

# 铸造 WE54 镁合金的枝晶干涉点及其与合金显微组织的关系

李吉林, 冯俊宁, 秦 春, 董福元

(北方民族大学材料学院, 宁夏银川 750021)

**摘要:** 采用热分析方法分别对经过Zr变质和未经过Zr变质的WE54镁合金的枝晶干涉点进行了研究, 并分析了合金显微组织与枝晶干涉点固相分数的关系, 讨论了枝晶干涉点固相分数对合金热裂和缩松倾向的影响。研究表明, 未经过Zr变质的WE54合金在较高的过冷度下发生固相晶粒的形核, 而形核之后晶粒长大速度较快, 在较低的固相分数(0.36)下发生枝晶的相互干涉, 其凝固组织为粗大的树枝晶。而经过Zr变质后, 合金的枝晶干涉点固相分数显著提升至0.51, 合金的显微组织也发生了明显的细化, 表现为均匀、细小的近球形晶粒组织。以上结果表明, 合金的枝晶干涉点固相分数与合金的晶粒尺寸和形态密切相关。枝晶干涉点还与合金凝固过程中液相的补缩行为直接相关, 当合金在较低的固相分数下发生枝晶干涉时, 意味着合金凝固过程中会有较长时间处于补缩不畅的状态, 从而加剧合金的热裂和缩松倾向。

**关键词:** 镁合金; 枝晶干涉点; 热分析; 显微组织

## 作者简介:

李吉林(1986-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为金属材料液态成形工艺及理论。电话: 15309586248, E-mail: jilli@nmu.edu.cn

## 通讯作者:

冯俊宁, 女, 博士, 讲师。E-mail: 2014092@nmu.edu.cn

中图分类号: TG260

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)11-1270-07

## 基金项目:

宁夏自然科学基金(2018AAC03252); 北方民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(2021XYZCL01); 国家自然科学基金(51804011)。

## 收稿日期:

2021-04-13 收到初稿,

2021-06-11 收到修订稿。

铸造合金在凝固过程中的一些特征温度点对于理解合金的铸造工艺性能和显微组织形成过程有着十分重要的意义。因此, 在铸铁和铝合金的铸造生产过程中, 热分析技术是常用的炉前检测手段<sup>[1-2]</sup>。对于存在一定凝固温度区间的合金, 除了其液相线和固相线之外, 枝晶干涉点作为合金凝固过程中的一个重要特征点, 受到研究人员的日益重视<sup>[3-4]</sup>。合金凝固过程中的枝晶干涉点是指合金晶粒长大过程中相邻晶粒之间开始相互接触的温度<sup>[5-6]</sup>。在枝晶干涉点, 半固态合金的很多性质发生了显著的变化。比如, 合金在枝晶干涉点之前是不具有剪切强度和拉伸强度的, 而在枝晶干涉点, 合金开始逐渐建立剪切强度和拉伸强度, 而这个强度的建立过程与铸件中热裂缺陷的形成具有十分密切的关系<sup>[7-8]</sup>。此外, 在枝晶干涉点之前, 合金中的液相能够相对自由地在固相晶粒之间发生流动, 但在枝晶干涉点之后, 合金中液相的流动开始受到固相晶粒骨架的阻碍, 导致合金的凝固收缩得不到液相的充分补缩, 进而引发缩松缺陷的形成<sup>[9]</sup>。因此, 合金的枝晶干涉点温度及其对应的固相分数对于理解铸造合金中热裂、缩松等铸造缺陷的形成机制, 评价合金的热裂、缩松倾向也有重要的作用。

为了确定合金的枝晶干涉点, 人们主要提出了两种方法, 分别为连续扭矩测试法和热分析法<sup>[5]</sup>。连续扭矩测试法是将一旋转的搅拌头直接浸入合金熔体中, 通过检测熔体凝固过程中搅拌头旋转所受的阻力变化来表征合金熔体中固相晶粒之间的干涉情况。这种方法会破坏熔体凝固过程中晶粒形核和长大的过程, 因而测量结果并不能准确反映熔体凝固时的真实情况。而热分析法是通过测量合金熔体凝固过程中熔体心部和近表面处的温度差来实现枝晶干涉点的测量, 其根本原理是利用熔体凝固过程中液相和固相晶粒之间导热性的差异, 通过测量熔体边缘与中心的温度差变化来反映熔体中液固两相共存的情况。相比较而言, 热分析法测量过程中对熔体凝固过程的影响较小, 能更准确地反映实际熔体的凝固过程。测定合金枝晶干涉点的

