

# 铝合金晶界结构控制与钎焊过程晶界渗透行为的研究

林岚荣

上海建科检验有限公司, 上海  
Email: 181322755@qq.com

收稿日期: 2021年3月11日; 录用日期: 2021年5月18日; 发布日期: 2021年5月25日

## 摘要

近年来, 汽车的轻量化已成趋势。汽车热交换器用钎焊铝箔替代铜箔, 不但可以减轻汽车自重, 而且还能降低生产成本。但由于铝箔散热器钎焊加工过程中会发生皮材中Si向芯材渗透, 使芯材溶蚀以至于影响整个散热器的使用性能。采用金相显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)分析、织构能谱分析等实验设备和手段研究不同控制轧制工艺及热处理工艺对Al/4343/Al以及4343/3003铝箔组织和钎焊渗透的影响, 探索钎焊过程中晶界渗透行为的机理。研究结果显示, 纯Al以及3003铝箔再结晶晶粒均随着热处理温度的提高而长大。钎焊后Al/4343/Al发生沿晶界渗透, 并且小角度晶界相对于大角度晶界不容易发生渗透, 而中间退火及精轧率对晶界渗透行为无显著影响。而4343/3003则主要发生液膜迁移(在钎焊过程中, 液体的前端会形成液膜, 在液膜前端的固体合金的溶质会重新分布)。钎焊前后Al/4343/Al以及4343/3003铝箔组织的织构取向趋于一致。本文采用SEM, EBSD等多种微观分析方法, 深入研究了钎焊工艺对晶界渗透行为的影响, 其结果对复合钎焊铝箔材料的退火和轧制等工艺具有指导意义。

## 关键词

复合钎焊铝箔, 控制轧制, 晶界渗透, 液膜迁移, EBSD

# Control of Grain Boundary Structure of Aluminum Alloy and Grain Boundary Penetration in Brazing Process

Lanrong Lin

Shanghai Jianke Technical Assessment of Construction Co., Ltd., Shanghai  
Email: 181322755@qq.com

## Abstract

In recent years, the lightweight of automobile has become a trend. As one of the major automobile components, heat exchanger was once made of copper. Aluminum alloy has higher thermal conductivity compared with copper, as well as lower density and lower cost, which contributes to the lowering of automobile's weight and cost. Since the radiator brazing foil process, the Si material of the skin will penetrate to the core material, so that the core material's corrosion will happen. In this paper, optical microscope, SEM, electron backscatter diffraction (EBSD) analysis, texture energy spectrum analysis of laboratory equipment were used to investigate the influence of varied approaches of controlled rolling process and the different heat treatment on Al/4343/Al. The results indicate that aluminum foil of pure Al and 3003's grains grows up with ascending annealing temperature. After brazing, Al/4343/Al penetration happened along the grain boundaries. It is shown that small angle grain boundaries are less likely to infiltrate than the high angle grain boundaries, and middle rates of annealing and finishing have no significant effects on the permeation performance of grain boundaries. Besides, the 4343/3003 mainly conducts liquid migration. Finally, the texture orientations of aluminum foil around the Al/4343/Al and 4343/3003 line coincide gradually with those before brazing.

## Keywords

Composite Brazing Foil, Controlled Rolling, Grain Boundary Penetration, Film Transfer, EBSD

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

由于目前国内汽车热交换器的铝制化才刚刚起步,对复合钎焊铝箔材料的组织、抗下垂性及抗腐蚀性能等方面的研究还很不够。国内目前也只有少数企业能够用复合钎焊铝箔生产汽车热交换器,且产品性能不稳定。以常铝铝业股份有限公司为例,其复合钎焊铝箔 4343/3xxx/4343 会存在熔蚀、抗下垂性能差等问题。如果能从晶界结构渗透的机理入手,研究 Si 沿着晶界渗透的原理,通过晶界优化的手段,实现芯材抗钎焊腐蚀性能的提升,这对国内生产的钎焊铝箔性能的提高有很重要的意义。

