

# 蠕变时效对Al-0.62Mg-0.55Si合金耐晶间腐蚀性能的影响

杜方超<sup>1</sup>, 王宇<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>湖南汽车工程职业大学公共课教学部, 湖南 株洲

<sup>2</sup>湖南汽车工程职业大学航空工程学院, 湖南 株洲

<sup>3</sup>新能源汽车节能设计与绿色制造湖南省工程研究中心, 湖南 株洲

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘要

本文采用晶间腐蚀浸泡实验、透射电子显微镜(TEM)等方法,研究了蠕变时效工艺参数(单轴拉应力和蠕变时效时间)对Al-0.62Mg-0.55Si合金晶间腐蚀性能的影响。试验结果表明,实验用峰值时效态Al-Mg-Si合金的晶间腐蚀敏感性随外加应力增大而减小,外加应力为75 MPa时,试样晶间腐蚀深度最小;在相同外加应力条件下,轻微过时效的试样(75 MPa/12h)表现最优的耐晶间腐蚀性能,且能较好地协调强度与耐蚀性。透射电镜显微组织分析结果表明,一方面,外加应力的引入,促进了析出相的析出,同时降低了PFZ宽度,从而降低了晶界析出相与PFZ形成腐蚀微电偶的几率;另一方面,晶界析出相呈断续分布,切断了腐蚀扩展通道,使轻微过时效的75 MPa/12h试样获得较好的耐晶间腐蚀性能。

## 关键词

Al-Mg-Si合金, 蠕变时效, 晶间腐蚀, 晶界析出相, 晶界无沉淀析出带

# Effects of Creep Aging on Intergranular Corrosion Resistance of Al-0.62Mg-0.55Si Alloy

Fangchao Du<sup>1</sup>, Yu Wang<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of General Education, Hunan Automotive Engineering Vocational University, Zhuzhou Hunan

<sup>2</sup>School of Aviation Engineering, Hunan Automotive Engineering Vocational University, Zhuzhou Hunan

<sup>3</sup>Hunan Engineering Research Center for Energy-Saving Design and Green Manufacturing of New Energy Vehicles, Zhuzhou Hunan

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

\*通讯作者。

## Abstract

The effects of creep aging process parameters (uniaxial tensile stress and creep aging time) on the intergranular corrosion (IGC) resistance of Al-0.62Mg-0.55Si alloy were investigated in this paper by means of IGC immersion test and transmission electron microscopy (TEM). The test results showed that the IGC susceptibility of the peak-aged experimental Al-Mg-Si alloy decreased with increasing of applied stress; the minimum IGC depth is observed in the specimen under an applied stress of 75 MPa. Under the same applied stress condition, the slightly overaged specimen (75 MPa/12h) exhibits the best IGC resistance and achieves a favorable balance between strength and corrosion resistance. TEM microstructure analysis revealed that, on the one hand, the applied stress promotes precipitation while reducing the width of the precipitate-free zone (PFZ), thereby decreasing the probability of forming corrosion micro-galvanic couples between grain boundary precipitates and the PFZ. On the other hand, the grain boundary precipitates are discontinuously distributed, which interrupts the corrosion propagation path, enabling the slightly overaged 75 MPa/12h specimen to obtain good IGC resistance.

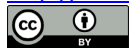
## Keywords

Al-Mg-Si Alloys, Creep Aging, Intergranular Corrosion, Grain Boundary Precipitates, Precipitate-Free Zone (PFZ)

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国内新能源汽车工业的蓬勃发展,轻量化制造已成为提升续航能力与能效的核心途径之一[1]-[3]。Al-Mg-Si合金因具有较高的比强度和良好的成形性,被广泛用于车身结构件、电池托盘等关键部件[3][4]。然而,为了满足日益增长的轻量化与结构安全需求,汽车用Al-Mg-Si合金往往需要通过合金化设计和时效强化来进一步提高合金综合性能[5][6]。目前,以第二相强化理论为基础,通过优化合金中Mg、Si元素配比,并提高Cu、Cr、Mn等元素含量,可以获得显著的时效强化效果[7]-[9]。然而,这些元素的添加可能导致腐蚀敏感性显著增加,难以实现强度与耐蚀性能的协同。例如,Mg/Si摩尔比低于1.73时,晶界处会同时析出Mg<sub>2</sub>Si相与富Si颗粒;添加的Cu元素会富集在晶界形成富Cu元素薄膜;Cr、Mn元素形成的弥散结晶相,等等[10]-[14]。上述组织均与晶界无沉淀析出带、基体等在车辆服役环境中容易形成腐蚀微电偶,进而加剧点蚀和晶间腐蚀(IGC)倾向,影响车辆结构安全性。

