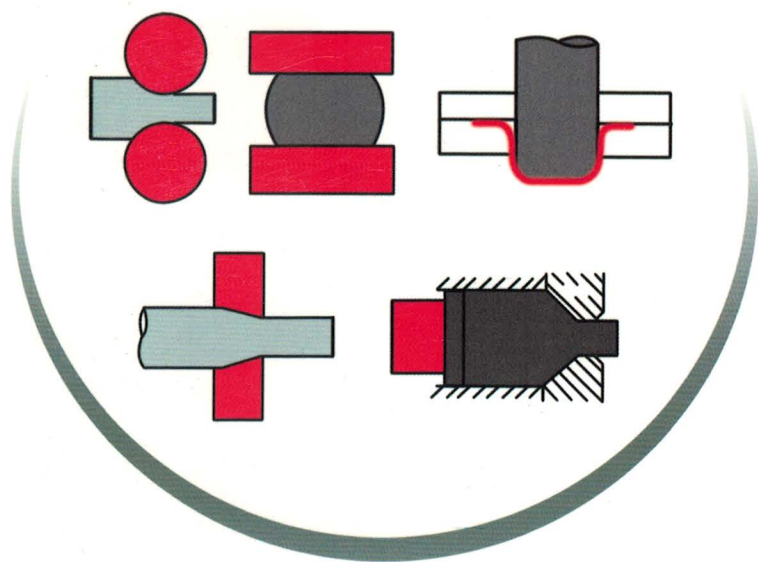


高等院校材料科学与工程专业规划教材

固态成形 原理与控制

康永林 韩静涛◎等编著



高等院校材料科学与工程专业规划教材

固态成形原理与控制

康永林 韩静涛 等编著



机械工业出版社

本书以高等院校材料科学与工程专业的规划教材大纲为基础,重点针对“材料成形与控制工程”本科专业教学及相关研究的需要编写。全书共5章,主要内容包括:轧制原理与控制、锻造原理与控制、板材成形原理与控制、挤压成形原理与控制、拉拔成形原理与控制。

本书可供材料成形与控制工程、金属材料工程和材料科学与工程专业的本科生使用,也可供有关专业的研究生和生产、科研与设计相关部门的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

固态成形原理与控制/康永林等编著. —北京:机械工业出版社, 2017.9

ISBN 978-7-111-58086-7

I. ①固… II. ①康… III. ①工程材料-成型-控制-高等学校-教材
IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第234762号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:何月秋 责任编辑:何月秋 贺怡

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明

责任印制:张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·425千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58086-7

定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是根据高等院校材料科学与工程专业规划教材大纲，以2008年版《固态成形工艺原理与控制》为基础，重点针对“材料成形与控制工程”本科专业教学及相关研究的需要编写的。全书共5章，主要内容包括：轧制原理与控制、锻造原理与控制、板材成形原理与控制、挤压成形原理与控制、拉拔成形原理与控制。

本书由康永林、韩静涛等编著，绪论由韩静涛编写，第1章1.1~1.7、1.9节由康永林编写，1.8节由孙建林编写，第2章由刘靖编写，第3章由王开坤编写，第4章及第5章由韩静涛编写。

本书可供材料成形与控制工程、金属材料工程和材料科学与工程专业的本科生使用，也可供有关专业的研究生和生产、科研与设计相关部门的科技人员参考。

本书在编写结构、内容取舍和编排等方面尚存在许多不如意的地方，加之编者水平有限、时间仓促，可能存在许多不当之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 轧制原理与控制	5
1.1 轧制过程的基本概念	5
1.1.1 轧制变形区的几何参数	5
1.1.2 咬入条件和轧制过程的建立	8
1.2 轧制过程中金属的变形	11
1.2.1 轧制时金属变形的基本概念及变形系数	11
1.2.2 轧制时金属的宽展	13
1.2.3 轧制过程中的不均匀变形	20
1.3 轧制过程中的前滑和后滑	22
1.3.1 平辊轧制前滑、后滑的计算	22
1.3.2 平辊轧制时中性角的确定	25
1.3.3 影响前滑的主要因素	27
1.4 轧制过程中的摩擦	29
1.4.1 摩擦的基本概念	29
1.4.2 金属塑性成形时摩擦的特点	30
1.4.3 接触摩擦理论	30
1.4.4 确定轧制时摩擦系数的方法	32
1.5 金属的变形抗力	36
1.5.1 变形抗力的基本概念	36
1.5.2 影响变形抗力的因素	39
1.5.3 冷变形抗力	43
1.5.4 热变形抗力	45
1.6 轧制压力、轧制力矩及功率	48
1.6.1 轧制单位压力的理论及实验	48
1.6.2 轧制力计算	55
1.6.3 轧制力矩及功率	65
1.7 连续轧制理论	73
1.7.1 连续轧制基本规律	73
1.7.2 连续轧制中的前滑	75
1.7.3 连续轧制的静态特性	76
1.7.4 连续轧制的动态特性	78
1.8 板带轧制原理与控制	82
1.8.1 厚度控制 AGC	82
1.8.2 宽度控制 AWC	85
1.8.3 板形控制 AFC	89
1.8.4 智能控制在轧制中的应用	92
1.9 热轧板带工艺控制新技术	97
1.9.1 薄板坯连铸连轧	97
1.9.2 热轧板带无头轧制、半无头轧制	99
复习思考题	102
参考文献	104
第 2 章 锻造原理与控制	105
2.1 墩粗成形原理	105
2.1.1 平砧墩粗	105
2.1.2 垫环墩粗	108
2.1.3 局部墩粗	109
2.1.4 墩粗工序中常见的质量问题及解决措施	109
2.2 拔长成形原理	111
2.2.1 实心件拔长变形特点	111
2.2.2 空心件拔长特点	113
2.2.3 拔长工序中常见的质量问题及解决措施	114
2.3 冲孔成形原理	119
2.3.1 开式冲孔	119
2.3.2 闭式冲孔(反挤)	120
2.3.3 冲孔工序中常见的质量问题及解决措施	120
2.4 扩孔成形原理	122
2.4.1 冲子扩孔	122
2.4.2 马杠扩孔	122
2.4.3 辗压扩孔(辗扩)	122
2.4.4 扩孔工序中常见的质量问题及解决措施	123
2.5 模锻成形原理	124
2.5.1 开式模锻	124
2.5.2 闭式模锻	127
2.5.3 模锻过程常见的质量问题及措施	128
2.6 回转成形原理	130
2.6.1 摆动辗压	130
2.6.2 旋转锻造	132
2.6.3 辊锻	133
2.7 特种合金及其锻造	135
2.7.1 特种合金的锻造特点及其对策	135
2.7.2 特种工艺方法及其对锻件质量的影响	136
2.8 锻造成形的数字化与智能化控制及应用	137
2.8.1 数字化制造技术	137



