

现代轧制理论

中国金属学会

冶金继续工程教育丛书

冶金工业出版社

贺毓辛 编著

013805

冶金继续工程教育丛书

现代轧制理论

贺毓辛 编著

冶金工业出版社

1993年

(京) 新登字036号

内 容 简 介

本书为“冶金继续工程教育丛书”之一。全书共有三篇十五章。本书从横向上介绍了现代轧制理论的主要内容,从纵向上说明轧制理论由第一、二代向第三代的发展。现在,轧制理论已成为宏观力学与微观材料科学相结合、实验力学与数学模拟相结合、理论与实际结合的综合系统地解决轧制工程问题的应用纵断技术科学。

本书可供轧钢专业及其他塑性加工专业技术人员、科研人员和大专院校师生学习、参考。

冶金继续工程教育丛书

现代轧制理论

贺毓辛 编著

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北阜城县印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 11.625 字数 266 千字

1993年6月第一版 1993年6月第一次印刷

印数00,001~4,000册

ISBN 7-5024-1116-X

TG·153 定价 9.90元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事

冶金工业部副部长

蒋大铨

一九八八年十二月

前 言

轧制理论源于实践，并反过来为轧制生产服务。与其他科学技术一样，满足国民经济及社会需求，是轧制技术及理论发展的动力。随着轧钢生产的迅速发展，轧制理论在轧制生产中起着越来越重要的作用，而生产技术对理论的依赖性也愈来愈强。

第二次世界大战后的40余年，是轧制生产迅速发展，轧制技术突飞猛进，轧制工程发展的极盛时期，也是轧制理论长足发展的年代。战前，轧钢生产主要依靠经验，一般把轧制工程看成是一种技艺（Art），虽然卡尔曼方程及西贝尔（Siebel）实验资料问世，但仍谈不上系统理论，而现在轧制理论已成为具有完整体系的塑性加工工程学的一个分支。

战后的第一个10年是钢铁工业迅速发展时期，轧机的设计者及建设者迫切需要有关的知识。因此，许多工作者进行了大量轧制参数的研究，众多的轧制力、宽展等计算公式相继问世。

第二个10年是建设第二、第三代现代轧机的准备期。在此期间轧制科技工作者一方面致力于澄清一些有争论问题（如滑移及粘着、摩擦峰等）并提高工程计算精度，另一方面着手研究工作与工具的关系和描述轧制的动态过程，从而使理论和技术取得巨大进展，1965年由计算机控制的带材轧机建成投产则是它的标志。

第三个10年主要是完善第三代轧机。围绕这一任务轧制科技工作者做了大量研究工作，例如自适应技术的成功运用

对稳定自动控制的轧制操作起着重要的作用。

此外，计算机的普及为轧制科学的发展做出了巨大贡献。没有计算机的帮助，用有限元方法解决轧制工程问题是很难想像的。

第四个10年期间发达国家的轧钢生产能力几乎没有什么增长，是在能源危机和激烈竞争中渡过的，这种严峻局面促进轧制技术的巨大进步。

第五个10年的开始是令人鼓舞的，发展中国家（特别是中国）轧钢生产能力迅速增长，发达国家也迎来了稳定生产、设备更新的新时期。紧凑轧机、全连续冷轧机建成投产、薄板坯连铸连轧机也在建设中。面对这种情况，现有理论已不能满足轧制工程的需求，需要从系统工程学的观点来研究综合复杂的轧制过程中出现的问题。

简言之，轧制理论的水平随着轧制技术的进步与年俱增。

现代轧制理论是一个多层次的学术体系，如表所示，它包含着4个层次。

从表轧制理论的发展及多层次学术体系中可以看出：

（a）早期轧制理论限于研究变形区内轧制的性质和行为，稍后，对轧机的弹性性质开始注意。而后，研究从静态扩展到动态过程，从单机扩展到连轧，从轧制工序扩展到前后工序进而涉及到连铸炼钢生产过程。

（b）和其他学科一样，轧制科学对一个问题也从不同的角度进行研究。例如，把金属视为连续体和视为晶体的塑性加工力学和塑性加工金属学同时并存、应用和发展，这种情况和几何光学、波动光学在光学中并存、发展的情况相似。

