

计算轧制工程学

JISUAN ZHAZHI GONGCHENGXUE

贺毓辛 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

计算轧制工程学

贺毓辛 著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 简 介

本书在分析研究现代钢铁工业冶铸轧一体化所带来的生产集约化、高速化、连续化基础上,根据其数据的爆炸性、无序性、实时性、唯一性等主要特征,采用计算数学的方法,把所研究的对象看成是一个离散、随机、模糊、不确定的动态系统处理,结果证明过去一般无法求解或常规方法未有涉及、但又对生产有较大影响的问题,都得到圆满的解决。同时书中通过对模拟技术的分析研究,提出了建立“虚拟未来实验室”的具体设想。本书属于继续工程教育教材,它是在本科教育的基础上,为继续从事轧制生产和技术工作的人员编写的。

本书可供从事金属材料及塑性加工成型方面的工程技术人员及研究人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生和生产现场人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算轧制工程学/贺毓辛著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-5024-6853-8

I. ①计… II. ①贺… III. ①轧制 IV. ①TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 057154 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 张登科 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6853-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 4 月第 1 版, 2015 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 17.5 印张; 337 千字; 264 页

50.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

尽管金属轧制已有近 500 年的历史^[1], 1728 年开始可以轧制型材, 1786 年用蒸汽机代替水轮机作为动力, 19 世纪可以轧制钢轨, 出现连轧并采用电机等^[2], 但真正的轧制技术大发展还是在第二次世界大战之后。我们把战后轧制生产的发展大致分为三个阶段, 在这三个阶段里, 轧制理论和技术都有相应的发展^[3,4]。

第一阶段是第二次世界大战战后恢复及迅速发展生产的阶段, 大约用了 20 多年的时间, 这是一个百花齐放、百家争鸣的年代, 其研究更多地局限于变形区内轧制的性质和行为, 澄清了许多争论问题, 使变形区理论日臻完善, 为当时大规模建设轧机提供了科学依据。第二阶段是大型化、高速化、自动化阶段, 也大约用了 20 多年的时间, 1965 年第一套由计算机控制的轧机建成, 1985 年板形控制也取得成功, 实现了生产现代化。此时, 要求了解轧制动态过程, 英国钢铁协会 (BISRA) 率先进行了研究, 而后动态变规格、全连轧的计算问题相继解决。为了提高计算精度, 一些实验方法和算法 (如云纹法、有限元等) 得到很大发展。还形成了一些具有特色的分块理论。第三阶段是起源于 20 世纪末能源危机而激烈竞争的阶段, 其结果是 CC-CR、CSP、ISP、TSP 等的实现, 由此引出的一系列技术和理论问题, 如物流控制、生产计划动态变更、性能预报等需要解决, 从而促进了技术的进步和理论的发展。

在第一阶段, 为建设轧机提供精确参数, 研究工作集中在轧制参数 (特别是轧制压力) 计算和轧机受力分析上。在此期间, 出现了数十个轧制压力公式, 其目的是给出可信的轧制压力, 以作为设计轧机

的依据。在轧制学术界中,由单位压力削峰以提高计算精度引起了滑移与黏着的激烈争论。

为了设计可靠的、性能良好的轧机,轧机刚度、辊系受力分析及轧制稳定性等,也是这一阶段研讨的重要内容。其他如弹性压扁、最小可轧厚度等也都有不少公式发表。

在第二阶段,由于大量连轧机的建设及其自动化,对产品质量要求愈来愈高,解决轧机快速精确调整并量化的问题,提到日程上来,亦即需要研究轧制动态过程。轧制动态理论最主要的内容有以下三个方面:连轧轧制时的动态演变过程;出现偏差时的调整策略及具体调整的量值;连轧张力的作用。

对轧制动态过程,BISRA 率先进行了研究,而后诸多学者做了大量研究,动态变规格、全连轧的计算问题相继解决。BISRA 导出厚控方程并建立了初步的厚控系统模型,自动厚控系统是在理论指导下开发出来的,这也是轧制工程中首次体现理论的超前指导作用。虽然当时推导出不少张力公式,但它们都没有把张力的“自动调节作用”反映出来,而这种“自动调节作用”对连轧过程又是非常重要的。因此,我们建立了考虑“自动调节作用”的张力公式,这一公式不仅和现有公式一样,可以说明建立张力过程,而且还可以很好地说明张力的“自动调节作用”。

