

镁硅质量比对 Al-Mg-Si 合金组织、热学和力学性能的影响

樊博阳¹ 李元东^{1,2} 李 想¹ 李 夏³ 马 颖^{1,2}

(1.兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室;
2.兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室; 3.广东工业大学分析测试中心)

摘 要 以 Al-Mg-Si(6XXX)系合金为基础,通过改变 Mg、Si 质量比,采用金属型铸造研究不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 对合金的组织、热导率及力学性能的影响。结果表明,当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 小于 1.53 时,合金中的相组成主要为共晶 Si、 α -Al 和 β -Mg₂Si 相;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,合金中出现 θ -Al₂Cu 相,而共晶 Si 相消失;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大于 1.53 时,合金中出现新相 S-Al₂CuMg 相,而 θ 相逐渐减小最后消失;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,合金具有最佳的综合性能,其热导率为 175.5 W/(m·K),抗拉强度为 153 MPa,硬度(HV)为 109.14,伸长率为 6.54%。

关键词 Al-Mg-Si 合金; $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$; 金属型铸造; 热导率; 力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ Ratio on Microstructure, Thermal and Mechanical Properties of Al-Mg-Si Alloys

Fan Boyang¹, Li Yuandong^{1,2}, Li Xiang¹, Li Xia³, Ma Ying^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metal, Lanzhou University of Technology; 2.Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloy and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology; 3.Analysis and Testing Center, Guangdong University of Technology)

Abstract: On the basis of Al-Mg-Si (6XXX) system alloy, the effects of $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of the alloy were investigated by permanent mold casting. The results indicate that the primary phase is also changed with the change of $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$. When the $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ is less than 1.53, the phase composition in the alloy is mainly composed of eutectic Si, α -Al and β -Mg₂Si phase. When the $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ is equal to 1.53, the θ -Al₂Cu phase gradually appears in the alloy and the eutectic Si phase disappears. When the $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ is greater than 1.53, the new S-Al₂CuMg phase appears in the alloy, while the θ phase is gradually decreased and finally disappears. The thermal conductivity of the alloy is 175.5 W/(m·K), when the $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ is 1.53. In addition, the optimal tensile strength and hardness are 153 MPa and 109.14 HV and the elongation is 6.54%, respectively.

Key Words: Al-Mg-Si Alloy, $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ Ratio, Permanent Mold Casting, Thermal Conductivity, Mechanical Properties

随着 5G 时代的到来,通信系统及设备都趋向于小型化、轻量化、功率密度增加,同时,电子设备运算速度急剧提升,导致设备发热量剧增,对其散热要求越来越高,常规铝合金已不能满足要求^[1]。根据美国空军电子工业部门的统计,电子产品失效的原因中,约有 55% 是过热及与热相关的问题导致的^[2]。提高散热器散热性能最有效的方法是提高材料的导热性能,因而开发高导

热性能的材料来满足设备高散热的要求受到研究者重视^[3]。6XXX(Al-Mg-Si)系铝合金的主要合金元素有 Mg、Si、Cu^[4]。表 1 为典型变形铝合金的热导率。可以看到 6XXX 系铝合金普遍具有较高的导热能力,其中 6063 铝合金的应用最为广泛,其具有良好的热塑性、挤压性和导热性能,生产工艺成熟简单,可以一次挤压成断面结构复杂的型材,从而成为首选的散热材料^[5]。

收稿日期:2020-06-20;修改稿收到日期:2020-07-23
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2001800)
第一作者简介:樊博阳,男,1996 年出生,硕士研究生,兰州(730050),E-mail:1210368560@qq.com
通信作者:李元东,男,1971 年出生,教授,兰州(730050),E-mail:liy_d_lut@163.com
引用格式:樊博阳,李元东,李想,等. 镁硅质量比对 Al-Mg-Si 合金组织、热学和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):168-173.
FAN B Y, LI Y D, LI X, et al. Effects of $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio on microstructure, thermal and mechanical properties of Al-Mg-Si alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):168-173.