2.8.2 智能化的材料制备与成形加工技术	138	4.4 连续挤压原理及特点	207
复习思考题	138	4.4.1 概述	207
参考文献	139	4.4.2 Conform 连续挤压法	207
第3章 板料成形原理与控制	140	4.4.3 连续铸挤	211
3.1 板料成形的基本变形方式	140	4.5 挤压制品的组织性能及质量控制	214
3.1.1 板料成形过程中金属的流动特点	140	4.5.1 挤压制品的组织	214
3.1.2 板料成形中的应力应变分析	144	4.5.2 挤压制品的力学性能	216
3.1.3 板料成形的基本变形方式	148	4.5.3 挤压制品的质量控制	217
3.2 板料成形性的基本概念	150	4.6 影响挤压力的因素	219
3.2.1 厚向异性系数 r 值	151	复习思考题	220
3.2.2 平面各向异性与压延凸耳	156	参考文献	221
3.2.3 应变硬化指数 n 值	158	第5章 拉拔成形原理与控制	222
3.3 金属板料成形性能的特征和成形极限图	162	5.1 概述	222
3.3.1 鉴定板料成形性能的基本试验	163	5.2 线棒材拉拔原理	222
3.3.2 鉴定板料成形性能的模拟试验	164	5.2.1 建立拉拔过程的条件	222
3.3.3 板料成形极限图	167	5.2.2 拉拔时变形区内金属流动规律和应力分布特点	223
3.3.4 板料成形的数字化与智能化控制及应用	170	5.3 管材拉拔的基本原理	226
3.4 金属板料成形的计算机模拟	174	5.3.1 无芯棒拔管过程	229
3.4.1 杯突试验计算机模拟	174	5.3.2 短芯棒拔管过程	234
3.4.2 扩孔试验计算机模拟	177	5.3.3 长芯棒拔制过程	236
3.4.3 小结	181	5.3.4 游动芯棒拔管过程	237
3.5 影响板料成形性能的主要因素	181	5.4 拉拔制品中的残余应力	237
3.5.1 材料特性对成形性能的影响	181	5.4.1 拉拔棒材中的残余应力	237
3.5.2 加工条件对成形性能的影响	185	5.4.2 拉拔管材中的残余应力	238
3.6 金属板料成形缺陷及控制	190	5.4.3 残余应力的消除	240
3.6.1 弯曲成形缺陷及控制	191	5.5 拉拔制品的主要缺陷	241
3.6.2 拉深成形缺陷及控制	191	5.5.1 实心制品的主要缺陷	241
复习思考题	195	5.5.2 管材制品的主要缺陷	242
参考文献	195	5.6 影响拉拔力的主要因素	242
第4章 挤压成形原理与控制	196	5.6.1 金属材质的影响	242
4.1 概述	196	5.6.2 拉拔模角的影响	243
4.2 挤压的基本方法	196	5.6.3 模具材质的影响	244
4.3 挤压时金属的流动	197	5.6.4 润滑剂的影响	244
4.3.1 研究金属流动的方法	197	5.6.5 拉拔速度的影响	245
4.3.2 挤压时材料的变形特点	197	5.6.6 减面率的影响	245
4.3.3 影响金属流动的因素	203	5.6.7 反拉力对拉拔力的影响	245
		5.6.8 振动的影响	246
		复习思考题	246
		参考文献	246

绪 论

1. 固态成形原理与控制的性质和任务

材料是人类赖以生存的物质基础，材料加工则是使材料成为对人类具有使用价值产品的必经之路，自然界及人工合成的绝大多数材料需经固态加工而成形。因此，学习、研究、掌握和应用材料固态成形的基本原理及其质量控制的理论基础是十分重要的。

材料成形科学是一门历史源远流长，从未停止创新发展，并能推动人类社会不断进步的常青学科。材料成形工业也成为人类社会赖以生存的基础工业，并不断产生出新兴的产业分支。固态成形是材料成形的最基本方式，涉及的基本原理类问题有：

- 1) 材料成形有哪些基本的原理与基本的技术方法？
- 2) 如何选择材料成形技术的基本组合方式，才能最经济快捷地生产出所需要品质的产品？
- 3) 如何控制宏观、介观和微观生产工艺，使产品在外形、尺寸、精度上满足下游用户要求？
- 4) 如何控制材料内部微观组织、缺陷程度、表面状态，使产品的质量和性能满足用户要求？
- 5) 如何正确计算和确定成形过程的工艺参数，正确合理地选择生产设备和控制手段？

