

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180299

基于配合辊系的楔形板矫直工艺

孙建亮^{1,2}, 李 凯¹, 杜兴明¹, 彭 艳^{1,2}

(1. 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;

2. 燕山大学亚稳材料科学与技术国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 采用常规矫直辊系矫直楔形板严重降低了楔形板矫直范围和效率, 为了提高楔形板矫直厚度范围和矫直质量, 提出了一种基于配合辊系(大直径矫直辊系和小直径矫直辊系)的楔形板矫直方法。首先研究了配合辊系矫直机辊径、辊距与楔形板矫直效果的关系, 设计了楔形板矫直机配合辊系, 给出了矫直工艺方案; 然后给出了配合辊系矫直楔形板的分区原则, 基于有限元法建立了基于配合辊系的楔形板矫直过程有限元模型, 仿真结果与实测结果一致, 验证了有限元模型的正确性; 最后对基于配合辊系的楔形板矫直过程进行仿真, 计算了常规辊系和配合辊系下楔形板矫直力及残余应力, 分析了不同板厚分区对楔形板矫直效果的影响, 结果表明, 配合辊系设计方案适合楔形板矫直过程且矫直效果较好。

关键词: 楔形板矫直; 配合辊系; 分区原则; 残余应力

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)03-0047-09

Straightening process of longitude profiled plate based on matching straightening roller system

SUN Jian-liang^{1,2}, LI Kai¹, DU Xing-ming¹, PENG Yan^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University,

Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Applying the conventional straightening roller system in straightening the longitude profiled plate will severely reduce the straightening range and efficiency of the longitude profiled plate. In order to improve the thickness range and straightening quality of the longitude profiled plate, a longitude profiled plate straightening method based on a matching roller system method (large diameter straightening roller system and small diameter straightening roller system) was proposed. Firstly, the relationship between the roll diameter and the roll distance of the straightening machine based on the matching roller system was studied. The matching roller system of longitude profiled plate straightening machine was designed, the straightening technology of longitude profiled plate was proposed. Then, the partition principle of the longitude profiled plate with the matching roller straightening machine was studied. The finite element model of longitude profiled plate straightening process based on the matching roller system was established, and the simulation results were consistent with the measured results, which verified the correctness of the finite element model. Finally, the straightening process of the longitude profiled plate based on the matching roller system was simulated. The straightening force and residual stress of the longitude profiled plate under the conventional roller system and the matching roller system were calculated. The influence of different plate thickness partition on the straightening effect of the longitude profiled plate was analyzed. The results show that the designed matching roller system is suitable for the straightening of the longitude profiled plate and the straightening effect is better.

Key words: longitude profiled plate straightening; matching roller system; partition principle; residual stress

楔形板是纵向截面变厚度板, 主要应用于船舶、桥梁和建筑等领域, 在结构减重方面发挥重要

作用^[1-3]。矫直是楔形板主要生产工序之一, 矫直工艺直接影响到楔形板矫直质量^[4-5], 实际生产中主要

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0306404); 河北省自然科学基金钢铁联合基金资助项目(E2016203179); 河北省高等学校科学技术重点资助项目(ZD2018203)

作者简介: 孙建亮(1981—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** sunjianliang@ysu.edu.cn; **收稿日期:** 2018-07-27

通过改变矫直辊开口度来调节楔形板曲率,完全依赖人工经验,缺乏基于机理模型的楔形板矫直理论工艺。

板带材矫直理论主要方法包括试验方法、理论解析和数值方法。试验法一般通过大量实测数据回归经验公式,针对性强,但使用限制条件较多,普适性不强。理论解析方法一般以零弯矩点作为支点将矫直过程简化成简支梁,在板带材矫直研究中应用较广,崔甫^[6]系统推导和总结了基于简支梁初等弹塑性弯曲模型的相关理论及计算公式;连家创^[7-8]采用绝对曲率,压下量的计算建立在反向弯曲曲率、弹复曲率和反向弯曲挠度的基础上,不必计算残余挠度,更简单直观。数值方法研究矫直理论大多采用有限元法,Morris J W 等^[9]基于 ABAQUS/Standard 研究了冷轧带材矫直过程,考虑了 Bauschinger 效应对残余应力的影响,对材料的各向同性强化与运动强化作分析比较;Huh H 等^[10]利用 ABAQUS/Standard 对拉伸弯曲矫直过程进行了模拟,得出了最大应变与压入深度的关系;王效岗等^[11]针对变形抗力较大的厚板难以一次矫直的问题,提出了不充分变形多次矫直方案,可有效地改善板形;王勇勤等^[12]建立了中厚板矫直过程横向残余应力计算解析模型,并进行了有限元模拟。

目前对楔形板矫直工艺的相关研究较少,研究较多的是轧制成形环节,Kopp R 等^[13]结合差厚板与型轧技术生产出 3D 成形板,柔性轧制技术用于控制其横截面厚度变化,型轧用于控制其纵向厚度的变化;Ryabkov N 等^[14]研究了横向与纵向均有厚度变化的差厚板轧制工艺,讨论了不同硬化级别对轧制过程的影响;刘相华等^[15-17]系统研究了变厚度板轧制原理,优化了楔形板轧制规程,建立了楔形轧制过程控制模型;高娟^[18]建立了变厚度板的电液伺服厚度控制系统数学模型,制订了楔形板轧制工艺。

由于楔形板矫直过程中板材厚度不断变化,因此矫直辊矫直的难点在于矫直辊压下量要随楔形板厚度变化而实时动态调整。CUI Li 等^[19]基于曲率积分法研究了 LP 板矫直过程中变形特征和残余曲率。鞍钢开发了 LP 板半自动矫直模式,实现将 LP 板矫直不平度控制在 2 mm/m 以内,解决钢板中间浪问题^[20]。张子骞等^[21]研究了冷轧差厚板的柔性矫直方法,冷矫从等厚度厚区变化到等厚度薄区的带卷,其存在长度很短的变厚度区。目前楔形板主要采用常规矫直机通过线性递减方法和人工调整来矫直,生产效率低下,人为干预的不确定性对矫直

