

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5205

基于相图计算的新型 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金设计

高辰祺, 田璐莎, 李建平

(西安工业大学 材料与化工学院 陕西 西安 710021)

摘要:以相图热力学计算相关原理为基础,计算了新型 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金在不同 Mg 含量、不同 Mg/Si 质量比下的相组成,并对合金在铸态下的力学性能进行了模拟,得到成分为 Al-1.5Mg-1.1Si-0.8Cu-0.2Mn(简记为 1.5Mg-1.1Si)和 Al-1.0Mg-1.0Si-0.8Cu-0.2Mn(简记为 1.0Mg-1.0Si)两种铝合金。采用光学金相显微镜、扫描电镜以及室温拉伸试验,对上述两种不同成分的铝合金进行了显微组织观察和力学性能测试。结果表明,随着 Mg 含量、Mg/Si 质量比的同时增大,1.5Mg-1.1Si 合金的平均晶粒尺寸为 $81.10\ \mu\text{m}$,比 1.0Mg-1.0Si 的平均晶粒尺寸减小了 18.5%;1.5Mg-1.1Si 合金的最大抗拉强度达到了 177 MPa,相比于 1.0Mg-1.0Si 合金平均提高了 12.5%。整体上 1.5Mg-1.1Si 合金的力学性能和显微组织得到了一定程度的优化与提高。同时,模拟计算结果与实验结果得到了相互印证,可以说明相图热力学计算软件 JMatPro 有利于提高合金成分设计的效率。

关键词:相图计算;铝合金;力学性能;显微组织

中图分类号: TG27

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)07-0795-11

Novel Al-Mg-Si-Cu-Mn Alloy Design Based on Phase Diagram Calculations

GAO Chenqi, TIAN Lusha, LI Jianping

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: On the basis of thermodynamic calculations of phase diagrams, the phase composition of a new type of Al-Mg-Si-Cu-Mn alloy was calculated under different Mg contents and Mg/Si mass ratios, and the mechanical properties of the alloy in the as-cast state were simulated. Two aluminium alloys with compositions of Al-1.5Mg-1.1Si-0.8Cu-0.2Mn and Al-1.0Mg-1.0Si-0.8Cu-0.2Mn were obtained. The microstructures and mechanical properties of the two alloys with different compositions were observed and tested via optical metallographic microscopy, scanning electron microscopy and room temperature tensile tests. The results show that with increasing Mg content and Mg/Si mass ratio, the average grain size of the as-cast Al-1.5Mg-1.1Si-0.8Cu-0.2Mn alloy is reduced by 30% compared with that of the as-cast Al-1.0Mg-1.0Si-0.8Cu-0.2Mn alloy; the maximum tensile strength of the as-cast Al-1.5Mg-1.1Si-0.8Cu-0.2Mn alloy reaches 177 MPa, which is 12.5% greater on average than that of the as-cast Al-1.0Mg-1.0Si-0.8Cu-0.2Mn alloy. Overall, the mechanical properties and microstructure of the as-cast Al-1.5Mg-1.1Si-0.8Cu-0.2Mn alloy were optimized and improved to a certain extent. Moreover, the simulation results are consistent with the experimental results, which indicates that the phase diagram thermodynamic calculation software JMatPro is beneficial for improving the efficiency of alloy composition design.

Key words: phase diagram calculation; aluminium alloy; mechanical properties; microstructure

6xxx 系铝合金因具有加工性能好、耐蚀性好、比强度高优点而广泛应用于建筑、交通、汽车制造等诸多领域,成为现代社会普遍使用的金属材料。随着现代工业的高速发展,对 6xxx 系铝合金的要求

也逐渐提高。在大量实践中发现微合金化是有效提高 6xxx 系铝合金力学性能的重要手段^[1-4]。6xxx 系铝合金作为以 Mg_2Si 为主要强化相的一类铝合金,主合金元素 Mg、Si 的含量对合金显微组织和力学性能

收稿日期: 2025-09-12

基金项目: 陕西省教育厅科研计划(K20250066)

作者简介: 高辰祺,2000 年生,硕士生。研究方向为铝合金成分设计与性能提升。Email: g18167525197@163.com

通信作者: 田璐莎,1988 年生,博士,讲师。研究方向为铝镁钛轻合金先进制造技术。Email: tianlusha51@163.com

引用格式: 高辰祺,田璐莎,李建平. 基于相图计算的新型 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金设计[J]. 铸造技术, 2026, 47(7): 795-805.

GAO C Q, TIAN L S, LI J P. Novel Al-Mg-Si-Cu-Mn alloy design based on phase diagram calculations[J]. Foundry Technology, 2026, 47(7): 795-805.

产生了重要影响。因此研究不同 Mg、Si 含量对 6xxx 系铝合金显微组织和力学性能的影响显得尤为重要。

张建新等^[5]固定 Si 元素含量为 0.43%(质量分数,下同),通过调整 Mg 含量以改变 Mg/Si 质量比,研究了 Mg/Si 质量比为 1.2~1.8 对 Al-Mg-Si 系合金组织性能的影响,发现 Mg/Si 质量比为 1.5 时铸态试样晶粒均匀细小,其强度和塑性达到最佳配合,二者比值超过 1.73 后,抗拉强度急剧降低;Mg/Si 质量比在 1.5~1.7 范围内合金腐蚀性能相对稳定,Mg/Si 质量比大于 1.73 或小于 1.5 后材料的耐蚀性能下降显著;Mg/Si 质量比为 1.65 时材料的导电性能较高。孙亮等^[6]设计了 Mg/Si 质量比为 0.73、1.19 和 1.30 的 3 种不同 6 系铝合金,发现随 Mg 和 Si 质量比的增加,6 系铝合金组织中粗晶层厚度与析出相的尺寸均减小,屈服强度、抗拉强度和硬度均小幅度降低,电导率呈上升趋势,同时抗裂纹性能逐渐提高。Dong 等^[7]研究了 Mg/Si 比为 0.65、0.78、1.02、1.45、1.88、2.32 对 Al-Mg-Si 合金力学性能和导电性能的影响,结果表明,低镁硅比的合金具有更快的时效硬化响应和更高的峰值硬度,镁硅比为 1.02 的合金在硬度和导电性之间提供了极好的平衡;镁硅比较低的合金,其析出物数量越多,尺寸越小,其力学性能越好。Yan 等^[8]研究表明,对于 Al- x Mg-2.0Si-0.6Mn 合金,不同镁含量的合金所含有的相类型不变,随着镁含量的增加,镁硅相由简单的细长相向汉字相发展。当镁含量超过 5%时,镁硅相变粗大;随着镁含量的增加,合金的力学性能呈现先升后降的趋势。当镁含量为 5%时,合金的最大抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 227.21、136.55 MPa 和 7.24%。刘云鹤等^[9]利用材料相图及性能模拟软件 JMatPro 对 Al-Mg-Si-Cu-La 合金进行热力学模拟计算,合金力学性能模型表明,增加 Cu 含量会提高合金的力学性能,当 Cu 含量为 4%时,合金的抗拉强度和硬度均达到最大,但当 Cu 含量为 5%时合金抗拉强度和硬度开始下降。

需要指出的是,迄今为止,绝大多数有关 Mg、Si 含量对 6xxx 系铝合金显微组织和力学性能影响的科研成果都是通过大量实验得出的。这种依靠科研经验和大规模实验获得铝合金最优成分的方法需要耗费大量的时间、人力与物力,对于工业发展来说不仅效率低下而且成本高昂。近年来,虽然有研究人员尝试使用各种基于 CALPHAD 方法开发的热力学与相图计算软件辅助合金成分设计和解释合金在平衡凝固中出现的各种现象,但是利用热力学相图计算软件分析不同化学成分对 6xxx 系铝