为使材料成形与控制工程专业的本科生了解和掌握解决上述问题的理论基础，特开设《固态成形原理与控制》这门专业基础课。本课程为材料成形与控制工程专业学生的必修课，其理论基础是材料力学、金属学、机械原理与设计、计算机基础等，所研究的核心问题是材料结构、性能与固态成形工艺之间的关系。由于学时所限，本课程重点讲述材料固态成型的主要工艺方法——轧制、锻造、板料成形、挤压和拉拔的原理，以及外在尺寸形状和内部质量控制的基础。

2. 材料固态成型的主要工艺方法

材料固态成形加工的工艺方法种类繁多，各种具体工艺技术自身也在不断地发展进步。特别是随着新材料技术的发展，新兴的成形加工技术不断涌现，本课程难以全部包容，但其成形工艺原理和控制基础则大致相通。因此，本课程重点讨论“材料”成型的主要工艺方法——轧制、挤压和拉拔，以及“零件”成型的主要工艺方法——锻造和板料成形。

(1) 轧制成形 在轧机上一组旋转着的轧辊之间改变金属断面形状和尺寸，同时控制其组织状态和性能指标的固态成形加工方法称为轧制。轧制是一种使材料发生连续塑性变形的工艺过程。轧制工艺的生产效率高，因此是初级金属材料应用最广泛的固态成形加工方法。90%以上金属“材料”的一次成形需经轧制工序完成。钢铁、有色金属、某些稀有金属及其合金均可以采用轧制进行加工。轧制除能改变材料形状及尺寸外，还可以改善铸锭/坯的初始铸态组织，细化晶粒，改善相和析出物的组成和分布状态，因而能大幅度提高产品品质。但一部分难变形材料、形状特别复杂的材料，以及特长、特细类产品不宜采用轧制方法生产，而需采用其他固态成形加工方法，如锻造、拉拔、挤压等方式生产。

按照轧机上轧辊配置方式和旋转方向、轧件的运动方式以及产品形状划分，轧制主要有纵轧、横轧和斜轧。根据轧制过程中材料加工硬化、回复和再结晶的程度不同，轧制分为热轧、冷轧和温轧。按轧制品种不同，轧制可分为坯料轧制、板带箔材轧制、型材和线材轧制、管材轧制，以及特殊形状材的轧制，如周期断面轧制、车轮轮箍轧制等。

轧制是生产钢铁、合金、有色金属材料的主要成形加工方法。钢材产品主要有厚板、带材、薄板、箔材，常用型材，如方钢、圆钢、扁钢、角钢、工字钢、槽钢等，专用型材如钢轨、钢板桩、球扁钢、窗框钢等，还有异形断面型材、周期断面或特殊断面型材，管材包括圆管、部分异形管及变断面管。有色金属材主要有板、带、箔材及各种管、棒、型、线材等。

轧制工艺发展于 15 世纪后期的欧洲，基本加工方法是平板轧制，其产品则是扁平材，亦称板带材。板带钢材按规格一般可分为厚板（包括中板、厚板和特厚板）、薄板和极薄带材或箔材。我国一般称厚度在 3mm 以上者为中厚板（其中 3~20mm 者为中板，20~60mm 者为厚板，60mm 以上者为特厚板），3~0.2mm 者为薄板，而 0.2mm 以下者为极薄带材或箔材，目前箔材最薄可达 0.001mm，而特厚板最厚已达 500mm 以上，最宽可达 5350mm，单件最重已达 250t。中厚板常用于制作结构件，如船体、锅炉、桥梁、大梁、机器机身、核反应堆堆芯等，其中 300mm 的厚板可作为大锅炉的基座，150mm 可作为反应堆的堆芯，100~125mm 可用于战列舰或坦克。薄板、极薄带材或箔材常用于汽车车身、设备装置、食品或饮料罐、厨房或办公设备，商业飞机机身通常使用的最小厚度是 1mm 的铝合金薄板。为便于将薄板更进一步加工成产品，薄板常以平板或带卷方式提供。

(2) 锻造成形 用锤击或压制的方法对坯料施加压力，使之产生塑性变形的固态成形加工方法称为锻造。轧制工艺的产品是板带、结构型钢等半成品，锻造则可生产出机器设备的零部件。锻造加工的优点是：适应性强，能生产各种材质、形状和尺寸的锻件；在保证设计强度的情况下可以减轻零件的重量，节约金属材料 and 机械加工；可进行大批量生产，生产效率高。由于锻造生产可以控制金属流动及晶粒组织，锻造产品有较高的强韧性。锻造成形的缺点是：设备庞大复杂，能耗高，效率低，成本高。锻造加工的生产方法在机械、交通运输、冶金和采矿等工业部门中起着重要的作用。在机械制造业中，各种机床、发电机和电动机的主轴、齿轮和涡轮叶片等都需经过锻造制成；在交通运输业方面，各种汽车、火车、拖拉机和船舶的曲轴、连杆等重要零件都需要通过锻造制坯；在冶金、采矿工业中，锻造生产用于特殊钢、合金钢、钛合金、其他合金材料的开坯，以提高合金的组织 and 性能，轧钢机的轧辊，矿山设备的主轴、凿岩用的钎头等也需锻造成形；国防工业的兵器、飞机、运载火箭、航天器外壳等都离不开锻造加工；在轻工机械和日用品中的锻造产品也随处可见，如刀、剪、锤头、钳子、锹和镐等。

