

自孕育剂参数对自孕育铸造法制备 AM60 镁合金 半固态浆料的影响(II)

李元东^{1,2}, 杨建¹, 马颖^{1,2}, 曲俊峰¹, 张鹏¹

- (1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 采用加入与母合金液具有相同成分的自孕育剂方法, 研究孕育剂参数(孕育剂加入方式、孕育剂尺寸、孕育剂加入量和孕育剂组织)对 AM60 镁合金组织细化的影响。结果表明: 加入自孕育剂后, 熔体经导流器浇注到铸型中, 可以明显细化 AM60 镁合金的组织。当孕育剂加入量为 11%(质量分数)时, 效果最好, 平均晶粒尺寸仅为 43.4 μm , 且分布均匀。孕育剂的原始组织对合金凝固组织有明显的影响, 孕育剂本身的组织越细小, 合金凝固组织越细小。孕育剂的加入使合金液中形成大的能量起伏和成分起伏, 在合金凝固过程中起到吸热、形核、促进凝固和阻止二次相连续长大的作用, 有助于形成细晶组织。

关键词: AM60 镁合金; 孕育剂; 自孕育法; 组织细化; 半固态

中图分类号: TG249; TG146.2

文献标志码: A

Effect of inoculant parameters on AM60 Mg alloy semisolid slurry prepared by self-inoculation method (II)

LI Yuan-dong^{1,2}, YANG Jian¹, MA Ying^{1,2}, QU Jun-feng¹, ZHANG Peng¹

- (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing,

Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The self-inoculant with the same composition as the melt of alloy was introduced into the melt. The effects of the inoculant parameters, such as addition method, particle size, addition amount and precursor microstructure, on grain refinement were investigated. The results indicate that the grain size of AM60 alloy is refined when the self-inoculant is introduced into the melt, and then the melt passes through a special cooling channel. A average grain size of 43.4 μm is gained when the addition amount of inoculants is up to 11% (mass fraction). The precursor microstructure of self-inoculants affects final solidification microstructure visibly of AM60 alloy. The smaller the microstructure of self-inoculant is, the better the final solidification microstructure is. The inoculant increases the thermal and constitutional fluctuation, and plays a role of heat absorption, nucleation, acceleration solidification during solidification of AM60 alloy, which is helpful for the formation of grain refining microstructure.

Key words: AM60 magnesium alloy; inoculant; self-inoculation method; grain refinement; semi-solid state

在半固态发展初期, 人们一致认为必须将液态金属冷却到两相区, 形成树枝晶, 然后, 通过机械或电

磁搅拌将树枝晶剪切、打碎来生产半固态浆料^[1-2]。近期的研究工作发现, 不需要通过打碎树枝晶来获得球

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613700); 甘肃省国际科技合作计划资助项目(090WCGA894); 兰州理工大学博士科研启动基金资助项目(SB01200701)

收稿日期: 2009-12-03; **修订日期:** 2010-02-24

通信作者: 李元东, 教授, 博士; 电话: 0931-2976795; E-mail: liyd_lut@163.com

形 α 相的半固态组织。相反, 如果熔体的温度适合产生很多晶核, 并且超过一定的温度晶核不会生长也不会溶于液态, 就可以利用直接从熔体中获得半固态结构的方法来生产浆料^[3]。随后, 国内外学者相继开发出了新型的无搅动制浆技术, 如 SRC^[4]、CRP^[5]、NRC^[6]、CDS^[7]、倾斜冷却板(管)法^[8-12]、SEED^[13]和 Sibloy 法^[14]。与搅拌法相比, 这些方法更加简捷、灵活, 符合成本效益的要求。

作者在多年研究后, 提出自孕育法的概念(Self-inoculation method, 简称 SIM 法)^[15]。此方法中, 加入的孕育剂为与母合金液具有相同成分的自孕育剂, 不要特别加工。导流器可以起到倾斜冷却板的作用, 破碎枝晶, 促进熔体形核并抑制其长大, 从而得到理想的组织。自孕育法技术工艺简单, 生产成本低, 适合各种合金, 可以成形复杂铸件, 还可以直接与冷室压铸机相连进行半固态成形, 而不需要安装其他特殊装置。

影响自孕育法铸造过程及组织的主要因素有熔体温度、孕育剂、导流器和模具等。作者以前主要研究了浇注温度对自孕育铸造法制备 AM60 镁合金半固态浆料的影响^[16], 在此, 研究孕育剂加入方式、尺寸、加入量、组织对采用自孕育铸造法制备 AM60 镁合金半固态浆料的影响。

1 实验

本实验采用商用 AM60 镁合金铸锭, 其液相线温度为 618 ℃, 共晶温度为 433 ℃, 其成分如表 1 所列。

表 1 AM60 化学成分
Table 1 Chemical compositions of AM60 alloy(mass fraction, %)

Al	Mn	Zn	Si	Cu	Fe	Mg
5.6~6.4	0.17~0.40	0.2	0.08	0.008	0.004	Bal.

