

基于预制铝层的大厚度钢/铝复合板轧制复合技术

张石磊¹, 张永才¹, 孙晓光¹, 贾 焱², 刘文文², 王 涛²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对大厚度钢/铝复合板轧制成形过程中极易出现结合强度不高或翘曲的问题, 提出了基于预制铝层的大厚度钢/铝复合板轧制复合技术, 借助大厚比轧制和铝-铝界面易结合的特点, 实现了大厚度钢/铝复合板的连续高强轧制。以 Q235 钢和 1050 铝为基材, 采用冷轧预制和异温预制两种预制铝层工艺, 以总压下率 22.7% 制备出厚度为 34 mm 的钢/铝复合板。对复合板界面剪切强度和组织分析结果表明: 两种预制铝层工艺均可制备出界面剪切强度超过 74 MPa 的钢/铝复合板, 且界面组织得到细化, 复合板界面结合强度超过铝基体; 剪切断口位于铝基体, 且呈现韧性断裂; 1050 铝加热产生的氧化膜在轧制过程中会破碎弥散, 不影响复合板界面结合强度。

关键词: 大厚度钢/铝复合板; 预制铝层; 界面剪切强度; 界面结合强度; 晶粒尺寸

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.024

中图分类号: TG33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 05-0197-06

Rolling composite technology for large thickness steel/aluminum composite plate based on prefabricated aluminum layer

Zhang Shilei¹, Zhang Yongcai¹, Sun Xiaoguang¹, Jia Yi², Liu Wenwen², Wang Tao²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problem of low bonding strength or warping which is prone to occur during the rolling process of large thickness steel/aluminum composite plate, the rolling composite technology of large thickness steel/aluminum composite plate based on prefabricated aluminum layer was proposed. Then, with the help of large thickness ratio rolling and advantage of easy bonding characteristic of aluminum-aluminum interface, the continuous high-strength rolling of large thickness steel/aluminum composite plate was realized. Taking Q235 steel and 1050 aluminum as substrates, the steel/aluminum composite plate with a thickness of 34 mm at a total reduction rate of 22.7% was prepared by two prefabricated aluminum layer processes, namely cold rolling prefabrication and non-isothermal prefabrication. The analysis of the shear strength of interface and the microstructure for the composite plate shows that the steel/aluminum composite plate with a shear strength of interface exceeding 74 MPa can be prepared by both prefabricated aluminum layer processes, and the interfacial microstructures are refined, and the bonding strength of interface for the composite plate exceeds the strength of the aluminum matrix. The shear fracture is located in the aluminum matrix and presents a ductile fracture. The oxide film formed by the heating of 1050 aluminum will break and disperse during the rolling process, without affecting the bonding strength of interface for the composite plate.

Key words: large thickness steel/aluminum composite plate; prefabricated aluminum layer; shear strength of interface; bonding strength of interface; grain size

钢/铝复合板因兼具钢和铝组元的优点, 被广泛

应用于船舶、轨道交通、电力系统和新能源汽车等领域, 其厚度尺寸也从几十微米到几十毫米不等。例如: 空气冷凝器用钢/铝复合板厚度通常低于 2 mm; 高端炊具用钢/铝复合板的厚度常为 5 mm 左右; 舰船用钢-铝结构过渡接头厚度超过了 20 mm; 轨道交通直线电机车用钢/铝复合感应板, 厚度超过了 30 mm。

近年来, 为了实现高性能钢/铝复合板的制备^[1-2], 研究人员开展了大量的理论和实验研究, 应用了爆炸复合法、轧制复合法、铸轧复合法、钎

收稿日期: 2024-01-03; 修订日期: 2024-04-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFB3714301); 青年科学基金资助项目 (52005361); 中央引导地方科技发展资金资助项目 (YDZJSX2022 A022); 中国博士后科学基金会特别资助项目 (2023T160474); 山西省基础研究计划联合资助项目 (太重) 产业发展类重点项目 (TZLH20230818006); 中车重大专项 (2023CTA016)

作者简介: 张石磊 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 15192764010@163.com

