

超大尺寸平板硫化机特厚复合钢板开发

邬早勤¹, 孔令熠², 王磊³, 骆宗安²

(1. 唐山文丰特钢有限公司, 河北 唐山 063000; 2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300401)

摘要: 采用焊前预热、真空电子束焊接、低加热速度加热、合理道次压下率轧制和热处理工艺, 成功生产出超大尺寸 (170 mm×3420 mm×10620 mm) 平板硫化机 45 钢特厚复合钢板, 其平均硬度达到 199 HB。并且, 上、下复合面位置与整板中间 1/2 位置的基体夹杂物分布相似, 冶金结合效果良好; 回火后组织较为均匀, 板材达到 GB/T 2970—2016 中 I 级探伤要求。研究发现, 不合理的焊前预热速度会加剧真空焊接过程中的坯料变形, 在温度较低、组织应力较大的情况下容易产生表面区域裂纹, 且该类裂纹在轧制过程中难以消除, 需合理控制焊前预热速度。

关键词: 复合轧制; 超大尺寸; 平板硫化机; 特厚复合板; 焊前预热速度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.018

中图分类号: TG335.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0149-06

Development of extra-thick composite steel plate for extra-large size plate vulcanizing machine

Wu Zaoqin¹, Kong Lingyi², Wang Lei³, Luo Zong'an²

(1. Tangshan Wenfeng Special Steel Co., Ltd., Tangshan 063000, China;

2. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: By adopting pre-heating before welding, vacuum electron beam welding, heating at low heating rate, rolling with reasonable pass reduction rate and heat treatment process, the 45 steel ultra-thick composite steel plate of extra-large size (170 mm×3420 mm×10620 mm) plate vulcanizing machine was successfully produced. Its average hardness is 199 HB. The distribution of matrix inclusions in the upper and lower composite surfaces is similar to that in the middle of the whole plate, and the result of metallurgical bonding is good. The microstructure is relatively uniform after tempering, and the plate meets the requirements of level I flaw detection in GB/T 2970—2016. However, the research shows that the unreasonable pre-heating speed before welding aggravates the deformation of blank during the vacuum welding. When the temperature is low and the microstructure stress is large, the cracks at surface areas occur easily. In addition, these types of cracks are difficult to eliminate during the rolling process, so it is necessary to control the pre-heating speed before welding reasonably.

Key words: composite rolling; extra-large size; plate vulcanizing machine; extra-thick composite plate; pre-heating speed before welding

平带平板硫化机主要用于生产硫化平型胶带 (输送带、传动带等), 它具有热板单位面积压力大、设备操作可靠和维修量少等优点, 其产品已广泛应用于冶金、矿山和港口等领域^[1-2]。随着平带平板硫化机的装备升级, 对超大尺寸 (宽度 ≥ 2800 mm、长度 ≥ 10000 mm) 平带平板硫化机加热板的需求越来越多, 对其性能要求也越来越高。采

用特厚钢板制备的平带平板硫化机的上、下加热板的主要功能是提供硫化所需的压力和温度, 同时要求整板具有良好的均匀性、耐热性及心部力学性能, 保证平带平板硫化机工作时工艺质量控制稳定。结合国内生产特厚复合钢板的企业状况, 采用钢锭、电渣重熔锭、水冷模铸等方式生产特厚复合钢板, 其最大质量不超过 40000 kg, 当特厚复合钢板质量超过 40000 kg 时, 国内均无企业供货。为解决超大尺寸平板硫化机加热板的生产问题, 本文采用东北大学骆宗安等^[3-6]研制的真空制坯轧制复合技术 (Vacuum Rolling Cladding, VRC), 在纯净、均质、致密的连

收稿日期: 2024-01-12; 修订日期: 2024-04-11

基金项目: 河北工业大学教改项目 (209634110)

作者简介: 邬早勤 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: wuzaoqin@163.com

铸坯上结合“增材制厚”工艺，制备出高质量特厚复合钢板——超大尺寸平板硫化机 45 钢特厚复合钢板。

1 实验材料及方法

1.1 坯料规格、成分及工艺路径

此次实验采用的 45 钢的坯料尺寸为 395 mm×2200 mm×3710 mm，需 3 块坯料组坯复合轧制，最终成品尺寸为 170 mm×3420 mm×10620 mm，单重为 48470 kg。实验所用 45 钢的化学成分见表 1。

