

文章编号: 1004-0609(2004)12-2049-06

转动输送管制浆工艺参数对 A356 合金半固态组织的影响^①

郭洪民¹, 杨湘杰², 胡 斌²

(1. 南昌大学 材料科学与工程学院, 南昌 330047; 2. 南昌大学 机电工程学院, 南昌 330029)

摘 要: 利用开发的低转速输送管控制浇注工艺制备了 A356 合金半固态组织, 从不同浇注温度、不同转动速度下晶核的来源和不同结晶器冷却强度下游离晶演变的 2 个角度, 结合凝固微观组织模拟技术分析非枝晶组织的形成与演变规律。结果表明: 适当的低温浇注和输送管转速可极大地提高有效形核数目, 降低熔体的冷却强度有利于初生相呈球形生长; 晶粒周围溶质扩散层的叠加影响着液/固界面处引起界面失稳的浓度梯度, 进而影响初生相的生长形态。

关键词: 浆料制备; 控制浇注; 非枝晶; 微观组织模拟

中图分类号: TG 146.2; TG 249; TG 292

文献标识码: A

Effects of parameters of slurry-making process with rotating duct on semi-solid microstructure of A356 alloy

GUO Hong-min¹, YANG Xiang-jie², HU Bin²

(1. School of Materials Science and Engineering,
Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering,
Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: Semi-solid slurry of A356 alloy was produced by a controlled pouring process with a rotating duct. Nucleation behavior and morphology evolution of primary phase under different pouring temperatures were investigated. Rotating speeds of the duct and cooling intensity of crucible were studied. The formation of non-dendrite was analyzed through experiments and microstructure simulation technique. The results show that appropriate combination between pouring temperature and rotating speed of duct can significantly improve effective nucleation rate, decreasing the cooling intensity of the melt metal can give rise to a transition of the growth morphology from dendritic to rosette and to spheroid. Results from simulations indicate that the overlapping diffusion fields from adjacent growing crystals can influence the morphology of crystal by influencing the concentration gradients that can cause instabilities at solid/liquid interface.

Key words: slurry preparation; controlled pouring; non-dendrite; microstructure simulation

众所周知, 非枝晶粒状组织在液/固共存条件下保温可发生明显的球化。因此, 在触变成形中, 即使坯料的组织不甚理想, 也可以通过重熔加热阶

段来改善。所以触变成形对坯料的质量要求较低, 只需达到非枝晶状态即可。但在流变成形中, 半固态浆料的质量(固相的形态、尺寸、数量和分布)只

① 基金项目: 南昌大学基础理论基金资助项目(ncuj-14); 江西省教育厅科技基金资助项目; 江西省自然科学基金资助项目(0450050)

收稿日期: 2004-07-06; 修订日期: 2004-09-22

作者简介: 郭洪民(1976-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 郭洪民, 博士研究生; 电话: 0791-8304135, 13576919861; E-mail: hmguo_email@163.com

能在制备阶段控制,所以半固态流变成形的关键技术之一是如何快速获得与触变成形中重熔加热后相近的半固态组织。在工业发达国家,金属半固态成形完全依赖于技术创新和研究成果开发,即原创性研究^[1~5],近年来国内在浆料制备方面也取得了显著成绩^[6~10]。在半固态成形技术中价格始终是一个重要因素,其中半固态金属浆料的价格影响最大。因此应当开发具有自主知识产权的半固态浆料制备技术,其关键是高效、优质和低成本。本文作者介绍了一种新开发的浆料制备工艺,通过实验和微观组织模拟技术对其主要工艺参数进行了研究。

1 实验

1.1 材料

以 ZL102 铸造铝合金和工业纯铝为原料,在 SG2-6-12 型 6.3 千瓦电阻炉内进行合金熔炼,获得 A356 合金,其化学成分(质量分数,%)为: Si 7.0, Mg 0.29, Fe 0.97, Cu 0.95, Al 其余。该实验合金的液相线温度为 614 ℃,固相线温度为 572 ℃。

