

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190494

宽厚板多点柔性压力矫直装置设计与反弯量计算

孙登月, 侯海涛, 汝文弟, 许石民

(燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 宽厚板厂采用压头可移动式压平机, 压下量基本上靠工人凭经验确定, 矫直效率低。为了提高压平机的工作效率和矫直精度, 提出多点柔性压力矫直方案并设计出一种宽厚板多点柔性压力矫直装置。运用弹塑性理论推导出压下量计算公式, 基于有限元模拟的方法对反弯量计算公式进行修正, 并试验验证了修正后矫直公式的正确性。为后续多点柔性压力矫直工艺的研究奠定理论基础。

关键词: 宽厚板; 压平机; 多点反弯; 反弯量; 有限元模拟

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2020)06-0113-05

Design of multi-point flexible pressure straightening device for wide and heavy plates and calculation of reverse bending amount

SUN Deng-yue, HOU Hai-tao, RU Wen-di, XU Shi-min

(National Cold Rolled Strip Equipment and Process Engineering Technology Research Center, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Wide and thick plate factories use movable head flattening presses, the reduction amount is basically determined by workers based on experience, and the straightening efficiency is low. In order to improve the working efficiency and straightening accuracy of the flattening machine, a multi-point flexible pressure straightening scheme and designs a multi-point flexible pressure straightening device for wide and thick plates was proposed. Using the elastoplastic theory, the calculation formula of the reduction is derived. Based on the finite element simulation method, the formula for calculating the amount of reverse bending was modified, and the correctness of the corrected straightening formula was verified by experiments. It lays a theoretical foundation for the subsequent research of multi-point flexible pressure straightening process.

Key words: wide and heavy plate; flattening machine; multi-point reverse bending; reverse bending amount; finite element simulation

宽厚板主要应用在船舶、桥梁建造、高压容器、锅炉等领域。由于其用途广泛, 宽厚板对一个国家的发展起着至关重要的作用, 是衡量一个国家钢铁工业水平的重要指标^[1-2]。

宽厚板的不平度问题包括横向、纵向或双向弯曲, 需经过平整工艺改善其不平度。许多行业对宽厚板不平度的要求较高, ISO 7452-84 规定, 40~150 mm 厚板在 2 000 mm 以内的不平度不得超过 11 mm^[3]。而实际生产的宽厚板不平度已经远远超过了该规定值, 因此一般会在辊式矫直机上矫直。当矫厚厚度超过 40 mm 的热处理合金钢或热矫厚度超过 100 mm 的钢板时, 无法在辊式矫直机上矫直, 需要借助压力矫直机来改善钢板的不平度^[4-6]。目前, 矫直方法是工人手动垫垫铁并凭经验设置压

下量, 经常需要多次矫直才能使钢板达到不平度要求。现有的压平机大都是压头可移动式压平机, 压头由一个大直径液压缸带动, 造价高且单次矫直范围有限。因此, 设计一种新型压力矫直装置以提高矫直效率和精度十分必要。

1 多点反弯矫直工艺的研究

1.1 多点反弯矫直理论的提出

传统压平机采用 3 点反弯矫直原理。在钢板达到最大反弯时, 钢板中心处发生小部分塑性变形, 其余部分均发生弹性变形^[7]。因此, 若支点距过大, 矫直后钢板仍有较大的挠度。针对 3 点反弯矫直存在的问题, 本文提出一种多点反弯矫直模型, 如图 1 所示。多点反弯矫直模型依然采用两个支点的形式,

与 3 点反弯矫直模型的不同是本模型采用多个压头,各压头配合形成所需曲率,使被矫钢板发生较均匀的变形,以获得更高的精度。

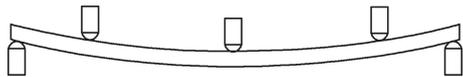


图 1 多点反弯矫直模型

Fig. 1 Multi-point reverse bending straightening model

1.2 反弯量计算公式推导

由于受力不同,多点反弯矫直压下量也不同,因此首先对反弯量的计算公式进行推导。反弯矫直过程钢板可认为发生纯弯曲变形,中性层纤维长度不变,上下两侧纤维分别被拉伸和压缩。外力撤去后各层纤维长度刚好相等时钢板被矫直。

