊为主动辊,在电动机的带动下做匀速旋转运动,同时在液压或气动装置驱动下做

直线进给运动;芯辊和导向辊为被动辊,在环件摩擦力作用下做从动旋转轧制运动。在驱动辊旋转和进给作用下,环件连续进入由驱动辊与芯辊构成的轧制孔型并产生连续局部塑性变形,使其壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形。当环件经过多转轧制变形使其外径扩大到预定尺寸时,环件外表面与信号辊接触,驱动辊停止直线进给运动并返回,环件轧制过程结束。轧制过程中,导向辊的导向运动保证环件的平稳转动。图 1-1(b)为在双导向辊卧式轧环机上进行的环件径向轧制。图中,驱动辊只在电动机驱动下做匀速旋转运动;芯辊在液压或气动装置的作用下做直线进给运动和从动旋转运动;两个导向辊在液压装置作用下从环件两侧以一定的力抱住环件,并随着环件直径的扩大而逐渐张开,以保证轧制过程的平稳进行。

1.1.2 环件径轴向轧制原理

环件径轴向轧制主要用于生产大型环件。图 1-2^[3]是径轴向轧制的基本原理图。为了改善轧制环件的端面质量、轧制成形具有复杂截面轮廓的环件,在径向环件轧制设备的基础上,增加了一对轴向端面轧辊,对环件的径向和轴向同时进行轧制,这样使得径向轧制产生的环件端面凹陷在经过轴向端面轧制后得以修复平整,而且轴向端面轧制还可以使环件获得复杂的截面轮廓形状。在轧制过程中,驱动辊做旋转轧制运动,芯辊做径向直线进给运动,上、下端端面轧辊做旋转运动和向外水平移动,同时上端面轧辊还做向下的轴向进给运动。环件在轧辊的作用下产生径向壁厚减小、轴向高度减小、内外直径扩大、截面轮廓成形的连续局部塑性变形。当环件经反复多转轧制使直径达到预定值时,芯辊的径向进给运动和上端面轧辊的轴向进给运动停止,环件径轴向轧制结束。

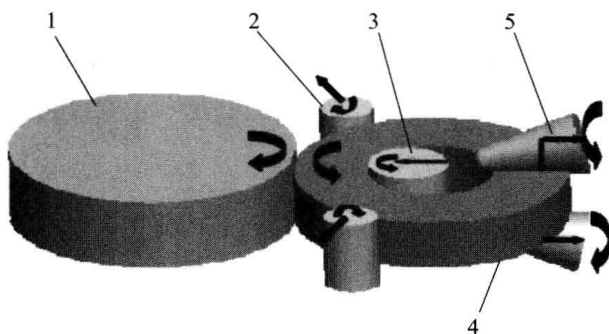


图 1-2 径轴向轧制基本原理图

1—驱动辊;2—导向辊;3—芯辊;4—环件;5—端面轧辊

1.1.3 环件冷轧原理及优点

环件冷轧的基本工作原理与环件热轧基本相似,不同之处仅在于冷轧是在常温下对环件毛坯进行轧制,而不需对环件毛坯进行加热。环件冷轧设备目前应用较普遍的为立式环件冷轧设备,其原理如图 1-3 所示^[4,5]。该原理与单导向辊径向轧制类似,不同之处在于径向直线进给运动是由芯辊来实现的。由于环件冷轧产品尺寸较小,其精度要求比热轧高,因此,环件冷轧设备上均配备有在线测量装置,以确保成形零件的尺寸精度。另外,还有一套专门的导向机构,使导向辊可以随环件外径的扩大而运动,并能提供合适的力作用在环件上以保证轧制过程的平稳进行。