表 1 45 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of 45 steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	P	S	C	Fe
0.46	0.27	0.61	0.012	0.005	0.56	余量

真空制坯轧制复合技术的工艺流程如图 1 所示。首先，将两块坯料进行表面铣削；然后，组坯、预热、真空焊接，进行组坯复合轧制；最后，再与第 3 块坯料进行 2 次表面铣削、组坯、预热、焊接复合轧制。相比 3 层坯料直接复合，此方案的优点如下：（1）如果采取 3 层坯料整体预热焊接，焊接时间较两层坯料整体预热焊接至少多 1 倍，导致焊接过程中温降太多，进而造成焊缝低温开裂，同时温降太多会使得焊接位置变形增大，增加后续焊接的难度，甚至导致后续焊接难以进行；（2）先将两块坯料复合轧制（整体压下率≥30%，确保 2 次轧制复合面不开裂），再与第 3 块坯料复合轧制，相比 3 块坯料直接复合轧制，有利于中间板坯的变形渗透，从而确保成品板材的内部质量。

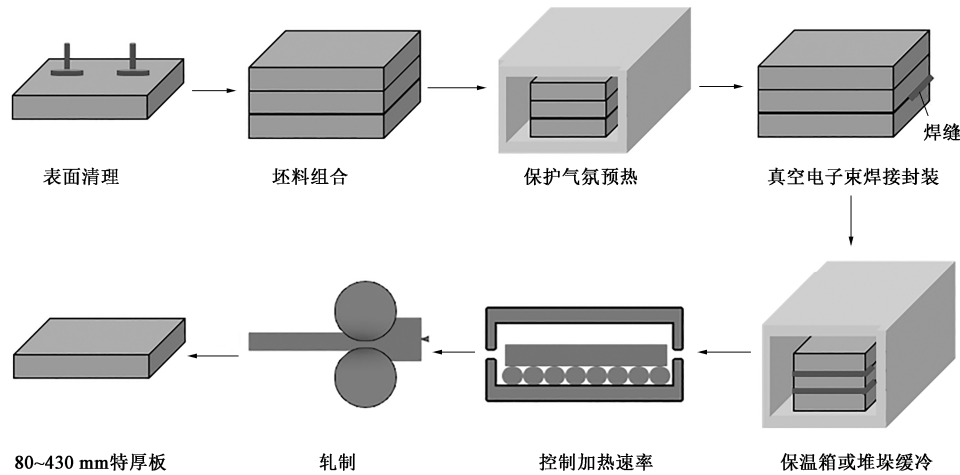


图 1 VRC 工艺流程
Fig. 1 Process flow of VRC

1.2 主要工艺参数设定

1.2.1 焊前预热工艺

由于 45 钢属于中碳钢，碳含量高，易产生裂纹，为防止焊接裂纹的出现，需要焊前预热。焊前预热在台车式低温电阻炉中进行，其工艺为：以≤80 ℃·h⁻¹

的升温速度升温至≤500 ℃并保温 12 h 以上出炉。同时，进入电子真空室焊接时，采用双电子枪技术，即 A 枪散焦预热+B 枪焊接，可有效避免焊接开裂，调控 A 枪和 B 枪的距离，进行双枪焊接，可提高焊接效率，双电子枪焊接示意图如图 2 所示。

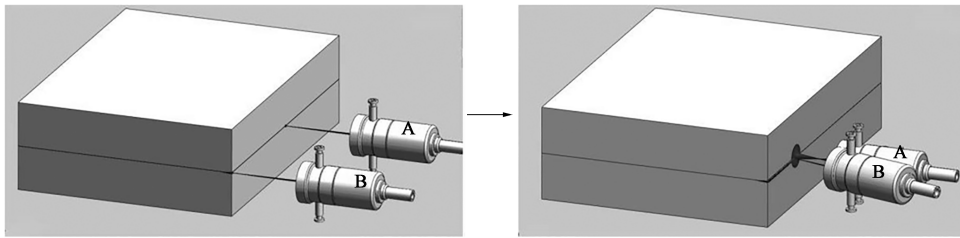


图 2 双电子枪焊接示意图
Fig. 2 Schematic diagrams of double electron gun welding

1.2.2 复合坯加热工艺

在复合坯加热过程中，由于存在组织应力和相

变应力，如果加热工艺设置不当，极易在加热过程中造成焊缝开裂，从而导致轧制复合失败。为了防

止这一现象发生，制定了合理的加热工艺：首先以 600 ℃ 保温 10 h，然后以 $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的升温速度升温至 900 ℃ 并保温 10 h，最后以 $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的升温速度升温至 1250 ℃ 并保温 10 h。

