

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

环件轧制理论和技术

华林 黄兴高 朱春东 著



机械工业出版社
China Machine Press

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目
塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室资助项目

环件轧制理论和技术

华 林 黄兴高 朱春东 著



机械工业出版社

本书的作者经过长期的理论和实践探索,从静力学、运动学、动力学、几何学、塑性成形原理和系统控制等方面深入研究了环件轧制条件、成形流动规律、力能计算方法、工艺设计方法和过程控制方法,揭示了环件轧制的物理本质,建立了环件轧制理论体系。从环件轧制技术生产应用出发,系统阐述了环件轧制工艺的下料、加热、制坯、轧制成形、轧制工艺调试以及环件轧制设备,充分体现了理论与应用的结合。书中介绍的环件轧制工艺流程、工步设计、生产组织等,是对大量环件轧制生产实践的总结和归纳,具有很强的实用性。

本书的出版填补了环件轧制技术著作的空白,将会对从事环件轧制研究和生产的科技工作者提供有力的帮助,而且将有利于促进我国环件轧制技术的应用和发展。

本书可供材料成形与控制工程专业特别是压力加工、特种成形、轴承制造等领域的人员和工程技术人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

环件轧制理论和技术/华林等著. —北京:机械工业出版社, 2001.10

ISBN 7-111-09175-2

I. 环… II. 华… III. 环形-零部件-轧制
N. TG33

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第051455号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨燕 王霄飞 版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧

封面设计:鞠扬 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年10月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·8.5印张·2插页·330千字

0 001—1 500册

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

序

我们面前的这本书，是系统阐述环件轧制理论、工艺、设备、控制的第一本专著，是特种轧制领域研究中有重要学术价值和实际意义的一项新成果，也是我国学者对特种轧制技术的新贡献。

自 19 世纪中叶英国制造第一台轧环机以来，经历 100 多年的发展，已在机械、汽车、冶金、船舶、化工、能源、航空航天等工业领域中得到广泛应用。至今，用环件轧制方法生产零件的直径可达 $40 \sim 10000\text{mm}$ ，重量可达 $0.2 \sim 82000\text{kg}$ ；轧制的材料包括黑色、有色以及各种合金。与此形成强烈反差的是，还没有一本全面阐述环件轧制的著作。所以，本书的出版必将对环件轧制技术发展与应用起促进作用。

零件轧制又称回转塑性成形，由于它与普通锻造成形比较，具有载荷小、效率高、节材、无冲击、低噪声、工作环境好等优点，成为当今先进制造技术的组成部分。环件轧制是零件轧制中的重要组成部分，本书的出版是零件轧制领域研究中既有理论价值，又有实际意义的新成果。

环形轧制虽属轧制范畴，但有许多特殊之处，它不仅具有普通的平板轧制、异步轧制、多道次轧制的性质，而且具有这些轧制的耦合性质。环件轧制涉及到直线进给运动、旋转轧制运动、导向运动以及环件自身的转动和直径扩大运动，而且轧制过程是时变的，具有高度的几何非线性和物理非线性。这使得环件轧制物理力学机制变得极为复杂，研究工作难度大。本书作者经过长期理论和实践探索，从静力学、运动学、动力学、几何学、塑性成形原理和系统控制等方面深入研究了环件轧制条件、成形流动规律、力能计算方法、工艺设计方法和过程控制方法等，揭示了环件轧制的物理本质，建立了环件轧制理论体系。

作者还从环件轧制技术生产应用出发，系统阐述了环件轧制工艺的下料、加热、制坯、轧制成形、轧制工艺调试及环件轧制设备，充分体现了理论与实际的结合。

书中在深入研究的基础上建立了环件轧制咬入条件、锻透条件与

刚度条件；环件轧制力能匹配计算方法；环件轧制直线进给速度和旋转轧制速度极限范围；环件轧制线性振动和非线性振动的临界条件与稳定性条件；环件轧制孔型和轧制环件精度的空间啮合设计方法；环件轧制工艺参数设计方法和轧制工艺调试优化方法；轧制过程环件尺寸在线检测方法和精度控制方法等，这些都是环件轧制研究的创新性成果。