通信作者: 刘文文 (1990-), 男, 博士, 副教授

E-mail: liuwenwen@tyut.edu.cn

焊复合法等多种工艺。爆炸复合法在制备厚度小于 20 mm 的钢/铝复合板方面具有优势,所制备的产品在各个领域均获得了广泛应用。Wang J M 等^[3]使用爆炸焊接复合法制备了高性能的铝合金/铝/钢复合板,界面实现了有效结合且呈现规则的正弦波。固-液铸轧法主要用于制备厚度小于 5 mm 的钢/铝复合板。苗鹏^[4]采用液-固铸轧法制备出厚度为 3 mm 的铝/钢复合板,发现随着浇覆温度的提升,复合板界面结合强度增强。Chen G 等^[5]使用固-液铸轧法以 29% 的压下率制备出厚度为 3.8 mm 的钢/铝复合板,其剥离强度达到 $16 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

相比于爆炸复合法和铸轧复合法,轧制复合法因其制备的产品尺寸精度高、层厚比均匀、界面性能稳定等优点,逐渐成为钢/铝复合板制备的主流方向^[6],且根据组元温度,轧制复合法可分为冷轧、热轧和异温轧制。冷轧复合法主要用于制备薄规格的钢/铝复合板,其单次压下率需要在 50% 以上才能实现界面有效复合。例如, Fu L 等^[7]采用 60% 的压下率实现了钢-铝界面的高强结合。与冷轧法相比,热轧可以制备不同厚度规格的钢/铝复合板,且界面更易实现有效结合。然而,因钢和铝的热物性差异巨大,热轧过程中变形主要集中在铝侧,极易出现翘曲现象,同时钢和铝界面在高温下易被氧化,导致界面结合强度较低。例如:李民权^[8]开展了不同温度下的钢/铝复合板热轧,发现升高温度可提升界面结合强度,但会加剧钢和铝组元的变形不协调,导致翘曲现象出现;黄华贵等^[9]为了避免组元变形不协调,采用对称组坯,制备出轧制后总厚度为 13.5 mm 的钢/铝复合板,但钢层厚度明显低于铝层厚度。异温轧制主要用来解决轧制过程中因组元性能差异显著而导致的变形不协调问题,该方法将难变形高熔点金属加热至高温,而对易变形低熔点金属不加热或加热至低温,减小了组元间变形抗力的差异,实现组元变形协调。Xiao H 等^[10]利用感应加热实现钢和铝组件的不同温度,成功地生产出厚度为 2 mm 的钢/铝复合板。此外, Cheng Y Z 等^[11]采用一种新的异温轧制复合方法将铝加热至高温,而钢采用常温,以 30% 的压下率下制备出厚度为 7 mm 的钢/铝复合板,界面剪切强度超过 70 MPa。虽然,理论上的轧制复合法可以制备出不同厚度规格的钢/铝复合板,但当总厚度超过 10 mm 时,轧制复合法制备存在诸多难点,研究成果还相对较少。甚至 Spina R 等^[12]认为只有爆炸复合法才能制备出总厚度为 20 mm 的钢/铝复合板。出现该问题的原因为

钢、铝组元性能差异过大,当钢层和铝层均较厚时,常规的直接轧制复合过程中界面高强结合所需的大压下率会导致组元变形不协调,无法连续制备。

综上所述,为了制备出厚度超过 30 mm 的钢/铝复合板,本文提出了基于预制铝层的大厚度钢/铝复合板轧制复合技术。该方法首先将一层薄铝板和厚钢板组坯,利用组元大厚比的特性,增强钢-铝界面剪切变形,实现钢-铝界面预先复合;然后将预复合的钢/铝复合板再与厚铝板组坯,经过高温热轧,借助铝-铝界面高温易复合的特点,以小压下率实现铝-铝界面复合并强化已复合的钢-铝界面,降低界面有效结合所需的压下率,为大厚度钢/铝复合板的高效制备提供一种新方法。

1 实验材料与方 法

1.1 实验材料

本实验中,基材为 Q235 钢,中间薄层和覆层均为 1050 铝。其中, Q235 钢板厚度为 30 mm,中间薄层 1050 铝板厚度为 2 mm,覆层 1050 铝板厚度为 12 mm,各组元材料均处于退火状态,材料的力学性能参数如表 1 所示。

表 1 材料的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of materials

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
Q235 钢	453	316	25
1050 铝	100	90	25

