

挤压铸造高强韧 Al-Si-Cu-Mg 合金组织性能研究

范卫忠¹ 黄建良¹ 闫俊¹ 王东涛² 张 海²

[1.华劲新材料研究院(广州)有限公司; 2.苏州大学高性能金属结构材料研究院]

摘 要 研究了挤压铸造高强韧 Al-Si-Cu-Mg 合金的组织与性能。结果表明,合金致密性良好,共晶 Si、含 Cu 相均匀分布于材料的横截面。经 T6 处理后,共晶 Si 与含 Cu 相均发生了明显的球化,时效过程含 Cu/Si/Mg 纳米强化相的析出使屈服强度提升 180 MPa 以上,同时合金也能保持良好的韧性;挤压铸造 Al-9Si-3.4Cu-0.15Mg 合金 T6 处理后的屈服强度可达 375 MPa 以上,抗拉强度可达 423 MPa 以上,伸长率可达 9% 以上。

关键词 铸造铝合金;纳米相强化;力学性能

中图分类号 TH142.3;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of High-strength-ductility Al-Si-Cu-Mg Alloy by Squeeze Casting

Fan Weizhong¹, Huang Jianliang¹, Yan Jun¹, Wang Dongtao², Zhang Hai²

[1.Huajin New Material Research Institute (Guangzhou) Co., Ltd.;

2.High-Performance Metal Structural Materials Research Institute(HMR), Soochow University]

Abstract: The microstructure and mechanical properties of the high-strength-ductility Al-Si-Cu-Mg alloy by squeeze casting were investigated. The results indicate that the alloy has excellent compactness, where the eutectic Si and Cu-containing phases are uniformly distributed in the cross-section of the specimen. After T6 treatment, the eutectic Si and Cu-containing phases are significantly spheroidized. The Cu/Si/Mg-containing nano-reinforced precipitations during aging can effectively increase the yield strength by more than 180 MPa, meanwhile the alloy can maintain desirable ductility. The yield strength, tensile strength of the squeeze casting Al-9Si-3.4Cu-0.15Mg alloy can reach over 375 MPa and 423 MPa, elongation over 9% after T6 treatment.

Key Words: Casting Aluminum Alloy, Nanophase Strengthening, Mechanical Properties

挤压铸造工艺是结合铸造和塑性加工特点的先进材料精确成形技术^[1~5],相较于压铸,铝合金挤压铸件可以通过 T6 热处理进行时效强化,有效提高其力学性能^[6~8]。目前挤压铸造铝合金主要以 Al-Si-Mg 合金为主,其具有良好的铸造性能和耐蚀性,T6 处理后通过 β'' 强化相的析出,可使合金的屈服强度提升至 250~300 MPa,伸长率为 6%~10%^[9~10]。但随着新一代轻量化挤压铸造铝合金对力学性能要求的提高,需要屈服强度达到 350 MPa 以上,伸长率大于 6%,以满足铸造铝合金承载件的性能需求。目前研究较多的 Al-Cu 系铸造合金,虽然具有较高的力学性能,但其铸造性能弱于 Al-Si 合金,压铸过程易出现铸造缺陷^[11~13]。而 Al-Mg 系合金铸造性能以及强度目前难以满足高强韧铸

造铝合金的性能需求^[14,15]。基于此,本课题以铸造性能优异的 Al-Si 系合金为基础,通过 Cu、Mg 含量的适当匹配,设计制备高强韧的挤压铸造铝合金,分析其微观组织与力学性能以及 T6 处理后合金的强化机理。

1 试验方法

试验使用 99.99% (质量分数,下同) 纯铝锭、Al-20Si 中间合金、99.95% 纯 Mg 锭、99.99% 纯 Cu 块在挤压铸造机边炉内配置试验合金,设计合金成分为 Al-9Si-3.5Cu-0.15Mg,光谱检测实际成分见表 1。熔炼过程首先在机边炉内熔炼纯铝锭,在 730~750 °C 下依次加入 Si、Mg、Cu 元素原料进行熔化,而后对熔体使用高纯氩气除气精炼 20 min。使用 Al-10Sr 中间合金进行

收稿日期:2021-09-07;修改稿收到日期:2021-10-08

第一作者简介:范卫忠,男,1968 年出生,高级工程师,广州(511358),E-mail:gisfanweizhong@hotmail.com

通信作者:王东涛,男,1991 年出生,讲师,江苏苏州(215000),E-mail:dtwang@suda.edu.cn

引用格式:范卫忠,黄建良,闫俊,等. 挤压铸造高强韧 Al-Si-Cu-Mg 合金组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):513-516.

