

# 包覆层浇注温度对铝 / 钢液 - 固复合组织及性能的影响

杨成<sup>1</sup>, 李晓<sup>1</sup>, 姜荣恒<sup>2</sup>, 高思明<sup>2</sup>, 张达<sup>3</sup>

(1. 国能中卫热电有限公司, 宁夏中卫 755000; 2. 哈尔滨华德学院 智能制造工程学院, 黑龙江哈尔滨 150025; 3. 佳木斯大学 材料科学与工程学院, 黑龙江佳木斯 154007)

**摘要:** 以304不锈钢、纯铝为试验材料, 通过自主设计的浇注系统, 采用液-固复合铸造工艺制备得到铝/钢双金属复合材料, 对304不锈钢表面进行镀镍预处理, 利用SEM及XRD等研究了纯铝浇注温度(750、780、810 °C)对铝/钢复合界面微观形貌、成分及力学性能的影响。结果表明: 与镀镍前相比, 铝/镀镍钢扩散层微观形貌明显改善, 镀镍层提高了铝液在钢基体表面的活性及润湿性。随浇注温度升高, 扩散层剪切强度和厚度增加。810 °C浇注温度下, 铝/钢结合质量最佳, 扩散层无夹杂、气孔等缺陷, 且复合界面平均剪切强度最高, 为25.78 MPa。铝/钢扩散层显微硬度随浇注温度升高呈先增加后降低的趋势, 浇注温度为780 °C时, 扩散层硬度最高, 达到HV1 000左右。

**关键词:** 铝/钢双金属; 液-固复合; 浇注温度; 镀镍

**中图分类号:** TG174.4; TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0336-07

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0048

## Effect of Coating Pouring Temperature on the Microstructure and Properties of Aluminum/Steel Liquid Solid Composite

YANG Cheng<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>1</sup>, JIANG Rong-heng<sup>2</sup>, GAO Si-ming<sup>2</sup>, ZHANG Da<sup>3</sup>

(1. Guoneng Zhongwei Thermal Power Co., Ltd., Zhongwei 755000, Ningxia, China; 2. School of Intelligent Manufacturing Engineering, Harbin Huade University, Harbin 150025, Heilongjiang, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Using 304 stainless steel and pure aluminum as test materials, the aluminum/steel bimetallic composite materials were prepared via liquid-solid composite casting technology and a self-designed pouring system. The surface of 304 stainless steel was pretreated by nickel plating, and the effects of pure aluminum pouring temperatures (750, 780, 810 °C) on microstructure, composition, and mechanical properties of aluminum/steel composite interface were studied using SEM and XRD. The results show that the microstructure of the diffusion layer of aluminum/nickel plated steel is significantly improved, compared with that before nickel plating. The nickel coating can improve the surface activity and wettability of aluminum liquid on the steel substrate. As the pouring temperature increases, the shear strength and thickness of diffusion layer increase. The aluminum/steel has the best bonding quality at pouring temperature of 810 °C, with no defects such as inclusions or pores in the diffusion layer, and the average shear strength of the composite interface is up to 25.78 MPa. The microhardness of the aluminum/steel diffusion layer increases first and then decreases with the increase of pouring temperature. At the pouring temperature of 780 °C, the microhardness of the diffusion layer reaches a maximum of about HV1 000.

**Key words:** aluminum/steel bimetallic; liquid-solid composite; pouring temperature; nickel plating

“十五五”规划建议指出, 要着力培育壮大新兴产业, 加快新能源、新材料等战略性新兴产业集群发展。汽车轻量化作为连接“新能源”与“新材料”两大战略性新兴产业的枢纽工程, 不仅能够缓解新能

源车续航问题, 更有助于落实“十五五”规划, 提升中国制造业整体竞争力。轻量化的实现是一项系统工程, 主要通过三种途径进行优势互补<sup>[1-2]</sup>: 轻量化材料开发、结构优化及先进制造工艺的集成化设计。轻

**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)。

**收稿日期:** 2025-12-12 收到初稿, 2026-01-03 收到修订稿。

**作者简介:** 杨成(1991-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为特殊燃料特性汽轮机设计。E-mail: 283688742@qq.com

**通信作者:** 张达, 男, 讲师, 研究方向为双金属复合材料。E-mail: 1790323529@qq.com

**引用格式:** 杨成, 李晓, 姜荣恒, 等. 包覆层浇注温度对铝 / 钢液 - 固复合组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (4): 336-342.  
YANG Cheng, LI Xiao, JIANG Rongheng, et al. Effect of coating pouring temperature on the microstructure and properties of aluminum/steel liquid solid composite [J]. Foundry, 2026, 75 (4): 336-342.

