

钎焊式空冷系统用嵌入式冷轧铝-钢复合带材的开发

李 龙 张小军 曾祥勇 陈 鑫 高 闯 周德敬
(银邦金属复合材料股份有限公司江苏省金属层状复合材料重点实验室, 无锡 214145)

摘 要 通过“表面处理 + 冷轧复合 + 退火处理”三步法, 即先采用钢丝刷对 4 mm 08Al 钢(/% : 0. 01C, 0. 018Al) 和 0. 23 mm 4A60 铝带表面进行处理, 然后在前张力 30 kN 下利用高精度 $\Phi 420$ mm 四辊轧机对铝-钢进行 60% 的单道次冷轧复合, 并于罩式退火炉进行 520 $^{\circ}\text{C}$ 24 h 的退火处理, 开发出了极薄复层(80 ~ 90 μm) 冷轧 4A60 铝/08Al 钢 1. 7 mm 复合带材。复合带材中 08Al 钢的组织为平均晶粒尺寸 15 μm 的等轴铁素体, 抗拉强度 ≥ 320 MPa, 伸长率 $\geq 28\%$, 弯曲性能也符合指标要求。复合带材在(600 \pm 10) $^{\circ}\text{C}$ 钎焊后铝钢界面未发现金属间化合物, 铝钢界面未发现分层现象。

关键词 铝-钢复合带材 冷轧复合 嵌入式 力学性能 结合性能

Development of Embedded Aluminum-Steel Cladding Strip for Brazed Air Cooling System by Cold Rolling Bonding

Li Long, Zhang Xiaojun, Zeng Xiangyong, Chen Xin, Gao Chuang and Zhou Dejing
(Jiangsu Key Laboratory for Clad Materials, Yinbang Clad Material Co Ltd, Wuxi 214145)

Abstract With three-step method "surface process + cold rolling bonding + annealing treatment", i. e. first, treating the surface of 4mm 08Al steel strip (/% : 0. 01C, 0. 018Al) and 0. 23 mm 4A60 aluminium strip by brushing, then single-pass-rolled by 60% reduction for the aluminium-steel strip using high precision $\Phi 420$ mm four high rolling mill with 30 kN forward tension to get large deformation cladding, and annealing treatment at 520 $^{\circ}\text{C}$ for 24 h in a bell type annealing furnace, the cold-rolled 1. 7 mm 4A60 aluminium-08Al steel cladding strip with 80 ~ 90 μm extra-thin cladding layer is developed. The microstructure of 08Al steel in cladding strip is equiaxed ferrite with average grain size 15 μm , its tensile strength ≥ 320 MPa and elongation $\geq 28\%$, and the bending properties of cladding strip also meet the requirement of standard. The intermetallic compound is not found in aluminium-steel interface region of cladding strip brazed at (600 \pm 10) $^{\circ}\text{C}$, and the delamination phenomenon is not observed at interface of aluminium and steel.

Material Index Aluminum-Steel Cladding Strip, Cold Roll Bonding, Embedded, Mechanical Properties, Bonding Strength

铝合金/低碳钢层状复合材料广泛应用于发电、汽车、航空、化工、炊具和家电等领域^[1-5], 其中典型应用领域为发电(火电、太阳能、核电)空冷系统。目前在火力发电领域, 以空冷系统取代开放式大冷却塔冷却系统, 可节约用水 75%。

与普通层状复合材料相比, 嵌入式铝-钢复合材料除了要求严格的铝层和钢层的厚度外, 还有严格的无铝边宽度, 目的是在复合带材焊接成管时进行钢与钢之间的焊接, 然后将钢与钢的焊接区进行喷涂铝粉, 制作成火力发电用空冷系统的基管。嵌入式铝-钢复合带材(图 1)具备:(1) 铝层厚度极薄($t < 100 \mu\text{m}$), 铝钢组元层厚度差别极大($t:h$ 一般为 1:15);(2) 在宽度分布上, 具有对称的无铝边结构, 且无铝边宽度 d 尺寸精度高;(3) 经高温钎焊后, 铝钢复合界面无金属间化合物, 且结合良好。