1.2 设备和原理

采用自行研制开发的低转速输送管制浆工艺进行半固态浆料制备实验。实验设备主要组件包括浇包、低转速输送管、熔体结晶装置、温度在线控制和采集模块。其工艺流程为:精练、扒渣后的 720 ℃高温合金转入浇包,合金液在浇包内自然冷却,其温度由热电偶测量,达到浇注温度 t_p 后进行浇注,合金熔体通过浇包流入输送管,利用低转速、具有合理热交换条件的输送管使低过热合金液流经管壁时产生大量的游离晶核,并保证合金液流经输

送管末端的温度控制在合金液相线 ± 5 ℃,携带大量晶核的熔体流入具有特定热交换条件的结晶器,通过结晶器换热条件的调节,控制熔体的冷却速度,获得具有理想固相率(温度为 t_F)的半固态浆料。

本文作者主要研究浇注温度、输送管转动速度和结晶器冷却强度 3 个主要工艺参数对初生相形态、大小的影响。实验中采用不同的结晶器材质和预热温度实现浆料的不同冷却强度,按照 Shell 定律将水淬温度定位在 600 ℃,对应的固相率约为 35%。利用光学显微镜观察不同工艺条件的金相试样显微组织,用图像分析仪分析半固态浆料的质量,主要指标包括:固相率 f_s 、形状因子 F 和等效面积圆直径 D 。

2 结果和讨论

2.1 不同浇注温度下的合金微观组织

图 1 所示为输送管转速为 232 r/min、预热温度为 470 ℃的石墨坩埚在不同浇注温度下的合金组织,白色为初生相,黑色为共晶相。当浇注温度为 655 ℃时,初生 α 相多呈现粗大的蔷薇状,较少的球状或粒状,如图 1(a) 所示。当浇注温度为 640 ℃时,初生 α -Al 基本上呈现规则的球状或粒状,晶粒明显细化,分布也比较均匀,为理想的半固态组织,如图 1(b) 所示。当浇注温度为 625 ℃时,初生 α 相为粗大枝晶状的组织,如图 1(c) 所示。

2.2 不同输送管转速下的合金微观组织

图 2 所示为浇注温度 640 ℃、室温石墨坩埚、不同输送管转速下的微观组织。转速为 300 r/min

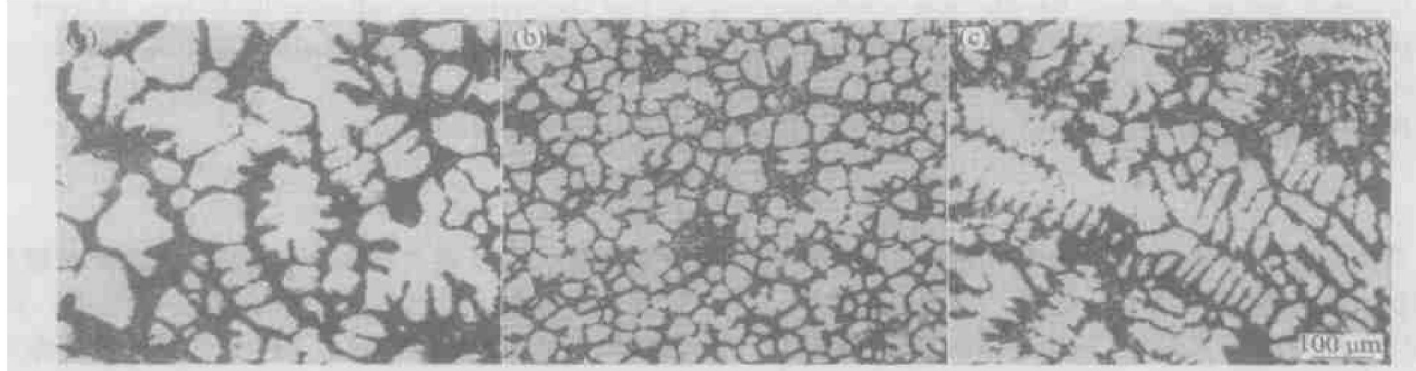


图 1 输送管转速为 232 r/min、预热温度为 470 ℃的石墨坩埚在不同浇注温度下的合金组织

Fig. 1 Microstructures of alloys under rotating rate of 232 r/min,

pre-heating temperature of 470 ℃ and different pouring temperatures

(a) —655 ℃, $F = 1.93$, $D = 151 \mu\text{m}$; (b) —640 ℃: $F = 1.06$, $D = 43 \mu\text{m}$; (c) —625 ℃, $F = 2.31$, $D = 234 \mu\text{m}$

