

板形控制和板形理论

王国栋 著

冶金工业出版社

板形控制和板形理论

王 国 栋 著

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是作者在有关的板形研究学术论文的基础上参考了国内外161篇文献写成的。全书共有十章，其中第一、二章介绍了与板形有关的基本概念；第三、四、五章从执行机构、检测装置和控制系统三个方面介绍了板形的调整和控制技术；第六、七、八章较详细地介绍了板形理论三个主要方面，即轧辊弹性变形理论、轧辊热变形理论和金属三维流动理论，还介绍了有关的电子计算机计算方法；第九章介绍了利用板形理论及其它轧制理论制订合理轧制规程的方法；第十章介绍了带钢连轧机综合特性的研究。

本书对生产、技术改造、科研和教学等都有参考价值。

板形控制和板形理论

王国栋 著

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 17 3/4 字数471 千字

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷

印数00,001~2,000册

统一书号：15062·4230 定价4.75元

前 言

近年来，轧钢生产已由过去单纯追求大型化、高速化、连续化转向注重节约能源和提高产品质量，力求以尽可能低的能源和原材料消耗创造尽可能高的经济效益。为了实现这个目标，采用了大量的新技术和新设备，在板带生产中板形控制技术就是一项引人注目的新技术。

板形是带钢的重要质量指标。随着其它工业部门生产的发展，对板带钢板形质量的要求也日趋严格。特别是近年来由于AGC系统的不断完善和广泛采用，板带的纵向厚度精度越来越高，相形之下，板形问题就变得日益突出。

关于板形问题的研究和应用始于六十年代，M.D.斯通(Stone)的弹性基础梁理论和液压弯辊的实用研究，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，工作开展得相当活跃，并取得了较大的进展。目前，关于板形问题的理论研究和实验研究的成果已经大量地应用到生产实践中去，使板带生产的面貌发生了根本变化。

国内开展板形问题研究的时间不长，刚刚开始应用于生产实践。即使是近年引进的先进设备，如武汉钢铁公司的带钢冷、热连轧机也只是具有手动的液压弯辊装置，控制质量还是较差的。至于原有老厂普遍缺乏最基本的板形控制和调整手段。每年由板形不良所造成的经济方面的损失是十分严重的。所以，解决我国板带生产中板形质量问题是一项具有巨大经济意义的课题。如果国内板带生产厂能够广泛采用各种新技术提高板形质量，经济效益将是十分可观的。鉴于此，作者在总结国内板形方面工作的同时，广泛地参考了有关的国外文献，特别是近几年的最新进展写成了这本书，把它奉献给广大读者，希望它能够为解决我国板带生产中的板形问题、提高我国板带生产技术水平作出微薄的贡献。

本书共分十章，它涉及到板形技术的各个方面。其中第一、二章主要介绍与板形有关的基本概念，它们将为以后的叙述奠定基础。第三、四、五章主要介绍板形的调整和控制技术，它们共包括三个方面，即执行机构、检测装置和控制系统。这三章既是独立的，又是互相联系的，它们是板形控制技术的几个侧面。第六、七、八章较为详细地介绍了板形理论的三个主要方面，即轧辊弹性变形理论、轧辊热变形理论和金属三维流动理论，介绍了这些理论发展的各个阶段及其主要工作。板形理论涉及到较多的数学和力学问题，为了便于读者理解和应用这些理论解决各种实际问题，书中比较全面地介绍了有关的基础理论，并进行了详细的推导，还介绍了有关的电子计算机计算方法。掌握了这三章的理论知识，可以从理论上更清晰地了解板形问题的实质，应用这些理论解决生产实际中的问题，并可以为板形控制系统提供合理的数学模型。第九章介绍了利用板形理论及其它轧制理论制订合理轧制规程的方法，它是前面三章板形理论的具体运用。第十章介绍了带钢连轧机综合特性的研究，它既是板形理论的应用，又是进行板形研究的一种手段。

书末附有参考文献161种。

由于板形问题涉及到较多的基础理论和较广泛的专业知识，加上作者水平有限，书中错误之处在所难免，望广大读者批评指正。

在从事板形方面的工作和写作本书的过程中，得到我的老师张树堂同志多方面的指导和鞍山钢铁公司高级工程师傅作宝同志的支持帮助，本书写成后，张树堂老师认真审阅了全书并提出了宝贵的修改意见，在此表示深切的谢意。

