

普通高等教育“九五”国家级重点教材



# 金属塑性加工学

## —— 轧制理论与工艺

(第2版)

王廷溥 齐克敏 主编

冶金工业出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 金属塑性加工学

——轧制理论与工艺

(第2版)

王廷溥 齐克敏 主编

北京  
冶金工业出版社  
2001

## 第 2 版 前 言

本书于 1988 年 5 月出版以来,受到金属压力加工(塑性加工)专业师生和工程技术人员的好评,迄今已印刷 6 次,印数达 15000 余册。该书既包括了基本轧制理论内容,又阐述了钢与有色金属合金的现代轧制工艺技术,既有理论又联系实际,内容充实,系统性强,反映了学科的发展,适应了高等院校教学的要求,为此曾获原冶金部优秀教材一等奖。但在长期的使用中逐渐发现该书的部分内容随着现代轧制技术的发展正日趋陈旧,有些已不能满足广大读者的需求。为此我们根据原冶金部“九五”教材出版规划,决定对本书进行修订。此次修订本着基本保留原书体系的精神,对一些章节进行了调整,精化并修改了有关内容,补充和充实了必要的新内容,如新增加了第 6 章和第 9 章等。并根据教学内容的需要在各篇之后附上了习题,以供读者学习之用。

本书第 2 版由东北大学王廷溥、齐克敏主编,参加本书第 2 版编写的有于淑娴(第一、三篇)、齐克敏(第一、四篇)、王廷溥(第二、四篇)、吴迪(第三篇)、周忠民(第五篇)、高秀华(第五篇)。此外还邀请王国栋教授撰写了本书的绪论。请丁修堃与胡林二教授担任主审,他们对初稿提出了许多宝贵意见。编者对此深表感谢。

由于编者水平所限,书中还可能存在一些不足,敬请读者指正。

第 2 版编者

2000. 11

# 目 录

绪 论	1
-----	---

## 第一篇 轧制理论

1 轧制过程基本概念	5
1.1 变形区主要参数	5
1.2 金属在变形区内的流动规律	9
2 实现轧制过程的条件	13
2.1 咬入条件	13
2.2 稳定轧制条件	15
2.3 咬入阶段与稳定轧制阶段咬入条件的比较	16
2.4 改善咬入条件的途径	17
3 轧制过程中的横变形——宽展	19
3.1 宽展及其分类	19
3.2 影响宽展的因素	22
3.3 宽展计算公式	31
3.4 在孔型中轧制时宽展特点及其简化计算方法	34
4 轧制过程中的纵变形——前滑和后滑	38
4.1 轧制过程中的前滑和后滑现象	38
4.2 轧件在变形区内各不同断面上的运动速度	39
4.3 中性角 $\gamma$ 的确定	41
4.4 前滑的计算公式	43
4.5 影响前滑的因素	44
4.6 连续轧制中的前滑及有关工艺参数的确定	46
5 轧制压力及力矩的计算	50
5.1 计算轧制单位压力的理论	50
5.2 轧制压力的工程计算	58
5.3 主电动机传动轧辊所需力矩及功率	76
6 不对称轧制理论	85
6.1 异步轧制理论	85
6.2 轧辊直径不对称(异径)轧制理论	90
第一篇练习题	95

## 第二篇 轧制工艺基础

7 轧材种类及其生产工艺流程	97
----------------	----

7.1 轧材的种类 .....	97
7.2 轧材生产系统及生产工艺流程 .....	99
8 轧制生产工艺过程及其制定 .....	105
8.1 轧材产品标准和技术要求 .....	105
8.2 金属与合金的加工特性 .....	106
8.3 轧材生产各基本工序及其对产品质量的影响 .....	108
8.4 拟订轧制产品生产工艺过程举例 .....	116
9 连续铸造及其与轧制的衔接工艺 .....	119
9.1 连续铸钢技术 .....	119
9.2 连铸与轧制的衔接工艺 .....	122
第二篇练习题 .....	130

### 第三篇 型材和棒线材生产

10 大、中型型材及复杂断面型材生产 .....	132
10.1 生产特点、用途及典型产品 .....	132
10.2 轧机规格、轧制工艺和轧机布置 .....	139
10.3 二辊孔型与四辊万能孔型轧制凸缘型钢的区别 .....	144
10.4 初轧开坯生产的历史、现状及改造方向 .....	148
10.5 三辊中型型钢轧机在我国的现状及改造的设想 .....	153
10.6 大、中型型钢生产新技术 .....	155
11 棒、线材生产 .....	158
11.1 棒、线材的种类和用途 .....	158
11.2 棒、线材的生产特点和生产工艺 .....	159
11.3 棒、线材轧制的发展方向 .....	161
11.4 棒、线材轧机的布置形式 .....	163
11.5 棒、线材轧制的控制冷却和余热淬火 .....	170
12 型材和棒、线材轧制及其轧制过程的自动化控制 .....	175
12.1 轧制方法、轧制条件和变形特点 .....	175
12.2 在孔型中轧件变形的数值模拟 .....	185
12.3 连轧的张力特性及张力控制 .....	186
12.4 型材和棒、线材轧制的自动控制 .....	189
第三篇练习题 .....	192