为协同提升强度与耐腐蚀性,近年来研究人员将蠕变时效(CA)引入Al-Mg-Si合金的制备流程[15]-[18]。该技术利用外加应力和时效温度的协同作用,在成形的同时实现时效强化,显著提高了合金峰值时效下的强度,如文献[17][18]等均研究了蠕变时效对Al-Mg-Si合金力学性能的影响,结果表明,随着外加应力的引入,合金峰值强度显著提高,且达到峰值所需时间显著缩短。然而,对于外加应力的引入对合金晶界析出特征的调控行为及其对耐晶间腐蚀性能的影响目前仍鲜见文献报道。尤其是针对能够协同Al-Mg-Si合金强度与耐蚀性能的蠕变时效工艺参数(如温度、应力、时间等)的研究目前仍十分有限。

因此,本文研究了蠕变时效对Al-Mg-Si合金耐晶间腐蚀性能的影响,揭示单轴拉应力调控合金晶间腐蚀性能的相关机理,旨在为协同Al-Mg-Si合金强度与耐腐蚀性能的蠕变时效工艺优化提供理论依据。

## 2. 试验材料与方法

实验用初始材料为 2.5 mm 厚 Al-Mg-Si 合金 T4 态挤压材, 其实测化学成分为 Al-0.62Mg-0.55Si-0.15Cu-0.25Mn-0.10Cr-0.14Fe (wt%), 其光学金相组织如图 1 所示, 其特征为表层约 100  $\mu\text{m}$  厚粗晶层 + 挤压纤维组织。材料按图 2 所示尺寸加工成试样后, 在 535 $^{\circ}\text{C}$  下保温 1 h 进行固溶处理, 随后采用室温水淬火, 获得后续实验用试样。试样的蠕变时效按 GB/T 2039-2012《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》的相关规定执行, 试验设备为 RWS50 型电子蠕变试验机, 蠕变时效温度为 180 $^{\circ}\text{C}$ , 外加应力分别为 0 MPa、25 MPa、50 MPa、75 MPa, 试样均时效到硬度峰值后, 进行晶间腐蚀浸泡试验。

