时效处理对6082铝合金力学性能和晶间腐蚀抗性的影响

周一帆[1,2] 项文娟[1,2] 李月[1,2] 耿晓勇[1,2] 于庆巾[1] 刘新良[1,2]

（1.中国兵器工业集团凌云工业股份有限公司中央研究院，涿州 072761；2.河北省汽车安全件技术创新中心，涿州 072761）

摘要：为研究200 ℃/1~10 h的时效处理对6082铝合金的力学性能、微观组织及抗腐蚀性能的影响，进行了拉伸试验、晶间腐蚀试验并对拉伸断口进行扫描电子显微镜（SEM）检测，结果表明，在200 ℃时随时效时间的延长，合金基体的析出相数量逐渐增多，合金强度先增大后减小；断口由大量等轴韧窝组成的韧性断裂逐渐演化为以细小而浅的韧窝和撕裂棱占据主导的混合断裂。随着时效时间的延长，合金表面点蚀坑及裂纹开展逐渐增多，并相互连通；峰时效后腐蚀坑和裂纹显著减少，合金的晶间腐蚀敏感性呈先升高后降低的趋势。因此，6082铝合金的欠时效态兼具较高的强度和晶间腐蚀抗性，适合汽车零部件大规模量产应用。

关键词：时效处理 6082铝合金 混合断裂 晶间腐蚀敏感性 力学性能

中图分类号：U465.2；TG178 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260075

Effects of Aging Treatment on Mechanical Properties and Intergranular Corrosion Resistance of 6082 Aluminum Alloy

Zhou Yifan[1,2], Xu Wenjuan[1,2], Li Yue[1,2], Geng Xiaoyong[1,2], Yu Qingjin[1], Liu Xinliang[1,2]

(1.China North Industries Group Lingyun Industrial Co., Ltd. Central Research Institute, Zhuozhou 072761; 2. Hebei Province Automotive Safety Parts Technology Innovation Center , Zhuozhou 072761)

Abstract: To study the effects of a 200 ℃/1~10 h aging treatment on the mechanical properties, microstructure and corrosion resistance of 6082 aluminum alloy, tensile tests, intergranular corrosion tests are conducted, and SEM examination is performed on the tensile fracture surfaces. The results indicate that at 200 ℃, the number of precipitated phases in the alloy matrix gradually increases with prolonged aging time, while the alloy strength first increases and then decreases. Additionally, the fracture morphology transitions from a ductile fracture dominated by numerous equiaxed dimples to a mixed fracture characterized by fine and shallow dimples along with tear ridges. As the aging time increases, the number of pitting corrosion pits and cracks on the alloy surface gradually increases and they interconnect. After peak aging, the number of corrosion pits and cracks significantly decreases, and the intergranular corrosion susceptibility of the alloy shows a trend of first increasing and then decreasing. Therefore, the under-aged state of 6082 aluminum alloy has both high strength and intergranular corrosion resistance, making it suitable for large-scale mass production applications in automotive parts.

Key words: Aging treatment, 6082 aluminum alloy, Mixed fracture, Intergranular corrosion susceptibility, Mechanical property

1 前言

随着汽车轻量化发展以及节能减排政策的持续落地，铝合金材料愈发受到广泛关注。6系铝合金（Al-Mg-Si系变形铝合金）因具有密度低、比强度高、成形性好、较高强度和良好的焊接性能、抗腐蚀性能，已经广泛应用于汽车制造、航空航天等领域[1-3]。

作者简介：周一帆（1997—），男，工程师，硕士学位，研究方向为铝合金材料开发及热处理等。

参考文献引用格式：

周一帆，项文娟，李月，等. 时效处理对6082铝合金力学性能和晶间腐蚀抗性的影响[J]. 汽车工艺与材料，2026(6): 54-59.

