

Fe 含量对挤压铸造 Al-3.5Mg-0.8Mn 合金组织性能的影响

唐 月¹ 王 勇¹ 罗宗强¹ 林 波² 张卫文¹
(1.华南理工大学机械与汽车工程学院; 2.贵州大学机械工程学院)

摘 要 采用拉伸和硬度测试、扫描电镜和 X 射线衍射仪等手段,研究了不同 Fe 含量对挤压铸造 Al-3.5Mg-0.8Mn 合金显微组织和力学性能的影响。结果表明,Fe 能改善合金的力学性能,合金中只存在 Al₆(FeMn)相。合金的抗拉强度和屈服强度随着 Fe 含量的增加而增大,伸长率随着 Fe 含量的增加而降低,原因是随着 Fe 含量增加,硬脆的 Al₆(FeMn)相增多。在挤压压力为 75 MPa 和 Fe 含量为 0.5%时,合金的综合力学性能最佳,其抗拉强度为 252 MPa,屈服强度为 128 MPa,伸长率为 28%。

关键词 Fe; Al-Mg-Mn 合金; 挤压铸造; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG249.2; TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Fe Content on Microstructures and Mechanical Properties of Squeeze Casting Al-3.5Mg-0.8Mn Alloys

Tang Yue¹, Wang Yong¹, Luo Zongqiang¹, Lin Bo², Zhang Weiwen¹

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology;
2.School of Mechanical Engineering, Guizhou University)

Abstract: The effects of Fe content on the microstructures and mechanical properties of squeeze casting Al-3.5Mg-0.8Mn alloys were analyzed by tensile and hardness test, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results reveal that Fe can improve the mechanical properties, and only Fe-rich intermetallics of Al₆(FeMn) phases is observed in the alloy. The ultimate tensile strength and yield strength are improved by increasing Fe content, however the elongation is decreased due to the increase of brittle Al₆(FeMn)phases. With applied pressure of 75 MPa and the Fe mass fraction of 0.5%, the mechanical properties of the alloys present the satisfied effects, where ultimate tensile strength, yield strength and elongation reach 252 MPa, 128 MPa and 28%, respectively.

Key Words: Fe, Al-Mg-Mn Alloy, Squeeze Casting, Microstructure, Mechanical Properties

随着节能减排和绿色铸造趋势的加强,交通领域安全结构件的轻量化日益受到重视,尤其是新能源汽车领域,对高强、高韧、轻质铝合金安全结构件的需求愈加强烈。Al-Mg 系合金具有密度小、比强度高、成形性好、耐腐蚀、可焊性好等特点,在交通领域得到关注^[1]。然而,Al-Mg 系合金因其较差的熔铸性能和较低的强度,限制了其作为交通领域安全结构件的使用。

Al-Mg-(Mn)合金是非热处理型铝合金,因此减少了热处理的成本和零件的变形^[2]。改善和提高铝镁合金的熔铸性能和力学性能的途径:一是改变成形工艺,如采用压力铸造来生产铝镁合金精密零部件,但由于气体易卷入,导致铸件性能较差^[3,4]。挤压铸造具有工艺简单、成本低、产品性能好、质量可靠等特点,能实现近

净成形,可生产高质量铸件取代锻件^[5],广泛应用于 Al-Si、Al-Cu 和 Al-Zn 系合金铸件的成形^[6~8]。目前为止,针对挤压铸造 Al-Mg-(Mn)合金的研究报道还较少^[9~11]。二是合金化,主要通过添加 Sc、Zr、Cu 等元素来实现,但大幅提升了合金的成本^[12,13]。ZHU X 等^[14]研究了 Fe 含量对压铸 Al-Mg-Mn 合金组织和性能的影响,发现在保留较高伸长率的基础上,Fe 含量可以显著提升合金的强度。此外,Fe 作为铝合金中常见的杂质元素,一般无法避免,在废铝回收过程中还会不断累积^[15]。前期研究结果发现,在挤压铸造高 Fe 含量 Al-Cu 合金中,挤压铸造可以改善杂质 Fe 对 Al-Cu 合金的危害,有利于废铝的回收再利用^[16]。

基于此,本课题采用挤压铸造制备高 Fe 含量 Al-

收稿日期:2020-08-17;**修改稿收到日期**:2020-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704084);广东省自然科学基金团队资助项目(2015A030312003)

第一作者简介:唐月,男,1995 年出生,硕士研究生,广州(510640),E-mail:tangyue7113@163.com

通信作者:张卫文,男,1969 年出生,教授,广州(510640),E-mail:mewzhang@scut.edu.cn

引用格式:唐月,王勇,罗宗强,等. Fe 含量对挤压铸造 Al-3.5Mg-0.8Mn 合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):177-181.

