

分级淬火对Al-Mg-Si-Cu合金力学及腐蚀性能的影响^①

王昆¹, 陈志国^{2,3}, Tarek Khelfa³, 周燕锴¹

(1.中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2.湖南开放大学智能制造学院, 湖南长沙 410004; 3.湖南人文科技学院能源与机电工程学院, 湖南娄底 417000)

摘要: 采用室温拉伸、晶间腐蚀、电化学腐蚀和TEM等测试方法,研究了不同温度下分级淬火对Al-Mg-Si-Cu合金力学和耐腐蚀性能的影响。结果表明,100℃/60min分级淬火后的合金在28d自然时效后不仅能维持162.49MPa的低屈服强度和105.60MPa的高强化增量,相较于水淬合金,晶间腐蚀深度降低了57.2%。TEM和EDS分析结果表明,分级淬火期间形成的II型Mg-Si团簇抑制了自然时效期间形成的I型团簇,有效促进了晶内 β'' 相、 β' 相的析出。此外,晶界处的析出相由于附近溶质原子的耗尽呈现粗大球形、离散分布的特征。

关键词: 分级淬火; Al-Mg-Si-Cu合金; 力学性能; 腐蚀性能; 屈服强度; 极限抗拉强度; 析出相

中图分类号: TG156

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.029

文章编号: 0253-6099(2024)06-0134-05

Effect of Step Quenching on Mechanical and Corrosion Properties of Al-Mg-Si-Cu Alloy

WANG Kun¹, CHEN Zhiguo^{2,3}, Tarek Khelfa³, ZHOU Yankai¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.School of Intelligent Manufacturing, Hunan Open University, Changsha 410004, Hunan, China; 3.School of Energy and Electromechanical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, Hunan, China)

Abstract: Effect of step quenching at different temperatures on mechanical and corrosion properties of Al-Mg-Si-Cu alloy was explored by carrying out room temperature tensile test, intergranular corrosion test, electrochemical corrosion test, as well as by means of transmission electron microscopy (TEM). It is found that the alloy, after 60 minutes of step quenching at 100℃ followed by 28 days of natural aging, can not only maintain a low yield strength of 162.49 MPa and a high strengthening increment of 105.60 MPa, but also exhibit a 57.2% reduction in intergranular corrosion depth compared to water-quenched alloy. TEM and EDS analyses show that type II Mg-Si clusters formed during step quenching effectively inhibit type I clusters formed during natural aging, while promote precipitation of intergranular β'' phase and β' phase. Moreover, the precipitated phase at grain boundary is coarse and spherical with discrete distribution due to depletion of nearby solute atoms.

Key words: step quenching; Al-Mg-Si-Cu alloy; mechanical properties; corrosion performance; yield strength; ultimate tensile strength; precipitated phase

可热处理强化的Al-Mg-Si合金凭借中等的力学性能、优良的焊接性能和成形性能被广泛应用于汽车、轮船工业^[1-4]。然而,工业生产条件限制导致Al-Mg-Si合金析出动力学和强化反应不足,严重限制了Al-Mg-Si

合金的直接应用范围^[5]。因此,通常在Al-Mg-Si合金中加入不同质量分数的Cu,以增强析出动力学从而提升合金的力学性能。但加入Cu会增加合金的晶间腐蚀(intergranular corrosion, IGC)敏感性,降低材料耐腐

① 收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2022WZ1014); 湖南省“双一流”学科建设项目(湘教通[2018]469号)

作者简介: 王昆(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为高性能铝合金。E-mail: wangkuncsu@csu.edu.cn

通信作者: 陈志国(1969—),男,湖南临澧人,博士,教授,主要研究方向为高性能材料的微观调控。E-mail: hngary@163.com

蚀性能。热处理是一种调控铝合金材料性能的常见手段,具有效率高、成本低、操作简单、易实现连续生产等优势。已有研究表明:不同温度的两步预时效工艺组合显著影响 Al-Mg-Si 合金的力学性能,特别是第一步预时效发挥了更重要作用^[6],这归因于不同温度下团簇和空位的演化不同;且 560 °C/30 min + 100 °C/50 min 分级淬火可以显著抑制自然时效的负面效果^[7],促进合金的快速时效强化。

