

· 设计与研究 ·

热轧板带板形检测发展分析^①

张兵^② 王快社 王训宏 梁彦安 沈洋
(西安建筑科技大学 西安 710055)

摘要 分析了国内外热轧板带的板形检测技术及几种板形检测方法的发展应用状况,并就热轧板带产品的发展及要求展望了未来板形检测的发展方向。

关键词 热轧板带 板形检测 发展趋势

中图分类号 TG333.71 **文献标识码** A

Development of Plate Shape Measurement of Hot Rolling Sheet Strip

Zhang Bing Wang Kuaishe Wang Xunhong Liang Yanan Shen Yang
(Xi'an University of Architecture and Technology)

ABSTRACT The hot rolling sheet strip Plate shape measurement technology and the application of that at home and broad were discussed in this article. The future developing trend of the hot rolling sheet strip Plate shape measurement was analyzed by examining the development and requirement of hot rolling sheet strip.

KEYWORDS Hot rolling sheet strip Plate shape measurement Developing trend

随着薄板坯连铸连轧技术的飞速发展,热轧板带产品规格愈来愈薄,且有朝着更薄规格方向发展的趋势。在汽车制造、家用电器、集装箱、涂层板、镀锌板和建筑工业上,热轧薄带钢和超薄带钢替代传统的冷轧带钢,已经得到了广泛的推广应用,市场发展前景广阔。目前,热轧板带产品的规格已达到 0.8mm~1.2mm,未来有可能生产出厚度为 0.6mm~0.8mm 的特薄规格的热轧带钢^[1-3]。板形是热轧薄板轧制过程中的一个重要控制指标,直接影响和决定产品的最终质量,因此,热轧板带板形检测技术在板带轧制生产过程中占据非常重要的地位^[4-8]。

关于板形检测的研究始于上世纪六十年代,几乎所有能够反映板形质量的物理量都被尝试用于板形检测方法的研究。按带钢和板形检测

装置的关系可将其划分为两类:与带钢直接接触的板形检测装置为接触式;不与带钢接触的为非接触式板形检测装置。冷轧带钢一般在大张力下轧制,温度较低,生产环境好,通常采用接触式测量装置,典型的有瑞典 ABB 公司的分段辊式和英国 DAVY 公司的空气轴承式板形检测装置。但是,由于热轧带钢与冷轧带钢的生产工艺和环境不同,一般在微张力下轧制,带钢的振动、漂浮、横向移动和高温对接触式板形检测方法产生的干扰较大,而通常采用非接触式检测装置测量板形^[9-12]。着重分析国内外热轧板带非接触式板形检测技术的发展。

1 板形检测装置

1.1 非接触式感应传感器板形检测装置^[13]

该检测装置预先将带钢板形用正弦波形近

① 陕西省自然科学基金项目(项目编号:2001C32),西安建筑科技大学材料加工工程学科发展规划资助项目

② 作者简介:张兵,男,1969 年出生,高级工程师,硕士研究生,主要从事材料加工工程方向的研究工作

似,然后通过对来自传感器的连续性信号处理来测量传感器和钢带之间距离,从而输出钢带的平直度。日本神户特钢成功的应用了这种板形检测装置,板形检测效果良好。

这种板形检测装置有若干个非接触式感应传感器,如图 1 所示,分成平行的两排,沿带钢横向排列。纵向相邻的一对传感器测量通过这些传感器的该段带钢的平直度。

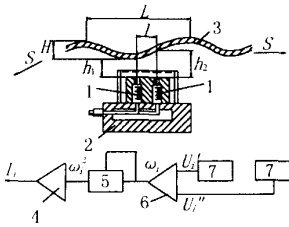


图 1 非接触式感应传感器板形检测装置

1——空气间隙传感器;2——支撑;3——带钢;
4——技术放大器;5——倍增器;6——差动放
大器;7——传感器;S——带钢;H——波高;
 h_i ——带钢与对应传感器之间的距离; $(i = 1,$
 $2)$; L ——波长; l ——纵向两排传感器之间的
距离; U_i', U_i'' ——第 i 对传感器输出的信号;
 ω_i ——带钢的相对延伸差; I_i ——板形 I 单位。

