

Mg-Al 系合金凝固组织形貌及特征参数演变规律

张 昂, 刘 和, 覃 朗, 宋江凤, 杨 艳, 蒋 斌

(国家镁合金材料工程技术研究中心, 高端装备铸造技术全国重点实验室,
重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 通过阶段淬火方法, 准原位观察了Mg-Al系合金炉冷凝固过程凝固组织形貌及特征参数的演变过程。凝固过程中枝晶较为粗大, 数量较少, 粗化较为严重, 共晶组织由条状共晶相和分散的岛状共晶相构成。使用多种形貌特征参数刻画了枝晶形貌, 发现Mg-Al系合金凝固过程中形貌复杂化和粗化并存, 前期以形貌复杂化为主, 后期粗化占主导地位, 进一步建立了形貌特征参数、成分和固相率之间的关系模型。

关键词: Mg-Al系合金; 凝固; 组织形貌; 特征参数

中图分类号: TG146.2² **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0150-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0022

作者简介:

张昂(1993-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为镁合金凝固组织和缺陷控制。E-mail: angzhang@cqu.edu.cn

基金项目:

新材料重大专项项目 (No. 2024ZD0601400); 国家自然科学基金项目 (No. 524711118); 新重庆青年创新人才项目 (No. CSTB2025YITP-QCRCX0043); 中国科协青年人才托举工程项目 (No. 2022QNRC001)。

收稿日期:

2025-08-21 收到初稿,
2025-09-18 收到修订稿。

引用格式:

张昂, 和, 覃朗, 等. Mg-Al系合金凝固组织形貌及特征参数演变规律[J]. 铸造, 2026, 75(2): 150-158.
ZHANG Ang, LIU He, QIN Lang, et al. Evolution rules of solidification microstructure morphologies and characteristic parameters of Mg-Al series alloys [J]. Foundry, 2026, 75(2): 150-158.

镁合金性能优越, 在航空航天、轨道交通和医疗器械等领域应用广泛^[1-7]。大部分镁合金零部件采用铸造工艺成形, 在凝固成形过程中形成的微观组织结构对材料性能有重要影响^[8-11]。对于特定成分的合金, 凝固组织极大地影响了合金性能, 包括力学性能、耐腐蚀性、抗氧化性和阻尼性能等^[12-13]。

对于凝固组织的研究离不开对其形貌的描述, 凝固组织形貌特征参数可以反映凝固组织某方面或某一凝固阶段的凝固特点^[14-17], 如枝晶臂间距、比表面积和分形维数等。枝晶臂间距是指相邻同次枝晶间的垂直距离, 它是枝晶组织细化程度的表征, 其中一次枝晶臂间距会影响力学性能, 二次枝晶臂间距会影响成分偏析、第二相及显微孔洞的分布等。比表面积是单位体积材料的表面积, 又称为表面积密度, 可以反映枝晶的粗化程度, 是度量整体结构形貌的重要参数。分形维数可以将复杂图形在不同尺度上的特征集合在一起综合体现, 实现对图形的多尺度描述。

近年来, 学者对凝固条件和形貌特征参数之间的关系开展了大量研究。通过记录分析金属及类金属化合物的凝固过程, 可以获得枝晶生长、组织演变等微观现象的实时数据。如Han和Trivedi通过对丁二腈-丙酮体系开展定向凝固研究, 得出稳态生长条件下枝晶一次臂间距的大小存在一定的范围, 并建立了一次枝晶臂间距与凝固条件之间的关系模型^[18]。Kaya等研究了丁二腈-四溴化碳合金在温度梯度为7.5 K/mm、生长速率范围为6.5~103.5 $\mu\text{m/s}$ 时的凝固行为, 发现二次枝晶臂间距相对于一次枝晶臂间距受凝固过程生长速率和成分的影响更大^[19]。Sun等发现Mg-Y-Zr合金在0.8~83.0 K/s的冷却速率范围内, 二次枝晶臂间距与冷却速率的关系为^[20]: $\lambda_2=77R^{-0.311}$ 。在比表面积、分形维数等参数方面, Kasperovich等使用X射线重构了Al-30wt.%Cu合金在施加磁场的条件下糊状区的三维枝晶结构^[21], 发现在恒定温度梯度下, 枝晶的比表面积随着磁场增加以及保温时间增加而降低。Yang等研究了镍基高温合金定向凝固过程中的枝晶形貌, 发现分形维数从1.228到1.418之间, 具体则取决于凝固速度^[22]。Genau等研究了凝固条件对Al-Si合金枝晶分形维数的影响, 发现凝固条件对分形值没有显著影响^[23]。数值模拟也是研究凝固组织形貌特征参数的重要手段。许多学者利用相场法模拟枝晶生长并对其形貌展开研究^[24-26]。Neumann等采用相场模拟分析了枝晶比表面积的演变, 建立了考虑生长、曲率驱动粗化和界面合并影响的比表面积随时间和固相率的演化方程^[27]。Ishida等使用相场法计算了Fe基合金

枝晶的分形维数，测量了分形维数介于1.266和1.464之间^[28]。

虽然对凝固组织形貌特征参数的研究已经取得了相当大的进展，但这些研究多是基于凝固完成后的组织，对凝固过程中形貌特征参数的演变规律认识不足。为此，本研究使用多种形貌特征参数对镁合金凝固组织形貌进行精细化的定量描述，通过探明镁合金凝固过程形貌特征参数的演变规律，建立形貌特征参数与合金成分及固相率之间的内在关系，助力镁合金凝固组织的精细化控制。