将 AM60 镁合金锭料在井式坩锅电阻炉中熔炼, 待金属全部熔化后, 开始测温。当熔体温度达到 720 ~ 725 ℃后, 用 1.5%~2.0% C₂Cl₆ 进行精炼除气, 调整金属液温度到 710~720 ℃时直接浇注到 3 种不同的金属型模具中, 自然冷却后制备出 d 70 mm×150 mm、 d 45 mm×150 mm、 d 15 mm×150 mm 铸锭, 然后将每组铸锭都相应加工成 10 mm×10 mm×10 mm 和 5 mm×5 mm×5 mm 的金属块作为孕育剂待用。

同前熔炼方法, 调整熔体温度为 650 ℃, 实验分为 4 组:

- 1) 孕育剂加入方式分为直接加入到金属液中(M1)和将孕育剂均匀置于浇口杯内的过滤网上(M2)(见图 1);
- 2) 孕育剂尺寸分别为 5 mm×5 mm×5 mm (S1)和 10 mm×10 mm×10 mm (S2);
- 3) 孕育剂加入量分别为熔体质量的(质量分数) 5%、7%、9%、11%、13%;
- 4) 将前面浇铸不同直径孕育剂铸锭分为 3 种, (SI-1)、(SI-2) 和(SI-3)(见表 2)。

加入不同组织的孕育剂到同种成分 AM60 镁合金的熔体中, 所有实验都浇铸成 d 15 mm×150 mm 的试样, 实验条件参数如表 3 所列, 实验流程如图 2 所示。

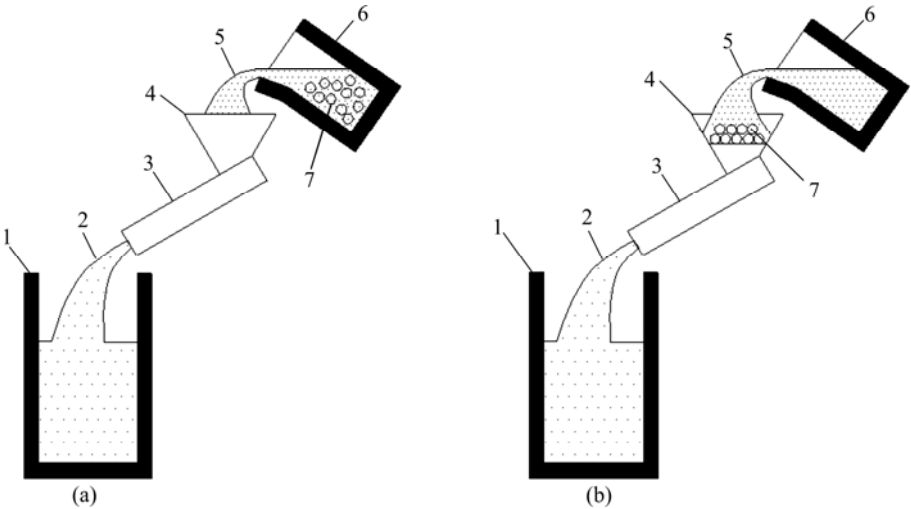


图 1 不同方式加入孕育剂的浇注示意图
Fig.1 Schematic diagrams of adding methods of inoculant: (a) Adding into melt (M1); (b) Adding into filter (M2) (1—Mould; 2, 5—melt; 3—Cooling channel; 4—Pouring cup; 6—Crucible; 7—Inoculant)

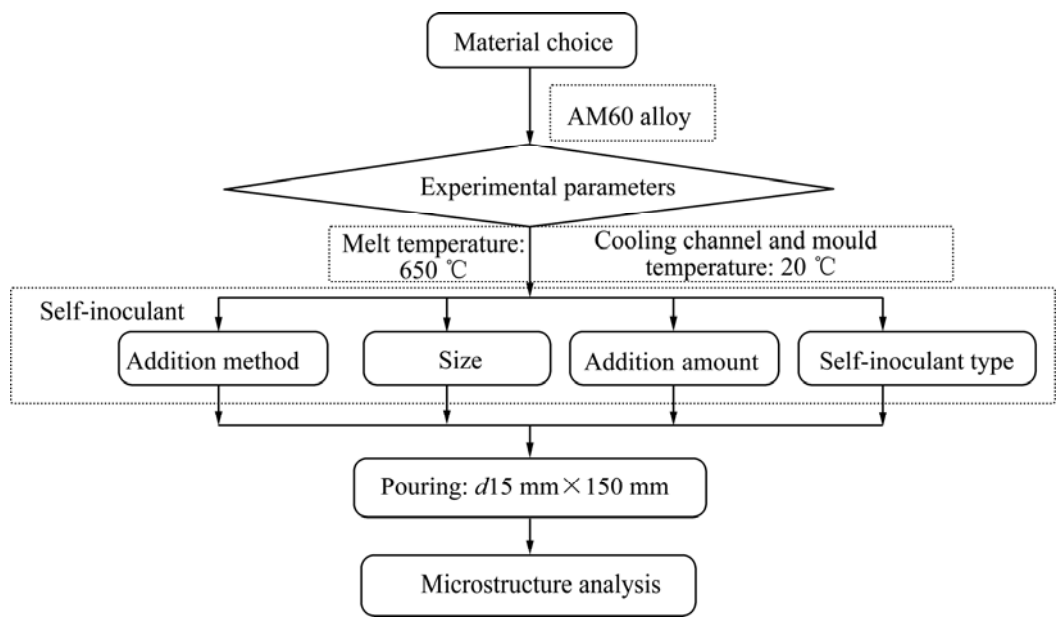


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental flow chart for this work

表 2 孕育剂类型

Table 2 Self-inoculant types

Self-inoculant type	Source
SI-1	Ingot, $d70\text{ mm}\times150\text{ mm}$
SI-2	Ingot, $d45\text{ mm}\times150\text{ mm}$
SI-3	Ingot, $d15\text{ mm}\times150\text{ mm}$

