

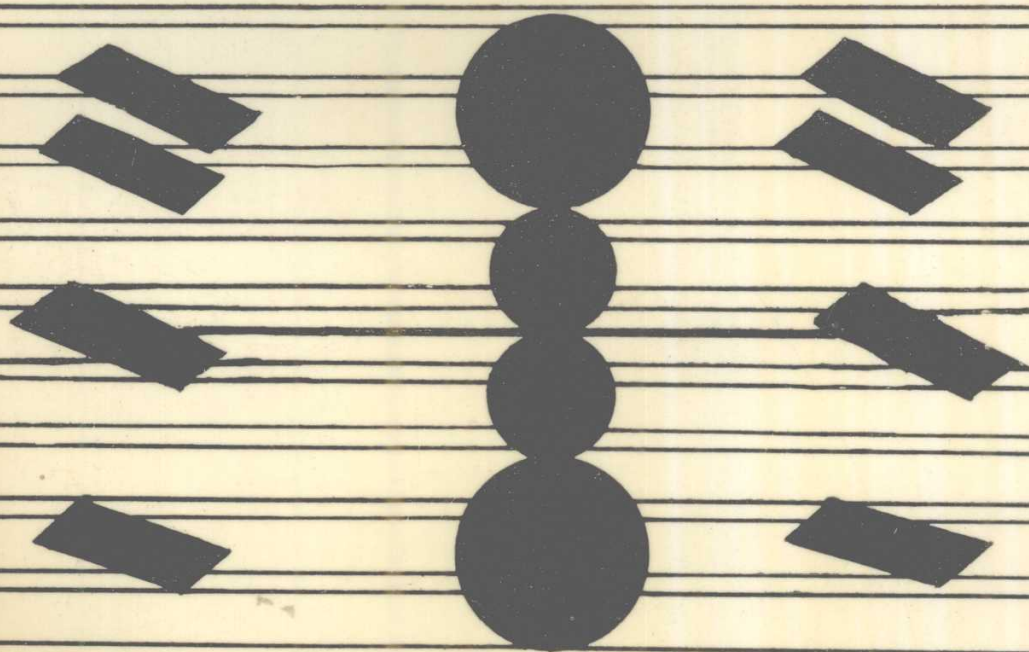
轧制板形控制技术

● 中国有色金属工业总公司

教育局 组编

● 中南工业大学出版社

有色金属继续教育丛书



[湘]新登字010号

轧制板形控制技术

姜燕雄 编

责任编辑: 周兴武

*

中南工业大学出版社出版发行

湘潭市东平印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 6 字数: 180千字

1993年9月第1版 1993年9月第1次印刷

印数: 0001—2000

*

ISBN 7-81020-491-2/TD·029

定价: 3.50元

内 容 提 要

本书介绍了六种新型的轧机，这些轧机在控制板凸度和板形上较以往的轧机更加灵敏和精确；该书叙述了用热膨胀方法控制辊型的有关问题，同时还简单地介绍了若干种板形与板凸度的测量方法和原理。本书可供从事板带材生产的工程技术人员和管理人员阅读参考，也可供压力加工专业的研究生阅读参考。

序

继续教育是对在职专业技术人员不断进行知识技能补充、更新、拓宽和提高的一种追求教育，这种与科研、生产任务密切结合的教育形式，对于专业技术人员提高科技水平和创造能力，并使最新的科技成果迅速转化为生产力，具有重要的意义。总公司教育局根据有色金属企事业单位专业技术人员在职学习的特点，组织有关企业、科研院所、高等学校的专家，编写了这套有色金属继续教育教材，为广大专业技术工作者在职学习提供了方便，这是一件很有意义的工作。

邓小平同志曾经精辟地指出：“科学技术是第一生产力”。我们搞改革、搞开放、搞建设，不抓科学技术这一生产力是没有出路的。有色金属工业的发展也必须重视教育和科学技术。随着有色金属企业经营机制的转换，企业要直接在商品经济的海洋中搏击，没有科学技术这一第一生产力做后盾是不行的。发展科技，最重要的是人才，企业的竞争最终是人才的竞争。当前科学技术发展迅猛，日新月异，仅靠在大学里学到的知识是远远不够的。经济发达国家的教育模式正在从“一次教育”向“终身教育”过渡。