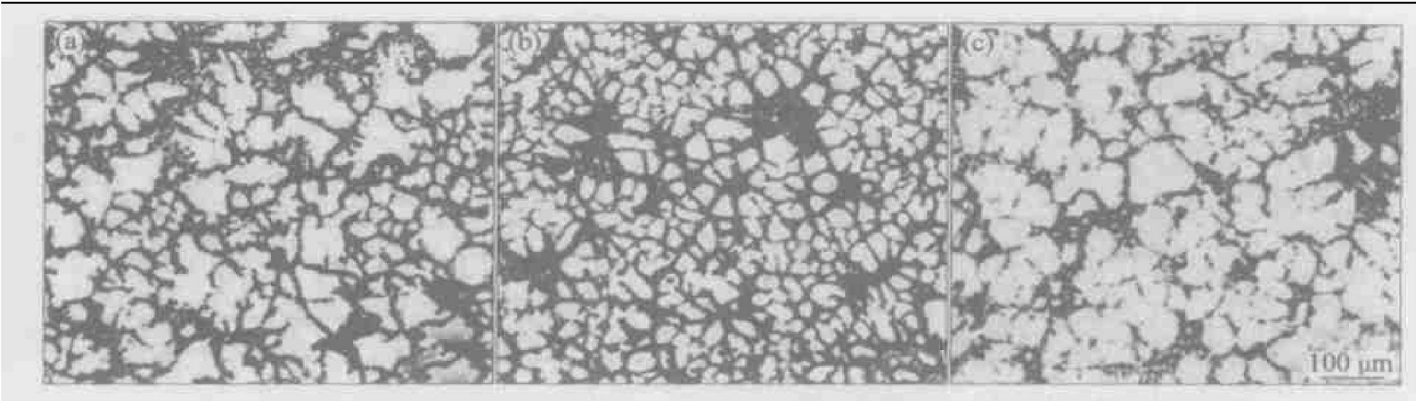


图 2 浇注温度为 640 ℃、预热温度为 30 ℃ 的石墨坩埚在不同输送管转速下的合金微观组织

Fig. 2 Microstructures of alloys under different rotating rates of duct, pouring temperature of 640 °C and pre-heating temperature of 30 °C

(a) -300 r/min, $F= 2.1$, $D= 106\ \mu\text{m}$; (b) -232 r/min, $F= 1.24$, $D= 39\ \mu\text{m}$; (c) -0 r/min, $F= 1.42$, $D= 110\ \mu\text{m}$

时, 初生相数目少, 为粗大的树枝状组织(图 2(a))。转速为 232 r/min 时, 初生相呈现不规则的蔷薇状, 组织细小(图 2(b))。转速为 0 r/min 时, 晶粒为粗大的蔷薇状(图 2(c))。

实验发现, 在过低温度浇注, 输送管转动速度过慢或过快时, 型壁上都出现结皮现象。过低温度浇注(图 1(c))或输送管转速过快(图 2(a))时, 型壁冷却能力大, 熔体在型壁上形核, 沿形核面生长的晶粒同相邻的晶粒迅速接连, 形成凝固壳。这种凝固壳一旦产生, 即使其前沿有液体流动, 晶粒也难以从型壁上产生游离, 于是在型壁上产生结皮现象。而输送管转动速度过慢时, 外界对熔体的搅动能力下降, 同样在型壁上产生凝固壳而导致结皮。在 655 ℃(高温)浇注时, 晶粒只在型壁上形核, 并且流入结晶器内的熔体温度高于液相线较多, 一部分晶核发生熔化, 故有效形核数目降低。因此, 只有浇注温度与输送管速度达到很好地匹配时, 才能有效地提高有效形核数目。

