

70%Si-Al 合金的热性能及其分形描述

余 琨, 杨 军, 陈福文, 蔡志勇, 谭 欣, 李 超

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用分形方法探讨 70%Si-Al 热沉材料的典型热性能与显微组织之间的关系, 针对不同 Si 相尺寸的分形特征进行描述。结果表明: 70%Si-Al 合金的显微组织具有自相似的界面形态和典型的分形特征, 使用分形维数能够直观表示出 70%Si-Al 合金中两相间的界面性质; 计盒维数法和质量维数法 2 种不同的分形描述方法反映的规律相同; Si 相平均尺寸为 75 μm 的试样比 Si 相平均尺寸为 45 μm 的试样的分形维数更小; 随着温度的升高, 分形维数较小的合金热导率较大, 热膨胀系数增加的幅度却减小。

关键词: 70%Si-Al 合金; 分形维数; 显微组织; 热性能

中图分类号: TG132.11

文献标志码: A

Thermal properties and fractal description of 70%Si-Al alloy

YU Kun, YANG Jun, CHEN Fu-wen, CAI Zhi-yong, TAN Xin, LI Chao

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The fractal description was applied to 70%Si-Al alloy to analyze the relationships between the thermal properties and the microstructures. The fractal character of different sizes of Si phase was researched. The results show that the microstructures of 70%Si-Al reveal a self-similar irregular interface structure and possess typical fractal character. Both the calculated box-counting fractal dimension and mass fractal dimension acquire the similar behaviors. The fractal dimension values of the microstructures decrease when the Si size changes from 45 μm to 75 μm . And the thermal conductivity of 70%Si-Al alloy increases but the coefficient of thermal expansion changes slightly with decreasing fractal dimension values.

Key words: 70% Si-Al alloy; fractal dimension; microstructures; thermal properties

硅含量为 70%(质量分数)的 Si-Al 合金具有与 Si、GaAs 等半导体芯片材料接近的热膨胀系数, 良好的导热性能, 是一种新型电子封装用的热沉材料, 它在电子封装材料领域具有广阔的应用前景^[1-3]。70%Si-Al 合金主要通过粉末冶金或者快速凝固技术获得。为了满足电子封装材料高热导率、低热膨胀系数的使用要求, Si-Al 合金理想的微观组织一般是合金中的 Si 相与 Al 相形成相互缠绕的网状结构, 这样, 通过 Si 相可以控制合金整体的热膨胀程度, 通过 Al 相进行热传导。由 Si-Al 的二元相图可知, Si-Al 两相之间是简单的共晶反应, 硅在固态铝中的固溶度很小, 而 Al 基本

不溶于硅中, 所以 Si-Al 合金的显微组织主要决定于硅相和铝相的分布形态、尺寸大小、界面结合情况等。

目前对于 Si-Al 合金的显微组织评定, 都是通过简单的金相图谱比照, 没有建立显微组织与材料宏观性能之间的联系^[4], 尤其是针对 Si-Al 合金热物理性能与微观组织之间的关系研究很少, 而针对 Si-Al 合金显微组织观察发现, Si-Al 合金的显微组织是一种不规则图像, 具有分形的特征, 可以通过显微组织的分形几何方法描述, 并可建立其显微组织和热物理性能之间的分形关系, 因此, 本文作者以典型的 70%Si-Al 合金的显微组织为对象, 用分形维数来描述 Si-Al 合

金的显微组织,分析 Si 相尺寸的差异在分形上的差别,建立其与合金显微组织及宏观热物理性能之间的联系。

1 实验

本实验针对平均尺寸为 45 μm 和 75 μm 2 种不同 Si 相尺寸的 70%(质量分数)Si-Al 合金进行显微组织观察与分析,以验证计算分形维数的可行性,并针对不同 Si 相尺寸的合金材料进行热物理性能测试,对比不同 Si 相尺寸分形维数的区别及其与宏观性能之间的关系。合金采用粉末冶金烧结工艺制备,利用精度为 0.001 g 的电子天平,采用阿基米德排水法测量材料的密度,计算其相对密度。合金显微组织观察采用 Polyvar-met 宽视野金相显微镜。Si-Al 合金的热膨胀系数采用日本理学公司生产的差热分析仪测定,测试温度范围为 20~400 $^{\circ}\text{C}$ 。采用 JR-2 热物理测试仪测定试样在常温下的热扩散系数,然后根据热导率、热扩散率、密度、定压比热容之间的关系 $\lambda = \alpha \rho c_p$ 求得材料的热导率。其中, λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; α 为热扩散率, m^2/s ; ρ 为密度, g/cm^3 ; c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

