

轧制原理手册

〔苏联〕A. H. 采利科夫 等著
王克智 欧光辉 张维静 译

冶金工业出版社

TG 33-62

C

12

0.1

轧制原理手册

〔苏联〕 A. И. 采利科夫 等著

王克智 欧光辉 张维静 译

315/15



冶金工业出版社

220825

内 容 提 要

本书是苏联出版的轧制人员手册丛书的第一本,书中简洁扼要地阐述了轧制原理范畴的主要内容,综合归纳了各国学者近二十年的研究成果,列举了大量的轧制计算公式和计算实例。书中有插图392幅,数据表55个,参考文献163种。

全书共分七章,包括:塑性理论基础;金属与合金的机械性能;轧制时金属的运动和变形规律;轧制力;轧制力矩和轧制功率;横向轧制和螺旋轧制理论;轧制过程的热平衡。

本书可供轧材生产部门、轧机制造部门、有关科研及设计院所的工程技术人員使用,也可供高等院校有关专业的教师,研究生和学生参考。



中国有色金属加工工业协会组织翻译

轧制原理手册

[苏联] A. H. 采利科夫 等著

王克智 欧光辉 张维静 译

•

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩恒院北巷11号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

850×1168 1/32 印张 $13\frac{7}{8}$ 字数 365 千字

1989年 7 月第一版 1989年 7 月第一次印刷

印数00,001~2,200册

ISBN 7-5024-0221-7

TG·34 定价:10.60元

译者前言

近二十年来，各国学者发表了大量的研究轧制原理有关问题的专著和论文，大大丰富了轧制原理学科的内容。

由苏联А.И.采利科夫 (Целиков)、А.Д.托姆列诺夫 (Томленов)、В.И.久津 (Зюзин)、А.В.特列季亚科夫 (Третьяков)、Г.С.尼基京 (Никитин) 等人编写的《轧制原理手册》一书，基本上从宏观方面，简洁、扼要地阐述了轧制原理范畴的主要内容，为有关的生产、教学、科研和设计人员提供了一本简明、实用的工具书。

该书主要包括：塑性变形的理论基础，金属及合金变形时的机械性能，轧制时金属的运动和变形规律，轧制力、轧制力矩和轧制功率，横向轧制和螺旋轧制理论以及轧制过程的热平衡等。

书中列举了经过检验的理论公式和经验公式，为轧制工艺及轧机设计提供了大量的计算实例和实践资料。书中所用数据主要取自苏联的文献，但介绍其它国家在轧制原理学科方面的新成果不够深入、全面。

本书第二至第四章由王克智、张维静译，欧光辉校；第一、第五至第七章由欧光辉译，王尚伦校。中国有色金属加工协会重有色金属加工分会夏立信、杨海云同志在组织书稿中给予了帮助，谨致谢意。

为便于出版，书后的主题索引已予略去。

译者

序 言

为了总结和推广轧材生产和轧机制造方面的先进科技经验，决定按轧制生产的基本组成部分出版一套轧制人员手册。考虑到这套书的内容、篇幅和百科全书性质，各个组成部分将独立成书，分别论述轧制原理、轧制工艺、轧制车间机械设备、电气传动与轧机的自动化以及轧制过程的研究等。这些单独的书组成一套统一的相互联系的手册。

新轧机的设计和现有轧机的生产，要求采用各个科技领域的成果，因此，在手册所属的这本书和以后陆续出版的几本书中，列举了相邻学科的必要知识。所论述的大多数计算方法都用计算实例作了说明。为便于使用，以附表和插图的形式列出了大量的数据。每本书后都附有主题索引和参考文献。

轧制人员手册的作者中，有苏联轧材生产和轧机制造领域的著名专家和高等院校的工作人员。

手册中反映了苏联近代轧机的研制经验，以及与之紧密相连的轧制理论、新的工艺过程的制订及其自动化等。在这些问题上，苏联的几个主要科研设计院和重型机器厂做了大量的工作（这些单位有全苏冶金机械研究所、国立冶金设计院、中央黑色冶金研究所、乌拉尔重机厂、新克拉马托尔斯克机器制造厂、旧克拉马托尔斯克机器制造厂等）。书中对苏联的几个特大型冶金厂（马格尼托哥尔斯克、新里别茨克、切列波维茨、西西伯利亚、下塔吉尔、卡拉冈达以及亚速钢厂等）在掌握新技术和使用现有轧机方面的经验给予了很大的注意。从国外轧机制造和轧材生产领域的经验中，引述了苏联轧制人员感兴趣的最新发展趋势。

