

扩散连接 Al/Ni/0Cr18Ni9Ti 复合材料的界面组织

成小乐, 高义民, 邢建东, 廖熠, 尹敏

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 选取纯 Ni 箔作过渡层, 采用真空热压扩散工艺, 在加热温度 480 °C、压力 10 MPa、真空度 1.0×10^{-2} Pa 的工艺条件下, 制备了变形铝合金 2024 和不锈钢 0Cr18Ni9Ti 双金属复合材料. 利用扫描电子显微镜、能谱仪、X 射线衍射仪和显微硬度仪等测试分析方法, 对双金属复合材料的 2 个连接界面及基体进行了组织、性能分析. 结果表明: 不锈钢/纯 Ni 界面形成了宽约 8 μm 的互扩散区, 但其过渡区无金属间化合物生成; Al/Ni 界面生成了宽约 4 μm 的扩散过渡区, 过渡区的相组成为金属间化合物 Al_3Ni_2 、 Al_3Ni 及 Al_3Ni_5 .

关键词: 复合材料; 金属间化合物; 界面; 扩散连接

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0867-03

Investigation into Intermetallic Compounds in Al/Ni/0Cr18Ni9Ti Diffusion Bonded Joint

Cheng Xiaole, Gao Yimin, Xing Jiandong, Liao Yi, Yin Min

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

Abstract: Choosing pure nickel foil as the transition layer, Al/0Cr18Ni9Ti bimetallic composite is prepared with the vacuum warm compaction diffusion method under the condition of 480 °C compaction temperature, 10 MPa pressure and 1.0×10^{-2} Pa vacuum. The structures and performances of the two bimetallic composite bonding interfaces and matrix are analyzed respectively with scanning electron microscope, X-ray diffractometer and Vickers microhardness scale. It is found that under the condition of diffusion bonding, three kinds of intermetallic compounds, Al_3Ni_2 , Al_3Ni and Al_3Ni_5 , form in the Al/Ni interface less than 4 μm in thickness; and no intermetallic compound forms in the Ni/0Cr18Ni9Ti diffusion zone with about 8 μm in thickness.

Keywords: composite; intermetallic compound; interface; diffusion bonding

钢/Al 双金属复合材料既具备 Al 的高导电性、耐腐蚀性、质轻等优点, 又具备钢的耐磨性好、强韧性好、价格便宜等优点, 因而已广泛应用于机械、汽车、铁路、船舶、冶金、矿山、医疗、体育等领域^[1-3]. 目前, 钢/Al 双金属复合材料的制备主要采用压力加工和局部焊接的方法^[4-6], 界面结合方式属于机械结合. 机械结合的主要缺点是层间接触电阻大, 同时由于钢和 Al 的结合面局部有空隙, 会导致结合层的腐蚀加剧, 从而影响导电轨的导电性和使用寿命. 另外, 还有一种比较普遍的制备方法是熔焊法, 但是熔

焊法得到的复合材料属于冶金结合, 在结合界面处有很大的温度梯度, 而且在界面处易于生成脆性金属间化合物 Fe_3Al , 从而大大降低材料的强度及电导率. 虽然人们做过很多工作来提高熔焊接头的性能, 但是效果都不是很好^[7-8].

本文采用真空热压扩散连接法来实现钢/Al 双金属复合材料的结合, 利用自行研制的真空热压扩散设备, 通过 2 次真空热压扩散实现中间添加纯 Ni 过渡层的钢/Al 双金属材料的连接, 并利用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、能谱仪

