

低过热度倾斜板流变压铸对 ADC12 组织及力学性能的影响

汪鹏程 柳飞洪 闫赛飞 张 龙

(安徽工业大学冶金工程学院)

摘 要 采用金相显微镜、X 射线衍射仪和扫描电镜等手段研究了低过热度倾斜板流变压铸 ADC12 合金的组织演变及形成机理,并测试其力学性能。结果表明,随着与压铸机压室距离的增加,合金组织由粗大枝晶成长为球形或近球形晶粒。组织形成机理包括了枝晶的破碎和熔体爆发形核。另外,半固态压铸提高了合金的力学性能,抗拉强度达到 248 MPa,伸长率也略优于常规压铸。

关键词 流变压铸;ADC12 铝合金;显微组织;力学性能

中图分类号 TG249.2;TG292

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Low Superheat Inclined Plate Rheo-diecasting on Microstructure and Mechanical Properties of ADC12 Aluminum Alloy

Wang Pengcheng, Liu Feihong, Yan Saifei, Zhang Long

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology)

Abstract: The microstructure evolution and formation mechanism of rheo-die-casting ADC12 alloy for low superheat inclined plate were investigated by means of metallography, X-ray diffraction and scanning electron microscope, and its mechanical properties were tested. The results show that the microstructure of the alloy is converted from coarse dendrites to spherical or near-spherical grains with the increase of the distance from the pressure chamber. The mechanism of microstructure formation is attributed to dendrite fragmentation and melt explosion nucleation. It is also proved that rheo-die-casting can improve the mechanical properties of the alloy, where the tensile strength reaches 248 MPa and the elongation is slightly better than that of conventional ones.

Key Words: Rheo-diecasting, ADC12 Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

相较于传统铸造,压铸具有生产效率高、能耗低和成形零件复杂等特点,广泛应用于汽车、电子、航空航天等领域的零部件生产^[1]。然而,压铸过程是在高压下将铝合金熔液注入型腔,导致空气滞留在铸件内部或与金属发生反应,零件内部容易出现气泡和氧化物夹杂^[2]等缺陷。

为了降低上述缺陷,提高压铸件的性能,引入了半固态压铸工艺^[3]。研究表明,半固态压铸改善了压铸件的性能并提高其品质^[4~7]。半固态压铸可以提供更高粘度的流体,且充型温度低,卷气量显著减少,从而减少气孔和氧化物夹杂,达到提高铸件力学性能的目的^[8]。半固态成形一般分为触变成形与流变成形,触变成形工艺流程长,半固态浆料存储和运输困难,成本过高,工业化生产难度大。而具有工艺流程短、节能节材、成本低等特点的流变成形工艺,成为了关注的热点。

ADC12 铝合金具有铸造性能好、收缩率低、耐腐蚀好等特点,广泛应用于汽车零部件生产。但是迄今为止,关于 ADC12 铝合金的流变压铸研究报道甚少。JANUDO M 等^[9]用气体诱导半固态(GISS)方法成功制备了 ADC12 铝合金半固态浆料,并压铸出商用零件。HU Z H 等^[10]利用机械搅拌制备浆料与压铸结合的方式,成功制备了 ADC12 半固态压铸铝合金。但是这些方法都需要外加设备,成本也显著增加。

本课题以 ADC12 铝合金为研究对象,为简化成形工艺、缩短流程,对压铸机进行改造,自行设计了倾斜板法半固态浆料制备与高压压铸相结合的压铸系统。针对铸件的浇注系统,研究了其不同位置的显微组织,并研究了流变压铸 ADC12 铝合金的力学性能,旨在为其应用提供参考。

收稿日期:2021-10-23;修改稿收到日期:2021-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405002)

第一作者简介:汪鹏程,男,1997 年出生,硕士研究生,安徽马鞍山(243000),E-mail:1486093358@qq.com

通信作者:张龙,男,1983 年出生,副教授,安徽马鞍山(243000),E-mail:longzhang@ahut.edu.cn

引用格式:汪鹏程,柳飞洪,闫赛飞,等. 低过热度倾斜板流变压铸对 ADC12 组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):540-545.

WANG P C, LIU F H, YAN S F, et al. Effects of low superheat inclined plate rheo-diecasting on microstructure and mechanical properties of ADC12 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):540-545.