矫直模型如图 2 所示,虚线 $C'D'$ 和实线 CD 分别表示反弯前后的钢板边界,其与竖直位置的夹角为 α_1 和 α_2 , α_1 和 α_2 分别为原始弯曲角和反弯角。反弯矫直过程即是边界 $C'D'$ 绕 O 点旋转至 CD 并反弹至竖直位置的过程。应力应变在中性层两侧对称分布,为简化计算将中性层上部作为研究对象。处于最大反弯量时,钢板整体处于弹性变形状态,随着各层纤维到中性层距离 z 的增加,变形量逐渐增大。假定 LN 层处于弹性极限状态,其下方纤维发生弹性变形,上方纤维发生弹性变形。撤去外力后钢板发生回弹,若纵向各层不相互制约、自由回弹,回弹后边界由 OC' 变形至 ONF 。而实际各纤维层相互制约,弹复后钢板边界依然是直的,而非折线,导致 OG 左侧受到压应力,右侧受到拉应力。在矫直过程中忽略钢板残余应力影响,三角形区域 ONL 、 LNK 、 KGF 处内应力做功分别为 W_1 、 W_2 、 W_3 。各部分内应力做功大小可由其包含区域各层纤维变形能的积分表示。 ONF 处的应力为 0,至 OG 线性增加到最大值。

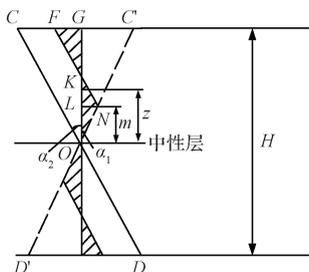


图 2 矫直模型示意图

Fig. 2 Straightening model diagram

对于 W_1 , 各层应变 $\epsilon_1 = z_1 \alpha_1$, 各层应力最大值 $\sigma_1 = z_1 \alpha_1 E$, 沿板厚方向积分得到

$$W_1 = \int_0^m \frac{1}{2} B \sigma_1 \epsilon_1 dz_1 = \frac{B m^3 \alpha_1^2 E}{6} \quad (1)$$

式中: B 为钢板宽度, mm; E 为弹性模量, MPa; m 为弹性极限层与中性层距离, mm。

对于 W_2 , LK 长度为 $m \alpha_1 / \alpha_2$, 各层应变 $\epsilon_2 = z_2 \alpha_2$, 应力最大值 $\sigma_2 = z_2 \alpha_2 E$, 沿板厚方向积分得到

$$W_2 = \int_0^{\frac{m \alpha_1}{\alpha_2}} \frac{1}{2} B \sigma_2 \epsilon_2 dz_2 = \frac{B m^3 \alpha_1^3 E}{6 \alpha_2} \quad (2)$$

对于 W_3 , KE 长度为 $H/2 - m - m \alpha_1 / \alpha_2$, 各层应变 $\epsilon_3 = z_3 \alpha_3$, 应力最大值 $\sigma_3 = z_3 \alpha_3 E$, 沿板厚方向积分得到

$$W_3 = \int_0^{\frac{(H/2-m)\alpha_2 - m\alpha_1}{\alpha_2}} \frac{1}{2} B \sigma_3 \epsilon_3 dz_3 = \frac{\left[\left(\frac{H}{2} - m \right) \alpha_2 - m \alpha_1 \right]^3 BE}{6 \alpha_2} \quad (3)$$

式中: H 为钢板厚度, mm。

当钢板处于稳定状态, 总内应力为 0。即内部拉应力做功 W_1 、 W_2 之和等于内部压应力做功 W_3 [8]。

$$\frac{B m^3 E \alpha_1^2}{6} + \frac{B m^3 \alpha_1^3 E}{6 \alpha_2} = \frac{\left[\left(\frac{H}{2} - m \right) \alpha_2 - m \alpha_1 \right]^3 BE}{6 \alpha_2} \quad (4)$$

