

电磁搅拌和 Ce 含量对半固态 A356 合金组织与成分影响

罗浩林
(江西交通职业技术学院)

摘 要 利用电磁搅拌和稀土细化剂制备了不同 Ce 含量的 A356 铝合金半固态浆料,对比了电磁搅拌对稀土 Ce 分布的影响,分析稀土 Ce 在半径方向上的分布。结果表明,添加 1.0% 的 Ce 时合金晶粒细化效果最好,大多数晶粒呈等轴晶,电磁搅拌能显著影响 Ce 的分布,在金属熔体最大旋转速度处稀土产生微观偏聚,能使 Ce 分布更加均匀,减少宏观偏析。

关键词 电磁搅拌;铝稀土化合物;偏聚

中图分类号 TG146;TG244;TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.020 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Electromagnetic Stirring and Ce Addition on Microstructure and Composition Distribution in Semi-solid A356 Alloy

Luo Haolin
(Jiangxi Vocational and Technical College of Transportation)

Abstract: Electromagnetic stirring and rare earth refiner were applied to prepare semi-solid slurry of A356 aluminum alloy with different Ce content. The effects of electromagnetic stirring on the Ce distribution were analyzed comparatively, and Ce content variation along the radius direction was analyzed. The results indicate that the alloy has a desirable refinement effect with the Ce addition of 1.0%, where the most grain shape present equiaxed structure. The electromagnetic stirring can seriously influence distribution of rare earth element, and the rare earth microsegregation occurs at the maximum rotation rate of the metal melt, thus making the rare earth atoms distributed more evenly and reducing macrosegregation.

Key Words: Electromagnetic Stirring, Aluminum Rare Earth Compound, Segregation

电磁搅拌能产生洛伦兹力,使金属熔体由定向平流向在立体上的紊流转变,使温度和浓度分布更均匀,从而减轻偏析和中心缩孔,同时也能改善杂质元素的分布,增加异质形核质点,使晶粒由柱状晶向等轴晶转变,细化微观组织^[1~4]。电磁搅拌改变了原有的平衡凝固方式,对溶质原子的扩散与分布产生重要影响,已在半固态铝合金制备中广泛应用^[5,6]。陈涛等^[7]研究了电磁搅拌对添加 0.5% 的 Ce 的半固态 A356 凝固组织的影响,发现在 30 Hz 频率双向搅拌作用下,合金晶粒细化效果最好。邓可月等^[8]研究了电磁搅拌作用下稀土对 A356 铝合金的影响,发现稀土在电磁场的作用下容易在边缘和中心处偏聚。本课题研究了电磁搅拌作用下不同 Ce 添加量的半固态 A356 铝合金的组织与 Ce 元素分布,并了解在电磁搅拌下,初生 α -Al 相的形貌和 Ce 的聚集状态及分布情况。

1 试验材料及方案

试验材料为 A356 铝合金,其化学成分见表 1。

表 1 A356 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A356 alloy										%
ω_B										
Si	Mg	Fe	Ti	Zn	Mn	S	Zr	Cu	Al	
7.14	0.33	0.135	0.023	0.021	0.012	0.011	0.004	0.002	余量	

合金熔炼采用 SG2-3-10 型坩埚电阻炉,熔炼前先将石墨坩埚放入电阻炉中进行干燥预热,然后把 A356 铝合金加入到预热的坩埚中,迅速将电阻炉升温至 700℃,待合金完全熔化后,撒入适当的覆盖剂(NaCl 和 KCl 各 50%),静置 5 min 后扒渣。然后添加 C_2Cl_6 精炼剂精炼,5 min 后去除熔体表面杂质,同时加入 Al-15Ce 中间合金,升温至 740~760℃,待 Al-15Ce 合金完全熔化后,加精炼剂,5 min 后再一次捞去表面的浮

收稿日期:2020-12-04;修改稿收到日期:2020-12-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51361012)
作者简介:罗浩林,男,1988 年出生,助教,南昌(330013),E-mail:1025885840@qq.com
引用格式:罗浩林. 电磁搅拌和 Ce 含量对半固态 A356 合金组织与成分影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):614-619.
LUO H L. Effects of electromagnetic stirring and ce addition on microstructure and composition distribution in semi-solid A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):614-619.