合金显微组织和力学性能的影响规律未有系统性研究。

因此,本文针对实验法优化铝合金成分效率低下、成本高昂等缺点,利用相图热力学计算软件系统研究与分析 Mg 含量为 1.0%和 1.5%两种情况下不同 Mg/Si 质量比对 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金显微组织与力学性能的影响规律,并选择合适成分进行显微组织观察和力学性能测试,验证模拟计算所得规律的有效性,以实现系统研究不同化学成分对 6xxx 系铝合金显微组织和力学性能影响规律的有益探索。

1 实验材料与方法

1.1 合金设计

实验采用的合金成分为 Al- x Mg- y Si-0.8Cu-0.2Mn-0.03Ti-0.15V,其中 x 为 1.5%和 1.0%。针对上述合金的化学成分进行定量模拟,变量元素为 Si,在同一 Mg 含量下通过调整 Si 含量 y 来改变 Mg/Si 质量比,其余元素均为定量元素。将各合金元素值输入 JMatPro 软件,分别计算同一条件下合金的平衡相组成及抗拉强度。通过抗拉强度大小进行化学成分选定,具体步骤为:①确定 Mg 元素含量不变,分别计算 Mg/Si 质量比为 1.0、1.5、1.7 时的合金相组成及其力学性能大小,并对计算结果进行分析、对比;②确定 Mg 元素含量不变,将 Mg/Si 质量比取值范围设定为 1.00~1.70,计算合金平衡相组成时步长取值为 0.01,计算合金抗拉强度时步长取值为 0.05。将上述计算结果分别进行分类、统计。

1.2 实验材料与方法

(1)熔炼与铸造 根据选定成分配制两种不同成分的 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金所需原料。把原料放入石墨坩锅中加热至熔化,待其完全熔化后搅拌均匀,温度达到 730~750 °C 时使用 1%的 C_2Cl_6 精炼剂除气 3 min 并扒渣,随后保温 10 min 后浇铸成 210 mm×30 mm×60 mm 板材。模具选用铁质模具,使用前应提前在真空干燥箱中 200 °C 预热 30 min。

(2)显微组织观察 使用线切割从板材底部相同位置处切取 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试样,分别用 240#、400#、600#、800#、1000#、1500#、2000# 砂纸对试样表面进行打磨,之后使用金刚石研磨膏对试样进行抛光,分别用去离子水、无水乙醇清洗表面后吹干试样。使用配制好的凯勒试剂对试样表面进行腐蚀,之后分别在全自动倒置金相显微镜和扫描电镜下观察试样的组织形貌。凯勒试剂配置参数如表 1 所示。

(3)力学性能测试 室温拉伸实验时,将板材制

表1 凯勒试剂配置参数

Tab.1 Keller reagent preparation parameters

Reagent	Dosage/mL
HNO ₃	2.5
HCl	1.5
HF	1.0
H ₂ O	95.0

成棒状拉伸试样,同一块板材制备3个试样,在微机控制电子万能试验机上测定试样在室温下的抗拉强度、屈服强度及断后伸长率。布氏硬度测定时,使用线切割从板材底部相同位置处切取50 mm×50 mm×10 mm的立方体试样,分别用240#、400#、600#、800#、1000#、1500#、2000#砂纸对试样表面进行打

磨,之后使用金刚石研磨膏对试样进行抛光,分别用去离子水、无水乙醇清洗表面后吹干试样。将制备好的试样放置在载物台上,使用5 mm硬质合金球压头,载荷参数选定为2.45 kN,加载时间为15 s,撤去压力后观察压痕大小并使用配套设备读出数据。同一试样分别测定3次并取平均数。

2 模拟计算结果分析

图1~3是Mg含量为1.5%时,随着Mg/Si质量比改变(Mg/Si质量比为1.0、1.5、1.7)合金相组成随温度变化及力学性能随冷却速度变化的曲线。通过分析可知,当Mg/Si质量比为1.0增大到1.5时,

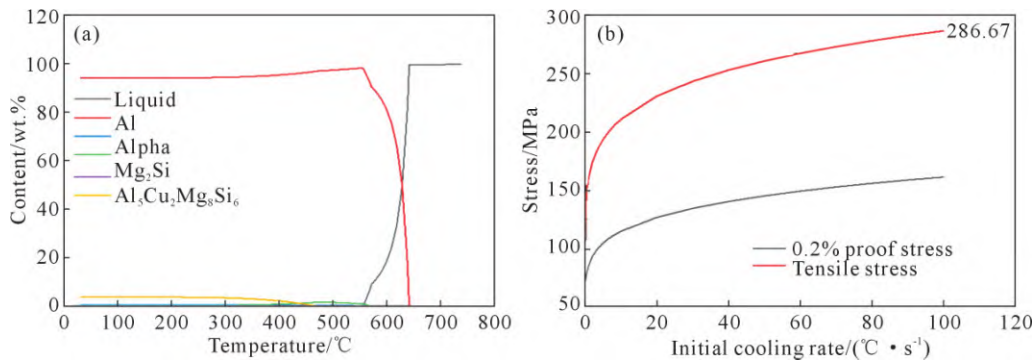


图1 Mg含量为1.5%,Mg/Si质量比为1.0时合金相组成及力学性能计算结果:(a)合金相组成;(b)力学性能

Fig.1 Calculation results of the alloy phase composition and mechanical properties with a Mg content of 1.5 wt.% and a Mg/Si mass ratio of 1.0: (a) alloy phase composition; (b) mechanical properties

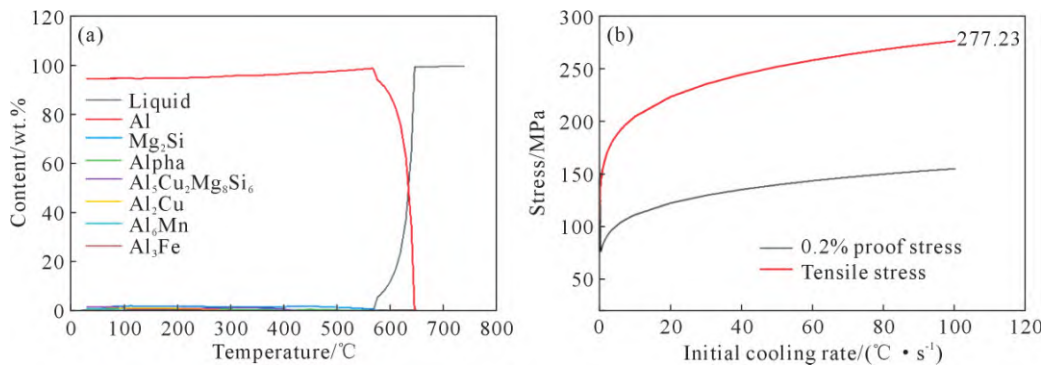


图2 Mg含量为1.5%,Mg/Si质量比为1.5时合金相组成及力学性能计算结果:(a)合金相组成;(b)力学性能

Fig.2 Calculation results of the alloy phase composition and mechanical properties with a Mg content of 1.5 wt.% and a Mg/Si mass ratio of 1.5: (a) alloy phase composition; (b) mechanical properties