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

Experiment No.	Classification (inoculant)			
	Addition method	Size type	Addition amount/%	Self-inoculant type
1	M1	S1	5	SI-3
2	M2	S1	5	SI-3
3	M1	S2	5	SI-3
4	M1	S1	7	SI-3
5	M1	S1	9	SI-3
6	M1	S1	11	SI-3
7	M1	S1	13	SI-3
8	M1	S1	11	SI-1
9	M1	S1	11	SI-2

制样、固溶处理后采用 Image Pro 软件测定各晶粒尺寸与分布,用 MEF-3 光学显微镜观察其组织形貌。

2 实验结果

2.1 孕育剂的加入方式对坯料组织的影响

孕育剂的加入方式直接影响孕育剂在熔体中的均匀性和熔体的冷却速率。实验中采用 2 种方式加入,一种是将孕育剂加入到盛载金属熔体的坩锅中(见图 1(a)),另一种是将孕育剂均匀置于浇口杯内的钢丝网上,然后将金属熔体进行浇注(见图 1(b)),其他参数相同,即孕育剂尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm,孕育剂加入量为 5%,孕育剂组织为 SI-3。

图 3 所示为不同孕育剂加入方式下浇注试样的铸态组织。其中:图 3(a)所示的为第 1 种加入方式,图 3(b)所示的为第 2 种加入方式。图 3(a)中没有出现明显的树枝晶,晶粒呈不规则的多边形;而在图 3(b)中,可以看到树枝晶但是枝晶臂较细,且相互连接构成网状。固溶处理后测得对应晶粒的等积圆平均直径分别为 62.2 μm 和 73.1 μm。

当孕育剂加入到金属熔体中时,孕育剂吸收了金属熔体的大量热量,使熔体中产生大量晶核而达到快速凝固效果;合金中无枝晶形成或已经形成细小枝晶,但无法长大。当以第 1 种方式加入熔体时,孕育剂可以充分和熔体均匀混合,由于熔体的表面张力,使孕育剂可以悬浮于熔体内部,充分激冷熔体;当采用第 2 种加入方式时,加入孕育剂后金属熔体流经导流器上端的浇口杯,液面不能全部淹没孕育剂,只有少量

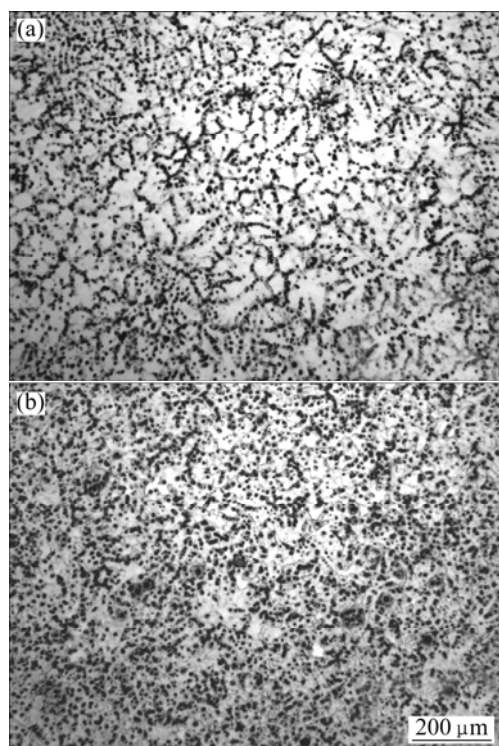


图 3 不同的孕育剂加入方式下浇注坯料的铸态组织

Fig.3 Microstructures of as-cast AM60 alloys by different addition methods: (a) M1; (b) M2

的孕育剂起到冷却作用, 导致熔体的冷却速率小, 瞬间产生的晶核也很少, 同时熔体的温度场不均匀, 没有接触孕育剂的熔体温度高, 使一些初生晶核被重新熔化, 失去孕育作用, 晶粒尺寸较大。

2.2 孕育剂尺寸对坯料组织的影响

加入的孕育剂颗粒尺寸有 2 种: $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 和 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。其他参数相同, 即孕育剂加入方式为直接加入到金属液, 孕育剂加入量为 5%, 孕育剂为 SI-3。

图 4 所示为采用颗粒尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 孕育剂制备的坯料铸态组织。颗粒尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 孕育剂所制备坯料的铸态组织见图 3(a)。根据固溶处理后试样的金相照片, 测得晶粒的平均等积圆平均直径分别为 $62.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $77.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

在自孕育法铸造中, 孕育剂的颗粒尺寸直接影响到浇注坯料的组织。理论上讲, 孕育剂颗粒越细小, 则孕育剂表面积越大, 短时间内和熔体的接触面积越大, 熔体的冷却速度就越大, 导致熔体内瞬间形核多, 提高了形核率, 最终成形坯料的晶粒尺寸小, 晶粒分布均匀; 并且, 越细的颗粒加入到熔体中, 孕育剂越分散, 能更均匀地分布在熔体中: 因此, 比颗粒大的