表 1 一些典型变形铝合金的热导率^[5]

Tab.1 Thermal conductivity of typical deformed aluminum alloys^[5]

合金牌号	主要元素	处理方式	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
3003	Al-Mn	H18	154
5005	Al-Mg	—	200
6061	Al-Mg-Si-Cu	T6	163
6063	Al-Mg-Si	T5	209
6101	Al-Mg-Si	T6	218
6201	Al-Mg-Si	T81	205
7075	Al-Zn-Mg-Cu	T6	130

6XXX 系合金中 Mg₂Si 相为主要强化相,其 Mg、Si 质量比为 1.73。合金中的 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大多小于 1.73^[6]。当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 比为 1.73 时,Si 在 Al 中的扩散速度远大于 Mg,大部分 Si 会在晶界处聚集产生偏析,只有部分的 Si 与 Mg 结合生成 Mg₂Si 相。当合金中 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 略小于 1.73 时,合金中 Mg、Si 能最大程度形成 Mg₂Si,且少量的过剩 Si 会提升合金的流动性,提高合金的充型能力。因此,在实际生产中,合金中的 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 略小于 1.73。本课题通过改变 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 来调整 Al-Mg-Si 合金的相组成和数量,研究其对合金的组织、热导率及力学性能的影响,为扩大 Al-Mg-Si 合金在导热领域的应用提供参考。

1 试验方法与过程

1.1 试验材料

试验原材料为纯铝、纯镁、Al-20Si、Al-50Cu 中间合金。制备的 Al-Mg-Si 合金成分见表 2。

表 2 金属型铸造 Al-Mg-Si 合金的化学成分及 Mg、Si 质量比
Tab.2 Chemical composition of Al-Mg-Si alloys prepared by permanent mold casting and $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio

编号	$w_B/\%$				$w(\text{Mg})/w(\text{Si})$
	Mg	Si	Cu	Al	
1	0.6	0.65	0.25	余量	0.92
2	0.8	0.65	0.25	余量	1.23
3	1.0	0.65	0.25	余量	1.53
4	1.12	0.65	0.25	余量	1.73
5	1.2	0.65	0.25	余量	1.84
6	1.4	0.65	0.25	余量	2.15

1.2 合金熔炼

熔炼时,首先将纯铝放入石墨坩埚在电阻炉(SR-JX-4-12)中熔炼,当铝液温度达到 730℃时,加入 Al-20Si 中间合金,熔化后再加入 Al-50Cu 中间合金,熔化完全后静置 15 min。最后加入纯 Mg,熔化完全后,把合金熔体降温到 720℃,用熔体质量分数 1.5%的 C₂Cl₆ 进行精炼,调整温度至 700℃,加入熔体质量分数 0.03%的 Al-5Ti-1B 细化剂,保温 10 min。然后将合金液浇注到预热至 250℃的金属型(内径为 $\phi 18$ mm,高为 150 mm)中。

1.3 组织与性能检测

利用 Axio Scope A1 型金相显微镜(OM)对合金晶粒尺寸、分布进行分析;采用 QUANTA FEG-450 型热场发射扫描电镜(SEM)对合金元素分布及第二相成分、形态进行研究;使用 D/max-2400 型 X 射线衍射仪(2θ 为 20°~90°)对合金中的相进行分析;利用 DSC200F3 测试仪和 TA DXF-200 型界面材料热阻及热传导系数测量仪分别对合金的比热容及热扩散系数进行测定;采用 WDW-100D 型电子万能材料试验机(拉伸试样尺寸见图 1)对合金的抗拉强度和伸长率测定;使用 W1102D37 型显微硬度计对合金的硬度进行测定。

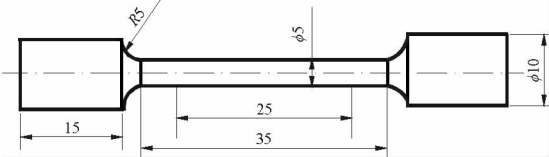


图 1 拉伸试样
Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 对 Al-Mg-Si 合金组织的影响

不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下 Al-Mg-Si 合金的微观组织见图 2。可以看出,随着 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 的增大,合金中的晶粒逐渐均匀,晶粒由树枝晶逐渐向等轴晶发生转变;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,合金内的等轴晶数量最多,且成分偏析最少。由于 Mg 的原子序数为 12,Si 的原子序数为 14,过剩的 Si 会使得合金的晶格发生严重畸变,Mg 含量的增加使得其与过剩的 Si 形成 Mg₂Si,减少了 Si 在合金中的固溶,减少了成分偏析和晶格畸变;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大于 1.53 时,等轴晶又逐渐减少,树枝晶逐渐增多。随着 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 进一步增加,合金中的 Mg 过剩,会导致合金的流动应力增大,并使得基体中出现成分过冷,增加了基体内微观组织的不稳定性且成分偏析更加严重^[7]。