本手册的主要读者对象是从事轧机制造、使用和研究广大科技人员，也可供高等院校的研究生和学生参考。所有批评意见和建议请寄出版社。

科技编辑

В.И.久津

А.В.特列季亚科夫

目 录

序 言

1. 塑性理论基础	1
1.1 应力状态	2
1.1.1 力和应力	2
1.1.2 主应力、八面体应力和应力强度	3
1.1.3 塑性理论中的平面问题	4
1.2 运动学状态	6
1.2.1 位移和应变	6
1.2.2 移动速度和应变速度	10
1.3 塑性拉伸	11
1.3.1 拉伸图	11
1.3.2 单向拉伸的稳定性	13
1.4 金属的屈服条件	14
1.4.1 最大剪应力恒定条件	14
1.4.2 单位变形能恒定条件	16
1.4.3 各向异性的非均匀强化材料的屈服条件	16
1.5 应力、应变和应变速度之间的联系	17
1.5.1 弹性和塑性状态	17
1.5.2 塑性势与能耗	19
1.5.3 各向异性金属	20
1.5.4 弹性卸载与残余应力	21
1.6 塑性弯曲和扭转	22
1.6.1 横向纯弯曲	22
1.6.2 弹塑性纵向弯曲	24
1.6.3 有约束塑性偏心压缩	25
1.6.4 塑性扭转	26
1.7 双向应力状态的稳定性	27
1.8 金属的平面流动	28
1.8.1 基本方程	28

1.8.2	应力和速度的边界条件	30
1.8.3	绘制滑移线场和速度场的实例	31
1.8.4	完全解	33
1.8.5	机械性能的不均匀性与变形强化	34
1.8.6	静力学和运动学方法	34
1.9	金属压力加工过程的分析举例	35
	参考文献	49
2.	金属与合金的机械性能	50
2.1	概況	50
2.1.1	机械性能的定义及其试验方法	50
2.1.2	金属与合金的弹性性能 (E 、 G 、 μ)	54
2.1.3	机械性能值离散的原因	59
2.2	热状态下压力加工时金属与合金的机械性能	59
2.2.1	热轧时影响机械性能的因素	59
2.2.2	与温度有关的强度极限 σ_B 和延伸率 δ 的实验值	61
2.2.3	变形抗力在塑性计上的实验研究	65
2.2.4	用热力学系数确定变形抗力的方法	65
2.2.5	确定变形抗力的经验公式	76
2.2.6	与变形温度、变形程度、变形速度有关的变形抗力的实验值和按热力学系数法确定的变形抗力	80
2.2.7	变形抗力计算实例	140
2.2.8	用扭转法研究变形抗力	140
2.3	冷状态下压力加工时金属与合金的机械性能	141
2.3.1	冷加工时影响机械性能的因素	141
2.3.2	确定屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 、强度极限 σ_B 、延伸率 δ 和硬度HB的经验公式	145
2.3.3	退火状态金属及合金的屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 、强度极限 σ_B 、延伸率 δ 和硬度值HB (在20°C温度下)	146
2.3.4	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 、强度极限 σ_B 、延伸率 δ 和硬度HB与变形程度的关系	161
2.3.5	由硬度HB换算强度极限 σ_B 和假想屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 的资料	161
2.3.6	假想屈服极限的计算实例	202

