

# 挤压温度对高硅铝合金材料物理性能的影响\*

杨伏良 甘卫平 陈招科

(中南大学材料科学与工程学院 长沙 410083)

摘要：针对航空航天电子封装用轻质高硅铝合金，采用空气雾化水冷与真空包套热挤压工艺相结合的方法，制备了 Al-30Si 和 Al-40Si 过共晶高硅铝合金，并通过排水法对其进行了密度测试，同时测定了材料的导热性、气密性和热膨胀系数，得到了挤压温度与其性能的关系。结果表明：利用粉末冶金热挤压技术所制备的高硅铝合金，其致密度高达 99.64%；材料的密度随挤压温度的升高而增加；随挤压温度的升高，热导率在 104~140 W/(m·K) 内变化，热膨胀系数逐渐增加，但均小于  $13 \times 10^{-6}$  (在 100 时)；材料的气密性达  $10^{-9}$  数量级。

关键词：快速凝固 真空包套 热挤压 Al-Si 合金 气密性 导热性能 电子封装

中图分类号：TF112 TG337

## 0 前言

高硅铝合金轻质电子封装材料的质量仅为金属基 W-Cu 电子封装材料的六分之一，且高硅铝合金具有很好的热导性能，线膨胀系数可控，能与电路板广泛使用的半导体材料相匹配，因此，作为基片衬底、机壳及盖板等材料可保证电子器件在使用过程中不致受热或开裂而过早失效。高硅铝合金电子封装材料，代表了新型轻质封装材料的发展方向。

采用快速凝固技术制备的高硅铝合金粉末，由于 Al 的活性很高，在雾化制粉时不可避免地会形成一层氧化膜，导致致密化过程中合金元素的相互扩散受到阻碍，难以形成冶金粘结，因此，需采用一些特殊的致密化成形工艺，其中应用最广泛的致密化技术是粉末热挤压<sup>[1]</sup>。另外，由于高硅铝合金粉末含有大量的初晶硅相，材料的塑性较差，同时由于 Si 相颗粒硬度高，在热挤压成形时加剧了模具的磨损，故一般采用塑性较好的材料(如纯铝)做包套封装<sup>[2-3]</sup>。

目前，国内外已有人利用喷射沉积粉末冶金技术制备出了 Si 质量分数在 30% 以内的过共晶高硅铝合金的二元<sup>[4-5]</sup>或多元合金<sup>[6-8]</sup>，且主要集中在 Al-Si-Cu-Mg 系多元耐磨合金或高强耐磨合金的研究上，至今未见更高 Si 质量分数的二元高硅铝合金制备技术的报道，试验采用快速凝固/粉末冶金工艺制备了 Si 质量分数分别为 30% 和 40% 的过共晶高硅铝合金材料，并研究了挤压温度对电子封装材料所要求的物理性能(密度、导热性、气密性和热膨胀系

数)的影响。

## 1 试验

材料制备工艺流程为：雾化制粉 粉末过筛 真空包套 热挤压 机加工制样 性能测试。

### 1.1 粉末制备

将配制好的 Al-Si 合金在感应炉中加热熔化、精炼和脱气，金属液流经漏嘴流入喷雾装置中，被高压气体破碎后的金属液滴直接喷入距离喷嘴约 200 mm 的高压水流中，经冷却后，Al-Si 粉末浆料流经筛网，过滤掉粗大的金属及杂物，流入高速旋转的甩干机中进行脱水处理，经烘干、过筛制得各种试验所需粉末，其制粉工艺参数如表 1。

表 1 制粉工艺参数

熔炼温度 $q/m$	喷嘴孔径 $d/mm$	雾化气体	气体压力 $p/MPa$	喷腔类型
1 000	3.5	空气	0.6	环缝式

试验按要求配制了硅质量分数分别为 30% 与 40% 的两种高硅铝合金(其化学分析成分见表 2)，利用气雾化-水冷法，将其制备成粉末，对两种成分的合金粉末分别进行过孔径为 0.154 mm、0.071 mm 的筛分处理，得出四种不同类型的粉末，其具体编号及组成见表 2。