1 试验材料与方方法

1.1 试验材料

试验材料为 ADC12 铝合金。利用 X 射线荧光光谱仪测得 ADC12 合金的化学成分见表 1。

表 1 ADC12 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ADC12 aluminum alloy %						
w_B						
Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Mn	Al
10.78	1.73	0.696	0.884	0.265	0.234	余量

图 1 为 ADC12 铝合金的重力铸造组织。可见其主要由树枝状 α -Al 相和针片状共晶 Si 相组成。

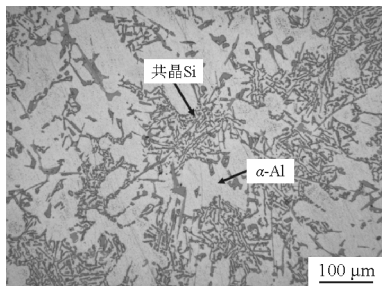


图 1 重力铸造 ADC12 铝合金的显微组织
Fig.1 The microstructure of gravity casting ADC12 aluminum alloy

1.2 半固态浆料的制备及压铸过程

倾斜板流变压铸过程示意图见图 2。首先将 ADC12 铸锭放于石墨坩埚中于 620 °C 下熔化;同时,在倾斜板表面涂上石墨涂料,其中倾斜板材质为 45 号钢,长度为 100 cm,倾角为 30°,调整支架确保金属液从倾斜板尾端准确流入压铸机浇口处;将压铸机模具预热至 200 °C。

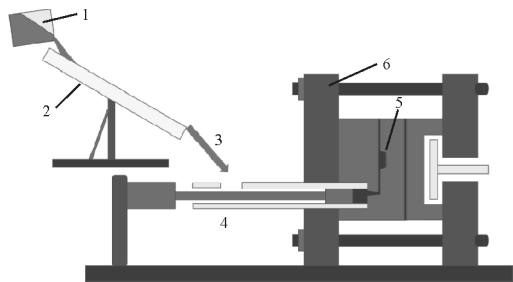


图 2 倾斜板流变压铸 ADC12 铝合金原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of the principle of rheo-die-casting ADC12 aluminum alloy with inclined plate

1.铝液 2.冷却板 3.半固态浆料 4.注射系统 5.铸件 6.压铸机

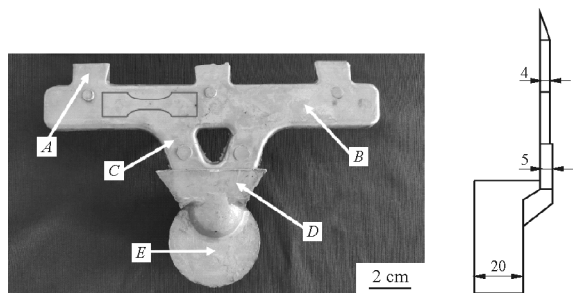
对熔液进行除气扒渣后,将其从倾斜板上端倒入,经过倾斜板的冷却与自身重力作用,形成半固态浆料直接流入压铸机进料口。用热电偶测量浆料的温度,待温度下降至 560~570 °C 时进行压铸成形。

1.3 试验仪器与检测方法

ADC12 铝合金半固态压铸件的取样位置及浇注系

统尺寸见图 3。在 A 到 E 处(充型顺序为 E→A)各取一个试样观察显微组织。使用 DK7735 型线切割机截取 8 mm×10 mm×10 mm 的试样,经砂纸磨光、机械抛光后,使用体积分数为 0.5% 的 HF 溶液腐蚀 15 s,采 Olympus BX51 型光学显微镜(OM)对试样进行金相组织形貌观察。

采用 DTG-60H 型差热分析仪测定 DTA 曲线。将 $\phi 3\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、质量为 19.67 mg 的试样放置在氧化铝坩埚中,在流量为 50 mL/min 的氩气保护气氛中以 5 °C/min 的加热速率从 450 °C 加热至 650 °C。利用 D8 Advance X 射线衍射仪(XRD)(Cu K α)对试样进行物相分析。使用 JSM-6490LV 扫描电镜(SEM)进行显微结构观察和相组成鉴定,并对其进行力学性能测试,取样部位见图 3。



(a) 取样位置 (b) 浇注系统尺寸
图 3 半固态压铸 ADC12 铝合金取样位置及浇注系统尺寸
Fig.3 The sampling position and gating system profile of semi-solid die casting ADC12 aluminum alloy

