

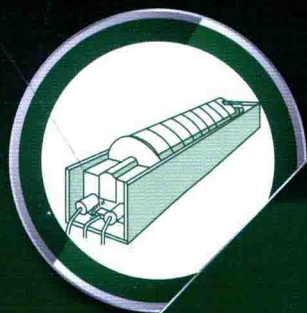
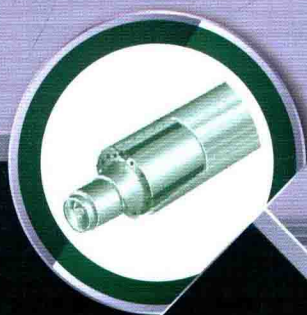


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

板形与板凸度控制

BANXING YU BANTUDU
KONGZHI

王国栋 等著



化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

板形与板凸度控制

BANXING YU BANTUDU
KONGZHI

王国栋 等著



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

板形与板凸度控制/王国栋等著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 8
ISBN 978-7-122-24658-5

I. ①板… II. ①王… III. ①板形控制 IV. ①TG335. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 162404 号

责任编辑: 刘丽宏
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 463 千字 2016 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

FOREWORD

前言

板形控制水平是衡量轧制技术水平的一个重要指标。特别是近年来 AGC 技术不断完善,板带的纵向厚度控制精度已经越来越高,那么板带横向厚度(板形和板凸度)控制问题就越来越突出。板带轧机板形与板凸度及其控制的研究是一个具有重要理论价值和实际意义的课题。

关于板形问题的研究和应用始于 20 世纪 60 年代,斯通的弹性基础梁理论和液压弯辊的应用研究,使板形问题取得了较大的突破,以后各国相继进行这方面的研究,在理论和应用时间方面的研究都取得了非常大的进展。同时关于板形问题的理论研究和实验研究的成果已经被大量地应用到生产实践中去,使板带轧机板形控制的精度得到了非常大的提高。近 30 年来,国内对于板带轧机板形和板凸度问题的研究日益广泛起来。国内一些高校、科研院所和企业在此方面也取得了一系列突出进展,有效地提高了板形和板凸度的控制效果。

为了满足人们对板带轧机板形控制技术的了解和研究需要,为了促进先进新技术的推广应用和新发展,根据国内外一些先进轧机所采用的板形控制技术,在认真学习国内外先进技术和经验的基础上,我们组织从事板形控制研究和应用相关工作的,以及对教学、科研、生产实践有丰富经验的人员编写了本书,希望它能够为解决我国板带生产中的板形问题,提高板带轧机的生产水平带来一定的益处。

全书共 10 章。第 1 章主要介绍板形与板凸度的基本概念及质量指标。第 2 章介绍了各因素对板形、板凸度的影响规律。第 3 章介绍了板形与板凸度控制的执行机构,并对执行机构进行了评述。第 4、第 5、第 6 章分别介绍了轧辊弹性变形、热变形、磨损的数学模型和计算方法。第 7 章介绍了金属的三维流动及其分析方法。第 8 章介绍了板形与板厚的解耦控制。第 9、第 10 章分别介绍了热轧板形和冷轧板形的控制方法和控制系统。其中李海军负责完成第 1、第 8、第 9 章的撰写,孔祥伟负责完成第 2、第 5、第 6、第 7 章的撰写,田勇负责完成第 4 章的撰写,梁勋国负责完成第 10 章的撰写,第 3 章由王国栋、孔祥伟、李海军、梁勋国和田勇共同完成。全书由王国栋负责策划和统稿。

本书的撰写得到了钢铁研究总院张树堂老师的指导和帮助,在此深表谢意。

由于笔者水平所限,同时板形控制技术的进步日新月异,在本书中难免还会存在不足之处,希望广大读者给予批评指正。

著 者

CONTENTS

目 录

第1章 板形与板凸度的基本概念

1

1.1 板形及其度量	1
1.1.1 板形	1
1.1.2 板形的度量	4
1.2 板凸度	8
1.3 板形与板凸度的关系	9
1.4 边部减薄	10
参考文献	10

第2章 板形和板凸度的影响因素分析

11

2.1 轧制力对板形和板凸度的影响	11
2.2 来料板凸度对板形和板凸度的影响	12
2.3 热凸度对板形和板凸度的影响	13
2.4 初始轧辊凸度对板形和板凸度的影响	14
2.5 辊系直径对板形和板凸度的影响	15
2.5.1 工作辊直径对板形和板凸度的影响	15
2.5.2 支撑辊直径对板形和板凸度的影响	15
2.6 轧辊接触状态与接触长度对板形和板凸度的影响	16
2.6.1 轧辊接触状态对板形和板凸度的影响	16
2.6.2 轧辊接触长度对板形和板凸度的影响	16
2.7 弯辊力对板形和板凸度的影响	17
2.8 轧辊磨损对板形和板凸度的影响	17
2.9 板宽对板形和板凸度的影响	18
2.10 张力对板形和板凸度的影响	19
参考文献	19

