

半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的组织与性能

刘 岩¹ 高民强² 杨 莉² 陈谦稳³ 陈海伟³ 管仁国^{1,2}
(1.东北大学材料科学与工程学院; 2.大连交通大学辽宁省轻质金属材料近净成形重点实验室;
3.苏州金澄精密铸造有限公司)

摘 要 采用剪切、振动耦合亚快速凝固制浆技术获得 Al-Si-Mg-Fe 合金半固态浆料,并通过优化挤压铸造工艺参数,制备出高性能挤压铸件。研究了浇注温度和挤压压力对半固态挤压铸件组织与力学性能的影响。结果表明,随着浇注温度从 690 ℃降低至 670 ℃,初生 α -Al 晶粒直径减小,形状因子增加,孔隙率降低,铸件的力学性能明显提高;随着挤压压力从 100 MPa 增至 120 MPa,初生 α -Al 晶粒变得细小、圆整,铸件的力学性能提升明显,进一步增加挤压压力至 140 MPa 时,铸件组织和力学性能的变化不明显。T6 热处理后,铸件的力学性能得到进一步提高。
关键词 Al-Si-Mg-Fe 合金;半固态挤压铸造;浇注温度;挤压压力;T6 处理
中图分类号 TG146.21;TG249.2⁺6 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.005 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Microstructure and Properties of Semi-solid Squeeze Casting Al-Si-Mg-Fe Alloys
Liu Yan¹, Gao Minqiang², Yang Li², Chen Qianwen³, Chen HaiWei³, Guan Renguo^{1,2}
(1.School of Materials Science and Engineering, Northeastern University; 2.Key Laboratory of Near-Net Forming of Light Metals of Liaoning Province, Dalian Jiaotong University;
3.Suzhou Jincheng Precision Die Casting Co., Ltd.)

Abstract: Al-Si-Mg-Fe alloy slurry was prepared by sub-rapid solidification slurring technology combined with shear and vibration. The high-performance squeeze castings were manufactured by optimizing process parameters. Effects of pouring temperature and squeeze casting pressure on the microstructure and mechanical properties of semi-solid squeeze casting Al-Si-Mg-Fe alloys were investigated. The results indicate that when the pouring temperature is decreased from 690 ℃ to 670 ℃, the average grain size of primary α -Al grains is decreased, however average factor shape is increased, while porosity is decreased, where the mechanical properties of castings are significantly enhanced. Furthermore, primary α -Al grains are obviously refined and spheroidized with squeeze pressure increasing from 100 MPa to 120 MPa, leading to the rise in mechanical properties. When the squeeze casting pressure is further increased to 140 MPa, the change of microstructure and mechanical properties of castings can be ignored. After T6 heat treatment, mechanical properties of castings are further raised.
Key Words: Al-Si-Mg-Fe Alloy, Semi-solid Squeeze Casting, Pouring Temperature, Squeeze Pressure, T6 Treatment

挤压铸造技术兼具铸造成形和锻造加工的特点,受到国内外广泛关注^[1]。液态金属挤压铸造过程中易出现卷气现象,导致铸件力学性能降低^[2]。随着“双碳”政策的实施,各领域对高性能轻量化零部件的需求越来越高,半固态挤压铸造技术在高性能铝合金近净成形方面极具发展潜力^[3]。
半固态挤压铸造技术的关键在于制备具有球状晶的半固态浆料。目前,国内外学者在半固态浆料的制备

技术方面已进行了大量研究,开发出了机械搅拌技术^[4]、电磁搅拌技术^[5]和蛇形流道技术^[6]等,能够制备具有球状晶的半固态浆料,但粘料现象以及制浆效率低仍是亟需解决的问题。将剪切、振动耦合亚快速凝固制浆技术应用于半固态浆料的制备^[7],不仅可以有效解决粘料问题,还会影响溶质的扩散和临界形核功,促进冷却板表面晶核的游离、增殖,进而提高形核率、改变晶粒大小、提升晶粒的圆整度。

