

Sc 含量对 ZL101 合金组织和力学性能的影响

石 博 崔晓明 王 伟 白朴存
(内蒙古工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 通过 OM、SEM、TEM 研究了不同 Sc 含量对 ZL101 合金组织和力学性能的影响。结果表明,当 Sc 含量为 0.3% 时能显著细化 α -Al 晶粒,改善共晶 Si 形貌,此时合金的硬度(HRC)、抗拉强度、伸长率均达到最大值,分别为 29、197.95 MPa、11.06%。在 ZL101 合金中添加 Sc 后,合金会生成 Al_3Sc 相,形成异质核心,显著细化晶粒尺寸。
关键词 Sc; ZL101 合金; 微观组织; 力学性能
中图分类号 TG146.21; TG113.25 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.013 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Sc Content on Microstructure and Mechanical Properties of ZL101 Alloy

Shi Bo, Cui Xiaoming, Wang Wei, Bai Pucun
(Materials Science and Engineering College, Inner Mongolia University of Technology)

Abstract: The effects of different Sc contents on microstructure and mechanical properties of ZL101 alloy were investigated by OM, SEM and TEM. The results reveal that when the Sc content is 0.3%, the grain size of α -Al can be refined and the morphology of eutectic silicon can be improved. Meanwhile, the Rockwell hardness(HRC), tensile strength and elongation of the alloy reach maximum values of 29, 197.95 MPa and 11.06%. After adding Sc in ZL101 alloy, Al_3Sc phase can be generated to act as heterogeneous nuclei to refine grain size remarkably.
Key Words: Sc, ZL101 Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

ZL101 合金作为典型的亚共晶 Al-Si 系合金,其强度较高、塑性较好,具有优良的铸造性能、力学性能和耐腐蚀性能,被广泛应用于航空航天及汽车工业中^[1,2]。ZL101 铝合金中初生 α -Al 相、共晶 Si 相形貌在很大程度上决定了合金的力学性能^[3]。研究表明,在铝合金中添加适当的稀土元素可以改善其力学性能^[4~6]。Sc 被认为是有效的晶粒细化剂,可以减小合金的晶粒尺寸,提高合金的力学性能^[7,8]。目前铝合金中 Sc 含量范围一般控制在 0.1%~0.6%^[9~13]。鉴于此,本课题在 ZL101 合金中加入微量 Sc,通过扩大 Sc 添加量范围从 0.1%~0.8%,系统地研究 ZL101 合金组织及力学性能的变化,从而探讨更高的 Sc 含量对 ZL101 合金组织和力学性能的影响。

1 试验方法

试验采用 ZL101 合金,Sc 含量(质量分数,下同)分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.5%、0.8%。采用 ZG-0.03 型真空感应炉熔炼,金属型尺寸为 $\phi 110\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。

首先抽真空至 $<20\text{ Pa}$ 后充氩气至 0.05 MPa 然后进行熔炼,加热至 700℃左右保温 10 min 后浇注,然后随炉冷却 30 min 开炉,清理坩埚进行下一炉次熔炼。表 1 为不同 Sc 含量的 ZL101 合金的化学成分。

表 1 不同 Sc 含量的 ZL101 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of ZL101 alloy with different Sc content

编号	不同 Sc 含量 (%)				
	Si	Mg	Fe	Sc	Al
1	7.132	0.317	0.175	0.107	余量
2	7.214	0.278	0.174	0.211	余量
3	7.105	0.291	0.189	0.297	余量
4	7.171	0.305	0.167	0.504	余量
5	7.143	0.297	0.173	0.789	余量

金相组织观察在 Axio Imager A1m 型光学显微镜上进行,微观形貌组织在 QUANTA FEG650 扫描电镜进行观察,腐蚀液采用体积分数为 10% 的 HF 酒精溶液。

ZL101 合金试样的硬度在铸件上切取大小为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm,经过 1000 号砂纸粗磨后,在

收稿日期:2020-09-01;修改稿收到日期:2020-11-16
基金项目:内蒙古科技计划资助项目(201802029);内蒙古自治区科技重大专项资助项目(zdxx2018031)
第一作者简介:石博,男,1994 年出生,硕士研究生,呼和浩特(010051),E-mail:690906574@qq.com
通信作者:崔晓明,男,1981 年出生,副教授,呼和浩特(010051),E-mail:xmcui@imut.edu.cn
引用格式:石博,崔晓明,王伟,等. Sc 含量对 ZL101 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(6):726-730.
SHI B, CUI X M, WANG W, et al. Effects of Sc content on microstructure and mechanical properties of ZL101 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):726-730.