1.2 C. R. M. 的光学式热轧板形检测装置^[14]

比利时冶金研究中心研制的光学式热轧板形检测装置,它的测量对象是带钢的波形。测量原理如图 2 所示,带钢由右向左运动。图 2a) 所示为带钢平直的情况;而图 2b) 是发生边波的情况,这时带钢中部仍保持平直,在测量平面内周期性的测量带钢在基准面—辊道平面以上的高度。这样可在带钢中心或边部分别测得在时刻 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ 一系列高度值 $y_0, y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$, 如图 2c)。与这些高度值相对应,可以求出带钢纵向纤维的长度:

$$L_j = \sum [(y_i - y_{i-1})^2 + v_i^2 (t_i - t_{i-1})^2]^{1/2} \quad (1)$$

$(i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$

式中 v_i ——在测取 y_i 的时刻,带钢的运动速度,它一般取输出辊道的线速度;
 $t_i - t_{i-1}$ ——相邻两次测量中的时间间隔;
 n ——在限定时间内的测量次数。

因此,翘曲度 ρ 应为:

$$\rho = \Delta L / L \quad (2)$$

式中 ΔL ——两纤维之间的长度差,即 $\Delta L = L_j$

$-L_j$;

L ——被测钢带平直时的纤维长度值。

1.3 IRSID 激光板形检测装置^[15]

法国钢铁研究院 (IRSID) 研制了一种利用平移图象法的传感器,进行带钢平直度的在线测量。这个传感器被称为“激光板形仪”。该方法是测量带钢因浪形而上下摆动的位移量,而得到对应的平直度参数。由于这种板形测量方法简单,响应速度快,在线数据容易实现,现已广泛应用于热轧板带板形测量领域。

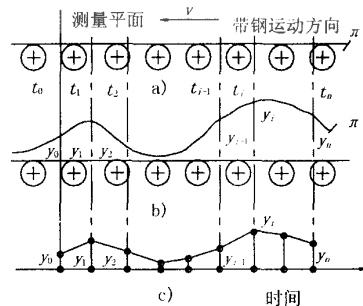


图 2 距离测量原理

a)——钢带平直;b)——钢带发生边波;c)——测量高度分布

激光测位移系统由激光光源 (LD) 和接收器 (PSD 或 CCD) 两部分组成,如图 3 所示。激光器 LD 发出的光经透镜 L_1 会聚照射在被测带钢表面的点 O ,其散射光由透镜 L_2 接收会聚到线性光电元件 (CCD) 上的点 O' , O 与 O' 点共轭,当被测带钢表面相对激光器 LD 发生位移 x ,而使物光点偏离零点 O ,像光点也产生位移 x' 而偏离光电元件的零点 (O'),由几何关系可推得:

$$x = ax' / (b \sin \beta + x' \cos \beta) \quad (3)$$

再通过信号转换装置可得到板带材的平直度信息。

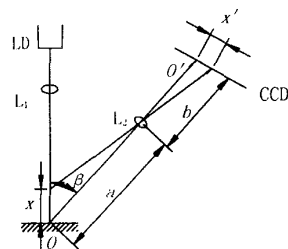


图 3 IRSID 激光板形仪原理

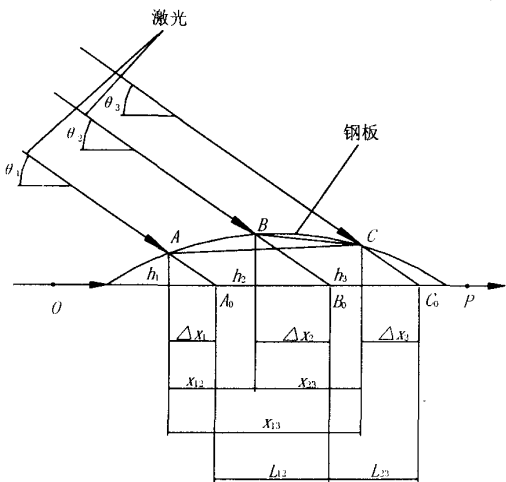


图 4 激光截面法测量原理图

1.4 利用光截面法的平直度检测装置^[16]