1 试验方法

1.1 合金制备

参经常用Mg-Al系合金牌号，如AZ31、AM60和AZ91等，确定研究对象为Mg-3Al、Mg-6Al、Mg-9Al、Mg-12Al和Mg-15Al。以工业纯Al和纯Mg为原料，熔炼Mg-Al系合金。从熔炼制备的铸锭中线切割出 $\Phi 4.1 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的小圆柱，去除合金表面氧化皮后用于阶段淬火研究。

1.2 阶段淬火试验

Mg-Al系合金凝固温度区间较宽，在炉冷条件下，因冷却速率较低，固相率增长较慢，凝固过程较容

易控制，通过阶段淬火可以获取不同阶段的凝固组织。首先让合金随炉冷却，一段时间后，合金处于半固态状态；再对合金进行淬火，将试样置于冰水中。因冷却速率极高，剩余的液相会快速凝固，并且炉冷条件下形成的凝固组织在淬火过程中不受影响，这样就“冻结”了合金在半固态时的凝固组织形貌，实现了对合金凝固过程组织演变情况的准原位观察。

阶段淬火实验装置主要由加热部分和快速淬火部分组成，其装置和内部结构如图1所示。加热部分采用电阻丝加热，主体与熔炼电阻炉相似；快速淬火部分由伺服电机控制移动装置带动升降杆快速移动，以对坩埚进行快速淬火。内部结构如图1(c)所示，移动装置在伺服电机的控制下在纵向的滑轨上进行可调速移动，带动升降杆上下移动。在最快移动速度模式下，移动装置可在2 s达到滑轨的限位点。升降杆的下端装有气管架和坩埚架，其中气管架用于固定连通保护气的气管，坩埚架用于固定淬火用的薄壁坩埚；气管架突出的长度大于坩埚架，避免气管因正对薄壁坩埚直吹而对凝固过程产生影响。在升降杆移动时，气管和坩埚随之移动，二者保持相对静止，保护气始终可以保护坩埚内的熔体避免氧化。下炉门为可开关设计，在对熔体加热时，下炉门为关闭状态，提高加热效率并维持炉内保护气体氛围，当需要进行淬火时，



图1 阶段淬火实验装置及内部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of step quenching experimental device and internal structure

下炉门为打开状态,使得升降杆通过。如图1(d)所示,本文使用课题组内自行组装的温度采集系统采集合金凝固过程的温度变化曲线,温度采集系统主要由数据采集系统、便携式计算机及热电偶组成,共有四个接口,支持同时采集三个温度数据。将K型热电偶接口端与测温接口相连,再将热电偶测温端插入模具中即可采集熔体温度,采集频率为10 Hz,采集时间最长为150 min,数据采集系统通过USB通讯接口与计算机连接,将热电偶采集的温度数据上传至计算机并显示,即可获得合金凝固时的温度-时间曲线。

结合热力学软件Pandata计算各种成分合金在Scheil模型下的非平衡凝固曲线。根据凝固曲线获取各成分合金阶段淬火固相率及对应的温度,如表1所示。冷却阶段让试样随炉缓冷,在冷却过程观察数据采集系统显示的熔体温度,当熔体温度即将到达目标固相率对应的温度时,提前0.5 °C打开淬火炉下炉门,快速将坩埚置于冰水中进行淬火,重复上述试验,完成炉冷阶段淬火。

1.3 试样制备及表征方法

由于淬火时坩埚下端最先淬火,故取试样下端进行线切割,制备出5 mm金相试样,对加工好的金相试样依次使用200[#]、400[#]、800[#]、1 200[#]、3 000[#]的干湿两

表1 Mg-Al合金阶段淬火固相率及对应温度
Tab. 1 Step-quenched solid phase fractions and corresponding temperatures of Mg-Al alloys °C

固相率 $f_s/\%$	合金成分				
	Mg-3Al	Mg-6Al	Mg-9Al	Mg-12Al	Mg-15Al
10	633	616	599	581	563
20	631	613	594	574	554
30	629	608	588	567	544
40	626	604	582	556	529
50	624	598	571	543	508
60	619	588	557	521	480

用砂纸打磨至表面光滑、明亮且无明显划痕后,使用硝酸酒精对试样进行腐蚀。

采用蔡司(ZEISS, Axiovert 40 MAT)倒置光学显微镜、TESCAN VEGA 3 LMH扫描电子显微镜对试样凝固组织进行观察。扫描试样与金相试样相同,金相试样观察完毕后,放入无水乙醇中浸泡,避免氧化,在进行扫描电镜观察前将试样取出吹干,再进行观察。

1.4 形貌特征参数

本研究用到的凝固组织形貌特征参数如表2所示。

表2 表征凝固组织形貌的特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters representing the morphologies of solidifying microstructures

凝固组织形貌特征参数	定义	计算公式
等效圆直径(Equivalent circular diameter)	将不同形状转换为相同周长的圆的直径	$D_c = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ [29]
二次枝晶臂间距(Secondary dendrite arm spacing, SDAS)	一次枝晶臂相邻二次分枝之间的间距	$\lambda_2 = \frac{L}{n_2 - 1}$ [18-20]
比表面积(Specific surface area)	单位体积固相的固/液界面面积	$S_s = P/A$ [21]
分形维数(Fractal dimension)	为定量表征图形或曲线的复杂性和不规则性引入的非整数维数	$N(r) = c \times r^{-F_d}$ [22]

