DOI: 10.3901/JME.2019.14.030

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*

黄华贵 赵阳 王超 燕猛

(燕山大学国家冷轧板带装备及工艺技术工程研究中心 秦皇岛 066004)

摘要: 针对厚规格钢/铝复合板坯料厚度大、组元差异显著、难以直接轧制复合等特点,采用等离子涂覆技术与热轧复合工艺相结合成功制备了厚规格钢/铝复合板,通过结合界面剪切强度测试和 SEM、EDS 等检测方法,分别探究了轧制道次、温度与压下率对界面结构与力学性能的影响规律。结果表明,与直接轧制复合相比,经表面喷涂处理后的界面结合强度明显提高,且拉剪断裂面均位于钢与涂层界面。在单道次轧制条件下,随着轧制压下率增加,钢/涂层的微观界面得到改善,界面结合强度逐渐提高。在 400~500 °C 范围内,钢/铝界面扩散层厚度随轧制温度提高呈增加趋势、界面结合强度先增大后减小。由于变形的不协调性,增加轧制道次会破坏前一道次界面复合结果,导致结合强度剧烈下降。当轧制温度为 450 °C、单道次压下率为 40% 时,钢/铝复合板界面剪切强度达 66 MPa,符合相关标准要求。研究成果为厚规格钢/铝复合板生产制备提供了一种新途径。

关键词: 厚规格钢/铝复合板; 等离子喷涂; 热轧复合工艺; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG142

Influence of Plasma Spraying on Interfacial Microstructure and Mechanical Property of Thick Steel/Aluminum Laminated Plate by Hot Rolling

HUANG Huagui ZHAO Yang WANG Chao YAN Meng

(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: It is difficult to fabricate thick steel/aluminum laminated plate directly by existing rolling process because of the large thickness and obvious difference of characteristics between steel and aluminum. Plasma coating technology and hot rolling process are combined to prepare thick steel/aluminum plate successfully. The effects of rolling pass, temperature and reduction on interfacial bonding characteristics and mechanical properties of steel/aluminum plate were investigated by the interface shear strength test and SEM, EDS. The results show that the interface bond strength after treatment of plasma spraying is significantly improved compared with direct rolling, and the shear fracture surface is located at the steel/coating interface. Under the condition of single pass rolling, with the rolling reduction increases, the micro-interface of the steel/coating is improved, and the bonding strength of the steel/aluminum plate is gradually improved. In the range of 400 °C to 500 °C, the thickness of the steel/aluminum interface diffusion layer increases with the increase of rolling temperature generally, and the bonding strength first increases and then decreases. Due to the uncoordinated deformation, increasing the rolling pass will destroy the bonding effect previously, resulting in a sharp decrease of bonding strength. The steel/aluminum plate has an interface shear strength of 66 MPa when the rolling temperature is 450 °C and the single pass reduction is 40%, which comply with the relevant. Research results provide a new way for the production of thick steel/aluminum plate.

Key words: thick steel/aluminum laminated plate; plasma spraying; hot rolling process; micro-interface; mechanical property

0 前言

钢/铝复合板兼具有钢的高强度与铝的优良导电性、导热性、耐蚀性等优点,广泛应用于散热器、

电热传输、石化、汽车、船舶、水利水电、环保等领域^[1-3],产品厚度规格从几十微米至几十毫米,钢和铝的层厚比跨度也较大。例如,汽车水箱散热片、电热传输片等钢/铝复合板厚度通常不到 2 mm,而大型舰船用的钢/铝过渡接头^[4-6]、钢背铝复合轴瓦等^[7-8]产品厚度则超过 30 mm,甚至达 60 mm。

近年来,层状复合材料的研究已成为热点,国

* 国家自然科学基金(51474189)和河北省自然科学基金杰出青年基金(E2018203446)资助项目。20181210 收到初稿,20190328 收到修改稿