2 试验结果与分析

2.1 固液区间测定和物相分析

ADC12 铝合金的 DTA 曲线见图 4。其中深灰色区域为吸热峰,即 Al-Si 二元反应^[10]。这一区域为固液区间,合金从 539 °C 开始熔化,在 578 °C 时完全熔化,590 °C 时合金开始凝固,故固、液相线温度区间为 539~590 °C。

铸件不同取样位置的 XRD 图谱见图 5。可以看

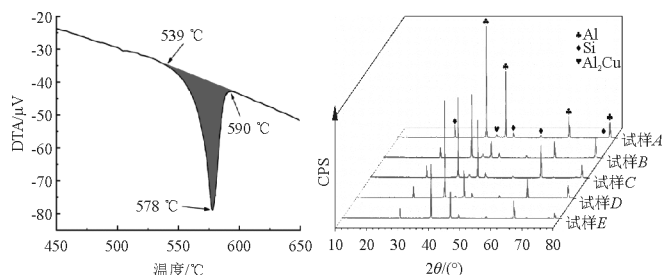


图 4 ADC12 铝合金的 DTA 曲线
Fig.4 DTA curve of ADC12 aluminum alloy

图 5 不同部位 ADC12 铝合金试样的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of ADC12 aluminum alloy at different sampling sites

出,铸件组织主要由 Al、Si 和 Al_2Cu 等 3 相组成。对于 ADC12 铝合金,最初结晶出 $\alpha\text{-Al}$ 相与 $\alpha\text{-Al}+\text{Si}$ 的共晶相,又由于合金中的 Cu 含量较高,会产生 $L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{Cu}$ 共晶反应,故最终的组织主要由 $\alpha\text{-Al}$ 、Si、 Al_2Cu 等 3 相组成^[11]。

2.2 显微组织及形成机理

图 6 为半固态压铸 ADC12 合金 A~E 位置的金相组织。可以看出,浇注系统各个位置的组织具有显著差异,A 处与 B 处具有较多分布均匀且圆整的初生 $\alpha\text{-Al}$ 相,C 处与 D 处的初生 $\alpha\text{-Al}$ 相含量较少,而距离压室最近的 E 处初生 $\alpha\text{-Al}$ 为白色粗大枝晶形态,且固相率最高。分析认为,造成这种组织差异的原因主要受冷却速率和充型过程的影响。压室温度为 $560\sim 570\text{ }^\circ\text{C}$,

而模具预热温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$,距离压室越近,冷却速率越小。E 处离压室最近,且厚度最大,冷却速率最慢,因此 E 处 $\alpha\text{-Al}$ 相呈现粗大枝晶形态。又由于 E 处连接 D 处的浇口尺寸较小,对初生的粗大树枝晶的流动起到阻碍作用,仅细小的初生 $\alpha\text{-Al}$ 相和液相能通过,故在 E 处的固相最多^[12]。随着充型距离增加,位置 D→位置 A 处冷却速率逐渐增大,白色初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒总体数量增加,其中位置 C 处的初生 $\alpha\text{-Al}$ 含量最少。这与李明等^[13]研究中距离压室越远,固相含量越少的现象不符。原因可能是,一方面充型过程浆料中液相裹挟细小初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒产生了液相偏析^[14],使得 A 和 B 处固相较多,C 及 D 处固相较少;另一方面由于 A 和 B 处冷却速率大,液相形核长大成细小圆整的初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒。

