

中厚板轧制头部弯曲研究现状浅析

庞玉华 刘长瑞 赵永团

(西安建筑科技大学, 西安 710055)

【摘要】 通过对国内外中厚板轧制生产、实验研究及理论模拟研究的对比分析, 指出了中厚板头部翘曲程度与变形程度、上下工作辊速比等因素的关系。目前研究成果不一致, 说明了有必要对提出的理论和技术方法深入研究, 对各种因素的影响进行定量实验、检测、数值解析, 建立模型, 以适应实际生产的需要。

【关键词】 中厚板轧制 头部翘曲 变形程度 辊速比

ANALYSIS OF THE RESEARCH STATUS FOR HEAD WARPING AND BENDING DURING PLATE ROLLING PROCESS

Pang Yuhua Liu Changrui Zhao Yongtuan

(Xi'an University of Architecture and Technology)

【Abstract】 The comparing and analyzing of the production experiment and theory stimulation both at home and abroad to the head warping and bending during plate rolling process were performed, it was described that the research conclusions at present were different about the relationship among the head warping and bending degree of plate and the pass reduction, and the ratio of rotate speed by upper roll vs lower roll. In order to build models to satisfy the requirements of production, the further study was needed on the published theory and technology methods, and the systematical tests, checking and stimulation about all kinds of effecting facts should be carried out.

【Key Words】 Plate Rolling Head Warping and Bending Pass Reduction Ratio of Rotate Speed

1 绪言

中厚板的头部向上或向下弯曲现象是一直存在且常见的质量缺陷, 也称为“板形翘曲”, 主要发生在轧制充满变形区的不稳定轧制过程。主要危害有: 因翘曲发生“勒辊”或钻入辊道下, 往往导致轧制过程不能继续, 严重时损坏设备, 经济损失巨大; 因平直度偏差大产生大量废品和不良品, 增加了切头几何废料^[1]; 使生产工艺过程控制复杂化, 往往难以达到理想状态。

由于轧制过程中动静态不对称变形条件的客观存在, 板形翘曲必然发生。探索影响板形翘曲的因素及机理, 对板材平直度实施控制是钢铁工业过去三十年的重要技术课题。国内外研究工作

主要集中在两个方面: 一是通过总结分析探索影响板形翘曲的因素及机理, 已研究的影响因素是板带上下表层温度差^[2]、轧件中心与轧辊中心不对称^[3]、轧辊辊速不同等; 二是依据轧制理论, 建立与工业生产相适应的理论模型, 对翘曲过程进行数值模拟^[4], 对控制技术进行开发研究。

对板形翘曲的表示目前还没有统一的方法, 有两种常见表示方法: (1) 波形表示法 (图 1), 在 $x-y$ 坐标系中, 板带材的翘曲度 $\lambda = \pm \frac{h}{l} \times 100\%$, $\lambda > 0$, 说明板带上翘, 反之为下翘 (式中 l — 翘曲弦长; h — 翘曲高度^[5]); (2) 曲率表示法, 翘曲弧段的曲率 ρ 。

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2004E119)

作者简介: 庞玉华, 女, 副教授, Email: pyhyyl@126.com

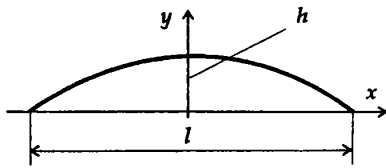
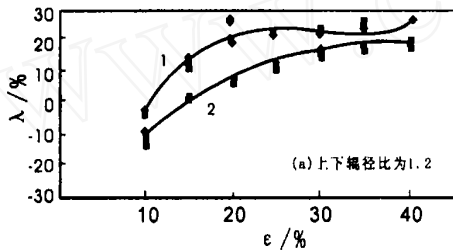


图1 翘曲示意图

2 翘曲产生的影响因素研究

2.1 变形区几何形状对翘曲的影响

变形区几何形状参数包括变形区长度 l 、轧辊直径 D 、来料板厚 H 及出口板厚 h 。这些参数不是独立存在的，它们相互关联，对翘曲的影响是综合性的。主要研究成果如下：