为了提高计算精度,要求了解轧制时的应力场、应变场、温度场等,一些实验方法(如视塑性法、光塑性法、云纹法等)和算法(如有限元法、上下界法、变分法、能量法等)此时也得到了很大发展,还形成了一些具有特色的分块理论,如板形理论、控轧理论等。

在第三阶段,生产集约化、高速化、连续化,即冶铸轧一体化为这一阶段的主要特征。它给轧制技术人员提出了许多新课题,例如,生产计划的编制,当每个机组单独运行时,其编制并不太复杂,然而一体化计划的编制,由于生产的随机性、作业的同期性、过程的离散性、信息的爆炸性,等等,再加上设备高速运转以及要求按合同组织

生产的营销策略,就使问题的解决遇到很大的困难。现在采用的仍是经验的方法,需用大量的人力,且不一定是最优的。因此,生产计划编制以及动态变更的理论及实际运用就必然为大家所关注。由于用户对产品质量要求愈来愈高,产品性能的预报和控制也提到日程上来。

面对这一情况,科研组开始思索和探讨,首先要认清现在冶金生产、科技特点及其发展趋势。在信息化条件下,现在冶金生产系统已成为一个巨系统。这个巨系统又包括众多子系统,而每个子系统仍是一个巨系统,下面用热送热装生产计划编制问题可说明这一点。生产计划编制是一个排序问题,通常是以旬(10天)为单位制定生产合同,安排生产。一个生产合同除合同编号、规格、钢号、订货量、用途等商业信息外,还要考虑指导生产的生产信息,如板坯尺寸、硬度、表面级别、出炉温度、粗轧温度、精轧温度、卷取温度、紧急程度等,以体现全线的生产工艺规程。这样一个生产合同包含20多项属性,而一旬合同可能多达百个以上,拆成炼钢炉次约为360炉,可能的组合为 $360!$,因而形成了“组合爆炸”,显然它是一个巨系统,这给生产计划编制带来很大困难。不仅如此,生产的不确定性(如某一机组的事故、待轧、待热等)需要瞬时的计划动态变更,因而提出更高的要求。

数据的爆炸性,无序性,实时性,唯一性为其主要特征。这类问题没有什么理论可循,而且,也没有什么公式或定律可以应用。同时也不能用基于相似理论的实验方法来解决,例如,某厂曾做过提高热装温度的试验,由于生产不确定性造成一个环节的滞后,不仅没有提高热装温度,反而造成了板坯下架,改为冷装。

经过科研组多年的努力,我们将出现的新课题逐一解决。为解决这类问题,我们采用了计算数学的方法^[5]。

很早就有计算数学的著作问世^[6],它是数学的一个分支。它与纯数学不同,纯数学是以数学问题为研究对象的,而计算数学着重研究求解实际问题的计算方法以及与此有关的理论。尽管早期研究也离不开数学,例如,在求解塑性加工问题时与其他力学一样常要求解微分

方程,众所周知,微分方程求解已有成熟的数学方法,如牛顿法等。但是由于日益复杂的生产系统和深奥的科技研究对象,它和早期用应用数学方法来求解已大不一样,计算数学越来越发挥着重要的作用,而且由于每个专业各具特色,所求解的问题不同,从而形成与专业密切结合的新兴学科,如计算物理学、计算材料学等。显然,由于其复杂性、特殊性,现在轧制科技更离不开计算数学,急需两者紧密结合,建立计算轧制工程学,这也是我们编写本书的目的。

本书是按“数学方法-相关问题”这一思路来编写的。但须指出,这里的“数学方法”是一个更广泛的概念,这是因为“数学方法-工程问题-计算机应用”三者是密不可分的,因而它也指计算机语言、计算技术,甚至一些商业软件。

