

铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金综合性能调控研究现状

周鹏飞^{1,2} 王东涛^{1,2} 张 海^{1,2}

(1.苏州大学沙钢钢铁学院;2.苏州大学高性能金属结构材料研究院)

摘 要 综述了铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金组织演变及综合性能调控的最新研究进展。阐述了 Cu 含量对组织演变以及力学性能的影响;概括了铸造铝合金疲劳寿命和耐腐蚀性的影响因素及机制;Cu 含量对铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金综合性能影响的临界阈值仍未明晰,不同强化相之间的竞争机制有待分析,这对精准控制合金组织,提升合金综合性能具有积极意义。

关键词 铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金;组织演变;性能;临界阈值;机制

中图分类号 TG146.21;G353.11

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status of Comprehensive Performance Regulation for Cast Al-Si-Mg-Cu Alloy

Zhou Pengfei^{1,2}, Wang Dongtao^{1,2}, Zhang Hai^{1,2}

(1.School of Iron and Steel, Soochow University;

2.High Performance Metal Structure Materials Research Institute, Soochow University)

Abstract: The microstructure evolution and comprehensive performance regulation of cast Al-Si-Mg-Cu alloy were reviewed. Effects of Cu content on microstructure evolution and mechanical properties of the alloy were expounded. The influencing factors and mechanisms of the fatigue life and corrosion resistance of casting aluminum alloy were summarized, and the critical threshold of effect of Cu content on the comprehensive performance of casting Al-Si-Mg-Cu alloy was unclear. The competition mechanism between different precipitations needs to be analyzed, which is valuable for accurately controlling microstructure and improving the comprehensive performance of the alloy.

Key Words: Cast Al-Si-Mg-Cu Alloy, Microstructure Evolution, Performance, Critical Threshold, Mechanisms

铸造 Al-Si 合金具有密度小、耐腐蚀性好以及优异的铸造性能,被广泛应用于汽车零部件制造^[1-4]。通常在铸造 Al-Si 合金中加入 Mg、Cu 等元素来提高合金的强度,单独加入 Mg 并经过热处理可析出 β' -Mg₂Si 强化相,但并不是 Mg 含量越高,合金的力学性能越高^[2,5-8]。随着工业部件对性能要求的提高,在 Al-Si 合金中仅添加 Mg 所达到的强度已不能满足工业需求,因此在铸造 Al-Si-Mg 合金中引入 Cu,热处理后析出 Q' -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 和 θ' -Al₂Cu 等强化相来继续提升合金的力学性能,但由于 Cu 会加大凝固区间,易形成孔洞等缺陷^[6-11],同时 Cu 含量的增加对合金凝固析出过程以及时效析出演变的临界点尚不清楚,导致不同 Cu 含量析出的强化相种类、形貌、数密度均不同,最终强化效果也不同,因此,Cu 的强化机制及添加量仍需深入研究。研究者们通过改善铸造工艺、冷却速率和热处理工艺以及添加其他微量元素(Zn、Zr、Cr 等)来提高合金的综合

性能^[6-7,10-16]。本研究对 Al-Si-Mg-Cu 合金综合性能调控的研究现状进行综述,旨在为加深应用提供参考。

1 铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金凝固过程及组织演变

MONDOLFO L F^[1]研究了不同温度下铝合金析出相类型,见表 1。

表 1 铝合金中的吸热反应^[1]

Tab.1 Endothermic reaction in aluminium alloy^[1]

吸热峰	反应	温度/℃
A	共晶 Al ₂ Cu→液相	507
B	块状 Al ₂ Cu→液相	520
C	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ →液相	534
D	Mg ₂ Si→液相	554
E	共晶 Si→液相	569

ZHANG B R 等^[2]利用 DSC 技术分析 Al-9Si-0.6Mg-(0~3)Cu(质量分数,下同)合金随着 Cu 含量变化时凝固过程组织的演变,结果见图 1。可以看出,不

收稿日期:2023-01-30;修改稿收到日期:2023-02-27

第一作者简介:周鹏飞,男,1988 年出生,博士研究生,江苏苏州(215400),E-mail:zpfjsyc@126.com

引用格式:周鹏飞,王东涛,张海. 铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金综合性能调控研究现状[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 607-1 612.
ZHOU P F, WANG D T, ZHANG H. Research status of comprehensive performance regulation for cast Al-Si-Mg-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 607-1 612.