热分析法自1990年由Backerud等人提出后,已经被很多研究者证实能够准确反映合金中发生的枝晶干涉现象<sup>[10]</sup>。

本文采用热分析法确定了WE54镁合金的枝晶干涉点,并研究了Zr变质对合金的晶粒尺寸、枝晶干涉点温度和固相分数的影响。在此基础上,对晶粒尺寸和形态与枝晶干涉点之间的关系,以及枝晶干涉点固相分数对合金热裂、缩松倾向的影响进行了讨论。

## 1 试验方法

### 1.1 合金试样制备

试验所用镁合金铸锭通过金属型铸造制备。表1所示为铸造合金的化学成分,其中WE54合金在熔炼过程中利用Mg-Zr中间合金对其进行变质处理,而WE54-0Zr合金在熔炼过程中未进行任何变质处理。热分析试验所用的试样为 $\Phi 30\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的圆柱形,在铸锭上用电火花线切割获得,试样表面用金相砂纸打磨至表面光亮。

### 1.2 热分析

图1中插图所示为双热电偶热分析实验装置的示意图。首先将圆柱形试样置于石墨坩埚内,并将坩埚置于电阻炉内加热到约 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 使之完全熔化。然后将两根K型镍铬镍硅热电偶分别通过坩埚顶盖中部和边缘的小孔插入合金熔体中,使热电偶底部距坩埚底部的距离约为 $30\text{ mm}$ ,如图1a所示。然后继续加热使熔体温度升高至 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 后保温 $5\text{ min}$ 。保温结束后,将坩埚移出电阻炉,坩埚内的熔体以大约 $1\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度自然冷却。合金熔体冷却过程中中心部和边缘的温度变化分别由两根热电偶测得,并通过数据采集系统传送到电脑。根据热电偶测得的数据可以得到试样心部和边缘的冷却曲线,并求得合金冷却过程中心部和边缘的温度差随凝固时间的变化情况(如图1b中 $\Delta T$ 曲线所示)。在 $\Delta T$ 曲线上找到第一个极大值点,该点即为合金凝固过程

中的枝晶干涉点。该点对应的温度和固相分数也可分别由冷却曲线得到<sup>[11]</sup>。为了保证数据的可靠性,每种合金的热分析试验均重复三次。

### 1.3 显微组织观察

合金的显微组织分别采用金相显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)进行观察,金相观察所用样品经预磨、抛光后使用 $5\text{ vol.}\%$ 的硝酸酒精溶液进行腐蚀。由于WE54-0Zr合金的显微组织为发达的枝晶组织,通过OM观察很难确定其晶粒尺寸,因此本研究采用SEM附带的EBSD模块对铸态合金的显微组织进行观察,以便于测量合金的晶粒尺寸。EBSD观察所用样品先用砂纸预磨至 $3000\#$ 后,使用 $10\text{ vol.}\%$ 的高氯酸酒精溶液进行电解抛光。合金的平均晶粒尺寸( $d$ )采用截线法在合金的EBSD组织图片上测量得到。

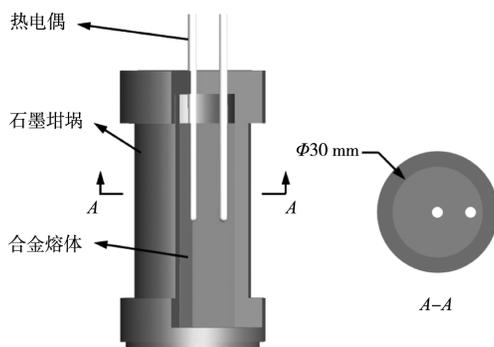
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 热分析结果