1.2 实验过程

基于预制铝层的大厚度钢/铝复合板轧制复合技术原理如图 1 所示,分为预制铝层和热轧复合两个工艺过程。(1) 预制铝层。去除中间薄层 1050 铝板和 Q235 钢板表面的油污和氧化膜,并打磨粗糙;将中间薄层 1050 铝加热至温度 500 °C 并保温 1 h 或常温,然后与 Q235 钢组坯,经过二辊轧机轧制,在钢板上预制铝层,形成预复合板。(2) 热轧复合。去除预复合板和覆层 1050 铝板表面油污、氧化物,并打磨粗糙;将覆层 1050 铝板与预复合板组坯,使铝-铝界面接触,放入加热炉中加热至 500 °C 并保温 1 h,然后利用二辊轧机轧制,制备出钢/铝复合板。实验过程中,轧机为二辊轧机,轧辊直径为 $\Phi 360 \text{ mm}$,轧制速度为 $65 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。预制铝层过程中轧制压下率为 12.5%,热轧复合过程中轧制

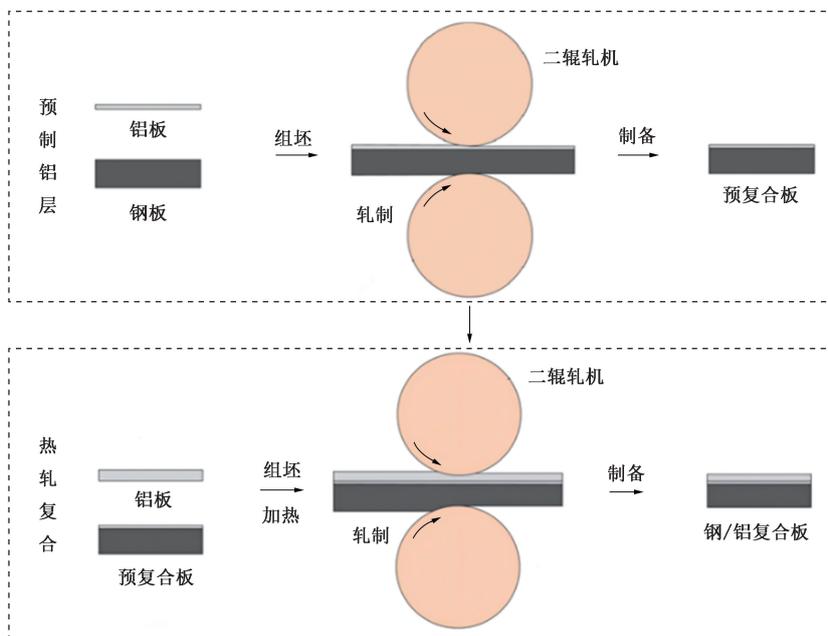


图 1 基于预制铝层的大厚度钢/铝复合板轧制复合技术原理图

Fig. 1 Principle diagram of rolling composite technology for large thickness steel/aluminum composite plate based on prefabricated aluminum layer

压下率为 15%，总压下率为 22.7%。为了验证该工艺的可行性，选取两种预制铝层工况开展研究，具体为：(1) 工况 a，1050 铝和 Q235 钢均为常温；(2) 工况 b，1050 铝加热至 500 °C，而 Q235 钢为常温。

对两种典型工况下获得的钢/铝复合板进行形貌、结合性能和微观组织分析。采用带能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 的扫描电子显微镜获得钢-铝界面微观形貌和元素分布。考虑复合板中钢侧厚度比铝侧厚度大，为了更为准确地测量复合板界面剪切强度，将钢侧厚度减薄，并按照 GB/T 6396—2008^[13] 切割出试样。采用 INSTRON5969 型电子万能材料试验机对界面剪切强度进行测试，测试过程中速度为 0.5 mm·min⁻¹，每个工况测试 3 组数据，取平均值。采用电子背散射衍射 (Electron Backscattered Diffraction, EBSD) 分

析复合板钢-铝界面的微观组织，扫描区域测量 50 μm (轧制方向)、60 μm (法线方向)，步长为 0.1 μm。

2 实验结果分析

2.1 钢-铝界面形貌分析

获得工况 a 和工况 b 下钢/铝复合板界面的宏观形貌如图 2 所示。从图 2 中可以看出，复合板平直，界面结合紧密，未发现明显的孔洞、裂纹等缺陷。测量复合板厚度，两种工况下复合板厚度均为 34 mm，其中，钢侧厚度为 26.3 mm，铝侧厚度为 7.7 mm。工况 a 和工况 b 所获得的复合板厚度的差异极小，可以忽略。钢/铝复合板轧制过程中，钢的总变形量为 3.7 mm，钢侧相对于钢基体的变形量为