ZHOU Y F, XU W J, LI Y, et al. Effects of Aging Treatment on Mechanical Properties and Intergranular Corrosion Resistance of 6082 Aluminum Alloy[J]. Automobile Technology & Material, 2026(6): 54-59.

6系铝合金想要同时获得更高的强度和较高的韧性需要进行强化处理，其中，时效处理是变形铝合金最常用、最经济且效果明显的强化工艺。其原理主要是以析出强化为主，时效析出相的析出序列普遍被认为是：过饱和固溶体(SSSS)→溶质原子团簇（cluster）→GP区(MgSi)/initial-β″(Mg2Al6Si3)→β″(Mg5Si6或$Mg_4Al_3Si_4$)→β′(Mg_9Si_5)→β(Mg_2Si)，其中在峰值时效起主要强化作用的是β″相[4-5]。李海等[6]以Al-Mg-Si-Cu铝合金为研究对象，发现经不同时效时间的时效处理后，Al-Mg-Si-Cu铝合金的电导率随时效温度的升高和时间的延长而增大，且晶间腐蚀深度先增大后减小。

然而，在不同时效制度下合金的微观组织、力学性能及抗腐蚀性能均存在明显差异。本文以6082铝合金挤出型材为研究对象，在200 ℃下进行全时段时效试验，以得到包含欠时效、峰值时效和过时效的时效曲线，通过不同时效状态的6082铝合金微观组织、力学性能及腐蚀性能的试验分析，为在量产中根据客户要求优化铝合金时效工艺提供理论依据和实践指导。

2　试验材料及方法

试验材料采用厚度为2 mm的T4态6082铝合金制成的某新能源汽车后防撞梁产品，化学成分如表1所示。

表1　6082铝合金化学成分（质量分数）　%

元素	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Ti
质量分数	0.50~0.90	0.70~1.00	0.11	0.20~0.60	≤0.10	≤0.10

试验使用程序控制的高温箱在200 ℃的热处理温度下分别进行1~10 h（时间间隔为1 h）的单级时效，每组3个平行试样，采用如图1所示60 min线性升温+保温的时效工艺来模拟生产实际过程，热处理后进行性能测试。拉伸试验根据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》采用万能拉伸试验机进行，拉伸试样尺寸选用国标A30试样，并沿挤出方向取样。晶间腐蚀试验根据GB/T 7998—2023《铝合金晶间腐蚀敏感性评价方法》进行，样品尺寸为30 mm×60 mm，试验步骤如下：

a. 试样预处理。采用有机溶剂（如酒精、汽油、丙酮等）擦净表面油污，浸入100 g/L的氢氧化钠溶液中10 min后用水冲洗；浸入密度为1.4 g/mL的硝酸中1 min，用水冲洗，在空气中晾干。

b. 溶液配制。将57 g氯化钠溶于少量水中，搅拌均匀，用水稀释至990 mL。再将试液加热至试验温度（30±3）℃，添加10 mL质量分数为30%的过氧化氢，再搅拌均匀。

c. 开始试验。试样应完全浸没于（30±3）℃的试验溶液中并保持恒温，上端距试液界面不小于25 mm，试样间互不接触，且试样不与容器接触，同时试液体积与试样被浸面的面积之比≥5 mL/cm^2。

d. 腐蚀观察。取出样品后用水清洗并晾干，将试样在中间位置切开，横截面进行预磨、抛光，在蔡司金相显微镜上观察腐蚀特征。微观检测部分，采用扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）观察热处理后拉伸试样的断口形貌及第二相形貌。