收稿日期:2023-03-02
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFE0137900);大连市高层次人才创新支持计划资助项目(2021RD06)
第一作者简介:刘岩,男,1993 年出生,博士研究生,沈阳(110819),E-mail: yanliu0310@126.com
通信作者:管仁国,男,1975 年出生,教授,沈阳(110819),E-mail: guanrg@smm.neu.edu.cn
引用格式:刘岩,高民强,杨莉,等. 半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(6): 747-752.
LIU Y, GAO M Q, YANG L, et al. Microstructure and properties of semi-solid squeeze casting Al-Si-Mg-Fe alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6): 747-752.

A356 合金因具有较宽的半固态温度区间而被广泛应用于半固态加工领域^[8]。通讯领域的发展,对铸件性能的要求日益增长。合金化对力学性能的提升有重要作用。添加 Mg 可以通过固溶强化以及第二相强化作用来提高合金的力学性能^[7],而 Fe 的添加则可以提高铸件的脱模能力^[9]。另外,工艺参数对合金性能亦有一定的影响。李伟东等^[10]研究了浇注温度对半固态挤压铸造 A356 合金组织和力学性能的影响。结果发现,在一定范围内,随着浇注温度降低,初生 α -Al 晶粒更为细小、圆整,力学性能得到进一步提高。胡传林^[11]研究了挤压压力对半固态挤压铸造 A356 合金组织和力学性能的影响,发现随着挤压压力增加,初生 α -Al 晶粒的直径减小,从而提高合金的力学性能。

本研究以 Al-Si-Mg-Fe 合金为对象,采用剪切、振动耦合亚快速凝固制浆与挤压铸造技术,制备了半固态挤压铸件,并重点研究了浇注温度和挤压压力对其组织与性能的影响规律,以确定优化的工艺参数。

1 试验方法

采用工业纯铝(99.7% 质量分数,下同)、纯镁(99.7%)、Al-30Si 和 Al-10Fe 中间合金作为原材料制备 Al-Si-Mg-Fe 合金。使用化学分析方法对合金的实际成分进行分析,实测成分见表 1。图 1 为 350T 半固态挤压铸造装置及铸件,采用 350T 半固态挤压铸造机进行生产。首先将工业纯铝在坩埚中加热到 750 ℃保温熔化后,加入 Al-30Si 中间合金。待熔体温度降低至 720 ℃时,先后加入纯镁和 Al-10Fe 中间合金。当熔体完全熔化后,对熔体进行除气、除渣处理,并保温 30 min。当熔体温度降低至目标温度时,给汤勺取料,将熔体浇注到剪切、振动耦合亚快速凝固制浆机的冷却板表面上,熔体沿着冷却板流入挤压铸造机的入料口,调整挤压铸造机参数,进行挤压铸造成形,获得半固态挤压铸造通讯部件,其轮廓尺寸为 240 mm×100 mm×40 mm。半固态挤压铸造试验的工艺参数见表 2。对半固态挤压铸件进行 T6 热处理,即在 535 ℃固溶 1 h,水淬,170 ℃时效 2.5 h,空冷。

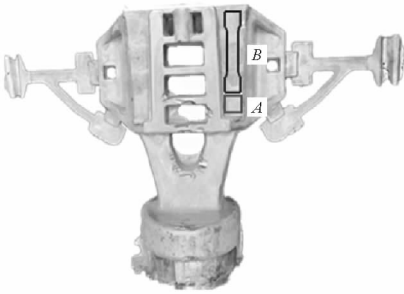
表 1 Al-Si-Mg-Fe 合金的实测成分

Tab.1 Measured composition of Al-Si-Mg-Fe alloy %			
w_B			
Si	Mg	Fe	Al
7.79	0.89	0.66	余量

