

# 超大尺寸高性能异材质多复合平板硫化机加热板的研究与开发

邬早勤<sup>1</sup>, 谢广明<sup>2</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 骆宗安<sup>2</sup>

(1. 唐山文丰特钢有限公司, 河北唐山 063200; 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 300131)

**摘要:** 采用真空焊接复合制备了45钢+Q355B钢的AB型坯料, 并通过调整该AB型复合坯料加热时在加热炉的上、下烧嘴的加热负荷, 对AB型钢板进行了不对称复合轧制。通过二次真空焊接复合制备了45钢+Q355B钢+Q355B钢+45钢的ABBA型坯料, 并对焊缝进行焊后高温回火处理, 得到了ABBA型轧制复合板。结果表明: ABBA型复合板的界面为良好的冶金结合, 平均硬度值为(180±10) HBW, 组织成分均匀, 各位置的硬度无明显差异。基材45钢中主要由片状珠光体和块状铁素体组成, 复材Q355B钢主要由大量铁素体和少量珠光体组成。复合板厚度方向的断面收缩率平均值为62.67%, 性能优异。此外, 还实际生产了170 mm×3420 mm×10620 mm的ABBA型复合板, 单重超过48000 kg。

**关键词:** 45钢; Q355B钢; 复合板; 轧制; 高温塑性

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.013

**中图分类号:** TG335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0102-07

## Research and development on heating plate for ultra large size, high performance, different materials and multi composite plate of vulcanization machine

Wu Zaoqin<sup>1</sup>, Xie Guangming<sup>2</sup>, Wang Lei<sup>3</sup>, Luo Zong'an<sup>2</sup>

(1. Tangshan Wenfeng Special Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, 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 300131, China)

**Abstract:** AB billet of 45 steel+Q355B steel was prepared by vacuum welding, and the AB billet was rolled asymmetrically by adjusting the heating load of upper and lower burners of heating furnace when the AB billet was heated. Then, ABBA billet of 45 steel+Q355B steel+Q355B steel+45 steel was prepared by secondary vacuum welding, and the weld seams were subjected to high-temperature tempering treatment after welding to obtain ABBA rolled composite plates. The results show that the interface of ABBA composite plate is good metallurgical bonding, the average hardness value is (180±10) HBW, the microstructure composition is uniform, and the hardness of each position has no obvious difference. The substrate 45 steel is mainly composed of flake pearlite and block ferrite, while the composite Q355B steel is mainly composed of a large amount of ferrite and a small amount of pearlite. The average cross-section shrinkage rate in the thickness direction of composite plate is 62.67%, indicating excellent performance, and 170 mm×3420 mm×10620 mm ABBA composite board with a unit weight exceeding 48000 kg is produced actually.

**Key words:** 45 steel; Q355B steel; composite plate; rolling; high temperature plasticity

平板硫化机生产线主要用于钢丝绳芯输送带的成形、硫化和卷取包装, 同时, 也可硫化各类织物芯如棉、尼龙或其他纤维织物的输送带<sup>[1-3]</sup>。其核心装备为用于成形的上、下加热板, 力学性能一般具有如下特点: (1) 在加热板中间或近中间位置打孔, 要求具有良好的心部力学性能; (2) 加热板工

作时, 在中间或近中间位置孔洞通蒸汽用于散热, 要求加热板具有良好的耐热变形; (3) 加热板体积较大, 长度×宽度×高度一般为(4600~15600) mm×(600~2800) mm×(70~150) mm, 要求整板性能均匀。结合国内河北钢铁集团舞阳钢铁有限责任公司、江阴兴澄特种钢铁有限公司和南阳汉冶钢铁集团有限公司等国内特厚板生产企业来看, 采用钢锭、电渣重熔锭、水冷模铸等方式生产的特厚板, 其最大单重不超过40000 kg。近些年, 随着平板硫化机生产线的不断迭代升级, 对其核心装备加热板的性能

收稿日期: 2023-10-13; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 河北工业大学教学改革项目(209334110)

作者简介: 邬早勤(1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: wuzaoqin@163.com