### 第四篇 板、带材生产

13 板、带材生产概述 .....	193
13.1 板、带产品特点、分类及技术要求 .....	193
13.2 板、带轧制技术的发展 .....	194
14 热轧板、带材生产 .....	202
14.1 中、厚板生产 .....	202

14.2	热连轧带钢生产 .....	208
14.3	中小型企业薄板带钢生产 .....	224
14.4	薄板带坯连铸—连轧及连续铸轧技术 .....	228
15	冷轧板、带材生产 .....	236
15.1	冷轧板、带材生产工艺特点 .....	236
15.2	冷轧板、带材生产工艺流程 .....	240
16	板、带材高精度轧制和板形控制 .....	249
16.1	板、带材轧制中的厚度控制 .....	249
16.2	横向厚差与板形控制技术 .....	253
17	板、带材轧制制度的确定 .....	271
17.1	制定轧制制度的原则和要求 .....	271
17.2	压下规程或轧制规程设计(设定) .....	275
	第四篇练习题 .....	294

### 第五篇 管材生产工艺和理论

18	热轧无缝管材的主要加工形式和基本工艺过程 .....	297
18.1	穿孔方法 .....	297
18.2	轧管方法 .....	299
18.3	毛管精轧 .....	304
18.4	热轧无缝钢管生产的一般工艺过程 .....	305
19	斜轧原理与工具设计 .....	308
19.1	斜轧过程的运动学 .....	308
19.2	斜轧过程中轧件的变形 .....	311
19.3	斜轧的曳入条件 .....	319
19.4	斜轧穿孔压力和力矩的计算 .....	322
19.5	斜轧穿孔机的工具设计 .....	324
20	管材纵轧原理和工具设计 .....	329
20.1	管材纵轧变形区的特点 .....	329
20.2	管材纵轧变形区的速度分析 .....	331
20.3	管材纵轧的咬入条件 .....	333
20.4	管材纵轧的轧制力和轧制力矩 .....	334
20.5	纵轧管机的工具设计和轧机调整 .....	339
20.6	轧制表计算 .....	355
21	管材冷加工 .....	359
21.1	管材冷加工概述 .....	359
21.2	周期式冷轧管机轧制的变形原理和工具设计 .....	363
22	焊管生产工艺 .....	377
22.1	电焊管生产方法概述 .....	377
22.2	辊式连续成型机生产电焊钢管的基本问题 .....	380

---

22.3 辊式连续成型机的轧辊孔型设计 .....	385
22.4 带钢综合弯曲法的孔型设计 .....	388
第五篇练习题 .....	395
参考文献 .....	396

## 绪 论

轧制方法是金属材料成型的主要方法,轧制成型的钢材是数量最大的金属材料制品。冶炼钢的90%以上要经过轧制工艺才能成为可用的钢材。轧制钢材与汽车、建筑、能源等国民经济支柱产业密切相关,因此它也是与人民的生活紧密相连的。由于钢材生产数量大、品种多,广泛应用于国民经济的各个部门,因此冶金工业是国民经济发展的基础产业之一。

上一世纪的后半叶,特别是最后的20多年,在相关学科和技术发展的基础上,轧制技术发展迅速,面貌日新月异,逐渐形成了现代轧制工艺。当今现代轧制工艺技术的特点和发展趋势基本可以归纳为如下几个方面:

### 一、大力开发高精度轧制技术

提高轧制产品的精度,是用户的需要,也是轧制技术发展的永恒的目标。产品的精度主要指产品的外形尺寸精度,它是社会主义市场经济发展的需要,也是作为产品的最基本条件。

对于板带钢来说,外形尺寸包括厚度、宽度、板形、板凸度、平面形状等等。在所有的尺寸精度指标中,厚度精度指标是最基本、最重要的指标。通过对轧制过程控制计算机的高精度设定和基础自动化的AGC控制系统的改进,厚度精度已经达到了很高的水平。为了提高板带钢的板形质量,板形控制技术取得了长足的进步。除了一般的配辊、配辊型曲线、轧制负荷分配等手段之外,硬件水平的提高,特别是轧机本身的改进起到了重要的作用,CVC、PC、HCW、DSR等新机型的出现使板带钢的板形质量发生了质的飞跃。平面形状控制,对提高中厚板成材率是一项关键的技术。在平面形状控制技术中,利用立辊轧机与MAS法配合,可以获得最好的控制效果,并能显著提高中厚板轧机的成材率。