嵌入式铝-钢复合带材的生产过程中的关键技术主要包括:(1) 钎焊时的铝钢界面脆性化合物的

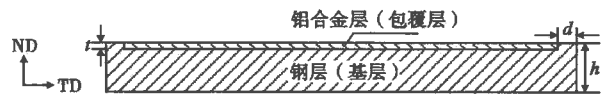


图 1 嵌入式铝-钢复合带材截面示意图: h - 复合带材总厚度; t - 铝包覆层厚度; d - 无铝边宽度

Fig. 1 Schematics of cross section of embedded aluminium-steel cladding strip: h - total thickness of cladding strip; t - thickness of aluminium cladding layer; d - width of edge without aluminium

控制技术;(2) 轧制对中技术及复合带材尺寸精度控制技术;(3) 润滑控制技术。

本工作在前期系列实验的基础上, 在铝合金成分设计中加入适量的 Si, 通过“表面处理 + 冷轧复合 + 退火处理”三步法利用高精度 $\Phi 420$ mm 四辊轧机, 成功开发出了嵌入式冷轧 4A60 铝/08Al 钢复合带材。

1 实验材料和方法

实验材料为 0. 23 mm 厚的 4A60 铝合金与 4 mm

厚的低碳钢板(名义牌号 08Al, Al 为铝), 4A60 的宽度为 452 mm, 08Al 钢板来料为卷料, 宽度为 474 mm, 长度为 500 m。4A60 铝合金初始状态为退火态(平均晶粒尺寸 35 μm), 08Al 钢板为热轧态(平均晶粒尺寸 25 μm)。材料的成分见表 1。



图 2 冷轧嵌入式铝-钢复合带材的工艺示意图

Fig.2 Schematics of process for manufacture of aluminium-steel cladding strip by cold rolling bonding

图 2 为冷轧嵌入式铝-钢复合带材的工艺示意图, 首先利用 0.2 mm 直径的 304 不锈钢钢丝刷(刷辊直径 320 mm)对退火后的 4A60 铝合金和 08Al 钢板的待复合表面进行打磨(4A60 铝的粗糙度为 $Ra = 1.0 \mu\text{m}$, 08Al 钢板的粗糙度 $Ra = 1.70 \mu\text{m}$), 然后在张力条件下喂钢调整辊缝到规定的压下量后, 把铝带喂入辊缝, 单道次压下量约为 60%, 轧制速度为 4 m/min, 测得的表面温度约为 100 $^{\circ}\text{C}$, 终轧厚度为 1.7 mm 左右, 其中 08Al 钢的厚度为 1.6 mm 左右, 包覆铝层厚度为 80 ~ 90 μm , 然后进行 520 $^{\circ}\text{C}$ 24 h 退火处理。模拟钎焊制度为 (600 \pm 10) $^{\circ}\text{C}$ 20 min。

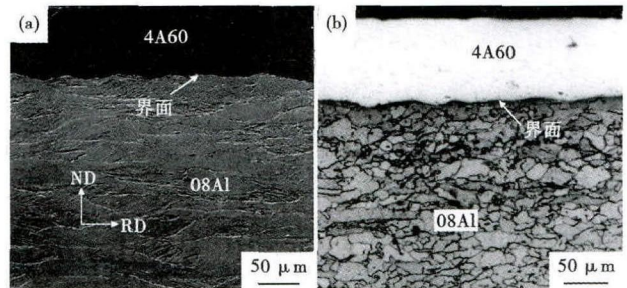


图 3 铝-钢复合带材横截面的组织形貌:(a) 冷轧态(扫描电镜);(b) 退火态(光学显微镜)

Fig.3 Morphology of structure of cross section of aluminium-steel cladding strip: (a) as cold rolled (SEM); (b) as annealed (OM)

