

文章编号: 1004-0609(2004)08-1431-06

在线高频电阻加热工艺对碳钢/铝 复合带组织与力学性能的影响^①

祖国胤¹, 于九明¹, 温景林²

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004;

2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 研究了 2 种母材在线高频电阻加热生产碳钢/铝复合带的生产工艺, 对产品的金相形貌与元素扩散进行了观察和分析。结果表明: 在复合界面上没有生成采用传统热轧工艺所产生的金属间化合物 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 ; 碳钢/铝复合带的最佳退火工艺为 450 °C 退火 1 h; 复合带的综合性能得到了明显的优化, 在线高频电阻加热工艺在双金属复合带的生产中具有广阔的应用前景。

关键词: 碳钢/铝复合带; 金属间化合物; 集肤效应; 退火

中图分类号: TB 321

文献标识码: A

Effect of high-frequency resistance heating on structure and mechanical properties of steel/Al cladding strip

ZU Guoyin¹, YU Jiurming¹, WEN Jinglin²

(1. State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Materials and Metallurgy,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The cladding strip of steel/Al heated by high-frequency resistance on line was produced. Morphologies and diffusion were studied by optical microscope and scanning microscope. The results show that intermetallics FeAl_3 and Fe_2Al_5 are not found at interface. The best annealing temperature and time of steel/Al cladding strip is 450 °C and 1 h. The mechanical properties is improved obviously. High-frequency resistance heating cladding strip has very wide application prospect.

Key words: cladding strip of steel/Al; intermetallics; skin effect; annealing

从 20 世纪 80 年代以来, 双金属复合材料的研究已经成为材料科学研究的热点。在双金属复合材料中碳钢/铝复合带以其广阔的应用前景和低廉的价格优势已经成为传统材料的一种重要替代品^[1-5]。在目前碳钢/铝复合带的各种生产工艺中, 热轧复合工艺由于技术比较成熟, 可以实现连续化生产等特点而应用范围较广, 但采用热轧复合工艺

生产的碳钢/铝复合带在复合界面上会生成厚度为 5~10 μm 的金属间化合物 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 。 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 在力学性能方面表现为具有很高的脆性, 使复合带的各项力学性能明显下降^[6-9]。本文作者采用对 2 种母材进行在线高频电阻加热的工艺来生产碳钢/铝复合带, 对退火热处理后的产品进行了金相形貌观察及元素扩散分析。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50174019)

收稿日期: 2003-12-19; 修订日期: 2004-04-19

作者简介: 祖国胤(1977-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 祖国胤, 博士; 电话: 024-83686415; E-mail: zuguoyin@163.com

1 实验

1.1 材料

采用工业纯铝 L3M, 尺寸为 $25\text{ mm} \times 1.80\text{ mm}$, 主要成分为 Si 0.30 (质量分数, %), Fe 0.30, Cu 0.15, Al 余量。

采用 Q235 低碳钢板, 尺寸为 $25\text{ mm} \times 0.57\text{ mm}$, 主要成分为 C 0.1, Si 0.5, Mn 0.8, Fe 余量。

1.2 设备

实验所采用的设备为自行设计制造的在线高频电阻加热装置, 按其功能可以分为开卷及张力控制单元、高频电阻加热设备单元、电流导入及加热区单元、导卫装置及复合轧制单元、收卷及张力控制单元等几个部分, 如图 1 所示。经过脱脂、除油、清刷处理过的碳钢及铝卷送入开卷机, 通过张力控制可以保证带材的平直。在 2 种带材进入导电辊之后, 高频电流将对带材进行在线加热, 加热的范围是从导电辊到轧辊这一区间。高频电流从 2 个导电辊导入, 在轧辊处两带材通过轧制实现复合。在图 1 中虚线所示的 V 型区域里, 根据高频电流具有的集肤效应和邻近效应的原理^[10], 高频电流将只对从导电辊到轧辊处这一区域的带材进行加热, 并且在加热的过程中高频电流集中于母材待复合表面很浅的深度内流动, 在进入轧辊前加热温度达到最高。这种加热方式避免了传统热轧工艺中由加热炉送入轧机轧制过程中热能大量损耗的缺点, 加热后的母材立即进入轧辊轧制, 轧后的复合带在收卷机上卷取。在复合的过程中轧机的速度控制在 $1\sim 2\text{ m/s}$, 轧制速度的选择是综合 2 方面的原因: 一方面较低的轧制速度有利于加热温度的控制, 另一方面为保证母材在加热后不被氧化又需要提高轧制速度。