FAN W Z, HUANG J L, YAN J, et al. Microstructure and properties of high-strength-ductility Al-Si-Cu-Mg alloy by squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):513-516.

变质处理。挤压铸造使用 HVSC-400T 型挤压铸造机,浇注温度为 710~750 ℃,挤压力为 50~60 MPa,用直径为 6 mm 的模具挤压铸造拉伸试棒,其尺寸见图 1,模具温度为 240~260 ℃。

表 1 挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金的实际化学成分

Tab.1 Actual chemical composition of squeeze casting

Al-Si-Cu-Mg alloy						%
ω_B						
Si	Cu	Mg	Fe	Ti	Al	
8.92	3.41	0.16	0.12	0.11	余量	

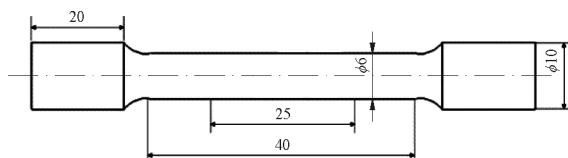


图 1 挤压铸造拉伸试棒

Fig.1 Tensile specimen bar by squeeze casting

取试棒拉伸段的横截面进行微观组织分析,使用 NETZSCH DSC204 进行铸态试样的 DSC 曲线分析,使用 Phenom XI 扫描电镜(SEM)进行微观组织的观察分析,使用 DDL200 拉伸试验机进行拉伸性能测试;而后对铸态试样进行 T6 处理,经 490 ℃×4 h 固溶处理后水淬,再进行 170 ℃×6 h 的时效处理,观察 T6 处理后的微观组织;通过 JEM-2100 场发射透射电镜(TEM)观察时效后的纳米强化相析出和拉伸断口形貌。

2 试验结果与讨论

图 2 为挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金试棒横截面从试棒边部到心部再到边部的均匀性对比。可以看出,挤压铸造试棒横截面的微观组织较为均匀,其中的白色相为含 Cu 相,主要为 θ -Al₂Cu 相与 Q-AlCuMgSi 相。

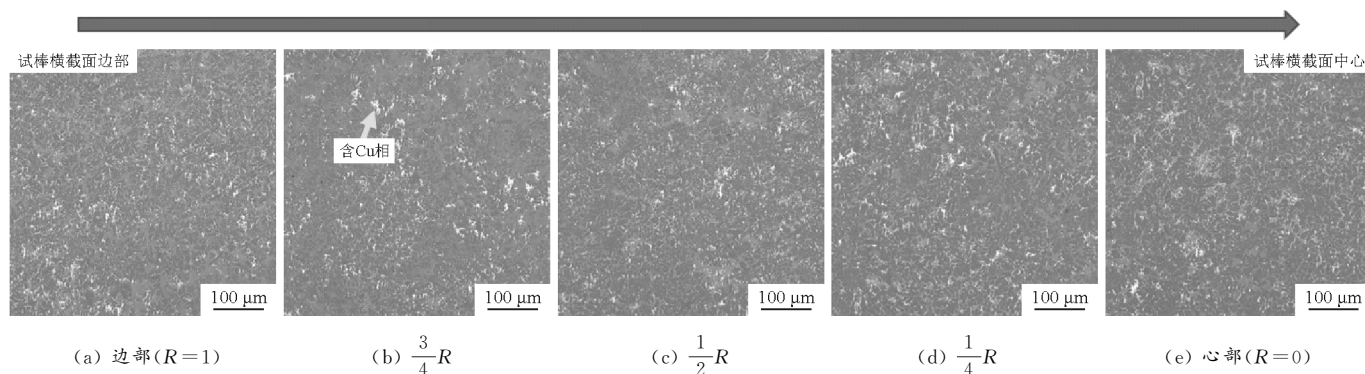


图 2 挤压铸造试棒横截面微观组织(R 为半径)

Fig.2 Cross-section microstructure of specimens by squeeze casting

图 3 为挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金高倍微观组织及其 EDS 分析。可以看出,合金微观组织主要由黑色的 α -Al 相、灰色的共晶 Si 相以及白色的 θ -Al₂Cu、Q-AlCuMgSi 相组成,其中两种含 Cu 相的能谱测试结果见图 3e、图 3f。 θ -Al₂Cu、Q-AlCuMgSi 相主要沿 α -Al 的晶界分布,通过图 3c、图 3d 可知, θ -Al₂Cu、Q-AlCuMgSi 相主要呈短杆状和块状,另外合金中的共晶 Si 主要呈细小绒毛状,熔炼过程的 Sr 变质对共晶 Si 相起到了良好的变质细化作用,细小的共晶 Si 形态有利于固溶处理过程 Si 颗粒的球化分散以及力学性能的提高。

