



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

快速凝固铝硅合金电子封装材料

RAPIDLY SOLIDIFIED ALUMINUM SILICON ALLOYS FOR ELECTRONIC PACKAGING

蔡志勇 王日初 著
Cai Zhiyong Wang Richu



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

快速凝固铝硅合金 电子封装材料

RAPIDLY SOLIDIFIED ALUMINUM SILICON ALLOYS
FOR ELECTRONIC PACKAGING

蔡志勇 王日初 著
Cai Zhiyong Wang Richu



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

快速凝固铝硅合金电子封装材料/蔡志勇,王日初著.
—长沙:中南大学出版社,2016.1
ISBN 978-7-5487-2236-6

I. 快... II. ①蔡... ②王... III. 快速凝固-硅-铝基合金-封装
工艺-电子材料 IV. TN04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 096366 号

快速凝固铝硅合金电子封装材料

KUAI SU NING GU LU GUI HE JIN DI AN ZI FENG ZHUANG CAILIAO

蔡志勇 王日初 著

-
- ☐责任编辑 史海燕 胡 炜
☐责任印制 易红卫
☐出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
☐印 装 长沙鸿和印务有限公司
-
- ☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 13 ☐字数 258 千字
☐版 次 2016 年 1 月第 1 版 ☐印次 2016 年 1 月第 1 次印刷
☐书 号 ISBN 978-7-5487-2236-6
☐定 价 68.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

该书以介绍国内外电子封装材料的研究动态为基础,着重阐述 Al-Si 合金的制备科学、主要性能和应用现状。作者深入分析快速凝固 Al-Si 合金的凝固过程,探讨显微组织、热稳定性、变形性能以及 Si 相粗化机制与非平衡状态的关系;通过考察合金中 Si 相尺寸、形貌和分布特征,揭示其生长和演变规律,建立 Si 相特征与合金力学性能、热物理性能的内在联系,通过优化合金成分和制备工艺提高 Al-Si 合金的力学性能;同时研究 Al-Si 合金在服役条件下显微组织和性能的变化趋势并揭示产生这一变化的机理。书中涵盖的内容对高性能电子封装材料的制备具有重要的参考价值和借鉴意义。

该书内容丰富、数据翔实、结构严谨、可读性强,可以作为材料科学和电子封装相关专业教学或参考用书,也可以供从事快速凝固技术研究、开发和生产的科技人员参考。

作者简介

About the Authors

蔡志勇，男，1983 年出生，博士，江西理工大学材料科学与工程学院讲师。2015 年毕业于中南大学材料科学与工程学院材料学专业，获博士学位。目前主要从事有色金属及其复合材料、新型电子封装材料、快速凝固技术等的基础科学和制备技术研究，发表论文多篇，其中被 SCI 收录 8 篇，EI 收录 5 篇。

王日初，男，1965 年出生，博士，教授，博士研究生导师。中南大学金属材料研究所负责人，兼湖南省铸造学会副秘书长。目前主要从事快速凝固技术、新型电子封装材料、水激活电池阳极材料设计及制备、氧化物陶瓷基片材料、金属粉末及表面改性 5 个领域的研究工作，先后得到十余项国家级项目的支持。在相关的研究工作中，发表研究论文 90 多篇。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学省委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合的金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，“有色金属理论与技术前沿丛书”计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。“有色金属理论与技术前沿丛书”瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在“有色金属理论与技术前沿丛书”的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王汝佐

2010 年 12 月

前言

Foreword

电子封装 Al-Si 合金由 Al 基体和 Si 相构成,也称为 Al/Si_p 复合材料。Al-Si 合金综合 Al 和 Si 的优异性能,具有热导率高、热膨胀系数低、比强度高、密度小($<2.7\text{ g/cm}^3$)、均质、易于镀覆等特点,并且 Si 和 Al 在地壳中含量十分丰富(分别占 27.7% 和 8.1%),对环境无污染,对人体无害。因此,Al-Si 合金能够满足高性能电子封装材料对力学、热物理和工艺性能的要求,并且方便回收利用、具有良好的环境友好性。尽管如此,Al-Si 合金仍存在一些不足之处,主要包括容易形成粗大、不规则且棱角尖锐的 Si 相, Si 相特征及其演变过程十分复杂,界面形成及作用机制缺乏深入研究,成分优化设计的信息还相当匮乏;此外, Al-Si 合金在服役条件下界面结构、显微组织与性能的交互作用是评价其可靠性的基础,而这方面的认识还有待深入研究。

