

钢管连轧理论

GANGGUAN LIANZHA LILUN

王先进 徐树成 编著

冶金工业出版社

钢管连轧理论

王先进 徐树成 编著

北 京

冶金工业出版社

2005

内 容 简 介

本书在总结国外理论研究成果及作者多年研究经验的基础上,对连轧管理论的基本问题包括圆孔型轧管的几何学特征、连轧管运动学及动力学、连轧管过程中的金属流动及变形模型等进行了深入、系统的分析和论述。本书根据接触非同时性和非平面性特征,运用微分几何原理,从理论上揭示了变形区几何边界方程,最小压扁条件与接触区计算方法;分析了浮动芯棒连续轧管三个轧制阶段,三种工作机架及连轧管速度阶跃图示,首次明确提出了连续轧管过程中“断续轧制状态”的科学论断,为连轧管工艺控制奠定了理论基础;根据非对称塑性流动的特点和4种可能的轧制图示,导出了连轧管一般变形模型。

本书可作为从事钢管生产技术工作的工程技术人员、科研设计人员和大专院校材料加工与控制等有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢管连轧理论/王先进等编著. —北京:冶金工业出版社,
2005.1

ISBN 7-5024-3630-8

I. 钢… II. 王… III. 钢管—连续轧制 IV. TG335.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 092699 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 王之光 美术编辑 李 心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2005 年 1 月第 1 版, 2005 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 11.5 印张; 274 千字; 175 页; 1-2000 册

35.00 元

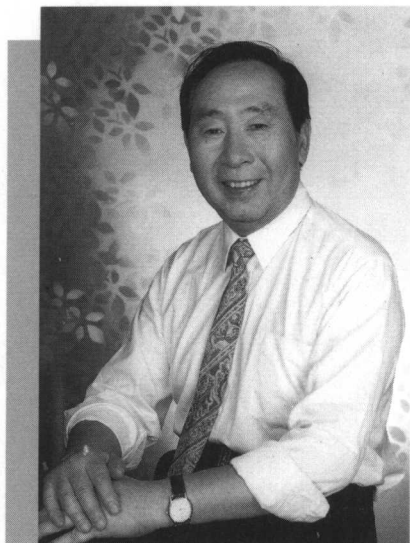
冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

王先进

1937年生于河南，1963年北京钢铁学院压力加工系研究生毕业。1986年起任北京科技大学教授、博士生导师，山东大学名誉教授，燕山大学和武汉科技大学兼职教授。1984年至1996年任北京科技大学压力加工系主任、研究所所长。历任中国金属学会深加工学术委员会主任，北京金属学会压力加工分会主任，中国钢结构协会理事，中国冷弯协会常务理事，中国薄板技术研究会副理事长。《北京科技大学学报》、《钢铁》、《轧钢》、《塑性加工学报》、《冲压》、《金属成型工艺》、《焊管》、《Iron and Steel Research》杂志编委，中国冶金学名词编委会委员。



长期从事钢板钢管成型及深加工领域的教学科研工作。20世纪60年代初，最早发现斜轧穿孔沿圆坯断面变形呈W形分布，揭示了斜轧穿孔的变形断裂机理和工艺实质。70年代，提出并主持冶金部科研项目“可控芯棒连轧管”实验机组的设计、建设和研究工作，提出了连续轧管过程中“断续轧制状态”的概念，为连轧管工艺控制提供了理论根据。编著《连轧管理论基础》并于1978年在北京钢铁学院连轧管进修班、1980年在宝钢、1988年在衡阳钢管厂钢管班讲授。

1982年至1993年期间，多次应邀赴加拿大麦克马斯特大学和美国俄亥俄州立大学进行薄板成型方面的高访研究，回国后率先倡议并开辟钢材深度加工学科新领域，组建中国金属学会深加工学术委员会，提出并主持了七五、九五国家重大攻关项目“薄板成型性能研究”，“IF钢系列品种开发”、“轿车用钢研究开发”等，与宝钢、武钢、鞍钢、一汽、二汽合作攻关，获国家教委，冶金部多项科技进步奖，北京市优秀成果一等奖和国家发明专利。作为“宝钢高等级汽车板品种、生产及使用技术的研究”项目主要负责人获2004年冶金科学技术奖特等奖。主编参编的著作有《冷弯型钢生产及应用》、《薄板成型性能》、《薄板成型与制造》、《钢管连轧理论》、《中国大百科全书矿冶卷》、《中国冶金百科全书塑性加工卷》、《冶金学名词》、《现代英汉科技大词典》等，在国内外期刊和国际会议上发表学术论文200余篇。

多次任中国代表团团长出席国际学术会议，应邀担任IDDRG、ICTP、NUMISHEET、APCMP等大型国际会议执行主席、学术委员、组织委员、论文集主编，曾多次应邀赴宝钢、武钢、美国密执安大学、美国ALCOA公司、加拿大McMaster大学、新西兰Auckland大学、澳大利亚BHP公司等讲学。