参考文献	203
3. 轧制时金属的运动和变形规律	206
3.1 轧制过程的定义	206
3.2 变形区及其参数	206
3.3 变形系数	208
3.4 咬入条件	209
3.5 中性角和咬入后被轧制金属的运动条件	210
3.6 应力和变形沿轧件截面高度的分布	211
3.7 二维变形时接触应力的微分方程	216
3.8 三维变形时接触应力的微分方程	221
3.9 法向应力和剪应力沿咬入弧的分布	224
3.10 外区对接触压力的影响	231
3.11 中性面的位置	233
3.12 前滑值和后滑值	234
3.13 张力对前滑的影响	237
3.14 运动速度不同时接触表面上的应力	239
3.15 宽展和变形沿轧件宽度的分布	241
3.16 轧制时轧辊和机座的弹性对金属变形的影响	247
3.17 考虑轧辊弹性时, 应力沿轧件宽度的分布	254
3.18 板材的纵向和横向厚差	257
3.19 轧件形状的稳定性	263
3.20 轧材几何尺寸的控制	265
3.21 计算实例	270
参考文献	275
4. 轧制力	277
4.1 决定轧制力的诸因素	277
4.2 轧件与轧辊接触面积的确定	278
4.3 轧制时的摩擦系数	283
4.3.1 咬入时的摩擦系数	283
4.3.2 打滑时的摩擦系数	285
4.3.3 稳定运动时的摩擦系数	286
4.4 外摩擦对轧制力的影响	288
4.5 张力对轧制力的影响	293

4.6 被轧金属宽度对轧制力的影响	294
4.7 在孔型中轧制时接触压力的确定	295
4.8 计算接触压力的公式	297
4.8.1 热轧时计算接触压力的公式	297
4.8.2 冷轧时计算接触压力的公式	302
4.9 平整时的作用力计算	305
4.10 行星轧制时的轧制力计算	311
4.11 轧制时轧辊上作用力的方向	320
4.12 行星轧机上轧辊的受力方向	329
4.13 计算实例	334
参考文献	339
5. 轧制力矩和轧制功率	341
5.1 构成轧辊主动装置载荷的基本量	341
5.2 按轧制力确定轧制力矩	342
5.3 轧辊和被轧金属的弹性压扁对轧制力矩的影响	349
5.4 按能耗确定轧制力矩	351
5.5 张力或推力对能耗及轧制力矩的影响	354
5.6 附加摩擦力矩的确定	355
5.7 空载力矩	357
5.8 静载荷图	357
5.9 传动装置按可逆工作制工作时的载荷	358
5.10 计算实例	361
参考文献	362
6. 横向轧制和螺旋轧制理论	364
6.1 横向轧制和螺旋轧制的几何关系	364
6.2 横向轧制和螺旋轧制的运动学	372
6.3 应力状态	376
6.4 横向轧制和螺旋轧制时力和力矩的计算	383
6.5 计算实例	391
参考文献	394
7. 轧制过程的热平衡	396
7.1 热轧和冷轧时热制度的特点	396

7.2 热轧机的发热计算.....	397
7.2.1 计算的基本步骤.....	397
7.2.2 金属的加热、轧制和卷取温度.....	398
7.2.3 宽带轧机上的轧材温度计算.....	399
7.2.4 粗轧机、厚板轧机、开坯轧机和型材轧机的 轧材温度计算	403
7.2.5 宽带轧机上的轧材温度计算实例.....	405
7.2.6 板材热轧机的轧辊发热计算.....	407
7.2.7 半连续式板材轧机机座发热计算实例.....	414
7.3 冷轧机的发热计算.....	416
7.3.1 计算原则和基本假定.....	416
7.3.2 计算方法、基本公式和计算步骤.....	421
7.3.3 轧机的发热计算实例.....	425
7.3.4 轧制与平整时的给热系数.....	430
参考文献	431

1 塑性理论基础

(技术科学博士 A. И. 托博列茨夫)

固态金属可经受显著的残余变形而无损于其密实性，这种性能称为塑性。塑性是轧制、挤压、拉伸、锻造和模压过程所利用的金属的基本特性。塑性理论给金属塑性流动的复杂过程以数学描述，并给出决定这些过程进展和结果的主要参量的计算方法。在研究金属塑性流动时，产生了与被加工金属组织性能变化有关的问题。这些问题可用金属物理学和金相学的方法来解决。这些学科是以研究现有金属的性能和研制具有所需机械性能和物理性能的某些新合金为目的的。