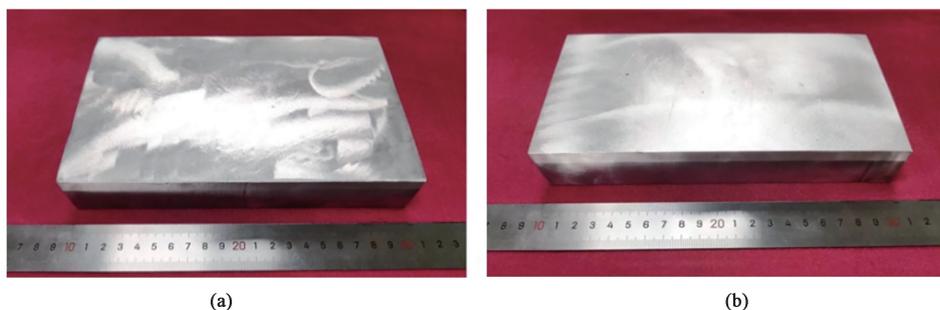


图 2 工况 a (a) 和工况 b (b) 下制备的复合板宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphologies of composite plates prepared under working condition a (a) and working condition b (b)

12.3%；而铝的总变形量为 6.3 mm，铝侧相对于铝基体的变形量为 45%，明显高于钢的变形量。由于轧制过程中总压下率仅为 22.7%，远低于直接热轧复合所需压下率^[12]，因此，虽出现了铝侧变形率高于钢侧变形率的情况，但复合板未出现翘曲现象。

为了进一步分析，利用扫描电镜（Scanning Electron Microscope, SEM）和 EDS 对复合板界面进行表征，结果如图 3 和图 4 所示。工况 a 和工况 b 所获得的复合板界面均实现了有效结合，未出现孔洞等缺陷。图 3 中界面线扫结果显示，工况 a 和工

况 b 所获得的复合板界面扩散层厚度分别为 1.46 和 1.43 μm ，未出现明显偏差。工况 b 在预制铝层过程中，1050 铝被加热至 500 $^{\circ}\text{C}$ ，其表面会生成一层氧化膜，但工况 b 的线扫结果未发现界面有氧元素聚集的现象。这是因为在 500 $^{\circ}\text{C}$ 时，轧制过程中粗糙且极硬的钢与带氧化膜且基体极软的铝接触，在轧制力作用下粗糙且极硬的钢刺穿了铝表面的氧化膜，使氧化膜弥散分布到界面，如图 4 所示。因此，在线扫过程中钢-铝界面未发现氧聚集现象，1050 铝因加热形成的氧化膜未影响钢-铝界面的有效结合。

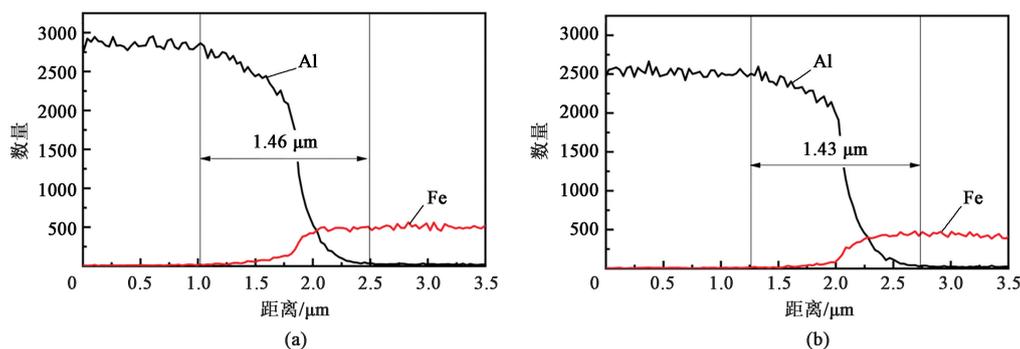


图 3 工况 a (a) 和工况 b (b) 所获复合板界面 EDS 图

Fig. 3 EDS diagrams of composite plate interface obtained by working condition a (a) and working condition b (b)