比较图 1 和 2 可见, 浇注温度和输送管转速通过交互作用影响合金熔体流经输送管时的温度分布, 进而影响有效形核数目, 最终影响初生相的形态和尺寸。图 3 所示为浇注温度对初生相晶粒密度和形状因子的影响曲线, 结合图 1 和 2, 可以看出晶粒密度(每平方米含有的初生相数目)和形状因子间的关系: 晶粒密度越高, 初生相的形状越圆整, 其尺寸越小。其机理为: 晶核多, 晶粒间距越小, 限制枝晶二次晶臂生长所需的热力学稳定性, 随着系统温度降低, 只有靠粗化一次晶臂来增加固相率。因此, 晶粒在互相抵触之前呈球形长大, 或枝晶长大阶段程度较小, 不发达枝晶熟化成蔷薇晶。

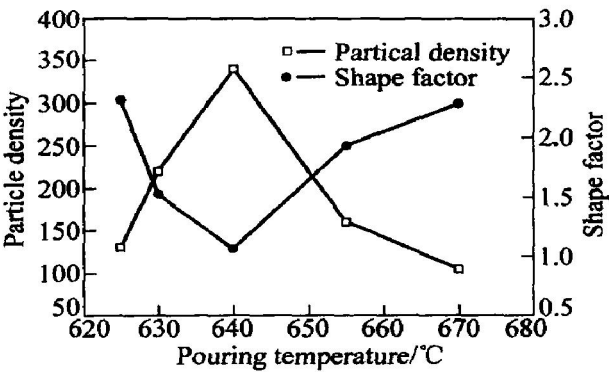


图 3 在输送管转速为 232 r/min、预热温度为 470 ℃ 的石墨坩埚条件下, 浇注温度对初生相的形状和晶粒密度的影响

Fig. 3 Effects of pouring temperature on particle density and shape factor of primary phases under rotating rate of 232 r/min and pre-heating temperature of graphite crucible 470 °C

2.3 不同结晶器冷却强度下的合金微观组织

由图 4 可以看出, 在相同浇注温度下, 结晶器内熔体冷却速度严重影响着初生相的生长形态。冷却强度越大, 晶粒就越小, 晶粒形态越差, 而冷却强度越小, 晶粒呈球状或粒状的倾向越显著。形核后, 晶核的生长可以分为 2 个阶段: 第一阶段, 晶核在急剧冷却和搅拌的环境下生长(输送管内), 生长动力来源于温度降低, 此阶段生长速度较快, 晶粒形态可能表现为图 5 中的 1、4 和 7; 第二阶段是结晶器内的生长, 生长动力来源于系统温度的降低和 Gibbs-Thompson 效应, 生长速度相对很慢。在晶粒的第二生长阶段, 图 5 中 4 和 7 的树枝状形态可演变成 8 和 5 的蔷薇状形态, 随着凝固时间的延长, 蔷薇晶进一步演变为 9 和 6 的近球晶。

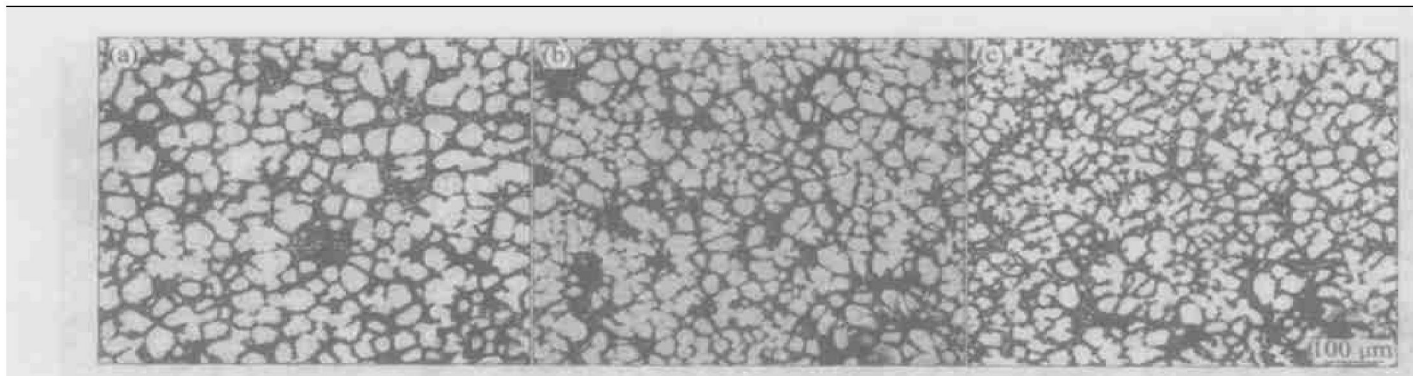


图 4 浇注温度为 640 ℃, 输送管速度为 232 r/min, 不同冷却强度下获得的合金微观组织

Fig. 4 Microstructures of alloys under different cooling intensities of crucible, pouring temperature of 640 ℃ and rotating rate of 232 r/min