从复合板料上取横向 (TD- Transverse Direction) 截面进行组织分析, 用 4% 硝酸酒精对 08Al 钢层进行腐蚀。利用扫描电镜 (SEM) 及 EDS 能谱仪 (Energy Disperse Spectrum) 观察了界面的微观组织并分析了元素的分布情况。拉伸、弯曲及拉剪试验分别按照国家标准 GB/T 228-2002 和 GB/T 6396-2008 进行, 拉伸试样的取样为轧制方向 (RD- Rolling Direction), 拉伸、弯曲及拉剪试验在 CMT7540 电子万能试验机上进行, 拉伸速率 30 mm/min, 弯曲速率 5 mm/min, 拉剪实验速率 2 mm/min, 弯曲的方法为先向钢侧弯曲 90 $^{\circ}$ 后再反向弯曲 180 $^{\circ}$ 。采用 MHVD-1000AP 维氏硬度计测量硬度, 载荷 100 gf, 时间为 15 s。

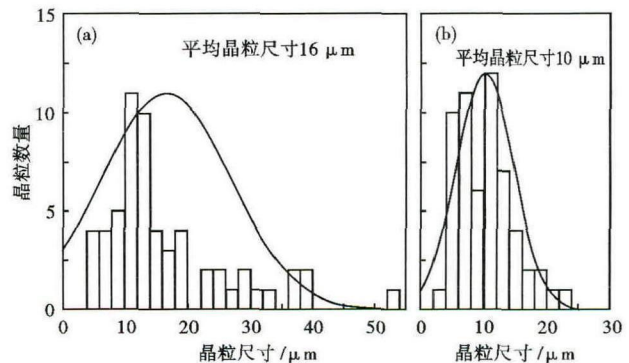


图 4 退火后铝-钢复合带材沿轧制方向(a)和板面法线方向(b)的晶粒分布

Fig.4 Distribution of grain size in annealed aluminium-steel cladding strip along rolling direction (a) and normal direction (b)

2 结果与分析

2.1 铝-钢复合带材的显微组织

从图 3(a) 中可以看出 08Al 钢在冷轧状态下为明显的变形组织, 铁素体晶粒沿着轧制方向 (RD) 被拉长。当在 520 $^{\circ}\text{C}$ 退火 24 h 后, 组织大部分为等轴

的铁素体晶粒(图 3b)。钎焊后铝-钢复合带材中 4A60 铝层为再结晶组织, 平均晶粒尺寸为 60 μm , 08Al 钢的组织没有变化。

图 4 为退火状态下沿 RD 和 ND 方向晶粒的分布状态, 基本符合正态分布。从统计结果可以看出, RD 方向的晶粒尺寸的大小范围较大, 大部在 5 ~ 40 μm , 有极个别晶粒尺寸大于 40 μm , 轧制方向 (RD) 的平均晶粒尺寸为 16 μm ; 板面法线方向 (ND) 的晶粒尺寸的大小较为均匀, 基本都在 5 ~ 25 μm , 平均晶粒尺寸为 10 μm 。这说明再结晶退火后并非所

表 1 铝-钢复合带材 4A60 铝和 08Al 钢的分析成分 / %
Table 1 Analysis of aluminium 4A60 and steel 08Al for aluminium-steel cladding strip / %

材料	C	Si	Mn	P	S	Fe	Al
包覆层 4A60	-	0.83	0.01	0.001	-	0.32	余
基层 08Al	0.01	0.14	0.21	0.020	0.004	余	0.018