目前的研究主要针对分级淬火对材料力学性能的影响,而对材料腐蚀性能特别是晶间腐蚀性能影响方面的研究鲜有报道。本文以某公司 Al-Mg-Si-Cu 合金为研究对象,探究分级淬火对合金材料力学和腐蚀性能的协同影响,并分析其影响机理,可为实际生产提供理论依据。

1 实验材料及方法

实验所用 Al-Mg-Si-Cu 合金化学成分见表 1。

表 1 实验合金的化学成分(质量分数) %

Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Al
1.03	0.99	0.02	0.65	0.24	余量

分级淬火热处理工艺如下:合金试样在箱式电阻炉中进行 560 °C/60 min 固溶处理后,使用盐浴淬火炉迅速淬火至 100 °C、150 °C,最后用冷水冷却到室温。对所有试样进行 28 d 自然时效处理,再将试样在恒温鼓风干燥箱中进行人工时效处理。具体热处理工艺参数如表 2 所示,其中,SQ100 试样分级淬火温度为 100 °C, SQ150 试样分级淬火温度为 150 °C, WQ 试样直接用冷水淬火。

表 2 Al-Mg-Si-(Cu) 合金的分级淬火热处理工艺参数

样品名称	固溶处理	淬火方式	自然时效	人工时效
SQ100	560 °C/ 60 min	100 °C/60 min+冷水淬火	28 d	170 °C/6 h
SQ150		150 °C/60 min+冷水淬火		170 °C/5 h
WQ		冷水淬火		170 °C/8 h

使用 HV-1000Z 型维氏硬度仪测试显微硬度(试验力为 4.9 N),每组测试 7 个点,舍去最大值和最小值后取平均值。使用 Instron 3369 型材料试验机进行室温拉伸力学测试,每组 3 个试样,取平均值。依照 GB/T 36174—2018 在恒定 30 °C 下进行晶间腐蚀测试,镶样后使用徕卡 DM4M 金相显微镜检测试样的腐蚀形貌和深度。在 MULTI AUTOLAB M204 电化学工作站进

行电化学性能测试,腐蚀液为质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液,极化曲线电位极化范围为 ± 0.3 V(Vs OCP),扫描速率为 1 mV/s。透射试样先经机械减薄至 50 μm ,再置于 -20 °C 以下的双喷液(甲醇与硝酸体积比为 3:1)中使用 RL-I 型双喷减薄仪进行减薄。采用 Titan G2 60-300 透射电子显微镜对样品微观组织进行观察。

2 实验结果与讨论

2.1 分级淬火对合金力学性能的影响

图 1 为合金经不同淬火方式处理后的时效硬化曲线。不同热处理后的合金硬度均随着时效时间增加呈现先上升再下降并逐渐趋于平稳的变化趋势。其中,WQ 试样的初始硬度最高,为 73.28HV,并在时效 8 h 时达到峰值 114.98HV,随后逐渐下降。SQ150 试样和 SQ100 试样初始硬度较低,分别为 71.24HV 和 69.04HV,但在时效开始后硬度上升速率较大,分别在时效 5 h 和 6 h 时达到峰值,相较于 WQ 试样明显缩短了时效时间。显然,分级淬火处理有利于加快合金时效强化速率,从而缩短峰时效时间。

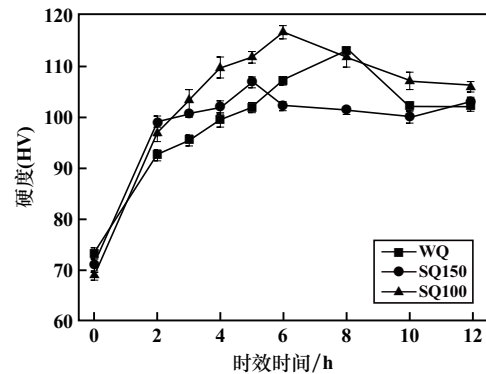


图 1 不同热处理下合金的时效硬化曲线

工业生产过程中,固溶处理与人工时效处理之间的时间间隔往往超过 1 个月,在此期间会产生自然时效的负面影响,即在自然时效期间,过饱和固溶体中的 Mg 和 Si 溶质原子逐渐扩散形成 I 型团簇,提高合金强度,损害合金后续的成形性和强化潜力。表 3 为不同热处理后合金在人工时效前后力学性能的变化。由表 3 可以看到,经过 28 d 自然时效后,WQ 试样的屈服强度为 252.51 MPa,远远高于 SQ100 试样的 162.49 MPa 和 SQ150 试样的 187.5 MPa,这将影响合金后续加工处理的难易度和精度。进行人工时效后,WQ 试样的极限抗拉强度增量仅为 55.11 MPa,远低于 SQ100 试样的 105.60 MPa。这是由于 I 型团簇的形成导致大量溶质原子被消耗,而 I 型团簇的热稳定性较高,在人工时效温度下既不溶解也无法直接转变为主要