1.2.3 复合坯轧制工艺

轧制工艺为普通轧制，共 15 道次。在开轧阶段的前 3 道次，由于此阶段复合坯界面还未充分复合，道次压下率太大会引起表面和心部变形相差太大，造成焊缝本身沿长度方向产生相对“滑行”，引起焊缝开裂，结果复合失败。因此，在开轧阶段的前 3 道次采用 $\leq 3\%$ 的道次压下率进行轧制。在开轧阶段的前 3 道次结束后，此时复合界面有了一定程度的结合，增大道次压力率轧制会使轧制力进一步增加，有利于复合界面结合。因此，后续 12 道次采用 $\geq 5\%$ 的道次压下率进行轧制。

1.2.4 复合板热处理工艺

为了消除轧制过程中产生的组织应力，对轧制完成的复合钢板采用高温回火。回火工艺温度为 $(550\pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温系数为 $3.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

2 实验结果分析与讨论

2.1 力学性能检验

在 45 钢复合板上取全厚度方向试样，在 5 点不同位置（近上表面 *a* 点、上 1/4 处 *b* 点、1/2 中心 *c* 点、下 1/4 处 *d* 点、近下表面 *e* 点）进行硬度测试（图 3），每点测试 3 次并记录平均值。表 2 为 45 钢复合板厚度方向不同位置的硬度检验值表，可以看出：钢板硬度的最低值为 197 HB，最高值为 200 HB，平均值为 199 HB，达到客户要求的 $(195\pm 5)\text{ HB}$ 。



图 3 力学性能检验时 45 钢复合板厚度方向不同位置的取样示意图
Fig.3 Schematic diagram of sampling at different positions along thickness direction of 45 steel composite plate for mechanical properties test

表 2 45 钢复合板厚度方向不同位置的硬度检验值 (HB)
Table 2 Testing values of hardness at different positions along thickness direction of 45 steel composite plate (HB)

位置	<i>a</i> 点	<i>b</i> 点	<i>c</i> 点	<i>d</i> 点	<i>e</i> 点	平均值
数值	199	198	197	200	200	199

2.2 光学显微组织分析

对 45 钢复合板沿厚度方向不同位置（上复合面 *f* 点、1/2 中心 *c* 点、下复合面 *g* 点）进行取样（图 4），随后进行光学显微组织观察。

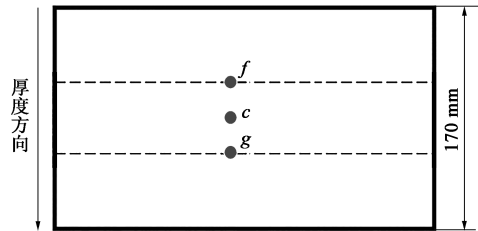


图 4 显微组织观察时 45 钢复合板厚度方向不同位置的取样示意图
Fig.4 Schematic diagram of sampling at different positions along thickness direction of 45 steel composite plate for microstructure observation

图 5 和表 3 为 45 钢复合板在厚度方向不同位置的夹杂物显微组织图和评级结果，其中评级结果根据 GB/T 10561—2023^[7] 得出。从图 5 可以看出，上、下复合面位置的夹杂物呈弥散分布，与 1/2 中心处的基体夹杂物分布相似。表 3 可以看出，上复合面和下复合面位置的夹杂物等级为 A1.0 D1.0，1/2 中心处的基体夹杂物等级为 A0.5 D1.5，说明复合面位置的冶金结合效果良好^[8]。

图 6 为 45 钢复合板在厚度方向 *a* 点、*f* 点、*c* 点、*g* 点、*e* 点这 5 个位置的光学显微组织图。从图 6 可以看出，在厚度方向的 5 个不同位置，其组织均为片状珠光体+网状、块状铁素体+少量魏氏组织，晶粒度均为 7 级左右，表明正火后组织较为均匀，复合面位置与基体正常位置的光学显微组织区别不大，复合位置未影响正火过程中正常的再结晶，符合相关金属固相复合机理。