主要物理量符号及单位

物理量	符号	单位
横截面积	A	毫米 ²
工作辊横截面积	A_w	毫米 ²
支撑辊横截面积	A_b	毫米 ²
带钢横截面积	A_s	毫米 ²
板宽	B	毫米
半板宽	$b = B/2$	毫米
支撑辊凸度	c_b	毫米
工作辊凸度	c_w	毫米
热凸度	c_t	毫米
磨损曲线	c_{we}	毫米
初始轧辊凸度	c_0	毫米
比热	c	千卡/°C·千克
轧前板凸度	C_H	毫米
轧后板凸度	C_h	毫米
边部减薄	C_e	毫米
比例凸度	C_P	
直径	D	毫米
工作辊直径	D_w	毫米
支撑辊直径	D_b	毫米
中间辊直径	D_i	毫米
杨氏模量	E	公斤/毫米 ²
工作辊材料杨氏模量	E_w	公斤/毫米 ²
支撑辊材料杨氏模量	E_b	公斤/毫米 ²
中间辊材料杨氏模量	E_i	公斤/毫米 ²
轧件材料杨氏模量	E_P	公斤/毫米 ²

物理量	符号	单位
液压弯辊力	F	公斤, 吨
工作辊液压弯辊力	F_w	公斤, 吨
支撑辊液压弯辊力	F_b	公斤, 吨
振动频率	F_H	赫兹
材料剪切弹性模量	G	公斤/毫米 ²
工作辊材料剪切弹性模量	G_w	公斤/毫米 ²
支撑辊材料剪切弹性模量	G_b	公斤/毫米 ²
影响函数矩阵	$\overrightarrow{G}$	
影响函数	g	
磁场强度	H_{cm}	高斯
轧件轧前厚度	H	毫米
轧件轧后厚度	h	毫米
轧件轧前边部厚度	H_s	毫米
轧件轧前中心厚度	H_0	毫米
轧件轧后边部厚度	h_s	毫米
轧件轧后中心厚度	h_0	毫米
轧件轧前平均厚度	$\overline{H}$	毫米
轧件轧后平均厚度	$\overline{h}$	毫米
压下量	Δh	毫米
轧件厚度变化量	Δh_f	毫米
轧件轧后厚度向量	$\overrightarrow{H}$	
电流	I	安培
电压	V	伏特
抗弯截面模数	I	毫米 ⁴
支撑辊抗弯截面模数	I_b	毫米 ⁴
工作辊抗弯截面模数	I_w	毫米 ⁴
中间辊抗弯截面模数	I_i	毫米 ⁴
带钢抗弯截面模数	I_s	毫米 ⁴

物理量	符号	单位
热功当量	J	
弹性常数	K	公斤/毫米 ²
单向变形抗力	k_f	公斤/毫米 ²
板材翘曲临界应力系数	k_{or}	公斤/毫米 ²
曲率	k_o	1/毫米

$$k_w = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi E_w}$$

$$k_b = \frac{1 - \nu_b^2}{\pi E_w}$$

$$k'_w = 16 \frac{1 - \nu_w^2}{\pi E_w}$$

长度	L	毫米
长度	l	毫米
接触弧长度	l_d	毫米
辊身长度	L_r	毫米
压下螺丝中心距的一半	L_b	毫米
弯辊液压缸中心距的一半	L_w	毫米
翘曲波长	L_v	毫米
力矩	M	公斤·毫米
工作辊弯曲力矩	M_w	公斤·毫米
支撑辊弯曲力矩	M_b	公斤·毫米
轧机刚度	M_r	吨/毫米
轧机对轧制力的横刚度	M_p	吨/毫米
轧机对弯辊力的横刚度	M_F	吨/毫米
轧机对轧制力的纵刚度	$M_{r p}$	吨/毫米
轧机对弯辊力的纵刚度	$M_{r f}$	吨/毫米
i 单元工作辊凸度值	$m_w(i)$	毫米
i 单元支撑辊凸度值	$m_b(i)$	毫米
i 单元中间辊凸度值	$m_i(i)$	毫米

物理量	符号	单位
工作辊凸度向量	$\vec{M}_w$	
支撑辊凸度向量	$\vec{M}_b$	
中间辊凸度向量	$\vec{M}_i$	
轧制力	P	吨, 公斤
单位宽轧制力	p^*	公斤/毫米
i 单元轧制力	$p(i)$	公斤
轧制压力	p_d	公斤/毫米 ²
板边部单位宽轧制力	p_s^*	公斤/毫米
板中心单位宽轧制力	p_c^*	公斤/毫米
单位宽轧制力向量	$\vec{P}$	
剪力	Q	公斤
中间辊横移阻力	Q_r	公斤
弹性基础反力	q^*	公斤/毫米
工作辊和支撑辊之间的		
接触压力	q^*	公斤/毫米
单位面积的接触压力	q_d	公斤/毫米 ²
辊间接触压力向量	$\vec{Q}$	
传热量	Q_i	千卡
热流量	q_i	千卡/米 ² ·小时
轧辊半径	R	毫米
轧辊压扁半径	R'	毫米
工作辊半径	R_w	毫米
支撑辊半径	R_b	毫米
相对压下量	r	
翘曲波高	R_v	毫米
双阶梯支撑辊接触段长度	S_l	毫米
张力	S_i	公斤, 吨
板形参数	Sh	