利用 J-Mat Pro 软件对合金中相含量进行计算(25℃),结果见表 3。推测当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 小于 1.53 时,合金中的 Si 主要以共晶 Si 的形式存在,另有少量 Si 与溶质元素 Mg 形成 β 相,绝大多数的 Mg、Cu 溶进 α -Al 中,部分合金元素以 W 相形式存在;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 等于 1.53 时,合金中出现 θ 相,而共晶 Si 相消失;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大于 1.73 时,合金中的 W 相消失;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.84 时,合金中出现 S 相并逐渐增多;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 2.15 时,合金中 θ 相消失。

图 3 是 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 0.92、1.53 和 2.15 时合金 XRD 分析结果。可以看出, $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 0.92 时,其相组成主要为 α -Al 相、 β 相和共晶 Si 相,未发现 θ 相

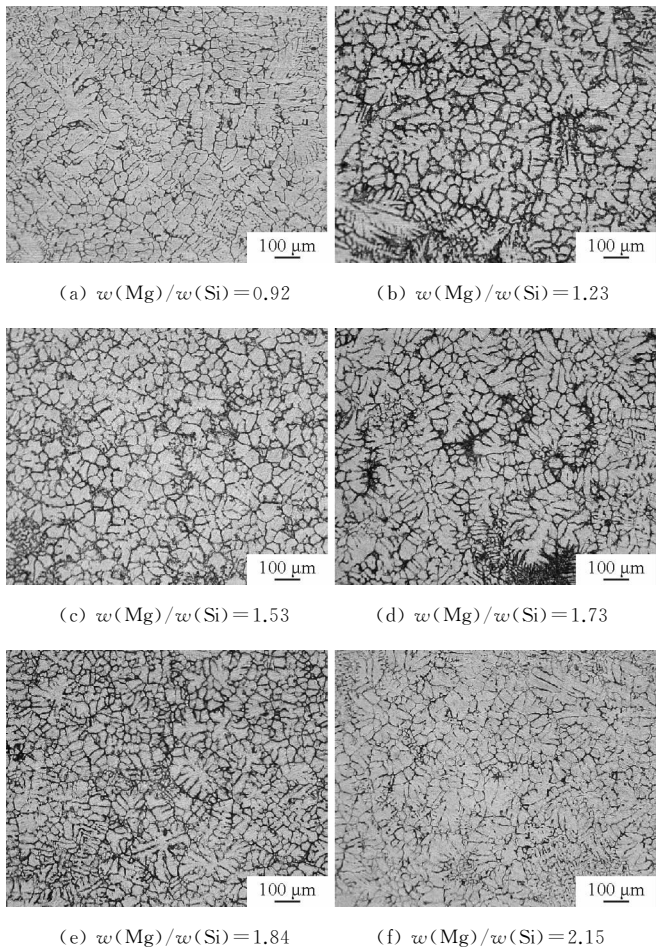


图 2 不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下铸造 Al-Mg-Si 合金的微观组织
Fig.2 Microstructure of casting alloy under different $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio

表 3 J-Mat Pro 计算所得合金中相含量

$w(\text{Mg})/w(\text{Si})$	$w_B/\%$					
	$\alpha\text{-Al}$	共晶 Si	$\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$	$\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$	S- $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$	W- $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$
0.92	98.23	0.19	0.34	—	—	1.23
1.23	98.03	0.08	0.66	—	—	1.23
1.53	97.85	—	1.18	0.16	—	0.80
1.73	97.77	—	1.75	0.45	—	0.03
1.84	97.69	—	1.78	0.10	0.43	—
2.15	97.67	—	1.78	—	0.56	—