孕育剂所制得的坯料更好。但是, 当孕育剂颗粒过小时, 加入到熔体中后不能悬浮于熔体中, 而是漂浮于熔体表面, 使大部分孕育剂不起作用。孕育剂颗粒过大, 孕育剂单个质量大, 加入到熔体中, 熔体的表面张力不能使孕育剂悬浮于熔体中, 在重力作用下沉到熔体底部, 不能使熔体均匀冷却, 同时、由于作用时间短, 不能更好地冷却熔体, 熔体的冷却速率低, 导致组织不均匀, 制备的坯料质量差, 晶粒较大。所以, 实验中最终选择孕育剂的颗粒尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。

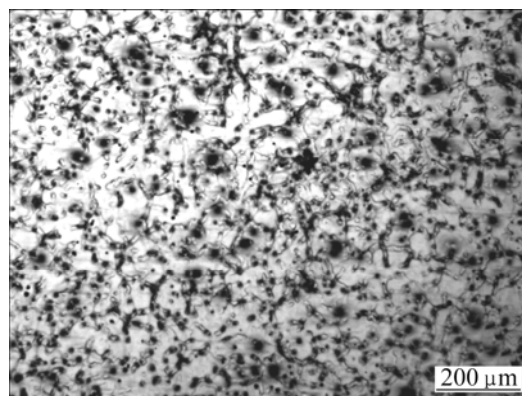


图 4 加入 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 孕育剂浇注坯料的铸态组织

Fig.4 Microstructure of as-cast AM60 alloy with self-inoculant of $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$

2.3 孕育剂的加入量对坯料组织的影响

孕育剂的加入量主要影响熔体的温度和过冷度。加入量过少不能使熔体温度降低到液相线附近, 不能形成有效的形核; 加入量过大, 使熔体温度太低, 流动性差, 充型困难。实验采用的孕育剂加入方式为直接加入到金属液, 孕育剂颗粒尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$, 孕育剂为 SI-3, 调整孕育剂加入量分别为 7%、9%、11%、13%。

图 5 所示为加入不同量孕育剂制备的坯料铸态组织和固溶处理后的组织。结合图 3(a)(孕育剂加入量为 5%)可以看出, 随着加入量的增多, 组织中主要形成了蔷薇状和块状晶粒, 当孕育剂占熔体质量 11% 时, 效果最好, 晶粒细小; 从固溶处理后的组织直观看出, 此时的晶粒尺寸最小且分布均匀。

加入不同量孕育剂浇注坯料的平均晶粒尺寸如图 6 所示。从图 6 可以看到, 当孕育剂加入量为 11% 时, 晶粒的平均尺寸为 $43.4\text{ }\mu\text{m}$, 且晶粒在 $20\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ 的数量占 75% 左右。