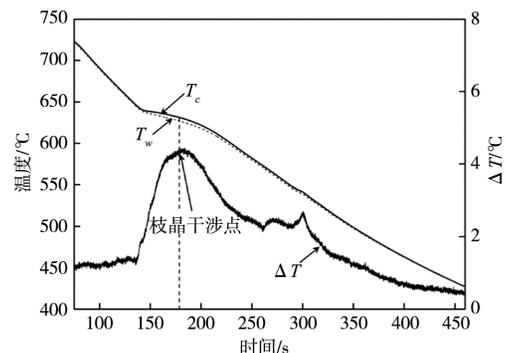
图2所示为通过热分析得到的WE54-0Zr和WE54合金的冷却曲线及其一阶导数曲线。从图中可以看到,Zr变质合金与未变质合金的冷却曲线及其一阶导数曲线之间存在明显的区别,这种区别主要体现在合金凝固过程的初始阶段,而在凝固过程的后半段两种合金的区别不大。这说明Zr元素主要影响的是合金凝固初始阶段的晶粒形核和长大过程,而对凝固过程末期的第二相析出过程影响不大。结合一阶导数曲线可以准确确定WE54-0Zr和WE54合金凝固过程中固相晶粒的形

表1 试验所用合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of investigated alloys  $w_B/\%$

合金	Y	Nd	Gd	Zr	Mg
WE54-0Zr	5.10	1.91	2.03	—	余量
WE54	5.02	1.92	2.13	0.45	余量



(a) 实验装置示意图



(b) 枝晶干涉点确定方法

图1 双热电偶热分析实验装置示意图及枝晶干涉点的确定方法

Fig. 1 Schematic diagram of two-thermocouple thermal analysis system and determination of the dendrite coherency point

核温度 ( $T_m$ ) 分别为637.5 °C和645.8 °C, 表明经过Zr变质处理后, 固相晶粒在较高的温度、较低的过冷度下形核。这主要是由于Zr的加入为初生相提供了大量的异质形核质点, 从而促进了初生相的异质形核过程所导致的。

固相晶粒形核后会进一步发生晶粒长大, 并逐渐消耗液相至最终凝固完成, 在此期间存在一个特征温度点, 即晶粒长大至相互干涉的温度点, 称为枝晶干涉点, 该特征点对应的温度和固相分数分别记为 $T_{dc}$ 和 $f_s^{dc}$ 。由于合金中固相的导热系数高于液相的导热系数<sup>[12]</sup>, 因此两根热电偶之间的温度差会受到固相分数及固相之间相互接触关系的影响。图3所示为对两种合金分别重复进行三次双热电偶热分析实验得到的结果。对比三次试验的结果, 可见采用热分析法确定的枝晶干涉点具有很好的重复性。由图3可见, 在合金凝固过程的初期, 试样心部和边缘的温度差很小, 约为1 °C左右, 随着凝固过程的进行, 由于液相的导热系数低于固相的导热系数<sup>[12]</sup>, 试样心部和边缘之间的温度差逐渐变大, 并在试样温度分别降低到629 °C、630 °C时达到极大值, 该极大值点即对应着合金凝固过程中的枝晶干涉点。据此可确定WE54-0Zr和WE54合金的枝晶干涉点温度分别为629 °C和630 °C。结合固相晶粒的形核温度, 可知WE54-0Zr合金的形核温度与枝晶干涉点温度之间相差8.5 °C, 而经过Zr变质后, WE54合金的形核温度与枝晶干涉点温度之间的温差为15.8 °C。这说明经过Zr变质处理后, 合金晶粒的长大速度较慢, 因而会较晚发生枝晶干涉。

相比于枝晶干涉点温度, 该温度所对应的固相分数能更准确地反映在枝晶干涉点合金所处的状态。根据图2中所示的合金冷却曲线的一阶导数曲线, 在假定凝固过程中, 不同的液固相变反应发生单位数量转变所释放的潜热相等的基础上, 可以计算得到合金凝固过程中固相的体积分数 ( $f_s$ ) 随凝固时间 ( $t$ ) 和温度

( $T$ ) 的变化情况<sup>[13]</sup>。为了计算 $t$ - $f_s$ 曲线, 首先要确定一条基线以排除凝固过程中除液固相变之外的其他因素对冷却曲线的影响。本研究使用origin软件中的基线工具通过拟合一阶导数曲线中液相线以上的部分和固相线以下的部分得到一阶导数曲线的基线, 如图4所示。分别对一阶导数曲线及基线进行积分, 则可求得在不同凝固时间合金中的固相分数为:

$$f_s = \frac{\int_{t_1}^t \left[ \left( \frac{dT}{dt} \right)_{cc} - \left( \frac{dT}{dt} \right)_{bl} \right] dt}{\int_{t_1}^{t_s} \left[ \left( \frac{dT}{dt} \right)_s - \left( \frac{dT}{dt} \right)_s \right] dt} \quad (1)$$

