

半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形特征

刘 政^{1,2}, 于锋波²

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000;

2. 江西理工大学 江西省有色金属加工技术工程研究中心, 赣州 341000)

摘 要: 利用低过热度浇注技术制备半固态A356铝合金浆料, 应用Matlab编制计算软件以及图像计盒分形维数的计算方法, 研究半固态A356铝合金初生相形貌的分形特征。结果表明: 所制备的半固态A356铝合金初生相形貌属于一种分形结构; 不同工艺条件制备的初生相形貌有不同的分形维数, 分形维数大的初生相, 其形貌复杂; 分形维数小的初生相, 其形貌趋于简单; 半固态A356合金的凝固过程是一个分形维数变化的过程。

关键词: A356铝合金; 半固态; 分形特征; 初生相

中图分类号: TP 317; O 186 **文献标识码:** A

Fractal characteristics of morphology of primary phase in semi-solid A356 Al alloy

LIU Zheng^{1,2}, YU Feng-bo²

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou 341000, China;

2. Jiangxi Nonferrous Metal Processing Engineering Research Center, Jiangxi University of
Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Semi-solid A356 alloy slurry was prepared by low superheat pouring technology, and the fractal characteristics of morphology of primary phase in the alloy was researched by calculating program and computing method for box-counting dimension of images written with Matlab. The results indicate that the morphology of primary phase in semi-solid A356 alloy prepared belongs to fractal structure, and there are different fractal dimensions for the morphologies of primary phases prepared by different technologies, and the primary phase with a big fractal dimension has complicated morphology, and the primary phase with a small fractal dimension has simple morphology. The solidification of semi-solid A356 alloy is a process of fractal dimension change.

Key words: A356 Al alloy; semi-solid; fractal characteristics; primary phase

半固态加工作为一种新型的成形技术, 已成为当今最活跃的研究领域之一。已有研究表明获得成形性能优良的半固态组织特征之一就是要有一定数量的非枝晶初生相^[1]。为此, 人们对如何获得半固态非枝晶初生相进行了深入的研究, 但是, 半固态组织的形貌组织大都是不规则的、非光滑的复杂几何体, 无法或很难用欧氏几何的方法来描述。

分形理论以自然界中的非线性过程为研究对象, 是探索无规律现象的内部所隐含的某种规律和物理机制的有力工具^[2]。20世纪90年代初, 有人用分形理论证明了定向凝固的固-液界面结构属于分形结构, 可以用分形方法来定量描述^[3]。已有研究结果^[4]表明, 珠光体球化金相组织具有分形特征, 可以用分形维数来进行定量描述。CuAu合金晶粒的边界可用分形表示,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374012); 江西省自然科学基金资助项目(0650047)

收稿日期: 2008-05-12; **修订日期:** 2008-10-22

通讯作者: 刘 政, 教授, 博士; 电话: 0797-8312428; 传真: 0797-8312059; E-mail: liukk66@163.com

但分形维数随着晶粒尺寸的变化而变化^[5]。对于热变形 Ti 合金的再结晶组织可用分形维数表征其不规则程度^[6]。在金属冶炼和电化沉积中也获得应用^[7-8]。近年来, 分形理论逐步应用到半固态加工中。QIN 等^[9]最近将分形维数(D)引入到固体颗粒组织的量化, 完全球化的颗粒的分形维数为 3。FAN 等^[10]采用微观结构模型, 按 Sn-15%Pb 的持续冷却实验结果来估计 D 值。Al-4Cu-Mg 合金在半固态条件下, 其晶粒的分形维数强烈地依赖于加工条件(如变形温度、变形程度和应变速率等)^[11]。在镁合金的半固态加工中, 固相颗粒的分形描述可作为研究该合金工艺—组织—性能之间关系的一个理想定量分析参数^[12]。这些研究表明, 实际的合金凝固组织具有分形特征, 为人们用分形表征合金凝固组织的形貌提供了理论依据, 应用分形理论来描述和分析合金中凝固组织的形貌变化规律甚至各种组成相的形成机理是完全可能的。为此, 本文作者以低过热度浇注^[13-14]制备的半固态 A356 铝合金初生相为例, 应用 Matlab 所编制的计算软件以及图像计盒分形维数的计算方法, 研究半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形特征以及半固态初生相形貌演化的规律。

