

Si 含量和超声处理对 Al-Mg-Si 合金组织和性能的影响

田元 吴树森 任嘉康 廖巧 张耀华 秦建

(华中科技大学材料科学与工程学院,材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘要 采用金属型重力铸造研究 Si 含量以及超声处理对 Al-5Mg- x Si 合金组织及力学性能的影响。结果表明,随着 Si 含量增加,合金中初生 α -Al 相以及强化相 Mg_2Si 的形状和分布也会发生变化。超声处理后,不同 Si 含量的合金组织中主要相组成没有发生变化, α -Al 相较于超声处理前变得圆整, β - Mg_2Si 相分布也比较均匀,但是当 Si 含量为 2% 时, β - Mg_2Si 相会发生团聚现象。抗拉强度和伸长率随 Si 含量的增加呈现出先上升后下降的趋势,当 Si 含量为 1.6% 时,合金的铸态力学性能最佳,抗拉强度为 141.2 MPa,伸长率为 1.5%。超声处理后,当 Si 含量为 1.6% 时,合金力学性能最佳,抗拉强度和伸长率分别为 168.0 MPa 和 2.6%,较铸态分别提升了约 19% 和 73%。

关键词 Al-Mg-Si 合金; Si 含量; 金属型重力铸造; 超声处理; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG243⁺2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Si Content and Ultrasonic Treatment on Microstructure and Properties of Al-Mg-Si Alloy

Tian Yuan, Wu Shusen, Ren Jiakang, Liao Qiao, Zhang Yaohua, Qin Jian

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The effects of different Si contents and ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of Al-5Mg- x Si alloy were investigated by metal mold gravity casting. The results indicate that the shape and distribution of the primary α -Al phase and the reinforced phase Mg_2Si in the alloy are also varied with the increase of Si content. After ultrasonic treatment, the main phase composition in microstructure of the alloy with different Si contents has little change, where the α -Al grains become rounder and the distribution of β - Mg_2Si is also more uniform. However, the β - Mg_2Si agglomeration occurs when the Si content is 2%. The tensile strength and elongation of the alloy are firstly increased and then decreased with the increase of Si content. The as-cast mechanical properties of the alloy presents desirable when the Si content is 1.6%, where the tensile strength and elongation is 141.2 MPa, and 1.5%, respectively. After ultrasonic treatment, the mechanical properties of the alloy are desirable with the same Si content, where the tensile strength and elongation is 168.0 MPa and 2.6%, which are 19% and 73% higher than the as-cast ones, respectively.

Key Words: Al-Mg-Si Alloy, Si Content, Metal Mold Gravity Casting, Ultrasonic Treatment, Mechanical Properties

在铸造 Al-Mg 合金系中,ZL303 合金的高温强度高,抗蚀性能、焊接性能、铸造性能好,切削加工性能优越,另外,Mg 和 Si 易形成 Mg_2Si 强化相。但由于不能进行热处理,ZL303 合金力学性能比 ZL301 低得多。ZL303 合金主要用于制造在海水、燃气等腐蚀介质下承受中等载荷的发动机、转子、叶片、内燃机、石化气泵壳等零件,这些部件对材料的抗拉强度、伸长率、硬度等力

学性能都提出了很高的要求^[1,2]。

合金元素对 Al-Mg 合金组织和力学性能影响很大。Si 的添加可以改善合金的铸造性能,提高合金的耐磨性能,降低原材料成本;Mn 可以抑制合金再结晶,提高合金的再结晶温度,只有 Si 和 Mn 含量适中时,才能使 Al-Mg-Si 合金组织中结晶相含量合适,合金在得到强化的同时,仍能保持较高的塑性^[3]。通过添加稀土

收稿日期:2021-07-07;修改稿收到日期:2021-09-19

基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2019B090921001)

第一作者简介:田元,男,1996 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:734990426@qq.com

通信作者:吴树森,男,1961 年出生,教授,武汉(430074),E-mail:ssw636@hust.edu.cn

引用格式:田元,吴树森,任嘉康,等. Si 含量和超声处理对 Al-Mg-Si 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):574-578.

TIAN Y, WU S S, REN J K, et al. Effects of Si content and ultrasonic treatment on microstructure and properties of Al-Mg-Si alloy[J].

Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):574-578.