强化相 β'' 相,故降低了WQ试样人工时效期间的强化潜力。此外,SQ150试样的极限抗拉强度增量也仅为54.13 MPa。

表3 不同热处理后合金在人工时效前后的力学性能变化

样品名称	极限抗拉强度/MPa		屈服强度/MPa	
	人工时效前	人工时效后	人工时效前	人工时效后
SQ100	264.88	370.48	162.49	310.35
SQ150	287.40	341.53	187.50	293.77
WQ	320.12	375.23	252.51	310.68

为进一步分析分级淬火处理对合金析出动力学的影响,对各时效态合金进行了DSC分析,结果如图2所示。可以看到在100~500℃范围内,WQ试样出现了3个放热峰,分别对应 β'' 、 β' 、 β 相的析出。而经过分级淬火处理后的合金 β'' 相的放热峰均显著减弱,这说明分级淬火处理显著促进了 β'' 相的充分析出^[8]。相较于SQ100试样还存在 β' 相的析出峰,SQ150试样的放热峰更加不明显,说明其在人工时效阶段 β'' 相和 β' 相的演化更加充分,在后来的DSC加热过程中脱溶驱动力已经很小。值得注意的是,WQ试样在 β'' 放热峰之前存在一个明显的吸热峰,这是室温下形成的I型团簇溶解所导致的,而在SQ150和SQ100试样中均未观察到该吸热峰,这进一步证明了分级淬火处理抑制

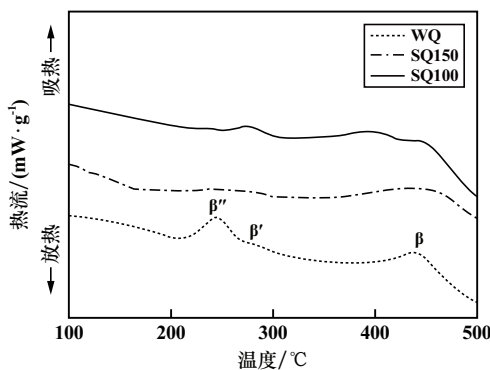
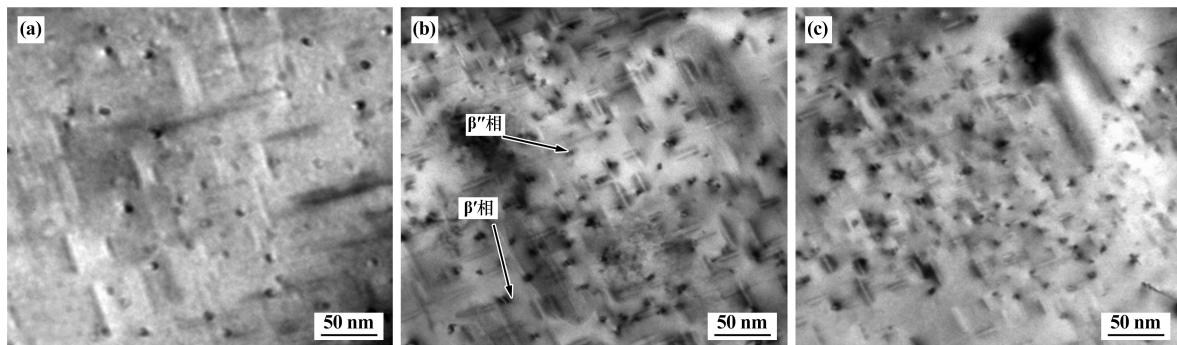