- (a) —Graphite crucible with temperature of 470 ℃, $F = 1.06$, $D = 43 \mu\text{m}$;
 (b) —Graphite crucible with temperature of 30 ℃, $F = 1.24$, $D = 39 \mu\text{m}$;
 (c) —Metal crucible with temperature of 30 ℃, $F = 1.29$, $D = 32 \mu\text{m}$

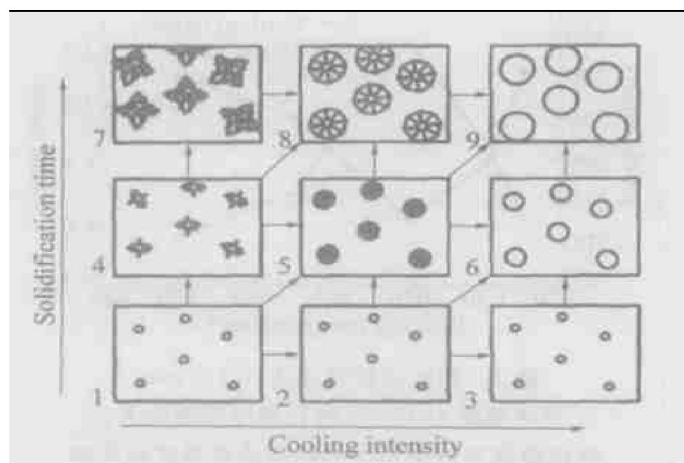


图 5 凝固时间和熔体冷却强度影响初生相形态演变的示意图

Fig. 5 Schematic illustration of morphology transition with solidification time and cooling intensity

3 微观浓度场对初生相形态的影响

采用文献[12~14]建立的微观尺度树枝晶生长模型分析本实验制浆工艺中初生相在结晶器内的形态演变, 通过引入溶质再分配、溶质扩散、界面能各向异性和界面曲率, 该模型可清晰地再现与实测结果相一致的枝晶形态和生长现象。采用连续形核模型^[15]计算熔体内与模壁表面的晶粒形核密度与形核概率, 采用元胞自动机模型处理初生相的生长。本实验假设条件如下: 1) 由于合金的温度扩散系数较溶质扩散系数大 3~4 个数量级, 可假设相变动力学由溶质扩散和 Gibbs-Thomson 效应决定; 2) 传热在微观尺度上扩散完全, 即微观组织演变模

拟空间内的温度可视为牛顿冷却; 3) 低过热熔体在转动输送管内完成形核, 熔体内与结晶器壁表面形核情况相同; 4) 忽略液相中对流的影响。为了能够较精确地描述初生相的晶体学形态演变, 模拟空间选为 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$, 由 300×300 个 $3 \mu\text{m}^2$ 的正方形元胞构成。

图 6 所示为结晶器内熔体冷却速度对初生相形态影响的模拟结果。图 6(a)~(c) 为浆料的终态相场, 图中白色为初生相; 图 6(d)~(e) 为 6(a)~(c) 凝固初期某一时刻的浓度场, 图中背景灰度代表溶质浓度。在其它条件相同时, 增加熔体的冷却强度可以促使初生相由近球晶向蔷薇晶和树枝晶转变, 模拟结果与 2.3 的实验结果非常吻合。

