

矫直理论与 卷取理论

连家创 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

矫直理论与卷取理论

连家创 著



机械工业出版社

前 言

矫直理论和卷取理论是轧制辅助设备计算理论的主要组成部分。作者曾于1960年秋季学期至1963年春季学期在东北重型机械学院(燕山大学的前身)讲授“轧钢辅助设备”课程。1963年秋季学期东北重型机械学院进行课程体系改革,实行设备工艺合并,按初轧型钢、钢板、钢管生产工艺及设备讲授,并把设备和工艺的共性部分编为“轧钢设备及工艺总论”,先于型、板、管进行授课。本书就是在多年讲授“轧钢辅助设备”和“轧钢设备及工艺总论”的基础上,结合改革开放以后与上海宝山钢铁集团公司、第一重型机器集团公司等企业的技术合作所取得的成果编写的,其中许多内容是作者和以作者为课题负责人的课题组多年来的研究成果。

十分感谢合作单位的领导和工程技术人员的大力支持和密切合作;感谢课题组成员李俊洪、孙蓟泉、戚向东、岳晓丽和白振华等博士在项目研究工作中作出的成绩和贡献;特别感谢戚向东博士自始至终协助完成了本书的编辑、校阅和初审工作。

在完成本书的编写时,适逢迎来我校“轧钢设备及工艺专业”1955年在哈尔滨工业大学创建至今55周年纪念日,也是哈尔滨工业大学和燕山大学90周年校庆,在此向母校和专业表示衷心的感谢和祝贺。

作 者

2010年9月

目 录

前 言

第 1 篇 矫直理论

第 1 章 压力矫直机的矫直理论	1
第 1 节 塑性弯曲力矩的计算	1
第 2 节 矫直条件及弹复曲率的计算	5
第 2 章 辊式矫直机的矫直理论	8
第 1 节 辊式矫直机的矫直原理	8
第 2 节 作用在辊式矫直机辊子上的压力	11
第 3 节 矫直辊间板带的弯曲挠度	13
第 4 节 辊系压下调整量的计算和设定 ^[39]	16
第 5 节 变断面板材辊式矫直机的调整制度	18
第 6 节 辊式矫直机传动功率的计算	20
第 7 节 辊式钢板矫直机基本参数的确定	33
第 8 节 辊式型钢矫直机基本参数的确定	47
第 3 章 斜辊式矫直机的矫直理论	52
第 1 节 斜辊式棒料和钢管矫直机传动功率的计算	52
第 2 节 斜辊矫直机的辊型曲线	64
第 4 章 辊式拉弯矫直机的矫直理论	70
第 1 节 拉伸弯曲对塑性弯曲力矩和曲率及板形的影响	70
第 2 节 带张力时辊式矫直机垂直力的计算	73
第 3 节 辊式拉弯矫直机水平力的计算	75
第 4 节 胶辊拉弯矫直机力能参数的计算	77
第 5 节 拉弯过程延伸率的计算理论	79

第 2 篇 卷取理论

第 5 章 热带地下卷取机主要参数的计算理论	82
第 1 节 热带地下卷取机张力辊偏移角计算理论 ^[40]	82
第 2 节 热带地下卷取机助卷辊主要参数的计算理论 ^[41]	86

第 6 章 卷取机卷筒单位压力的计算理论	91
第 1 节 卷筒单位压力的弹性理论平面问题求解方法	91
第 2 节 钢卷径向压缩系数的确定	98
第 3 节 逐层迭代法计算卷取机卷筒单位压力	103
第 4 节 多项式拟合法计算径向压缩系数和卷筒单位压力	107
第 7 章 热带卷取机扇形板变形计算	110
第 1 节 热带卷筒温度场三维有限元模型的建立 ^[23]	110
第 2 节 1580 热轧卷筒扇形板变形有限元模型的建立	115
第 3 节 热带卷筒扇形板温度场计算	117
第 4 节 热带卷筒扇形板变形计算	122
第 5 节 热带卷筒扇形板热变形的模拟试验和工业试验	132
第 8 章 冷轧钢卷粘结成因及预防对策	135
第 1 节 影响钢卷粘结的因素	135
第 2 节 叠层板粘结及物性参数的模拟试验	138
第 3 节 解析法求解钢卷温度场	146
第 4 节 有限差分法求解钢卷内部应力	152
第 5 节 温度场及热应力的有限元法	160
第 6 节 预防粘结的对策与措施	163
参考文献	175