测定分形维数的常见方法主要分为两类,即改变尺度求维数和改变规模求维数^[5]。通常在改变尺度求维数的方法中是指改变测量的尺度,总测量规模不变;改变规模求维数是指测量的尺度是一个固定值,一般选取最小尺度,而测量的规模是变化的。本文作者采用分别属于 2 种分形原理的计盒维数法和质量维数法对试样的显微组织进行分析,其基本原理如下:

盒维数法是改变尺度求维数的分形原理中使用最广泛的一种方法,分析时,主要是用边长为 r 的正方形网格分割分形图像。实验测量一个分形的计盒分维,是用具有特征长度 ε 的基本图形(正方形)去度量分形图形^[6]。通过改变特征长度(即码尺) ε ,就可以获得一组 ε_i 所对应的 $N_i(\varepsilon_i)$ 。盒子维数 D 可按式计算:

$$\lg N_i(\varepsilon_i) = A - D \lg \varepsilon \quad (1)$$

式中: A 为常数。盒子维数 D 可通过对 $(\lg \varepsilon, \lg N_i(\varepsilon_i))$ 进行线性回归得出,拟合直线斜率的负数即为盒子维数。

质量维数法亦称集结维数法,是属于改变规模求维数中的一种。质量维数的定义式如下^[5]:

$$N(R) = K \left(\frac{R}{R_0} \right)^D \quad (2)$$

式中: D 是集结维数; R_0 为某一固定的测量尺度;选

取适当的原点,如集结的中心点; R 为半径,代表规模的变化; K 为比例常数; $N(R)$ 为半径 R 内所测量的总个数,或总质量。因为以同一尺度测量,每一部分的质量是相同的,所以 $N(R)$ 可以解释为质量, D 也称为质量维数。由于 R_0 是固定的,则 $N(R) = ZR^D$ 。不同的半径对应有不同的 $N(R)$,于是可求维数。

2 结果与讨论

用于图像分析的原始图像一般都是灰度图像,其特征提取主要是根据其灰度分布情况来判断。通过分析软件,把具有多灰度级的图像转换成二灰度级图像(即黑白图)^[7],即所有的像素分别置为黑(像素值为 0)和白(像素值为 1)。对图像进行了特征提取后,然后进行图像分析。将两种不同尺寸 Si 相(45 μm 、75 μm)的 70%Si-Al 合金的金相组织图进行特征提取,结果如图 1 所示。

分别采用计盒维数法和质量维数法对图 1(c)和(d)进行数据采集,由线性回归得到拟合曲线,结果如图 2 和 3 所示,计盒维数法采用 30 种不同的尺寸进行统计计算,质量维数法采用 100 种不同的规模进行分析。结果表明,无论用哪种方法,均可得到一条线性相关性很好的直线。这说明 Si-Al 合金组织具有明显的分形特征,用分形维数值定量表征 Si-Al 合金的微观组织形貌是可行的。

分形维数的变化是材料内禀特性变化的表现,也反映了材料显微组织结构变化的特征。通过分维数的研究可以从一个新角度了解微观组织与性能的关系。根据测量,70%Si-Al 合金的分形维数和热物理性能对应关系如表 1 所示,可以得出,2 种方法测量结果都表明 Si 相尺寸为 45 μm 的合金分维数比 Si 相尺寸为 75 μm 的合金分维数要大。

由表 1 可以得出,2 组试样的分形维数大小符合传统的材料学理论^[8]。Si 相尺寸越小,相与相之间的界面面积增加越多,相界面的弯曲程度越大,因此,分形维数相应地增加。针对 Si-Al 合金中 Si 与 Al 两相间不发生反应,界面清晰简单的特征,利用分形维数分析显微组织,实际是分析 Si 相和 Al 相间的界面性质,即界面的数量、分布、弯曲度、复杂度等。

