

高效搅拌摩擦钎焊制备铝/钢双金属复合板的可行性研究

张贵锋¹, 郭咏华², 徐明志¹, 张建勋¹

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 河南省电力勘测设计院, 450007, 郑州)

摘要: 为验证采用作者开发的免磨损无针式搅拌摩擦钎焊(简称FSB)制备铝/钢防腐双金属复合板的可行性,研究了采用不同直径搅拌头所制备的复合板的表面成形、界面组织与性能特点. 结果表明:当搅拌头直径过小(20 mm以下)时,因热输入不足使焊道表面起始端粗糙,且试样在较低载荷下便断裂于原始界面;当采用中等直径(20 mm)搅拌头时,焊道表面成形光滑,在中等焊速(150 mm/min)下可获得致密的结合及良好的性能;当采用大直径(40 mm)搅拌头时,飞边陡然加剧,适当减小压入深度或提高焊速可减小飞边;由于强烈的热力联合作用,即使在高焊速(300 mm/min)下也可以获得致密的界面结合,钎料锌几乎全被挤出. 因此,采用大直径搅拌头、高焊速FSB制备铝/钢双金属复合板是可行的.

关键词: 搅拌摩擦焊; 钎焊; 层状复合材料; 搅拌摩擦钎焊

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0093-06

Feasibility of Efficiently Fabricating Al/Steel Bimetal Composite by Friction Stir Brazing

ZHANG Guifeng¹, GUO Yonghua², XU Mingzhi¹, ZHANG Jianxun¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: To verify the feasibility of efficiently fabricating Al/steel corrosion-resistant bimetal composite by the authors' friction stir brazing (FSB) process, in which a tool without probe is used to eliminate severe wear of probe by steel, the characteristics of bead surface forming, interfacial microstructure and property of FSB joint of Al/steel were investigated with tools of different sizes. For small tool of a diameter less than 20 mm, rough bead surface forming tended to occur at the just starting portion, simultaneously, joints fractured along initial interface under low load. For medium tool of 20 mm diameter, both dense interfacial structure and excellent bonding were obtained at medium traverse speed (150 mm/min). For larger tool of 40 mm diameter, flash became extremely obvious. In this case, the flash could be reduced by decreasing plunge depth or increasing traverse speed, while dense interfacial structure with little filler metal of Zn and excellent bonding could still be obtained even at high traverse speed (300 mm/min) due to the combination of enhanced heating and forging force. Therefore, Al/steel metallic layered composite can be effectively fabricated by FSB with larger tool and higher traverse speed.

Keywords: friction stir welding; brazing; layered composite; friction stir brazing (FSB)

包覆防腐材料(如铝)、电弧喷涂(如喷涂锌)是 2 种常用的提高钢材表面抗腐蚀能力的非电镀型工

艺,因为喷涂过程中仅将涂层材料加热至熔化状态而钢基层温度仍较低,故涂层/基体界面间的结合多以机械结合为主,此时涂层仅起保护作用,常用于涂层不承受载荷或承受轻载的情况。金属层状复合材料包括包覆型(cladding)与双金属型,通常采用爆炸焊、热轧焊方式制备^[1],其界面间通过塑性变形(有利于破碎氧化膜)^[1-2]、扩散及微量熔化(仅限于爆炸焊^[2])可实现适度的冶金结合,因此覆层/基层界面间的结合强度较高,可使覆层兼具防腐功能与承载能力。爆炸焊、热轧焊方式虽然在制备大面积复合板材时具有高效的优势^[3-7],但对于局部、型材及薄、小型件的防腐工况,因基材易变形或加压困难而使其应用受到限制,而扩散焊则有需保护、效率低之弊^[8-9]。

搅拌摩擦钎焊(Friction Stir Brazing,简称FSB)是作者在搅拌摩擦焊(简称FSW)^[10]与搅拌摩擦处理(简称FSP)^[11]的基础上开发的一种异种金属钎焊专利技术(受理号为200910021918.3),具有采用无针搅拌头、以摩擦热为热源、免用保护气体与钎剂、无匙孔、免针磨损、绿色高效(加热快、焊速高)、低成本等特点。当FSB采用较大直径搅拌头或多道搅拌摩擦钎焊时,便可用于制备层状复合材料,尤其适用于覆板为铝或镁等轻金属的复合型材制备。在要求覆材/基材间为牢固的冶金结合以使覆材兼具承载与保护双重功能的情况下,与爆炸焊、热轧焊、电弧喷涂相比,FSB具有灵活(适用于型材或局部防腐)、节能、节材、简捷、界面组织及性能易于调控等优势。