该装置由日本住友金属公司研制,用于测量热轧板出口处的带钢平直度,原理如图 4 所示。处于同一平面内的三束激光倾斜照射在被测带钢表面,形成沿带钢运动方向分布的三个光斑,沿带钢运动方向相邻两光斑间距为 300 ~ 400mm。当带钢因板形缺陷产生浪形时,光斑相对基准位置 A_0 、 B_0 、 C_0 发生位置移动至 A 、 B 、 C , A_0 、 B_0 、 C_0 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 L_{12} 、 L_{23} 可通过标定过程知道, Δx_1 、 Δx_2 、 Δx_3 可通过设置在带钢上方的摄像机测量,从而可依下列方程组计算 AB 、 BC 和 AC ,并直接计算出相对延伸差(平直度)。

$$h_1 = \Delta x_1 \tan \theta_1$$

$$x_{12} = L_{12} + \Delta x_1 - \Delta x_2$$

$$\overline{A} = [x_{12}^2 + (h_2 - h_1)^2]^{1/2}$$

$$h_2 = \Delta x_2 \tan \theta_2$$

$$x_{23} = L_{23} + \Delta x_2 - \Delta x_3$$

$$\overline{B} = [x_{23}^2 + (h_3 - h_2)^2]^{1/2}$$

$$h_3 = \Delta x_3 \tan \theta_3$$

$$x_{13} = x_{12} + x_{23}$$

$$\overline{AC} = [x_{13}^2 + (h_3 - h_1)^2]^{1/2}$$

通常相对延伸差 ε_0 可按下式计算:

$$\varepsilon_0 = \frac{\overline{op} \cdot \overline{op}}{\overline{op}} \times 10^5 \quad (4)$$

考虑到实际需要及测量方便,常以近似值 ε 来代替 ε_0 :

$$\varepsilon = \frac{\overline{AB} + \overline{BC} - \overline{AC}}{\overline{AC}} \times 10^5 \quad (5)$$

1.5 激光莫尔法^[16]

激光莫尔法测量原理是利用同级次的莫尔条纹代表钢板在相同高度的位移,如图 5 所示。在被测带钢上方设置一格栅 G ,距格栅高 L 处设置点光源 S ,这时被测带钢上会留下格栅的影像。若在与点光源 S 同水平高度距离为 d 的 T 点,通过格栅 G 观察钢板变形后的格栅影响,就可观察到由变形格栅与格栅的空间位置周期变化而产生的莫尔条纹,观察到的这些条纹的级次依次为 $1, 2, \dots, N$ 。

格栅由耐热材料制成,宽 2m,长 1m,节距 P 为 1 ~ 1.5mm,直线型。格栅置于被测带钢上方 1.2m 处。为了使亮条纹表示距格栅的等高条件成立,点光源 S 与观察点 T 距格栅相等高度是必要的。若 z_N 表示被测带钢上亮条纹位置距格栅的距离,则在被测带钢上的第 N 次亮条纹用下式表示:

$$z_N = N \cdot L / (d/p - N) \quad (6)$$

由上式可知,两亮纹间隔 $\Delta z_N = (z_N - z_{N-1})$ 随 N 变化,当测量范围不太大时, Δz_N 可视为不变。光源是脉冲发光式 YAG 激光器,脉冲频率 10Hz,每次发光时间为 20ns,发光能量最大功率 14kW/P(脉冲)。激光束经扩束后照射耐热(1000℃ 以上)格栅,产生的莫尔条纹是由带滤光片的电视摄像机拍摄,经录像机存储,再由计算机作数据处理,监视器便于在线观察莫尔条纹,从而得到板形的信息。

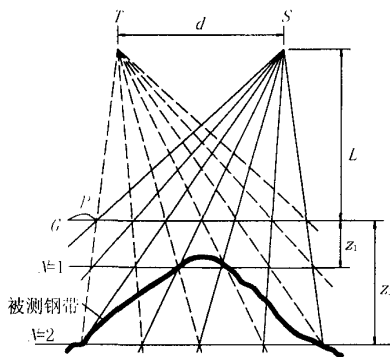


图 5 激光莫尔法测量原理图

1.6 多束激光板形测量装置^[17]