目前,高性能电子封装 Al-Si 合金的制备主要采用快速凝固技术。快速凝固过程的高凝固速率和大过冷度,一方面有效细化 Si 相并改善其形貌,从而提高合金的综合性能;另一方面, Al 基体过饱和固溶大量 Si 原子,对基体起强化作用。此外,快速凝固产生的非平衡凝固组织结构在加热过程的演变,特别是 Si 相长大和形貌变化对于电子封装 Al-Si 合金的设计与制备至关重要,深入分析快速凝固显微组织热稳定性、Si 相粗化机制,并建立与合金性能的关系是开发高性能电子封装 Al-Si 合金的关键。

本书以电子封装 Al-Si 合金为研究对象,采用快速凝固技术结合粉末冶金方法制备 Al-Si 合金。采用显微组织表征和性能检测方法,从快速凝固组织结构特征、显微组织热稳定性、Si 相特征演变、基体合金化和服役性能等方面研究显微组织与性能的

关系,目的是获得具有良好综合性能的 Al-Si 合金。全书共分 7 章,内容分别如下:第 1 章,介绍国内外电子封装 Al-Si 合金的制备技术、主要性能和应用现状;第 2 章,分析气雾化 Al-Si 合金粉末的特性和组织结构特征;第 3 章,研究快速凝固显微组织的热稳定性和 Si 相粗化机制;第 4 章,研究凝固速率和退火对 Al-Si 合金粉末变形性能的影响;第 5 章,采用热压烧结方法制备 Al-Si 合金,分析合金的显微组织及力学、热物理性能;第 6 章,通过热循环实验分析 Al-Si 合金显微组织和性能的演变规律,探讨显微组织演变与合金性能之间的内在联系;第 7 章,针对 Al-Si 合金力学性能偏低的问题,通过添加微量单质 Cu 粉末改善其烧结性能并提高力学性能。

本书在撰写和出版过程中,得到中南大学彭超群教授的悉心指导、支持和帮助,使本书结构更加合理、内容更为翔实;得到张纯博士的大力支持和帮助,她通读本书并提出宝贵的修改意见,使本书语言更加精练;本书出版得到国家出版基金的支持,在此一并表示感谢。

由于作者的学术水平有限,书中难免存在一些不足或错误之处,敬请广大同行专家批评指正。

第 1 章 绪论	1
1.1 电子封装与电子封装材料	1
1.1.1 电子封装概述	1
1.1.2 电子封装材料研究进展	2
1.1.3 电子封装 Al-Si 合金研究进展	5
1.2 电子封装 Al-Si 合金制备技术	8
1.2.1 熔炼铸造	8
1.2.2 浸渗法	10
1.2.3 喷射沉积	10
1.2.4 快速凝固-粉末冶金	13
1.3 电子封装 Al-Si 合金主要性能	15
1.3.1 物理性能	15
1.3.2 力学性能	18
1.3.3 工艺性能	20
1.4 Al-Si 合金的应用	22
1.5 主要研究内容	25
第 2 章 气雾化 Al-Si 合金粉末特性及组织结构	27
2.1 前言	27
2.2 实验过程	28
2.2.1 粉末制备	28
2.2.2 粉末特性、显微组织和硬度表征	29
2.3 粉末形貌和尺寸分布	30
2.4 粉末组织结构及显微硬度	35
2.4.1 显微组织特征	35
2.4.2 物相结构特征	42