第3章 板形与板凸度控制的执行机构

20

3.1 WRB	20
3.1.1 弯辊力的配置	21
3.1.2 工作辊正弯	21
3.1.3 工作辊负弯及其控制	21
3.1.4 合理弯辊力的设置	22

3.2 WRS	24
3.2.1 WRS 轧机的设计原理	24
3.2.2 WRS 轧机的结构特点	24
3.2.3 WRS 轧机的边部减薄控制	25
3.2.4 SFR 与 WRS	28
3.3 NBCM 轧机	29
3.3.1 NBCM 轧机的原理	29
3.3.2 NBCM 轧机支撑辊辊型曲线的设计	30
3.3.3 NBCM 轧机的配置	32
3.4 PC 轧机	34
3.4.1 PC 轧机的设计原理	34
3.4.2 PC 轧机的结构特点	35
3.4.3 PC 轧机的轴向力	35
3.4.4 PC 轧机在热连轧机上的配置	36
3.5 PCS 轧机	37
3.5.1 PCS 轧机的设计原理	37
3.5.2 PCS 轧机的结构特点	37
3.5.3 PCS 轧机在热连轧机组的配置	37
3.6 CVC	38
3.6.1 CVC 辊型设计原理	38
3.6.2 CVC 轧机结构特点	39
3.6.3 四辊 CVC 轧机	41
3.6.4 六辊 CVC 轧机	42
3.6.5 CVC 新辊型	42
3.7 HC 轧机	43
3.7.1 HC 轧机的结构	43
3.7.2 HC 轧机的功能	44
3.7.3 HC 轧机的优点	48
3.7.4 HC 轧机的分类及应用	50
3.8 UC 轧机及其家族	51
3.8.1 UC 轧机的结构	52
3.8.2 UC 轧机的板形控制特性	52
3.8.3 UC 轧机的分类及应用	56
3.9 轧辊分段冷却	57
3.9.1 轧辊分段冷却控制的原理与特点	57
3.9.2 系统组成与喷嘴结构	58
3.9.3 分段冷却控制策略	59
3.10 板形和板凸度控制手段的评述	66
参考文献	68

第4章 轧辊弹性变形的数学模型和计算方法

69

4.1 与轧辊弹性变形有关的基础理论	69
4.1.1 梁的弯曲及其挠度曲线微分方程	69

4.1.2	梁的剪切挠度	71
4.1.3	变形能和卡氏定理	71
4.1.4	弹性基础梁理论	73
4.1.5	半无限体模型及其应用于轧辊弹性压扁时的修正	74
4.2	轧辊弹性变形的解析方法	76
4.2.1	解析方法的初级阶段——斯通和 R.戈雷的工作	76
4.2.2	盐崎模型	79
4.2.3	比较完善的解析方法——本城模型	82
4.3	影响函数法	89
4.3.1	离散化过程	89
4.3.2	影响函数	91
4.3.3	绍特的工作	92
4.3.4	艾德瓦尔兹等的工作	98
4.3.5	户泽的工作及工作辊弹性压扁影响函数	103
4.4	计算轧辊弹性变形的矩阵方法	108
4.4.1	辊间压扁影响函数	108
4.4.2	矩阵方法的基本方程	114
4.4.3	计算方法	115
4.5	各类轧机辊系弹性变形的计算	122
4.5.1	横移式四辊轧机辊系变形计算	122
4.5.2	PC 轧机的辊系变形计算	130
4.5.3	CVC 四辊轧机的辊系变形计算	138
4.5.4	六辊轧机的辊系变形计算	140
	参考文献	149

第5章 轧辊热变形的数学模型和计算方法

151

5.1	不考虑周向温度变化的计算	151
5.2	考虑周向温度变化的计算方法	152
5.3	工作辊横移式轧机轧辊温度的计算	153
5.3.1	工作辊模型单元划分	153
5.3.2	传热学的基本定律	154
5.3.3	轧辊温度场的计算	155
5.3.4	工作辊热凸度的计算	156
5.3.5	横移方式的选择	157
5.3.6	横移方式对轧辊温度场和热凸度的影响	158
5.3.7	不同横移步长对工作辊热凸度的影响	159
5.4	轧制过程中热凸度的计算	159
	参考文献	162

