

# 汽车热交换器用三层复合铝 合金箔材的冷轧复合工艺<sup>①</sup>

甘卫平 庞欣 罗春辉 彭志辉

(中南工业大学汽车用有色金属材料研究所, 长沙 410083)

**摘要** 研究了 Al-Si/Al-Mn 三层复合钎焊箔冷轧复合工艺, 分析了初始配对比和压下率对轧制复合包覆率的影响; 在此基础上, 提出了复合包覆率的经验方程式。同时也分析了成品冷轧前退火温度、退火时间对成品力学性能的影响。

**关键词** 汽车热交换器 铝合金 钎焊箔 冷轧复合

制造汽车用铝热交换器(如汽车水箱散热器、汽车空调冷凝器、蒸发器)的关键材料之一是 Al-Si/Al-Mn 三层复合铝钎焊箔, 其包覆层为双面包覆的熔点较低的 Al-Si 合金钎焊料。这种叠层复合材料的生产方法有多种, 国内对其热轧复合工艺已有一定研究<sup>[1-3]</sup>, 但存在生产效率低、成材率低等缺点。冷轧复合工艺具有生产效率高、产品性能稳定、适合于高精度多层金属复合轧制。从冷轧箔坯开始生产, 成卷轧制, 能充分发挥轧机的效率。当前, 日、美、法等国正以生产自动化程度高、生产效率高的冷轧复合生产逐步取代热轧复合法, 以提高生产效率和产品质量。国内外迄今尚未见冷轧复合三层铝合金钎焊箔材料的文献报道。本文旨在对汽车散热器用三层复合铝合金

钎焊箔冷轧复合的预处理条件及其工艺进行研究, 并对关键性工艺参数进行优化。

## 1 实验方法

### 1.1 试样化学成分

芯、皮材合金化学成分分析结果见表1。

### 1.2 冷轧复合工艺

芯、皮材合金铸锭分别经均匀化退火、热轧开坯后按表2所列实验流程进行。

表1 试验合金成分(%)

| 化学成分 | Si    | Fe   | Cu   | Mn   | Ti   | Al |
|------|-------|------|------|------|------|----|
| 芯材   | 0.09  | 0.21 | 0.01 | 1.19 | 0.09 | 余量 |
| 皮材   | 10.54 | 0.26 | 0.02 | 0.03 | 0.07 | 余量 |

表2 冷轧复合加工工序表

|   | 复合前厚度<br>配比/% | 酸、碱洗  | 表面打磨                                 | 冷轧复合<br>压下率/% | 中间退火                               | 冷轧                   | 成品前退火        |
|---|---------------|---|--------------------------------------|---------------|------------------------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 1-1           | 20% NaOH,<br>60°C, 5min<br>↓<br>热水清洗, 60°C<br>↓<br>20% HNO <sub>3</sub> , 60°C<br>↓<br>冷水清洗 | 钢丝辊刷<br>打磨结合<br>面后, 丙<br>酮脱脂,<br>酒精擦 | 50            | 360°C<br>40min<br>退火,<br>室冷至<br>室温 | 试样均<br>冷轧至<br>0.23mm | 360°C, 40min |
|   | 1-2           |   |                                      | 60            |                                    |                      | 360°C, 40min |
|   | 1-3           |   |                                      | 70            |                                    |                      | 360°C, 40min |
| 2 | 2-1           | 20% HNO <sub>3</sub> , 60°C<br>↓<br>冷水清洗  | 钢丝辊刷<br>打磨结合<br>面后, 丙<br>酮脱脂,<br>酒精擦 | 50            | 360°C<br>40min<br>退火,<br>室冷至<br>室温 | 试样均<br>冷轧至<br>0.23mm | 360°C, 20min |
|   | 2-2           |   |                                      | 60            |                                    |                      | 360°C, 40min |
|   | 2-3           |   |                                      | 70            |                                    |                      | 360°C, 60min |
| 3 | 3-1           | 20% HNO <sub>3</sub> , 60°C<br>↓<br>冷水清洗  | 钢丝辊刷<br>打磨结合<br>面后, 丙<br>酮脱脂,<br>酒精擦 | 50            | 360°C<br>40min<br>退火,<br>室冷至<br>室温 | 试样均<br>冷轧至<br>0.23mm | 300°C, 40min |
|   | 3-2           |   |                                      | 60            |                                    |                      | 360°C, 40min |
|   | 3-3           |   |                                      | 70            |                                    |                      | 420°C, 40min |