书中介绍的环件轧制工艺流程、工步设计、生产组织等，是对大量环件轧制生产实践的归纳与总结，具有很强的实用性。

本书的出版填补了环件轧制技术著作的空白，将对从事环件轧制研究和生产的科技工作者提供有力的帮助，将促进我国环件轧制技术的应用和发展。对从事机械锻压与冶金轧制的科技人员也是一本很好的参考书。我很高兴为该书作序，并祝贺作者在环件轧制研究和开发中取得更大成绩。

中国塑性工程学会理事长

中 国 工 程 院 院 士

二〇〇〇年十二月

前 言

环件轧制是机械零件制造技术与轧制技术交叉复合而成的环形零件连续局部塑性成形新技术，它具有省力、节能、节材、生产率高、生产成本低、产品范围广等显著特点。在机械、汽车、火车、船舶、冶金、化工、能源、航空航天等许多工业领域中日益得到了广泛的应用，成为轴承环、齿轮环、法兰环、火车车轮、燃汽轮机环等各种无缝环形零件的先进制造技术和主要加工方法。

本书是在作者多年的理论研究、实验研究和生产实践之基础上写成的，系统阐述了环件轧制成形原理、力能计算、工艺和模具设计、轧制设备、轧制过程控制等，并注重理论与实际的结合，技术与应用的结合，工艺与产品的结合。

本书由武汉理工大学华林教授、朱春东副教授和洛阳矿山机器厂黄兴高高级工程师合作完成。华林撰写第一～五章，黄兴高撰写第六章，朱春东撰写第七章。武汉理工大学李佐新先生绘制了书中的插图。

本书的研究工作得到了原机械工业部科技攻关项目、湖北省自然科学基金项目、塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室开放基金项目、教育部国家重点实验室访问学者基金项目的资助。本书的出版得到了机械工业出版社高水平学术著作出版基金的资助。在此，作者表示衷心的感谢。

环件轧制技术发展很快，许多理论与实际问题尚处在认识之中，殷切期望读者对本书批评指正。

作 者

2000 年 10 月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 环件轧制的分类	2
一、径向轧制	2
二、径一轴向轧制	2
第二节 环件轧制应用和发展	3
一、环件轧制应用	3
二、环件轧制的历史和发展	3
第三节 环件轧制技术经济性	4
第二章 环件轧制力学原理	6
第一节 环件轧制静力学	6
一、环件咬入过程分析	6
二、环件锻造状况分析	11
三、环件塑性失稳分析	13
第二节 环件轧制力能计算	16
一、力能计算中的问题	16
二、力能计算方法	17
三、力能计算实验验证	32
四、力能计算分析比较	33
五、环件轧制力和力矩影响因素	36
第三节 环件轧制运动学	38
一、轧制变形区运动学方程	38
二、环件轧制中的前滑和后滑	40
三、环件直径扩大运动	44
四、环件旋转运动	46
五、轧制直线进给运动	46
六、驱动辊旋转轧制运动	50
七、轧制生产率	51
第四节 环件轧制动力学	54
一、环件轧制中的形状	54
二、环件轧制动力学模型	58

三、环件轧制动力学方程	60
四、线性振动分析	61
五、非线性振动分析	63
第三章 环件轧制变形和成形规律	72
第一节 矩形截面环件轧制变形规律	72
一、塑性变形区分布	72
二、宽展变形	73
三、环件椭圆度	81
第二节 非矩形截面环件轧制成形规律	83
一、截面轮廓充满难度	83
二、台阶截面环件轧制拉缩和充满	85
三、内台阶截面环件轧制成形流动	90
四、外台阶截面环件轧制成形	94
五、台阶截面环件轧制实验	96
六、非矩形截面环件轧制成形缺陷	100
第四章 环件轧制工艺	101
第一节 下料	101
一、剪切	101
二、锯切	114
三、其他下料方法	114
四、材料下料定额	116
第二节 加热	117
一、加热方法及特点	117
二、锻造温度范围	119
三、加热规范	122
四、环件轧制加热特点	127
第三节 环件锻件和毛坯设计	128
一、环件锻件图设计	129
二、环件毛坯设计原理和方法	137
三、典型环件毛坯设计举例	141
第四节 环件毛坯制造	144
一、自由锻制坯	144
二、平锻机制坯	151
三、压力机制坯	162
四、联合制坯	175
第五节 环件轧制孔型设计和调试	175
一、轧制孔型分类	176