前 言

钢管连续轧制是无缝钢管生产的重大关键技术,近30年在国内外已得到广泛应用。迄今为止,国内外尚无有关带芯棒钢管连轧理论的系统专著。

自20世纪70年代中叶开始,我国北京钢铁学院、东北重型机械学院、太原重型机械厂等先后开展了连轧管技术的研究和应用工作。随后,宝钢、衡阳钢管厂、天津无缝钢管厂及包头钢铁公司等连轧管机组陆续投产。

本书系作者在总结国外理论研究成果及本人多年研究经验的基础上,对连轧管理论的基本问题包括圆孔型轧管的几何学特征、连轧管运动学及动力学、连轧管过程中的金属流动及变形模型等进行了深入系统的分析和论述。作者根据接触非同时性和非平面性特征,运用微分几何原理,从理论上揭示了变形区几何边界方程、最小压扁条件与接触区计算方法。剖析了浮动芯棒连续轧管过程的三个轧制阶段、三种工作机架及连轧管速度阶跃图示,首次明确提出了连续轧管过程中“断续轧制状态”的科学论断,为连轧管工艺控制奠定了理论基础。根据非对称塑性流动的特点和四种可能的轧制图示,导出了连轧管一般变形模型。

当代材料加工学科的发展可以概括为正在由一门工艺技术(Technology)向工程科学(Engineering Science)过渡和由原材料加工向深度加工延伸两大趋势,即从以技艺(Art)和经验为基础,以试错(Trial and Error)为基本方法的工艺技术向以模型化、最优化、柔性化为特征,实现过程仿真和超前规划的工程科学阶段过渡,由原材料的初级加工向以材料综合、过程综合、技术综合为特征的多层次开发材料使用价值和附加价值的深度加工延伸。两大趋势的发展都依赖于理论的指导。

鉴于连续轧管过程的复杂性及研究难度,其理论系统尚远未成熟。由于作者水平有限,难免挂一漏万,希望能抛砖引玉,如蒙指正,深表谢意。

本书的出版得到了河北省唐山市遵化建龙钢铁有限公司的大力支持和帮助。他们热情鼓励和鼎力协助使本书得以面市,作者谨表示衷心感谢。

作者能以久病之躯完成本书,还要感谢我的夫人李君慧教授,正是她无微不至的体贴照顾才使本书得以问世。

谨以本书献给所有关心帮助我的亲人和朋友们。

王先进

2004年5月10日

北京科技大学

目 录

引言	(1)
1 圆孔型轧管的几何学特征	(3)
1.1 圆孔型轧管的几何变形区的构成因素	(3)
1.2 圆孔型中管材的变形特征	(5)
1.3 变形区边界方程和最小压扁条件的讨论	(8)
1.4 钢管与孔型原始接触点的确定	(15)
1.5 接触面积的计算	(18)
1.5.1 回转体相贯积分法	(18)
1.5.2 微分几何曲面单元积分法	(21)
1.5.3 考虑展宽和非接触区变形的接触区面积算法	(26)
1.6 圆孔型轧管的咬入条件	(29)
2 钢管连轧动力学和运动学	(31)
2.1 概述	(31)
2.2 钢管连轧的运动学现象	(32)
2.2.1 轧辊平均速度和轧制速度	(32)
2.2.2 滑移现象	(35)
2.2.3 张力系数	(38)
2.3 钢管连轧一般动力学方程	(40)
2.4 连续轧管运动状态的分析	(43)
2.4.1 三个轧制阶段及轧制周期内轧件与芯棒的位移图示	(43)
2.4.2 三种工作机架和同步机架的确定	(44)
2.4.3 断续轧制状态的形成和速度图示	(46)
2.4.4 单机轧制时芯棒运动特征分析	(53)
2.5 连轧管接触面的滑动性质和中性角的计算	(58)
2.5.1 连轧管中性角变化的定性描述	(58)
2.5.2 连续轧管中性角的计算	(61)
2.5.3 前后滑区分界区域边界的分析	(71)
2.5.4 关于前后滑区边界的变化特点	(79)
2.6 断续轧制状态对钢管尺寸精度的影响	(83)
2.6.1 连轧荒管的几何尺寸的变化特征——“竹节”的形成机理	(83)

2.6.2 消除“竹节”和提高钢管精度的措施	(91)
2.6.3 采用电子计算机计算纵向壁厚不均	(98)
2.6.4 偏心壁厚不均的分析	(100)
2.7 芯棒长度的计算	(102)
2.7.1 方法1	(102)
2.7.2 方法2	(105)
2.7.3 Тарновский 关于芯棒运动和长度分析	(107)
2.8 连轧管机工作时间的计算	(110)
3 钢管连轧的金属流动和变形模型	(113)
3.1 轧制过程变形区力学图示	(113)
3.2 圆孔型芯棒轧管的金属流动和可能的轧制图示	(114)
3.3 圆孔型芯棒轧管的单位压力	(124)
3.4 连轧管管内应力分析	(130)
3.5 侧壁处钢管的变形和应力分析	(143)
3.6 连续轧管变形模型	(147)
3.6.1 芯棒轧管基本关系式	(147)
3.6.2 瓦特金单位压力平衡微分方程	(149)
3.6.3 连续轧管一般变形模型	(153)
3.7 冈本塑性理论	(163)
3.8 连轧管后芯棒的滑脱及脱棒力	(168)
参考文献	(175)

