

T6 处理对半固态压铸 Al-27Si 合金组织与性能的影响

颜丙栋 毛卫民 闫鹏宇

(北京科技大学材料科学与工程学院)

摘要 采用纯铜质蛇形通道复合 Sr 变质制备了 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金的半固态浆料,并进行了压铸,研究了在不同 Sr 加入量时,T6 处理对流变压铸试样的性能和组织的影响。结果表明,复合工艺充分细化了初生 Si 和有效变质了共晶 Si,再经 T6 处理后可以得到圆整的颗粒状共晶 Si 和棱角被钝化的初生 Si,并且热处理前的变质效果越好,T6 处理后得到的共晶 Si 形貌越圆整细小。T6 处理进一步提高了复合处理制备的 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金半固态流变压铸试样的抗拉强度,热处理前后的最高抗拉强度都出现在 Sr 含量为 0.02% 条件下,分别为 228.8 MPa 和 254.7 MPa。

关键词 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金;T6 处理;蛇形通道;流变压铸;共晶 Si

中图分类号 TG249.2;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of T6 Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of Rheo-die Casting Al-27Si Alloy

Yan Bingdong, Mao Weimin, Yan Pengyu

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: The semi-solid slurry of Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy was prepared by a composite process of serpentine pouring channel (SPC) and Sr-modifier. The rheological die-casting was carried out. The effects of heat treatment on the properties and microstructure of the rheological die-casting samples with different Sr addition were investigated. The results show that primary Si and modified eutectic Si are fully refined by the composite process, and the rounded granular eutectic Si and primary Si with edges and angles passivated can be obtained after T6 treatment. The better the modification effect before heat treatment, the more rounded and finer the morphology of the obtained eutectic Si after heat treatment. Heat treatment further improves the tensile strength of semi-solid rheological die-casting samples of Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy prepared by composite treatment, and the maximum tensile strength appears at the condition of 0.02% Sr content before and after heat treatment, which are 228.8 MPa and 254.7 MPa, respectively.

Key Words: Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg Alloy, T6 Treatment, Serpentine Pouring Channel, Rheological Die Casting, Eutectic Si

过共晶 Al-Si 合金具有优异的耐磨损和耐腐蚀性能、较低的密度、较高的热稳定性和优异的力学性能,其主要用于制造汽车或摩托车等发动机的活塞、缸套、带轮、传动装置等零件^[1,2]。但当 Si 含量较高时,过共晶 Al-Si 合金组织中会出现粗大的多角块状、板条状及五星瓣状不规则的初生 Si,共晶 Si 也呈长针片状,严重割裂合金基体,且易于在初生 Si 边缘产生应力集中,导致微裂纹产生,恶化合金的力学性能。因此,为了提高过共晶 Al-Si 合金的性能,必须同时充分细化初生 Si 和有

效变质共晶 Si。

为了充分细化初生 Si 和有效变质共晶 Si,传统的方法是向过共晶 Al-Si 合金中加入适量的 P 或 S 来细化初生 Si,加入适量的 Na、Sr、Sb 等来变质共晶 Si,但当同时加入 P、S 和 Na、Sr、Sb 时,会发生化学反应,既降低了初生 Si 的细化作用,也会削弱共晶 Si 的变质效果^[3,4]。纯铜质蛇形通道浇注半固态合金浆料是近些年提出的一种方法,可制备出品质良好的半固态合金浆料^[5,6]。本课题利用纯铜质蛇形通道来充分细化初生

收稿日期:2021-08-12;修改稿收到日期:2021-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771032)

第一作者简介:颜丙栋,男,1995 年出生,硕士研究生,北京(100083),E-mail:980619824@qq.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:颜丙栋,毛卫民,闫鹏宇. T6 处理对半固态压铸 Al-27Si 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(3):346-349.

YAN B D, MAO W M, YAN P Y. Effects of T6 treatment on the mechanical properties and microstructure of rheo-die casting Al-27Si alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):346-349.