同传统的热轧复合工艺比较, 在线高频电阻加

热的工艺使得热能的利用更为合理, 最大限度地降低了生产能耗, 符合现代工业节能降耗的要求。同时高频电流在传导中的特性保证了母材在极短的时间内即获得了理想的加热效果, 克服了在复合中“重复氧化”的难题。最关键的是采用在线高频电阻加热工艺生产的复合带在复合界面上没有生成严重影响复合强度的脆性的金属间化合物, 产品经过合理的热处理之后各项力学性能明显优于一般热轧工艺生产的同类产品。该工艺的缺点主要体现在目前对于高频电流在各种材料中的传导规律认识得不够, 尚未找到各种双金属的最佳原始厚度比的关系。

1.3 方法

轧制后复合带的初结合强度较低, 需要通过退火热处理去除轧制复合所造成的残余应力, 同时使母材之间的原子得到充分的扩散。退火温度设定为 $420, 450, 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 退火时间设定为 $0.5, 1, 2\text{ h}$ 。

将采用各种退火制度处理的复合带磨制金相试样, 磨制好的试样选用自制的腐蚀液进行腐蚀, 在金相显微镜下观察复合界面的显微组织, 重点研究是否有金属间化合物生成, 使用扫描电镜分析在复合界面两侧铁、铝元素的含量变化情况, 进一步研究界面组织的变化。

在实际应用中由于需要复合带具有一定的再加工能力, 而复合带的反复弯曲次数可以直观地表示其承受冷弯和深冲的能力, 因此在实验中测试了复合带的反复弯曲次数。在制备反复弯曲试样时, a 为复合带的轧后厚度, 试样的宽度为 $(2a+10)\text{ mm}$, 长度为 150 mm , 实验所用的夹口圆弧直径为 6 mm , 拔杆距夹口平面的距离为 40 mm , 为了避免金属的疲劳, 每分钟的弯曲次数不超过 60。另外对复合带的剥离强度也进行了检测, 并且将测试结果同采用其它复合工艺生产的复合带的相关指标进行