① 收稿日期: 1995-08-25; 修回日期: 1995-11-02 甘卫平, 男, 41岁, 副教授(硕士)

### 1.3 力学性能测试

将0.23 mm 复合箔按表2退火制度进行成品冷轧前退火后, 冷轧至成品厚度0.16 mm, 取拉伸试样在 WD-10A 型电子万能材料试验机上进行力学性能测试, 拉伸速度2 mm/min。

将不同压下率下冷轧复合好的材料, 加工成100 mm×30 mm 规格的矩形条, 于万能材料试验机上进行剥离实验(如图1), 拉伸速率10 mm/min。

图1 剥离实验示意图

### 1.4 金相观察

在各实验阶段取金相试样, 在金相显微镜下观察并照相, 浸蚀剂为混和酸((HF 5 mL, HNO<sub>3</sub>, HCl 70 mL)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冷轧复合效果

冷轧复合实验表明, 在适当的表面打磨工序后, 压下率达45%就能达到令人满意的复合效果。当压下率达50%~60%时, 冷轧复合的芯、皮材结合处有较明显的复合界面(见图2); 施以如表2所列的后序加工后, 情况则大有好转。图3中0.16 mm 厚成品箔材金相组织表明, 芯、皮材之间已不存在明显分界, 复合状况良好, 说明冷轧复合法是可行的。

图2 50%压下率的复合界面(250×)

图3 0.16 mm 厚三层复合铝合金箔材显微组织(200×)

有关轧制复合机理十分复杂, 它是人们长期关注、也长期争论的课题。描述轧制复合机理有表面层裂缝机理、能量障碍机理、再结晶机理、位错学说、扩散理论等<sup>[4-8]</sup>。其理论的多样化, 一是因为缺乏大量的实验数据, 二是由于复合轧制自身形式多样化的缘故。不同金属的组合, 不同的材料状态往往采用不同的机理形式。然而, 大多数文献都强调了大的压下率和适当的表面处理对冷轧复合的影响极大。Bay<sup>[7]</sup>提出的 Al-Al 冷轧复合机理认为: 在轧制过程中, 由刷面产生的表面硬化层破裂, 清洁的基体金属从裂缝中被挤出, 相互间真实地

接触结合,这一机理占焊合面的60%;另外,在焊合面的其余40%无硬化层,但氧化膜及吸附的水汽组成的表面污染层在轧制中破裂,新鲜金属暴露出来彼此相遇。这种“表面层裂缝”机理较合理地解释了铝合金冷轧复合机理。本工作中芯、皮材经钢丝辊刷打磨结合面就是基于这一复合机理的考虑。

### 2.2 包覆率变化规律

多层复合板在轧制区中的塑性变形行为十分复杂,由于各金属组元间流变应力的不同,复合前后各层厚度将发生一定改变<sup>[9, 10]</sup>

表3为不同芯、皮材厚度配对比在不同冷轧复合压下率下,最终包覆率的变化情况。取40%、50%、60%和70%冷轧复合压下率与复合后的包覆率之相关数据,采用多元线性回归数学方法,令  $y =$  复合后包覆率,  $x_1 =$  复合前包覆率,  $x_2 =$  复合压下率。假设存在一方程式:

$$y = Ax_1 + Bx_2 + C$$

经计算机进行多元线性回归方程拟合后,结果如下:

$$y = - 1.6926 + 1.01183x_1 + 0.0466886x_2$$

$$R = 0.991924$$

其中  $R$  为复相关系数,其结果很接近1,说明拟合出的线性方程的相关性较高,能够反应一定的客观规律,即冷轧复合后包覆率与初始包覆比和复合压下率有如下关系:

$$\text{复合包覆率} = 1.01183 \text{ 初始包覆比} + 0.0466886 \text{ 复合压下率} - 1.6926$$

经选用另一组轧制复合试样,根据上式计算复合包覆率所得计算值和实测值分别列于表3。由此经验公式可以看出,初始包覆比对复合包覆率影响较大。在相同的初始包覆比下,复合压下率越大,复合包覆率则越高,这是由于芯材较皮材变形抗力小、变形程度大的缘故。