要求也越来越严苛。对于板宽 $\geq 2800$  mm、长度 $\geq 10000$  mm、单重超过 40000 kg 的平板硫化机加热板, 目前国内均无厂家供货, 导致下游平板硫化机企业无法生产相匹配的设备, 且与其相关的输送带产品均需进口, 成为“卡脖子”产品。因此, 能否生产单重超过 40000 kg 的平板硫化机加热板成为创新技术攻关。复合钢板因其兼具基材和复材的优点, 已经被广泛应用于石化、天然气和海洋装备等领域<sup>[4-6]</sup>。唐山文丰特钢有限公司结合现有复合坯装备优势, 制定了合理的工艺开发线路, 开发并生产了高性能超大单重平板硫化机加热复合钢板。

目前, 复合钢板的制备方法主要有爆炸复合法和轧制复合法<sup>[7-9]</sup>。然而, 爆炸复合法对环境污染严重已经被逐渐淘汰, 轧制复合法成为生产复合板最主流的方法<sup>[10-12]</sup>。采用 45 钢+Q355B 钢+Q355B 钢+45 钢复合(简称 ABBA 型)生产高性能超大单重平板硫化机加热钢板, 相比单一材质 45 钢, 其具有下表面硬度均匀、厚度方向性能优异和机械加工性能优良等优点<sup>[13]</sup>。目前, 真空焊接、同材质复合等工艺技术的相关文献报道较多, 但关于对称轧机上轧制的 45 钢和 Q355B 钢, 即 AB 型复合板, 尤其是难焊接的中碳钢的相关研究较少, 而且后续将 AB 型复合板轧制成 ABBA 型特厚板的轧制工艺的相关研究也较少。因此, 本文采用真空焊接+轧制技术制备了复合钢板, 并对复合钢板的力学性能及基材和复材的组织进行了表征和分析。

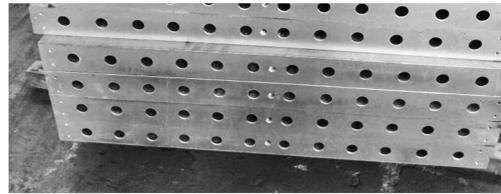


图1 平板硫化机中间打孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of punching holes in middle of plate for vulcanization machine

## 1 45 钢+Q355B 钢复合板工艺线路

复合板的长度 $\times$ 宽度 $\times$ 高度规格为 10620 mm $\times$ 3420 mm $\times$ 170 mm, 单重为 48470 kg。钢板关键性能指标需满足如下要求:

- (1) 钢板上下表面硬度需满足  $(180\pm 10)$  HBW;
- (2) 出于安全性考虑, 尽量避开在复合层处打孔;
- (3) Z 向(厚度方向)的性能需满足断面收缩率不小于 35%。

为了满足钢板相关性能的要求, 整体设计思路如下。

- (1) 采用 4 层复合设计轧制, 简称 ABBA 型, 按成品厚度为 170 mm 计算, 理论计算 4 层成品厚度分别为: 上层 45 钢为 30 mm、中间 1 层 Q355B 钢为 55 mm、中间 2 层 Q355B 钢为 55 mm 和下层 45 钢为 30 mm。其中 45 钢和 Q355B 钢的化学成分见表 1。

表 1 45 钢和 Q355B 钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 45 steel and Q355 steel

元素		C	Si	Mn	P	S	Fe
GB/T 699—2015 <sup>[14]</sup>	45 钢	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	$\leq 0.025$	$\leq 0.005$	余量
GB/T 1591—2018 <sup>[15]</sup>	Q355B 钢	$\leq 0.22$	$\leq 0.55$	$\leq 1.60$	$\leq 0.025$	$\leq 0.005$	余量
测量	45 钢	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	$\leq 0.025$	$\leq 0.005$	余量
	Q355B 钢	$\leq 0.22$	$\leq 0.55$	$\leq 1.60$	$\leq 0.025$	$\leq 0.005$	余量

(2) 按步骤(1)理论计算成品厚度后反推 4 块连铸坯料的尺寸, 确定原始坯料尺寸。

(3) 真空焊接复合过程如下:

(a) 首先将 45 钢(A 型)和 Q355B 钢(B 型)两块坯料开坯为相同宽度、相同长度的中间坯;

(b) 将 45 钢和 Q355B 钢中间坯的表面进行铣削、翻转和对齐;

(c) 将 AB 型组合坯进行焊前预热;

(d) 将 AB 型组合坯进行真空室电子束焊接;

(e) 将 AB 型组合坯加热、轧制成 AB 型中间坯;

(f) 将两块 AB 型中间坯的表面进行铣削、翻转和对齐;