TANG Y, WANG Y, LUO Z Q, et al. Effects of Fe content on microstructures and mechanical properties of squeeze casting Al-3.5Mg-0.8 Mn alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):177-181.

Mg-Mn 合金,主要研究 Fe 含量对挤压铸造非热处理型 Al-3.5Mg-0.8Mn 合金显微组织和力学性能的影响,为高性能、低成本、易再生的高 Fe 含量非热处理型挤压铸造 Al-Mg-Mn 合金提供参考,以满足交通领域高强、高韧、轻质铝合金安全结构件的需求。

1 试验材料和方法

试验所用原料(质量分数):纯度为 99.8% 的纯铝、99.97% 的纯镁、Al-10Fe、Al-14Mn、Al-5Ti-B 中间合金。在井式电阻炉中进行合金熔炼,熔体经过精炼、除气、扒渣后,于 720 ℃ 左右浇注,制备出 Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe 合金,其化学成分见表 1。

表 1 Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe alloy

编号	w _B / %			
	Mg	Mn	Fe	Al
1	3.19	0.89	0.12	余量
2	3.27	0.87	0.45	余量
3	3.38	0.85	0.81	余量

挤压铸造在 1 000 kN 四柱液压机上进行,模具材质为 H13 钢,采用石墨机油润滑,模具预热温度约为 230 ℃,挤压压力分别为 0(重力铸造)和 75 MPa,挤压速度为 10~20 mm/s,保压时间为 30 s,获得的试样件尺寸为 ϕ68 mm×65 mm。张东城等^[17],赵愈亮等^[18]

对挤压铸造铝合金的研究发现,当挤压力为 75 MPa 时合金的力学性能最佳,对模具的损耗小。在铸件同半径的周边截取 ϕ5 mm 的标准拉伸试样,在 SANS CMT5105 型微机控制万能材料试验机上进行拉伸力学性能测试,拉伸速度为 1 mm/min,每个测量结果为 5 个试样的平均值。在 HB-3000B 型布氏硬度计上进行硬度测试,钢球直径为 5.0 mm,载荷为 2 500 N,保压时间为 30 s,取 5 个点的平均值。

在拉伸试样夹头部位末端的相同位置截取金相试样。在 DMI 5000M 金相显微镜上进行微观组织观察,并利用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件进行第二相定量分析。采用 $A_A = V_V^{[19]}$,即第二相的面积分数(A_A)等于体积分数(V_V),将软件计算出的面积分数转化为体积分数,在放大 500 倍下选取至少 15 个视场。使用 Xpert Powder X 射线衍射仪和 Quanta200 扫描电镜对试样微观结构进行表征和相成分分析。

2 试验结果与分析

2.1 合金的微观组织

图 1 为不同挤压力下 Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe 合金的显微组织。表 2 为合金中富 Fe 相的能谱分析结果。从表 2 可知,合金组织中的富 Fe 相均为 Al₆(FeMn)相,与文献[14,20,21]结果一致。