(1) 变形程度与翘曲度关系

变形程度对翘曲度的影响研究深入，目前已有铝、铅等材料轧制头部翘曲实验成果，图2显示部分实验曲线。图2(a)是上下辊径比为1.2的轧铝实验结果，其中曲线“1”对应轧件原始厚度2.36mm，曲线“2”对应轧件原始厚度1.35mm^[6]。图2(b)为某厂 $\phi 650\text{mm} \times 1500\text{mm}$ 单机架双卷取二重铝热轧机轧制坯料厚为35mm铝合金板材，轧制速度为0.7~0.9m/s时的结果^[7]。由图可知，翘曲度随变形程度的改变而变化，不仅会改变其大小，还会改变其翘曲方向。

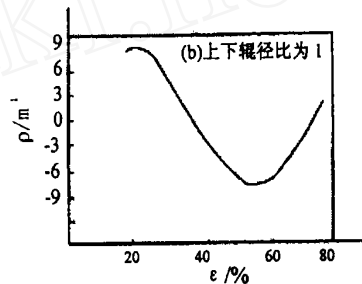
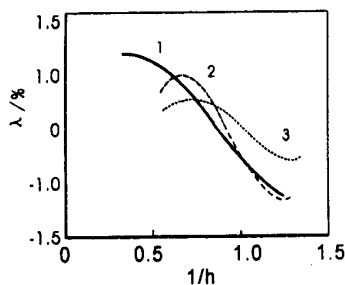


图2 变形程度(ε)与翘曲度关系

(2) 变形区形状系数(l/h)与翘曲度的关系^[8]

变形区形状系数定义为变形区长度与轧件平均厚度之比(l/h)。如图3所示，在上下辊直径比为 $\phi 130/\phi 134.5\text{mm} \times 220\text{mm}$ 轧机上，轧 $300 \times 60 \times 15\text{mm}^3$ 铅实验中，随变形区形状系数的变化，轧件翘曲方向和程度变化均表现为正(余)弦函数曲线变化态势。当 $l/h < 0.85 \sim 1.1$ 时，轧件出辊缝后上翘，当 $l/h > 0.85 \sim 1.1$ 时轧件出辊缝后下翘。当 l/h 值在0.85~1.1范围时，翘曲方向发生转折，翘曲程度减小($\eta = R/r \times 100\%$ ， R 表示轧辊半径， r 表示轧件翘曲弧段半径)。

图3 变形区形状系数(l/h)与翘曲度(λ)关系

注：1、2、3分别为导入角 13.5° 、 7.4° 、 0° 时的回归曲线

2.2 异步轧制对翘曲的影响

异步轧制是指由于上下辊旋转速度不同或轧辊直径不同等引起两个工作辊表面线速度不同时的轧制过程。

实际生产中的对称轧制过程，其上下辊直径也是有差异的，尽管差异很小。有实验表明：在其它条件相同时，下辊直径大，轧件上翘；反之下扣。图4为轧辊转速60r/min，导入角 $0 \sim 3.5^\circ$ ，后张力200N，对厚度为15mm的铅带实验结果^[9]。“1”为上下轧辊直径都为99.6mm时的实

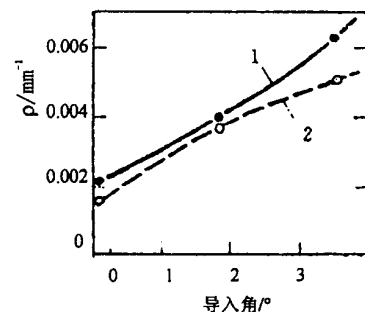


图4 轧辊直径及导入角对翘曲的影响

1- 上下辊直径相等；2- 上辊直径与下辊直径比为99.3/99.85

验结果,“2”为上下轧辊直径比为 99.3mm/99.85mm 时的实验结果。由图可知,上下辊直径相同时翘曲度大于辊径略有不同时,且翘曲程度差别较明显。

当上下轧辊直径差异较大时,有实验结果如图 2 (a) 所示^[6],该实验曲线的辊径比为 1.2 (上轧辊直径比下轧辊大),轧件下表面金属流动速度小于上表面,据此推断带材变形应发生下扣现象。但由图可知,轧出的轧件基本上上翘,且随着变形程度的增加上翘更明显。可见,翘曲受轧辊工作表面速度差的影响并非像传统认识的那样。