有晶粒都为等轴晶粒, RD 方向与 ND 方向的纵向轴比大约为 1.6。

2.2 嵌入行为和铝层厚度

图 5 为铝-钢复合材料轧制后 4A60 铝层 RD 截面的嵌入情况。在轧辊的压力作用下铝层率先发生塑性变形,同时出现少量的宽展变形;钢层上表面由轧辊通过铝层施加压力,因此,钢层的应力集中区主要为与铝层接触的部位。随着铝层的不断变形,钢层受到的压应力不断增加,导致与铝层接触的钢层产生压缩变形,而边界的钢层形状基本保持不变。随着轧制变形的持续进行,铝层侧面逐渐与弧形过渡区的钢层接触,并在压应力的作用下逐渐嵌入钢层中,并形成了楔形接触面。从实验结果来看,4A60 铝层的宽度从 452 mm 增加到了 454 mm,每边各增加了约 1 mm,基本上和图 5 中所示的嵌入层过渡长度(2.4 mm)一致;另外,08Al 钢的宽度从 474 mm 减小到了 473 mm,轧制过程中不但没有宽展,宽度反而变窄,这正是嵌入式轧制的变形特点之一。在 Al 层厚度稳定区间,铝层存在一定的波动(85 ± 5) μm,基本为 5%。

2.3 铝-钢复合带材的硬度及力学性能

从图 6(a)中可以看出,08Al 钢的硬度沿厚度方向分布整体较为均匀,退火后 08Al 钢的平均硬度大约为 100 Hv,4A60 铝的硬度小于 30 Hv。图 6(b)为沿 RD 方向的工程应力-应变曲线,屈服强度超过 250 MPa,抗拉强度 300 MPa 左右,伸长率超过 35%。

从图 7 可知,弯曲强度是随着弯曲的进行逐渐增加,到 90°时可达 200 MPa,弯曲后钢侧表面和铝侧表面未发现宏观裂纹,铝钢界面也未发现分层现象(图 7b),说明 60% 的压下量可以生产良好的界面结合。

2.4 钎焊后的界面特征

图 8 为钎焊后界面附近的扫描电镜形貌及冷轧(CR)、退火(AN)及退火后钎

焊(Brazing)的 Fe、Al 元素扩散的情况。从图 8(a)可以看出,钎焊后界面未出现脆性化合物,从图 8(b)可以看出,退火后通过界面 Fe 和 Al 元素存在有一定的过渡距离,宽度为(3 ± 0.5) μm,钎焊后 Al 元素的扩散距离基本是(4 ± 0.5) μm,而 Fe 的过渡距离与钎焊前的相比基本没有变化。虽然扫描电镜上的 EDS 对元素在空间上的分辨精度在微米级别,但热处理后存在有元素的扩散^[6-8]。

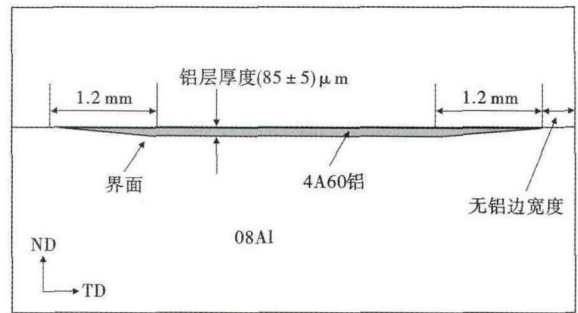


图 5 铝-钢复合带材轧制后 4A60 铝层的嵌入示意图
Fig. 5 Schematics of embedded 4A60 aluminium layer in cold rolled aluminium-steel cladding strip

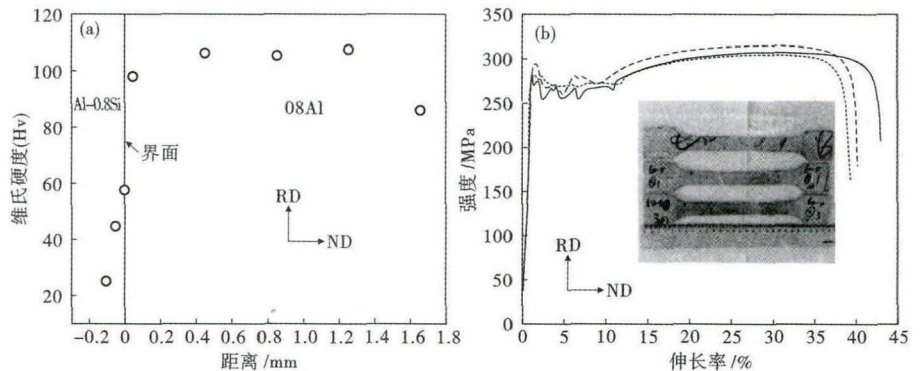


图 6 退火后铝-钢复合带材沿厚度方向硬度分布(a)及轧制方向的拉伸曲线(b)
Fig. 6 Distribution of hardness along thickness direction (a) and tensile curves along rolling direction for annealed aluminium-steel cladding strip