HR-150A 型洛氏硬度计进行测试。为减小误差,每个试样分别在不同位置各取 5 组硬度并取平均值。

拉伸试样尺寸见图 1,首先按照试样尺寸在线切割机床上进行加工,然后将切好的试样在砂纸上进行打磨,以消除其线切割产生的纹路。最后利用 Gatan DE-BEN/MT10204 型拉伸台进行室温力学性能测试,为减小误差,每种 Sc 含量的 ZL101 合金试样测 3 组并取平

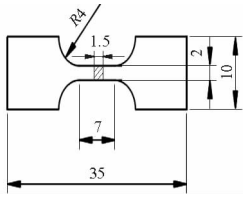


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Dimension of tensile specimens

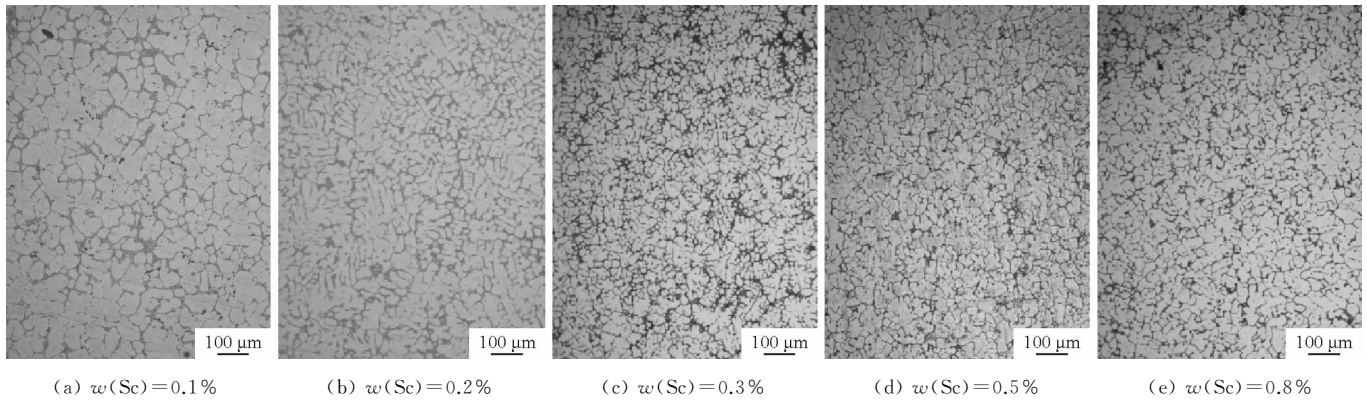


图 2 不同 Sc 含量的 ZL101 合金中初生 α -Al 相 OM 照片
Fig.2 OM of primary α -Al phase in ZL101 alloy with different Sc contents

却变得稍显粗大。

2.2 Sc 对 ZL101 合金中共晶 Si 相的影响

图 3 为不同 Sc 含量下 ZL101 合金中共晶 Si 相的 SEM 形貌。可以看出,黑色组织为共晶 Si 相,灰色组织为 α -Al 相,白色组织为第二相。当 Sc 含量为 0.1%