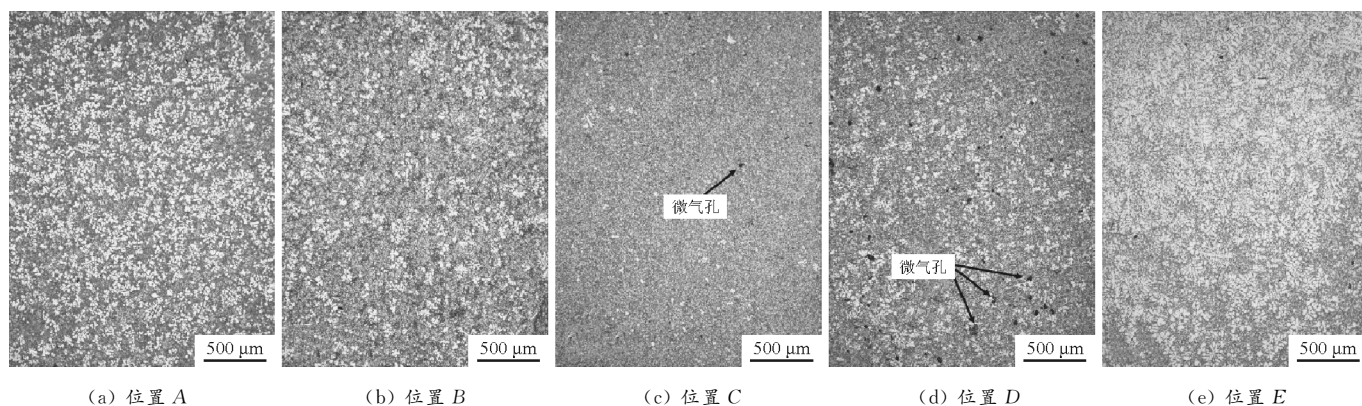


图 6 不同位置处半固态 ADC12 合金的金相组织

Fig.6 Metallographic structure of semi-solid ADC12 alloy at different positions

此外,从图 6 还发现组织中存在一些明显的黑色微气孔。在压铸过程中,合金浆料高速充填型腔,使得型腔内未及时排出的气体被合金熔体裹挟,随着合金液的凝固残留在试件中形成了气孔。除此之外,造成微气孔的原因还可能是由于在合金熔炼过程中形成了金属夹杂物^[15]。

图 7 为浇注系统不同位置半固态压铸 ADC12 合金的高倍金相组织。可观察到组织中粗大枝晶消失,演变

形成不同大小与形状的初生 $\alpha\text{-Al}$ 相,形态主要为球状、近球状、破碎枝晶状。而在图 7e 中,初生 $\alpha\text{-Al}$ 相表现为粗大枝晶,和图 6e 一致。图 7a~图 7d 中观察到的初生 $\alpha\text{-Al}$ 相一般可分为 3 种类型:一种是大球形和近球形颗粒,标记为 $\alpha_1\text{-Al}$ 相;另一种为较小的球形或近球形颗粒,标记为 $\alpha_2\text{-Al}$ 相。还有一种最后凝固的细小枝晶,标记为 $\alpha_3\text{-Al}$ 相。其中, $\alpha_1\text{-Al}$ 与 $\alpha_2\text{-Al}$ 相在图 7a、图 7b 中数量众多,图 7c 和图 7d 中则主要为细小枝晶

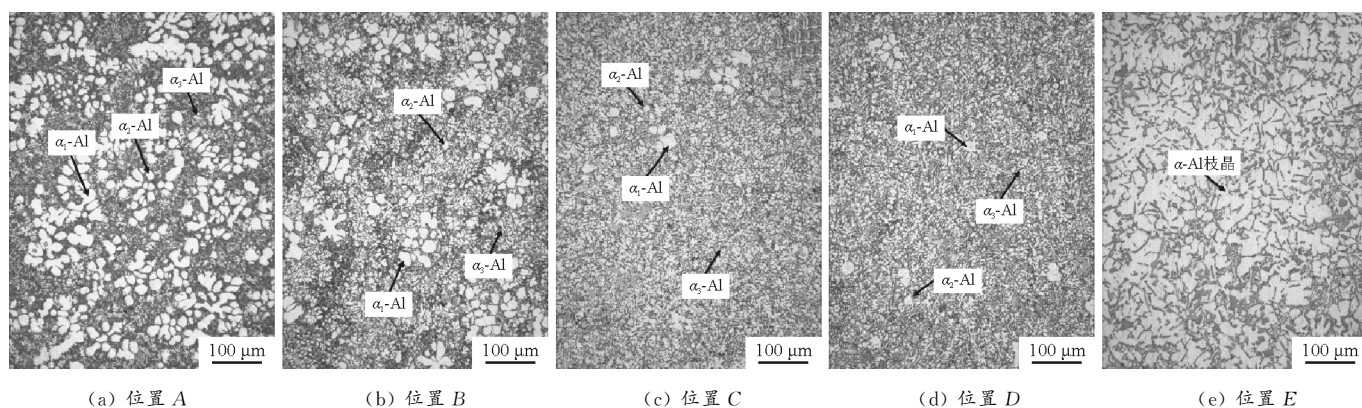


图 7 不同位置 ADC12 合金的高倍金相组织

Fig.7 High magnification metallographic structure of ADC12 alloy at different positions