效果也将产生不良影响;楔形板是连续变厚度板,厚度连续变化对矫直机辊径和辊距的要求也随之改变,而常规矫直机的辊径辊距已经确定,严重限制了楔形板矫直厚度范围,由以上分析可知,基于常规矫直工艺和人工调控相结合的楔形板矫直方法,大大降低了楔形板的矫直范围和矫直效率,不能较好地应用于楔形板矫直。为了提高楔形板矫直能力和矫直范围,本文提出了一种基于配合辊系的楔形板矫直方法,对楔形板矫直过程进行了仿真计算,该方法满足楔形板矫直过程厚度实时变化的要求,为楔形板矫直工艺制订提供理论依据。

1 基于配合辊系的楔形板矫直工艺数学模型

1.1 矫直机辊径、辊距与待矫板材厚度的关系

对于一定厚度的板材,矫直机的辊距和辊径的选择范围是一定的,不能过大也不能过小;同样对于一定辊距和辊径的矫直机,其矫直板厚的范围也是一定的。矫直机辊距过大,板材不能充分塑性变形,矫直精度难以保证,同时辊距过大,压弯量必然要增大,使辊缝变小,咬入困难;辊距过小,使矫直力过大,导致矫直辊表面产生疲劳剥蚀、矫直辊与接轴等零件的破坏。对于板材矫直而言,希望矫直辊辊径越小越好,因此设计时一般取允许最小辊径^[6]。

矫直辊的最大辊距 $l_{\max}$ 取决于板材矫直质量,可表示为

$$l_{\max} = 0.35 \frac{h_{\min} E}{\sigma_s} \quad (1)$$

式中: E 为弹性极限; σ_s 为屈服极限; $h_{\min}$ 为最小矫直板材厚度。

矫直辊的最小辊距 $l_{\min}$ 取决于矫直辊扭转强度和表面接触应力条件,可表示为

$$l_{\min} = 0.43 h_{\max} \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}} \quad (2)$$

式中: $h_{\max}$ 为最大矫直板材厚度。

由文献^[22]可知,矫直辊辊径 d 与辊距 l 的关系可表示为

$$d = \phi l \quad (3)$$

式中: ϕ 为比例系数,对于薄板 $\phi = 0.90 \sim 0.95$,中板 $\phi = 0.85 \sim 0.90$,厚板 $\phi = 0.70 \sim 0.85$ 。

由于楔形板厚差最小为 10 mm,最大可达 100 mm,当厚差达到一定时,为了提高矫直质量,必须设计出满足楔形板厚度变化要求的辊径和辊距。本文基于有限元方法,对最小厚度分别为 10、20、30、50 mm,坡度均为 2 mm/m $\times$ 2 mm/m 的楔形板进行有限元矫

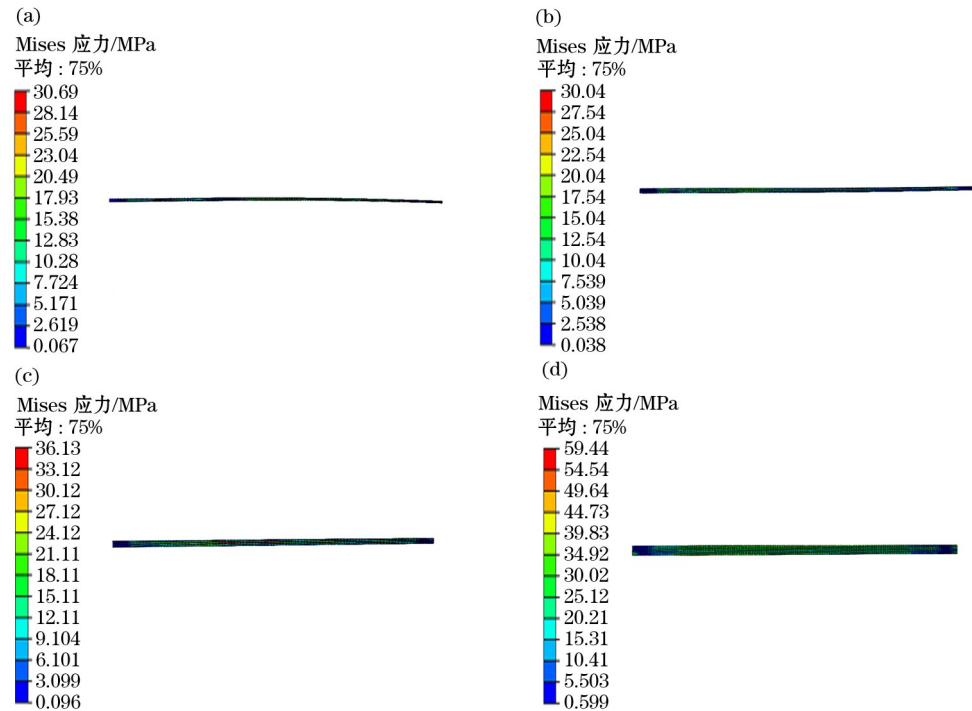
直过程模拟,研究矫直不同厚度板材需要的最优矫直辊直径和辊距,其中楔形板及矫直设备工艺参数见表 1。在本文 3.1 节中验证了有限元模型的正确性。

矫直后的楔形板残余应力分布如图 1 所示,平均阈值为 75%。由图 1 可知,最小板厚为 20、30 和 50 mm 的 2 块楔形板在矫直后板形良好,最小板厚为 10 mm 的楔形板矫直后出现较严重的板形问题。为了改善最小板厚为 10 mm 的楔形板矫直后板形,可以在原矫直辊系基础上通过调整楔形板矫直工艺参数,以期望获得良好板形,本文以调整压下量参数为例进行说明,采用线性递减矫直方案,末辊初始压下量均为 2.015 1 mm,首辊初始压下量