1 分形维数及图像计盒维数的计算方法

分形维数又称 Hausdorff 维数, 是分形几何中的重要特征量之一, 它不同于经典几何学中整数型的欧几里德维数, 而能够表征自然界中所获取的图像的某些特性, 是描述分形体复杂结构的主要工具。目前, 有许多分形维数的定义和计算方法^[15]。在被使用的多种多样的“分形维数”中, Hausdorff 维数是最古老的一种, 它具有相对任何集都有定义的优点, 但主要缺点是往往难以计算。因此, 许多等价的或近似的维数定义被提出来, 其中应用最广的是计盒维数, 它是由相同形状集的覆盖确定的, 所以, 容易计算或估计。因此, 在实际应用中, 通常所说的分形维数都是指计盒维数。计盒维数 D_B 有一系列等价的定义, 常用近似计算计盒维数为^[2, 16]

$$D_B = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\ln N_{\delta_k}(F)}{-\ln \delta_k} \quad (1)$$

式中 F 是 \mathbf{R}^n 中的一个非空有界集合; δ_k 为立方体网格边长, 通常 k 取 1, 2, 4, 8, ..., 2^j ; $N_{\delta}(F)$ 为与 F 相交的个数。

图形图像包括研究对象的众多物理信息, 是计算分形维数的载体。经过信息处理, 图形图像可以转化

为数字图像, 最终得到由一系列二进制数字(0 和 1)表示的二维矩阵(二值图), 然后可对二值图进行分析求数字图像的计盒维数。在对二值图进行计盒维数计算时, 考虑到已经储存在计算机内的图像是由大小为 δ 的点(像素点)组成的, 该方法又称为像素点覆盖法。

像素点覆盖法求计盒维数的具体步骤如下。

1) 将图像进行二值化处理, 使图像中每个像素点为黑或白 2 种颜色, 获得一个数据文件, 其行列数分别对应二值图的行列数。对处理后的二值图像可视为一个矩阵, 矩阵中每个元素对应 1 个像素值。

2) 将获得的数据文件即矩阵依次划分成若干子矩阵, 使每个子矩阵的行数和列数均为 k , 把所有非 0 的子矩阵个数记作 N_k , 通常 k 取 1, 2, 4, 8, ..., 2^j , 即以 1, 2, ..., 2^j 个像素点的尺寸为边长作块划分, 从而获得盒子数 $N_1, N_2, N_4, \dots, N_k$ 。因为像素点的尺寸是图像的长度 L 与图像的一行中像素点的个数的商, 所以, 行和列都由 k 个像素点构成的块的边长为 δ_k , 具体计算时可直接用 k 值代替。

3) 在双对数坐标平面内, 以最小二乘法用直线拟合数据点($\lg \delta_k, \lg N_k$), 所获得直线的斜率的负值(D)就是该图像的物理计盒维数。

2 半固态 A356 铝合金初生相的形貌分形维数的计算

利用低过热度浇注技术制备半固态 A356 铝合金浆料, 液态合金浇注温度分别为 630 °C 和 615 °C。为了研究不同制备条件对半固态 A356 铝合金的初生相形貌的影响, 当液态合金浇注到铸型中后, 在固-液相区不同温度下进行不同时间的等温保温。温度为 615 °C 至 595 °C, 等温保温时间为 1 min 至 40 min。等温保温结束后, 将铸锭淬入水中。从铸锭上取样制成金相试样, 用 ZEISS Axioskop2 光学显微镜观察试样的金相组织, 并拍摄其初生相形貌的金相照片。

采用本文作者提供的方法, 对不同的制备条件下获得的半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数进行计算, 研究其分形维数与工艺条件的关系。