第1篇 矫直理论

第1章 压力矫直机的矫直理论

第1节 塑性弯曲力矩的计算

压力矫直机是矫直机最简单的型式（图 1-1），即钢材停留在两个支点上，靠上面压头动作进行矫直。矫直过程实质上是一个塑性弯曲过程。研究塑性弯曲时一般都不考虑切应力的影响，而认为是纯塑性弯曲。实验证明，材料力学中关于弹性弯曲的平面假设对塑性弯曲仍然适合，即杆件的横断面变形后仍是平面，故断面上各点的变形正比于该点至中性层的距离。在很多情况下切应力是很小的，因此，这种假设是允许的。

研究塑性弯曲时，都认为材料拉伸时的真实应力-变形曲线仍然是适用的。对各种材料的应力-变形曲线分析结果表明，应力-变形曲线可分为三个区域，并用三段直线来代替（图 1-2）。第一段对应于弹性变形，第二段对应于不很大的塑性变形，第三段对应于很大的塑性变形。

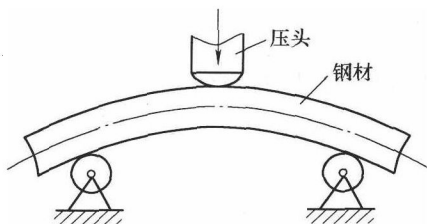


图 1-1 压力矫直机简图

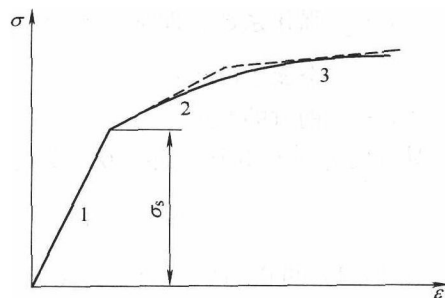


图 1-2 应力-变形曲线

一般矫直时，塑性弯曲程度不是很大，即对应于真实应力-变形曲线的第二段。在分析矫直过程时，可以认为应力-变形曲线是由两段直线组成的。

根据变形的平面假设和应力-变形曲线可以确定塑性弯曲时应力沿高度的分布（图 1-3），

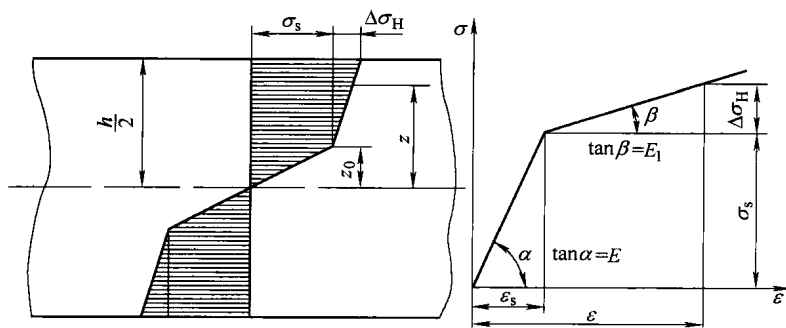


图 1-3 塑性弯曲力矩的计算

故塑性弯曲力矩为

$$M = 2 \int_0^{z_0} \sigma z dF + 2 \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_s z dF + 2 \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \Delta \sigma z dF$$

代入 $\sigma = \frac{z}{z_0} \sigma_s$, $\Delta \sigma = \Delta \sigma_H \frac{z - z_0}{\frac{h}{2} - z_0} = E_1 (\epsilon - \epsilon_s) \frac{z - z_0}{\frac{h}{2} - z_0}$, $\epsilon = \epsilon_s \frac{h}{2z_0} = \frac{\sigma_s}{E} \frac{h}{2z_0}$, 整理后

可得

$$M = \sigma_s \left\{ 2 \int_0^{z_0} \frac{z^2}{z_0} dF + 2 \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} z dF + 2\eta \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \left(\frac{z^2}{z_0} - z \right) dF \right\} \quad (1-1)$$

式中 z_0 ——开始产生塑性变形的金属层距中性层的距离；

σ_s ——屈服强度；

F ——钢材的断面积；

η ——强化系数，即强化模量 E_1 与弹性模量 E 的比值， $\eta = \frac{E_1}{E}$ ；

z ——金属层的坐标；

h ——钢材的厚度。

对宽度为 b 的矩形断面， $dF = b dz$ ，代入式 (1-1) 积分后可得

$$M = \sigma_s b \left[\left(\frac{h^2}{4} - \frac{z_0^2}{3} \right) (1 - \eta) + \frac{\eta h^3}{12 z_0} \right] \quad (1-2)$$