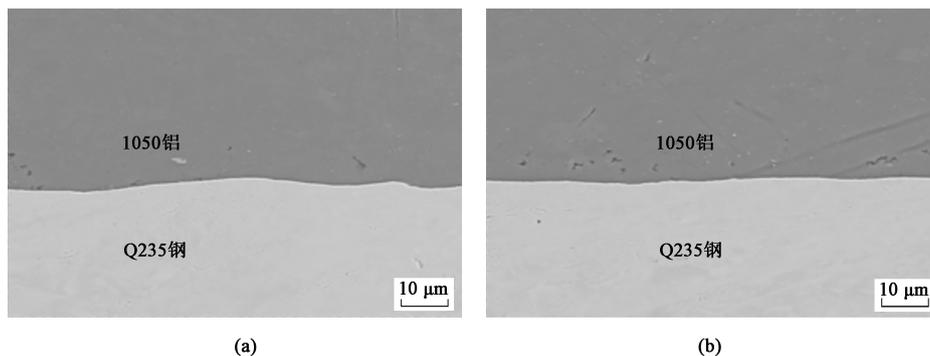


图 4 工况 a (a) 和工况 b (b) 所获复合板界面 SEM 图

Fig. 4 SEM images of composite plate interface obtained by working condition a (a) and working condition b (b)

2.2 剪切性能分析

对工况 a 和工况 b 获得的复合板进行剪切强度测试，工况 a 获得的复合板界面剪切强度为 74.13 MPa，而工况 b 获得的复合板界面剪切强度为 74.05 MPa，两种工况获得的复合板剪切强度差异极小，如图 5 所示。为了分析该现象，观察两种工况下复合板剪切断口宏观形貌和钢侧微观形貌，如图 6 所示。根据宏观断口可知，工况 a 和工况 b 所获复合板的剪切断裂位置均位于铝基体，说明钢-铝界面的剪切强度高于铝基体强度。对钢侧的微观形貌进行分析，发现工况 a 试样断口的部分区域存在较多的韧窝，

呈现韧性断裂模式；而部分区域断面比较光滑，为解理断口。根据断裂特征，可知试件在剪切过程中铝基体在剪切作用力下先发生滑移，然后出现韧性断裂。工况 b 试样断口与工况 a 相似，同样存在韧窝区和解理面，但工况 b 试件的断口处存在更多的韧窝结构。根据工况 a 和工况 b 所获复合板的断裂位置和断裂方式可知，热轧复合过程中铝表面因加热产生的氧化膜并未影响铝-铝界面的结合强度^[14]。结合界面 SEM 和 EDS 结果可知，大厚度钢/铝复合板轧制复合过程中，1050 铝表面因加热形成的氧化膜不会影响复合板界面的有效结合。

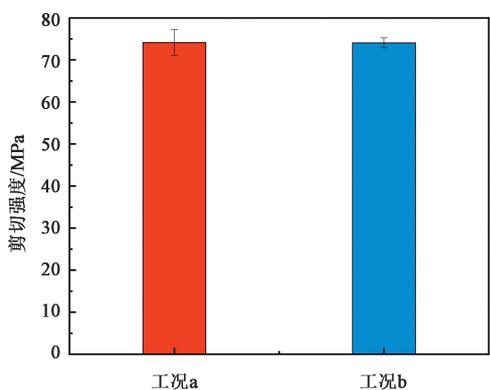


图 5 钢/铝复合板剪切强度

Fig. 5 Shear strength of steel/aluminum composite plate

2.3 组织性能分析

为了分析工况 a 和工况 b 所获复合板界面剪切

断裂位置均位于铝基体的原因，对复合板界面进行了 EBSD 表征，得到的反极图 (Inverse Pole Figure, IPF) 如图 7 所示，其中 I 区域为铝侧基体，II 区域为钢-铝界面，III 区域为钢侧基体。从图 7 中可知，复合板界面结合良好，未出现金属间化合物层。对钢侧基体晶粒进行统计，发现工况 a 和工况 b 所获得的钢/铝复合板的钢侧基体晶粒的平均尺寸分别为 7.17 和 12.29 μm ，工况 a 的钢侧基体晶粒尺寸明显小于工况 b。出现该现象的原因为：与工况 a 相比，工况 b 的钢侧基体获得的热量更多，晶粒受热长大。对铝侧基体晶粒进行统计，发现工况 a 和工况 b 所获得的复合板的铝侧基体晶粒的平均尺寸分别为 4.02 和 4.61 μm ，两者差异较小，但工况 b 下的晶粒尺寸更大。