对于高晶粒密度和低冷却强度(图 6(a)), 在整个温度场均匀冷却的情况下, 晶粒可以在整个金属液中同时生长。晶粒固/液界面的凝固扩张速度小, 液相内的溶质扩散充分, 由于晶粒周围溶质扩散层的叠加, 使得液相中溶质浓度梯度降低, 增加了界面的稳定性, 在界面曲率作用下, 初生相保持稳定球状生长的临界半径增大或在整个凝固过程中保持近球形形态。对于高冷却强度(图 6(c)), 晶粒周围浓度场叠加晚些, 导致液相中溶质浓度差别加大, 增加了晶粒前沿的成分过冷。当成分过冷抵消了晶粒前沿“晶芽”表面张力的作用时, 晶粒的球形生长条件就会破坏, 使得液/固界面失稳, 初生相呈现树枝状, 此时枝晶尖端可以不受其它晶粒的影响而自由生长, 只有当树枝晶较发达时, 浓度场才发生相互叠加。

图 7 所示为减少晶核数目下的模拟结果, 其它

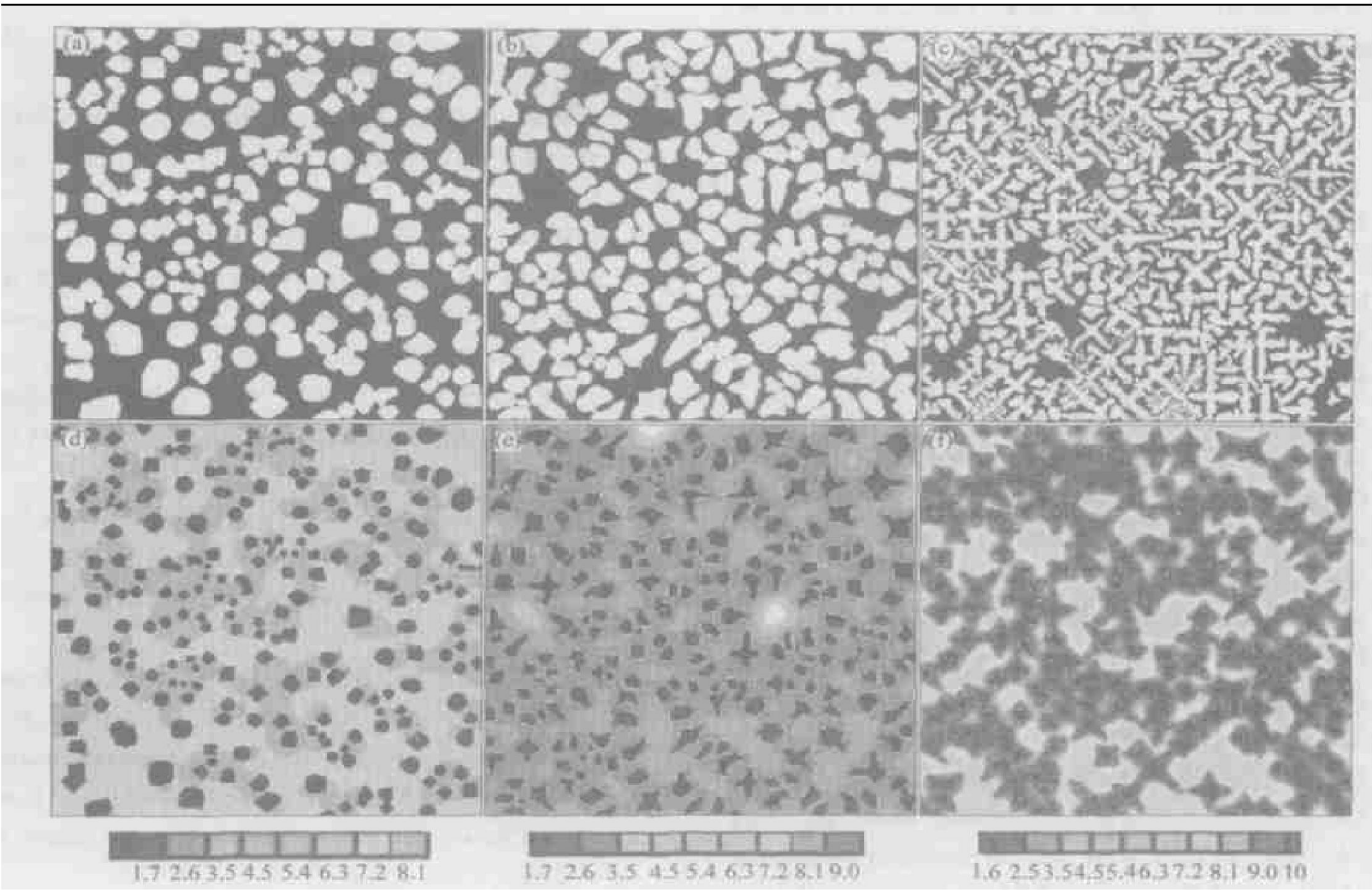


图 6 浇注温度为 640 ℃时不同冷却强度下的模拟结果

Fig. 6 Results of simulation under deferent cooling intensity and a pouring temperature of 640 ℃