需要指出的是：各单位要积极创造条件，采取有力措施，为广大专业技术工作者学习提供条件，支持他们不断提高水平；同时，从事专业技术工作的同志要勤于学习，学习本专业、本岗位需要的新理论、新技术、新工艺以及新的管理方法。只有勤于学习，才能适应改革开放的新形势，才能为有色金属工艺的发展更好地贡献自己的聪明才智。

中国有色金属工业总公司
副 总 经 理

何伯泉

1992年7月24日

编者的话

板形或平度是板带材生产质量的一项指标，对后续工序与使用影响很大。近20多年来国外在改善板形，提高平度技术指标方面做了大量工作，有长足的进步，各种改进方法与思路已变成了各种各具特色的轧机，并都成功地在工业上得到使用和推广。监控更精确的检测手段同步得到发展。读此书后可体会轧制技术进步的足迹。我国有色金属板带材生产占有金属加工材生产总量的60%以上，大大小小各类轧机千多台，其中虽有先进的，但为数很少，大部份为平度控制功能较差的轧机，全面被淘汰似不现实，对其进行改造，提高其对平度的调控能力，使平度质量在现有基础上提高，仍是必要的和可能的。本书介绍当今板带材平度调控的状态，希望对读者有所启发，洋为中用土洋结合，在工艺和设备上作小的、中的甚致大的改革，使先进的更先进，后进的有提高，这就是编者的希望。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 现代板带材的生产特点	(1)
1.2 板形	(1)
1.3 板形与板凸度	(7)
1.4 影响辊缝形状的因素	(9)
1.5 板形控制的过去和现在	(11)
1.6 轧辊的弯曲计算	(13)
1.7 轧辊的压扁计算	(19)
参考文献	(22)
2 弯辊技术	(23)
2.1 起因和发展	(23)
2.2 支撑辊弯辊的轧机	(23)
2.3 工作辊弯辊的轧机	(28)
2.4 工作辊弯辊与支撑辊弯辊的比较	(35)
参考文献	(36)
3 HC轧机及其家族	(38)
3.1 HC轧机的结构特点与由来	(38)
3.2 HC轧机的特点	(41)
3.3 HC轧机的使用效果和应用情况	(44)
3.4 UC轧机	(47)
3.5 HCMW轧机	(53)
3.6 HCW轧机 (K-WRS 轧机)	(56)

参考文献.....	(65)
4 CVC技术	(66)
4.1 基本原理	(66)
4.2 技术参数	(67)
4.3 CVC轧机的类型	(77)
4.4 生产中可能出现的问题	(79)
4.5 CVC轧机的使用情况	(81)
参考文献.....	(82)
5 UPC轧机	(84)
5.1 UPC轧机的基本原理	(84)
5.2 轧辊参数和辊面曲线	(86)
5.3 实例	(89)
参考文献.....	(91)
6 PC轧机	(92)
6.1 基本原理	(92)
6.2 PC轧机的特点	(93)
6.3 PC轧机的使用	(97)
参考文献.....	(98)
7 可涨凸度轧辊	(99)
7.1 基本原理	(99)
7.2 可涨凸度轧辊的形式和结构	(103)
7.3 使用情况	(105)
7.4 具有柔性端头的轧辊	(109)
参考文献	(113)
8 NIPCO 技术	(114)
8.1 发展由来	(114)

8.2	NIPCO 轧辊	(115)
8.3	理想力分布和实际力分布	(116)
8.4	NIPCO 的工作方式与功能	(119)
8.5	平度控制范围	(125)
8.6	闭环控制	(127)
8.7	NIPCO 与轧制速度	(129)
	参考文献	(133)
9	轧辊的热膨胀控制	(134)
9.1	轧辊温度分布	(134)
9.2	轧辊的热平衡与温升	(136)
9.3	传热系数 τ	(137)
9.4	辊凸度的热控制	(139)
9.5	实例	(147)
	参考文献	(151)
10	板凸度与板形的测量	(152)
10.1	板凸度与板截面形状的测量	(152)
10.2	板形测量方法	(152)
10.3	ASEA 板形辊	(160)
10.4	Vidimon板形辊	(163)
10.5	CLECIM 板形辊	(165)
10.6	Vollmer板形测量仪	(166)
10.7	激光板形仪	(169)
10.8	板形规	(171)
10.9	活套挑板形仪	(174)
10.10	板形测调器	(175)
	参考文献	(178)