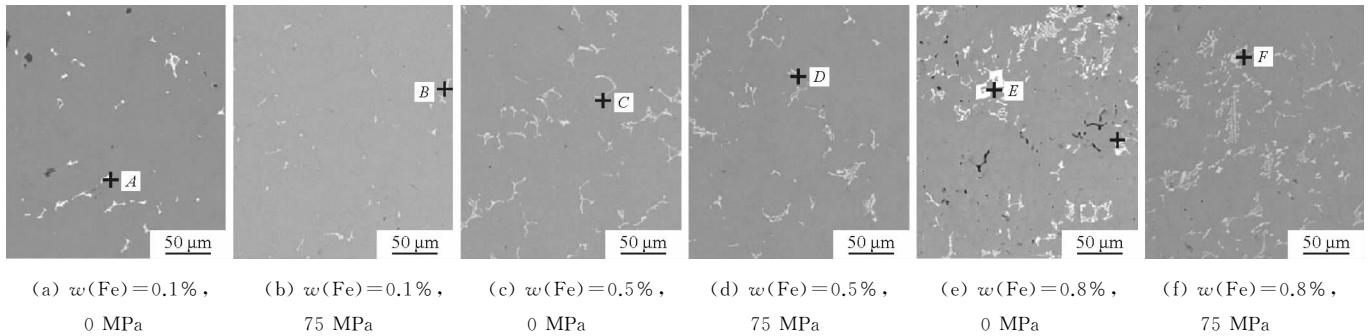


图 1 在不同挤压力下 Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe 合金的 SEM 图

Fig.1 Backscattered SEM micrographs of Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe alloys under different extrusion pressures

表 2 Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe 合金中富 Fe 相的能谱分析结果

Tab.2 Average composition of Fe-rich intermetallics
in Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe alloy

编号	压力/ MPa	位置	构成相	w _B / %				
				Al	Mg	Mn	Fe	Si
1	0	A	Al ₆ (FeMn)	80.17	2.77	8.95	10.13	0.14
	75	B	Al ₆ (FeMn)	72.01	4.22	12.71	10.68	0.37
2	0	C	Al ₆ (FeMn)	72.77	2.24	7.95	16.77	0.26
	75	D	Al ₆ (FeMn)	72.68	1.96	8.70	15.21	0.30
3	0	E	Al ₆ (FeMn)	76.35	1.05	7.89	14.61	0.10
	75	F	Al ₆ (FeMn)	80.49	1.68	6.58	10.94	0.41

晶界处的富 Fe 相形貌、数量和尺寸发生了变化;当 Fe 含量为 0.1% 时,合金中的 Al₆(FeMn)相为汉字状,数量较少,见图 1a;当 Fe 含量为 0.5% 时,合金中大部分为汉字状 Al₆(FeMn)相,仅有少量板条状 Al₆(FeMn)相,见图 1c;当 Fe 含量增加到 0.8% 时,合金中棒状和汉字状 Al₆(FeMn)相数量增多,见图 1e。挤压压力为 75 MPa 时,当 Fe 含量为 0.1% 时,合金中存在尺寸非常细小的汉字状 Al₆(FeMn)相,见图 1b;当 Fe 含量为 0.5% 时,合金中主要为汉字状的 Al₆(FeMn)相,并未发现板条状 Al₆(FeMn)相,见图 1d;当 Fe 含量增加到

从图 1 可以看出,随着 Fe 含量增加,重力铸造合金

0.8%时,合金中存在少量板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相,连续汉字状的 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相变为分散细小的骨骼状,见图 1f。从图 1 还看出,当挤压力为 75 MPa 时,合金中的缩孔、缩松基本消失。

不同压力下的 Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe 合金中 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相体积分数和尺寸的变化见图 2。由图 2a、图 2b 可知,汉字状和板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的体积分数随着 Fe 含量的增加而增加,当挤压力为 75 MPa 时,合金中的汉字状和板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的体积分数减少。由图 2c 可知,汉字状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的尺寸随着 Fe 含

量的增加而增大。当挤压力为 0 时,随着 Fe 含量从 0.1% 增加到 0.8%,汉字状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的尺寸由 6.6 μm 增大到 12.8 μm ,但 75 MPa 的挤压力明显降低了汉字状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的尺寸。此外,还可发现,板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的长度和宽度随着 Fe 含量的增加而急剧增大。由图 2d 可见,当挤压力为 0 时,随着 Fe 含量从 0.1% 增加到 0.8%,板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的平均长度增至 24.4 μm ,平均宽度增至 4.5 μm 。然而 75 MPa 的挤压力使板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的长度和宽度显著减小,Fe 含量为 0.8% 时,板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的平均长度