图2 不同热处理下合金的DSC曲线



(a) WQ; (b) SQ100; (c) SQ150

图3 合金峰时效态晶内TEM照片

了I型团簇的形成,有利于II型团簇的形成。II型团簇中尺寸较大部分的Mg/Si比与 β'' 相十分接近,易于转变成 β'' 相^[9],因此分级淬火处理可以通过形成大量II型团簇来促进时效过程中 β'' 相的快速析出。表4详细列出了DSC曲线中各试样的峰值特征温度。可以看出,SQ试样 β'' 相和 β' 相的析出峰值特征温度均低于WQ试样,这说明经过分级淬火处理的合金更加易于析出 β'' 相和 β' 相,与前述结论一致。

表4 不同热处理下合金析出相的峰值特征温度

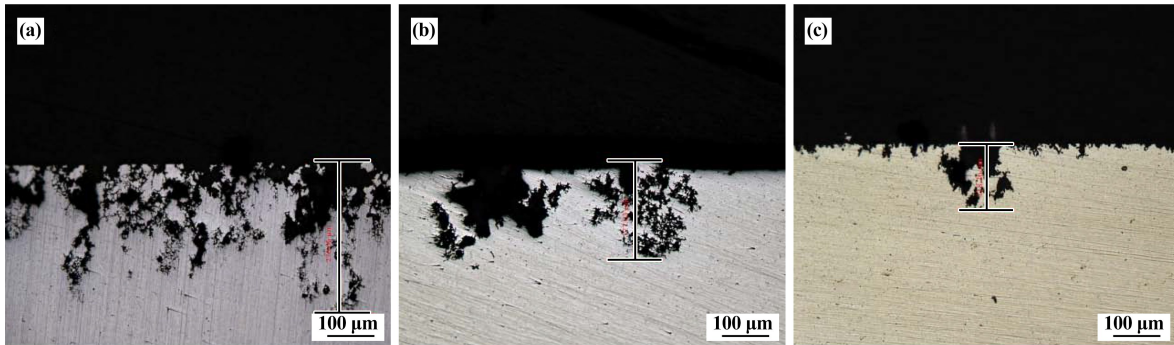
样品名称	合金析出相峰值特征温度/℃		
	β'' 相	β' 相	β 相
WQ	247	283	435
SQ100	237	273	435
SQ150	237	270	431

图3为不同热处理下合金峰时效态晶内TEM图片。WQ试样的晶内析出相主要为沿着 $\langle 100 \rangle_{Al}$ 方向排列分布的针状相,结合文献^[10]可知,此为与基体共格的 β'' 相,是Al-Mg-Si合金中主要的强化相,通常对应较高的力学性能。SQ100合金晶内析出了多种形态的析出相,既能观察到针状的 β'' 相,也可以观察到棒状的 β' 相,这说明相较于WQ试样,分级淬火处理后的合金时效过程发展更加充分^[10],在峰时效期间已有部分 β'' 相转化为与基体半共格的非平衡相 β' 。通常 β' 相等半共格相的生成伴随着合金力学性能的损失,但适宜的分级淬火处理形成的II型团簇有效促进了 β'' 相的充分析出,因此相较于WQ合金来说,力学性能损失并不明显。但在较高温度下进行分级淬火处理,由于淬火空位较少,而原子扩散速度较快,会使II型团簇的生成稳定性不足、形核率降低,造成 β'' 相的数量密度进一步减少,如图3(c)所示,导致合金力学性能的损失,这与表3所示SQ150试样极限抗拉强度增量损失相吻合。

2.2 分级淬火对合金腐蚀性能的影响

不同热处理后合金的晶间腐蚀形貌如图4所示。各试样均发生了腐蚀现象,其中WQ和SQ150试样呈现出网状形貌,为典型的晶间腐蚀形貌,SQ100试样网状形貌不明显。同时,WQ试样最大腐蚀深度达到276.06 μm ,

表现出严重的晶间腐蚀倾向,SQ150试样和SQ100试样最大腐蚀深度分别为177.03 μm 和118.26 μm ,其中SQ100试样的腐蚀深度仅为WQ试样的42.8%。综合腐蚀形貌和最大腐蚀深度来看,100 $^{\circ}\text{C}$ 分级淬火处理有助于缓解Al-Mg-Si-Cu合金的晶间腐蚀敏感性。