α_3 -Al 相^[16]。

目前,半固态显微组织形成机理有两种:一种认为是枝晶在外力的作用下发生破碎,破碎枝晶最终演变成球形晶粒^[17];另一种认为在激冷状态下熔体产生了大量晶核,其抑制了枝晶的长大,直接以球形方式长大^[18,19]。

在低过热度倾斜板流变压铸的显微组织中球形晶粒的形成机理两者均有。首先,合金熔体受到倾斜板内壁的激冷作用,使紧靠内壁的熔体中产生大量的初生 α -Al 晶核,这些晶核随着熔体进入压室充型,充型过程晶核继续长大,最终长大为球形或近球形 α_1 -Al 或 α_2 -Al 相。此外,合金熔体在倾斜板受重力的作用时不断向下流动,对熔体形成了剪切作用。熔体中的枝晶被剪切破坏,形成断裂的枝晶臂,同时由于倾斜板的激冷作用,这些破碎细小的枝晶臂得以保留。

在压铸过程中,从倾斜板流入压室的熔体受到激冷与高压的双重作用,一方面流经倾斜板形成的大量的初生 α -Al 晶核继续长大成为球形或近球形 α_1 -Al、 α_2 -Al 相;另一方面,高压、高速对熔体产生一个类似于强力搅拌的作用,熔体内残留的枝晶继续被剪切破坏,这些细

小的枝晶臂最终凝固为球形或近球形晶粒。然而,压铸过程冷却速度大,但由于各位置冷却速率不同,位置 E 离压室最近,冷却速度最慢,枝晶得以长大,而位置 A 至位置 D 处由于冷却速度大,枝晶来不及长大,故主要凝固为细小均匀的 α_3 -Al 相。

综上所述,低过热度倾斜板法流变压铸可以破坏熔体内枝晶的成长,在受到流经倾斜板的剪切作用和压铸充型过程的搅拌作用,初生 α -Al 相最终成长为球形或近球形。

2.3 金属间化合物分析

图 8 为半固态压铸 ADC12 合金不同位置的金属间化合物的 SEM 形貌。由 XRD 及金相组织可以确定,流变压铸 ADC12 铝合金主要由 α -Al、Si、 Al_2Cu 相组成。但从图 8 可以看出,除此之外还存在一些不同形貌的未知金属间化合物,其 EDS 点分析结果见表 2。根据摩尔比来推测:白色多边形组织为 $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ 相,白色汉字状组织为 Al_2Cu 相,深灰色块状或条状的为富 Si 相,少量白色粗针状组织为 $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 相。其中点 11 处为 Al_2Cu 混杂了部分 $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 相。