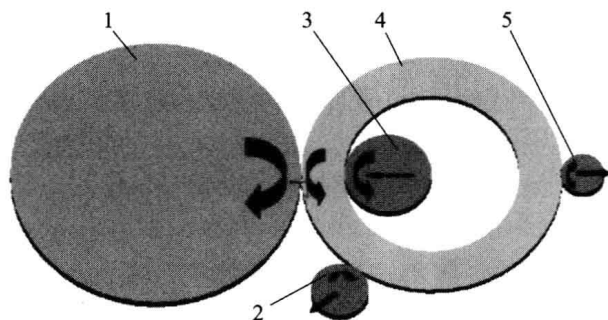


图 1-3 冷轧基本原理图

1—驱动辊;2—导向辊;3—芯辊;4—环件;5—测量辊

目前,环件冷轧加工的零件最大外径不超过 350 mm^[6]。对于直径小于 350 mm 的零件,传统环件轧制工艺为采用棒料直接车削、管料直接车削或锻造制坯→热轧→车削等。由于这些加工方法节能节材效果差,经济技术效益低,不能满足现代制造业的发展需求,因而开发出了环件冷轧工艺^[7,8]。环件冷轧工艺研究开发起源于 20 世纪 80 年代,其最早应用于轴承套圈加工。由于其与传统的轴承套圈加工工艺相比,具有节能、节材、生产率高、产品质量好等众多技术经济优点,因而在德国、美国、日本和前苏联等国家得到较快的推广应用。我国自 20 世纪 90 年代开始研究开发轴承套圈冷轧工艺,并从德国、日本引进环件冷轧设备进行轴承套圈冷轧生产^[9,10]。目前,环件冷轧工艺已基本取代传统的加工工艺,全面应用于国内轴承套圈加工行业。与传统的加工工艺相比,环件冷轧工艺的技术经济优点具体如下^[11-14]:

(1) 节约原材料 冷轧节约原材料主要体现在两方面:①加工余量小。传统的环件加工方法中,由热轧、热锻、管坯或其他方式制得的环件坯料直径与成品

直径相当,其预留的加工余量大。而采用冷轧加工时,只需在一个小于成品的毛坯表面上预留切除余量,要少于传统的加工方法。②材料切屑少。环件冷轧是通过塑性变形使环件成形,工件原先需要通过车削加工得到的沟槽、圆角等均可通过塑性变形而得到,减少了金属材料的切屑量。

(2)节约成本 环件冷轧材料利用率高,且能减少机加工工作量,因此降低了生产成本。

(3)提高产品质量 冷轧可以在以下四个方面提高产品的质量:①塑性变形避免了切削加工对金属纤维连续性的破坏,提高了产品的表面耐磨性和使用寿命。②轧制过程中实现了在线测量和控制,提高了产品的几何尺寸精度。③提高了产品的表面光洁度,传统工艺的表面粗糙度为 $3.2\ \mu\text{m}$,而冷轧加工的表面粗糙度为 $0.8\ \mu\text{m}$ 。④提高了产品的硬度,传统工艺加工的产品的硬度一般为 $179\sim 207\ \text{HB}$,而冷轧加工的产品硬度可达到 $250\sim 280\ \text{HB}$ 。

(4)工作环境好 环件冷轧过程冲击、噪声小,进出料容易实现自动化。

1.2 环件轧制研究现状

环件轧制技术的研究最早起源于 20 世纪 60、70 年代,当时英国学者 W. Johnson 等率先在轧环机上对矩形截面环件轧制变形进行了实验测试,逐步引起了工程科学界的重视。早期的环件轧制研究主要采用实验测试方法和各种解析方法。到 20 世纪 80 年代,随着计算机技术和有限元理论的逐渐发展,许多学者开始采用有限元方法,通过计算机数值模拟对环件轧制开展研究。从 20 世纪 80 年代至今,英国、美国、韩国、日本及国内众多学者采用实验测试、解析计算和有限元模拟等研究方法,对环件轧制变形规律和工艺设计进行了深入的研究,极大地促进了环件轧制技术的应用和发展。

1.2.1 早期的环件轧制研究

1.2.1.1 实验研究

1968 年, W. Johnson 等^[15,16]首先开展了环件轧制实验研究。他们先在立式二辊轧环机上进行了基本参数的实验研究,发现环件轧制时径向变形区的径向对称点存在塑性铰。同年, W. Johnson 等^[17]在实验室建造了小型卧式环件轧机,其结构形式与工业生产轧机相同,在该轧机上,他们进行了轧制力、力矩及压下量的连续测量,得到了一些基本结论。1973 年, J. B. Hawkyard 等^[18]在