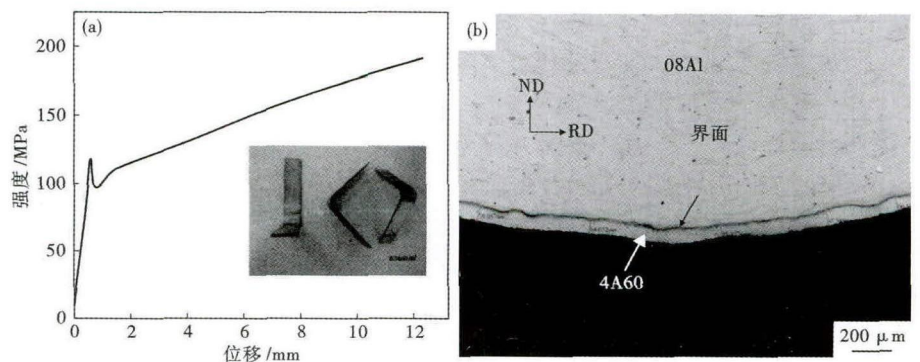


图 7 退火后铝-钢复合带材弯曲曲线(a)和弯曲后界面的形貌(b)
Fig. 7 Bending curve (a) and morphology of bended interface (b) of annealed aluminium-steel cladding strip

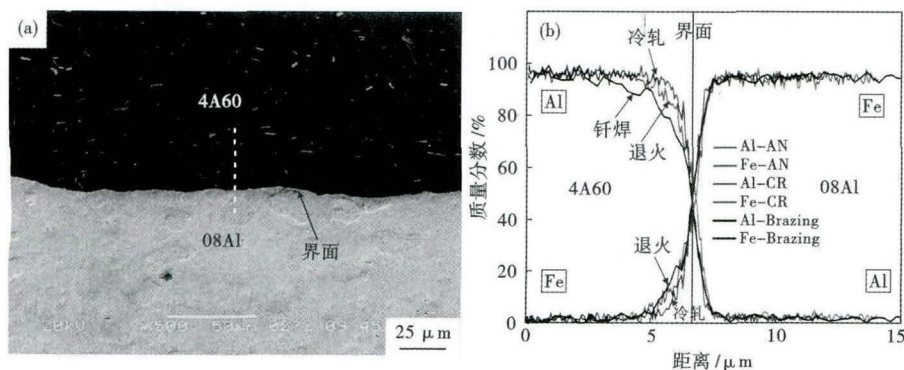


图 8 铝-钢复合带材钎焊态后的界面形貌(a);冷轧态(CR)、退火态(AN)及钎焊态元素扩散对比(b)

Fig. 8 Morphology of interface, brazed status (a); comparison of elements diffusion between at cold-rolled status, annealed status and brazed status (b) of aluminium-steel cladding strip

表 2 铝-钢复合带材的指标要求及测试结果

Table 2 Requirements for aluminium-steel cladding strip and measured results

项目	目标值	实测值	备注
铝层厚度/mm	0.08 ± 0.004	0.085 ± 0.005	有偏差
屈服强度($\sigma_{0.2}$)/MPa	≥230	270 ± 10	合格
抗拉强度(σ_b)/MPa	280 ~ 380	305 ± 5	合格
伸长率(δ)/%	≥28	35 ± 5	合格
弯曲性能	先向钢侧弯曲 90°, 再反向弯曲 180° 不分层	不分层	合格
热脆性	40 min 加热到 (600 ± 10) °C 保温 20 min 不分层	无脆性化合物未分层	合格