### 1.2 真空包套热挤压

各种编号的合金粉末经均匀混合，初装、振实装入特制的纯铝包套内，其密度可达理论密度的 70%，经真空除气后，封闭焊合包套。挤压前对样品采用四种不同的温度加热、保温 1 h 后挤压，其加热温度分别为 370、430、490 和 550。热挤压试验在 2.9 MN 油压机上进行，各种挤压模具

\* 国防科学技术工业委员会资助项目(MKPT-03-151)。20050620 收到初稿，20051110 收到修改稿

首先置入井式炉中充分预热保温, 模具加热温度为 250 , 热挤压的过程中用润滑油润滑, 挤压比为 16(纯铝包套和挤压棒直径分别为 40 mm 和 10 mm), 挤压锥角为 90°。

表 2 高硅铝合金粉末成分及粒度

编号	质量分数 w/%			粉末粒度 d/ $\mu\text{m}$
	Si	O	Al	
1	26.60	0.48	余量	71
2	26.60	0.50	余量	154
3	36.44	0.51	余量	71
4	36.44	0.54	余量	154

### 1.3 性能检测

将热挤压得到的挤压棒车去包套并机加工成各种规格的检测样品。采用排水法测定材料的密度, 所用分析天平最小精度为 0.1 mg; 导热性测定在 JR-2 热物性测试仪上进行; 在日产 HELIOT306S 型 He 吸附试验机上进行气密性测试; 在日本理学热分析 TAS100 上测试材料膨胀系数。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 材料密度

采用排水法对热挤压后的高硅铝合金材料进行了密度测试, 测量结果见图 1。由图 1 可知, 在同一成分下, 随着挤压温度升高, 密度略有提高。这是因为挤压温度升高, 使得 Al-Si 合金粉末固溶强化下降, 粉末越容易发生再结晶, 粉末强度软化, 更容易挤压, 孔隙易消失, 从而致密度上升, 密度提高。

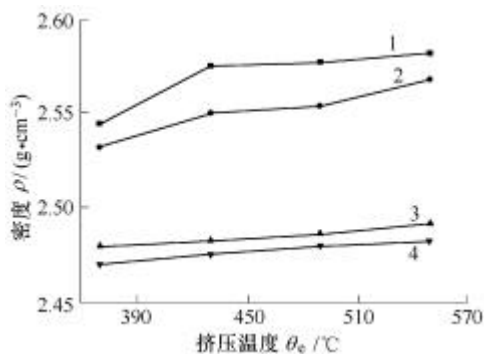


图 1 挤压温度对密度的影响

- 1 .Al-26.60Si, 粒径不大于 0.071 mm 2 .Al-26.60Si, 粒径不大于 0.154 mm  
3 .Al-36.44Si, 粒径不小于 0.071 mm 4 .Al-36.44Si, 粒径不小于 0.154 mm

从图 1 中可以看出, Al-Si 合金具有很低的密度, 随着挤压温度的提高, 其值在 2.46 ~ 2.60 g/cm<sup>3</sup> 间变化, 与传统的金属基 W-Cu 电子封装材料相比, 高硅铝合金材料的密度仅为 W-Cu 电子封装材料的

六分之一, 完全满足轻质电子封装材料对密度的要求。从表 3 中(表 3 中同时给出了其他数据)可以看出, 密度实测值与其理论计算值很接近, 表明利用热挤压工艺可以制备出较高致密度的高硅铝合金材料。快速凝固所制备的粉末具有不规则的颗粒形貌, 且大部分为长条形, 如图 2 所示。这种形状的粉末颗粒之间容易咬合, 热挤压时在强大的三向压应力所产生的高度的界面切应力的作用下, 使粉末发生移动, 填充间隙, 粉末在热和力的作用下发生变形, 相互间产生滑动, 靠摩擦使粉末表面的氧化膜破碎, 从而促使粉末颗粒之间通过咬合和粘结而形成良好的冶金结合, 得到非常致密的高硅铝合金材料。