为尝试将“FSB制备双金属复合型材”技术应用于输电铁塔等钢结构的防腐方面,作为系列研究的一环,本文对铝/钢双金属复合板的表面成形与界面结合的控制进行了研究,以期对搅拌头设计及焊接规范的优化提供指导与参考。

1 试验材料与方法

为节约试验成本,所用母材为市售廉价薄钢板与纯铝板,其厚度均为1.8 mm。将2种试板(100 mm×60 mm×1.8 mm)按搭接形式进行装配,为避免钢质母材对搅拌头产生磨损,将铝板置于上方,钢板置于下方。同时,在两板间预置厚约0.1 mm的锌片作为钎料,试图通过冶金途径克服“针”被取消后对界面间机械混合的不利影响。为消除匙孔并防止较硬母材(钢板)对搅拌头的磨损,在FSB工艺中所用搅拌头为无针式柱状搅拌头^[12]。因此,搅拌头直径便成为搅拌头设计中唯一的重要参数。本试验中

将搅拌头直径分为小直径(包括10、15 mm)、中等直径(20 mm)、大直径(40 mm)3组。对于中、小直径,所选焊接规范相同:主轴转速为1 500 r/min;焊速为150 mm/min;倾角为3°;压入深度为0.5 mm左右。对于大直径搅拌头,为降低上板的减薄量,将倾角减小至1°,在不同焊速(23.5~300 mm/min)与压入深度下试焊。焊后评价的主要内容为外观检查、界面微观组织分析、拉剪与撕裂性能评价(采用长春试验机研究所产CSS-88100试验机,加载速率均为1 mm/min)和断口分析(采用日本电子株式会社产JEOL JSM-6390A型扫描电镜进行形貌与背散射分析)。试验中免用任何钎剂与保护气体。

2 试验结果

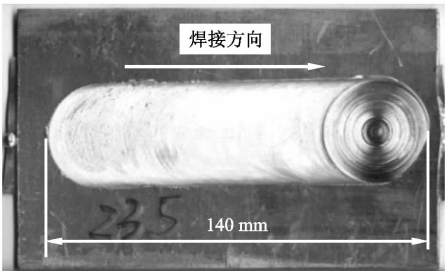
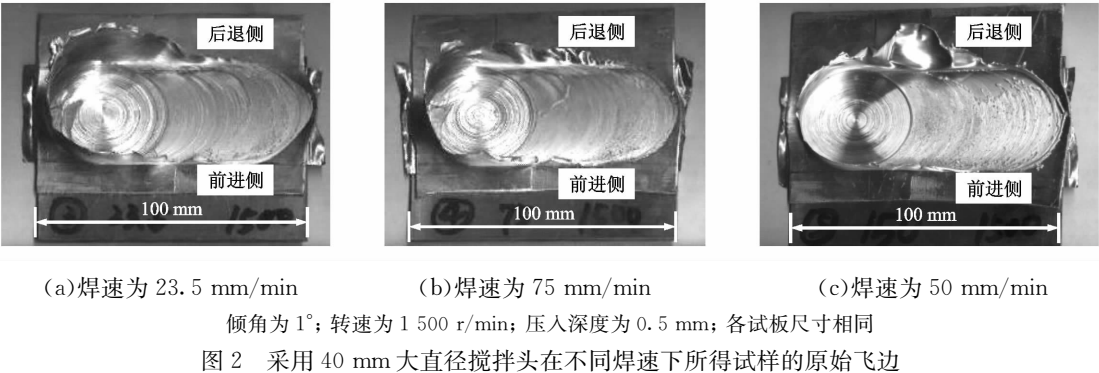
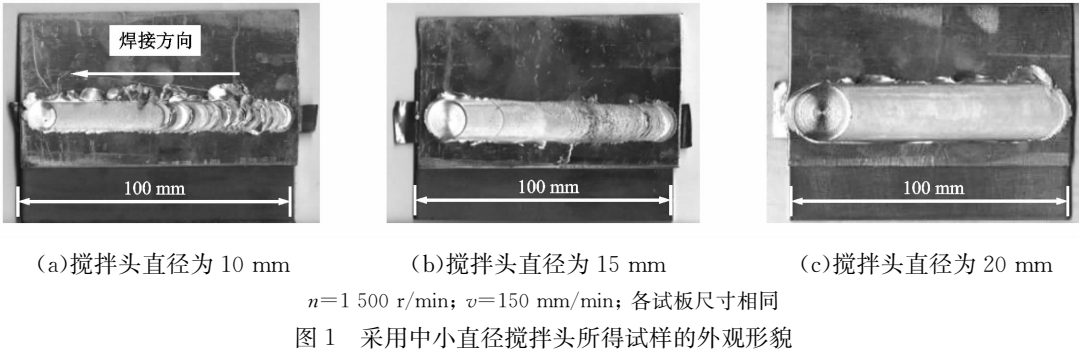
2.1 搅拌头直径对表面成形的影响