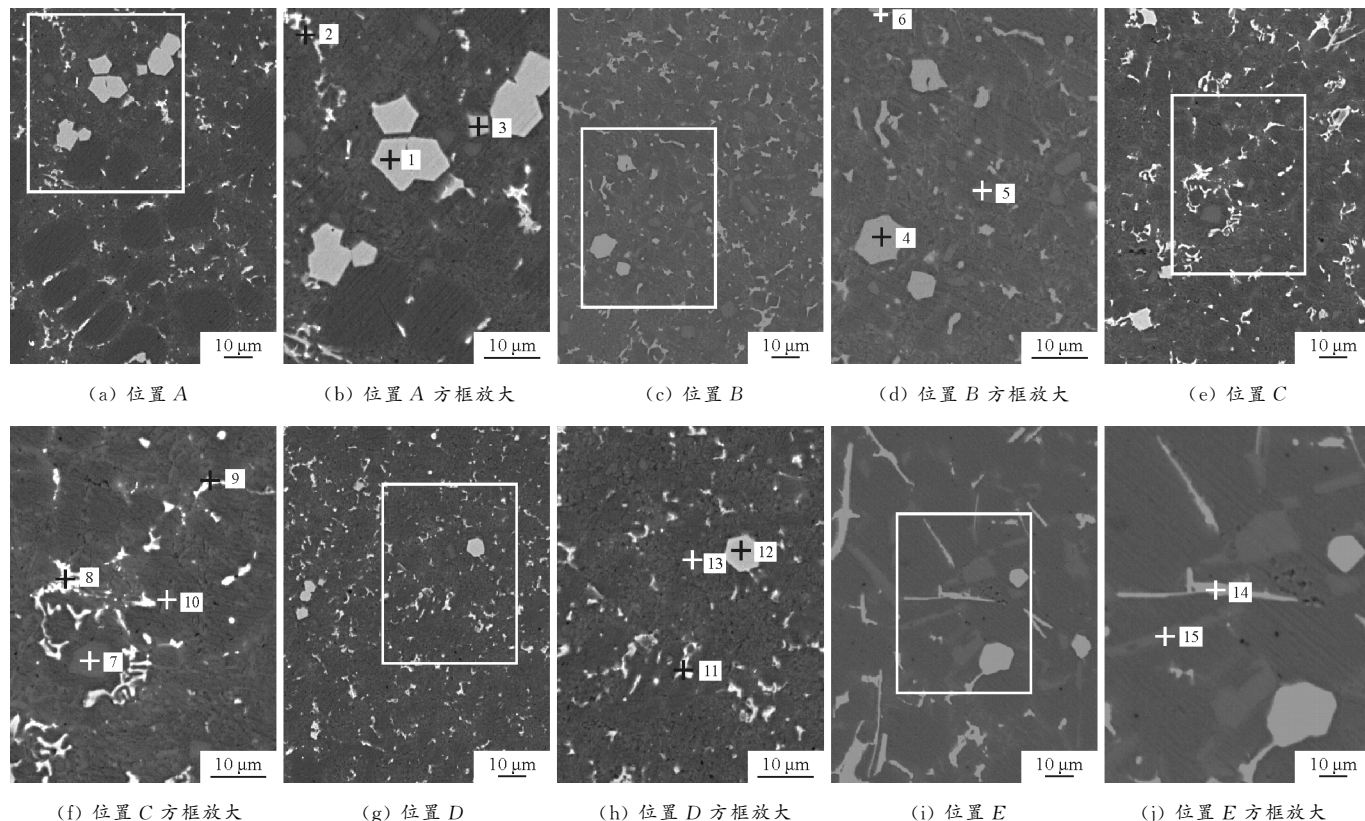


图 8 半固态压铸 ADC12 合金中不同位置金属间化合物的 SEM 形貌

Fig.8 SEM morphologies of intermetallic compounds at different positions of semi-solid die casting ADC12 alloys

在图 8 中,不同位置的 Al_2Cu 数量最多,为强化相。一般认为粗针状 $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 对基体起到割裂作用,会降低合金的力学性能。而图中绝大多数高 Fe 相表

现为白色多边形的 $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$,改善了少量 $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 带来的破坏作用^[20],因此对合金力学性能有改善作用。

表 2 半固态压铸 ADC12 合金中金属间化合物的 EDS 点分析
Tab.2 EDS point analysis of intermetallic compounds in semi-solid die casting ADC12 alloy

位置	形貌	$x_B/\%$							化合物组成
		Al	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	O	
1	白色,五边形	74.19	13.39	—	12.01	0.4	—	—	α -Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂
2	白色,汉字状	71.79	4.49	17.84	—	—	1.73	4.15	Al ₂ Cu
3	白色,四边形	74.18	12.71	—	9.51	1.97	—	—	α -Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂
4	白色,六边形	74.83	13.16	—	9.50	2.50	—	—	α -Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂
5	深灰色,块状	33.78	64.75	—	—	—	—	1.47	富 Si 相
6	白色,粗针状	89.11	5.31	—	5.59	—	—	—	β -Al ₅ FeSi
7	深灰色,块状	3.51	96.49	—	—	—	—	—	富 Si 相
8	白色,汉字状	67.48	3.76	21.87	—	—	2.74	4.17	Al ₂ Cu
9	白色,汉字状	78.31	2.46	16.57	—	—	2.65	—	Al ₂ Cu
10	深灰色,块状	19.29	78.65	—	—	—	—	2.05	富 Si 相
11	白色,汉字状	66.89	11.00	7.16	6.23	—	1.49	7.22	Al ₂ Cu 和 β -Al ₅ FeSi
12	白色,六边形	74.03	12.89	—	12.28	0.80	—	—	α -Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂
13	深灰色,块状	26.94	73.06	—	—	—	—	—	富 Si 相
14	白色,长条状	68.70	5.62	19.29	—	—	3.65	2.74	Al ₂ Cu
15	深灰色,长条状	35.51	67.49	—	—	—	—	—	富 Si 相