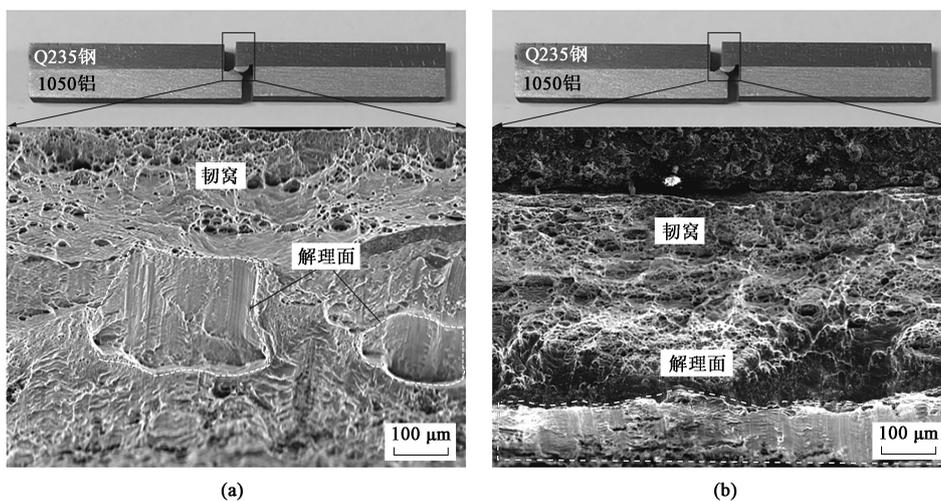


图 6 工况 a (a) 和工况 b (b) 下钢/铝复合板剪切断面形貌

Fig. 6 Shear fracture morphologies of steel/aluminum composite plates under working condition a (a) and working condition b (b)

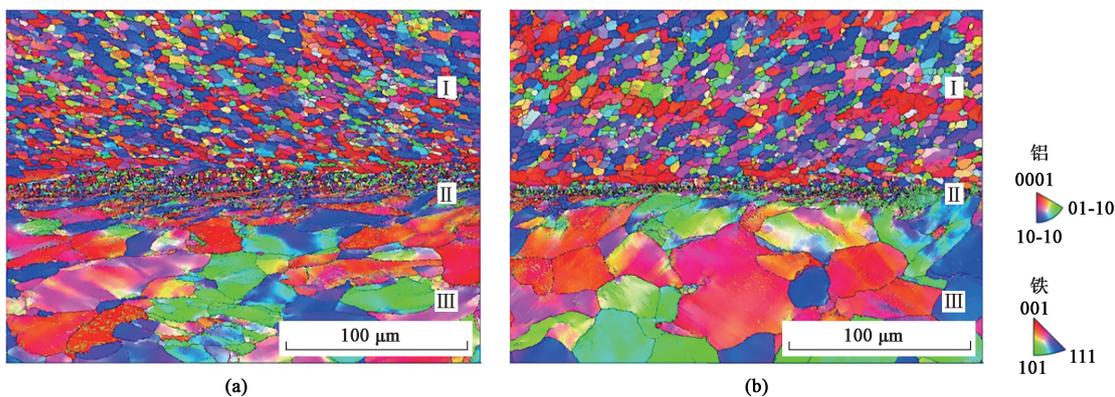


图 7 工况 a (a) 和工况 b (b) 下钢/铝复合板界面区域的 IPF

Fig. 7 IPF of interface area for steel/aluminum composite plates under working condition a (a) and working condition b (b)

对钢-铝界面晶粒尺寸进行统计，工况 a 和工况 b 所获得的复合板界面钢侧晶粒平均尺寸分别为

0.67 和 1.52 μm ，界面铝侧晶粒平均尺寸分别为 0.52 和 1.75 μm 。与复合板基体组织的晶粒尺寸相

比, 钢-铝界面处的晶粒尺寸远小于基体。根据前人研究结果, 界面晶粒尺寸减小有利于提升界面结合强度^[15], 同时晶粒尺寸越小, 材料的组织性能越好, 强度也越高^[16]。因此, 对工况 a 和工况 b 所获得的复合板进行剪切测试过程中, 钢-铝界面的结合强度高于铝基体强度, 剪切断口出现在铝基体上。而工况 a 和工况 b 所获得的复合板的铝侧晶粒尺寸相差极小, 故剪切强度也基本一致。