内外学者开展了大量关于钢/铝复合材料制备工艺与性能分析方面的研究工作,涵盖了固相轧制复合、固-液铸轧复合、爆炸复合、激光钎焊等工艺手段。其中,李民权等^[3]定性分析了总厚度为 2 mm 的钢/铝板坯料在不同温度及不同压下率等条件下轧制的结合规律;GRYDIN 等^[9]使用双辊铸轧方法成功制备出厚度为 3 mm(钢厚度为 0.35 mm)的钢/铝复合板,结合性能达到 70 MPa;CHEN 等^[10-11]制备出厚度为 3.8 mm、剥离强度为 16 N/mm 的钢/铝固-液铸轧复合板;LI 等^[12]分别对总厚度为 65 mm、71 mm、77 mm 的钢/铝复合板坯料爆炸复合,并分析了界面各相的形貌和结构;QIAN 等^[13]采用激光深熔钎焊方法制备了 9.5 mm 的铝/钢复合板。

综上所述可以看出,目前有关固-固轧制和固-液铸轧工艺的研究,仅局限于厚度 5 mm 以下规格,厚规格钢/铝复合板的工业生产仍以爆炸复合为主。TRICARICO 等^[14]指出对超过总厚度 20 mm 的钢/铝复合板坯料的轧制复合只能采用爆炸复合的方式。如何将钢/铝复合薄板轧制生产的成功经验,借鉴应用到厚规格钢/铝复合板,探索厚规格钢/铝复合板大批量连续生产工艺,成为现阶段亟待解决的问题^[15-17]。然而,试验结果表明,由于钢和铝组元性能差异大,当钢材基板厚度大于 5 mm 后,在常规轧机能力下轧制变形区内钢板难以变形,甚至无法

弯曲,常规热轧工艺难以获得满意的界面结合效果。

等离子喷涂是一种先进的材料表面强化和表面改性技术,可将陶瓷、合金、金属等材料加热到熔融或半熔融状态,并以高速度喷向经过预处理的工件表面而形成附着牢固的涂覆层^[18-20]。本文将等离子涂覆技术和热轧复合工艺相结合,通过在钢板表面预喷涂硅铝合金涂层,使涂覆层与钢板表面形成牢固结合,再与铝板组坯进行热轧,重点解决铝板与涂层间的轧制复合问题,大大降低了轧制工艺难度,为厚规格钢/铝复合板高效制备提供一种新途径。

1 材料与方法

本试验中,钢/铝复合板基体材料为 Q235,尺寸为 100 mm×60 mm×7.5 mm,覆层材料为铝 1050,尺寸为 100 mm×60 mm×15 mm。喷涂材料为硅质量分数 12% 的硅铝合金。

如图 1a 所示,首先将钢板和铝板分别采用 10% H₂SO₄ 溶液和 10% NaOH 溶液进行清理,除去表面的氧化层,并对结合面进行打毛和去污处理。然后,在钢板复合面等离子喷涂厚度约为 1 mm 的硅铝合金层。等离子喷涂原理如图 1b 所示。最后,将坯料以铝/钢/钢/铝的对称方式进行组坯和热轧复合试验,轧制速度均为 0.08 m/s。

图 1 试验流程及等离子喷涂原理

如图 2 所示,参考 GB/T 6396-2008 制备拉剪试样, d 为铝板厚度,根据压下率不同,分别为 6 mm、7.5 mm、9 mm。在 INSPEKT TABLE 100 型万能试验机进行试验,拉剪速度 0.5 mm/min。采用 FEI-SCIOS 型扫描电子显微镜(SEM)及配套的能谱仪(EDS)等设备详细分析复合界面的微观组织特性。

2 结果与讨论

2.1 等离子喷涂涂覆效果分析

图 3 给出了等离子喷涂的钢/涂层界面 SEM 及

EDS。由图 3 可知,在钢基体表面等离子喷涂硅铝涂层,结合面呈现明显的咬合现象,且基体与表面的铝涂层溶质元素之间发生相互扩散,厚度大约为 2 μ m,实现了硅铝覆层与钢基体的机械咬合和冶金结合。同时,在喷涂硅铝合金的钢板在初始条件下界面存在一些孔隙,这些缺陷可以通过后续的轧制工艺逐渐消除。