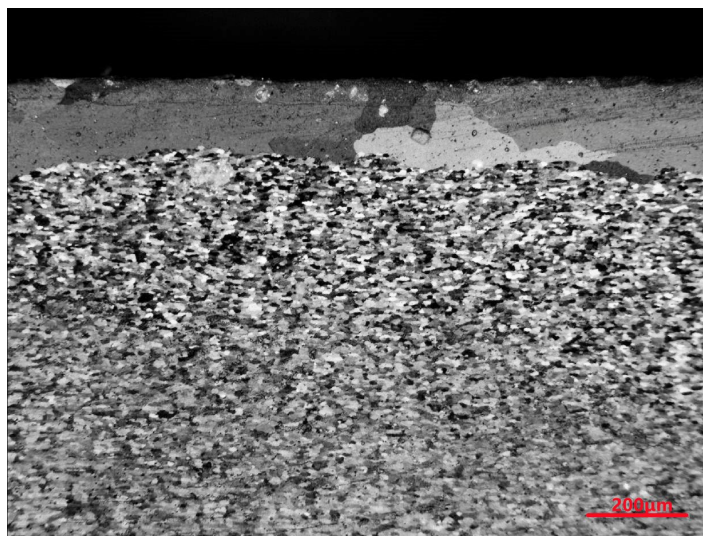


Figure 1. The optical microstructure of starting material

图 1. 初始材料的光学金相组织

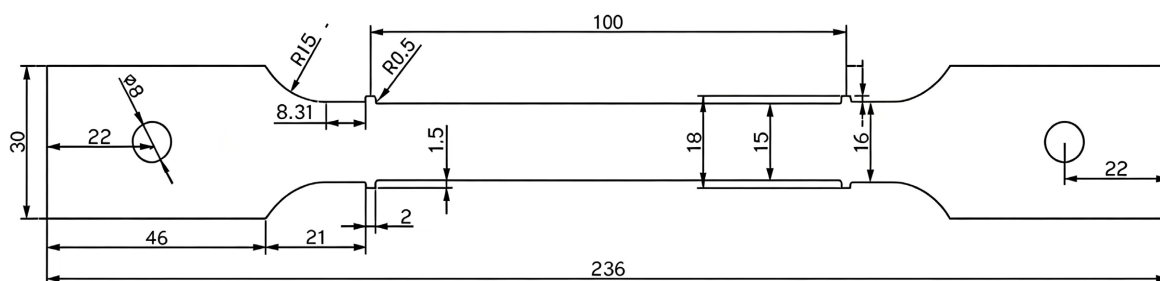


Figure 2. Schematic diagram of the specimen dimensions for creep aging

图 2. 蠕变时效试样尺寸示意图

晶间腐蚀试样经氢氧化钠溶液(1 g NaOH + 9 mL H<sub>2</sub>O)、硝酸溶液(3 mL 66.7%硝酸 + 7 mL H<sub>2</sub>O)分别清洗后, 将非实验面用松香与石蜡混合物封装, 随后浸泡在 35 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  恒温的腐蚀溶液(57g/L NaCl + 10 mL/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)中, 浸泡 24 h。浸泡完成后, 取出试样先后用水和无水乙醇清洗、干燥, 截取试样横截面按金相制样程序处理样品后, 在 OLYMPUS DSX500 金相显微镜下测量试样的腐蚀深度。

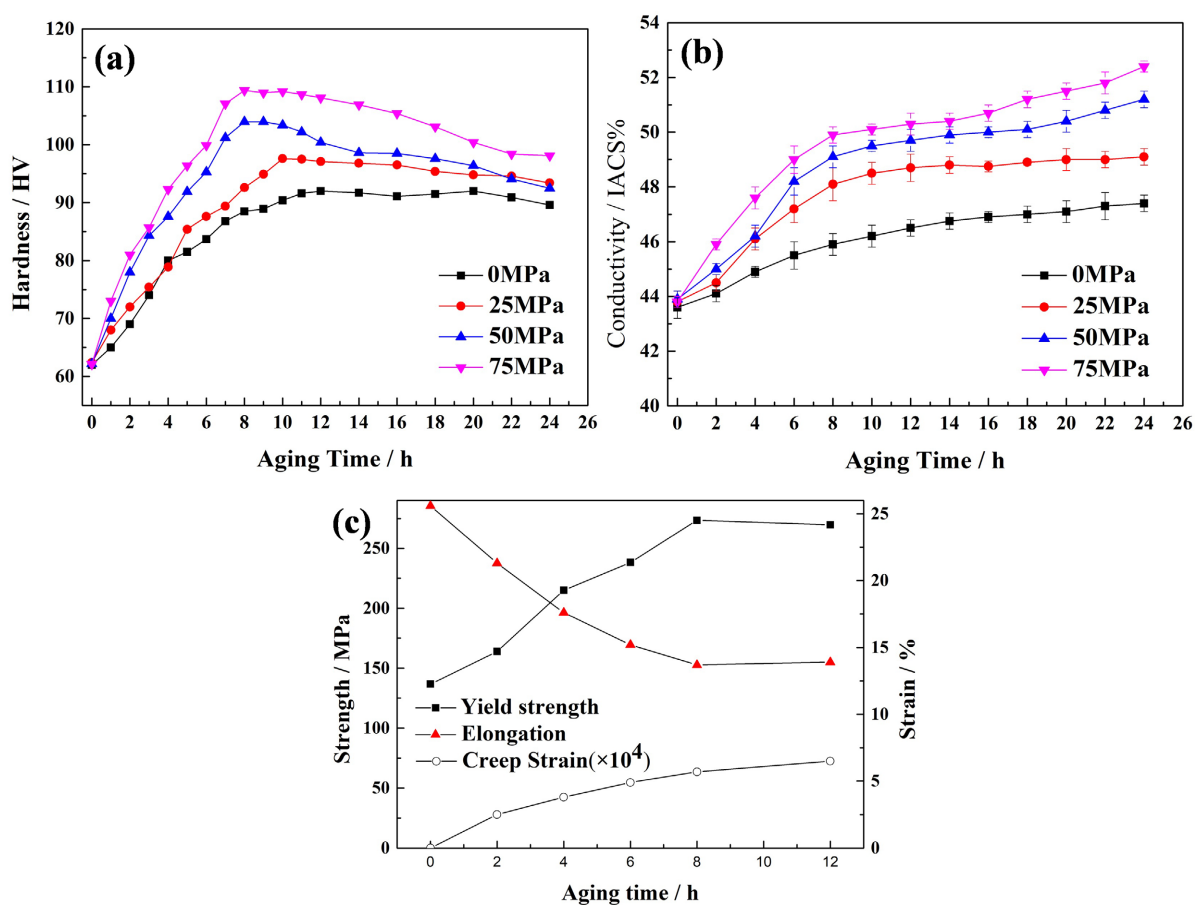
本文所涉及的硬度、电导率分别采用 HV-5 型低负荷维氏硬度计、便携式电导率测试仪进行试验。TEM 试样分别经机械减薄、人工减薄后, 采用电解双喷减薄, 电解溶液为硝酸和甲醇(体积比 3:7)的混合溶液。晶界微观组织采用 TECNAIG220 透射电子显微镜(TEM)进行观察。