大量研究表明^[9-10],界面是影响多相合金材料热导率最重要的一个微观因素。由图 1 中不同 Si 相的显微组织的特征提取图可知,当 Si 相的平均尺寸只有 45 μm 时, Si 相和 Al 的接触界面较弯曲,使得相界面之间的接触面积增大,界面热阻增加。当 Si 相的平均

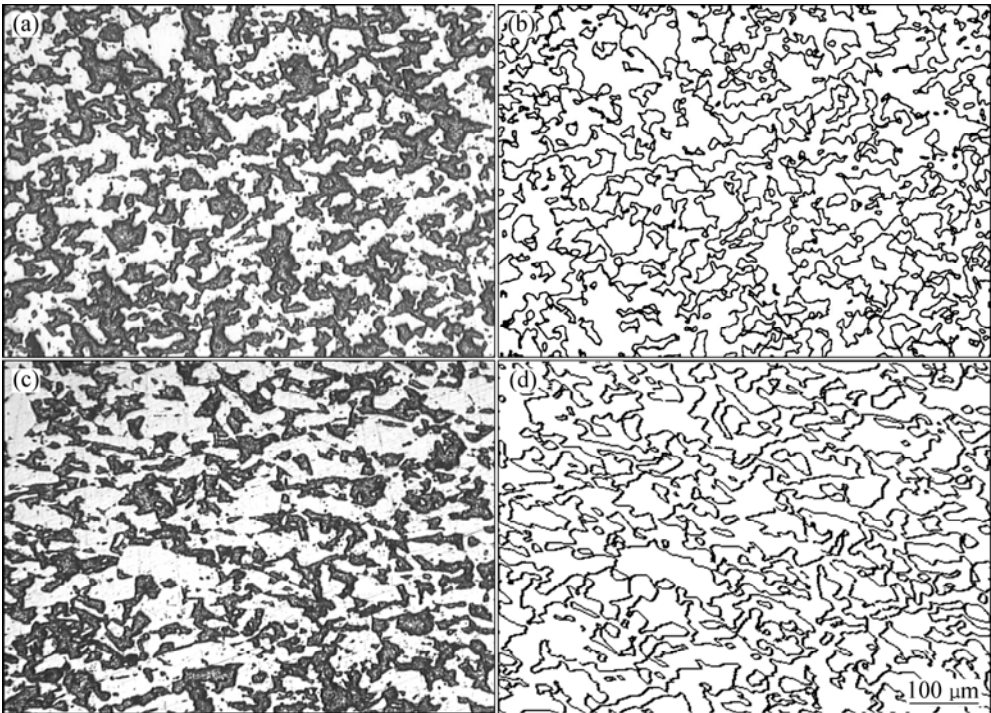


图 1 70%Si-Al 合金的金相显微组织及其特征提取图

Fig.1 Microstructures ((a), (c)) and feature extraction graphs ((b), (d)) of 70%Si-Al alloy: (a), (b) Average size of Si phase of 45 μm ; (c), (d) Average size of Si phase of 75 μm

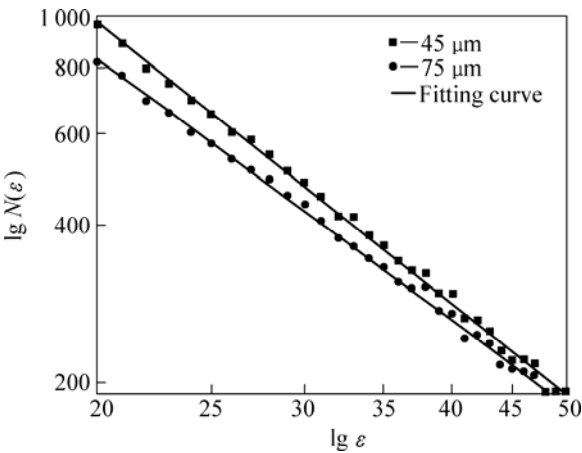


图 2 计盒维数法分析 70%Si-Al 合金的线性回归曲线

Fig.2 Linear regression curves of 70%Si-Al alloy calculated by box counting dimension