2.1 保温温度对半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数的影响

图 1 所示是在 630 °C 浇注并在不同温度等温保温 1 min 所获得的凝固组织。将结果进行图像处理, 利用所编制的计盒维数算法对其初生相形貌的分形维数进行计算, 结果如图 2 所示。在不同温度等温保温 1 min 所获得的初生相形貌的分形维数, 见表 1 所列。

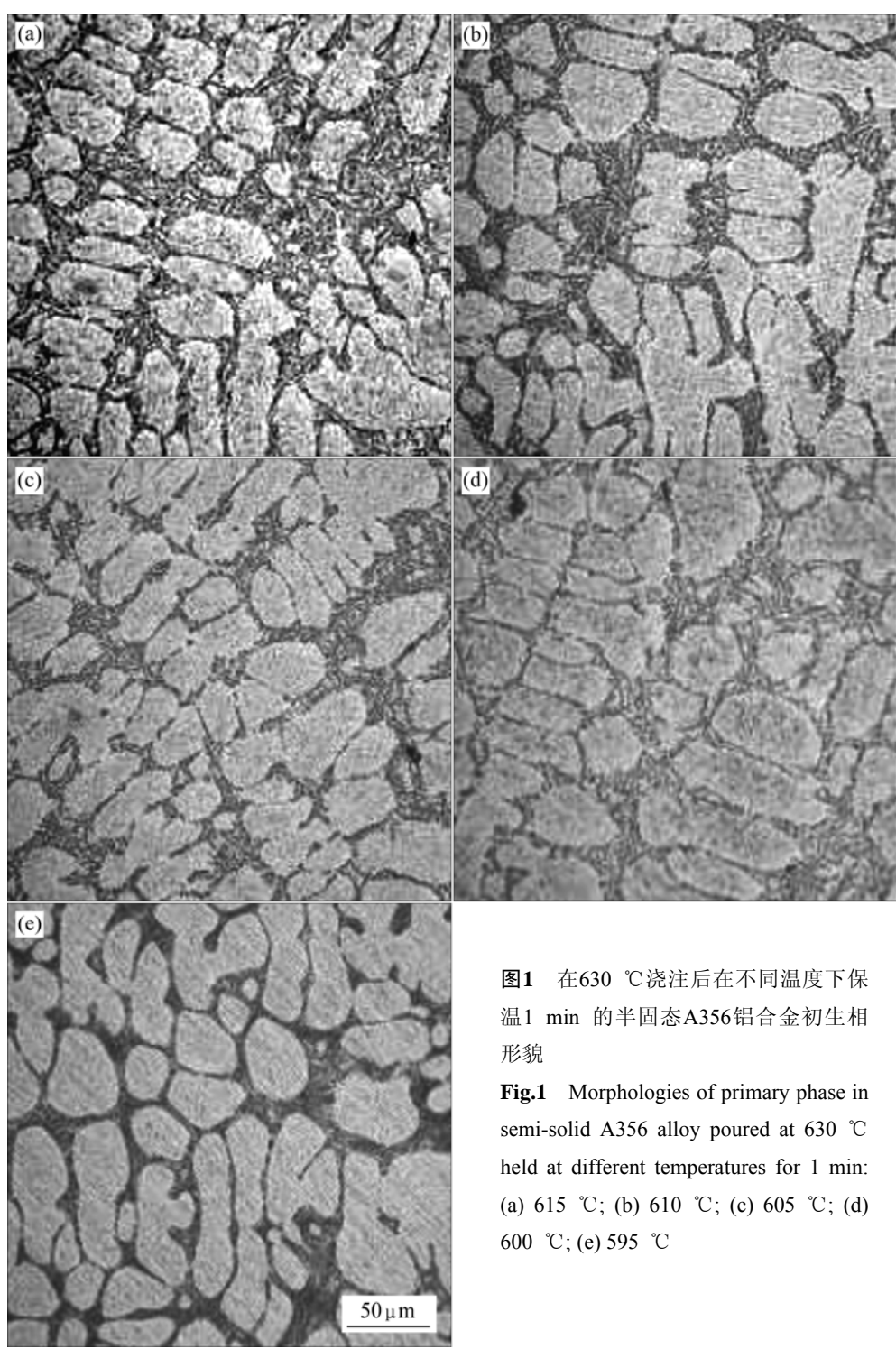


图1 在630 °C浇注后在不同温度下保温1 min 的半固态A356铝合金初生相形貌

Fig.1 Morphologies of primary phase in semi-solid A356 alloy poured at 630 °C held at different temperatures for 1 min: (a) 615 °C; (b) 610 °C; (c) 605 °C; (d) 600 °C; (e) 595 °C

表 1 在 630 °C浇注后在不同温度下保温 1 min 的半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数

Table 1 Fractal dimensions of morphologies of primary phases in semi-solid A356 alloy poured at 630 °C and then held for 1 min at different held temperatures

| Held temperature/°C | 615 | 610 | 605 | 600 | 595 |
|---------------------|-------|---------|-------|---------|---------|