1 绪 论

1.1 现代板带材的生产特点

现代板带材的生产特点呈以下趋势：

生产方式：成卷轧制然后纵剪成带，横剪成板，这种方式成为主流。除中厚板外，单张块式法生产正趋向淘汰。

质量：尺寸精度高，厚度偏差小，外观平直，表面光滑清洁，性能均一，成份准确。

生产效率：轧制速度快，停车时间短，卷重大，产量高。钢和铝都实现了全连续无头轧制。生产呈流水作业化和自动化，如连续铸造线，轧制线，退火与清洗线，剪切、分类和包装线，甚至仓储也已开始了自动化作业。这样，生产效率由于高速化、连续化、自动化和专业化而大大提高，从而使生产的人力物力消耗减少，成本降低。

生产装备：以生产工艺为基础，配备有强大而完善的支持、保证和测控系统，使生产过程高度可靠地运行。板带材的轧制生产已成为一个技术高度密集的行业。

人员的素质：从业人员既精通本行业业务也了解相关技术，掌握本行业发展动向。

1.2 板形

板形 (Shape) 是指板带材的外貌形状。

板形是板带产品的外观质量指标之一。板形不良的板带不但使后续工序操作困难（如堆不稳，卷不紧和剪不直），从而造成废品，也影响板带的剪裁、冲压、铆焊和其它使用性能。

不良的板形表现为瓢曲、起拱、波浪、侧弯（又称镰刀弯和不直等）和塔形卷等。如图1-1所示。

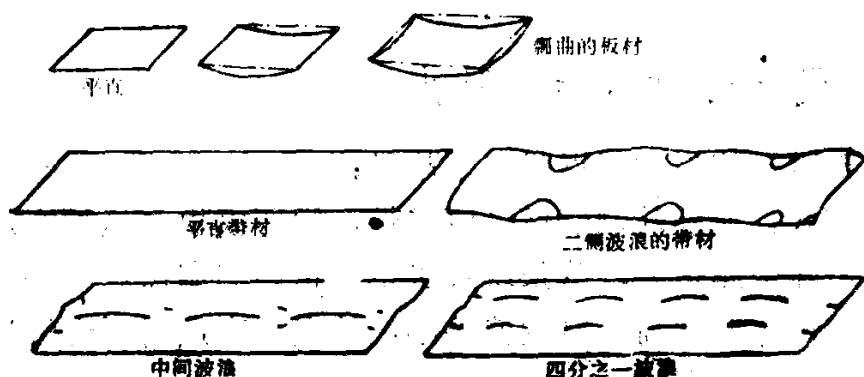


图1-1 板材的瓢曲和带材的波浪

板形的量化指标：现在国际上通用的指标有：

(1) 平度 (Flatness)，也可称平直度，定义为：

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

若算出结果为30，则称之为“该轧件的平度为30个I单位”。

(2) 波度 (Steepness)，又称波浪度，定义为：

$$S = \frac{H}{L} \times 10^2 \quad (\%) \quad (1-2)$$

(3) 波高：H (mm)