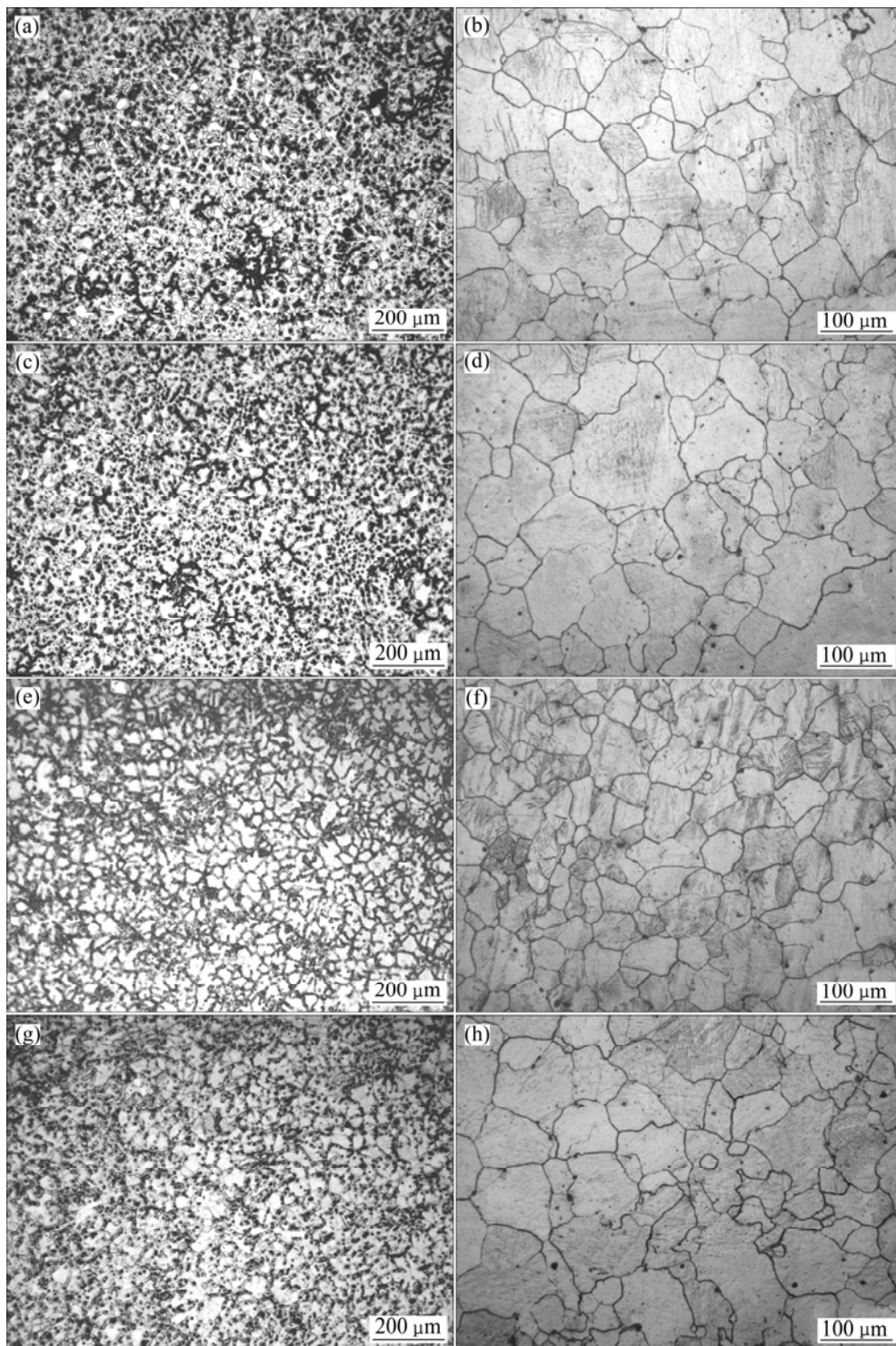


图 5 加入不同量孕育剂 SI-3 浇注坯料的铸态组织和固溶处理后的组织

Fig.5 Microstructures of as-cast (a, c, e, g) and solid-solution treated AM60 alloys (b, d, f, h) with various addition amounts of self-inoculant SI-3: (a), (b) 7%; (c), (d) 9%; (e), (f) 11%; (g), (h) 13%

当孕育剂加入量小时, 熔体的温度较高, 热量散失时间较长, 冷却对晶粒长大的抑制作用较小, 晶粒长大成树枝晶的概率增加, 自孕育法中导流器的剪切力小, 不能很好地剪断枝晶臂, 从而又减小了游离晶

核, 使晶粒不能充分细化; 当孕育剂加入量大时, 使熔体很快冷却到液相线, 缩短熔体的冷却时间, 使得冷却对抑制晶粒长大的作用增强, 晶粒不能充分长大。同时, 在导流器壁上长大的晶粒枝晶也很细小, 易被

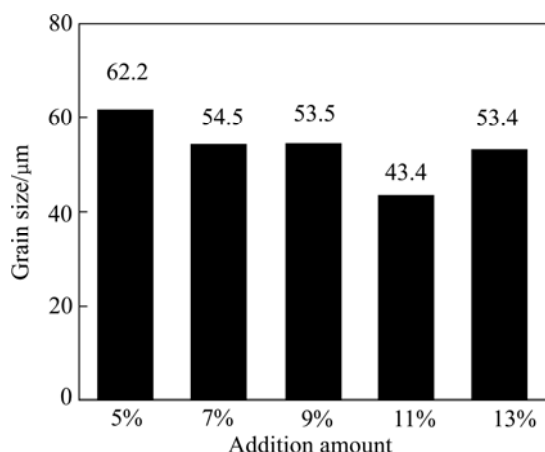


图 6 加入不同量孕育剂 SI-3 浇注坯料的平均晶粒尺寸

Fig.6 Average grain size of AM60 alloys with various addition amounts of self-inoculant SI-3

导流器的剪切力剪断从而增加游离晶核,使晶核增殖,也使后期晶粒更细小、更均匀。导流器的主要作用是剪切断在导流器壁上瞬间形成的细枝晶臂,导致熔体中瞬间晶核增殖。当孕育剂量加入量过大时,如加入量为 13%时,熔体温度降低太大,影响其流动性,出现浇不足,大部分熔体凝固在导流器中,少量的熔体

进入到铸型中,由于熔体温度低,其在坩锅中已有大部分形核、长大,导流器的剪切作用对此时的熔体中的枝晶不起作用,制备的坯料晶粒反而变大。因此,孕育剂加入量选择 11%为宜。

2.4 不同组织的孕育剂对铸态组织的影响

本实验采用自孕育方法在 650 °C 浇注,孕育剂加入方式为直接加入到金属液,孕育剂颗粒尺寸采用 5 mm×5 mm×5 mm,孕育剂加入量为 11%。

坯料的铸态组织和固溶处理后的显微组织如图 7 所示。由图 7 可以看出,铸态组织中都没有树枝晶,但能观察到枝晶臂断裂的痕迹,组织都是由细小的蔷薇状晶粒组成。从固溶处理后的金相照片可以观察到,孕育剂的组织对制备的坯料组织有很大影响。加入 SI-1 孕育剂制备的坯料其晶粒的平均尺寸较大,为 56.8 μm,加入 SI-2 孕育剂制备的坯料的平均晶粒尺寸为 47.4 μm,加入 SI-3 孕育剂制备的坯料的平均晶粒尺寸为 43 μm。图 8 所示为加入不同种孕育剂浇注坯料的晶粒尺寸分布。从图 8 可以看出,加入孕育剂 SI-1 和 SI-2 所制得的坯料,都有尺寸为 100~160 μm 的晶粒存在,而在加入 SI-3 孕育剂所制备的坯料中没有,可见,这种工艺下制备的坯料晶粒分布更均匀。