### 2.3 剥离实验

实验结果见表4,从中可以看出:

(1) 压下率增大则剥离力增大。这是由于

表3 复合前后包覆率的变化

| 试样号  | 复合前<br>包覆率/% | 复合<br>压下率/% | 复合后包覆率/% |       |
|------|--------------|-------------|----------|-------|
|      |              |             | 实测值      | 计算值   |
| 1- 1 | 5.00         | 44.00       | 5.50     | 5.42  |
| 1- 2 | 5.00         | 50.00       | 5.80     | 5.70  |
| 1- 3 | 5.00         | 67.00       | 6.40     | 6.49  |
| 2- 1 | 8.00         | 49.00       | 8.80     | 8.69  |
| 2- 2 | 8.00         | 62.00       | 9.20     | 9.30  |
| 2- 3 | 8.00         | 75.40       | 9.70     | 9.92  |
| 3- 1 | 10.00        | 65.00       | 11.30    | 11.46 |
| 3- 2 | 10.00        | 60.00       | 10.80    | 11.23 |
| 3- 3 | 10.00        | 72.00       | 12.50    | 11.79 |

表4 剥离实验结果

| 试样状态 | 处理条件                | 冷轧复合压下率<br>/% | 剥离力<br>/kg |
|------|---------------------|---------------|------------|
| A    | 刷面、24h 后复合          | 60            | 0.5        |
| B    | 刷面、24h 后复合          | 65            | 0.6        |
| C    | 表面精整、刷面、<br>24h 后复合 | 50            | 0.6        |
| D    | 刷面后立即复合             | 45            | 1.0        |

变形程度越大,组元金属表面暴露率就越大,组元间焊合桥的面积增加,因而板层的焊合牢固程度也相应提高的缘故<sup>[11]</sup>。

(2) 表面精整试样在较小压下率下的剥离力,能接近未精整试样在大压下率下的剥离力的数值,说明表面精整对复合有利。有文献称粗糙度有利于塑性变形时造成应力偏聚和能量起伏<sup>[6]</sup>,但笔者认为粗糙度过大,势必减少结合点的数量和面积,同时对均匀变形也有不利影响,降低了产品的质量。因此,将粗糙度控制在一定范围内,进行适当的表面精整对提高复合强度是有利的。

(3) D 状态试样压下率最低,剥离力却最大,说明即时清刷表面非常重要。铝性质活泼、易氧化,且氧化层脆硬、易破碎,在打磨后露出的新鲜表面将再次氧化,生成薄而不易破裂的硬化层<sup>[4]</sup>,严重阻碍复合过程,其影响比未打磨的氧化表面更为不利。

### 2.4 成品前退火温度与时间对复合箔力学性能的影响

成品前不同退火温度与保温时间对复合箔力学性能影响见表5。图4和图5分别为退火温度和退火时间与力学性能的关系曲线。

表5 合金力学性能

| 试样号  | 退火温度 / °C | 保温时间 / min | $\sigma_b$ / MPa | $\sigma_{0.2}$ / MPa | $\delta$ / % |
|------|-----------|------------|------------------|----------------------|--------------|
| 2- 1 | 360       | 20         | 176. 0           | 159. 4               | 0. 70        |
| 2- 2 | 360       | 40         | 161. 3           | 141. 1               | 0. 90        |
| 2- 3 | 360       | 60         | 152. 7           | 135. 9               | 0. 85        |
| 3- 1 | 300       | 40         | 178. 7           | 155. 2               | 0. 73        |
| 3- 2 | 360       | 40         | 143. 9           | 128. 7               | 1. 08        |
| 3- 3 | 420       | 40         | 168. 1           | 150. 1               | 0. 96        |

值下降, 这可能是由于高温下 Si 扩散速度急剧升高, 皮材中 Si 扩散入芯材, 改变了芯、皮材的化学成分和力学性能的缘故。综合考虑材料的各力学性能指标, 成品冷轧前退火以 360 °C 时保温 40 min 为宜。