型钢和棒线材轧机的尺寸精度的最新进展是采用高精度精轧技术,即在型钢轧机的精轧机架的后面,装设高精度轧制机组,通过该机组对制品尺寸进一步规整,以实现产品尺寸的高精度成型。该项技术包括HPR(High Precision Rolling)技术, Tekisun机组和PSB(Precision Sizing Block)机组。

随着用户对产品要求的不断提高,产品的表面质量问题也已经成为制约市场开拓的严重问题。除了高压水除鳞之外,冷却水系统的质量和保养以及水质的清洁度,润滑技术的改进,都可以大幅度提高钢材的表面质量。

### 二、以过程冶金理论为基础,以低合金钢为重点,提高产品的冶金质量,扩大品种

轧制过程是赋予金属一定的尺寸和形状的过程,同时也是赋予金属材料一定组织和性能的过程。因此,轧制过程也是一个冶金过程。以物理冶金理论为基础,通过材料化学成分优化和工艺制度的改进,已经大幅度提高了现有钢种的质量,并开发出大批优良的新钢种。

对于热轧产品来讲,依据物理冶金理论,实现控制轧制和控制冷却,是提高产品质量和附加值、开发新品种、增加企业经济效益的关键。通过控制轧制和控制冷却,一些重要的钢种,例如管线钢、容器钢、工程机械用钢、桥梁板、造船板、贝氏体钢、双相钢、TRIP钢等都已经开发



出来,为经济发展和社会进步做出了巨大贡献。目前,利用新一代的控制轧制和控制冷却技术开发的超级钢材,性能可以达到现有常规轧制钢材的两倍,已经引起了各个方面的普遍重视,因此而投入了大量的人力、物力和财力来进行开发和研究。

退火工序是冷轧产品质量控制的重要工序。除了传统的罩式退火外,连续退火近年获得较大发展。连续式退火炉板形质量好,板材性能均匀,通过过时效处理,可以在很大的程度上控制钢板的冷却速度(最高可达  $2000^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ),是利用退火过程提高质量、开发新品种的关键设备。

### 三、提高连铸比,大力推广连铸—连轧工艺及短流程技术

采用连铸技术可以大幅度降低能耗,提高成材率,提高轧制产品的质量。近年我国的连铸比大幅度提高,促进了相关轧制技术的发展,特别是连铸和轧制衔接技术的发展,例如热装和直接轧制技术及板坯调宽技术等。

短流程是钢铁工业的发展方向,是目前国外竞相开发的热点。尽管目前还存在各种各样的问题,短流程这个大趋势是绝对不会逆转的。我国已经由包钢、邯钢、珠钢捆绑式引进3套薄板坯连铸连轧机组,这是热轧带钢发展的重要方向。此外,我国还引进了H型钢用异型坯连铸技术,圆管坯连铸技术等。与此相关的轧制技术也正在开发中。

薄带连续铸轧是近年各国竞相开发的热点技术,在下一世纪将会获得大的发展。

### 四、轧制过程连续化的新进展——无头轧制技术

轧制过程的连续化是轧制技术发展的重要方向。无头轧制是连续轧制的新发展。冷轧机组通过轧前焊接、轧后切断以及轧制中的动态改变规格,最早实现了无头轧制技术。20世纪80年代又将冷连轧与酸洗机组连接起来,建立了酸洗—冷轧连续式机组(CDCM)的无头轧制技术。20世纪90年代,又开发成功常规板坯连续化的热轧无头轧制技术和与薄板坯连铸连轧相对应的无头轧制技术。通过无头向热带精轧机组提供温度和轧材断面恒定的坯料,轧制出形状、尺寸、组织、性能几乎恒定不变的热轧带钢,大大简化了热轧的自动控制系统,提高了产品的质量。近年来型钢、棒线材轧机也都开始采用无头轧制技术,在提高产量和成材率等方面发挥了巨大的作用。

### 五、采用柔性化的轧制技术

在激烈的市场竞争中,为了适应用户多品种、小批量、短交货期的需要,迫切需要开发柔性化的轧制技术。

在热轧带钢生产过程中,要提高连铸坯热装比和直轧比,必须打破轧制规程的限制,实现自由程序轧制(SFR)。该技术实质上是集成了几乎全部现代轧制技术,取消了以往的轧制程序编制中对宽度、厚度、钢种、终轧温度、卷取温度等的跳跃幅度等施加的严格限制,极大地加强了热带轧制过程的柔性。