物理量	符号	单位
初始辊缝	S_0	毫米
温度	$T_{i,j}$	$^{\circ}\text{C}$
前张应力	t_f	公斤/毫米 ²
后张应力	t_b	公斤/毫米 ²
平均前张应力	$\overline{t_f}$	公斤/毫米 ²
时间增量	Δt	秒
变形能	U	焦耳
弯曲变形能	U_b	焦耳
剪切变形能	U_s	焦耳
秒流量	U_0	毫米 ² /秒
轧件出口速度	v	米/秒
轧辊圆周速度	V_R	米/秒
磨损量	w	毫米
位移量	y	毫米
位移向量	$\underline{Y}$	
边部减薄比	α_p	
换热系数	α_i	卡/毫米 ² ·秒· $^{\circ}\text{C}$
线膨胀系数	β_i	1/ $^{\circ}\text{C}$
正应力	σ	公斤/毫米 ²
翘曲临界应力	σ_c	公斤/毫米 ²
残余应力	σ_r	公斤/毫米 ²
平均张应力	$\overline{\sigma}$	公斤/毫米 ²
剪应力	τ	公斤/毫米 ²
密度	ρ_d	公斤/毫米 ³
曲率半径	ρ_r	毫米
板形参数	ρ	
应变	ε	
热传导系数	λ_i	卡/毫米·秒· $^{\circ}\text{C}$
翘曲度	λ	%

物理量	符号	单位
塑性应力应变比例因子	$d\lambda_p$	
泊松比	ν	
工作辊材料的泊松比	ν_w	
支撑辊材料的泊松比	ν_b	
中间辊材料的泊松比	ν_i	
轧件材料的泊松比	ν_p	
板形矢量	$\vec{\Theta}$	
英制板形	Σ_s	英寸/厘米
加制板形	$\Sigma_{s'}$	I
摩擦系数	μ	
板中心部分厚度变动量	δ_c	毫米
板边部厚度变动量	δ_e	毫米

目 录

第一章 板形及有关板形的基本概念	1
§ 1. 板形	1
§ 2. 带钢翘曲的力学条件	2
§ 3. 良好板形的几何条件	2
§ 4. 板形的表示方法	5
§ 5. 板凸度	14
§ 6. 板凸度与板形的关系	15
§ 7. 边部减薄	17
第二章 影响板形的因素	20
§ 1. 规程图	20
§ 2. 轧制力变化对板形的影响	25
§ 3. 来料板凸度对板形的影响	27
§ 4. 热凸度变化对板形的影响	28
§ 5. 初始轧辊凸度对板形的影响	30
§ 6. 板宽变化对板形的影响	30
§ 7. 张力对板形的影响	31
§ 8. 轧辊接触状态对板形的影响	32
第三章 板形改善方法	34
§ 1. 轧制规程的在线修正	34
§ 2. 液压弯辊	36
§ 3. 双轴承座工作辊弯曲装置 (DC-WRB)	59
§ 4. HC轧机	76
§ 5. 张应力分布控制 (TDC)	104
§ 6. VC轧辊	119
§ 7. 热凸度控制	130
第四章 板形检测	138
§ 1. 压头测压式组合辊测定张应力分布	139
§ 2. 空气轴承式组合辊测定张应力分布	147
§ 3. 透磁式磁性板形检测装置	154

§ 4. 剩磁式磁性板形检测装置	162
§ 5. 光学式板形检测装置	165
§ 6. 带反馈放大式涡流测距仪的板形检测装置	173
§ 7. C. R. M. 的光学式热轧板形检测装置	180
§ 8. 分割辊式热轧板形检测装置	184
§ 9. 带X射线测厚仪的板断面形状检测装置	185
§ 10. 机械加振式板形检测装置	190
§ 11. 喷嘴式板形检测装置	194
第五章 板形控制系统	200
§ 1. 自动挠度控制系统	200
§ 2. BISRA的板形控制系统	202
§ 3. 液压弯辊系统的自动控制	210
§ 4. HC轧机的板形控制系统	213
§ 5. TDC装置的自动控制系统	220
第六章 轧辊弹性变形理论	225
§ 1. 与轧辊弹性变形有关的基础理论	226
§ 2. 轧辊弹性变形的解析方法	238
§ 3. 研究轧辊弹性变形的影响函数方法	289
§ 4. 计算轧辊弹性变形的矩阵方法	324
§ 5. HC轧机轧辊弹性变形的矩阵计算方法	351
§ 6. 轧辊弹性变形理论应用举例	361
第七章 轧辊的热变形理论	380
§ 1. 传热的方式和基本定律	381
§ 2. 温度对称分布的无限长圆柱体的热膨胀	386
§ 3. 热传导方程的解析解法	389
§ 4. 轧辊温度场的差分解法	406
§ 5. 求解轧辊热变形的半经验方法	434
§ 6. 关于轧辊热变形理论的讨论	437
第八章 金属三维变形理论	439
§ 1. 初等分析方法的解析求解	439
§ 2. 三维变形时材料流动的解析方法	446
§ 3. 展宽函数和A. 特罗斯特(Troost)的差分解法	453
§ 4. 二维变形区和三维变形区联合求解的数值方法	460