UMIST 实验室安装了一台专用的环件实验轧机。其特点是芯辊可沿轴线移动,便于实验时环件的装卸,且轧辊两端支撑,提高了轧机刚度和实验精度。1976 年,A. G. Mamalis 等^[19,20]在该轧机上进行了环件金属变形及宽展试验,及不同材料在不同孔型中轧制时的单位压力分布。

1991 年,许思广等^[21,22]对恒定轧制力条件下环件的宽展变形及环件轧制变形后的应变分布进行了实验研究。华林等^[23]最早在 D51-160A 立式热轧环机上进行了矩形截面环件轧制的实验研究,设计了环件轧制测试系统,对环件轧制中的力学和运动学参数进行了测试和研究。

早期的实验研究由于受实验设备和测量手段等条件限制具有一定的局限性,人为影响因素较多,实验和测量数据精确度不高,只能反映研究对象的某一个侧面。但人们通过各种实验方法,已逐步认识到环件轧制过程所具有的一些基本特性,为进一步深入地研究奠定了基础。

1.2.1.2 理论研究

由于早期开展的环件轧制实验研究受客观条件的局限,因此许多学者采用解析分析的方法对环件轧制进行了理论研究,主要有滑移线法和上限法。

1976 年,A. G. Mamalis 等^[24]首次采用平面滑移线法计算了矩形截面和 T 形截面环件轧制的轧制力和力矩分布情况,结果与实验测试结果比较吻合。华林等^[25,26]采用上限元法研究了矩形截面环件轧制力能参数计算方法,并采用平面滑移线法研究了矩形截面环件轧制的塑性穿透条件。D. Y. Yang 等^[27]采用上限元法研究了闭式孔型中内台阶截面环件轧制力能参数的计算方法。周存龙等^[28]采用上限元法研究了半闭式孔型中内台阶截面环件轧制力的计算方法。

经典的解析分析方法在环件轧制理论的发展过程中起到了一定的作用,为环件轧制工艺设计提供了理论分析的手段,对于预测轧制力、定性分析金属流动及近似确定最佳轧制条件,是非常有用的。但是,环件轧制是三维、非对称变形过程,具有典型的非线性、时变、非稳态特性,这使得对轧制过程的理论研究十分的困难。而环件轧制的解析分析方法大多对复杂的环件轧制过程进行了假设和简化,从而导致了分析计算结果与实际生产情况相差较大,尤其通用性受到一定的限制,缺乏分析诸如接触条件、材料性质、工件形状等对金属流动规律的影响,不能满足现代金属成形加工的需要。

1.2.1.3 有限元研究

20 世纪 80 年代末,随着计算机技术和塑性理论的发展,有限元方法逐渐应

用于金属塑性成形领域研究。采用有限元法分析金属塑性成形过程比解析分析方法更精确和详细,同时能避免实验方法所消耗的大量时间、人力和物力。因此,许多学者逐渐将有限元方法应用于环件轧制研究中。

1988年D. Y. Yang等^[29]最早采用刚塑性有限元方法对环件轧制的平面变形作了分析,获得了变形金属的速度场和沿着接触表面的外力,计算出了应变速率分布、驱动辊的转矩和垂直压力分布。其计算结果与实验数据相近。随后N. Kim、Y. Yea和许思广等^[30—32]分别采用三维刚塑性有限元方法对环件轧制过程进行了数值模拟研究。解春雷、李尚健等^[33—36]采用刚黏塑性动力显式有限元算法模拟了环件轧制过程,提出了环件轧制过程的刚黏塑性算法。

由于刚塑性有限元法忽略了环件的弹性变形,主要适用于环件热轧。而环件冷轧中存在回弹现象,弹性变形对环件几何尺寸精度影响较大,因此,刚塑性有限元法不能精确地分析环件冷轧变形。1994年,Z. M. Hu等^[37]最早采用弹塑性有限元法对环件冷轧进行了三维有限元建模和模拟,利用提出的模型对低碳钢环件进行了模拟,较好地对变形、应变和轧制力等参数进行了分析,并对轧制中的宽展现象进行了预测。随后K. Sawamiphadi和H. Utsunomiya等^[38,39]在此基础上先后采用显式弹塑性有限元模型对环件轧制过程进行了分析,其主要是利用显式有限元程序来分析各种冷轧工艺过程。结果发现,利用显式有限元分析,可以准确地得到轧制过程的各个参数,并节约大量的计算时间。K. Davey等^[40]通过ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)流动方程对环件轧制进行了模拟,提出了基于ALE流动方程的环件轧制有限元模型,它主要是基于ALE力学模型的有限元分析,比惯用的Lagrange程序可以节省大量的计算时间,同时指出真正较为准确的模拟环件冷轧的模型应该是弹塑性的,只有该模型才能较全面地模拟冷轧的基本过程。早期的环件轧制有限元研究从材料本构模型、求解算法、建模及网格划分等各方面促进了有限元理论和技术在环件轧制中的应用和发展,为后期环件轧制有限元模拟分析奠定了基础。