Si,再提前向合金中加入 Sr 来化学变质共晶 Si,以同时实现初生 Si 的充分细化与共晶 Si 的有效变质,并且纯铜质蛇形通道制备的半固态过共晶 Al-Si 合金浆料可实现流变压铸,有效减轻试样的卷气。T6 处理可以进一步改善过共晶 Al-Si 合金压铸试样的力学性能。因此,本课题采用水冷纯铜质蛇形通道和 Sr 复合工艺制备半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金浆料,再对流变压铸试样进行 T6 处理,考察了流变压铸试样的抗拉强度和组织的变化,旨在为其应用提供参考。

1 试验方案

试验合金采用 Al-27Si 合金,其化学成分见表 1。Sr 以 Al-10Sr 中间合金的形式加入。

表 1 Al-27Si 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Al-27Si alloy %				
w_B				
Si	Cu	Mg	Fe	Al
26.5	4.49	0.62	<0.01	余量

采用电阻炉加热 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金,熔化温度控制在 850 ℃。当合金熔化后,保温 2 h,再加入 Al-10Sr 中间合金,随后保温 30 min。Sr 的加入量分别为 0、0.01%、0.02%、0.03%。合金保温后,再向熔体中通入 Ar 进行除气 10 min,随后将熔体温度降至 830 ℃ 附近时,进行扒渣并准备浇入蛇形通道内。浇注之前,蛇形通道提前通入冷却水。将 830 ℃ 的 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金液浇入纯铜质蛇形通道,半固态浆料流入提前预热至 200 ℃ 的陶瓷烧勺中,立即将其倒入压铸机的压室内并进行流变压铸。纯铜质蛇形通道制备半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金示意图见图 1。

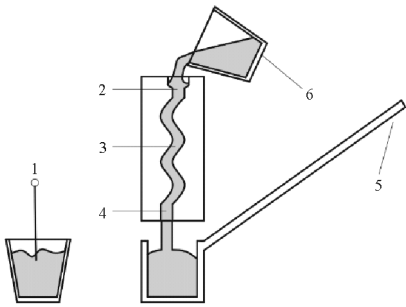


图 1 蛇形通道制备半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 铝合金的示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparing semi-solid Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg aluminum alloy slurry through the composite process of serpentine pouring channel (SPC) and Sr-modifier

1.K 型热电偶 2.浇口杯 3.蛇形弯道 4.导流管
5.陶瓷烧勺 6.熔化坩埚

采用 4XC 倒置光学显微镜(OM),拍摄金相照片,并计算初生 Si 和球化后的共晶 Si 等效圆直径 D :

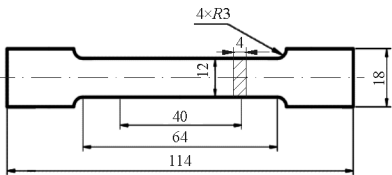
$$D = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{4 \frac{A_i}{\pi}}}{N}$$

式中, A_i 为初生 Si 或共晶 Si 面积; N 为统计的初生 Si 颗粒总数。

流变压铸采用 YYC180B 型卧式冷室压铸机,压射比压为 90 MPa,压射压头速率为 0.5 m/s,保压时间为 9 s,同时压铸 4 件厚度为 4 mm 的标准拉伸试样,见图 2。



(a) 浇注出的试样



(b) 拉伸试样示意图

图 2 流变压铸试样

Fig.2 Rheo-die-casting sample

T6 处理工艺:固溶温度为 490 ℃,保温 6 h,水淬;时效温度为 180 ℃,时效时间为 6 h。

2 试验结果及分析

2.1 T6 处理对压铸试样组织的影响

图 3 为纯铜质蛇形通道复合 Sr 变质制备的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金压铸后及 T6 处理的试样组织。其中,白色相为初生 α -Al 相,灰色块状为初生 Si,灰色针片状为共晶 Si,黑色枝晶状为 Al_2Cu 。未添加 Sr 时,合金组织中的共晶 Si 呈长针片状,且主要分布于基体的枝晶间。长针片状共晶 Si 的平均长度可达 7.85 μm (见图 4),这严重割裂了合金基体。此外,因为激冷作用,在组织中也存在少量变质的纤维状共晶 Si。粗大的枝晶状 Al_2Cu 与长针片状的共晶 Si 存在搭接现象,见图 3a。当 Sr 含量为 0.01%时,针片状的共晶 Si 发生明显的细化,部分共晶 Si 被变质为纤维状,其中剩余的长针片状共晶 Si 平均长度减小到了 4.64 μm (见图 4),且随着 Sr 的加入, α -Al 枝晶长度变小,见图 3c。当 Sr 含量为 0.02%时,长针片状的共晶 Si 得到进一步变质,共晶 Si 平均长度减小到了 2.85 μm ,并且共晶 Si 的分布更加均匀,见图 3e。当 Sr 含量为 0.03%时,长针片状的共晶 Si 基本消失,共晶 Si 长度仅为 1.07 μm 左右。因此,当 Sr 含量为 0.03%时,可有效变质共晶 Si,使其由长针片状变质为纤维状。 α -Al 枝晶转变为蔷薇状,并且发现部分共晶 Si 与初生 Si 颗粒有连接的情况,在初生 Si 周围共晶 Si 以纤维状存在,然而 Al_2Cu 仍以枝晶方式存在,见图 3g。