二、轧制孔型设计	177
三、轧制孔型工作尺寸设计示例	179
四、其他轧制工具设计	184
五、轧制孔型安装调试	184
第六节 基于啮合理论的轧制孔型设计	186
一、环件轧制啮合分析	186
二、平面轧制孔型啮合设计方法	187
三、平面共轭曲线孔型轮廓设计举例	188
四、空间轧制孔型共轭曲面啮合设计方法	189
五、轧制孔型空间共轭曲面啮合设计示例	191
第七节 轧制工艺参数设计	192
一、轧辊极限直径	192
二、环件极限壁厚	193
三、轧制比	193
四、轧制温度和压力	195
五、每转进给量	195
六、进给速度和轧制时间	196
七、轧制工艺规程	197
第八节 环件轧制缺陷和工艺调试	198
一、轧制缺陷形成机制和防止对策	198
二、轧辊变形对环件精度的影响及其补偿	201
三、环件毛坯轧制优化试验	203
四、轧辊空间角位移对轧制环件几何精度影响	205
第五章 环件轧制设备	208
第一节 立式轧环机	208
一、结构形式和工作原理	208
二、主要技术参数和应用	209
第二节 卧式轧环机	210
一、结构形式和工作原理	210
二、主要技术参数和应用	212
第三节 多工位轧环机	213
一、工作原理	213
二、主要技术参数和应用	214
第四节 卧式轧环机主要部件	214
一、主滑块机构	214
二、轴向轧制机构	215
三、定心机构	215
第五节 环件轧制生产线	216

一、环件轧制生产线构成	216
二、典型环件轧制生产线	217
第六章 径一轴向轧环理论与应用	219
第一节 径一轴向轧环机的发展	219
第二节 径一轴向轧环时的几何尺寸	220
一、径向轧制变形区	220
二、轴向轧制变形区	222
第三节 轧环过程的运动学	223
一、轧制时环的尺寸变化	223
二、孔型转速的调整	226
三、轴向立柱的移动	227
四、环位调节	227
第四节 轧环时的展宽	228
第五节 对环位和环的圆度的影响	229
第六节 实际轧制过程的分析 and 优化	230
一、干扰引起的现象	230
二、对轧制过程进行优化	234
第七节 加工余量和公差	234
一、术语的定义	234
二、最小加工余量	234
三、与公差有关的加工余量	235
四、提高尺寸精度和形状精度的方法	236
第八节 轧制矩形环时环坯尺寸的计算	237
一、环坯高度的简单确定	238
二、根据环的高度和壁厚关系确定环坯的高	238
第九节 大型轧环件的工艺流程	239
第七章 环件轧制过程控制	244
第一节 手动控制	244
一、控制原理	244
二、控制装置	244
第二节 计算机控制	247
一、锻压设备控制发展动态	247
二、轧环机控制发展概况	248
三、控制原理	249
四、计算机控制的硬件组成	250
五、软件的结构及功能	250
六、工件尺寸检测的原理及方法	251

七、控制算法	252
八、控制系统的调整与维修	256
参考文献	258

第一章 绪 论

环件轧制又称环件辗扩或扩孔，它是借助环件轧制设备——轧环机（又称辗扩机或扩孔机）使环件产生壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形的塑性加工工艺。环件轧制是连续局部塑性加工成形工艺，与整体模锻成形工艺相比，它具有大幅度降低设备吨位和投资、振动冲击小、节能节材、生产成本低等显著技术经济优点，是轴承环、齿轮环、法兰环、火车车轮及轮箍、燃汽轮机环等各类无缝环件的先进制造技术，在机械、汽车、火车、船舶、石油化工、航空航天、原子能等许多工业领域中日益得到广泛的应用。