在半固态挤压铸件 A 处取金相试样(见图 1b),经过抛光腐蚀后,在 Leica DMI8A 金相显微镜下对显微组织进行观察。采用 Image-Pro Plus 分析软件对初生 α -Al 晶粒的面积(A)、数量(N)、周长(C)和金相图片



(a) 350T 半固态挤压铸造装置



(b) 铸件

图 1 350T 半固态挤压铸造装置及铸件

Fig.1 350T semi-solid squeeze casting device and casting

表 2 半固态挤压铸造工艺参数

Tab.2 Processing parameters of semi-solid squeeze casting

编号	浇注温度/℃	挤压压力/MPa	倾斜角度/(°)	振动频率/Hz
1	690	120	30	60
2	680	120	30	60
3	670	120	30	60
4	670	100	30	60
5	670	140	30	60

面积(A_T)进行测量,计算获得初生 α -Al 晶粒的平均晶粒直径(D)、形状因子(F_s)和固相率(S)^[7,12]:

$$D = \sum_{i=1}^N \sqrt{4A/\pi} / N \tag{1}$$

$$F_s = N / \sum_{i=1}^N [C^2 / (4\pi A)] \tag{2}$$

$$S = A / A_T \tag{3}$$

参照 GB/T228-87,在流变挤压铸件 B 处截取拉伸试样(见图 1b),试样尺寸见图 2。采用 CMT5105 型拉伸试样机对试样进行力学性能测试,应变速率为 2 mm/min。每组设定 3 个平行试样,结果取其平均值。

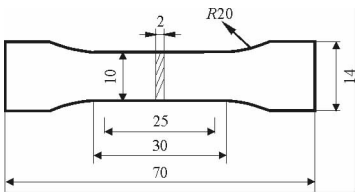


图 2 拉伸试样的尺寸

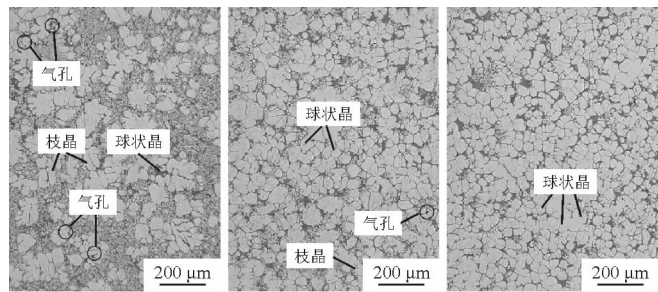
Fig.2 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

2.1.1 浇注温度对合金显微组织的影响

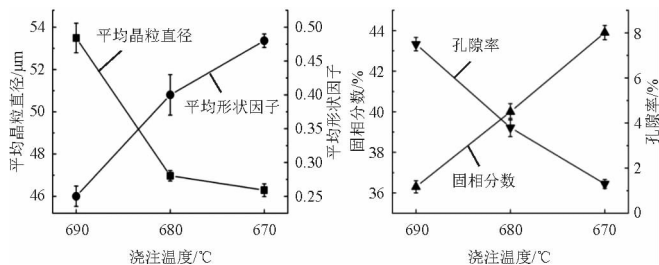
图 3 和图 4 分别为不同浇注温度下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的显微组织及其统计信息。可以看出,当浇注温度为 690 ℃时,初生 α -Al 晶粒由大量的枝晶和少量的球状晶组成,其平均晶粒直径和形状因子分别为 53.49 μm 和 0.25,见图 3a 和图 4a。随着浇注温度降低至 680 ℃时,枝晶数量明显减少,球状晶数量增加,见图 3b,平均晶粒直径和形状因子分别为 46.97 μm 和 0.40。当浇注温度继续降低至 670 ℃时,枝晶消失,初生 α -Al 晶粒为球状晶,其平均晶粒直径减小至 46.29 μm ,形状因子提高至 0.48,见图 3c 和图 4a。这是因为当浇注温度较高时,合金熔液具有较好的流动性,流动速度较快,致使熔体在剪切、振动耦合亚快速凝固制浆机的冷却表面上停留时间变短,熔体受到的激冷和剪切作用效果随之减弱,从而导致过冷度较小,形核率较低。另外,浇注温度过高还会使熔体中已形成的晶核被高温合金熔体重熔,降低形核率、减少晶核数量,导致固相率降低、晶粒尺寸增大。当浇注温度降低时,合金熔体的流动速度减慢,在激冷作用下过冷度增大,从而提高了形核率,同时,低的浇注温度可以有效避免晶核重熔,进