式 (1-2) 可以写成下面更为简化的形式，即

$$M = \left[\frac{1 - \eta}{2} (3 - k_0^2) + \frac{\eta}{k_0} \right] \sigma_s \frac{b h^2}{6} \quad (1-3)$$

式中 k_0 ——表示塑性变形深度的系数， $k_0 = \frac{2z_0}{h}$ 。

对其他断面的型钢，也可以计算出弯曲力矩的数值。

强化系数 η 的数值与钢种有关。对于冷状态的碳钢， $\eta = 0.01 \sim 0.03$ ；对于合

金钢, $\eta = 0.1 \sim 0.25$ 。因此, 从式 (1-3) 可以看出, 对于一般碳钢, 当塑性弯曲程度不大时, 即 k_0 的数值较大时, 不考虑材料强化所引起的误差是很小的。

矫直时, 一般 $k_0 > 0.2 \sim 0.3$, 故对于碳钢和一般低合金钢, 为了简化, 在研究矫直过程时一般都忽略了材料的强化, 认为材料是理想塑性的, 即令 $\eta = 0$ 。

理想塑性体弯曲应力沿高度的分布如图 1-4 所示。此时, 对矩形断面, 弯曲力矩的计算公式简化为

$$M = \sigma_s b \left(\frac{h^2}{4} - \frac{z_0^2}{3} \right) \quad (1-4)$$

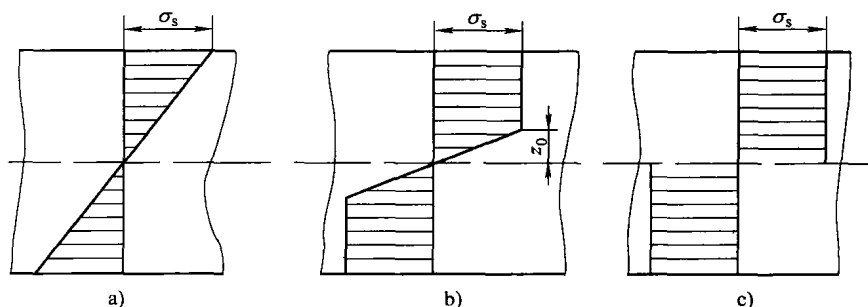


图 1-4 理想塑性体的弯曲应力图

a) 弹性弯曲极限值 b) 塑性弯曲 c) 塑性弯曲极限值

当 $z_0 = \frac{h}{2}$ 时, 弯曲力矩最小, 即

$$M = M_w = \sigma_s \frac{bh^2}{6} = \sigma_s W \quad (1-5)$$

式中 W ——弹性断面系数。

当 $z_0 = 0$ 时, 弯曲力矩最大, 即

$$M = M_s = \sigma_s \frac{bh^2}{4} = \sigma_s S \quad (1-6)$$

式中 S ——塑性断面系数。

对矩形断面, $S = 1.5W$, 对非矩形断面的钢材, $S : W$ 的数值列在表 1-1 中。

表 1-1 各种断面形状 $S : W$ 的数值

断面形状	$S : W$	断面形状	$S : W$
圆钢 	1.7	工字钢及槽钢 	1.2
方钢 (立) 	2.0	工字钢 (卧) 	1.8
角钢 	1.5	槽钢 (卧) 	1.55

实际的 z_0 的大小即弯曲力矩 M 的大小决定于矫直时钢材弯曲曲率的大小。矫直时弯曲力矩与弯曲曲率的关系可以根据下面的矫直原理进行确定。

若钢材的原始曲率为 $\frac{1}{r}$ (图 1-5), 要使它矫直, 必须使钢材向反方向弯曲至曲率 $\frac{1}{\rho}$ 。当载荷去除后, 在内力矩的作用下曲率 $\frac{1}{\rho}$ 完全恢复, 即钢材弹性恢复到完全平直的状态。

从原始曲率 $\frac{1}{r}$ 弯曲至反方向的弹复曲率 $\frac{1}{\rho}$ 时, 距中性层 z 的金属层的相对变形为

$$\varepsilon = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \approx \frac{l_2 - l_1}{l}$$

其中

$$l = r\varphi_1 = \rho\varphi_2$$

$$l_2 = (\rho + z)\varphi_2 = (\rho + z) \frac{l}{\rho}$$

$$l_1 = (r - z)\varphi_1 = (r - z) \frac{l}{r}$$

所以

$$\varepsilon = z \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho} \right) \quad (1-7)$$