本文以常铝铝业股份有限公司提供的复合钎焊铝箔成品和实验室自行浇筑的纯铝板为研究对象,研究不同轧制率和退火温度对复合铝箔钎焊后 Si 沿着晶界渗透行为的影响。本课题主要从下面几个方面进行了研究:(1) 纯铝晶界渗透行为的研究,通过不同的加工工艺和组织控制手段,分析不同回复再结晶温度(回复再结晶指的是经塑性形变的金属或合金在不同温度加热后,会发生结构、组织和性能的变化。在较低温度发生回复;温度较高时发生基体的再结晶和晶粒长大。)下, Si 沿着纯铝晶界渗透的机理。分析晶界结构特征,如晶界角度、点阵重合度等与 Si 渗透深度之间的关系。(2) 3003 晶界渗透行为的研究,在纯铝晶界渗透行为机理的基础上,进一步研究不同回复再结晶退火温度下, Si 在铝合金 3003 晶界中的渗透行为。但是,需要说明的是,由于铝箔加工是一个系统的工程性问题,实验室是很难完成的,本课题的很多实验样品均来自于江苏省常铝铝业股份有限公司的生产现场,样品采集与生产线上的不同工序,

无疑给研究工作带来了很大的不可控因素和复杂性[1]-[6]。

## 2. 实验方法及材料

### 2.1. 试验方法

通过控制轧制、热处理等工艺(见图 1 和图 2)来探索 Al-4343-Al 沿晶界渗透现象与其再结晶组织及晶界之间的关系。

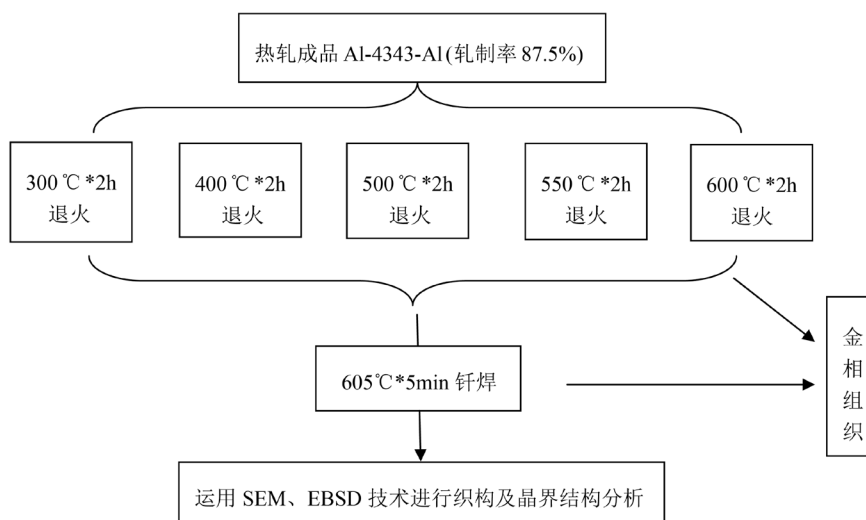


Figure 1. Heat treatment process flow chart

图 1. 热处理工艺流程图

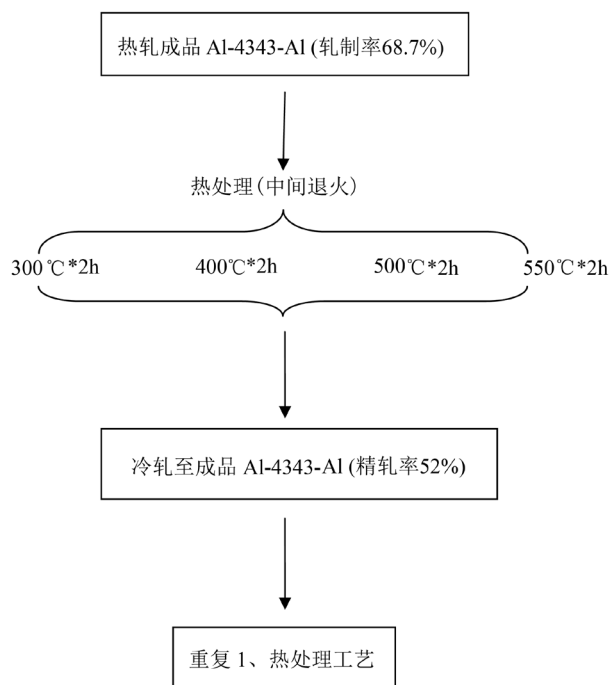


Figure 2. Process flow chart of controlled rolling

图 2. 控制轧制工艺流程图

## 2.2. 实验材料

实验用原料：纯铝锭(实验室自行浇筑)，4343 铸轧板(常铝铝业股份有限公司提供)，3003 铝合金(常铝铝业股份有限公司提供)。

4343 及 3003 铝合金合金成分如表 1 所示：

**Table 1.** Alloy composition (wt%) of composite foil

**表 1.** 复合箔合金成分(wt%)

牌号 \ 元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
4343	7.8~8.2	0.15~0.30	0.05	0.05	0.03	0.03	余量
3003	0.6	0.7	0.2~0.5	1.0~1.5	0.03	0.1	余量