注: D_c 为等效圆直径; A 为枝晶的面积; λ_2 为二次枝晶臂间距; L 为多个二次枝晶臂中心之间的距离; n_2 为测量的二次枝晶臂的个数; S_s 为比表面积; P 为枝晶的周长; $N(r)$ 为覆盖枝晶边缘盒子的个数; c 为常数; r 为盒子尺寸; F_d 为分形维数。

2 Mg-Al系合金凝固组织

2.1 枝晶组织形貌

图2展示了炉冷条件下Mg-Al系合金不同固相率时的阶段淬火凝固组织。各成分合金淬火所得的枝晶组织均较粗大,部分枝晶具有少量二次枝晶臂,部分枝晶臂会发生断裂。随着固相率的增加,断裂的枝晶臂增多,这些枝晶继续生长,在熔体中随机碰撞,聚集在一起形成

多枝晶簇。

炉冷条件下,冷却速率缓慢,熔体温度下降较慢,且由于潜热的释放,熔体过冷度较小,形核率降低,形核数量减少;较慢的冷速为先形核的枝晶提供了充足的时间进行扩散生长,因此金属熔体中固相的增长以枝晶生长为主,形核的作用相对次要,合金不同阶段的凝固组织中枝晶数量较少,尺寸较为粗大。由于凝固持续时间长,Al溶质在枝晶固液界面前沿大量富集,降低了局

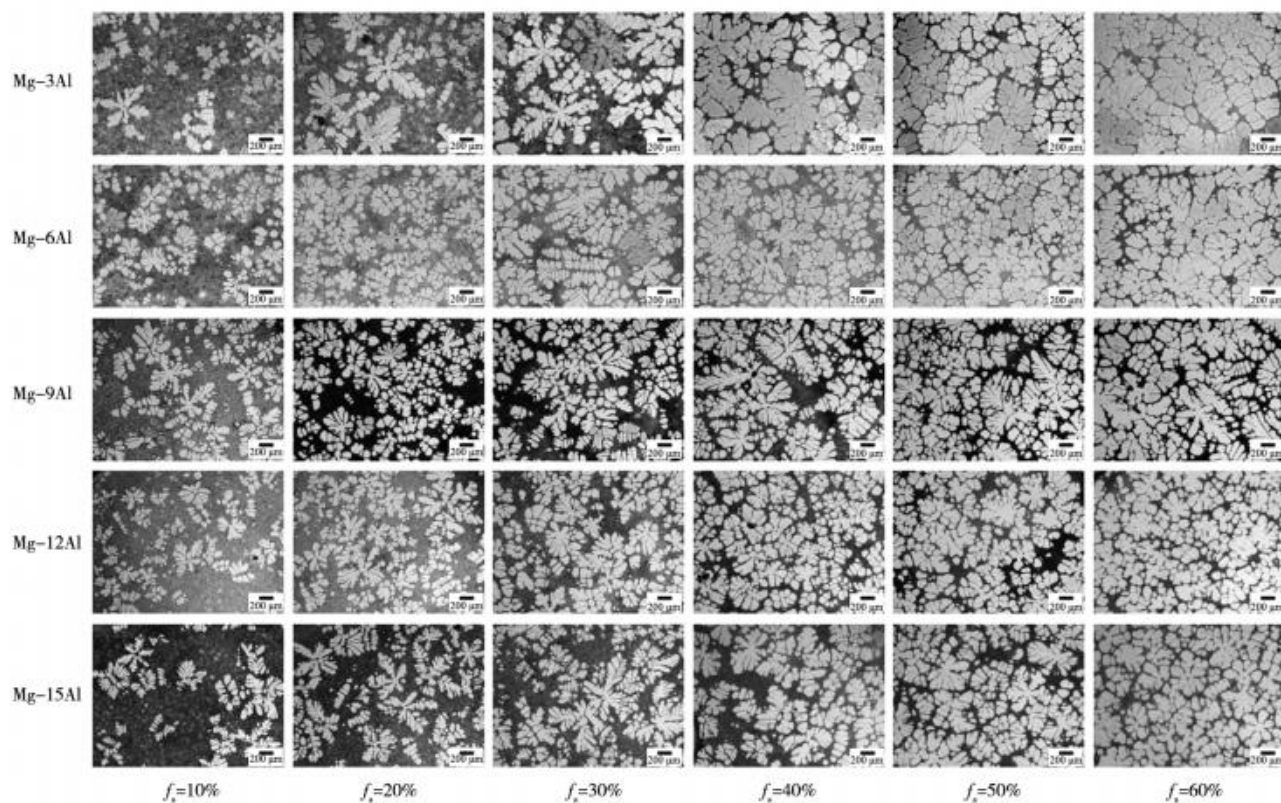


图2 Mg-Al系合金阶段淬火后的凝固组织

Fig. 2 The solidification microstructures of Mg-Al series alloys after Step-quenching

部区域的熔点，当熔体温度波动或局部热流变化时，溶质富集区域的温度会升至熔点以上，使枝晶臂熔断。

2.2 共晶组织形貌

图3展示了Mg-Al系合金固相率 f_s 为10%、30%和60%时的共晶组织形貌。共晶相形貌分为两种，一种分布在粗大的初生 α -Mg枝晶周围或枝晶臂间隙之间，呈现较为集中的连续长条状，另一种分散在淬火瞬间形成的细小枝晶的周围，以密集块状或岛状聚集。炉冷枝晶数量较少，枝晶生长充分，尺寸较大，进行淬火时，枝晶周围富集溶质的位置会形成离异共晶，残余液相中的Al原子则在淬火瞬间形成的枝晶周围形成分散的共晶相。