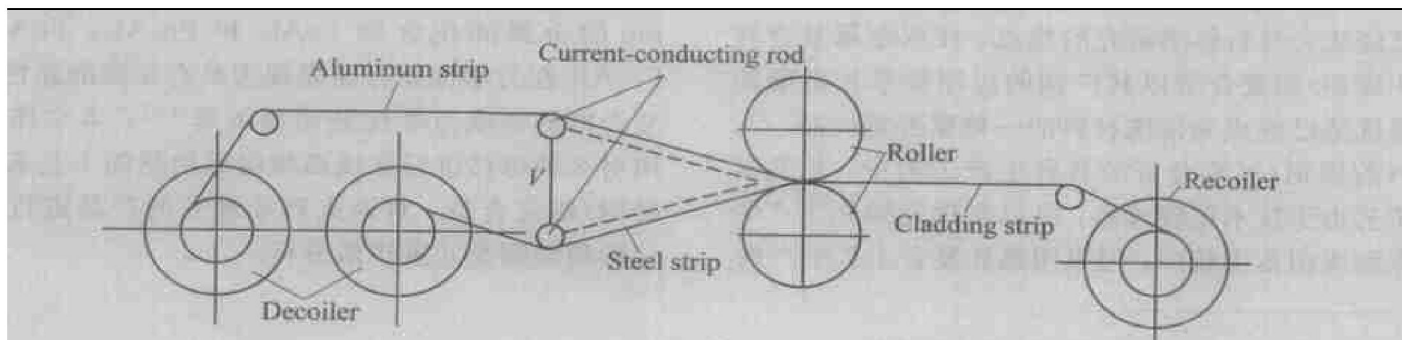


图 1 高频电阻加热复合轧制设备布局示意图

Fig. 1 Equipments of high-frequency resistance heating rolling bonding

了对比。

2 结果与讨论

2.1 金相组织

图 2 所示为采用在线高频电阻加热工艺生产的碳钢/铝复合带的显微组织。图 2(a) 为轧制后未经热处理的复合带的显微组织, 可以看到, 虽然在复合界面上存在着一定的缺陷, 但并没有出现传统热轧工艺中所产生的厚度为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 金属间化合物, 已经实现结合的部分界面较为平整, 是典型的轧制态形貌。这是因为所采用的在线高频电阻加热工艺改变了传统加热热传导方式, 使得热量集中于复合区, 并且在轧制后轧件温度迅速降低, 金属间化合物的生成受到抑制, 加热后的母材马上进入轧机轧制也有效克服了热轧工艺存在的重复氧化的问题。这时 2 种母材之间形成的是结合强度较低的初结合, 需要通过合理的退火热处理制度达到理想的冶金结合状态。图 2(b) 是在 420°C 退火 1 h 后复合带的显微组织形貌, 在复合界面上已经看不到明显的缺陷, 复合界面结合情况良好, 元素扩散分析的结果显示在母材之间已经形成了良好的扩散。图

2(c) 为在 450°C 退火 1 h 后复合带的显微组织形貌, 可以发现复合界面已经基本消失, 2 种母材的组织也没有出现明显的晶粒长大情况, 此时母材之间达到了最佳的冶金结合状态, 后续力学性能检测的数据也验证了这一观点。图 2(d) 为在 500°C 退火 1 h 后复合带的显微组织形貌, 在复合界面上可以看到有明显的“锯齿状”的物质生成, 厚度约为 $10 \mu\text{m}$ 。一般认为在脆性的金属间化合物的厚度超过 $5 \mu\text{m}$ 后, 就会对复合界面的结合性能产生严重的影响^[11]。对复合带力学性能分析的结果显示, 退火温度达到 500°C 后, 产品的各项力学性能均明显下降。金属间化合物的出现是由于在 500°C 时铝原子的活性很强, 达到了生成金属间化合物的热力学条件, 同时由于温度的升高, 母材之间的原子扩散速度加快, 使得在复合界面上出现铁、铝元素富集的情况。“锯齿状”是在扩散时间较长, 碳钢一侧所生成的金属间化合物的典型形貌, 锯齿状界面形态的出现, 表明金属间化合物的厚度已经达到较宽的尺度, 严重地降低了界面的有效结合面积, 改变了母材之间的结合方式, 导致结合强度急剧下降。另外, 铝基体的晶粒在 500°C 时已经比较粗大, 位错滑移距离的增加会使位错塞积应力显著增大, 以上