引 言

热轧无缝钢管生产的基本变形工序可以概括为3个阶段：穿孔、延伸和精轧。穿孔工序的主要目的是将实心圆坯穿孔成为空心毛管。毛管在规格、精度和表面质量上都不可能满足成品要求，需要通过进一步对金属的变形加以改善。延伸机的主要目的是进一步减小截面（主要是压缩管壁）获得较大的轴向延伸，使毛管在尺寸精度、表面质量和组织性能上获得改善。经延伸机轧制的钢管统称荒管，需要在精轧机上进一步成型以达到成品管的要求。

在圆孔型中轧制钢管的方法广泛地运用于无缝钢管生产中。迄今为止，圆孔型轧制钢管的方法可分为两大类：不带芯棒的轧制（空心体轧制）和带芯棒的轧制。

定径机、减径机和张力减径机属于不带芯棒圆孔型连续轧制，一般属于精轧机。其主要变形工艺的目的是减小管径或定径获得成品钢管，其壁厚由工艺控制，可以使其减薄、增厚或者近似保持不变。

传统的带芯棒的圆孔型轧制有3种形式：

- (1) 带固定芯棒的单机座轧管机（自动轧管机）；
- (2) 带自由浮动的长芯棒的连续轧管机（M. M）；
- (3) 变断面圆孔型中长芯棒周期轧管机（皮尔格轧机）。

所有传统的带芯棒的圆孔型轧管机都属于延伸机。主要的变形工艺目的是在轧辊孔型和芯棒所构成的变形区内减小穿孔毛管的壁厚和外径，获得较大的轴向延伸，同时在组织、性能、精度、表面质量方面得到一定改善。

目前，国外还在继续研制新型的带芯棒轧管机，包括：

(1) 带强制推力的穿孔机（P. P. M）。在强制后推力、带圆孔型的轧辊和固定芯棒作用下，将方形坯料穿孔成空心毛坯，作为一种新型穿孔方式，正在引起人们的重视。

(2) 作为自动轧管机改造方案，出现了双机架跟踪式固定芯棒轧管机和三机架限动芯棒轧管机，由于简化了操作，强化了变形过程，轧制工艺趋于合理，机组产量可获得大幅度增长。

(3) 以限动芯棒多机架连轧管机（M. P. M）代替自由浮动的长芯棒连轧管机（M. M）是连续轧管技术的新发展。轧制时强制芯棒以小于管材速度产生运动，可以用较短芯棒轧制更长的荒管，并且在轧制状态的控制上表现出新的特征，使轧制过程是连续的、而轧制状态是断续的M-M方式产生了质的变化。世界上已有多个机组投入生产。人们称之为第三代连轧管机。

我们以后将把芯棒速度可以控制从而轧制状态可以控制的M. P. M轧机称为可控芯棒连轧管机。

圆孔型轧管方式的应用见表0-1。

表 0-1 圆孔型轧管方式的应用

工 序	传 统 方 式	新 型 方 式
穿 孔		P. P. M 压力穿孔机
延 伸	固定短芯棒单机轧制 (自动轧管机)	跟踪式双机座轧机 三机架限动芯棒轧机
	浮动长芯棒连续轧制 (连续轧管机 M. M)	M. P. M 限动芯棒连轧机
	变断面孔型长芯棒往复轧制 (周期轧管机)	多排辊冷轧管机
精 轧	定径机 减径机	张力减径机

圆孔型中钢管连续轧制包括不带芯棒的空心体连续轧制(定径、减径、张力减径)和带芯棒连续轧制。其轧制过程是一个复杂的金属塑性变形的过程,其复杂性表现为:

(1) 空心体在具有孔型轮廓的轧辊和芯棒作用下,金属产生的塑性变形具有明显的不均匀的三维变形和孔型轧制特征。压下的不均匀性、接触的非同时性、工具形状的强迫作用和孔型周边各点的速度差等孔型轧制的特点使钢管的变形过程复杂化。

(2) 钢管同时在多个机架中轧制时必须满足一般连轧条件,保持连续轧制的特征,服从稳态连轧的基本方程,即秒流量相等条件;运动协调方程;张力公式。由于各架轧件的形状和尺寸的复杂性,影响到上述稳态连轧基本方程的描述和控制非常复杂。

(3) 轧制过程中,芯棒属于刚—弹性变形工具,各机架是由被轧金属和芯棒相连接共同构成一个动力系统,由于刚性芯棒和塑性金属在各轧制阶段运动速度不相协调,引起了轧制状态图示、运动状态图示的复杂化、变形模型多样化,轧制状态和荒管的尺寸因素都出现规律性的反应。断续轧制状态是浮动芯棒连续轧管的基本特征。