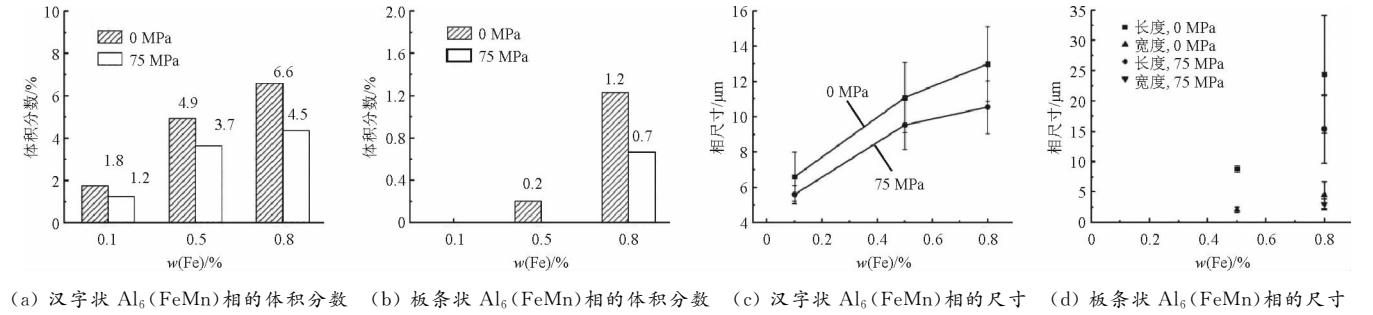


Fig.2 Quantitative analysis of $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ phase in the Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe alloys

和宽度分别为 15.4 μm 和 3 μm 。

图 3 为当挤压力为 0 时 Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe 合金的 XRD 图谱。可以看出,合金的相组成为 $\alpha\text{-Al}$ + $\text{Al}_6(\text{FeMn})$,随着 Fe 含量增加, $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相的衍射峰也逐渐增加。XRD 结果进一步证明,合金中存在的富 Fe 相为 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$,与能谱分析结果一致。

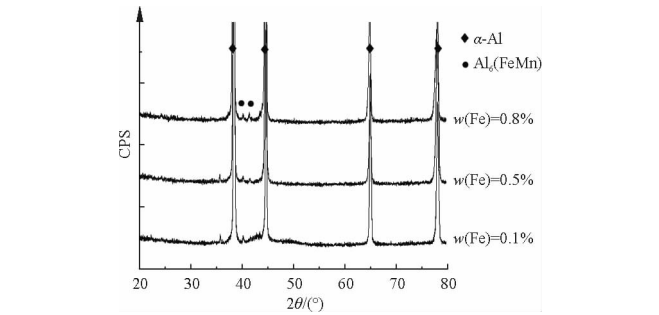


图 3 压力为 0 时 Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe 合金的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of the Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe alloys under extrusion pressures of 0

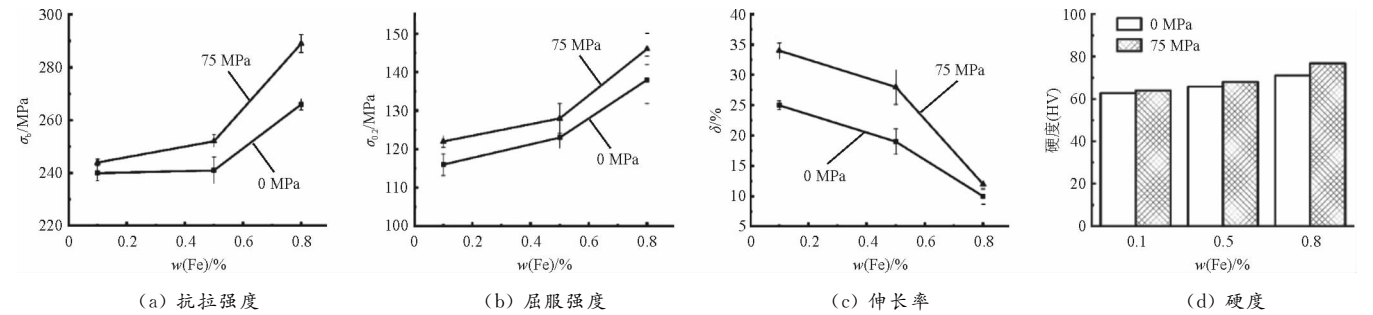


图 4 不同压力下 Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe 合金的力学性能
Fig.4 Mechanical properties of the Al-3.5Mg-0.8Mn- x Fe alloys under different pressures

