DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3208

钢/铝双金属固–液复合工艺研究

张　达,周建溢,孙建波,黄志求,张云龙,焦玉凤,胡　明
(佳木斯大学 材料科学与工程学院,黑龙江 佳木斯 154007)

摘　要:研究冲击射流固–液复合法制备钢/铝复合材料,预先对钢基体表面预处理,在浇铸过程中改变钢基体的移动速度,使得铝液与钢基体产生不同程度强化换热作用。利用 SEM、XRD、EDS 及导热仪检测分析钢/铝复合层的组织形貌、成分及导热性,用万能力学试验机测量其剪切强度。实验结果表明,随着钢基体移动速度升高,铝液对钢基体冲击射流换热量减小,复合界面由 Fe/Al 金属间化合物组成,钢基体表面镀锌层起到了润湿、漫流、保护作用,有效提升了钢/铝之间结合强度。在浇铸温度 810 ℃,钢基体移动速度为 12 mm/s 时,测得结合强度为 19.1 MPa,测得最高热导率为 88.23 W/(m·K)。

关键词:冲击射流强化换热;钢/铝双金属;固–液复合;镀锌

中图分类号:TG174.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)06-0593-07

Research on the Solid–liquid Composite Process of Steel/Aluminium Bimetal

ZHANG Da, ZHOU Jianyi, SUN Jianbo, HUANG Zhiqiu, ZHANG Yunlong, JIAO Yufeng, HU Ming
(School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract: The preparation of steel/aluminium composites by the impact jet solid-liquid composite method was studied. The surface of the steel matrix was pretreated in advance, and the moving speed of the steel matrix was changed during the casting process, resulting in different degrees of enhanced heat exchange between the molten aluminium and the steel matrix. The microstructure, morphology, composition and thermal conductivity of the steel/aluminium composite layer were detected and analysed via SEM, XRD, EDS and thermal conductivity, and the shear strength was measured via a universal testing machine. The experimental results show that with increasing moving speed of the steel matrix, the heat transfer of the impact jet of the molten aluminum on the steel matrix decreases. The composite interface is composed of Fe/Al intermetallic compounds, and the galvanized layer on the surface of the steel matrix plays the role of wetting, diffuse flow and protection, which effectively improves the bonding strength between the steel and aluminum. At a casting temperature of 810 ℃ and a moving speed of the steel matrix of 12 mm/s, the measured bonding strength is 19.1 MPa, and the highest thermal conductivity is 88.23 W/(m·K).

Key words: shock jets enhance heat exchange; steel/aluminium bimetal; solid-liquid composite; electrogalvanized

随着社会的发展,能源及污染问题日益突出,汽车轻量化已成为汽车领域未来发展不置可否的趋势,是助力“双碳”目标早日实现的重要力量之一。随着我国新能源汽车产业发展不断取得积极成效,轻量化复合材料的发展及应用成为当前交通工具领域的重要研究方向。使用轻量化复合材料既可有效减少油耗、电耗及污染物的排放,同时交通工具的动力性、安全性以及续航里程也随之大幅提高。

钢/铝复合材料兼具各组元金属所特有的性能,是车身轻量化发展的重要组成部分,具有结构强度高、耐腐蚀性好、导热性优异、重量轻等优势,但如何解决钢/铝异种材料的连接问题是决定钢/铝复合结构件能否大规模应用的关键[1]。

目前各国都研发了异种复合材料生产工艺,按不同金属组元复合状态划分为固–固复合法、液–液复合法和固–液复合法。固–液复合法相对于其它两

收稿日期:2023-08-06
基金项目:黑龙江省省属高等学校基本科研业务费项目(2022-KYYWF-0584);黑龙江省自然科学基金(LH2021E115);黑龙江省教育厅科研业务费项目(2022-KYYWF-0581)
作者简介:张　达,1995 年生,硕士生.研究方向为双金属复合材料.Emai: 1790323529@qq.com
通讯作者:胡　明,1962 年生,教授.研究方向为金属基复合材料.Email: minghu02@163.com
引用格式:张达,周建溢,孙建波,黄志求,张云龙,焦玉凤,胡明.钢/铝双金属固–液复合工艺研究[J].铸造技术,2024,45(6):593-599.
ZHANG D, ZHOU J Y, SUN J B, HUANG Z Q, ZHANG Y L, JIAO Y F, HU M. Research on the solid-liquid composite process of steel/aluminium bimetal[J]. Foundry Technology, 2024,45(6): 593-599.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