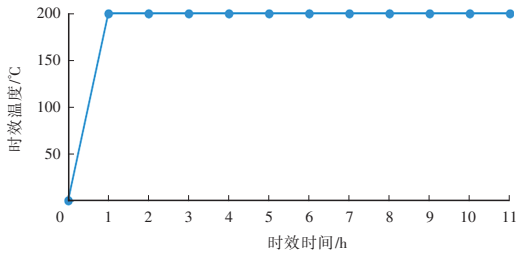


图1　时效工艺示意

3　试验结果与分析

3.1　拉伸性能分析

在实际生产中，金属材料的拉伸试验是最常用、最快捷衡量材料综合力学性能的方法，因此使用拉伸试验得到的屈服强度、抗拉强度以及延伸率作为性能指标。图2所示为6082铝合金在200 ℃下的时效性能曲线，包括了欠时效、峰时效和过时效3个阶段。可以看出，在较高的温度下，欠时效阶段铝合金的强度快速上升，仅仅保温2 h便达到峰值（应力应变曲线如图3所示），取2次试验平均值，此时屈服强度和抗拉强度分别为294.71 MPa和327.32 MPa，但同时也伴随延伸率的快速下降，到达峰时效的前1 h内下降了17.98%。随着时效时间不断延长，进入过时效阶段，屈服强度和抗拉强度同步开始下降，下降过

程较为平缓，保温 10 h 时屈服强度和抗拉强度较峰值分别下降 19.7% 和 14.4%，而延伸率在峰时效及之后始终保持在 11% 左右，这意味着过时效阶段始终保持较好的塑性变形能力。

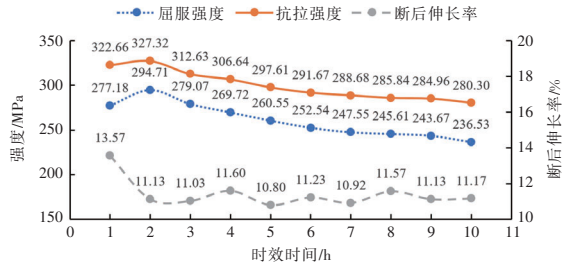


图 2　6082 铝合金 200 ℃时效性能曲线

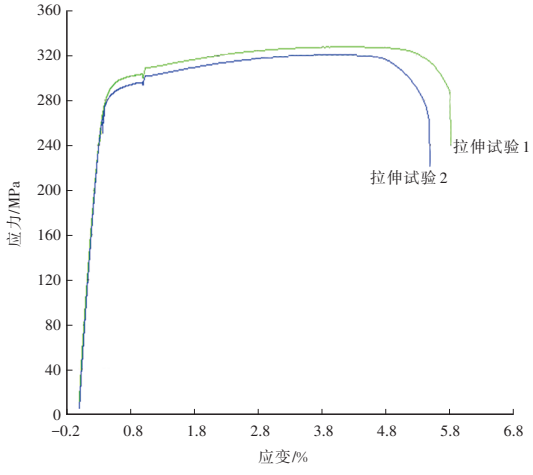
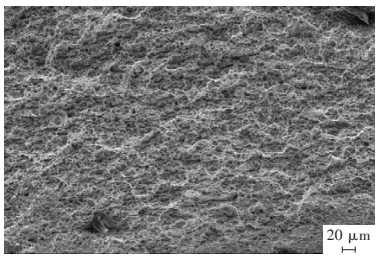