式中L、L'和H的意义，见图1-2。若波浪曲线与正弦曲线相合时，则他们的关系为：

$$I = (\pi H / 2L)^2 \times 10^5 = 2.5 (\pi \cdot S)^2 \quad (1-3)$$

$$H = (2LI / \pi) \times 10^{-5} = LS / 100 \quad (\text{mm}) \quad (1-4)$$

$$S = (2I/\pi) \times 10^{-1} = (H/L) \times 100 \quad (\%) \quad (1-5)$$

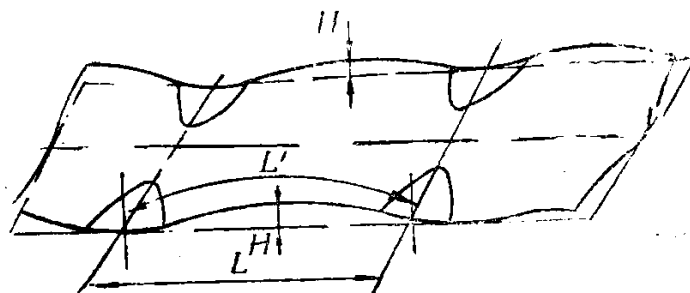


图1-2 带材波浪的高度与间隔

在测得波浪的高度 (H) 和波浪的间隔 (L) 后, 即可算出各指标。例如轧件的波高为10mm, 间隔为800mm, 则该轧件的波度 $S = \left(\frac{10}{800} \right) \times 100 = 1.25\%$, 平度为: $I = \left(\frac{\pi}{2} \frac{10}{800} \right)^2$

$\times 10^5 = 38.6$ 个 I 单位。同时按平度的定义 $I = \frac{L' - L}{L} \times 10^5$, 可

算得: 对于1000m长的轧件, 波浪部位的长度为1000.386m。

板形不良结果的出现是轧件宽向上延伸不均的结果, 延伸大的部位由于受相邻延伸小的部位的制约, 而受纵向压应力的作用。当轧件较“薄”时, 轧件的刚度也较小, 故在压应力的作用下失稳起拱而成为间隔基本相同的波浪。当轧件稍“厚”时, 其刚度有所增大, 若受到同样的压应力时, 虽也失稳起拱, 但波浪的间隔 (L) 拉长, 高度 (H) 减小。当轧件达到一定厚度时, 其刚度足以抵抗压应力的作用, 于是虽有内应力存在, 但不失稳, 保持平直的外形。但这时称之为“具有潜在板

形的轧件”。

对于外观平直而内部又不存在应力的轧件，称之为“具有理想板形的轧件”^[1]。这种理想状态虽然是极难实现的，但却是轧制工作者努力要去实现的。

在轧件的宽度上，既有可见板形又有潜在板形时，称之为“具有双板形的轧件”。如图1-3示。

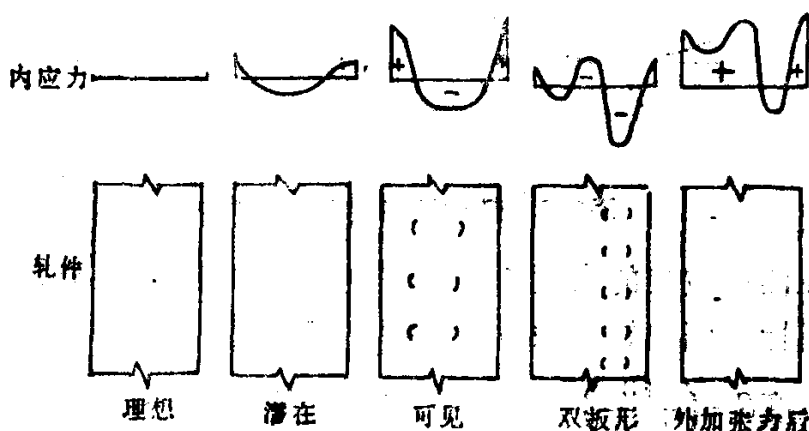


图1-3 板形与内应力

在具有可见板形的轧件上施加纵向张力，这样改变了内应力的~~大小和正负~~。使压应力减弱，张应力增大，结果使波浪和不平减弱，甚至消失。但当取消外加张力后，内应力和板形也随之恢复原状。因此应该在~~没有外加张力的情况下~~观察板形，才不失真。

若施加外张力后，某部位的张应力超过了材料的抗张屈服强度，则此部位发生塑性伸长，使相邻部位的纵向压应力减弱，这就是张力矫平。当然在取消外加张力后，仍将发生一些弹性恢复。关于板形与内应力的关系如图1-3示。

对于板厚度在30mm左右或以上时，轧件宽度上的延伸不均匀，可被不均匀的宽展所补偿，故外观总是平直的，但造成轧件宽度上延伸不均匀的压下量不均匀，却留在轧件上，造成轧件宽度上的厚度不均匀。