渣,待熔体降温至 620 ℃ 时进行浇注,采用底部直径为 55 mm,高为 100 mm,上端开口的不锈钢铸型,其壁厚为 2 mm。浇注后,立即将铸型放入到电磁搅拌设备中,设定搅拌频率为 30 Hz,搅拌时间为 15 s,搅拌结束后将铸型放入 590 ℃ 保温炉中保温 10 min,之后取出铸型,水淬后取出试样。从浇注的试样中取半径为 18 mm、高 10 mm 的 60° 扇形试样用作后续试验。电磁搅拌设备是由改装而成的电机(除转子)和变频控制系统两部分构成,频率范围为 0~50 Hz。金相试样经 W50-W1 金相砂纸逐层打磨并抛光后,采用体积分数为 0.5% 的 HF 水溶液腐蚀,采用 XJ-16A 80612 型光学显微镜观察试样的金相组织;采用 image pro-plus 软件进行晶粒和相尺寸分析;采用 D&ADVANCE 型 X 射线仪进行物相分析;采用带 EDAX 能量分散谱仪的 XL30W/TMP 扫描电镜进行对试样 SEM 形貌及稀土 Ce 分布研究。

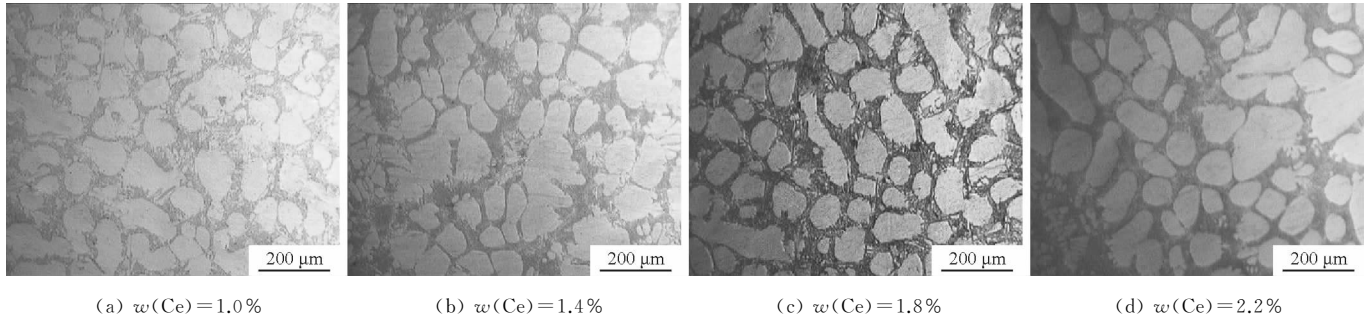


图 1 电磁搅拌下不同稀土含量的 A356 合金的凝固组织

Fig.1 The effect of Ce content on microstructure of the A356 alloy under electromagnetic stirring

2.2% 时,合金晶粒平均形状因子最小(0.74),等积圆直径最大(90.1 μm)。可以看出,在 Ce 含量为 1.0% 时晶粒圆整度最佳,晶粒细化程度最好。

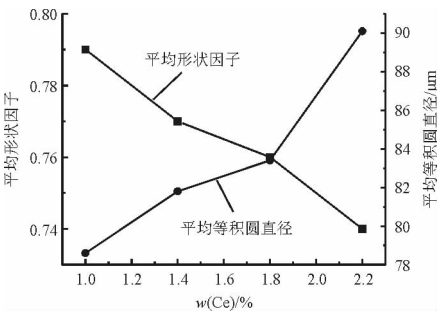


图 2 电磁搅拌下 Ce 含量对 A356 铝合金初生 α 相的影响

Fig.2 The effect of Ce content on the primary α phase in the A356 alloy under electromagnetic stirring

图 3 为无电磁搅拌条件下,不同 Ce 含量的半固态 A356 合金的组织形貌。可以看出,合金中初生 α 相晶粒圆整度比图 1 中稍低,稀土作为细化剂本身亦能细化晶粒,得到类球形初生相。对比图 1 可发现,无电磁搅拌时合金中存在明显的破碎的枝晶组织,一次枝晶臂较