分别为 3.2、3.4、3.8 和 4.0 mm。

表 1 楔形板及矫直设备工艺参数
Table 1 Parameters of longitude profiled plate and straightening machine

参数	数值	参数	数值
辊数	11	矫直温度/℃	810~830
辊径/mm	285	矫直速度/(mm·s ⁻¹)	0.5
辊距/mm	300	弹性模量/MPa	68 600
板宽/mm	300	屈服极限/MPa	107.8
板厚/mm	10、20、30、50	泊松比	0.3
初始残余曲率比	0.3	上辊首辊压下	4
		相对反弯曲率	



(a) 最小板厚为 10 mm 的楔形板; (b) 最小板厚为 20 mm 的楔形板;
(c) 最小板厚为 30 mm 的楔形板; (d) 最小板厚为 50 mm 的楔形板。

图 1 不同板厚楔形板矫直后的板形

Fig. 1 Plate shape after straightening of different thickness longitudinal profiled plate

不同首辊压下量时最小板厚为 10 mm 的楔形板矫后状态如图 2 所示。图 1 中最小板厚为 10 mm 的楔形板首辊初始压下量为 3.627 2 mm,末辊初始压下量为 2.015 1 mm,综合图 2 和图 1 可知,调节压下量并未有效改善楔形板矫后板形质量。针对最小板厚为 10 mm 的楔形板,根据由上述辊径、辊距与板厚的关系重新设计了矫直机的辊径辊距,得到最大辊距 $l_{\max}=2\ 227.27\ \text{mm}$,最小辊距 $l_{\min}=195.25\ \text{mm}$,设计时一般取最小辊距,这里取辊距为 200 mm,辊径为 190 mm。

重新设计辊径辊距后最小板厚为 10 mm 楔形板的矫直结果如图 3 所示。由图 3 可知,重新设计矫直机的辊距和辊径后,楔形板矫直后板形良好,即将辊径、辊距减小后,楔形板的矫直质量明显改善很多。本文基于不厚度范围的板材需要不同辊径辊距的矫直机与之匹配的思想,提出一种基于配合辊系的楔形板矫直工艺。

1.2 楔形板矫直机配合辊系及矫直工艺设计

本文提出一种基于配合辊系的楔形板矫直工艺,能够更加有效地矫直楔形板。楔形板矫直机配

合辊系如图 4 所示,大、小辊径辊系前后排列,在矫直过程中大辊径辊系始终投入工作,小辊径辊系根

据板厚度变化确定是否投入工作,大小辊径辊系的下矫直辊可调整其倾斜角度。

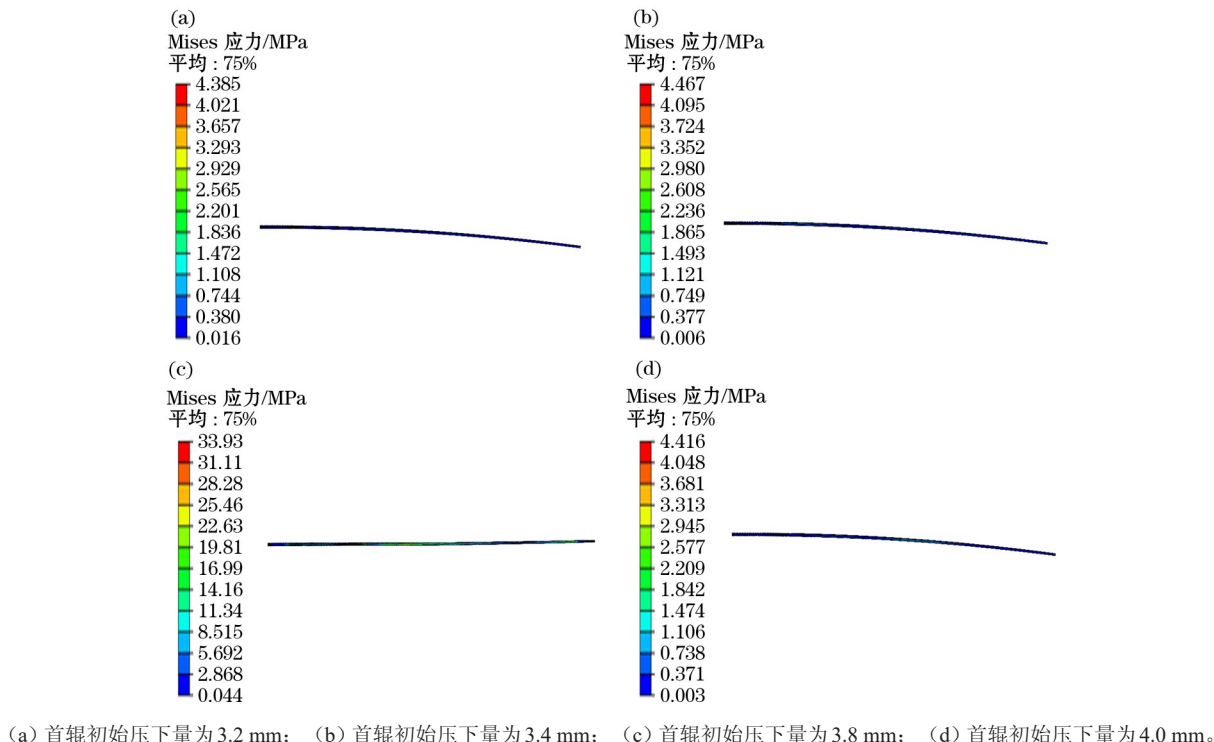


图 2 最小厚度为 10 mm 楔形板在不同首辊初始压下量下矫直后的板形

Fig. 2 Plate shape after straightening of 10 mm thickness longitudinal profiled plate in different initial reductions