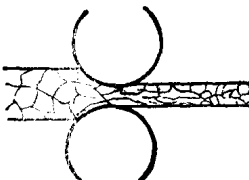
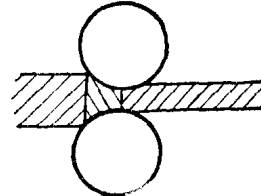
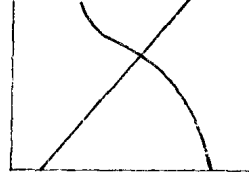
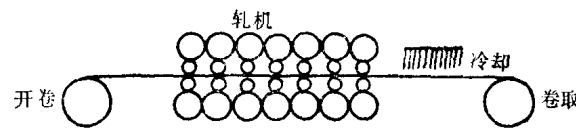
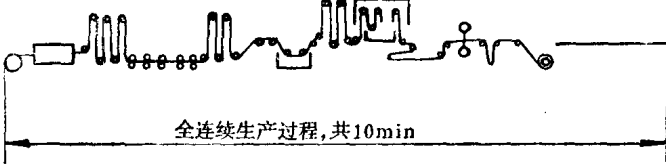
（c）轧制参数、过程的精确描述与生产的不确定性是

有矛盾的。我们可以用一个模型来精确地描述轧制参数或过程，然而由于实际生产的统计性质，模型不可能满足所有情况。例如，金属的化学成分随炉号甚至罐号而波动，因而其变形抗力也随之变化，尽管对某一成分的变形抗力可以精确确定，但生产中成分的波动影响了预报的精度。在这种情况下，有人却认为是模型精度不高，而没有看到模型精确性与生产统计性质的矛盾是普遍存在的，是生产中的正常现象。目前这一矛盾靠自适应理论及技术来解决。设备和工艺的刚性与生产的柔性也是矛盾的，我们可以以连铸直接轧制(CC-DR)为例来说明这一点。作为连铸，其铸速、铸坯断面在某一条件下基本上是固定的，也即它们是刚性的；连轧也是如此，其轧制速度、孔型等都不可能变化很大。相反，轧件的物流性质却变化较大，亦即是柔性的，这就造成了各工序之间的匹配问题。我们试图用系统科学的观点、用物流传输理论来处理这一问题，这在后面我们将加以讨论和介绍。

(d) 从上面讨论可以看出，我们不能仅注意轧件以及轧件在变形区的行为，而应把整个过程作为一个系统去研究。轧制工程是一个巨系统，对它我们可以从不同的角度去考察、去研究，用不同的数学方法去解决、去处理。例如，当工件、工具一同研究时，它就是一个弹、塑性系统；当考虑生产的不确定性时，它可视作模糊系统；当考虑整个过程的匹配时，则它可视为物流系统，等等。

(e) 从上两点以及我们在研究过程中既把轧件看成连续体又看成具有缺陷的晶体（显然连续体与晶体观点是矛盾的），可以在方法论上给我们以启示：当描述塑性加工过程时，总是有两种相互矛盾的概念，这是对立统一律（西方叫两面神观点）的体现，而不能错误地把它看作是理论不成熟的标志。把两者的对立给予统一地描述，则可能是建立现代

轧制理论的发展

层次	典型图 示
I	 轧件被视为具有各种缺陷的多晶体
II	 轧件被视为连续介质
II	 (a) 工具是弹性体; (b) 工件是塑性体
III	 (a) 必须考虑轧制设备及电气的非刚性; (b) 动态过程是研究重点
IV	 酸洗、加热、轧制、精整……所有工序甚至连铸等部综合在一起

及多层次学术体系

基 本 特 征	研究盛期
(a) 研究局限在轧件在变形区中的行为、轧制参数工程计算及设计； (b) 力学方法用于解决轧制参数的工程计算，材料学方法用于控制产品的性能； (c) 连续体和带有缺陷的实际晶体是相互矛盾的两个不同概念	1970—1985 1945—1965
(a) 轧件轧机两者关系决定着轧机调整及厚控、板形控制的基本原则； (b) 希望轧件有尽可能大的塑性变形，轧机有尽可能小的弹性变形，而两者是矛盾的	1955—1975
(a) 轧制过程有许多外扰，它来自轧机设备、电气系统和原始轧件，既成模型是精确的也很难实时模拟实际过程； (b) 目前，生产的不确定性与模型精度的矛盾用自适应的方法来解决	1965—1985
(a) 每一机组（工序）的刚性和生产的柔性是矛盾的，这一矛盾用柔性生产系统来解决； (b) 轧制工程是一个巨系统，除力学、材料学（主要的）外，尚须引入系统工程学，轧制理论成为多学科交叉的应用技术科学	1975—

轧制理论的途径, 数学进展又为其提供了可能, 故为改革(或发展、充实)传统理论展现出一幅新的图景。

由上看出, 当我们编写新的轧制理论教材时, 应当重视学术体系的严谨性、完整性。我们认为轧制理论应当是宏观连续体力学与微观材料学结合, 实验力学与数学模拟结合, 理论与实际结合, 把待解决的问题视为一个系统综合地进行研究的一种应用技术科学。显然这一系统对工程实践更有意义, 也更具有科学性。