## 2.3. 退火处理

### 2.3.1. 钎焊退火处理

在实验室模拟钎焊退火，以研究复合钎焊铝箔钎焊前后的组织和性能，模拟钎焊退火温度为 605℃。为保证实验条件一致，将马弗炉加热到 605℃，待稳定 5 min 后放入托盘，保温 5 min 后再将试样放入，进行 5 min (进炉开始计时)的钎焊退火处理，每次试样拿出后同样使炉子稳定 5 min 后再放入下一个样。

### 2.3.2. 扩散退火

为研究不同晶粒组织的复合钎焊铝箔中 Al-Si 共晶相的渗入情况和 Si 的渗透情况，对晶粒组织明显差异的复合箔成品 Al/4343/Al 和 3003/4343 进行了不同温度的扩散退火，退火工艺如表 2 所示。

**Table 2.** Diffusion annealing process

**表 2.** 扩散退火工艺

退火温度	退火时间	冷却方式
300℃		
400℃		
500℃	2 h	空冷
550℃		

## 2.4. 轧制工艺过程

铝锭是通过浇筑机器浇筑而成，轧制是采用型号为(Type y 132M1-6)的轧机对 Al/4343/Al 进行不同变形量的冷轧，轧制到不同的加工状态厚度。

第一批样品的轧制工序如下：

- 1、对 8 mm 厚度的 Al/4343/A 复合板进行不同道次的热轧。
- 2、经过不同道次轧制工序直接轧制到 1 mm 厚，轧制率为 87.5%，进行不同温度成品退火。

第二批样品的轧制工序如下：

- 1、对 8 mm 厚度的 Al/4343/Al 复合板进行不同道次的热轧。
- 2、经过不同道次轧制工序轧制到 2.5 mm 厚，轧制率为 68.7%，之后进行中间退火工艺。
- 3、对做完退火工艺的不同样品再全部冷轧到 1.2 mm 厚，则得到冷精轧加工率 52% 的样品，再进行

不同成品退火工艺。

### 3. 纯铝晶界渗透行为的研究

#### 3.1. 液膜迁移

液膜迁移理论是，在钎焊过程中，液体的前端会形成液膜，在液膜前端的固体合金的溶质会重新分布，并且原来的界面被侵蚀，形成新的结构，由此降低钎焊工件的使用寿命[7]。同时液体合金和芯材合金的相互作用也会降低液体钎焊料合金的钎焊性能。

关于液膜迁移机制争议较多，至今还没有一个统一的意见。其中比较有影响的是扩散导致的相干应变机制，认为亚稳态液化层的迁移是液化层周围晶粒通过晶格溶质原子扩散快速平衡的过程，扩散使得液化层界面与基体中的溶质元素含量存在差别，而溶质元素含量的不同引起晶格常数的改变。如果相差较大，就会产生一个相干应变场。应变导致固/液界面的摩尔自由能发生改变，以确保与基体保持完全共格。另外，晶界发生弯曲后液化层两边界面的表面能不对称也会导致液膜发生迁移。