FSB制备双金属复合板材的表面成形特征可通过两个方面进行表征:一是焊道本身的光滑程度;二是飞边的大小。当搅拌头直径过小时,焊道本身的光滑程度较差,尤其是在起始阶段更为粗糙(见图1a、b);当搅拌头直径较大时,焊道表面平滑(见图1c)。飞边主要出现在后退侧。可见,搅拌头直径对焊道本身的光滑程度影响甚为显著。搅拌头直径过小时焊道光滑程度较差的原因在于摩擦热输入不足,尤其在起始端,因母材处于冷态,表面加热温度更低,塑性流动困难,致使起始端表面更为粗糙。

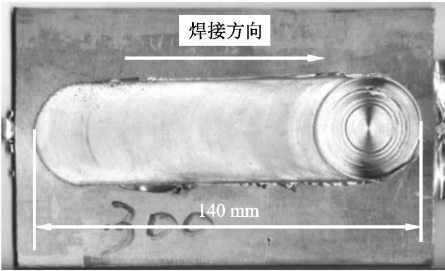
图2为采用大直径(40 mm)搅拌头时所得复合板的表面成形照片。当采用大直径搅拌头时,加热过程变得激烈,甚至有液态金属自板间喷射而出,这应该是缘于线速度的增大及摩擦加热区域面积增大的双重作用。焊道表面较为光滑,但突出特征表现为飞边显著增大。飞边的形成特征为:肩的前沿逐渐嵌入铝板表面以下,焊道或肩的正前方随之竖起较高的“铝墙”(称为肩前飞边);伴随着肩的进一步移动与转动,肩正前方的侧壁将肩前的铝竖墙刮擦至后退侧,致使后退侧也形成较高的飞边。显然,肩前飞边是飞边大的根本原因。结合施焊中及焊后的观察,初步认为肩前飞边的形成有一个累积过程,肩正前方的侧壁对肩端棱边压入深度内母材的向前挤压使肩前飞边逐渐累积而变厚、增高,以致肩前飞边具有足够的强度与施载能力,进而将铝板从夹具下抽出、抬起,情况严重时甚至可将铝板拔起,使搅拌头完全嵌入上板内,导致钢板焊接面裸露于焊道表面。此外,大直径搅拌头由于具有较大的周长,会加剧肩前飞边的累积速度与总量。另一方面,在部分接头表面还

观察到由界面冶金反应引起的焊道表面突起,这也会加剧肩前飞边的形成. 因此,为了改善表面成形,

首先必须尽量抑制肩前飞边的形成.
图 3 为减小大直径搅拌头($d=40\text{ mm}$)的压入



(a)焊速为 235 mm/min



(b)焊速为 300 mm/min

倾角为 1° ; 转速为 $1\,500\text{ r/min}$; 压入深度为 0.4 mm ;
焊缝长度约为 140 mm ; 各试板尺寸相同

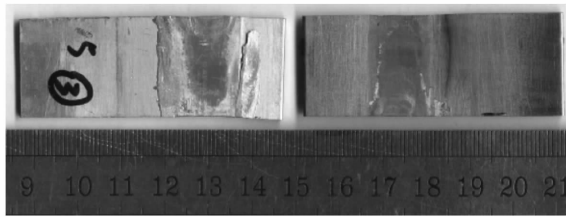
图 3 减小大直径搅拌头($d=40\text{ mm}$)的压入深度后
所得双金属复合板的原始外观形貌

深度(取 0.4 mm)并增大焊速后所得复合板的表面形貌,可见减小压入深度可显著减小肩前飞边与后退侧飞边. 另外,增大焊速意味着可减少单位长度焊道内被摩擦的圈数,这对减少飞边累积也有一定的贡献.