第6章 轧辊磨损

163

6.1	轧辊磨损的影响因素	163
6.2	轧辊磨损的数学模型	163
6.3	轧辊的在线研磨 (ORG)	165

参考文献	166
第7章 金属的三维流动	167
7.1 有限元法	168
7.1.1 黏塑性有限元法	168
7.1.2 刚塑性有限元法	169
7.1.3 弹塑性有限元法	171
7.2 条元法	173
7.3 轧辊变形与轧件变形的耦合分析	175
参考文献	176
第8章 板形与板厚的解耦控制	177
8.1 CVC 轧机轧辊横移对厚度的影响	177
8.2 弯辊力对厚度的影响	178
8.3 板形板厚综合控制	178
参考文献	180
第9章 热轧板形和板凸度的控制	181
9.1 热连轧机板形和板凸度的控制手段	181
9.2 热轧板形控制策略	182
9.2.1 热连轧机上下游机架的分工	182
9.2.2 边部减薄的控制	183
9.2.3 SFR 与板形-板凸度控制	184
9.3 板形和板凸度控制模型	186
9.3.1 考虑来料板形的热轧板形良好条件	186
9.3.2 板形与板凸度之间的转换关系	189
9.3.3 板凸度设定计算模型	190
9.3.4 热连轧机机架间二次变形	193
9.4 热轧板凸度的检测与信号处理	194
9.4.1 辐射测厚原理	194
9.4.2 凸度仪的主要类型	194
9.5 热轧平直度的检测与信号处理	196
9.5.1 非接触式感应传感器板形检测装置	196
9.5.2 利用转像方法的光学平直度检测仪	198
9.5.3 利用光截面法的光学平直度检测仪	199
9.6 热轧板形与板凸度控制系统	199
9.6.1 板形设定计算	200
9.6.2 轧辊热膨胀和磨损的计算	201
9.6.3 板形自学习计算	201
9.6.4 板凸度自动控制	202
9.6.5 平直度自动控制	202
参考文献	203

10.1 冷轧板形的检测与信号处理	204
10.1.1 板形检测装置	205
10.1.2 检测信号的补偿处理	229
10.2 冷轧板形控制策略	231
10.2.1 板形检测信号的分解	231
10.2.2 板形执行机构的分工	238
10.3 冷轧板形控制系统	239
10.3.1 板形控制系统构成	240
10.3.2 板形预设控制	241
10.3.3 板形前馈控制	247
10.3.4 板形反馈控制	251
参考文献	274

板形与板凸度的基本概念

1.1 板形及其度量

1.1.1 板形

取一定长度的带钢自然地放到一个平台上，常常可以观察到带钢的翘曲。翘曲有各种形式，大多数是波浪形，薄带钢常产生皱纹或局部凸凹。翘曲有时可以遍布整个带宽，有时只限于局部。这种翘曲和带钢的变形不均及内应力分布不均密切相关。

轧制过程实质上是金属在旋转的弹性体——轧辊作用下发生塑性变形的过程，一定断面形状的坯料经过轧制发生明显的纵向延伸和一定的横向流动，最终成为一定尺寸的成品。板带轧制对变形过程有一个主要的要求，即沿板带宽度各部分有相同的纵向延伸。设想将带钢分割成若干纵条，如果任何一条上压下量发生变化，都会引起该窄条的纵向延伸发生变化，同时又会影响到相邻窄条的变形。由于带钢实际上是一个整体，各窄条之间必定互相牵制，互相影响。因此，当沿横向的压下量分布不均时，各窄条就会相应地发生延伸不均，这就会在各窄条之间产生相互作用的内应力。当这个内应力足够大时，就会引起带钢翘曲。由于轧制过程是一个复杂的物理过程，金属所发生的塑性变形和轧辊所发生的弹性变形受到许多因素的影响，要想彻底消除这种变形不均，是不可能的。但是，应该将这种变形不均限制在尽可能小的范围内，以防止带钢翘曲^[1]。

为了说明金属纵向变形不均的程度，引入了板形这个概念。所谓板形，直观说来，是指板材的翘曲程度；就其实质而言是指带钢内部残余应力的分布。只要带钢中存在残余内应力，就称为板形不良。如果应力虽然存在，但不足以引起带钢翘曲，则称为“潜在的”板形不良，如果应力足够大，以致引起带钢翘曲，则称为“表观的”板形不良^[2]。带钢在张力作用下冷轧有时并未发生翘曲，当去除张力后，带钢发生明显的翘曲，前者可称为潜在的板形不良，后者称为表现的板形不良。常见的带钢板形如下^[1]。

① 理想板形。理想板形应该是平坦的，内应力沿带钢宽度上均匀分布。当去除带钢所受外应力和纵切带钢时，带钢板形仍然保持平直。

② 潜在板形。潜在板形产生的条件是内部应力沿带钢宽度方向上不均匀分布，但是带钢的内部应力足以抵制带钢平直度的改变。当去除带钢所受外力时，带钢板形仍然保持平

直。然而，当纵切带钢时，潜在的应力会使带钢板形发生不规则的改变。

③ 表观板形。表观板形产生的条件是内部应力沿带钢宽度方向上不均匀分布。同时，带钢的内部应力不足以抵制带钢平直度的改变。结果局部区域发生了弹性翘曲变形。去除带钢所受外力和纵切带钢都会加剧带钢的表观板形。带钢中内应力分布的规律不同，它所引起的带钢翘曲形式也不同。所以，可以依据内应力的分布规律和带钢翘曲情况，将板形缺陷分为不同的类型，如图 1-1 所示^[2]。