2 试验结果与分析

图 1 为电磁搅拌下不同稀土 Ce 含量的 A356 合金的凝固组织。可以看出,Ce 含量为 1% 时,合金晶粒整体较圆整,有少数晶粒呈长条状。Ce 含量为 1.4% 时,晶粒有比较明显的粘连,但总体上看是单个存在的晶粒,在大尺寸晶粒周围分布有小尺寸晶粒,这可能是由于保温温度过长引起的,也可能与试验操作不当有关。Ce 含量为 1.8% 时,合金中有很多细小的晶粒,但是也有少部分呈不规则的形状,有椭圆形甚至少数的长条形。Ce 含量为 2.2% 时,合金中晶粒大多呈类球形,也有一些晶粒呈长条形,个别晶粒较粗大。4 种合金的平均形状因子和等积圆直径见图 2。可以看出,随 Ce 含量增加,合金平均形状因子逐渐降低,平均等积圆直径逐渐增加。添加 1.0% 的 Ce 时,晶粒平均形状因子最大(0.79),等积圆直径最小(78.6 μm)。在 Ce 含量为

发达,晶粒呈椭圆形、蔷薇状、长条状,部分晶粒存在彼此粘连现象。无电磁搅拌下合金中的晶粒平均形状因子和平均等积圆直径见图 4。可以看出,与电磁搅拌下的趋势相同,随 Ce 含量增加,合金平均形状因子逐渐降低,平均等积圆直径逐渐增加。Ce 含量为 1.0% 时,合金晶粒平均形状因子最大(0.71),平均等积圆直径最小(83 μm),Ce 含量为 2.2% 时,晶粒平均形状因子最小(0.67),平均等积圆直径最大(91 μm)。这表明在未施加电磁搅拌的情况下,Ce 含量为 1.0% 时的细化效果最理想,但细化程度不及施加电磁搅拌的。

对 Ce 含量为 1.0% 的试样进行 XRD 分析,结果见图 5。可以看出,电磁搅拌下生成了 AlCe_3 化合物,而无电磁搅拌下则存在单质 Ce,说明不施加电磁搅拌时,在局部微小区域存在 Ce 聚集的现象。由于 Ce 存在微观偏聚,而其他元素含量较低,Ce 来不及充分反应而凝固,故而存在单质 Ce。而在有电磁搅拌条件下,稀土 Ce 与熔体中的 Al 发生了化学反应,不存在单质 Ce,Ce 的偏聚程度较轻。根据 Al-Ce 二元相图, AlCe 和 AlCe_3 都是在 Ce 含量高于 80% 时发生 Al-Ce 共晶反应

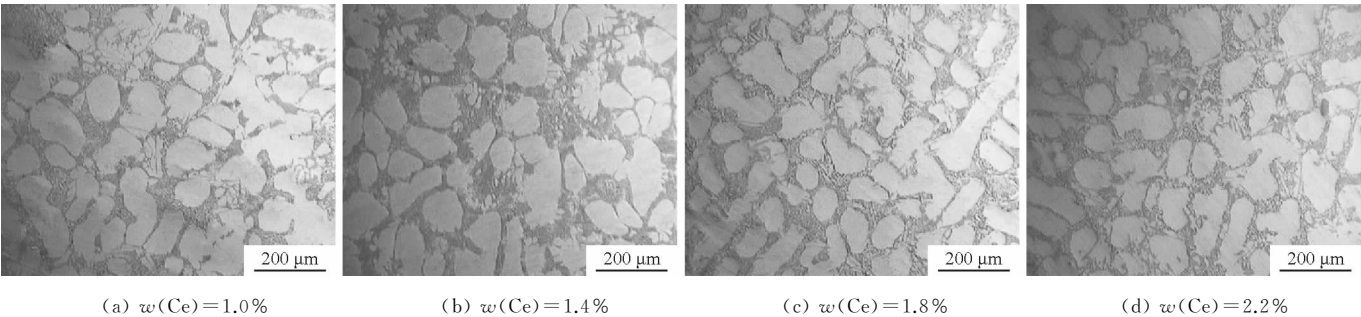


图 3 无电磁搅拌下不同 Ce 含量的半固态 A356 合金的组织形貌

Fig.3 The effect of Ce content on the microstructure of A356 alloy without electromagnetic stirring

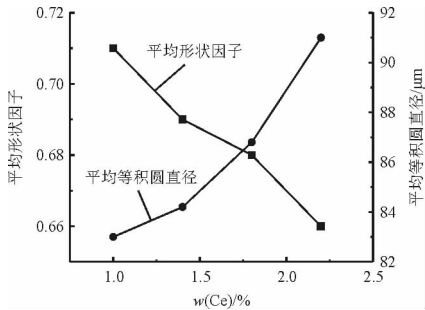


图 4 无电磁搅拌 Ce 含量对 A356 铝合金初生 α 相的影响
Fig.4 The effect of Ce content on the primary α phase in the A356 alloy without electromagnetic stirring