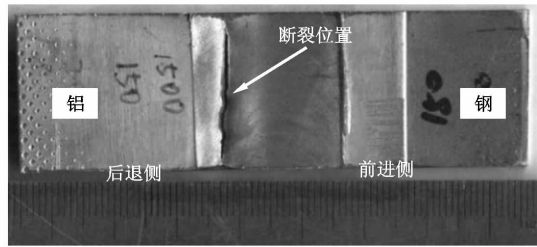
2.2 试样拉剪、撕裂性能测试与断口分析

小直径搅拌头($d=10, 15\text{ mm}$)所得试样的钎料虽然可被熔化,但拉剪测试时绝大多数试样都断裂于焊接界面(见图 4a). 中等直径搅拌头($d=20\text{ mm}$)所得试样在拉剪测试中均能稳定地断裂于上板铝的后退侧边缘而非界面(见图 4b),表明接头性能优良. 可见,欲获得性能优良的 FSB 接头,除了摩擦产生的热效应能使钎料顺利熔化之外,还必须依赖足够大直径的搅拌头所产生的足够大的力学效应,如锻压效应与界面扭转效应(这些力学效应均有利于铝表面氧化膜的破除).

虽然中等直径搅拌头所得试样在拉剪测试时断裂于铝母材内,但考虑到较大的搅拌头直径(20 mm 以上)等效于增大了钎焊接头搭接长度,会使拉剪载荷增大,故拉剪载荷与拉剪强度并不能直接反映界面结合性能. 为此,本文还采用了撕裂试验来评价界



(a) $d=15\text{ mm}$,断裂于界面



(b) $d=20\text{ mm}$,断裂于铝材内部的后退侧

图4 中小直径搅拌头所得试样的拉剪侧断裂位置

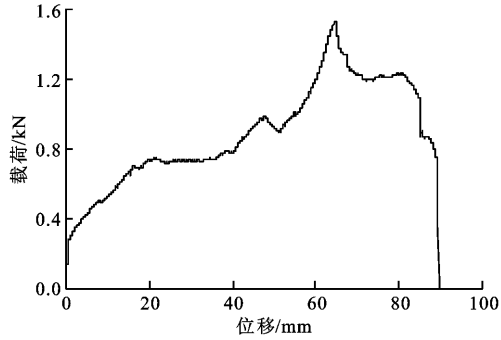
面结合性能. 为便于焊后制备撕裂试样并便于加载, 仅在试样的后半长度范围内预置锌片钎料, 其余操作与正常施焊情况相同, 以便尽量使2种情况下对钎料的加热条件保持相同.

图5为在撕裂测试中得到的试样位移-载荷曲线(分别沿焊接方向与垂直焊接方向撕裂, 撕裂宽度分别为20和45 mm). 由图5可知, 采用40 mm搅拌头在300 mm/min高焊速条件下所得试样的最大载荷为3.273 kN, 平均值约为2.228 kN, 平均撕裂强度约为49.5 N/mm, 而采用20 mm搅拌头在150 mm/min焊速下所得试样的平均撕裂强度为35~25 N/mm(取平直段撕裂载荷计算).

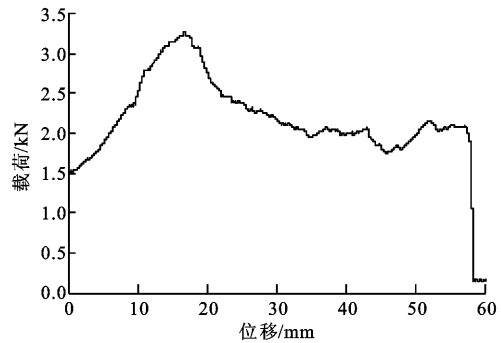
图6、图7为采用40 mm搅拌头在300 mm/min焊速下所得复合板试样的撕裂断口微观与宏观照片. 从图6可知, 铝已牢固地黏附于钢上, 且背散射照片中未发现比铁更亮的锌微区; 从图7可知, 测试完成后, 界面强度足以使铝材发生90°弯曲变化(由直角弯曲状被拉直), 这反证了试样并没有在原始界面上被撕裂.

