

高等学校教学用书 •

金属塑性加工学

——轧制理论与工艺

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属塑性加工学

——轧制理论与工艺

东北工学院 王廷溥 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属塑性加工学

——轧制理论与工艺

东北工学院 王廷溥 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787 × 1092 1/16 印张21 3/4 字数520千字

1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷

印数00,001~4,400册

ISBN 7-5024-0174-1

TF·61(课) 定价3.60元

前 言

《金属塑性加工学——轧制理论与工艺》一书是根据1982年冶金部教材工作会议所制定的1984~1988年教材规划编写的。全书共分轧制理论、轧制工艺基础、开坯及型线材生产、板带材生产及管材生产五篇，共计二十章，内容包括钢铁和有色金属材料的轧制理论与工艺。按照教学要求，本书尽力做到突出重点，精选内容，并力求反映国内外的先进技术和新成就，理论联系实际，能使内容有一定的广度，以便在教学使用中具有一定的灵活性。本书除作为高等学校金属压力加工专业教学用书外，也可供生产、科研和设计部门的工程技术人员参考。

本书由王廷溥（第二篇及第四篇）、于淑娴（第一篇及第三篇）和周忠民（第五篇）编写，王廷溥任主编。由于编者水平所限和时间仓促，书中定会有不少缺点和错误，请读者给予批评指正。

编 者

1986年9月

绪 论

金属压力加工过程即是使金属塑性变形的过程。故压力加工亦称塑性加工，其作用不仅是通过塑性变形改变金属的形状和尺寸，而且也改善其组织和性能。塑性加工的方法主要有锻造、冲压、拉拔、挤压和轧制等多种，其中轧制在冶金工业、尤其是钢铁工业中是最主要的加工方法。在钢的生产总量中，除少部分采用铸造和锻造等方法直接制成器件以外，其余占90%以上的钢都须经过轧制成材。许多有色金属与合金材料也都是靠轧制方法进行生产。由此可见，金属材料的轧制生产在国民经济中占有极其重要的地位。

本世纪六十年代以来，随着冶金和机械电气工业的进步、电子计算机自动控制技术的应用以及社会总体科学技术水平的提高，金属材料的轧制技术，尤其是轧钢技术，在工艺、设备和理论上也都有着飞跃的发展。总的看来，金属轧制工业技术发展的主要特点和趋势为：

(1) 轧制理论由于与实际结合更加紧密而得到迅速发展 近代由于电子计算机自动控制技术的推广应用，使轧制理论及有关数学模型的实际用处显著增大；各种轧制新工艺、新技术（如不对称轧制、板形控制技术）的出现和新的研究方法（如有限元法、极限分析法等）的开拓，也促使轧制理论不断得到新的发展，新理论反过来又指导和促进了轧制新技术的发展。

(2) 生产过程日趋连续化，作业速度不断提高 近二十年来，带钢和线材生产过程连续化更加完善，并出现了连续钢管轧机和连续型钢轧机。像无头轧制这样的完全连续式作业线，已由线材生产推广应用于冷轧带钢及连续焊管生产。近年还出现了包括电解脱脂、退火、冷却、平整及卷取等多个工序的连续精整作业线，使生产效率大为提高。尤其值得注意的是从冶炼、铸锭到轧制全过程的连续化，亦即连续铸轧或连铸-连轧技术，不仅在铝、铜等有色金属材料生产中日益得到推广和应用，而且在钢材生产中近年也取得了新的进展和成就。与此同时，生产过程的连续化也为提高作业速度创造了条件。近代各种轧机的轧制速度不断提高，例如线材轧制速度已超过了100m/s，带材冷轧速度达到41.7m/s，钢管张力减径速度达到20m/s。

(3) 生产过程自动化日益完善 生产过程自动化不仅是提高轧机生产能力的重要条件，而且是提高产品质量、节省劳力、降低消耗的重要前提。六十年代以后发展起来的电子计算机技术在轧钢生产中已得到日益普遍的应用，尤其在带钢连轧机上应用得最为全面。目前采用的多层计算机控制系统，不仅实现了过程控制和数字直接控制，而且使计算机技术在企业管理上也得到了应用。许多工厂正将电子计算机自动控制技术扩大应用到钢材精整、热处理及无损探伤等方面。