断面从原来的 A_1A_1 反方向弯曲至 A_2A_2 的变形可用图 1-6 来表示。由于变形是平面的, 即 ε 正比于距中性层的距离 z , 故总变形沿高度按三角形分布。最外层的变形为

$$\varepsilon_H = \frac{h}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho} \right) \quad (1-8)$$

开始产生塑性变形的金属层距中性层的距离 z_0 由式 (1-9) 决定, 即

$$z_0 = \varepsilon_s \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho}} = \frac{\sigma_s}{E} \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho}} \quad (1-9)$$

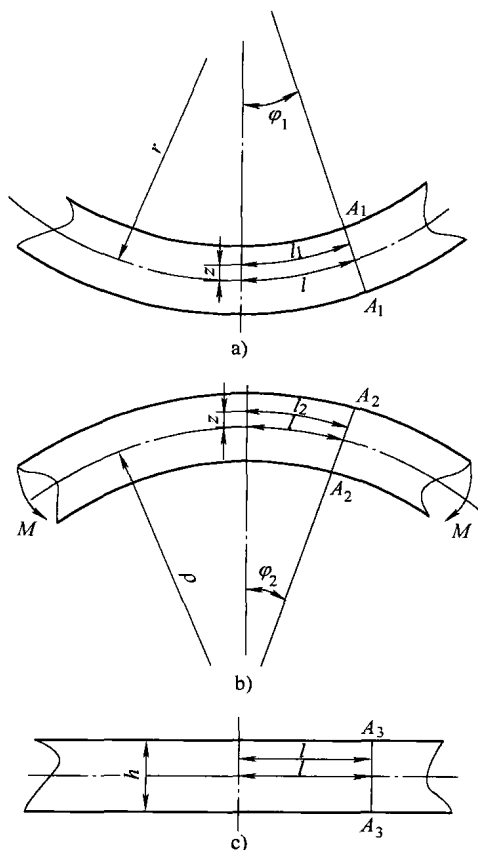


图 1-5 矫直时轧件的弯曲

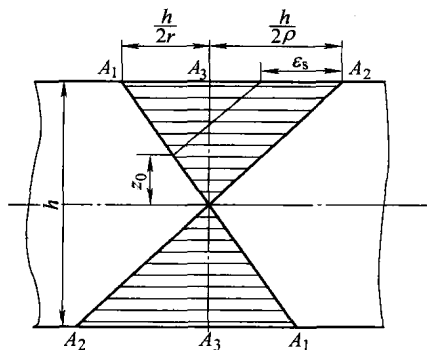


图 1-6 矫直时钢材的变形图

把 z_0 代入式 (1-4), 则得塑性弯曲力矩与弯曲曲率的关系如下:

$$M = \frac{M_w}{2} \left[3 - \frac{\left(\frac{1}{\rho_w} \right)^2}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho} \right)^2} \right] \quad (1-10)$$

式中 $\frac{1}{\rho_w}$ ——弹性弯曲曲率的极限值, $\frac{1}{\rho_w} =$

$$\frac{2\sigma_s}{hE}。$$

式 (1-10) 中 $\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho}$ 表示总弯曲曲率 $\frac{1}{R}$ 。

弯曲力矩 M 与总弯曲曲率的关系表示在图 1-7 中。图 1-7 中从 $O \sim A$ 为弹性弯曲, 超过 A 点以后为塑性弯曲。

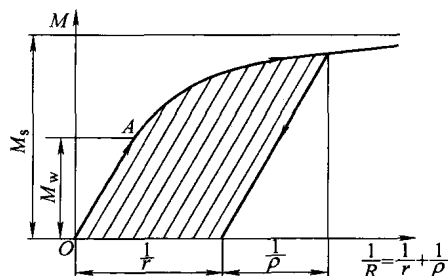


图 1-7 弯曲力矩与弯曲曲率的关系

第2节 矫直条件及弹复曲率的计算

在图 1-5 所表示的钢材完全恢复到平直状态的情况下, $\frac{1}{\rho}$ 既是弹复曲率, 也是反方向的曲率; $\frac{1}{r}$ 既是原始曲率, 也是残余曲率。因此, 必须正确选择反方向的曲率才能保证钢材恢复到完全平直的状态。反方向曲率过大, 则产生过度弯曲; 反方向曲率过小, 则产生弯曲不足。因此, 完全矫直的条件是: 反方向曲率正好等于弹复曲率。