### 3 结论

(1) 铝合金三层复合钎焊箔在冷轧复合时, 当芯、皮材经适当的表面打磨和即时复合时, 复合压下率增大, 则界面剥离力增大, 可得到良好复合状况。

(2) 三层复合钎焊箔冷轧复合包覆率与初始厚度配比(初始包覆比)、复合压下率之间的关系可用多元线性方程描述。

(3) 钎焊箔成品冷轧前退火以 360 °C、保温 40 min 为宜。

#### 参考文献

- 1 彭志辉, 罗春辉, 甘卫平. 中南矿冶学院学报, 1994, 25 (3): 333.
- 2 甘卫平, 庞欣, 罗春辉. 中国有色金属学报, 1994, 4(增刊): 236.
- 3 罗春辉, 甘卫平, 庞欣, 彭志辉. 中国有色金属学报, 1994, 4(增刊): 241.
- 4 Lechoslaw, Ciupik F. 世界塑性加工最新技术(译文集). 北京: 冶金工业出版社, 1987: 103.
- 5 Wright P K, Snow D A, Tay C K. Metals Technology, 1978, 1: 25.
- 6 曹献民. 上海钢研, 1987, 5: 62.
- 7 Bay N. Welding Journal, 1983, 62(5): 137.
- 8 何康生, 曹雄夫. 异种金属焊接. 北京: 机械工业出版社, 1986: 10.
- 9 Hwang Y M, Hsu H H. Advanced Technology of Plasticity, 1993.
- 10 迪吉 H 著, 金怀生译. 板带轧制科学与技术. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- 11 别洛夫 A Ф 等编, 刘静安等译. 铝合金半成品生产. 北京: 冶金工业出版社, 1982.

图4 40 min,  $T \sim \sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta$  关系曲线图5 360 °C 退火,  $t \sim \sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta$  关系曲线

由表5及图4、图5可知, 在相同的保温时间里, 随着退火温度的升高, 复合箔  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$  值降低  $\delta$  升高, 符合一般退火软化规律。退火温度超过 360 °C, 则  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$  开始回升, 而  $\delta\%$

(下转86页)

# PREPARATION AND SIZE EVALUATION OF NANOMETER GADOLINIUM POWDERS

Shao Yuanzhi, Zhang Jieli, Yu Weijian, Shitu Zuen

*Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275*

**ABSTRACT** Nanometer-size gadolinium powders (nm-Gd) have been prepared by means of condensation of evaporating Gd atoms within inert gas atmosphere. The microscope analysis, based on both measurements of small angle X-ray scattering (SAXS), X-ray diffraction (XRD), Raman scattering spectrum (RSS) and observation of transmission electron microscope (TEM), have been carried out in order to evaluate the size and its distribution of as-prepared nm-Gd powders. It turns out that the size distribution of nm-Gd powders meets very well with the distribution function of Rayleigh instead of logarithm. The mean size of nm-Gd powders shows a linear relationship with inert-gas pressure as follows:  $D = a + b \ln P$ . A discussion concerning the influence of particle size of nm-Gd powders on nanometer material parameters such as size distribution, specific surface area and percentage of surface atoms have been given in detail.

**Key words** rare earth nanometer materials microscope analysis

(编辑 彭超群)

(上接81页)

# COLD-ROLL BONDING PROCESS OF THE SANDWICH ALUMINUM FOIL FOR AUTOMOBILE HEAT EXCHANGER

Gan Weiping, Pang Xin, Luo Chunhui, Peng Zhihui

*Institute of the Nonferrous Metal Materials for Automobile,  
Central South University of Technology, Changsha 410083*

**ABSTRACT** The cold-roll bonding process of Al-Si/Al-Mn sandwich brazing foil was investigated, and the effect of the initial clad rate and the cold-roll deformation degree on the clad rate was analysed, on the basis of which the empirical equation of clad rate was established. Also, the effect of the temperature and time of the per-cold-roll annealing on the mechanical properties of the finished products was discussed.

**Key words** automobile heat exchanger aluminum alloy brazing foil cold-roll bonding

(编辑 朱忠国)