当钢板达到最大反弯量时, 钢板弹性屈服极限层 (LN 层) 的应变量为弹性极限应变 ϵ_s , 通过弹性屈服极限层处纤维伸长量建立等式

$$\epsilon_s = \frac{\Delta l}{L} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2) m}{L} = \frac{\sigma_s}{E} \quad (5)$$

式中: L 为支点距离; Δl 为弹性屈服极限层纤维伸长量; σ_s 为屈服极限, MPa。

联立式 (4) 和式 (5) 得式 (6), 可根据原始弯曲角求得反弯角。

$$\frac{H \alpha_2}{2} - \frac{\sigma_s^2 L^3 (\alpha_1^3 + \alpha_1^2 \alpha_2)}{E^3 (\alpha_1 + \alpha_2)} = 0 \quad (6)$$

弯曲钢板反弯依靠的是柔性压头给予钢板一定压下量来实现, 因此直接计算出反弯量比给出反弯角能更直观地确定各压头所需的行程。各个参数间的几何关系如图 3 所示。通过图 3 所示可建立关系式

$$r_1 = \frac{\delta_0^2 + L^2/4}{2\delta_0} \quad (7)$$

$$\alpha_1 = 2 \arcsin \frac{L}{2r_1}$$

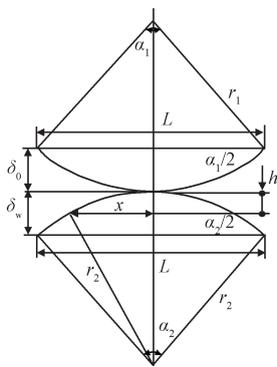


图 3 几何关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geometric relationship

式中: δ_0 为原始挠度,mm; r_1 为原始曲率半径,mm。

$$r_2 = \frac{L}{2\sin(\alpha_2/2)}$$

$$\delta_w = r_2 - \sqrt{r_2^2 - L^2/4} \quad (8)$$

式中: δ_w 为反弯量,mm; r_2 为反弯曲率半径,mm。

则多点反弯矫直模型反弯量的求解过程为:已知原始挠度 δ_0 ,由式(7)将原始挠度转化为原始弯曲角 α_1 ;根据原始弯曲角由式(6)求出反弯角 α_2 ;

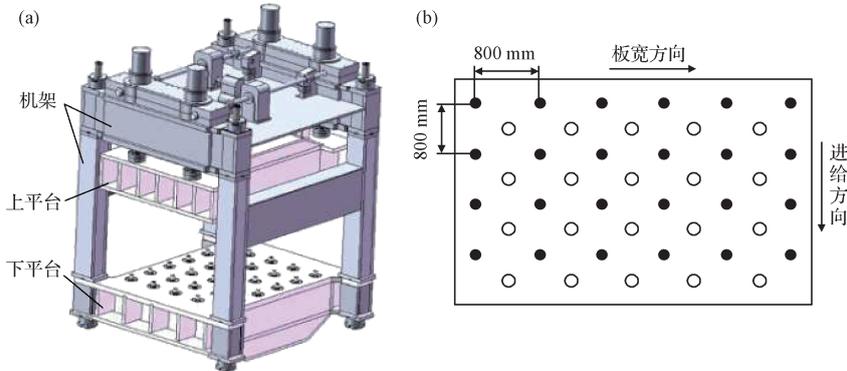
最后将反弯角代入式(8)即可得到反弯量 δ_w ,所计算出的反弯量为模型中点的最大反弯量。其余各压头反弯量可根据最大反弯量求出,即

$$h = r_2 - \sqrt{r_2^2 - x^2} \quad (9)$$

式中: x 为压头距最大反弯处的水平距离,mm; h 为压头与最大反弯处的竖直距离,mm。

2 多点柔性压力矫直装置设计

本文设计了一种多点柔性压力矫直装置如图 4 所示。装置的三维模型如图 4(a)所示。压力矫直装置中压头和垫块分别由多个离散的支撑点组成,每个支撑点的水平位置固定,竖直方向上由液压缸带动可实现单独升降。生产中宽厚板板型大多为 1 个波峰且曲率较小,很少存在两个及两个以上波峰的情况^[9-11]。故本装置支撑点间距为 800 mm,上平台沿板宽方向布置 5 排支撑点,每排 4 个;下平台沿进给方向布置 6 排支撑点,每排 4 个。上、下平台支撑点交错布置。平台支撑点位置分布图如图 4(b)所示,图中“空心圆”和“实心圆”分别表示上平台和下平台中支撑点所在位置。