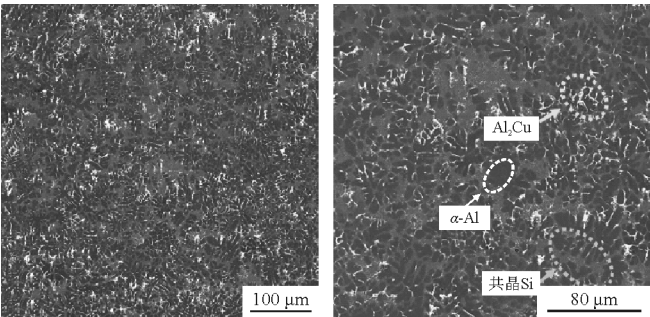
图 4 为铸态 Al-Si-Cu-Mg 合金的升温 DSC 曲线。可以看出,在 505 ℃的位置出现了 θ -Al₂Cu 相的熔化峰,而后在约 525 ℃出现了 Q-AlCuMgSi 相的熔化峰,之后在 570 ℃左右出现了共晶 Si 的熔化峰。DSC 的结果表明,合金的固溶温度最高不能超过 505 ℃,考虑热处理可能出现的温度波动,最终设定 T6 固溶温度为

495 ℃。

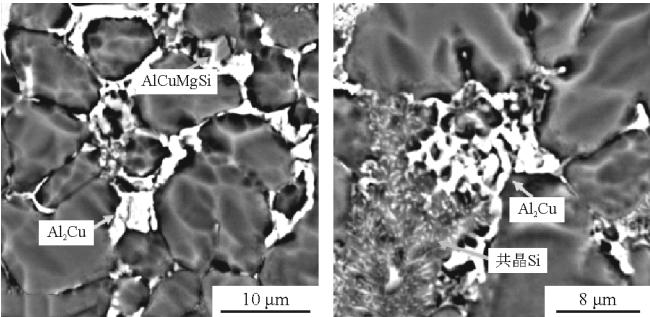
图 5 为 T6 处理后 Al-Si-Cu-Mg 合金的微观组织。从图 5a 可以看出,经过固溶处理以后,共晶 Si 相和 Al₂Cu 相均发生了明显的球化,Al₂Cu 相发生了明显的回溶。从图 5b 可以看出,共晶 Si 相和 Al₂Cu 相主要以近似球化的颗粒状存在。这种固溶处理后合金相的球化、分散,固溶处理过程合金元素的回溶,有助于合金塑性提高。

表 2 为 Al-Si-Cu-Mg 合金 T6 处理后的力学性能。可以看出,相较于铸态下合金的力学性能,T6 处理后合金的屈服强度和抗拉强度明显提升,屈服强度超过 375 MPa,抗拉强度超过 420 MPa,同时合金保持 7%~10%的伸长率,较 Al-Si-Mg 合金性能有明显提升。

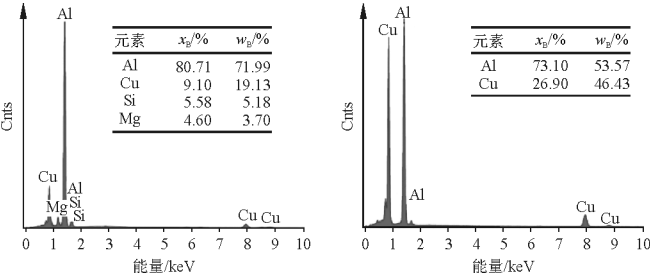
进行 T6 热处理之后,合金的屈服强度从 175 MPa 提升至 375 MPa 以上,可见挤压铸造合金可进行 T6 处理并使其性能显著提升,在性能上相较于常规压铸件有明显的优势。图 6 为时效处理后 Al-Si-Cu-Mg 合金纳



(a) 基体组织 (b) 析出相形貌



(c) 含 Cu 相形貌 (d) 共晶 Si 形貌



(e) Q-AlCuMgSi 相 EDS (f) θ -Al₂Cu 相 EDS

图 3 挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金的 SEM 和 EDS 分析
Fig.3 SEM images and EDS results of squeeze casting Al-Si-Cu-Mg alloy

