

# 铜-铝复合材料的研 究<sup>①</sup>

张胜华 郭祖军

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

**摘 要** 研究了铜/铝轧制复合工艺对复合板结合强度的影响, 指出轧制变形率和热处理工艺是控制结合强度的主要因素。

**关键词** 铜/铝复合板 轧制复合 铜、铝

随着科学技术的迅速发展, 现代工业对材料的性能要求越来越高、对材料的结构效率的改进要求也越来越强烈, 单一金属材料已无法满足这些需要, 于是, 集不同材料的物理、化学、力学性能和价格差别于一体的新型复合材料, 随之应运而生, 这将更有效地利用材料的特性, 并克服和弥补单一材料性能的不足, 获得具有更优异的综合性能的材料。

在电气设备连接过程中, 过渡接头是关键的零件。目前采用的铝铜对焊接头, 不仅电化学腐蚀严重, 而且界面过渡电阻高, 是引起电力系统运行(特别是高压大电流环境下)多发性事故的两个关键性问题, 其接触面不可避免地形成中间化合物, 使之质量差、寿命短, 且需耗大量铜。因此, 改革接头型式和采用新工艺开发新型 Al/Cu 复合接头材料是当务之急。

Al/Cu 复合材料不仅具有铜的导电、导热率高、易钎焊、接触电阻低和外表美观等优点, 也具有铝的质轻、经济等特点, 采用固相复合技术生产的 Al/Cu 复合板, 还具有结合面过渡电阻和热阻抗低、耐蚀、耐用、延展性和成形性好等综合特性, 可广泛用于电子、电器、电力、冶金设备、机械、汽车、能源和生活用具等各个领域。

但是, Al/Cu 复合材料的生产, 尤其固相复合技术, 目前在国外仍属于专利性的, 很少有实际报导; 固相复合理论目前也尚不完善,

无法统一。而且 Al-Cu 体系中铝、铜在固态下有限互溶, 并易形成硬而脆的金属间化合物。因此, 开发 Al/Cu 的固相复合研究工作, 无论在理论上还是实际应用中都具有重要意义<sup>[1]</sup>。

## 1 实验条件

### 1.1 材料

实验采用铝层(L<sub>2</sub>)和铜层(T<sub>2</sub>), 其厚度比为 1:1, 2:1, 两种金属成分均符合 GB2317-85 规定。

### 1.2 实验方法

#### (1) 复合轧制

在二辊轧机( $d$  500×600 mm, 功率 300 kW, 转速为 14 r/min)上以各种压下率进行复合轧制。

#### (2) 扩散热处理

在箱式退火炉内进行不同温度 and 不同保温时间的退火实验。

#### (3) 结合强度的检测

本实验采用拉剪法<sup>[2]</sup>测试界面强度, 其试样制备采用线切割技术, 将待测的 Al/Cu 复合板加工成如图 1(a)所示的形状和尺寸; 并比较相同测试状态下铝的抗剪强度, 具体形状、尺寸如图 1(b)所示, 拉伸条件: WD-10A 电子拉伸机, 拉伸速度为 0.5 mm/min。

① 收稿日期: 1995-04-13; 修回日期: 1995-06-08

#### (4) 硬度实验

硬度在 HVA-10A 型显微硬度计上测量。

#### (5) 金相组织观察

在 XJL-02A 型和 POLVAR MET 金相显微镜上观察结合面, 扩散层特征, 铝、铜层的组织变化。

#### (6) SEM 分析和 X 射线衍射分析

在日立 X-650 扫描电镜下, 采用波谱和能谱分析界面扩散状况。在 X 射线衍射仪下, 测定不同条件下形成的金属化合物。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 界面两侧的金相组织