对合金进行变质、净化及其微合金化作用,使合金的室温与高温力学性能、抗腐蚀性能等得到提高^[4,5]。

组织细化可以提高材料的综合性能,而超声处理被证实可以显著细化合金组织,减弱偏析,而且可用于工业生产^[6]。对于纯金属而言,在目前的铸造条件下,应用超声处理技术也可以产生非枝晶和形成等轴晶带^[7]。合金在熔融态进行超声外场处理时,超声波在熔体传播过程中会产生机械、空化、声流等效应,能够显著细化组织,降低其形成针孔的倾向,改善铸件的力学性能,提高致密度,还能减少缩松、缩孔,同时合金晶粒尺寸也得到一定程度的减小^[8],从而进一步提升铸件品质。本课题将改变 Si 含量及通过超声处理调整 Al-Mg-Si-Mn-RE 合金的相组成和数量,研究其对合金组织、力学性能的影响,并探讨其影响机理,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法与过程

试验基体合金为 ZL303 铝合金,其成分见表 1。试验所用材料为 >99.8% (质量分数,下同) 高纯 Al、>99.9% 的高纯 Mg、Al-20Si、Al-10Mn 和 Al-10RE 中间合金,其中 Al-10RE 中间合金 Ce 与 La 的质量比为 65 : 35。

表 1 ZL303 合金的化学成分

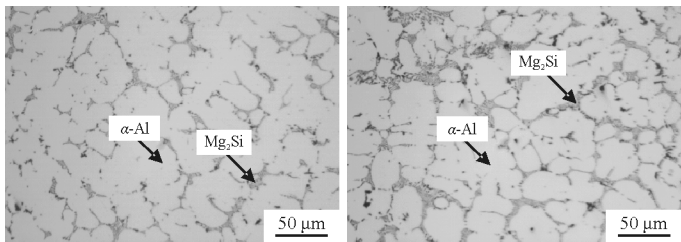
Tab.1 Chemical composition of ZL303 alloy %			
w_B			
Mg	Si	Mn	Al
4.5~5	0.8~1.3	0.1~0.4	余量

试验制备的 Al-Mg-Si-Mn-RE 合金成分见表 2, Si 的最高含量超过了 ZL103 合金中的 Si 含量。

表 2 金属型铸造 Al-Mg-Si-Mn-RE 合金的化学成分

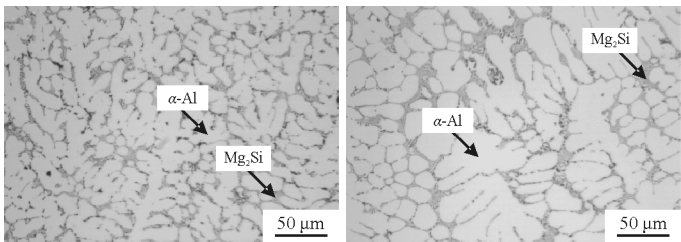
Tab.2 Chemical composition of Al-Mg-Si-Mn-RE alloy by metal mold casting %					
编号	w_B				
	Mg	Si	Mn	RE	Al
1	5	1.0	0.3	0.4	余量
2	5	1.3	0.3	0.4	余量
3	5	1.6	0.3	0.4	余量
4	5	2.0	0.3	0.4	余量

用电阻丝加热炉,设置炉温为 750 ℃,将纯铝以及



(a) $w(Si) = 1.0\%$

(b) $w(Si) = 1.3\%$



(c) $w(Si) = 1.6\%$

(d) $w(Si) = 2.0\%$

图 2 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 合金的显微组织

Fig.2 Microstructures of Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE alloys

Al-20Si 合金在石墨坩埚中熔化后降温至 700 ℃,在液面铺一层覆盖剂,加入纯 Mg、Al-10Mn、Al-10RE 中间合金,熔化后将铝液温度控制在 710 ℃,用高纯氩气精炼 15 min 并扒渣后,加入覆盖剂,静置 20 min,升温至 740 ℃浇注。采用金属型重力铸造和超声处理后金属型重力铸造 Al-Mg-Si-Mn-RE 合金试棒,见图 1。超声处理工艺参数:超声功率为 1 800 W,处理时间为 90 s,起振温度为 660 ℃,工作时超声探头插入至液面以下 10~15 mm,再将铝液浇注到预热好的金属型中。