量增加而增大;当挤压力为 0 时,硬度(HB)从 62.8 增加到 71,增幅为 13.1%;当挤压力为 75 MPa 时,硬度(HB)从 64 增加到 76.8,增幅为 20%。挤压力从 0 增大到 75 MPa 时,合金的宏观硬度也随之增大。

图 5 为 Al-*z*Mg-*y*Mn-*x*Fe 合金在不同工艺条件下的力学性能^[5,9,12,14,22~24]。可以看出,Fe 含量为 0.5% 的 Al-5Mg-0.8Mn 合金在 75 MPa 压力下成形,抗拉强度达到 252 MPa,屈服强度为 128 MPa,伸长率为 28%。与有关研究相比,所制备的高 Fe 含量挤压铸造 Al-Mg-Mn 合金具有强度和塑性方面的优势,尤其是合金的塑性。与金属型重力铸造 Al-5.0Mg-0.6Mn 合金相比^[23],抗拉强度相当,而伸长率提高了 2 倍以上。与挤压铸造 Al-3.0Mg-0.5Mn 合金相比^[5],抗拉强度提高了 20%,伸长率提高了 93%。由此可见,挤压铸造 Al-3.5Mg-0.8Mn-0.5Fe 合金具有非常优异的综合力学性能,达到了高 Fe 含量挤压铸造 Al-Mg-Mn 合金高强、高韧的力学性能目的。

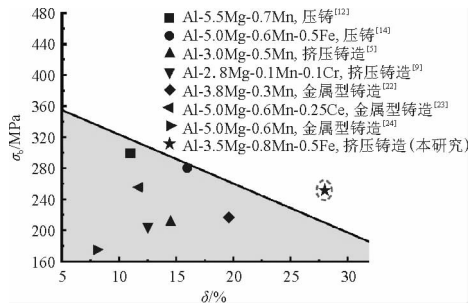


图 5 Al-Mg-Mn 合金在不同工艺条件下的力学性能
Fig.5 Mechanical properties of the exsited Al-Mg-Mn alloys produced by different processes

2.3 合金的断口形貌

不同压力下 Al-5Mg-0.8Mn-*x*Fe 铸态合金的断口形貌见图 6。可以看出,当 Fe 含量增加到 0.8% 时,拉伸断口中的韧窝数量和深度显著减少。这说明相同压力下,Fe 含量降低了合金的塑性。与重力铸造相比,在挤压力为 75 MPa 时,拉伸断口韧窝的数量和深度都增大,这说明挤压铸造显著改善了合金的塑性。

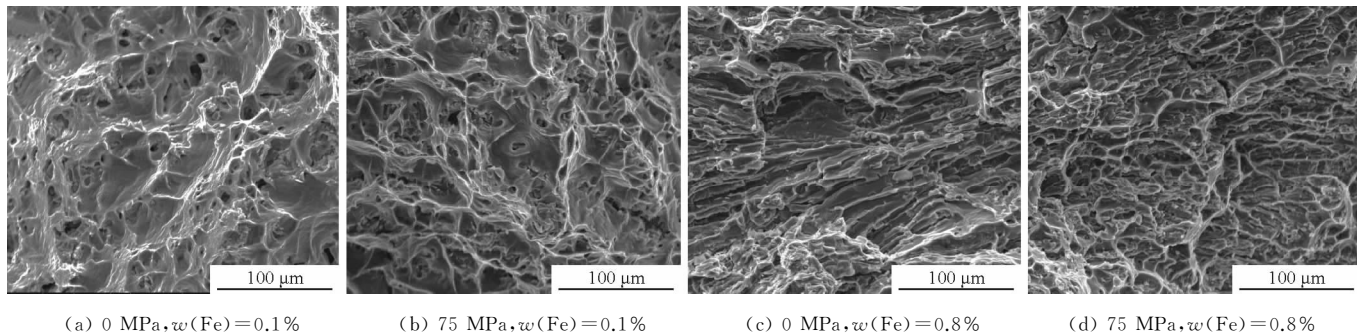


图 6 不同压力下 Al-5Mg-0.8Mn-*x*Fe 合金的拉伸断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of the Al-3.5Mg-0.8Mn-*x*Fe alloys under different extrusion pressures