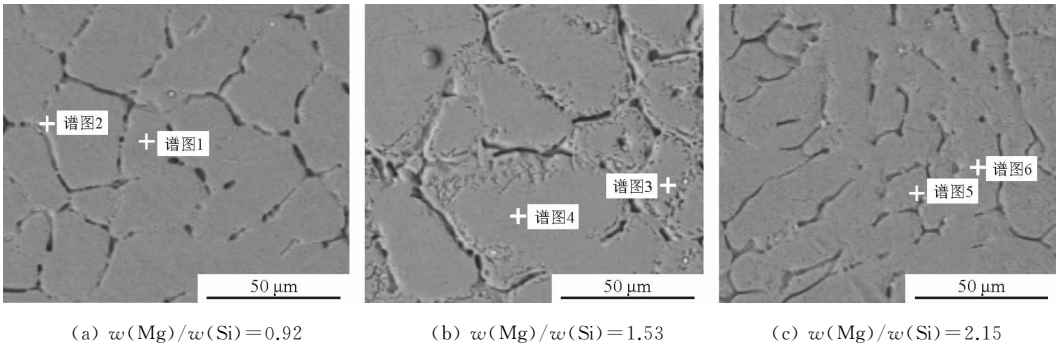


图 4 不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下铸造 Al-Mg-Si 合金 SEM 图像
Fig.4 SEM images of permanent mold casting Al-Mg-Si alloy under different $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio

和 S 相。 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,其相组成是 $\alpha\text{-Al}$ 相、 β 相和 θ 相,共晶 Si 相消失。 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 2.15 时,其相组成是 $\alpha\text{-Al}$ 相、 β 相和 S 相,而 θ 相消失,与计算结果基本符合。

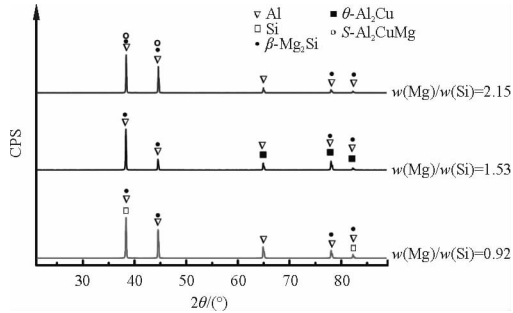


图 3 不同 Mg、Si 比下合金的 XRD 分析
Fig.3 XRD patterns of permanent mold casting alloy with different $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio

不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下 Al-Mg-Si 合金的 SEM 点扫描分析结果见图 4 及表 4。可以看出,当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 小于 1.53 时,图 4a 中点 1 处 Mg、Si 摩尔比为 5 : 3,由此可以认为合金内有第二相 β 相析出。合金中第二相的析出只与该位置是否获得溶制和空位的饱和度有关,且铸造本身就会存在成分偏析,由此该点的 Mg、Si 达到饱和状态,使得第二相 β 相析出;图 4a 中点 2 处 Al、Mg、Si、Cu 的摩尔比为 63.1 : 3.2 : 31.7 : 2.0,根据文献[8],Al-Mg-Si 合金的晶界组成相是 $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$ 及 $\text{Al-Mg}_2\text{Si-Si}$,因此该点的相组成为 $\alpha\text{-Al}$ 、 β 相和共晶 Si。

当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,图 4b 中 3 点,其 Al、Mg、Si、Cu 摩尔比为 79.9 : 0.7 : 10.7 : 8.7,由于该点位于基体内,可推断其相组成为 $\alpha\text{-Al}$ 和 θ 相。4 点 Mg、Si 摩尔比为 0.6 : 0.8,其值 0.75 与 1.73(β 相标准摩尔比)相比较小,其组成为共晶 Si 与 β 相,当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大于 1.53 时,图 4c 中 5 点,其 Al、Cu、Mg 摩尔比为 86.5 : 1.0 : 1.4,由此推测该点相为 S 相。对 6 号点进行分析,其 Mg、Si 摩尔比为 1.3 : 0.8,其值 1.625 与 1.73 接近,因此为 β 相。点扫描结果与 J-Mat Pro 计算结果和 XRD 测试结果基本一致,只有少量亚稳相存在差异,可能是因其存在方式以及位置难以判

表 4 不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下合金的 EDS 分析
Tab.4 EDS analysis results under different $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio %

$w(\text{Mg})/w(\text{Si})$	位置	x_B			
		Si	Mg	Cu	Al
0.92	1	0.3	0.5	0	99.2
	2	31.7	3.2	2.0	63.1
1.53	3	10.7	0.7	8.7	79.9
	4	0.8	0.6	0.2	98.5
2.15	5	1.7	1.4	1.0	96.0
	6	0.8	1.3	0.1	97.8