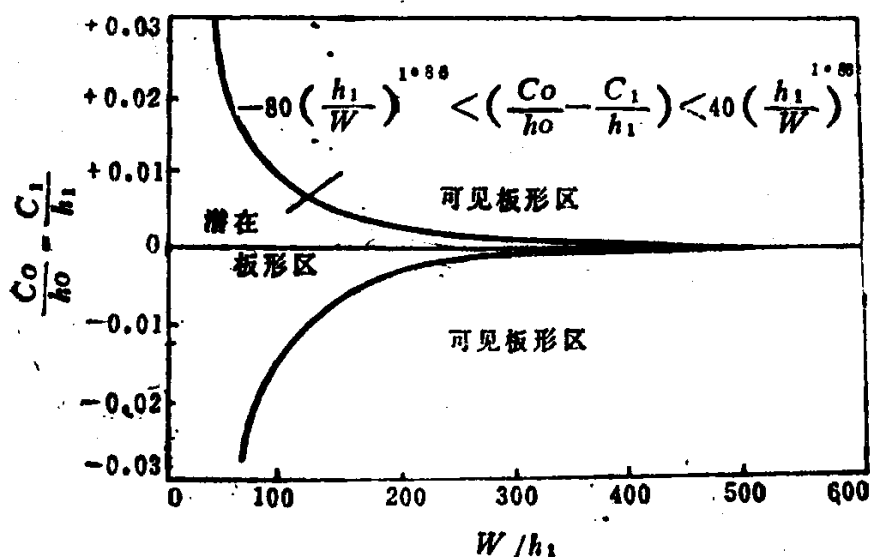


图1-4 出现可见板形的区间

Shobet等人提出了一条经验方程，用来预报可见板形的出现，方程也可描绘成曲线，示于图1-4。方程如下：

$$-80\left(\frac{h_1}{W}\right)^n < \left(\frac{C_0}{h_0} - \frac{C_1}{h_1}\right) < 40\left(\frac{h_1}{W}\right)^n \quad (1-6)$$

其中：W——轧件的宽度；

h_0, h_1 ——轧件轧制前、后的厚度；

C_0, C_1 ——轧件轧制前、后的板凸度（关于板凸度的概念见1.3）；

n ——为一常数，对于钢材 $n = 1.86$ 。

可以把 (h_1/W) 看作轧件的相对厚度，代表轧件的刚度大小。

不中 越的土更宽料片，却土以越各过mm03在更宽对于拔
 如雪且，直平县总感代站，对林袍更宽的因不均面，因
 如查，土料片在留味，因不均量不阻的因不均更宽料片
 因不均更宽的因不均更宽料片

