

# 静压延时矫直策略在头部翘曲板材矫直过程中的应用

## Application of Static Press Leveling for Front End Bending Plate During Roller Leveling Process

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 崔丽 张艳肖 田禾

**[摘要]** 随着厚规格、高强度品种钢的大量开发,头部翘曲成为中厚板生产过程中的一种常见缺陷,同时国产化的矫直机矫直能力不足,使得头部翘曲板材矫直过程困难。以某板卷厂开发厚规格、高强度品种钢过程中,频繁出现头部翘曲呈蛇形问题为依托,采用弹塑性差分的曲率积分方法,分析头部翘曲板材的传统矫直策略中残余曲率与矫直力的变化,讨论传统矫直策略和静压延时矫直策略的选择原则,研究静压延时矫直工艺。某板卷厂现场证明:静压延时矫直可以有效解决头部翘曲板材矫直问题,同时改善板材的板形。

**关键词:** 辊式矫直 静压延时矫直 头部翘曲 残余曲率

**[ABSTRACT]** Front end bending is a common defect for plate production with the massive development of new steel grades and thickness plates. At the same time the capacity of domestic lever is so low that it is difficult to level the front end plate. Based on the problem of some steel mill, the residual curvature and leveling force during tradition leveling strategies for the leveling of front end plate are analyzed by adopting the curvature integration by elastic-plastic differences to discuss the applicable condition of static press leveling and the leveling regulations are also investigated. In particular, the static press leveling is turned out to be a good way to level the front end bending plate by the mill.

**Keywords:** Roller leveling Static press leveling Front end bending Residual curvature

在板带热轧生产过程中,由于厚度方向温度不均和变形不均等原因,轧制过程中或轧制后板材头部会发生翘曲。严重头部翘曲不仅会造成轧制下一道次(或矫直过程)中咬入困难,甚至可能出现卡钢、缠辊等事故,从而影响生产效率。此外,头部翘曲影响产品的质量,在实际生产过程中会导致大量废品和不良板材的出现,增加了切头的几何废品<sup>[1-4]</sup>。头部翘曲一方面提高矫直过程的矫直力,另一方面消除头部翘曲需要增加矫直过程中的压下量<sup>[5-6]</sup>,同时国产化的矫直机矫直能力不足。因

此,头部翘曲严重的板材难以矫平现象广泛存在。特别是随着 TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技术的广泛应用,板材矫直温度降低、矫直强度级别升高等多种因素<sup>[7]</sup>,使得头部翘曲板材无法有效矫直,从而造成钢板头部切损偏大,严重影响效益。本文以某板卷厂开发厚规格、高强度品种钢过程中,频繁出现头部翘曲呈蛇形问题为依托,采用弹塑性差分的曲率积分方法<sup>[8-10]</sup>,分析头部翘曲板材的传统矫直策略中残余曲率与矫直力的变化,讨论传统矫直策略和静压延时矫直策略的选择原则,研究静压延时矫直工艺,解决该板卷厂头部翘曲板材矫直过程中不敢矫和矫不平问题。

### 1 静压延时矫直原理

静压延时矫直策略主要是基于解决像 X70 等头部翘曲严重的高强度钢板矫直不平和不能矫直的现象提出的。该方法首先经过抛钢把钢板头部波幅最大的部分置于矫直机的中央辊缝处,然后调整矫直速度为零,降低上矫直辊缝,当矫直力达到预设值时保持上辊缝不变,静压 6~7s,之后反复进行,最后采用传统矫直。静压延时矫直策略由于矫直过程的不连续性问题,矫直普通板材时效果不如传统矫直方式,但是由于静压延时矫直的矫直力比传统矫直小得多,因此,对于受矫直能力限制的强度钢板、头部翘曲板材,特别是受咬入限制的头部翘曲板材,矫直效果明显。

矫直过程中曲率的变化如图 1 所示,假设板材原始曲率半径为  $\rho_0$ ,反弯曲率半径为  $\rho_w$ ,这时总曲率等于初始曲率加上弯曲曲率,静压弹复后变直时,弯曲曲率等于弹复曲率,矫直过程中需要的压弯量可以根据矫直需要即小变形矫直原则来确定,即压弯挠度等于轧件的弹复挠度。希望一道次就能矫直,但是实际上往往达不到这种理想目标,而需要再次计算压弯挠度,再次进行压弯。遇到原始翘曲严重,曲率变化梯度不均的,反复静压的次数就要增加。另外精度要求越高,所需静压的次数越大。总之,按弹复挠度计算的压弯挠度是理论值,不一定能复合复杂的实际情况,但是它能保证每多静压一次所残留的挠度变小。经过几次静压后逼近于零。这样结果同残留曲率比函数是一致的,即公式(1)。每