多束激光板形检测装置综合了激光位移法和激光截面法的优点,测量系统结构如图 6 所示。该系统由激光光源、摄像装置、数据处理系统组

成。21 支半导体激光器布置成 7×3 矩阵,21 束相互平行的激光束倾斜照射在被测带钢表面,并在被测带钢表面发生漫反射而留下 21 个激光光斑,然后由安装在对应带钢被测段的 CCD 摄像机摄取含有带钢板形信息的光斑图像,经 I/O 接口进入高速图像处理系统作二值化处理,剔除噪声,窗口采集和光斑中心位置,再由计算机计算相对延伸率,在监视器上显示被测带钢的板形实际情况。

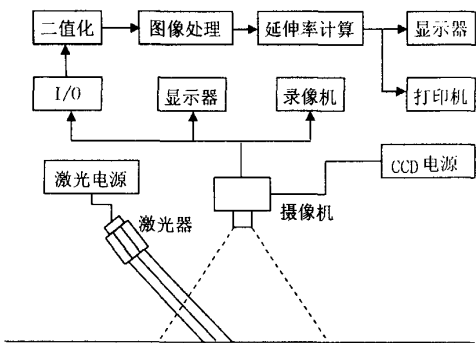


图 6 多束激光板形仪测量系统

2 板形测量方法的比较

目前,以上几种板形测量技术在国内外热轧带钢都有实际应用,下面分析它们的优缺点:

非接触式感应传感器板形检测装置是通过

感应传感器来测量带钢与基准面位移,以此来推算带钢的翘曲度,从而得到带钢板形信息。由于热轧时钢带温度高,环境恶劣,对传感器精度有一定的影响,易造成测量误差。并且该传感器结构复杂,维护成本高,不适用于轧制温度在 1000°C 左右的热轧钢带在线检测。

C. R. M. 光学式板形检测装置、IRSID 激光板形检测装置的检测原理都是用激光三角法测位移。由激光位移传感器测量带钢因存在浪形而上下跳动的位移量,推算钢带高度方向不同点的纵向纤维长度,从而得到板形信息。由于这种测量方法响应速度快,仪表结构简单,容易实现在线数据处理,因此被广泛应用于板形测量领域。该方法的不足之处在于相对延伸差的计算需要知道钢带的速度,且因钢带振动容易造成测量误差。

激光莫尔法在被测带钢温度高于 1000°C 时,仍可获得清晰的莫尔条纹图像,从而及时测量带钢表面的真实形状,得到板形信息。此方法的优点是可以测量运动中带钢的真实形状;不足是大型格栅的制造安装维护困难,数字图像处理工作量大,难于在线实时计算测量结果和用于在线实时板形控制。

表 1 几种板形检测方法比较

技术项目	测 量 方 法				
	非接触式感应传感器	激光三角法	激光光截面法	激光莫尔法	多束激光法
被测带钢温度	$<600^{\circ}\text{C}$	$<1000^{\circ}\text{C}$	$<1000^{\circ}\text{C}$	1000°C 左右	$<1000^{\circ}\text{C}$
测量带钢类型及规格	各种带钢,带宽 $900 \sim 2000\text{mm}$	各种带钢,带宽 $<2000\text{mm}$	各种带钢,带宽 $<2000\text{mm}$	各种带钢,带宽 $<2000\text{mm}$	各种带钢,带宽 $<2000\text{mm}$
测量连续性	离散点测量	离散点测量	离散点测量	连续测量	离散点测量
能否有效避免带钢运动、振动等引起的误差	不能	不能	不能	能	不能
测量精度/mm	$<$ 全量程的 $\pm 4\%$	± 0.5	± 1	± 0.4	$< \pm 1.0$
检测装置结构复杂程度	结构复杂,维护困难	结构简单,容易维护	结构简单,调试和维护困难	结构复杂,调试和维护困难	结构简单,但调试和维护困难
设备成本费用情况	成本高	成本低	成本高	成本高	成本低

光截面法的测量原理较莫尔法、激光三角法先进,因光源采用扫描方式,它可以测量带钢宽

度方向上任一位置的相对延伸差,且该系统测量一幅图像约需 0.1s,每 0.5s 即可在 CRT 上更新

一次计算结果,并将结果输出给上位计算机用于板形控制,但因采用大功率的 A_+^* 激光器(4W)和机械扫描装置,使安装调试、维护困难,养护费用高。

多束激光板形检测装置综合了激光位移法和光截面法测量原理的优点,免去了分光器及扫描电镜,以多只小功率(10~15mW)半导体激光器替代大功率 A_+^* 激光器(4W)作光源,降低了仪器造价,并由于测量原理是实时计算相对延伸差,不含时间及运动速度因素,使检测与带钢运动状态无关,提高了测量可靠性。但由于激光光斑数较多使数字图像信息数量增加,加大了计算机运算量,反馈信息速度较慢,从而使在线检测效率降低。上述几种板形检测装置的比较如表1所示。