2.4 力学性能

图 9 为 ADC12 合金常规压铸与半固态压铸试样在相同位置取样的力学性能。可以看出,半固态压铸的铝合金抗拉强度为 248 MPa,明显优于常规压铸的 210.7 MPa。同时,屈服强度变化相对较小。还可以看出,半固态压铸试样的伸长率为 2.05%,也明显优于常规压铸的 1.46%。

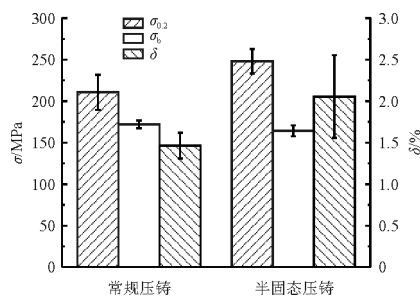
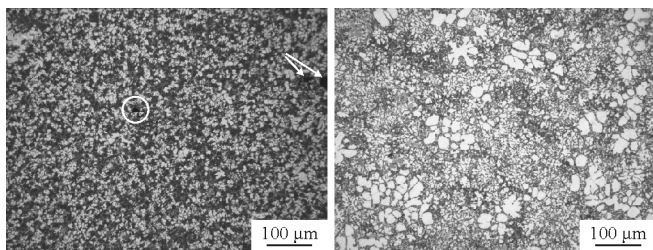


图 9 ADC12 常规压铸与半固态压铸的力学性能对比

Fig.9 Mechanical properties of conventional die casting and semi-solid die casting ADC12 alloy

图 10 为常规压铸与半固态压铸试样在 B 处的显微组织。可以看出,常规压铸态组织为均匀细小枝晶及激冷态晶粒,其中存在较多的黑色微气孔,而半固态压



(a) 常规压铸 (b) 半固态压铸

图 10 常规压铸和半固态压铸试样 B 处的显微组织对比

Fig.10 Comparison of microstructure at B in conventional die casting and semi-solid die casting ADC12 alloy specimens

铸的组织中存在大量的球形或近球形 α -Al 相,且固相含量高。研究表明,半固态压铸件的力学性能随着固相率提高而提高,而常规压铸在充型过程中容易发生卷气和夹杂,使得力学性能降低^[21]。究其原因,半固态压铸使得试样内部气孔等缺陷减少,使组织致密均匀,故其强度和塑性均优于常规压铸。

3 结 论

(1)ADC12 铝合金的固、液相线温度区间为 539~590 ℃,半固态压铸 ADC12 铝合金主要由 Al、Si 和 Al₂Cu 相组成。

(2)随着距压铸机压室距离增加,半固态压铸 ADC12 合金组织由粗大枝晶向球形或近球形晶粒演变,组织形成机理包括了枝晶的破碎和熔体爆发形核。

(3)ADC12 半固态压铸态组织中白色多边形的为 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂,白色汉字状的为 Al₂Cu,深灰色块状或条状的为富 Si 相,少量白色粗针状为 β -Al₅FeSi相。

(4)半固态压铸 ADC12 铝合金抗拉强度为 248 MPa,优于常规压铸的 210.7 MPa。两者的屈服强度接近,半固态压铸的伸长率也优于常规压铸。

参 考 文 献

- [1] 王珏. Al-Si-Cu-Zn 压铸铝合金的显微组织及力学性能[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [2] HANGAI Y, KITAHARA S. Quantitative evaluation of porosity in aluminum alloy die castings by fractal analysis of spatial distribution of area[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1 169-1 173.
- [3] 徐骏, 张志峰. 半固态加工技术的最新进展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013(2): 1-6.
- [4] FAN Z, FANG X, JI S. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast (RDC) aluminium alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2005, A412(1-2): 298-306.
- [5] WU S S, LÜ S L, AN P, et al. Microstructure and property of rheocasting aluminum-alloy made with indirect ultrasonic vibration process[J]. Materials Letters, 2012, 73(9): 150-153.