| Fractal dimension | 1.674 | 1.635 2 | 1.617 | 1.608 2 | 1.607 1 |

从计算结果可以看出,在615~595 °C保温1 min后所得的半固态初生相形貌的分形维数(D)均大于1,并且随着保温温度的降低,分形维数逐渐减小。由于分形维数的大小在某种程度上反映曲线或面的复杂程度,从而在半固态凝固组织中就反映初生相形貌的复杂程度或初生相晶粒的圆弧度。分形维数越小表明半固态初生相形貌越简单。分形维数计算的结果与所获得的半

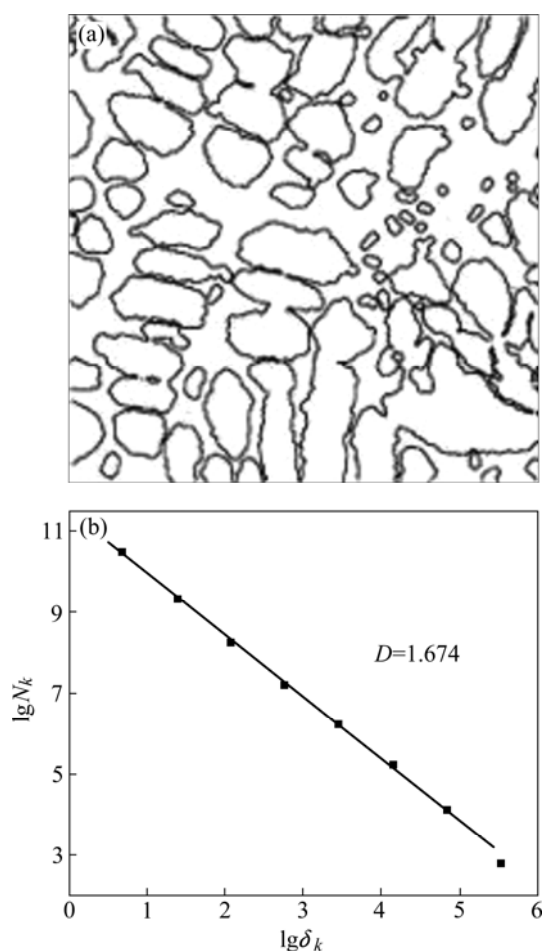


图2 在630 ℃浇注后615 ℃保温1 min的半固态A356铝合金初生相形貌的分形维数

Fig.2 Fractal dimension of morphology of primary phase in semi-solid A356 alloy poured at 630 ℃ and then held at 615 ℃ for 1 min: (a) Boundary graph processed; (b) Bilogarithmic graph

固态A356铝合金初生相形貌的观察结果是一致的。

从所获得的半固态初生相来看,当等温温度较高时(如 610~615 ℃),所获的初生相比较粗大,其形貌呈现树枝状晶的痕迹,如图 1(a)和(b)所示;当等温温度逐步降低时,半固态 A356 铝合金初生相的枝晶臂逐渐产生颈缩、熔断,其形貌向蔷薇状转变,但大小还不均匀;当等温温度进一步降低时,初生相的形貌向颗粒状或球状转变,并形成部分较小的初生相颗粒,如图 1(c)和(d)所示;当等温温度达到 595 ℃时,半固态 A356 铝合金初生相的形貌逐步呈现为颗粒状和球状,如图 1(e)所示。