所需要的弹复曲率的数值可以根据弹性恢复力矩应该等于塑性弯曲力矩的条件求得 (图 1-7)。弹性恢复力矩与弹复曲率 $\frac{1}{\rho}$ 成正比, 由材料力学的公式可得

$$M = \frac{EI}{\rho} \quad (1-11)$$

式中 I ——断面惯性矩。

塑性弯曲力矩由式 (1-10) 决定, 故得

$$M = \frac{EI}{\rho} = \frac{M_w}{2} \left[3 - \frac{\left(\frac{1}{\rho_w} \right)^2}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho} \right)^2} \right]$$

所以

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{2} \left[3 - \frac{\left(\frac{1}{\rho_w} \right)^2}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho} \right)^2} \right] \frac{1}{\rho_w} \quad (1-12)$$

当矫直原始弯曲曲率很小的轧件时 $\left(\frac{1}{r} \approx 0 \right)$, 弹复曲率最小, 即

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_w} = \frac{M_w}{EI} = \frac{2\sigma_s}{hE} \quad (1-13)$$

当矫直原始弯曲曲率很大的轧件时 $\left(\frac{1}{r} \gg \frac{1}{\rho_w} \right)$, 弹复曲率最大, 即

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_s} = \frac{M_s}{EI} = \frac{3\sigma_s}{hE} \quad (1-14)$$

故弹复曲率在 $\frac{1}{\rho_w} \sim \frac{1}{\rho_s}$ 中间变化。由式(1-12)

可以做出 $\frac{1}{\rho}$ 与 $\frac{1}{r}$ 的关系曲线 (图 1-8), 由此曲线就可以根据不同的原始曲率决定弹复曲率的数值。

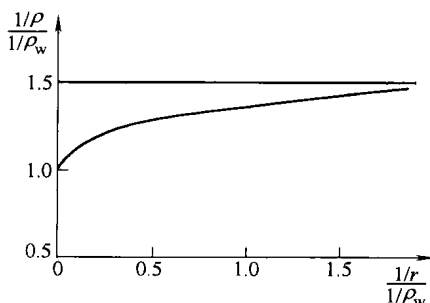


图 1-8 $\frac{1}{\rho}$ 与 $\frac{1}{r}$ 的关系曲线

考虑材料强化时, 相对弯曲力矩和相对弹复曲率按式 (1-15) 计算:

$$m = \frac{M}{M_w} = \frac{\rho}{\rho_w} = \left(1.5 - \frac{1}{2K^2} \right) (1 - \eta) + \eta K \quad (1-15)$$

式中 K ——总弯曲曲率的相对值, $K = \frac{1}{k_0} =$

$$\frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{\rho_w}} = \frac{\frac{1}{r} + \frac{1}{\rho}}{\frac{1}{\rho_w}}$$