含 Cu 时,仅有 β -Mg₂Si 相和共晶 Si 的吸热峰;Cu 含量为 0.6%~1.2% 时, β -Mg₂Si 消失, Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆、 θ -Al₂Cu 析出;Cu 含量达到 1.8% 及以上仅有 θ -Al₂Cu 析出。即随着 Cu 含量的增加, β -Mg₂Si 含量逐步减少直至消失; Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 先增加后减少直至消失; θ -Al₂Cu 逐步增加,这与 DE MORI A 等^[6]、YAMAMOTO K 等^[7] 研究结果一致。

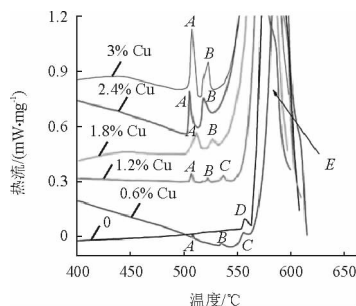
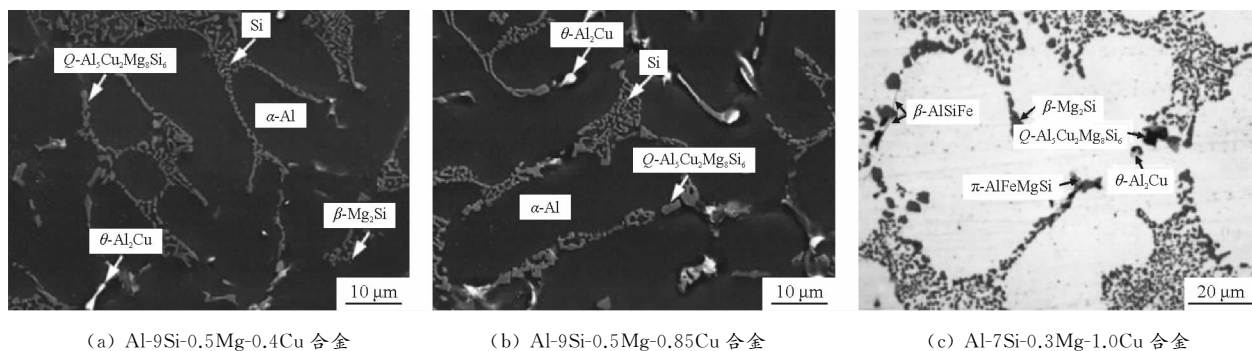


图 1 铸态 Al-9Si-0.5Mg-(0~3)Cu 合金 DSC 曲线(5 °C/min)^[2]
Fig.1 DSC curves of as-cast Al-9Si-0.5Mg-(0~3)Cu alloy^[2]

DONG X X 等^[3] 研究了 Al-9Si-0.5Mg- x Cu 合金铸态组织演变,发现 Cu 含量为 0.4% 时,组织中同时存在 β -Mg₂Si、 Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 和 θ -Al₂Cu 相;而 Cu 含量达 0.85% 及以上时,组织中仅有 Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 和 θ -Al₂Cu,见图 2a 和图 2b,并且随着 Cu 含量增加,铸态组织中 β -Mg₂Si 含量逐步下降直至消失; Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 含量先增加,达到平衡后保持不变; θ -Al₂Cu 含量逐步增加。相关研究^[5,8,10] 也有类似的结论。CERRI E^[4] 在 A356 合金中加入 1% 的 Cu,发现铸态组织中同时存在 β -Mg₂Si、 Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 和 θ -Al₂Cu,见图 2c,类似研究结果在文献[9]中也有相应报道。因此,在上述研究铸造工艺类似的情况下,Cu 含量对铸造 Al-Si-Mg 合金凝固组织转变的转折点仍不能定量给出。

Cu 含量对铸造 Al-Si-Mg 合金铸态组织的演变,主要是对可溶第二相(β -Mg₂Si、 Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 和 θ -Al₂Cu)演变的影响,但目前仍无明确结论。



(a) Al-9Si-0.5Mg-0.4Cu 合金 (b) Al-9Si-0.5Mg-0.85Cu 合金 (c) Al-7Si-0.3Mg-1.0Cu 合金

图 2 Al-9Si-0.5Mg-0.4Cu、Al-9Si-0.5Mg-0.85Cu 和 Al-7Si-0.3Mg-1.0Cu 合金铸态组织^[3-4]

Fig.2 SEM images of as-cast Al-9Si-0.5Mg-0.4Cu, Al-9Si-0.5Mg-0.85Cu and Al-7Si-0.3Mg-1.0Cu alloy^[3-4]

主要的不同点在于:① β -Mg₂Si 消失时的 Cu 含量临界值;②随着 Cu 含量增加, Q -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 相含量先增加,然后达到平衡值保持不变,还是减少直至消失。