质材料替代是基础,因此要重点提高汽车轻量化材料的开发及制备。近年来,汽车领域出现铝/钢异种材料的构思,将304不锈钢和铝的优良性能结合起来,可制备出具有比重小、强度高、耐蚀性及导热性好等多种性能的双金属复合材料,在提高材料性能的同时降低成本。研究铝/钢复合材料对汽车等诸多领域的轻量化具有重要现实意义<sup>[3]</sup>。

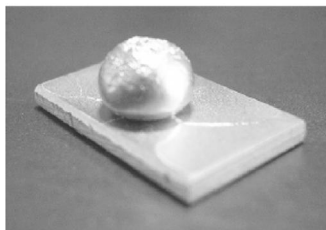
双金属复合材料制备工艺主要为固-固复合、液-液复合和液-固复合。其中,固-固复合制备方法主要有焊接、轧制等。但焊接过程中IMC(金属间化合物)的不足或过度形成可能损害焊接接头性能。尤其异种材料焊接时,IMC层的成分及厚度控制仍有较大困难<sup>[4]</sup>。而轧制法制备的复合板界面易出现加工硬化及孔洞等缺陷。铝/钢液-液复合(共铸法)存在材料选择受限、复合层厚度难以精确控制等问题,一般不采用此方法。

相比而言,液-固复合法具有生产成本低、加工工艺简单、产品界面结合强度高等优势。但由于铝/钢之间的化学及物理性能有较大差异,二者在液-固复合过程中存在较多问题,这制约了铝/钢复合材料的发展。主要问题如下:(1)表面处理。钢板表层的氧化膜会严重阻碍铝/钢之间的冶金复合,如何清除该氧化膜,并防止钢基体在浇注工序中发生二次氧化,是决定铝/钢双金属良好结合的关键。(2)镀层

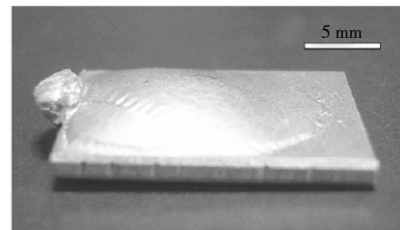
选择。合适的镀层材料不仅可以避免浇注时钢板再次氧化,还可避免对铝/钢之间的结合产生不良影响。

(3)浇注温度。浇注温度太低会延长液态铝在钢板表面的润湿时间,并且Fe原子向Al侧的扩散速率将会减慢,导致扩散层厚度较薄,引起复合材料性能下降。若温度太高,则会导致扩散层过厚,复合材料将容易发生断裂。故在浇注前,预先确定浇注温度并对钢板表面做镀层预处理,同时合理控制工艺参数能够减少脆硬相的形成,获得性能优良的复合界面<sup>[5-6]</sup>。研究表明<sup>[7-14]</sup>,Cu、Zn、Ni等金属常作为中间镀层使用,可有效提高基体合金的表面质量及润湿性。图1所示为镀锌前后Al-Mg合金基体的润湿性,锌涂覆合金材料与铝液的润湿角低于 $10^\circ$ <sup>[15]</sup>。León等<sup>[16]</sup>发现,在 $Al_2O_3$ 陶瓷基板上镀镍后,其与铝液的润湿性显著改善,由原本的不润湿转变为润湿角达 $11.6^\circ$ 。

目前,通过液-固复合铸造工艺制备铝/镀镍钢复合材料的相关研究较为匮乏。因此,本课题对304不锈钢表面进行镀镍预处理,采用自主设计的液-固复合浇注系统制备铝/钢复合材料,最大限度地减少热输入并缩短高温停留时间,从而将界面脆性金属间化合物的生长控制在允许范围内,并研究了不同浇注温度对铝/钢扩散层微观形貌、成分及力学性能的影响,为该工艺的进一步推广和应用提供依据。



(a) 氧化层未处理基底



(b) 镀锌基底

图1 氧化层未处理基底及锌涂覆基底的润湿性

Fig. 1 Wettability of untreated substrate with oxidation layer and zinc coated substrate

## 1 试验材料与方法

基体材料为304不锈钢板,尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,浇注材料选用纯铝锭,材料的化学成分如表1和表2所示,物理性能如表3所示。