(4) 生产过程日趋大型化、专业化的同时，又转向发展中、小型灵活生产系统，亦即柔性生产系统 由于社会需要量的增大和冶炼生产能力的提高，使轧材生产规模不断扩大，例如带钢热连轧机年产可达600万吨以上，卷重达45 t；冷连轧机年产可达200万吨以上，卷重达60 t。厚板、薄板、H型钢、巨型管线等生产设备都在日趋重型化、专业化。但另一方面又由于原料供应和产品销路的限制，要求企业向中小型灵活生产系统发展。这

样企业投资小、建厂快，可提高投资效果和增强竞争能力。

(5) 节约能源和金属消耗以降低生产成本、提高经济效益的新工艺新技术得到大力发展。大力发展连铸钢坯并进一步采用连铸-连轧技术，可以大大提高成材率、节约能源消耗、简化工艺过程和降低生产成本。此外，还有很多新工艺新技术，如“液芯加热及轧制”、初轧坯“直接轧制”、钢坯保温抢温技术、低温轧制技术、ZF法铸锭及“大头进钢”轧制、“平面形状控制轧法”等等，也正在得到积极开发和推广应用。

(6) 采用自动控制及新技术以大大提高产品的尺寸精度及成型质量。采用计算机自动控制、板型控制、不对称轧制、HC轧机、FFC轧机等新技术和新轧机，都可大大提高钢板尺寸、形状和表面质量的控制精度。例如，能使厚5mm以下的热轧宽带钢的厚度精度控制到 $\pm 0.025\text{mm}$ ，冷轧带钢控制到 $\pm 0.004\text{mm}$ ；使盘重4.4t的线材直径精度控制在0.1mm以内；使冷加工钢管外径偏差达0.05mm，壁厚偏差达0.01mm，表面粗糙度在 $0.4\sim 1.6\mu\text{m}$ 之内。

(7) 发展合金钢种与控制轧制工艺以提高钢材性能质量。利用锰、硅、铌、钛、钒等微量合金元素生产低合金钢种，配合控制轧制、控制冷却新工艺，可以显著提高钢材使用性能，延长使用寿命。近年由于工业发展的需要，对石油钻采用管、造船钢板、深冲钢板及硅钢片等生产技术的提高特别注意，故在这些方面取得的成就也特别显著。

(8) 不断扩大钢材品种规格及增加板带钢和钢管的产品比重。现在钢材品种规格已达数万种之多。已能生产 $1200\times 530\text{H}$ 型钢、78公斤重轨、直径1.6m以上的管线、宽5m以上的钢板、薄至0.1mm以下的镀锡板等。近年来，经济钢材（包括经济断面钢材和异型少（无）切削钢材）和冷弯型材的生产，发展很快。H型钢在几个主要国家已占大型钢材产量的30~45%，可使金属节约30~40%。各种特殊断面及变断面钢材、各种镀层复层钢材都有很大发展。在钢材总产量中板带及钢管所占比重不断增大。在工业发达国家板带钢占50~65%，美国则达66%以上。

轧制生产技术发展的这些特点正是反映了当前轧制工艺理论研究的主要内容。轧制工艺理论主要是研究如何通过理论分析及工艺改进来达到提高钢材的产量、质量、扩大品种并降低各项消耗和成本的目的。

通过对轧制工艺理论课程的学习，应能做到：1) 了解和掌握轧制基本理论并熟悉各类轧材的生产工艺过程、工艺规律及有关计算方法与数学模型，掌握轧制生产的基本知识；2) 了解与掌握工艺分析的基本方法及改进技术经济指标的途径；3) 具有合理组织轧制生产工艺过程、制定工艺规程的初步能力；4) 了解当代国内外轧制生产新技术及新成就。

由于金属材料品种繁多，轧制工艺理论课的内容十分广泛。本书只能重点讲述较为先进和典型的技术内容。为了加强理论和实际的联系，在学习本课程之前应先学习金属压力加工原理等课程；同时，在学习过程中应配合专业实习、现场教学等教学环节，才能很好完成本课程的学习任务，达到预期的目的。