### 3. 试验结果

#### 3.1. 硬度与电导率

图 3(a)为不同外加应力下蠕变时效试样的硬化曲线。从图中可见, 所有试样均表现出显著的时效硬化效应, 但外加应力大小对峰值硬度及达到峰值的时间具有显著影响。从 0 MPa 试样来看, 其峰值硬度约为 92 HV、峰值时间为 12 h, 随着外加应力的增大, 峰值硬度提高, 达到时效峰值所需时间呈减少趋势。其中外加 75 MPa 的试样硬度最高, 其硬度约为 109 HV, 其达到时效峰值的时间缩短至 8 h。从电导率来看, 如图 3(b)所示, 所有试样电导率均随时效时间的延长而呈增大的趋势, 同时随外加应力的增大, 电导率也增大, 结合时效硬化曲线可见, 在峰值蠕变时效状态下, 75 MPa 试样电导率最大, 约为 50 IACS%。

从上述结果可知, 在 75 MPa 外加应力条件下, 试样峰值时效硬度最高。因而, 选取该条件下不同时效时间的试样记录其蠕变应变并进行室温拉伸试验, 所得结果如图 3(c)所示。从图中可见, 随着蠕变时效时间的延长, 试样的蠕变应变、屈服强度均呈提高的趋势, 而断后伸长率呈下降趋势; 其峰值屈服强度约为 273.5 MPa, 达到峰值的时间为 8 h, 此结果与时效硬化曲线的结果吻合较好。当时效时间为 12 h 时, 其屈服强度约为 270 MPa, 较峰值屈服强度仅轻微下降, 表明该试样仅发生轻微过时效。