m 值与 K 值的关系曲线表示在图 1-9 上, 说明在总弯曲曲率较大时, 强化系数对相对弯曲力矩和相对弹复曲率的影响是不能忽略的。

为了根据不同的弹复曲率来调整压力矫直机压头下降的行程, 还必须确定弹复曲率 $\frac{1}{\rho}$ 与钢材反方向弯曲挠度 (即弹复挠

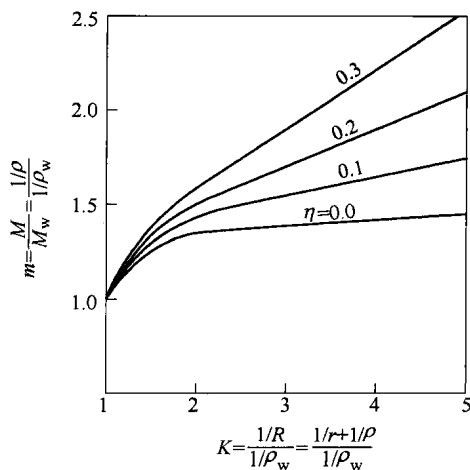


图 1-9 相对弯曲力矩即相对弹复曲率与总弯曲曲率相对值的关系

度)的关系,如图 1-10 所示,弹复挠度与压力 p 成正比,由材料力学的公式可得

$$f = \frac{pl^3}{48EI} \quad (1-16)$$

作用在压头上的压力 p 由式 (1-17) 决定,即

$$p = \frac{4M}{l} = \frac{4EI}{lp} \quad (1-17)$$

把 p 代入式 (1-16), 可得弹复挠度的计算公式为

$$f = \frac{l^2}{12\rho} \quad (1-18)$$

压力矫直机的缺点就在于只能进行局部矫直,不能使均匀弯曲的钢材的每个断面都连续地得到矫直,因此不能保证矫直质量,只能用于局部矫直和辅助矫直。

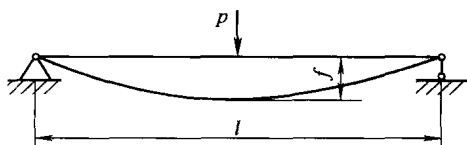


图 1-10 弹复挠度计算简图

第2章 辊式矫直机的矫直理论

第1节 辊式矫直机的矫直原理

要克服压力矫直机工作的不连续性，即不能使钢材的每个断面都连续地得到矫直及生产率低和需要人工操作等缺点，就必须采用辊式矫直机（图2-1）。

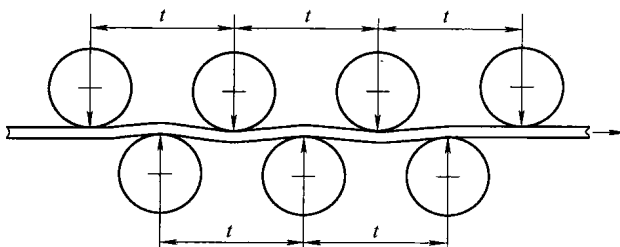


图 2-1 辊式矫直机简图

当钢材具有均匀的原始曲率时，用三个弯曲辊就可以很容易地把它完全矫直。如图2-2所示，弯曲辊连续旋转，当钢材通过弯曲辊时，每个断面都向反方向弯曲到相同的曲率。因此，产生均匀弯曲（即每个断面的原始曲率相同）的钢材经过三个弯曲辊以后就可以完全被矫直。

一般情况下，钢材的原始曲率沿长度常常是变化的，对这种不均匀弯曲的钢材用三个弯曲辊就不可能使它完全矫直。因此，辊式矫直机不是由三个弯曲辊组成的，而是由许多上下交错排列的辊子组成的。这样，具有任何原始曲率的钢材经过多次反复弯曲以后都可以得到矫直。

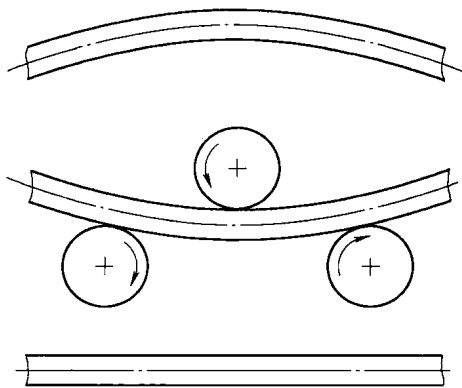


图 2-2 钢材在三个辊间的弯曲

为保证具有任何原始曲率的钢材都能得到矫直，辊式矫直机各个辊弯曲变形的大小和分布可以有不同的方案。在所有的各种方案中可分为两种基本的方案，即小变形矫直方案和大变形矫直方案。

1. 小变形矫直方案

小变形矫直方案的基本特点是：采用较小的弯曲变形来使钢材矫直，并且各个

辊的弯曲变形是逐渐减小的。

小变形矫直方案中矫直辊的调整根据不同的结构型式也有不同的方法。当每个辊允许单独调整时,这种方案的调方法表示在图 2-3 上。假设钢材的原始曲率在 $0 \sim \frac{1}{\pm r_0}$ 的范围内, $\pm$ 表示凹向下和凹向上。钢材的弯曲从第 2 辊开始,第 2 辊的弯曲变形这样调整,使得凹向下的曲率 $\frac{1}{r_0}$ 被完全矫直,即原始曲率为 $\frac{1}{r_0}$ 的断面经过第 2 辊时按箭头 m 的方向向反方向弯曲到曲率 $\frac{1}{\rho_2}$,当此断面走出第 2 辊时,曲率 $\frac{1}{\rho_2}$ 完全恢复。这样,具有原始曲率 $\frac{1}{r_0}$ 的断面经过第 2 辊时完全得到矫直,而 $0 \sim \frac{1}{r_0}$ 中间的曲率则由于过度弯曲都变成凹向上的曲率。原来凹向上的曲率此时没有变化,仍保持原来的弯曲方向。因此,钢材进入第 3 辊时,只剩下 $\frac{1}{-r_0} \sim 0$ 的原始曲率了。