锻造根据温度的不同可分为冷锻和高温锻造，高温锻造又可分为热锻和温锻。由于冷锻时金属的变形抗力比较大，需要较高的锻造力，因此工件在室温下必须有较高的塑性。冷锻件表面粗糙度值小，尺寸精确度较高。热锻所需的锻造力相对较低，但表面粗糙度值大，尺寸精确度不如冷锻好。锻造产品通常需要后续的精加工工序，如利用热处理来改善锻件的性能，利用机械加工以提高成品的尺寸精确度。

某些传统的锻造产品也可以采用其他更经济的方法生产，如铸造、机械加工、粉末冶金等。然而，不同的加工方法都仅在特定的范围内有其独到的优越性或局限性，主要表现在强度、韧性、尺寸精确度、表面粗糙度、表面和内部缺陷、环境影响以及经济性等方面。

(3) 板料成形 在压力机上用凹模和凸模将金属板料成形为具有立体造型并且符合质量要求制件的固态成形加工方法称为板料成形。

板料成形工艺过程包括材料选择、坯料设计、成形工序制定、模具设计、模具制造、设备选择、成形操作、后续处理（热处理、校形、整修、表面保护、质量检验）等。按成形时工件受力和变形特点，成形方法可分为伸长类变形和压缩类变形两类。伸长类变形时，作用于坯料变形区的应力的绝对值以拉应力为最大，成形主要靠材料纤维的伸长和厚度减薄来实现，这类变形时材料的成形性主要取决于材料的塑性，并且可用材料的塑性指标直接或间接地加以表示。压缩类变形时，作用于坯料变形区的应力的绝对值以压应力为最大，薄板的成



形主要靠材料纤维的缩短与厚度的增加来实现。这类变形时材料的成形性主要取决于坯料传力区的承载能力,有时也受变形区或传力区的压缩失稳起皱所限制。板料成形时,变形区材料大都处于平面应力状态。垂直于薄板平面方向的应力或是没有,或是因其数值很小可以忽略。除弯曲外,一般认为板面内的应力沿板厚方向不变。因此,板料的塑性变形主要是受板面内两个方向的应力作用而产生的。将板料成形分为伸长类变形和压缩类变形是基于板料变形的受力特点,这样有利于分析、研究板料成形可能出现的障碍及其机理和规律。

也可按板料基本成形方式划分为弯曲、拉延、胀形和翻边四类。复杂制件的板料成形,一般来说是上述四种基本成形方式的不同组合。可以用基本成形方式的分析方法,分析复杂制件的成形特点,制定合理的工艺规程,确定改善复杂制件成形条件和加工技术的方向或途径。板料成形性是其原料的基本特性,既为评定薄板成形性能提供了方便,又为科学选材提供了依据。用户可根据成形制件的变形特点和不同成形类别所占的比例,合理选用成形性好的薄板,以提高材料利用率。板料生产厂也可依据用户的要求,调整材料组分和生产工艺,满足下游用户的需求。

(4) 挤压成形 用挤压杆将放在挤压筒中的坯料压出挤压模孔而成形的材料固态成形加工方法称为挤压成形。用挤压方法可以生产管、棒、型、线材以及各种机械零件。用挤压方法生产的典型产品有:门框、窗框、围栏立柱、各种不同截面形状的管制品,以及结构型钢和建筑型钢。挤压产品可切成所需的定尺长度,如门把手支架和齿轮。通常挤压用的材料有铝、铜、钢、镁和铅。其他金属和合金可用不同难度水平的挤压方法生产。

挤压按金属流动及变形特征分类,有正向挤压、反向挤压和特殊挤压。特殊挤压包括静液挤压、连续挤压、侧向挤压、联合挤压、复合挤压、包套挤压、脱皮挤压、水封挤压、舌模挤压、粉末挤压、半熔融态挤压和液态挤压等。按挤压温度分类,有热挤压、温挤压和冷挤压。热挤压和冷挤压是挤压的两大分支,在冶金工业中主要应用热挤压,即通称的挤压,机械工业主要应用冷挤压,冷挤压有许多重要用途,包括用于生产汽车、自行车、摩托车、重型机械和传输设备上的紧固件和零部件。温挤压发展比较晚,应用范围也窄。

作为生产管、棒、型材和线坯的常规挤压法,与其他塑性加工方法(如轧制等)相比,其特点是:①具有比轧制更为强烈的三向压应力状态,金属可以一次承受很大的塑性变形,为加工难变形的低塑性材料提供了途径;②可以生产断面极其复杂的以及变断面的管材和型材,这些产品用其他加工方法很难加工,甚至不可能;③具有极大的生产灵活性,用一台设备可以生产出很多品种和规格的产品,并且产品更换容易;④产品尺寸精确,表面质量高;⑤比较容易实现生产过程自动化;⑥生产效率低,废料损失大,工具消耗较大,制品性能不均匀。挤压法适用于批量小、品种规格多的有色金属管、棒、型材和线坯的生产,对于断面复杂的或薄壁的管材和型材,直径与壁厚之比趋近于2的超厚壁管材,以及用于脆性的有色金属和特殊钢铁材料的成形则更显示出无比的优越性。

(5) 拉拔成形 坯料靠拉力通过锥形模孔使断面缩小以获得尺寸精确、表面光洁制品的固态成形加工方法称为拉拔成形。拉拔棒材可用于制造手柄、杆、活塞以及用作诸如铆钉、螺栓、螺钉等紧固件的原材料。除圆棒外,多种外形的棒料也能通过拉拔生产。与挤压过程不同,材料在拉拔过程中受到拉应力作用,而在挤压过程中受到压应力的作用。拉拔通常在室温下进行,属于冷加工。在高于室温、低于再结晶温度下的拉拔叫作温拔,属于温加工。拉拔是金属塑性加工方法中除轧制以外的主要加工方法,用于轧制产品如线材、管材和型材的深加工。