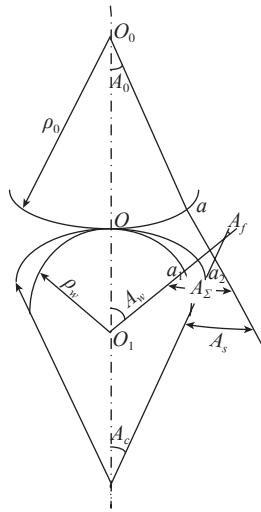


图1 矫直时的曲率变化  
Fig.1 Change of curvature during leveling

次静压都要矫直曲率比方程来确定弯曲曲率。

矩形板材的矫直曲率比方程式<sup>[11]</sup>如公式(2)所示,当相对初始曲率 \$C\_0\$ 已知时,可解出矫直所需的相对弯曲曲率 \$C\_w\$。

$$A_w - A_f = A_w - \bar{M} = 0 \quad (1)$$

$$C_w - \left( 1.5 - 0.5 \frac{1}{(C_w + C_0)^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中, \$A\_w\$ 是弯曲曲率, \$\text{mm}^{-1}\$; \$C\_w\$ 为相对弯曲曲率; \$A\_f\$ 是弹复曲率, \$\text{mm}^{-1}\$; \$C\_0\$ 是相对初始曲率; \$\bar{M}\$ 是塑弯比。

相对弯曲曲率为弯曲曲率与弹性极限曲率的比值,弹性极限曲率又称屈服曲率,可以表示为:

$$C_i = \frac{2 \times Y}{EH} \quad (3)$$

式中, \$C\_i\$ 为弹性极限曲率, \$\text{mm}^{-1}\$; \$Y\$ 材料曲率强度, MPa; \$E\$ 是杨氏模量, MPa; \$H\$ 是板材厚度, mm;

## 2 传统矫直策略分析

### 2.1 初始条件分析

#### (1) 基本数据。

本文主要为了解决某板卷厂在矫直头部翘曲的 X70 或者 Q460 等板材出现的问题。因此,以该厂的 11 辊热矫直机为研究对象,其基本数据如表 1 所示。

#### (2) 初始曲率计算。

中厚板矫直过程中,板材经过多次弹塑性弯曲后,不同大小、方向的初始曲率会趋近于某一单值曲率,最终当弹复和反弯曲率相等时,残余曲率为零。因此初始曲率采用单值曲率的假设,假设板材的形状是一以曲率半径 \$R\$ 为半径的圆弧。这样翘曲波幅 \$R\_v\$ 可以采用公式(4)计算,利用公式(5)计算初始曲率。

表1 矫直分析条件

厚度 /mm	宽度 /mm	屈服应力 /MPa	杨氏模量 /GPa	工作辊直径 /mm	工作辊辊距 /mm	最大矫直力 /kN
30	2520	500	190	220	230	16000

$$R_v = R - \sqrt{R^2 - L_v^2} \quad (4)$$

$$k_{in} = \frac{1}{R} = \frac{8R_v}{L_v^2 + 4R_v^2} \quad (5)$$

式中, \$K\_{in}\$ 为初始曲率, \$\text{mm}^{-1}\$; \$R\_v\$ 为不平波幅, mm; \$L\_v\$ 为不平波长, mm。

现场调研发现该板卷厂生产的板材头部弯曲情况如图 2 所示,距离头部 2m 左右的位置,钢板形状为波浪形分布,距离头部 400mm 左右的部分为翘起形状,而后 1.5m 左右就是一个拱形,翘曲波幅为 30~40mm。因此初始曲率值如表 2 所示。