从表 2 可以看出,除了铝层厚度有一定的偏差之外,其它性能都符合指标要求。

综上所述,钎焊式空冷系统用嵌入式 4A60 铝/08Al 钢复合带材的生产工艺为:钢丝刷连续在线对铝钢表面打磨产生 1 ~ 2 μm 的粗糙度,然后在有前后张力的条件下通过四辊轧机进行 60% 的单道次大变形,之后放入罩式退火炉进行 520 °C 24 h 的退火处理,08Al 钢板的显微组织为等轴铁素体,屈服强度大于 250 MPa,抗拉强度大于 300 MPa,冷弯性能合格,40 min 加热到 (600 ± 10) °C 后保温 20 min 界面不分层。

3 结论

(1) 钢丝刷连续在线对铝钢表面打磨在铝带表面产生 1 μm 的粗糙度,在钢带表面形成 1.7 μm 的粗糙度。

(2) 道次压下量为 60% 的大变形可使 4A60 铝和 08Al 钢产生良好的结合,弯曲性能符合指标要求。

(3) 冷轧铝-钢复合带材在 520 °C 24 h 退火后,

08Al 钢的组织为相对等轴的铁素体,轧制方向(RD)的平均晶粒尺寸为 16 μm ;板面法线方向(ND)的平均晶粒尺寸为 10 μm 。轧制方向的屈服强度大于 250 MPa,抗拉强度大于 300 MPa,材料的伸长率超过了 30%。

(4) 钎焊后界面并未出现脆性化合物,退火后通过 EDS 分析发现 Fe 和 Al 元素在界面附近存在有一定的过渡距离,宽度大约为

(3 ± 0.5) μm ,钎焊后 Al 元素的过渡距离基本是 (4 ± 0.5) μm ,而 Fe 的过渡距离与钎焊前相比基本没有变化。

国家高技术研究发展计划(863)(2013AA031301);国家国际科技合作专项项目(2013DFB50170);江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2011038);江苏省重点实验室资助项目(BM2014006)。

参考文献

- [1] Li L, Nagai K, Yin F X. Progress in Cold Roll Bonding of Metals [J]. Science Technology of Advanced Materials, 2008, 9: 1-11.
- [2] 彭大暑,刘浪飞,朱旭霞.金属层状复合材料的研究状况与展望[J].材料导报,2000,14(4):23-24.
- [3] Kawase H, Makimoto M, Takagi K, et al. Development of Aluminum Clad Steel by Roll Bonding [J]. Transaction ISIJ, 1983, 23: 628-632.
- [4] Danesh Manesh H, Karimi Taheri A. The Effect of Annealing Treatment on Mechanical Properties of Aluminum Clad Steel Sheet [J]. Materials and Design, 2003, 24: 617-622.
- [5] Springer H, Kostka A, Payton E J, et al. On the Formation and Growth of Inter-metallic Phases during Inter-diffusion Between Low-carbon Steel and Aluminum Alloys [J]. Acta Materialia, 2011, 59 (4): 1586-1600.
- [6] Laasraouia Jonas J. Recrystallization of Austenite After Deformation at High Temperatures and Strain Rates-Analysis and Modeling [J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22: 151-159.
- [7] 周德敬,陈智,张新明,等. Si 含量对轧制复合铝钢层状复合材料界面化合物组织形貌的影响 [J]. 金属热处理, 2014, 39 (1): 42-48.
- [8] Kobayashi S, Yakou T. Control of Intermetallic Compound Layers at Interface Between Steel and Aluminum by Diffusion-treatment [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 338 (1): 44-53.

李 龙(1977-),男,博士(东北大学),高级工程师,2004 年内蒙古科技大学(本科)毕业,金属层状复合材料技术开发。
E-mail:lichen040928@163.com

收稿日期:2014-08-28