种方法具有对原材料要求不高、工艺简单、成本较低、效率高、可以制造复合板材、异型材、结合方式采用强度远超机械结合的冶金结合等特点，适合应用于大规模生产和连续性生产。固-液复合法主要包括：铸造法、铸轧法、反向凝固复合法、喷射成型法等[2-6]。铸轧法将轧制法和铸造法相结合，是一种有潜力的新型工艺，但目前发展还不成熟，有待进一步完善[7]。反向凝固复合法是一种新型的双金属材料制备技术，其凝固生长方向与普通凝固不同，为由内而外生长凝固，该方法的操作难度较大[8]。喷射成型法生产的复合板尺寸精度较难控制，金属液流分布不均匀，该方法需进一步完善和探索。采用铸造法制备双金属复合材料，成本较低、工艺简单，适用于制备各种复杂连接界面的双金属工件，是发展最为悠久，工艺最为简单，成本最为低廉的成型方法[9]。

国内外的研究表明[10-12]，复合层的微观结构、厚度、金属间化合物成分对钢/铝双金属复合材料结合强度起着决定性的作用。尤其在固-液复合过程中，会形成脆性(Fe/Al)金属间相，另外钢基体表面存在杂质或氧化层时，极易与铝液先发生反应，在界面处形成夹杂物，降低铝液在钢基体表面润湿性，难以形成有效冶金结合。这一问题长期制约着钢/铝复合材料的应用。因此在钢/铝双金属复合铸造技术中常采用在钢基体表面进行镀层预处理，防止表面污染并保持活性、提高铝液在钢表面润湿性，促进钢/铝间发生冶金反应[13-14]。研究发现，改善钢/铝异种金属接头性能的元素有Ag、Si、Mn、Sn、Au、Ni、Cu和Zn等。Jiang等[15]在钢表面上施加锌层发现钢/铝固-液复合过程中仅发生少量的金属间Fe-Al相。此外，锌涂层会破坏钢/铝高温接触氧化层，实现材料表面之间更好的结合[16-17]。Cao等[18]研究了Ni/Cu中间镀层对钢/铝异种金属的可焊性，有效地抑制了Fe-Al二元脆性相的形成。李迟等[19]研究浸表面改性+热浸铝制备钢-铝双金属复合材料，其界面结合情况较未处理铸件有所改善。Bick等[20]研究通过将复合锻造工艺与锌添加剂相结合，发现锌与钢和铝形成化合物而没有脆性相的形成。目前通过钢基体表面镀锌提高钢/铝复合铸件结合强度的研究报道较少。因此研究镀锌对钢/铝双金属复合材料制备的可行性和效果是值得研究的。

本文从固-液复合铸造的工艺特点出发提出一种钢/铝复合材料制备新工艺——冲击射流固-液复合法，在钢基体表面沉积厚度约为23 μm左右的锌层，浇铸过程中铝液冲击力对钢基体产生强化换热作用来提高界面结合强度，比较了无镀层作用的钢/铝复合层，对其微观形貌及成分变化、相关力学性能进行了评价。

1 实验材料与方法

基体材料为表面镀锌304不锈钢板，表1为304不锈钢的化学成分。浇铸金属为纯铝，化学成分见表2。不锈钢板尺寸为110 mm×50 mm×3 mm。图1为冲击射流固-液复合法原理示意图，采用外包覆技术将镀锌不锈钢板固定在型腔底部的凹槽内，铝液以冲击射流的方式浇铸到钢基体表面。铝液与钢基体发生共晶反应将两种金属复合在一起，浇铸后立即采用硅酸铝保温棉进行保温缓冷至室温。

表 1 钢基体化学成分
Tab.1 Chemical composition of the steel matrix
(mass fraction/%)

C	Cr	Ni	S	P	Mn	Fe
≤0.07	17.0~19.0	8.0~11.0	≤0.03	≤0. 035	≤2. 0	Bal.

表 2 纯铝化学成分
Tab.2 Chemical composition of pure aluminium
(mass fraction/%)

Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Al
0.001	0.001	0.001 5	0.001	0.001	≤0. 05	Bal.