(4) 和带钢与型钢连轧相比,钢管连轧稳态轧制阶段较短,大部分毛管处于非稳态轧制阶段,整个轧制过程的动力系统、电气系统的动态特征复杂。

据此,至今为止连续轧管理论尚处于定性描述阶段,距定量解析整个轧制过程的变形机理和工艺控制的数学模型尚有相当大的距离。

本书将以圆孔型连续轧管为对象,以全浮动的芯棒连续轧管方式为主,对连续轧管理论的若干问题作一粗略的讨论。

1 圆孔型轧管的几何学特征

钢管在工具作用下产生的变形,从根本上讲是钢管本身的因素(几何的、物理的、物理-化学的等)和工具的因素组成矛盾双方相互作用的结果。工件因素和工具因素所构成的对立统一关系在轧制过程中主要表现为以下几个方面的条件(参数):

- (1) 几何条件;
- (2) 咬入条件;
- (3) 运动学和动力学条件;
- (4) 应力应变和金属流动条件;
- (5) 力能条件。

变形的几何条件研究工件与工具相互作用的外部几何关系,构成了变形区的几何边界,和简单轧制相比,钢管在圆孔型中轧制的几何条件要复杂得多,分析几何学特征是我们分析变形过程各参数的基础。

1.1 圆孔型轧管的几何变形区的构成因素

几何变形区乃是指稳定轧制时工件与工具接触边界内的金属变形区域。带芯棒的圆孔型轧管变形区是由轧辊孔型形状和结构、芯棒形状和结构及毛管尺寸和形状所决定的。

现用的轧辊孔型形状有以下三种:

(1) 圆孔型,包括正圆孔型,带直线侧壁圆孔型和带圆弧侧壁(单圆弧,双圆弧等)的圆孔型等。

(2) 椭圆孔型,包括带圆弧侧壁椭圆孔型和不带侧壁的椭圆孔型等。

(3) 多弧边孔型,包括六角弧边孔型等。

各种孔型如图 1-1 所示。表示孔型形状和尺寸的主要几何参数有:孔型高度 b ,孔型宽度 B ,顶部圆弧半径 r_k ,侧壁角 α_B ,侧壁圆弧半径 ρ ,椭圆孔型偏心距 e ,辊环圆角半径 r ,轧辊辊缝 Δ ,轧辊理想直径 D_i ,孔型椭圆度 ξ 。

当已知孔型宽度 B 和孔型高 b 时

$$\xi = \frac{B}{b} \quad (1-1)$$

$$r_k = \frac{b}{4}(\xi^2 + 1) = \frac{b}{2} + e \quad (1-2)$$

$$e = \frac{b}{4}(\xi^2 - 1) \quad (1-3)$$

侧壁的作用是保证金属实现正常的咬入,并在金属断面压缩,轴向延伸时控制横向展宽,防止出现“耳子”。

连轧管机所用芯棒是圆柱形或弱锥形,在限动芯棒轧制时采用 0.2%~0.5% 锥度。

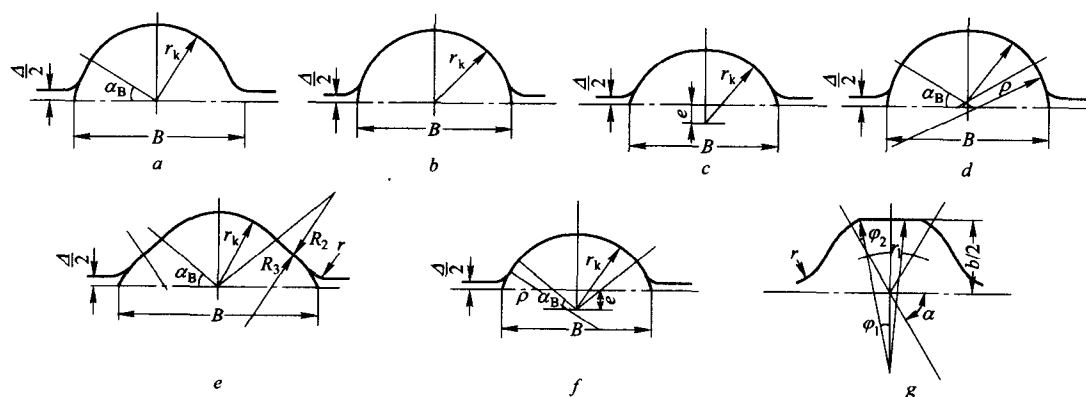


图 1-1 常用孔型的几何参数

a—直侧壁圆孔型；b—无侧壁圆孔型；c—椭圆孔型；d—单圆弧圆孔型；

e—双圆弧侧壁圆孔型；f—圆弧侧壁椭圆孔型；g—六边棱孔型

毛管的尺寸和形状由穿孔机决定，通常二辊斜轧穿孔的毛管前端外径比中部、尾端大。对第2架以后的各架，其轧件形状不再是圆形而是前一架孔型实际轧出的截面，通常是一种特殊形状，近似椭圆形。

实际的变形区形状极为复杂，图 1-2 为沿孔型顶部变形区截面形状。在生产中具有重要实际意义的是咬入角 α_0 ，变形区长度 l_0 （包括减径区长度 l_1 和减壁区长度 l_2 ）和接触区面积的水平投影。