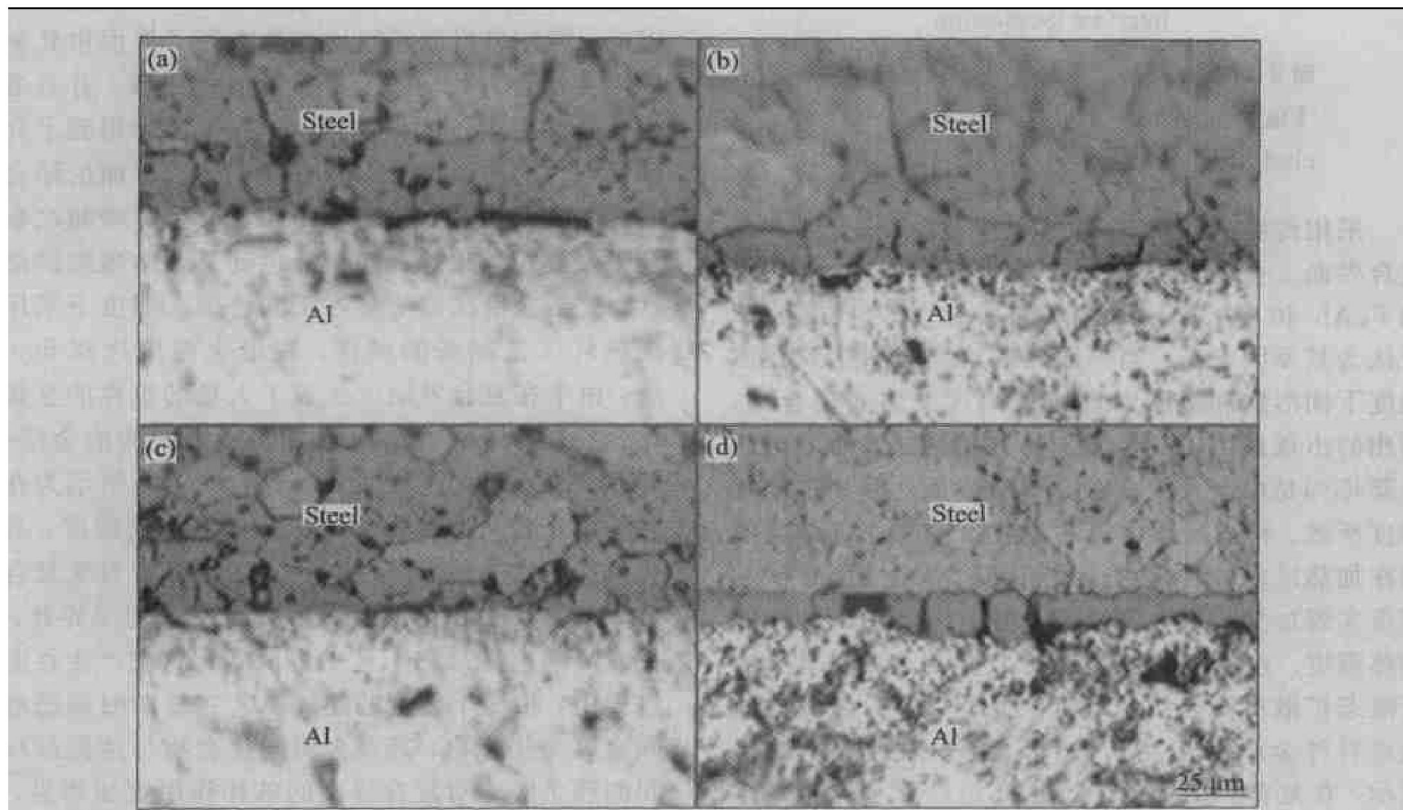


图 2 不同退火制度的碳钢/铝复合带复合界面显微组织

Fig. 2 Microstructures of interface of steel/Al cladding strip on different annealing systems

(a) —Unannealed; (b) — 420°C , 1 h; (c) — 450°C , 1 h; (d) — 500°C , 1 h

2 个有害因素共同造成了复合带结合性能的急剧恶化。

2.2 元素扩散

通过复合界面的线扫描曲线,并结合界面处的母材元素成分的变化情况分析在复合界面处是否出现了金属间化合物。图 3 所示为采用在线高频电阻加热工艺复合后未经热处理的碳钢/铝复合带的线扫描曲线,从图中可以发现,在复合界面处铁元素和铝元素的成分含量都是呈线性下降的,并未出现平台区,可以认为此时在碳钢/铝复合带的复合界面上,没有金属间化合物生成^[12]。