2.3 轧件导入角影响

板带轧制过程中,由于轧辊入口侧导辊高度与下辊面高度之间存在差异,或辊缝中心高度与轧件入口中心高度不一致都会引起轧件倾斜咬入现象发生,定义此倾斜角为导入角 θ (导辊上表面和下辊面上表面连线与轧制线夹角)。当轧辊偏向上辊侧时, θ 为正,反之为负。如图 3^[8] 所示,曲线“1”导入角为 13.5° ,曲线“2”导入角为 7.4° ,曲线“3”导入角为 0° 。由图可知,随着 θ 的增加,最大翘曲程度也增加,但在变形区形状系数相同时,导入角大时,翘曲程度可能小,如变形区形状参数为 0.7~0.85 时。图 4 也显示了导入角对翘曲度的明显作用。

2.4 板带上下表面温度影响

由于轧件在加热炉中吸(传)热条件以及出炉后运送过程中轧件上下表面散热条件的差异,会造成轧件上下表面存在温度差。一般情况下,轧件上层温度较下层温度高几十度,此时上表层变形阻力小于下表层。在其它条件相同的情况

下,轧件头部下扣,且温差相同时,随着变形程度的增加,下扣程度加剧;变形程度相同时,随着温差的增加,下扣更加严重;在相同压下率及温差时,轧件入口厚度越小,下扣曲率越大。但只见定性分析,未见实验研究结果公开发表。

从公开发表的各项研究成果来看,从原先认为某些因素(如温度、变形区形状等)是翘曲产生的主要原因,发展到现今认为翘曲的产生是相关参数的综合影响结果,并且从变形区金属受力状态、体积转移、变形深透程度、轧制动力学、运动学等方面分析了引起板形翘曲方向和程度变化的机理。

3 理论分析方法研究

为弥补实验研究的不足以及寻求控制板形翘曲的有效方法,有关翘曲形成的塑性成形理论研究以及各种数值模拟方法研究近来越来越活跃。下面是公开发表的主要研究成果。

3.1 温差及变形程度与翘曲度关系^[10]

根据轧制理论及相关数学基本理论,温差及压下率与翘曲度关系如下:

$$\rho = \frac{h}{4} \left(\frac{2v + \Delta v_1 + \Delta v_2}{\Delta v_1 - \Delta v_2} \right) \quad (1)$$

式中 h —出口板厚; v —某时间内上下轧轧出的对称部分金属体积; Δv_1 、 Δv_2 —分别为上下轧轧出的弧形区域内金属体积;

模拟条件为轧辊直径 1100mm,出炉钢坯上表面温度 1274°C ,下表面温度 1254°C 及 1224°C 等,压下率小于 20% 时的模拟结果如图 5 所示。如图所示,翘曲度与变形程度成线性关系,对比图 2,与实际不符;翘曲度随温差增加而增大,与实际相符。

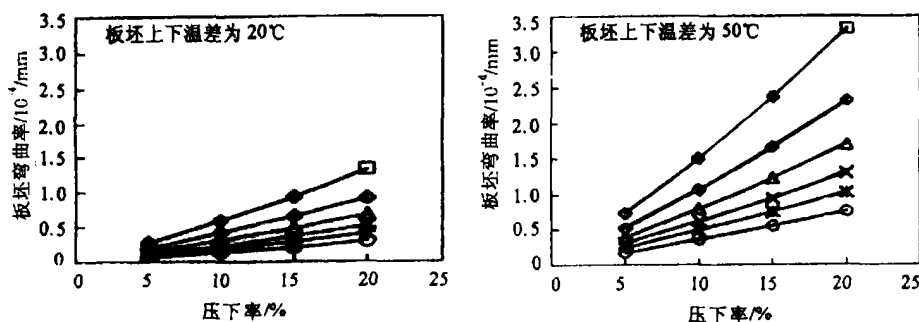


图 5 翘曲度与板坯温差及变形程度关系

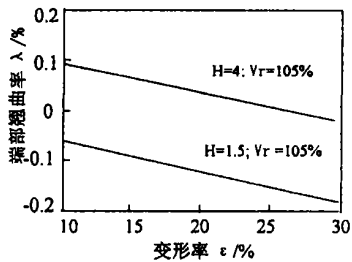
其中 h 为: $\bigcirc$ —220mm $\ast$ —190mm $\times$ —170mm $\triangle$ —150mm $\diamond$ —130mm $\bullet$ —110mm

3.2 辊速比及变形程度与翘曲度关系^[11]