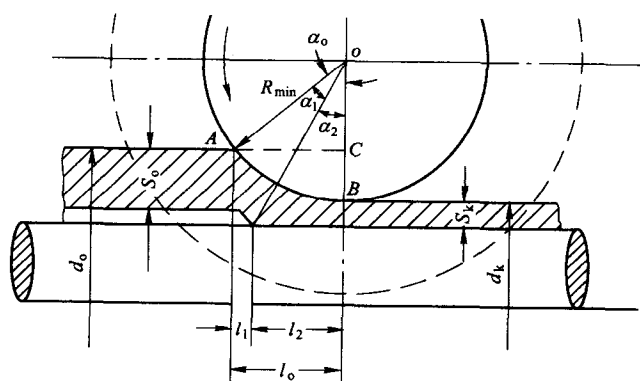


图 1-2 沿孔型顶部变形区截面形状

沿孔型顶部接触弧的水平投影称为变形区长度 l_0 ， l_0 是一个重要的几何参数。

$$l_0 = R_{\min} \sin \alpha_0 \quad (1-4)$$

根据变形区几何关系：

$$\cos \alpha_0 = \frac{OC}{R_{\min}}$$

$$OC = R_{\min} - BC = R_{\min} - \frac{1}{2}(d_o - d_k)$$

$$\text{故} \quad \cos \alpha_o = 1 - \frac{(d_o - d_k)}{2R_{\min}}$$

$$\text{因为} \quad l_o = R_{\min} \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_o}$$

$$\text{所以} \quad l_o = \frac{d_o - d_k}{2} \sqrt{\frac{4R_{\min}}{d_o - d_k} - 1} \quad (1-5)$$

$$\text{咬入角} \quad \alpha_o = \arccos \left(1 - \frac{d_o - d_k}{R_{\min}} \right)$$

$$\begin{aligned} l_2 &= \sqrt{(R_{\min} + S_o)^2 - (R_{\min} + S_k)^2} \\ &= \sqrt{(S_o - S_k)(2R_{\min} + S_o + S_k)} \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$l_1 = l_o - l_2 \quad (1-7)$$

1.2 圆孔型中管材的变形特征

我们以穿孔后的圆形毛管进入第1架为例讨论毛管咬入后的变形过程。

毛管被推料机喂入孔型时，管子首先和孔型的侧壁 a 、 b 、 c 、 d 相接触（见图1-3）。沿纵向不同剖面所得轧辊孔型轮廓分别为不同形状的椭圆，其宽度不变，然而随着距出口截面愈大孔型顶部高愈大，轧辊辊环间隙愈大。孔型轮廓相应地由宽度大于高度变为高度大于宽度。在某一剖面，孔型轮廓上 a 、 b 、 c 、 d 4点与毛管周边的4点相接触。此后，随着轧辊的旋转，依靠轧辊和轧件之间的摩擦力（当满足第一次咬入条件时）将轧件曳入变形区内。

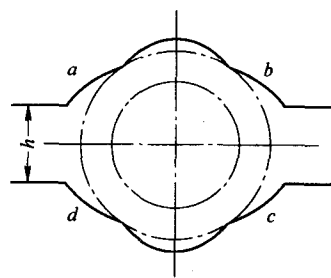


图 1-3 开始接触点

随着轧辊的旋转，辊间距减小，两个孔槽逐渐靠拢，金属在辊面上的点接触逐渐变为面接触，从而产生压扁变形。

由此可见，由于接触瞬间孔型轮廓和毛管形状不相吻合，毛管和轧槽首先在个别点而不是同时在孔型周长上接触。在曳入过程中作用于轧件的外力将使毛管只产生形状变化（压扁）而几乎不产生断面缩小（延伸），保持断面的平均周长几乎不变。此时的变形不是延伸变形而属于塑性弯曲变形。

为了说明压扁变形产生的必然性，现在我们对毛管横断面在稳定轧制时进入轧槽的瞬间的情况进行研究。当轧件与轧辊 a 点接触后形成一个接触弧，它由 θ_p 代表（见图1-4）。为了确定横断面的变形是如何发展的，我们可以对一个单位宽度的管环的应力状态做一研究。该管环由两个与轧制线垂直的平面所切出，并受法向单位压力作用。在所研究的平面里，孔型外形近似认为是圆弧。根据平衡条件，管环 B 断面的法向力 N_B 为

$$N_B = \sigma_\theta \cdot r \cdot \frac{\sin \theta_\pi}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right)} \quad (1-8)$$

式中 σ_θ ——管环上切向平均应力；

r ——孔型圆弧半径；

α_B ——侧壁角。

由于管环和所加负荷相对于通过轧制线和孔型中心线的平面对称的，故 B 截面上不存在剪应力，弯矩 M_B 的确定条件是 B 断面相对 A 断面无转角。即

$$\int_0^{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right)} \frac{M_\theta M_o}{EJ} r d\theta = 0 \quad (1-9)$$

式中 M_θ ——在任一 θ 断面上的弯矩；

M_o ——单位负荷在 B 断面上所造成的弯矩， $M_o = 1$ ；

E ——弹性模量；

J ——惯性矩。

θ 断面上的弯矩：当 $0 \leq \theta \leq \theta_\pi$ 时

$$M_\theta = M_B - N_B r \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B - \theta\right) \right] + \sigma_\theta r^2 [1 - \cos(\theta_\pi - \theta)] \quad (1-10)$$