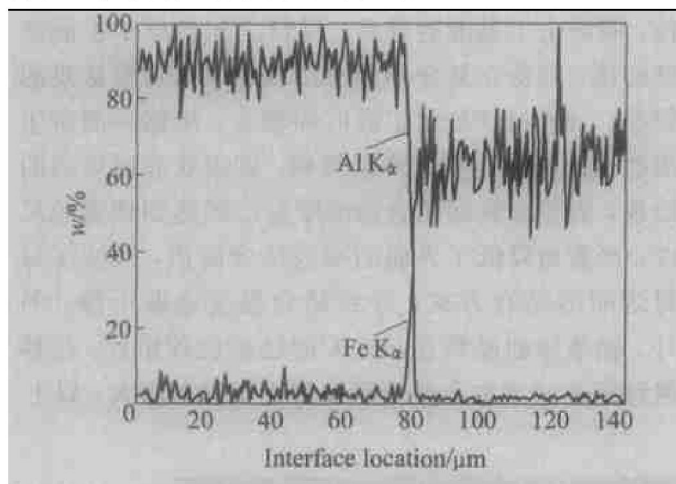


图 3 碳钢/铝复合带复合界面线扫描像

Fig. 3 Line scanning analysis on cladding strip interface of steel/Al

采用传统的热轧工艺生产碳钢/铝复合带,在复合界面上会生成厚度为 5~10 μm 的金属间化合物 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 。以普罗科希金^[13]为代表的学者认为其原因在于:当界面层的溶质金属达到在该温度下固溶饱和极限时就可能出现金属间化合物,新相的出现是由于晶格重新排列的结果,而晶格的重新排列是由于其中一种金属在界面达到了极限溶解度所致。利用高频电流的集肤效应和邻近效应使得在加热区内 2 种母材金属只在待复合表面很浅的深度实现加热,并且在极短的时间内就达到预期的加热温度。在加热的过程中可以使铝表面液化,由于液态扩散比固态扩散速度快且均匀,可以有效地促进异种金属的相互扩散^[14]。电子探针分析结果显示,在复合界面上发生的主要是铁原子向铝基体中的扩散,扩散层厚度为 3 μm,而铝原子向碳钢基体中的扩散则相对较为微弱,扩散层厚度仅为 1 μm。由于在母材经过轧制实现复合后,轧辊的吸热作用可以使极薄的一层液态铝迅速凝固,达到理想的瞬