断,而点扫描区域很小,只能表征微观区域相组成。

2.2 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 对 Al-Mg-Si 合金热导率的影响

图 5 为不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下 Al-Mg-Si 合金的热导率测试结果。随着 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 的增大,合金的热导率呈现出先增大后减小的趋势,并且在 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时达到最大值,为 $175.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 0.92 和 2.15 时,测得热导率分别为 171.2 、 $149.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

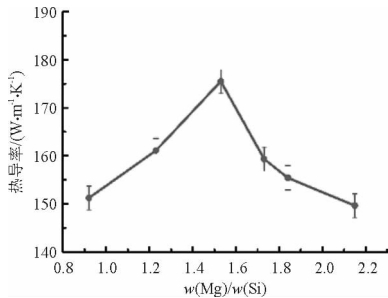


图 5 不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下 Al-Mg-Si 合金的热导率
Fig.5 Thermal conductivity of the alloy under different $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio

当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 小于 1.53 时,Al-Mg-Si 合金中 Si 过剩,由于 Si 溶入 Al 基体之中引起的晶格畸变大于 Mg,所以随着 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 的增大,合金中的 Si 会与 Mg 形成 Mg_2Si , Mg_2Si 沉淀相对合金中电子散射的影响远小于合金元素固溶在基体中引起晶格畸变对电子散射的影响,所以合金的热导率先呈上升趋势。当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 过小(<1.53)时,合金中存在大量的过剩 Si,过剩的 Si 一方面会固溶于铝基体中,另一方面极易与合金中的杂质 Fe 形成粗大 $\text{Al}_9\text{Mg}_2\text{Si}_2$ 相,使得合金的导热性能下降。

当 Al-Mg-Si 合金中 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,Si 与 Mg 能最大程度地形成 Mg_2Si 沉淀强化相,同时过剩的微量 Si 会与杂质 Fe 弥散分布在基体中,从而减小了 Si 和 Fe 在 Al 中的固溶度,并且在熔体结晶过程中很难形成粗大的 $\text{Al}_9\text{Mg}_2\text{Si}_2$ 相,所以合金的导热性能良好^[2]。Si 作用的区分主要是 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 的大小,当略小于 1.73 时,合金中只有微量 Si 过剩,与 Fe 结合并弥散分布在基体中;当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 远小于 1.73 时,合金中 Si 大量过剩,Si 与 Fe 形成粗大相。

当 Al-Mg-Si 合金中 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大于 1.53 时,其热导率出现下降趋势,这是因为 Mg 过剩增加了自身在铝基体中的固溶,过剩的 Mg 会阻碍 Mg_2Si 相的析出,进一步增大晶格畸变,增大了其对电子的散射,减少电子的平均自由程,使得合金的热导率下降^[6]。

2.3 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 对 Al-Mg-Si 合金力学性能的影响

不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 下 Al-Mg-Si 合金的力学性能见图 6。随着 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 的增大,其抗拉强度、伸长率和硬度均先上升后下降,一方面,由于随着 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 增大,基体中的合金元素增加,在基体中形成了晶格畸变,阻碍了位错运动,使得合金的抗拉强度上升;另一方面,当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 过高时,合金中的 Mg 过多会使得浇注时熔体的流动性变差,导致合金的抗拉强度又下降。当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,抗拉强度最大,为 153 MPa,与文献[2]中相比提升了 23.3%。由于 Si 原子与 Mg 原子相比扩散速度快,因此在 Al-Mg-Si 合金中,预计会有更多的 Si 在晶界处分离,导致 Si 耗尽速度超过 Mg 的,所以晶粒内部添加的 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 将小于 1.73 速度,这意味着合金中添加 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,其中有少量的 Si 过剩形成脆性相(共晶 Si),所以 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,会产生更多的 Mg_2Si 相^[9],使得合金的强度最高,而 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 超过 1.53 时,晶粒内部过量的 Mg 会限制 Mg_2Si 相的析出,并导致合金熔体的流动应力增大,使得合金的成形性变差,合金内部会出现更多的缩孔、缩松,导致合金晶粒分布不连续,因此合金的抗拉强度下降。