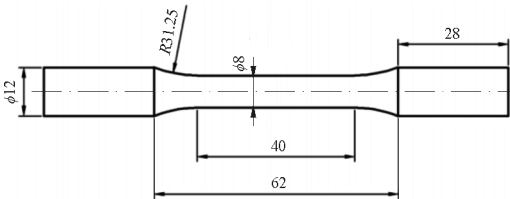


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 The dimension of tensile specimen

从铸件底部区域取样,镶样、磨制、抛光、腐蚀,腐蚀液采用 Keller 试剂。显微组织采用 DMM-480C 光学显微镜和 Nova NanoSEM 450 场发射扫描电镜观察,采用与扫描电镜配套的能谱分析仪测定晶间元素组成;显微硬度试验在 430SVD 维氏硬度计上进行,试验载荷为 9.8 N,保压时间为 12 s;室温拉伸力学性能测试在 AG-IC 100kN 材料高温持久性能试验机上进行,拉伸速率为 1.0 mm/min。

2 试验结果与讨论

2.1 Si 含量对合金组织与性能的影响

对 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 合金的微观组织进行观察,结果见图 2。可以看出,随着 Si 含量增加, α -Al 晶粒先细化后粗化,当 Si 含量为 1.6% 时,合金晶粒最细小,为 17.70 μm ,但是当 Si 含量增加到 2.0% 时,晶粒又开始变得粗大,平均晶粒直径随 Si 含量变化见图 3。晶粒的数量与大小是形核和长大两个过程共同作用的结果,只有适当调整两者之间的关系才能得到理想的组织。当熔体浇入金属型中后,由于紧靠型壁处首先获得

大的过冷条件,同时也有相当数量的溶质 Si 被排入固液界面前沿,存在明显的成分过冷区,晶粒变得细小。

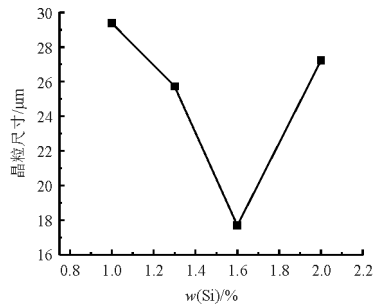


图 3 Al-5Mg-*x*Si-0.3Mn-0.4RE 合金的晶粒尺寸
Fig.3 Grain size of the Al-5Mg-*x*Si-0.3Mn-0.4RE alloys

但是在 Si 含量较高的熔体中,随着凝固过程不断进行,大量的溶质 Si 被不断地排入固液相界面前沿。Si 具有很高的形成焓,大量溶质 Si 的聚集会释放出大量的潜热,这些热量除了通过固相散失外,还会向周围液相区散失,改变了已建立起的成分过冷区的形貌和大小,最终导致晶粒粗大^[9]。

图 4 为 Al-5Mg-*x*Si-0.3Mn-0.4RE 铝合金的高倍组织。可以看出,随 Si 含量增加,断续的晶界逐渐变得连续,晶界处有大量 Mg、Si 的富集,晶间 Mg₂Si 相体积分数逐渐增大,并且在 Si 含量为 2% 时,Mg₂Si 相发生团聚并且分布不均匀。图 5 和表 3 分别为 Si 含量为