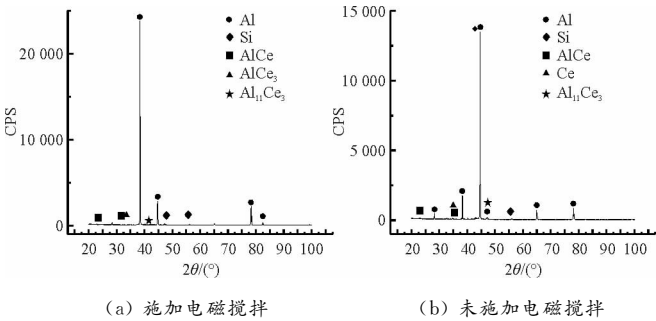
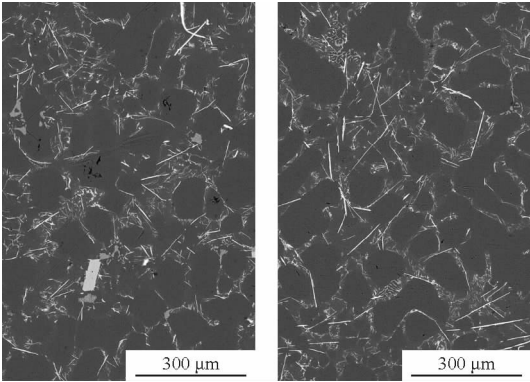


图 5 有、无电磁搅拌时 A356 合金的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of A356 alloy before and after electromagnetic stirring

生成的。而根据所加入稀土量质量守恒定律可知,依然可能存在偏聚。

图 6 是 Ce 含量为 1.4% 的 A356 合金在电磁搅拌处理后的凝固组织。可以看出,在晶界分布有白色针状相,且取向各异,呈无序状态。但施加电磁搅拌后白色针状相较短,说明电磁搅拌能部分打断过长的组织,使组织分布更加均匀,减少偏聚。白色针状相推断为稀土 Ce 及其化合物。为进一步分析白色区域的成分,对该区域进行能谱分析,结果见图 7 和表 2。发现其 Ce 含量较高,由此可推断其为稀土及其化合物。

为进一步了解稀土 Ce 在铸锭上的分布规律,试样半径约为 18 mm,取距铸锭圆心 1 mm 处作为第 1 个测试点,之后每隔 3 mm 取 1 个点直至取到距边部 2 mm 处,共计 6 个点,进行能谱分析,结果见图 8 和图 9。从



(a) 施加电磁搅拌 (b) 未施加电磁搅拌
图 6 有、无电磁搅拌下稀土 Ce 在 A356 铝合金中的形貌
Fig.6 Morphology of Ce phase in the A356 alloy before and after electromagnetic stirring

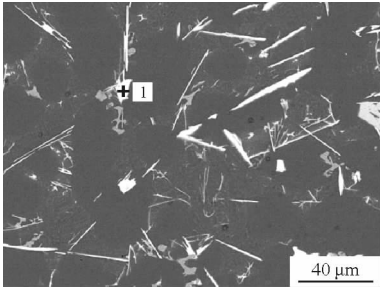


图 7 白色针状相的形貌
Fig.7 Morphology of white acicular phase in the alloy

表 2 白色针状相各元素的含量(谱图 1)
Tab.2 EDS analysis of element content of white acicular phase

x_B			w_B			%
Ce	Al	Si	Ce	Al	Si	
54.73	24.80	20.47	86.04	7.51	6.45	

图 8 可以看出,在电磁搅拌下,沿半径方向从内向外,Ce 含量呈先增后减再增的趋势,不同 Ce 含量的试样中最大值都出现在距圆心 10 mm 处,最小值则出现在边部。说明电磁搅拌能改变稀土的分布状况,虽然在铸锭半径上稀土不是均匀分布,但在铸锭不同径向上存在一定的规律性,在特定的半径处稀土含量最高,而在距圆心最远处稀土含量最低。从图 9 可以看出,无电磁