确定 Cu 含量的临界值对精准控制合金组织,达到合金预期要求以及合理控制合金成分和成本具有重要意义。后续工作可先模拟分析 Cu 含量的临界值,然后通过小跨度控制 Cu 含量变化进行 XRD、DSC 以及 SEM-EDS 分析确定 Cu 含量对组织演变的精准阈值。

对于锻造 Al-Mg-Si 合金中时效析出相的演变已经有大量的研究,含 Cu 情况下析出序列^[15-18]:过饱和固溶体(SSSS)→原子团簇→G.P.区→ β'' , Q_{P1} , Q_{P2} , C → Q ,Si。Al-Mg-Si-Cu 合金峰值时效时,析出相见图 3^[19],Cu 含量为 0.5% 时,析出相仅有 β'' 相,见图 3a;当 Cu 含量达到 1% 时, Q' 相出现,且 β'' 相依然存在,见图 3b;Cu 含量增加至 2.5% 时, β'' 相消失, θ' 相析出,同时存在 Q' 相,见图 3c,相关结论与文献[15-16]类似。有研究指出^[3,6-7,9],铸造 Al-Si-Mg 合金中 Cu 含量达到

0.4% 时,组织中同时存在 β'' 、 Q' 和 θ' 相,直至 Cu 含量达到 0.85%,见图 3d 和图 3e;当 Cu 含量达 1.25% 时,仅 β'' 相消失,见图 3f。很多研究都分析了 Cu 含量的变化对峰值时效析出相析出种类、形貌的影响,但析出相转变时 Cu 含量的临界值仍不够精准。峰值时效析出相种类演变的临界 Cu 含量还不清楚。尽管时效析出组织的演变随着 Cu 含量以及热处理制度的不同,析出产物的种类不同^[15-18],但在工业应用中,一般使用峰值时效状态。因此需要深入研究峰值时效状态下析出相种类演变时临界 Cu 含量的精准范围。

综上所述,目前的研究都关注 Cu 含量变化对析出相种类的演变,但并未得出析出相演变时 Cu 的临界范围。但引入 Cu 后强度虽会提高,却使塑性降低,普遍认为 Cu 的增加使得缺陷增多,从而塑性下降^[8,17]。因此,Cu 含量对于合金综合性能的提升需要更加精确的研究,且随着 Cu 含量增加,不含 Cu 强化相和含 Cu 强化相之间的竞争机制,以及在特定 Cu 含量范围内强度