2.3 界面组织

图8所示为分别采用20 mm搅拌头、150 mm/min焊速与40 mm搅拌头、300 mm/min焊速时所得试样的界面微观组织照片, 可以看出二者的相同之处为: 界面致密, 无空洞, 所形成的界面层为金属间化合物, 其厚度在通常推荐的搭接接头临界值 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[13]左右. 从图8b及不同相区的能谱(EDS)分析结果(见表1)可以得出: ①锌的含量极低(原子分

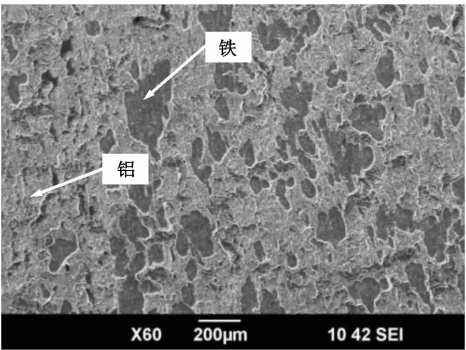


(a) $d=20\text{ mm}$, $v=150\text{ mm/min}$

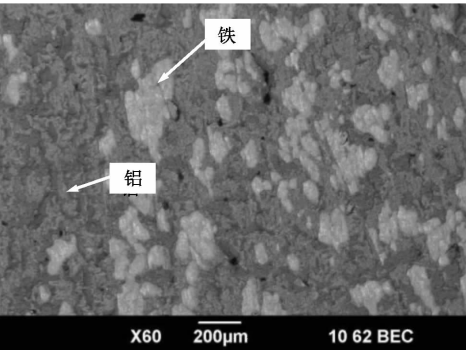


(b) $d=40\text{ mm}$, $v=300\text{ mm/min}$

图5 不同搅拌头所得试样在撕裂试验中测得的位移-载荷曲线



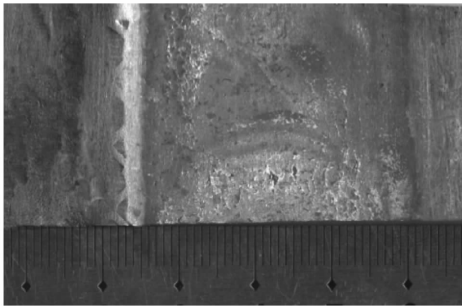
(a)二次电子照片



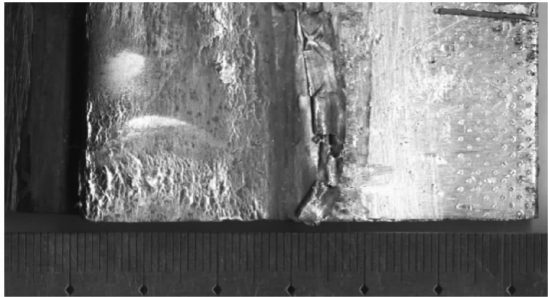
(b)背散射照片

$d=40\text{ mm}$; $v=300\text{ mm/min}$

图6 采用大直径搅拌头在高焊速下所得复合板试样的撕裂断口



(a)钢侧断口形貌



(b)铝侧断口形貌

$d=40\text{ mm}; v=300\text{ mm/min}$

图 7 采用大直径搅拌头在高焊速下所得复合板试样的撕裂断口宏观扫描图

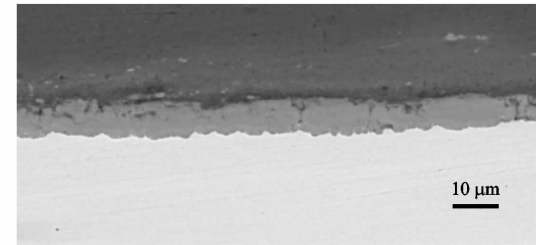
数基本上不大于 0.5%),表明低熔点、低强度的锌基液相已被搅拌头挤出界面,而锌的熔化与挤出都必须依赖强烈的摩擦与锻压力,说明界面的热-力联合作用明显,这有利于界面的结合;②界面处的金属间化合物层自上而下主要包含有 FeAl_3 、 Fe_2Al_5 和 FeAl 三种相,厚度分别约为 7、3 和 $1\text{ }\mu\text{m}$,但是相对分散的 FeAl 相(一般富铁相金属间化合物的性能优于富铝相的性能)由钢侧伸入 Fe_2Al_5 相内,可见钢侧界面形态的嵌合特征亦较为明显,更为重要的是,即使高熔点的铁也在 FSB 过程中发生了快速扩散. 根据固态下有明显互扩散的情况,也可推测出焊接前期固态母材向液相中的扩散(即溶解)不容忽视. 