环件轧制是轧制技术与机械零件制造技术的交叉和结合，它有如下特点：①驱动辊与芯辊直径相差悬殊；②驱动辊作主动旋转轧制运动，芯辊作从动旋转轧制运动，且它们的转速不同；③旋转轧制运动与直线进给运动相互独立；④径向轧制运动与端面轴向轧制运动相互制约，并都受到导向运动的约束与干涉；⑤轧制中环坯反复多次通过高度逐渐减小的轧制孔型；⑥环件变形区几何边界是复杂的、不稳定的，变形的热、力条件也是动态变化的。由于这些特点，环件轧制不仅表现出了普通平板轧制、异步轧制、型材轧制、多道次轧制的性质，而且还表现出了这些轧制的耦合性质。环件轧制不仅表现出了几何非线性和物理非线性，而且还表现出了几何非线性和物理非线性的耦合性质。环件轧制不仅受到静力学、运动学和动力学因素的影响，而且还受到这些因素的耦合影响，因而环件轧制变形具有高度的复杂性。

环件轧制中存在并经常发生：①环件在孔型中不转动；②环件在孔型中转动但直径不扩大；③环件及轧辊强烈自激振动；④环件突然压扁；⑤环件直径扩大速度剧烈变化；⑥已经成形的环件截面轮廓在轧制中又逐渐消失等各种特有现象。任一现象的出现将会破坏环件轧制的稳定性，导致环件轧制过程无法进行，并产生轧制废次品。现有的环件轧制理论还无法阐明这些现象，因而从工艺设计和过程控制上主动消除和避免这些现象还难以做到。关于环件轧制工艺设计，有关设计手册只是给出了一些经验性的原则，缺乏系统的设计计算方法，难以满足环件轧制技术应用和发展的需要。鉴此，本书作者从理论、实验和生产应用上对环件轧制技术进行了系统深入的研究，以期为环件轧制技术设计提供依据和方法，进而促进我国环件轧制技术发展，提高环件轧制技术经济水平。

第一节 环件轧制的分类

一、径向轧制

以立式径向轧环机轧制成形为例,环件径向轧制原理如图 1-1 所示。驱动辊为主动辊,同时作旋转轧制运动和直线进给运动;芯辊为被动辊,作从动旋转轧制运动;导向辊和信号辊都为可自由转动的从动辊。在驱动辊作用下,环件通过驱动辊与芯辊构成的轧制孔型产生连续局部塑性变形,使环件壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形。当环件经过多转轧制变形且直径扩大到预定尺寸时,环件外圆表面与信号辊接触,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了环件的平稳转动。环件径向轧制中,驱动辊旋转轧制运动由电动机提供动力,直线进给运动由液压或气动装置提供动力,其他轧辊运动无需提供动力,而在环件摩擦力作用下随环件作从动运动。环件径向轧制设备结构简单,广泛地用于中小型环件轧制生产,但轧制的环件端面质量难以保证,环件端面常有凹坑缺陷。

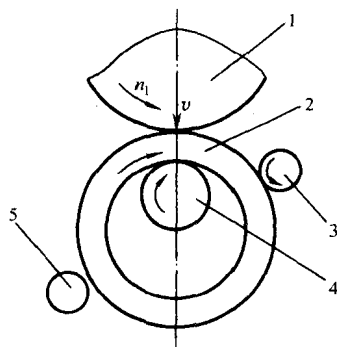


图 1-1 环件径向轧制原理

1—驱动辊 2—环件 3—导向辊
4—芯辊 5—信号辊

二、径—轴向轧制

为了改善轧制环件的端面质量、轧制成形复杂截面轮廓的环件,在径向环件轧制设备的基础上,增加一对轴向端面轧辊,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再经过轴向端面轧制而得以修复平整,且轴向端面轧制还可使环件获得复杂的截面轮廓形状。环件径—轴向轧制如图 1-2 所示,驱动辊作旋转轧制运动,芯辊作径向直线进给运动,端面轧辊作旋转端面轧制运动和轴向进给运动。在径—轴向轧制中,环件产生径向壁厚减小、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端面辊的轴向进给运动停止,环件径—轴向轧制变形结束。环