形核率是影响晶粒形成的一个重要因素,而形核率受两方面因素的控制,一方面,随着过冷度的增加,临界晶核半径和形核功都随之减小,形核率增加;另

一方面,无论是晶核的形成还是晶核的长大,都必须伴随着液态原子向固态原子集团(晶核)扩散迁移。没有液态原子的扩散迁移,晶核的形成、长大就不能进行。但是增加液态金属的过冷度必定会降低原子的扩散能力,导致形核、长大过程难以进行,有效晶核数目减少,即形核率降低^[17]。实验中所使用的 A356 铝合金的液相线温度约为 615 ℃。当液态合金在 615 和 610 ℃保温时,过冷度小,虽然非自发形核所需过冷度很小,但是在此温度下保温,一方面液态合金中形成的晶核数量较少,另一方面,由于保温温度较高,原子扩散较快,晶核生长速度也较快,易生长成树枝状晶。随着等温温度的降低,熔体中的过冷度逐步增大,晶核数量逐渐增加,初生相的形貌也发生变化,呈现出由枝晶状向蔷薇状转变的趋势。在较低的等温温度(如 600~595 ℃)时,熔体处于明显的过冷状态,易产生较多的晶核;另外,由于选择结晶的原因,初生相在结晶时析出的溶质富集在凝固前沿,造成初生的枝晶根部发生颈缩、熔断,在等温保温过程中还会形成一部分晶核,产生“晶粒倍增”现象。由于过冷度大、形核率高,单个晶粒的长大空间小,易形成细小的颗粒状初生相。

2.2 保温时间对半固态A356铝合金初生相形貌的分形维数的影响

图3所示是在615 ℃浇注后在605 ℃等温保温不同时间所获得的半固态 A356 铝合金初生相形貌。对图3的结果进行分形维数计算,结果如图4和表2所示。随着等温保温时间的延长,初生相逐渐由枝晶到条状晶再到比较圆整的粒状晶所对应的初生相形貌的分形维数也从 1.570 2 减小到 1.506 8,也说明初生相形貌变好,边界变得比较光滑。可见随着等温保温时间的延长,半固态 A356 铝合金初生相的形貌由树枝状变到颗粒状,分形维数也由大变小。

表2 保温不同时间得到的半固态A356铝合金初生相形貌的分形维数

Table 2 Fractal dimensions of morphologies of primary phases in semi-solid A356 alloy held for different times (poured at 615 ℃, held at 605 ℃)

| Held time/min | 20 | 30 | 40 |
|-------------------|---------|---------|---------|
| Fractal dimension | 1.570 2 | 1.556 0 | 1.506 8 |

从表2可以看出:等温保温不同时间所得的初生相形貌的分形维数不同,且半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数(D)均大于1,并随着等温保温时间