型钢和棒线材的自由程序轧制技术更多地依赖于设备和孔型设计。例如采用平辊轧制技术,可以免受粗轧延伸孔型的限制。在H型钢的轧制过程中,为了能够利用同一套孔型轧制多种规格,国外已经开发了可以改变外宽尺寸和内部尺寸及改变H型钢高度的新的轧制方法和新型轧机。在棒钢、扁钢、角钢等的生产中,可以在延伸机组上采用无孔型平辊轧制技术来

提高生产的柔性。在棒线材的轧制中,通过合理设计成品及成品前的孔型,可以用同一套孔型轧制相近的几种规格的产品,扩大了生产的自由度。

## 六、轧制过程的自动控制和智能控制

自动化是现代化轧钢厂提高产品质量的最为重要的手段。现代化的轧钢厂采用了多种自动化系统进行产品的质量监督和控制。自动化技术与轧制技术的交叉和融合,将为轧钢厂提高产品质量、降低成本、增加效率提供最为有效的手段。另一方面,在目前实现了自动化的基础上,尽量采用人工智能技术,实现轧制过程的人工智能控制,是一个新的重要的方向。在这方面,利用 ANN(人工神经网络)、模糊逻辑(Fuzzy)、专家系统、GA(遗传算法)进行对过程的诊断、优化、控制,进行信息处理,具有非常广阔的发展前景。

## 七、深加工

产品的深加工可以比较小的投入带来比较大的效益,把产品的最终效益留在钢厂,同时也加强了冶金厂与用户之间密不可分的关系。产品的深加工包括涂镀、裁剪、切分、焊接、冷弯、机械加工、复合等等,方式繁多,效益明显,是极有前景的发展领域。近年来,产品的深加工领域受到人们越来越多的重视。

本书实际上就是通过对轧制理论的分析讨论以及对各种轧制产品的生产工艺过程、工艺布置、规程制定、数学模型、技术经济等方面的阐述,让读者掌握现代轧制技术的基本知识及其现状、特点、发展,使其具有制定合理轧制工艺、建立先进轧制工艺制度的能力,为轧制工艺技术的发展做出贡献。

学习本门课程的方法 首先对轧制技术的发展前景要有正确的认识。轧制工艺技术已经取得了巨大的进步,它在国民经济中发挥了重要的作用,但是轧制技术的进步绝对不能说明它已经达到了终点,恰恰相反,这些进步预示着轧制工艺技术在新的世纪里将出现崭新的局面,迈入前所未有的新阶段。客观需求无止境的发展和攀升,相关学科技术和产业发展的牵动及影响,都为轧制工艺技术的发展提供了充分的发展空间和良好的机遇。面对这样的形势,作为材料成型与控制工程专业的学者和从业人员,应当努力学好本门课程,全面、深入掌握现代轧制工艺技术。

要从基础开始掌握课程的内容 轧制技术的发展,需要深厚的理论基础,其中最为重要的是数学、力学、金属学、控制理论。只有这样,才能从理论的角度上掌握轧制技术的深刻内涵,才能对轧制技术的核心理论和方法,如对轧制过程变形规律、轧制过程数学模型、轧制规程制定、控制轧制和控制冷却技术等有着深刻的认识。因此,在学习本课程之前,应对于相关基础课程给予充分的重视。学习之前和学习过程中,都应当经常回顾、联系相关的基础课的理论知识,并将其与本课联系起来,做到融会贯通。

从学科发展的角度学习本门课程 要想掌握现代轧制工艺技术,就必须了解该学科的核心以及科研前沿,因而必须把握现代轧制技术的发展现状和趋势。这就要求我们的在校大学生不仅了解课本的内容,而且能够通过各种媒体,例如书刊、杂志、网络、影视等,了解本学科丰富多彩的世界,知晓轧制技术的最新发展,从而与迅速发展的轧制技术前沿保持同步,掌握轧制技术的内涵。

通过实践掌握轧制工艺技术的内容 各种实践活动,是知识的源泉,是创造力的根本。各

种教学实践环节,例如实习、实验、科研、设计、调研等,也是重要的实践环节,是我们掌握轧制工艺技术和理论的重要课堂。在学习本门课程的过程中,通过实践获得活的知识,对深入掌握课本内容是十分重要的。

从学科交叉的角度学好本门课程 现代轧制工艺技术是现代科学与技术发展的结晶,离开了现代科学技术的支撑,则现代轧制工艺技术就无从谈起。作为压力加工专业的大学生,在学习本课程的同时,还应当不断拓宽自己的知识面,广泛地从相关学科吸取精华和营养,在轧制技术与相关学科的交叉点上产生新的学术思想,新的技术,新的方法,从而推动轧制工艺技术更快地向前发展。