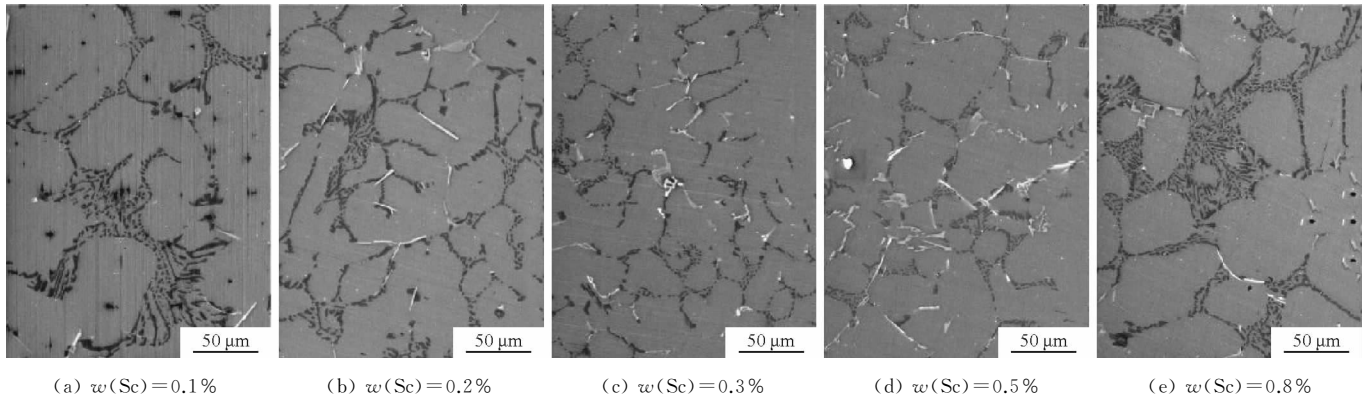


图 3 不同 Sc 含量的 ZL101 合金 SEM 照片
Fig.3 SEM images of eutectic Si phase in ZL101 alloy with different Sc contents

2.3 Sc 含量为 0.3% 的 ZL101 合金 EDS 分析

图 4 和图 5 是 Sc 含量为 0.3% 的 ZL101 合金 EDS 分析结果。

均值。
采用 JEOL2100 透射电镜研究 Sc 对 ZL101 合金的细化机理,工作电压为 200 kV。

2 试验结果与分析

2.1 Sc 对 ZL101 合金初生 α -Al 相的影响

图 2 为不同 Sc 含量的 ZL101 合金的微观组织。ZL101 合金主要由共晶 Si 相和初生 α -Al 相组成,当 Sc 含量为 0.1% 时,初生 α -Al 相粗大且分布不均,少部分细化。增加 Sc 含量至 0.2% 时,大部分初生 α -Al 相得到细化,呈圆球状,且分布较为均匀。当 Sc 含量为 0.3% 时,晶粒细化效果最为明显,粗大的枝晶得到细化,二次枝晶间距最小,继续增加 Sc 的含量,合金晶粒

时,共晶 Si 相只有少部分呈球状,大部分呈粗大的针片状。Sc 含量增至 0.2% 时,共晶 Si 相得到显著细化,分布较为均匀。当 Sc 含量为 0.3% 时,细化效果尤为明显,共晶 Si 相基本呈细小的圆球状,并均匀地分布在晶界上。继续提高 Sc 含量,共晶 Si 相又逐渐变得粗化。

通过对同一相多次点扫描取平均值,并结合面扫描结果,推测 Sc 含量为 0.3% 的 ZL101 合金中主要有 AlSc_2Si_2 相、 π - AlMgFeSiSc 相和 β - AlFeSiSc 相。由于

富 Fe 相分别为 π -AlMgFeSi 和 β -AlFeSi,而在添加 Sc 的富 Fe 相中通过 EDS 点扫检测到了 Sc 的存在,推测 Sc 能够改善富 Fe 相形貌,减弱长针片状相对基体的割

裂作用。同时合金生成了 AlSc_2Si_2 三元相, AlSc_2Si_2 相的生成会消耗一部分 Si 和 Al 元素,因此对合金中 α -Al 相和共晶 Si 相的细化有着显著的影响。