界面层的相组成表明,最终界面层实质上是铝/铁间固态扩散的产物. 因此,FSB 的结合机理可表征为先导性机械辅助反应去膜、母材(铝和铁)快速溶解(此项机理的研究将另文发表)、液相挤出以及固相扩散,据此实现了上板-下板界面间的牢固结合,从而解决了传统搅拌摩擦焊对母材塑性变形的苛求(尤其是对下板). 上述结合机理与激光辅助轧制焊接的机理(溶解-扩散-反应)^[13-14]相似,但是 FSB 的界面焊接温度更低,单道焊接面积更大,免用任何保护气体与钎剂,设备投资也低.

图 8a、b 的不同之处在于:采用大直径搅拌头时,对铝侧的搅拌相对强烈,致使铝侧界面呈现较大起伏,同时钢的扩散有被强化的趋势,呈现许多长短不一的 FeAl 短条. 采用大直径搅拌头时相对强烈的搅拌或塑性流动及其诱发的快速扩散应得益于大的线速度、较长的加热时间(搅拌头直径与焊速之比)、较大的锻压力和界面扭转效果,而这种界面间相对强烈的热-力联合作用为高速焊接的实用化创造了有利条件.

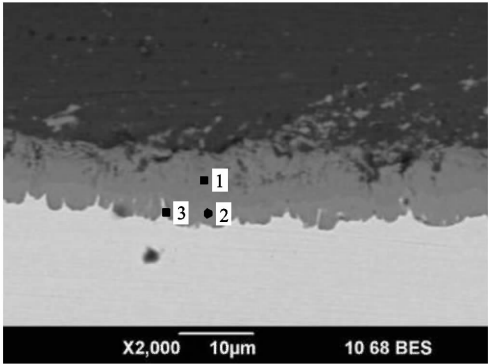
此外,统观前进侧、中心区、后退侧的界面微观组织,虽然采用大直径搅拌头时由里向外线速度相差较大,但整个界面组织均匀性仍较好,表明搅拌头直径的大小对界面组织的均匀性影响不大.

表 1 图 8b 所示界面中心区中不同相区的能谱分析结果

分析点	原子分数/%		
	Al	Fe	Zn
1	79.57	20.08	0.34
2	71.38	28.12	0.51
3	51.49	48.07	0.44



(a) $d=20\text{ mm}, v=150\text{ mm/min}$



(b) $d=40\text{ mm}, v=300\text{ mm/min}$ (中心区)

由上到下分别为铝层、界面层和钢层;1~3:能谱分析点

图 8 采用不同直径搅拌头 and 不同焊速所得试样的界面微观组织背散射照片

3 结 论

(1)为提高工效而采用大直径搅拌头时,容易引发肩前飞边的显著累积,进而在后退侧也形成严重的飞边,此时通过减小压入深度或增大焊速可减小飞边,改善复合板的表面形貌.

(2)采用大直径搅拌头所得复合板的界面由多种金属间化合物组成.在本文的试验条件下,主要组成相 FeAl_3 、 Fe_2Al_5 分布致密、均匀,其总厚度适中,约为 $10\text{ }\mu\text{m}$.界面间相对强烈的热-力联合作用有利于促进界面的塑性流动及扩散,并为提高焊速(如 300 mm/min)提供了可能.