表 3 高硅铝合金材料的物理特性

编号	Si 的体积分数 $j/\%$	理论密度 $r_t/(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	实测密度 $r_r/(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	气密性 $p/(\text{nPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	29.57	2.590 6	2.581 4	1.4
2	29.57	2.590 6	2.549 8	2.2
3	39.92	2.552 3	2.491 2	3.8
4	39.92	2.552 3	2.481 7	5.4

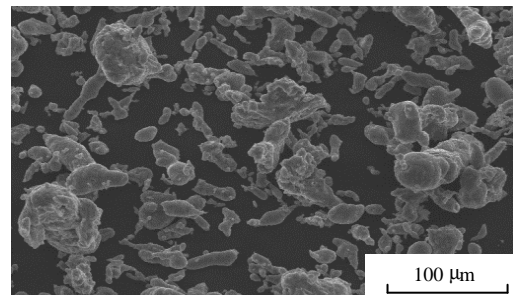


图 2 粉末颗粒形貌

### 2.2 导热性

用线切割机将挤压棒加工成  $f10 \times 4$  的样品, 依照国家标准 GB11108-1989, 在 JR-2 热物性测试仪上采用闪光法测定试样在室温下的热扩散系数, 测量误差为  $\pm 5\%$ 。然后根据热扩散率、密度、定压比热容之间的关系求得热导率, 其公式如下

$$I = 100 a r c_p$$

式中  $a$  ——热扩散率( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$r$  ——密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$c_p$  ——质量定压热容( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

对于纯金属铝的质量定压热容为 0.905, 硅为 0.713, 硅的体积分数为 29.57% 的合金, 其质量定压热容为 0.848 J/(kg · K), 硅的体积分数为 39.92% 的合金, 其质量定压热容为 0.828 J/(kg · K)。图 3 为快速凝固热挤压高硅铝合金材料导热性能随不同挤压温度的变化规律, 曲线含义同图 1。从图 3 中可见, 在试验所设计的挤压温度范围内, 材料的导

热性能基本上随着挤压温度的升高而上升的,这说明在一定的温度范围内提高挤压温度对材料的导热性能是有利的。这主要有以下几方面的原因。

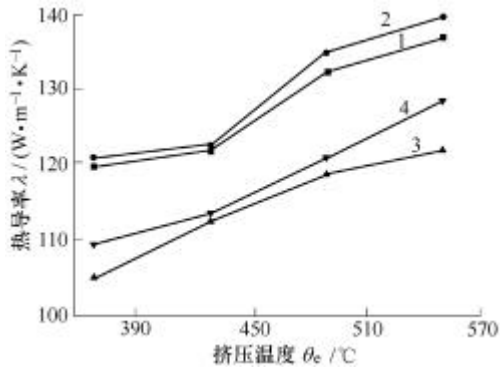


图3 挤压温度与材料热导性能的关系

首先是提高挤压温度,有利于 Al-Si 合金粉末固溶强化的下降,粉末越容易挤压,促进 Al 相的流动和 Si 相的重排过程,使 Al-Si 合金颗粒更好的粘合,减少材料内部大量存在的气孔、缺陷等造成的孔隙。而这些孔隙内的气体导热系数很低,对声子的散射严重,从而对材料的热导性能产生不利的影响。因此,降低材料的孔隙率必然会带来材料热导性能的提高。由图 1、3 可见,在同一成分下,热导率随温度的变化趋势与密度的变化趋势基本上是相同的,表明挤压温度的提高有利于减少材料内部的各种孔隙,使致密度上升,促进材料热导率的提高。温度引起致密度变化成为影响材料热导性能的主要因素之一。

其次是挤压温度的升高,不仅使材料的致密度提高,而且会使颗粒与颗粒之间的相互接触面积增大,使原子扩散更容易进行,导致材料原有细小的 Si 颗粒大部分消失,而使得材料内部颗粒的总表面积大大减少,界面结合得到改善,界面热阻大大降低。