(a) 工艺 1 (b) 工艺 2 (c) 工艺 3

图 3 不同浇注温度下 Al-Si-Mg-Fe 合金的显微组织

Fig.3 Microstructure of Al-Si-Mg-Fe alloys under different pouring temperatures



(a) 初生 α -Al 晶粒平均晶粒直径和形状因子 (b) 固相分数和孔隙率

图 4 不同浇注温度下 Al-Si-Mg-Fe 合金的统计信息

Fig.4 Statistics of Al-Si-Mg-Fe alloys under various pouring temperatures

而增大有效形核率和固相率(见图 4b),因此有利于形成细小的球状晶粒。然而,当浇注温度继续降低至 660 ℃时,制浆机的冷却表面出现粘板现象。

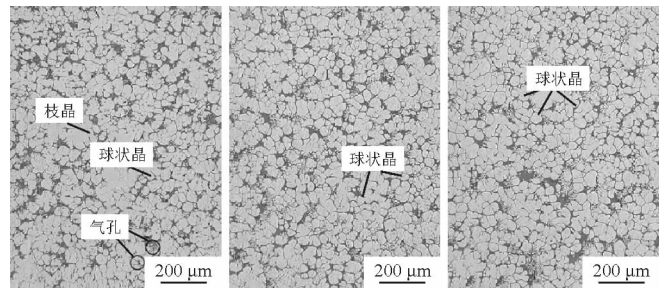
此外,合金组织中可以观察到有气孔存在,为了准确地研究浇注温度对气孔形成的影响,对孔隙率(φ)进行了计算^[13]:

$$\varphi = (1 - \rho/\rho') \times 100\% \quad (4)$$

式中, ρ 为试样的实际测量密度; ρ' 为合金的理论计算密度。可以看出,随着浇注温度降低,孔隙率降低,见图 4b。这是由于浇注温度降低时,熔体的粘度增加,流动速度降低,熔体以层流的形式流入挤压铸造机的入料室,从而有效避免卷气,降低铸件的孔隙率。

2.1.2 挤压压力对显微组织的影响

图 5 和图 6 分别为不同挤压压力下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的显微组织及其统计信息。可以看出,当挤压压力为 100 MPa 时,初生 α -Al 晶粒主要由少量的枝晶和大量的球状晶组成,见图 5a,其平均晶粒直径和形状因子分别为 55.73 μm 和 0.39。当挤压压力为 120 MPa 时,合金中枝晶组织消失,球状晶数量增加,见图 5b,平均晶粒直径和形状因子分别为 48.32 μm 和 0.48。当挤压压力继续增大至 140 MPa 时,合金中初生 α -Al 晶粒为尺寸更加均匀的球晶,见图 5c,其平均晶粒直径和形状因子分别为 48.19 μm 和 0.50。因此,随着挤压压力增加,初生 α -Al 晶粒的平均直径逐渐减