(a), (b), (c) —Final microstructures with cooling rate of 0.3 ℃/s, 3 ℃/s, 20 ℃/s;
(d), (e), (f) —Concentration field of initial stage of solidification corresponding to (a), (b) and (c)

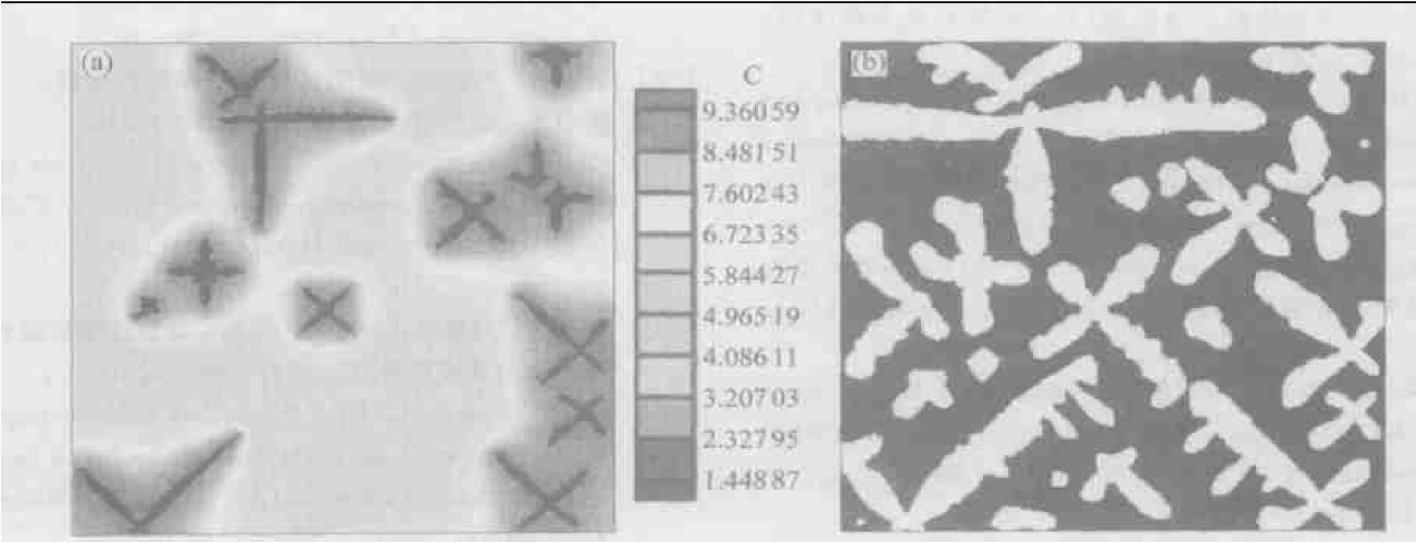


图 7 冷却强度为 0.3 ℃/s 时低核数量下的初生相形态

Fig. 7 Results of simulation under less nucleus with cooling rate of 0.3 ℃/s

(a) —Concentration field of initial stage of solidification;
(b) —Final microstructure corresponding to (a)

参数和图 6(a) 相同。比较图 7 和图 6(a) 和(d) 可见, 低冷却强度并不是获得近球晶的充分条件。在低冷却强度条件下, 如果熔体有效形核数目少, 初生相