3 分析与讨论

与重力铸造相比,挤压铸造改善了合金的力学性能,有利于发挥高 Fe 含量挤压铸造 Al-Mg-Mn 合金高强高韧的优势。这主要是归因于 Fe 含量和挤压力导致的显微组织变化。

Fe 含量显著提升了 Al-Mg-Mn 合金的强度,但是降低了合金的伸长率,这主要是由于 Al-Mg-Mn 合金中 Fe 含量的增加导致合金中 Al₆(FeMn)相增多。从图 2 中富 Fe 相的定量分析可知,随着 Fe 含量从 0.1% 增加到 0.8%,汉字状和板条状富 Fe 相数量增加。与基体相比,富 Fe 相硬而脆,因此富 Fe 相阻碍了位错的运动,产生第二相强化,从而提高合金的强度和硬度^[14]。合金在凝固过程中,富 Fe 相阻碍液相的补充形成缩孔、缩松,脆性的富 Fe 相在拉伸的过程中造成应力集中,容易形成裂纹源,所以合金的伸长率降低^[21]。

与重力铸造相比,挤压铸造改善了合金的力学性

能,有利于发挥高 Fe 含量的 Al-5Mg-0.8Mn 合金高强、高韧的优势,这主要是由于压力作用下导致显微组织的变化。一方面,由于压力凝固过程中的强制补缩作用,挤压铸造将显著降低合金的缩孔、缩松铸造缺陷,从而大幅提升合金的力学性能;另一方面,根据克拉伯龙方程,挤压力可以显著提升合金的过冷度,从而使晶粒细化,同时在挤压铸造过程中,压力的作用消除了铸件与模具之间的间隙,导致界面传热系数提高,使合金的冷却速度加快^[25]。在挤压力下,冷却速度较高,Fe 原子不容易聚集,且形核数目增多,从而当压力由 0 增大到 75 MPa 时,棒状和汉字状的 Al₆(FeMn)相尺寸都减少,连续汉字状的 Al₆(FeMn)相变为分散细小的骨骼状。前期研究工作发现挤压力改善了 Al₆(FeMn)相的形态,降低 Al₆(FeMn)相的有害影响。因此高 Fe 含量挤压铸造 Al-5Mg-0.8Mn 合金高强、高韧力学性能获得的主要原因是压力凝固导致的组织细化、铸造缺陷减少以及富 Fe 相形态的改变。

4 结 论

(1) Fe 含量和挤压力没有改变高 Fe 含量 Al-5Mg-0.8Mn 合金中富 Fe 相的类型。不同 Fe 含量的合金中只存在 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相。Fe 含量和挤压力显著改变了富 Fe 相的形态,在重力铸造下,在 Fe 含量低于 0.5% 时,合金中主要为汉字状的 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相,存在少量板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相;当 Fe 含量增加到 0.8% 时,合金中主要为汉字状和板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相。挤压压力可以使合金中板条状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相转变为汉字状的 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相,同时细化富 Fe 相的尺寸,并使其变得分布均匀。

(2) 随着 Fe 含量增加,Al-5Mg-0.8Mn 合金的强度和硬度显著提高,而伸长率显著下降。挤压铸造可以显著提升合金的力学性能,这主要是由于压力作用下组织细化、铸造缺陷减少,以及富 Fe 相形态改变导致的结果。当挤压力增大到 75 MPa,合金的抗拉强度和屈服强度显著升高。

(3) 在挤压力为 75 MPa 和 Fe 含量为 0.5% 时,Al-5Mg-0.8Mn 合金具有非常优异的综合力学性能,其抗拉强度为 252 MPa,屈服强度为 128 MPa,伸长率为 28%。