间液相复合的效果,并且界面层的溶质金属不会达到在该温度下的固溶饱和极限,仅在复合界面两侧生成很薄的一层固溶体,从而有效地制约了金属间化合物的生成。

2.3 力学性能

图 4 所示为在不同温度下退火 1 h 后复合带试样的反复弯曲次数,在图中同时给出了采用传统热轧工艺的测试数据来进行对比。由于轧制复合后未进行退火的试样在复合界面上存在着一定面积的空洞缺陷,并且已经结合的部分也只是实现了机械啮合,所以结合性能较差。在测试中反复弯曲 7~8 次,母材之间就出现了分离的情况,但一般的热轧复合带只需反复弯曲 4~5 次界面即被破坏,这是由于采用在线高频电阻加热的工艺生产的碳钢/铝复合带虽然初结合强度较低,但因为在界面上并没有生成脆性的金属间化合物 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 ,在母材表面发生的是有利于复合的裂口机制,母材在刺破各自的氧化膜后形成了大面积的结合,所以结合情况要明显优于一般的热轧产品^[15]。在经过退火热处理之后,复合界面的结合性能得到了明显的改善,在 420 °C 的温度条件下,弯曲次数已经达到未经退火处理的 2 倍以上。这是因为在经过退火处理以后,两侧母材原子通过扩散实现了界面由轧制后的机械啮合方式向冶金结合方式的过渡,并且退火使轧制后界面上的缺陷消失,残余应力得到了完全的释放,这些因素都十分有利于改善界面的结合性能。在退火温度升高到 450 °C 时,反复弯曲次数达到了最高值,此时界面已经达到了非常理想的结合状态,结合情况要明显好于同种退火制度下采用传统热轧工艺制备的试样。在退火温度达到 500 °C 后,由于在复合界面上生成了大量的脆性的金属间化合物,破坏了碳钢与铝之间所形成的冶金结合,导致复合板的力学性能迅速恶化。图 5 所示为在不同温度下退火 1 h 后复合带试样的剥离强度,其变化规律同弯曲强度基本一致。在实验中发现复合带的分离均发生在金属间化合物与碳钢的交界处。在线高频电阻加热工艺中金属间化合物产生在退火过程中,相比于传统的热轧工艺在轧制时即已形成的金属间化合物,其在金属间化合物与两侧母材之间的残余应力对复合界面的破坏作用更加明显,由图 5 可见,采用在线高频电阻加热工艺生产的复合带在 500 °C 退火后,其剥离强度甚至低于采用传统热轧工艺的相应数据。结果表明,采用在线高频电阻加热工艺生产的碳钢/铝复合带的结合强度完全

符合 GB6396-87 的性能标准。综合金相组织观察和力学性能分析的结果可以发现, 采用在线高频电阻加热的工艺生产的碳钢/铝复合带在 450 °C 退火 1 h 可以获得最佳的结合效果。

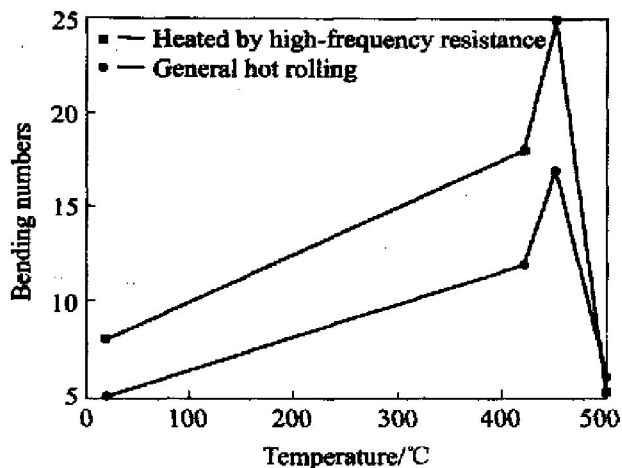


图 4 不同退火温度的碳钢/铝复合带的反复弯曲次数

Fig. 4 Numbers of repeated flexure of steel/Al cladding strip at different annealing temperatures

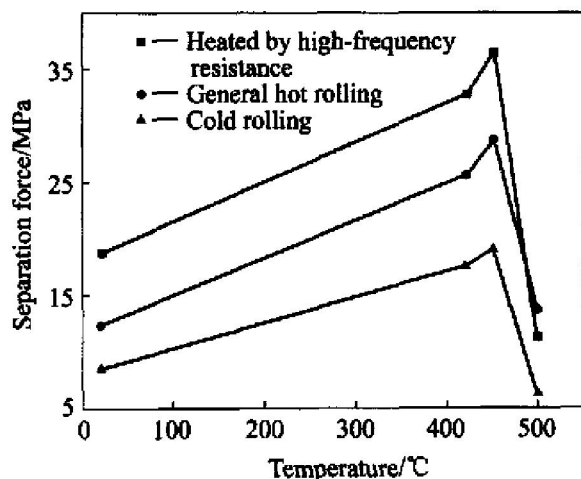


图 5 不同退火温度的碳钢/铝复合带的剥离强度

Fig. 5 Peeling strength of steel/Al cladding strip at different annealing temperatures