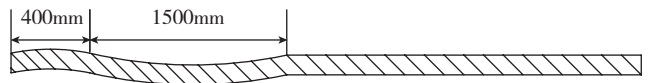


图2 板材头部翘曲示意图  
Fig. 2 Diagram of front end bending

表2 初始曲率计算

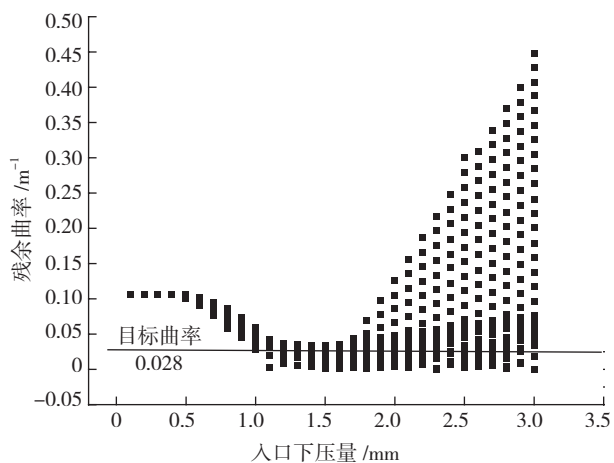
编号	翘曲波长 /mm	翘曲波幅 /mm	初始曲率 /m <sup>-1</sup>
1	1500	30	0.106
		40	0.142
2	400	20	0.990
		40	1.923

### 2.2 采用传统矫直策略矫直头部翘曲板材

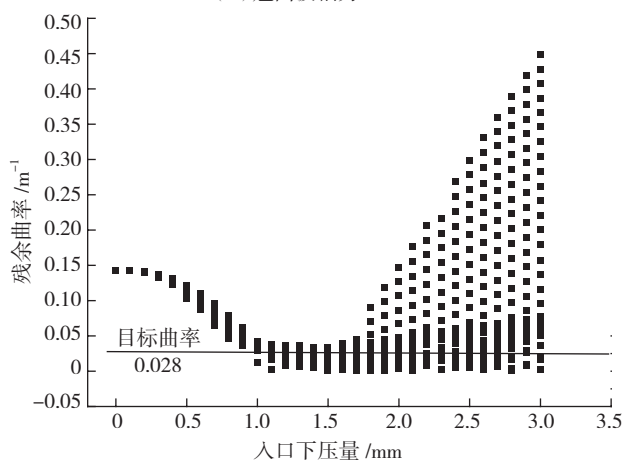
#### (1) 传统矫直压下量分配制度。

传统矫直过程中中厚板矫直是一个加载、卸载交变进行的弹塑性过程,矫直工艺的计算采用弹塑性差分的曲率积分模型。即对钢板厚度方向和两个接触点之间进行单元划分,利用不同数学模型反复迭,最后输出压下量分配制度、残余曲率与残余应力及矫直力等参数。采用弹塑性差分的曲率积分方法分析头部翘曲板材一道次矫直效果。矫直后不平度按 8mm 标准计算,使得残余曲率最小化的目标曲率为 \$0.0284\text{m}^{-1}\$。

图 3 为翘曲波长为 1500mm 的第二段部分矫直后残余曲率与入口压下量关系曲线,从曲线看,矫直过程中存在多种压下量分配制度使得残余曲率最小化,同时高入口压下量下,出口压下量的调整对残余曲率最小化至关重要。使得残余曲率最小化的入口压下量大于 1.0mm,只要入口压下量大于 1.0mm,调整出口压下量总能找到合适的压产的压下量分配制度使得残余曲率最



(a) 翘曲波幅为 30mm



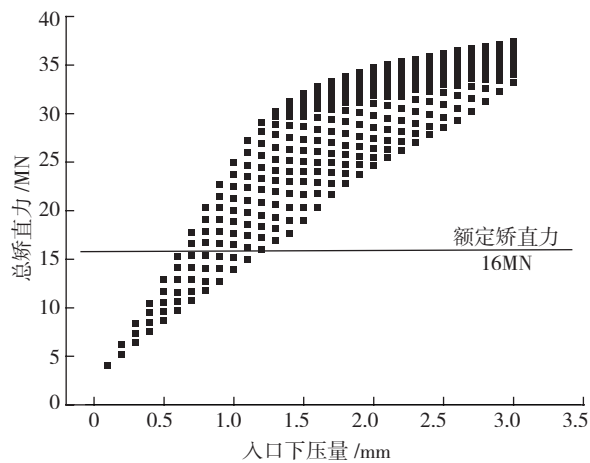
(b) 翘曲波幅为 40mm

图3 翘曲波长为1500mm板材残余曲率与入口压下量的关系

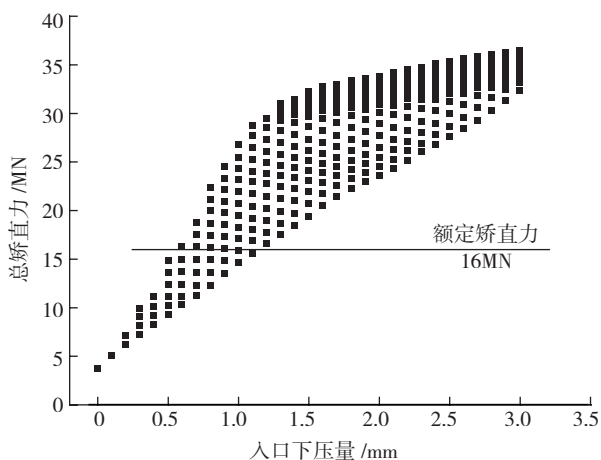
Fig.3 Relation between residual curvature and entry intermesh for 1500mm wave length plate