(EDS)、显微硬度仪等测试分析手段,对双金属复合材料的界面结合区进行组织及性能分析。

1 试验材料及试样制备方法

试验材料采用变形铝合金 2024、不锈钢 0Cr18Ni9Ti 及纯 Ni 箔(质量分数 99.91%)。2024 及 0Cr18Ni9Ti 的化学成分如表 1、表 2 所示。扩散连接试样尺寸均为 $\varnothing 25\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。试验设备为本校耐磨材料研究所自行研制的真空热压炉,设备的技术核心在于通过复合材料界面和加热区相对位置的调整来实现界面附近的温度梯度。试验前对试验材料进行表面处理:纯 Ni 箔进行除油、除锈处理;Al 表面进行化学镀锌,锌层厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$,起防止铝合金高温氧化和抑制 Al/Ni 过度扩散的作用。由于纯 Ni 和不锈钢之间较为剧烈的互扩散要在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上进行,所以实现 Al/Ni/钢 2 个界面的结合要分 2 步来实现。首先在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力 15 MPa 、真空度 $1.0 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ 条件下保温 60 min ,在不锈钢表面预制一层纯 Ni 过渡层,然后在 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力 10 MPa 、真空度 $1.0 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ 条件下保温 30 min ,实现 Al/Ni 的扩散结合,制备出双金属复合材料试样。

表 1 变形铝合金 2024 的化学成分

$w/\%$						
Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	其他
93.6	3.8	1.2	0.5	0.5	0.3	0.1

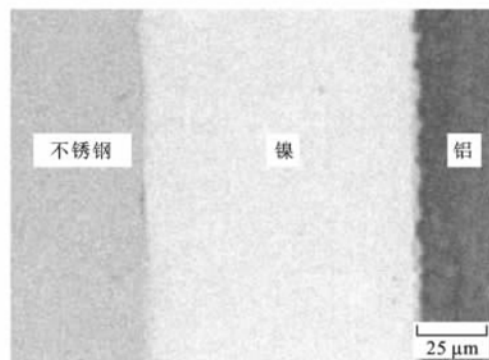
表 2 0Cr18Ni9Ti 的化学成分

$w/\%$								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	Al
0.061	0.645	1.30	0.024	0.003	10.31	17.81	0.652	0.182

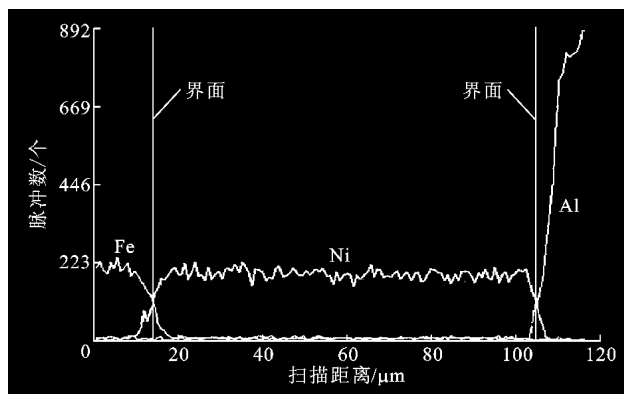
2 试验结果及分析

经过 2 个阶段的扩散连接试验,使用 Ni 箔作过渡层材料的钢/Al 双金属复合材料制备完成。整个接头的总体形貌如图 1a 所示,过渡层两侧的主要元素分布如图 1b 所示,可以看出接头可分为不锈钢、Ni、铝合金 3 层。复合材料在不锈钢与 Ni 箔的扩散区结合良好,在 Ni 箔和 Al 的扩散区有新相形成。接头区结合良好,没有明显的裂纹等缺陷。不锈钢与铝合金没有直接接触,避免了硬且脆的 Fe-Al 系金属间化合物的形成。铝合金表面的镀锌层有效地防止了铝合金在加热初期的氧化,避免了影响扩散的 Al_2O_3 的生

成。由于试验温度为 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$,超过了锌的熔点($420\text{ }^{\circ}\text{C}$),液相的锌可能富集在个别接触不好的区域,从而在该处形成局部钎焊。从图 1b 可以看出,Ni 与不锈钢形成了大约 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的扩散区,Ni 箔与 Al 形成了大约 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的扩散区。