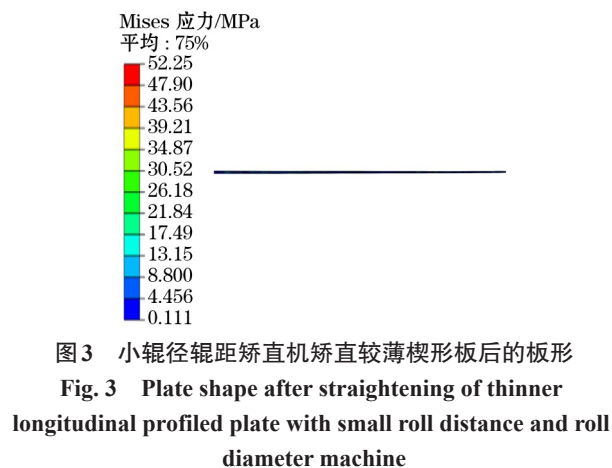
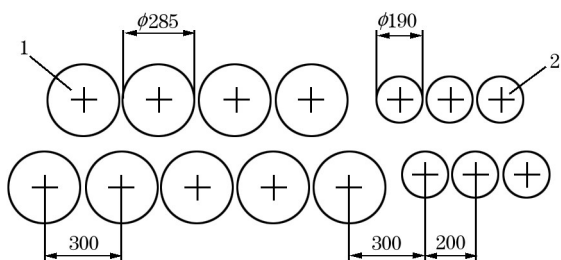


Fig. 3 Plate shape after straightening of thinner longitudinal profiled plate with small roll distance and roll diameter machine



1—大辊径矫直辊系; 2—小辊径矫直辊系。

图 4 用于楔形板矫直的配合矫直辊系示意图(mm)

Fig. 4 Schematic diagram of matching straightening roller system for straightening longitudinal profiled plate

基于配合辊系的楔形板矫直工艺流程如下: 首先根据待矫楔形板信息判断楔形板是否进行板厚分区, 进而确定小辊径辊系是否投入矫直; 若需要对楔形板进行厚度分区, 根据楔形板分区原则将其分为薄板区、过渡区和厚板区等, 采用不同大小直径矫直辊系组合对不同分区段进行矫直; 矫直时, 楔形板薄板区先进入矫直机, 此时大小辊径矫直辊系同时工作, 当楔形板厚度增大到一定程度时, 小辊径矫直辊系脱离工作、大辊径矫直辊系工作直至结束。基本矫直原则为: 矫直时楔形板先从小辊径矫直辊系进入, 入口侧使用大辊径可以承受更大压力, 同时还满足等强度设计的理想状态; 矫直薄板区时, 楔形板先经过大辊径辊系预矫直, 再经过小辊径辊系二次矫直, 使其达到质量要求; 矫直过渡区时, 小辊径矫直辊系上辊由入口端到出口端逐个脱离工作, 直至全部脱离工作; 矫直厚板区时, 小辊径矫直辊系不参与工作。

2 楔形板矫直过程仿真分析

2.1 楔形板矫直分区准则

当发生塑性变形时, 残余曲率和反弯曲率的关系为

$$C_{ci} = C_{wi} + C_{fi} = C_{wi} + \left(1.5 - \frac{0.5}{-C_{wi} + C_{ci-1}}\right) \quad (4)$$

式中: C_{ci} 为第 i 辊处相对残余曲率; C_{wi} 为第 i 辊处相对反弯曲率; C_{fi} 为第 i 辊处相对弹复曲率; C_{ci-1} 为第 $i-1$ 辊处相对残余曲率。

曲率和残余曲率之间的关系为

$$A_c = A_i C_c \quad (5)$$

式中: A_i 为弹性极限弯曲曲率, $A_i = \frac{2\sigma_s}{Eh}$; h 为板厚; A_c 为残余曲率; C_c 为相对残余曲率。

同一矫直机在相同反弯曲率比和初始曲率比的条件下,不同厚度的板材矫直完成后其残余曲率比相同,但残余曲率不同时,板材越厚,其残余曲率越小,板材越薄,其残余曲率越大,因此矫直最小厚度 10 mm 的楔形板出现板形不合格。在原有矫直辊系后加一小辊径矫直辊系能够有效改善这种情况,薄板经大辊径矫直辊系矫直后将会有较大的残余曲率,之后通过小辊径矫直辊系继续矫直能够将残余曲率控制到合理范围,最终达到矫直效果。其优点在于可以减小薄板区的空矫区,增大楔形板可矫厚度范围,提高楔形板整体板形质量。

矫直弯矩和矫直力见式(6)和式(7)。

$$M = \begin{cases} \frac{bh^2}{6} \sigma_i C & \text{发生弹性变形} \\ \frac{bh^2}{6} \sigma_i \left(1.5 - \frac{0.5}{C^2}\right) & \text{发生弹塑性变形} \end{cases} \quad (6)$$

式中: b 为板宽; σ_i 为板材弹性极限应力; C 为总变形曲率比。

$$p_i = \frac{2}{l} (M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1}) \quad (7)$$

式中: p_i 为第 i 辊处矫直力; l 为矫直辊辊距; M_{i-1} 、 M_i 、 M_{i+1} 分别为第 $i-1$ 辊、第 i 辊、第 $i+1$ 辊处的弯矩。

在配合矫直辊系矫直机中,其中辊 10 的左右两侧的辊距不同,因此该辊的矫直力为

$$p_i = \frac{2}{l_1} (M_{i-1} + M_i) + \frac{2}{l_2} (M_i + M_{i+1}) \quad (8)$$

式中: l_1 为大辊径矫直辊辊距; l_2 为小辊径矫直辊辊距。

由式(6)和式(7)可知,在初始曲率比和反弯曲率比相同的情况下,各辊总变形曲率比相同,因此不同厚度的弯矩和矫直力与 h^2 有关。在矫直厚度为 10~18 mm 楔形板时,通过计算得到小辊径矫直机最大矫直力为 103.29 kN,配合矫直辊系中小辊径矫直辊最大的矫直力为 58.17 kN,而最大矫直力出现在 18 mm 处,经计算,在配合辊系矫直机小辊径矫直辊矫直力达到 103.29 kN 时,矫直厚度可以