小化。因此,塑性变形率不能作为判断矫直效果的单一标准,应该在高的塑性变形率区间内匹配合适的出口压下量使得残余曲率最小化。翘曲波幅小的板材与翘曲较大的板材在初始翘曲消除后的变化过程相当,其区别在于压下量较小时,初始不平度小的板材矫后残余曲率小。可以推断,不同的翘曲波幅分布在一块板材上,入口压下量大于 1.0mm 将会形成单值曲率。

图 4 为翘曲波长为 1500mm 的第二段部分矫直后总矫直力与入口压下量关系曲线,随着入口压下量的增加,总矫直力增加。由于矫直机的矫直能力为 16MN,从矫直能力的角度考虑入口压下量应该小于 1.0mm。因此在额定矫直力内使得残余曲率最小化的压下量分配制度几乎不存在,即头部翘曲波长为 1500mm 的板材经过一道次矫直不能获得满意的矫直效果。但是残余曲率与入口压下量关系曲线显示,低入口压下量下调整出口压下量虽然不能使得残余曲率最小化,但能够降低残余曲率,改善板形,经过多道次矫直可能获得满意的板形。



(a) 翘曲度波幅为 30mm



(b) 翘曲度波幅为 40mm

图4 翘曲波长为1500mm板材总矫直力与入口压下量的关系

Fig.4 Relation between leveling force and entry intermesh for 1500mm wave length plate

如图 5 所示,翘曲波长为 400mm 的第一段部分,当波幅为 20mm 时板材任何压下量分配制度都能使得矫直力过载,即使是矫直能力 25MN 的矫直机也无法进行矫直。因此这类头部翘曲板材,可以通过多道次矫直改善第二段板形,但是为了防止超载第一段弯曲部分不能进行传统矫直。

### (2) 头部翘曲对传统矫直策略的影响。

头部翘曲严重的板材不仅会造成矫直过程的咬入困难,同样会增加矫直过程中的矫直力,如图 6 所示。总矫直力随着初始曲率的增加而增加,入口压下量越小,增加越明显。矫直能力为 16MN 的矫直机,当初始曲率大于  $0.4\text{m}^{-1}$  时,为了防止过载,不能进行传统矫直。

## 3 静压延时矫直的应用

利用静压延时矫直原理,表 2 中 2 号板材的静压矫直时残余曲率与入口压下量的关系曲线,如图 7 所示。采用静压矫直时入口压下量达到 2.5mm 左右时可以使

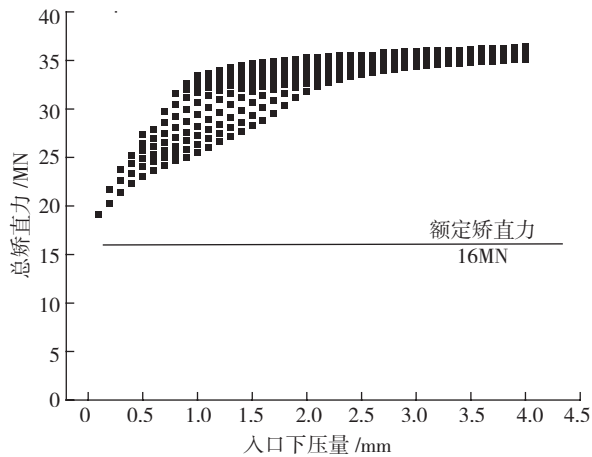


图5 翘曲波长为400mm板材总矫直力与入口下压量关系  
Fig.5 Relation between leveling force and entry intermesh for 400mm wave length plate