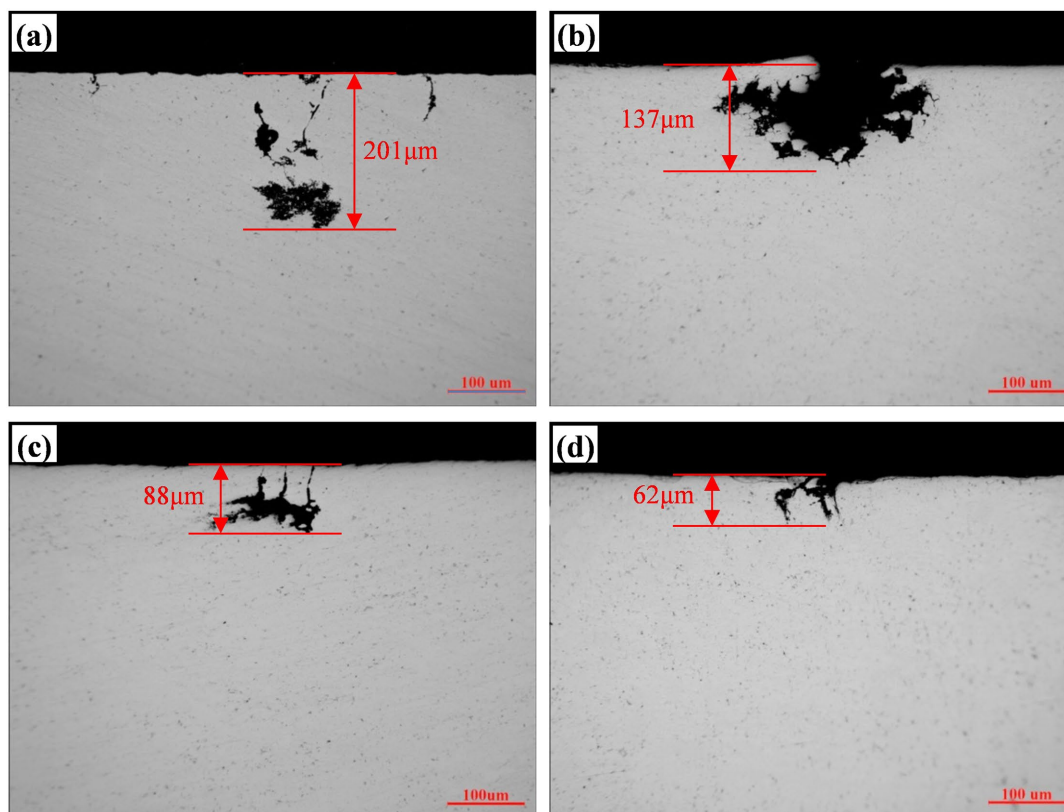


**Figure 3.** Aging hardening and electrical conductivity curves for specimens under different applied stresses: (a) Aging hardening curves; (b) Electrical conductivity curves; (c) Mechanical properties of the specimens under 75 MPa applied stress creep aging conditions

**图 3.** 不同外加应力试样的时效硬化与电导率曲线: (a) 时效硬化曲线; (b) 电导率曲线; (c) 75 MPa 外加应力下蠕变时效试样的力学性能

### 3.2. 晶间腐蚀

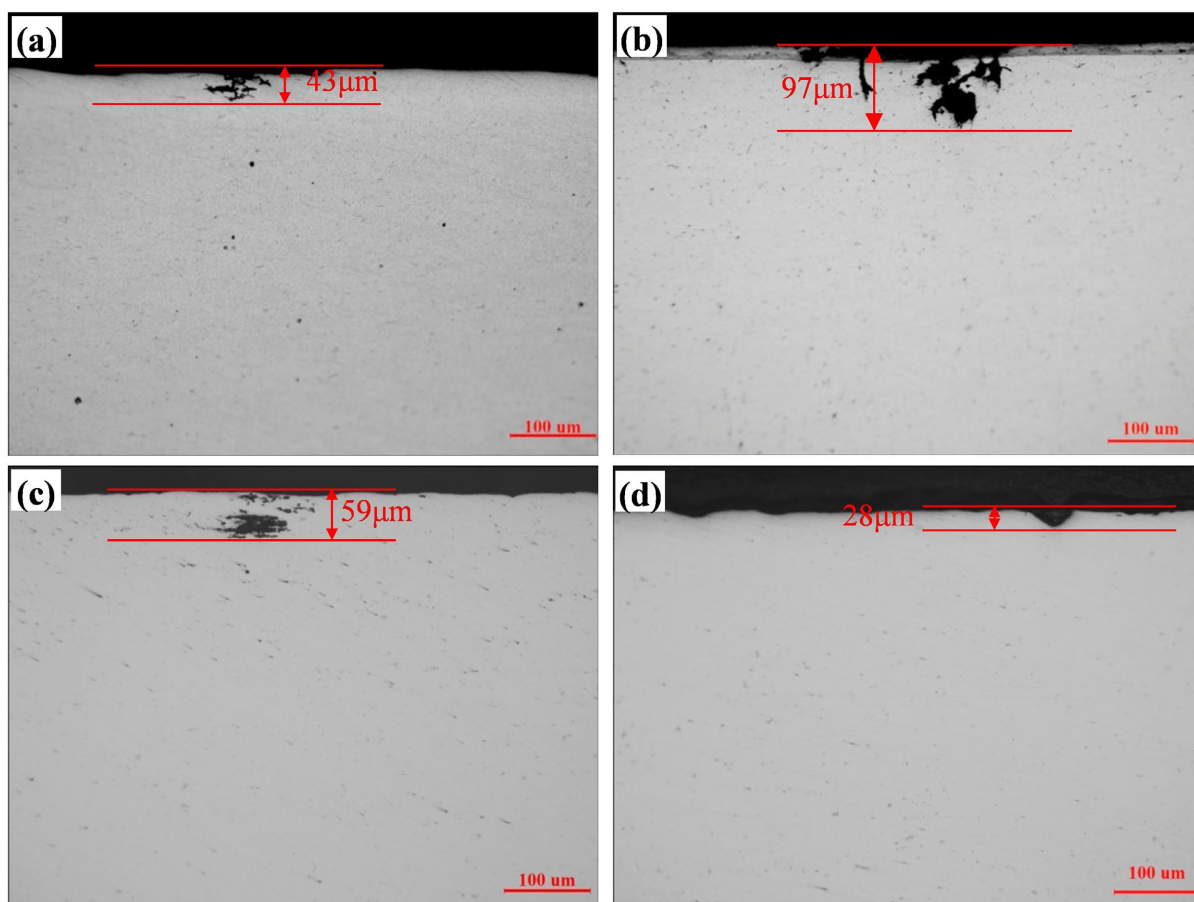
按时效硬化曲线结果取不同外加应力下的峰值时效样品进行晶间腐蚀试验, 所得结果如图 4 所示。从图中可见, 所有试样观察面上位置均可见腐蚀沿晶界扩展特征, 即所谓网状晶界, 此结果表明, 不同外加应力的峰值时效试样均表现出一定的晶间腐蚀敏感性。从横截面上腐蚀深度来看, 不同外加应力下试样的最大腐蚀深度存在显著差异, 其中 0 MPa 试样腐蚀深度最大, 约 201  $\mu\text{m}$ , 当外加应力提高至 75 MPa 时, 试样的最大腐蚀深度约为 62  $\mu\text{m}$ , 如图 4(d)所示。此结果表明, 峰值时效试样的耐晶间腐蚀性能随蠕变时效外加应力的增大而提高, 这与电导率测试结果一致。