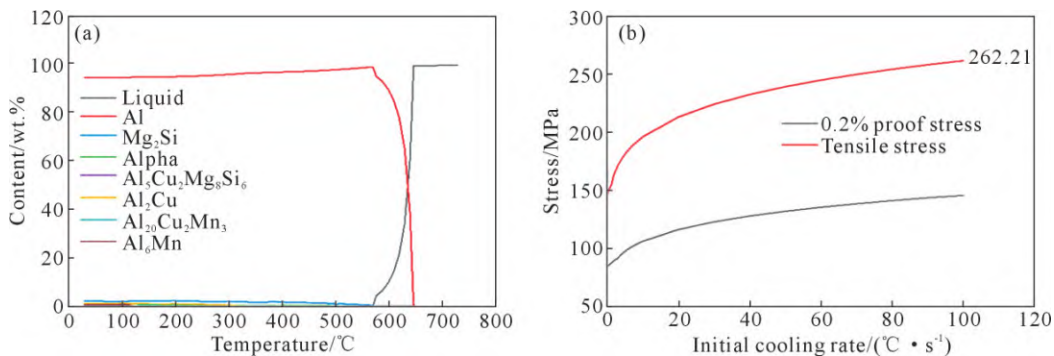


图3 Mg含量为1.5%,Mg/Si质量比为1.7时合金相组成及力学性能计算结果:(a)合金相组成;(b)力学性能

Fig.3 Calculation results of the alloy phase composition and mechanical properties with a Mg content of 1.5 wt.% and a Mg/Si mass ratio of 1.7: (a) alloy phase composition; (b) mechanical properties

合金中的强化相由 2 种(Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$)增加到 5 种(Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_6Mn 、 Al_2Cu 、 Al_3Fe)；当 Mg/Si 质量比由 1.5 增大到 1.7 时，合金中强化相数量无变化，主要强化相由 Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_6Mn 、 Al_2Cu 、 Al_3Fe 变为 Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_6Mn 、 Al_2Cu 、 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 。随着 Mg/Si 质量比增大，合金抗拉强度大小先从 286.67 MPa 降低到 277.23 MPa，再降低到 262.21 MPa，呈现出逐渐减小的趋势。

当 Mg 含量为 1.0% 保持不变时(图 4~6)，随着 Mg/Si 质量比改变(Mg/Si 质量比为 1.0、1.5、1.7)合金相组成随温度变化及力学性能随冷却速度变化的曲线图。通过分析可知，当 Mg/Si 质量比为 1.0 增大到

1.5 时，合金中的强化相由 3 种(Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_2Cu)增加到 5 种(Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_6Mn 、 Al_2Cu 、 Al_3Fe)；当 Mg/Si 质量比为 1.5 增大到 1.7 时，合金中的强化相由 Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_6Mn 、 Al_2Cu 、 Al_3Fe 变化为 Mg_2Si 、 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 Al_6Mn 、 Al_2Cu 、 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 。随着 Mg/Si 质量比的增大，合金抗拉强度大小先从 273.62 MPa 降低到 247.95 MPa，再降低到 236.64 MPa，呈现出逐渐减小的趋势。

分别对比图 1 与 4、图 2 与 5、图 3 与 6 可知，在相同 Mg/Si 质量比下，Mg 含量为 1.5% 的合金的力学性能均略好于 Mg 含量为 1.0% 的合金的力学性能；Mg/Si 质量比为 1.0 时，Mg 含量 1.5% 的合金力

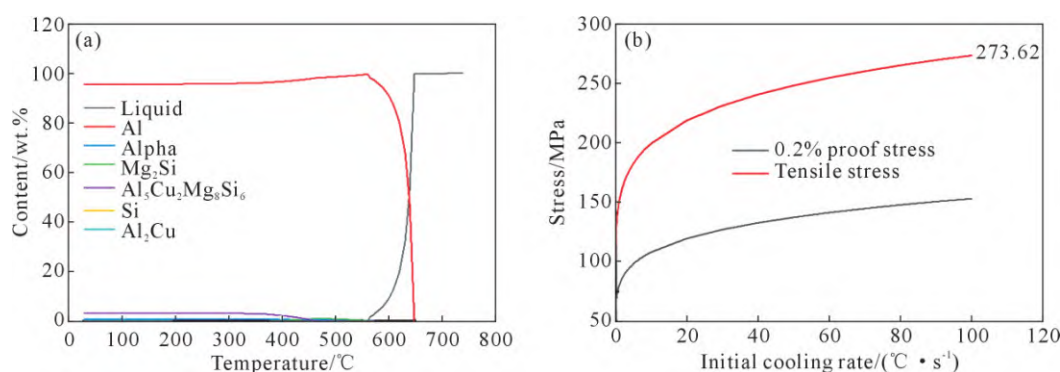


图 4 Mg 含量为 1.0%，Mg/Si 质量比为 1.0 时合金相组成及力学性能计算结果：(a) 合金相组成；(b) 力学性能
Fig.4 Calculation results of the alloy phase composition and mechanical properties with a Mg content of 1.0 wt.% and a Mg/Si mass ratio of 1.0: (a) alloy phase composition; (b) mechanical properties

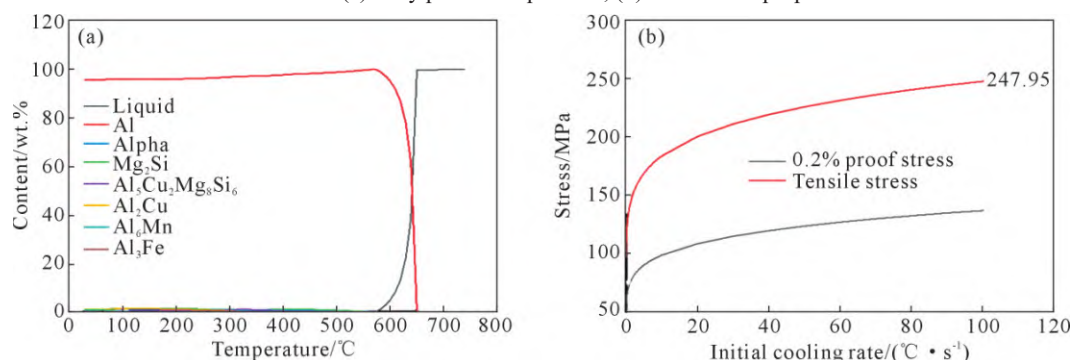


图 5 Mg 含量为 1.0%，Mg/Si 质量比为 1.5 时合金相组成及力学性能计算结果：(a) 合金相组成；(b) 力学性能
Fig.5 Calculation results of the alloy phase composition and mechanical properties with a Mg content of 1.0 wt.% and a Mg/Si mass ratio of 1.5: (a) alloy phase composition; (b) mechanical properties

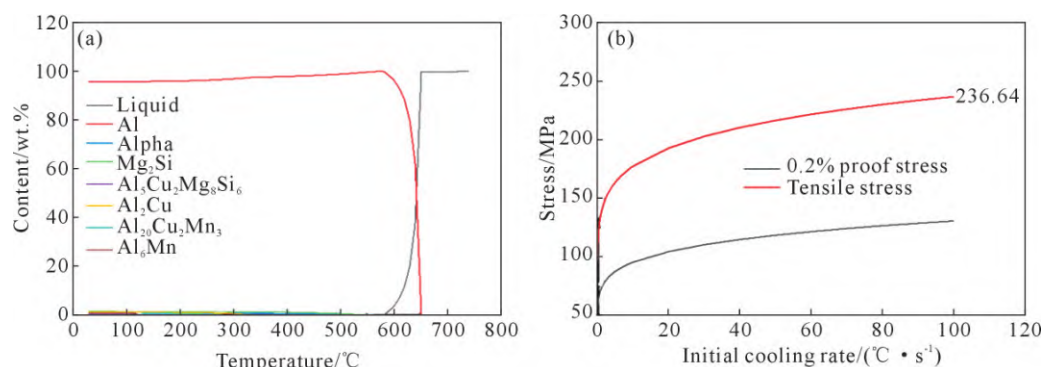


图 6 Mg 含量为 1.0%，Mg/Si 质量比为 1.7 时合金相组成及力学性能计算结果：(a) 合金相组成；(b) 力学性能
Fig.6 Calculation results of the alloy phase composition and mechanical properties with a Mg content of 1.0 wt.% and a Mg/Si mass ratio of 1.7: (a) alloy phase composition; (b) mechanical properties