#### 3.2. 再结晶退火温度对 Al/4343/Al 组织及渗透行为的影响

对 500℃ \* 2 h 再结晶退火的样品进行 SEM 扫描电镜观察，并作能谱扫描，如图 3 所示，500℃ \* 2 h 再结晶退火的样品钎焊后渗透深度为 30 μm，比金相下观察到的深度要深得多，并且 Si 渗透的时候呈现出了三种特征，正如 Corus RD&T 和 Aleris [6]所说，即刚开始渗透时形成凹槽；进入凹槽后以微米级向合金渗透；最后以纳米级的厚度向合金更深处扩散。550℃ \* 2 h 再结晶退火钎焊后和 600℃ \* 2 h 退火的样品的渗透深度分别是 55 μm 和 60 μm<sup>3</sup>，相对于 500℃ \* 2 h 再结晶退火的样品渗透得更深。但是由于这些渗透的点是选取样品上渗透得最深的地方拍摄。

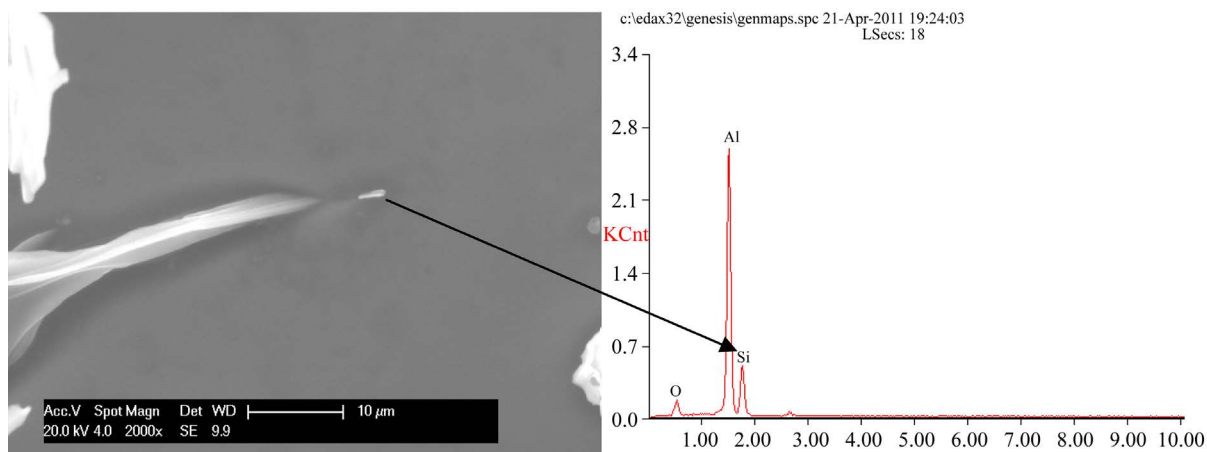


Figure 3. SEM and EDS after annealing at 500℃ \* 2 H + 605℃ \* 5 min

图 3. 500℃ \* 2 h + 605℃ \* 5 min 退火后 SEM 及 EDS 图

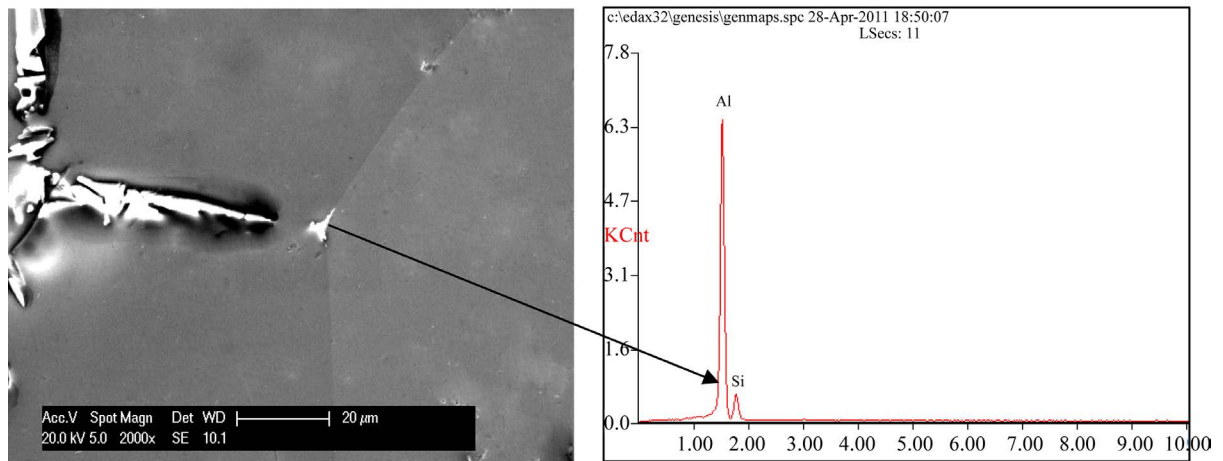
对渗透得较深的 550℃ \* 2 h 中退后钎焊样品进行扫描分析，如图 4 所示，400℃ 成品退火钎焊样品已经渗透到下一个晶粒的三叉晶界处，而无成品退火和 500℃ 成品退火的样品也都沿着晶界渗透的很深。