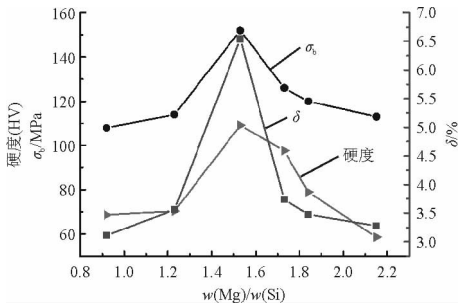


图 6 不同 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 时 Al-Mg-Si 合金的力学性能
Fig.6 Mechanical properties of the alloy under different $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ ratio

从图 6 看出,当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 为 1.53 时,Al-Mg-Si 合金的伸长率最大,这是由于少量过剩的 Si 有利于合金的成形,并且能最大程度的与 Mg 形成 Mg_2Si ,其伸长率最佳。为 6.54%。 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 小于 1.53 时,Mg 含量的增加会使过剩的 Si 含量逐渐降低,导致存在的脆性相(共晶 Si)逐渐减少,其伸长率呈增加趋势。当 $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$ 大于 1.53 时,合金的伸长率下降,尽管 Mg_2Si 在铝基体中极限固溶度达 1.84%^[10],但是 Mg_2Si 在熔铸过程中并非全部固溶在铝基体中并产生

固溶强化作用,会有少部分以结晶相 Mg_2Si 的形式析出,其与基体结合力弱,对基体强化作用有限,因此合金的伸长率下降。

当 Al-Mg-Si 中 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.53 时,其硬度 (HV) 为 109.14,与文献[11]相比提升了 12.7%。合金中的 Si 与 Mg 最大程度形成 Mg_2Si ,从晶粒形貌观察其晶粒最为均匀、细小,所以此时合金的硬度最大。当 $w(Mg)/w(Si)$ 小于 1.53 时,过剩的 Si 会以固溶的形式存在于基体之中,合金基体发生晶格畸变,阻碍了位错的移动,同时含有少量的 Mg_2Si 形成第二相强化,使得合金的硬度增加。当 $w(Mg)/w(Si)$ 大于 1.53 时,合金的硬度下降,因为过剩的 Mg 会产生局部的成分过冷,使得合金产生元素偏析,合金晶粒尺寸不均匀且以树枝晶居多,同时过剩的 Mg 会使得合金中的缩松、缩孔增多,合金的致密度下降,导致合金的硬度下降。

图 7 为不同 $w(Mg)/w(Si)$ 时 Al-Mg-Si 合金的断口形貌。可以看到, $w(Mg)/w(Si)$ 为 0.92 时,合金中有大量的解理台阶和解理面存在,还有少量纤维状结构存在,几乎没有韧窝存在,含有大量穿晶断裂,因此断裂

方式为脆性断裂(见图 7a);当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.23 时,合金断口出现了少量韧窝,同时也有大量的撕裂棱存在,符合准解理断裂特征(见图 7b); $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.53 时,可以明显看到合金中有少量大韧窝,以及大量的小韧窝存在,符合韧性断裂的特征(见图 7c);当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.73 时,断口呈“人字形”,为沿晶断裂,同时有部分小型韧窝存在,且断口表面比较粗糙不平,无结晶颗粒,认为其为韧性断裂(见图 7d);当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.84 时,合金中的韧窝进一步减少,断口表面呈纤维状,且粗糙不平,属于韧性断裂(见图 7e);当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 2.15 时,合金中的韧窝几乎消失,断口呈纤维状,还有少量解理台阶存在,符合混合型断裂方式(见图 7f)。合金的塑性先增大后减小,当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.53 时,合金塑性达到最大。 $w(Mg)/w(Si)$ 小于 1.53 时合金中的 Si 过剩,会细化 Mg_2Si 的质点,同时 Si 沉淀后有强化作用,但 Si 易在晶界处产生偏析,将引起合金脆化,降低其塑性^[7],所以随着 Mg 含量增加,合金中的脆性相逐渐减少,因此合金的断裂方式从脆性断裂逐渐向韧性断裂转变。 $w(Mg)/w(Si)$ 大于 1.53 时,随着过剩 Mg 含量增加,合金中的脆性相虽然减少,且不同程度有纤维状断口存在,但是合金中出现了缩松、缩孔,最终使得其塑性下降。