(a) 工艺 4 (b) 工艺 3 (c) 工艺 5

图 5 不同挤压压力下 Al-Si-Mg-Fe 合金的显微组织

Fig.5 Microstructure of Al-Si-Mg-Fe alloy with various squeeze pressures

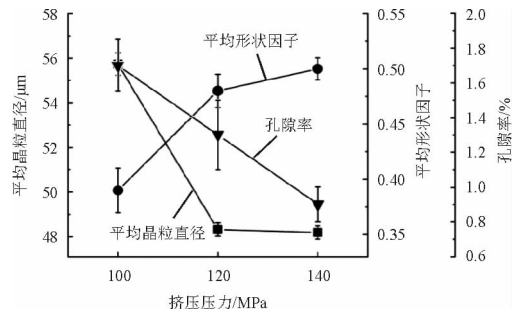


图 6 不同挤压压力下 Al-Si-Mg-Fe 合金的统计信息

Fig.6 Statistics of Al-Si-Mg-Fe alloys under various squeeze pressures

小,形状因子逐渐增加,见图 6。根据 Clausius-Clapeyron 方程^[2]:

ΔTf / ΔP = ΔTf(Vl - Vs) / ΔHf (5)

式中,P 为施加的挤压压力;Tf 为平衡凝固温度;Vl 和 Vs 分别为液相和固相金属的体积;ΔHf 为熔化潜热。挤压压力增加会引起平衡凝固温度增加,从而增加过冷度,而过冷度(ΔT)与临界形核半径(rc)之间存在如下关系^[10]:

rc = 2σlsT0 / (LmΔT + KεT0P) (6)

式中,σls 为固-液界面张力;T0 为合金在标准压力下的熔点;Lm 为压力作用下晶体的凝固潜热;K 为常数;ε 为体积收缩率;P 为挤压压力。因此,增大挤压压力引起熔体过冷度增大,可以减小临界形核半径,增加晶核数量,从而导致初生 α-Al 晶粒被细化和球化。从图 6 可以看到,随着挤压压力增加,孔隙率降低。由于增大挤压压力可使合金熔体与模具贴合更加紧密,导致铸件更加致密,从而降低了孔隙率。

2.2 力学性能

2.2.1 浇注温度对合金力学性能的影响

图 7 为不同浇注温度下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的工程应力-应变曲线,对应的力学性能见表 3。结果显示,随着浇注温度降低,合金的力学性能明显增加,当浇注温度为 670 ℃时,Al-Si-Mg-Fe 合金的力学性能达到最佳,抗拉强度为 278.6 MPa,屈服强度为

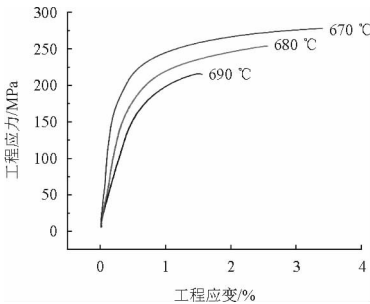


图 7 不同浇注温度下 Al-Si-Mg-Fe 合金的工程应力-应变曲线

Fig.7 Engineering stress-strain curves of Al-Si-Mg-Fe alloy under different pouring temperatures

表 3 不同浇注温度下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of semi-solid squeeze casting Al-Si-Mg-Fe alloy under various pouring temperatures			
浇注温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
690	216.0±3.2	165.8±1.9	1.6±0.3
680	253.7±1.6	182.2±2.4	2.6±0.4
670	278.6±2.1	191.7±1.7	3.4±0.1

191.7 MPa,伸长率为 3.4%。由组织分析可知,低的浇注温度增强了初生 α-Al 晶粒的球化效果,而球状的晶粒可以降低应力集中效应,有利于合金发生均匀的塑性变形,从而提高力学性能。同时,随着浇注温度降低,初生 α-Al 晶粒的平均晶粒直径明显减小。根据霍尔-佩奇公式,屈服强度(σs)与初生 α-Al 晶粒的直径(d)存在如下关系^[13]:

σs = σ0 + Kyd^{-1/2} (7)