从实际生产过程来看，由于复合坯原始厚度为 1140 mm，成品厚度为 170 mm，计算总压下率达到 85%。根据陈生禄等^[9] 和王光磊^[10] 的研究，压下率 $> 50\%$ 时，界面夹杂物随着压下率的增大而减小，数量也有所减少，钢板复合界面的夹杂物随着压下率的增大被不断压碎减小，最终达到不再对界面性能造成影响尺寸。

在探伤检验室，发现 45 钢复合板部分位置存在线状缺陷，具体缺陷情况描述如下：（1）在钢板长边一侧（图 7 上部）距边缘 260 mm 的位置，存在长度为 250 mm 左右的连续点状缺陷；（2）在钢板长边另一侧（图 7 下部）距边缘 150 mm 的位置，存在长度为 380 mm 左右的连续点状缺陷；（3）连续点状缺陷的深度为 103~104 mm；（4）其余部分

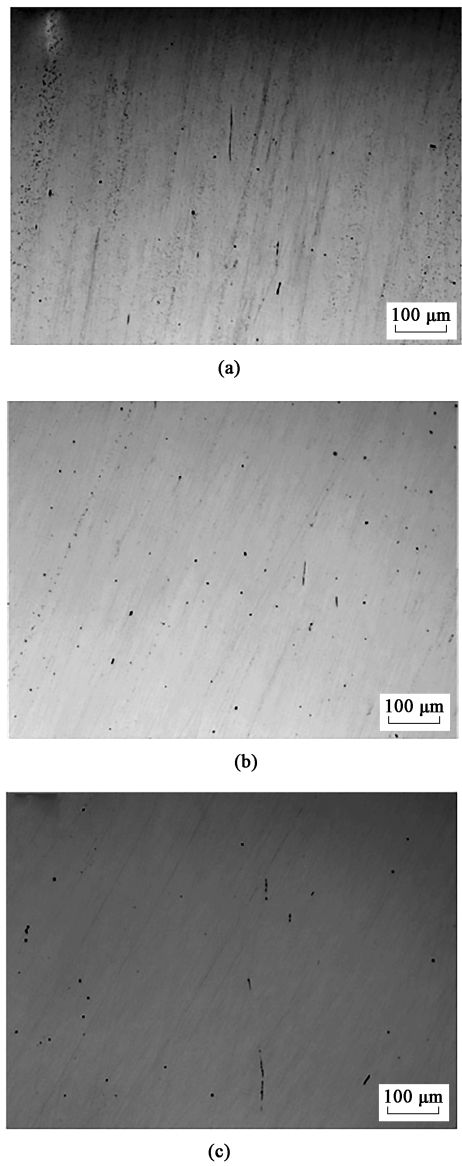


图 5 45 钢复合板在厚度方向不同位置的夹杂物显微组织
(a) 上复合面 (b) 1/2 中心 (c) 下复合面
Fig. 5 Microstructures of inclusions for 45 steel composite plate at different positions along thickness direction
(a) Upper composite surface (b) 1/2 center
(c) Lower composite surface

表 3 45 钢复合板夹杂物评级结果
Table 3 Rating results of inclusions for 45 steel composite plate

位置	非金属夹杂等级
f 点	A1.0 D1.0
c 点	A0.5 D1.5
g 点	A1.0 D1.0

根据 GB/T 2970—2016^[11] 要求, 探伤结果均达到 I 级探伤要求, 表明整板复合效果良好^[12-14]。

2.3 探伤结果分析

从缺陷深度来看, 缺陷位置在近复合面位置, 但非复合面缺陷, 因为复合坯缺陷一般为面状缺陷, 而此次缺陷呈现点状、线状。为了进一步查清缺陷原因, 沿缺陷位置垂直取样, 经光学放大镜观察发现为线状裂纹, 缺陷微观形貌见图 8。从图 8 可以看出, 线状缺陷断面形状呈三角形裂纹, 宽度在 1 mm 左右, 边缘有被压缩迹象。