当 $\theta_\pi \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha_B$ 时，

$$M_\theta = M_B - N_B r \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B - \theta\right) \right] \quad (1-11)$$

把 M_θ 代入式 (1-10)，经积分后变换得

$$M_B = \sigma_\theta r^2 \left[\frac{\sin \theta_\pi}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right)} - \frac{\theta_\pi}{\frac{\pi}{2} - \alpha_B} \right] \quad (1-12)$$

图 1-5a 为 M_B 随 θ_π 的变化曲线，随 θ_π 增大， M_B 先是增加，而后减小，当金属全部

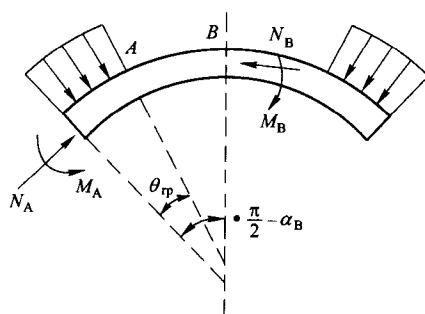


图 1-4 开始接触时受力分析

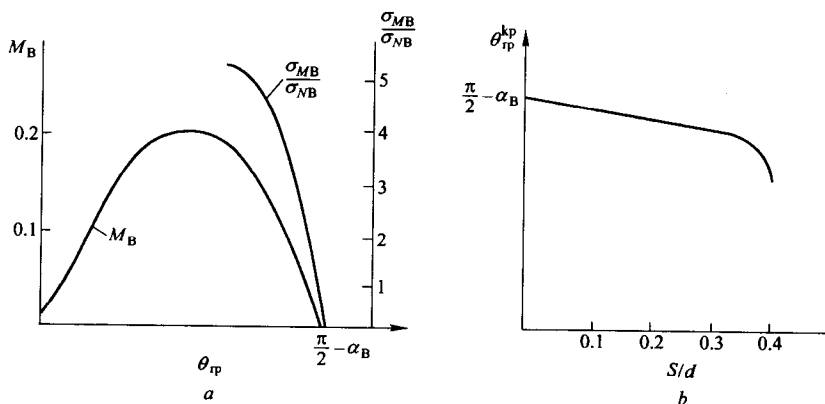


图 1-5 $M_B \frac{\sigma_{MB}}{\sigma_{NB}}$ 与 θ_π 关系(a) 及 S/d 对 θ_π^{kp} 影响(b)

被咬紧时, $M_B = 0$ 。

B 断面上的应力由两部分构成, 即法向力 N_B 引起的 σ_{NB} 和 M_B 引起的 σ_{MB} 复合作用所决定。外表面上金属的切向应力

$$\sigma_B = \sigma_{NB} + \sigma_{MB} \quad (1-13)$$

式中 σ_{NB} ——压缩力引起的压应力;

σ_{MB} ——弯矩引起的张应力。

由式 (1-13) 得到

$$\frac{\sigma_{NB}}{\sigma_{MB}} = \frac{s}{2d} \frac{1}{\left[1 - \frac{\theta_{rp}}{\sin \theta_{rp}} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right)}{\frac{\pi}{2} - \alpha_B} \right]} \quad (1-14)$$

计算表明: 在 θ_{rp} 较小的变形开始阶段, σ_{MB} 的绝对值大于 σ_{NB} (图 1-5a)。这说明虽然此时管内表面产生了压应力并且产生了塑性变形, 但在外表面却存在拉应力, 在这种条件下, 管环的塑性变形是无周边减小的形状变化的结果。随 θ_{rp} 继续增大, σ_{MB} 减小, 而 σ_{NB} 增大, 并逐步达到出现外表面上的应力和等于零的瞬间, 此时开始才会发生周边减小的变形。我们把停止弯曲的那个角度称为临界角 θ_{rp}^{kp} , 并根据式 (1-14) 取 $\sigma_{NB}/\sigma_{MB} = 1$ 得到

$$\frac{\theta_{rp}^{kp}}{\sin \theta_{rp}^{kp}} = \frac{\frac{\pi}{2} - \alpha_B}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right)} \left(1 - \frac{S}{2d}\right)$$

上式的关系曲线见图 1-5b。可见, θ_{rp}^{kp} 随 S/d 增加而减小, 随 S/d 增大至 0.4 时, θ_{rp}^{kp} 的大小变化约 15° 对大多数连轧毛管 ($S/d < 0.15$), 管子在开始时的变形都属于无周边减小的形状变化, 直到管子表面取得孔型形状为止。

压扁过程将使接触区向两个方向发展, 一是沿孔型侧壁向开口区逐步增加接触面, 引起横向尺寸的展宽; 二是沿孔型圆形部分逐步向顶部扩展直至孔型顶部充满。

管壁愈厚, 孔型愈窄则侧壁压力愈大, 将使压扁过程受阻, 而较早开始延伸变形。因此, 孔型愈窄或壁厚愈大时压扁则较早停止, 表现出延伸愈大。

因此, 主要是由毛管断面的压扁而充满孔型。从轧制轴方向看, 变形区的边界不是一个平面曲线, 具有接触的非同时性特征。

为了减小压扁量, 增加延伸, 务求所选用的孔型在咬入瞬间有较大部分的周长与轧件接触, 也就是孔型形状应尽可能的使变形区边界线接近平面曲线。基于上述分析, 在孔型设计时, 应考虑到限制压扁量, 增加接触瞬间的接触弧, 这就要求不仅要考虑孔型本身, 而且要和所轧的管子形状联系起来综合考虑, 这个原则我们认为对无芯棒轧制时意义尤其大。