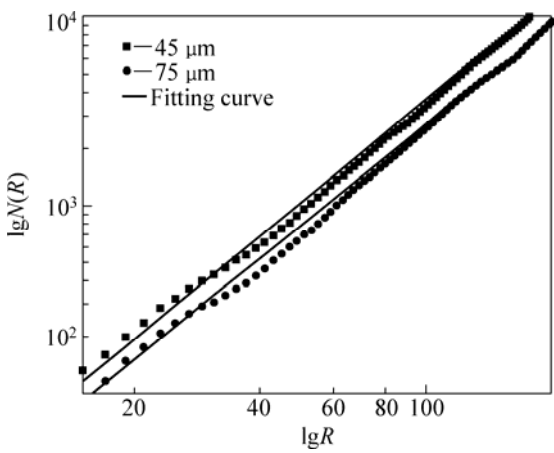


图 3 质量维数法分析 70%Si-Al 合金的线性回归曲线

Fig.3 Linear regression curves of 70%Si-Al alloy calculated by mass dimension

表 1 70%Si-Al 合金的分形计算结果和热导率、热膨胀系数之间的关系

Size of Si phase/ μm	Relative density/%	Box-counting dimension	Mass fractal dimension	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	α/K^{-1}	
					100 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$
45	98.3	1.78	1.83	115	5.7×10^{-6}	8.1×10^{-6}
75	99.5	1.68	1.79	120	5.5×10^{-6}	6.9×10^{-6}

尺寸增加到 75 μm 时, Si 相与 Al 相之间的界面更加平整, 随着相尺寸的增加, 合金单位体积中相与相之间的界面面积减少, 界面热阻的影响降低, 使得合金的热导率提高^[11-12]。此外, 合金中相界面之间热阻的产生形式还包括了相界面的缺陷、相界面的厚度、相界面新相种类等其它影响因素, 这些因素也会影响合金的导热性能^[13-14]。

当 Si-Al 合金中 Si 含量达到 70% 时, Si 相已经形成了连续网络状的骨架结构, Al 相分布在 Si 相基体之间。随着温度的升高, 热膨胀性能较差的 Si 相将抑制 Al 相的膨胀。在加热温度较低时, 热膨胀率主要由合金中各相含量和合金中各个相独自的热膨胀性质所决定。由表 1 可见: 100 $^{\circ}\text{C}$ 时, Si 相尺寸不同的两种试样的热膨胀系数相差不大。随着加热温度的升高, 两者的热膨胀系数之差增大, 此时, 合金中的热膨胀系数变化还受基体相-Si 相的骨架结合程度的影响, 以及受 Si 相与 Al 相界面结合时满足 Al 相进行更大的膨胀的孔隙大小的影响。当 Si 相尺寸较细小时, Si 相容易互相搭接形成 Al 相难以填充的显微间隙, 以及 Si 相与 Al 相界面的孔隙, 从而使合金的热膨胀系数随温度的升高而增长幅度较大。当 Si 相尺寸较大时, 界面孔隙的数量明显减少。这种受 Si 相与 Al 相结合界面特征影响的热导率和热膨胀系数等性能, 恰好与 Si-Al 合金中 Si 相与 Al 相界面显微组织的分形维数值对应, 从而将微观组织结构特征与宏观性能表征之间建立起初步的数学模型关系, 值得进一步的研究。

3 结论

1) 70%Si-Al 合金的显微组织具有较好的自相似性, 使用分形维数能够直观地表示出 70%Si-Al 合金中两相间的界面性质, 而界面性质是影响 70%Si-Al 合金热物理性能的最主要因素之一, 用分形维数描述其热性能与显微组织之间关系的方法是可行的。

2) 用计盒维数法和质量维数法 2 种不同方法测量, 得到的分形维数值不同, 但反映的规律相同, Si 相尺寸为 75 μm 的合金比 Si 相尺寸为 45 μm 的合金计算获得的分形维数要小, 随温度的升高, 这种分形维数较小的合金热导率增加, 热膨胀系数增加的幅度却减小, 使用分形分析的方法, 对 70%Si-Al 合金热物理性能的研究具有重要的指导作用。

REFERENCES

[1] 张济山. 新型喷射成形轻质、高导热、低膨胀 Si-Al 电子封装

材料[J]. 材料导报, 2002, 16 (9): 1-4.