式中,σ0 为单晶体的屈服强度;Ky 是与材料相关的常数。因此,细小的晶粒有利于强度增加。

图 8 为不同浇注温度下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的拉伸断口。当浇注温度为 690 ℃时,断口中发现孔缺陷,见图 8a,从而加快了裂纹的萌生以及扩展速率,导致合金力学性能降低^[13]。随着浇注温度降低至 680 ℃时,孔缺陷尺寸减小,降低了裂纹的萌生以及扩展速率,从而增加合金的力学性能^[13]。当浇注温度继续降低至 670 ℃时,孔缺陷消失,韧窝数量增加,从而提高力学性能。综上,当浇注温度为 670 ℃,合金的力学性能最佳。

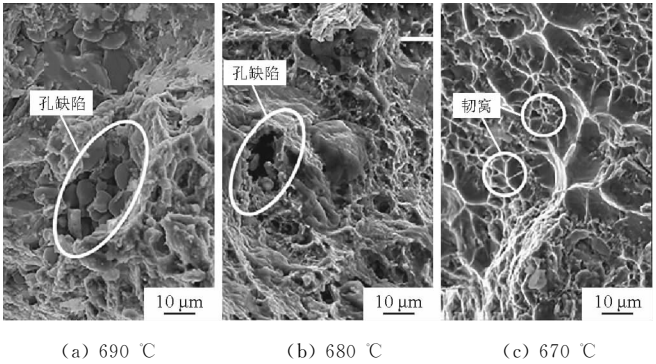


图 8 不同浇注温度下 Al-Si-Mg-Fe 合金的拉伸断口形貌
Fig.8 Tensile fracture morphologies of Al-Si-Mg-Fe alloy under different pouring temperatures

2.2.2 挤压压力对合金力学性能的影响

图 9 为不同挤压压力下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的工程应力-应变曲线,对应的力学性能结果见表 4。图 10 为不同挤压压力下半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的拉伸断口形貌。可以看出,随着挤压压力从 100 MPa 增至 120 MPa,合金的力学性能明显提高,抗拉强度提升了 18.2%,伸长率提高了 78.9%。这是因为一方面,增加挤压压力能有效地消除合金中的枝晶组织并使初生 α-Al 晶粒的平均直径减小,从而提高力学性能;另一方面,随着挤压压力增加,孔缺陷减少,韧窝数量增加,导致合金的力学性能提高。然而,当挤压压力从 120 MPa 增至 140 MPa 时,合金的力学性能提升不明显,同时,挤压压力增大对模具的冲击增大,会缩短模具的使用寿命。综合考虑,挤压压力确定为 120

MPa。

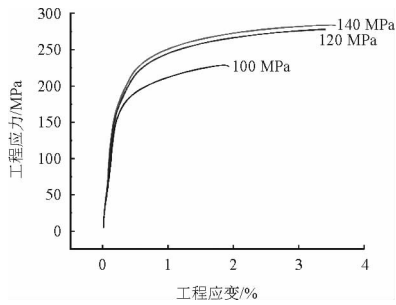


图 9 不同挤压压力下 Al-Si-Mg-Fe 合金的工程应力-应变曲线
Fig.9 Engineering stress-strain curves of Al-Si-Mg-Fe alloy under different pressures

表 4 不同挤压压力下的半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of semi-solid squeeze casting Al-Si-Mg-Fe alloy under various pressures			
挤压压力/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
100	235.7±1.2	188.4±0.9	1.9±0.5
120	278.6±2.1	191.7±1.7	3.4±0.1
140	284.0±0.8	198.4±2.3	3.6±0.1