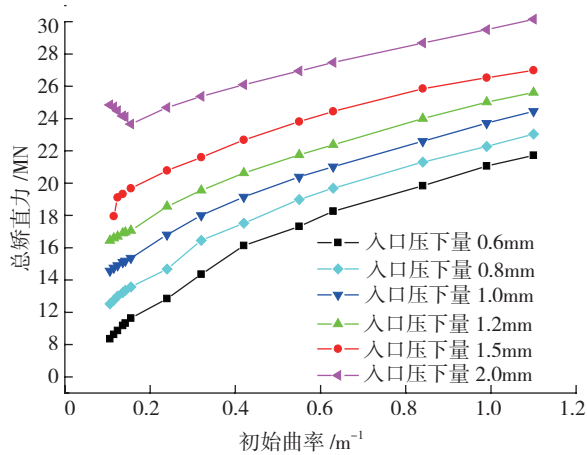


图6 总矫直力与初始曲率关系  
Fig.6 Relation between leveling force and initial curvature

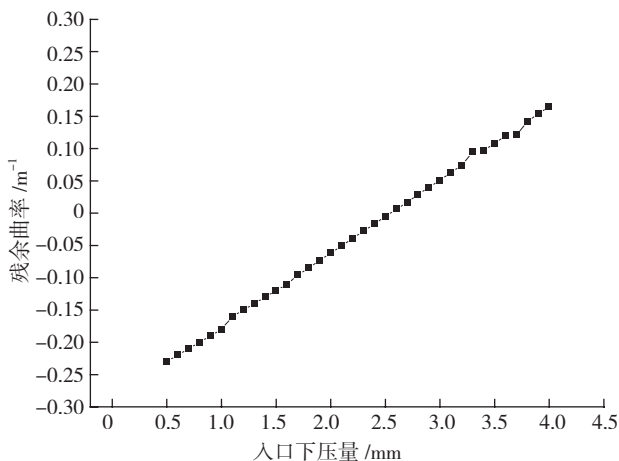


图7 静压延时矫直策略中入口下压量与残余曲率关系  
Fig.7 Relation between residual curvature and entry intermesh during static press leveling

得残余曲率最小化。

采用静压矫直策略,可以在额定矫直力范围内实现矫直过程中的大压下量,因此提高了矫直机的矫直能力。

采用静压延时矫直策略有效解决头部翘曲板材不能矫直的问题,同时矫直后第二段翘曲消除,板形良好,第一段翘曲减小,板形得到改善。虽然部分头部翘曲板材不能通过静压延时矫直获得满意的板形,但是头部切损减少,效益提高。

由于静压延时矫直的不连续性,静压后板子不同部分的反弯曲率不同,造成静压延时后板子曲率不同,有可能产生新的板形缺陷,因此静压延时时要与传统矫直同时使用。由于静压延时的压下量较大,静压延时要先抬起辊子,增大辊缝再施加矫直速度,否则会引引起断辊,该厂就出现由于操作工误操作引起的断辊。

#### 4 结论

(1) 矫直能力小的矫直机,头部翘曲波长为 1500mm 的板材经过一道次矫直不能获得满意的矫直效果,但是增加矫直道次可以改善板形。(2) 矫直能力为 16MN 的矫直机,当初始曲率大于  $0.4\text{m}^{-1}$  时,不能进行传统矫直。(3) 静压延时矫直策略可以有效地解决头部翘曲板材不能矫直问题,可以改善板形,减少头部切损,提高效率。

#### 参考文献

- [1] 孙蓟泉,张海滨,于成全. 热轧带钢头部翘曲原因分析. 钢铁研究学报,2006,18(7):30-34.
- [2] 胡贤磊,赵忠,刘相华,等. 中厚板头尾厚度超差原因分析. 钢铁,2007,42(4):50-52.
- [3] 王耀宇. 中厚板非堆成轧制头部弯曲的实验研究. 西安建筑科技大学学报,2008,40(2):290-292.
- [4] 王耀辉. 中厚板头部翘曲的有限元模拟. 中国新技术新产品,2009(4):95-96.
- [5] Kadota K, Maeda R. A method of analysis of curvature in leveling process. Journal of the JSTP, 1993, 34(388):481-486.
- [6] Doege E, Menz R, Huinink S. Analysis of the leveling process based upon an analytic forming model. Annals of the CIRP, 2002, 51(1):191-194.
- [7] 阿高松男,藤田将明. ローラレベラーでの板材矯正時の諸問. CAMP-ISIJ, 2006, 19(2):327-330.
- [8] 薛军安,崔丽,胡贤磊,等. 塑性变形率对辊式矫直板才的影响研究. 东北大学学报,2009(5):681-684.
- [9] 薛军安,崔丽,胡贤磊,等. 辊式矫直过程的接触倾角与曲率耦合分析. 中国冶金,2009(2):23-26.
- [10] 阿高松男,佐藤好一. ローラレベラによる矯正のメカニズム. CAMP-ISIJ, 2002, 15(5):1010.
- [11] 崔普. 矫直理论与参数计算. 北京:机械工业出版社, 1992.

(责编 深蓝)