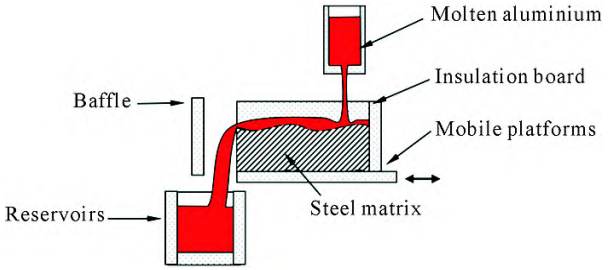


图 1 冲击射流固-液复合法制备钢/铝复合材料示意图
Fig.1 Schematic diagram of the preparation of steel/aluminium composites by the impact jet liquid-solid composite method

电镀Zn处理步骤：依次用180~1 500目砂纸对304不锈钢基体表面进行机械打磨并抛光，以获得纯净、光滑的表面，用冷/热水清洗后表面加入除锈剂清洗2 min，随后超声波清洗以去除表面杂质，酒精清洗后干燥。每次处理后，试样必须用蒸馏水冲洗，同时将氯化钾，硼酸分别用热水溶解后倒入烧杯。最后将氯化锌用少量水溶解至需要容积，搅匀镀液测pH，搅匀镀液并钢基体在空气中干燥后立刻放入镀液中，通电试镀，配方如表3。

在表4所示钢/铝复合实验参数下，制备出1#至6#试样，线切割截取金相样品，抛光后用含20 mL H_2SO_4、80 mL H_2O的溶液进行腐蚀，利用JSM-7800F型场发射扫描电子显微镜对钢/铝界面的微观组织和化学成分分析，采用D8 ADVANCE型X射线衍射仪对钢/铝界面进行物相分析。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 电镀锌溶液配方
Tab.3 Electrogalvanizing solution formulation

Composition and process conditions	formulation
$ZnCl_2$/(g·L^{-1})	60
KCl/(g·L^{-1})	180
H_3BO_3/(g·L^{-1})	25
Temperature/℃	35
pH	5.5
Cathode current density/(A/dm^2)	1.5 V

表 4 钢/铝复合实验主要参数
Tab.4 Main parameters of the aluminum/steel composite experiment

Specimen number	Surface pretreatment	Movement speed /(mm·s^{-1})	Casting temperature/℃
1#	polishment	3	810
2#		7	
3#		12	
4#	galvanize	3	
5#		7	
6#		12	

制备出图2a所示的剪切试样，固定在如图2b所示的夹具中，在距钢/铝界面3 mm的钢侧施加剪切力，以1 mm/min的加载速度从上向下不断加载，使得试样沿复合界面发生断裂。通过测试界面断裂过程中承受的最大载荷，根据下式计算出相应的剪切强度：

$$\tau=F_{max}/S \quad (1)$$

式中，F_{max}为加载过程中最大载荷；S为铝/钢双金属界面接触面积。

2　实验结果与讨论

2.1　镀锌层微观形貌

图3所示为钢基体镀锌后界面微观形貌。镀层表面光滑均匀，未出现裂纹、气泡等表面缺陷，整体电镀效果较好。通过扫描电子显微镜对镀锌层进行分析，发现在钢板表面形成了厚度为23 μm左右的镀锌层，钢基体与镀锌层之间结合良好，未出现明显缺陷，钢基体与镀锌层形成良好结合，镀层厚度均匀，电镀锌方案满足实验要求。

2.2　复合层微观形貌及组织分析

铝液在钢基体表面快速铺展开来，先与镀层Zn发生共晶反应，待镀层原子扩散完毕之后，Fe原子将不断向共晶合金内扩散复合。图4中1#试样虽在钢侧和铝侧之间产生较完整复合层，但在界面处产生一些气孔、夹杂及裂纹等缺陷，2#试样裂纹更为明显，3#试样基本不能形成冶金结合。复合区金属流动性大小：1#>2#>3#，分析可知随着钢基体移动速度加快铝液冲击产生高温强化换热作用减弱。铝液与钢基体未达到理想的扩散温度和时间，甚至出现未复合区域，再者铝液在高温浇铸过程中会产生氧化铝膜，进而导致钢基体表面二次氧化，阻碍铝液与钢基体表面发生冶金反应，同时Al原子与Fe原子相互扩散过程中，靠近钢侧温度相对较低，收缩量较大，靠近铝液区域温度相对较高，收缩程度较小，导致金属两侧形成热应力，复合层金属硬度较大，塑性相对较

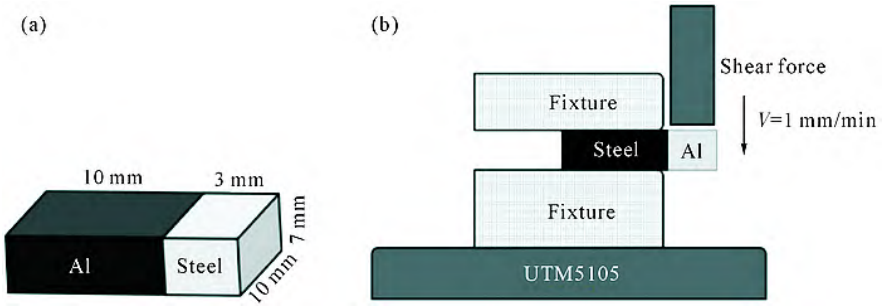


图 2　剪切试样尺寸及剪切试验示意图：(a) 剪切式样尺寸；(b) 剪切试验
Fig.2　Schematic diagram of the shear sample size and shear test: (a) shear sample size; (b) shear test