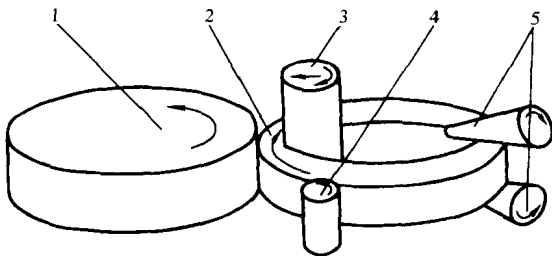


图 1-2 环件径—轴向轧制原理

1—驱动辊 2—环件 3—芯辊 4—导向辊 5—端面轧辊

件径一轴向轧制设备结构复杂，主要用于大型复杂截面环件轧制生产。

第二节 环件轧制应用和发展

一、环件轧制应用

环件轧制适于生产各种形状尺寸、各种材料的环形零件或毛坯。目前轧制环件的直径为 $\phi 40 \sim \phi 10000\text{mm}$ ，高度为 $15 \sim 4000\text{mm}$ ，最小壁厚为 $16 \sim 48\text{mm}$ ，环件的重量为 $0.2 \sim 82000\text{kg}$ 。环件的材料通常为碳钢、合金钢、铝合金、铜合金、钛合金、钴合金、镍基合金等。常见的轧制环件产品有轴承环、齿轮环、火车车轮及轮箍、燃汽轮机环、集电环等，最大的轧制环件是直径 $\phi 10000\text{mm}$ 、高度 4000mm 的核反应堆容器环件。典型的轧制环件产品形状如图 1-3 所示。

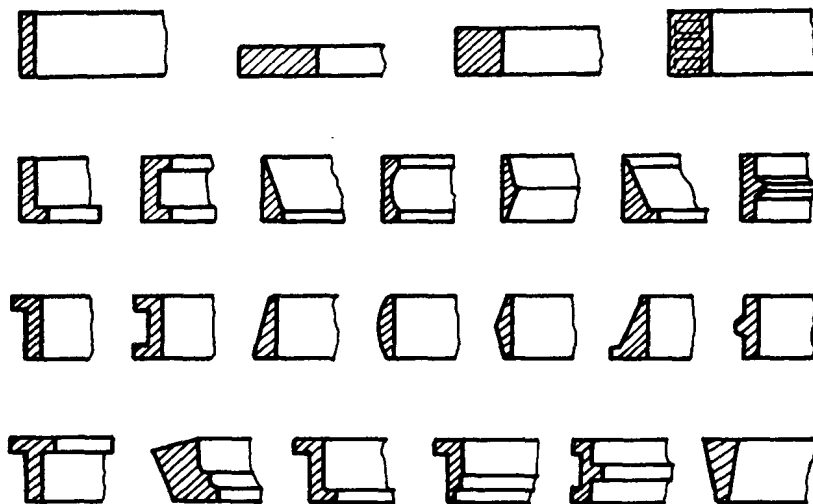


图 1-3 环件轧制典型产品形状

二、环件轧制的历史和发展

环件轧制技术是伴随着铁路运输业的发展而产生的。自 19 世纪中叶以来，铁路系统的迅速发展使得火车的行驶速度和载重量大幅度提高。火车的铸铁车轮无法满足高速重载的使用要求，于是人们在火车铸铁车轮上装备性能更好的、可更换的钢质轮箍。为了生产火车轮箍，1842 年英国建造了轮箍轧机，1886 年俄国奥斯特洛维茨炼铁铸造厂设立了火车轮箍生产车间。随后，环件轧制技术不仅在火车轮箍、火车车轮生产中得到了广泛应用，在其他环形机械零件生产中也逐步得到了推广应用。我国于 20 世纪 50 年代开始应用环件轧制技术生产轴承环，1959 年在上海建立了锤—压力机—扩孔机的轴承环轧制生产线。现在，环件轧制技术已经成为环形机械零件生产的高效、先进和主要工艺方法之一，并向着以下几