2.2 轧制道次对钢/铝复合效果分析

本组试验轧制温度 450℃,分别单道次和两道次轧制。第一、二组分别单道次压下 26.7%、33.3%,第三、四组分别两道次压下 26.7%+9.1%、

图2 拉剪试验图及试件尺寸(mm)

(a) 钢/涂层初始界面的 SEM

(b) 钢/涂层初始界面的 EDS

图3 钢/涂层初始界面的 SEM 及 EDS

33.3%+10%。统计试验测试结果，发现拉伸试件断裂均发生在钢/涂层界面区域，而 SEM 结果显示涂层/Al 界面结合紧密，如图 4 所示。故在研究中的微观界面分析主要集中在薄弱区钢/涂层界面。

(a) 拉伸试件宏观形貌

(b) 涂层/Al 界面 SEM

图4 33.3%压下率轧制时试件宏观形貌及涂层/Al 界面 SEM

图 5 为单道次和两道次轧制时钢/铝复合板剪切强度。由图可知，单道次轧制剪切强度明显高于两道次轧制。且对比单道次压下 33.3%和两道次压下(33.3%+10%)时钢/涂层界面 SEM，如图 6 所示，两道次轧制时，试样的结合界面处存在明显的裂隙，由于第一道次轧制后铝板和硅铝合金涂层实现复合，钢/涂层之间的扩散层较薄，在第二道次轧制过程中，铝板会随轧辊的运动发生滑移，带动涂层产生切向运动，进而使钢/涂层界面裂开导致结合性能大大降低。因此，后续试验均以单道次轧制。

图5 单道次和两道次轧制时钢/铝复合板剪切强度

(a) 单道次压下33.3%

(b) 两道次压下 33.3%+10%

图6 单道次和两道次轧制时钢/涂层界面 SEM

2.3 压下率对力学性能和钢/涂层界面微观组织分析

本组试验坯料的轧制温度 450 °C，分别在压下率 26.7%、33.3%、40% 的条件下进行。作为对比，对钢板未做喷涂处理的相同规格钢/铝复合板坯料封焊抽真空，在同样温度和压下率进行轧制。图 7 为不同压下率轧制后钢/铝复合板试样剪切强度。随着轧制压下率增大，钢/铝复合板剪切强度逐渐增加，但是钢板未做喷涂处理的钢/铝复合板试样剪切强度明显低于喷涂后轧制制备的钢/铝复合板。测量可知，试验所用规格钢板轧制过程中未发生变形，

图 7 不同压下率轧制时钢/铝复合板剪切强度

在与铝板轧制过程中不能使钢基体的新鲜金属挤出与铝形成冶金结合，故常规热轧工艺不能用于制备厚规格钢/铝复合板。

图 8 为不同压下率轧制后钢/涂层界面 SEM 及 EDS。由图可知，轧制后的界面相比初始状态下界面得到很大改善。这是由于随着压下率逐渐增加，轧件的变形抗力随之增大，在轧制力作用下，结合界面贴合逐渐的紧密，孔隙减少，界面的形貌逐渐平整，从而使结合性能提高。EDS 显示，经过轧制之后钢/涂层界面扩散层厚度基本一致，均为 1.5 μm 左右，相比图 3 钢/涂层初始界面，扩散层有所下降，这是由于在轧制过程中，铝板延展变薄导致扩散层变薄。

2.4 轧制温度对力学性能和界面涂层微观组织分析

在本节试验中各坯料的压下率均 40%，各组坯料轧制温度分别为 400 °C、450 °C、500 °C，图 9 所示为不同轧制温度时钢/铝复合板的剪切强度。由图可知，在一定温度下轧制的钢/铝复合板的剪切强度随着温度升高增大。但是随着温度的升高，在轧制温度为 500 °C 时，力学性能有所下降。