镀镍前使用200目~1 500目砂纸对钢基体表面进行

打磨,去除氧化膜和杂质,然后使用除锈剂清洗钢基体,去除表面油污后进行水洗。将钢板置于4%硝酸酒精溶液中浸泡30 s,活化钢板表面,再次水洗后准备施镀。图2为化学镀镍示意图。配制1 000 mL镀液,镀液成分如表4所示,配制过程如下:取600 mL蒸馏水预热

表1 304不锈钢的化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of 304 stainless steel

Cr	Ni	C	Mn	Si	P	Si	Fe
17.0~19.0	8.0~10.0	$\leq 0.07$	$\leq 2.0$	$\leq 1.0$	$\leq 0.035$	$\leq 1.0$	余量

$w_B/\%$

表2 纯铝的化学成分  
Tab. 2 Chemical composition of pure aluminum

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	V	Fe	Al
0.25	≤0.05	≤0.03	≤0.05	≤0.03	≤0.03	≤0.05	≤0.4	余量

表3 试验材料的物理性能  
Tab. 3 Physical properties of test materials

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	剪切强度/MPa	熔点/℃	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	硬度HB	线膨胀系数/10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup>
纯铝	80~100	60~80	100~180	660.4	2.698 9	25~32	24.3
304不锈钢	515~1 035	≥205	312~415	1 398~1 454	7.93	≤187	17.3

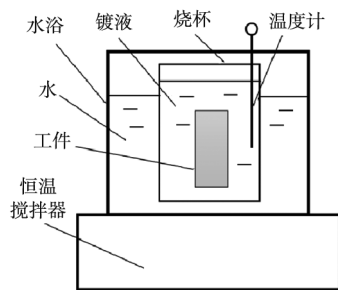


图2 化学镀镍示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electroless nickel plating

表4 化学镀液成分  
Tab. 4 Composition of chemical plating solution

名称	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
硫酸镍	30
丁二酸	15
次磷酸钠	20

到65℃, 溶解硫酸镍和丁二酸, 再取300 mL (65℃) 蒸馏水溶解次磷酸钠, 搅拌后将溶液倒入一个烧杯中; 使用稀硫酸调节溶液pH为4.8~5.2, 倒入蒸馏水将镀液调至1 000 mL。将镀液搅拌均匀后置于恒温水浴锅中, 保持80℃恒温, 将304不锈钢板悬空放置于镀液中, 施镀时间为60 min。

包覆层浇注温度是液-固复合过程中的重要工艺参数, 直接影响着铝液在钢基体表面的流动性。包覆层浇注温度过高时扩散程度加剧, 易产生多种金属间化合物, 且对于纯铝来说, 过度提高浇注温度会增加熔炼时间, 加大氧化风险和元素烧损率; 浇注温度过低时, 铝液流动性较差, 元素之间扩散不充分。故本试验将浇注温度设定在750~810℃, 研究其对材料复合区域的影响。

铝/钢液-固复合材料制备示意图见图3, 预先将镀镍钢固定在凹槽内, 利用自主设计的浇注系统使铝液冲击浇注在钢基体表面, 二者产生充分的强化换热反应后达到冶金结合状态, 将K型热电偶连接到无纸记录

仪各通道, 显示铝液各点横向温度分布及钢基体表面的温度变化。在表5所示试验参数下, 制备出4组复合试样, 铝液冷却后测得其包覆层厚度在15 mm左右。在铝/钢扩散区域截取金相试样, 打磨抛光后用5 mL HNO<sub>3</sub>+1 mL HF+94 mL H<sub>2</sub>O配置的混合溶液进行蚀刻。

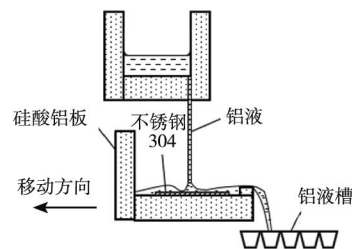


图3 液-固复合法制备铝/钢复合材料示意图

Fig. 3 Schematic diagram of aluminum/steel composite material prepared by liquid-solid composite method

表5 铝/钢复合试验的主要参数  
Tab. 5 Main parameters of aluminum/steel composite experiments

试样编号	表面处理	镀层厚度/μm	浇注温度/℃
1	抛光		810
2	镀镍	12.19	750
3	镀镍	12.19	780
4	镀镍	12.19	810

采用JSM-7800F型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察铝/钢复合界面处的形貌以及结合状况, 并使用牛津能谱仪 (EDS) 对扩散层元素进行定性和定量分析。