式中:  $t$ 为凝固时间,  $t_1$ 和 $t_s$ 分别为凝固开始和终止的时间; 下标cc和bl分别代表一阶导数曲线和基线。式中分子部分代表在凝固时间为 $t$ 时, 合金中液固相变导致的放热量, 而分母则代表合金整个凝固过程中液固相变的总放热量 (图4中阴影所示)。在任一时间 $t$ , 固相分数可由两者的比值计算得出。而根据合金凝固过程中凝固时间与温度的对应关系, 不同温度下的固相分数亦可得到。

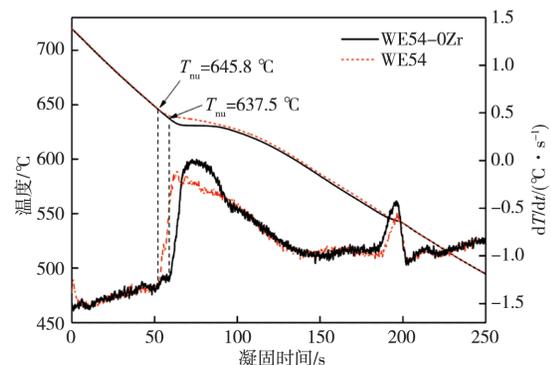
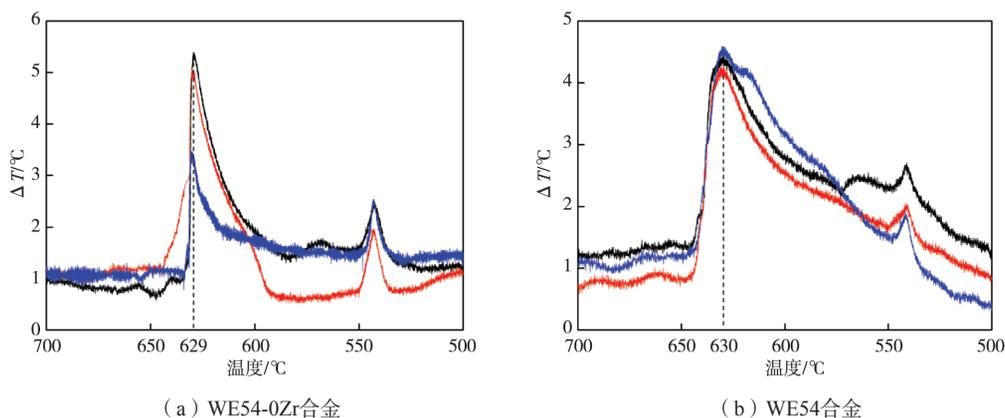


图2 WE54-0Zr合金和WE54合金的冷却曲线及其一阶导数曲线  
Fig. 2 Cooling curves and their first derivative curves of WE54-0Zr and WE54 alloys



(a) WE54-0Zr合金 (b) WE54合金

图3 WE54-0Zr合金和WE54合金的枝晶干涉点温度

Fig. 3 Dendrite coherency point temperatures of WE54-0Zr and WE54 alloys

图5所示为由冷却曲线计算得到的合金固相分数与温度的关系曲线。根据双热电偶热分析法测得的枝晶干涉点温度及图5所示的固相分数与温度的关系曲线，可以确定两种合金在凝固过程中发生枝晶干涉时的固相分数分别为0.36（WE54-0Zr合金）和0.51（WE54合金）。可见，经过Zr变质处理后，WE54合金会在更高的固相分数下发生枝晶干涉。

### 2.2 显微组织观察

为了研究枝晶干涉点与合金显微组织之间的关系，分别使用金相显微镜和EBSD对试样的凝固组织进行了观察。图6和图7分别为采用OM和EBSD观察得到的WE54-0Zr合金和WE54合金的铸态显微组织。由图6a可以看到WE54-0Zr合金的铸态显微组织由发达的树枝晶组成。而经过Zr变质后，WE54合金的晶粒则明显细化且晶粒形态由树枝晶转变为多边形或近球形晶粒，如图6b所示。受到腐蚀效果的限制，采用OM观察很难分辨WE54-0Zr合金显微组织中的晶界，而采用EBSD则可以清楚看到WE54-0Zr合金显微组织中的晶界，如