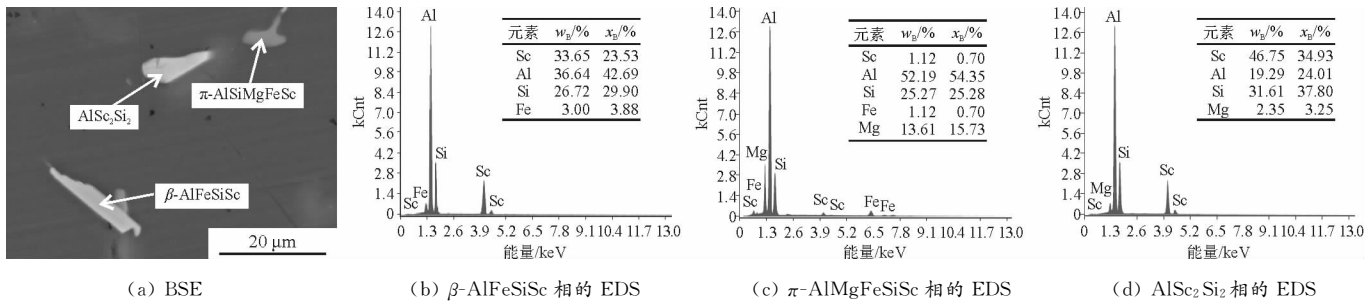


图 4 Sc 含量为 0.3% 的 ZL101 合金 EDS 结果

Fig.4 EDS analysis of ZL101 alloy with 0.3% Sc contents

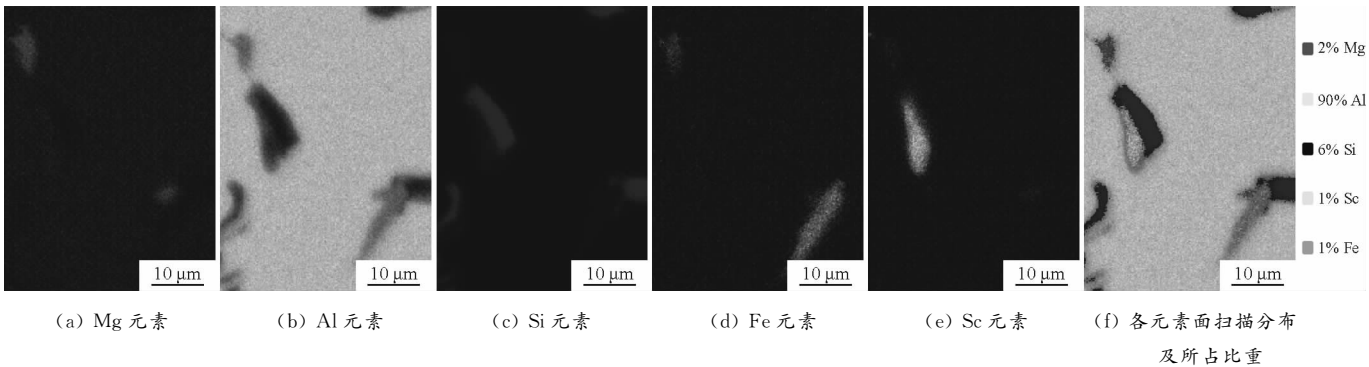


图 5 Sc 含量为 0.3% 的 ZL101 合金元素面扫描结果

Fig.5 Surface scanning results of ZL101 alloy with 0.3% Sc contents

2.4 力学性能分析

图 6 为不同 Sc 含量下 ZL101 合金的维氏硬度。可以看出,ZL101 合金的硬度随着 Sc 添加量增加,呈现先增加后减小的趋势。当 Sc 含量为 0.3% 时,合金的硬度(HRC)值最大,为 29。这是由于 Sc 的添加能改善共晶 Si 相形貌,细化晶粒,从而强化基体,使硬度增加。而添加过量的 Sc 则会使 α -Al 相和共晶 Si 相粗化,导致合金硬度降低。

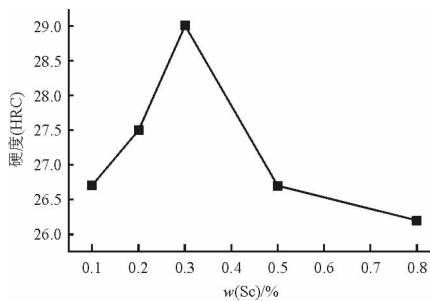


图 6 不同 Sc 含量下 ZL101 合金的硬度

Fig.6 Hardness of ZL101 alloy with different Sc contents

图 7 为不同 Sc 含量的 ZL101 合金的拉伸力学性能。可见随着 Sc 含量增加,ZL101 合金的抗拉强度和伸长率逐渐升高,并在含量为 0.3% 时达到最大值,此时合金的抗拉强度为 197.95 MPa,伸长率为 11.06%。这

是由于此时初生 α -Al 晶粒细化效果最为明显,并且共晶 Si 相也得到显著细化。继续增加 Sc 添加量,合金的抗拉强度和伸长率都有所降低,这是由于 α -Al 晶粒和共晶 Si 相粗化所致。