(a) 26.7% 压下率轧制时钢/涂层界面 SEM

(b) 26.7% 压下率轧制时钢/涂层界面 EDS

(c) 33.3% 压下率轧制时钢/涂层界面 SEM

(d) 33.3% 压下率轧制时钢/涂层界面 EDS

(e) 40% 压下率轧制时钢 / 涂层界面 SEM

(f) 40% 压下率轧制时钢 / 涂层界面 EDS

图 8 不同压下率轧制时钢/涂层界面 SEM 及 EDS

图 9 不同轧制温度时钢/铝复合板剪切强度

图 10a、10b, 图 8e、8f 和图 10c、10d 分别为 400 °C、450 °C、500 °C 轧制的钢/涂层界面 SEM 及 EDS。相比图 3 钢/涂层界面的原始状态, 在 400 °C 轧制的钢/涂层的复合界面较为平整, 但也存在一些微小的孔隙, 在 450 °C 轧制的界面缺陷基本消失, 而 500 °C 轧制时界面处出现裂纹和缝隙。EDS 显示, 在 450 °C 以下轧制时, 扩散层的厚度基本一致, 大约为 1.5 μm, 而在 500 °C 热轧时, 扩散层的厚度略有提高, 大约为 2 μm。轧制温度的提高有利

(a) 400 °C 轧制时钢 / 涂层界面 SEM

(b) 400 °C 轧制时钢 / 涂层界面 EDS

(c) 500 °C 轧制时钢 / 涂层界面 SEM

(d) 500 °C 轧制时钢 / 涂层界面 EDS

图 10 不同温度轧制时钢/涂层界面 SEM 及 EDS

于提高界面处原子的能量,使其获得足够的激活能,增加钢/涂层间的扩散。

3 结论

(1) 经过等离子喷涂工艺处理后的钢/涂层的界面初步形成冶金结合,扩散层厚度约为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。单道次轧制后涂层和铝的界面实现结合,且轧制过程改善了原始钢/涂层的界面缺陷。但由于变形的不协调性,增加轧制道次会破坏前一道次界面复合结果,在钢/涂层界面处出现明显裂隙,导致结合强度剧烈下降。单道次轧制的钢/铝复合板结合效果更佳。

(2) 在单道次轧制时,钢/铝复合板结合强度随着压下率的增加而逐渐提高,钢/涂层的微观界面也不断得到改善,界面贴合逐渐紧密,孔隙减少,界面形貌逐渐光滑平整。扩散层厚度基本未发生变化。

(3) 在 $400\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,结合强度随着轧制温度的提高先增大后减小,钢/铝界面扩散层厚度随轧制温度提高总体呈增加趋势。在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,扩散层厚度基本未发生变化。在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,扩散层的厚度有所提高,但界面开始出现裂纹。

(4) 当轧制温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、单道次压下率为 40% 时,钢/铝复合板界面剪切强度达 66 MPa ,高于美国军用标准 MIL-J-24445A(SH) 对于钢/铝剪切标准 55 MPa 。