**Figure 4.** Corrosion morphology of the samples cross-section under different stress conditions: (a) 0 MPa; (b) 25 MPa; (c) 50 MPa; (d) 75 MPa

**图 4.** 不同应力条件下试样横截面的腐蚀形貌: (a) 0 Mpa; (b) 25 MPa; (c) 50 MPa; (d) 75 MPa

为研究蠕变时效时间对合金耐晶间腐蚀性能的影响, 选取外加应力为 75 MPa 下不同时效时间的试样进行了晶间腐蚀试验, 所得结果如图 5 所示。从图中可见, 所有试样均表现出一定的腐蚀敏感性, 但其腐蚀形貌和腐蚀深度均存在一定差别。从腐蚀形貌上来看, 在峰值时效前(如图 5(a)~(c)所示)的试样均可见网状晶界特征, 此结果表明, 峰值时效前试样均发生了一定程度的晶间腐蚀, 而 75 MPa/12h 试样仅发生轻微点蚀现象, 未见网状晶界特征。从腐蚀深度来看, 75 MPa/12h 试样的最大腐蚀深度最小, 约为 29  $\mu\text{m}$ , 如图 5(d)所示; 而与峰值时效的 75 MPa/8h 试样相比, 轻微欠时效 75 MPa/6h 试样的腐蚀深度更大, 约 97  $\mu\text{m}$ (如图 5(b)、图 5(c)所示)。此结果表明, 在相同外加应力下, 轻微过时效试样的耐腐蚀性能最好; 然而, 在本文的试验条件下, 峰值时效试样的腐蚀敏感性反而较欠时效试样低, 此结果与一般认识不一致, 需要结合透射电镜显微组织作进一步分析。



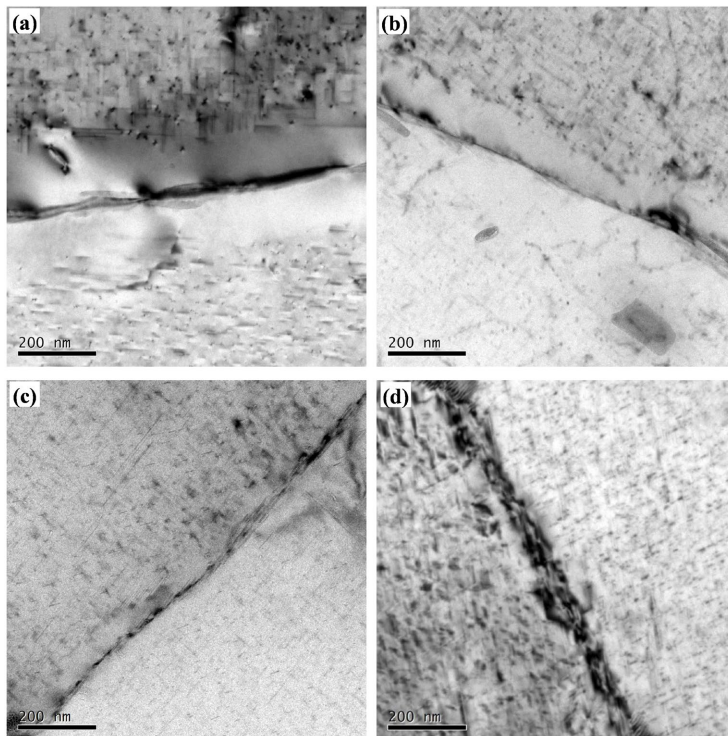
**Figure 5.** Corrosion morphology of the samples cross-section under different creep aging times: (a) 75 MPa/2h; (b) 75 MPa/6h; (c) 75 MPa/8h; (d) 75 MPa/12h