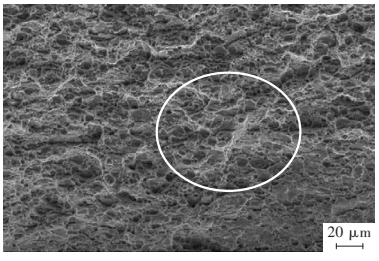
图 3　6082 铝合金峰时效(2 h)应力应变曲线

3.2　断口分析

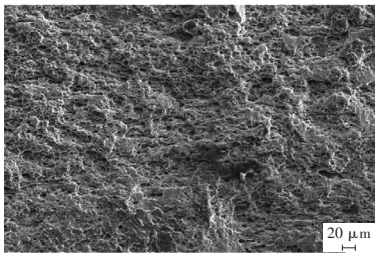
选择拉伸试验中的 200 ℃×1 h、200 ℃×2 h、200 ℃×6 h、200 ℃×10 h 共 4 个试样，分别代表合金的欠时效、峰时效、过时效及较长过时效状态，使用扫描电镜进行拉伸断口分析(图 4)。从图 4a、图 4b 可以看出，断口主要由大量的撕裂棱和极细小而浅的韧窝组成，一些区域甚至存在网状撕裂棱，且纤维区灰度小，虽为韧性断裂但韧窝大小差异较大且分布不均匀。图 4c 和图 4d 中随着时效时间增加，纤维区灰度明显增大，有更大更深的等轴韧窝产生且分布均匀性和密度明显提高，是典型的韧性断裂[7-8]。时效时间继续延长至 6 h 时，图 4e 和图 4f 中的韧窝尺寸和数量较图 3d 有明显下降，韧窝类型由等轴韧窝逐渐转变为撕裂韧窝，一些区域开始产生大小不一的空洞，合金强度下降明显。随着时效时间持续延长至 10 h，韧窝数量和分布均匀性均下降明显，以细小而浅的韧窝和撕裂棱占据主导，属于混合断裂形式[9-11]。