# 第一篇 轧制理论

## 1 轧制过程基本概念

轧制过程是靠旋转的轧辊与轧件之间形成的摩擦力将轧件拖进辊缝之间,并使之受到压缩产生塑性变形的过程。轧制过程除使轧件获得一定形状和尺寸外,还必须使组织和性能得到一定程度的改善。为了了解和控制轧制过程,就必须对轧制过程形成的变形区及变形区内的金属流动规律有一概括的了解。

### 1.1 变形区主要参数

通常在生产实践中所使用的轧机其结构形式多种多样,为了搞清楚其共同性的问题,轧制原理要先从简单轧制过程讲起。所谓简单轧制过程,就是指轧制过程上下轧辊直径相等,转速相同,且均为主动辊,轧制过程对两个轧辊完全对称,轧辊为刚性,轧件除受轧辊作用外,不受其他任何外力作用、轧件在入辊处和出辊处速度均匀、轧件的机械性质均匀。

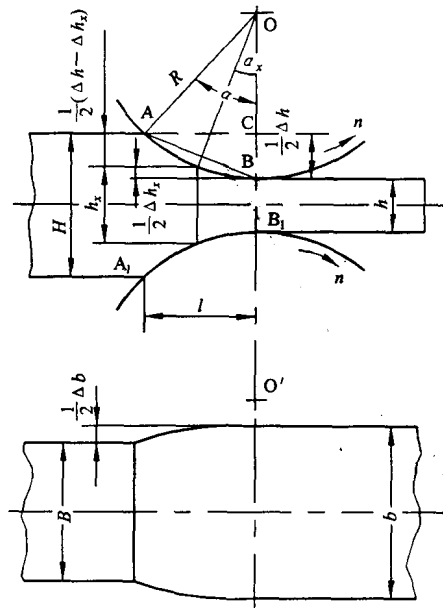


图 1-1 变形区的几何形状

理想的简单轧制过程在实际中是很难找到的,但有时为了讨论问题方便,常常把复杂的轧制过程简化成简单轧制过程。

### 1.1.1 轧制变形区及其主要参数

轧件承受轧辊作用发生变形的部分称为轧制变形区,即从轧件入辊的垂直平面到轧件出辊的垂直平面所围成的区域  $AA_1B_1B$ (图 1-1),通常又把它称为几何变形区。轧制变形区主要参数有咬入角和接触弧长度。

#### 1.1.1.1 咬入角( $\alpha$ )

如图 1-1 所示,轧件与轧辊相接触的圆弧所对应的圆心角称为咬入角。压下量与轧辊直径及咬入角之间存在如下的关系:

$$\Delta h = 2(R - R\cos\alpha)$$

因此得到

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

又

$$\cos\alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}$$

得

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-2)$$

当  $\alpha$  很小时( $\alpha < 10^\circ \sim 15^\circ$ )。取  $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$ , 此时可得

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-3)$$

式中  $D, R$ ——轧辊的直径和半径;

$\Delta h$ ——压下量。

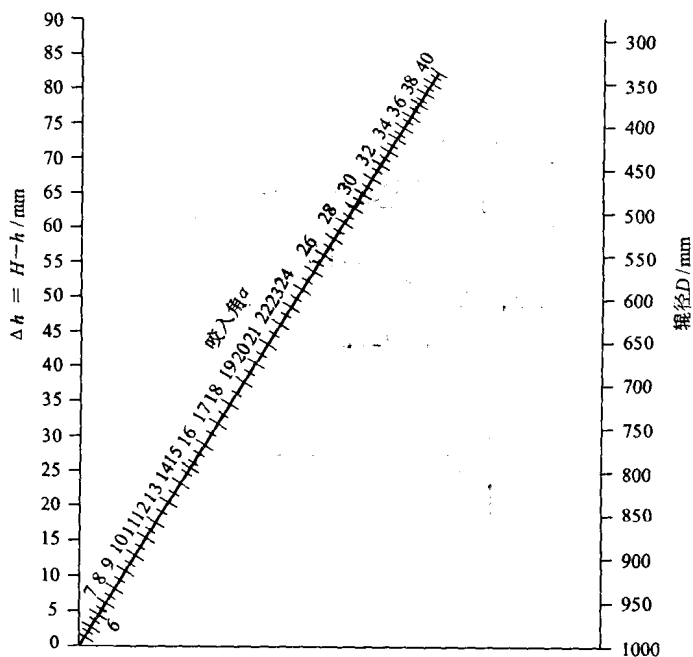


图 1-2  $\Delta h, D$  和  $\alpha$  三者关系计算图

为了简化计算,把  $\Delta h$ ,  $D$  和  $\alpha$  三者之间的关系绘制成计算图,如图 1-2 所示。这样,已知  $\Delta h$ ,  $D$  和  $\alpha$  三个参数中的任意两个,便可用计算图很快地求出第三个参数。