Al含量越高，凝固组织中共晶相占比越多。Al含量较低时，淬火枝晶间隙的块状共晶孤立分布，尺寸较小且分散；当Al含量较高时，分布在淬火形成的小枝晶周围的块状共晶相会逐渐连接，形成局部共晶网络。对于同一种合金成分而言，淬火时固相率越高，残余液相越少，液相中富集的Al原子越多，淬火时更容易形成集中分布的共晶组织，SEM成像亮度更高，这种变化在Mg-3Al和Mg-6Al这种低Al含量的合金中尤其明显。

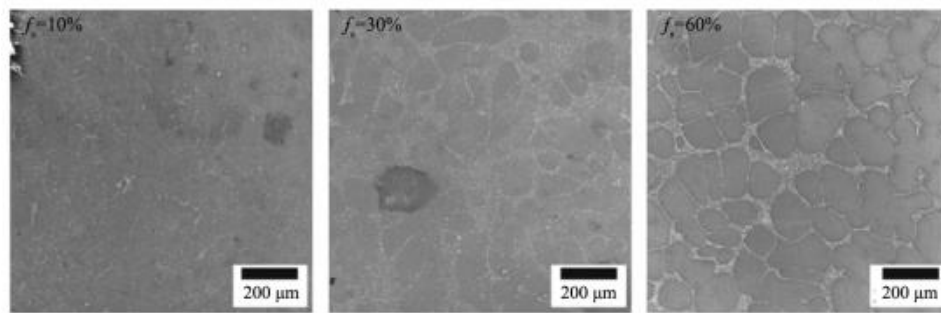
3 Mg-Al系合金凝固组织形貌特征参数

3.1 凝固组织形貌特征参数演变规律

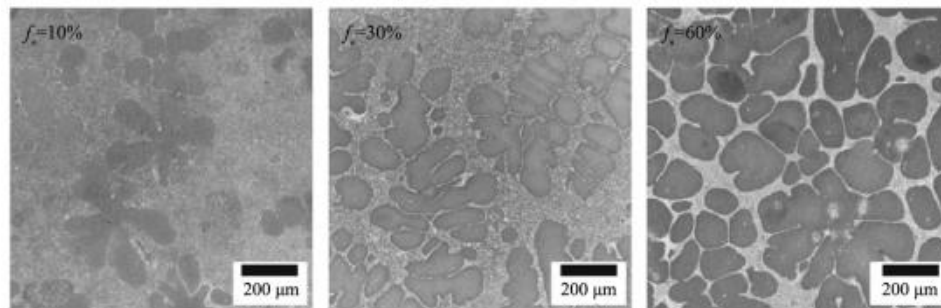
由于共晶组织是多相协同生长的复合结构，不适合用形貌特征参数进行刻画，本研究只对枝晶这种单相分支结构的形貌特征进行表征。在各固相率对应的金相组织中选取10个典型等轴枝晶（球状晶不在研究范围内），测量枝晶面积并计算等效圆直径，取平均值作为该成分在对应固相率下的枝晶尺寸表征。

在凝固过程中，枝晶同时形核和生长，不适合用一次枝晶臂间距来描述枝晶的尺寸。为了描述凝固过程枝晶尺寸的演变情况，引入等效圆直径来刻画枝晶大小。图4展示了Mg-Al系合金凝固过程枝晶等效圆直径的变化。等效圆直径随Al含量增加而减小，Mg-3Al各凝固阶段的枝晶尺寸最大，在 $f_s=60%$ 时达到最大，为 $617.13 \mu\text{m}$ ；而在 $f_s=60%$ 时，Mg-15Al枝晶尺寸最小，为 $376.31 \mu\text{m}$ 。各成分的枝晶等效圆直径均随固相率的增加逐渐增大，即固相率越高，枝晶尺寸越大。由于枝晶在凝固过程中会发生熔断，枝晶尺寸的增长会出现局部波动。