学性能为 286.67 MPa, Mg 含量 1.0% 的合金力学性能为 273.62 MPa; Mg/Si 质量比为 1.5 时, Mg 含量 1.5% 的合金力学性能为 277.23 MPa, Mg 含量 1.0% 的合金力学性能为 247.95 MPa; Mg/Si 质量比为 1.7 时, Mg 含量 1.5% 的合金力学性能为 262.2 MPa, Mg 含量 1.0% 的合金力学性能为 236.64 MPa。

表 2~3 为两种不同 Mg 含量下、Mg/Si 质量比对合金相组成的影响规律。由表可知, 两种不同 Mg 含量合金的相组成数量均随着 Mg/Si 质量比的增大而增多。两种不同 Mg 含量下、Mg/Si 质量比对合金相组成的影响规律可以按照不同 Mg/Si 质量比分成 0.05~1.05、1.20~1.55 以及 1.65~1.70 分成 3 个阶段。同时可以发现, 当 Mg/Si 质量比取值范围为 1.00~1.70 时, 两种不同 Mg 含量合金中均含有强化相 Mg_2Si ; 当 Mg/Si 质量比取值范围为 1.09~1.70 时, 两种不同 Mg 含量合金中均含有强化相 Mg_2Si 、 Al_2Cu 、 Al_6Mn 。

表2 Mg含量为1.5%、不同Mg/Si质量比合金相组成
Tab.2 Phase compositions of alloys with a 1.5 wt.% Mg content and different Mg/Si mass ratios

Mg/Si mass ratio	Alloy phase composition
1.63~1.70	α , Al, Mg_2Si , Al_2Cu , Al_6Mn , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$, $Al_{30}Cu_2Mn_3$
1.19~1.59	α , Al, Mg_2Si , Al_2Cu , Al_6Mn , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$
1.00~1.16	α , Al, Si, Mg_2Si , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$

表3 Mg含量为1.0%、不同Mg/Si质量比合金相组成
Tab.3 Phase compositions of alloys with a 1.0 wt.% Mg content and different Mg/Si mass ratios

Mg/Si mass ratio	Alloy phase composition
1.59~1.70	α , Al, Mg_2Si , Al_2Cu , Al_6Mn , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$, $Al_{30}Cu_2Mn_3$
1.51~1.56	α , Al, Mg_2Si , Al_2Cu , Al_6Mn , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$
1.09~1.49	α , Al, Mg_2Si , Al_2Cu , Al_6Mn , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$
1.00~1.07	α , Al, Si, Mg_2Si , $Al_3Cu_2Mg_8Si_6$

表 4 和 5 为两种不同 Mg 含量下、Mg/Si 质量比对合金力学性能的影响规律(表中“\”表示未能计算出结果)。从两表中可以看出, 在相同 Mg/Si 质量比时, 随着 Mg 含量的增加, 合金的力学性能随之增大; 在相同 Mg 含量时, 随着 Mg/Si 质量比的减小, 合金的力学性能随之增大。结合两种不同 Mg 含量合金在 Mg/Si 质量比取值范围在 1.00~1.05、1.20~1.50 以及 1.65~1.70 范围内相组成的计算结果。

根据上述模拟计算结果, 本文选取成分为 Al-1.5Mg-1.1Si-0.8Cu-0.2Mn-0.03Ti-0.15V(简记为 1.5Mg-1.1Si)和 Al-1.0Mg-1.0Si-0.8Cu-0.2Mn-0.03Ti-0.15V(简记为 1.0Mg-1.0Si)的两种合金分别进行实验。

表4 Mg含量为1.5%、不同Mg/Si质量比合金力学性能
Tab.4 Mechanical properties of alloys with a 1.5 wt.% Mg content and different Mg/Si mass ratios

Mg/Si mass ratio	$w(Mg)/\%$	$w(Si)/\%$	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa
1.70		0.880	262.21	146.10
1.65		0.910	266.08	148.50
1.55		0.970	273.57	153.17
1.50		1.000	277.23	155.46
1.45		1.030	\	\
1.40	1.5	1.070	262.99	146.59
1.35		1.110	286.06	161.03
1.30		1.150	\	\
1.25		1.200	\	\
1.20		1.250	\	\
1.05		1.430	\	\
1.00		1.500	286.67	161.41

表5 Mg含量为1.0%、不同Mg/Si质量比合金力学性能
Tab.5 Mechanical properties of alloys with a 1.0 wt.% Mg content and different Mg/Si mass ratios

Mg/Si mass ratio	$w(Mg)/\%$	$w(Si)/\%$	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa
1.70		0.590	236.64	130.42
1.65		0.610	239.54	132.18
1.60		0.625	241.68	133.48
1.55		0.650	245.19	135.63
1.45		0.690	246.05	136.15
1.40	1.0	0.710	253.35	140.63
1.35		0.740	242.12	133.75
1.30		0.770	261.12	145.43
1.25		0.800	264.90	147.77
1.20		0.830	\	\
1.05		0.950	273.24	152.96
1.00		1.000	273.62	153.21

3 实验结果及讨论

3.1 显微组织

两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的金相照片如图 7 所示。通过观察相同放大倍数下两种不同成分合金的金相照片可知, 1.5Mg-1.1Si 合金相比于 1.0Mg-1.0Si 合金而言晶粒更细小、晶粒分布更加均匀、缺陷更少。同时可以看出, 两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金在晶界处均有第二相生成。之后将两种不同成分合金的金相图片分别导入 Image J 软件中, 每张照片任选 10 个边界清晰的晶体进行晶粒尺寸测量并对结果进行统计, 得到了两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的晶粒尺寸分布直方图(图 8)。由图 8 可知, 1.5Mg-1.1Si 合金的晶粒尺寸主要分布在 60~100 μm 之间, 而 1.0Mg-1.0Si 合金的晶

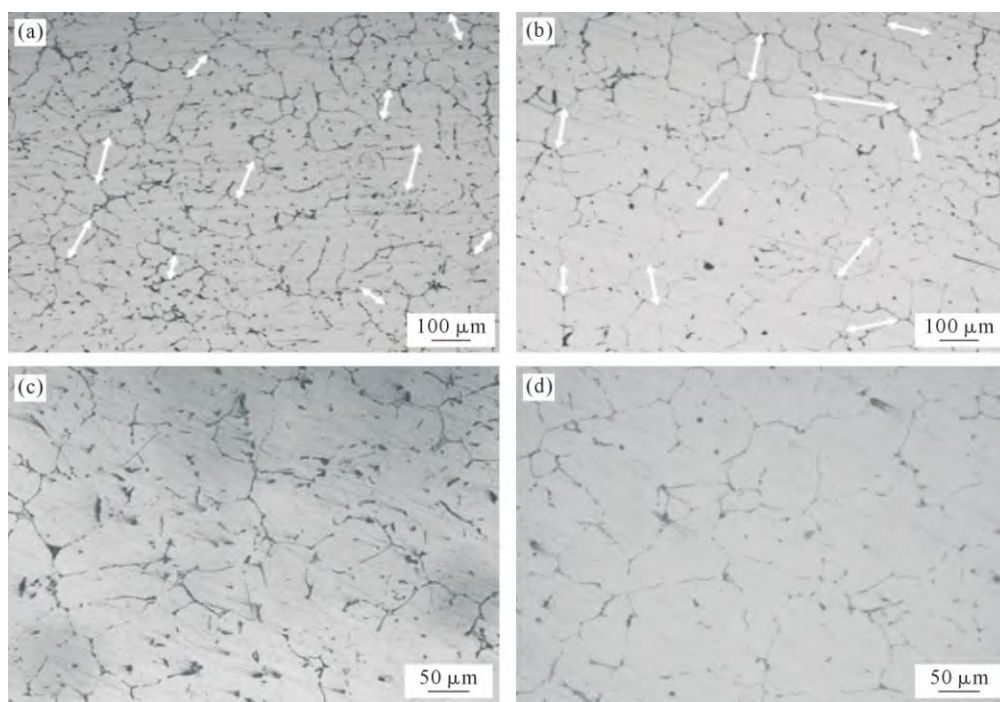


图 7 两种不同 Mg/Si 质量比铸态试样金相组织:(a, c) 1.5Mg-1.1Si; (b, d) 1.0Mg-1.0Si

Fig.7 Metallographic structures of two cast alloys with different Mg/Si mass ratios: (a, c) 1.5Mg-1.1Si; (b, d) 1.0Mg-1.0Si