图7所示。应用截线法可以确定WE54-0Zr合金和WE54合金的平均晶粒尺寸分别为295 μm和83 μm。以上结果表明，Zr元素可以显著降低WE54合金的晶粒尺寸，并使合金的晶粒形态由不均匀、粗大的树枝晶转变为均匀、细小的近球形晶粒。

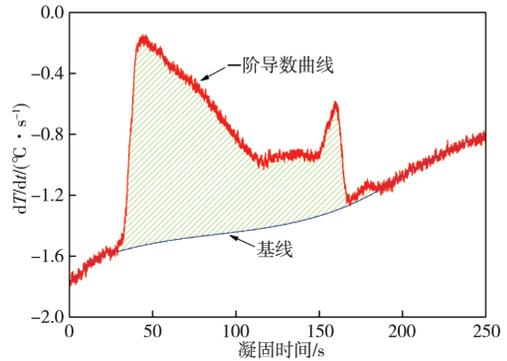


图4 冷却曲线的一阶导数曲线及其基线  
Fig. 4 The first derivative curve of the cooling curve and its baseline

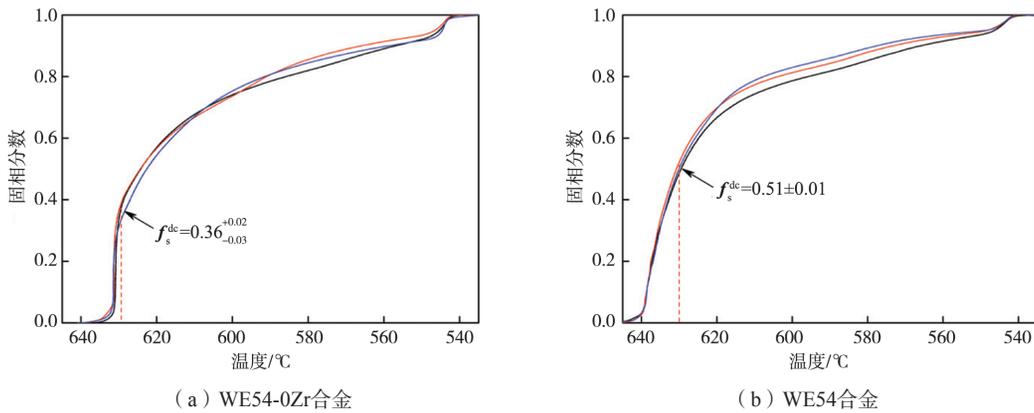


图5 合金凝固过程中固相分数随温度的变化曲线  
Fig. 5  $T-f_s$  curves of investigated alloys during solidification