一般而言,直径小于5mm的金属丝只能靠拉拔加工。小直径管材常用热钢管经拉拔减径减壁生产冷拔成品。型材冷拔能够提高产品的尺寸精度、降低表面粗糙度值、增加强度和节约金属。在工业上,线材一般指至少经过一次模拉拔的棒材。线拉拔可生产比棒拉拔更小直

径的产品。线拉拔生产的磁线可达 0.01mm，低电流熔体尺寸可以更小。线材和金属线制品有广泛的用途，例如用于制造电线、电缆、屏幕、纱窗、承载拉力的结构件、焊条、弹簧、纸夹、自行车的辐条和乐器的弦等。

3. 材料固态成形技术的发展

人类社会的发展史，始终伴随着材料固态成形加工技术的发展。从远古时代起，人类就开始利用固态成形方法对一些天然材料进行加工，如岩石、骨骼、兽皮、木材和贝壳等。由此逐渐形成了这样一种理念，即对大自然赋予的材料可以进行成形加工，为人类的生存服务。通过长期的生产实践活动，以实践和经验为基础，逐渐积累了关于材料性能、加工工艺和使用特性的丰富知识。但是，由于人类的知识水平和研究手段的限制，材料固态成形加工技术长期处于“技艺”的水平。产业革命以后，尤其是近 50 年来，材料固态成形理论研究与应用技术开发迅速走上了科学发展的道路。到目前为止，仍在发展中的材料固态成形加工体系和研究范畴，实际上涵盖了从材料微观结构研究到工业生产工程基础理论和基本方法的十分广泛的范围。其研究成果不仅促进了材料生产技术的发展，也为基础理论研究提供了很好的平台，并对促进学科交叉研究和学科沟通起到了十分重要的作用。

在今后的岁月中，人类不可避免地会受到越来越大的、与材料技术有关的压力。人类在地球上居住的空间将继续相对缩小，由于不断增长的在住房、食物、材料、能源和知识方面的激烈竞争，人们将会对材料固态成形技术从可持续发展角度不断提出越来越高的要求，材料固态成形加工技术也必将日新月异，得到飞速的发展。

第1章 轧制原理与控制

1.1 轧制过程的基本概念

1.1.1 轧制变形区的几何参数

1. 轧制变形区和描述参数

(1) 轧制变形区 轧制过程是由轧件与轧辊之间的摩擦力将轧件拉进相对旋转方向的轧辊之间使之产生塑性变形的过程。轧制变形区是指轧制时，轧件在轧辊作用下发生变形的体积。实际的轧制变形区分为弹性变形区、塑性变形区和弹性恢复区三个区域，如图 1-1 所示。热轧时，在轧辊表面粗糙的情况下，轧件与轧辊有一部分黏着在一起，轧件轧制时发生的变形情况要复杂得多。

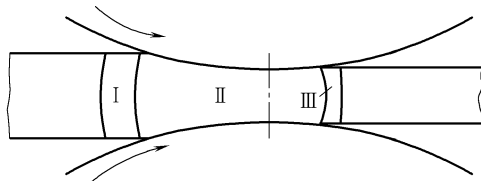


图 1-1 板材轧制变形区
I—弹性变形区 II—塑性变形区 III—弹性恢复区

在实际分析中，一般将轧制变形区简化为轧辊与轧件接触面之间的几何区。最简单的轧制变形区是宽而较薄的板材的轧制变形区，如图 1-2 所示。当轧件横向变形为零时，变形区水平投影为一矩形。当有宽展存在时则变形区水平投影近似为梯形。

(2) 描述变形区的参数 从图 1-2 可见，描述变形区的主要参数有：

- 1) α ：咬入角，轧件被咬入轧辊时轧件和轧辊最先接触点（实际上为一条线）和轧辊中心的连线与两轧辊中心连线所构成的角度。
- 2) l ：接触弧长的水平投影，也叫变形区长度。
- 3) F ：接触面水平投影面积，简称接触面积。
- 4) l/h_m ：变形区形状参数， $h_m = (H+h)/2$ （变形区平均高度）。

2. 简单轧制时变形区参数间的关系

(1) 简单轧制 实际生产中有各种各样的轧辊组合形式，在轧制方式中，主要是纵轧，轧辊组合形式有 2 辊、3 辊、4 辊、6 辊、8 辊、12 辊、20 辊等不同形式。但除 Y 型轧机、行星轧机等形式轧机外，轧件承受压缩产生塑性变形是在一对工作辊之间完成的，这是轧制过程的最基本形式。

但是一对工作辊也有各种不同的情况，如辊径相同和不

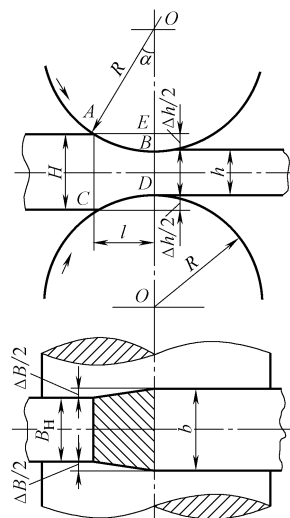


图 1-2 轧制板材的变形区

同、轧辊刻槽和不刻槽（平辊）、轧辊转速相同和不同，轧辊均为主动（传动）或一个主动辊一个被动辊的，轧制时有无张力或推力，轧件温度、摩擦条件是否均匀等。

为了便于进行研究分析，对一些轧制条件做出假设和简化，建立一个理想的轧制模型，这就是简单理想的轧制过程，即上下轧辊直径相同、均为传动辊、转速相等、轧辊为圆柱形刚体，轧件金属为均匀连续体，轧制时变形均匀，轧件为平板（参见图 1-2）。