3 结束语

随着热轧板带钢短流程轧制工艺技术的日趋成熟,热轧板带向厚度更薄的方向发展,在更多领域可以用“热轧产品”代替“冷轧产品”。因此,热轧板带的在线板形检测显得尤为重要。目前,以激光三角法(位移法)、光切法(截光法)和莫尔法为代表的热轧带钢板形检测技术在实际应用中还存在着一些局限性,影响板形检测装置的适应性、精确度和稳定性。今后热轧带钢板形检测的研究方向应结合板形自动控制数学模型的建立、计算机软件的开发、数字图像信息处理技术等方面,使热轧板形检测技术向高精度、高速度、数字化的方向发展。

参考文献

- [1] 黄庆学,梁爱生著.高精度轧制技术[M].北京:冶金工业出版社,2002
- [2] Gunter Knepe, Dieter Rosenthal. 热轧带钢技术[J]

MPT 冶金设备和技术,1998(2):86~99

- [3] 王定武.特薄规格热轧带钢生产现状和前景[J].轧钢,2000,17(5):29~32
- [4] 杨溪林等.多束激光热轧带钢板形测量仪的开发与研究[J].冶金自动化,1997,21(1):24~28
- [5] 田乃媛著.薄板坯连铸连轧[M].北京:冶金工业出版社,1998
- [6] 刘相华,王国栋.热轧带钢新技术的发展[J].钢铁研究,2000,(5):1~4
- [7] 唐荻,杨晓臻等.热轧超薄带生产的若干问题分析[J].轧钢,2001,10(5):34~38
- [8] 张东清,陈先霖等.板形控制与热轧带钢自由规程轧制[J].钢铁,2001,2(2):72~75
- [9] 王国栋.板形控制和板形理论[M].北京:冶金工业出版社,1986
- [10] 田小果,卫恩泽.热轧带钢板形测量技术[J].重型机械科技,2001.1(2):19~22
- [11] 朱敏之.国外热轧带钢板形的控制组合方式及应用[J].重型机械科技,2001.1(2):27~31
- [12] 陈先霖.新一代高技术宽带钢轧机的板形控制[J].北京科技大学学报,1997,5(19):2~5
- [13] Practical Shape Meter for Hot Strip Mill[M],Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan,1985
- [14] R. Pirlet, et al, A Noncontact System for Measuring Hot Strip Flatness[J] AISE Year Book,1983, pp. 284~289
- [15] J. Jouet, et al. Development of a Shape Model and a Shape meter for Hot Strip Mills[C], Proceedings of the 4th International Steel Rolling Conference: The Science and Technology of Flat Rolling, Vol. 1, Deauville, France, June 1~3, 1987, pp. A. 24.1~A. 24.7
- [16] 杨溪林等.激光板形测量技术现状及发展[J].冶金自动化,1998,(1):29~30.
- [17] 杨溪林等.LF-100型激光板形仪的研究[C].冶金自动化,1998.5

(收稿日期:2004—10—14)

(接30页)

- [3] 孙桓,陈作模.机械原理(第五版)[M].北京:高等教育出版社,1996
- [4] 王玉新,杨柳,王仪明,朱殿华.渐开线直齿圆柱齿轮齿根应力的有限元分析[J].机械设计,2001(8)
- [6] 美国 ANSYS 公司北京办事处编. ANSYS 非线性分析指南[M].美国 ANSYS 公司北京办事处,1976.

- [7] 张学伟,葛华江,徐克生.基于 Pro/E 的 3D 齿轮模型自动设计[J].林木机械与木工设备,2002.7
- [8] 杨份爱,张志强,龙小乐,鲍务均.基于精确模型的斜齿轮接触应力有限元分析[J].机械科学与技术,2003(3)
- [9] 张玉奎.高炉炉顶布料齿轮箱在线监测诊断组态化研究[D].武汉:武汉科技大学,2004

(收稿日期:2004—09—19)