(g) 将两块 AB 型组合坯进行真空室电子束焊接;

(h) 将 ABBA 型复合坯进行焊后热处理;

(i) 将 ABBA 型复合坯加热、轧制成 ABBA 型钢板。

## 2 AB 型和 ABBA 型复合板轧制工艺技术

### 2.1 AB 型复合板轧制工艺

AB 型复合板 (45 钢+Q355B 钢) 轧制时, 为了防止因 A、B 两种材质延展性不一致而导致钢板上翘, 并撞击宽厚板轧机的导卫, 从而阻碍轧制过程的顺利进行, 出钢时将高温延展性较好的 A 面向上, 这样轧制钢板由“上翘”转为“下扣”, 而钢

板“下扣”时有轧机内的机架辊和辊道的支撑, 可以确保轧制相对顺利进行。

轧制后的钢板成品如图 2 所示。从图 2a 和图 2b 可知, 钢板的头尾均出现了上表面延展大于下表面的情况, 这可能是由于 45 钢和 Q355B 钢变形抗力的差异导致了变形的不协调。通过火切 4 边后, 在两个长边的复合面位置发现了分层开裂现象, 在两个短边的复合面位置未发现分层开裂现象, 经无损探伤检测发现钢板未达到复合效果。

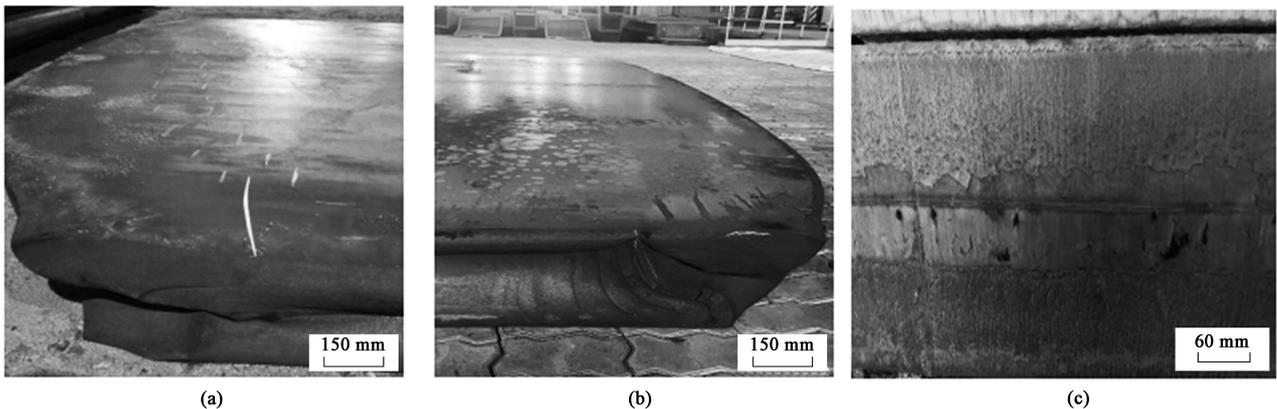


图 2 AB 型复合板的实物图

(a) 头部 (b) 尾部 (c) 火切面

Fig. 2 Physical images of AB type composite plate

(a) Head (b) Tail (c) Fire cutting surface

通过对轧制过程进行详细分析, 认为发生分层的主要原因有以下两点: (1) AB 型复合板轧制时, 由于上、下表面延展不一致, 在轧制时发生了“下扣”现象, 这一过程会导致复合面在轧制时承受弯曲负荷; (2) 出轧机后, 随着轧件长度变长且钢板高温塑性较好, 在辊道支撑的作用下部分钢板会发生“反弯”, 从而改善整体板形进而再次承受弯曲负荷。以上, 在整个轧制过程中复合面承受较大的弯曲载荷, 在轧制初期复合板的复合面未充分结合的情况下, 当弯曲载荷大于焊缝强度时便会发生开裂现象。

为解决上述问题, 一般通过调整轧制线高度改变上、下工作辊负荷以改善上、下表面的不均匀变形, 但是该方法在上、下表面的不均匀变形较小时效果显著, 不均匀变形较大时则无明显差异。由于钢的高温塑性随着温度的升高而增加, 因此在加热时针对高温塑性较好的上表面降低其加热炉上烧嘴的加热负荷, 确保低温低塑性。同时, 保持加热炉下烧嘴的加热负荷不变, 确保