本书对轧制力微分方程等这类常规问题,不准备予以介绍,显然我们应该把重点放在轧制大系统问题的求解上,把所研究的对象都看作是一个离散、随机、模糊、不确定的动态系统,其结果是过去一般无法求解或常规方法未有涉及但又对生产有较大影响的问题,都得到了完满的解答。

如上所述,按现今说法,冶金生产系统已具备大数据系统的特征。正如迈尔-舍恩伯格所说,我们进入了大数据时代^[7]。

面对大数据系统,我们决不能仅停留在数据庞大、数据爆炸的简单认识上,而要看到随之带来的各种变革^[8],这些变革包括对问题的认识、问题的求解思路和求解方法等方面。

必须指出,冶铸轧一体化尚有其他一些问题需要探讨和解决,我们不可能将其全部罗列出来,如果本书能起到抛砖引玉的作用,也就达到目的了。

在最后章节,我们还对今后如何有效地开展研究以及发展趋势进行了探讨,在对模拟技术分析的基础上,提出了建立“虚拟未来实验室”的具体设想。

在读本书时,由于涉及不少数学问题,可能会遇到一些困难,并

不要求大家一步一步地推导它，而是希望大家知道问题的症结和解题的思路及途径，为了求解需用什么方法就可以了，需要对某一问题深入了解时，再做进一步探讨。而且在科技发展的今天，既有众多科研合作伙伴，又有大量商用软件，不可能也没必要事事亲自动手去完成了。本书编写注重阐明问题的工艺实质、解题的思路、数学方法的基本概念，至于公式推导、计算步骤及程序则未给予过多的篇幅，因为现在成熟软件甚多，基于工艺实质能合理选择、运用就可以了。

本书属工程教育教材，它是在本科教育的基础上，为继续从事轧制生产和技术工作的人员编写的。

我们热切希望广大读者提出宝贵意见，让我们大家共同努力逐步建立起论据严密、体系完整、内容丰富且能满足广大读者及生产需求的计算轧制工程学。

北京科技大学 贺毓辛
2015年3月

注：本前言的参考文献如下：

- [1] Adams J R. AISI Year Book. 1924, 115 ~ 147. 该文说，关于第一篇有关轧制钢材的文献为 E. Hesse 所写，该文献介绍了于 1530（或 1532）年建设在 Nurnberg 的轧机。
- [2] Roberts W L. Hot rolling of steel [J]. Marcel Dekker. Inc., 1983.
- [3] 贺毓辛. 现代轧制理论 [M]. 北京：冶金工业出版社，1988.
- [4] 贺毓辛. 轧制工程学 [M]. 北京：化学工业出版社，2009.
- [5] 石亦平，贺毓辛. 钢铁工业生产、技术、理论的进步 [C] // 轧钢学会. 全国轧制理论会议文集. 1996.
- [6] 复旦大学数学系. 计算数学 [M]. 上海：上海科学技术出版社，1960.
- [7] 迈尔·舍恩伯格. 大数据时代 [M]. 杭州：浙江人民出版社，2013.
- [8] 贺毓辛. 轧制科技发展展望 [J]. 中国冶金，2013，12.

目 录

0 绪 论	1
0.1 塑性加工学的学科体系	1
0.2 理论算法的综合与分析	2
0.2.1 以动量守恒定律为基础的方法	2
0.2.2 以能量守恒定律为基础的方法	3
0.3 轧制生产理论简析	4
0.4 当前遇到的技术问题及其特征	4
1 连铸-连轧生产的系统特征	7
1.1 系统及系统工程学简介	7
1.1.1 系统的类型	7
1.1.2 系统工程的研究方法	8
1.2 物流及物流学简介	8
1.2.1 物流学基础知识	8
1.2.2 轧制生产的物流学特征	10
1.3 轧制生产物流系统	10
1.4 轧制生产物流系统的不确定性	12
1.4.1 随机性与模糊性	13
1.4.2 非确定性和确定性	13
1.5 系统仿真	15
1.6 简单小结	16
2 离散事件型仿真——小方坯连铸连轧生产研究	17
2.1 现场条件	17
2.2 现场数据的采集与处理	17
2.3 离散事件型仿真模型的构造原理	19
2.4 连铸-连轧物流系统仿真模型的研究范围及影响因素	20
2.5 CC-CR 物流系统仿真模型	22
2.6 输入参数的随机分布模型	28