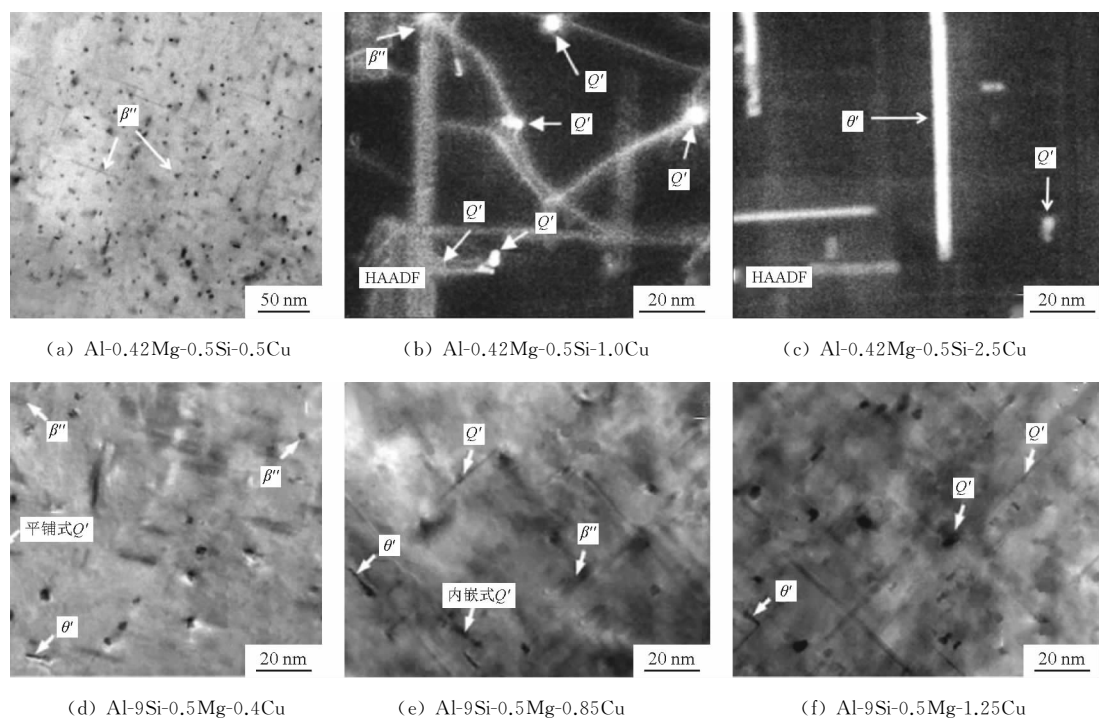


图 3 Al-0.42Mg-0.5Si- x Cu 合金和 Al-9Si-0.5Mg- x Cu 合金峰值时效析出相^[3,19]
Fig.3 Precipitation phases in Al-0.42Mg-0.5Si- x Cu and Al-9Si-0.5Mg- x Cu alloy after peak aging^[3,19]

可达到平衡状态的研究鲜见报道,所以仍需深入研究 Cu 含量对铸造 Al-Si-Mg 合金综合性能的影响。

2 铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金静态力学性能

一般通过添加(微)合金元素、晶粒细化、变质处理、热处理、塑性变形等方式来提高铸造 Al-Si-Mg 合金的力学性能。其中,引入 Cu 是最便捷、最经济的方法之一。图4为部分 Al-Si-Mg-Cu 合金力学性能^[3,5,7,9,14,20-32]。分析可知,目前绝大部分研究的合金中 Mg 的含量基本在 0.3%~0.5% 之间,而 Cu 的含量则变化范围较大(0.5%~5%),并且其抗拉强度都不高于 350 MPa,屈服强度不高于 300 MPa,同时伸长率小于 8%。研究指出,合金的屈服强度由固溶强化(σ_{ss})、细晶强化(σ_g)、析出强化(σ_{ppt})3 部分组成,而时效处理后合金屈服强度的增加主要是由析出强化(σ_{ppt})主导。析出相强化主要机制有绕过机制和切过机制,都与析出相的种类、形貌、数密度等因素相关^[15-17,19]。在 Al-Si-Mg 三元合金中仅有 β'' 和 β' 两种强化相,并且普遍认为共格的 β'' 相强化效果比半共格 β' 相好。YANG MJ 等^[33]首次采用试验的方法定量分析了时效 Al-Mg-Si 合金中 β'' 和 β' 析出相对强度的贡献,给出了在峰值时效状态下, β'' 相对屈服强度的贡献为 142.8 MPa, β' 相对屈服强度的贡献为 64.1 MPa。但在 Al-Si-Mg-Cu 合金中由于存在多种析出相,目前许多研究按照绕过机制半定量地计算了析出相对强度的影响,但并未定量分析每种析出相对合金强

度的贡献,因此,仍无法判定何种析出相对强度的贡献更大。虽然 Cu 含量的增加会降低共晶温度,形成低熔点的共晶化合物,扩大固、液两相区,增加缩松、缩孔的形成,但 Cu 含量对力学性能的影响的临界范围

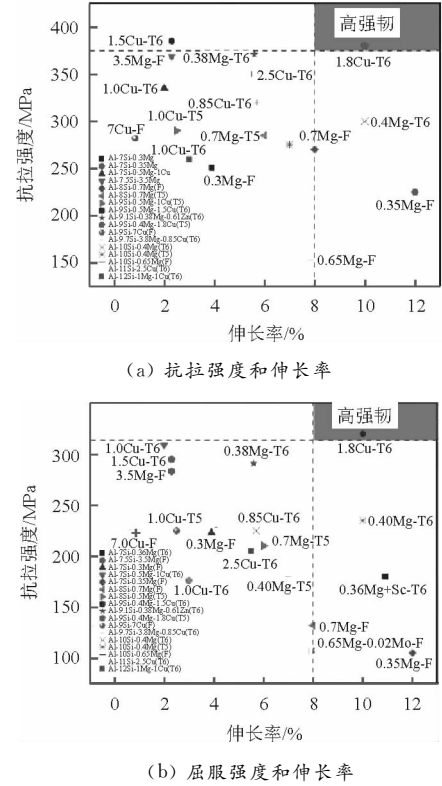


图 4 部分 Al-Si-Mg-Cu 合金的力学性能^[3,5,7,9,14,20-32]
Fig.4 Mechanical properties of partial Al-Si-Mg-Cu alloys^[3,5,7,9,14,20-32]

仍不清楚。DONG X X 等^[3]和 ZHU X Z 等^[5]对不同 Cu 含量的 Al-Si-Mg-Cu 合金采用不同的热处理方式,得出 Cu 含量为 0.4%~0.85% 时合金的屈服强度可以保持不变,针对时效强化合金而言,热处理工艺特别是时效工艺会显著影响强化相形貌、分布、数量,从而影响合金的性能。