高温高塑性。这样在加热结束出钢后, 其塑性较好的上表面温度在 1230 °C 左右, 其塑性较差的下表面温度在 1280 °C 左右, 在复合板厚度方向形成约为 50 °C 的温度梯度, 同时, 在轧制过程中适当调整轧制线, 成功地完成了 AB 型不对称复合坯板的轧制。

### 2.2 ABBA 型复合板轧制工艺

通过 AB 型 (45 钢+Q355B 钢) 组坯方式轧制得到中间坯后, 需将两块 AB 型中间坯通过二次真空焊接复合轧制为 ABBA 型 (45 钢+Q355B 钢+Q355B 钢+45 钢)。此时, 需要采用真空焊接复合面的材质为 Q355B 钢+Q355B 钢, 通常此类焊接不需要焊前预热和焊后热处理。因此, ABBA 型复合板首次轧制时未进行焊前预热和焊后热处理, 但在轧成钢板后出现了整板探伤不合格, 火切完 4 边后, 长边出现了与图 2c 相似的分层开裂缺陷。

针对上述缺陷详情调查了轧制过程和焊接复合过程。其中, 在轧制过程中未发现异常, 由于 AB-

BA 型轧制属于对称轧制，轧制过程中焊缝不存在承受弯曲负荷的现象，因此，对 AB 型焊缝开裂的原因分析并不适用。

在调查焊接复合过程中，发现在真空焊接完两个长边后，两个短边出现了“弓”型现象，其最大缝隙距离为 1.5~2.0 mm，该距离远远大于单一材质 Q355B 钢复合距离 ( $\leq 1$  mm)，因此，判断上、下层 A 型 (45 钢) 对 ABBA 型真空焊接变形有较大影响。据此推测，在加热过程中的热应力较单一材质 Q355B 钢更大，因此，可能是 ABBA 型轧制在低温段 ( $\leq 600$  °C) 产生较大的热应力，当热应力大于焊缝强度时也会发生开裂现象。

为了解决上述问题，对 ABBA 型复合板进行焊后热处理。热处理工艺为：升温速度  $\leq 100$  °C · h<sup>-1</sup>，600 °C 保温 10 h。上述工艺可达到以下两个目的：(1) 通过高温回火处理，消除焊接应力；(2) 由于加热炉的燃料介质为高炉煤气，其点火温度在 700 °C 左右，将焊后且热处理后的复合板带温转运至加热炉加热，达到降低加热炉低温段加热速度的目的。通过上述工艺调整，成功完成了 ABBA 型复合板的轧制。

### 3 试验结果分析与讨论

#### 3.1 钢板硬度检验

复合板从上至下依次可分成顶部 45 钢复合层 (上复合层)、45 钢/Q355B 钢上复合界面 (中间层 1)、复合板心部 Q355B 钢 (1/2)、Q355B 钢/45 钢下复合界面 (中间层 2) 和底部 45 钢复合层 (下复合层)。表 2 为 ABBA 型复合板厚度方向不同位置的硬度，从表 2 可以看出，中间层 1、1/2、中间层 2 的硬度值符合 GB/T 1591—2018<sup>[14]</sup> 要求。上复合层、下复合层的硬度值分别为 185 和 187 HBW，满足设计要求 ( $(180 \pm 10)$  HBW)。

表 2 ABBA 型复合板厚度方向不同位置的硬度 (HBW)

Table 2 Hardnesses of ABBA type composite plate at different positions in thickness direction (HBW)

位置	上复合层	中间层 1	1/2	中间层 2	下复合层
硬度	185	143	161	144	187

图 3 为 ABBA 型复合板表面硬度测试取样点示意图，表 3 为不同取样点对应的硬度值，其中， $B$  为取样点 1、2、4、5 的中心点距离边部的距离，通

常  $B \geq 20$  mm。从表 3 可以看出，5 个不同位置的表面硬度最小值为 176 HBW，最大值为 185 HBW，平均值为 180 HBW，整体较为均匀，满足合同设计要求 ( $(180 \pm 10)$  HBW)。