(2) 咬入角 $\alpha(^{\circ})$ 、轧辊直径 $D(\text{mm})$ 、压下量 $\Delta h(\text{mm})$ 间的关系 利用图 1-2 中的几何关系，可以得出

$$EB = OB - OE$$

式中， $EB = \frac{\Delta h}{2}$ ； $OB = R = \frac{D}{2}$ ； $OE = R \cos \alpha = \frac{D}{2} \cos \alpha$ ，代入上式得出

$$\Delta h = D(1 - \cos \alpha) \quad (1-1)$$

根据三角函数关系，当 α 较小时 ($\alpha < 10^{\circ} \sim 15^{\circ}$)，取近似值 $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$ ，因此可得

$$\Delta h \approx R\alpha^2$$

根据上式，当轧辊直径相同时 ($D=C$, C 为常数)，压下量 Δh 随咬入角 α 呈抛物线型增长，如图 1-3a 所示。当咬入角 α 一定时 ($\alpha=C$)，压下量 Δh 与轧辊直径呈线性关系，如图 1-3b 所示；而当压下量一定时 ($\Delta h=C$)，咬入角 α 随轧辊直径 D 的增加呈双曲线型下降，如图 1-3c 所示。由式 (1-2) 可知，咬入角也可以表示为

$$\alpha \approx \sqrt{\Delta h / R} \quad (1-2)$$

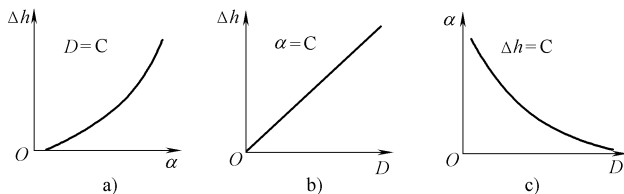


图 1-3 压下量、咬入角、轧辊直径三者间的关系

如考虑轧机机架的弹性变形 δ 时，咬入角 α 近似为

$$\alpha \approx \sqrt{(\Delta h - \delta) / R} \quad (1-3)$$

3. 变形区长度及接触面积计算

(1) 变形区长度计算 由图 1-2 得

$$l = R \sin \alpha \quad \text{或} \quad l^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2} \right)^2 = R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}$$

则有

$$l = \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (1-4)$$

如果忽略 $\frac{\Delta h^2}{4}$ ，则变形区长度 $l(\text{mm})$ 可近似用下式表示

$$l \approx \sqrt{R \Delta h} \quad (1-5)$$

(2) 考虑轧辊及轧件弹性变形时的变形区长度 l' 在冷轧薄板以及热轧厚度小于 $4 \sim 6\text{mm}$ 的薄板时，由于在金属和轧辊表面上产生较高的接触应力，使轧辊产生弹性压扁，而被加工金属在塑性变形后也有弹性恢复，因而造成接触弧长度增加。由于弹性压扁的接触弧长增加量可达 $30\% \sim 100\%$ ，有的甚至更大。在这种情况下，简单轧制时变形区长度公式就不适用了。



如图 1-4 所示, 设轧辊的弹性变形量为 Δ_1 , 轧件的弹性恢复值为 Δ_2 , 为得到 Δh 的绝对压下量, 应多压下 $\Delta_1 + \Delta_2$ 。由 $\triangle OA_2D$ 得

$$x_1 = \sqrt{2R\left(\frac{\Delta h}{2} + \Delta_1 + \Delta_2\right)} \quad (1-6)$$

从 $\triangle OB_1C$ 可近似得到

$$x_2 \approx \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)} \quad (1-7)$$

考虑轧辊和轧件弹性变形时的变形区长度 l' (mm) 为

$$l' = x_1 + x_2 \approx \sqrt{2R\left(\frac{\Delta h}{2} + \Delta_1 + \Delta_2\right)} + \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)} \quad (1-8)$$

或者

$$l' \approx \sqrt{R\Delta h + x_2^2} + x_2 \quad (1-9)$$

Δ_1 和 Δ_2 的值可由弹性理论中关于两个圆柱体压缩的结论来确定。如果忽略轧制时两圆柱体压缩在轧辊连心线两边的非对称性, 变形量 Δ_1 (mm) 和 Δ_2 (mm) 可表示为

$$\Delta_1 = 2p \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}, \quad \Delta_2 = 2p \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \quad (1-10)$$

式中 p ——压缩圆柱体单位长度上的压力;

ν_1 、 ν_2 ——轧辊与轧件的泊松系数;

E_1 、 E_2 ——轧辊与轧件的弹性模量。

如果平均单位压力用 \bar{p} 表示, 则 p 值为

$$p = 2x_2\bar{p} \quad (1-11)$$

将式 (1-10)、式 (1-11) 代入式 (1-7), 得

$$x_2 = 8\bar{p}R \left(\frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \right) \quad (1-12)$$

如果忽略轧件弹性变形 (考虑轧件厚度与轧辊直径相比非常小, 即 $h \ll R$, 忽略 Δ_2), 则有

$$x_2 = 8\bar{p}R \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} = C\bar{p}R \quad (1-13)$$

式中, $C = 8 \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}$ 。

若钢轧辊, $E = 2.2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$, 此时

$$x_2 \approx \frac{\bar{p}R}{9500}$$

对钢轧辊

$$l' = \sqrt{R\Delta h + \left(\frac{\bar{p}R}{9500}\right)^2} + \frac{\bar{p}R}{9500} \quad (1-14)$$