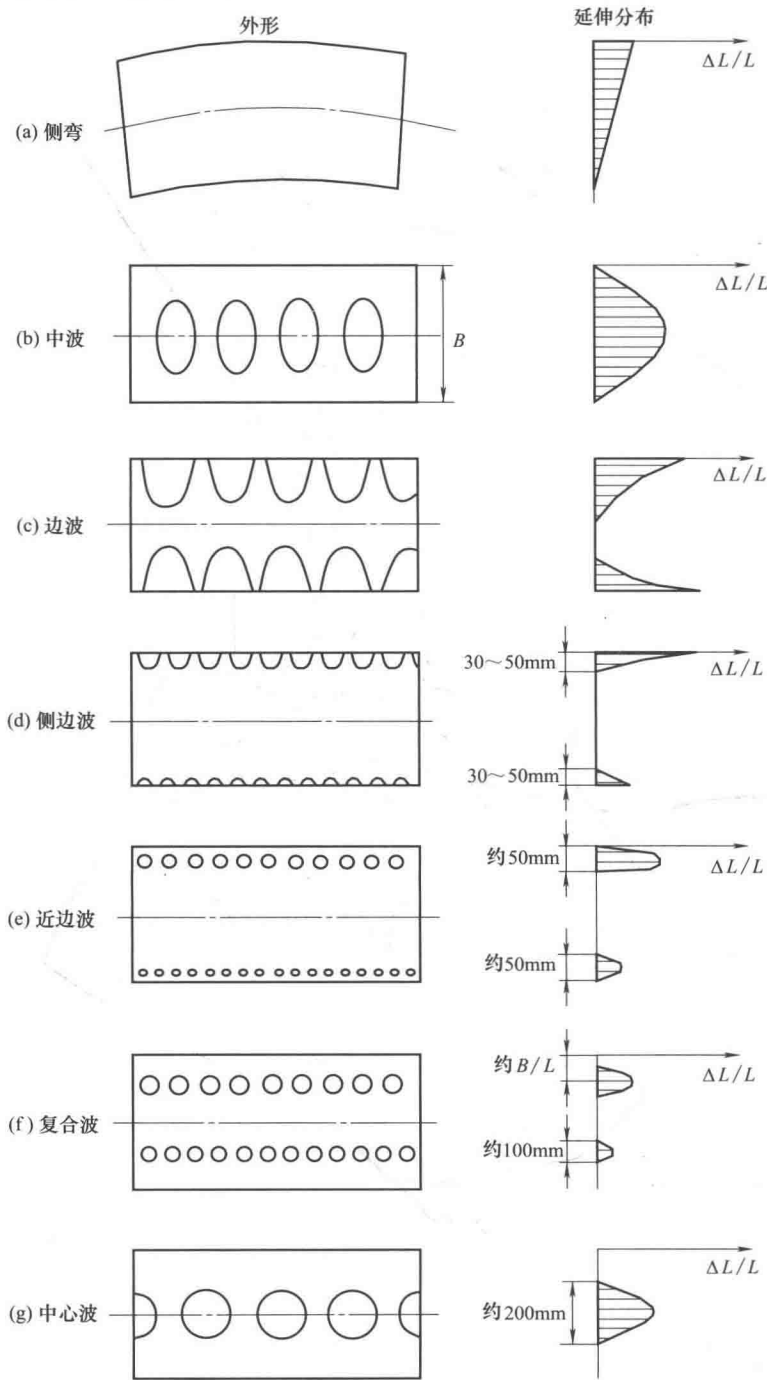


图 1-1 板形缺陷的种类

(1) 带钢翘曲的力学条件

根据塑性力学的研究结果钢板发生翘曲的力学条件可以表示为:

$$\sigma_{cr} = k_{cr} \frac{\pi^2 E_p}{12(1+\nu)} \left(\frac{h}{B} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中 σ_{cr} ——带钢发生翘曲的临界应力;

B ——带钢宽度;

h ——带钢厚度;

E_p ——带钢材料的杨氏模量;

ν ——泊松比;

k_{cr} ——板材翘曲临界应力系数。

系数 k_{cr} 取决于应力分布特征及板边支撑条件, 它可以成数量级地变化。例如, 沿带钢宽向作用均匀的压缩应力, 其一个长边可以自由挠曲时, 或者板材四周均简单支撑, 处于纯剪状态时 k_{cr} 可以小至 0.5; 但当板宽上仅有一半受到拉伸时, 它可以高达 25。

如果考虑到薄膜效应和某些不同边界条件, 式 (1-1) 应用于宽板轧制不够精确, 但是用它可以定性地进行估计。式 (1-1) 表明带钢的宽厚比在带钢翘曲方面具有重要的意义。利用式 (1-1) 对几种典型的应力分布进行分析, 可以将应力分布规律和各种板形缺陷联系起来, 图 1-1 实际上表明了内应力和板形之间的关系。

(2) 良好板形的几何条件

如图 1-2 所示, 横坐标表示各点的横向位置, 即横向各点距带钢中心的距离, 纵坐标分别为入口和出口轧件半高, 入口断面形状为 $H(x)$, 出口断面形状为 $h(x)$ 。设各点对应的原始长度为 $L(x)$, 轧后长度为 $l(x)$, 根据体积不变定律并考虑到当保证良好板形时, 板材轧制接近于平面变形, 则纵向延伸和高度压缩之间应当有下述关系:

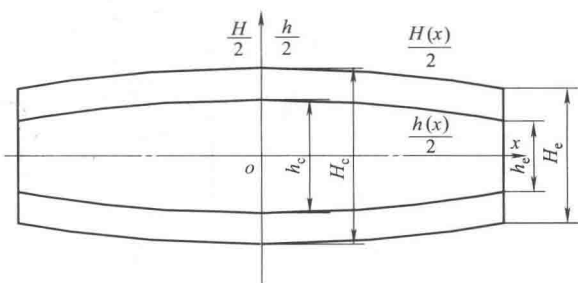


图 1-2 轧件轧前轧后的断面形状

$$\frac{L(x)}{l(x)} = \frac{H(x)}{h(x)} \quad (1-2)$$

欲获得良好板形, 必须保证带钢沿横向有相同的延伸。根据式 (1-2), 应该保证来料横断面几何形状和承载辊缝的几何形状之间相“匹配”, 即轧前和轧后的轧件断面之间应保持下述几何关系:

$$\left. \frac{h(x)}{H(x)} \right|_{x=x_i} = \text{const} \quad -0.5B \leq x_i \leq 0.5B \quad (1-3)$$

式中 B ——轧件宽度。

随板形表示方式的不同, 这个几何条件的形式也不同。一般为了使问题简化, 以带钢中心和接近带钢边部的某点的厚度差表示断面形状。下面讨论采用这种表示方法时式 (1-2) 给出的良好板形条件应取何种形式。仍如图 1-2, 设轧前带钢中心和边部的厚度分别为 H_c 和 H_e , 轧后相应的厚度为 h_c 和 h_e , 由式 (1-2), 利用分比定理, 可得:

$$\frac{\overline{C_H}}{\overline{H}} = \frac{C_h}{h} \quad (1-4)$$

式中 $\overline{H}, \overline{h}$ ——轧前、轧后的轧件平均厚度;

C_H, C_h ——轧前、轧后的轧件凸度。

式(1-4)就是常用的良好板形几何关系的表达式。虽然这种方法仅考虑带钢中心和边部两点,对于复合波等较为复杂的板形缺陷、不能确切地描述,但是由于这种方法简便,所以它仍广泛地应用于板形问题研究。

1.1.2 板形的度量

定量地表示板形,既是生产中衡量板形质量的需要,也是研究板形问题和实现板形自动控制的前提条件。因此,人们依据各自不同的研究角度及不同的板形控制思想,采取不同的方式定量地描述板形。所谓板形直观地说是指板材的翘曲度,就其实质而言,是指带钢内部残余应力的分布。根据不同的研究角度及不同的板形控制思想,采用不同的方式来定量地描述板形。其主要表示方法如下。

(1) 相对长度差表示法

如图 1-3 (a) 所示为轧后翘曲带钢的外形,该轧件由于边部产生较大的延伸而产生严重边波。将钢板裁成若干纵条并铺平,则如图 1-3 (b) 所示,可清楚地看出横向各点的不同延伸。一个比较简单的方法就是取横向上不同点的相对长度差 $\Delta L/L$ 来表示板形,通常板形以 I 单位表示,其表达式为:

$$I = \frac{\Delta L}{L} \times 10^5 \quad (1-5)$$

式中 I ——带钢板形;

L ——所取基准点的轧后长度;

ΔL ——其他点相对基准点的轧后长度差。

(2) 波形表示法

切取一段翘曲的带钢置于平台上,如将最短纵条视为一条直线,最长纵条视为一正弦波,以翘曲波形来表示板形,则称为翘曲度。翘曲度通常以百分数来表示,如图 1-4 所示。带钢的翘曲度 λ 表示为:

$$\lambda = \frac{R_V}{L_V} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 λ ——翘曲度;

R_V ——波幅;

L_V ——波长。

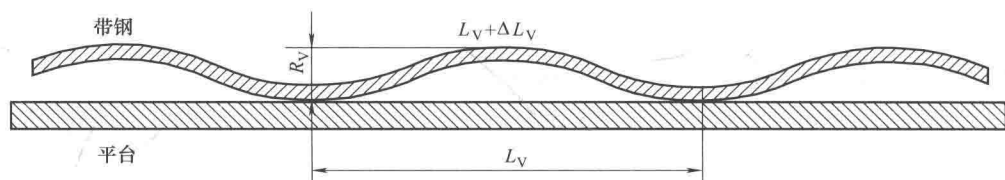


图 1-4 板形的波形表示法

设在图 1-4 中与长为 L_V 的直线部分相对应的曲线部分长为 $L_V + \Delta L_V$, 并认为曲线按正弦规律变化, 则可利用线积分求出曲线部分与直线部分的相对长度差。因设波形曲线为正弦