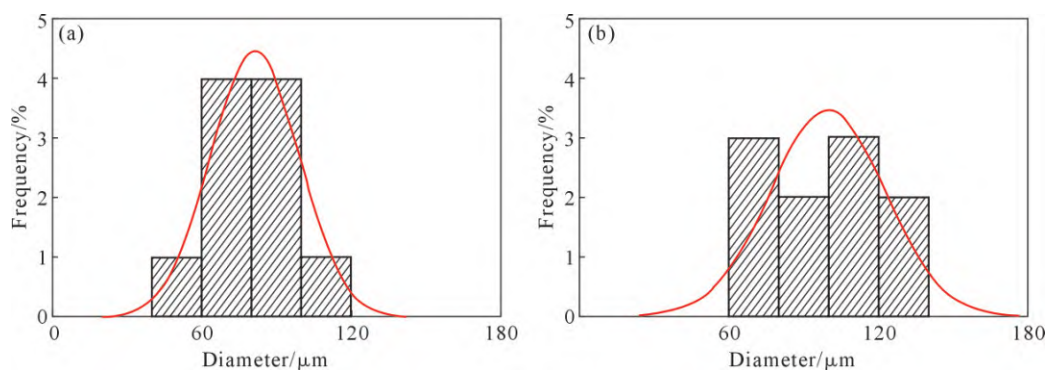


图 8 两种不同成分合金的晶粒尺寸分布直方图:(a) 1.5Mg-1.1Si;(b) 1.0Mg-1.0Si

Fig.8 Grain size distribution histograms of the two different alloy compositions: (a) 1.5Mg-1.1Si; (b) 1.0Mg-1.0Si

粒尺寸主要分布在 60~80 μm 和 100~120 μm 之间。此外,由图 8 可计算得到 1.5Mg-1.1Si 合金的平均晶粒尺寸为 80 μm,1.0Mg-1.0Si 合金的平均晶粒尺寸为 98 μm,相比而言 1.5Mg-1.1Si 合金的平均晶粒尺寸比 1.0Mg-1.0Si 合金的平均晶粒尺寸减小了 18.4%,1.5Mg-1.1Si 合金的组织比 1.0Mg-1.0Si 合金的组织更加紧密。

两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的 XRD 结果如图 9 所示。通过分析可知,1.5Mg-1.1Si 合金中可能含有 Al 相、Mg₂Si 相、Al₂Cu 相、Al₆Mn 相,1.0Mg-1.0Si 合金中可能含有 Al 相、Mg₂Si 相、Al₂Cu 相、Al₆Mn 相、Si 相。通过对比,两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金中均可能含有 Al 相、Mg₂Si 相、Al₂Cu 相、Al₆Mn 相;并且,各物相对应 XRD 峰的位置均相同。此外,由图 8 可知,1.5Mg-1.1Si 合金中各物相对应的信号强度均大于 1.0Mg-1.0Si 合金中各物相对

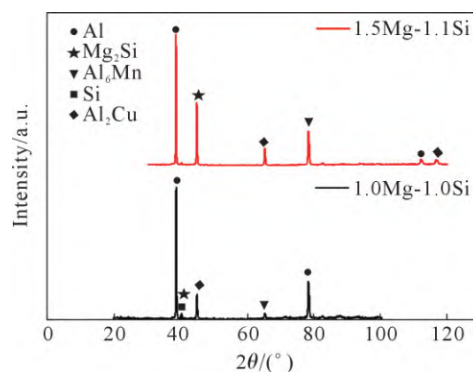


图 9 两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的 XRD 结果
Fig.9 XRD results for two different compositions of Al-Mg-Si-Cu-Mn alloys

应的信号强度。

对两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金进行 SEM 分析,由 EDS 结果(图 10 和 11)可知,呈银白色、不规则形状的组织是 θ(Al₂Cu)相(图 10 中 B 点、

图 11 中 B 点);呈细小、树枝状的组织是 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 相(图 10 中 A 点);呈暗黑色、条状组织的是 Si 相(图 11 中 A 点)。同时可以发现,两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金中均含有强化相 Al_2Cu (B 点);1.5Mg-1.1Si 合金中还含有强化相 Mg_2Si ,1.0Mg-1.0Si 合金

中还含有 Si 相。

3.2 力学性能

两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金经室温拉伸实验得到的应力-应变曲线如图 12 所示。通过对比可以看出,在相同实验条件下,1.5Mg-1.1Si 合金

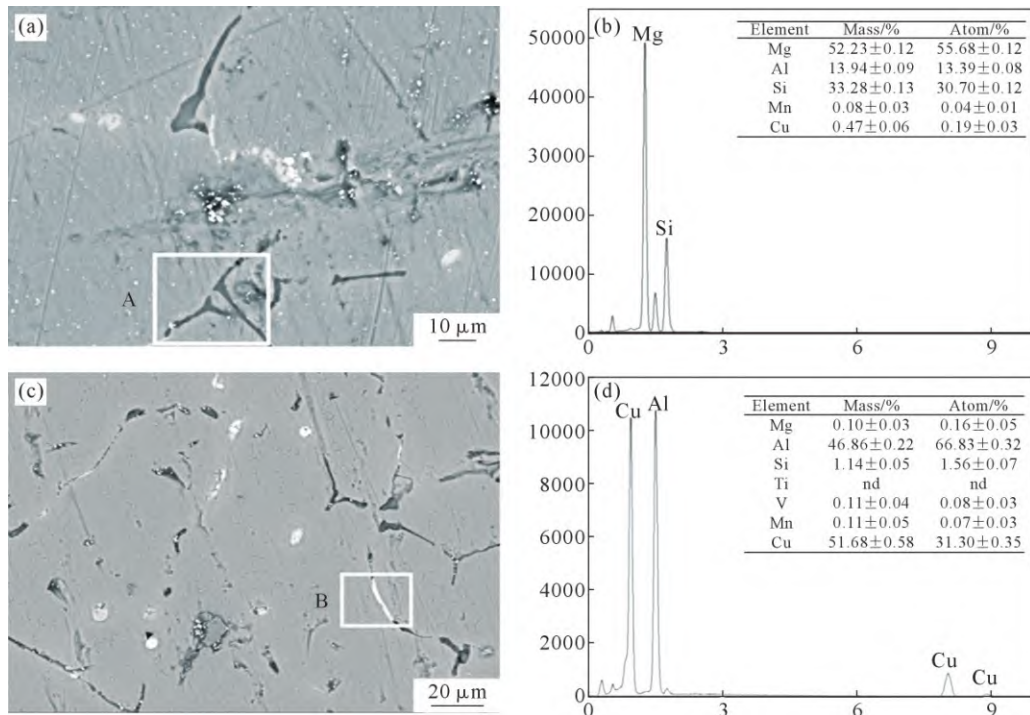


图 10 1.5Mg-1.1Si 合金 SEM 图片与 EDS 结果:(a, b) A 点所在区域 SEM 图片及 EDS 图谱;(c, d) B 点所在区域 SEM 图片及 EDS 图谱

Fig.10 SEM images and EDS results of the 1.5Mg-1.1Si alloy: (a, b) SEM image of the area where point A is located and the EDS spectrum of point A; (c, d) SEM image of the area where point B is located and the EDS spectrum of point B