以И.М.巴甫洛夫(Павлов)^[1]、L.R.安德伍德(Underwood)^[2]等人的理论为代表的轧制理论, 我们把它叫做第一代轧制理论, 以变形区内轧件的行为和轧制力能、宽展等工程计算作为中心内容。第二代轧制理论^[3,4]增加了工件工具关系、动态过程分析等内容, 使理论前进了一步。本教材除了从内容和体系上尽量完善以外, 还增加了大量新的内容, 并把研究对象扩展到整个轧制工程。

从这本书也可看出, 由于我国轧制工程发展的形势和专业设置的特点, 在轧制理论研究方面中国学者的研究工作处于比较高的水平。

本书除可做轧制工程技术人员继续教育教材外, 还可做本专业研究生、大学高年级学生以及其他从事轧制科研、生产、教学工作的有关人员的参考读物。

东北工学院朱泉教授审阅了全书, 并提出了许多宝贵意见, 在此表示感谢。

北京科技大学 贺毓辛

1992.2

目 录

序 前言

第一篇 轧 制 力 学 I

1 轧制过程的基本概念 2

1.1 简单(理想)轧制过程模型 2

1.2 影响轧制过程的因素及三种典型轧制情况 10

2 金属变形抗力 20

2.1 影响金属变形抗力的因素 21

2.2 金属变形抗力的数学模拟 28

2.3 轧制时变形程度、变形速度、变形温度的确定 36

3 外摩擦及外区 48

3.1 外摩擦 48

3.2 外区的作用 59

4 轧制时金属的流动 62

4.1 应力、应变沿轧件截面的分布假设 62

4.2 用视塑性法建立轧制的应力、应变场 64

4.3 沿轧件长度方向变形不均匀性 75

4.4 带材轧制时沿轧件宽度的应力分布 81

4.5 异步轧制 89

5 轧制力 95

5.1 变形过程的力学基本方程 95

5.2 截面法 96

5.3 初等能量法 110

5.4	滑移线法	113
5.5	关于提高轧制力计算精度问题	117
6	轧制力矩及功率	127
6.1	轧制力矩	127
6.2	轧制功率	136
6.3	单位能耗曲线	141
7	前滑	142
7.1	前滑及后滑的表示方法	142
7.2	影响前滑的因素	144
7.3	孔型中的前滑	146
8	宽展及端部变形	148
8.1	宽展	148
8.2	坯料端部变形	157
第二篇 轧制系统工程学		167
9	轧制过程控制基础——工件工具关系	171
9.1	轧制弹塑曲线	173
9.2	轧机调整图示	175
9.3	厚控方程	178
9.4	平轧时的板形及纵横向厚度不均	179
10	连续轧制动态过程描述	187
10.1	轧制工艺设备因素波动与产品质量的关系	188
10.2	连轧张力	189
10.3	连轧动态综合特性分析	196
11	轧制过程模化	204
11.1	轧制数学模型	204
11.2	轧制数学模型的真实性与实用性	205
11.3	模型的精度与生产的不确定性	210
12	轧制工程最优化	216
12.1	最优化技术的发展	216

12.2	最佳参数选择	218
12.3	工艺方案最优选择	225
12.4	工艺制度优化	229
12.5	生产计划安排优化	254
13	轧制物流系统及轧制柔化	258
13.1	物流学基础知识	262
13.2	轧制物流仿真系统举例及连铸连轧柔性生产系统	266
第三篇	轧制金属学	295
14	冶金学因素及合金设计	297
14.1	合金成分的主要作用	297
14.2	组织与性能的关系	302
附录	若干元素的主要作用	311
15	热轧——高温热力学过程	319
15.1	热轧时钢的组织变化	320
15.2	形变热处理及控制轧制	338
15.3	带卷卷取温度控制	347
15.4	连铸-连轧过程的金属学特征	349
参考文献		354

第一篇

轧制力学

通常，人们宏观地把轧件视为连续介质，用力学方法以解决轧制工程实践问题，这也就是传统轧制理论的内容。限于篇幅和避免重复，在这里我们仅围绕着如何提高轧制参数的工程计算精度这一问题展开讨论，因为，随着计算机的广泛应用，就需要高精度的数学模型，而轧制理论近年来的一些进展也恰恰是在解决这一问题中取得的。

轧制过程的基本概念

通常把轧制力及力矩、宽展、前滑等叫做轧制参数，它们也是经典轧制理论的主要研究内容。对这些参数大家并不陌生，通过大学学习，都熟悉确定它们的公式和方法。但在计算机综合辅助工程（CIM）日益普及的今天，要求建立这些参数的高精度的数学模型，仅对这些参数有一般了解和掌握，具有一般计算知识就不够了。轧制技术人员需要在了解轧制过程实质的基础上，具有对其进行精确工程计算的能力。