达到 23.98 mm,而小辊径矫直机最大矫直厚度约为 24 mm,配合辊系矫直机中小辊径矫直辊最大矫直厚度为 32 mm,因此,薄板区最大厚度要保证小于 32 mm。

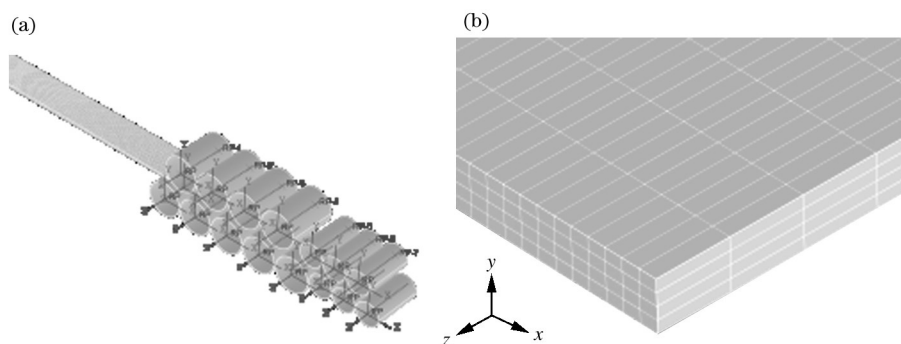
本文在原有大矫直辊系之后设计一小矫直辊系组成了配合矫直辊系,从而使矫直辊系的矫直厚度范围变大,对薄板区,采用大小辊系一起矫直,配合矫直辊系中的大矫直辊系矫直的厚度范围为过渡区和厚板区。通过 1.1 节的仿真分析可知,在常规大矫直辊径矫直机基础上,最小厚度 20 mm 矫直效果良好,最小厚度 10 mm 矫直效果较差,因此,配合矫直辊系中小直径矫直辊系矫直厚度范围为 10~20 mm,为了使整个矫直过程更加合理,将配合矫直辊系中的小直径矫直辊系的矫直范围扩大到 10~24 mm,其余厚度范围通过大矫直辊系可达到理想矫直效果。

2.2 楔形板矫直机配合辊系参数

配合辊系是在原有矫直辊系的基础上加一个小直径矫直辊系,对薄板区,采用大小辊系联合矫直,因此,薄板区相对厚板区多进行了几次反弯,由于在大矫直辊系矫直薄板区后仍会有较大的残余曲率,通过小辊径矫直辊系继续矫直进而达到理想的矫直效果。由上述计算可知,板厚为 10~18 mm 时小矫直辊系的辊径和辊距分别为 190 和 200 mm,正常情况下小矫直辊系所能矫直的最大厚度为 18 mm,但是在配合辊系中大矫直辊系起到了预压下的作用,在厚度为 18 mm 时,小矫直辊系不再需要原先所需的最大矫直力,而且薄板区相对于厚板区多进行了几次反弯,同样起到减小小矫直辊系矫直力的效果,确保小矫直辊系正常工作,因此,小矫直辊系矫直的厚度范围扩大。最终确定楔形板矫直机配合辊系为大矫直辊径为 285 mm,辊距为 300 mm;小矫直辊径为 190 mm,辊距为 200 mm。通过下文仿真计算能够证明配合辊系的合理性。

2.3 基于配合辊系的楔形板矫直有限元模型

本文建立基于配合辊系的楔形板矫直过程有限元模型,配合辊系由 9 个辊径为 285 mm、辊距为 300 mm 的大辊径矫直辊系和 6 个辊径为 190 mm、辊距为 200 mm 的小辊径矫直辊系组成,所建立的有限元矫直模型如图 5 所示。模型主要设备工艺参数见表 2。根据上述理论对该楔形板分区,楔形板总长为 4 000 mm,其中厚板区长 1 700 mm,过渡区长 400 mm,薄板区长 1 900 mm。



(a) 配合辊系矫直模型; (b) 网格划分。

图5 楔形板矫直有限元模型

Fig. 5 Leveling finite element model

表2 基于配合辊系的楔形板矫直设备和工艺参数
Table 2 Parameters of longitude profiled plate and straightening machine based on matching straightening roller system

参数	数值	参数	数值
大辊系辊数	9	小辊系辊数	6
大辊系辊径/mm	285	小辊系辊径/mm	190
大辊系辊距/mm	300	小辊系辊距/mm	200
矫直温度/℃	810~830	矫直速度/(mm·s ⁻¹)	0.5
板坡度/(mm·m ⁻¹ ×mm·m ⁻¹)	2×2	弹性模量/MPa	68 600
泊松比	0.3	屈服极限/MPa	107.8

3 结果分析与讨论

3.1 模型的验证及楔形板矫直过程分析

有限元模型计算的矫直力和实测矫直力的对比如图6所示。实测矫直力来源于某4 300 mm矫直机通过矫直辊上的压力传感器实测得到。矫直机设备参数与表1矫直机参数相同,板材宽度为2 550 mm,厚度为21.5 mm,弹性模量为88 000 MPa,屈服极限为80.1 MPa,泊松比为0.3,矫直过程中静摩擦因数为0.3,动摩擦因数为0.2。从图6中可以看出,模型计算值和测量值误差小于10%,这验证了所建有限元模型的正确性。

基于配合辊系的楔形板矫直过程中大小辊系工作状态和板材矫直情况如图7所示。在矫直薄板区时所有矫直辊都参与矫直工作,如图7(a)所示;当矫直到过渡区时,小辊径矫直辊逐渐退出工作,先慢速离开楔形板,再快速提升到合适的高度,如图7(b)所示;当过渡区矫直结束后,厚板区进入矫直,直至矫直结束,如图7(c)所示。矫直后的楔形板如图7(d)所示,矫直后的楔形板薄板区、过渡区