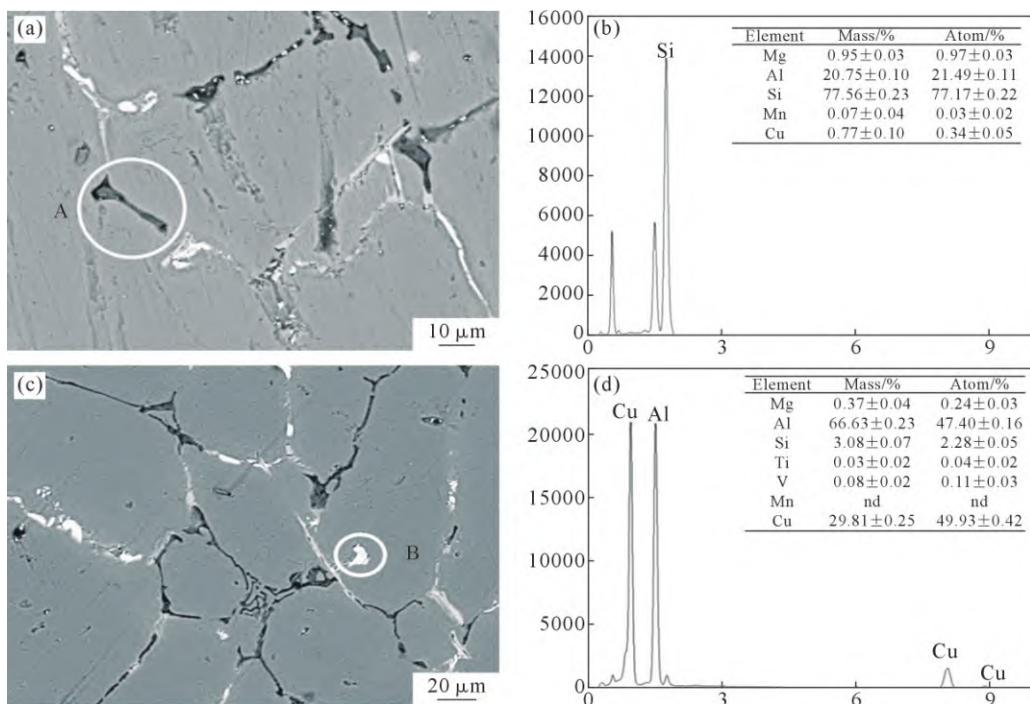


图 11 1.0Mg-1.0Si 合金 SEM 图片与 EDS 结果:(a, b) A 点所在区域 SEM 图片及 EDS 图谱;(c, d) B 点所在区域 SEM 图片及 EDS 图谱

Fig.11 SEM images and EDS results of the 1.0Mg-1.0Si alloy: (a, b) SEM image of the area where point A is located and the EDS spectrum of point A; (c, d) SEM image of the area where point B is located and the EDS spectrum of point B

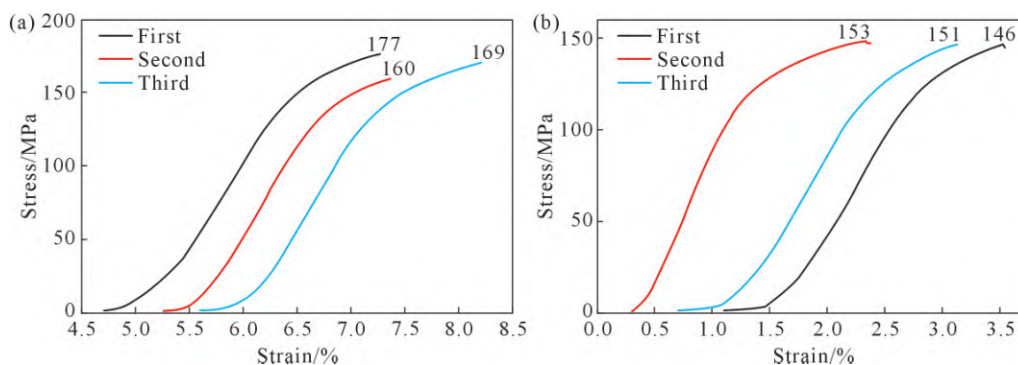


图 12 两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的应力-应变曲线:(a) 1.5Mg-1.1Si; (b) 1.0Mg-1.0Si
Fig.12 Stress-strain curves of two different component Al-Mg-Si-Cu-Mn alloys: (a) 1.5Mg-1.1Si; (b) 1.0Mg-1.0Si

的抗拉强度好于 1.0Mg-1.0Si 合金的抗拉强度。通过分析可知,两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的应力-应变曲线均呈现出非线性上升趋势,说明材料在受力过程中发生了一定程度的塑性变形。应力-应变曲线根据斜率可划分为 3 个阶段:斜率最小的曲线开始阶段、斜率最大的曲线中间阶段、斜率中等大小的曲线末尾阶段。相应地,材料在拉伸中的受力情况也可划分为 3 个时期:开始受力期、弹性变形期、受力即将结束期。AB 段斜率最小可归因于合金中分布的 Mg_2Si 相、粗大 Si 相会阻碍位错运动,应力较小时,位错需要克服粒子的障碍,导致曲线斜率较小。曲线末尾阶段斜率减小是因为材料在断裂前发生了一定程度的颈缩现象,表现出了一定的塑性。

两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的布氏硬度测定结果如表 6 所示。通过对比两种合金的布氏硬度测定结果可知,1.5Mg-1.1Si 合金的布氏硬度略

表 6 两种不同成分合金的布氏硬度测定结果

Tab.6 Brinell hardness measurement results for two alloys with different compositions

Alloy	1.5Mg-1.1Si	1.0Mg-1.0Si
Brinell hardness (HBW)	70.40	68.90
	69.30	67.40
	69.70	67.80
Average	69.80	68.03
Standard deviation	0.556 78	0.776 75

优于 1.0Mg-1.0Si 合金的布氏硬度。

3.3 拉伸断口形貌

两种不同 Mg/Si 质量比的对应铸态试样室温拉伸断口在不同放大倍数下的形貌如图 13 和 14 所示。

通过图 13a 与图 14a 可知,两种不同 Mg/Si 质量比的铸态合金室温拉伸试样断口边缘没有 45°斜切的剪切唇,表明试样断裂前几乎没有产生宏观塑性变形;断口宏观平面相对平齐且与拉伸力方向垂