在实验轧机上用铅做了正交试验，通过对 61 组铅试样的回归，得：

$$\lambda = 0.4559 + 0.061508H - 0.5328V_r - 0.005807\varepsilon \quad (2)$$

式中 H —轧件入口厚度； V_r —上下辊速比； ε —



道次压下率。

当设定 $H = 4\text{mm}$ 及 1.5mm ， $V_r = 1.05$ 时，结果见图 6 (a)；设定 $H = 4\text{mm}$ 及 1.5mm ， $\varepsilon = 10\%$ 时，结果见图 6 (b)。对比图 2 与图 6 (a)，可见回归结果与实验结果差异很大；由图 6 (b) 可知辊速比与翘曲度的关系为线性关系。

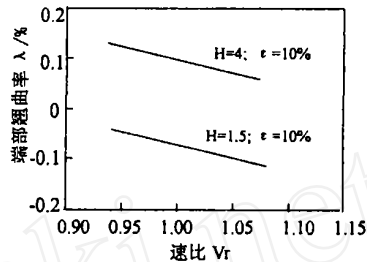


图 6 变形程度及辊速比与翘曲度关系

(a) 变形程度与翘曲度关系；(b) 辊速比与翘曲度关系

3.3 辊速比与翘曲度关系^[11]

对 41 组铅试样回归，得： $\lambda = 3.164706 - 5.650022V_r + 2.42045V_r^2$ (3)

该公式回归结果为翘曲度与辊速比成二次曲线关系，其精度高于公式 (2)。计算结果见图 7。

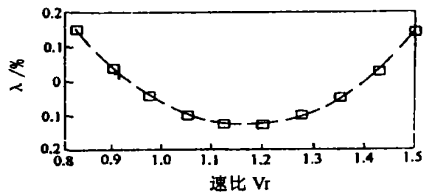


图 7 辊速比与翘曲度关系

3.4 神经网络模型模拟结果^[12]

用 3 层 BP 网，以翘曲量 C 为“0”作为训练目标 (C 是用轧件头部弯曲高度，以厘米为单位，向上弯为正，向下弯为负)，对 3000mm 四辊精轧机轧制 Q235 过程进行了模拟计算。图 8 表示轧出厚度为 20mm，温度为 960℃，上下辊径比为 0.998，轧制速度为 2m/s 时的情况。从模拟结果看，变形程度及辊速比与翘曲度关系复杂。

3.5 有限元模拟结果^[13]

根据塑性成形理论及弹塑性有限元原理，对厚度分别为 227mm、66mm 及 38mm 的轧件，在辊径为 600mm、轧件平均温度为 1180℃的条件下

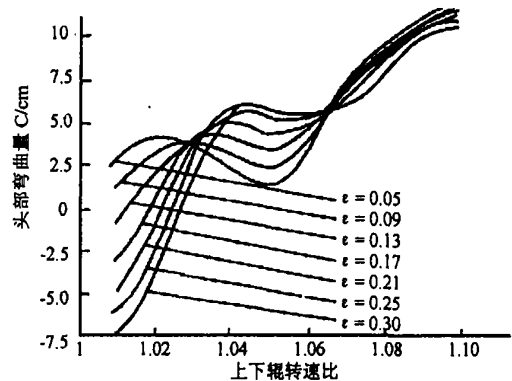


图 8 翘曲度与变形程度及辊速比关系

进行了模拟计算，结果如图 9 所示。翘曲度与温差、变形程度及辊速比都不是线性关系，且与变形程度及辊速比的关系复杂。

对比图 2 与图 6、图 7、图 8、图 9 等可知：翘曲度与变形程度、速比等的关系，各种理论分析方法所得结果与实验结果并不完全一致，各种理论方法研究成果之间也存在不同，说明该领域研究还有很多工作需进一步完成。能够正确提出对板形翘曲方向和程度的预报，可以改善或克服目前控制方法存在的问题。

4 总结

由于轧制过程是一个复杂的物理过程，影响因素多，各因素之间又互相影响。因此，有必要对提出的理论和技术方法深入研究，对各种因素的影响进行定量实验、检测、迭加、数值解析，建立模型，以适应实际生产的需要。