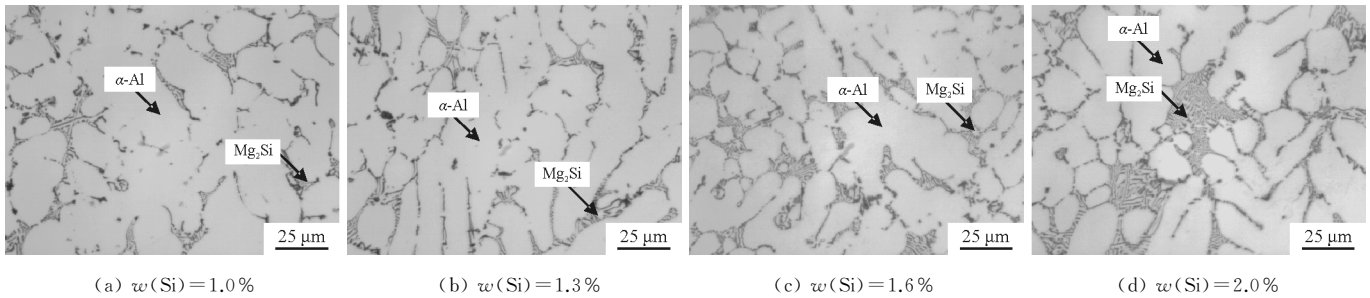


图 4 Al-5Mg-*x*Si-0.3Mn-0.4RE 合金高倍显微组织

Fig.4 High magnification microstructure of Al-5Mg-*x*Si-0.3Mn-0.4RE alloys

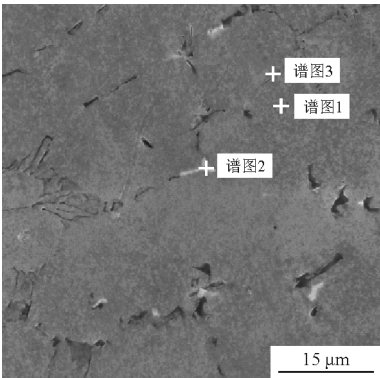


图 5 Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE 合金的 SEM 图
Fig.5 SEM images of Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE alloy

1.6% 时铝合金晶内及晶界稀土相及 Mg₂Si 相形貌及 EDS 分析结果。可以看出,晶内主要是 α-Al 以及少量固溶的 Mg,富稀土相主要呈块状或条状分布在晶界,Mg₂Si 相在晶界周围呈针状或条状分布。图 6 是 Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE 合金的元素面扫描。可以看

表 3 图 5 中谱图 1~3 处的 EDS 分析

Tab.3 EDS analysis of spectrum 1~3 in Fig.5 %													
谱图	x_B						w_B						
	Al	Mg	Si	Mn	La	Ce	Al	Mg	Si	Mn	La	Ce	
1	97.17	2.53	0.18	0.12	—	—	97.29	2.29	0.19	0.23	—	—	
2	90.34	5.82	0.78	1.47	0.37	1.21	83.94	4.87	0.76	2.78	1.79	5.86	
3	90.78	6.18	2.90	0.14	—	—	91.10	5.59	3.03	0.28	—	—	

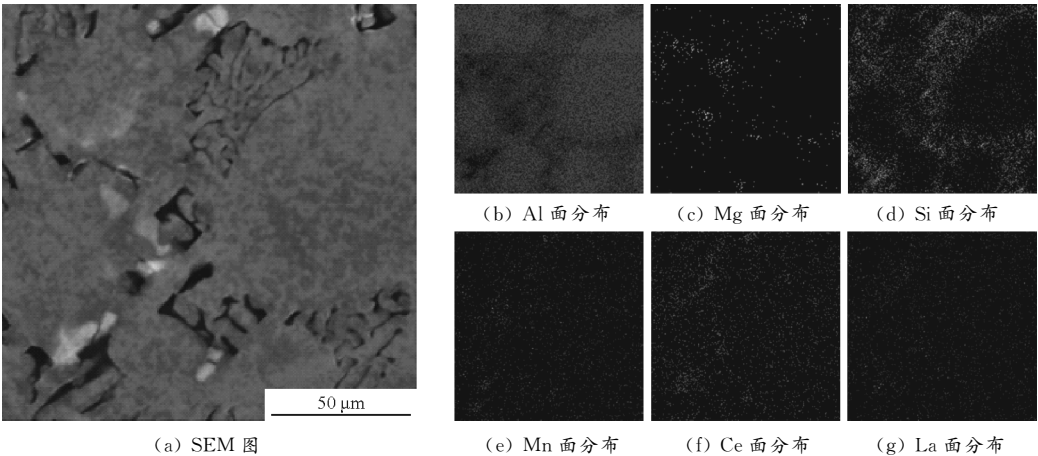


图 6 Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE 微观组织及各元素分布情况

Fig.6 Microstructure and distribution of each element in Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE alloy