波, 可得其方程为:

$$H_V = \frac{R_V}{2} \sin \frac{2\pi y}{L_V} \quad (1-7)$$

故与 L_V 对应的曲线长度为:

$$\begin{aligned} L_V + \Delta L_V &= \int_0^{L_V} \sqrt{1 + (dH_V/dy)^2} dy = \frac{L_V}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + (\pi R_V/L_V)^2 \cos^2 \theta} d\theta \\ &\approx L_V [1 + (\pi R_V/2L_V)^2] \end{aligned} \quad (1-8)$$

因此, 曲线部分和直线部分的相对长度差为:

$$\frac{\Delta L_V}{L_V} = \left(\frac{\pi R_V}{2L_V} \right)^2 = \frac{\pi^2}{4} \lambda^2 \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表示了翘曲度 λ 和最长、最短纵条相对长度差之间的关系, 它表明带钢波形可以作为相对长度差的代替量。只要测出带钢波形, 就可以求出相对长度差。

(3) 矢量表示法

矢量表示法可形象地表示在控制系统作用下板形的变化趋势。如图 1-5 所示, 设有某板形控制系统, 当其设定值变化为 1 时, 带钢的中心点 c 、半板中心点 q 、边部 e 点的板厚分别变化 α_c 、 α_q 、 α_e 。这里 α_c 、 α_q 、 α_e 为该系统对板形的影响系数。以板宽方向的位置 x 为横坐标, 以 α 为纵坐标, 可将影响系数表示于图 1-5 (a) 上。上述三个影响系数的值大小不同, 表示板形的变化趋势也不同。怎样用一个统一的量来表示这些复杂的变化呢? 为解决问题, 引入了板形矢量 Θ 。如图 1-5 (b) 所示, 板形矢量 Θ 有两个分量 Θ_q 和 Θ_e , 即:

$$\begin{cases} \Theta = \Theta(\Theta_q, \Theta_e) \\ \Theta_q = \frac{\alpha_c - \alpha_q}{x_q} & \Theta_e = \frac{\alpha_q - \alpha_e}{x_e - x_q} \end{cases} \quad (1-10)$$

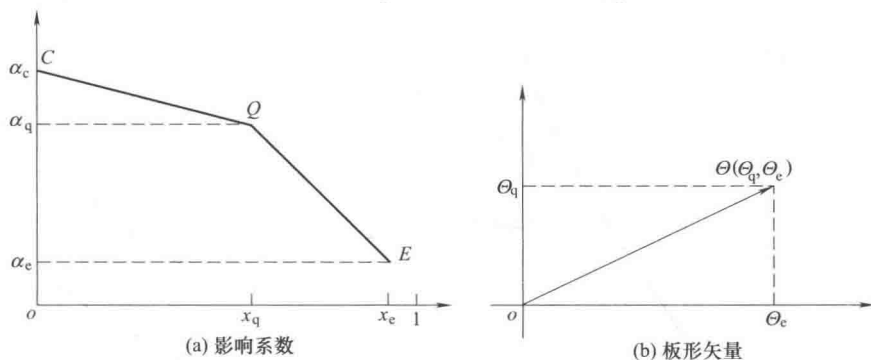


图 1-5 板形矢量的定义

Θ_q 、 Θ_e 实际上分别是图 1-5 (a) 中直线 CQ 和 QE 的斜率。根据矢量 Θ 在不同象限的位置, 可以表示板形的不同变化趋势和变化的剧烈程度。如图 1-6 所示为板形矢量 Θ 位于不同象限时板形的变化趋势, 可见, 当 Θ 位于第一象限时, 带钢向发生边波的方向变化; 当 Θ 位于第三象限时, 带钢向发生中波的方向变化, 当 Θ 位于第二、四象限时, 带钢向发生复合波的方向变化。这样, 控制 Θ 在坐标系中的位置, 就可以使带钢板形向需要的方向变化。

(4) 残余应力表示法

前已述及, 带钢板形实质上是指带钢内部残余应力沿横向的分布。所以在理论研究和板形控制中用带钢内部的残余应力表示板形更能反映问题的实质。一般将带钢内部残余应力表示为带钢横向相对位置 $2x/B$ 的函数, x 是所研究点距带钢中心的距离, B 是板宽。经验表