3 铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金的疲劳性能

添加 Mg、Cu 等元素可以增加基体强度,但会降低韧性,从而缩短疲劳寿命。图 5 为 Cu 含量、晶粒尺寸 (S_{DAS}) 与疲劳强度的关系以及常见疲劳断裂的起源。

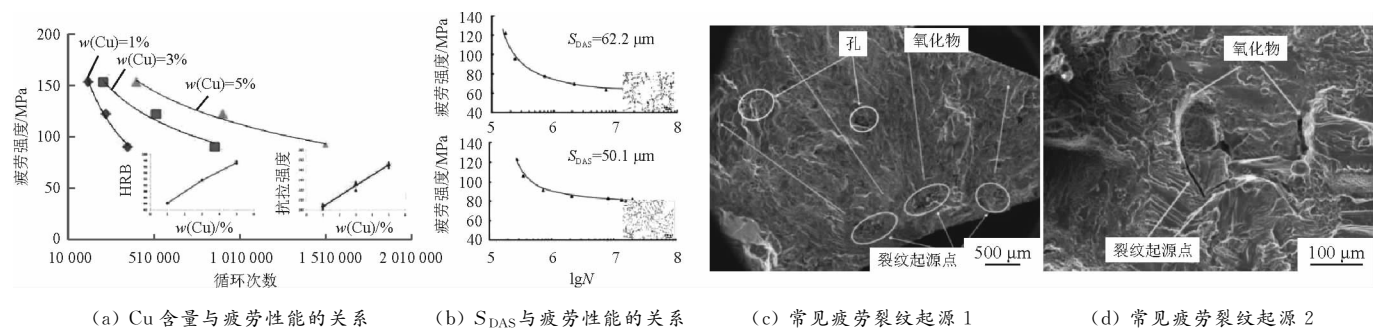


图 5 Cu 含量、 S_{DAS} 与疲劳强度的关系以及常见疲劳断裂的起源^[34, 37-38]

Fig.5 Relationship between Cu content or S_{DAS} with fatigue strength and the common derivation of fatigue crack^[34, 37-38]

研究表明,疲劳断裂最大的影响因素是铸造缺陷,铸造缺陷尺寸增加会降低疲劳寿命(和 Cu 含量类似)。缺陷尺寸对疲劳性能的影响存在关键尺寸,一般采用 Kitagawa-Takahashi 图来表示缺陷尺寸与疲劳强度 (σ_a) 的关系,见图 6^[39]。可以看出,疲劳断裂存在两种断裂机制,一种是曲线以下疲劳裂纹起源于缺陷,但由于驱动力不足不能开动;另一种是曲线以上裂纹在缺陷处得以扩展,即缺陷要达到一定尺寸时,才能使裂纹扩展并失效。

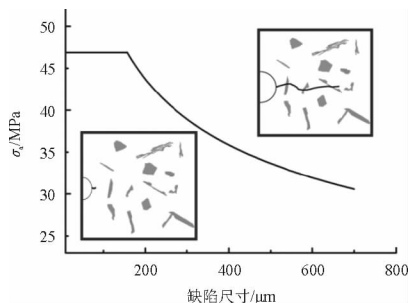


图 6 Kitagawa-Takahashi 图^[39]

Fig.6 Kitagawa-Takahashi digram^[39]

缺陷的类型不同,其关键尺寸也不一样,一般气孔为 25 μm,氧化膜为 50 μm^[34],若在此之下,则气孔对裂纹萌生的影响显著降低。另外,与缺陷到试样表面的距离相关,若大气孔远离表面则几乎对疲劳寿命没有影响,但试样表面的小气孔则会使疲劳寿命下降。铸造

可以看出,随着 Cu 含量增加,合金的强度呈上升趋势,其疲劳强度也逐渐递增,见图 5a。微观组织对疲劳寿命影响的研究主要集中在晶粒细化和变质处理方面,一般认为 S_{DAS} 增加会致使孔洞尺寸增加,从而降低合金疲劳强度^[34-36]。从图 5b 可见, S_{DAS} 减小(其他条件相同), A356 合金的疲劳强度提高^[37]。研究发现, S_{DAS} 在 60 μm 以下, S_{DAS} 增加会使疲劳寿命下降;但 S_{DAS} 在 60 μm 以上时,随着 S_{DAS} 增加,疲劳寿命有小幅增加^[35]。铸造缺陷是导致疲劳断裂的重要因素,图 5c 和图 5d 中清晰可见裂纹起源于孔洞、氧化膜以及脆性第二相,在熔炼过程中应严格控制熔炼工艺,净化熔液^[38]。