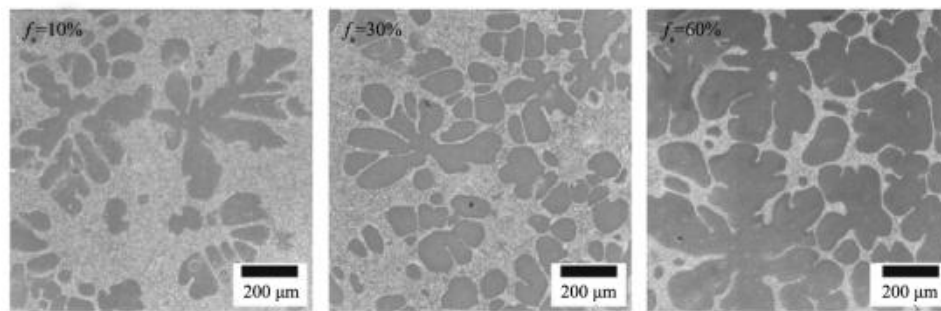
二次枝晶臂间距常作为表征枝晶粗化程度的特



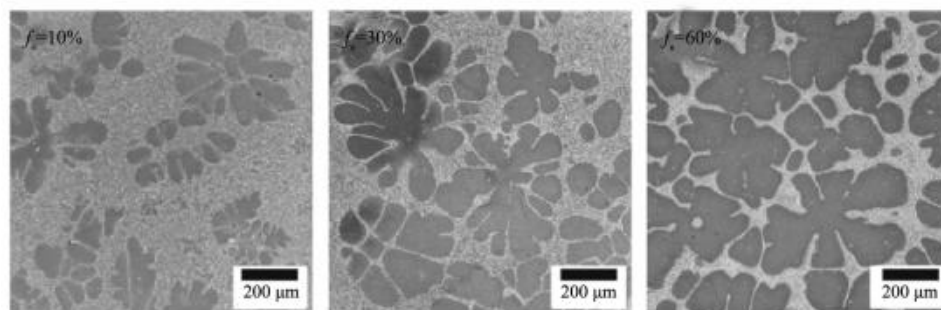
(a) Mg-3Al



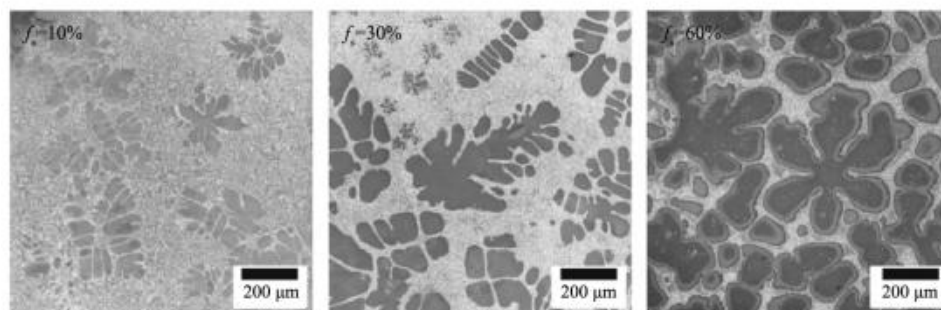
(b) Mg-6Al



(c) Mg-9Al



(d) Mg-12Al



(e) Mg-15Al

图3 Mg-Al系合金在固相率 f_s 为10%、30%和60%时的共晶组织Fig. 3 The eutectic microstructures of Mg-Al series alloys while solid fraction $f_s=10\%$, 30% and 60%, respectively

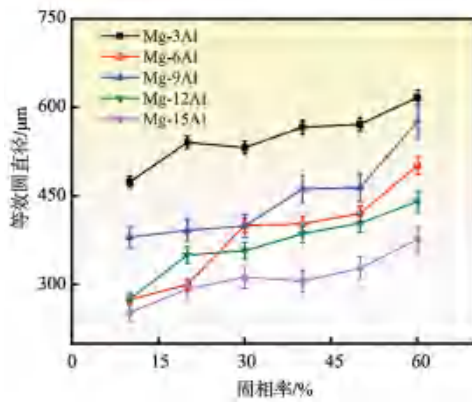


图4 Mg-Al系合金凝固过程枝晶等效圆直径的变化
Fig. 4 Variations of dendrite equivalent circle diameters during solidification processes of Mg-Al series alloys

征参数。在不同合金金相照片的各凝固阶段选取多个典型枝晶，然后在不同的视场中选择多个连续清晰的二次枝晶，测出二次枝晶臂间距的长度，最后计算出试样上的二次枝晶臂间距平均值。图5展示了凝固过程二次枝晶臂间距的变化。二次枝晶臂间距随着固相率的增加而增加，随着Al含量的增加而降低。二次枝晶臂在凝固过程中会经历粗化过程，较小的枝晶臂由于曲率较高逐渐溶解，而较大的枝晶臂表面曲率低，固液界面表面能低，通过溶质扩散能继续生长。这一过程虽然减少了枝晶臂的数量，但增大了枝晶臂之间的平均距离，使二次枝晶臂间距持续增加。随着固相率的增大，Mg-3Al至Mg-15Al合金的二次枝晶臂间距分别从50.71、47.69、44.72、32.84、32.69 μm 增加至88.37、82.31、78.58、72.69、71.01 μm 。

作为独立于形态学的特征参数，比表面积能够清晰刻画材料形貌从枝晶向球形的过渡规律，量化凝固过程可能发生的枝晶臂分离和聚结这种拓扑变化。通过获取枝晶面积及周长，可以计算出枝晶比表面积，取平均值作为测试结果。图6展示了凝固过程枝晶比

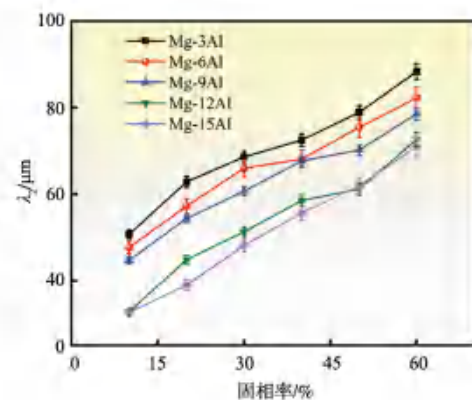


图5 Mg-Al系合金凝固过程二次枝晶臂间距的变化
Fig. 5 Variations of secondary dendrite arm spacings during solidification processes of Mg-Al series alloys