出,晶界的 Mg、Si 含量远高于晶内,稀土元素也主要聚集在晶界处,表明 Mg_2Si 相及稀土相大多分布在晶界。

图 7 为铸态 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 合金的力学性能。可以看出,随着 Si 含量增加,抗拉强度先增加后减小,当 Si 含量为 1.6% 时,抗拉强度达到最大值(141.2 MPa),但 Si 含量增至 2.0% 时,抗拉强度急剧下降。因此,最佳 Si 含量为 1.6%,高于国标值的上限(1.3%)。Si 含量在 1.0%~1.6% 时,抗拉强度增加是由于 Si 在固液界面前富集从而产生成分过冷,使晶粒细化,对合金起到细晶强化的作用,同时 Mg_2Si 数量增多,合金在变形时,对其有一定的阻碍作用,也使得抗拉强度提高。当 Si 含量达到 2.0% 时,由于 Si 含量过高,Si 的形成焓较高,凝固时会释放出大量的潜热,改变成分过冷区的形貌和大小,最终导致晶粒粗大,同时 Mg_2Si 开始聚集并且分布不均匀,受力过程中产生局部应力集中,导致抗拉强度下降。另外,随着 Si 含量增加,试样的伸率先增加再缓慢降低,这是由于适量的 Si 能使晶粒细化,细晶强化能同时提高强度与伸长率,但是 Si 含量过高会使得脆性相 Mg_2Si 增多且分布随机,导致合金塑性降低。另外,合金的硬度随着 Si 含量增加逐渐增加,这是由于 Mg_2Si 体积分数逐渐增多,而 Mg_2Si 硬而脆,使合金的整体硬度提高。

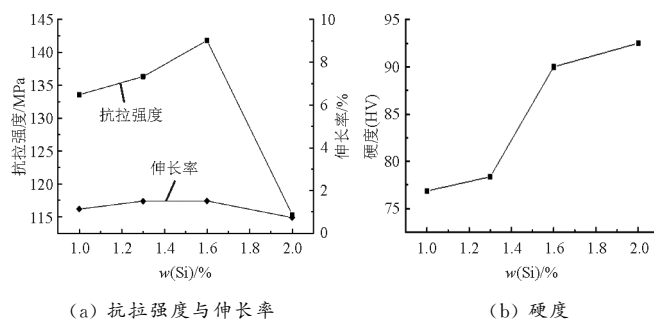


图 7 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 合金的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE alloys

2.2 熔体超声处理对合金组织与性能的影响

图 8 为 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 熔体经超声处理后的金相组织。可以看出,随着 Si 含量增加,合金晶粒相比未超声处理前晶粒更加圆整,呈近球形的等轴晶,且分布比较均匀,其晶粒尺寸变化,并且 Mg_2Si 强化相的体积分数随着 Si 含量增加而增大,见图 9。当 Si 含量为 1.6% 时晶粒尺寸较小且 Mg_2Si 分布较均匀,当 Si 含量增大到 2.0% 时出现一定程度的团聚现象。 α -Al 晶粒细化主要是因为,施加超声振动时,高能超声波在金属熔体中会产生声空化与声流效应^[10~12]。首先,随着空化泡的长大,会大量吸热,同时空化泡破碎产生的高压会提高金

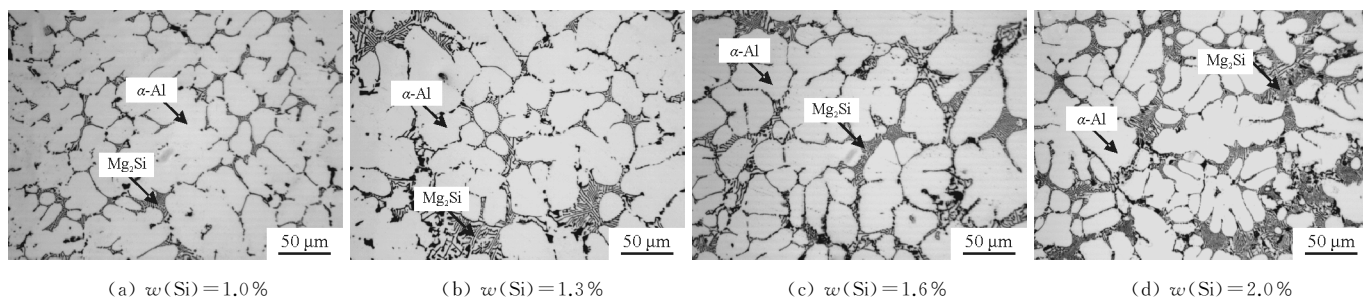


图 8 超声处理 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 合金的显微组织

Fig.8 Microstructure of Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE alloy after ultrasound treatment