目 录

结论	VI
第一篇 轧制理论	1
1 轧制过程基本概念	1
1.1 变形区主要参数	1
1.2 金属在变形区内的流动规律	5
2 实现轧制过程的条件	9
2.1 咬入条件	9
2.2 稳定轧制条件	11
2.3 咬入阶段与稳定轧制阶段咬入条件的比较	12
2.4 改善咬入条件的途径	13
3 轧制过程中的横变形——宽展	15
3.1 宽展及其分类	15
3.2 影响宽展的因素	18
3.3 计算宽展的公式	27
3.4 在孔型中轧制时宽展特点及其简化计算方法	30
4 轧制过程中的纵变形——前滑和后滑	34
4.1 轧制过程中的前滑和后滑现象	34
4.2 轧件在变形区内各不同断面上的运动速度	35
4.3 中性角 γ 的确定	37
4.4 前滑的计算公式	39
4.5 影响前滑的因素	40
4.6 连续轧制中的前滑及有关工艺参数的确定	43
5 轧制压力及力矩的计算	47
5.1 计算轧制单位压力的理论	47
5.2 轧制压力的工程计算	56
5.3 主电动机传动轧辊所需力矩及功率	74
第二篇 轧制工艺基础	81
6 轧材种类及其生产工艺流程	84
6.1 轧材的种类	84
6.2 轧材生产系统及生产工艺流程	86
7 轧制生产工艺过程及其制定	92
7.1 轧材产品标准和技术要求	92
7.2 金属与合金的加工特性	93
7.3 轧材生产各基本工序及其对产品质量的影响	95
7.4 拟订轧制产品生产工艺过程举例	103
第三篇 轧制开坯及型、线材生产	106
8 轧制开坯	106

8.1 概述	106
8.2 初轧机类型及生产特点	106
8.3 钢锭及其质量	109
8.4 初轧生产工艺	113
8.5 初轧机的速度制度	121
8.6 初轧机的自动化	130
9 型材生产	132
9.1 概述	132
9.2 型钢轧机及型钢轧制法	133
9.3 常用型钢生产	137
9.4 H型钢生产	138
9.5 重轨生产	141
9.6 型钢轧制检控技术的发展	143
10 线材生产	147
10.1 概述	147
10.2 线材轧机类型及其布置	147
10.3 线材生产工艺	152
10.4 线材高速无扭轧制	158
10.5 线材的控制冷却	161
第四篇 板带材生产	165
11 概述	165
11.1 板带材分类及其主要技术要求	165
11.2 板带轧制技术的发展	166
12 热轧板带材生产	170
12.1 中厚板生产	170
12.2 热连轧板带材生产	176
12.3 中小企业板带材生产	183
13 冷轧板带材生产	188
13.1 冷轧板带材生产工艺特点	188
13.2 冷轧板带生产工艺流程	190
14 板带材高精度轧制和板形控制	200
14.1 板带材轧制中的厚度控制	200
14.2 横向厚差与板形控制技术	204
15 板带材轧制制度的确定	219
15.1 制定轧制制度的原则和要求	219
15.2 压下规程或轧制规程设计(设定)	223
第五篇 管材生产工艺和理论	243
16 热轧无缝管材的主要加工形式和基本工艺过程	245
16.1 穿孔方法	245
16.2 轧管方法	247
16.3 毛管精轧	252

16.4 热轧无缝钢管生产的一般工艺过程	253
17 斜轧原理与工具设计	257
17.1 斜轧过程的运动学	257
17.2 斜轧过程中轧件的变形	261
17.3 斜轧的咬入条件	268
17.4 斜轧穿孔压力和力矩的计算	272
17.5 斜轧穿孔机的工具设计	274
18 管材纵轧原理和工具设计	278
18.1 管材纵轧变形区的特点	278
18.2 管材纵轧变形区的速度分析	280
18.3 管材纵轧的咬入条件	283
18.4 纵轧管机的工具设计和轧机调整	284
18.5 轧制表计算	300
19 管材冷加工	304
19.1 概述	304
19.2 周期性冷轧管机轧制的变形原理和工具设计	308
20 焊管生产工艺	322
20.1 电焊管生产方法概述	322
20.2 辊式连续成形机生产电焊钢管的基本问题	325
20.3 辊式连续成形机的轧辊孔型设计	330
20.4 圆周弯曲法的孔型设计	332
参考文献	339

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,还必须具有一定的性能。为了了解和控制轧制过程,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

通常人们在生产实践中遇到的轧机结构形式多种多样,为了搞清楚共同性的问题,轧制原理先从简单轧制过程研究起。所谓简单轧制过程,即上下轧辊直径相等,转速相同,且均为主动辊;轧制过程对两个轧辊完全对称;轧辊为刚性的;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。

理想的简单轧制过程在实际中是很难找到的,但是为了讨论问题方便,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:

(1) 咬入角(α)