### 4. 电子背散射衍射(EBSD)分析

#### 晶界角度分析

由于电子金相显微分析和 SEM 分析并不能看出晶界角度等晶界特征对沿晶界渗透的影响情况，所以

对不同退火样品进行电子背散射衍射(EBSD)分析, 从而分析纯铝的晶界特征分布等情况, 以进一步分析其对 Si 沿着晶界渗透的影响。

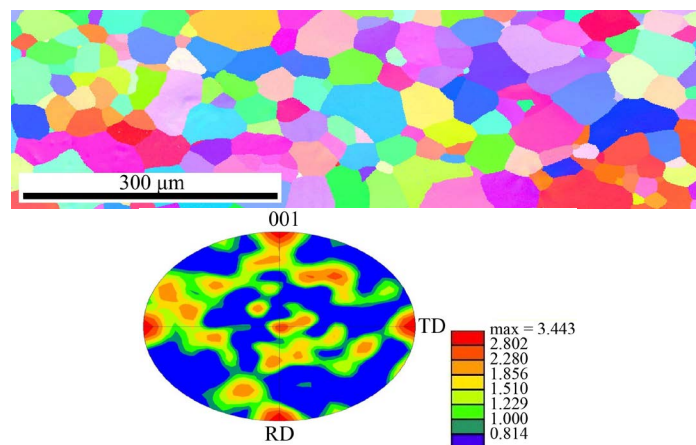


**Figure 4.** SEM and EDS of 550°C intermediate annealing + 400°C final annealing

**图 4.** 550°C中退 + 400°C成退 SEM 及 EDS 图

图 5 所示为 550°C 中退 500°C 成品退火样品的织构图, 由图中可以看出织构强度(多晶集合体中的晶粒就会沿着某些方向排列, 呈现出或多或少的统计不均匀分布, 即出现在某些方向上聚集排列, 因而在这些方向上取向几率增大的现象, 这种现象叫做择优取向。这种组织结构及规则聚集排列状态类似于天然纤维或织物的结构和纹理, 故称之为织构。织构强度指的就是这种晶粒择优取向的结合力大小。其大小代表晶粒在某个取向的结合牢固程度)为 3.443, 比图 6 中所示的 6.786 减少一倍。而织构的取向只剩  $\{110\}\langle 110\rangle$  和  $\{001\}\langle 110\rangle$  两个取向, 550°C 中退 400°C 成品退火样品中纯铝的  $\{131\}\langle 132\rangle$  织构取向消失。既在同一中间退火工艺下, 随着成品退火温度的升高, 晶粒发生长大, 同时织构取向趋于一致。