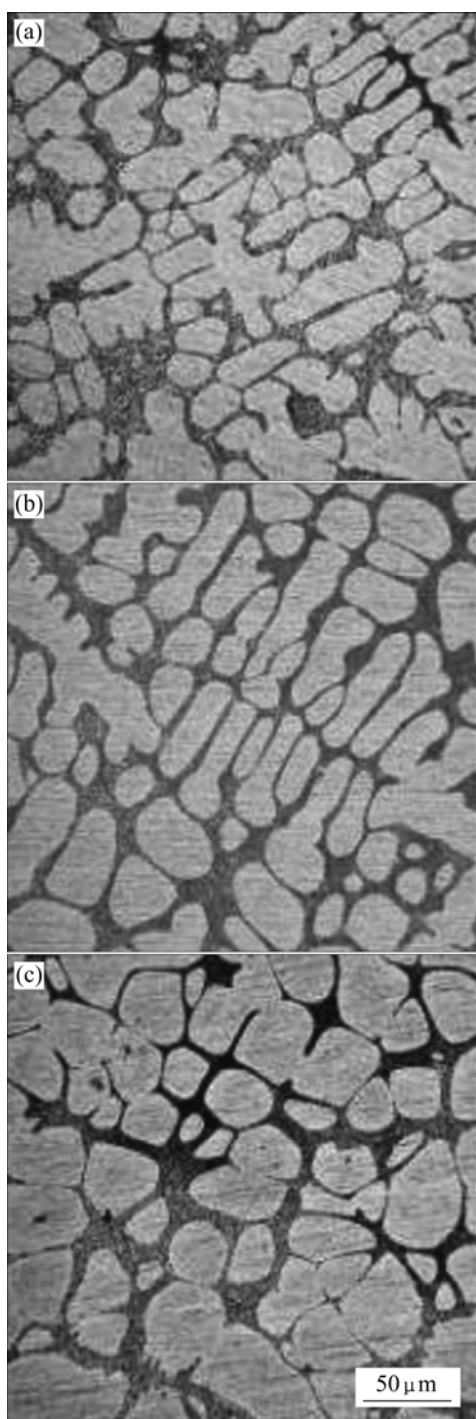


图3 在615 ℃浇注再在605 ℃保温不同时间得到的半固态A356铝合金初生相形貌

Fig.3 Morphologies of primary phases in semi-solid A356 alloy poured at 615 ℃ and then held at 605 ℃ for different times: (a) 20 min; (b) 30 min; (c) 40 min

的延长初生相形貌的分形维数减小。

将半固态 A356 合金保温不同时间可获得不同的初生相形貌,说明初生相的形貌演变与保温时间有关。将半固态 A356 合金在 605 ℃保温时,熔体处于过冷

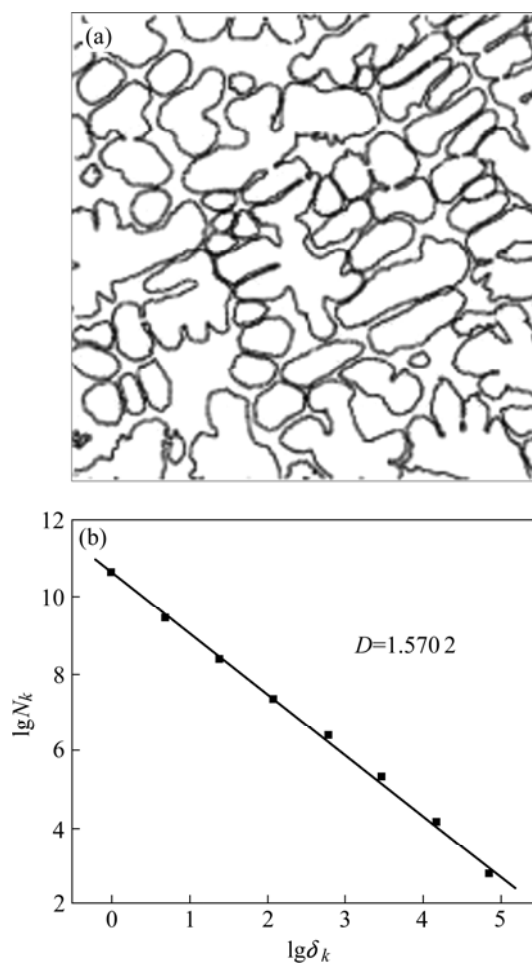


图4 在615 ℃下浇注再在605 ℃保温得到的A356铝合金初生相的形貌和分形维数

Fig.4 Fractal dimensions of morphologies of primary phases in A356 alloy poured at 615 ℃ and then held at 605 ℃: (a) Boundary graph processed; (b) Bilogarithmic graph