(a)界面 SEM 照片



(b)界面 EDS 谱

图 1 Al/Ni/0Cr18Ni9Ti 复合材料界面的 SEM 照片及主要元素 EDS 谱

参考 Al-Ni 二元合金相图^[9]可以看出,Al 和 Ni 之间存在 5 种常温下稳定的金属间化合物: Al_3Ni , Al_3Ni_2 , AlNi , Al_3Ni_5 , AlNi_3 。在 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验条件下,Al/Ni 扩散初期在靠近 Al 一侧很快有金属间化合物 Al_3Ni 生成,而在靠近 Ni 一侧,由于 Al 在 Ni 中有较大的固溶度,所以 Al 主要是固溶在 Ni 中,随着扩散的进一步进行会有金属间化合物 AlNi_3 生成。无论哪种金属间化合物的生成,都会使界面结合区的硬度大幅度提高。采用显微硬度仪对 Al/Ni 界面过渡区进行显微硬度分析,测试的 5 个点如图 2 所示,其中测试点 1~4 所加载荷为 20 g ,加载时间 10 s ,测试点 5 所加载荷为 50 g ,加载时间为 10 s 。硬度测试结果见表 3。对比图 2 和表 3 可以看出,在 Al/Ni 的过渡区有一层高硬度的新相生成,界面区从 Al 一侧开始,新相的显微硬度逐渐增高,在靠近 Ni 一侧达到最高值

HV950. 3. 测试点 1 的压痕在靠近 Al 一侧出现了一条小裂纹,且沿着过渡区边界有小范围的扩展. 在测试点 5,采用 50 g 载荷时在压痕的纵向端点处出现了 2 条裂纹,并且在过渡区和 Ni 的分界区也出现了 1 条纵向裂纹,由此可以断定在 Al/Ni 的扩散界面区生成了脆性的新相,而且此脆性新相为横向梯度分布.

表 3 Al/Ni 界面硬度测试点对应的显微硬度值

测试点	1	2	3	4	5
硬度 HV	545.8	776.3	806.9	945.4	950.3

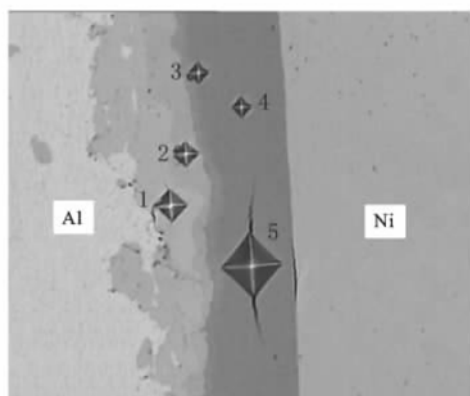


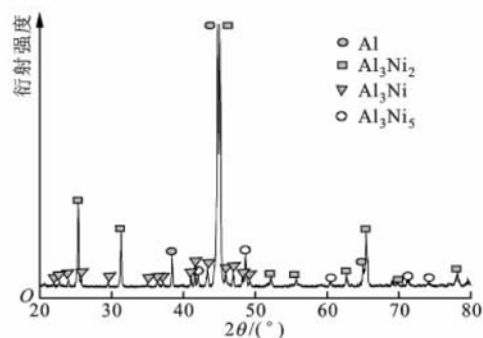
图 2 Al/Ni 界面硬度测试点位置

利用 X 射线衍射仪对 Al/Ni 界面过渡区的相组成进行判定. 试验时将 Al/Ni/0Cr18Ni9Ti 试样沿 Al/Ni 界面切开,分别对界面两侧进行 X 射线衍射分析,结果如图 3 所示,可以看出在 Al/Ni 结合界面有 Al_3Ni_2 、 Al_3Ni 和 Al_3Ni_5 3 种金属间化合物生成.