和厚板区板形均良好,基于配合辊系的楔形板矫直工艺是可行的。矫直完成后板材最大残余应力集中于楔形板头部,这是因为楔形板进入矫直辊系时和矫直辊发生碰撞产生了弹塑性变形,头部为空矫区,所以矫直后保留了较大的残余应力。楔形板其余长度上残余应力都在10 MPa以内。

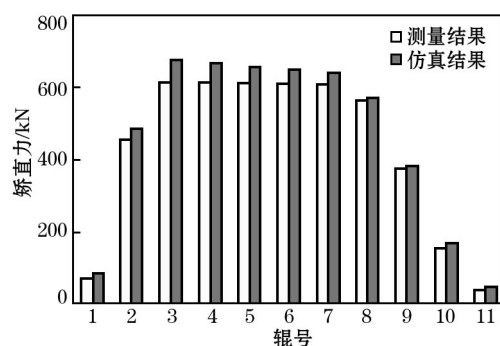


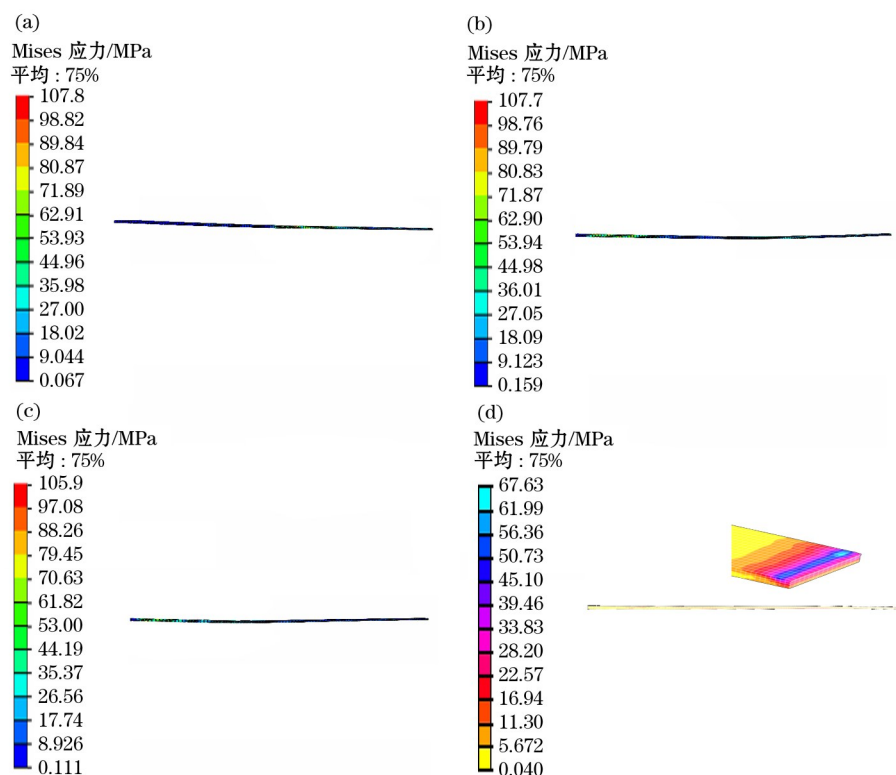
图6 模型计算的矫直力和实测矫直力的对比

Fig. 6 Comparison of measured leveling force and simulated leveling force

3.2 基于配合辊系的楔形板矫直结果分析

3.2.1 同辊径矫直辊系下楔形板矫直过程各辊矫直力

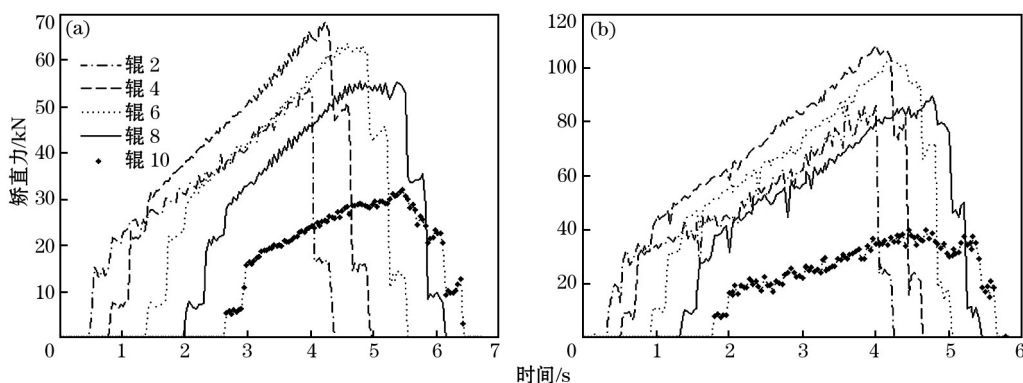
分别采用大辊径矫直辊系和小辊径矫直辊系矫直最小厚度为10 mm楔形板,初始残余曲率比为0.3时矫直力变化曲线如图8所示。从图8中可以看出,大辊径辊系和小辊径辊系矫直时,其矫直力都是随着板材厚度的增加而增大,其中辊4和辊6的矫直力较大,其次为辊2和辊8,而辊4的矫直力始终为最大,这是由于板材在辊3处相对反弯曲率较大,经过辊3时相对残余曲率也较大,所以在辊4处板材总的相对弯曲曲率较大,矫直力最大。不同的是大辊径矫直机各辊矫直力小于小辊径各辊处的矫直力,由式(7)可知,小辊径矫直机的辊距小,矫直力大。



(a) 楔形板薄板区矫直过程; (b) 楔形板过渡区矫直过程;
(c) 楔形板厚板区矫直过程; (d) 矫直完成后楔形板残余应力分布。

图7 楔形板矫直过程

Fig. 7 Longitude profiled plate straightening process



(a) 大辊径矫直机上辊矫直力; (b) 小辊径矫直机上辊矫直力。

图8 矫直机上辊矫直力曲线

Fig. 8 Leveling force of upon rollers

3.2.2 配合辊系下楔形板矫直过程各辊矫直力

基于配合辊系矫直时上辊系矫直力如图9所示。从图9可以看出,配合矫直辊系中大辊径矫直辊受力状态与大辊径矫直机的矫直力分布规律基本一致,配合矫直辊系中的小辊径矫直辊的矫直力远远小于大辊径矫直辊最大矫直力,其中大直径矫直辊系中的辊4矫直力最大,原因与上述分析相同。值得注意的是,采用配合辊系的楔形板矫直力