参 考 文 献

- [1] HWANG W S, WU T I, SUNG W C. Effects of heat treatment on mechanical property and microstructure of aluminum/stainless steel bimetal plate[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2012, 134(1): 014501-014506.
- [2] SI Xiao, LU Bining, WANG Zhenbo, et al. Aluminizing low carbon steel at lower temperatures[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2009, 25(4): 433-436.
- [3] 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 Minquan, JIANG Fulin, ZHANG Hui, et al. Hot-rolled deformation law of steel/aluminum clad plate[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 644-648.
- [4] CHAO Rumin, YANG Joeming, LAY S R. Interfacial toughness for the shipboard aluminum/steel structural transition joint[J]. Marine Structures, 1997, 10(5): 353-362.
- [5] 宋军, 张文平, 华先锋. 船用铝钢复合材制备工艺研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(3): 129-131. SONG Jun, ZHANG Wenping, HUA Xianfeng. Research on preparation technology of marine aluminum steel composites[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(3): 129-131.
- [6] LIU W, MA J, MAZAR ATABAKI M, et al. Joining of advanced high-strength steel to AA 6061 alloy by using Fe/Al structural transition joint[J]. Materials & Design, 2015, 68: 146-157.
- [7] 韩海东, 张鹏, 杜云慧, 等. 钢背铝基轴瓦材料复合新工艺探索[J]. 内燃机与配件, 2008(3): 21-24. HAN Haidong, ZHANG Peng, DU Yunhui, et al. Exploration of new composite technology for steel back aluminum bearing material[J]. Internal Combustion Engines and Parts, 2008(3): 21-24.
- [8] 王保海. 铝合金轴承材料的轧制分析及应用[J]. 内燃机与配件, 2011(7): 28-29. WANG Baohai. Rolling analysis and application of aluminum-based alloy bearing materials[J]. Internal Combustion Engines and Parts, 2011(7): 28-29.
- [9] GRYDIN O, GERSTEIN G, FLORIAN Nürnberger, et al. Twin-roll casting of aluminum-steel clad strips[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4): 501-507.
- [10] CHEN G, LI J, XU G. 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.
- [11] CHEN G, XU G. Effects of melt pressure on process stability and bonding strength of twin-roll cast steel/aluminum clad sheet[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 438-446.
- [12] LI Y, HASHIMOTO H, SUKEDAI E, et al. Morphology and structure of various phases at the bonding interface of Al/steel formed by explosive welding[J]. Journal of Electron Microscopy, 2000, 49(1): 5-16.
- [13] QIAN Wei, CUI Li, MA Biao, et al. Laser keyhole welding-brazing for dissimilar metals between aluminum alloy and steel[J]. Journal of Laser Application, 2015, 35(4): 451-455.
- [14] 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.
- [15] 陈鑫, 李龙, 曾祥勇, 等. 压下率对冷轧铝/钢(4A60/08Al)复合带材组织性能的影响[J]. 轧钢, 2015, 32(2): 36-40. CHEN Xin, LI Long, ZENG Xiangyong, et al. Effect of reduction rate on Microstructure and properties of cold rolled Al/steel (4A60/08Al) composite strip [J]. Rolling, 2015, 32(2): 36-40.
- [16] ZHANG X, ZHAO J, HUI L, et al. Effect of annealing

- treatment on microstructure and properties of cold rolled aluminum/steel composite plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(7): 93-95.
- [17] 郭俊俊, 石振基. 热轧法对钢铝板界面组织及力学性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 26-30.
GUO Junjun, SHI Zhenji. Effect of hot rolling on interfacial microstructure and mechanical properties of steel storage plate[J]. Hot Processing Technology, 2016, 45(17): 26-30.
- [18] MURAKAWA M, WATANABE S. Manufacture of a cermet/ceramic coated steel plate by a combined plasma spraying and hot rolling method[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1989, 20(20): 331-340.
- [19] 赵聪硕, 邢志国, 王海斗, 等. 铁碳合金表面激光熔覆的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 418-426.
ZHAO Congshuo, XING Zhiguo, WANG Haidou, et al. Advances in laser cladding of iron-carbon alloys[J]. Materials Report, 2018, 32(3): 418-426.
- [20] LAHA T, AGARWAL A, MCKECHNIE T, et al. Synthesis and characterization of plasma spray formed carbon nanotube reinforced aluminum composite[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 381(1): 249-258.
-
- 作者简介: 黄华贵, 男, 1978 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为层状复合材料开发及应用。
E-mail: hhg@ysu.edu.cn
- 赵阳, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为界面涂层对厚规格钢/铝复合板热轧界面结构与力学性能的影响。
E-mail: 1147185955@qq.com
- 王超, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为钢/铝复合材料轧制复合尺寸效应研究。
E-mail: 1611903177@qq.com
- 燕猛, 男, 1987 年出生, 讲师。主要研究方向为复合材料制备工艺研究。
E-mail: yanmysu@163.com