(a) 压力矫直装置三维模型; (b) 平台支撑点位置分布。

图 4 压力矫直装置设计

Fig. 4 Design of pressure straightening device

3 多点反弯矫直公式的有限元修正

3.1 有限元模型的建立

矫直模型中钢板为变形体,压头为解析刚体。任意两压头或垫块之间距离为 800 mm,钢板的宽度和长度分别为 2 400 和 1 600 mm。钢板沿宽度方向存在曲率,挠度为 70 mm,如图 5 所示^[12-13]。钢板的材料参数见表 1。当钢板最大反弯量为 51 mm 时刚好被矫直,钢板反弯及弹复后状态如图 6 所示^[14-15]。

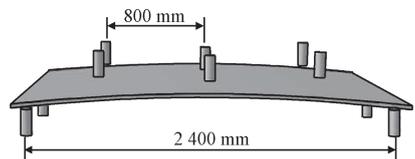
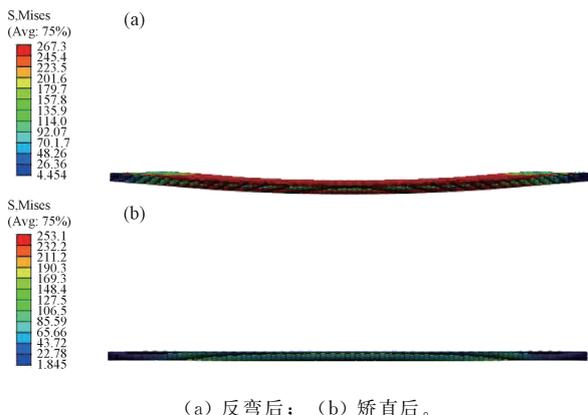


图 5 矫直模型

Fig. 5 Straightening model

3.2 矫直公式修正

由于矫直后钢板内部存在残余应力,则与式(6)所计算出的反弯角是存在偏差的。因此用有限元得



(a) 反弯后；(b) 矫直后。

图 6 矫直前后应力云图

Fig. 6 Stress cloud before and after straightening

到的结果与计算结果相对比,引入修正系数对公式修正。分别改变支点距、板厚、屈服强度和原始挠度,理论反弯角 α_2 与模拟反弯角 α' 见表 2。

将计算值和模拟值经 MATLAB 拟合,发现 α_2 与 α' 存在较明显的线性关系,如图 7 所示,拟合斜率为 0.77,即

$$\alpha' = 0.77\alpha_2 \quad (10)$$

将式(10)代入式(6),得到

$$\left(\frac{25H\alpha'}{38} - \frac{\sigma_s L}{E}\right)^3 - \frac{\sigma_s^3 L^3 (\alpha_1^3 + 1.3\alpha_1^2 \alpha')}{E^3 (\alpha_1 + 1.3\alpha')^3} = 0 \quad (11)$$

表 1 Q250 的材料参数

Table 1 Material parameters of Q250

屈服极限 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ
250	509	206 000	0.33

表 2 理论反弯角与模拟反弯角对比

Table 2 Contrast between theoretical reverse bend angle and simulated reverse bend angle

支点距 L /mm	板厚 H /mm	屈服强度 σ_s /MPa	原始挠度 δ_0 /mm	理论反弯角 α_2 /($^\circ$)	反弯量 δ_w /mm	模拟反弯角 α' /($^\circ$)
1 600	30	250	50	0.217	43.4	0.160
2 400	40	250	70	0.237	71.2	0.183
2 400	60	250	70	0.180	54.0	0.130
3 200	80	250	80	0.250	100.1	0.195
4 000	60	500	80	0.360	180.5	0.270