(a) WQ; (b) SQ150; (c) SQ100

图4 合金峰时效态的晶间腐蚀形貌

不同热处理下合金的动电位极化曲线如图5所示,可以看到各试样的腐蚀模式均为没有明显钝化现象的连续腐蚀过程。分别对各极化曲线进行Tafel外推和线性拟合,得到自腐蚀电位和自腐蚀电流如表5所示。可以得到,自腐蚀电位从低到高为:WQ<SQ150<SQ100,自腐蚀电流密度从大到小为:WQ>SQ150>SQ100。由法拉第第二定律可知,自腐蚀电流密度直接反映体系腐蚀速率,因此试样的耐腐蚀性能由高到低为:SQ100>SQ150>WQ,这与晶间腐蚀形貌实验结果一致。由此可以推测适宜温度下的分级淬火处理有利于提高合金耐腐蚀性,但其作用机理仍需进一步微观组织观察。

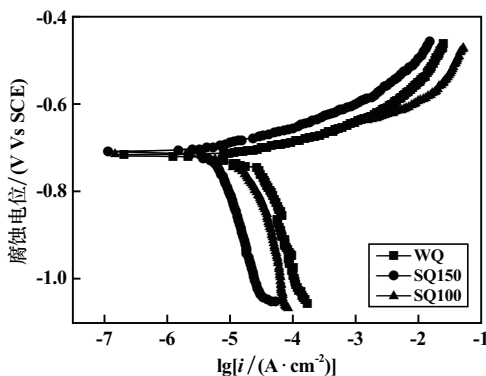


图5 不同热处理下合金的动电位极化曲线

表5 不同热处理下合金的电化学性能参数

合金	自腐蚀电位/(V Vs SCE)	自腐蚀电流密度/[10^{-5} ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)]
WQ	-0.718	2.301
SQ150	-0.714	1.106
SQ100	-0.707	0.754

一般认为时效硬化型铝合金的晶间腐蚀性能与其晶界结构密切相关。在腐蚀过程中,由于晶界处的析出相(GBP)与无沉淀区(PFZ)之间以及PFZ与基体之间存在电位差,这会形成以晶界析出相为阴极、晶界PFZ或邻近基体为阳极的腐蚀微电池,如果GBP呈现连续分布,则会形成连续的微电流,导致晶界处连续腐蚀^[11-12]。

图6为不同热处理后试样晶界处的TEM图片,相应的EDS分析结果见表6~8。

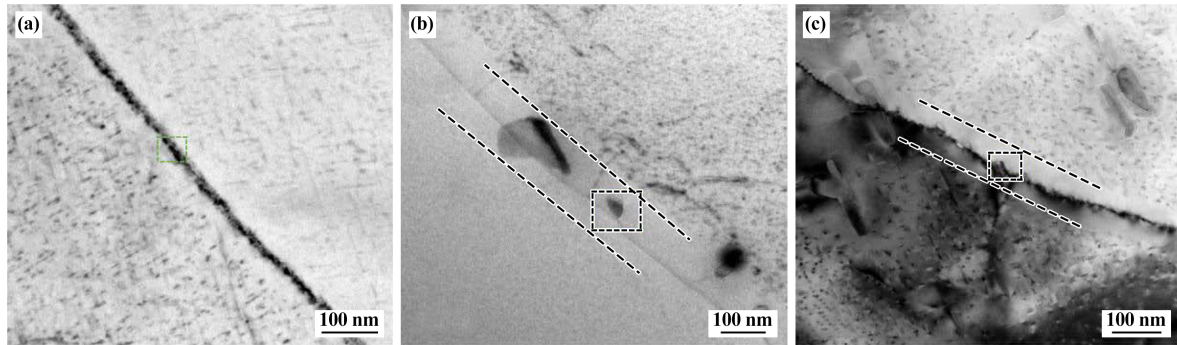
WQ试样晶界处生成了多种连续分布的析出相,EDS分析显示其主要为针状的 β'' 相(Mg_5Si_6)和棒状的富Mg相 β' 相(Mg_9Si_5)。这种晶界结构将导致WQ试样晶界上连续分布的 β''/β' 相在腐蚀介质中作为阳极优先溶解,逐步形成网状形貌的晶间腐蚀。