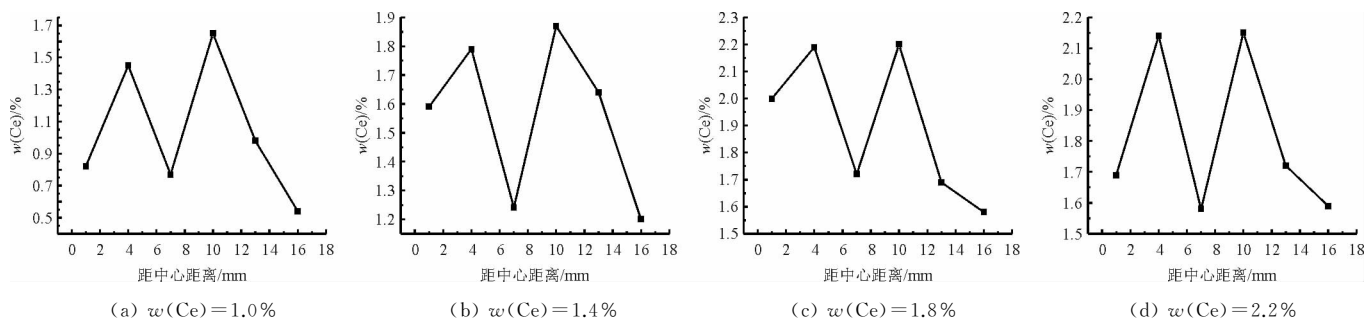


图 8 电磁搅拌下稀土 Ce 在铸锭径向上分布

Fig.8 The effect of the electromagnetic stirring on the rare earth Ce distribution in the alloy along radial direction

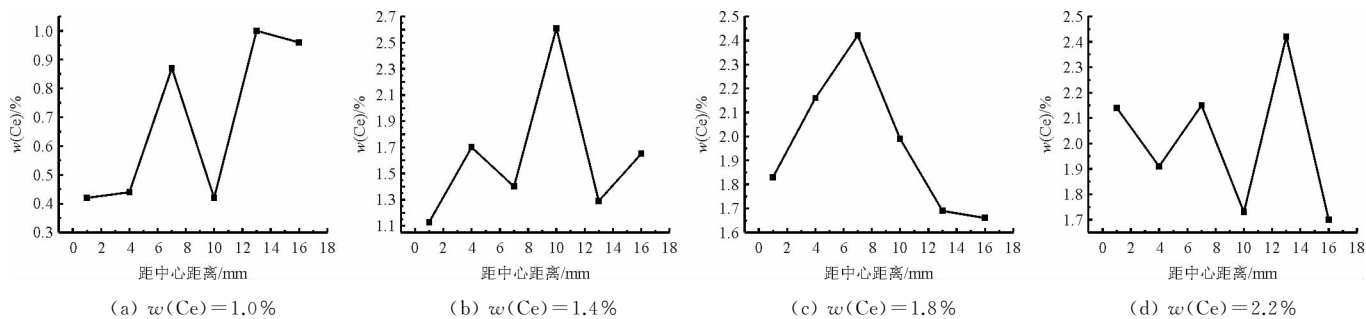


图 9 无电磁搅拌下稀土 Ce 在铸锭径向上分布

Fig.9 The rare earth Ce distribution in the alloy along radial direction without electromagnetic stirring

搅拌条件下,稀土 Ce 的分布无明显规律。

3 试验结果与讨论

3.1 稀土 Ce 含量对初生 α -Al 相的影响

由 Al-Ce 二元相图可知,在 A356 铝合金中加入 Ce 时会发生 $L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \text{Al}_{11}\text{Ce}_3$,组织中观察到了 AlCe 及 AlCe_3 相,说明稀土 Ce 分布不够均匀,而生成的初生 α -Al 相能作为异质形核的核心。在凝固过程中,由于存在成分过冷,使得在凝固界面前沿出现溶质原子的富集,阻碍了晶粒的生长,使得初生 α -Al 相大多呈细小等轴状,随着液相中稀土含量增加,对初生 α -Al 相细化作用增强,在距离固-液界面前沿一定值处会出现一个最大的成分过冷度,当稀土 Ce 含量处于最大成分过冷度区间时,对初生 α -Al 相细化效果最明显,所以当 Ce 含量为 1.0%,初生 α -Al 相最细小,形状最规则。