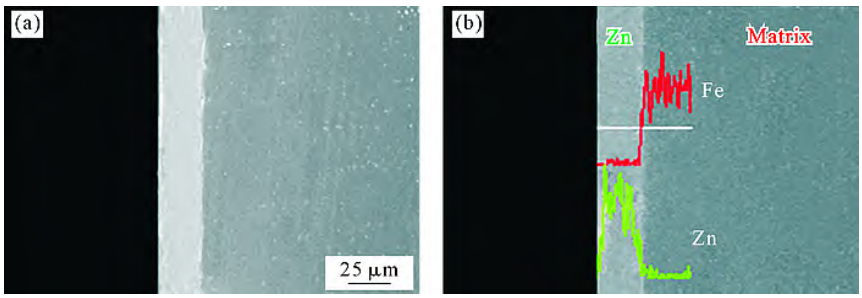


图 3　钢基体镀锌后界面微观形貌：(a) 横截面 SEM 图像；(b) EDS 线扫描分析
Fig.3　Morphology of the surface after galvanizing on the steel matrix: (a) cross-sectional SEM image; (b) EDS line-scan analysis

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

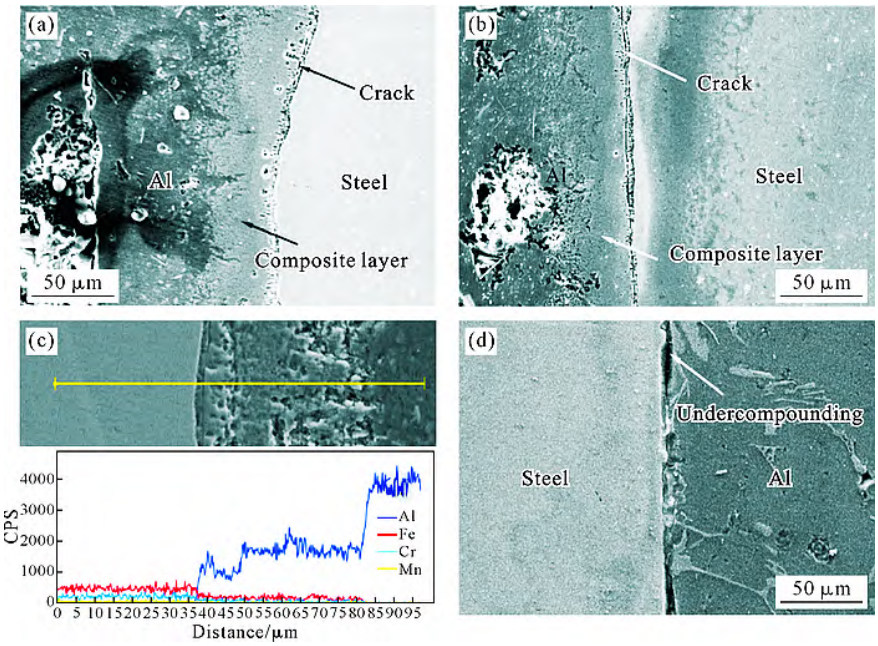


图 4 铝/钢复合 SEM 形貌：(a) 1# 试样；(b) 2# 试样；(c) 1# 试样 EDS 线分析；(d) 3# 试样

Fig.4 SEM images of the aluminium/steel composite: (a) specimen 1#; (b) specimen 2#; (c) EDS line analysis of specimen 1#; (d) specimen 3#

低，因此产生应力的同时只有通过产生裂纹缺陷和扩展来消耗。

结合EDS线成分分析(图4c)，若形成稳定相则一定在界面处扫描线上成分相对稳定区域，线扫从钢基体开始穿过复合层至铝基体，深蓝色线代表Al元素分布，红色线代表Fe元素分布，浅蓝色线代表Cr元素分布，黄色线代表Mn元素分布。Al、Fe元素在复合层处有明显渐变过程，Fe元素向铝基体中扩散明显，可知复合层为Fe/Al金属间化合物，此工艺制备方法在表面机械抛光下3 mm/s时也可实现较完整冶金结合。