变形区内任一断面的高度  $h_x$ ,可按下式求得:

$$h_x = \Delta h_x + h = D(1 - \cos\alpha_x) + h \quad (1-4)$$

或

$$\begin{aligned} h_x &= H - (\Delta h - \Delta h_x) \\ &= H - [D(1 - \cos\alpha) - D(1 - \cos\alpha_x)] \\ &= H - D(\cos\alpha_x - \cos\alpha) \end{aligned} \quad (1-5)$$

### 1.1.1.2 接触弧长度( $l$ )

轧件与轧辊相接触的圆弧的水平投影长度称为接触弧长度也叫咬入弧长度,即图 1-1 中的 AC 线段。通常又把 AC 称为变形区长度。

接触弧长度随轧制条件的不同而不同,一般有以下 3 种情况:

(1) 两轧辊直径相等时的接触弧长度。从图 1-1 中的几何关系可知:

$$l^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2$$

所以

$$l = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (1-6)$$

由于式(1-6)中根号里的第二项比第一项小得多,因此可以忽略不计,则接触弧长度公式就变为:

$$l = \sqrt{R\Delta h} \quad (1-7)$$

用式(1-7)求出的接触弧长度实际上是 AB 弦的长度,可用它近似代替 AC 长度。

(2) 两轧辊直径不相等时接触弧长度。此时可按下式确定:

$$l = \sqrt{\frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2}\Delta h} \quad (1-8)$$

该式是假设两个轧辊的接触弧长度相等而导出的,即:

$$l = \sqrt{2R_1\Delta h_1} = \sqrt{2R_2\Delta h_2} \quad (1-9a)$$

式中  $R_1, R_2$ ——分别为上下两轧辊的半径;

$\Delta h_1, \Delta h_2$ ——分别为上下轧辊对金属的压下量。

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (1-9b)$$

由式(1-9a)及式(1-9b)便得式(1-8)。

(3) 轧辊和轧件产生弹性压缩时接触弧的长度。由于轧件与轧辊间的压力作用,轧辊产生局部的弹性压缩变形,此变形可能很大,尤其在冷轧薄板时更为显著。轧辊的弹性压缩变形一般称为轧辊的弹性压扁,轧辊弹性压扁的结果使接触弧长度增加。另外,轧件在辊间产生塑性变形时,也伴随产生弹性压缩变形,此变形在轧件出辊后即开始恢复,这也会增大接触弧长度。因此,在热轧薄板和冷轧板过程中,必须考虑轧辊和轧件的弹性压缩变形对接触弧长度的影响见图 1-3。

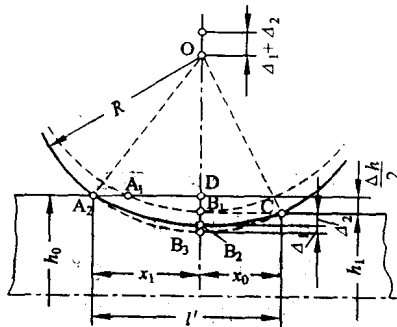


图 1-3 轧辊与轧件弹性压缩时接触弧长度

如果用  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  分别表示轧辊与轧件的弹性压缩量,为使轧件轧制后获得  $\Delta h$  的压下量,那么必须把每个轧辊再压下  $\Delta_1 + \Delta_2$  的压下量。此时轧件与轧辊的接触线为图 1-3 中的  $A_2B_2C$  曲线,其接触弧长度为:

$$l' = x_1 + x_0 = A_2D + B_1C$$

$A_2D$  和  $B_1C$  可分别从图 1-3 的几何关系中找出:

$$\overline{A_2D} = \sqrt{\overline{A_2O}^2 - (\overline{OB_3} - \overline{DB_3})^2} = \sqrt{R^2 - (R - \overline{DB_3})^2}$$

$$\overline{B_1C} = \sqrt{\overline{CO}^2 - (\overline{OB_3} - \overline{B_1B_3})^2} = \sqrt{R^2 - (R - \overline{B_1B_3})^2}$$

展开上两式中的括号,由于  $\overline{DB_3}$  与  $\overline{B_1B_3}$  的平方值与轧辊半径与它们的乘积相比小得多,故可以忽略不计,得:

$$\overline{A_2D} = \sqrt{2R \overline{DB_3}}; \quad \overline{B_1C} = \sqrt{2R \overline{B_1B_3}}$$

因为

$$\overline{DB_3} = \frac{\Delta h}{2} + \Delta_1 + \Delta_2; \quad \overline{B_1B_3} = \Delta_1 + \Delta_2$$

所以

$$l' = x_1 + x_0 = \overline{A_2D} + \overline{B_1C} \\ = \sqrt{R\Delta h + 2R(\Delta_1 + \Delta_2)} + \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)}$$