ZHANG Ji-shan. New spray formed light weighted Si-Al electronic packaging materials with low thermal expansion and high heat conducting[J]. Materials Review, 2002, 16(9): 1-4.

[2] 徐高磊, 李明茂. 新型高硅铝合金电子封装复合材料的研究进展[J]. 铝加工, 2007, 178: 10-13.

XU Gao-lei, LI Ming-mao. Research status of novel high silicon aluminum alloy for electronic packaging material[J]. Aluminium Fabrication, 2007, 178: 10-13.

[3] 王敬欣, 张永安. 应用于电子封装的新型硅铝合金的研究与开发[J]. 材料导报, 2001, 15(6): 18-20.

WANG Jing-xin, ZHANG Yong-an. Research and development of novel aluminium-silicon alloys for electronics packaging[J]. Materials Review, 2001, 15(6): 18-20.

[4] 王 鲁, 程兴旺, 王富耻, 李树奎. 钨合金微观组织分形特征研究[J]. 中国体视学与图像分析, 2001, 6(3): 149-156.

WANG Lu, CHENG Xing-wang, WANG Fu-chi, LI Shu-kui. Fractal characteristics of tungsten alloy microstructure[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2001, 6(3): 149-156.

[5] 叶 俊, 陈秉钊. 分形理论在城市研究中的应用[J]. 城市规划汇刊, 2001, (4): 38-42.

YE Jun, CHEN Bing-zhao. Applications of fractal theory to urban studies[J]. Urban Planning Forum, 2001, (4): 38-42.

[6] 褚武扬. 材料科学中的分形[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 33-45.

ZHE Wu-yang. Fractals in materials science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 33-45.

[7] 张 青, 李 萍, 薛克敏. 热变形 Ti-15-3 合金再结晶晶粒的分形分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1149-1154.

ZHANG Qing, LI Ping, XUE Ke-min. Fractal analysis of recrystallized grains of Ti-15-3 alloy after hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1149-1154.

[8] 周 捷, 王印培, 柳曾典, 陈 进, 孙晓明. 分形金相的初步探讨—关于晶粒度的分形特征[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(2): 188-190.

ZHOU Jie, WANG Yin-pei, LIU Ceng-dian, CHEN Jin, SUN Xiao-ming. Preliminary Investigation on fractal metallographs—Investigation on the fractal characters of grain size[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2000, 26(2): 188-190.

[9] NAN Ce-wen, LI Xiao-ping, BIRINGER R. Inverse problem for composites with imperfect interface. Determination of interfacial thermal resistance, thermal conductivity of constituents, and microstructural parameters[J]. Am Ceram Soc, 2000, 83: 848-854.

[10] MOLINA J M, NARCISO J, WEBER L, MORTENSEN A, LOUIS E. Thermal conductivity of Al-SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution[J]. Mater Sci

- Eng A, 2008, 58: 393–399.
- [11] CHU Ke, JIA Cheng-chang, LIANG Xue-bing, CHEN Hui, GUO Hong. The thermal conductivity of pressure infiltrated SiC_p/Al composites with various size distributions: Experimental study and modeling[J]. Materials and Design, 2009, 30(9): 1–7.
- [12] HASSELMAN D P H, KIMBERLY Y, DONALDSON, ALAN L G. Effect of reinforcement particle size on the thermal conductivity of particulate silicon carbide-reinforced Al matrix composite[J]. Am Ceram, 1992, 75(11): 3137–3140.
- [13] 于家康, 梁建芳, 王 涛. 高导热金属基复合材料的热物理性能[J]. 功能材料, 2004, 35: 1668–1671.
- YU Jia-kang, LIANG Jian-fang, WANG Tao. Thermophysical properties of metal matrix composites with high thermal conductivity[J]. Journal of Functional Materials Contents, 2004, 35: 1668–1671.
- [14] HUBER T, DEGISCHER H P, LEFRANC G, SCHMITT T. Thermal expansion studies on aluminium-matrix composites with different reinforcement architecture of SiC particles[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 2206–2217.
- (编辑 龙怀中)