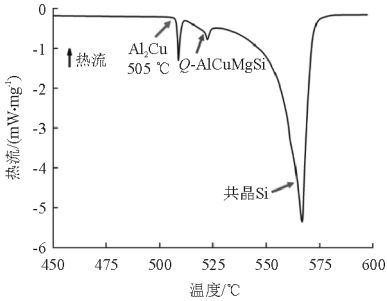
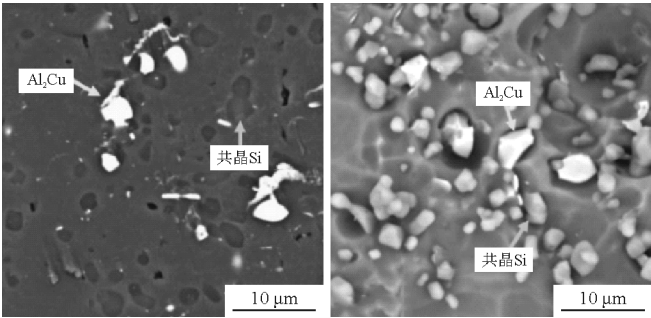


图 4 铸态 Al-Si-Cu-Mg 合金的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curve of as-cast Al-Si-Cu-Mg alloy



(a) SEM 图 1 (b) 含 Cu 相与 Si 颗粒

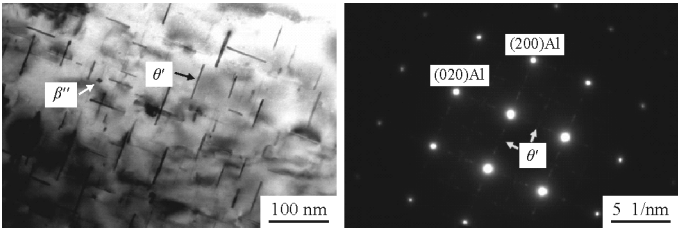
图 5 T6 处理后 Al-Si-Cu-Mg 合金的微观组织

Fig.5 Microstructure of Al-Si-Cu-Mg alloy after T6 treatment

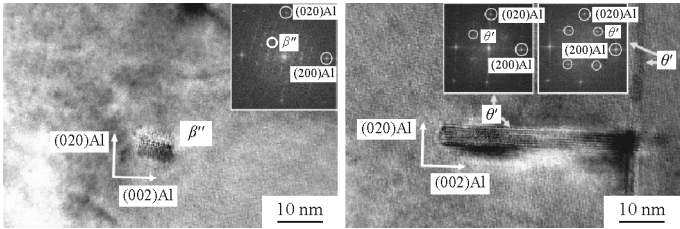
表 2 铸态与 T6 态 Al-Si-Cu-Mg 合金的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of as-cast and T6-treated

Al-Si-Cu-Mg alloys				
测试编号	状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1	铸态	175	308	8.56
2	T6 处理	375	428	7.48
3		380	425	9.85
4		376	423	8.12
5		385	432	7.21
6		378	427	8.55



(a) TEM 图像 (b) 选区衍射斑点



(c) β'' 相的 HRTEM 图像 (d) θ' 相的 HRTEM 图像

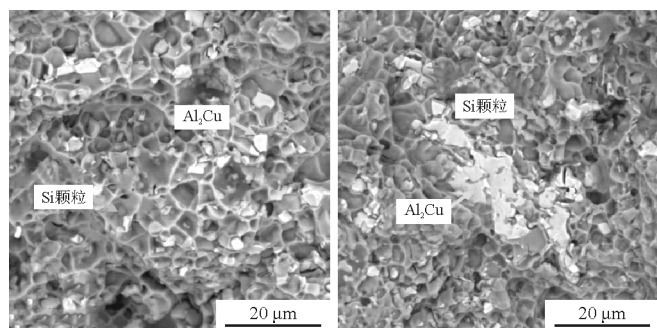
图 6 时效处理后 Al-Si-Cu-Mg 合金纳米强化相的析出

Fig.6 Precipitation of nano-reinforced phases in Al-Si-Cu-Mg alloy after aging treatment

米强化相的析出的 TEM 图像及其对应的选区衍射斑点。结合图 6c 和图 6d 可知,在 Al-Si-Cu-Mg 合金的时效过程中主要有 θ' 以及 β'' 纳米强化相的析出,并且在 Cu 含量较高时,条状的 θ' 纳米相析出产生重要作用^[16,17]。从图 6a 中可以看出,在 Al-Si-Cu-Mg 合金中 Cu 含量达到 3.41% 时,时效过程析出了数量较多的条状 θ' 相,同时也有一定数量的 β'' 相析出,不同纳米强化相的析出共同起到了强化合金力学性能的作用。挤压

铸造相较于重力铸造,形成的铸态组织更加细小,晶界含 Cu 相的尺寸也更小、更均匀。这种铸态组织能使 Cu 在固溶处理后更加充分地回溶于基体,同时使晶界的含 Cu 相残留更少;这既有利于时效过程高密度 θ' 相的充分析出,同时晶界上较少的含 Cu 相残余也有助于合金保持较好的伸长率。所以,以挤压铸造方式进行高 Cu 低 Mg 合金配比的 Al-Si-Cu-Mg 成分合金制备,能够得到高强度、高伸长率的铸造铝合金材料。