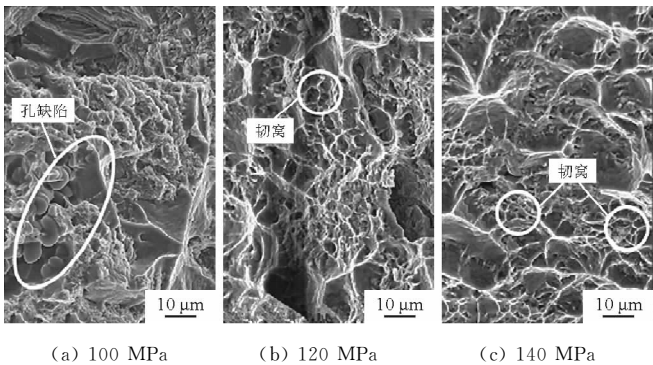


图 10 不同挤压压力下 Al-Si-Mg-Fe 合金的拉伸断口形貌
Fig.10 Tensile fracture morphologies of Al-Si-Mg-Fe alloy under various pressures

2.2.3 热处理对合金力学性能的影响

在优化的工艺参数基础上,对半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金铸件进行 T6 热处理。图 11 为 T6 热处理后半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金铸件的工程应

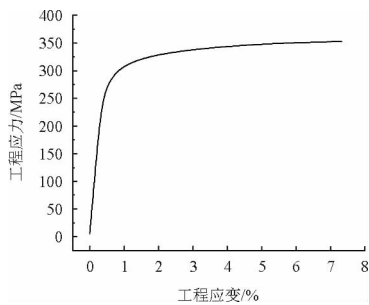


图 11 T6 热处理后 Al-Si-Mg-Fe 合金的工程应力-应变曲线
Fig.11 Engineering stress-strain curves of Al-Si-Mg-Fe alloy after T6 heat treatment

力-应变曲线,对应的力学性能结果见表 5。可以看出, T6 热处理后力学性能得到明显提高。

表 5 T6 热处理后半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of semi-solid squeeze casting Al-Si-Mg-Fe alloy after T6 heat treatment			
热处理	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
T6	352.5±1.2	280.4±1.6	7.3±0.3

3 结 论

(1)随着浇注温度降低,半固态挤压铸造 Al-Si-Mg-Fe 合金过冷度增加,有效形核率增大,导致初生 α -Al 晶粒的平均晶粒直径减小,形状因子增加,孔隙率降低,从而提高合金的力学性能,但过低的浇注温度会导致粘料。

(2)随着挤压压力增加,初生 α -Al 晶粒更为细小、球化,且铸件更加致密,力学性能提高。但当挤压压力超过一定值后,对铸件的组织、致密性和力学性能的改善不明显,反而会影响模具使用寿命。

(3)倾斜角度为 30°、振动频率为 60 Hz 条件下,半固态挤压铸造的优化浇注温度和挤压压力分别为 670 ℃和 120 MPa,对应铸件的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 278.6 MPa、191.7 MPa 和 3.4%。

(4)T6 热处理后,铸件的力学性能得到进一步提高,其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 352.5 MPa、280.4 MPa 和 7.3%。

参 考 文 献

[1] 薛利文,周文强,朴一男,等.挤压铸造 Al-Si 系合金成分优化,孕育变质及其复合材料的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2022,42(1): 22-31.

[2] WANG Y F, ZHAO S D, ZHANG C Y. Microstructures and mechanical properties of semi-solid squeeze casting ZL104 connecting rod[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28: 235-243.

[3] 郑瀚森,徐永涛,高志华,等.大型 7050 铝合金轮毂流变挤压铸造技术[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8): 970-973.

[4] MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Evolution of particle morphology in semisolid processing[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, A36: 2 205-2 210.

[5] CHEN X R, ZHANG Z F, XU J, Effects of annular electromagnetic stirring processing parameters on semi-solid slurry production [J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 873-877.

[6] LI N Y, MAO W M, GENG X X, et al. Semi-solid 6061 aluminum alloy slurry prepared by serpentine channel pouring process and its rheo-diecasting[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 279-286.

[7] LIU Y, GAO M Q, FU Y, et al. Microstructure evolution and solidification behavior of a novel semi-solid alloy slurry prepared by vibrating contraction inclined plate[J]. Metals, 2021, 11: 1 810.