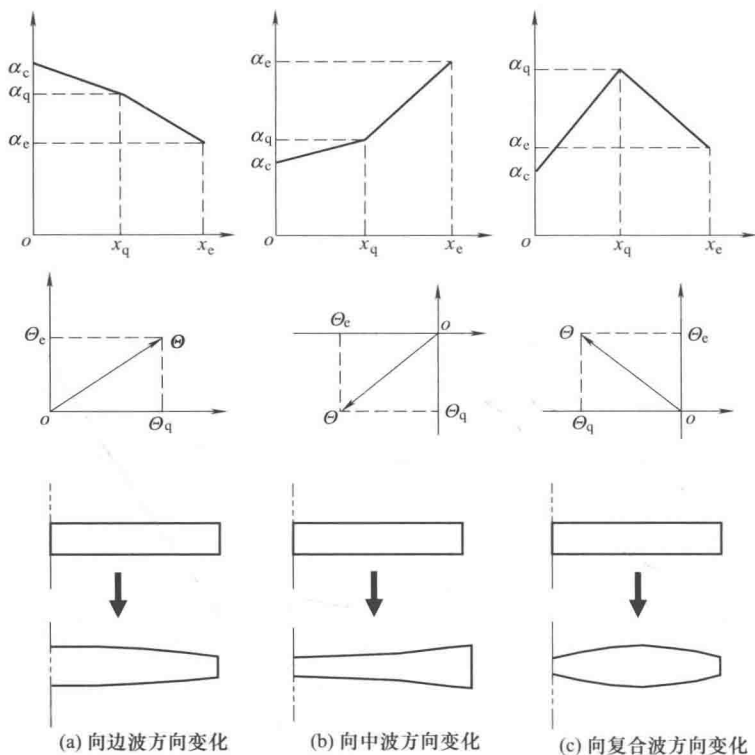


图 1-6 以矢量法表示的板形变化趋势

明,要精确表示残余应力分布,需要用四次函数,一般为了简化,只用二次函数,即:

$$\sigma_{re}(x) = a_T \left(\frac{2x}{B} \right)^2 + \text{const} \quad (1-11)$$

式中 $\sigma_{re}(x)$ ——辊缝出口处距带钢中心距离为 x 的点在带钢中发生的残余应力。

式 (1-11) 的关键是 a_T 。 a_T 称为板形参数,它可以由理论分析确定。编制合理的轧制规程及进行板形控制,目的是将 a_T 减到最小。理论研究表明, a_T 可以表示成:

$$a_T = a_T(t_f, t_b, H, h, v, c_w, c_b, F_w) \quad (1-12)$$

式中 t_f, t_b ——前、后张应力, Pa;

H, h ——轧前、轧后厚度, m;

c_w, c_b ——工作辊、支撑辊的凸度, m;

v ——轧制速度, m/s;

F_w ——液压弯辊力, N。

这种表示方法在考虑板形的最优规程设计时得到应用,寻求最优规程,应将 a_T 的表达式线性化:

$$a_T = a_T^* + K_1 \Delta t_f + K_2 \Delta t_b + K_3 \Delta H + K_4 \Delta h + K_5 \Delta v + K_6 \Delta c_w + K_7 \Delta c_b + K_8 \Delta F_w \quad (1-13)$$

式中 Δ ——各量的增量;

$K_1 \sim K_8$ ——各量对板形参数的影响系数;

a_T^* ——基准条件下的 a_T 值。

(5) 带钢断面形状的多项式表示法

如果带钢断面对称的,如图 1-7 所示,根据对断面的测量和计算,可以认为下式是逼

近带钢断面形状的:

$$h(x) = h_c + a_i x^2 + b_i x^4 \quad (1-14)$$

式中 a_i 、 b_i ——断面特征的系数。

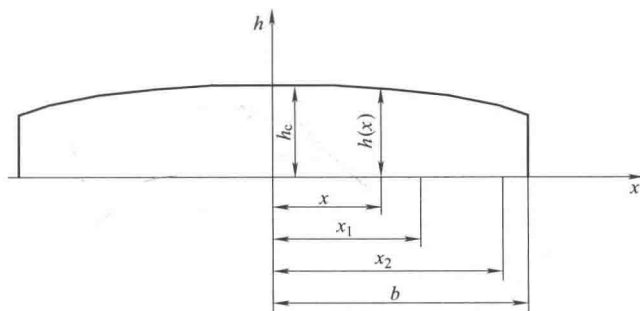


图 1-7 带钢断面形状

任何一个给定的断面形状,都可用式(1-14)表达。该式对宽度上任何两点 x_1 、 x_2 都成立,所以对 x_1 、 x_2 两点可以建立关于 a_i 、 b_i 的线性方程组。如果 h_c 给定,可以求出 a_i 、 b_i 。由此可见,只要知道了 3 个参量 h_c 、 a_i 、 b_i ,则断面形状就完全确定了。参量 a_i 、 b_i 主要取决于轧辊凸度分布、单位宽度轧制力分布、液压弯辊力和外加弯辊力矩,即:

$$\begin{cases} a_i = a_i(C_r, P, F, M) \\ b_i = b_i(C_r, P, F, M) \end{cases} \quad (1-15)$$

式中 C_r ——工作辊和支撑辊的凸度分布;

P ——轧件和工作辊之间的单位宽轧制力分布;

F ——外界作用的弯辊力 F_w (工作辊)、 F_b (支撑辊);

M ——外界作用的弯辊力矩 M_w (工作辊)、 M_b (支撑辊)。

在实际轧制过程中,控制 P 、 F 、 M , 改以改变 a_i 、 b_i , 从而达到改变轧后断面形状、控制板形的目的。下面根据板形良好条件,导出具体情况下良好板形条件的表达形式。设带钢入口断面形状为:

$$H(x) = H_c + a_1 x^2 + b_1 x^4 \quad (1-16a)$$

带钢出口断面形状为:

$$h(x) = h_c + a_2 x^2 + b_2 x^4 \quad (1-16b)$$

欲获得良好板形,应有:

$$\frac{H_c + a_1 x^2 + b_1 x^4}{h_c + a_2 x^2 + b_2 x^4} = \text{const} \quad (1-16c)$$