此外,对比图 1 和图 3 发现,添加稀土 Ce 后,共晶 Si 组织也更加致密,促进了长条状的共晶 Si 向颗粒状转变,这是由于稀土 Ce 起到变质剂的作用,而稀土 Ce 的细化作用不是影响共晶 Si 的形核,而是限制了其某些方向的长大^[9],能够使长条状的共晶 Si 生长出凹槽,使得共晶 Si 以小颗粒形式生长。

3.2 电磁搅拌对凝固组织的影响

目前,电磁搅拌在制备铝合金铸锭中研究较多,由于施加了电磁搅拌,给熔体系统增加了额外的能量,打破了原有的平衡结晶过程,使最终的组织出现与常规浇

注的不同形貌和分布的组织。对于电磁搅拌对凝固组织的影响还未有定论,但主要有以下 3 种。

(1)枝晶臂的断裂增加了形核核心的数目 电磁搅拌导致的流体在三维方向上的流动作用于固-液界面的剪切力超过了枝晶臂根部的剪切强度,或者枝晶臂上所受的弯曲应力超过抗弯强度时,就促使枝晶臂发生折断。断裂下来的颗粒状或者树枝状的组织由于电磁搅拌的紊流作用而带入到液相中成为新的临界晶核,使得晶粒倾向于等轴状晶发展。

(2)枝晶分枝的溶断脱落 由于电磁搅拌加剧了液相的流动,加剧了界面处的温度起伏,使得凝固界面局部温度升高,当温度超过固相熔点时,就使枝晶臂溶断。

(3)晶粒再结晶机制 熔体扰动产生的应力,使得晶粒发生变形,当变形量达到一定值时,在随后的等温保温过程中就可能再结晶,从而形成等轴晶。

综上,电磁搅拌对凝固组织的影响主要是枝晶臂的断裂和枝晶熔化机制两者共同作用的结果,而不是单一的结果。电磁搅拌对金属凝固组织的影响主要体现在对液-固界面前沿的撞击效应,正是由于这种冲刷作用,使得温度场分布更均匀,也扰乱了固-液界面前沿溶质分布规律,促使固-液界面处的温度和浓度分布更均匀。

过冷度是影响金属结晶的一个重要参数,在实际金属凝固过程中,过冷度往往是由实际温度分布和浓度变化来决定的,这种由溶质浓度变化引起的过冷称之为成分过冷。若凝固界面前沿温度梯度过大则不利于形成成分过冷,凝固组织倾向于形成柱状晶。在常规浇注不

施加电磁搅拌时,铸锭冷却速度大,散热方向为单向散热,温度梯度较大,不利于等轴晶的生长,存在枝晶状组织,见图3c。在金属凝固过程中,过冷区的区域大小影响了凝固组织的形态^[10]。熔体中出现成分过冷的条件为:

$$\frac{G}{R} \leq m \frac{c_0}{D} \left(\frac{1-k_0}{k_0} \right) \quad (1)$$

式中, G 为实际温度分布; R 为凝固速度; m 为液相线斜率; c_0 为合金中溶质质量分数; D 为扩散系数; k_0 为平衡分配系数。从式(1)可以看出,液相中实际温度分布(G)越平缓,凝固速度(R)越快,成分过冷倾向越大。对比在有、无电磁搅拌的情况下,保持其他条件相同,只有 G 不一样。正是由于电磁搅拌的缘故,使熔体温度分布更加均匀,因而成分过冷倾向增强,更趋向于生长为等轴晶。

3.3 电磁搅拌下金属熔体的运动规律

电磁搅拌试验在自制的旋转型电磁搅拌装置中进行。在旋转型搅拌装置中,金属液绕着轴线做周向旋转运动。根据电磁搅拌原理,其最大磁通量在靠近搅拌器附近,然后从铸型壁开始到中心呈线性依次递减,直至为0^[11]。这些作用在熔体上的电磁力对金属液体产生扭矩,使熔体产生旋转运动。正是由于磁通量分布的特点,使得速度大小由铸锭中心向边部逐渐增大,在凝固界面前沿周向旋转速度达到最大值^[12]。金属熔体溶质运输情况取决于电磁搅拌力的大小,建立相关模型,得到金属熔体在铸锭径向上的速度^[13~15]:

$$V_\theta = \frac{1}{\frac{8\eta}{3\sigma R_0^4} + 1} \omega \left(1 - \frac{r^2}{3R_0^2} \right) r \quad (2)$$