或者

$$l' = \sqrt{R\Delta h + x_0^2} + x_0 \quad (1-10)$$

这里

$$x_0 = \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)} \quad (1-11)$$

轧辊和轧件的弹性压缩变形量  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  可以用弹性理论中的两圆柱体互相压缩时的计算公式求出:

$$\Delta_1 = 2q \frac{1 - \gamma_1^2}{\pi E_1}; \quad \Delta_2 = 2q \frac{1 - \gamma_2^2}{\pi E_2}$$

式中  $q$ ——压缩圆柱体单位长度上的压力,  $q = 2x_0 \bar{p}$  ( $\bar{p}$ ——平均单位压力);

$\gamma_1, \gamma_2$ ——轧辊与轧件的泊桑系数;

$E_1, E_2$ ——轧辊与轧件的弹性模量。

将  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的值代入式(1-11)得

$$x_0 = 8R\bar{p} \left( \frac{1 - \gamma_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \gamma_2^2}{\pi E_2} \right) \quad (1-12)$$

把  $x_0$  的值代入式(1-10),即可计算出  $l'$  值。金属的弹性压缩变形很小时,可忽略不计,即  $\Delta_2 \approx 0$ ,则可得只考虑轧辊弹性压缩时接触弧长度的计算公式,即西齐柯克公式。

$$x_0 = 8 \frac{1 - \gamma_1^2}{\pi E_1} R \bar{p} \quad (1-13)$$

$$l' = \sqrt{R\Delta h + \left[ 8 \frac{1 - \gamma_1^2}{\pi E_1} R \bar{p} \right]^2} + 8 \frac{1 - \gamma_1^2}{\pi E_1} R \bar{p} \quad (1-14)$$

### 1.1.2 轧制变形的表示方法

#### 1.1.2.1 用绝对变形量表示

用轧制前、后轧件绝对尺寸之差表示的变形量就称为绝对变形量。

绝对压下量为轧制前、后轧件厚度  $H, h$  之差,即  $\Delta h = H - h$ 。

绝对宽展量为轧制前、后轧件宽度  $B, b$  之差,即  $\Delta b = b - B$ 。

绝对延伸量为轧制前后轧件长度  $L, l$  之差,即  $\Delta l = l - L$ 。

用绝对变形不能正确地说明变形量的大小,但由于习惯,前两种变形量常被使用,而绝对延伸量一般情况下不使用。

### 1.1.2.2 用相对变形量表示

即用轧制前、后轧件尺寸的相对变化表示的变形量称为相对变形量。相对变形量有:

$$\text{相对压下量: } \frac{H-h}{H}100\%; \quad \frac{H-h}{h}100\%; \quad \ln \frac{h}{H}$$

$$\text{相对宽展量: } \frac{b-B}{B}100\%; \quad \frac{b-B}{b}100\%; \quad \ln \frac{b}{B}$$

$$\text{相对延伸量: } \frac{l-L}{L}100\%; \quad \frac{l-L}{l}100\%; \quad \ln \frac{l}{L}$$

前两种表示方法只能近似地反映变形的大小,但较绝对变形表示法则已进了一步。后一种方法导自移动体积的概念,故能够正确地反映变形的大小,所以相对延伸量也叫真变形。

### 1.1.2.3 用变形系数表示

用轧制前、后轧件尺寸的比值表示变形程度,此比值称为变形系数。变形系数包括:

$$\text{压下系数: } \eta = \frac{H}{h}$$

$$\text{宽展系数: } \beta = \frac{b}{B}$$

$$\text{延伸系数: } \mu = \frac{l}{L}$$

根据体积不变原理,三者之间存在如下关系,即  $\eta = \mu \cdot \beta$ 。变形系数能够简单而正确地反映变形的大小,因此在轧制变形方面得到了极为广泛的应用。

## 1.2 金属在变形区内的流动规律

### 1.2.1 沿轧件断面高向上变形的分布

关于轧制时变形的分布有两种不同理论,一种是均匀变形理论,另一种是不均匀变形理论。后者比较客观地反映了轧制时金属变形规律。均匀变形理论认为,沿轧件断面高度方向上的变形、应力和金属流动分布都是均匀的,造成这种均匀性的主要原因是由于未发生塑性