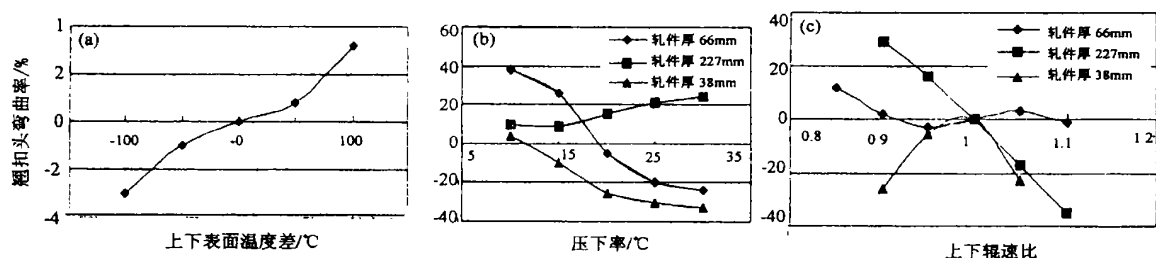


图9 有限元模拟结果

(a) 与温差关系; (b) 与变形程度关系; (c) 与辊速比关系

参考文献

- [1] 王伏生. 热连轧带钢带坯头部上翘下弯的预防措施 [J]. 轧钢. 2001, (60): 59
- [2] 吉井 ほか. 厚板圧延における先端反りにおよぼす影響因子の解析と制御技術の検討 [J]. 鉄と鋼. 1999, 85 (8): 29~34
- [3] 杨竞等. 轧件头部下弯的成因分析 [J]. 北京科技大学学报. 1997, (增刊): 97
- [4] Q. Xu, P. Hartly, I. Pillinger. Finite element investigation of curvature in the roll platen forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology. 1996, (60): 103~108
- [5] J. Jeswiet, P. G. Greene. Experimental measurement of curl in rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, (84): 202~209
- [6] 胡衍生等. 中厚板轧制头部弯曲机理的探讨 [J]. 钢铁. 2003, (6): 28
- [7] 姜远军等. 热轧时铝板带头部产生翘曲原因分析及预防 [J]. 轻合金加工技术. 2001, (9): 18
- [8] 刘长瑞等. 异径辊轧制过程综合参数对轧件头部翘曲的影响研究 [C]. 2005 全国第十三届轻加工学术交流会论文集.
- [9] B. A. Hrnovab 等. 使用不同直径工作辊热轧厚板 [J]. 国外钢铁. 1993, (12): 60
- [10] 闫晓强等. 中板轧制过程板坯弯曲生成与印制之三 [J]. 北京科技大学学报. 2001, (1): 75
- [11] 宋耀华等. 预防中厚板轧制头部下扣途径探讨 [J]. 轧钢. 2001, (1): 18
- [12] 程晓茹等. 中厚板轧制轧件头部弯曲模拟计算 [J]. 武汉科技大学学报. 2001, (3): 24
- [13] 李亮等. 非对称板带热轧头部翘曲的分析与有限元模拟 [J]. 冶金设备. 2003, (2): 4

收修改稿日期: 2006-01-09

信息

2005 年中国有七家钢铁公司产量超千万吨

2005 年底, 济南钢铁公司表示, 该厂从 2005 年全年生产钢已经超过 1000 万 t, 从而使其成为中国第 7 个年产量超过 1000 万 t 的钢厂。就在 2004 年, 济南钢铁公司的产量还仅为 690 万 t, 在中国的钢厂中排名第 9 位。

2005 年, 由于增加产能或采用并购手段, 目前已经有新的 5 家钢铁公司的产量超过 1000 万 t, 而 2004 年, 只有宝钢 (2410 万 t) 和鞍钢 (1190 万 t) 的产量超过 1000 万 t。

除济钢外, 其它 4 家产量超过 1000 万 t 的钢

铁公司是武钢、首钢、唐钢、江苏沙钢。这些公司全年的产量数据要晚些时候才能公布。

在 2004 年排名前 10 位的中国钢铁公司中, 只有马鞍山钢铁公司、邯郸钢铁公司、华菱钢铁公司的钢产量 2005 年没有达到 1000 万 t。

据马鞍山钢铁公司的一名官员表示, 该公司 2005 年的产量将在 2004 年的基础上增加 170 万 t, 达到 970 万 t。2004 年, 马鞍山钢铁公司的钢产量在中国的钢铁公司中排名第 5。

小杜 译自 MB, 2005 年 12 月 29 日消息