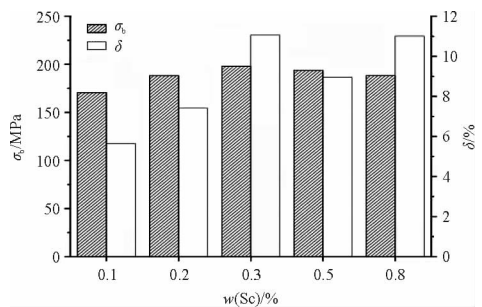


图 7 不同 Sc 添加量下 ZL101 合金的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of ZL101 alloy with different Sc contents

2.5 拉伸断口形貌分析

图 8 为不同 Sc 含量下 ZL101 合金的拉伸断口形貌。可以看出,当 Sc 含量为 0.1% 时,ZL101 合金中存在少量韧窝,并且分布不均。随着 Sc 含量的增加,韧窝数量也随之逐渐增加,并在 Sc 含量为 0.3% 时达到最大值,且韧窝大小分布较为均匀。而此时 ZL101 合金组织和力学性能最好。此后,随着 Sc 含量继续增加,拉伸

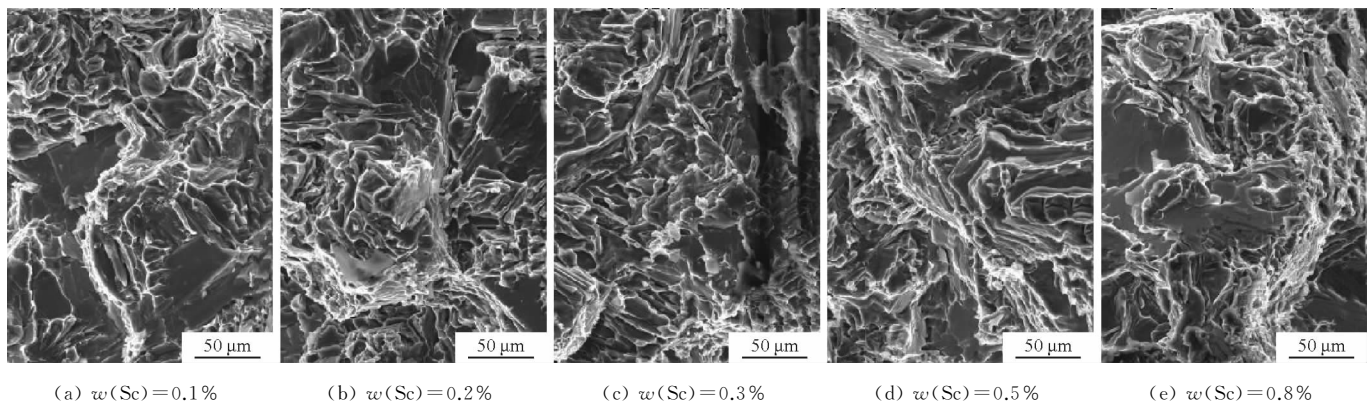


图 8 不同 Sc 含量的 ZL101 合金断口形貌 SEM 照片

Fig.8 SEM images of fracture morphology of ZL101 alloy with different Sc contents

断口形貌则又呈河流状趋势,且韧窝大小及分布不均,对应合金力学性能下降。

2.6 ZL101 合金 TEM 分析

图 9 和图 10 分别为 Sc 含量为 0.3% 的 ZL101 合金中 Mg_2Si 相和 Al_3Sc 相的 TEM 照片和 FFT 图。由图 9 可知,在 ZL101 合金中检测到了 Mg_2Si 相的存在。这是由于合金在结晶过程中,Mg 的扩散系数较高,且不能完全进入 $\alpha-Al$ 中,因此会发生 $L \rightarrow \alpha-Al + Si + Mg_2Si$ 三元共晶反应,生成 Mg_2Si 相。由图 10 可知,在合金中检测到了 Al_3Sc 相的存在。铸态合金的晶粒细化程度取决于单位体积和单位时间内晶核的有效形核作用,而晶核的有效形核作用又取决于该晶核与 $\alpha-Al$