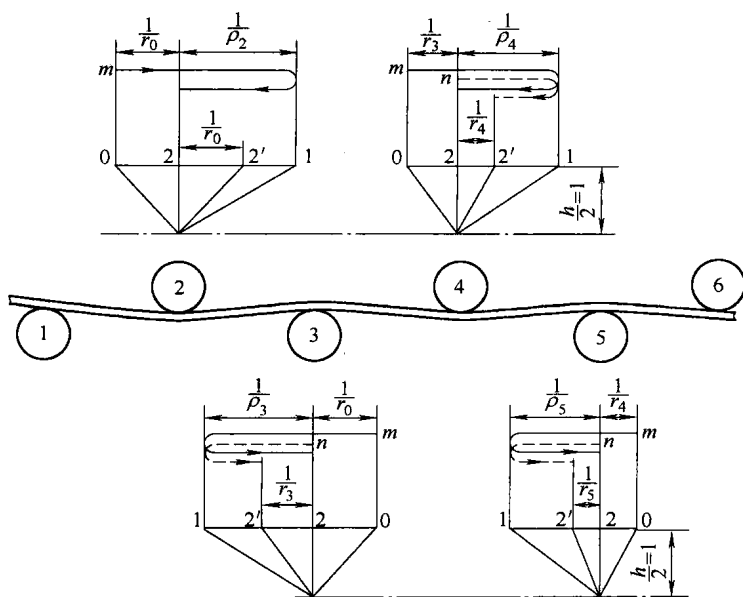


图 2-3 小变形矫直方案示意图

第 3 辊的调整原则与第 2 辊相同,即向反方向弯曲到曲率 $\frac{1}{\rho_3} = \frac{1}{\rho_2}$,使得具有曲率 $\frac{1}{-r_0}$ 的断面完全矫直,而 $\frac{1}{-r_0} \sim 0$ 中间的曲率则由于过度弯曲重新变成凹向下的曲率。原来平直的部分(即原始曲率为 0 的断面)得到的过弯曲最大,即按箭头 n

的方向重新被弯曲而得到残余曲率 $\frac{1}{r_3}$ 。因此, 经过第3辊以后, 就只剩下 $0 \sim \frac{1}{r_3}$ 的曲率了。

第4辊的调整原则与上述两个辊相似, 即向反方向弯曲到曲率 $\frac{1}{\rho_4}$, 使得 $\frac{1}{r_3}$ 的曲率完全矫直, 而曲率为0的部分又重新得到残余曲率 $-\frac{1}{r_4}$ 。以下其他各辊也照此规律进行调整。这样, 经过第*i*个辊以后, 残余曲率的范围就只剩下 $0 \sim \frac{1}{r_i}$ 了。

残余曲率 $\frac{1}{r_i}$ 是逐渐减小的, 因为弯曲程度越小, 残余曲率也就越小(图1-7)。

$\frac{1}{r_i}$ 虽然是逐渐减小的, 但不可能绝对消除, 因此, 可以得出以下结论:

1) 辊式矫直机不可能使具有不同的原始曲率的钢材绝对矫直, 即不可能没有任何一点残余曲率。

2) 增加矫直辊的数目, 即增加弯曲的次数, 就可以提高矫直的精度。

2. 大变形矫直方案

大变形矫直方案的主要特点是: 采用比小变形矫直方案更大的变形程度, 以提高矫直精度, 即减小残余曲率的数值。

大变形矫直方案中矫直辊的调整方法也是各不相同的。对矫直辊可以单独调整的矫直机, 这种方案的调整方法表示在图2-4上。与小变形方案不同, 第2辊不是按曲率 $\frac{1}{r_0}$ 被完全矫直的原则调整, 而是使具有曲率 $\frac{1}{r_0}$ 的部分也产生过度的弯曲, 即第2辊的反方向曲率都大于弹复曲率。此时, 原始曲率为 $\frac{1}{-r_0}$ 的部分也产生塑性弯曲(当 $\frac{1}{-r_0}$ 很大而反方向弯曲曲率 $\frac{1}{R_z}$ 不够大时, 则不产生塑性弯曲)。因此, 具有原始曲率为 $0 \sim \frac{1}{\pm r_0}$ 的钢材经过第2辊的弯曲后都弹性恢复到22'的范围内, 再经过第3辊时又从原来的22'重新向反方向弯曲并弹性恢复至33'的范围内。经过这样几次大变形以后, 再按小变形矫直方案的原则调整以下各辊的变形。图2-4表示的是只进行两次大变形的情况, 故第4辊的弯曲变形这样调整, 使得对应于位置3的曲率完全矫直。经过第4辊以后, 剩下的残余曲率就在44'的范围内了, 以后各辊的变形完全按小变形矫直方案的原则进行调整。