Al-Si 合金中缺陷尺寸小于关键尺寸时, Si 颗粒的断裂会造成显微裂纹,加速局部塑性应变集中,使得各处裂纹连接,并通过滑移在基体处发展。

目前对于铸造铝合金疲劳性能的研究集中在分析合金疲劳断裂的影响因素,而结合 Cu 含量对铸造 Al-Si-Mg 合金组织和力学性能的影响,系统研究 Cu 含量对铸造 Al-Si-Mg 合金疲劳行为的影响未见报道。

4 铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金耐蚀性能

铸造 Al-Si 系合金的耐蚀性也是工程应用中需要综合考量的必要性能指标。影响铸造 Al-Si 合金耐蚀性的主要因素有:机械研磨工艺、晶粒尺寸、第二相(Si 相、富 Fe 相等)、合金元素等^[40-46]。图 7 为机械研磨、 S_{DAS} 、合金元素等对铸造铝合金耐蚀性的影响^[40-42]。GOODALL M D 等^[40]通过机械研磨在 A356 铝合金的近表面区域形成一个连续的变形层,由超细等轴晶粒组成(即近表面变形层, NSDL),外部区域大小为 50~75 nm,内部区域大小为 100~150 nm,在 3.5% 的 NaCl 溶液中近表面变形层的优先溶解和铝基体在共晶 Si 颗粒周围的挖沟同时发生,见图 7a。由于铸造 Al-Si 合金表层组织中含有脆性的 Si 相,在机械研磨产生超细等轴变形层过程中 Si 相是否会大量与基体剥离以及变形过程中基体是否会开裂而降低耐蚀性都值得继续研究。

OSORIO W R 等^[43-44]发现, S_{DAS} 较大的合金比较小的耐蚀性更佳, 这可能是较小的 S_{DAS} 增加了基体和 Si 相的界面导致的。GOMES L F 等^[41] 也发现了同样的现象, 见图 7b。 S_{DAS} 与冷却速率相关, 冷却速率越慢则 S_{DAS} 越大, 组织越粗大, 相应的力学性能也会降低, 这不利于合金的工程应用, 因此关于 S_{DAS} 对合金综合性能

的影响临界点还需要进一步研究。XAVIER M G C 等^[42] 通过添加 Ni 和 Co 等元素来改善富 Fe 相形貌以及在组织内部形成含 Ni 的高密度氧化铝层从而降低腐蚀速率, 见图 7c 和图 7d。也有研究者在铸造合金中添加 Zn、Zr、Cr 等元素来改善其性能^[2,11,30,37]。不同的元素添加对耐蚀性能的改善不一, 机制也不一样。

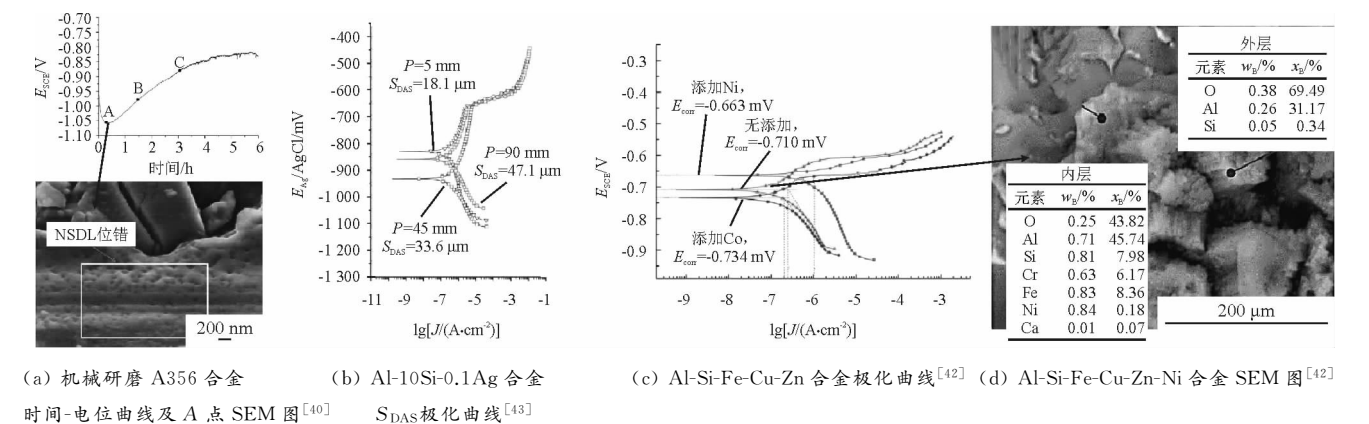


图 7 不同因素对铸造铝合金耐蚀性的影响^[40,42-43]
Fig.7 Effect of different factors on corrosion resistance of cast aluminum alloy^[40,42-43]