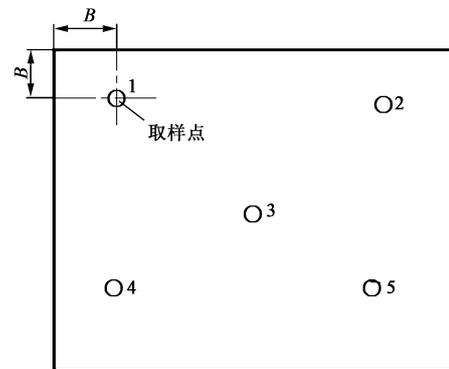


图 3 ABBA 型复合板表面硬度取样点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sampling points for surface hardness of ABBA type composite plate

表 3 ABBA 型复合板表面不同位置的硬度 (HBW)

Table 3 Hardnesses of ABBA type composite plate at different positions of surface (HBW)

位置	1	2	3	4	5	平均值
数值	183	180	176	185	178	180

#### 3.2 力学性能检验

分别对上、下复合面进行拉伸试验取样，测试结果如图 4 和表 4 所示。上复合面的屈服强度为 393 MPa，抗拉强度为 562 MPa，伸长率为 23%；下复合面的屈服强度为 378 MPa，抗拉强度为 557 MPa，伸长率为 24%。按照 GB/T 1591—2018<sup>[15]</sup> 判定，其

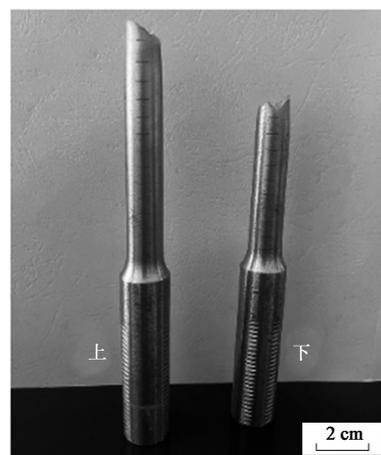


图 4 ABBA 型复合板上、下复合面拉伸试样断裂图

Fig. 4 Fracture diagram of tensile sample for upper and lower composite surfaces of ABBA type composite plate

表 4 ABBA 型复合板的拉伸试验结果  
Table 4 Results of tensile tests for ABBA type composite plate

性能	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
GB/T 1591—2018 <sup>[15]</sup>	285	450~600	17
上复合面	393	562	23
下复合面	378	557	24

屈服强度高于标准要求约 90~110 MPa, 抗拉强度高于标准要求下限约 100 MPa, 伸长率高于标准要求下限约 7%。上述力学性能值优异, 对比同类产品, 其塑性优于 45 钢, 其强度高于 Q355 钢。沿复合板的厚度方向取 3 个拉伸试样, 分别称为 Z1、Z2、Z3, 试验结果如图 5 和表 5 所示。从试验结果看: 3 个试样 Z1、Z2、Z3 的断面收缩率检验值分别为 63%、63%、62%, 平均值为 62.67%, 满足 GB/T 5313—2010<sup>[16]</sup> 的要求。复合钢板厚度方向的性能远超 45 钢的厚度方向性能值 ( $\leq 15\%$ )。

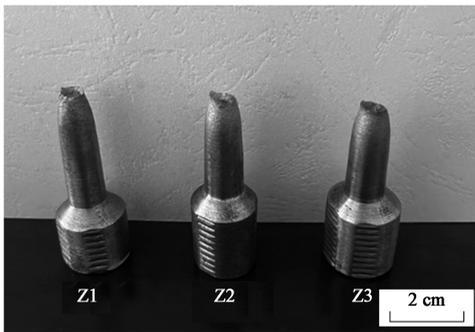


图 5 ABBA 型复合板厚度方向拉伸测试试样  
Fig. 5 Tensile test specimens of ABBA type composite plate in thickness direction

表 5 ABBA 型复合板厚度方向的断面收缩率  
Table 5 Cross-section shrinkage rates of ABBA type composite plate in thickness direction

试样	Z1	Z2	Z3	平均值
断面收缩率/%	63	63	62	62.67

### 3.3 光学显微组织分析

为了更准确地找出 AB 型复合层位置, 从复合板整体厚度方向取样, 通过冷酸 (盐酸和水体积配比为 1:1) 刷洗, 结果如图 6 所示。根据图 6 显示, 复合层厚度约为 32 mm, 取金相试样进行组织观察, 结果如图 7 所示。