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

$$\begin{aligned}\Delta h &= 2(R - R\cos\alpha) \\ \text{因此得到} \quad \Delta h &= D(1 - \cos\alpha)\end{aligned}\quad (1-1)$$

$$\text{又} \quad \cos\alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D} \quad \text{得} \quad \sin\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-2)$$

当 α 很小时($\alpha < 10 \sim 15^\circ$)。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;

Δh ——压下量。

为了简化计算,把 $\Delta h, D$ 和 α 三者之间的关系绘制成计算图,见图1-2。这样,已知 $\Delta h, D$ 和 α 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 ,可按式求得:

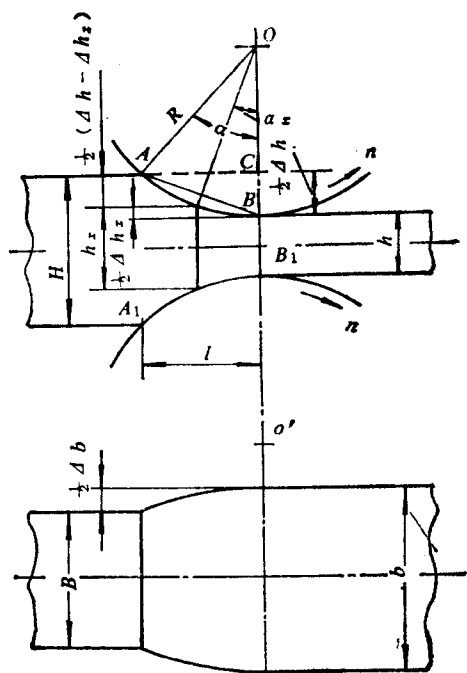


图 1-1 变形区的几何形状

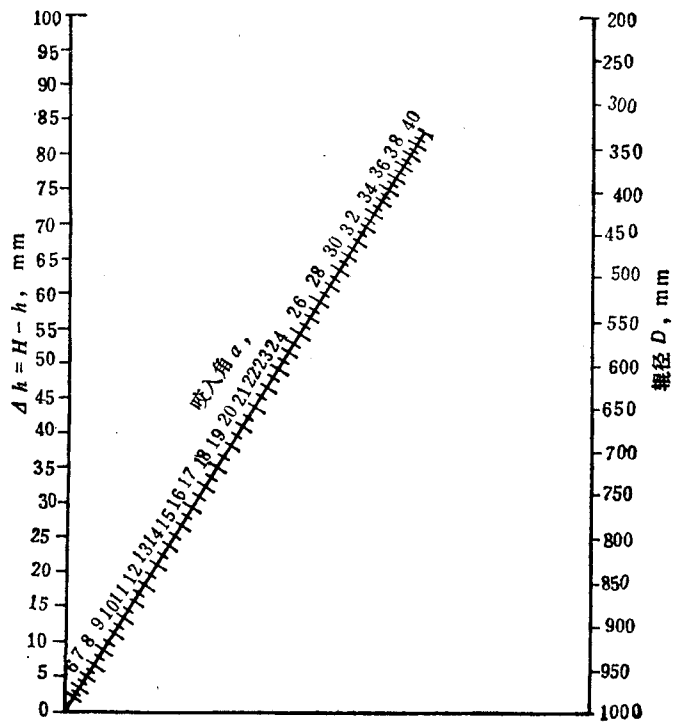


图 1-2 Δh , D 和 α 三者关系计算图

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

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

(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不同而不同,一般有以下三种情况:

1) 两轧辊直径相等时接触弧长度 从图1-1中的几何关系可知:

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

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

由于公式1-6中根号里第二项较第一项小得多;因此可以忽略不计,则接触弧长度公式变为:

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

用公式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。

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

由公式1-9a及1-9b便得公式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时,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。

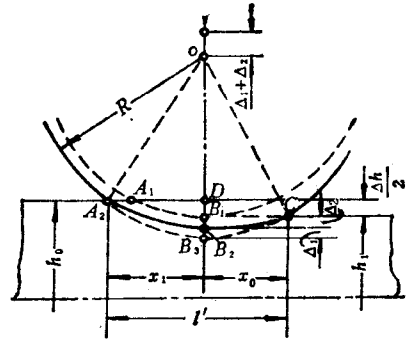


图 1-3 轧辊与轧件弹性压缩时接触弧长度

如果用 Δ_1 和 Δ_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 Δh 的压下量,那么必须把每个轧辊再压下 $\Delta_1 + \Delta_2$ 。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 $\overline{B_1B_3}$ 的平方值较轧辊半径与它们的乘积小得多, 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 Δ_1 和 Δ_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 ——圆柱体单位长度上的压力, $q = 2x_0 \bar{p}$ ($\bar{p}$ ——平均单位压力);