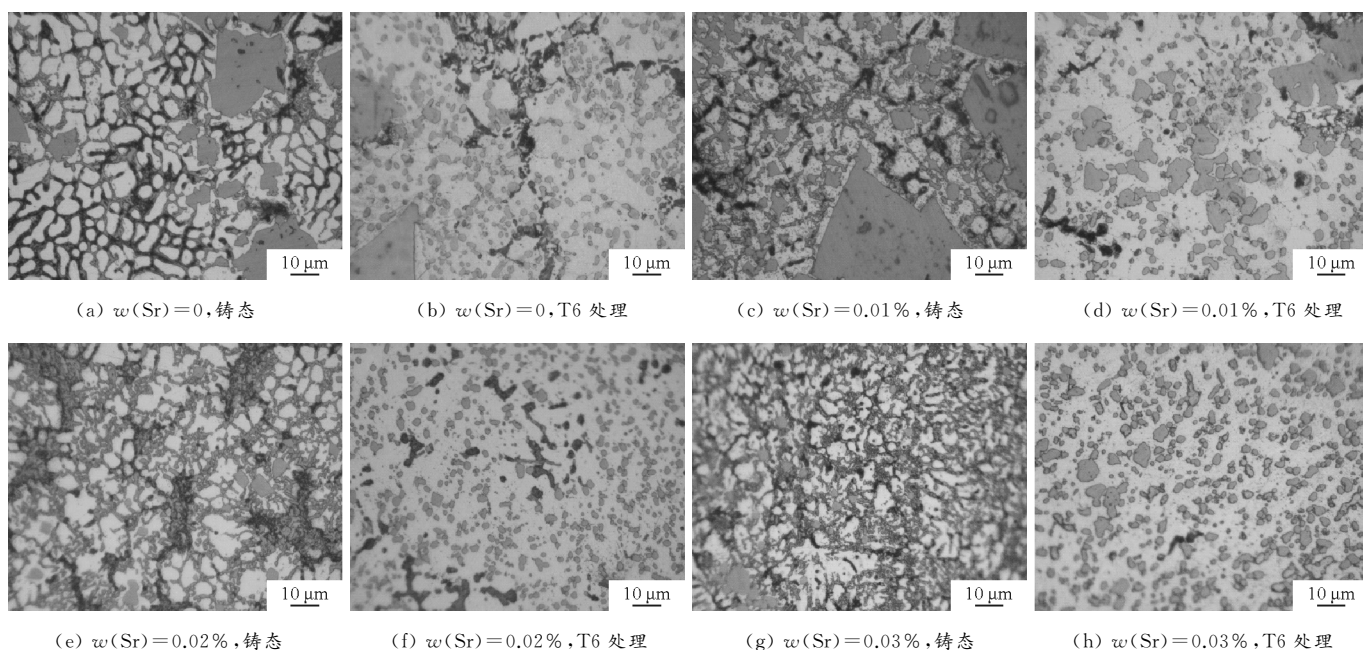


图 3 不同 Sr 含量的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金压铸及 T6 态组织

Fig.3 As-cast and T6-treated semi-solid Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy with different Sr

经过 T6 处理,压铸 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金试样中的共晶 Si 转变为颗粒状,只是共晶 Si 大小与是否变质有关,枝晶状的 Al_2Cu 基本消失。从图 4 可以看出,T6 处理后不同 Sr 加入量的共晶 Si 等效圆直径不同,经过 Sr 变质处理,共晶 Si 等效圆直径减小。不添加 Sr 时,共晶 Si 的等效圆直径为 $5.2\ \mu\text{m}$;当 Sr 加入量为 0.01% 时,共晶 Si 的等效圆直径大幅度减小到 $3.7\ \mu\text{m}$;当 Sr 含量为 0.02% 时,共晶 Si 的等效圆直径进一步减小到 $3.2\ \mu\text{m}$;当 Sr 含量为 0.03% 时,最终共晶 Si 的等效圆直径为 $2.9\ \mu\text{m}$ 。