金属机械性能已知时，其塑性流动的计算问题可根据变形物体的力学原理来解决。在设计和研究轧机及其他金属压力加工设备时经常出现这类问题。本章在探讨塑性理论基础时，仅局限于金属塑性变形的力学问题。

研究金属塑性流动是以决定金属基本粒子的平衡和运动的微分方程式为基础的。理论力学中所研究的绝对刚体平衡和运动的方程式对变形物体是必要条件但不是充分条件。这些方程式不过是金属塑性流动时必须满足的一些局部条件。为了使变形物体获得平衡，除要求外力平衡外，还要求其每个无限小的部分都能得到平衡。因此动态方程、平衡条件和描述金属塑性流动的运动方程都是微分方程。

引起塑性流动的是将力传到变形金属上去的工具。假如工具的弹性变形很小，则可将工具（在轧制过程中就是轧辊）视为绝对刚体。但是，在轧制过程的大多数（尤其是精轧）情况下，工具和制品的弹性变形对制品精度的影响很明显，因而在计算中要加以考虑。

1.1 应力状态

应力状态决定了金属的塑性流动特性。塑性理论的基本课题之一就是确定金属塑性成型过程中的应力状态和作用力。下面阐述的有关应力状态的概念和公式是进行工艺计算时所必需的。

1.1.1 力和应力

力和应力是塑性理论所研究的主要物理量。力可用一个具有方向性的线段（即所谓矢量）来表示。如同给出矢量的几何定义一样，可给出它的代数定义：矢量是三个实数（分量）的有序组合，当由一个坐标系转到另一坐标系时这些分量按余弦规律变化。

所分切的单元面积（面素）上的应力取决于一个矢量，其数值等于无限小的力矢量与此面积的大小之比值。所研究的某点上的应力可用三个作用在经过该点的相互垂直的三个平面（组成一既定的三坐标系）上的应力矢量的组合来表示。因为以上所述三个应力矢量中每一矢量都可沿三个平行于坐标轴的方向分解，故一点上的应力状态可用9个应力分量来表示：即三项法向应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 和六项剪应力 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{yx} 、 τ_{xz} 、 τ_{zy} 。在从一坐标系转入另一坐标系时，这些剪应力按余弦成对相乘的规律变化。以上应力位称为二阶张量。矢量是一级张量。由一个坐标系转入另一坐标系而不发生变化的数量是零级矢量，称为标量或不变量。应力张量可用以下矩阵表示：

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1-1)$$

第一下标表示垂直于面素的法线方向，第二下标表示坐标轴方向。应力张量的分量可用与相应坐标轴方向相同的线段来表示。

图1-1表示了一个受应力张量各分量作用的变形体单元。假定法向张应力分量为正，法向压应力分量为负。若所研究面素的外法线方向与坐标轴方向一致，则正向剪应力分量与坐标轴方向一

数；反之，若外法线方向与坐标轴方向相反，则正向剪应力分量亦与坐标轴方向相反。

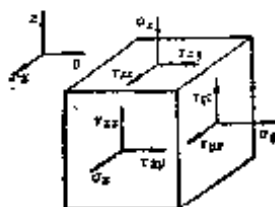


图 1-1 作用在变形单元上的应力

由单元体的平衡条件可知，剪应力分量互为对称时彼此相等，即：

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \quad (1-2)$$

张量

$$\sigma'_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xz} & \tau_{xy} \\ \tau_{xz} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{xy} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_m \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

称为应力偏量（或应力偏斜张量）。此处： σ_m 为法向平均应力， $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ 。

1.1.2 主应力、八面体应力和应力强度

应力体的任一点上都有三个相互垂直的只有法向应力作用而剪应力为零的面素。这种情况下的法向应力称为主法向应力，以 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示。在将主法向应力之间的夹角等分为二的面素上，剪应力达到最大值，称为主剪应力，其数值为：

$$\tau_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (1-4)$$

在塑性理论中，等倾斜于法向应力主轴的平面上的应力具有重大意义。由于这些平面平行于正八面体的各个面，故作用在这些面上的应力称为八面体应力。

法向和切向八面体应力 σ_0 和 τ_0 分别为：

$$\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = \sigma_m \quad (1-5)$$

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2} \end{aligned} \quad (1-6)$$