1.2.2 近期的环件轧制研究

早期的研究,丰富了环件轧制研究方法,为环件轧制技术提供了有力的工程科学理论支持,有效地促进了环件轧制技术在制造业的应用。进入21世纪以来,科技和信息飞速发展,国内外加工制造业逐渐向精密制造方向发展,这对产品的尺寸精度要求就更高。环件冷轧作为一种精密成形制造技术也已逐渐取代传统工艺,大量应用于轴承套圈加工生产,受到国内外轴承行业的高度重视。因而,对环件冷轧精密成形过程进行研究,有效提高冷轧环件产品的几何精度也成

为环件轧制的主要研究方向。在此大环境下,2004年,武汉理工大学与华中科技大学、西北工业大学联合开展了国家自然科学基金重点项目“金属环件冷辗扩塑性成形机理及工艺设备研究”,从冷轧成形规律、工艺设计及过程控制、模具寿命和设备结构设计、软件开发等方面对环件冷轧进行了深入的研究。

1.2.2.1 冷轧成形规律

采用弹塑性动力显示有限元法,建立了环件冷轧精确成形过程的三维有限元模拟模型,实现了环件冷轧过程的精确仿真^[41,42]。基于冷轧有限元模型,通过数值模拟研究了冷轧过程中环件的应力、应变分布和变化规律^[43],揭示了冷轧中环件的各种塑性变形行为^[44]。通过在D56G90精密数控冷轧环机上进行环件冷轧实验,研究了冷轧中环件的截面几何变化规律和宽展规律^[45-47]。

1.2.2.2 工艺设计及过程控制

设计了环件冷轧中芯辊的进给速度规范^[48,49],通过控制冷轧中环件的外径增长速度保持恒定的方法来设计芯辊进给速度,可以有效减少冷轧中环件的振动,提高成形环件的几何精度。研究了每转进给量、进给速度、转速、摩擦系数、轧辊尺寸等轧制工艺参数对环件冷轧成形的作用规律^[50-54]。研究了环件冷轧中导向辊的随动位置、运动轨迹及控制方法^[55-61]。

1.2.2.3 模具寿命和设备结构设计

通过实验测试,进行了环件冷轧中芯辊的疲劳断裂和寿命分析,探明了冷辗扩芯辊损伤破坏机理,研究了芯辊材料和热处理工艺对疲劳强度和寿命的影响^[62-65]。建立了精密冷轧环机的工艺动力学模型^[66],以D56G90精密数控冷轧环机为研究对象,对其机架和进给系统进行了动态变形仿真分析和刚度分析^[67-71]。进行了最大加工直径为350 mm的大型冷轧环机的虚拟样机设计和运动仿真分析^[72,73]。

1.2.2.4 软件开发

基于弹塑性动力显示有限元法,开发了专用的环件冷轧数值模拟软件^[74-76]。开发了环件冷轧CAPP系统^[77]。

以上这些研究结果极大地充实了环件冷轧理论和技术,有效推进了我国环件冷轧技术生产水平的发展。

1.2.3 异形截面环件轧制研究

目前,工业应用较多的典型异形截面环件有沟槽截面环件(内沟槽、外沟槽、双沟槽截面环件等)和台阶截面环件(外台阶、内台阶、外凸台、内凸台截面环件等),它们广泛应用于机械、汽车、航空航天、能源等众多工业领域。然而,目前关于环件轧制的研究大多集中于矩形截面环件轧制,而关于异形截面环件轧制的研究却相对甚少。截至2008年,SCI收录的环件轧制研究文献约有85篇,其中异形截面环件轧制研究文献只有22篇,占25.9%;中国期刊网收录的环件轧制研究文献约有143篇,异形截面环件轧制研究文献只有29篇,占20.3%。由此可看出,无论是国内还是国外,关于异形截面环件轧制的研究都相对缺乏。目前,有文献报道的异形截面环件轧制研究主要集中于台阶截面环件和沟槽截面环件轧制。