如图5a~c所示，与机械抛光工艺相比复合层界面差异明显，界面大为改善，表明经镀锌预处理下，形成一层致密的保护膜，能有效防止钢基体表面氧化，同时改善铝液在钢基体表面润湿性，有利于Al、Fe原子的相互扩散。4#、5#试样由于钢基体移动速度较慢，铝液与钢基体产生冲击射流换热量较大，钢基体被铝液持续加热，Al-Fe原子之间反应时间延长，导致相互扩散加深复合层变厚约45 μm左右，同时出现较密集裂纹沿着微观孔洞拓展，分析是钢基体表面镀层不均匀，防护性能下降，且在镀锌层制备过程中不可避免的被氧化，从而影响了Al、Fe原子的有效扩散。

随着钢基体移动速度升高至12 mm/s，铝液与钢基体产生冲击射流换热量较小，形成厚度约为20 μm复合层，结合图5e EDS点成分分析及表5各点成分变化，可以看出位置1、2、3、4、5的Al含量依次增加，Fe含量依次减少，区间Al和Fe的含量演变可以分为两个阶段，第一阶段：距离扫描边界5~10 pm；第二阶段：距离扫描边界10~20 pm。在第一阶段Al的含量要比第二阶段Al的含量低，而第一阶段Fe的含量要比第二阶段Fe的含量高，这说明在这两个阶段中Fe含量出现高低的变化过程，距离钢一侧较近的地方由于Fe原子含量高，相组织主要由$FeA1_2$组成，而距离钢一侧较远的地方，由于铁原子没有充分扩散到，所以这里的相主要由$FeA1_3$组成，结合EDS分析结果可知：Fe:Al近似为1:3、1:2，结合图5d XRD图谱分析相为$FeA1_3$、$FeA1_2$[21]，之后由于扩散加深，Fe原子进入$FeAl_3$相继续扩散，便形成了Fe_4Al_{13}相。图5f观察EDS面扫描可知钢/铝在界面之间发生了相互扩散反应。其中铁原子甚至扩散至界面之外，深入铝基体中。因为钢基体中Fe原子在铝液中的溶解度远大于A1原子在钢基体中的溶解度，A1原子比Fe原子半径大，A1原子向钢基体扩散需要克服更大势垒不易进入Fe晶格内部，所以整个扩散过程以Fe向A1基体中扩散为主。铝/钢复合时先发生溶解反应后再扩散，从而让钢/铝复合层进一步生长，最终形成20 μm左右的复合层。

2.3 复合层结合强度分析

图6a为对应试样位置平均最大剪切力，可以看出不同工艺对试样剪切强度的影响。1#、2#、3#试样随着基体移动速度加快铝液与钢基体之间高温强化换热作用减弱，剪切强度逐渐下降，且3#试样不能形成完整冶金结合。4#、5#、6#试样界面整体剪切强度有明显提升，剪切强度最高达19.1 MPa，且随着基体移动速度升高，剪切强度先下降后升高趋势，分析