2.7 方坯连铸-连轧物流系统仿真	35
2.7.1 仿真模型的评价指标	35
2.7.2 仿真结果的分析	39
2.8 简单小结	45
3 Petri 网仿真方法——宽带连铸-连轧生产系统研究	46
3.1 现场条件	46
3.1.1 生产组织的时间管理	47
3.1.2 生产组织的温度管理	47
3.1.3 生产系统的物流管理	47
3.1.4 生产系统的停滞	48
3.2 Petri 网方法	50
3.2.1 离散事件动态系统建模方法简介	50
3.2.2 Petri 网方法	51
3.3 用延时 Petri 网进行生产分析和研究	52
3.3.1 延时 Petri 网	52
3.3.2 仿真结果	65
3.4 用扩展 Petri 网进行生产分析和研究	66
3.4.1 扩展 Petri 网	66
3.4.2 连铸-连轧生产系统的仿真模型	68
3.4.3 仿真软件	69
3.4.4 仿真结果	76
3.5 简单小结	81
4 SLAM 网络仿真——“上引-盘拉”小铜管生产系统研究	82
4.1 “上引-盘拉”小铜管生产系统	82
4.2 SLAM 网络仿真方法	85
4.2.1 SLAM 网络的基本构模要素	86
4.2.2 SLAM 网络-离散事件的综合构模与仿真	89
4.3 紫铜小管生产仿真结果	99
4.3.1 原系统规划方案的仿真分析	99
4.3.2 主要影响因素的系统敏感性分析	102
4.3.3 改进方案的仿真分析	105
4.4 精密毛细管生产系统仿真	110
4.5 简单小结	112

5 启发式搜索法——生产计划的编制及动态变更	113
5.1 生产管理知识简介	113
5.1.1 它们都有哪些功能	115
5.1.2 管理系统的作用如何体现	115
5.2 生产作业计划	115
5.2.1 生产过程的组织	116
5.2.2 生产计划	117
5.2.3 生产作业计划的编制、实施原则	119
5.2.4 一体化生产计划编制的困难	123
5.3 启发式搜索法	128
5.3.1 知识表示方法——状态、操作和状态空间	128
5.3.2 启发式搜索	129
5.4 治-铸-轧一体化作业计划的编制	130
5.4.1 热送热装生产计划编制问题的状态空间	130
5.4.2 利用搜索技术求解	137
5.4.3 程序编制	152
5.5 治-铸-轧一体化作业计划的实例	156
5.6 治-铸-轧一体化作业计划的动态变更	158
5.7 简单小结	160
6 解释结构模型——钢管生产的质量控制	161
6.1 无缝钢管生产的质量分析	161
6.1.1 无缝钢管生产工艺流程	161
6.1.2 钢管质量分析	161
6.2 无缝钢管壁厚不均的特征及其演变规律	163
6.2.1 壁厚不均的特征	163
6.2.2 壁厚不均特征的演变	168
6.3 解释结构模型	171
6.3.1 解释结构模型基本性质	171
6.3.2 基本步骤	172
6.3.3 邻接矩阵	172
6.3.4 可达矩阵	173
6.3.5 级间划分	174
6.3.6 建立结构模型	175
6.4 无缝钢管壁厚精度的解释结构模型	176