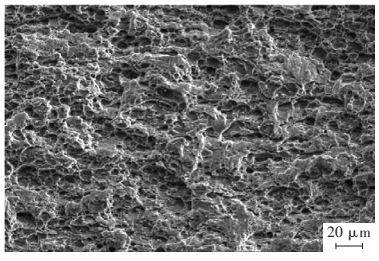
(a)200 ℃×1 h 试样低倍断口形貌



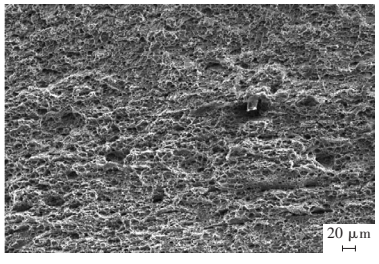
(b)200 ℃×1 h 试样高倍断口形貌



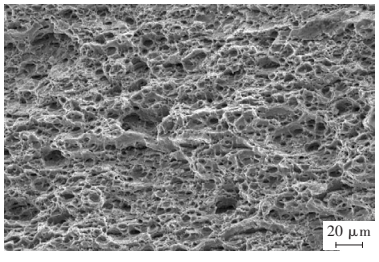
(c)200 ℃×2 h 试样低倍断口形貌



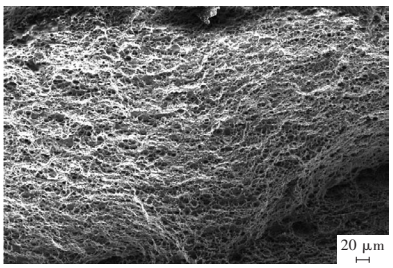
(d)200 ℃×2 h 试样高倍断口形貌



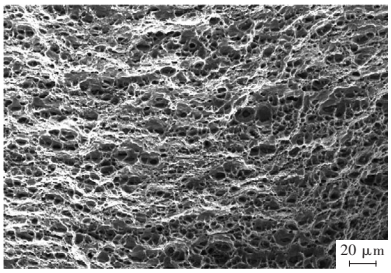
(e)200 ℃×6 h 试样低倍断口形貌



(f)200 ℃×6 h 试样高倍断口形貌



(g)200 ℃×10 h试样低倍断口形貌

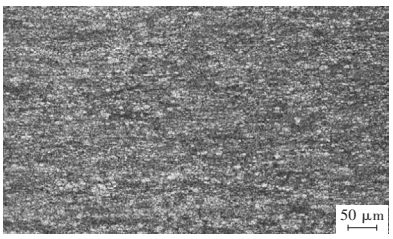


(h)200 ℃×10 h试样高倍断口形貌

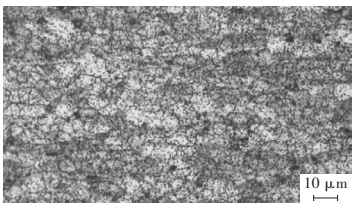
图4　不同时效制度下6082铝合金的断口形貌

3.3　微观组织检测

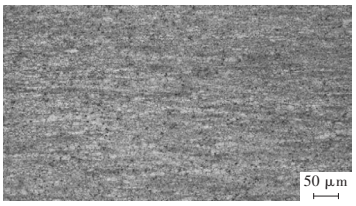
图5所示为200 ℃×1 h、200 ℃×2 h、200 ℃×6 h、200 ℃×10 h共4个试样的金相组织,图5a、图5b中可以观察到合金被挤压拉长并带有取向性的变形晶粒,有较为明显的分层和偏聚现象。在基体内分布着黑色硬质相,其轮廓尖锐、形状不规则;而析出的强化相尺寸较大且分布不均匀,对于合金的强化效果有限。图5c、图5d中合金经过挤压变形使晶粒得到细化[12-13],由长条状转变为短棒状或块状;基体中黑色块状难溶相细化效果同样显著,由不规则块状转变为尺寸更小的球状或点状;同时,位错的引入,可以作为合金元素快速扩散的通道和优先形核点位,促进时效时第二相粒子的形核和长大,晶内及晶界处有更多强化相析出,弥散分布程度增大,可形成共格畸变,当位错运动切割新相时,需要做更多的功,提高了抗拉强度[14-15]。随着时效时间继续延长,图5e、图5f中黑色高温难溶相有明显粗化,强度下降明显[16-17]。