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

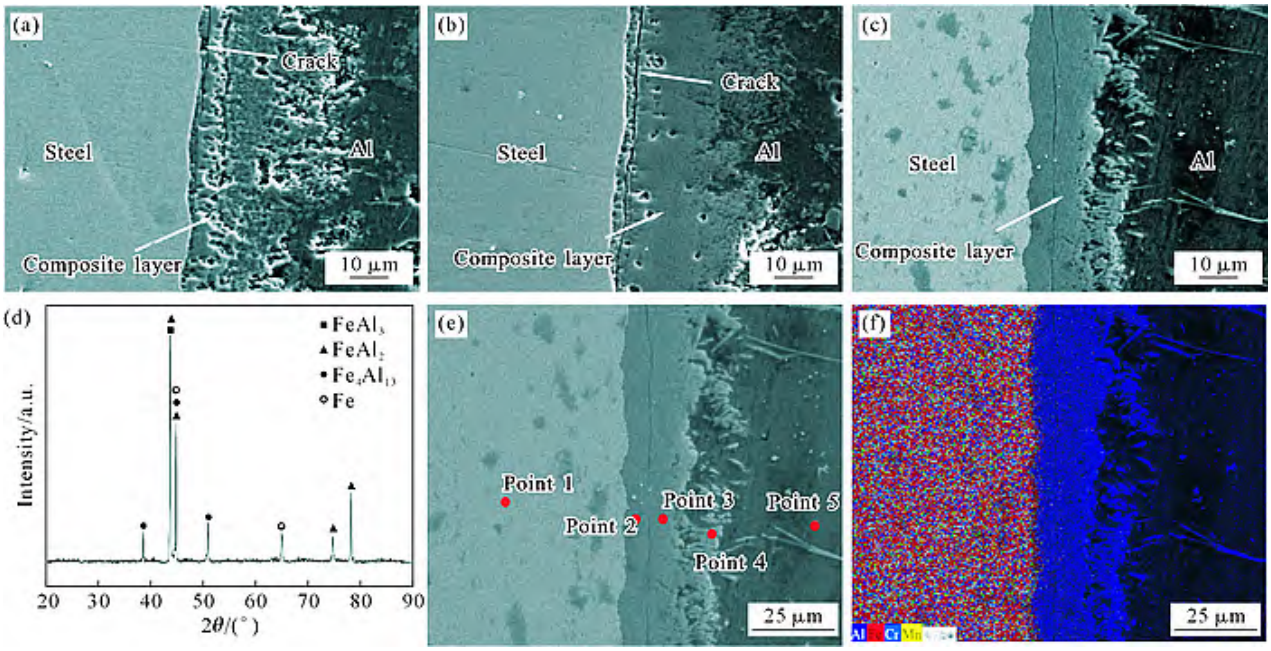


图 5　铝/镀锌钢复合层 SEM 图像：(a) 4# 试样；(b) 5# 试样；(c) 6# 试样；(d) 6# 试样 XRD 图谱；(e) 6# 试样 EDS 点分析；(f) 6# 试样 EDS 面分析

Fig.5　SEM images of the aluminium/galvanized steel composite: (a) specimen #4; (b) specimen #5; (c) specimen #6; (d) XRD pattern of specimen #6; (e) EDS point analysis of specimen #6; (f) EDS map analysis of specimen #6

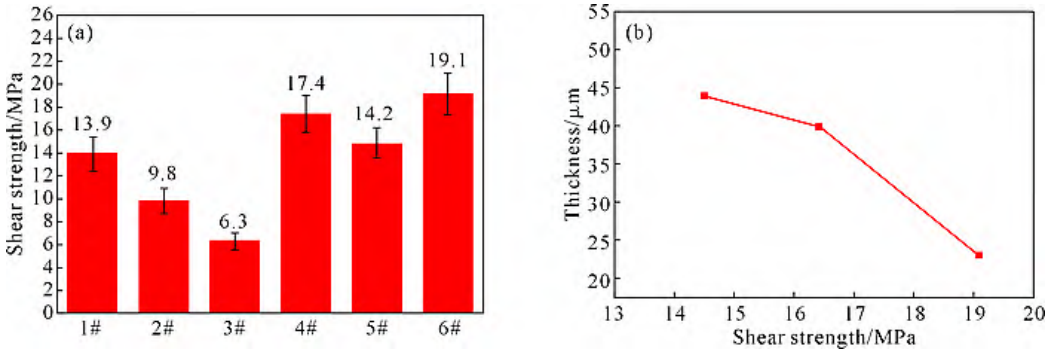


图 6　钢/铝复合试样力学性能分析：(a) 平均剪切强度；(b) 复合层厚度与剪切强度趋势

Fig.6　Analysis of the mechanical properties of the steel/aluminium composite specimens: (a) average shear strength; (b) trend of the composite layer thickness and shear strength

表 5 试样 6 EDS 各点成分

Tab.5 EDS point analysis of specimen 6#

(atomic fraction/%)

Scan location	Chemical composition				
	Al	Fe	Si	Cr	Mn
1	0.40	77.00	0.50	19.90	2.10
2	56.60	33.00	0.30	8.80	1.30
3	63.80	30.10	0.10	5.70	0.40
4	66.90	28.20		4.30	0.30
5	98.70	0.40		0.60	0.10

4#、5#试样，是由于镀层部分不均匀，钢表面的润湿、活化作用降低造成的。结合图5b复合层厚度与剪切强度趋势图可知，观察4#、5#试样复合层厚度明显高于6#试样，经验表明，许多强度试验数据分析以及强度与复合层组织关系都显示出钢/铝结合强度与界面的金属间化合物种类、复合层厚度有直接影响，复合层厚度越小结合强度越高，钢/铝界面复合层的厚度10 μm左右时，可以得到较高的强度[22-23]。随着钢/铝复合层厚度的降低，界面平均剪切强度逐渐变大。