另外挤压温度的升高,导致发生动态回复和动态再结晶,使得畸变能下降,晶格畸变消失,对声子和自由电子的散射减小,从而使材料的热导性能提高。

### 2.3 气密性

气密性测试的试样经机械加工和研磨,制成 23 mm×20 mm×1.5 mm 小片,在日产 HELIOT306S 型 He 吸附试验机上进行气密性测试,按测试程序,将待测试样置于密闭的容器中抽真空,真空度为 50 Pa,然后充 0.5 MPa 的 He 气 2 h,取出后置于一个已抽真空的仪器罩内,罩内真空度达 1 pPa,测试 He 气的排出量,罩内 He 气探头把 He 的分压回升情况传到仪器的指示系统,测试结果见表 3。

从表 3 的测试结果可看出:利用快速凝固粉末冶金法制备的高硅铝合金材料,其气密性与航空航天用传统电子封装材料 W-Cu<sup>[9]</sup>的气密性相当,完全可满足使用要求。这主要有如下两方面的原因:首先是采用快速凝固制备出来的粉末,其颗粒呈不规则形状,且大部分是液滴状长条形,这种形状有利于后续装料及挤压时材料的致密;其次是采用了热挤压工艺,热挤压时在强大的三向压应力所产生的高度的界面切应力的作用下,使粉末的表面氧化膜破碎,从而促进粉末颗粒之间形成良好的冶金结合,得到非常致密的高硅铝合金材料。从表 3 合金材料的密度可以看出,试样 1 的相对密度最高,已达到 99% 以上,这是其他方法很难达到的,而高致密度是高气密性的前提,因此,试样 1 的气密性最好,且气密性随合金材料致密度的下降而降低。

### 2.4 膨胀系数

图 4 反映了不同挤压温度下,高硅铝合金电子封装材料热膨胀系数(在 100 °C 时)的变化趋势,曲线含义同图 1。由此可见,在试验所设计的挤压温度范围内,在其他条件相同的情况下,材料的热膨胀系数随着挤压温度的升高而增加。其主要原因有以下几点:第一是在挤压温度比较低的情况下,材料内部保留的很多细小的 Si 颗粒,这些小颗粒弥散地分布于 Al 基体中,从而抑制了基体的膨胀,图 5 为 Al-26.6Si 经 370 °C 热挤压后的金相组织;第二是在较低温度下挤压,材料中残留的孔隙要多一些,这些残留的孔隙由于在受热时没有膨胀,可以看成膨胀为零的刚性第三相,从而使材料的热膨胀系数下降;第三是在较低温度下挤压后的材料中,由于 Si 相的弥散分布,延性相 a (Al) 基体没有形成完整的连通网络,其膨胀受 Si 相的约束作用更大,从而使得热膨胀系数比较小,随着挤压温度的升高,过饱和 a 相中的 Si 量会逐渐减少, Si 相的约束作用随之减小,从而致使膨胀系数随挤压温度的升高而增加。

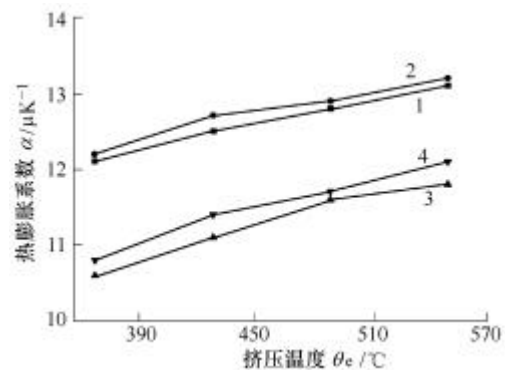


图4 挤压温度与线膨胀系数的关系

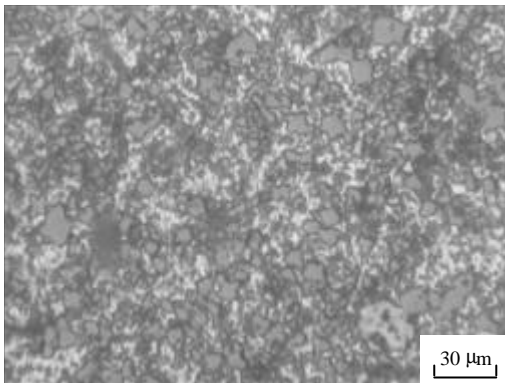


图 5 Al-26.6Si 粉末 370 热挤压后的金相照片

尽管挤压温度对材料热膨胀性能产生了一定的影响,但材料的热膨胀系数仍然主要取决于低膨胀 Si 相的体积百分数,提高 Si 相的质量分数是进一步降低热膨胀系数的主要途径。