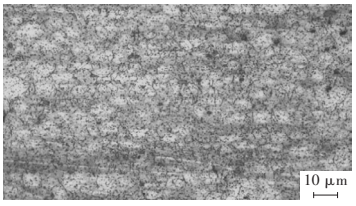
(a)200 ℃×1 h试样低倍金相组织



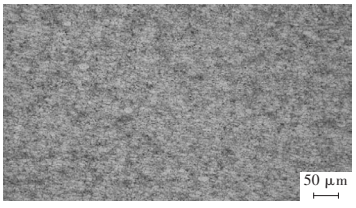
(b)200 ℃×1 h试样高倍金相组织



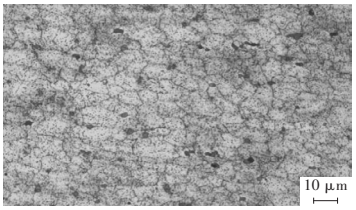
(c)200 ℃×2 h试样低倍金相组织



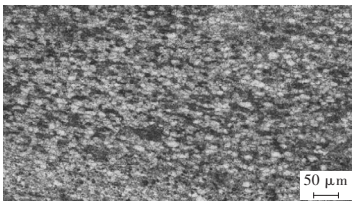
(d)200 ℃×2 h试样高倍金相组织



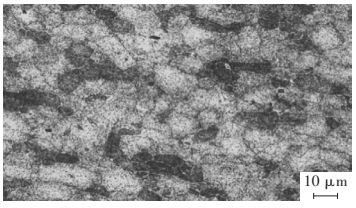
(e)200 ℃×6 h试样低倍金相组织



(f)200 ℃×6 h试样高倍金相组织



(g)200 ℃×10 h试样低倍金相组织

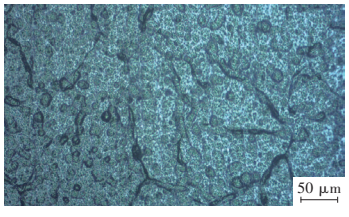


(h)200 ℃×10 h试样高倍金相组织

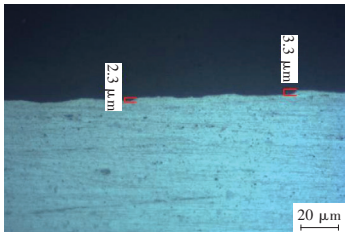
图5　不同时效制度下6082铝合金的金相组织

3.4 晶间腐蚀性能

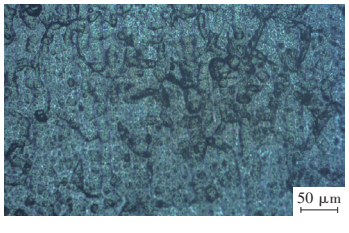
图6所示为不同时效制度下6082铝合金的晶间腐蚀后表面形貌。晶间腐蚀的原理是固溶时效过程中晶界处析出的强化相与基体组织存在电势差，在适当的腐蚀环境下发生电化学反应，继而破坏晶界，发生腐蚀。时效时间较短时，晶界处时效析出相较少，与基体间的电势差较小，晶间腐蚀敏感性较低[18]，合金腐蚀表面大多为独立的点状腐蚀坑及少量裂纹，腐蚀深度仅有3.3 μm，如图6a~图6b；随着时效时间的延长，晶界处第二相的析出数量逐渐增多，与基体间的电势差增大[19]；峰时效时，如图6c~图6d所示，裂纹数量明显增加且变宽，点蚀逐渐扩大并相互连通，腐蚀坑深度达到8.9 μm；当过了峰时效后，如图6e~图6h所示，腐蚀坑和裂纹数量明显减少，且腐蚀晶间腐蚀敏感性显著降低，腐蚀坑深度也逐渐减小至2.5 μm[20]。



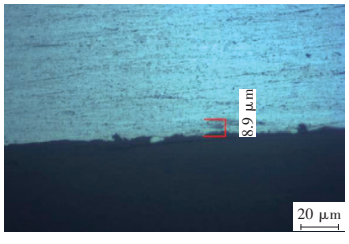
(a)200 ℃×1 h试样晶间腐蚀表面形貌



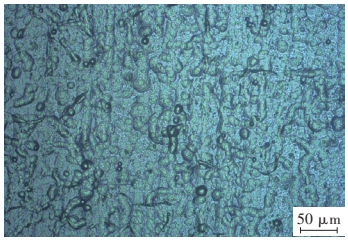
(b)200 ℃×1 h试样晶间腐蚀深度



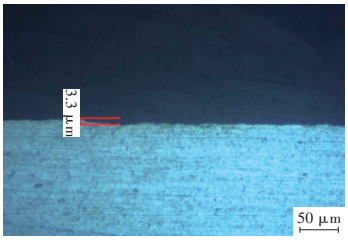
(c)200 ℃×2 h试样晶间腐蚀表面形貌



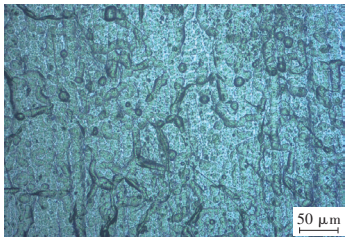
(d)200 ℃×2 h试样晶间腐蚀深度



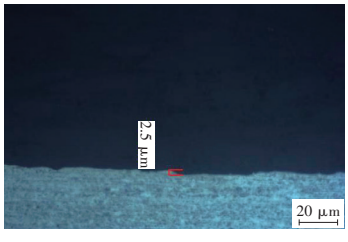
(e)200 ℃×6 h试样晶间腐蚀表面形貌



(f)200 ℃×6 h试样晶间腐蚀深度



(g)200 ℃×10 h试样晶间腐蚀表面形貌



(h)200 ℃×10 h试样晶间腐蚀深度

图6 不同时效制度下6082铝合金的晶间腐蚀后表面形貌

4 结论

a. 在200 ℃下，6082铝合金强度随时效时间的延长先增大后减小。合金断口由大量的撕裂棱和少量细小而浅的韧窝逐渐转变为大量等轴韧窝，过时效时韧窝数量和分布均匀性较峰时效均下降明显，为混合断裂形式。