有时为了方便, 也用 R' 来表示 l' , 即

$$l' = \sqrt{R'\Delta h} \quad (1-15)$$

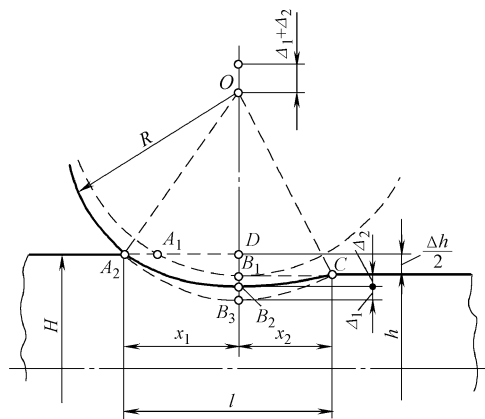


图 1-4 考虑轧辊和轧件弹性变形时的变形区长度

下面确定 R' 。平均单位压力 \bar{p} 可写成

$$\bar{p} = \frac{P_0}{l'}$$

式中 P_0 ——单位宽度上的总压力 ($P_0 = P/\bar{B}$)。

利用式 (1-13) 代入式 (1-9), 得

$$R' \Delta h = \sqrt{C^2 R^2 P_0^2 + RR' (\Delta h)^2} + CRP_0$$

经移项整理得

$$R' = R \left(1 + \frac{2CP_0}{\Delta h} \right)$$

或

$$R' = R \left(1 + \frac{2CP}{\Delta h \bar{B}} \right) \quad (1-16)$$

当采用其他材质的轧辊轧制时, 把相应的 E 和 ν 值代入式 (1-13), 确定 x_2 数值。用式 (1-15) 不能直接求解, 因为平均单位压力 \bar{p} 未知, 因此需用迭代法求解式 (1-16), 再由式 (1-15) 求得 l' 。

(3) 接触面积计算 前面述及, 接触面积是指轧制时轧辊与轧件实际接触面积的水平投影, 这是计算轧制压力时非常重要的参数。

这里只考虑平辊轧制时的接触面积 (若轧件入、出口宽度分别为 B 、 b), 其形状为梯形

$$A = \bar{B}l = \frac{B+b}{2} \sqrt{R\Delta h} \quad (1-17)$$

当考虑轧辊及轧件弹性变形时的接触面积 A (mm^2) 为

$$A = \bar{B}l' = \frac{B+b}{2} l' \quad (1-18)$$

当上、下工作辊径 R_1 、 R_2 不同时 ($R_1 \neq R_2$)

$$A = \bar{B}l = \frac{B+b}{2} \sqrt{\frac{2R_1 R_2 \Delta h}{R_1 + R_2}} \quad (1-19)$$

1.1.2 咬入条件和轧制过程的建立

1. 平辊轧制的咬入条件

在轧钢生产中, 轧制过程有时能顺利进行, 有时会出现轧件不能顺利进入轧辊或轧件不能被轧辊咬入, 使轧制不能进行。所以轧制过程能否建立的先决条件是轧件能否被轧辊咬入。轧件在轧辊上的咬入过程是一个不稳定过程, 因为当轧件咬入的时候, 变形区的几何参数、运动学参数以及力参数都是变化的。

为建成轧制过程, 必须使轧辊咬入轧件, 只有当轧件上作用有外力, 使其紧贴在轧辊上时才可能咬入。这种使轧件紧贴轧辊的力, 可能是轧件运动的惯性力, 也可能是由施力装置给的, 还可能是辊道运送轧件时的撞击力。在这种力的作用下, 轧辊与轧件前端接触, 前端边缘被挤压时产生摩擦力, 由摩擦力把轧件曳入辊缝中。

分析轧件曳入时的平衡条件 (见图 1-5), 应当是有利于咬入的水平投影力的总和大于阻碍咬入的水平投影力的总和。

$$(Q-F) + 2T_x = 2P_x \quad (1-20)$$

式中 P_x ——正压力 P 的水平投影;

T_x ——摩擦力 T 的水平投影;

Q ——外推力；

F ——惯性力。

采用库仑摩擦定律，则有

$$T_x = \mu P \cos\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right),$$

$$P_x = P \sin\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right)$$

式中 α ——咬入角；

θ ——边缘挤压角。

把 T_x 和 P_x 代入式 (1-20)，得出 μ ，则轧件被轧辊咬入的条件是

$$\mu \geq \tan\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) - \frac{Q - F}{2P \cos\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right)}$$

如果没有水平外力作用， Q 可以忽略，且不考虑惯性力 F ，那么轧入条件可以写成

$$\mu \geq \tan\alpha \quad (1-21)$$

如果用咬入时摩擦角 β 的正切来表示 μ ，咬入条件又可写成

$$\beta \geq \alpha \quad (1-22)$$

这个条件意味着只有当咬入时的摩擦角 β 等于或大于咬入角 α 时才能实现轧件进入辊缝的过程 ($\beta = \alpha$ 为咬入的临界条件)。

2. 轧制过程建成条件分析 当轧件前端到达轧辊中心线后，轧制过程建成。在轧制过程建成时，假设接触表面的摩擦条件和其他参数均保持不变，合力作用点将由入口平面移向接触区内。