**图 5.** 不同蠕变时效时间试样横截面的腐蚀形貌: (a) 75 MPa/2h; (b) 75 MPa/6h; (c) 75 MPa/8h; (d) 75 MPa/12h

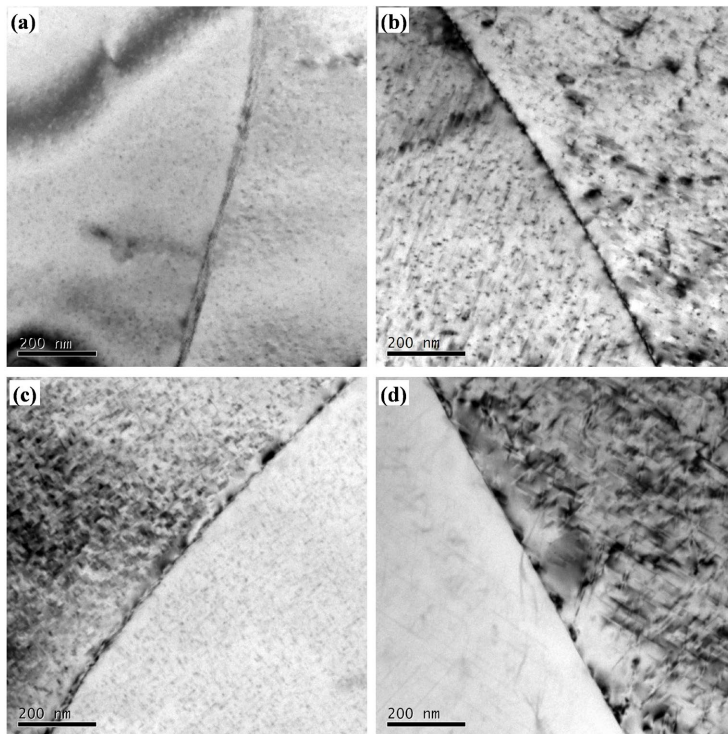
### 3.3. 透射电镜显微组织

不同外加应力下峰值蠕变时效试样的透射电镜显微组织如图 6 所示。从图中可见, 所有试样晶粒内部均密集分布着大量析出相, 显示出峰值时效的晶内析出特征, 但从晶界特征来看, 不同外加应力的峰值蠕变时效试样之间存在显著的差异。从图 6(a)来看, 0 MPa 试样晶界上可见粗大呈连续分布的析出相, 晶界两侧可见宽度约 140 nm 的无沉淀析出带(PFZ), 当外加应力提高到 25 MPa 时, 晶界析出相尺寸明显减少, 同时 PFZ 宽度也减少至约 95 nm, 随着外加应力进一步提高, 晶界析出相尺寸和 PFZ 宽度进一步减少, 到外加应力提高至 75 MPa 时, 晶界两侧几乎观察不到 PFZ 存在。此结果表明, 外加应力可减小峰值蠕变时效试样晶界 PFZ 宽度, 这种特征对晶间腐蚀敏感性存在显著的影响。

在 75 MPa 外加应力条件下, 不同蠕变时效时间试样的透射电镜显微组织如图 7 所示。从图中可见, 所有试样晶界上均分布着大量析出相, 但不同蠕变时效时间析出相尺寸及分布特征存在较大差别。75 MPa/2h 晶界上连续分布着大量细小的析出相, 如图 7(a)所示; 而 75 MPa/6h 试样上晶界析出相尺寸与 75 MPa/2h 试样相比更大, 在透射电镜视场上表现为衬度更明显。随着时效时间的延长, 到峰时效时, 75 MPa/8h 试样晶界析出相开始呈断续分布, 如图 7(c)所示, 进一步延长时效时间, 75 MPa/12h 试样晶界析出相尺寸进一步增大, 且断续分布特征较 75 MPa/8h 试样更加明显, 如图 7(d)所示。此结果表明, 随着时效时间的延长, 晶界析出相尺寸增大, 且其分布特征趋向于断续分布。



**Figure 6.** TEM microstructures of samples under different stress conditions: (a) 0 MPa; (b) 25 MPa; (c) 50 MPa; (d) 75 MPa  
**图 6.** 不同应力条件下试样的透射电镜显微组织: (a) 0 MPa; (b) 25 MPa; (c) 50 MPa; (d) 75 MPa