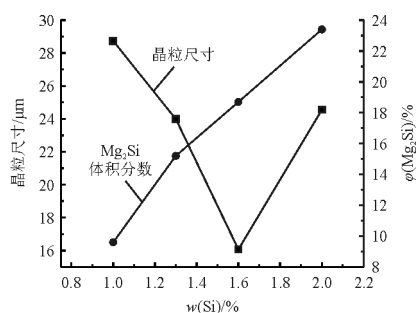


图 9 超声处理后 Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE 合金的晶粒尺寸和 Mg_2Si 相体积分数

Fig.9 Grain size of Al-5Mg- x Si-0.3Mn-0.4RE alloy and volume fraction of Mg_2Si phase after ultrasonic treatment

属熔体的平衡凝固温度,会使局部金属熔体过冷,促进形核;其次,声流能够强烈地搅拌金属熔体,抑制枝晶生

长,细化晶粒。图 10 为 Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE 合金超声处理后面扫描分析结果。可以看出,与未处理的相比,超声处理后 Mg 较均匀地扩散到晶内, Si 以及稀土还是较多聚集在晶界。

超声处理后不同 Si 含量下铸态试样的力学性能见图 11。可以看出,经过超声处理后合金的力学性能得到提升,其中 Si 含量为 1.6% 的试样铸态抗拉强度由未处理的 141.2 MPa 增加到 168.0 MPa,伸长率由 1.5% 上升到 2.6%。这是由于超声处理能提高金属熔体的平衡凝固温度,使得局部金属熔体过冷,促进形核;声流能够强烈地搅拌金属熔体,抑制枝晶生长,细化晶粒。超声后也可能使元素分布更加均匀,避免 Si 在晶界产生偏析。所以超声处理后合金变形更加分散,产生应力集中的可能性也减少,因此铸态抗拉强度和伸长率较未处

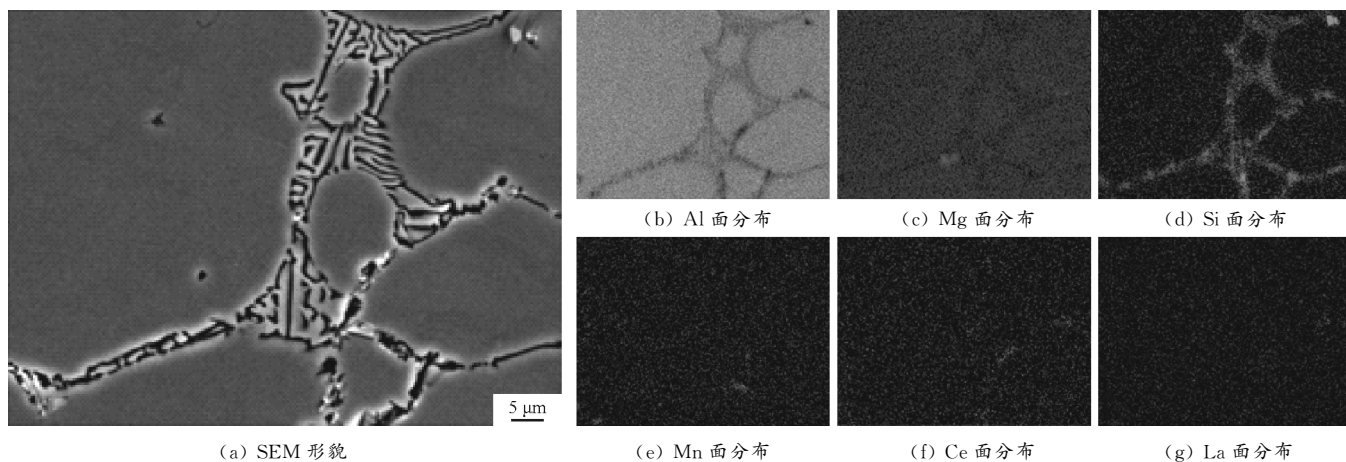


图 10 超声处理后 Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE 微观组织及各元素分布情况

Fig.10 Microstructure and distribution of each element of Al-5Mg-1.6Si-0.3Mn-0.4RE alloy after ultrasonic treatment