SQ100试样晶界处存在离散和较粗大的析出相,EDS分析显示主要为平衡 β 相和Si颗粒,呈现椭球状。这是因为作为高能区域的晶界在热处理过程中常常伴随着偏聚过程,SQ100试样在分级淬火期间的非平衡偏析将导致紧邻偏析区域中的溶质耗尽,这就消耗了Mg、Si原子和附近可移动的空位从而形成贫溶质原子区^[13]。由于溶质原子和空位的损耗,SQ100试样在后续人工时效阶段晶界处只能形成离散的析出相。同时由于SQ100试样的人工时效时间较WQ试样大幅缩短,使得经PFZ进入晶界的溶质原子也相应减少,因此晶界析出相在形成过程中无法获得足够的溶质原子,继而发生降低界面能的球化过程^[14]。这种离散球化的晶界析出相形貌使得沿晶界腐蚀的连续性降低,在阴极上无法持续进行还原

反应,因此在动电位极化曲线中表现为较低的极化电流密度。

SQ150 试样的晶界处析出了大量细小半连续的析出相,EDS 分析显示为棒状的 β' 相和 Si 颗粒。值得注意的是,不同温度下分级淬火处理后试样的晶界特征

明显不同,这是因为 SQ150 试样的处理温度接近人工时效的处理温度,分级淬火保温期间晶界处富集的元素已经开始形成析出相,并在随后的人工时效期间持续演化,但同时溶质原子的耗尽阻碍了析出相的长大,因此形成了细小半连续的晶界结构。



(a) WQ; (b) SQ100; (c) SQ150

图6 不同热处理下合金时效态的晶界 TEM 照片

表6 针状相的 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子分数/%	不确定系数/%	修正系数	k 比值
Mg(K)	2.55	2.83	0.08	0.88	1.050
Si(K)	3.97	3.81	0.10	0.92	1.000
Al(K)	93.32	93.28	0.51	0.92	1.030

表7 棒状相的 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子分数/%	不确定系数/%	修正系数	k 比值
Mg(K)	2.31	2.62	0.14	0.88	1.050
Si(K)	1.71	1.67	0.09	0.92	1.000
Al(K)	94.09	94.34	0.67	0.92	1.030

表8 椭球相的 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子分数/%	不确定系数/%	修正系数	k 比值
Mg(K)	0.00	0.00	100.00	0.88	1.050
Si(K)	3.70	3.57	0.13	0.92	1.000
Al(K)	95.34	95.99	0.83	0.92	1.030

3 结论

1) 分级淬火工艺可以有效抑制 Al-Mg-Si-Cu 合金的自然时效负面影响,可在长时间自然时效后维持较低力学性能的同时还能较好保留合金的时效强化潜力。分级淬火温度 100 °C 时,合金自然时效后的屈服强度仅为 162.49 MPa,而极限抗拉强度增量达到 105.6 MPa。

2) 分级淬火工艺可以有效缓解合金在峰时效后的晶间腐蚀倾向,SQ100 合金的晶间腐蚀深度较 WQ 合金降低了 57.2%。

3) 分级淬火工艺对合金力学性能的影响主要归

因于有效抑制了 I 型团簇的生成,有利于 II 型团簇的充分发展,促进了强化相 β'' 相的充分析出。对腐蚀性能的影响主要是影响了合金的晶界析出过程,100 °C 分级淬火处理期间晶界处的非平衡偏析形成了溶质耗尽区,同时峰时效时间的缩短也使得经 PFZ 进入晶界的原子数降低,形成离散球化的晶界结构,无法形成连续的腐蚀通道。

参考文献:

- [1] 侯悦,田原,赵志鹏,等. 海洋工程用铝合金的腐蚀与防护研究进展[J]. 表面技术, 2022,51(5):1-14.
- [2] 余欣未,蒋显全,谭小东,等. 中国铝产业的发展现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2020,30(4):709-718.
- [3] 王森,李天景,曾一达,等. 6061-T4 铝合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):141-144.
- [4] 孟祥超,孙有平,何江美,等. ZL114A 和 6061 异种铝合金激光焊接工艺及接头显微组织和力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3):160-164.
- [5] ZHU S, SHIH H C, CUI X, et al. Design of solute clustering during thermomechanical processing of AA6016 Al-Mg-Si alloy[J]. Acta Materialia, 2021,203:116455.
- [6] YANG Z, CHENG J, LIANG Z, et al. Two-step preaging of an Al-Mg-Si alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(12): 2200973.
- [7] 赵鸿金,李升燕,张荣伟,等. 分级淬火对 6016 铝合金自然时效及烤漆硬化的影响[J]. 金属热处理, 2018,43(8):198-202.
- [8] HUA L, YUAN P G, ZHAO N, et al. Microstructure and mechanical properties of 6082 aluminum alloy processed by preaging and hot forging[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(3):790-800.