5 结 语

铸造高性能 Al-Si-Mg-Cu 合金在工业结构件中的应用有非常广泛的前景, 但其综合性能的提升研究尚不够透彻, 大大限制了其在重要工业领域的深入应用。目前铸造高性能 Al-Si-Mg-Cu 合金综合性能提升研究, 主要存在以下问题。

(1)合金的组织决定性能, 铸态及热处理态下合金组织演变的临界 Cu 含量尚未明晰, 不能精准控制合金组织和性能的关系。

(2)铸造 Al-Si-Mg-Cu 合金时效析出强化相之间的平衡机制对强度贡献的影响仍不清楚, 致使不能合理调整热处理工艺以达到目标强度要求。

(3)减小 S_{DAS} 导致的合金力学性能提升与耐蚀性下降的调和关系需进一步研究, 以达到其平衡临界状态。未来的研究中可首先固定一种成分合金研究 S_{DAS} 的临界值, 以达到合金力学性能与耐蚀性的平衡; 研究同铸造组织演变的临界 Cu 含量范围, 以及峰值时效状态下强化相之间的竞争机制; 最后再通过添加微合金元素来提升临界合金的疲劳及耐蚀性能。

参 考 文 献

[1] MONDOLFO L F. Aluminum Alloys: Structure and Properties [M]. London, UK: Butterworths, 1976.

[2] ZHANG B R, ZHANG L K. Achievement of high strength and ductility in Al-Si-Cu-Mg alloys by intermediate phase optimization in as-cast and heat treatment conditions[J]. Materials, 2020, 13: 647-653.

[3] DONG X X, JI S X. Formation of strength platform in cast Al-Si-Mg-Cu alloys[J]. Scientific Reports, 2019(9): 9 582-9 589.

[4] CERRI E. A study of intermetallic phase stability in Al-Si-Mg casting alloy: The role of Cu additions[J]. La Metallurgia Italiana, 2020(6): 37-46.

[5] ZHU X Z, JI S X. Improvement in as-cast strength of high pressure die-cast Al-Si-Cu-Mg alloys by synergistic effect of $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ and $\theta-Al_2Cu$ phases[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A802: 140 612-140 619.

[6] DE MORI A, TIMELLI G. Influence of Cu content on the microstructure and high-temperature tensile and fatigue properties of secondary AlSi7Mg0.3Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A816: 141 310.

[7] YAMAMOTO K, NAKATA T. Optimization of Cu content for the development of high-performance T5-treated thixo-cast Al-7Si-0.5Mg-Cu(%) alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 93: 178-190.

[8] ZHENG Y. Effects of Cu content and Cu/Mg ratio on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 649: 291-296.

[9] LI Y J, BRUSETHAUG S. Influence of Cu on the mechanical properties and precipitation behavior of AlSi7Mg0.5 alloy during ageing treatment[J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 99-103.

[10] 张丽华. Cu 元素对 Al-Si 合金的力学性能及耐腐蚀性的影响[J]. 陶瓷, 2020(4): 36-44.

[11] BIDMESHKI C, ABOUEI V. Effect of Mn addition on Fe-rich intermetallics morphology and dry sliding wear investigation of hypereutectic Al-17.5% Si alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2016, 5(3): 250-258.

[12] BJURENSTEDT A, CASARI D. In-situ study of morphology and growth of primary $\alpha-Al(FeMnCr)Si$ intermetallics in an Al-Si alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 130(15): 1-9.