从图2-4中第四辊的变形可以看出, 残余曲率的范围44'的大小主要决定于大

变形的弹复曲率的差值 $33'$ 的大小。因此,若能减小弹复曲率的差值,就可以提高矫直的精度。

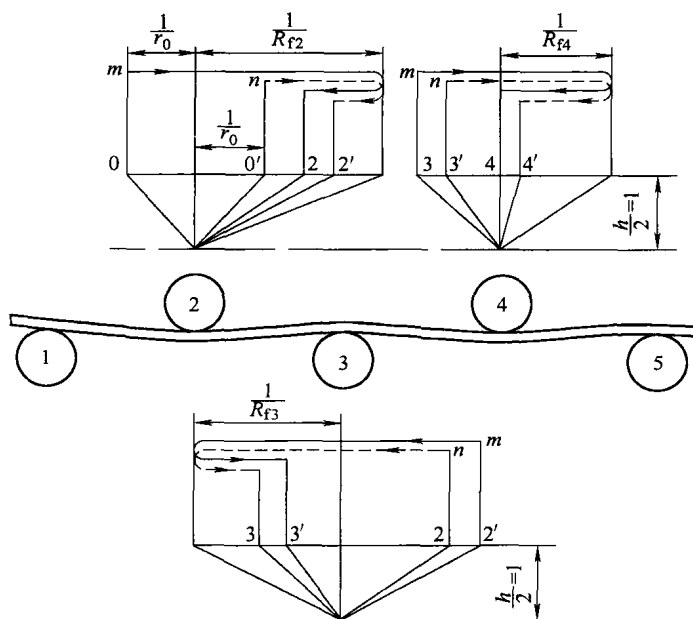


图 2-4 大变形矫直方案示意图

采用大变形可以大大减小弹复曲率的差值,这是因为总的弯曲变形与弹复变形不是线性关系的缘故 [见式 (1-12)]。因此,总弯曲曲率越大时,原始曲率的不均匀度对弹复曲率的不均匀度影响越小。此一原理可以更明显地用图 1-8 的曲线来解释,当采用大的弯曲变形时,即采用曲率 $\frac{1}{r}$ 很大时,曲线趋近于渐近线 $\frac{1}{\rho} : \frac{1}{\rho_w} = 1.5$, 即 $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_s}$ 。此时,虽然原始曲率的差别较大,但弹复曲率的差别很小,都接近于极限值 $\frac{1}{\rho_s}$, 故钢材弯曲后曲率的差值就大大减小。因此,越是接近于理想塑性体的材料 (如强化系数 η 很小的普通碳钢), 采用大变形矫直方案对提高矫直精度的效果就越好。

第2节 作用在辊式矫直机辊子上的压力

矫直过程中作用在辊式矫直机辊子上的压力可用下面方法确定,从左面开始对各自断面写出平衡条件 (图 2-5)

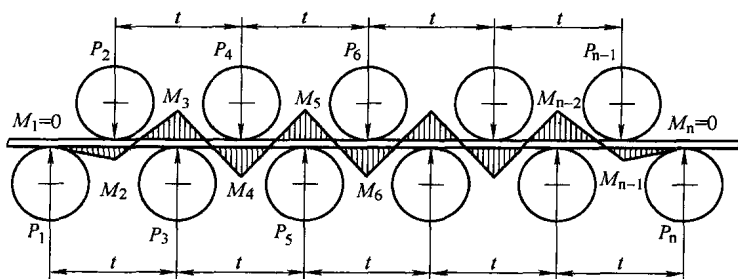


图 2-5 作用在辊式矫直机辊子上的压力

对第 2 辊:

$$P_1 \frac{t}{2} = M_2$$

所以

$$P_1 = \frac{2}{t} M_2$$

对第 3 辊:

$$P_1 t - P_2 \frac{t}{2} = -M_3$$

所以

$$P_2 = \frac{2}{t} (M_3 + 2M_2)$$

对第 4 辊:

$$P_1 \frac{3}{2} t - P_2 t + P_3 \frac{t}{2} = M_4$$

所以

$$P_3 = \frac{2}{t} (M_4 + 2M_3 + M_2)$$

对第 5 辊:

$$P_1 \cdot 2t - P_2 \frac{3}{2} t + P_3 t - P_4 \frac{t}{2} = -M_5$$

所以

$$P_4 = \frac{2}{t} (M_5 + 2M_4 + M_3)$$

可以证明下面规律, 即作用在第 i 个辊上的压力为

$$P_i = \frac{2}{t} (M_{i+1} + 2M_i + M_{i-1}) \quad (2-1)$$

作用在所有上下辊的总压力为