通过分析 45 钢组坯的质量情况发现, 复合坯表面在铣削过程中并未发现表面裂纹。进一步分析预热和焊接过程发现, 由于预热时组坯两短边靠近加热线电阻丝, 导致出炉后两短边的温度在 330 ℃ 左右, 两长边的温度在 260 ℃ 左右, 组坯整体呈现“拱”形(图 9a)。具体表现为上板坯呈现“拱”形, 下板坯较为平直。分析原因为上板未受外力影响, 更容易产生变形, 而下板受上板重力影响难于发生变形。“拱”形的最大高度为 3~4 mm; 组坯进真空焊接室经过 45 min 左右抽真空后, 此时“拱”形消失(图 9b), 两短边和两长边均热效果良好, 温度在 260 ℃ 左右, 并且铣削面接触良好, 满足焊接要求。从整个预热和焊接过程来看: 经过约 45 min, 组坯整体呈现“拱”形消失, 说明组坯的两短边在此过程中发生了激烈的热胀冷缩, 而整个变形过程又发生在 350 ℃ 以下, 此时属于 45 钢的低塑性区, 由于温度低、组织应力较大, 易产生平行于短边的横裂纹。经真空电子束焊接、加热、轧制后, 裂纹未被进一步“压合”, 最终形成点状或线状的探伤缺陷。将预热速度由 100 ℃ · h⁻¹ 降为 80 ℃ · h⁻¹ 后, 此类点状或线状探伤缺陷消失。

3 结论

- (1) 通过采用焊前预热、真空电子束焊接、低加热速度加热、合理道次压下率轧制和热处理工艺, 成功生产出超大尺寸 (170 mm×3420 mm×10620 mm) 平板硫化机 45 钢特厚复合钢板。
- (2) 超大尺寸平板硫化机 45 钢特厚复合钢板的平均硬度达到 199 HB, 上、下复合面位置与整板中间 1/2 位置的基体夹杂物分布相似, 冶金结合的效果良好, 回火后组织较为均匀, 探伤达到 GB/T 2970—2016 中的 I 级要求。
- (3) 不合理的焊前预热速度, 会加剧真空焊接过程中的坯料变形, 在温度低、组织应力较大的情况下容易形成表面区域裂纹, 该类裂纹在轧制过程