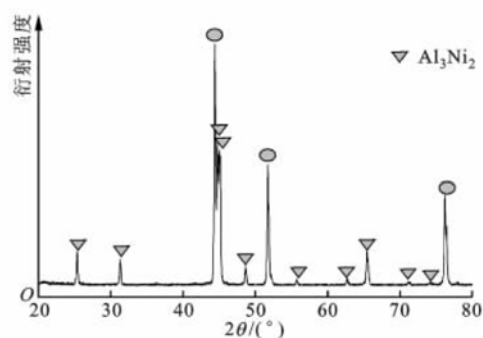
综上所述可以初步断定,在本试验条件下的钢/Al 双金属复合材料的 Al/Ni 界面上,金属间化合物的形核、生长要经过以下 4 个阶段:①接触金属(Al/Ni)之间以不同速率相互扩散,最初在界面处以 Al/Ni 之间的固溶体形式存在;②由于 Ni 在 Al 中的固溶度很小,所以在靠近 Al 一侧较易形成金属间化合物 Al_3Ni ,而在靠近 Ni 一侧,由于 Al 在 Ni 中的固溶度较大(原子分数接近 10%),故金属间化合物 AlNi_3 的生成要经历相对较长的时间;③新相晶核随着扩散的进行沿着 Al/Ni 界面生长;④2 种金属间化合物随着扩散的进一步进行向其他金属间化合物转化.

3 结 论

(1)本文采用两步扩散结合法制备钢/Al 双金属



(a)靠近 Al 侧



(b)靠近 Ni 侧

图 3 Al/Ni 接头过渡区的 X 射线衍射谱

复合材料:首先在 850 °C、压力 15 MPa、真空度 1.0×10^{-2} Pa 条件下保温 60 min,在不锈钢表面预制一层纯 Ni 过渡层,然后在 480 °C、压力 10 MPa、真空度 1.0×10^{-2} Pa 条件下保温 30 min,实现 Al/Ni 的扩散结合,制备出了界面结合良好的双金属复合材料试样,在 Al/Ni 接头生成了宽度约为 4 μm 的金属间化合物层,在 Ni/0Cr18Ni9Ti 接头形成了宽度约为 8 μm 的固溶体层.

(2)采用 XRD 对 Al/Ni 接头新生成相进行了定性分析,发现在本试验条件下,在 Al/Ni 界面区生成了 3 种金属间化合物 Al_3Ni_2 、 Al_3Ni 和 Al_3Ni_5 ,从而初步确定了 Al/Ni 固-固复合所经历的一般阶段.

参考文献:

- [1] Glueck J, Gluck J. Compound profiled conductor rail has wear strip with recesses, notches or embossings at its longitudinal edges, filled at least partially by connecting material: US, 6935473-B1 [P]. 2005-08-13.
- [2] Hartland D J. Conductor rail with wear-resistant facing layer— has aluminum body with stainless stem facing layer formed by welding two sections into longitudinal J-section strips: US, 5047595-A [P]. 1991-09-10.
- [3] Anderson B C. Al-Cu-Fe quasicrystal/ultra-high molecular weight polyethylene composites as biomaterials for ace-

- tabular cup prosthetics [J]. *Biomaterials*, 2002, 23: 1761-1768.
- [4] VER Aluminum-Werke AG. Joining aluminum or copper rails to steel conductors—esp. for aluminum mfr. by electrolysis, using explosion plated joint: Sweden, SE200500323-A [P]. 2006-07-18.
- [5] 杨连发,郭成,程羽,等. 钢铝复合导电轨制造技术的探讨[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(6): 103-108.
Yang Lianfa, Guo Cheng, Cheng Yu, et al. New technologies of steel aluminum composite conductor rail [J]. *China Railway Science*, 2004, 25(6): 103-108.
- [6] Anon. Composite conductor rail replaces catenary in tunnels [J]. *Railway Gazette International*, 1989, 145(10): 729-730.
- [7] Lee W B, Bang K S, Jung S B. Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 390: 212-219.
- [8] 陈国良,林均品. 有序金属间化合物结构材料物理金属学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1999:3-12.
- [9] 郭建亭. 有序金属间化合物镍铝合金[M]. 北京:科学出版社,2003:28-35

(编辑 葛赵青)