状态,在保温过程中可形成较多的晶核,有利于产生细小的初生相晶粒。若保温时间较短,初生相不能够完成正常的熟化过程,其形貌仍呈现长条状及蔷薇状。随保温时间的延长,由于原子扩散及能量起伏等原因,合金会发生成分均匀化,初生相在等温过程中进行熟化^[18],导致枝晶分枝特征消失,形成蔷薇状晶。同时,与液相接触的蔷薇状晶的凹凸边界存在着曲率上的差异。由曲率与熔点的影响关系可知,小曲率半径晶体的熔点要低于大曲率半径晶体的熔点。凹谷部位的曲率半径小、熔点低而首先熔化,继而使该凹谷部位曲率进一步增大,从而越熔越细,并最终熔断变成小颗粒组织。此外,在 Ostwald 熟化机制的作用下,蔷薇状晶的凸起部位将不断长大,最终使得大晶粒变大而小晶体逐渐被熔化消失,凹凸部位逐渐抹平,形成近似球状的组织^[19]。延长保温时间使得初生相进一步熟

化, 圆形度更好。此外, 由于熔体中的晶粒在热运动过程中不断发生互相碰撞, 位向合适的晶粒还会融合在一起, 长大成粗大的晶粒。从能量角度来看, 熔体中生成大量细小的晶核后, 表面能较大, 系统处于亚稳状态, 晶粒的合并长大有利于系统能量的降低。保温过程使温度场均匀, 也使宏观溶质场均匀, 消除或大幅度减轻成分过冷, 减小初生相生长时的过冷度, 结果使得初生相的长大失去方向优先性^[20]; 同时, 在 Ostwald 熟化机制的作用下, 最终形成球状或颗粒状的初生相。

3 讨论

从表1和表2可见, 在不同制备条件下获得的半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数(D)均大于其拓扑维数 $D_T(D_T=1)$; 根据Mandelbrot给出的分形定义^[20], 这表明在低过热度下浇注并在不同等温处理制度下所获得的半固态 A356 铝合金初生相形貌属于分形结构。从分形维数的计算结果可知, 数据均符合分形理论的幂率关系, 绝大部分点分布在线性相关性较好的直线附近。图2(b)和图4(b)中 $\lg N_k$ 与 $\lg \delta_k$ 之间的线性关系也进一步说明半固态 A356 铝合金初生相形貌具有分形特征。这表明 A356 合金经低过热度浇注并经不同等温处理制度的初生相形貌确实具有分形特征, 可以采用分形维数这一特征参数来描述其初生相形貌。

分形结构是复杂系统演化后的产物, 随机性、耗散性和非线性是产生分形结构的物理机制。在半固态 A356 铝合金初生相形貌的演变过程中, 其影响因素很多也很复杂, 本质上是非线性的, 而非线性的物理本质是耗散性, 耗散性又是随机性的后果, 因此, 半固态 A356 铝合金初生相形貌的演变具有分形性质。

通过对不同制备条件下获得的半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数分析发现, 随着制备条件如浇注温度、等温温度和等温保温时间等的改变, 半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数发生明显的变化, 这表明半固态 A356 合金的凝固过程是一个分形维数变化的过程。

4 结论

1) 采用低过热度浇注并经不同等温制度处理的半固态 A356 铝合金初生相形貌属于分形结构, 可以采用分形维数这一特征参数来描述其初生相形貌。

2) 半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数的计算结果表明, 在不同工艺条件下获得的初生相形貌有不同的分形维数; 分形维数大的初生相, 其形貌复杂; 分形维数小初生相, 其形貌趋于简单。

3) 在半固态 A356 铝合金浆料的制备过程中, 随着制备条件的改变, 半固态 A356 铝合金初生相形貌的分形维数发生明显的变化, 这表明半固态 A356 合金的凝固过程是一个分形维数变化的过程。