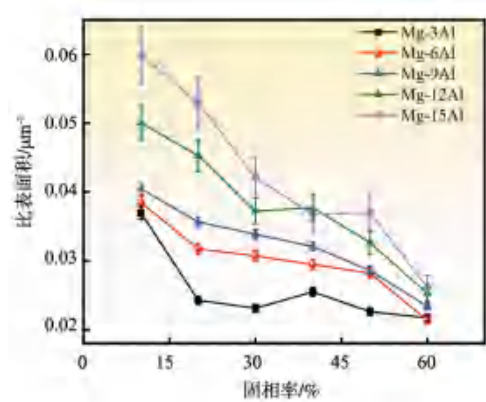
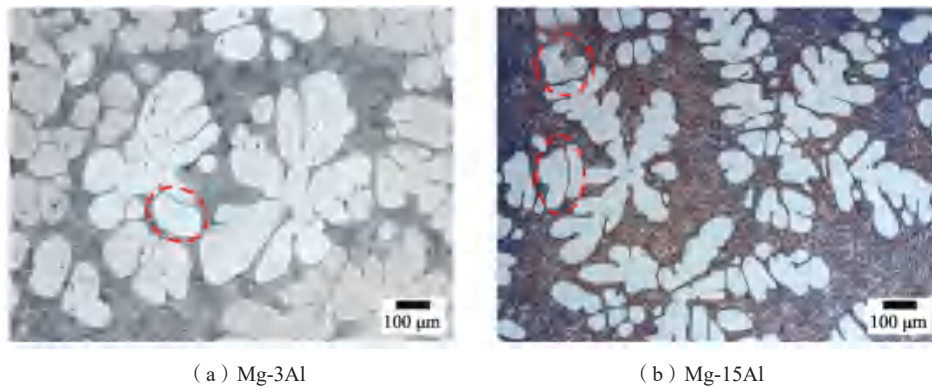


图6 Mg-Al系合金凝固过程枝晶比表面积的变化
Fig. 6 Variations of dendritic specific surface areas during solidification processes of Mg-Al series alloys

表面积的变化。由于溶质细化作用，随着Al含量的增加，枝晶比表面积逐渐增大，以 $f_s=10\%$ 时为例，Mg-3Al至Mg-15Al合金的比表面积分别为0.037、0.038、0.041、0.051和0.059 μm^{-2} 。Al含量越高的合金，凝固过程粗化效果越明显，Mg-15Al粗化效果最高，比表面积变化斜率为0.063，Mg-3Al凝固初期的枝晶粗化程度已经很高，粗化驱动力较低，凝固过程粗化效果最低，比表面积变化的斜率仅为0.018。

随着凝固的进行，比表面积逐渐降低，但在整个凝固过程中，Mg-15Al和Mg-3Al的枝晶比表面积并不是一直减少的，在 $f_s=40\% \sim 60\%$ 时，比表面积出现了增加的现象，这可能是由于枝晶臂发生熔断的位置是粗化较为严重的部分，导致剩下的枝晶基体的比表面积出现增加。图7展示了Mg-3Al和Mg-15Al枝晶臂的熔断现象，红圈中的位置即为粗化较为严重的部分发生了熔断。当某一凝固阶段较多的枝晶发生了粗大枝晶臂的熔断时，统计的比表面积就会出现增加的现象，但是枝晶臂熔断本质上是一种粗化模式，因此凝固组织的比表面积整体还是下降，凝固组织发生粗化。

分形维数可以将复杂图形在不同尺度上的特征集合在一起综合体现，从而实现对图形的多尺度描述。本研究选取每种成分在不同凝固条件下相同放大倍数下的金相照片，从凝固组织中各选取15个典型枝晶，采用具有不同尺寸 r 的小方格对枝晶进行覆盖，按照统一标准计数覆盖枝晶的盒子数量 $N(r)$ ，将 r 和对应的 $N(r)$ 以 $\ln r$ 为横坐标， $\ln N(r)$ 为纵坐标绘制散点图，使用最小二乘法拟合散点图，所得斜率即为凝固组织的分形维数，并取平均值作为该成分在对应凝固条件下凝固组织的分形维数。图8展示了凝固组织分形维数的变化。随着凝固的进行，分形维数先增后减，除了Mg-15Al，其余成分在20%固相率处均出现最大值，表明枝晶形貌的复杂程度整体上是先增加后减



(a) Mg-3Al (b) Mg-15Al

图7 Mg-Al合金中枝晶粗化较严重的部分发生的熔断现象

Fig. 7 Melting-off phenomena occurring in the parts where dendrite coarsening being relatively severe in Mg-Al alloys

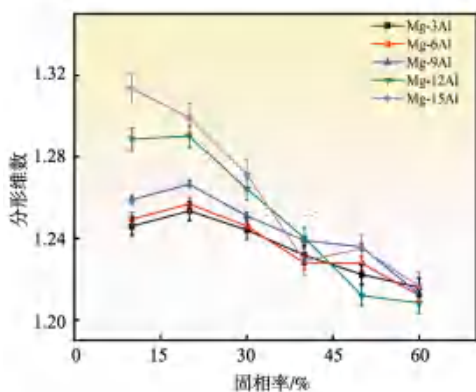


图8 Mg-Al系合金凝固过程枝晶分形维数的变化

Fig. 8 Variations of fractal dimensions during solidification processes of Mg-Al series alloys

少，即在枝晶生长过程中会出现形貌复杂化的现象。结合比表面积的变化规律，可知在凝固过程中，枝晶形貌复杂化和粗化是同时进行的。对于Mg-15Al合金，凝固过程中粗化作用最为显著，当枝晶粗化过程导致的形貌复杂程度降低幅度超过其生长过程中形貌的复杂化程度时，分形维数将会持续下降，因此，Mg-15Al合金的分形维数最大值出现在固相率为10%时。