利用HVT-1000A型显微硬度计测定试样硬度, 载荷为1.96 N, 加载时间为5 s, 每个试样钢侧和铝侧各测量3次, 扩散层测量5次, 取平均值。用线切割机切取尺寸为20 mm×10 mm×6 mm的试样, 如图4 (a) 所示, 用WDT-10微机控制电子万能试验机测量试样界面剪切强度, 将试样固定在图4 (b) 所示装置上, 加载速率为1 mm·min<sup>-1</sup>。根据下式计算剪切强度:

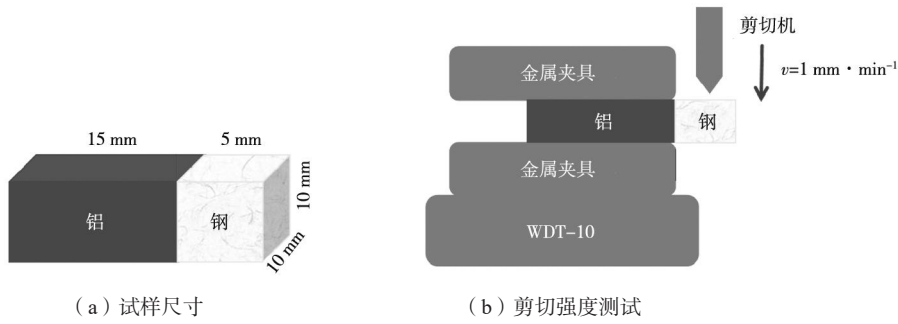


图4 铝/钢复合试样剪切强度测试示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of shear strength test of aluminum/steel composite specimen

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

式中： $F_{\max}$ 为加载试验的最大载荷； $S$ 为铝/钢复合界面面积。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 钢基体镀镍层分析

由图5可以看出，钢基体表面镀镍层厚度约为12.19  $\mu\text{m}$ ，镀层厚度均匀、完整，与基体结合较好，无脱落现象，但镀镍层与钢基体结合处存在部分黑色夹杂，需进一步清洁处理。总体来看施镀效果较好，镀镍层已达到试验预期要求。

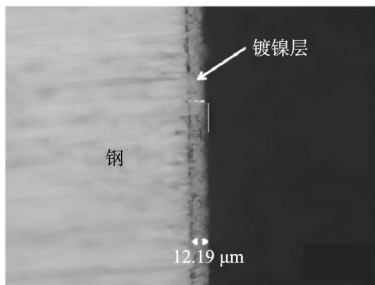


图5 钢基体表面镀镍层形貌

Fig. 5 Morphology of nickel coating on steel substrate surface

### 2.2 铝/钢复合界面组织分析

图6为未镀镍试样复合界面SEM形貌。铝/钢扩散层出现明显裂缝，二者之间并未形成冶金结合。这主要是由于钢/铝表面产生了氧化物构成的隔离层，导致铝液在钢基体表面润湿性较差，阻碍了两者的相互扩散以及进一步的扩散反应。可见解决界面氧化膜问题是制备铝/钢复合材料的关键因素之一。

图7为镀镍后不同浇注温度下铝/钢复合试样的SEM形貌。相比未镀镍试样，镀镍后铝/钢扩散层整体结合效果有较大改善，但750  $^{\circ}\text{C}$ 下，扩散层近钢侧出现明显裂纹、夹杂等缺陷。一方面由于浇注温度较低，

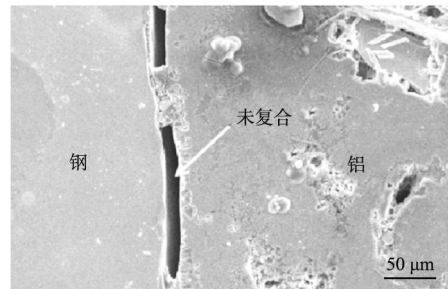
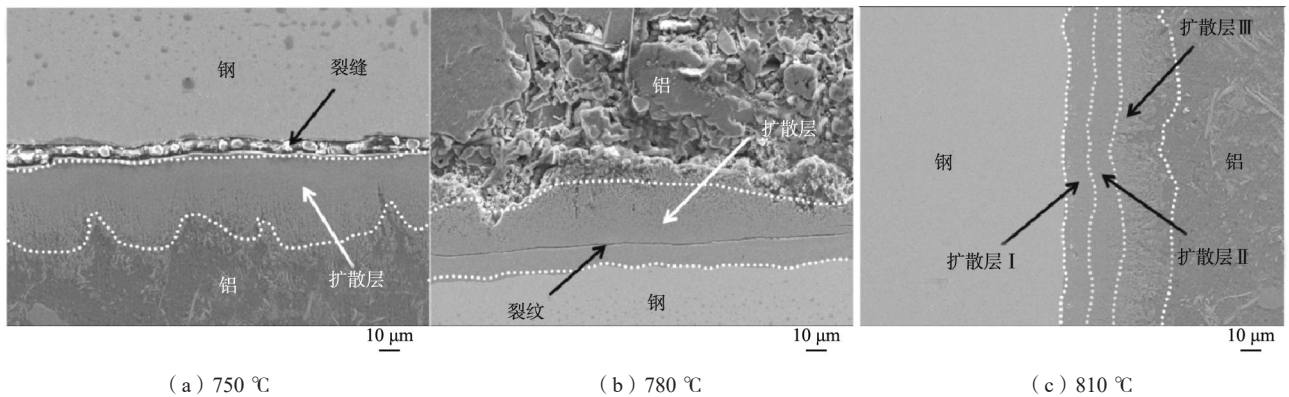