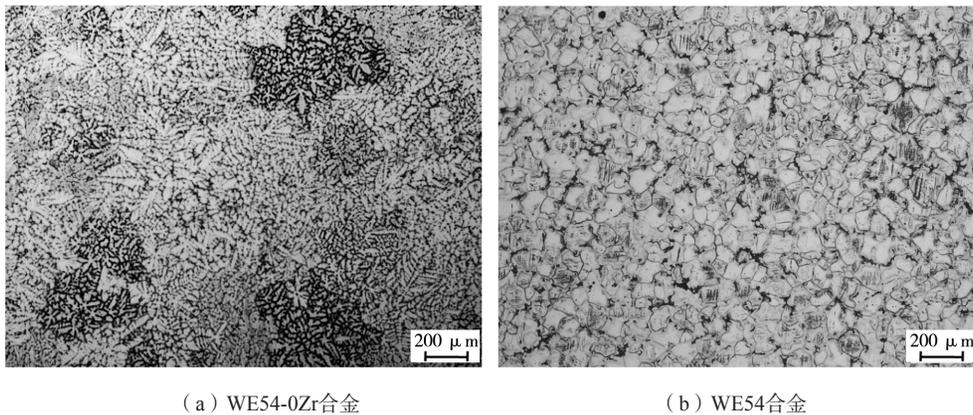


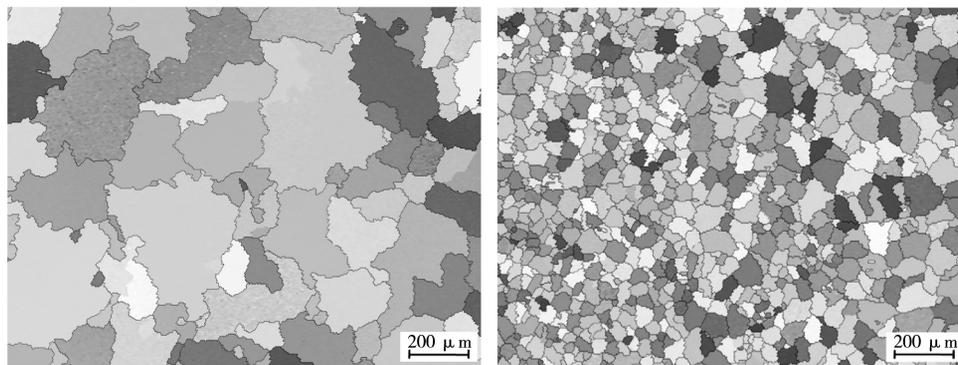
图6 合金的金相显微组织  
Fig. 6 OM microstructure of investigated alloys

## 2.3 分析讨论

### 2.3.1 枝晶干涉点与合金显微组织的关系

合金的凝固是晶粒形核和长大两个过程不断交替进行的结果, 本研究通过热分析测得的与晶粒形核和长大过程相关的主要参数总结于表2。从中可以发现, 在未添加Zr元素的WE54-0Zr合金中, 固相晶粒的形核需要更高的过冷度, 且形核数量较少导致合金的晶粒比较粗大。而添加Zr元素后, 由于Zr可以作为固相晶粒形核的异质形核基底, 因此形核过冷度降低, 形核数量增加, 合金的晶粒尺寸明显细化。此外, 由于WE54-0Zr合金中固相晶粒在更高的过冷度下形核, 因此形核之后晶粒长大的驱动力更大, 晶粒会以较快的速度长大, 相邻的固相晶粒之间会很快发生枝晶干涉。而添加Zr元素后, 由于形核在较低的过冷度下发生, 因此形核之后晶粒长大的速度较慢, 导致固相晶粒会在较长时间的长大后才能互相干涉。

枝晶发生与其相邻晶粒的相互干涉后, 其进一步的长大会受到相邻晶粒的阻碍, 因此后续的晶粒长大主要以二次枝晶臂的长大为主, 而一次枝晶的长大并不明显, 因此合金的晶粒尺寸变化不大。若合金中发生枝晶干涉时晶粒尺寸较大而晶粒数量较少, 则对应的枝晶干涉点固相分数较低, 如图8a所示。反之, 若发生枝晶干涉时, 合金的晶粒尺寸较小, 则对应的枝晶干涉点固相分数较高, 如图8b所示。因此, 枝晶干涉点固相分数与合金的晶粒尺寸有直接关系, 通过对枝晶干涉点固相分数的分析, 可以对合金的晶粒尺寸进行预测。此外, 枝晶干涉点固相分数还与合金的晶粒形态有关, 相比于树枝晶组织, 具有近球形晶粒组织的合金发生枝晶干涉时的固相分数会更高, 如图8c所示, 因此枝晶干涉点固相分数也能在一定程度上反映合金的晶粒形态。综上, 合金的枝晶干涉点信息可以反映合金的凝固组织特征, 因此可以借助热分析的