Al/Cu 复合板轧制态, 不同热处理制度下的结合界面的金相组织如图 2 所示。

由图 2 看出: 轧制复合态的 Al/Cu 晶粒均呈纤维状(图 2(a)), 但铜在低温(280℃)1 h 就发生再结晶, 在 350℃以上, 只需十几分钟就能得到较粗且完整的晶粒, 而铝却不一样, 在低温(图 2(b))保温 3 h, 仍为纤维状, 随着温度升高, 晶粒迅速长大(图 2(c), (d))。从图 2 中还可看出 Al/Cu 结合界面线, 在退火前的轧制复合态是较平直的, 随着退火温度的升高, 结合界面线不断加宽, 在显微镜下可观察到界面处有一薄层灰色物, 这就是扩散层。

### 2.2 界面结合强度与复合轧制变形率的关系

Al/Cu 复合板的剪切强度随轧制变形率变

化曲线如图 3 所示。当轧制变形率低于某极限值( $<40\%$ )时铝、铜板不能结合在一起, 在出口处自动分开, 此极限值即为临界变形程度  $R_L$ 。随压下率增大, 结合强度首先急剧上升, 当变形率达 55% 后, 斜率变缓; 当变形率达 75% 时, 结合强度逐渐趋近于相应状态下的纯铝的剪切强度。

### 2.3 Al/Cu 复合板结合区的显微硬度分布

图 4 为复合轧制态和经不同退火制度后的 Al/Cu 复合板沿厚度方向的显微硬度分布图。由图可见, 轧制复合后硬度峰值出现在结合分界面附近, 其显微硬度可达 1400 MPa, 在 280℃ 温度下, 保温 4 h 后, 界面附近的硬度峰值基本消除, 铝、铜基体回复到轧制复合前的水平。进一步升高温度, 铝、铜侧基体的硬度变化不大, 而界面附近却重新出现了硬度峰值, 其显微硬度值( $H_v$ )可达 2000~3000 MPa 以上, 这说明结合区形成了 Cu-Al 的金属间化合物<sup>[3]</sup>。

### 2.4 X 射线衍射分析

加热温度为 280℃, 保温 6 h 后, 还没发现有新相产生, 而保温 10 h 后的 Al/Cu 复合板的衍射结果表明, 此时已形成微量的 Cu/Al 相(如图 5(a)所示); 继续升高温度至 400℃, 保温 10 h 后, 结合区中已生成大量的 Cu/Al 相, 少量  $\text{CuAl}_2$  相, 微量的  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  中间化合物。(见图 5, 6)。