6.5 无缝钢管壁厚精度的控制	184
6.5.1 无缝钢管壁厚精度控制系统的结构	184
6.5.2 无缝钢管壁厚精度的控制环节	185
6.5.3 无缝钢管壁厚精度的控制因素分析	185
6.6 无缝钢管壁厚精度的工序控制(无目标值的质量控制技术)	187
6.6.1 控制点	187
6.6.2 控制图	189
6.6.3 应用实例	190
6.7 简单小结	194
7 面向对象技术——型钢孔型设计	195
7.1 型材轧制生产中的不确定性和模糊性问题	195
7.2 面向对象技术	197
7.2.1 什么是对象	197
7.2.2 面向对象技术的特点	198
7.2.3 面向轧制设计	199
7.3 型钢孔型设计——基于知识的 CAE 系统	199
7.3.1 专家系统概述	199
7.3.2 数据处理	200
7.3.3 CAE 系统的建立	200
7.4 设计实例	206
7.4.1 实例 1——圆钢生产孔型系统	206
7.4.2 实例 2——轻轨生产孔型系统	208
7.5 简单小结	209
8 模式识别——板形综合治理	210
8.1 板形综合治理策略	211
8.2 模式识别	212
8.2.1 模式识别诊断	212
8.2.2 模式识别原理	212
8.2.3 模式识别的映射方法	213
8.3 板形综合治理	213
8.3.1 现有生产工艺及研究路线选取	213
8.3.2 特征变量的筛选及确定	213
8.3.3 目标变量的确定	214

8.3.4 数据采集	214
8.3.5 聚类分析	214
8.4 板形的全生产过程综合一贯管理	219
8.4.1 板形质量预报及其验证	219
8.4.2 影响板形质量的工艺参数的因果层次分析	221
8.4.3 工艺参数优化的工艺规程	222
8.5 简单小结	223
9 未来虚拟实验室	224
9.1 模拟方法沿革	224
9.2 信息发掘及利用	226
9.2.1 信息利用举例	226
9.2.2 信息利用中应注意的问题	228
9.2.3 充分利用信息应采取的措施	229
9.3 如何控制生产和发展生产	230
9.3.1 虚拟制造技术开启未来	230
9.3.2 未来虚拟实验室、钢铁信息产业的建设	231
9.3.3 面向对象设计培训仿真器	239
9.4 仿真器举例之一——冷连轧培训研究仿真器	244
9.4.1 培训仿真构模	244
9.4.2 硬件配置及硬件系统	246
9.4.3 培训、研究仿真系统的软件系统	247
9.4.4 设计要求及验收标准	250
9.4.5 预期经济效益分析	253
9.4.6 实施方案	255
9.5 仿真器举例之二——钢材性能预报及控制	256
9.5.1 性能预报的流程及模型	257
9.5.2 性能预报及控制系统在线应用举例	258
9.6 未来虚拟实验室的建设	260
9.7 简单小结	260
参考文献	261

0 绪 论

首先,我们对现有塑性加工理论和研究方法做一简要的介绍和概括。

0.1 塑性加工学的学科体系

我们按以下的思路构造塑性加工学科体系^[1],用场的观点代替质点力学的观点来描述应力、应变,使其更具有逻辑性和严密性。建立严密的基本定律——质量守恒、动量守恒、能量守恒定律。根据流变学以建立物质特殊规律的方法来更好地逼近真实材料性质,并且逐步进行互相渗透、扩展,把材料的微观性质与宏观加工变形结合起来。在此基础上求解塑性加工的工程问题(如轧制力能参数计算、工具设计、板形控制、工艺制度制定、产品性能控制等),把工程计算从单纯的算法中解脱出来,并阐明各种算法的有机内在联系,给出评价。

我们还特别注意共性与个性的关系,例如轧件的受力与变形是塑性力学的问题,轧机及工具的变形是弹性力学的问题,而润滑则是流体力学的问题,但从求解思路来看,它们是一样的,它们都是连续介质力学的边值问题。所谓边值问题就是在已给的载荷下,确定物体的应变、应力和位移,其方程应当在给定的初始及边界条件下满足,这些方程为:

- (1) 力学平衡方程。由动量守恒定律转化而来。
- (2) 几何方程。又称运动学方程,即变形与位移的关系方程。
- (3) 本构方程。又称物性方程。
- (4) 连续方程。由质量守恒定律转化而来。

应当指出,既然是连续介质的力学方程,那么无论是对液体、弹性体,还是对塑性体,都应当是适用的。下面做简单的讨论。

流体运动和其他物体运动一样,也要遵循基本定律,但要改写为适用于流体运动的形式。如运动方程写为适合牛顿黏性假设的流体运动方程,即纳维-斯托克斯方程,不考虑物体黏性,则为欧拉方程。不可压缩的流体做定常运动时,其能量方程即为柏努利方程。