图6 无镀镍层铝/钢复合界面SEM形貌

Fig. 6 SEM morphology of aluminum/steel composite interface without nickel coating



(a) 750  $^{\circ}\text{C}$

(b) 780  $^{\circ}\text{C}$

(c) 810  $^{\circ}\text{C}$

图7 三种浇注温度下铝/钢复合扩散层SEM形貌

Fig. 7 SEM morphologies of aluminum/steel composite diffusion layers under three pouring temperatures

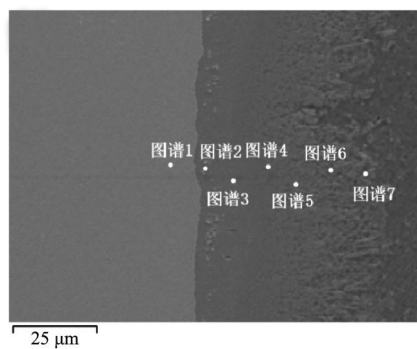
铝液在钢基体表面润湿性较差，元素之间扩散不充分，另一方面铝液温度远高于钢基体，在热量传输过程中铝液快速冷却，易产生激冷作用，阻止Fe、Al原子排列成有序的金属间化合物结构，从而形成裂缝。浇注温度达到780℃时，铝/钢之间虽已经形成冶金结合，但扩散层区域仍产生了微裂纹，分析可知随着浇注温度提高，铝和钢之间的相互扩散更加显著，扩散层厚度也逐渐增加，且在铝液与钢基体开始接触到浇注结束，复合界面温度梯度不断变化，铝、钢两侧收缩程度不一致，所以在温度变化过程中易产生热应力而形成微裂纹<sup>[17-18]</sup>。浇注温度为810℃时，铝/钢界面处形成了厚度60~65 μm的扩散层，扩散层表面光滑无缺陷，组织进一步生长为平整的“夹心状”，该趋势与温度呈正相关，近钢侧扩散层较致密，铝侧则呈现松散的絮状及树枝状组织。

进一步分析浇注温度为810℃的铝/镀镍钢试样扩散层成分，EDS点分析位置及数据如图8(a)和表6所示，可知点1~7的Al含量依次增加，Fe含量依次减少。根据Fe-Al二元相图可知，Al元素质量分数在64.5%~99.97%时，共晶组织一般为Al-FeAl<sub>3</sub>、Al-FeAl<sub>2</sub>、Al-Fe<sub>3</sub>Al。FeAl<sub>3</sub>中铝元素质量分数为58%~64.5%左右<sup>[19-20]</sup>。结合图8(b) XRD分析结果，剪

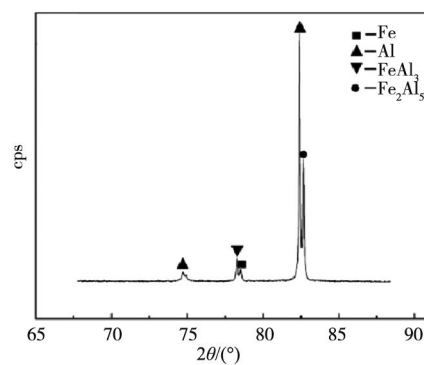
切断裂面上存在Fe、Al、Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>和FeAl<sub>3</sub>相。分析可知，反应初期，Fe原子向铝液中扩散，当铝中铁含量达到一定程度时，率先在铝/钢复合界面处产生FeAl<sub>3</sub>相，随界面间Fe、Al原子进一步扩散，FeAl<sub>3</sub>金属间化合物层厚度增加。点2、3位于扩散层Ⅰ区，可以推断物相为Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>，该区域厚度约为20 μm；点4位于扩散层Ⅱ区，Al-FeAl<sub>3</sub>等共晶组织厚度约为15 μm；随着扩散层区域铝含量的增加，扩散层Ⅲ区产生FeAl<sub>3</sub>相，该区域厚度约为25 μm；点7为铝材料。