图 7 为 T6 拉伸试样的拉伸断口形貌。可以看出,断口组织中出现了较为均匀的韧窝形态,球化的硬质 Si 颗粒在拉伸过程易出现应力集中形成裂纹源,均匀弥散的 Si 颗粒能够一定程度分散拉伸过程的应力集中且形成均匀的韧窝组织。表 2 中编号为 3 的试样这种较为均匀致密的断口形貌也能反映出合金相对较高的伸长率,而表 2 中编号为 5 的试样的断口组织则出现了尺寸较大的长片状 Al_2Cu 相,断口组织的均匀性也较差,因此伸长率下降。



(a) 3 号试样

(b) 5 号试样

图 7 表 2 中 T6 拉伸试样的拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphologies of T6 tensile specimens in Tab.2

3 结 论

(1) 挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金试棒横截面的组织分布较为均匀,Cu 和 Mg 在合金中主要形成 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 、 Q-AlSiCuMg 相。T6 热处理后,含 Cu 相与共晶 Si 相出现了明显的球化现象,Cu 与 Mg 在固溶处理时向基体中回溶。

(2) 挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金经 T6 处理后,屈服强度与抗拉强度显著提高,分别达到 375 MPa 和 423 MPa,伸长率为 7%~10%。T6 处理后,合金中主要析出了 θ' 以及 β'' 纳米强化相,有效强化了合金的力学性能,同时 T6 处理后均匀弥散的共晶 Si 颗粒以及含 Cu 相也利于合金塑性的提高。

参 考 文 献

- [1] ELSHALAKANY A B, TIRTH V, EL-KASHIF E, et al. Characterization and mechanical properties of stir-rheo-squeeze cast AA5083/MWCNTs/GNs hybrid nanocomposites developed using a novel preform-billet method[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021(10): 1 195-1 209.
- [2] LIU T W, WANG Q D, TANG H P, et al. Microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Al-5.0Mg-3.0Zn-1.0Cu alloys in solution-treated and aged conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(9): 2 326-2 338.
- [3] HU K, LIN C H, XIA S C, et al. Effect of Fe content on low cycle fatigue behavior of squeeze cast Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110 680.
- [4] LIN B, ZHANG W X, ZHENG X P, et al. Developing high performance mechanical properties at elevated temperature in squeeze cast Al-Cu-Mn-Fe-Ni alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 150: 128-137.
- [5] 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, L504(2): 42-45.
- [6] YUAN D, YANG X, WU S S, et al. Development of high strength and toughness nano-SiC_p/A356 composites with ultrasonic vibration and squeeze casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 269: 1-9.
- [7] 贾海龙, 周文强, 王思清, 等. 高性能挤压铸造铝合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 16-23.
- [8] 袁松阳, 张亮, 吴国华, 等. 7000 系铝合金及其复合材料挤压铸造研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 32-38.
- [9] 刘文伟, 徐聪, 刘茂文, 等. 稀土元素 Gd 对 Al-Si-Mg 铸造合金微观组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 133-139.
- [10] 元鹏, 李伯龙, 王同波, 等. 挤压铸造工艺对 Al-7Si-0.4Mg-0.3Er 汽车左支架组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 260-265.
- [11] 于海朋, 王利波, 于宝义, 等. 浇注温度对间接挤压铸造 Al-5Cu 合金的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(1): 43-45.
- [12] ZHANG M, ZHANG W W, ZHAO H D, et al. Effect of pressure on microstructures and mechanical properties of Al-Cu-based alloy prepared by squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(3): 496-501.
- [13] CAI Q, MENDISC M L, WANG S H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of die-cast Al-Cu-Si-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881: 160 559.
- [14] ZHU X Z, 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] 党惊知, 程军, 黄玉凤. Sc 和 Zr 对 Al-Mg 铸造合金组织和力学性能的影响[J]. 新技术新工艺, 2009(5): 77-80.
- [16] KIM D H, KIM J W, WENNER S, et al. Precipitation behavior of Al-Si-Cu-Mg(-Fe) alloys by a deformation-semisolid extrusion process[J]. Materials Characterization, 2021, 173: 110 863.
- [17] GAZIZOV M, MARIOARA C D, FRIIS J, et al. Precipitation behavior in an Al-Cu-Mg-Si alloy during ageing[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A767: 138 369.

(编辑: 栗万仲)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com