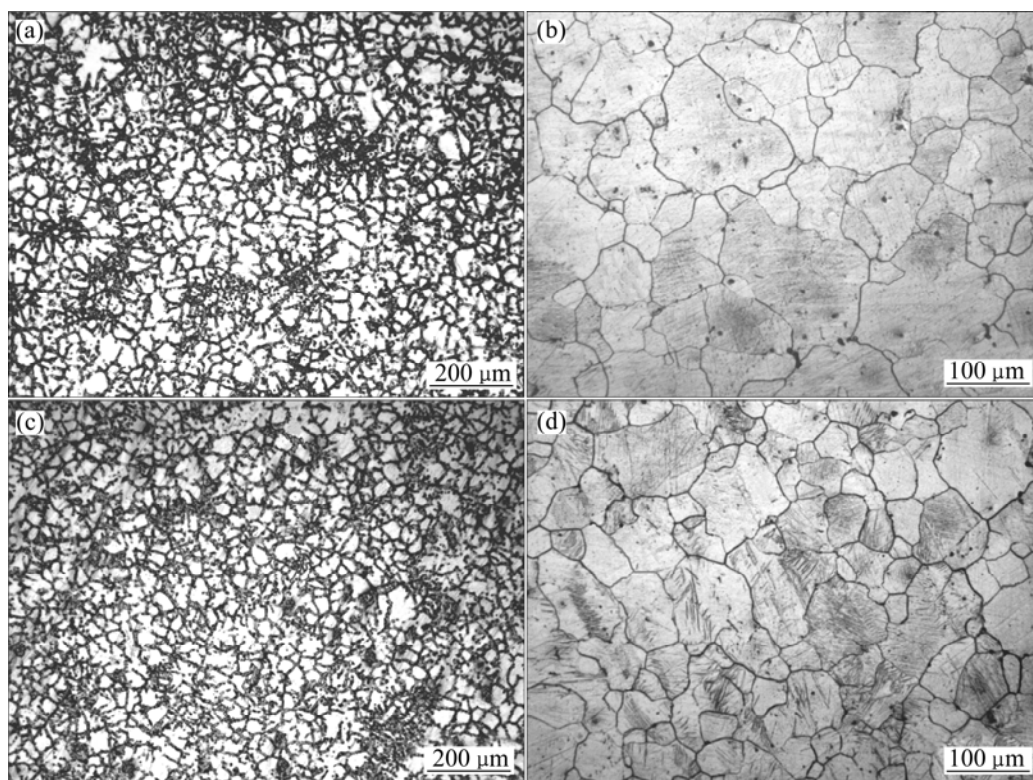


图 7 加入不同孕育剂制得的 AM60 合金的铸态组织和固溶处理后的显微组织

Fig.7 Microstructures of as-cast (a, c) and solid-solution treated (b, d) AM60 alloys with various types of self-inoculants: (a), (b) SI-1; (c), (d) SI-2

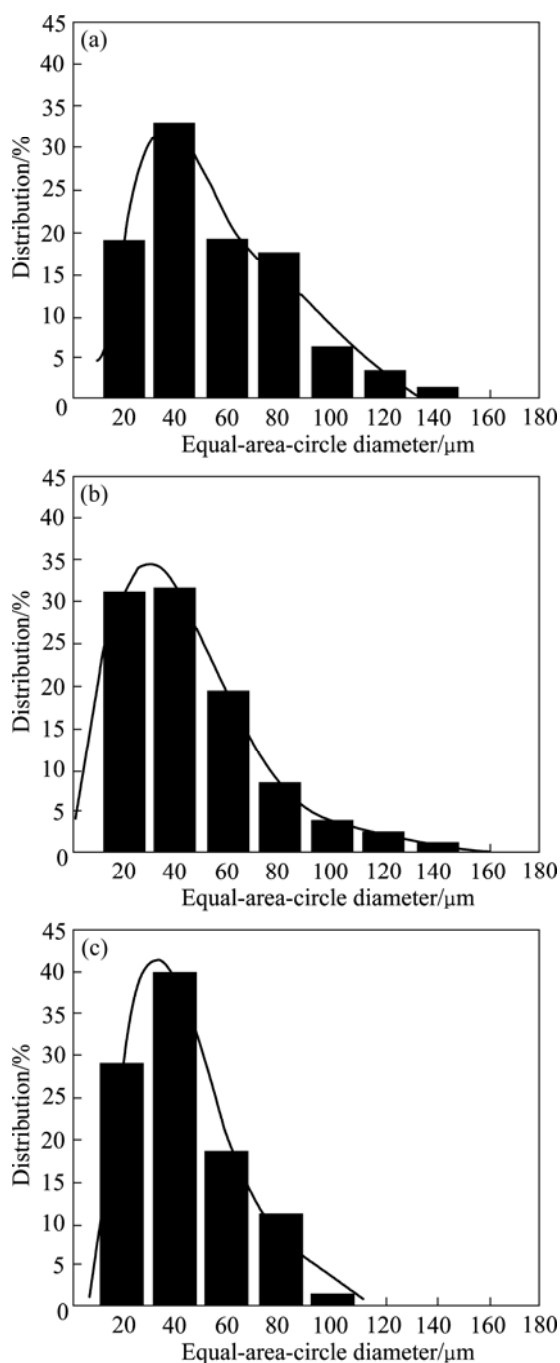


图 8 加入不同孕育剂浇注坯料的晶粒尺寸分布

Fig.8 Grain size distribution of samples with various types of self-inoculants: (a) SI-1; (b) SI-2; (c) SI-3

根据金属的遗传性,合金的原始组织对凝固后铸锭的组织有明显的影响^[17]。本实验中,不同组织的孕育剂对实验后的组织起到了同样的作用。孕育剂 SI-1, SI-2 和 SI-3 的锭料直径不同,其凝固速率也不同,随着孕育剂锭料直径的减小,对应的晶粒尺寸逐渐减小。因此,在加入孕育剂后,孕育剂部分熔化,使得后期成形的自孕育铸件的组织晶粒也相应地变小。