§ 5. 考虑横向剪应力影响的塑性理论解析	467
§ 6. 关于三维变形理论的讨论	478
第九章 轧制规程的制订	482
§ 1. 带钢冷连轧机轧制规程的制订	482
§ 2. 带钢热轧机轧制规程的制订 (I)——动态负荷分配法	489
§ 3. 带钢热轧机轧制规程的制订 (II)——变规程方法	501
§ 4. 中厚板轧机轧制规程的制订 (I)——恒比例凸度控制法	508
§ 5. 中厚板轧机轧制规程的制订 (II)——板凸—板形联合控制系统	513
第十章 带钢连轧机的综合特性	520
§ 1. 研究带钢连轧机综合特性的线性化方法 (I)——稳态过程的研究	520
§ 2. 研究带钢连轧机综合特性的线性化方法 (II)——动态过程的研究	529
§ 3. 研究带钢连轧机综合特性的直接法	536
参考文献	549

第一章 板形及有关板形的基本概念

§ 1. 板形

取一定长度的带钢自然地放到一个平面上，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均一的纵向延伸。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。

为了说明金属纵向变形不均的程度，引入了板形 (Shape) 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^{〔1〕}。

只要带钢中存在残余的内应力，就称为板形不良。如果这个应力虽然存在，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，后者称为表观的板形不良。

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（图1-1）〔3〕。

§ 2. 带钢翘曲的力学条件

根据弹性力学的研究结果，钢板发生翘曲的力学条件可以表示为

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

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, ν_P ——带钢材料的杨氏模量和泊松比；

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的边界条件，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。

一些研究结果〔1,4〕指出，对于冷轧宽带钢，在产生边波时 $k_{cr} \approx 12.6$ ，而中波时则 $k_{cr} \approx 17.0$ 。对于热轧宽带钢（1700轧机，带宽1000毫米），边波时 $k_{cr} \approx 14$ ，中波时 $k_{cr} \approx 20$ 。

§ 3. 良好板形的几何条件

如图1-2，横坐标表示各点的横向位置，即横向各点距带钢中

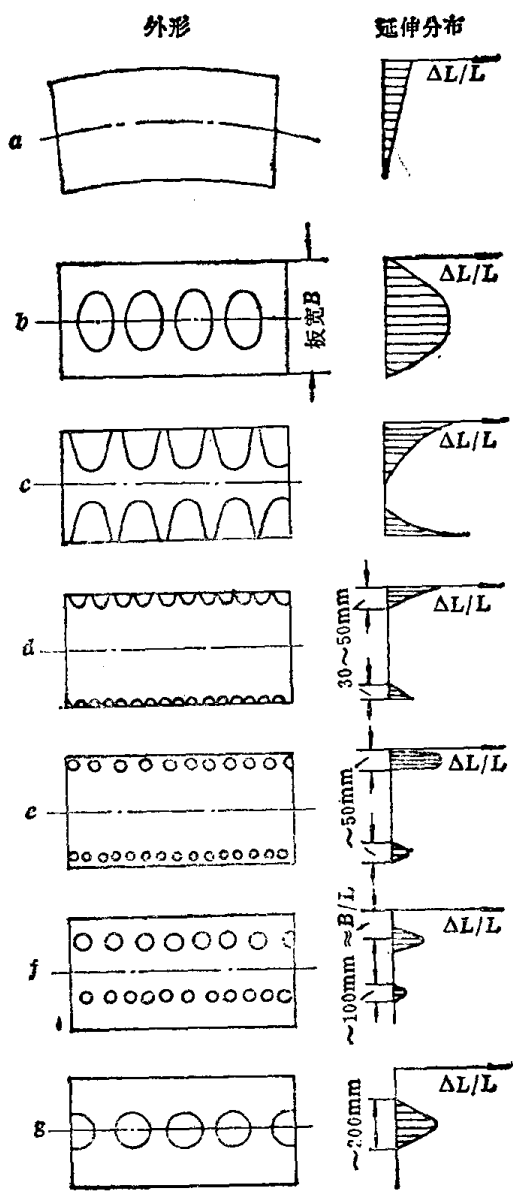


图 1-1 板形缺陷的种类

a —侧弯； b —中波； c —边波； d —侧边波； e —近边波； f —复合波； g —中心波