当压扁变形发生到一定程度时, 管子开始产生减径和纵向延伸。在管子完全与孔型顶部接触后, 管材产生减径变形。轧制带钢时, 可用压下量作为延伸变形的衡量尺度。而在减径机上, 仅仅采用减径量衡量变形是不行的, 因为大部分外径压下量没有体现在延伸上, 而是开始使管材产生压扁, 进而才部分产生延伸, 部分产生壁增厚 (当 S/d 较小

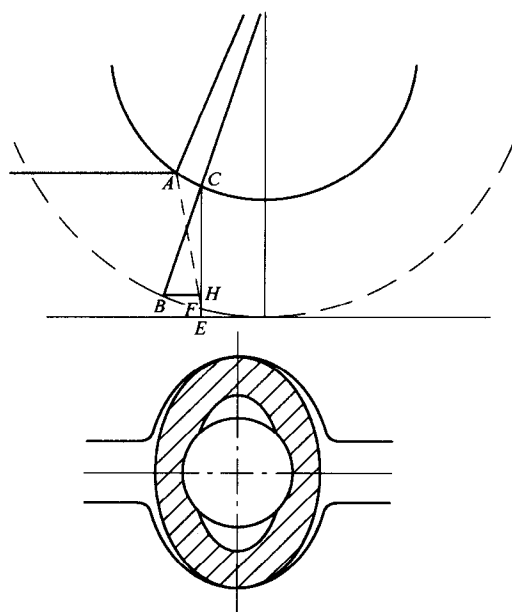


图 1-6 开始接触在顶部时的情况

时)。在带芯棒轧制时, 由于存在减壁区, 限制了压扁变形。

对于第 2 架以后的变形过程, 由于轧件从前一架轧出为椭圆形, 因而原始接触点乃是首先接触孔型顶部, 同样开始产生压扁, 随接触弧边界的发展进而实现金属延伸。图 1-6 示出开始在顶部接触的变形区, 管材与孔型顶部在 A 点相遇产生压扁, 在金属入口区某一位置可以找到一个与轧制线相垂直的平面 CE, 此平面与孔型表面和尚未与孔型表面接触的管材表面共同组成一条封闭曲线, 此曲线等于入口断面管子周长, 即满足管材原始周长等于 CE 截面处的周长, CE 平面上管子周边分为两个部分: $\widehat{CH}$ 为与孔型有相同形状部分, $\widehat{EH}$ 为与孔型不接触部分。从这一断面以后, 管子开始发生断面减小的变形即减径过程。

1.3 变形区边界方程和最小压扁条件的讨论

以上我们讨论了圆孔型变形过程的第一阶段是压扁, 压扁的根本原因是孔型形状和轧件形状不相吻合而导致接触的非同时性, 使接触边界具有空间曲线的特点, 即非平面性特点。可见压扁值与接触边界曲线的非平面性之间存在内在的联系。

边界方程乃是轧件与工具开始接触曲线的数学表达式。

假设孔型形状为无侧壁的圆孔型, 毛管是圆柱形, 变形区的边界计算一般采用图解法、分析法。

图解法具有直观、形象的图形, 但比较繁琐, 精度较差。

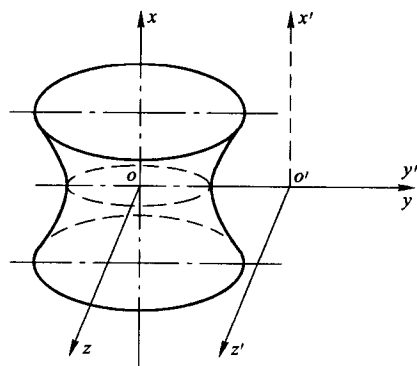
分析法比较精确, 便于运算, 但缺乏形象直观的图形, 不便判断图像。

应该指出, 边界方程的精确解至今尚未解决, 这是因为我们所研究的对象是一个三维变形系统的塑性体, 其变形的若干物理机理包括金属展宽和压扁、管壁增厚和拉薄、非接触区的影响等还没有认识清楚。因此, 在确定边界方程中把对象简化为两个轴线空间相垂的旋转体相贯加以处理。

孔型表面由圆孔型绕轧辊轴回转形成空间曲面, 其曲面方程为

$$x^2 + \left(\sqrt{y^2 + z^2} + \frac{D_i}{2} \right)^2 = \frac{b^2}{4} \quad (1-15)$$