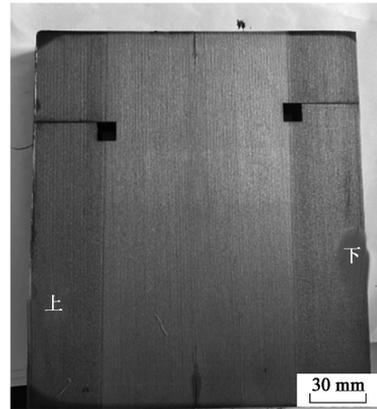


图 6 ABBA 型钢板全厚度冷酸侵蚀的实物图  
Fig. 6 Physical image of ABBA type steel plate with full thickness cold acid corrosion

图 7 为 ABBA 型钢板在厚度方向的上复合面和下复合面的夹杂物光学显微图和评级结果。从图 7 可以看出: 上复合面位置的夹杂物评级为 A0.5 D1.0, 下复合面位置的夹杂物评级为 A1.5 D1.0。上、下复合面位置夹杂物整体呈弥散分布, 部分位

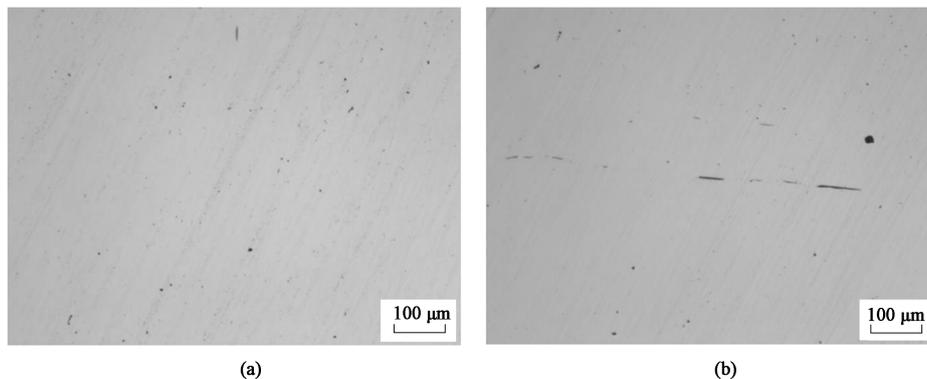


图 7 ABBA 型复合板微观组织图  
(a) 上复合面 (b) 下复合面

Fig. 7 Microstructure diagrams of ABBA type composite plate  
(a) Upper composite surface (b) Lower composite surface

置与普通钢板中心夹杂物等级相近，说明复合面位置达到了冶金结合的效果。

图 8 为 ABBA 型复合板在上复合面和下复合面不同位置的显微组织图。由图 8 可以看出：上、下复合面即 45 钢的组织为片状珠光体+网状、块状

铁素体，晶粒度均在 7 级左右，组织较为均匀；上、下复合面即 Q355B 钢的组织为铁素体+珠光体，晶粒度均在 7 级左右，组织较为均匀；上、下复合面组织与相邻材质组织相近，在复合面位置分界明显。