2.4　复合层导热性分析

对4#、5#、6#试样进行导热性能测试，结果见图7。随着Al、Fe原子的不断扩散，复合层厚度增加，合金热导率逐渐从88.23 W/(m·K)降至49.45 W/(m·K)，降幅达43.95%。4#试样基体移动速度3 mm/s时，随着Fe、Al原子不断扩散，晶界数量增多，对自由电子的运动有着强烈的阻碍作用，会降低能量传输效率及导热性能。基体移动速度7 mm/s时，5#试样热导率降幅明显加剧，因为复合层导热系数由电子导热和声子导热共同贡献，热运动引起点阵上原子的偏移，杂质原子引起晶格畸变，位错、晶界引起点阵缺陷，均对电子运动起到散射作用。此外，自由电子在运动过程中与振动原子相遇，将受到振动原子的散射作用，

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

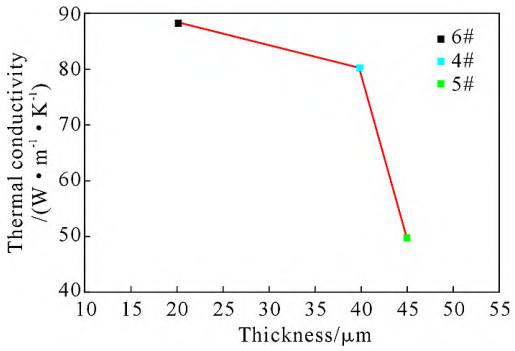


图 7 复合层厚度与导热系数趋势

Fig.7 Trends of the composite layer thickness and thermal conductivity

自由电子在运动过程中受到裂纹缺陷和声子的散射作用,产生电子热阻,对热传导的阻隔能力变大[24]。基体移动速度12 mm/s时,6#试样复合层结构完整,自由电子定向传输效率升高,导电及导热性能也随之升高[25-26]。

3 结论

(1)利用冲击射流固-液复合法成功制备出钢/铝复合材料。铝液以一定角度浇铸到钢基体表面,利用铝液与钢基体之间的冲击对流换热作用实现冶金结合,镀锌工艺复合层微观形貌及结合强度均优于表面抛光处理钢/铝铸件。

(2)验证了钢/铝固–液复合理论,其过程是当铝液在钢基底表面漫流、润湿时,首先与镀层Zn发生共晶反应,待镀层原子扩散完毕之后,强化换热反应开始,使得钢基体表面发生微溶解,Fe原子将不断的向共晶合金内扩散、生长。复合层中金属间化合物主要为$FeAl_2$(含铝49.13%左右),$FeAl_3$(含铝13.87%左右)及Fe_4Al_{13}(含铝54.71%左右)。在复合层中随着Al浓度的增加生成相依次为$FeAl_2$→Fe_2Al_5→Fe_4Al_{13}。

(3)复合层厚度越低平均剪切强度越高。镀锌钢在移动速度12 mm/s时,结合强度最高达到19.1 MPa。复合层厚度越低热导率越高。自由电子定向传输效率越高,导电及导热性能也随之升高,镀锌钢在移动速度12 mm/s时热导率达到88.23 W/(m·K),7 mm/s时热导率49.45 W/(m·K),降幅明显,主要是由于复合层中出现一定程度微裂纹对热流量传输有着强烈的阻碍作用导致的。

参考文献:

[1] 闫飞,周一凡,唐本刊,卓学滨. 铝/钢异种材料激光搭接焊接头组织与性能研究[J]. 应用激光,2023, 43(2): 65-69.
YAN F, ZHOU Y F, TANG B K, ZHUO X B, et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum/steel dissimilar laser lap welding joints[J]. Applied Lasers, 2023, 43(2): 65-69.

[2] WANG Q G, BOBEL A, WALKER M, HESS D, DOTY H, GERARD D. Evaluation of two new cast aluminum alloys for high performance cylinder heads[J]. Transactions of the American Foundry Society, 2023, 131: 107-114.

[3] LI L X, DU Q Y, SUN M H, LIU X T, ZHAO C. Study on the mechanism of strengthening the bonding strength of Cu/Al composite strip by cross shear behaviour from vibration cast-rolling process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121: 7413-7426.

[4] ŞIMŞIR M, KUMRUOĞLU L C, ÖZER A. An investigation into stainless-steel/structural-alloy-steel bimetal produced by shell mould casting[J]. Materials & Design, 2009, 30(2): 264-270.

[5] Paper abstracts contained in the proceedings of the 10th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, S2P2008[J]. China Foundry, 2009, 6(2): 170-175.

[6] 周继扬, 杜小东. 喷射铸造——一种崭新成型工艺[J]. 铸造, 1992(11): 28-32.
ZHOU J Y, DU X D. Jet casting-a new molding process[J]. Foundry, 1992(11): 28-32.