3 讨论

自孕育铸造法考虑了合金凝固过程中组织控制的原理:控制热学条件、孕育处理、动态结晶,因此具有这些组织控制的共同特点。理论上,当把 2 个一定成分和温度的合金混合在一起时会发生:1) 混合后的合金经过传导和对流使热量重新分配,最后达到热平衡;2) 通过界面的质量扩散达到化学平衡;3) 合金液在导流器内的流动过程中发生晶粒增殖,抑制晶粒生长,防止初生相再熔化。通过控制合金凝固过程中形核与长大过程达到获得半固态非枝晶浆料的目的。

由于孕育剂与金属液的化学成分相同,晶体结构也相同,因此,与金属液有良好的浸润性。当加入到过热的金属液中时,相当于加入内冷铁,增大了合金液的过冷度,从而使合金的凝固方式发生改变,枝晶来不及长大,在导流器的共同作用下,网状共晶组织的析出量减少而形成大量的等轴晶,甚至颗粒晶或蔷薇状晶粒。加入孕育剂后,使合金液中形成了大的能量起伏和成分起伏,也促使细晶组织的形成。

加入的孕育剂与金属液化学成分相同,与悬浮铸造中冷却剂相似。在悬浮铸造过程中,冷却剂在合金凝固的过程中起到吸热、形核、促进凝固和阻止二次相的连续长大的作用,从而细化晶粒并优化合金的微观组织结构^[18]。因此,孕育剂起到内冷铁作用,吸收合金液的热量,加快熔体的冷却速率,使金属液整体产生一个过冷度,在此过冷度下合金液中原子集团的稳定性得到提高。在整个合金液中,这些原子集团开始形成晶核并进一步长大;同时,激冷作用使熔体中瞬间产生大量晶核,增加了熔体的形核率。在孕育剂加入合金液的瞬间,孕育剂周围熔体温度迅速降至液相线或以下(见图 9),容易在孕育剂周围形成一个凝固壳层。随着孕育剂与合金液热量的交换,凝固壳又熔化形成原子集团,当达到一定的过冷度后,这些原子集团就会聚合长大而形成大量的结晶核心。

DAS 等^[19-20]采用 Monte Carlo 对外力作用下凝固过程进行模拟后认为,液体流动对合金凝固过程中初生相的形成有明显的影响,强调金属液内的固相颗粒的旋转导致了蔷薇状初生固相颗粒的形成,从而认为在紊流作用下将有利于球状晶的形成。吴树森等^[21-22]和 APELIAN 等^[23]研究表明,液相混合过程中紊流是不可避免的,因此认为一旦固相在液体中形核,新形成的晶核必然受到紊流的作用,倾向于生长成为球状,并且在凝固速度保持一定的条件下,随着液相运动速

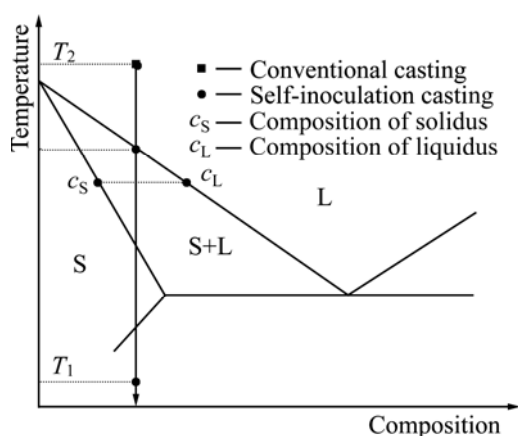


图9 自孕育铸造方法的原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of self-inoculation method

度的加快,晶粒形状系数逐渐增大,晶粒由枝晶状向球状转变;而在液相运动速度一定的条件下,凝固速度越大,晶粒形状系数越小,晶粒倾向于成为枝晶状。APELIAN 等^[23]对液相混合扩散凝固过程进行理论分析认为,紊流作用满足了球状晶形成的条件。因此,本文作者认为,加入孕育剂后,随后引入导流器产生紊流,加速了熔体的冷却及孕育剂和合金母液的混合,促进晶粒增殖、加强自孕育效果(二次自孕育)、抑制晶粒长大,有利于非枝晶组织的形成。

4 结论

1) 以直接加入到金属熔体的方式加入孕育剂,然后经导流器浇注到铸型中,所获得铸坯的铸态组织晶粒细小、分布均匀,制备的坯料的晶粒尺寸为 $62.2\ \mu\text{m}$ 。

2) 加入大颗粒的孕育剂制备的半固态浆料组织,晶粒粗大、不均匀;而加入的小颗粒孕育剂,均匀、弥散在金属熔体中,熔体温度均匀,获得的合金组织晶粒细小、均匀。

3) 随着孕育剂加入量的增加,通过自孕育法获得的铸坯组织晶粒均匀、细小,呈多边形,当孕育剂加入量为 11% 时,效果最好,平均晶粒尺寸仅为 $43.4\ \mu\text{m}$,且分布均匀。

4) 孕育剂原始组织对合金凝固组织有明显影响,孕育剂本身的组织越细小,合金凝固组织越细小。在合适的孕育剂加入方式、颗粒尺寸和加入量的条件下,加入 SI-3 孕育剂所获得的半固态浆料组织的平均晶粒尺寸小。