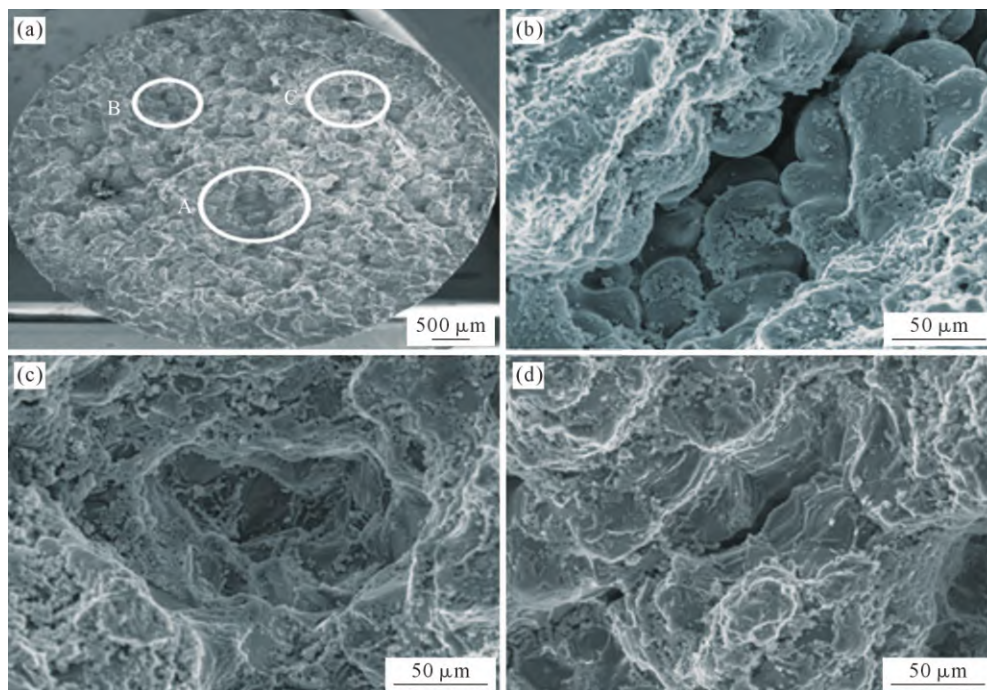


图 13 铸态 1.5Mg-1.1Si 合金室温拉伸试样断口形貌:(a) 整体形貌;(b) A 区域放大图;(c) B 区域放大图;(d) C 区域放大图
Fig.13 Fracture morphology of the room-temperature tensile samples of the as-cast 1.5Mg-1.1Si alloy: (a) overall morphology; (b) enlarged view of area A in (a); (c) enlarged view of area B in (a); (d) enlarged view of area C in (a)

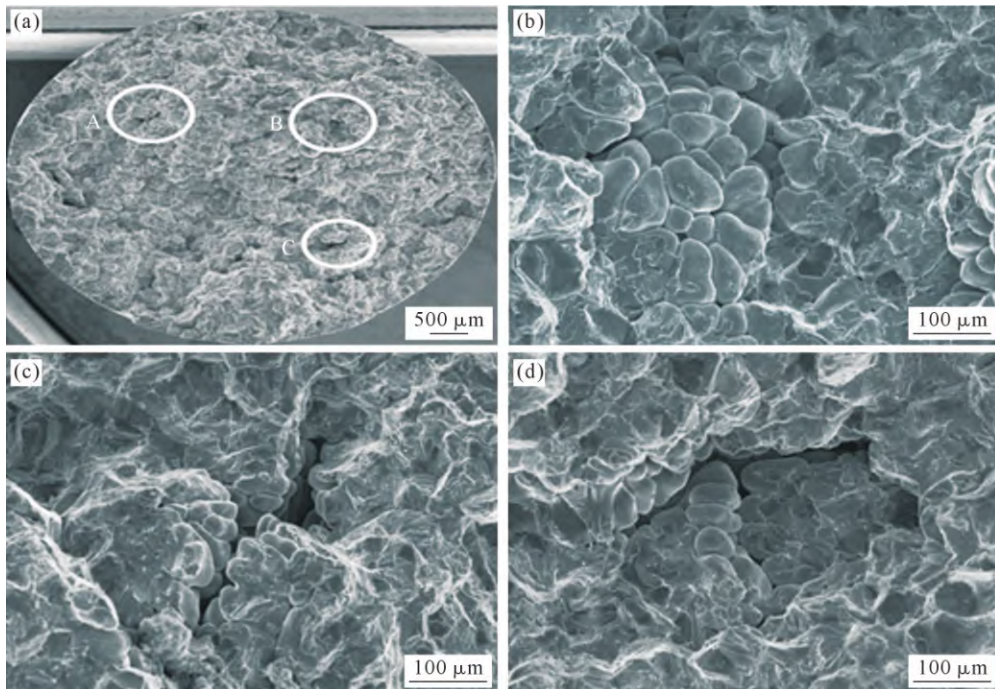


图 14 铸态 1.0Mg-1.0Si 合金室温拉伸试样断口形貌:(a) 整体形貌;(b) A 区域放大图;(c) B 区域放大图;(d) C 区域放大图
Fig.14 Fracture morphology of the room-temperature tensile samples of the as-cast 1.0Mg-1.0Si alloy: (a) overall morphology; (b) enlarged view of area A in (a); (c) enlarged view of area B in (a); (d) enlarged view of area C in (a)

直,断口由许多小平面组成,这些小平面高低错落,不同高度的小平面以台阶相连,由此表明两种不同 Mg/Si 质量比合金按断裂方式应当为脆性断裂。此外还可知,1.5Mg-1.1Si 合金组成断口的小平面高度整体上由一侧沿直线向对侧逐渐降低;而 1.0Mg-1.0Si 合金组成断口的小平面高度整体上表现为边缘高、中心低。因此,可以认为 1.5Mg-1.1Si 合金断裂方向是由一侧沿直线向对侧断裂,而 1.0Mg-1.0Si 合金断裂方向是由中心向边缘断裂。两种试样在断裂中形成的解理面台阶均汇合形成了河流状纹路,且河流状纹路方向指示了裂纹扩展路径。因此,两种不同 Mg/Si 质量比合金按断裂机理应当属于解理断裂。

通过图 13b~d 可知,1.5Mg-1.1Si 合金 A 区域的断口相貌中可见清晰的粒子,而 B、C 区域的断口相貌呈现冰糖状。其原因可能是 1.5Mg-1.1Si 合金在 A 区域存在缺陷;而在 B、C 区域,合金组织紧密、晶粒细小。

由图 14b~d 可知,1.0Mg-1.0Si 合金 A、B、C 区域的断口相貌中均可见清晰的粒子。与 A 区域相比,B、C 区域中清晰粒子的尺寸更小、数量更多。其原因可能是 1.0Mg-1.0Si 合金在 A、B、C 区域的组织不够紧密、晶粒尺寸较大。由对比图 13b~d 与图 14b~d 可知,两种不同 Mg/Si 质量比合金室温拉伸试样断口中均含有一定数量的空穴。1.5Mg-1.1Si 合金中只有少量空穴中可以看到清晰的粒子,而 1.0Mg-1.0Si 合金中大多数空穴均可以看到清晰的粒子。结合腐蚀

金相组织分析及晶粒尺寸测量结果可知,1.5Mg-1.1Si 合金中只有少量空穴中可以看到清晰粒子的原因是 1.5Mg-1.1Si 合金的组织更加紧密。同时,结合两种不同成分 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的 EDS 结果,本文认为 1.5Mg-1.1Si 合金断口形貌空穴中清晰可见的球状粒子为 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 相,而 1.0Mg-1.0Si 合金断口形貌空穴中清晰可见的球状粒子为游离 Si 相。理由是:当 1.5Mg-1.1Si 合金中的 Mg_2Si 相呈粗大块状时会成为应力集中源,受力时易在粒子与基体界面产生微裂纹,断口出现解理面或沿相界面分离的特征;当 1.0Mg-1.0Si 合金中的 Si 相呈粗大针状时会割裂基体,受力时 Si 相易断裂或与基体剥离,形成解理台阶、河流花样或脆性沿晶断裂特征,断口平整、发亮,合金呈典型脆性断裂。

4 结论

(1) 随 Mg 含量、Mg/Si 质量比的增大,铸态 1.5Mg-1.1Si 合金显微组织相比铸态 1.0Mg-1.0Si 合金得到显著细化。铸态 1.5Mg-1.1Si 合金的平均晶粒尺寸为 $81.10\ \mu\text{m}$,比铸态 1.0Mg-1.0Si 合金的平均晶粒尺寸减小了 18.5%。

(2) 铸态 1.5Mg-1.1Si 合金最大抗拉强度达 177 MPa,相比铸态 1.0Mg-1.0Si 合金平均提高了 12.5%;铸态 1.5Mg-1.1Si 合金最大布氏硬度达 70.4 HBW,相比铸态 1.0Mg-1.0Si 合金平均提高了 2.5%。整体上铸态 1.5Mg-1.1Si 合金的力学性能得到一定程度的提高。