基体的晶格常数和晶格类型。只要晶核的晶格类型与 $\alpha-Al$ 基体一致,且错配度小于 5%,就可以作为异质形核的质点,起到细化晶粒的作用。 Al_3Sc 和 $\alpha-Al$ 同属面心立方结构,晶格类型相同,错配度仅为 1.2%。因此 Al_3Sc 相可以作为 $\alpha-Al$ 相的异质形核质点,起到细化晶粒的作用。

3 结 论

(1)向 ZL101 合金中添加 Sc 后可以显著细化 $\alpha-Al$ 晶粒,改善共晶 Si 相形貌。当 Sc 含量为 0.3% 时,二者的细化效果均达到最佳。

(2)Sc 可以有效提高 ZL101 合金的力学性能。当 Sc 含量为 0.3% 时,合金的硬度(HRC)、抗拉强度、伸长率达到最大,分别为 29、197.95 MPa、11.06%。

(3)在含有 Sc 的 ZL101 合金中, Al_3Sc 相可以作为 $\alpha-Al$ 相的异质形核质点,起到细化晶粒的作用。

参 考 文 献

[1] 宋劲松,贾志宁,马瑞,等.稀土变质剂 Ce 对 ZL101 铝合金组织及性能的影响研究[J].热加工工艺,2018,47(7):62-66.

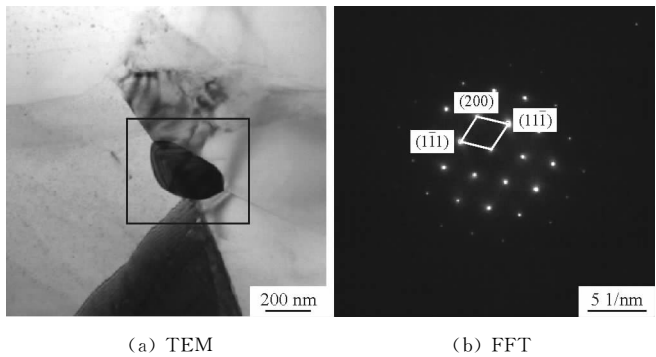
[2] LUO J, MEI Z, TIAN W H, et al. Diminishing of work hardening in electroformed polycrystalline copper with nano-sized and uf-sized twins[J]. Materials Science & Engineering, 2006, A441(1):282-290.

[3] KOBAYASHI T. Strength and fracture of aluminum alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2000, A280(1):8-16.

[4] LUMLEY R N, MORTON A J, POLMEAR I J. Enhanced creep performance in an Al-Cu-Mg-Ag alloy through underageing[J]. Acta Materialia, 2002, 50(14):3 597-3 608.

[5] MISHRA A K, BALASUBRAMANIAM R. Corrosion inhibition of aluminum alloy AA 2014 by rare earth chlorides[J]. Corrosion Science, 2006, 49(3):1 027-1 044.

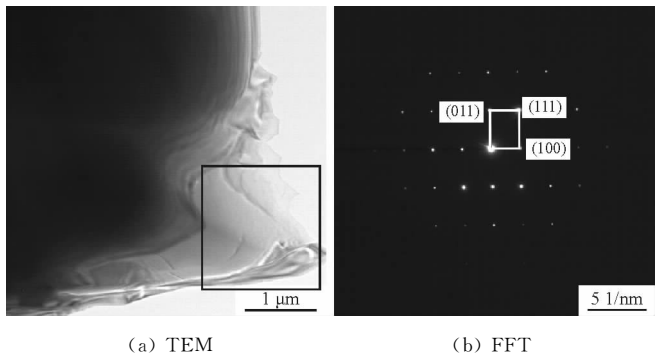
[6] BOHLEN J, YI S B, LETZIG D, et al. Effect of rare earth elements on the microstructure and texture development in magnesium-manganese alloys during extrusion[J]. Materials Science & Engineering, 2010, A527(26):7 092-7 098.