3.2 凝固组织形貌特征参数内在关系

为了对凝固组织形貌特征参数进行预测，通过多元非线性拟合，如算式(1)所示，构建凝固组织形貌特征参数和成分及固相率之间的定量关系。

$$\begin{bmatrix} MCP_{11} \\ MCP_{21} \\ MCP_{31} \\ MCP_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle a_{11} \rangle & \langle a_{12} \rangle & \langle a_{13} \rangle \\ \langle a_{21} \rangle & \langle a_{22} \rangle & \langle a_{23} \rangle \\ \langle a_{31} \rangle & \langle a_{32} \rangle & \langle a_{33} \rangle \\ \langle a_{41} \rangle & \langle a_{42} \rangle & \langle a_{43} \rangle \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \\ R \\ Const \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： MCP_{ij} 为不同的形貌特征参数（Morphological Characteristic Parameters）， $\langle a_{ij} \rangle$ 为广义拟合参数， C 为成分， R 为冷却速率， $Const$ 为常数。 $\langle a_{ij} \rangle C$ 代表构建二者之间的函数关系，并非简单相乘。

基于算式(1)，建立了炉冷条件下凝固过程中等

效圆直径和Al含量及固相率之间的关系为：

$$D_e = (140.37C^{-0.39} + 139.91)f_s^{0.21} \quad (2)$$

该式拟合系数为0.80，表明该式可以较为准确地预测凝固过程中等效圆直径的变化。成分的指数大于固相率的指数，表明成分对枝晶尺寸的影响更大。

二次枝晶臂间距和Al含量及固相率的关系为：

$$\lambda_2 = (-284.85C^{1.12} + 109.66) \times f_s^{0.34} \quad (3)$$

该式拟合系数为0.95，拟合程度较高。

比表面积和Al含量及固相率的关系为：

$$S_s = (0.028 + 0.2C) \times (1 - f_s)^{0.7} \quad (4)$$

该式拟合系数为0.91，表明该式可准确的描述凝固过程中枝晶比表面积随成分及固相率的变化。

枝晶分形维数和成分及固相率的关系为：

$$F_d = 1.24 + 0.4C + 1.38C^2 + 0.023f_s - 0.059f_s^2 - 1.23Cf_s \quad (5)$$

该式拟合系数为0.90，即该关系模型能够准确描述凝固过程中枝晶分形维数先增加后减少的现象。

以上多元非线性拟合算式的拟合精度都比较高，表明了拟合关系的准确性。通过固定成分或固相率，可以进一步获得形貌特征参数与其中某一个变量的关系。以二次枝晶臂间距为例，固定成分，可以获得每种成分下，二次枝晶臂间距与冷却速率的函数关系，如表3所示。

拟合关系表明，二次枝晶臂间距与固相率成幂函

表3 Mg-Al系合金凝固过程二次枝晶臂间距和固相率的关系
Tab. 3 Relationships between secondary dendrite arm spacings and solid fractions during solidification processes of Mg-Al series alloys

成分	关系式	拟合系数
Mg-3Al	$\lambda_2 = 93.6f_s^{0.29}$	0.97
Mg-6Al	$\lambda_2 = 90.3f_s^{0.30}$	0.97
Mg-9Al	$\lambda_2 = 89.6f_s^{0.31}$	0.98
Mg-12Al	$\lambda_2 = 86.9f_s^{0.42}$	0.97
Mg-15Al	$\lambda_2 = 87.1f_s^{0.47}$	0.97

数关系,拟合系数均大于或等于0.97,说明该系列公式能够描述Mg-Al系合金二次枝晶臂间距随冷却速率的变化。从形式上看,多元模型与单元模型形式相同,只是固相率的指数有一定差异。目前关于Mg合金的二次枝晶臂间距的公式还鲜有报道,通过给出不同成分下二次枝晶臂间距和冷却速率的关系,可以作为Mg合金相关数据的补充,用来预测Mg-Al合金在不同凝固阶段的二次枝晶臂间距。

4 结论

本文通过阶段淬火的方法,获取了炉冷条件下Mg-Al系合金在不同凝固阶段的组织形貌,使用多种形貌特征参数定量表征了枝晶的形貌特征,主要结论如

下。

(1) 炉冷条件下枝晶组织较为粗大,数量较少;共晶组织由条状共晶相和分散的岛状共晶相构成。形貌特征参数的变化表明,枝晶生长过程中,形貌复杂化和粗化同时发生,在凝固前期通常是形貌复杂化占据主导作用,提高枝晶形貌复杂程度,凝固中后期粗化效果占据主导作用,枝晶形貌复杂程度降低。

(2) 炉冷凝固过程中,形貌特征参数、成分和固相率满足以下关系。等效圆直径: $D_e = (140.37C^{-0.39} + 139.91)f_s^{0.21}$; 二次枝晶臂间距: $\lambda_2 = (-284.85C^{1.12} + 109.66)f_s^{0.34}$; 比表面积: $S_s = (0.028 + 0.2C) \times (1 - f_s)^{0.7}$; 分形维数: $F_d = 1.24 + 0.4C + 1.38C^2 + 0.023f_s - 0.059f_s^2 - 1.23Cf_s$ 。

参考文献:

- [1] ZHENG Z Y, DONG Z H, WANG C H, et al. Improved mechanical properties of highly alloyed Mg-10Gd-5Y-5Er-xZn alloys via tailoring LPSO phase structure [J]. Transactions of Materials Research, 2025, 1 (1): 100007.
- [2] YANG Y, XIONG X M, CHEN J, et al. Highlights of global magnesium materials research in 2024 [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13 (5): 1855-1858.
- [3] CHEN W T, YANG J Y, YU W B, et al. One developed finite element model used in nano-layered flaky Ti₂AlC MAX ceramic particles reinforced magnesium composite [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024 (10): 4219-4228.
- [4] YANG J, ZHANG Z H, YAO W H, et al. Recent developments in coatings on biodegradable Mg alloys: a review [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13 (4): 1405-1427.
- [5] JIANG B, DONG Z H, ZHANG A, et al. Recent advances in micro-alloyed wrought magnesium alloys: theory and design [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (6): 1741-1780.
- [6] SHE J, CHEN X H. The development and prospect of bio-Mg alloy materials [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13 (4): 1383-1385.
- [7] 蒋斌, 张昂, 宋江凤, 等. 镁合金一体化压铸缺陷控制 [J]. 金属学报, 2024, 61 (3): 383-396.
- [8] LI Y F, ZHANG A, LI C M, et al. Recent advances of high strength Mg-RE alloys: alloy development, forming and application [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 2919-2940.
- [9] BOETTINGER W J, CORIELL S R, GREER A L, et al. Solidification microstructures: recent developments, future directions [J]. Acta Materialia, 2000, 48 (1): 43-70.
- [10] 张昂, 郭志鹏, 蒋斌, 等. 合金凝固组织和气孔演变相场模拟研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (11): 2976-3009.
- [11] 刘孝山, 宋皎, 夏圣旭, 等. 数值模拟技术的高温合金中的应用 [J]. 铸造, 2025, 74 (7): 880-894.
- [12] DANTZIG J A, RAPPAZ M. Solidification [M]. EPFL Press, 2016.
- [13] PROVATAS N. Quantitative phase field modelling of solidification [M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [14] LI T, SONG J F, ZHANG A, et al. Progress and prospects in Mg-alloy super-sized high pressure die casting for automotive structural components [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11 (11): 4166-4180.
- [15] 李澳奇, 孙逊, 荆高扬, 等. 基于元胞自动机法的高温合金凝固组织数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2025, 74 (5): 578-587.
- [16] ARES A E. Solidification [M]. IntechOpen, 2018.
- [17] BRIAN C, O'REILLY K. Solidification and casting [M]. CRC Press, 2016.
- [18] HAN S H, TRIVEDI R. Primary spacing selection in directionally solidified alloys [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42 (1): 25-41.
- [19] KAYA H, ÇADIRLI E, KEŞLIOĞLU K, et al. Dependency of the dendritic arm spacings and tip radius on the growth rate and composition in the directionally solidified succinonitrile-carbon tetrabromide alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 276 (3-4): 583-593.
- [20] SUN M, STJOHN D H, EASTON M A, et al. Effect of cooling rate on the grain refinement of Mg-Y-Zr alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51 (1): 482-496.
- [21] KASPEROVICH G, GENAU A, RATKE L. Mushy zone coarsening in an AlCu30 alloy accelerated by a rotating magnetic field [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42 (6): 1657-1666.
- [22] YANG A, XIONG Y, LIU L. Fractal characteristics of dendrite and cellular structure in nickel-based superalloy at intermediate cooling rate

- [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2 (1) : 101-103.
- [23] GENAU A L, FREEDMAN A C, RATKE L. Effect of solidification conditions on fractal dimension of dendrites [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 363: 49-54.
- [24] CHEN H X, ZHANG A, LI H, et al. Segregation of Mg-6Gd alloy under natural convection: from macro solute distribution to micro dendrite growth [J]. China Foundry, 2024, 21 (5) : 613-624.
- [25] QIU Y Q, WU M W, QIN X P, et al. Phase-field lattice-Boltzmann study on fully coupled thermal-solute-convection dendrite growth of Al-Cu alloy [J]. China Foundry, 2024, 21 (2) : 125-136.
- [26] ZHANG A, GUO Z P, XIONG S M. Phase-field-lattice Boltzmann study for lamellar eutectic growth in a natural convection melt [J]. China Foundry, 2017, 14 (5) : 373-378.
- [27] NEUMANN H H, ECKERT K, BECKERMANN C. General evolution equation for the specific interface area of dendrites during alloy solidification [J]. Acta Materialia, 2017, 140: 87-96.
- [28] ISHIDA H, NATSUME Y, OHSASA K. Characterization of dendrite morphology for evaluating interdendritic fluidity based on phase-field simulation [J]. ISIJ International, 2009, 49 (1) : 37-43.
- [29] REZANEZHAD M, LAJEVARDI S A, KARIMPOULI S. Application of equivalent circle and ellipse for pore shape modeling in crack growth problem: a numerical investigation in microscale [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 253: 107882.

Evolution Rules of Solidification Microstructure Morphologies and Characteristic Parameters of Mg-Al Series Alloys

ZHANG Ang, LIU He, QIN Lang, SONG Jiang-feng, YANG Yan, JIANG Bin

(National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract:

The evolution courses of solidification microstructure morphologies and characteristic parameters during furnace cooling solidification processes of Mg-Al series alloys have been quasi-in-situ investigated through step quenching method. During the solidification process, the dendrites are relatively coarse, fewer in quantity, and severely coarsened. The eutectic microstructures are composed of strip-shaped eutectic phases and dispersed island-shaped eutectic phases. A variety of morphological characteristic parameters are used to characterize the dendrite morphologies, and it is found that the complication and coarsening of morphology coexist during solidification: morphology complication dominates in the early stage, while coarsening becomes dominant in the later stage. Furthermore, a reliable predictive model among morphological characteristic parameters, composition, and solid fraction is established.

Key words:

Mg-Al series alloy; solidification; microstructural morphology; characteristic parameter