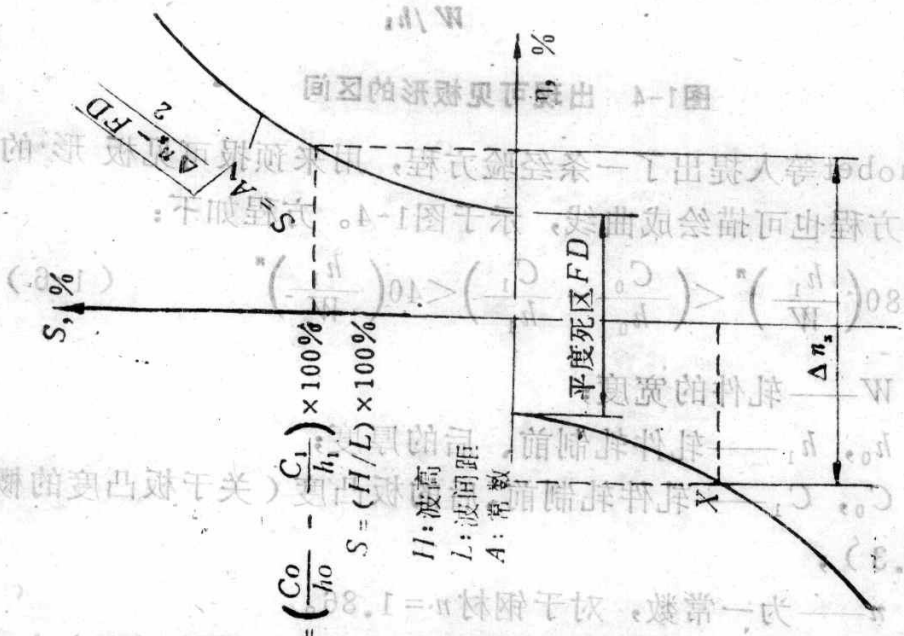
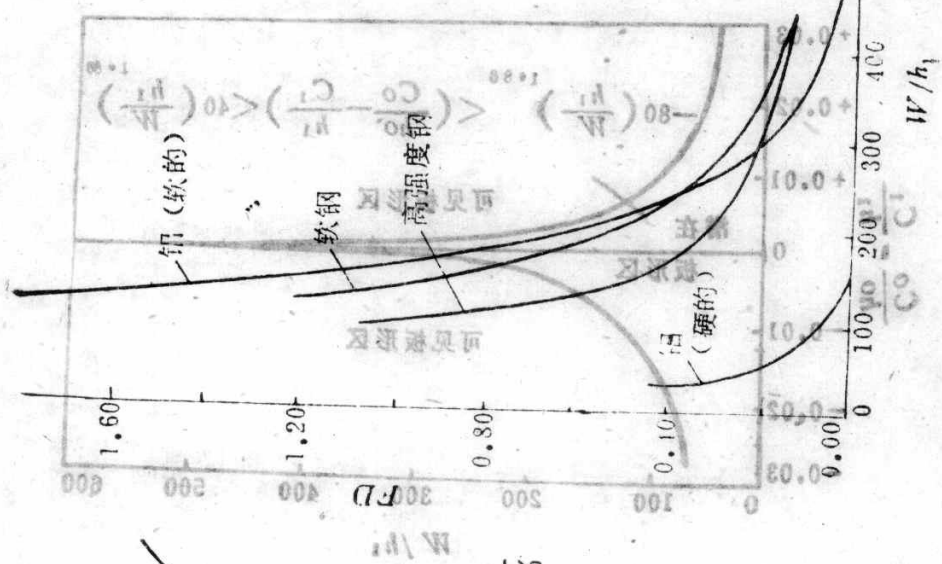


图1-5 度死区 (F.D.) 和波度

$\left(\frac{C_0}{h_0} - \frac{C_1}{h_1}\right)$ 是沿轧件宽向压下量的不均匀性，是造成轧件不均匀延伸和内应力的外部因素，当外因素超过了内部抵抗能力时，发生失稳，出现可见板形。

潜在板形的另一种预报形式叫平度死区 (Flatness dead-band)，轧制条件在此区域内时，不产生可见板形。平度死区的大小，与轧件的软硬和宽厚比有关，见图1-5所示。