(下转第 143 页)

- assisted with ultrasonic treatment [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 961:171083.
- [8] SRIVASTAVA N, CHAUDHARI G P, QIAN M. Grain refinement of binary Al-Si, Al-Cu and Al-Ni alloys by ultrasonication [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249:367-378.
- [9] 郭峰,李克,肖雄亮,等. 超声处理温度区间对镁合金凝固组织的影响 [J]. *矿冶工程*, 2009, 29(5):94-97.
- [10] KIM S, SHIN J, CHO H, et al. Microstructural refinement of as-cast Al-Mg alloy by ultrasonic melt treatment using a titanium sonotrode under fully liquid condition [J]. *Materials Transactions*, 2022, 63(10):1469-1476.
- [11] LIU Q, LI X, LI Z, et al. Effect of Cu content on the microstructures of as-cast and homogenized Al-Cu-Mg-Ag alloys [J]. *Key Engineering Materials*, 2022, 921:59-64.
- [12] WANG Y, WANG L, LIU X, et al. Effects of a short-duration pre-precipitation process prior to predeformation aging on the mechanical properties and corrosion resistance of Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. *World Journal of Engineering*, 2022, 19(3):429-435.
- [13] 王鹏,刘冠华,刘志义. 固溶温度对 Al-Cu-Mg-Ag 合金显微组织与力学性能的影响 [J]. *矿冶工程*, 2019, 39(6):115-119.
- [14] SO H, SHIN J H, KANG L, et al. Optimization of a solution treatment in the Al-Cu-Mg-Ag alloy via a microstructural investigation [J]. *Metals*, 2021, 12(1):66.
- [15] CHEN Y T, LEE S L, BOR H Y, et al. Effect of natural aging and cold working on microstructures and mechanical properties of Al-4.6Cu-0.5Mg-0.5Ag alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, 44(6):2831-2838.
- [16] TIRYAKIOGLU M. On the relationship between Vickers hardness and yield stress in Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 633:17-19.
- [17] WANG J, LIU Z, BAI S, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the electron-beam welded joints of cast Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 801:140363.
- [18] XIE H, ZHAO J, CAO J, et al. Effect of minor Er additions on the microstructures and mechanical properties of cast Al-Cu-Mg-Ag alloys [J]. *Materials*, 2021, 14(15):4212.
- 引用本文:** 毛盼,王吉祥,柏松,等. 熔体超声处理对 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和硬度的影响 [J]. *矿冶工程*, 2024, 44(6):139-143.

(上接第 138 页)

- [9] QIAN F, ZHAO D, Mørtzell E A, et al. Enhanced nucleation and precipitation hardening in Al-Mg-Si (-Cu) alloys with minor Cd additions [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 792:139698.
- [10] DING L, JIA Z, NIE J, et al. The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy [J]. *Acta Materialia*, 2018, 145:437-450.
- [11] FANIJO E O, THOMAS J G, ZHU Y, et al. Effects of thermal history on the corrosion kinetics of rolled aluminum 6111 alloy [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 303:127802.
- [12] ZHU L, GUO M, LI G, et al. Enhancing the intergranular corrosion resistance and mechanical properties of Al-Mg-xSi-Cu-Zn alloys by synergistic intergranular and intragranular precipitation behaviors [J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(30):14490-14510.
- [13] ZHANG X, ZHOU X, NILSSON J. Corrosion behaviour of AA6082 Al-Mg-Si alloy extrusion: the influence of quench cooling rate [J]. *Corrosion Science*, 2019, 150:100-109.
- [14] 李海,毛庆忠,王芝秀,等. 高温预时效+低温再时效对 Al-Mg-Si-Cu 合金力学性能及晶间腐蚀敏感性的影响 [J]. *金属学报*, 2014, 50(11):1357-1366.
- 引用本文:** 王昆,陈志国, Tarek Khelifa, 等. 分级淬火对 Al-Mg-Si-Cu 合金力学及腐蚀性能的影响 [J]. *矿冶工程*, 2024, 44(6):134-138.