### 3 结论

(1) 利用粉末冶金热挤压技术所制备的高硅铝合金材料,致密度可达理论密度的 99.64%;当 Si 质量分数一定时,其密度随挤压温度的升高而增加。

(2) 粉末冶金热挤压技术制备的高硅铝合金材料,材料的热导率随着挤压温度的升高而上升,其值在 104~140 W/(m·K)内,基本满足使用要求。

(3) 利用快速凝固粉末冶金法制备的高硅铝合金材料,其气密性达  $10^{-9}$  数量级,与航空航天用传统电子封装材料 W-Cu 的气密性相当,完全可满足使用要求。

(4) 材料的热膨胀系数随着挤压温度的提高而升高,在 100 时的膨胀系数均小于  $13 \times 10^{-6}$  可满足使用要求。

### 参 考 文 献

- [1] 张大童,李元元,罗宗强,等.快速凝固过共晶铝硅合金材料的研究进展[J].轻合金加工技术,2001,29(2):1-6.
- [2] SHEN J, XIE Z D, GAO Y L. Microstructure characteristics of a hypereutectic Al-Si alloy manufactured by rapid solidification/powder metallurgy process[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20: 1 513-1 515.
- [3] LI Y Y, ZHANG D T, ZHANG W W. Rapidly solidified hypereutectic Al-Si alloy prepared by powder hot extrusion[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2002, 12(5): 878-881.
- [4] JIA J, SONG G S, LI Q C. Microstructure of Al-Si alloys rapidly solidified from the different temperature[J]. Melts. J. Mater. Sci. Technol., 1999, 15 (3): 225-228.

- [5] SRIVASTAVA V C, MANDAL R K, OJHA S N. Microstructural evolution during spray forming of an Al-18Si alloy[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20: 27-29.
- [6] KIM W J, YEON J H, LEE J C. Superplastic deformation behavior of spray-deposited hyper-eutectic Al-25Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 308: 237-243.
- [7] XIONG B Q, ZHANG Y A, WEI Q, et al. The study of primary Si phase in spray forming hypereutectic Al-Si alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 137: 183-186.
- [8] KIM T S, HONG S J, KIM W T, et al. Microstructures and mechanical properties of Al-20Si-XFe(X=3,5,7) alloys manufactured by rapid solidification processing[J]. Materials Transactions, JIM, 1998, 39(12): 1 214-1 219.
- [9] 王志法,刘正春,姜国圣. W-Cu 电子封装材料的气密性[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(2): 323-326.

## EFFECT ON EXTRUSION TEMPERATURE FOR PHYSICAL PROPERTIES OF HIGH-SILICON ALUMINUM ALLOY

YANG Fuliang GAN Weiping CHEN Zhaoke  
(School of Materials Science and Engineering,  
Central South University, Changsha 410083)

**Abstract:** Light weight high-silicon aluminum alloys are used for electronic packaging in the aviation and space-flight. Al-30Si and Al-40Si are fabricated with air-atomization and vacuum canning hot-extrusion process. Material density, thermal conductivity, hermeticity and thermal expansion coefficient are also measured, and the relationship of extrusion temperature and properties are obtained. Experimental results show that the density of high-silicon aluminum alloys prepared with the method is high to 99.64% of the theory density, and it increases with elevating extrusion temperature, at the same time, thermal conductivity which varies between 104~140 W/(m·K) with the extrusion temperature and thermal expansion coefficient also increases, but it is within  $13 \times 10^{-6}$  (at 100 ), and the hermeticity of the material is high to  $10^{-9}$ .

**Key words:** Rapid solidification Vacuum canning  
Hot extrusion Al-Si alloy Gas sealed  
Thermal conductivity Electronic package

作者简介:杨伏良,女,1962年出生,博士研究生,副教授。主要研究方向为铝合金材料。

E-mail : yangflcsu@163.com