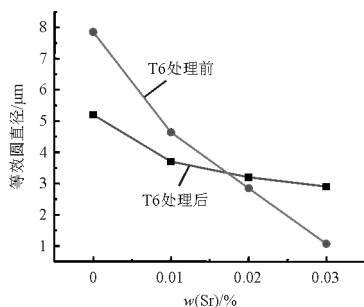
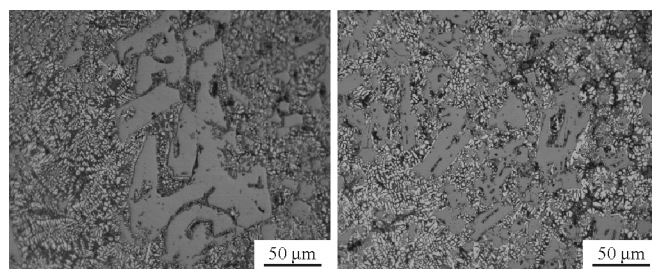


图 4 不同 Sr 含量的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金 T6 处理前后共晶 Si 尺寸

Fig.4 Eutectic Si size in the semi-solid Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy before and after T6 treatment with different Sr addition

图 5 为未添加 Sr 的 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金的组织。可以看出,未经纯铜质蛇形通道处理,Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金组织中的初生 Si 呈粗大的块状,严重割裂了基体,削弱了合金的力学性能,见图 5a。经纯铜质蛇形通道处理,Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金组织中的初生 Si 颗粒明显被细化,见图 5b。从图 3 可以看出,

T6 处理对半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金压铸组织中初生 Si 的影响较小。T6 处理前,初生 Si 呈多角块状;T6 处理后,初生 Si 有一定程度的钝化,但尺寸变化不大。



(a) 未经纯铜质蛇形通道 (b) 经纯铜质蛇形通道

图 5 未添加 Sr 的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金的组织

Fig.5 The solidification microstructure of semi-solid Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy without Sr

经纯铜质蛇形通道制备的 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 半固态合金,其初生 Si 受到通道内壁的激冷作用而发生充分的细化,这种物理细化作用对 Sr 化学变质共晶 Si 不会产生什么影响,所以通过纯铜质蛇形通道复合 Sr 处理可以充分细化初生 Si 的同时又可以有效变质共晶 Si。Sr 是典型的“吸附”类变质元素,Sr 原子吸附在共晶 Si 的生长表面上,毒化了 Si 的生长位置,诱发更多的孪晶生长,这为共晶 Si 提供了更多的生长方向^[7],使共晶 Si 的生长特性从各向异性转变为各向同性,于是共晶 Si 的生长状态发生改变,最终由长针片状转变为纤维状,产生了有效变质。随着 Sr 的加入, $\alpha\text{-Al}$ 枝晶最终转变为蔷薇状,由于 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶的消失增加了初生 Si 与最后凝固液相的接触机会,又因初生 Si 与共晶

Si 本质上具有相同的晶体结构,进而使得更多的共晶 Si 可以依附于初生 Si 形核长大。这表明 Sr 对共晶 Si 的变质是对共晶 Si 和 α -Al 相共同作用的结果。

2.2 T6 处理对压铸试样抗拉强度的影响

对半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金压铸试样 T6 处理过程中,Cu、Mg 等溶质原子在固溶时,扩散进入 α -Al 基体,形成过饱和固溶体,并在时效过程中弥散析出强化相,这有利于合金力学性能的提高。T6 处理时,共晶 Si 发生颈缩和颗粒化,变为较圆整的颗粒状,增强了其与基体的结合力,减轻了受力时应力集中和裂纹萌生的可能,有利于其抗拉强度的稳定或提高。T6 处理时,初生 Si 的棱角被钝化,也改善了其与基体的结合情况,有利于其抗拉强度的稳定或提高。

图 6 为纯铜质蛇形通道复合 Sr 处理制备的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金的压铸试样的抗拉强度。可以看出,T6 处理后不同 Sr 含量的合金抗拉强度都得到了进一步的提高,随着 Sr 含量增加,合金抗拉强度先增加后降低,当 Sr 含量为 0.02% 时,其抗拉强度最高,达

到 254.7 MPa。图 7 为 Sr 含量为 0 和 0.03% 的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金压铸态和 T6 态试样的拉伸断口形貌。可以看出,拉伸断口由脆断面及韧窝组成。平整的初生 Si 呈脆断面,其脆断面周围出现韧窝形的 α -Al 相断面,这表明合金的断裂是韧性和脆性共存的混合断裂方式。当 Sr 变质并经过 T6 处理,使断口中的韧窝增多,但未改善初生 Si 的脆断平面。