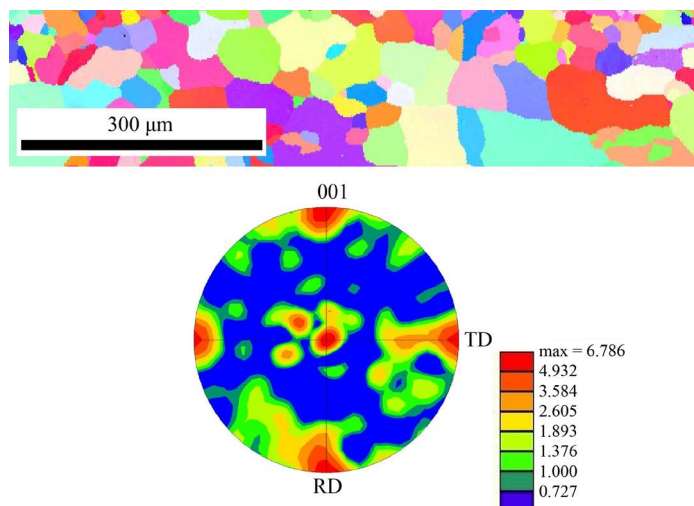
通过测量晶界处可视的渗透深度, 计算得到晶界渗透速率在 0.2 到 19.6  $\mu\text{m}/\text{min}$  之间, 所有旋转角度小于  $10^\circ$  的晶界(小于  $10^\circ$  的晶界称为小角晶界)的渗透速度都很慢, 但是对于大角度晶界(晶界角度大于  $10^\circ$ ), 旋转角度的大小和渗透的速度没有直接的联系。



**Figure 5.** Texture map of annealed samples annealed at 550°C and 500°C (orientation  $\{110\}\langle 110\rangle$   $\{001\}\langle 110\rangle$ )

**图 5.** 550°C中退 500°C成品退火样品的织构图(取向  $\{110\}\langle 110\rangle$ ;  $\{001\}\langle 110\rangle$ )





**Figure 6.** Texture map and grain distribution with different texture orientations (orientations  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{110\} \langle 10 \rangle$ ,  $\{131\} \langle 132 \rangle$ ) of annealed samples annealed at  $550^\circ\text{C}$  and  $400^\circ\text{C}$

**图 6.**  $550^\circ\text{C}$  中退  $400^\circ\text{C}$  成品退火样品的织构图以及不同织构取向的晶粒分布(取向 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{110\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{131\} \langle 132 \rangle$ )

## 5. 结论

我们通过使用 SEM, EBSD 等多种微观分析方法, 对不同退火及轧制工艺的铝箔晶界渗透进行研究, 最后得到以下几点结论, 这对复合钎焊铝箔材料的退火和轧制等工艺具有指导意义。

1) 随着再结晶退火温度的升高, 纯铝的再结晶晶粒逐渐变大, 当再结晶退火温度升高到  $600^\circ\text{C}$  时, 由于退火温度高于芯材 4343 熔点  $577^\circ\text{C}$ , 因此发生芯材中 Al-Si 共晶相向皮材渗透的现象, 渗透是沿着纯铝晶界进行的, 没有发生液膜迁移现象, 完全是晶界渗透行为。

2)  $500^\circ\text{C}$  以下的不同中退退火工艺对样品钎焊后 Al-Si 共晶相沿晶界向皮材纯铝中渗透的深度并没有明显的影响, 而  $550^\circ\text{C} * 2 \text{ h}$  中退和  $550^\circ\text{C} * 2 \text{ h}$  成品退火样品会使渗透的深度相对较深。

3) 对成品钎焊前样品进行 EBSD 分析发现, 随着成品退火温度的提高, 样品中纯铝的织构趋于一致。

4) 小角度晶界相对于大角度晶界不容易发生渗透现象, 但是对于大角度晶界, 旋转角度的大小和渗透的速度没有直接的联系。

## 参考文献

- [1] 黄晖, 马翠英. 汽车散热器的材料及其发展[J]. 内燃机, 2005(5): 36-38, 51.
- [2] 李益群. 车用全铜与全铝散热器的发展[J]. 农机化研究, 2005(4): 309.
- [3] 黄晖, 马翠英, 李国祥. 汽车散热器材料及其制造新技术[J]. 客车技术与研究, 2006(4): 45-48.
- [4] 周继峥, 李炳泉. 汽车铝散热器的发展趋势[J]. 汽车与配件, 2003(10): 30-32.
- [5] Tomlinson, J.E. (1974) Progress in Aluminum Automotive Heat Exchangers. *Sheet Metal Industries*, **51**, 766-768, 770, 771.
- [6] Corus, R.D. (2009) Microstructural Changes in Brazing Sheet due to Solid-Liquid Interaction. 90-91.
- [7] Meijers, S. (2002) Corrosion of Aluminium Brazing Sheet. Thesis, Delft University of Technology, Delft.