1.2.3.1 台阶截面环件轧制研究

1976年,A. G. Mamalis等^[24]最早采用滑移线法计算了由矩形截面毛坯轧制成内凸台截面环件过程中的轧制力和力矩分布。随后,N. Kim、D. Y. Yang等^[30,78]采用刚塑性有限元法模拟了由矩形截面毛坯轧制成内凸台截面环件的轧制过程,K. Davey等^[79]则采用弹塑性有限元法研究了矩形截面毛坯轧制成内凸台截面环件的轧制过程。李兰云等^[80]采用弹塑性动力显示有限元法研究了材料性能、进给速度和转速对内凸台截面环件轧制成形的影响规律。D. Y. Yang等^[27]采用上限元法研究了内台阶截面环件闭式轧制时的力能参数计算方法,通过建立三维动可容速度场进行分析,提出了轧制力能参数的计算方法。周存龙等^[28]在此基础上也采用上限元法研究了内台阶截面环件半闭式轧制时的轧制力计算方法。华林等^[81—87]结合静力学、运动学和塑性成形理论,对内台阶和外台阶截面环件轧制变形的力学和几何学规律进行了初步探讨,研究了轧制中的体积流动规律、尺寸变化规律和轧制缺陷。这些研究为台阶截面环件轧制成形理论和工艺设计研究提供了一定的理论指导。

然而,以上这些研究均选取了一种截面形状中环件毛坯。由于孔型复杂,台阶截面环件轧制中毛坯形状和尺寸不同时,其与轧辊间的接触模式也会不同,从而在孔型中的受力和变形条件也不同,直接影响到轧制中的变形规律。因此,以上文献单一地选择一种截面形状毛坯进行研究具有局限性。此外,以上关于台阶截面环件轧制的有限元研究中,大多侧重于有限元技术的创新和改进,并不是运用有限元方法去深入研究和揭示轧制中的成形机理和规律。而相关解析方法研究则基

于许多假设和简化,导致结果精确度不高。因此,虽然一些学者对台阶截面环件轧制开展了研究,但研究的基础性和连续性不够,没有形成系统的理论体系。

1.2.3.2 沟槽截面环件轧制研究

华林、左治江等^[2,55,88]最先对沟槽截面环件冷轧过程进行了研究。他们以 6308 深沟球轴承外圈冷轧成形为例,计算了其冷轧过程中随动导向辊的运动轨迹。随后设计了相关轧制工艺参数,建立了冷轧成形的三维有限元模型,对冷轧过程进行了数值模拟,并在 D56G90 精密数控冷轧环机上进行冷轧实验,模拟结果与实验结果较吻合。研究结果为沟槽截面环件冷轧工艺设计提供了理论依据。但以上研究偏重于 6308 深沟球轴承外圈这一特定型号环件冷轧的工艺研究,缺乏对沟槽截面环件冷轧成形物理机理、运动变形规律、几何精度传递规律等方面的基础理论研究。因此,沟槽截面环件冷轧虽然已经开展了相关研究,但相关基础理论尚属空白,没有形成系统的理论体系。

除台阶截面环件和沟槽截面环件之外,还有一些学者对其他异形截面环件的轧制成形进行了相关研究。如,文献[89]~[94]对锥形截面环件轧制用毛坯和工艺参数进行了优化设计;文献[95]、[96]进行了圆锥滚子轴承套圈封闭轧制实验,并设计了一种圆锥滚子轴承套圈的对称轧制工艺;文献[97]、[98]通过模拟和实验研究了一种梯形截面环件冷轧的变形规律,并设计了相关工艺参数。但是这些研究有的是针对热轧成形,有的则是偏重于工艺研究,同样缺乏基础理论研究。