比只采用大直径矫直辊系或小直径矫直辊系的矫直力波动大,主要原因在于楔形板从大矫直辊进入小矫直辊的过程中原有矫直状态发生改变,矫直力波动相对较大,下一步需要对配合辊系矫直机压下控制进行研究。

3.2.3 配合辊系下楔形板矫直后残余应力分布

基于建立的配合辊系有限元矫直模型,对最小板厚为10 mm的楔形板进行有限元模拟,矫直过程

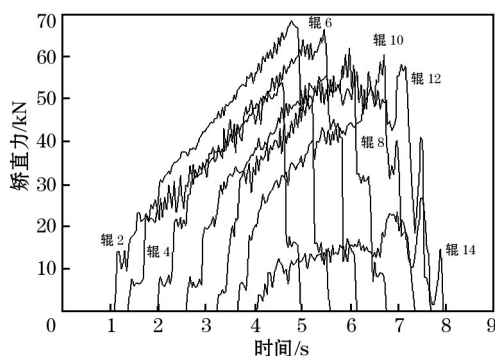
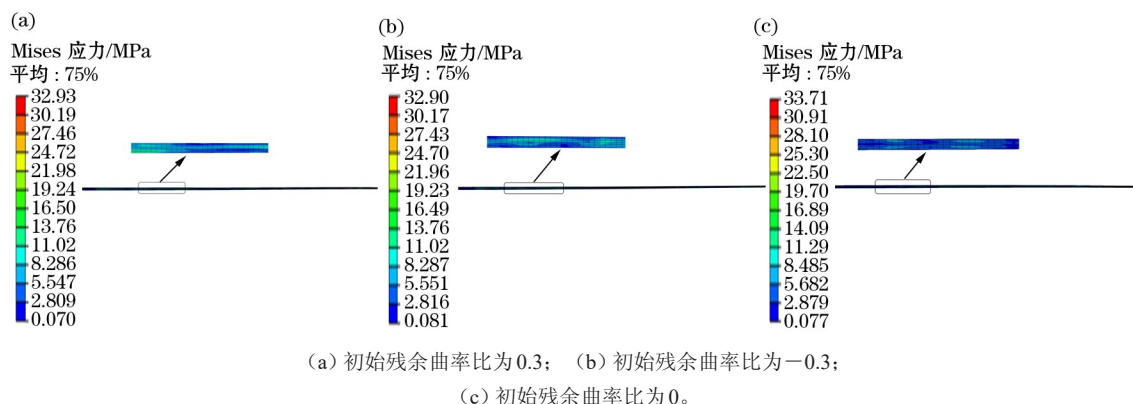


图 9 基于配合辊系矫直楔形板上辊矫直力变化曲线

Fig. 9 Leveling force of upon rollers based on matching straightening roller system



(a) 初始残余曲率比为 0.3; (b) 初始残余曲率比为 -0.3;

(c) 初始残余曲率比为 0。

图 10 矫直后的楔形板

Fig. 10 Shape of longitude profiled plate after straightening

矫直后楔形板弯曲情况和残余应力情况如图 11 和图 12 所示。由图 11 和图 12 可知,板厚分区对矫直质量有一定影响,同一板材其薄板区为 20~28 mm 比薄板区为 20~24 mm 矫直后的残余应力要小,这说明薄板区越厚,矫直后楔形板矫直质量越好。从图 12 薄板区为 20~24 mm 的局部放大图可以看出,此段残余应力较大,原因在于该段属于过渡区,在过渡区小矫直辊系依次离开改变了楔形板原矫直状态,从而导致过渡区应力变大,并且该应力主要集中在过渡区表面,因此如果在楔形板厚度分区时存

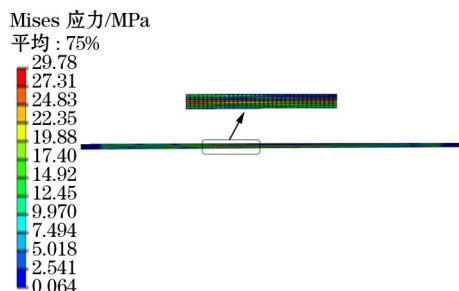


图 11 薄板区为 20~28 mm 时楔形板矫后残余应力分布

Fig. 11 Residual stress of longitude profiled plate when thin plate area is 20-28 mm

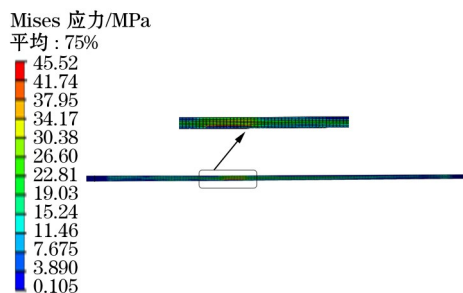


图 12 薄板区为 20~24 mm 时楔形板矫后残余应力分布

Fig. 12 Residual stress of longitude profiled plate when thin plate area is 20-24 mm

中大、小辊径矫直辊同时参与工作。矫直后的楔形板如图 10 所示。由图可知,与矫直前相比,矫直后的楔形板弯曲得到了消除,板形明显得到了改善,同时也表明基于配合矫直辊系的楔形板矫直方法对楔形板矫直具有良好效果。

3.2.4 配合辊系下不同分区对楔形板矫直效果的影响

以最小板厚为 20 mm 的楔形板为例,此时楔形板厚度分区变化范围为 20~28 mm,将薄板区分为 20~28 mm 和 20~24 mm 两种情况,基于建立的配合矫直辊系和楔形板矫直工艺,研究不同分区对楔形板矫直效果的影响。