- [13] YANG H L, JI S X. Effect of Mg level on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Si-Cu alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A642(26): 340-350.
- [14] DONG X X, ZHANG Y J, JI S X. Enhancement of mechanical properties in high silicon gravity cast AlSi9Mg alloy refined by Al₃Ti₃B master alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2017, A700(3): 291-300.
- [15] XIAO Q, LIU H Q, WANG B. Effect of Cu content on precipitation and age-hardening behavior in Al-Mg-Si-*x*Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 1 005-1 013.
- [16] WANG G Q, SUN Q Z, FENG L M. Influence of Cu content on ageing behavior of AlSiMgCu cast alloys[J]. Materials and Design, 2007, 28(3): 1 001-1 005.
- [17] SHABESTARI S G, MOEMENI H. Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys [J]. Journal Material Process and Technology, 2004, 153: 193-198.
- [18] WANG X, ESMAEILI S, LLOYD D J. The sequence of precipitation in the Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111[J]. Metallurgy Material-Transaction, 2006, A37: 2 691-2 699.
- [19] DING L P, JIA Z H, NIE J F, et al. The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. Acta Material, 2018, 145: 43 750.
- [20] TSAIA Y C. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487: 157-162.
- [21] YILDIRIM M, ÖZYÜREK D. The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys[J]. Materials and Design, 2013, 51: 767-774.
- [22] LIN Y C. Effects of solution treatment on microstructures and micro-hardness of a Sr-modified Al-Si-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A725: 530-540.
- [23] JEON J H. Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A748: 367-370.
- [24] JIANG B. A novel modifier on eutectic Si and mechanical properties of Al-Si alloy[J]. Materials Letters, 2019, 239: 13-16.
- [25] GU T F. Effects of boron addition on the morphology of silicon phases in Al-Si casting alloys [J]. Materials Characterization, 2018, 141: 115-119.
- [26] CHEN R. Precipitation behavior and hardening effects of Si-containing dispersoids in Al-7Si-Mg alloy during solution treatment[J]. Materials and Design, 2016, 90: 1 059-1 068.
- [27] QIU C R. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356.2 alloy[J]. Materials and Design, 2017, 114: 563-571.
- [28] RIESTRA M. Interactive effects of grain refinement, eutectic modification and solidification rate on tensile properties of Al-10Si alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2017, A703: 270-279.
- [29] THIRUGNANAM A. Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al-7Si-Mg alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A446: 405-414.
- [30] ZHAN H Y. Analyzing the microstructural evolution and hardening response of an Al-Si-Mg casting alloy with Cr addition[J]. Materials Characterization, 2018, 142: 602-612.
- [31] GAO T. Morphological evolution and strengthening behavior of α -Al(Fe, Mn) Si in Al-6Si-2Fe-*x*Mn alloys[J]. Results in Physics, 2017(7): 1 051-1 054.
- [32] WU X Y. Interactions between Fe-rich intermetallics and Mg-Si phase in Al-7Si-*x*Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 786: 205-214.
- [33] YANG M J, CHEN H N, DU Y. Quantified contribution of β'' and β' precipitates to the strengthening of an aged Al-Mg-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A774: 138 776.
- [34] 范宋杰, 何国球. A356 铸造铝合金疲劳性能影响因素概述[J]. 材料导报, 2007, 21(9): 59-62.
- [35] LIU Y, JIE W, GAO Z, et al. Rotary bending fatigue behavior of A356 T6 aluminum alloys by vacuum pressurizing casting[J]. China Foundry, 2015, 12(5): 326-332.
- [36] ZHENG X, CUI H. Engler-Pinto. Statistical relationship between fatigue crack initiator size and fatigue life for a cast aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2015, A580: 71-76.
- [37] TUPAJ M, ORLOWICZ A W. Improvement of Al-Si alloy fatigue strength by means of refining and modification [J]. Archives of Foundry Engineering, 2019, 19(4): 61-66.
- [38] REN P R, HUANG W Q. High-cycle fatigue failure analysis of cast Al-Si alloy engine cylinder head[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105 546.
- [39] PANG J C, LI S X, WANG Z G, et al. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A564: 331-341.
- [40] GOODALL M D, PAWAR S, CURIONI M. The influence of mechanical grinding on the microstructure and corrosion behaviour of A356 aluminium alloys [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2022, 57(2): 97-104.
- [41] GOMES L F, SPINELLI J E. Influences of alloying elements and dendritic spacing on the corrosion behavior of Al-Si-Ag alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 5 880-5 893.
- [42] XAVIER M G C, FREITAS B J M, KOGA G Y, et al. Corrosion resistance of Fe-contaminated Al-Si-Cu-Zn alloys modified with Ni and Co and with variable secondary dendrite arm spacing [J]. Metals, 2022, 12: 645.
- [43] OSORIO W R, GOULART P R, GARCIA A. Effect of silicon content on microstructure and electrochemical behavior of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Material Letter, 2008, 62: 365-369.
- [44] OSORIO W R, CHEUNG N, SPINELLI J E, et al. Microstructural modification by laser surface remelting and its effect on the corrosion resistance of an Al-9Si casting alloy[J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 2 763-2 770.
- [45] KIM J H, LEE S H. Correlation between microstructural evolution and corrosion resistance of hypoeutectic Al-Si-Mg alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 193: 112 276.
- [46] LIANG Y G, CUI C X. Synergistic effects of Cr and Sr addition on the mechanical and corrosion properties of A356.2 alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112 152.

(编辑:栗万仲)