铝合金半固态加工的现状和发展前景探讨

李杰华

(奥地利莱奥本大学铸造研究所)

摘要 基于16届国际半固态加工会议探讨了半固态加工的现状和发展前景。可以发现,再生铝合金流变铸造正在成为铝合金流变铸造的主流,计算机断层扫描在分析铝合金流变铸造缺陷方面正在得到越来越多的应用,同步辐射在分析半固态流变行为方面具有非常重要的科学意义和应用价值。虽然正在面临着大型真空一体化压铸的激烈竞争,半固态加工通过和连接技术的结合依然在大型复杂薄壁优质铸件的生产方面具有广泛的应用前景。

关键词 流变压铸;再生铝合金;计算机断层扫描;同步辐射分析

中图分类号 TG146.21;G253.11;TG249.2⁺6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Semi-solid Casting Technology of Aluminum Alloys

Li Jiehua

(Chair of Casting Research, Montanuniversität Leoben, Austria)

Abstract: Based on the 16th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, some views on research progress in semi-solid casting technology were summarized. The results indicate that recycled Al alloy becomes predominate, computed tomography has been widely used in the defect control of rheo-casting of Al alloys, and synchrotron radiation is of fundamental and practical importance for the further development of semi-solid processing. Although facing the fierce competition of large vacuum integrated die casting, semi-solid combined with suitable join technologies is still promising for the increasing demands of producing large thin complex high-performance casting parts processing.

Key Words: Rheo-casting, Recycled Al Alloys, Computed Tomography, Synchrotron Radiation

半固态加工主要包括流变成形和触变成形。在流变成形过程中,首先需要制备半固态浆料,然后通过常规压铸机进行流变成形。流变成形改变了传统凝固条件下的枝晶组织,生成近球晶组织,因此具有更高的力学性能,尤其是动态疲劳性能。在触变成形过程中,首先需要制备棒料,然后通过后续加热进行触变成形。与

触变成形相比,流变成形具有工艺流程短、过程成本低等特点。目前来看,流变成形由于制浆技术的逐渐成熟,已经占据了半固态加工的主导地位。虽然半固态加工在铜合金、钢铁以及高温合金等方面也有报道,但还是以Al-Si系合金为主。一方面,Al-Si合金具有流动性良好、力学性能较高、成本较低等特点,一直占据铸造

收稿日期:2023-04-26;**修改稿收到日期:**2023-05-06

作者简介:李杰华,男,1979年出生,教授,Franz Josef straÙe 18, Austria, Leoben(8700), E-mail:jiehua.li@unileoben.ac.at

引用格式:李杰华. 铝合金半固态加工的现状和发展前景探讨[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):752-755.

LI J H. Research progress in semi-solid casting technology of aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):752-755.

[8] LEI S M, GAO L, HARADA Y, et al. Microstructure analysis of quenched semi-solid A356 aluminum alloy slurry by using Weck's reagent[J]. Materials Transactions, 2020, 61(6): 1 077-1 083.

[9] QI M F, KANG Y L, LI J Y, et al. Improvement in mechanical, thermal conductivity and corrosion performances of a new high-thermally conductive Al-Si-Fe alloy through a novel R-HPDC process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279: 116 586.

[10] 李伟东,陈和兴,王顺成,等.工艺参数对半固态挤压铸造 A356 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(7): 611-614.

[11] 胡传林.A356 铝合金流变挤压铸造工艺及数值模拟研究[D].南昌:南昌大学,2016.

[12] QI M F, KANG Y L, LI J Y, et al. Synchronously improving the thermal conductivity and mechanical properties of Al-Si-Fe-Mg-Cu-Zn alloy die castings through ultrasonic-assisted rheoforming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34(10): 1 331-1 344.

[13] LIU Y, GAO M Q, MENG S C, et al. Solidification behavior and enhanced properties of semi-solid Al-8Si-0.5Fe alloys fabricated by rheo-diecasting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 3 160-3 171.

(编辑:彭瑾)