2.4.3 显微硬度	45
2.5 粉末凝固速率和过冷度	46
2.6 本章小结	51
第3章 Al-Si 合金粉末的组织热稳定性	53
3.1 前言	53
3.2 实验过程	54
3.3 粉末粒度对合金组织稳定性的影响	54
3.3.1 显微组织演变	55
3.3.2 析出 Si 相粗化动力学	58
3.4 加热温度和保温时间对组织热稳定性的影响	65
3.4.1 显微组织演变	65
3.4.2 物相结构特征	67
3.4.3 显微硬度	70
3.5 加热保温过程析出 Si 相粗化机制	71
3.5.1 Si 相形貌演变	71
3.5.2 Si 相粗化机制	76
3.6 本章小结	79
第4章 Al-Si 合金粉末的压制性能	81
4.1 前言	81
4.2 实验过程	82
4.3 不同粒度合金粉末压制性能	82
4.3.1 振实密度和 Si 相形貌特征	83
4.3.2 压力-相对密度关系	85
4.3.3 粉末致密化行为	86
4.3.4 粉末压坯显微组织和抗弯强度	91
4.4 退火合金粉末压制性能	94
4.4.1 Si 相形貌特征	95
4.4.2 压力-相对密度关系	96
4.4.3 粉末致密化行为	97
4.4.4 粉末压坯显微组织和抗弯强度	101
4.5 本章小结	104

第5章 Al-Si 合金的显微组织和性能	105
5.1 前言	105
5.2 实验过程	106
5.2.1 材料制备	106
5.2.2 组织结构和性能表征	107
5.3 显微组织特征	109
5.4 物理性能	116
5.4.1 热膨胀系数	117
5.4.2 热导率	121
5.5 力学性能	127
5.5.1 拉伸性能	127
5.5.2 抗弯强度和布氏硬度	130
5.5.3 断口形貌	133
5.6 本章小结	135
第6章 Al-Si 合金的热循环行为	136
6.1 前言	136
6.2 实验过程	137
6.3 高温力学性能	138
6.4 热循环对热物理性能的影响	141
6.4.1 热膨胀系数	141
6.4.2 热导率	144
6.5 热循环对力学性能和失效机制的影响	146
6.5.1 力学性能	146
6.5.2 失效机制	149
6.6 本章小结	154
第7章 铜合金化 Al-Si 合金的显微组织和性能	156
7.1 前言	156
7.2 实验	157
7.2.1 热压烧结	157
7.2.2 显微组织和性能表征	158
7.3 Cu 合金化对致密化过程的影响	158
7.3.1 DSC 分析	158

4 / 快速凝固铝硅合金电子封装材料

7.3.2 淬火显微组织	160
7.3.3 热压烧结基体显微组织	163
7.4 显微组织特征	165
7.4.1 热压态显微组织	165
7.4.2 热处理对显微组织的影响	169
7.5 热物理性能	171
7.5.1 热膨胀系数	171
7.5.2 热导率	172
7.6 力学性能	173
7.6.1 布氏硬度	173
7.6.2 拉伸和抗弯性能	174
7.6.3 断裂机制	176
7.7 本章小结	178
参考文献	179

第1章 绪论

1.1 电子封装与电子封装材料

1.1.1 电子封装概述

电子封装(electronic packaging)是指对电子器件、组件、部件和电子系统等的包装,用于保护电路、芯片等使其免受外界环境影响^[1, 2]。随着社会高速发展和市场迫切需求,现代电子技术向高功率、高封装密度和高散热率等方向发展,电子封装材料和电子封装技术成为推动现代电子工业发展的重要因素。电子封装在一般电子通信和电脑产品中可分为4个层次,如图1-1所示^[3]。芯片层次上的相互连通常称为零级封装;芯片在基板上固定、引线键合及隔离保护等称为一级封装;基板上器件的固定和连接称为二级封装;电路板的组装称为三级封装;而构成电子系统整体则称为四级封装。电子封装在电子产品中的主要功能包括^[1]:

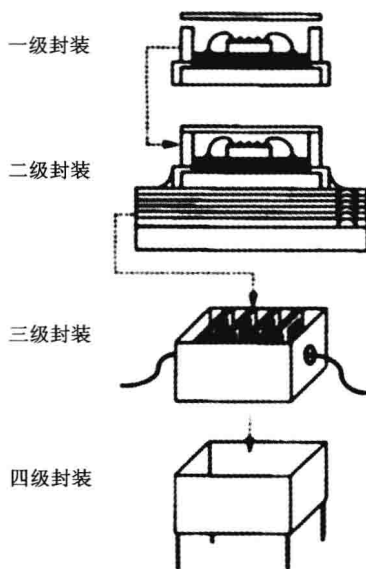


图 1-1 电子和微波系统中电子封装层次^[3]

- (1) 传输电源能量: 将电源能量由主机板传输至半导体集成电路(IC)芯片。
- (2) 讯号传输: 提供 IC 芯片与主机板及其他 IC 芯片间的讯号传输通道。
- (3) 散热: 将 IC 芯片运作过程中产生的热量及时释放出去。
- (4) 保护 IC 芯片: 将 IC 芯片包覆起来, 避免受水汽或外物污染及伤害, 并起机械支撑作用。

任何电子器件和电路在工作过程中都不可避免地伴随着热量产生, 及时地将热量释放出去是提高电子产品性能和可靠性的前提。通常情况下, 电子器件的电

学参数会随着温度变化而改变,如增益、漏电流、关调电压和正向压降等。自1958年世界上第一块IC芯片问世以来,IC芯片跨越小、中、大、超大、特大、巨大规模几个台阶,其集成度基本符合 Moore 定律,即 IC 芯片的集成度每 18~24 个月增长为之前的 2 倍,也就是说大概每 3 年就有新一代 IC 产品问世^[2,4]。进入 21 世纪以后,IC 芯片的计算速度和集成度不断提高而器件更加小型化,甚至有报道指出,芯片的集成度已经达到临界值。

但是,IC 芯片不是一个独立存在的个体,它必须与其他芯片、外引线相互连接以完成其电路功能;由于集成度迅猛增加,芯片能量急剧上升,每个芯片产生的热量高达 10 W。因此,如何及时释放这些热量以保证电路在正常温度下工作成为一个重要问题^[2,5]。实验证明,单个元件的失效率与工作温度呈指数关系,而功能与其呈反比^[2]。同时,IC 器件向轻量化、高性能和高可靠性方向发展是大势所趋。因此,提高芯片散热效率以保证电路在正常温度下工作对电子器件的稳定性至关重要,而合理的热管理(thermal management)是解决 IC 系统散热问题的主要途径之一。

1.1.2 电子封装材料研究进展

电子封装材料是用于承载电子器件及其相互连线,起散热、机械支撑、密封环境保护、信号传递和屏蔽等作用的基体材料。电子封装材料按封装结构主要包括基板、布线、层间介质和密封材料;按封装形式可分为气密封装和实体封装;按材料组成可分为陶瓷基、塑料基和金属基电子封装材料。电子封装材料的研究、开发、应用与现代电子工业和现代材料技术的发展密不可分。研究表明,电子器件的失效(fatigue)率随着工作温度上升而急剧增大:基本上工作温度每提高 10℃,半导体器件的寿命将下降三分之一^[6]。电子器件的散热和冷却通常采用热沉、散热器和电子封装材料实现。研究和开发具有高热导率(thermal conductivity)、低热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)和良好综合性能的电子封装材料和构件成为电子封装领域的一项关键技术并影响电子工业的发展。

根据现代电子封装的设计需要,对电子封装材料的要求主要包括^[7,8]:

(1)较高的热导率,及时将 IC 芯片工作过程中产生的热量释放出去,防止过热(over-heating)而影响其功能和寿命。

(2)合适的热膨胀系数,实现与电路半导体材料(Si、GaAs、GaN 等)和绝缘陶瓷基板(Al_2O_3 、SiC 等)相匹配,否则将在相邻部件和焊点处产生热应力(thermal stress),导致结合处发生热疲劳,甚至产生热开裂,从而导致结构和功能失效。

(3)较好的机械强度和刚度,为精密电子线路提供机械支撑和保护,且在工