(a) WE54-0Zr合金

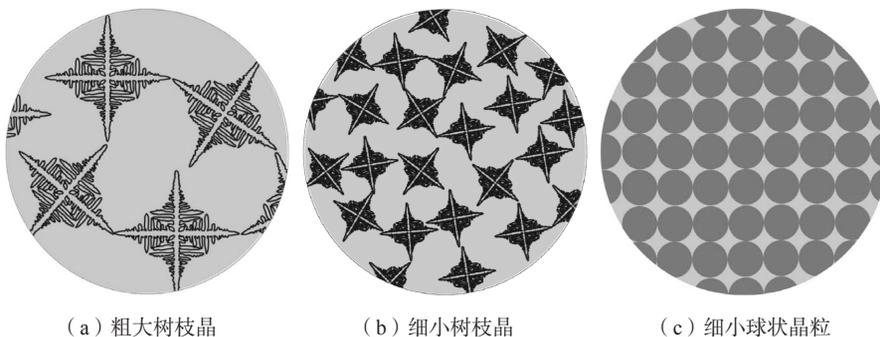
(b) WE54合金

图7 合金的EBSD显微组织

Fig. 7 EBSD microstructure of investigated alloys

表2 合金凝固过程中的特征点参数  
Table 2 Solidification characteristic parameters of alloys

合金	形核温度 ( $T_m$ )/°C	枝晶干涉点温度 ( $T_{dc}$ )/°C	$T_{dc}-T_m$ /°C	枝晶干涉点固相分数 $f_s^{dc}$
WE54-0Zr	637.5	629	8.5	0.36
WE54	645.8	630	15.8	0.51



(a) 粗大树枝晶

(b) 细小树枝晶

(c) 细小球状晶粒

图8 具有不同晶粒尺寸和形态的合金发生枝晶干涉时的组织示意图

Fig. 8 Schematic of microstructures of the alloys with different grain sizes and morphologies at dendrite coherency point

手段对合金的凝固组织乃至力学性能进行预测。而要实现这一目的,尚需要大量的试验研究工作以进一步确定合金枝晶干涉点信息与其凝固组织特征之间的具体关系。

### 2.3.2 枝晶干涉点与热裂、缩松缺陷之间的关系

作者的早期研究表明,Zr变质后,铸件的热裂倾向降低<sup>[8]</sup>,本文的研究结果也为这一结论提供了进一步佐证。根据Clyne和Davies提出的热裂判据,合金凝固后期的补缩障碍是造成热裂缺陷的关键因素,因此凝固后期是最易于产生热裂的阶段<sup>[14]</sup>。为了预测合金的热裂倾向,他们提出将合金的糊状区按照补缩难易程度分为两个阶段,即 $t_V$ (补缩不畅,可能产生热裂的阶段)和 $t_R$ (补缩充分,不会产生热裂的阶段),两者的比值可以定性地表征合金的热裂倾向 $HTS$ ( $HTS=t_V/t_R$ )。为了区分这两个阶段,通常的方法是选择某一特定固相分数(如 $f_s=0.4$ )作为两个阶段的分界点,但固相分数显然不能准确反映合金补缩的难易程度。枝晶干涉点是合金凝固过程中固相晶粒相互干涉形成连续固相骨架的特征点,因此在发生枝晶干涉之前,合金中液相的流动是比较顺畅的,属于补缩充分的阶段。发生枝晶干涉之后,连续的固相将残余液相分割成孤立的熔池,因此液相补缩比较困难。所以,使用枝晶干涉点来区分糊状区的两个阶段更加科学,即枝晶干涉点之前的阶段为补缩充分的 $t_R$ 阶段,而枝晶干涉点之后为

补缩不畅的 $t_V$ 阶段。根据本文的研究结果,经过Zr变质后,合金凝固过程中更晚发生枝晶干涉,因而处于 $t_V$ 阶段的时间明显缩短,从而可以降低合金的 $HTS$ 。缩松缺陷的形成同样与合金凝固过程后期的补缩过程有关,因此在更晚发生枝晶干涉现象的合金中,产生缩松缺陷的倾向也会有所降低。

## 3 结论

通过双热电偶热分析技术分别对Zr变质和未进行Zr变质的WE54合金的凝固过程进行了测定和分析,并通过OM和EBSD对比了两种合金的凝固组织特征。根据双热电偶热分析结果确定了两种合金凝固过程中的枝晶干涉点温度和固相分数。结果表明,未经Zr变质时,合金在凝固过程中的枝晶干涉会在比较低的固相分数(0.36)下发生,而经过Zr变质后,合金的枝晶干涉点固相分数提高至0.51。对合金的显微组织进行分析后发现,枝晶干涉点固相分数与合金的晶粒尺寸和晶粒形态有密切的关系。相比于具有细小近球形晶粒组织的合金,具有粗大树枝晶组织的合金的枝晶干涉点固相分数较低。枝晶干涉点固相分数还与合金凝固过程中各种铸造缺陷的形成过程有关,合金的枝晶干涉点固相分数越低,会导致合金在凝固过程中容易产生与补缩过程相关的热裂和缩松缺陷。