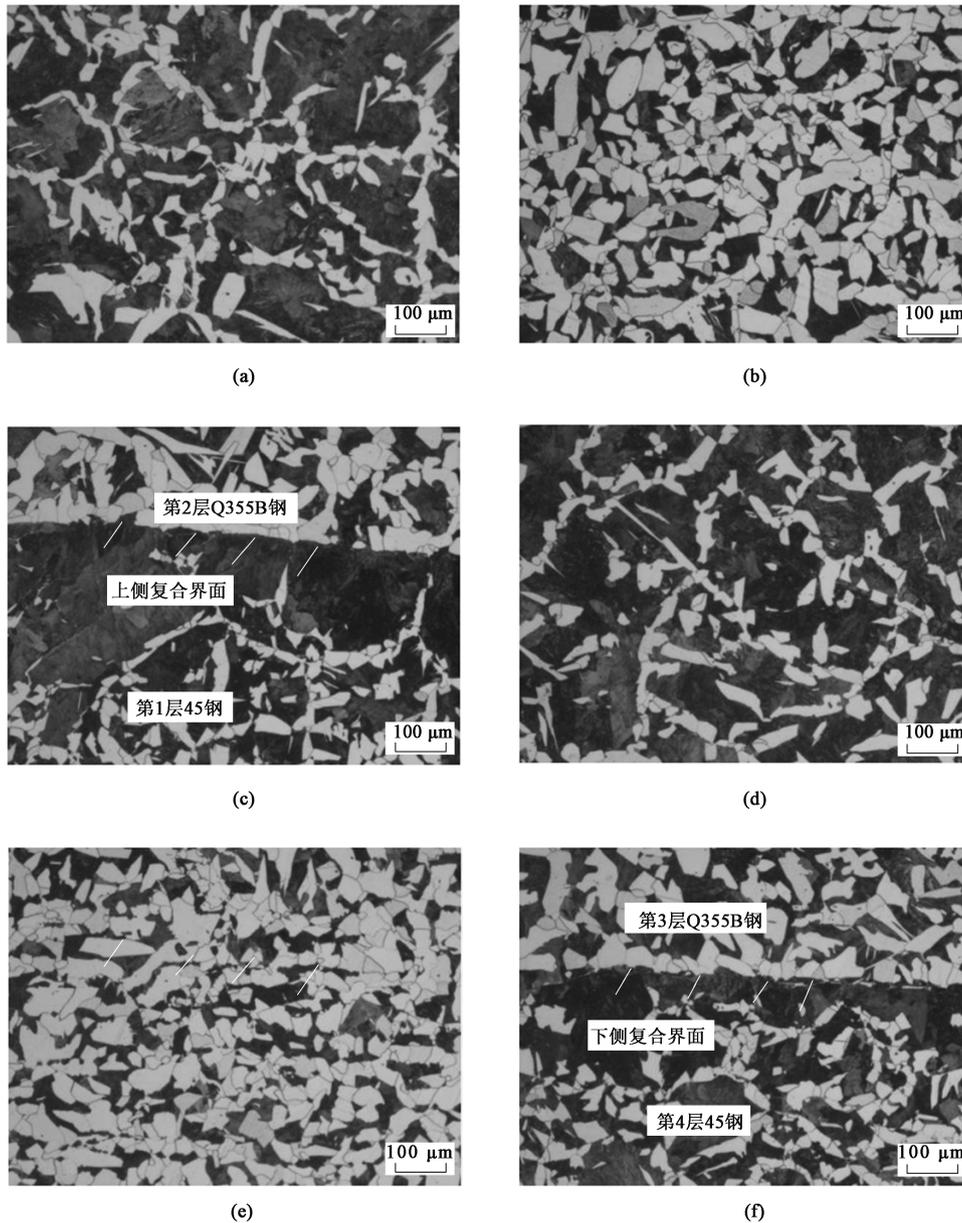


图 8 ABBA 型复合板复合界面不同位置的显微组织

(a) 上复合面 45 钢 (b) 上复合面 Q355B 钢 (c) 上侧复合界面 (d) 下复合面 45 钢 (e) 下复合面 Q355B 钢 (f) 下侧复合界面

Fig. 8 Microstructures at different positions of composite interface surface for ABBA type composite plate

(a) 45 steel of upper compound surface (b) Q355B steel of upper compound surface (c) Upper side composite interface  
(d) 45 steel of lower compound surface (e) Q355B steel of lower compound surface (f) Lower side composite interface

在轧制过程中，随着温度的降低，高温奥氏体经历以下组织转变：首先是先共析铁素体和奥氏体的转变，其中先共析铁素体主要在 Q355B 钢（贫碳侧）形核并生长，同时碳元素向剩余的奥氏体富

集，即向 45 钢（富碳侧）迁移<sup>[17]</sup>；随后，当温度进一步降低时，会发生珠光体转变。在这一过程中，由先共析铁素体形成的组织主要为铁素体，而由富碳奥氏体形成的组织则主要为珠光体<sup>[18]</sup>。这导致在

复合面处形成了明显的分界线。

## 4 结论

(1) 通过调整加热炉的加热负荷,优化了 AB 型复合板(45 钢和 Q355B 钢)的高温塑性,实现了在对称轧机上的不对称轧制。

(2) 对 ABBA 型(45 钢+Q355B 钢+Q355B 钢+45 钢)复合板进行焊后高温回火处理,既消除了焊接应力,又通过调整加热炉的加热速度,防止了复合板在轧制过程中的开裂。

(3) ABBA 型复合板的夹杂物评级满足标准,表现了良好的冶金结合。由于两侧原始组织碳含量相差较大,晶粒形核过程中碳元素从贫碳区向富碳区流动。上、下复合层和界面层的组织均匀,分界清晰,反映了碳元素在不同区域的分布和影响。