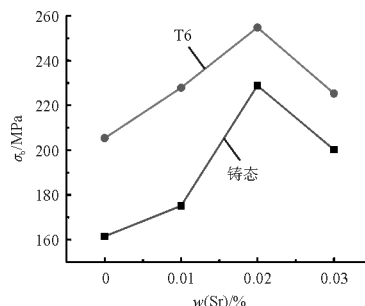


图 6 T6 处理前后不同 Sr 加入量的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金的抗拉强度

Fig.6 Tensile strength of the Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy with different Sr addition before and after T6 treatment

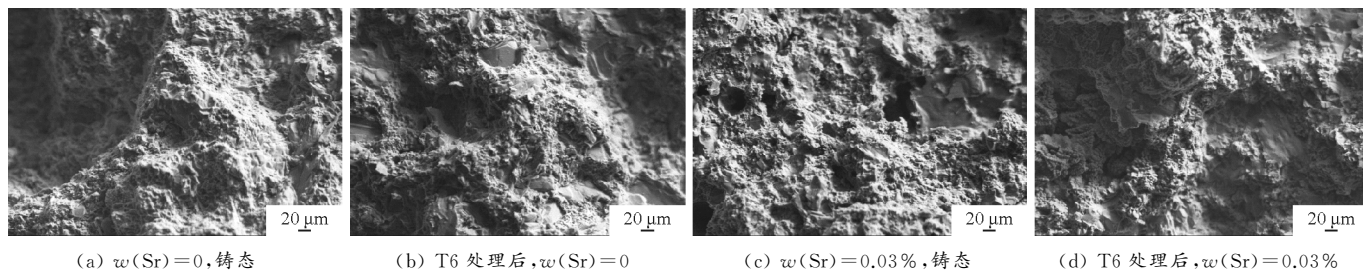


图 7 不同 Sr 含量变质的半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 压铸态、T6 态试样的拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphology of as-cast and T6-treated semi-solid Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg alloy specimen with different Sr addition

随着 Sr 的加入,半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金中的针片状共晶 Si 变质为纤维状,再经 T6 处理后,共晶 Si 进一步圆整,初生 Si 棱角也被钝化,Al₂Cu 也弥散分布于基体中,这些都改善了共晶 Si 和初生 Si 与基体的结合力,使得流变压铸 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金试样的抗拉强度得到进一步提高。

3 结 论

(1)采用水冷纯铜质蛇形通道浇注工艺和长效变质剂 Sr 复合细化工艺制备半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金流变压铸试样,能够充分细化初生 Si 的同时有效变质共晶 Si。

(2)经 T6 处理后,半固态 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg 合金的压铸试样,可以得到颗粒状的共晶 Si 和棱角钝化的初生 Si,而且 T6 处理前的变质效果越好,T6 处理后得到的共晶 Si 形貌越圆整细小,当 Sr 的含量为 0.03% 时,等效圆直径为 2.9 μm。

(3)T6 处理可以进一步提高 Al-27Si-4.5Cu-0.6Mg

合金半固态流变压铸试样的抗拉强度。当 Sr 含量为 0.02% 时,T6 处理前后合金的抗拉强度都达到最高,分别是 228.8 MPa 和 254.7 MPa。

参 考 文 献

- [1] 毛卫民,钟雪友.半固态金属成形技术[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 赖华清,范宏训,徐祥.过共晶铝硅合金的研究及应用[J].汽车工艺与材料,2001(10):21-24.
- [3] HUGHES C G, PANDHARIPANDE P P. Review articles: The effects of perioperative and intensive care unit sedation on brain organ dysfunction[J]. Anesthesia & Analgesia, 2011, 112(5): 1212-1217.
- [4] 王泽华,毛协民,张金龙,等. Sr-PM 复合变质过共晶铝硅合金[J].特种铸造及有色合金,2005,25(4):241-243.
- [5] 毛卫民,高冲,朱达平,等.蛇形通道制备半固态铝合金浆料的研究[J].特种铸造及有色合金,2009,29(10):915-917.
- [6] 陈正周,毛卫民,吴宗阔.蛇形通道浇注工艺参数对半固态 A356 铝合金浆料的影响[J].中国有色金属学报,2011,21(5):985-990.
- [7] EIKEN J, APEL M, LIANG S M, et al. Impact of P and Sr on solidification sequence and morphology of hypoeutectic Al-Si alloys: Combined thermodynamic computation and phase-field simulation[J]. Acta Materialia, 2015, 98: 152-163.

(编辑:张正贺)