快速轧制 GE61K 合金板材的组织及力学性能

胡大龙¹ 刘 轲¹ 郭成龙² 娄 峰¹ 杜文博²

(1.北京工业大学材料与制造学部; 2.北京星航机电装备有限公司)

摘 要 设计了低稀土含量的 Mg-6Gd-1Er-0.5Zr(GE61K)合金,采用快速轧制的方法制备了合金板材,获得了屈服强度、抗拉强度及伸长率分别为 201 MPa、248 MPa 及 17.4% 的 GE61 合金板材。该板材经退火处理后,强度略微降低,而伸长率可提升至 20.7%。固溶强化、织构强化是影响合金板材力学性能的主要因素。

关键词 Mg-Gd-Er-Zr 合金;快速轧制;显微组织;动态再结晶;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG335.5

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of GE61K Alloy Sheets Produced by Rapid Rolling Process

Hu Dalong¹, Liu Ke¹, Guo Chenglong², Lou Feng¹, Du Wenbo²

(1.Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology;

2.Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd.)

Abstract: Mg-6Gd-1Er-0.5Zr(GE61K) alloy with low rare earth content was designed. The alloy sheet was prepared by rapid rolling. The yield strength, tensile strength and elongation of the alloy sheet reach up to 201 MPa, 248 MPa and 17.4%, respectively. After annealing treatment, the strength of the sheet is decreased slightly, however the elongation can be increased to 20.7%. Solution strengthening and texture strengthening are the main factors affecting the mechanical properties of the alloy sheet.

Key Words: Mg-Gd-Er-Zr Alloy, Rapid Rolling, Microstructure, Dynamic Recrystallization, Mechanical Properties

收稿日期:2021-11-13;修改稿收到日期:2021-12-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301101)

第一作者简介:胡大龙,男,1997 年出生,硕士研究生,北京(1001240),E-mail:1748004185@qq.com

通信作者:刘轲,男,1979 年出生,副教授,北京(1001240),E-mail:lk@bjut.edu.cn

引用格式:胡大龙,刘轲,郭成龙,等.快速轧制 GE61K 合金板材的组织及力学性能[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5):545-550.

HU D L, LIU K, GUO C L, et al. Microstructure and mechanical properties of GE61K alloy sheets produced by rapid rolling process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):545-550.

- [6] LÜ S L, WU S S, LIN C, et al. Preparation and rheocasting of semisolid slurry of 5083 Al alloy with indirect ultrasonic vibration process-Science direct [J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528(29-30): 8 635-8 640.
- [7] XU C, ZHAO J, GUO A, et al. Effects of injection velocity on microstructure, porosity and mechanical properties of a rheo-diecast Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 167-171.
- [8] HONG C P, KIM J M. Development of an advanced rheocasting process and its applications[J]. Solid State Phenomena, 2006, 116-117: 44-53.
- [9] SJANUDO M, TRATTANOCHAIKU L, RBURA P A, et al. Feasibility of semi-solid die casting of ADC12 aluminum alloy[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1 756-1 762.
- [10] HU Z H, PENG X, WU G H, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of rheo-processed ADC12 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12): 3 070-3 080.
- [11] 丁晔. 铝合金盘类零件压铸工艺与力学性能的研究[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2014.
- [12] 李明, 杨文龙, 张玉, 等. AZ91D 镁合金自孕育流变压铸组织及性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7): 8-15.
- [13] 李明, 张玉, 杨文龙, 等. 6061 铝合金自孕育流变压铸薄壁件制备及组织性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(6): 15-22.
- [14] 邱谨, 李元东, 李明, 等. ZA27 合金自孕育流变压铸显微组织及凝固行为[J]. 中国有色金属学报, 2017(1): 72-81.
- [15] 兰天池. 铝合金压铸成型缺陷控制的研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- [16] HITCHCOCK M, WANG Y, FAN Z. Secondary solidification behaviour of the Al-Si-Mg alloy prepared by the rheo-diecasting process[J]. Acta Materialia, 2007, 55(5): 1 589-1 598.
- [17] 管仁国, 李建平, 陈礼清, 等. 波浪型倾斜板振动过程中合金组织的形成机理[J]. 材料研究学报, 2008, 22(4): 363-368.
- [18] 陈正周, 毛卫民, 吴宗阔. 多弯道蛇形管浇注法制备半固态 A356 铝合金浆料[J]. 中国有色金属学报, 2011, 31(1): 95-101.
- [19] 李涛, 黄卫东, 林鑫. 半固态处理中球晶形成与演化的直接观察[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 635-640.
- [20] SAMAT S, OMAR M Z, BAGHDADI A H, et al. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020(10): 1 086-1 102.
- [21] 朱旭中. 铝合金分段式倾斜板法半固态压铸工艺及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

(编辑:张正贺)