个方向迅速发展。

(1) 大型环件轧制技术 直径 $\phi 2000\text{mm}$ 以上的大型环件越来越多地采用环件轧制工艺生产, 而原来的马架扩孔工艺由于劳动强度大、生产率低、环件尺寸精度低、加工余量大等缺点逐步被淘汰。直径 $\phi 2000 \sim \phi 10000\text{mm}$ 环件轧制设备在美国、德国、英国、法国、日本、俄罗斯等国家的安装数量迅速增加, 我国洛阳矿山机器厂也从德国引进了直径 $\phi 5500\text{mm}$ 的环件轧制设备。

(2) 高速环件轧制技术 随着环件轧制设备及其上、下料辅助设备的机械化自动化程度的提高, 环件轧制速度和生产率随之迅速提高。小型轴承环轧制自动生产线, 不仅下料、加热、制坯、轧制工艺过程实现了流水自动生产, 而且生产率达到了 $300 \sim 1000$ 件/h。

(3) 精密环件轧制技术 随着制坯的精度和环件轧制过程测控系统的进展, 环件轧制精度逐步提高, 精密环件轧制技术迅速发展。目前, 精密轧制的环件直径尺寸精度可达到 $1/1000$ 。

(4) 复杂环件轧制技术 一般环件轧制主要用于生产截面为矩形或近矩形的环状零件, 复杂截面的环件通常简化成近矩形截面的环件进行轧制生产, 然后再进行机械切削加工。为了减少机械加工量、提高环件材料利用率, 复杂截面环件成形轧制生产得到高度重视和迅速发展。通过轧制用毛坯的优化和轧制孔型的合理设计, 许多复杂截面的环件逐步实现了直接成形轧制生产。

(5) 柔性环件轧制技术 为了满足小批量、多品种、多规格环件轧制生产, 具有轧制孔型快速更换、工作参数调节方便的柔性环件轧制设备受到了重视。目前已有的柔性环件轧制设备, 其轧制孔型更换时间为 $1.5 \sim 2\text{h}$, 轧制的环件直径为 $\phi 250 \sim 900\text{mm}$, 重量为 $20 \sim 100\text{kg}$, 非常适合每批环件数量为 50 件的小批量轧制生产。

第三节 环件轧制技术经济性

环件轧制工艺通常是以锻锤—轧环机、平锻机—轧环机、锻锤—压力机—轧环机等设备配置在一起组织生产, 与传统的环件自由锻造工艺、环件模锻工艺、环件火焰切割工艺相比, 具有较好的技术经济效果, 具体表现在以下几个方面:

(1) 环件精度高、加工余量少、材料利用率高 轧制成形的环件几何精确度与模锻环件相当, 制坯冲孔连皮小, 而且无飞边材料消耗。与环件自由锻工艺和火焰切割工艺相比, 轧制成形环件精度大为提高, 加工余量大为减少, 而且环件表面不存在自由锻与马架扩孔的多棱形和火焰切割的粗糙层。

(2) 环件内部质量好 轧制成形的环件, 内部组织致密, 晶粒细小, 纤维沿圆周方向排列, 其机械强度、耐磨性和疲劳寿命明显高于其他锻造和机械加工生产

的环件。

(3) 设备吨位小、投资少、加工范围大 环件轧制变形是通过局部变形的积累而实现环件成形的。与整体模锻变形相比,环件轧制变形力大幅度减小,因而轧制设备吨位大幅度降低,设备投资大幅度减少。EQ140 汽车后桥从动锥齿轮锻件为 $\phi 382\text{mm}$ 的环件,其整体模锻成形需要 8000t 热模锻压力机,而采用环件轧制工艺仅需 750kg 空气锤制坯和 D51-400 扩孔机轧制成形。D51-400 扩孔机吨位为 18t,其吨位和设备投资远远小于模锻设备。一般的环件轧制设备加工的环件尺寸范围较大,所加工的环件最大直径与最小直径相差 3~5 倍,最大重量与最小重量相差数十倍,这是其他的加工设备难以达到的。