1.3 板形与板凸度

板截面形状 (Profile)：简称板截面，是板带横截面的形状，和厚度沿宽向上的分布，常见的厚度沿宽向的分布情况如图1-6所示。

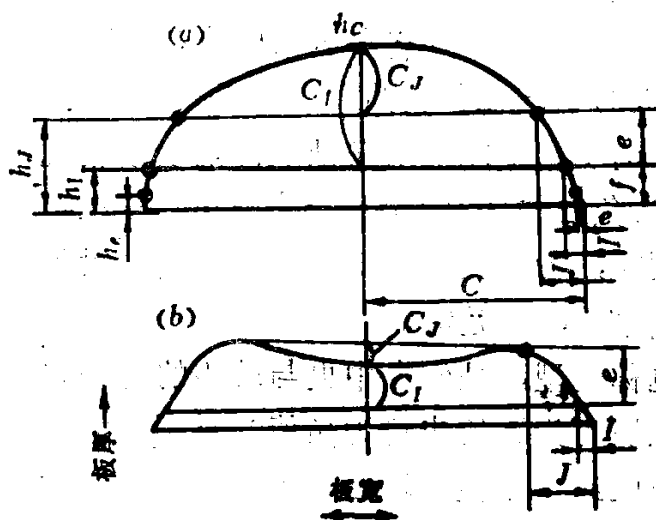


图1-6 轧件厚度沿宽向的二种分布

板凸度 (Crown)：是板带横截面上，三个特定位置的厚度差^[2]：

$$\text{板的总凸度: } C_I = h_C - \bar{h}_I \quad (1-7)$$

$$\text{板的部份凸度: } C_J = h_C - \bar{h}_J \quad (1-8)$$

$$\text{板的边部减薄: } e = \bar{h}_J - \bar{h}_I \quad (1-9)$$

$$\text{板的边缘减薄: } f = \bar{h}_I - \bar{h}_e \quad (1-10)$$

式中: h ——轧件的厚度;

$\bar{h}$ ——轧件左右相应位置厚度的平均值;

C 、 J 、 I 和 e ——分别为轧件宽度的中央和距轧件边缘 J 、 I 和 e 之处。对于钢板带: $e = 2 \sim 3\text{mm}$; $I = 19 \sim 25\text{mm}$; 和 $J = 50 \sim 150\text{mm}$ 。对于有色板带, 尚未见到有相应的提法和数据, 可根据轧件的软硬, 借用钢板带的规定使用。

板的边部减薄 (edge drop): $e = \bar{h}_J - \bar{h}_I$, 是因为轧件边部, 轧辊与轧件的接触压力逐渐减小以致消失, 导致轧辊的弹性压扁逐渐减少以致消失所致, 故 $e = \bar{h}_J - \bar{h}_I$ 永为正值。

板的部份凸度 (C_J) 受各种因素的影响, 可正可负, 如图 1-6 所示, 称板的正凸度和负凸度, 它反映了板的真实情况。而板的总凸度 (C_I) 却不能反映负凸度时的真实情况, 因为 $C_I = C_J + e$, 当 C_J 为负, 并 $|C_J| < e$ 时, C_I 为正。故在自动识别和自动调节板凸度时, 为避免差错, 应 C_I 与 C_J 同时投入运算。同理图 1-4 和 1-5 中的 C , 应是 C_J 。

辊凸度也称辊型, 是辊身中央与端头的直径差 (称直径辊凸度), 辊凸度可为正值也可为负值, 分别称之为正凸度或凸辊型, 和负凸度或凹辊型。辊凸度可在轧辊研磨时磨出, 称之为原始辊凸度, 辊凸度也可在轧制时控制温度沿辊身分布不均而造成, 称之为轧辊的热凸度。

辊缝轮廓也称辊缝形状, 是形成板截面的重要因素, 轧件进入前与轧制时, 辊缝轮廓是不相同的, 因为轧制时轧辊受轧

制力而变形，从而影响辊缝轮廓（和尺寸）。可以认为板截面等于轧制时的辊缝轮廓。

欲轧得理想板形，即要求轧件宽度上纵向延伸一致，就要求宽向上的压下率一致，即要求轧制时的辊缝轮廓与轧坯截面形状一致。因此研究板形，即研究板凸度、板截面和辊缝形状；控制板形，即控制板凸度、板截面和辊缝。

1.4 影响辊缝形状的因素

如上述，轧制时轧件与轧辊相接触，故板凸度和板截面形状取决于辊缝的形状和尺寸，故欲获得满意的板形和板凸度，就应控制辊缝。影响辊缝形状和尺寸的因素有：

(1) 轧辊的弯曲

轧辊受下列外力的作用：

- 轧件给的轧制力
- 弯辊装置给的弯辊力
- 压下装置给的支反力，或支撑辊给的支撑力。
- 轧制薄轧件时，轧辊相互压靠时的接触力。等等。在这些外力作用下，轧辊发生弯曲产生挠度，从而影虑辊缝的形状和尺寸。

(2) 轧辊的压扁 (Flaten)

轧件与工作辊相接触，支撑辊与工作辊也相互接触，都产生接触压力，并使接触面发生压扁，但由于接触压力沿辊身分布不均，故压扁量分布亦不均匀，从而影响辊缝的形状和尺寸，特别在轧件边部不均匀性更大。

(3) 轧辊的热膨胀

轧制时轧辊受轧件的变形热和摩擦热的作用，特别是热轧