3 结 论

(1)随着 $w(Mg)/w(Si)$ 比的增大,Al-Mg-Si 合金中的晶粒逐渐均匀,晶粒形貌由树枝晶逐渐向等轴晶发生转变;当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.53 时,合金内的等轴晶数量最多,且成分偏析最少;当 $w(Mg)/w(Si)$ 大于 1.53 时,等轴晶又逐渐减少,而树枝晶逐渐增多。

(2)随着 $w(Mg)/w(Si)$ 的变化,Al-Mg-Si 合金中初生相也会发生变化。当 $w(Mg)/w(Si)$ 小于 1.53 时,合金中的相组成主要为共晶 Si、 $\alpha-Al$ 和 β 相;当 $w(Mg)/w(Si)$ 等于 1.53 时,合金中逐渐出现 θ 相,而共晶 Si 相消失。当 $w(Mg)/w(Si)$ 大于 1.53 时,合金中出现 S 相,而 θ 相含量逐渐降低直至消失。

(3)随着 $w(Mg)/w(Si)$ 的增加,Al-Mg-Si 合金的热导率逐渐增加;当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.53 时,合金的热导率增加为 $175.5 W/(m \cdot K)$;随着 $w(Mg)/w(Si)$ 进一步增大,合金的热导率又逐渐下降。

(4)随着 $w(Mg)/w(Si)$ 的增加,Al-Mg-Si 合金的抗拉强度、硬度以及伸长率均先增加后降低;当 $w(Mg)/w(Si)$ 为 1.53 时,合金的抗拉强度为 153 MPa,硬度 (HV) 也达到 109.14,其伸长率为 6.54%。

参 考 文 献

[1] 王慧,李元东,罗晓梅,等. 高导热铝合金的开发与研究进展[J]. 铸造, 2019, 68(10): 1 104-1 110.

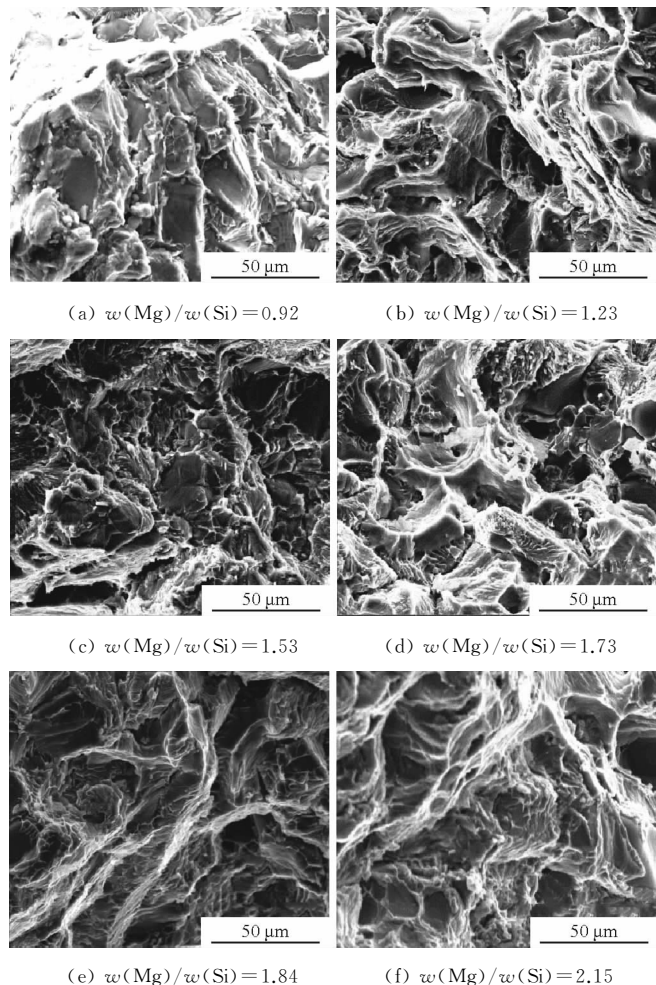


图 7 不同 $w(Mg)/w(Si)$ 下合金的断口形貌

Fig.7 Fracture morphology of the alloy under different $w(Mg)/w(Si)$ ratio

Cu 熔体中氧化夹杂在超重力场下的运动规律

宋高阳¹ 董立花² 王 哲³ 孙晓琳¹ 赵 烁¹
(1.河北工程大学材料科学与工程学院; 2.河北工程大学管理工程与商学院;
3.北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室)