有可能生长成为粗大的树枝晶, 与2.1节和2.2节的实验结果相符。该演变现象可由上述的晶粒周围浓度场叠加原理解释。

REFERENCES

- [1] Ji S, Fan Z. Solidification behavior of Sn-15Pb alloy under a high shear rate and high intensity of turbulence during semisolid processing[J]. Metal and Mater Trans A, 2002, 33A: 3511 - 3520.
- [2] Haga T, Kapranos P. Rheocasting processes using a cooling slope low super heat casting[A]. Proc of the 7th Int Conf on Semisolid Processing of Alloys and Compositions [C]. Japan: Japan Society for Technology of Plasticity, 2002. 801 - 807.
- [3] Yurko J A, Martinez R A, Flemings M C. Development of the semisolid rheocasting (SSM) process[A]. Proc of the 7th Int Conf on Semisolid Processing of Alloys and Compositions[C]. Japan: Japan Society for Technology of Plasticity, 2002. 659 - 664.
- [4] Findon F, Apelian D. Melt mixing approaches for the formation of thixotropic semisolid metal structure[A]. Proc of the 7th Int Conf on Semisolid Processing of Alloys and Compositions[C]. Japan: Japan Society for Technology of Plasticity, 2002. 557 - 562.
- [5] Kaufmann H, Ranshofen H, Uggowitzer P J. Metallurgical and processing aspects of the NRC semisolid casting technology[J]. Aluminum, 2000, 76: 70 - 76.
- [6] 路贵民, 董杰, 崔建忠. 7075 合金液相线半连续铸造与二次加热的合金组织[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 210 - 215.
LU Guimin, DONG Jie, CUI Jianzhong. Casting and remelted microstructure of 7075 alloy cast by liquidus semicontinuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 210 - 215.
- [7] 毛卫民, 赵爱民, 云东. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢半固态浆料的制备和轧制[J]. 金属学报, 2003, 39(10): 1071 - 1075.
MAO Weimin, ZHAO Aimin, YUN Dong. Semisolid slurry preparation and rolling of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(10): 1071 - 1075.
- [8] 张奎, 刘国钧, 徐骏. 电磁搅拌法连铸半固态铝合金及其凝固组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 47 - 50.
ZHANG Kui, LIU Guojun, XU Jun. Semisolid Al-7.0Si alloy prepared by electromagnetic stirring-continuous casting technology and its solidification microstructure [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 47 - 50.
- [9] 吴树森, 李东南, 毛有武. 半固态流变压铸 AZ91D 镁合金的组织与性能[J]. 铸造, 2002, 51(10): 583 - 586.
WU Shusen, LI Dongnan, MAO Yourwu. Microstructure and properties of AZ91D magnesium alloy with semisolid rheodie casting process[J]. Foundry, 2002, 51(10): 583 - 586.
- [10] 王顺成, 温景林, 李英龙. SCR 工艺参数对 A2017 半固态合金组织的影响[J]. 铸造, 2003, 52(10): 740 - 744.
WANG Shuncheng, WEN Jinglin, LI Yinglong. Effects of SCR process parameters on microstructure of semisolid A2017 alloys[J]. Foundry, 2003, 52(10): 740 - 744.
- [11] KANG Yonglin, AN Lin, WANG Kaikun. Experimental study on rheoforming of semisolid magnesium alloys[A]. Proc of the 7th Int Conf on Semisolid Processing of Alloys and Compositions[C]. Japan: Japan Society for Technology of Plasticity, 2002. 287 - 292.
- [12] 郭洪民, 危仁杰, 杨湘杰. 一种改进的模拟凝固微观组织的宏微观耦合模型[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(5): 26 - 28.
GUO Hongmin, Wei Renjie, YANG Xiangjie. A modified coupled macro-micro model simulating solidification microstructure of alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003(5): 26 - 28.
- [13] 郭洪民, 杨湘杰. 凝固微观组织多层次模拟[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 928 - 933.
GUO Hongmin, YANG Xiangjie. Multiscale modeling of solidification microstructure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(6): 928 - 933.
- [14] 郭洪民, 刘旭波, 杨湘杰. 元胞自动机法模拟微观组织演变的建模框架[J]. 材料工程, 2003(8): 23 - 27.
GUO Hongmin, LIU Xubo, YANG Xiangjie. Model framework for microstructure evolution modeling with cellular automata[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(8): 23 - 27.
- [15] Rappaz M, Gandin Ch A. Probabilistic modeling of microstructure formation in solidification processes[J]. Acta Metal Mater, 1993, 41(2): 345 - 360.

(编辑 李向群)