(a) TEM (b) FFT

图 9 Mg_2Si 的 TEM 照片和 FFT 图

Fig.9 TEM and FFT diagram of Mg_2Si phase



(a) TEM (b) FFT

图 10 Al_3Sc 的 TEM 照片和 FFT 图

Fig.10 TEM and FFT diagram of Al_3Sc phase

升温时效对 7050 铝合金组织及性能的影响

周炎^{1,2} 夏涵羿^{1,2} 史坤^{1,2} 杨湘杰^{1,2}

(1.南昌大学机电工程学院; 2.江西省高性能精确成形实验室)

摘要 研究了初始温度为 100 ℃,不同的升温时效工艺对 7050 铝合金硬度、电导率、室温拉伸性能、微观组织的影响。结果表明,当升温速率为 20 ℃/h 时,晶内析出相的平均尺寸和尺寸范围随终止温度的升高不断增大;终止温度为 200 ℃时,升温速率为 40 ℃/h 的平均尺寸和尺寸范围较 20 ℃/h 的小。硬度和室温拉伸性能随着析出相尺寸增大先增大后减小,断口类型均为包含沿晶断裂和穿晶断裂的混合型断口;电导率随着升温时效的进行一直增长。通过调整升温时效的升温速率和终止温度,能得到兼具较高强度和良好耐腐蚀性能的 7050 铝合金,且时效所需时间短。

关键词 7050 铝合金;升温时效;电导率;力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Heating-aging on the Microstructure and Properties of 7050 Aluminum Alloy

Zhou Yan^{1,2}, Xia Hany^{1,2}, Shi Kun^{1,2}, Yang Xiangjie^{1,2}

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University;

2.Jiangxi Province High Performance Precision Forming Laboratory)

Abstract: The effects of different heating-aging process at initial temperature of 100 ℃ on hardness, conductivity, room temperature tensile properties and microstructure of 7050 aluminum alloy were investigated. The results indicate that the average size and size range of precipitates are increased continuously with the increase of the final aging temperature at the heating rate of 20 ℃/h, which is larger than that at 40 ℃/h when the final aging temperature is 200 ℃. The hardness and room temperature tensile properties of the 7050 aluminum alloy are firstly increased and then decreased with the increase of precipitate size, and the fracture is characterized by mixture of intergranular and transgranular fracture. Meanwhile the conductivity is increased with the heating-aging process. The 7050 aluminum alloy with excellent strength and corrosion resistance can be obtained by adjusting the heating rate and final aging temperature, which requires short aging time.

Key Words: 7050 Aluminum Alloy, Heating-aging, Conductivity, Mechanical Properties

7050 铝合金属于 7xxx 系列铝合金,是典型的可时效强化合金^[1,2]。通过调整铝合金的化学成分和时效处理工艺来调整时效过程中析出相的几何尺寸、成分组成及分布密度,从而改善合金的力学性能和耐腐蚀性能^[3~5]。非等温时效与常规的等温时效处理不同,非等温时效是在连续升温或降温过程中进行的^[6]。升温时

收稿日期:2021-01-14;修改稿收到日期:2021-01-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674144)
第一作者简介:周炎,男,1994 年出生,硕士研究生,南昌(330031),E-mail:1606603402@qq.com
通信作者:杨湘杰,男,1960 年出生,教授,南昌(330031),E-mail:yangxj@ncu.edu.cn
引用格式:周炎,夏涵羿,史坤,等. 升温时效对 7050 铝合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(6):730-733.
ZHOU Y, XIA H Y, SHI K, et al. Effects of heating-aging on the microstructure and properties of 7050 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):730-733.

[7] 孙玥,田伟,胡梦楠.稀土对铝合金力学性能影响的研究进展[J].有色金属材料与工程,2019,40(3):55-60.

[8] 黄吉. Sc 对 A356 合金微观组织和力学性能的影响[D].合肥:合肥工业大学,2016.

[9] 周民,甘培原,邓鸿华,等.含钕微合金化铝合金研究现状及发展趋势[J].中国材料进展,2018,37(2):154-160.

[10] 路丽英.含 Sc 铝合金的研究现状及其发展探讨[A].中国有色金属加工工业协会年会[C].山东邹平,2018.

[11] 滕广标,刘崇宇,李剑,等.添加 Sc 对 7055 铝合金微观结构和力学性能的影响[J].材料研究学报,2018,32(2):112-118.

[12] 孙禹冲,左衡,李先芬.Sc 的添加对 Al-Si-Cu 系铝合金钎料性能的影响[J].金属功能材料,2015,22(3):31-34.

[13] 曾令喜,夏长清,周飞,等.微量 Sc 对 7055 铝合金组织与力学性能的影响[J].中国体视学与图像分析,2012,17(2):126-132.

(编辑:栗万仲)