### 2.5 波谱分析结果

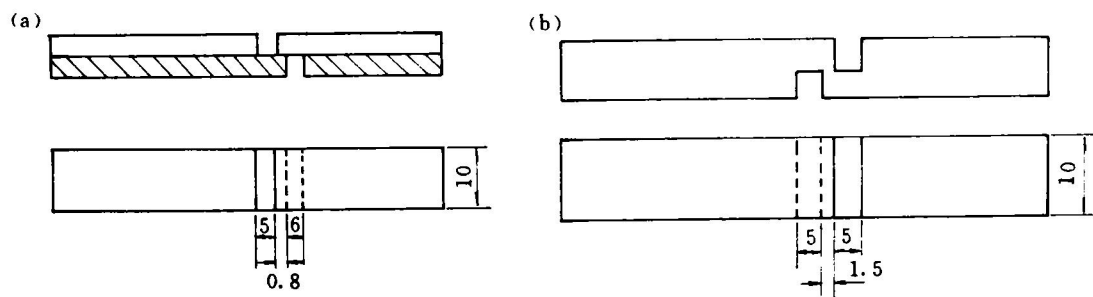


图 1 Al/Cu 复合板与纯铝板拉剪试样

(a)—铝/铜复合板试样; (b)—纯铝试样

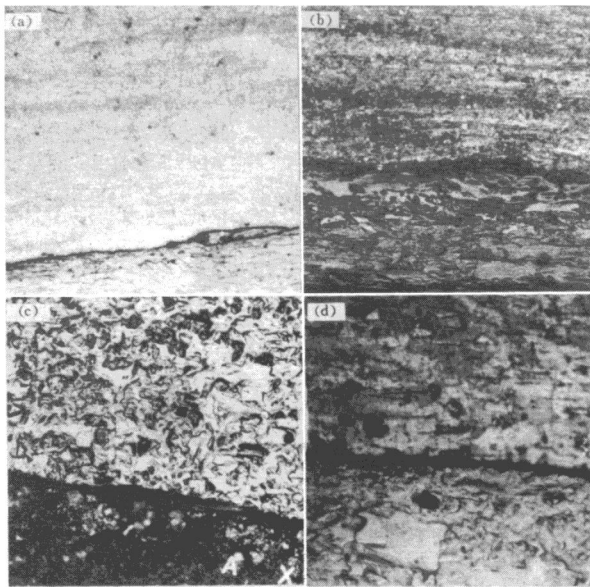


图2 不同状态 Al/Cu 复合界面两侧的组织

除(c)图外上面均为 Al 面

(a)—轧制态; (b)—350 °C, 15 min; (c)—280 °C, 3 h; (d)—500 °C, 10 min

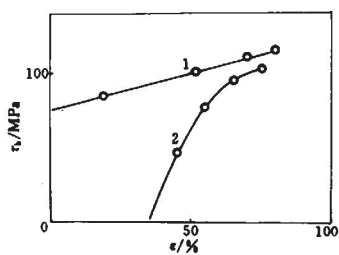


图3 Al/Cu 复合板的剪切强度与  
轧制变形率的关系图

(Al : Cu = 2 : 1, 冷轧复合态)

1—纯铝的拉剪强度; 2—Al/Cu 板的拉剪强度

图6 为不同退火温度, 保温时间下 Al/Cu 复合板的结合界面的 SEM 形貌, 可以看出, 低温时, 扩散层的厚度随时间增长并不明显, 当退火温度为 280 °C, 保温时间为 3 h 时, 结合区的扩散深度已达 2~4 μm, 继续保温 6~10 h 时, 其变化并不大。当加热温度为 320 °C, 保温 1.5 h, 就形成 6 μm 厚以上的扩散层, 但此时仍未出现浓度梯度的突变, 说明没有较厚的中间化合物出现。当温度达 400 °C 时, 保温 1 h 后, 其扩散层厚度可达 5~8 μm。扩散层急剧加宽, 结合面易在制样过程中形成裂纹, 若保温时间延长至 10 h 后, 可很清晰地观察到几层中间相, 总厚度达 20 μm 以上。

综上所述可以得出:

铜、铝双金属在扩散退火过程中, 存在两

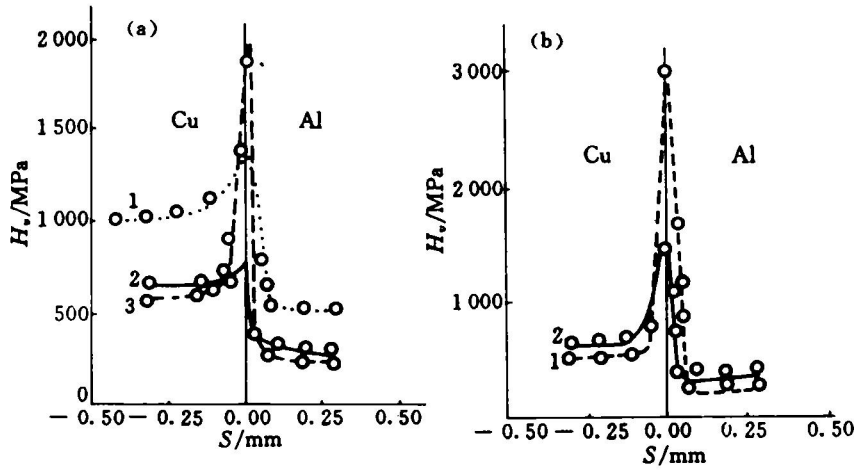


图 4 Al/Cu 复合板结合区的显微硬度分布

(a): 1—冷轧; 2—280℃, 4 h; 3—320℃, 4 h; (b): 1—500℃, 0.5 h; 2—350℃, 1.0 h

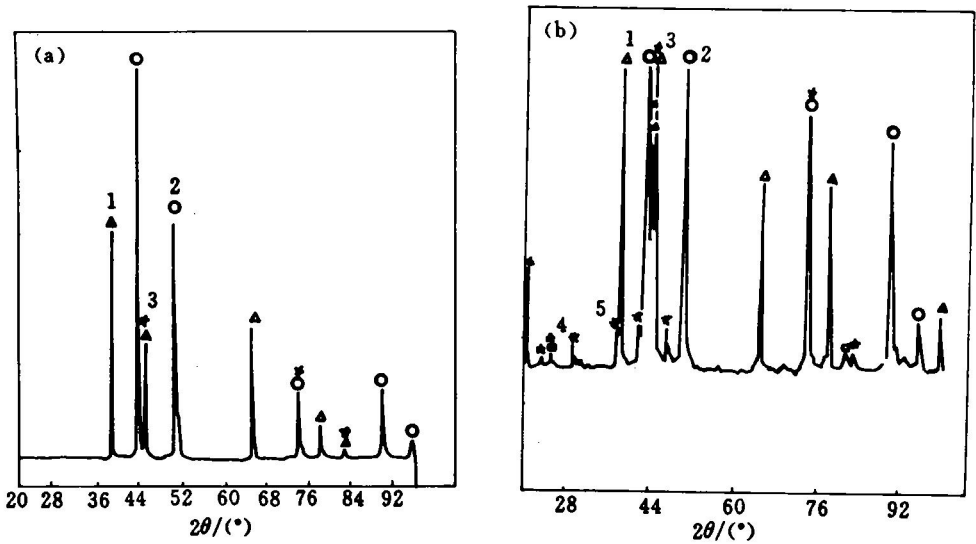


图 5 不同退火制度下的 X 射线衍射图

(a)—280℃, 10 h 保温后的 X 射线衍射谱; (b)—400℃, 10 h 保温后的 X 射线衍射图  
(a): 1—Al, 2—Cu, 3—CuAl; (b): 1—Al, 2—Cu, 3—CuAl, 4—Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>, 5—CuAl<sub>2</sub>

种情况：一是铜、铝原子的热运动和扩散行动，使基体金属复合轧制时由点结合变为面结合，因而使结合强度提高，同时，也使复合轧制时的残余应力得以消除，这是在较低温度下达到增加结合强度和消除加工硬化的目的。二是随着温度的增加，界面层两侧组织急剧变化，当温度较高时，铝、铜都发生再结晶，且

复合界面加宽，并有硬而脆的金属间化合物形成(CuAl、CuAl<sub>2</sub>、Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>等)，这将导致复合板的结合强度和弯曲性能等急剧恶化。

3 结论

(1)通过实验可以证明用铜铝双金属固相

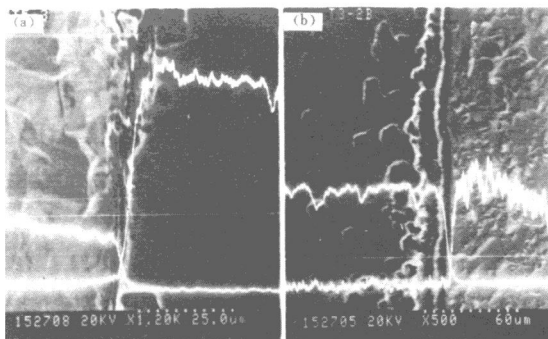


图6 结合区形貌及界面两侧浓度分布

(a)—400 °C, 1 h; (b)—320 °C, 1.5 h

复合法生产Cu/Al复合板是可行的,其复合质量好,且生产工艺简单。

(2) Cu/Al复合时,必须控制复合轧制率大于其临界值。

(3) 扩散退火能增强结合强度和消除应力,但为避免形成金属间化合物,宜采用低温长时为最佳工艺。

#### 参考文献

- 1 郭祖军. 硕士学位论文. 中南工业大学, 1995: 3.
- 2 Forster J A, Jha S, Amadruza A. JOM, 1993: 35-38.
- 3 周邦新, 蒋有荣. 金属学报, 1994, 30(3): B104-108.

(编辑 朱忠国)