5) 孕育剂在合金凝固过程中起到吸热、形核、促进凝固和阻止二次相的连续长大的作用,有利于非枝晶组织的形成。

REFERENCES

- [1] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1991, 22(5): 957-981.
- [2] FAN Z. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 2002, 47(2): 49-85.
- [3] FINDON M M. Semi-solid slurry formation via liquid metal mixing[D]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2003.
- [4] HELMUT K, UGGOWITZER P J. Metallurgy and processing of high-integrity light metal pressure castings[J]. Aluminium, 2007, 83(7/8): 96-97.
- [5] PAN Q Y, FINDON M, APELIAN D. The continuous rheoconversion process (CRP): A novel SSM approach[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. Limassol: North American Die Casting Association, 2004.
- [6] KAUFMANN H, WABUSSEG H, UGGOWITZER P J. Metallurgical and processing aspects of the NRC semi-solid casting technology[J]. Aluminum, 2000, 76(1/2): 70-75.
- [7] KIMON S. The controlled diffusion solidification process: fundamentals and principles[D]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2009.
- [8] TOSHIO H, KAPRANOS P. Billetss simple thixoforming process[J]. Journal of Materials processing Technology, 2002, 130/131: 581-586.
- [9] XIE Shui-sheng, YANG Hao-qiang, WANG Hao. Damper cooling tube method to manufacture semisolid slurry of magnesium Alloy[C]//The 8th S2P International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. Limassol: North American Die Casting Association, 2004.
- [10] YANG Xiao-rong, MAO Wei-min, PEI Sheng. Influence of process parameters on microstructure of semisolid A356 alloy slug cast through vertical pipe[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(1): 99-103.
- [11] 管仁国, 李江委, 李喜坤, 石路, 陈礼清. AZ91D 镁合金波浪型倾斜板振动技术触变成形[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(11): 1798-1802.
- [12] GUAN Ren-guo, LI Jiang-wei, LI Xi-kun, SHI Lu, CHEN Li-qing. Thixoforming of AZ91D magnesium alloy by vibrating wavelike sloping plate process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(11): 1798-1802.
- [13] 杨小容, 毛卫民, 高冲. 采用蛇形管通道浇注法制备半固态浆料[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 869-873.
- [14] YANG Xiao-rong, MAO Wei-min, GAO Chong. Preparation of semi-solid feedstock by serpentine pipe pouring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5): 869-873.
- [15] DOUTRE D, LANGLAIS J, ROY S. The SEED process for semi-solid forming[C]//Proceeding of 8th International

- Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Limmasol: North American Die Casting Association, 2004.
- [14] PAN Q Y, ARSENAULT M, APELIAN D, MAKHLOUF M M. SSM processing of AlB_2 grain refined Al-Si alloy[J]. Transactions of the American Foundry Society, 2004, 112: 273–287.
- [15] 李元东, 杨建, 马颖. 自孕育半固态制浆技术的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(3): 227–230.
LI Yuan-dong, YANG Jian, MA Ying. Study on self-inoculation method for semi-solid slurry preparation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(3): 227–230.
- [16] 李远东, 杨建, 马颖, 曲俊峰, 张鹏. 浇注温度对自孕育铸造法制备 AM60 镁合金半固态浆料的影响(I) [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(6): 1046–1052.
LI Yuan-dong, YANG Jian, MA Ying, QU Jun-feng, ZHANG Peng. Effect of pouring temperature on AM60 Mg alloy semi-solid slurry prepared by self-inoculation method (I), 2010, 20(6): 1046–1052.
- [17] 边秀房, 刘相法, 马家骥. 铸造金属遗传学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1999.
BIAN Xiu-fang, LIU Xiang-fa, MA Jia-ji. The heredity of casting metal[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1999.
- [18] 任政, 张兴国, 房灿峰, 郝海. 电磁一悬浮铸造对变形镁合金晶粒细化的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(5): 491–495.
REN Zheng, ZHANG Xing-guo, FANG Can-feng, HAO Hai. Effect of electromagnetic suspension casting on grain refinement for wrought magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(5): 491–495.
- [19] DAS A, JI S, FAN Z. Morphological development of solidification structures under forced fluid flow: A Monte Carlo simulation[J]. Acta Materialia, 2002, 50: 4571–4585.
- [20] DAS A, FAN Z. A Monte Carlo simulation of solidification structure formation under melt shearing[J]. Materials Science and Engineering A. 2004, 365(1/2): 330–335.
- [21] WU Shu-sen, WU Xue-ping, XIAO Ze-hui. A model of growth morphology for semi-solid metals[J]. Acta Materialia, 2004, 52(12): 3519–3524.
- [22] 吴树森, 吴雪平, 肖泽辉, 李东南, 罗吉荣. 半固态金属组织的形成模型及模拟[J]. 金属学报, 2004, 40(4): 95–99.
WU Shu-sen, WU Xue-ping, XIAO Ze-hui, LI Dong-nan, LUO Ji-rong. A formation model and simulation of microstructure of semi-solid metals[J]. Acta Metallurgica Sinica. 2004, 40(4): 95–99.
- [23] APELIAN D, MAKHLOUF M M, SAHA D. CDS method for casting aluminum-based wrought alloy compositions: theoretical framework[J]. Materials Science Forum, 2006, 519/512: 1771–1776.

(编辑 杨华)