式中, V_θ 为液态金属的周向速度; η 为液态金属的动力粘度; σ 为液态金属电导率; R_0 为电磁搅拌器半径; ω 为旋转磁场角速度(由电源频率和磁极对数决定); r 为液态金属的旋转半径。由以上可知:

$$\lim_{r \rightarrow R_0} \frac{dV_\theta}{dr} = 0 \quad (3)$$

即当液态金属在铸锭最外围时,旋转速度即为最大值,在固液界面前沿达到最大值。但是,由于边缘摩擦效应,在铸锭最外围处紧靠着铸型,冷却速度大,有激冷效果,凝固瞬间完成,电磁搅拌还来不及作用于金属就已成为固态,固态金属产生的粘滞力抵消了电磁搅拌产生的电磁力作用,粘度越大,熔体旋转速度越小。在铸锭中心由于磁场作用几乎为0,电磁力无法带动金属液产生旋转运动。因而,在边缘部位和中心熔体运动速度都为0。综上,金属熔体在电磁搅拌作用时铸锭截面上速度分布为:从中心开始向外逐渐增大,在铸锭半径

60%左右(此值与电磁力和金属熔体、稀土化合物的电导率和密度有关)速度最大。在试验中,铸锭半径为18 mm,发现在10 mm左右范围处,金属熔体旋转速度最大,从试验中得出10 mm处稀土Ce含量最高,说明在靠近中心部位的稀土由于旋转做离心运动,并逐渐向外围偏聚,当偏聚到10 mm,即最大的旋转速度之处,再往外围速度又开始降低,不利于溶质原子运输,因而在旋转速度最大的地方聚集。

在未施加电磁搅拌的情况下,从图9中可看出,稀土元素分布没有规律,溶质元素的析出更多是随机的,在凝固界面前沿当溶质元素的含量达到一定时,到达一定过冷度,满足形核条件,在该处就形核,甚至长大,且图9中稀土Ce含量最大值与最低值相差很大,比施加电磁搅拌时偏聚更明显。

4 结 论

(1)电磁搅拌能增大成分过冷度,增加形核质点,细化晶粒。在本试验研究范围内,稀土Ce最合适的添加量为1.0%。

(2)从中心向边缘,熔体旋转速度越来越大,在中心处速度为0,在靠近铸型某处达到最大值(本试验条件下为10 mm处),接着又下降,到边部速度为0。

(3)由于受离心力作用,稀土Ce有向铸锭边缘聚集的趋势,但是最外围熔体旋转速度为0,稀土Ce偏聚在熔体周向速度最大的地方(即10 mm处)。

参 考 文 献

- [1] 王建云,陈长乐,孟小华.旋转磁场作用下Pb-Sn合金的凝固行为[J].材料导报,2006,20(3):152-155.
- [2] CAMPANELLA T, CHARBON C, RAPPAZ M. Grain refinement induced by electromagnetic stirring: A dendrite fragmentation criterion[J]. Metallurgical and Material Transcation, 2004, A35(10): 3 201-3 210.
- [3] YANG Z, SEO P K, KANG C G. Grain size control of semisolid A356 alloy manufactured by electromagnetic stirring[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2005, 21(2): 219-225.
- [4] 孟晓华,陈长乐,洪振宇,等.旋转磁场对Pb-Sn合金凝固组织的影响[J].中国科学,2006,36(3):243-250.
- [5] 张奎,刘国钧,徐俊,等.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,2000,10(1):47-51.
- [6] 郭钧,谢水生,黄声宏.半固态铝合金的制备工艺研究[J].稀有金属,1998,22(6):424-429.
- [7] 陈涛,刘政,刘小梅.熔体搅拌方式对半固态A356-0.5Ce合金凝固组织和力学性能的影响[J].稀有金属与硬质合金,2017,45(4):47-52.
- [8] 邓可月,刘政,张嘉艺,等.电磁搅拌下稀土在铝合金熔体中的分布规律[J].有色金属科学与工程,2016,7(3):40-47.
- [9] 廖万能,康永林,祁明凡,等.稀土Ce对半固态A356合金流变挤压组织性能影响[J].物理测试,2017,35(1):8-13.