### 参考文献:

- [1] 吕孟杰,陈建勋,吴树森,等. 铈对铝硅合金变质效果的炉前快速热分析研究[J]. 铸造, 2017, 66(1): 11-15.
- [2] 徐锦锋,梁敬凡,苏锦琪,等. 无孕育蠕墨铸铁的热分析及凝固特性研究[J]. 铸造, 2019, 68(6): 593-598.
- [3] LI P, HOU D, HAN E H, et al. Solidification of Mg-Zn-Zr alloys: grain growth restriction, dendrite coherency and grain size [J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters 2020, 33(11): 1477-1486.
- [4] NAGHDALI S, JAFARI H, MALEKAN M. Cooling curve thermal analysis and microstructure characterization of Mg-5Zn-1Y-xCa (0-1wt%) alloys [J]. Thermochemica Acta 2018, 667: 50-58.
- [5] VELDMAN N L M, DAHLE A K, STJOHN D H, et al. Dendrite coherency of Al-Si-Cu alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science 2001, 32(1): 147-155.
- [6] GHONCHEH M H, SHABESTARI S G. Effect of cooling rate on the dendrite coherency point during solidification of Al2024 alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science 2015, 46A(3): 1287-1299.
- [7] 陈荣石,周波,李吉林,等. 铸造高强耐热Mg-Y-Nd(-Gd)-Zr和Mg-Gd-Y-Zr系镁合金组织性能和铸造缺陷对比[J]. 铸造, 2021, 70(1): 15-20.
- [8] LI J, CHEN R, MA Y, et al. Hot tearing of sand cast Mg-5wt.%Y-4wt.% RE (WE54) alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters 2013, 26(6): 728-734.
- [9] LI J, CHEN R, MA Y, et al. Characterization and prediction of microporosity defect in sand cast WE54 alloy castings [J]. Journal of Materials Science & Technology 2014, 30(10): 991-997.
- [10] BACKERUD L, CHAI G, TAMMINEN J. Solidification characteristics of aluminum alloys [J]. Foundry Alloys 1990, 2: 71-84.
- [11] SUDHEER R, PRABHU K N. A computer aided cooling curve analysis method to study phase change materials for thermal energy storage applications [J]. Materials and Design 2016, 95: 198-203.

- [12] 周天, 袁杰, 马爱纯. 基于相变线源解的固液热导率测量方法及其影响因素分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (1): 276-284.
- [13] BARLOW J O, STEFANESCU D M. Computer-aided cooling curve analysis revisited [J]. Transactions of the American Foundry Society, 1997 (5): 349-354.
- [14] CLYNE T W, DAVIES G J. The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems [J]. British Foundryman 1981, 74: 65-73.

---

## Dendrite Coherency Point of WE54 Magnesium Alloy and Its Relation with Solidification Microstructure

LI Ji-lin, FENG Jun-ning, QIN Chun, DONG Fu-yuan

(School of Materials Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

### Abstract:

The present research mainly investigated the dendrite coherency point of WE54 alloy (with and without Zr modifications) using thermal analysis method. The relationship between alloy microstructure and solid fraction at dendrite coherency point ( $f_s^{dc}$ ) was evaluated, and the effects of the fsdc on hot tearing susceptibility and shrinkage porosity tendency were discussed. The results show that, compared with the Zr-modified WE54 alloy, solid dendrites nucleated at higher undercooling degree during solidification of unmodified alloy, and the dendrites grow rapidly until the dendrite coherency occurred at relatively lower solid fraction (0.36). The microstructure of the unmodified alloy was composed of coarse dendrites. When modified with Zr, the fsdc increased to 0.51, and the microstructure of the WE54 alloy was significantly refined, consisting of fine globular grains. It was concluded from the results that the fsdc closely related with grain size and dendrite morphology of the alloy. The dendrite coherency point also reflects liquid feeding behavior during solidification. If the solid dendrites contacted with each other at lower solid fraction, the alloy may endure a long lack-of-feeding period during solidification, thereby increases hot tearing susceptibility and shrinkage porosity tendency of the alloy.

### Key words:

magnesium alloy; dendrite coherency point; thermal analysis; microstructure