参 考 文 献

- [1] POPOVIĆ M, ROMHANJI E. Stress corrosion cracking susceptibility of Al-Mg alloy sheet with high Mg content[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 125: 275-280.
- [2] ZHANG P, LI Z, LIU B, et al. Improved tensile properties of a new aluminum alloy for high pressure die casting[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A651: 376-390.
- [3] ZHAO H D, WANG F, LI Y Y, et al. Experimental and numerical analysis of gas entrapment defects in plate ADC12 die castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4 537-4 542.
- [4] LEE S G, GOKHALE A M. Formation of gas induced shrinkage porosity in Mg-alloy high-pressure die-castings[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(4): 387-390.
- [5] 罗守靖,陈炳光,齐丕骥.液态模锻与挤压铸造技术[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [6] LEE K, KWON Y N, LEE S. Effects of eutectic silicon particles on tensile properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, casting-forging, and squeeze-casting processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1): 532-541.
- [7] ZHANG W W, LIN B, ZHANG D T, et al. Microstructures and mechanical properties of squeeze cast Al-5.0Cu-0.6Mn alloys with different Fe content[J]. Materials & Design (1980-2015), 2013, 52: 225-233.
- [8] FAN C H, CHEN Z H, HE W Q, et al. Effects of the casting temperature on microstructure and mechanical properties of the

- squeeze-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504(2): L42-L45.
- [9] LÜ S L, WU S S, WAN L, et al. Microstructure and tensile properties of wrought al alloy 5052 produced by rheo-squeeze casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2013, A44(6): 2 735-2 745.
- [10] 杨文,杜刚,闫德胜,等.挤压铸造对 Al-Mg-Sc-Zr 合金组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(1):1-6.
- [11] 张冀粤,王智民,黄积荣. Al-Mg 合金的挤压铸造[J].热加工工艺,1998(4):50-51.
- [12] YUAN L, PENG L, HAN J, et al. Effect of Cu addition on microstructures and tensile properties of high-pressure die-casting Al-5.5Mg-0.7Mn alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 1 017-1 026.
- [13] PRACH O, TRUDONOSHYN O, RANDELZHOFFER P, et al. Effect of Zr, Cr and Sc on the Al-Mg-Si-Mn high-pressure die casting alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A759: 603-612.
- [14] ZHU X, BLAKE P, DOU K, et al. Strengthening die-cast Al-Mg and Al-Mg-Mn alloys with Fe as a beneficial element[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A732: 240-250.
- [15] ZHANG W N, LIN B, CHENG P, et al. Effects of Mn content on microstructures and mechanical properties of Al-5.0Cu-0.5Fe alloys prepared by squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1 525-1 531.
- [16] 林波,张卫文,程佩,等.挤压铸造 Al-5.0Cu-0.6Mn-0.5Fe 合金的显微组织和力学性能[J].中国有色金属学报,2013,23(5): 1 195-1 201.
- [17] 张东城.高强韧铝硅合金的挤压铸造组织和性能研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [18] 赵愈亮,孟凡生,张杨,等. Si 含量对挤压铸造 Al-5.0Cu-0.6Mn-0.7Fe 合金显微组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(11): 3 040-3 050.
- [19] RUSS J C, DEHOFF R T. Practical stereology[M]. Germany: Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] ZHENG X Z, PAUL B, JIANG S X. The formation mechanism of $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ phase in die-cast Al-Mg alloys[J]. Cryt. Eng. Comm., 2018, 20(10): 1 039-1 045.
- [21] LIU Y, LUO L, HAN C, et al. Effect of Fe, Si and cooling rate on the formation of Fe- and Mn-rich intermetallics in Al-5Mg-0.8 Mn alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 305-312.
- [22] 孙景旺,王渠东,丁文江.铸造 Al-Mg-Mn 合金的显微组织及力学性能[J].特种铸造及有色合金,2012,32(1):85-89.
- [23] 王春涛,姚杰,汤华平,等.铸造方法对 Al-Mg-Mn-Ce 合金组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(10): 1 125-1 130.
- [24] OKAYASU M, TAKEUCHI S. Mechanical properties of cast Al-5Mg alloy produced by heated mold continuous casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2018, 12(2): 298-306.
- [25] GHOMASHCHI M, VIKHROV A. Squeeze casting: An overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(1-3): 1-9.

(编辑:张正贺)