(3)模拟计算所得规律表明,在相同冷却速度下,铸态 1.5Mg-1.1Si 合金的力学性能优于铸态 1.0Mg-1.0Si 合金,特别是冷却速度为 100 °C/s 时,铸态 1.5Mg-1.1Si 合金的抗拉强度达到了 286.67 MPa,优于铸态 1.0Mg-1.0Si 合金的 273.62 MPa。模拟计算结果与实验结果得到了相互印证,显微组织结果及力学测试结果证明该计算可以指导新型 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金的设计。

参考文献:

- [1] 徐振,徐泽,王洪斌,曲九灏,李帅,杨东亚. 6000 系铝合金微合金化研究进展[J]. 辽宁科技大学学报, 2020, 43(5): 327-331.
XU Z, XU Z, WANG H B, QU J H, LI S, YANG D Y. Research progress on microalloying of 6000 series aluminum alloys [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2020, 43(5): 327-331.
- [2] 张福豹,许晓静,罗勇,宋涛,张允康,张振强. 6xxx 系铝合金微合金化的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 384-388.
ZHANG F B, XU X J, LUO Y, SONG T, ZHANG Y K, ZHANG Z Q. Research progress of microalloyed 6xxx series aluminum alloys[J]. Materials Reports, 2012, 26(S1): 384-388.
- [3] 张宏辉,李旭,项胜前,周春荣,蔡月华. 6xxx 系变形铝合金的合金化原理和生产应用[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(3): 12-17.
ZHANG H H, LI X, XIANG S Q, ZHOU C R, CAI Y H. Alloying principle and its application in production of 6xxx series wrought aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012, 40(3): 12-17.
- [4] 张建新,高爱华,曹新鑫. 提高 Al-Mg-Si 系合金强度的途径分析[J]. 铸造技术, 2006, 27(4): 367-369.
ZHANG J X, GAO A H, CAO X X. Analysis of approaches to improve strength of Al-Mg-Si aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2006, 27(4): 367-369.
- [5] 张建新,邵水军,高爱华. Mg/Si 质量比对 Al-Mg-Si 系合金组织性能的影响[J]. 轻金属, 2012(9): 56-59.
ZHANG J X, SHAO S J, GAO A H. Effect of Mg/Si mass ratio on microstructure and properties of Al-Mg-Si aluminum alloy [J]. Light Metals, 2012(9): 56-59.
- [6] 孙亮,刘兆伟,张宇,杨丽,李延军,王洪卓,贾永强. Mg 和 Si 质量比对 6 系铝合金性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(2): 35-40.
SUN L, LIU Z W, ZHANG Y, YANG L, LI Y J, WANG H Z, JIA Y Q. Effect of mass ratio of Mg to Si on the properties of 6 series aluminum alloys[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2020, 41(2): 35-40.
- [7] DONG Q P, WANG R Z, WANG J H, NAGAUMI H. Influence of Mg/Si ratio on the mechanical strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys [J]. Materials Today Communications, 2025, 42: 111439.
- [8] YAN X J, SUI Y D, ZHOU H, SUN W W, JIANG Y H, WANG Q D. Influence of the Mg content on the microstructure and mechanical properties of Al-xMg-2.0Si-0.6Mn alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 3880-3891.
- [9] 刘云鹤,刘桐宇,宋来,孔占琦,任玉艳,李英民,高岩. 基于 JmatPro 对 Al-Mg-Si-Cu-La 合金析出相及性能的研究[J]. 铸造, 2023, 72(7): 838-845.
LIU Y H, LIU T Y, SONG L, KONG Z Q, REN Y Y, LI Y M, GAO Y. Study on the precipitates and properties of Al-Mg-Si-Cu-La alloy based on JmatPro[J]. Foundry, 2023, 72(7): 838-845.
- [10] DONG Q P, ZHANG Y, WANG J H, HUANG L J, NAGAUMI H. Enhanced strength-conductivity trade-off in Al-Mg-Si alloys with optimized Mg/Si ratio[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 970: 172682.
- [11] ZANG R J, DING L P, EHLERS F J H, JIA Z L, XU S Q, LI Y J, CAO L F. The influence of Cu content and Mg/Si ratio on the strength and formability in Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. Materials Characterization, 2023, 205: 113355.
- [12] LIU X, ZHANG S Y, LIU Z T, WANG H Y. Effect of Mg/Si ratio on synergistic improvement of formability and yield strength in Al-Mg-Si-Zn alloys [J]. Materials Characterization, 2024, 214: 114095.
- [13] LI Z G, ZHANG Z J, ZHOU G W, ZHAO P Z, JIA Z H, POOLE W J. The effect of Mg and Si content on the microstructure, texture and bendability of Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 814: 141199.
- [14] MOCHUGOVSKIY A G, CHUKWUMA E U, TABACHKOVA N Y, MIKHAYLOVSKAYA A V. The chemical composition influence on the microstructure and superplasticity of the Al-Mg-Si-Zr-Sc-based alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 928: 148063.
- [15] XU X X, YANG Z, YE Y L, WANG G X, HE X L. Effects of various Mg/Si ratios on microstructure and performance property of Al-Mg-Si alloy cables[J]. Materials Characterization, 2016, 119: 114-119.
- [16] GONG W Y, LI R X, XIE M J, WU Y, ZHANG J S. Precipitation behaviors of multi-scale precipitation strengthened Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys controlled by Mg content[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 651-668.
- [17] ZHU L, GUO M X, ZHANG J S. Effect of silicon content on nucleation and growth of multiscale precipitates in Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys for different aging paths[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 841: 143016.
- [18] MA L H, TANG J G, TU W B, LIU W H, LI F Q, ZHU H, ZHAN X, ZHANG Y, TAO H J. Impact of Sn addition and Mg:Si ratio on the natural aging and subsequent artificial aging characteristics of Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 3382-3393.
- [19] SHISHIDO H, ARUGA Y, MURATA Y, MARIOARA C D, ENGLER O. Evaluation of precipitates and clusters during artificial aging of two model Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratios[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 927: 166978.
- [20] LIU Z T, WANG C, LUO Q, YOU J, ZHOU X L, XU J, MO Y T, SONG W J, ZHA M, WANG H Y. Effects of Mg contents on the microstructure evolution and Fe-bearing phase selection of Al-Mg-Si-Fe alloys under sub-rapid solidification[J]. Materialia, 2020, 13: 100850.
- [21] TAO G H, LIU C H, CHEN J H, LAI Y X, MA P P, LIU L M. The

- influence of Mg/Si ratio on the negative natural aging effect in Al-Mg-Si-Cu alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 642: 241-248.
- [22] 黄显赞,黎龙全,廖斌,郑长鑫. 基于 Jmat-Pro 软件的铝合金成分及工艺设计[J]. 装备制造技术,2023(12): 218-221.
- [23] 赵明铭,郭二军,冯义成,付金来,王丽萍,付原科. 基于 JMatPro 对 2324 铝合金析出相的热力学模拟计算[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021, 26(6): 112-117.
- ZHAO M M, GUO E J, FENG Y C, FU J L, WANG L P, FU Y K. Thermodynamic simulation of precipitation phase evolution in 2324 aluminum alloy by JMatPro[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(6): 112-117.
- [24] 樊振中,李世德,王佶,田艳中,罗婷瑞,胡惠翔,葛明,史华英. Mg, Si 质量比与热处理对压铸 Al-Mg-Si-Mn-Cu-Zr 合金组织性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2025, 45(4): 496-506.
- FAN Z Z, LI S D, WANG J, TIAN Y Z, LUO T R, HU H X, GE M, SHI H Y. Effects of Mg and Si mass ratio and heat treatment on microstructure and properties of Al-Mg-Si-Mn-Cu-Zr alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(4): 496-506.
- (责任编辑:杨浩雪)