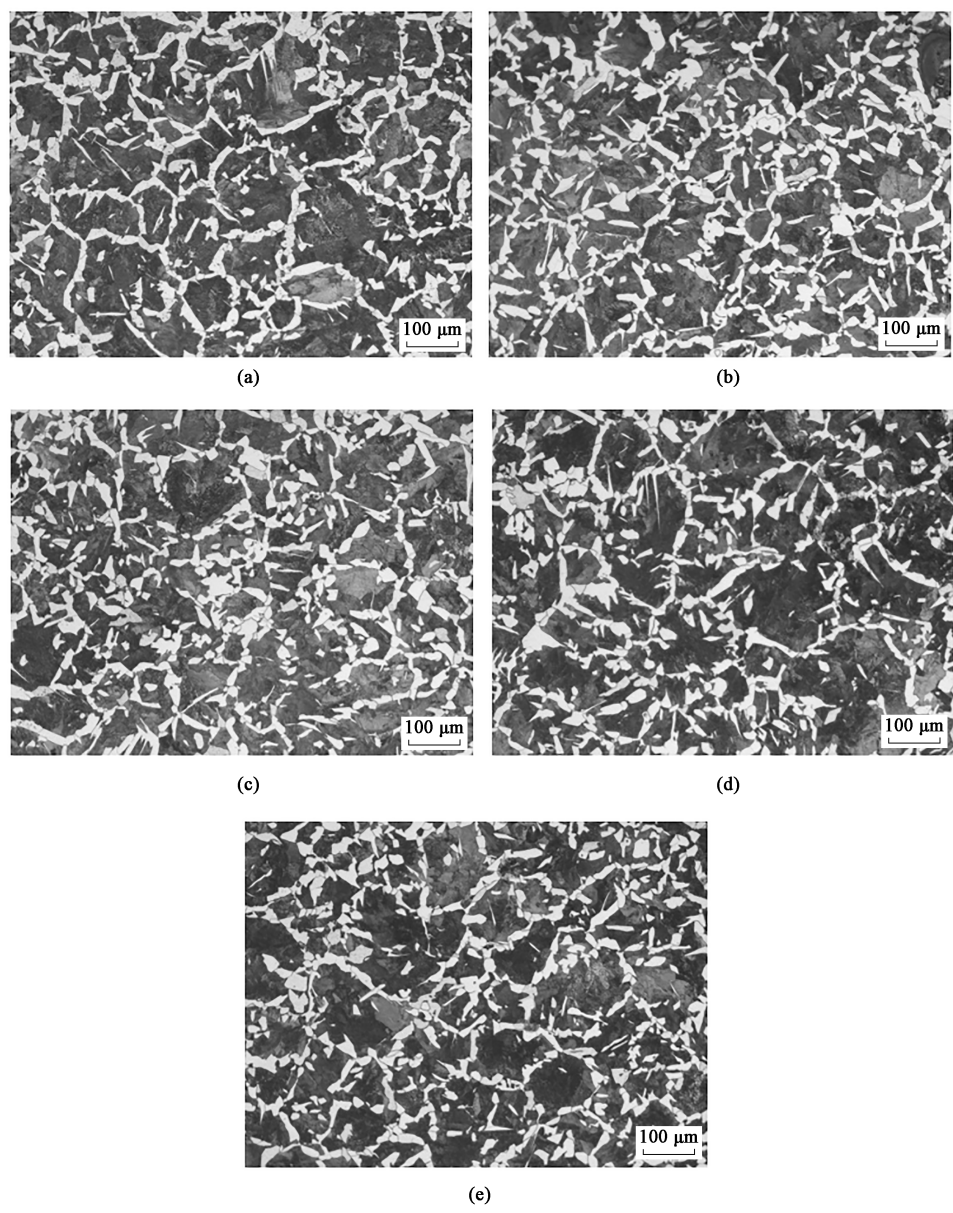


图 6 45 钢复合板在厚度方向不同位置的显微组织

(a) 近上表面 (b) 上复合面 (c) 1/2 中心处 (d) 下复合面 (e) 近下表面

Fig. 6 Microstructures of 45 steel composite plate at different positions along thickness direction

(a) Near upper surface (b) Upper composite surface (c) 1/2 center (d) Lower composite surface (e) Near lower surface

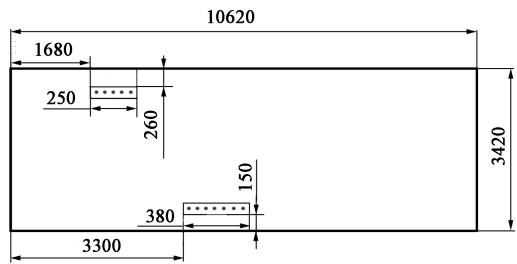


图 7 45 钢复合板探伤不合缺陷示意图

Fig. 7 Defect schematic diagram during flaw detection of 45 steel composite plate

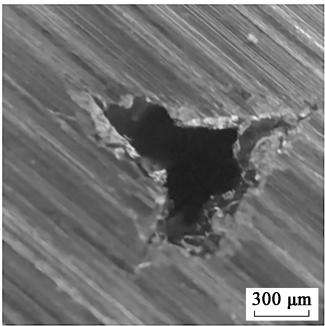


图 8 45 钢复合板的探伤缺陷形貌

Fig. 8 Flaw detection defect morphology of 45 steel composite plate

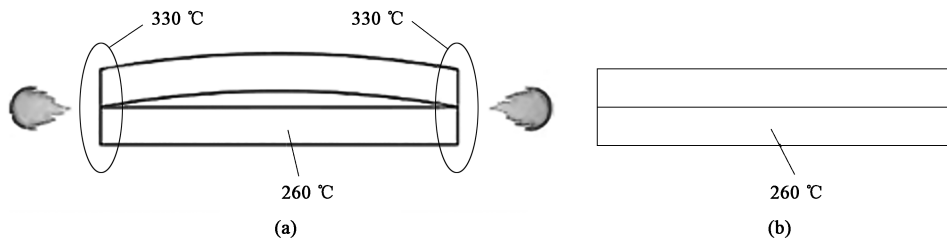


图 9 预热 (a) 和抽真空 (b) 结束时 45 钢组坯变形示意图

Fig. 9 Deformation schematic diagrams of 45 steel blocks at end of pre-heating (a) and vacuuming (b)

中难以消除。因此,需合理控制焊前预热速度。

参考文献:

- [1] 齐立东,赵靖,王海滨,等. 钢铁企业钢丝绳芯输送带无损监测技术应用与实践 [J]. 冶金设备, 2022, 279 (S2): 145-148.
Qi L D, Zhao J, Wang H B, et al. Application and practice of non-destructive monitoring technology for steel wire rope core conveyor belts in steel enterprises [J]. Metallurgical Equipment, 2022, 279 (S2): 145-148.
- [2] 齐立东,赵靖. 钢丝绳芯输送带无损检测技术应用实践 [J]. 中国钢铁业, 2020, (5): 58-60.
Qi L D, Zhao J. Application practice of non-destructive testing technology for steel wire rope core conveyor belts [J]. China Steel, 2020, (5): 58-60.
- [3] 骆宗安,杨德翰,谢广明,等. 真空制坯热轧钛/钢复合板工艺及性能 [J]. 钢铁研究学报, 2019, 31 (2): 213-220.
Luo Z A, Yang D H, Xie G M, et al. Production process and performance of titanium-steel vacuum roll-cladding plates [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31 (2): 213-220.
- [4] 谢广明,骆宗安,王光磊,等. 真空轧制不锈钢复合板的组织和性能 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32 (10): 1398-1401.
Xie G M, Luo Z A, Wang G L, et al. Microstructure and properties of stainless steel clad plate by vacuum rolling cladding [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32 (10): 1398-1401.
- [5] 王明坤,骆宗安,曾周燊,等. 热处理工艺对超级奥氏体不锈钢复合板组织与性能的影响 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2023, 44 (6): 777-782, 798.
Wang M K, Luo Z A, Zeng Z Y, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel clad plate [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2023, 44 (6): 777-782, 798.
- [6] Yang D H, Luo Z A, Xie G M, et al. Effect of vacuum level on microstructure and mechanical properties of titanium-steel vacuum roll clad plates [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25 (1): 72-80.
- [7] GB/T 10561—2023, 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评

级图显微检验法 [S].

GB/T 10561—2023, Determination of content of nonmetallic inclusions in steel—Micrographic method using standard diagrams [S].

- [8] 王一帆. 振动铸轧钛/铝复合板带力学性能及失效机制研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
Wang Y F. Study on Mechanical Properties and Failure Mechanism of Vibration Cast-rolling Ti/Al Composite Strip [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [9] 陈生禄,朱琳,刘鑫,等. 压下率对不锈钢复合板组织及结合强度的影响 [J]. 机械设计与制造, 2020, 350 (4): 236-239.
Chen S L, Zhu L, Liu X, et al. Effect of reduction rate on microstructure and bonding strength of stainless steel clad plate [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, 350 (4): 236-239.
- [10] 王光磊. 压下率对真空复合轧制特厚钢板复合性能影响规律的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
Wang G L. Study on Impact of Rolling Reduction Ratio on the Cladding Properties of Heavy Gauge Roll-cladding Steel Plate [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [11] GB/T 2970—2016, 厚钢板超声检测方法 [S].
GB/T 2970—2016, Method for ultrasonic testing of thicker steel plates [S].
- [12] 郭早勤,于健,刘建星,等. 真空焊接制坯复合轧制 45# 特厚钢板的工业生产与研究 [J]. 宽厚板, 2021, 27 (2): 37-39.
Wu Z Q, Yu J, Liu J X, et al. Industrial production and research of 45# extra heavy steel plate rolled from vacuum welding composite slab [J]. Wide and Heavy Plate, 2021, 27 (2): 37-39.
- [13] 李军,马晓生. 纵波双晶直探头检测中厚钢板近表面缺陷的试验研究 [J]. 山西冶金, 2023, 46 (4): 11-14.
Li J, Ma X S. Experimental study on the detection of near surface defects in medium and heavy steel plates using longitudinal wave double crystal straight probes [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46 (4): 11-14.
- [14] 郭早勤,于健,谢广明,等. 大厚度 P20 高合金模具钢复合轧制工艺开发与研究 [J]. 宽厚板, 2021, 27 (6): 4-6.
Wu Z Q, Yu J, Xie G M, et al. Development and research of composite rolling process for large thickness high alloy mould steel P20 [J]. Wide and Heavy Plate, 2021, 27 (6): 4-6.