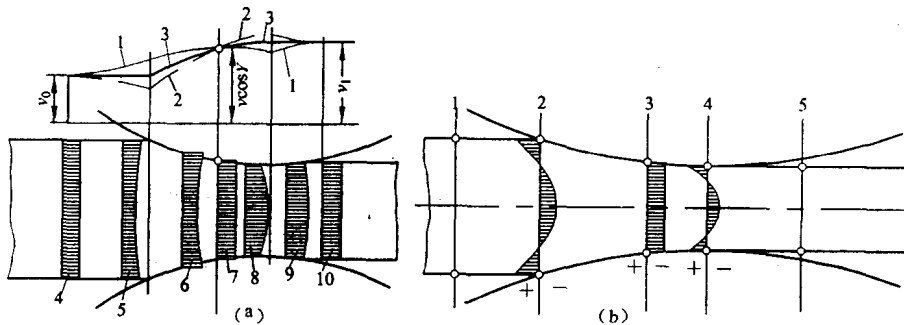


图 1-4 按不均匀变形理论金属流动速度和应力分布

- (a) 金属流动速度分布: 1—表面层金属流动速度; 2—中心层金属流动速度; 3—平均流动速度; 4—后外端金属流动速度; 5—后变形过渡区金属流动速度; 6—后滑区金属流动速度; 7—临界面金属流动速度; 8—前滑区金属流动速度; 9—前变形过渡区金属流动速度; 10—前外端金属流动速度
- (b) 应力分布: +—拉应力; -—压应力; 1—后外端; 2—入辊处; 3—临界面; 4—出辊处; 5—前外端



变形的先后外端的强制作用,因此又把这种理论称为刚端理论。而不均匀变形理论认为,沿轧件断面高度方向上的变形、应力和金属流动分布都是不均匀的,如图 1-4 所示。其主要内容为:

- (1) 沿轧件断面高度方向上的变形、应力和流动速度分布都是不均匀;
- (2) 在几何变形区内,在轧件与轧辊接触表面上,不但有相对滑动,而且还有粘着,所谓粘着系指轧件与轧辊间无相对滑动;
- (3) 变形不但发生在几何变形区内,而且也产生在几何变形区以外,其变形分布都是不均匀的。这样就把轧制变形区分成变形过渡区、前滑区、后滑区和粘着区,见图 1-4;
- (4) 在粘着区内有一个临界面,在这个面上金属的流动速度分布均匀,并且等于该处轧辊的水平速度。

近年来大量实验证明,不均匀变形理论是比较正确的,其中以 И. Я. 塔尔诺夫斯基 (Тарновский) 的实验最有代表性。他研究沿轧件对称轴的纵断面上的坐标网格的变化,证明了沿轧件断面高度方向上的变形分布是不均匀的,其实验研究结果如图 1-5 所示。图中曲线 1 表示轧件表面层各个单元体的变形沿接触弧长度  $l$  上的变化情况,曲线 2 表示轧件中心层各个单元体的变形沿接触弧长度上的变化情况。图中的纵坐标是以自然对数表示的相对变形。

由图 1-5 可看出,在接触弧开始处靠近接触表面的单元体的变形,比轧件中心层的单元体变形要大。这不仅说明沿轧件断面高度方向上的变形分布不均匀,而且还说明表面层的金属流动速度比中心层的要快。

显然图 1-5 中曲线 1 与曲线 2 的交点是临界面的位置,在这个面上金属变形和流动速度是均匀的。在临界面的右边,即出辊方向,出现了相反现象。轧件中心层单元体的变形比表面层的要大,中心层金属流动速度比表面层的要快。

在接触弧的中间部分,曲线上有一段很长的平行于横坐标轴的线段,这说明在轧件与轧辊相接触的表面上确实存在着粘着区。

另外,从图中还可以看出,在入辊前和出辊后轧件表面层和中心层都发生变形,这充分说明了在外端和几何变形区之间有变形过渡区,在这个区域内变形和流动速度也是不均匀的。

И. Я. 塔尔诺夫斯基根据实验研究把轧制变形区绘成图 1-6,用以描述轧制时整个变形的情况。

实验研究还指出,沿轧件断面高度方向上的变形不均匀分布与变形区形状系数有很大关系。当变形区形状系数  $l/\bar{h} > 0.5 \sim 1.0$  时,即轧件断面高度相对于接触弧长度不太大时,压缩

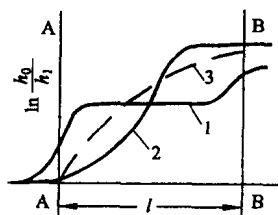


图 1-5 沿轧件断面高向上变形分布

1—表面层;2—中心层;3—均匀变形  
A—A—入辊平面;B—B—出辊平面

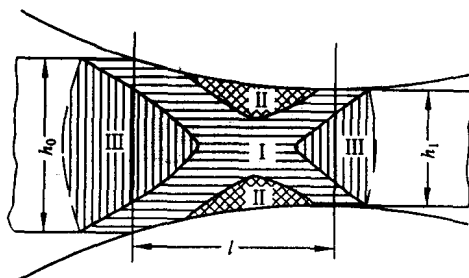


图 1-6 轧制变形区 ( $l/\bar{h} > 0.8$ )

I—易变形区;II—难变形区;III—自由变形区