1.1 简单(理想)轧制过程模型

我们用简单（理想）轧制过程来说明轧制过程的实质（图1-1）。轧制时，轧件受轧辊压下而在轧向延伸、横向宽展，其变形量表示方法如表1-1所示。

此外，变形区还有两个重要参数，就是咬入角和变形区长度。咬入角 α 是轧件和轧辊接触区所对应的圆心角。变形区长度 l 则为变形区接触弧长度 s 之水平投影。它们与轧辊直径 D 、压下量 Δh 之关系分别为：

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

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

表 1-1 变形量表示法

变形方向	绝对变形量	相对变形量	变形系数	对数变形系数
压下	$\Delta h = H - h$	$\varepsilon\% = \frac{H-h}{H} = \frac{\Delta h}{H}\%$	$\eta = \frac{H}{h}$	$\ln \frac{1}{\eta}$
宽展	$\Delta B = B_h - B_{f1}$	$\rho\% = \frac{B_h - B_{f1}}{B_{f1}}\%$	$\omega = \frac{B_h}{B_{f1}}$	$\ln \omega$
延伸	$\Delta L = L_h - L_{f1}$		$\mu = \frac{L_h}{L_{f1}}$	$\ln \mu$

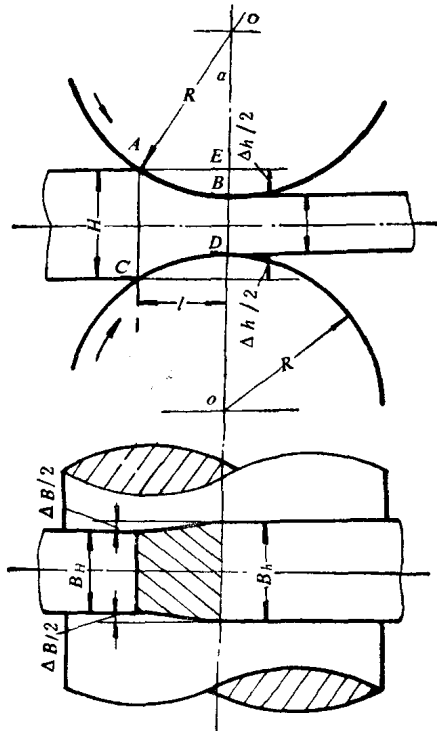


图 1-1 简单（理想）轧制过程

$$s = R\alpha$$

(1-3)

几何变形区在图1-1中以ABCD表示之。

1.1.1 咬入条件

大家熟知, 轧制过程能否建立, 决定于轧件能否被旋转的轧辊咬入。根据图1-2可知, 径向力 P 和切向力 T 之垂直分力 P_y 和 T_y 压缩轧件, 使轧件产生塑性变形才可咬入。水平分力 $P_x = T_x$ 是咬入的临界条件, 即

$$P \sin \alpha = T \cos \alpha \quad \text{或} \quad T/P = \tan \alpha \quad (1-4)$$

如令 $T/P = f$, $f = \tan \beta$, 则咬入条件为:

$$\beta = \alpha \quad \text{或} \quad \beta \geq \alpha \quad (1-5)$$

式中 f —— 摩擦系数;

β —— 摩擦角。

咬入过程中, 随着金属逐渐地进入辊隙, 轧制力 P 及摩擦力 T 已不作用在 α 处, 而是向变形区出口移动。用 θ' 表示轧件前端与轧辊中心线所成的夹角 (图1-3)。 θ' 角一直在减小, 力 P 的作用角由原来的 α 变为 φ , 设压力沿接触弧均匀

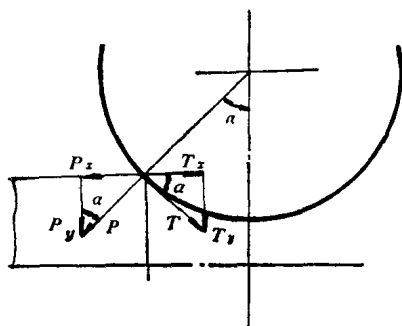


图 1-2 咬入时力的分解

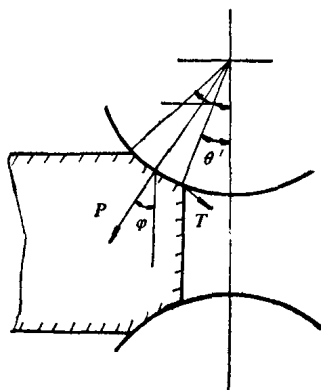


图 1-3 金属进入变形区情况

分布, 则