(3)FSB 所得最终界面层实质上是铝/铁间固态扩散的产物,低熔点、低强度的锌几乎全被挤出(界面层中锌的原子分数仅约 0.5%),即使是高熔点的铁也发生了快速溶解与扩散.FSB 的结合机理可表征为机械辅助反应去膜、母材快速溶解、液相被挤出以及固相扩散,从而避免了传统 FSW 对母材间上、下塑性的苛求(尤其是硬质下板).

(4)钎料的作用主要体现在前期的破膜方面(通过共晶反应与挤出液相 2 条途径),为实现洁净界面间的致密化及后续快速扩散创造了条件.

参考文献:

- [1] ASKELAND D R, PHULE P P. Essentials of materials science and engineering [M]. 影印版. 北京:清华大学出版社,2005: 556-557.
- [2] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用 [M]. 长沙:中南大学出版社,2007: 8-9.
- [3] 王建民,朱锡,刘润泉. 爆炸焊接的应用与发展[J]. 材料导报,2006, 20(1): 42-45.
WANG Jianmin, ZHU Xi, LIU Runquan. The application and development of explosive welding [J]. Materials Review, 2006, 20(1): 42-45.
- [4] ZHAO D S, YAN J C, WANG Y, et al. Relative slipping of interface of titanium alloy to stainless steel during vacuum hot roll bonding [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 499(1/2): 282-286.
- [5] 王敬忠,颜学柏,王伟琪,等. 轧制钛-钢复合板工艺综述[J]. 材料导报,2005, 19(4): 61-63.
WANG Jingzhong, YAN Xuebai, WANG Weiqi, et al. Summarization of the rolling Ti-steel composite plates process [J]. Materials Review, 2005, 19(4): 61-63.
- [6] 吴爱萍,邹贵生,金奇,等. 金属轧制扩散复合技术及其新进展[J]. 焊接,2005 (5): 25-28.
WU Aiping, ZOU Guisheng, JIN Qi, et al. Primary investigation of the rolling diffusion bonding of mild steel [J]. Welding & Joining, 2005 (5): 25-28.
- [7] 于九明,孝云祯,王群骄. 金属层状复合技术及其新进展[J]. 材料研究学报,2000,14 (1):12-16.
YU Jiuming, XIAO Yunzhen, WANG Qunjiao. New development of technology of clad metal [J]. Chinese Journal of Material Research, 2000,14(1):12-16.
- [8] 祖国胤,王宁,于九明. TLP 连接技术在不锈钢/3003 复合板制备中的应用[J]. 中国有色金属学报,2005, 15(1): 79-83.
ZU Guoyin, WANG Ning, YU Jiuming. Application of TLP joining techniques in preparing bonding plates of stainless steel/A3003 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2005, 15(1):79-83.
- [9] 成小乐,高义民,邢建东,等. 扩散连接 Al/Ni/0Cr18Ni9Ti 复合材料的界面组织[J]. 西安交通大学学报,2007, 41(7): 867-869.
CHENG Xiaole, GAO Yimin, XING Jiandong, et al. Investigation into intermetallic compounds in Al/Ni/0Cr18Ni9Ti diffusion bonded joint [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 867-869.
- [10] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering Review, 2005, 50(1): 1-78.
- [11] MA Z Y. Friction stir processing technology: a review [J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2008, 39 (3): 642-658.
- [12] 张贵锋,苏伟,张建勋. 铝与异种高强金属的搅拌摩擦钎焊新工艺及其在铝/钢防腐双金属复合板制备中的应用[J]. 材料科学与工艺,2009, 17(s1):185-190.
ZHANG Gui-feng, SU Wei, ZHANG Jian-xun. A novel process of friction stir brazing (FSB) for Al and dissimilar metal and its application for fabrication of Al/steel bimetallic composite plate [J]. Materials Science & Technology, 2009, 17(s1): 185-190.
- [13] PEYRE P, SIERRA G, DESCHAUX-BEAUME F, et al. Generation of aluminum-steel joints with laser-induced reactive wetting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 444(1/2): 327-338.
- [14] RATHOD J, KUTSUNA M. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding [J]. Welding Journal, 2004, 83(1): 16s-26s.

(编辑 葛赵青)