(4) ABBA 型复合板的硬度值满足(180±10) HBW 的要求,而且厚度方向的断面收缩率平均值为 62.67%,满足要求,展现了复合板良好的力学性能。

### 参考文献:

- [1] Cao Y D, Ma J X, Lin C, et al. Feasibility of developing strain-hardening geopolymer composite plates by hot-pressing method [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 138: 104956.
- [2] Ma F W, Chen S X, Han L, et al. Experimental and numerical investigation on the strength of polymer-metal hybrid with laser assisted metal surface treatment [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019, 33: 1112-1129.
- [3] Kang X Q, Yao C, Qiao L, et al. Processing and mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene reinforced by silver nanoparticles [J]. *Polymer and Polymer Composites*, 2017, 25: 683-688.
- [4] 胡建华, 王小花, 陈建勋, 等. 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料热压缩试验与有限元模拟 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (7): 222-227.  
Hu J H, Wang X H, Chen J X, et al. Hot compression test and finite element simulation on 20 carbon steel/316L stainless steel composite material [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (7): 222-227.
- [5] 林继彬, 阮金华, 张宏昱, 等. 电辅助不锈钢/碳钢轧制复合厚度比变化规律 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (9): 98-107.  
Lin J B, Ruan J H, Zhang H Y, et al. Change law on composite thickness ratio in electrically assisted rolling for stainless steel/carbon steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (9): 98-107.
- [6] 秦程, 夏源, 谭礼健, 等. 汽车用 310S/GH4169 钢镍复合板多道次热轧界面扩散行为 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (9): 152-157.  
Qin C, Xia Y, Tan L J, et al. Interfacial diffusion behavior on multi-pass hot rolling for automobile 310S/GH4169 steel-nickel composite plate [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (9): 152-157.
- [7] 张杭永, 臧伟, 郭龙创. 爆炸焊接法制备的钛/钢复合管板界面组织与力学性能分析 [J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40 (6): 48-51.  
Zhang H Y, Zang W, Guo L C. Microstructure and mechanical properties of interface for titanium/steel clad tube sheet prepared by explosive welding [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40 (6): 48-51.
- [8] 白于良, 刘雪峰, 王文静, 等. 钛/钢复合板及其制备应用研究现状与发展趋势 [J]. *工程科学学报*, 2021, 43 (1): 85-96.  
Bai Y L, Liu X F, Wang W J, et al. Current status and research trends in processing and application of titanium/steel composite plate [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43 (1): 85-96.
- [9] 董运涛, 吴江涛, 樊科社, 等. 爆炸-轧制 TA1/Q345R 复合板的组织与性能 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (17): 146-149.  
Dong Y T, Wu J T, Fan K S, et al. Research on microstructure and properties of TA1/Q345R clad plates prepared by explosive welding-rolling process [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (17): 146-149.
- [10] 李豪. 热轧复合不锈钢-碳钢层合板的界面层性能与塑性变形行为 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.  
Li H. Interface Layer Properties and Plastic Deformation Behavior of Hot-rolled Stainless Steel-carbon Steel Laminates [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [11] 田雅琴, 秦建平, 李小红. 金属复合板的工艺研究现状与发展 [J]. *材料开发与应用*, 2006, 21 (1): 40-43.  
Tian Y Q, Qin J P, Li X H. Current state and trend of metal clad sheet manufacture technology [J]. *Development and Application of Materials*, 2006, 21 (1): 40-43.
- [12] 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. Process and properties of vacuum billet hot rolled titanium/steel composite plate [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2019, 31 (2): 213-220.
- [13] Liu B X, Fan K Y, Yin F X, et al. Effect of caliber rolling reduction ratios on the microstructure and mechanical properties of 45 medium carbon steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 774: 138954-138967.
- [14] GB/T 699—2015, 优质碳素结构钢 [S].  
GB/T 699—2015, Quality carbon structure steels [S].
- [15] GB/T 1591—2018, 低合金高强度结构钢 [S].  
GB/T 1591—2018, High strength low alloy structural steels [S].
- [16] GB/T 5313—2010, 厚度方向性能钢板 [S].  
GB/T 5313—2010, Steel plates with through-thickness characteristics [S].
- [17] Wang S, Liu B X, Chen C X, et al. Microstructure, mechanical properties and interface bonding mechanism of hot-rolled stainless steel clad plates at different rolling reduction ratios [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 766: 517-526.
- [18] Liu B X, An Q, Yin F X, et al. Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54: 11357-11377.