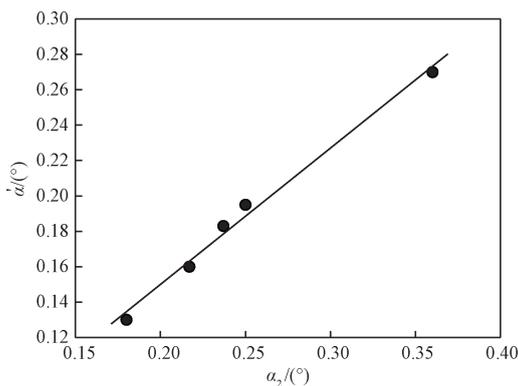
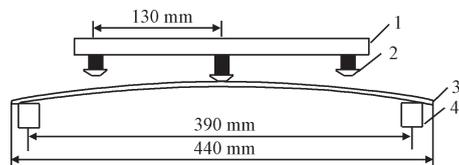


图 7 理论反弯角与模拟反弯角拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of theoretical reverse bend angle and simulated reverse bend angle

长度为 230 mm、厚度为 17 mm 的 Q235 号钢板,钢板原始挠度为 8 mm。布置 6 个(2 排 3 列)M16 \times 35 的半圆头螺丝(头部直径为 28 mm)压头和 6 个(3 排 2 列)垫块,试验模型正视图如图 8 所示。



1—平台；2—半圆头螺丝；3—被矫钢板；4—垫块。

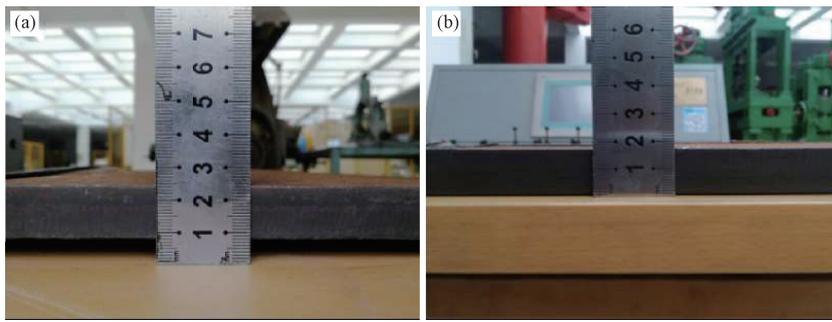
图 8 矫直试验模型正视图

Fig. 8 Straightening experimental model front view

由式(7)计算得原始弯曲角 $\alpha_1 = 0.041^\circ$,根据原始弯曲角由式(11)求出修正后的反弯角 $\alpha' = 0.07^\circ$,最后将反弯角代入式(8)即可得到最大反弯量 $\delta_w = 3.4$ mm,两侧压头与最大反弯量的竖直距离 $h = 1.5$ mm,压力机匀速压下,完成矫直后分离,钢板矫直前后挠度对比如图 9 所示。

4 试验验证

本次试验的矫直力由 100 t 的材料试验机提供,由于试验条件有限,采用钢板宽度为 440 mm、



(a) 矫直前的挠度; (b) 矫直后的挠度。

图9 矫直前后挠度对比

Fig.9 Comparison of deflection before and after straightening

由矫直结果看出,矫直后钢板的残余挠度小于1 mm,钢板变形均匀,充分证明了计算方法的正确性和矫直过程的合理性。

5 结论

(1)提出一种多点反弯矫直方法,运用弯曲与耗能关系推导出反弯量计算公式,基于SolidWorks软件设计并建立多点柔性压力矫直装置的三维模型。

(2)利用有限元软件ABAQUS对多点反弯矫直模型进行仿真计算,对比仿真与计算结果差别并分析了误差原因,引入修正系数修正计算结果。

(3)通过试验验证了修正后公式的正确性,为后续多点反弯矫直工艺研究提供理论依据。

参考文献:

[1] 郝铁文.宽厚板压平机技术与进步[J].一重技术,2011(6):17.(HAO Tie-wen. Development and progress of wide and thick plate flattening machine technology[J]. CFHI Technology,2011(6):17.)