通常,流体力学的基本方程包括三个运动方程和一个连续方程,如流体均匀不可压缩,则有四个方程和四个未知数,解此方程组,并使之适合一定的起始、边界条件,就成为流体力学的一般方程(可参见流体力学书籍^[2])。

在弹性力学中,其基本方程为:

(1) 平衡方程。给出 6 个应力分量与 3 个体力分量之间的关系。

(2) 几何方程。给出 6 个应变分量与 3 个位移分量之间的关系。但是, 6 个应变分量并非独立无关, 必须满足 6 个应变协调方程。应变协调方程仅是几何方程微分的结果, 故按几何方程求出的应变分量自然满足应变协调方程。

(3) 物理方程。给出 6 个应力分量与 6 个应变分量之间的关系。

以上 15 个方程式包含所研究的 15 个未知量, 故原则上可求解^[3]。实际上, 这样的方程组求解是很困难的, 只有一些特例可以求解。

求解塑性问题的基本方程也是连续方程、平衡方程、几何方程和物理方程, 它有 16 个方程含有 16 个未知量, 故原则可解^[4]。此外, 根据设定条件不同, 还有提出由 18 个方程及 18 个未知量求解者, 以及以 10 个方程及 10 个未知量求解者, 这里不再赘述。

这样, 我们不仅可以掌握和处理塑性加工问题, 对有关的设备、润滑等问题, 甚至对铸造问题, 也可触类旁通了, 这对一位工程师或研究者来说, 是至关重要的。

0.2 理论算法的综合与分析

塑性加工问题的理论算法已有很多, 这里不做一一介绍, 而是以塑性加工基本定律为依据, 进行综合与分析。

塑性加工常用算法基本上可分为以动量守恒定律为基础的方法和以能量守恒定律为基础的方法。

0.2.1 以动量守恒定律为基础的方法

0.2.1.1 工程近似法 (截面法)

这种方法以平截面为主平面的假设, 列平衡方程, 然后简化屈服条件、假设边界条件求解, T. 卡尔曼方程^[5]、E. 奥若万方程、M. D. 斯通方程均属这种方法, 在金属塑性加工中起着相当重要的作用。这种方法仅以动量守恒定律的力平衡方程为基础, 没有考虑能量, 不可能求出速度场, 得到的仅为轧制力及其分布, 仅在假设中考虑质量和能量守恒定律。据此, 在薄件轧制的情况下, 可能得到接近真实的解。

0.2.1.2 滑移线法

滑移线法根据最大剪应力学说, 滑移线为两族正交的曲线, 其上每一点的切线方向与最大剪应力重合, 在平面变形、理想刚塑性体条件下, 如能画出滑移线场, 就可能确定各点的应力状态及金属流动趋势。对此研究最多的是 W. 约翰逊, 他还曾经为他的这部仅讨论滑移线的专著是称塑性工程学好还是称工程塑性学好而犹豫不决^[6]。

滑移线法能处理平面问题及轴对称问题,但求解时最大困难是必须先构造变形物体的滑移线场。

王桂兰^[7]还建立了平面应力特征线法。

0.2.2 以能量守恒定律为基础的方法

0.2.2.1 初等能量法

这种方法根据试验直观观察到的现象,以外力功等于变形能列出方程来求加工时的载荷。这种方法虽以能量为基础,但对速度场(或位移场)由于采用假设,并不一定满足能量守恒定律。在计算中运用了体积不变条件,满足质量守恒定律,没有涉及动量守恒定律,本构方程多用简化形式,这就使得其解难以接近真实解,只对一些简单变形均匀的问题适用。但它是一种简便的方法,故多有应用。我们用能量法建立了既能满足薄件轧制也能满足厚件轧制的压力公式,应用甚为方便^[8]。