在过渡区,那么将会出现过渡区应力偏大问题,而过渡区很短,不会影响楔形板整体矫直质量。

中性层处沿长度方向上残余应力分布如图 13 所示。由图可以看出,不同薄板区分区残余应力分布基本相同,应力沿长度方向先增大后减小,中间部分最大。本文建立的配合矫直辊系其薄板区允许的最大厚度为 32 mm,因此本文设计的小辊径矫直辊系在其承载范围内薄板区厚度较厚,有利于矫直后的板材质量。通过上述分析可知,基于配合辊

系的楔形板矫直相对于大辊径矫直机,楔形板矫直后的板形较好;相对于小辊径矫直机,楔形板矫直后的残余应力较小。

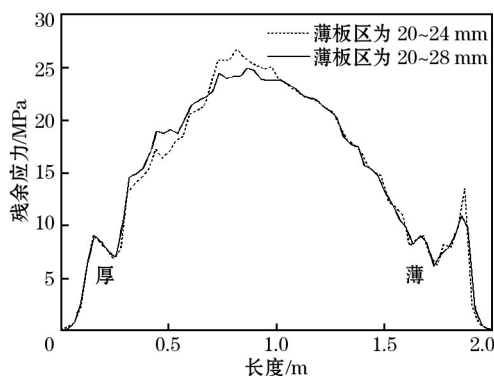


图 13 中性层处残余应力沿长度分布

Fig. 13 Residual stress along length distribution at neutral layer

4 结论

(1) 提出了一种基于配合辊系的楔形板矫直方法,设计了楔形板矫直机配合辊系及矫直工艺方案,研究了其分区原则,建立了基于配合辊系的楔形板矫直过程有限元模型。

(2) 计算了配合辊系状态下楔形板的矫直力,其小辊径辊系矫直力远小于大辊径辊系最大矫直力,而辊 4 的矫直力最大。配合辊系状态楔形板矫直力波动比常规辊系矫直楔形板矫直力波动大,原因在于楔形板从大矫直辊进入小矫直辊过程中原有矫直状态发生改变。

(3) 基于配合辊系矫直楔形板,相对大辊径矫直机板形改善明显,相对小辊径矫直,残余应力有所降低,因此,配合矫直辊系对楔形板的矫直效果较好。

参考文献:

[1] Shinichi S, Ryuji M, Tadashi O, et al. Steel products for ship-building[J]. JFE Technical Report, 2004(2): 41.

[2] 刘相华,刘鑫,付书涛,等. 变厚度板带材产品及其深加工[J]. 轧钢, 2015, 32(5): 1. (LIU Xiang-hua, LIU Xin, FU Shu-tao, et al. Variable thickness strip and its deep processing[J]. Steel Rolling, 2015, 32(5): 1.)

[3] 孙静娜,陈驰,黄华贵,等. 基于奥洛万微分方程的变厚度 LP 板轧制力模型[J]. 钢铁, 2017, 52(11): 37. (SUN Jing-na, CHEN Chi, HUANG Hua-gui, et al. Rolling force model of longitude profile LP plate based on E Orowan differential equation [J]. Iron and Steel, 2017, 52(11): 37.)

[4] 王少飞,窦爱民,时海涛,等. 2 230 冷连轧机带头飞翘原因分析与措施[J]. 中国冶金, 2018, 28(7): 54. (WANG Shao-fei,

DOU Ai-min, SHI Hai-tao, et al. Cause analysis and measures for warped head of strip in 2 230 cold tandem mill[J]. China Metallurgy, 2018, 28(7): 54.)

- [5] 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.)
- [6] 崔甫. 矫直原理与矫直机械[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2008. (CUI Fu. Straightening Principle and Straightening Machine[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.)
- [7] 连家创. 辊式板带矫直机压下量的计算和设定[J]. 冶金设备, 2010(4): 1. (LIAN Jia-chuang. Calculation and setting of roll reduction for roller plate strip straighteners[J]. Metallurgical Equipment, 2010(4): 1.)
- [8] 连家创. 矫直理论与卷取理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (LIAN Jia-chuang. Straightening Theory and Coiling Theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.)
- [9] Morris J W, Hardy S J, Lees A W, et al. Formation of residual stresses owing to tension levelling of cold rolled strip[J]. Iron-making and Steelmaking, 2001, 28(1): 44.
- [10] Huh H, Lee H W, Park S R, et al. The parametric process design of tension leveling with an elasto plastic finite element method[J]. Materials Processing Technology, 2001, 113(1): 714.
- [11] 王效岗,黄庆学,马勤,等. 厚板不充分变形矫直工艺方案研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(5): 191. (WANG Xiao-gang, HUANG Qing-xue, MA Qin, et al. Study on the plane of insufficient deformation and straightening of thick plates[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(5): 191.)
- [12] 王勇勤,徐维,严兴春,等. 中厚板横向残余应力控制对策研究[J]. 钢铁, 2012, 47(4): 60. (WANG Yong-qin, XU Wei, YAN Xing-chun, et al. Research on controlling residual stress in width direction of medium plate[J]. Iron and Steel, 2012, 47(4): 60.)
- [13] Kleiner M, Kopp R, Homberg W, et al. High-pressure sheet metal forming of tailor rolled blanks[J]. Production Engineering, 2004, 11(2): 109.
- [14] Ryabkov N, Jackel F, Van Putten K, et al. Production of blanks with thickness transition in longitudinal and lateral direction through 3D-strip profile rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 1(1): 391.
- [15] LIU Xiang-hua. Prospects for variable gauge rolling: Technology, theory and application[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(1): 1.
- [16] 杜平,胡贤磊,王君,等. 变截面轧制过程的多点动态设定[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(11): 27. (DU Ping, HU Xian-lei, WANG Jun, et al. Multiple point dynamic setting for variable cross section rolling process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(11): 27.)

(下转第 62 页)