除八面体剪应力外，还采用了另一不变量，即应力强度或当量应力 σ_e ，它与八面体剪应力只有乘积中的常数项（系数）的不同：

$$\sigma_e = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1-7)$$

采用这一数值很方便，因为简单拉伸或压缩时，它等于相对应的单向应力值。

1.1.3 塑性理论中的平面问题

在实际上应用很广泛的许多塑性成型过程中，金属流动具有在某一方向上位移很小的特点。例如，轧制薄板时，宽展与延伸相比数值很小。而模压边长相差悬殊的矩形坯料时，延伸与宽展相比数值也很小。因而可以认为，在这些情况下，坯料断面上发生的是平面变形。在板材冲压过程中，作用在坯料表面上的应力与坯料横截面上的应力相比往往很小。因而可以认为，在类似情况下出现的是平面应力状态。平面变形或平面应力状态的假定大大简化了塑性成型过程的研究。

由应力分布的连续性条件可得以直角坐标表示的平面流动的平衡微分方程式如下：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + r \frac{\partial \tau}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

图1-2上表示了在极坐标系中研究的作用于变形体单元上的应力。此时平衡方程具有以下形式：

$$\left. \begin{aligned} r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \sigma_r - \sigma_\theta &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + r \frac{\partial \tau}{\partial r} + 2\tau &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

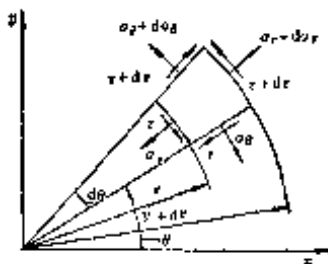


图 1-2 以极坐标表示的应力

图1-3上表示一个三角形单元体，其直角边与主剪应力方向重合 $\tau_1 = k$ ，斜边则与坐标轴 x 相重合。与直角边相重合的方向用 ξ 表示，直角边上的使法线顺时针方向旋转的应力 k 为正值。 ξ 与坐标轴 x 的夹角以 α 表示，与 ξ 成直角的方向以 η 表示。根据 ξ 与 η 相对于主方向 (σ_1) 具有对称性这一条件，可得：作用于三角形两直角边上的法向应力相等，即： $\sigma_\xi = \sigma_\eta = \sigma$ 。

由三角单元体的平衡条件可得：

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma - k \sin 2\alpha, \sigma_y = \sigma + k \sin 2\alpha, \\ \tau &= k \cos 2\alpha \end{aligned} \quad (1-10)$$

$$\text{因} \quad \sigma = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 \quad (1-11)$$

由(1-10)式可得：

$$(\sigma_n - \sigma)^2 + \tau^2 = k^2 \quad (1-12)$$

式中 σ_n ——法向应力 σ_x 或 σ_y 。

在坐标系 (σ, τ) 中, (1-12) 式是一个圆, 其圆心在 σ 轴上且与坐标原点之距离为 σ 。这个圆绘制在图1-4上, 称为莫尔 (Mohr) 应力圆。图上表示了 x 、 y 、 z 及 n 的方向。由图1-4可得:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau} \quad (1-13)$$

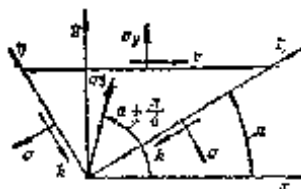


图 1-3 三角形单元体的“ n ”面

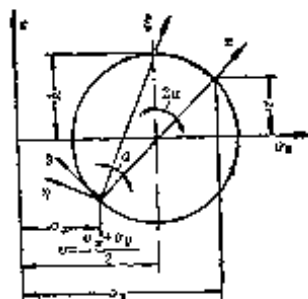


图 1-4 莫尔应力圆

1.2 运动学状态

由变形工具作用产生的应力状态而导致的金属塑性流动过程是很复杂的。为了对它进行数学描述, 引入了位移、应变、移动速度和应变速度等概念。这些概念描述着金属流动及其最终结果——塑性成型。

1.2.1 位移和应变

变形体各质点的位移取决于坐标为 u 、 v 、 w 的位移向量。这些坐标是质点坐标的函数。所研究的质点上的变形状态, 是由以