(4) 生产率高 环件轧制设备的轧制速度通常为 $1\sim 2\text{m/s}$,轧制周期一般为 10s 左右,最小周期已达 3.6s,最大生产率已达 1000 件/h,大大高于环件的自由锻造和火焰切割,也高于模锻生产率。

(5) 生产成本低 环件轧制具有材料利用率高、机加工工时少、生产能耗低、轧制孔型寿命长等综合优点,因而生产成本较低。德国制造 $\phi 3500\text{mm}\times 110\text{mm}\times 90\text{mm}$ 的碳钢环件,自由锻比轧制生产成本高 77%,火焰切割比轧制生产成本高 16%。前苏联统计,环件轧制与自由锻相比,材料消耗降低 40%~50%,生产成本降低 75%。用环件轧制生产 EQ140 汽车后桥从动锥齿轮锻件,相对于模锻成形单件材料消耗降低 5kg,生产成本降低 20%。

第二章 环件轧制力学原理

第一节 环件轧制静力学

环件轧制过程可分为环件咬入建立轧制过程阶段、稳定轧制阶段、轧制结束阶段。在环件稳定轧制阶段，进给速度和旋转轧制速度都不大，而且速度变化也较小，近似处于静力平衡状态。根据静力学理论对环件的咬入过程、锻透状态和塑性弯曲失稳情况进行研究分析，建立相应的物理力学模型、条件和判据，以揭示环件轧制静力学机制和规律。

一、环件咬入过程分析

(一) 咬入力学模型和条件

环件轧制类似于轧钢中的穿孔轧制，环件连续咬入孔型是环件转动并实现稳定轧制的必要条件。忽略导向辊对环件的作用力，提出环件咬入孔型的力学模型如图 2-1 所示。图中， P_1 和 T_1 分别为驱动辊对环件的正压力和摩擦力， P_2 为芯辊对环件的正压力（芯辊为空转辊，它随环件一起转动，不能承受摩擦力矩，所以芯辊对环件摩擦力的合力为零，而仅有正压力）。记 α_1 、 α_2 分别为驱动辊和芯辊与环件的接触角， R_1 、 R_2 分别为驱动辊和芯辊的工作半径， h_0 、 h 分别为环件在孔型入口处和出口处的壁厚， $\Delta h = h_0 - h$ 为环件轧制中每转壁厚减小量， n_1 为驱动辊转速， L 为接触弧长在进给方向的投影长度。设驱动辊对环件合力作用点位于环件外圆接触弧的 $\xi_1 \alpha_1$ 角处，芯辊对环件合力作用点位于环件内孔接触弧的 $\xi_2 \alpha_2$ 角处，这里 ξ_1 、 ξ_2 为系数，且 ξ_1 和 $\xi_2 \in (0, 1)$ 。要使环件咬入孔型，则环件所受的拽入力必须大于或等于它所受的推出力，而进给方向环件的受力是平衡的。据此由图 2-1 的环件受力条件得：

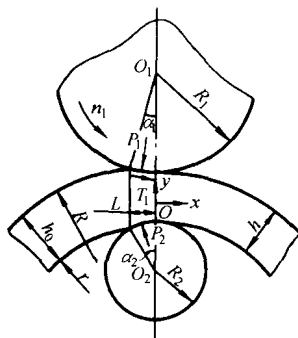


图 2-1 环件轧制咬入孔型模型

$$\Sigma F_x = T_{1x} + P_{1x} + P_{2x} = T_1 \cos(\xi_1 \alpha_1) - P_1 \sin(\xi_1 \alpha_1) - P_2 \sin(\xi_2 \alpha_2) \geq 0 \quad (2-1)$$

$$\Sigma F_y = T_{1y} + P_{1y} + P_{2y} = -T_1 \sin(\xi_1 \alpha_1) - P_1 \cos(\xi_1 \alpha_1) + P_2 \cos(\xi_2 \alpha_2) = 0 \quad (2-2)$$

设环件与轧辊之间的接触摩擦符合库仑摩擦定律并记摩擦系数为 μ ，则有

$$T_1 = \mu P_1 \quad (2-3)$$