γ_1, γ_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 Δ_1 和 Δ_2 的值代入公式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 的值代入公式 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) 用绝对变形量表示

即用轧制前、后轧件绝对尺寸之差表示的变形量称为绝对变形量。

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的说明变形量的大小, 但由于习惯, 前两种变形量常用, 而绝对延伸量一般情况下不使用。

(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。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的反映变形的大小，但较绝对变形表示法进了一步，后一种方法导自移动体积的概念，能够正确地反映变形的大小，但是，由于取用对数值计算较为麻烦，故在简单轧制条件下，常采用前两种表示方法。

(3) 用变形系数表示

即用轧制前、后轧件尺寸的比值表示变形程度，此比值称为变形系数。具体有：

$$\text{压下系数: } \eta = \frac{H}{h}$$

$$\text{宽展系数: } \beta = \frac{b}{B}$$

$$\text{延伸系数: } \mu = \frac{l}{L}$$

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的反映变形的大小，因此在轧制变形方面得到极为广泛的应用。

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。后者比较客观的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

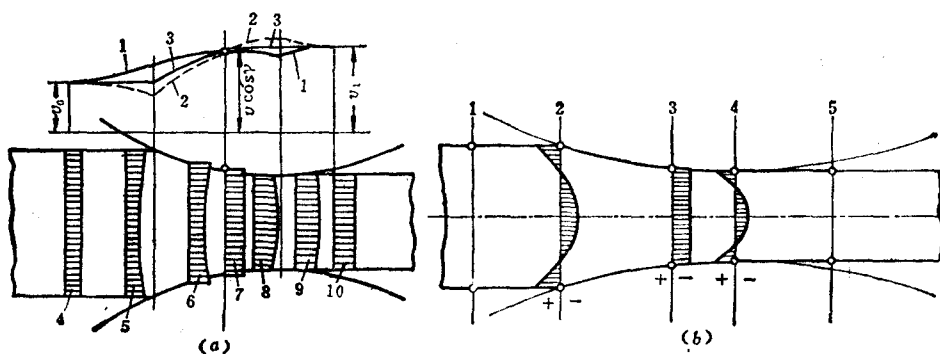


图 1-4 按不均匀变形理论金属流动速度和应力分布

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—入轹处；3—临界面；4—出轹处；5—前外端

塑性变形的前后外端的强制作用，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。图中的曲线1表示轧件表面层各个单元体的变形沿接触弧长度上的变化情况，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。

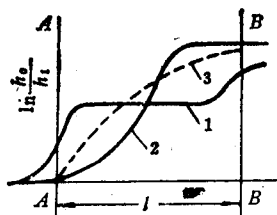


图 1-5 沿轧件断面高向上变形分布
1—表面层；2—中心层；3—均匀变形
A—A—入辊平面；B—B—出辊平面

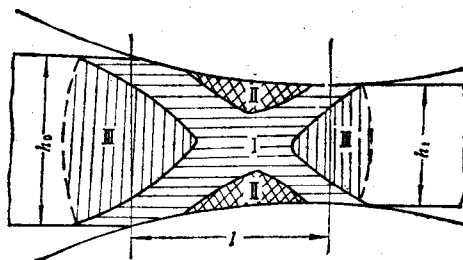


图 1-6 轧制变形区 ($l/\bar{h} > 0.8$)
I—易变形区；II—难变形区；III—自由变形区

实验研究还指出,沿轧件断面高度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,压缩变形完全深入到轧件内部,形成中心层变形比表面层变形要大的现象;当变形区形状系数 $l/\bar{h} < 0.5 \sim 1.0$ 时,随着变形区形状系数的减小,外端对变形过程影响变得更为突出,压缩变形不能深入到轧件内部,只限于表面层附近的区域;此时表面层的变形较中心层要大,金属流动速度和应力分布都不均匀如图1-7所示。