综合分析国内、外环件轧制研究现状可知,针对矩形截面环件轧制变形,国内、外许多学者进行了深入研究,已经形成较完善的该类环件轧制成形理论和工艺体系。而异形截面环件轧制研究相对较少且不够深入,大多偏重于工艺研究,缺乏基础理论研究,因而不能形成系统完善的理论体系,以至于异形截面环件轧制成形理论和技术设计方法一直不能建立起来。这种情况严重影响了异形截面环件轧制技术的应用和发展。

1.3 课题的来源、目的和意义

1.3.1 课题来源

本课题研究内容是高等学校博士学科点专项科研基金“异形截面环件轧制成形理论和技术基础研究”(项目编号 20060497014)和国家自然科学基金面上

项目“环件冷轧——淬火中细——微观变形与损伤规律研究”(项目编号 50675164)的一部分。

1.3.2 课题研究的目的、意义

环件分为简单的矩形截面环件和复杂形状异形截面环件两大类。异形截面环件冷轧是一个快速时变的物理过程。它不仅具有平板轧制、异步轧制、型材轧制、多道次轧制的特点,而且轧制过程中进给运动、轧制运动、导向运动与环件运动相互作用,弹性变形、塑性变形与环件材料组织性能、几何精度相互作用,在材料物理、塑性变形、几何学、静力学、运动学、动力学等多方面表现出了多因素耦合和高度的复杂性。从生产应用状况来看,环件冷轧技术目前主要应用于矩形或近矩形截面等简单形状中环件轧制生产,而在技术经济上更具优势的异形截面环件冷轧成形技术一直停滞不前。究其深层次原因,在于异形截面环件冷轧过程中,轧制进给运动与环件直径扩大运动、环件自身转动以及轧环机振动之间存在着高阶的非线性作用;截面轮廓成形与直径扩大并非同步进行,已经成形的截面轮廓在后续轧制中还可能逐渐消失,轧制变形规律十分复杂。而目前关于环件轧制技术的科学理论研究主要集中于矩形或近矩形截面环件轧制,异形截面环件轧制研究较少,其轧制工程科学理论尚属空白。由于缺乏科学理论依据,异形截面环件冷轧生产设计只能依赖于经验和轧制工艺试验,存在着较大的盲目性,常常是耗费了大量的人力、物力和时间也不能获得成功。因此,为了促进环件轧制技术的应用和发展,迫切需要研究和建立异形截面环件冷轧成形理论。

基于以上现状,开展本文研究旨在探索异形截面环件冷轧塑性变形机制和规律,探索轧制过程中的几何学、运动学、动力学机制和规律,研究异形截面环件冷轧成形规律、轧制用毛坯和孔型设计方法及工艺参数设计方法,建立系统的异形截面环件冷轧成形工程科学理论和技术方法,从而促进异形截面环件冷轧技术的应用和发展,提高我国异形截面环件生产的节能节材效果和技术经济水平。

1.4 本文的主要研究内容

1.4.1 异形截面环件冷轧力学条件

通过几何学、静力学、塑性力学分析计算,结合异形截面环件冷轧成形模拟和实验测试,研究沟槽形、外台阶、内台阶、内凸台等典型异形截面环件冷轧过程中咬入孔型机制和塑性穿透机制,建立相应的冷轧力学条件和判据。

1.4.2 异形截面环件冷轧成形规律

通过几何学、运动学、塑性成形理论、轧制成形运动学和动力学分析计算,结合异形截面环件冷轧成形模拟,研究沟槽形、外台阶、内台阶、内凸台截面环件冷轧成形的几何学、运动学和塑性变形规律。揭示轧制变形过程中,直线进给速度、旋转轧制速度与孔型充满速度、充满程度之间的关系;进给运动、轧制运动与环件运动、轮廓成形之间的相互作用机制和规律。探讨冷轧过程中环件直径、壁厚、截面轮廓等几何形状的变化规律,以及轧制工艺参数对环件冷轧成形的作用规律。

1.4.3 异形截面环件冷轧工艺设计方法

基于异形截面环件冷轧力学条件及运动变形规律,通过几何学、塑性成形理论、轧制理论等分析计算,结合成形数值模拟和实验测试,建立沟槽形、外台阶、内台阶、内凸台截面环件冷轧用毛坯、孔型及轧制工艺参数的设计方法。