理时得到提升。超声处理后合金的硬度随着 Si 含量增加逐渐增加,其变化趋势和超声处理前一样,并且其硬度值接近。

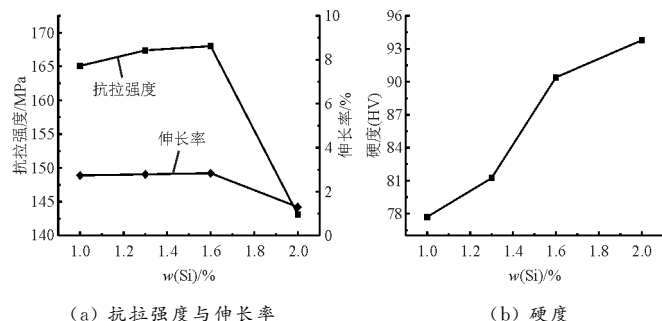


图 11 超声处理后 Al-5Mg-xSi-0.3Mn-0.4RE 合金的力学性能

Fig.11 Mechanical properties of Al-5Mg-xSi-0.3Mn-0.4RE alloys after ultrasonic treatment

3 结 论

(1)随着 Si 含量增加,Al-5Mg-xSi-0.3Mn-0.4RE 合金中初生 α -Al 相以及 Mg_2Si 相的形状和分布也会发生变化,当 Si 含量为 1.6% 时, α -Al 晶粒变得细小,平均晶粒尺寸为 $17.70 \mu m$,同时 β - Mg_2Si 相的分布更加均匀,但过高的 Si 含量会起到相反的作用。

(2)超声处理后,Al-5Mg-xSi-0.3Mn-0.4RE 合金中 α -Al 晶粒相较于超声处理前变得圆整, β - Mg_2Si 分布也比较均匀,但是当 Si 含量为 2% 时, β - Mg_2Si 会发生团聚现象。

(3)Al-5Mg-xSi-0.3Mn-0.4RE 合金经超声处理后, Si 含量为 1.6% 的试样铸态综合力学性能最佳,抗拉强度由未超声处理时的 141.2 MPa 提升到 168.0 MPa,伸长率由 1.5% 升至 2.6%。

参 考 文 献

[1] 贾强,孙清洲,边秀房,等. La 对 ZL303 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(10): 807-810.

[2] 郝玉喜,吴楠,王洪卓,等.合金元素对 Al-Mg-Si 合金力学性能的影响[J].热处理技术与装备, 2021, 42(2): 13-16.

[3] 李秋梅,王春雷,董刘颖,等.Si、Mn 元素含量对铝合金型材组织及性能影响[J]. 有色金属加工, 2020, 49(5): 46-48.

[4] HOLME B, LJONES N, BAKKEN A, et al. Preferential grain etching of AlMgSi(Zn) model alloys[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(12): 71-79.

[5] 蔡郭生,李志龙,陆华峰,等. 富 Ce 混合稀土对 2A14 铝合金铸态组织和性能的影响[J]. 铸造, 2014, 63(12): 1 264-1 265.

[6] 李成,吴树森,吕书林,等. Zr 含量及超声处理对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1 380-1 383.

[7] BALASUBRAMANI N, WANG G, STJOHN D H, et al. Current understanding of the origin of equiaxed grains in pure metals during ultrasonic solidification and a comparison of grain formation processes with low frequency vibration, pulsed magnetic and electric-current pulse techniques[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 65: 38-53.

[8] HU Y J, WANG X, WANG J Y, et al. Austenite grain refinement and subsequent martensite transformation of ternary Cu-Al-Ni alloy solidified within ultrasonic field[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2021, A52: 3 097-3 106.

[9] 王东辉,李建国,郑燕康,等. Al-3B 中间合金的加入量对亚共晶 Al-Si 合金晶粒细化的影响[J]. 稀有金属, 2001, 25(6): 411-415.

[10] LÜ S L, WU S S, LIN C. Preparation and rheocasting of semisolid slurry of 5083 Al alloy with indirect ultrasonic vibration process [J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528: 8 635-8 640.

[11] CHEN R R, ZHENG D S, GUO J J, et al. A novel method for grain refinement and microstructure modification in TiAl alloy by ultrasonic vibration[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A653: 23-26.

[12] LIN C, WU S S, LÜ S L, et al. Effects of ultrasonic vibration and manganese on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys with 2% Fe [J]. Intermetallics, 2013, 32: 176-183.

(编辑:栗万仲)