3 结论

1) 采用在线高频电阻加热工艺生产的碳钢/铝复合带在复合界面上没有生成脆性的金属间化合物 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 , 母材金属间复合情况良好, 产品的各项力学性能显著优于采用传统热轧工艺生产的同类产品。

2) 碳钢/铝复合带的最佳退火工艺制度为在

450 °C 下退火 1 h, 此时母材之间原子得到充分的扩散, 晶粒也没有出现明显的长大现象。

REFERENCES

- [1] Bay N. Cold welding[J]. Metal Construction, 1986, 18 (10): 625-629.
- [2] Cave J A, Williams J D. The mechanism of cold pressure welding by rolling[J]. Journal of the Institute of Metals, 1973, 101(7-8): 203-207.
- [3] 于九明, 孝云楨, 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 Jiu-ming, XIAO Yun-zhen, WANG Qun-jiao. New development of technology of clad metal[J]. Journal of Materials Research, 2000, 14(1): 12-16.
- [4] Koc C C. Intermetallic matrix composites prepared by mechanical alloying—a review [J]. Mater Sci Eng A, 1998, A214: 39-48.
- [5] Inoue M, Suganuma K I, Kudoh K, et al. Fabrication of discontinuous ceramic fibres/FeAl composites by reactive sintering[J]. J Jpn Inst Metals, 1995, 59(6): 1185-1191.
- [6] 汤文明, 唐红军, 郑治祥, 等. Fe-Al 金属间化合物基复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 811-826.
TANG Wen-ming, TANG Hong-jun, ZHENG Zhi-xiang, et al. Progresses in studies on Fe-Al intermetallic matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 811-826.
- [7] 傅恒志, 郭景杰, 苏彦庆, 等. TiAl 金属间化合物的定向凝固和晶向控制[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 797-810.
FU Heng-zhi, GUO Jing-jie, SU Yan-qing, et al. Directional solidification and lamellar orientation control of TiAl intermetallics[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 797-810.
- [8] 殷世强, 邱小明, 孙大谦. 复合层对 Al 接触反应钎焊过程及接头性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 323-236.
YING Shi-qiang, QIU Xiao-ming, SUN Da-qian. Effect of compound layer on process and joint properties of Al contact eutectic reaction brazing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 323-236.
- [9] 林栋梁. 高温金属间化合物研究的新进展[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(2): 95-109.
LIN Dong-liang. Recent advances in high temperature ordered intermetallic[J]. J Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(2): 95-109.
- [10] Wlosinski W, Olesinska W, Pietrzak K. Bonding of

- aluminum to steel using copper interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 56(2): 190 - 199.
- [11] 张彩培, 崔建忠. 不锈钢/Al 固液轧制复合板材界面剪切强度与界面结构[J]. 金属学报, 1999, 35(2): 113 - 116.
- ZHANG Caipei, CUI Jianzhong. The bonding strength and interface structure in solid-liquid rolling bonding of stainless steel/Al[J]. Acta Metall Sinica, 1999, 35(2): 113 - 116.
- [12] 张贵峰, 张建勋. 非晶态金属箔带作中间层的瞬间液相扩散焊管技术[J]. 焊接, 2000, 4(2): 35 - 37.
- ZHANG Guifeng, ZHANG Jianxun. The pipe welding technique by transient liquid phase diffusion bonding with amorphous ribbon[J]. Welding, 2000, 4(2): 35 - 37.
- [13] Vernia P. Mechanism for critical magnesium diffusion in vacuum brazing of aluminum sheet[J]. Welding Journal (Miami, Fla), 1981, 60(10): 194 - 198.
- [14] Ricks R A, Winkler P J, Hstoklossa H. Transient liquid phase bonding of aluminum-lithium base alloy AA8090 using roll clad zinc based interlayer[J]. Aluminum-lithium Alloys, 1989, 1(5): 27 - 31.
- [15] Croza J R. Nanosintering[J]. Nanostructured Materials, 1999, 12(5): 987 - 992.
- (编辑 李向群)