3 结论

(1) 提出了一种基于预制铝层的大厚度钢/铝复合板轧制复合技术, 并以 Q235 钢和 1050 铝合金为基材, 制备出了厚度为 34 mm 的钢/铝复合板。

(2) 冷轧预制铝层工艺和异温预制铝层工艺所制备的大厚度钢/铝复合板均可实现界面有效复合, 界面剪切强度均超过了 74 MPa。

(3) 两种预制铝层工艺制备的复合板界面未出现化合物层, 且界面组织与基体相比得到极大细化, 促使界面结合强度高于铝基体, 剪切断口出现在铝基体。

(4) 1050 铝因加热产生的氧化膜在轧制过程中会发生破碎, 未影响钢-铝界面和铝-铝界面的剪切强度。

参考文献:

- [1] 刘玲, 陈拂晓, 孙红英, 等. 3Al AFA 钢的高温拉伸变形行为 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (4): 80-88.
Liu L, Chen F X, Sun H Y, et al. High-temperature tensile deformation behavior of 3Al AFA steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (4): 80-88.
- [2] 付艺枫, 阮昕懿, 兰亮云, 等. 汽车用超高强度 25MnB 钢的热变形行为及本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (6): 133-140.
Fu Y F, Ruan X Y, Lan L Y, et al. Thermal deformation behavior and constitutive equation of ultra-high strength 25MnB steel for automobile [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (6): 133-140.
- [3] Wang J M, Zhang Y. A study on weldability of aluminum alloy-aluminum-steel transition joints [J]. Advanced Materials Research, 2013, 631-632: 713-716.
- [4] 苗鹏. 高性能铝/钢层状复合板的制备及其性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
Miao P. Preparation and Properties of High-performance Aluminum/Steel Laminated Composite Plates [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [5] Chen G, Li J T, Xu G M. Bonding process and interfacial reaction in horizontal twin-roll casting of steel/aluminum clad sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 246: 1-12.
- [6] 戴刚, 陈科, 刘元铭, 等. 预制波纹钢/铝复合板轧制工艺模拟与界面结合性能研究 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (1): 114-123.
Dai G, Chen K, Liu Y M, et al. Research on rolling process simulation and interface bonding performance of prefabricated corrugated steel/aluminum composite plates [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (1): 114-123.
- [7] Fu L, Xiao H, Yu C, et al. Bonding enhancement of cold rolling Al/steel composite plates via self-nano film modification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117427.
- [8] 李民权. 钢/铝复合板变形规律和性能的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
Li M Q. Study on the Deformation Laws and Properties of Steel/Aluminum Composite Plates [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [9] 黄华贵, 赵阳, 王超, 等. 界面涂层对厚规格热轧钢/铝复合板界面结构与力学性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (14): 30-36.
Huang H G, Zhao Y, Wang C, et al. Influence of plasma spraying on interfacial microstructure and mechanical property of thick steel/aluminum laminated plate by hot rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (14): 30-36.
- [10] Xiao H, Xu P P, Qi Z C, et al. Preparation of steel/aluminum laminated composites by differential temperature rolling with induction heating [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (2): 231-239.
- [11] Cheng Y Z, Liu W W, Wang T, et al. Study on the effects of initial temperature and thickness ratio of component metals on the preparation of aluminum/steel clad plates by the new different temperature rolling method [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 95: 229-241.
- [12] Tricarico L, Spina R. Experimental investigation of laser beam welding of explosion-welded steel/aluminum structural transition joints [J]. Materials & Design, 2010, 31 (4): 1981-1992.
- [13] GB/T 6396—2008, 复合钢板力学及工艺性能试验方法 [S]. GB/T 6396—2008, Clad steel plates—Mechanical and technological test [S].
- [14] 李民权, 蒋福林, 张辉, 等. 钢/铝复合板热轧复合变形规律 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19 (4): 644-648.
Li M Q, Jiang F L, Zhang H, et al. Deformation rule of steel/aluminum metal-laminate material during hot roll bonding [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19 (4): 644-648.
- [15] Wang H D, Zhou Z Y, Wang K S, et al. Microstructure and corrosion behaviors of friction stir-welded Q235 low-carbon steel joint [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30 (12): 2517-2530.
- [16] Kaya Y. Microstructural, mechanical and corrosion investigations of ship steel-aluminum bimetal composites produced by explosive welding [J]. Metals, 2018, 8 (7): 544.