b. 随着时效时间的延长，合金基体内部的强化相析出数量增多，尺寸增大，且分布密度也相应提高。200 ℃×2 h时效处理后，强化相质点在基体中分布密度达到峰值。

c. 合金的晶间腐蚀敏感性随着时效时间先增加后降低，在欠时效和过时效时均表现出较强的晶间腐蚀抗性。因此，6082铝合金在欠时效态兼

具较高的强度和晶间腐蚀抗性，在大规模量产应用时可有效降低生产成本。

参考文献：

[1] 刘贞山, 李英东, 赵经纬, 等. 汽车轻量化用铝合金材料及应用技术的研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 786-795+807.

[2] LERVIK A, WENNER S, LUNDER O, et al. Grain Boundary Structures and Their Correlation with Intergranular Corrosion in An Extruded Al-Mg-Si-Cu Alloy[J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110695.

[3] WANG X, GUO M, LUO J, et al. Effect of Intermediate Annealing Time on Microstructure, Texture and Mechanical Properties of Al-Mg-Si-Cu Alloy[J]. Materials Characterization, 2018, 142: 309-320.

[4] MAO H, KONG Y, CAI D, et al. Computational Materials Science[J]. 2020, 184: 109878.

[5] 张兵, 叶俊峰, 胡玉军,等. 车用6XXX系铝合金时效工艺与微合金化研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44 (9): 802-813.

[6] 李海, 田奎生, 王芝秀. 单级时效对Al-Mg-Si-Cu合金拉伸及晶间腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (16): 111-114.

[7] 王加兴, 王晓光, 于金凤, 等. 在线淬火强度对6×××系铝合金型材腐蚀性能的影响[J]. 铝加工, 2023, 6: 32-34+46.

[8] 谢文涛. 限制模压变形与热处理对6061铝合金组织性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.

[9] KHISHEH S, KHALIL K, AZADl M, et al. Influences of Roughness and Heat Treatment on High-Cycle Bending Fatigue Properties of A380 Aluminum Alloy under Stress Controlled Cyclic Loading[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 264: 124475.

[10] 范金琦, 崔旭华, 马慧娟, 等. 焊后热处理对2219铝合金搅拌摩擦焊接头的影响 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (6): 293-300.

[11] 张今捷. 热处理工艺对6082铝合金晶间腐蚀规律的影响[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.

[12] 韩如意, 董刘颖, 冯哲, 等. 高、低温时效处理对6xxx系铝合金性能的影响 [J]. 热处理技术与装备, 2024, 45 (4): 52-56+61.

[13] 李恩波, 谢海光, 王宇, 等. 热处理工艺对6110A铝合金棒材性能和组织的影响[J]. 有色金属加工, 2022, 51 (4): 38-43.

[14] 吴海旭, 杨丽, 耿庆涛, 等. 应力时效对车用6005A铝合金性能影响研究[J]. 轨道交通材料, 2025, 4(4): 46-49+53.

[15] 贾宇博, 朱源, 金曼. 双级时效对Al-Mg-Si合金力学性能和耐晶间腐蚀性能的影响[J]. 上海金属, 2017, 39 2: 10-14.

[16] 张兵, 叶俊峰, 胡玉军,等. 车用6XXX系铝合金时效工艺与微合金化研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44 9: 802-813.

[17] 史晓成, 付裕, 刘贞山, 等. 555℃均匀化时间对Al-0.9Mg-0.9Si-0.8Cu-0.5Mn合金显微组织和性能的影响[J]. 轻金属, 2023, 12: 38-42.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属显微组织检验方法: GB/T 13298-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[19] 李炯辉, 林德成. 金属材料金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[20] 毛佩, 吴子彬, 冯志鑫, 等. Cr元素对6061铝合金腐蚀行为及腐蚀损伤敏感性的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2026, 1: 1-14.

AT&M