摘 要 对超重力场条件下 Cu 熔体中的氧化夹杂进行受力分析,建立夹杂颗粒沿超重力方向上的运动速度与运动距离方程,并通过理论计算分析重力系数、夹杂物特性(尺寸、种类、含量)以及熔体温度对夹杂物在超重力场中运动行为的影响。计算结果表明,超重力场能强化 Cu 熔体中氧化夹杂的定向分离过程,其中重力系数、夹杂物尺寸、夹杂与熔体之间密度差(固液密度差)对夹杂颗粒运动行为影响较大。较大的重力系数、夹杂物尺寸以及固液密度差均有利于夹杂物的上浮去除。

关键词 超重力场;Cu 熔体;氧化夹杂;分离行为;理论分析

中图分类号 TF19;TG146.1⁺4 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Theoretical Analysis of Movement Rule of Oxide Inclusion in Copper Melt under Super-gravity Field

Song Gaoyang¹, Dong Lihua², Wang Zhe³, Sun Xiaolin¹, Zhao Shuo¹
(1.College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering;
2.College of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering;
3.State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: The force analysis on oxide inclusion in copper melt under super-gravity field was performed, and the equations of moving velocity and distance of inclusion particle along the direction of super gravity were established. The effects of gravity coefficient, inclusion features (size, type, content) and melt temperature on movement behavior of inclusion were also investigated by theoretical calculation under super-gravity field. The theoretical results indicate that directional separation process of oxide inclusion in the melt can be intensified effectively by super-gravity field, where the gravity coefficient, inclusion size and the density difference between inclusion and melt (solid-liquid density difference) have an obvious effect on moving behavior of inclusion particle. Besides, the larger gravity coefficient, particle size and solid-liquid density difference are beneficial to accelerating the floating and removal of inclusion.

Key Words: Super Gravity, Copper Melt, Oxide Inclusion, Separating Behavior, Theoretical Analysis

收稿日期:2020-08-12;**修改稿收到日期:**2020-09-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904086);河北省自然科学基金资助项目(E2018402098,E2020402067)
第一作者简介:宋高阳,男,1987 年出生,讲师,河北邯郸(056038),E-mail: gysong@hebeu.edu.cn
引用格式:宋高阳,董立花,王哲,等. Cu 熔体中氧化夹杂在超重力场下的运动规律[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):173-176.
SONG G Y, DONG L H, WANG Z, et al. Theoretical analysis of movement rule of oxide inclusion in copper melt under super-gravity field [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):173-176.

[2] JANICKI M, NAPIERALSKI A. Modelling electronic circuit radiation cooling using analytical thermal model[J]. Microelectronics Journal, 2000, 31(9-10): 781-785.

[3] 王慧,罗晓梅,李元东,等.固溶温度对铸造 Al-Si 合金热导率及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2019,39(9):1 016-1 020.

[4] 李念奎,凌泉,聂波,等. 铝合金材料及其热处理技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.

[5] 张胜华,章冰,肖荫果. 时效制度对 6063 合金导热性能和硬度的影响[J]. 铝加工,2003,26(3): 13-15,18.

[6] 高爱华,王福荣. 镁硅质量比对 6063 铝合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(16): 23-25,28.

[7] 章冰. 散热用 Al-Mg-Si 系铝合金组织与性能的研究[D]. 长沙:中南大学,2003.

[8] ZENG F L, WEI Z L, LI J F, et al. Mechanism of Mg₂Si and Si particles in Al-Mg-Si alloys during intergranular corrosion [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (12): 2 559-2 567.

[9] 刘辉丽,丁幸宇,徐龙辉. Mg₂Si 含量对 6061 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 南方金属,2019(4): 1-4.

[10] 柯彬. Mn 对 6061 铝合金组织与力学性能的影响[D]. 长沙:中南大学,2013.

[11] PITCHAYYAPILLAI G, SEENIKANNAN P, BALASUNDAR P, et al. Effect of nano-silver on microstructure, mechanical and tribological properties of cast 6061 aluminum alloy[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2017,27(10):2 137-2 145.

(编辑:栗万仲)