表6 810℃浇注温度下铝/镀镍钢复合界面EDS点扫描结果  
Tab. 6 EDS point scan results of aluminum/nickel plated steel composite interface under pouring temperature of 810℃

扫描位置	原子分数/%					可能的相组成
	Al	Fe	Cr	Mn	Ni	
1	0.7	71.1	18.7	1.7	7.8	Fe
2	54.3	31.7	11	1.1	1.9	Fe <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>
3	58.2	32.3	6.8	0.6	2	Fe <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>
4	65.3	27.9	4.9	0.5	1.5	Al-FeAl <sub>3</sub>
5	66	27.8	4.4	0.3	1.5	FeAl <sub>3</sub>
6	67.6	28.8	2.5	0.2	1	FeAl <sub>3</sub>
7	98.9	0.4	0.7	1.0	—	Al



(a) EDS点分析位置



(b) XRD图谱

图8 810℃浇注温度下铝/镀镍钢复合界面EDS点分析位置及XRD图谱

Fig. 8 EDS point analysis positions and XRD spectrum of aluminum/nickel plated steel composite interface under pouring temperature of 810℃

图9为铝/镀镍钢扩散界面EDS面扫描元素分布。可以看出，Al、Fe、Ni等元素均发生了扩散现象，当液态铝在钢基体表面漫流、润湿时，首先与镀层Ni发生共晶反应，待镀层原子扩散完毕之后，Fe原子不断向共晶合金内扩散复合，其中少部分Fe元素进入铝中，Al元素主要分布于扩散层中，镀镍层成分完全进入扩散层和钢基体中，一部分扩散进铝中。因此，施加镀镍镀层可以促进界面反应，提高铝液在钢基体表面的润湿性和铺展能力<sup>[21]</sup>。这意味着镀层不仅能防止钢基体氧化，还能一定程度上抑制铝/钢界面处Al、Fe界面金

属化合物的形成。

## 2.3 铝/钢复合界面力学性能分析

### 2.3.1 剪切强度

铝/钢复合材料剪切强度主要受扩散层组织和厚度影响。图10(a)为不同浇注温度下铝/镀镍钢的剪切强度。750℃下剪切强度较低，为15.87 MPa，结合微观形貌可知由于浇注温度较低，对流换热程度较弱，复合材料扩散区域存在明显裂纹。780℃下剪切强度为20.18 MPa，其扩散层区域结合较完整，但仍可观察到

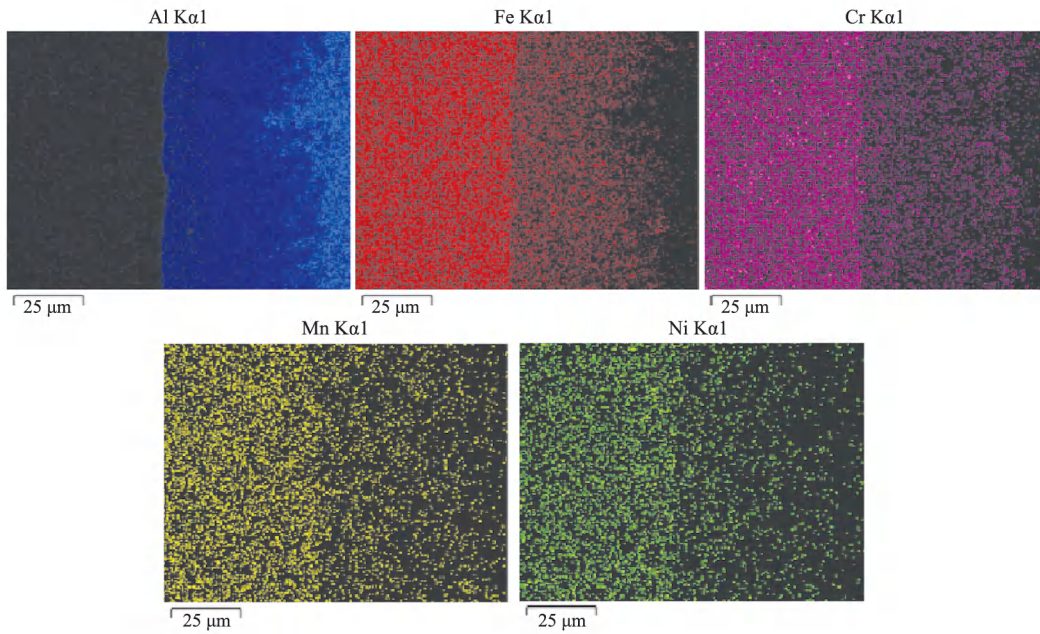
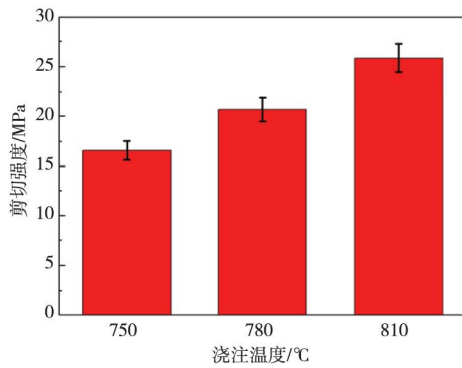
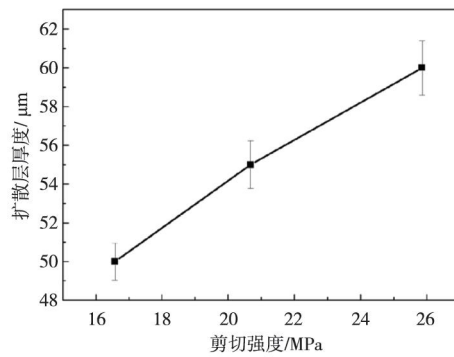