为此,必须满足:

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{b_2}{b_1} = \frac{h_c}{H_c} = 1 - \eta \quad (1-16d)$$

式中, η 为相对压下量。

将式(1-16)用图 1-8 表示,由原点引出横坐标为 b_i , 向上的纵坐标为 h , 向下纵坐标为 a_i , 根据带钢原始断面形状参数 h_{c1} 、 a_1 、 b_1 , 可以确定初始点 A_1 、 B_1 并作出射线 OA 、 OB , 在多道次轧制时,由 h_{c1} 轧到 h_{c2} 、 h_{c3} 、..., 为保证完好板形,相应 a_i 、 b_i 值应由射线 OA 、 OB 确定,即分别为 a_1 、

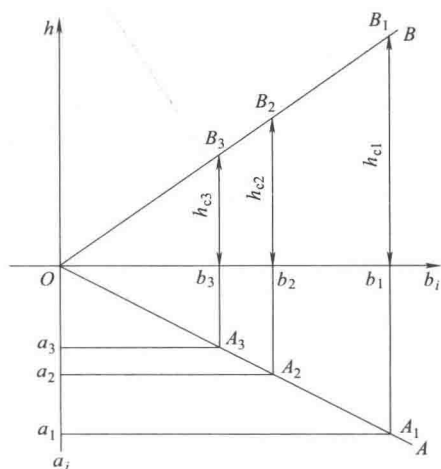


图 1-8 各道次断面形状参数之间的关系

a_2 、 a_3 、 $\cdots$ 和 b_1 、 b_2 、 b_3 、 $\cdots$ 。

这种表示方法不是选特定的点，而是以整个断面的形状来表示板形，所以它能反映复杂的板形缺陷。

(6) 厚度相对变化量差表示法

这是一种比较简单的方法，它以边部和中心两点的厚度相对变化量差来表示板形的变化，它主要在模拟计算中用来描述某些外扰对板形的影响，板形参数 Sh 表示为：

$$Sh = \frac{\delta_c}{h_c} - \frac{\delta_e}{h_e} \quad (1-17)$$

式中 δ_c 、 δ_e ——某种外扰引起的带钢中心和边部厚度的绝对变化量；

h_c 、 h_e ——带钢中心和边部的厚度。

当 $Sh=0$ 时，说明带钢板形没有变化；当 $Sh>0$ 时，说明带钢向边波方向变化；当 $Sh<0$ 时，说明带钢板形向中波方向变化。

1.2 板凸度

带钢横截面形状的描述包括凸度、楔形度、边部减薄量和局部凸起等几项内容。

与板形这一概念密切相关的另一个重要概念是板凸度。热轧及冷轧带钢往往具有共同的特点，除带钢边部外，90%的中间带钢断面大致具有二次曲线的特征，而在接近边部处，厚度突然迅速减小，这种现象称为边部减薄。带钢断面形状大致如图 1-9 所示。

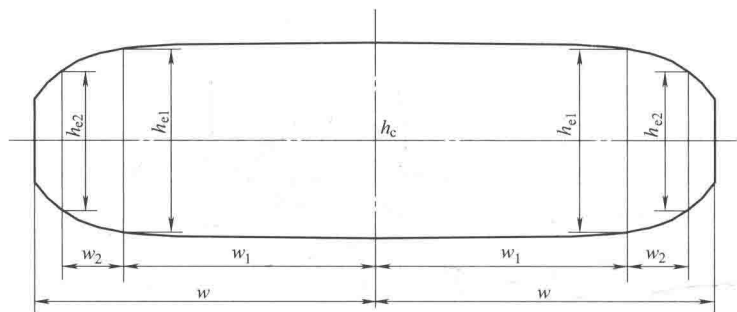


图 1-9 带钢宽度方向厚度分布

一般我们所指的板凸度，严格说来，是针对除去边部减薄区以外的部分。边部厚度是以接近边部但又在边部减薄区以外的一个点的厚度来代表，板凸度即为板中心处厚度与边部代表点处厚度之差。有时为强调它没有将边部减薄考虑进去，又称它为中心板凸度，它可以表示为：

$$C_h = h_c - h_{e1} \quad (1-18)$$

边部减薄也是一个重要的断面质量指标。边部减薄量直接影响边部切损的大小，与成材率有密切关系。边部减薄量越小，边部切损量也越小，则成材率越高。边部减薄表示为：

$$C_e = h_{e1} - h_{e2} \quad (1-19)$$

轧件厚度和板形、板凸度都有密切的关系，为了将这个因素考虑进去，引入了比例凸度的概念。比例凸度 C_p 表示为板凸度 C_h 与轧件平均厚度 $\bar{h}$ 之比：

$$C_p = C_h / \bar{h} \quad (1-20)$$

这样一来，在金属轧制过程中，良好板形条件就可以写成：

$$C_p = \text{const} \quad (1-21)$$