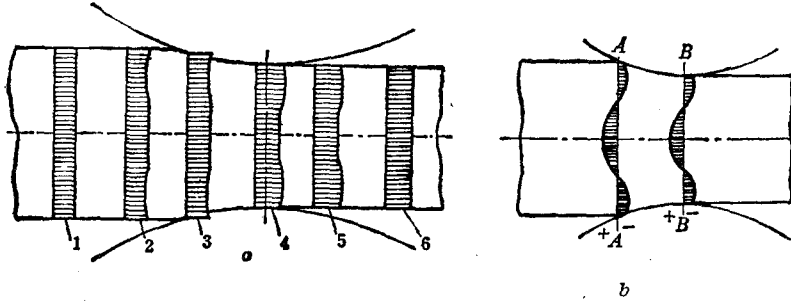


图 1-7 $l/\bar{h} < 0.5 \sim 1.0$ 时金属流动速度与应力分布

a—金属流动速度分布

1、6—外端; 2、5—变形过渡区; 3—后滑区; 4—前滑区

b—应力分布

A—A—入辊平面; B—B—出辊平面

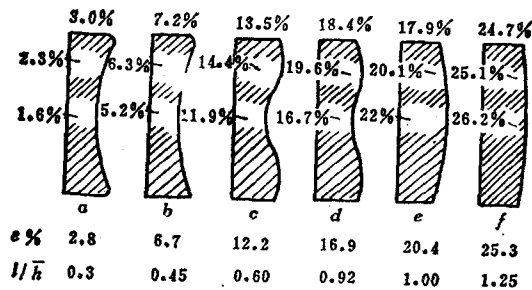


图 1-8 热轧LY12时沿断面高度上的变形分布

A.И.柯尔巴什尼柯夫也用实验证明,沿轧件断面高度上变形分布是不均匀的。他采用LY12铝合金扁锭分别以2.8%,6.7%,12.2%,16.9%,20.4%和25.3%的压下率进行热轧,用快速摄影对其侧表面坐标网格进行拍照,观察变形分布,其实验结果如图1-8所示。

该实验说明,在上述压下率范围内沿轧件断面高度上的变形分布都是不均匀的。当压下率 $e\%$ 在2.8~16.9%的范围内, $l/\bar{h}$ 在0.3~0.92时,轧件中心层的变形比表面层的变形要小,而压下率等于20.4%和25.3%, $l/\bar{h}$ 等于1.0和1.25时,轧件中心层的变形比表面层的变形要大。

1.2.2 沿轧件宽度方向上的流动规律

根据最小阻力定律,由于变形区的纵向和横向的摩擦阻力 σ_3 和 σ_2 的作用(见图1-9),大致可把轧制变形区分成四个部分;即ADB及CGE和ADGC及BDGE四个部分。ADB及CGE区域内的金属流向横向增加宽展,而ADGC及BDGE区域内的金属流向纵向增加延

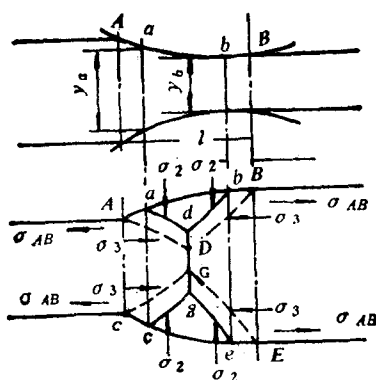


图 1-9 轧件在变形区的横向流动

伸。不仅上述四个部分是一个相互联系的整体，它们还与其前后两个外端相互联系着。外端对变形区金属流动的分布也产生一定的影响作用，前后外端对变形区产生张应力。另一方面由于变形区的长度 l 小于宽度 $\bar{b}$ ，故延伸大于宽展，在纵向延伸区中心部分的金属只有延伸而无宽展，因而使其延伸大于两侧，结果在两侧引起张应力。这两种张应力引起的应力以 σ_{AB} 表示，它与延伸阻力 σ_3 方向相反，削弱了延伸阻力，引起形成宽展的区域 ADB 及 CGE 收缩为 adb 和 cge 。事实证明，张应力的存在引起宽展下降。甚至在宽度方向上发生收缩产生所谓“负宽展”。

沿轧件高度方向金属横向变形的分布也是不均匀的，一般情况下接触表面由于摩擦力的阻碍，使表面的宽度小于中心层，因而轧件侧面呈单鼓形。当 $l/\bar{h}$ 小于0.5时，轧件变形不能深透到整个断面高度，因而轧件侧表面呈双鼓形，在初轧机上可以观察到这种现象。