图9 810 °C浇注温度下铝/镀镍钢复合界面EDS面扫描元素分布

Fig. 9 EDS surface scanning element distribution of aluminum/nickel plated steel composite interface under pouring temperature of 810 °C



(a) 不同浇注温度下的剪切强度



(b) 剪切强度与扩散层厚度的关系

图10 不同浇注温度下铝/镀镍钢复合试样的剪切强度和扩散层厚度

Fig. 10 Shear strengths and diffusion layer thicknesses of aluminum/nickel plated steel composite specimens under different pouring temperatures

微裂纹。810 °C下试样因形成完整冶金结合而展现出更高的剪切强度，达到25.78 MPa。这种改善归因于铝液与钢基体充分的热交换作用，且镀镍层的存在有效缓解了硬脆Al-Fe界面的不利影响，此时润湿效果达到最佳状态，应力集中减少，界面结合强度显著增强。图10 (b) 显示随着扩散层厚度的提升，剪切强度有上升趋势，两者均与浇注温度呈正相关。

### 2.3.2 显微硬度

图11为复合试样显微硬度分布，铝侧HV硬度值约为35，钢侧HV硬度值约为220。750、780、810 °C浇注温度下，扩散层HV硬度值分别约为795、1 000、850。结合微观组织分析可知，扩散层组织以 $Fe_2Al_5$ 为主，掺杂部分其他相，金属间化合物硬度普遍较高，这也是扩散层硬度高的原因。扩散层硬度随浇注温度升高先

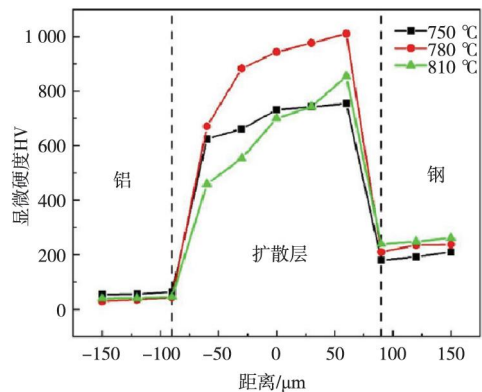


图11 不同浇注温度下铝/镀镍钢显微硬度分布

Fig. 11 Microhardness distributions of aluminum/nickel plated steels under different pouring temperatures

上升后下降，这是因为810 °C下 $Fe_2Al_5$ 相部分转变为稳定的 $FeAl_3$ ，而 $FeAl_3$ 硬度较低<sup>[22]</sup>。

### 3 结论

本研究通过对钢基体表面进行化学镀镍预处理,在750、780和810 °C三组浇注温度下,采用液-固复合法成功制备得到铝/钢复合试样,分析了不同浇注温度下扩散层的显微组织及力学性能。结论如下:

(1) 镀镍层可提高铝液在钢基体表面的活性及润湿性,扩散层整体结合效果较镀镍前大幅改善。810 °C

浇注温度下,铝/钢扩散层表面光滑完整、无缺陷,形成了良好的冶金结合。

(2) 铝/钢界面近钢侧组织主要为 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,近铝侧主要为 $\text{FeAl}_3$ 相和部分中间相。随浇注温度升高,扩散层冶金结合效果逐渐变好,铝/钢复合试样剪切强度及扩散层厚度呈上升趋势,810 °C下试样剪切强度最高,为25.78 MPa。显微硬度先上升后下降,780 °C时扩散层硬度最高,约为HV1 000。

#### 参考文献:

- [1] 高辰恺,杨瑾,李铸国,等. 铝/钢异种金属先进连接方法研究进展[J]. 焊接, 2021(11): 7-20.
- [2] ZHOU D S, WANG Y, LI S H, et al. Optimization of aluminum alloy steering knuckle for automotive lightweighting and performance enhancement [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025, 47: 327.
- [3] FU L, ZHU Y F, YANG B, et al. Effect of annealing on properties of Al/steel composite plates prepared by surface oxidation treatment before cold roll bonding [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 30: 749-759.
- [4] YANG Y, LUO Z, ZHANG Y X, et al. Dissimilar welding of aluminium to steel: a review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110: 376-397.
- [5] JIANG W M, FAN Z T, LI G Y, et al. Effects of hot-dip galvanizing and aluminizing on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/iron bimetallic composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 742-751.
- [6] YU H, ZHANG G W, LV W Z, et al. Improved microstructure and shear strength of the Al/steel bimetal prepared by compound casting under magnetic field [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 932: 167343.
- [7] QIU J, LI Y D, WANG X Y, et al. Influence of steel surface treatments on the microstructure and mechanical properties of Al/steel composite plates prepared by rheological cast-rolling [J]. Materials Characterization, 2025, 227: 115228.
- [8] MIELKE F, SULIK D, FANG X F. Influence of high-pressure die casting parameters on bonding characteristics of aluminium-steel hybrid-castings for automotive lightweight structures [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 143: 351-368.
- [9] ZHU Y F, JIANG R W, YU C, et al. Effects of different cooling processes on the structure and properties of aluminum/steel composite plate [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025, 38(1): 220-232.
- [10] BOBZIN K, ÖTE M, WIESNER S, et al. Effect of alloying elements on growth behavior of intermetallic compounds at the cold-sprayed coating/steel interface during immersion in aluminum melt [J]. International Journal of Metalcasting, 2018, 12(4): 712-721.
- [11] BICK T, HEULER V, TREUTLER K, et al. Characterization of influences of steel-aluminum dissimilar joints with intermediate zinc layer [J]. Metals, 2020, 10(4): 442.
- [12] BRYAN L, RAFAEL G, HASSAN A G, et al. Fe-Al intermetallic suppression of dissimilar RSW joints using stainless-steel interlayers [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(6): 461-467.
- [13] IBRAHIM I, ITO R, KAKIUCHI T, et al. Fatigue behaviour of Al/steel dissimilar resistance spot welds fabricated using Al-Mg interlayer [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(3): 223-233.
- [14] SHIN J, KIM T, LIM K, et al. Effects of steel type and sandblasting pretreatment on the solid-liquid compound casting characteristics of zinc-coated steel/aluminum bimetal [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 778: 170-185.
- [15] PAPIS K J M, HALLSTEDT B, LÖFFLER J F, et al. Interface formation in aluminium-aluminium compound casting [J]. Acta Materialia, 2008, 56(3): 3036-3043.
- [16] LEÓN C A, DREW R A L. The influence of nickel coating on the wettability of aluminum on ceramics [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2002, 33(10): 1429-1432.
- [17] 黄超. Fe-Al体系扩散相关性质的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [18] WANG H R, HARRINGTON T, ZHU C Y, et al. Design, fabrication and characterization of FeAl-based metallic-intermetallic laminate (MIL) composites [J]. Acta Materialia, 2019, 175: 445-456.
- [19] PAN J, YOSHIDA M, SASAKI G, et al. Ultrasonic insert casting of aluminum alloy [J]. Scripta Materialia, 2000, 43(2): 155-159.
- [20] GLASBRENNER H, WEDEMEYER O. Comparison of hot dip aluminised F82H-mod. steel after different subsequent heat treatments [J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 257(3): 274-281.
- [21] YU G Y, ZOU T P, CHEN S H, et al. Effect mechanism of Ni coating layer on the characteristics of Al/steel dissimilar metal brazing [J]. Materials Characterization, 2020, 167: 110518.
- [22] VON GOLDBECK O K. Iron-binary phase diagrams [M]. Springer, Berlin: Heidelberg, 2013.