在此取坐标原点为 o' (见图 1-7、图 1-8)。

图 1-7 坐标系 xyz 及 $x'y'z'$

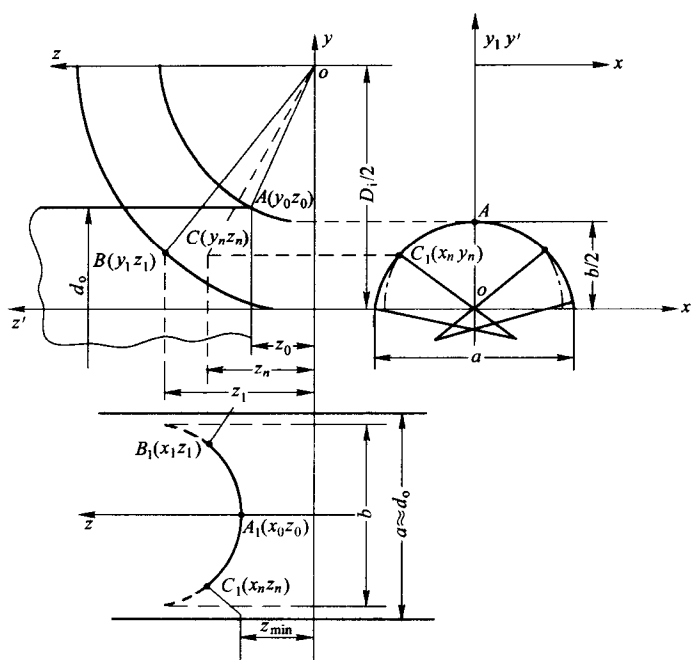


图 1-8 确定边界方程式

式中 x ——轧辊轴方向；
 y ——轧辊孔槽对称轴方向；
 z ——从出口平面沿轧制轴线的反方向；
 D_i ——轧辊名义直径；
 b ——孔型直径。

毛管表面为圆柱曲面，其表面方程为：

$$x^2 + \left(y + \frac{D_i}{2}\right)^2 = \frac{d_o^2}{4} \quad (1-16)$$

式中 d_o ——毛管直径。

求证：取坐标原点为出口截面管子中心 o' ，则孔型表面在 $z' = 0$ 时的曲线为圆，即在 $o'x'y'z'$ 坐标系中。

$$x'^2 + y'^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

当原点 o' 沿 y 反向移动 $\frac{D_i}{2}$ 时，坐标系为 $oxyz$ 在 $z=0$ 的 x 、 o 、 y 面上曲线方程为：

$$x^2 + \left(y + \frac{D_i}{2}\right)^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

所以

$$y = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - x^2} - \frac{D_i}{2}$$

根据多元函数空间曲面概念, 曲线沿 x 轴旋转一个回转曲面, 该曲面方程可由下式求得。取不同 x , 截面为圆, 其方程为

$$y^2 + z^2 = R_x^2$$

该曲线满足旋转曲面方程

$$x^2 + \left(y + \frac{D_i}{2}\right)^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

上式为不同 x 的回转平面上的半径 (R_x), 代入得

$$y^2 + z^2 = R_x^2 = \left(\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - x^2} - \frac{D_i}{2}\right)^2$$

即

$$\left(\sqrt{y^2 + z^2} + \frac{D_i}{2}\right)^2 + x^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

求证毕。

将方程式 (1-15) 和式 (1-16) 联立即得到二回转曲面相贯曲线, 它是一条空间曲线 (图 1-8)。

$$\begin{cases} 4x^2 + (\sqrt{4y^2 + 4z^2} + D_i)^2 = b^2 & (1-17) \\ 4x^2 + (2y + D_i)^2 = d_o^2 & (1-18) \end{cases}$$

由式 (1-18) 得: $d_o^2 - 4x^2 = (2y + D_i)^2$

$$y = -\frac{1}{2}(D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2}) \quad (1-19)$$

代入式 (1-17) 得: $4x^2 + [\sqrt{(D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2})^2 + 4z^2} + D_i]^2 = b^2$

$$\begin{aligned} b^2 - 4x^2 &= [\sqrt{(D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2})^2 + 4z^2} + D_i]^2 \\ &\quad - (D_i - \sqrt{b^2 - 4x^2})^2 \\ &= \sqrt{(D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2})^2 + 4z^2} \\ 4z^2 - (D_i - \sqrt{b^2 - 4x^2})^2 + (D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2})^2 &= 0 \end{aligned} \quad (1-20)$$

式 (1-20) 即为边界线在 xoz 平面上的平面投影的方程。由此可得

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{(D_i - \sqrt{b^2 - 4x^2})^2 - (D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2})^2} \quad (1-21)$$

此乃不同 x (宽度) 时接触区的长度。

以 x 为独立参数, 则可得参数形式的变形区方程

$$\begin{cases} y = -\frac{1}{2}(D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2}) \\ z = \frac{1}{2} \sqrt{(D_i - \sqrt{b^2 - 4x^2})^2 - (D_i - \sqrt{d_o^2 - 4x^2})^2} \end{cases}$$

y 值为负无物理意义, 仅由坐标原点决定。

对于不带侧壁的圆孔型, 参数 x 的绝对值由 0 到 $\frac{b}{2}$ 之间变化, 当 $x=0$ 即孔型顶部时, 边界线的水平坐标 (孔型顶部纵断面的变形区长度) 为