[2] WANG X, ZHANG Z, PENG Z. Development and technology of large thickness TMCP steel plate with 390MPa grade used for engineering machinery[J]. Hsla Steels Microalloying and Offshore Engineering Steels, 2016, 16(4): 816.

[3] 张寅寅.25 000 kN厚钢板压平机[J].舞钢技术,1992(1):18.(ZHANG Yin-yin. 25 000 kN thick steel plate flattening machine[J]. Wugang Technology, 1992(1):18.)

[4] 张学峰,王雪松,郑会平,等.首秦公司冷矫直机工艺优化及应用[J].中国冶金,2018,28(8):57.(ZHANG Xue-feng, WANG Xue-song, ZHENG Hui-ping, et al. Process optimization and application of cold leveler in Shouqin Company[J]. China Metallurgy, 2018, 28(8): 57.)

[5] 杨天云.50 MN宽厚板压平机的结构参数优化及力能参数研究[D].太原:太原科技大学,2014.(YANG Tian-yun. Structural Parameter Optimization and Force Energy Parameters of 50 MN Heavy Plate Flattener[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.)

[6] 沈新玉,胡柯,李宏洲,等. UCM冷连轧机边降控制工作辊辊

形优化[J].中国冶金,2019,29(11):55.(SHEN Xin-yu, HU Ke, LI Hong-zhou, et al. Work roll contour optimization for edge drop control based on UCM cold rolling mills[J]. China Metallurgy, 2019, 29(11): 55.)

[7] 崔甫.矫直原理与矫直机械[M].北京:冶金工业出版社,2005.(CUI Fu. Straightening Principle and Straightening Machine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.)

[8] ZHANG Z Q, YAN Y H, YANG H L. A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening process of thin-walled circular steel tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238:305.

[9] 赵军,曹宏强,展培培,等.纯弯曲过弯矫直等价原理及其试验验证[J].机械工程学报,2012,48(8):28.(ZHAO Jun, CAO Hong-qiang, ZHAN Pei-pei, et al. Equivalent principle of pure bending and bending straightening and its experimental verification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 28.)

[10] 连家创.矫直理论与卷曲理论[M].北京:机械工业出版社,2011.(LIAN Jia-chuang. Straightening Theory and Curl Theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.)

[11] 纳什 W A, 赵志岗.材料力学[M].4版.北京:科学出版社,2002.(NA Shen W A, ZHAO Zhi-gang. Mechanics of Materials [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2002.)

[12] 孙建亮,李凯,杜兴明,等.基于配合辊系的楔形板矫直工艺[J].钢铁,2019,54(3):48.(SUN Jian-liang, Li Kai, DU Xing-ming, et al. Straightening process of longitude profiled plate based on matching straightening roller system[J]. Iron and Steel, 2019, 54(3): 48.)

[13] 任新意,王松涛,高慧敏,等.冷连轧机 ESS 辊型板形控制性能分析[J].钢铁,2018,53(3):51.(REN Xin-yi, WANG Song-tao, GAO Hui-min, et al. Analysis on shape control performance of cold tandem mill with ESS roll profile[J]. Iron and Steel, 2018, 53(3): 51.)

[14] 孙登月,许石民. Q460 20 号角钢九辊矫直过程有限元仿真[J].钢铁,2009,44(9):45.(SUN Deng-yue, XU Shi-min. Finite element simulation of Q460 20 angle steel nine roll straightening process [J]. Iron and Steel, 2009, 44(9): 45.)

[15] 孟启星,孙登月,许石民.大直径厚壁管二辊矫直机凹辊辊型有限元研究[J].钢铁,2012,47(7):49.(MENG Qi-xing, SUN Deng-yue, XU Shi-min. Finite element study on concave roller type of large diameter thick wall tube two-roll straightening machine [J]. Iron and Steel, 2012, 47(7): 49.)