0.2.2.2 上界法

该方法利用能量方程,设一运动许可速度场来确定功率。严格地说,该方法与初等能量法无大差异,因为在初等能量法中,速度场也必然是虚拟的。该方法计算简便,概念清晰,故工程上广泛应用。B. 阿维采^[9]在这方面做了大量工作。但是,由于该方法设定的速度场比较简单,难以表达出精确的速度场,导致计算结果比较粗糙。

近年来以上界法为基础,又发展了上界单元法。它把物体的变形区分成许多区域,每个区域构成较简单的速度场,从而可求解较复杂变形条件下的金属流动。

0.2.2.3 变分法

该方法是设定一个许可速度场,对所求问题建立能量泛函,通过变分求最小值而得解。

变分法求解也有许多方法,例如,王风德用配置法计算求解了三维的轧制变形场^[10]。配置法也称点代入法,是将泛函的解近似解析化,然后通过点代入使之离散化的方法,得到的为近似解析解。

0.2.2.4 有限元法

有限元法把变形体假想分成有限个用节点连接的单元,以节点上的位移(或速度)为未知量,利用变分原理及相应方程建立起单元矩阵,并依节点的相应次序合成总体刚度矩阵以求解。

有限元法求解时运用了能量方程,采用变分原理,可以证明,所求的解满足动量守恒定律和能量守恒定律,其解接近真实解。此外,还有较少受工件形状影响的优点,它既能计算整个过程中质点的流动规律、应力应变分布、残余应力分

布,又可考虑变形热等一些非机械能,在计算机普及的今天,有限元法自然得到了广泛应用。

0.3 轧制生产理论简析

轧制生产是在轧机上将金属轧制成所需产品的方法,它涉及设备及工艺两个方面。工艺要求在优化制度下生产出产品尺寸和性能均合格的产品,设备要求不仅能满足一定产量,而且要保证能生产出所要求性能的产品,而产品性能又涉及尺寸、形状和性能诸方面,都必须予以保证,故需对轧制工艺和轧制设备予以研讨。

在设备方面,不仅为所生产产品配备专门的轧机(板、管、型),而且对其强度、刚度以及振动诸方面有一定要求,同时还需配备各种辅助设备。在工艺方面,要求在最经济条件下生产出尺寸、形状和性能合格的产品。正因如此,不仅建立了轧制设备学和轧制工艺学,而且还有涉及板、管、型方面的专著,并创建了许多分块理论,如孔型设计、轧制板形、控轧控冷、工艺润滑等方面的专著。

由此可以看出,轧制的宏观力学描述与微观材料学考察互补,其中任何一个解释都是部分恰当的,又都是不完全的,而且是互斥的。必须认识到学科的这种多元互补性,正如光学中的波动说与粒子说一样,轧制的连续体力学与材料学是互补的,从而追求实现高层次的综合。在这样基础上建立起现代轧制工程学^[1]。

建立起轧制工程学科,我们现在把它作为必要的基础知识,牢牢地掌握它、运用它就可以了,但这并不意味着是科技发展的终点,而仅是发展的一个阶段(通常习惯把早期的理论称作经典理论,严格地说这种称呼并不科学,把它看作一个发展阶段,或称第一代轧制理论更合理些),特别是现在进入科技发展的一个新时期,更应当以事物发展是无止境的眼光,注意和探讨当前遇到的技术问题及其发展趋势,步入新的阶段,因为它们正是我们面对的和要解决的。为此,既要研究该领域生产发展的现状,解决面临的诸多困难和问题,又要更宏观地观察现代科技发展的总趋势,绝不能停留在只是驾驭当前生产技术保证生产顺利运行和单纯运用现有理论上。下面就对此做一些探讨。

0.4 当前遇到的技术问题及其特征

由于冶铸轧一体化、生产连续化及高速化等现代化因素,导致一系列新问题的出现,如前言中提到的热送热装生产计划编制而形成的“组合爆炸”问题,就是一个典型事例。下面我们再举一个有关板形的例子,以做更进一步的说明。为了控制板形,在生产线上采取了诸多措施和调控手段,但板形问题仍未得到根本解决,因为板形问题的实质是一个显在板形与潜在板形交互作用的过程,随板形改善板带内部残余应力可能增加,此时是以潜在板形的形式存储起来,但随着