[7] LIU T, WANG Q D, LIU P, SUN J W, YIN X L, WANG Q G. Microstructure and mechanical properties of overcast aluminum joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(4): 1064-1072.

[8] 张君尧. 中国冶金百科全书:金属材料[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
ZHANG J Y. China metallurgy encyclopedia[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.

[9] 刘耀辉,刘海峰,于思荣. 液固结合双金属复合材料界面研究[J]. 机械工程学报,2000, 36(7): 81-85.
LIU Y H, LIU H F, YU S R. Study on bimetal composite material interface by liquid-solid bonding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(7): 81-85.

[10] RADSCHEIT C R. Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl[D]. Bremen: University of Bremen, 1997.

[11] BOUCHÉ K, BARBIER F, COULET A. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 249(1-2): 167-175.

[12] PARAMSOTHY M, SRIKANTH N, GUPTA M. Solidification processed Mg/Al bimetal macrocomposite: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1-2): 200-208.

[13] WANG Y Y, LUO G Q, ZHANG J, SHEN Q, ZHANG L M. Microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded Mg-Al joints using silver film as interlayer [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559: 868-874.

[14] ZHANG J, LUO G Q, WANG Y Y ,SHEN Q, ZHANG L M. An investigation on diffusion bonding of aluminum and magnesium using a Ni interlayer[J]. Materials Letters, 2012, 83: 189-191.

[15] JIANG W M, FAN Z T, LI G Y, LI C. Effects of zinc coating on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/steel bimetallic composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 678: 249-257.

[16] BICK T, TREUTLER K, WESLING V. Soldering of steel sheets

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and zinc-coated aluminum by hybrid composite forging[J]. Welding in the World, 2021, 65: 353-360.

[17] HOPPE C, EBBERT C, GROTHE R, SCHMIDT H C, HORDYCH I, HOMBERG W, MAIER H J, GRUNDMEIER. Influence of the surface and heat treatment on the bond strength of galvanized steel/aluminum composites joined by plastic deformation [J]. Advanced Engingeering Materials, 2016, 18(8): 1371-1380.

[18] CAO X L, WANG G, XING C, TAN C W, JIANG J J. Effect of process parameters on microstructure and properties of laser welded joints of aluminum/steel with Ni/Cu interlayer[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(8): 2277-2286.

[19] 李迟，樊自田，蒋文明，孙锐，陈金源，王春风，易致达. 表面处理对钢–铝双金属铸件组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2015(5): 516-519.
LI C, FAN Z T, JIANG W M, SUN R, CHEN J Y, WANG C F, YI Z D. Effect of surface treatment on microstructure and properties of steel-aluminum bimetallic castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(5): 516-519.

[20] BICK T, HEULER V, TREUTLER K, WESLING V. Characterization of influences of steel-aluminum dissimilar joints with intermediate zinc layer[J]. Metals, 2020, 10(4): 442.

[21] 祖国胤，张影，魏振雄，满婷. Fe-Al微叠层复合材料的制备及界面表征[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2021, 42(11): 1554-1561.
ZU G Y, ZHANG Y, WEI Z X, MAN T. Preparation and interface characterization of Fe-Al micro-laminated composites[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(11): 1554-1561.

[22] 里亚博夫著，铝及铝合金与其它金属的焊接[M]. 王义衡，赵瑞湘译. 北京：宇航出版社，1990.
РЯБОР В Р, Welding of aluminum and aluminum alloys and other metals[M]. WANG Y H, ZHAO R X translate. Beijing: Aerospace Press, 1990.

[23] ZIENERT T, AMIRKHANYAN L, SEIDEL J, WIRNATA R, WEISSBACH T, GRUBER T, FABRICHNAYA O, KORTUS J. Heat capacity of η-AlFe (Fe_2Al_5) [J]. Intermetallics, 2016, 77: 14-22.

[24] SU C Y, LI D J, LUO A A, YING T, ZENG X Q. Effect of solute atoms and second phases on the thermal conductivity of Mg-RE alloys: A quantitative study[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 431-437.

[25] 周玉立，邹纯，赵明宝，王占坤，钟鼓，王际海，张保存. Mg、Sc对铸造铝合金导热和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39(4): 353-356.
ZHOU Y L, ZOU C, ZHAO M B, WANG Z K, ZHONG G, WANG J H, ZHANG B C. Effect of Mg and Sc elements on the thermal conductivity and mechanical properties of casting Al alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(4): 353-356.

[26] CHEN J K, HUNG H Y, WANG C F, TANG N K. Effect of casting and heat treatment process on the thermal conductivity of Al-Si-Cu- Fe-Zn alloy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 189-195.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net