蛇形通道复合 Sr 变质处理对 Al-28Si 合金微观组织的影响

刘亚博 毛卫民 闫鹏宇 王冰坤 范 菁 颜丙栋
(北京科技大学材料科学与工程学院)

摘 要 针对传统铸造过共晶 Al-Si 合金中存在粗大初生 Si 和针片状共晶 Si 的问题,采用蛇形通道复合 Sr 变质处理工艺制备了 Al-28Si 合金半固态浆料,对半固态浆料的显微组织以及初生 Si 的析出温度进行了研究。结果表明,该工艺可充分细化初生 Si、有效变质共晶 Si,初生 Si 尺寸由 165.26 μm 细化到 45.68 μm ,共晶 Si 由长针状转变为点状、蠕虫状。随着 Sr 加入量的增加,初生 Si 的析出温度先升高后降低,初生 Si 的晶粒尺寸呈增大趋势。具有大量纤维状分支的共晶 Si 在长大时受到了铝相抑制。

关键词 Al-28Si 合金;蛇形通道;Sr;初生 Si;共晶 Si
中图分类号 TG249.2⁺6;TG146.21 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Serpentine Channel Composite Sr Modification on Microstructure of Al-28Si Alloy

Liu Yabo, Mao Weimin, Yan Pengyu, Wang Bingkun, Fan Jing, Yan Bingdong
(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: According to the problems in coarse primary silicon and acicular eutectic silicon in traditional hypereutectic Al-Si alloy, the semi-solid slurry of Al-28Si alloy was prepared by serpentine channel composite Sr modification process. The microstructure of the semi-solid slurry and the precipitation temperature of primary silicon were investigated. The results reveal that the composite process can fully refine the primary silicon and effectively modify the eutectic silicon. The primary silicon is refined from 165.26 μm to 45.68 μm , and the structure of eutectic silicon is transformed from acicular to punctate and worm-like. With the increase of the Sr addition, the precipitation temperature of primary silicon is increased at first and then decreased, and the grain size shows an increasing trend. The growth of eutectic silicon with a large number of fibrous branches is limited by aluminum phase.

Key Words: Al-28Si Alloy, Serpentine Channel, Sr, Primary Silicon, Eutectic Silicon

汽车发动机活塞要求其材料具有密度低、耐磨性高、线膨胀系数小、尺寸稳定等特点,随着汽车制造技术的发展,传统的亚共晶、共晶 Al-Si 合金难以满足发动机活塞材料的性能要求^[1,2]。随着 Al-Si 合金中 Si 含量增加,其耐磨性提高、线膨胀系数减小、热稳定性增加。过共晶 Al-Si 合金能够满足当前内燃发动机发展的需

求,正逐步替代亚共晶、共晶 Al-Si 合金成为新的活塞材料。然而,传统铸造工艺制备的过共晶 Al-Si 合金中通常存在粗大的板块状初生 Si 和针片状共晶 Si,这些粗大的 Si 相会严重割裂基体,在外力作用下还易引起应力集中,显著降低合金的铸造性能和力学性能^[3,4]。因此,改善合金中 Si 相的尺寸和形貌,对于提高过共晶

收稿日期:2020-10-19;**修改稿收到日期:**2020-12-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771032)
第一作者简介:刘亚博,男,1996 年出生,硕士研究生,北京(100083),E-mail:liuyabonl@163.com
通信作者:毛卫民,男,1958 年出生,教授,北京(100083),E-mail:mao_wm@ustb.edu.cn
引用格式:刘亚博,毛卫民,闫鹏宇,等.蛇形通道复合 Sr 变质处理对 Al-28Si 合金微观组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(5):619-624.
LIU Y B, MAO W M, YAN P Y, et al. Effects of serpentine channel composite Sr modification on microstructure of Al-28Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):619-624.

[10] 李庆春.铸件形成理论基础[M].北京:机械工业出版社,1982.

[11] 杨卯生,赵爱民,毛卫民,等.钢的半固态电磁搅拌力场与组织转变[J].钢铁研究学报,2003,15(4):18-24.

[12] 齐雅丽,贾光霖,张国志.电磁搅拌对液态金属运动及凝固组织的影响[J].铸造技术,2005,26(2):118-121.

[13] FLEMINGS M C. Solidification Processing [M]. New York: McGraw-Hill, 1974.

[14] 赵学瑞,廖其尊.粘性流体力学[M].北京:机械工业出版社,1983.

[15] MOLCAHY A, BEITELMAN L. 连铸小方坯和大方坯的旋转电磁搅拌[A].曹广畴译.电磁搅拌译文集[C].北京:中国金属学会连续铸钢学会,1988.

(编辑:刘晨辉)