在 x 轴上列出轧件-轧辊的力学平衡条件，其临界条件如图 1-6 所示。

$$2T_x - 2P_x = 0$$

采用库仑摩擦条件 $T = \mu P$ 并考虑到

$$P_x = P \sin\varphi_x, T_x = T \cos\varphi_x = \mu_y P \cos\varphi_x$$

式中 φ_x ——合力作用角 ($^\circ$)；

μ_y ——轧制过程建成后的摩擦系数。

因此有

$$\mu_y P \cos\varphi_x = P \sin\varphi_x, \mu_y = \tan\varphi_x$$

由于建成过程的摩擦系数为 $\mu_y = \tan\beta_y$ ，则有

$$\beta_y = \varphi_x$$

设 n 为合力移动系数， $n \geq 1$ ，则 φ_x 可表示为

$$\varphi_x = \frac{\alpha_y}{n}$$

式中 α_y ——轧制过程建成后，轧辊与轧件的接触角，单位为 ($^\circ$)。

将上式代入式 (1-23) 中

$$\beta_y = \frac{\alpha_y}{n}$$

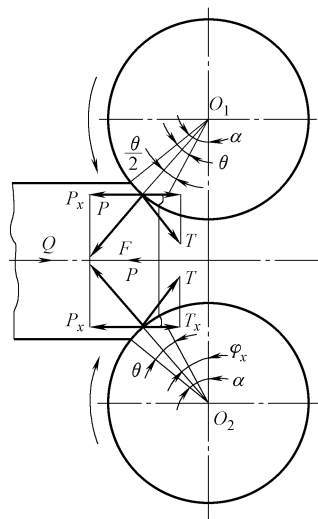


图 1-5 轧件进入轧辊时的作用力

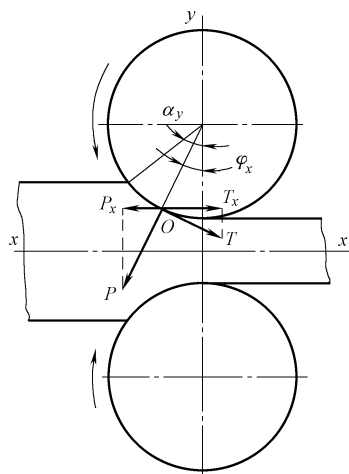


图 1-6 轧制过程建成的作用力

轧制过程建成后的最大接触角为

$$\alpha_{y\max} = n\beta_y \quad (1-24)$$

如果设 $n=2$ (当沿接触弧应力均匀分布时有这种可能, 在这种情况下, 合力作用点在接触弧的中点), 则轧制过程建成后的最大接触角为

$$\alpha_{y\max} = 2\beta_y \quad (1-25)$$

由式 (1-22) 得出最大咬入角为

$$\alpha_{\max} = \beta \quad (1-26)$$

因此轧制过程建成的综合条件乃是

$$\alpha_y \leq n\beta_y$$

当 $\alpha_y > n\beta_y$ 时, 轧制过程不能进行, 并且轧件在轧辊上打滑。用式 (1-24) 除以式 (1-26), 得到

$$\alpha_{y\max}/\alpha_{\max} = n\beta_y/\beta \quad (1-27)$$

从式 (1-27) 可以看出, 轧制过程建成时的最大接触角与最大咬入角的比值可以由合力移动系数 n 与摩擦角的比值决定。

当 $n=2$ 和 $\beta=\beta_y$ 时

$$\alpha_{y\max} = 2\alpha_{\max} \quad (1-28)$$

可见, 轧制过程建成的最大接触角是咬入时最大咬入角的两倍。研究指出, 轧制条件决定了 $\alpha_{y\max}/\alpha_{\max}$ 的比值变化在 1~2 之间。

3. 利用和改善咬入条件的方法

(1) 剩余摩擦力的概念 轧件从开始咬入到轧制建成的过程中, 有利于轧件咬入的水平分力 T_x (见图 1-6) 不断增加, 而阻碍轧件咬入的水平分力 P_x 不断减小, $T_x - P_x$ 的差值愈来愈大, 也就是咬入过程所要求的靠摩擦作用的曳入力愈来愈富余。我们将咬入力 T_x 和水平阻力 P_x 的差值称为剩余摩擦力, 并用 T_s 表示。

$$T_s = T_x - P_x = \mu P \cos\varphi - P \sin\varphi$$

如果引入摩擦角 β , 且 $\mu = \tan\beta$, 则有

$$T_s = P(\tan\beta \cos\varphi - \sin\varphi)$$

当 β 、 φ 很小时, $\tan\beta \approx \beta$, $\cos\varphi \approx 1$, $\sin\varphi \approx \varphi$, 上式简化为

$$T_s = P \tan(\beta - \varphi) \quad (1-29)$$

如果将剩余摩擦角的概念引入剩余摩擦力中, 剩余摩擦力表示为

$$T_s = P \tan\omega$$

式中 ω ——剩余摩擦角 ($^\circ$)。

当 ω 很小时, $\tan\omega \approx \omega$, 则

$$T_s = P\omega \quad (1-30)$$

比较式 (1-29) 和式 (1-30), 显然剩余摩擦角 ω 为

$$\omega = \beta - \varphi \quad (1-31)$$

可知, 剩余摩擦角 ω 等于金属与轧辊间的接触摩擦角 β 与合力作用角 φ 的差值。

最初咬入时, $\varphi = \alpha$ (咬入角), 此时自然咬入的临界条件如 $\alpha = \beta$, 即 $\varphi = \beta$, 则 $\omega = \beta - \varphi = 0$ 。这表明自然咬入时没有剩余摩擦力。

当 $\varphi < \alpha$ 时, $\omega = \beta - \varphi > 0$, 产生剩余摩擦力。

当 $\varphi = \frac{\alpha}{2}$ 时, $\omega = \beta - \varphi = \frac{\alpha}{2}$, 轧制过程建成, 剩余摩擦角 ω 达到最大值, 如图 1-7 所示。

引入剩余摩擦力 (角) 的概念有助于分析轧件咬入中的一些现象以及合理利用咬入特性。