REFERENCES

- [1] FAN Z. Semisolid metal processing[J]. Int Mater Rev, 2002, 47(2): 49–85.
- [2] 张济忠. 分形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
ZHANG Ji-zhong. Fractals[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [3] SUN Li-ling, DONG Lian-ke, ZHANG Jing-hua, HU Zhuang-qi. Application of fractal theory on the study of solid-liquid interface morphology[J]. J Mater Sci Letters, 1997, 16: 505–507.
- [4] 周 捷, 王印培. 分形金相的初步探讨[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(2): 188–191.
ZHOU Jie, WANG Yin-pei. Preliminary investigation on fractal metallographs[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2000, 26(2): 188–191.
- [5] HISATSUNE K, TAKUMA Y, TANAKA Y, UDOH K, KAWASAKI K. Fractal dimension of grain boundary in CuAu alloys refined by platinum addition[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 4783–4785.
- [6] 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.
- [7] 鄂加强, 梅 焱, 刘春洋, 张卫华. 炼铜转炉粗铜成分时间序列的混沌分形[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(2): 931–935.
E Jia-qiang, MEI Chi, LIU Chun-yang, ZHANG Wei-hua. Chaos and fractal of crude copper composition time series from copper convertor[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(2): 931–935.
- [8] 杨兵初, 罗成林. 霍尔效应对磁场作用下电化学分形沉积物形貌的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(4): 884–887.
YANG Bin-chu, LUO Cheng-lin. Influence of hall effect on fractal morphology of electrode posits under magnetic field[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(4): 884–887.
- [9] QIN R S, FAN Z. Theoretical study on the morphology

- dependence of viscosity of semisolid slurries by fractal theory [J]. *Mater Sci Tech*, 2001, 17: 1149–1152.
- [10] FAN Z, CHEN J Y. Modeling of rheological behaviour of semisolid metal slurry part4—Effect of particle morphology [J]. *Mater Sci Tech*, 2002, 18(3): 258–267.
- [11] 黄维超, 卢雅琳, 江海涛. 变形条件对半固态Al-4Cu-Mg合金微观组织的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(5): 833–836.
- HUANG Wei-chao, LU Ya-lin, JIANG Hai-tao. Effect of the process parameters on microstructure of the semisolid Al-4Cu-Mg alloy in the isothermal compression process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(5): 833–836.
- [12] 崔晓鹏, 刘勇兵, 曹占义. 半固态触变注射成形镁合金显微组织的评定[J]. *铸造*, 2006, 55(6): 593–596.
- CUI Xiao-peng, LIU Yong-bing, CAO Zhan-yi. The microstructure evaluation of thixomolding magnesium alloy[J]. *Foundry*, 2006, 55(6): 593–596.
- [13] LIU Dan, CUI Jian-zhong, XIA Ke-nong. Non-dendritic structural 7075 aluminum alloy by liquidus cast and its semi-solid compression behavior[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(2): 192–195.
- [14] LIU Zheng, MAO Wei-min, ZHAO Zhen-duo. Effect of pouring temperature on semi-solid slurry of A356 Al alloy prepared by weak electromagnetic stirring[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2006, 16(1): 71–76.
- [15] 李水根. 分形[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- LI Shui-gen. *Fractals*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [16] 谢和平, 薛秀谦. 分形应用中的数学基础与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- XIE He-ping, XUE Xiu-qian. *Mathematical base and method in application of fractal*[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [17] KURZ W, FISHER D J. *Fundamentals of solidification*[M]. Switzerland: Trans Tech Publishing House, 1984.
- [18] WANG Shun-cheng, CAO Fu-rong, WEN Jing-lin. Effect of original microstructures on microstructural evolution of A2017 semi-solid alloy billets during reheating[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2005, 15(3): 577–582.
- [19] JIANG Ju-fu, LUO Shou-jing. Reheating microstructure of refined AZ91D magnesium alloy in semi-solid state[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2004, 14(6): 1074–1081.
- [20] MAO Wei-min, CUI Cheng-lin, ZHAO Ai-min. Effect of pouring process on the microstructures of semi-solid AlSi7Mg alloy[J]. *J Mater Sci & Tech*, 2001, 17(6): 515–619.
- [21] MANDELBROT B B. *The fractal geometry nature*[M]. New York: WH Free man, 1982.

(编辑 杨华)