**Figure 7.** TEM microstructures of the samples under different creep aging times: (a) 75 MPa/2h; (b) 75 MPa/6h; (c) 75 MPa/8h; (d) 75 MPa/12h  
**图 7.** 不同蠕变时效时间试样的透射电镜显微组织: (a) 75 MPa/2h; (b) 75 MPa/6h; (c) 75 MPa/8h; (d) 75 MPa/12h

## 4. 分析与讨论

蠕变时效是在淬火态试样上外加一定应力的前提下, 将试样置于合适温度下进行的时效处理工艺。其热力条件与人工时效不同, 外加的应力在时效温度下会显著促进试样中位错的萌生和运动, 在时效过程中, 产生的位错又能作为析出相优先形核的位置, 促进析出相析出。因此, 蠕变时效的峰值时效状态较人工时效的峰值有所提前, 且其峰值硬度也较高。从本文的试验条件来看, 0 MPa 试样相当于人工时效, 因此, 其达到时效峰值的时间最长, 约为 12 h, 其峰值硬度也相应最低; 而 75 MPa 试样, 所受应力最大, 应力激发的位错数量更多, 相应地其峰值时效时间较短, 其峰值硬度也最大。

铝合金电导率与基体晶格畸变程度有关, 晶格畸变程度越大, 基体点阵中电子散射源越多, 电子平均自由程较小, 电子运动困难, 从而电导率越小。因而, 在本文的试验条件下, 时效过程中试样电导率随时效时间的延长而增加, 其主要原因是析出相的析出降低了合金基体的过饱和度, 降低了晶格畸变程度。此外, 由于引入的外加应力显著促进了析出相析出, 进一步降低了合金基体过饱和度, 因而 75 MPa 的电导率最大。

一般认为, 铝合金晶间腐蚀与其晶界特征的不均匀分布显著相关。析出相与基体之间总存在一定的电位差, 一旦接触腐蚀环境, 析出相与基体即组成腐蚀微电偶, 引发阳极溶解效应而引发腐蚀; 从而晶界析出相的分布对合金腐蚀的扩展具备显著的影响, 连续分布的析出相与其周边的无沉淀析出带组成的微电偶, 为腐蚀的扩展提供了理想的通道, 从而使得晶间腐蚀容易往试样内部扩展。在本文的试验条件下, 峰值蠕变时效试样晶界上析出相尽管都呈连续分布, 但随着外加应力的增加 PFZ 宽度逐渐变窄, 这主要是由于外加应力的引入, 引起晶界附近位错密度增大, 提高了晶界周边析出相形核的几率, 从而减少了 PFZ 宽度, 如图 6(a)~(c)所示。到外加 75 MPa 时, 试样晶界处几乎观察不到 PFZ 这种特征(如图 6(d)所示), 降低了晶界析出相与基体组成腐蚀微电偶的几率, 从而提高了合金耐晶间腐蚀性能, 因而 75 MPa 试样腐蚀深度最小。在 75 MPa 外加应力条件下, 试样中晶界附近均几乎观察不到 PFZ。从上述分析来看, 试样的腐蚀敏感性决定因素在于晶界析出相的分布情况, 从图 7(d)所示的结果来看, 轻微过时效的 75 MPa/12h 试样晶界析出相呈明显的断续分布, 切断了腐蚀扩展的通道, 因而该试样仅表现为轻微点蚀, 同时其腐蚀深度最小。同时结合力学性能试验的结果(如图 3(c)所示)来看, 该条件下试样能够较好地协调强度与耐腐蚀性能。

## 5. 结论

本文采用晶间腐蚀浸泡试验和透射电镜显微组织, 研究了蠕变时效对 Al-Mg-Si 合金耐晶间腐蚀性能的影响, 得到如下结论:

(1) 峰值蠕变时效试样的晶间腐蚀性能与外加应力大小显著相关, 随着外加应力的增大, 其耐晶间腐蚀性能提高, 外加应力为 75 MPa 时, 试样晶间腐蚀深度最小。

(2) 在 75 MPa 外加应力条件下, 试样耐晶间腐蚀性能随着蠕变时效时间的延长而提高, 轻微过时效(75 MPa/12h)试样在浸泡试验条件下仅表现出轻微点蚀, 且其最大腐蚀深度仅约 29  $\mu\text{m}$ , 能较好地协同强度与耐腐蚀性能。

(3) 外加应力的引入, 促进了析出相的析出, 同时降低了 PFZ 宽度, 当外加应力为 75 MPa 时, 峰值时效试样(75 MPa/8h)和轻微过时效试样(75 MPa/12h)晶界未见明显 PFZ, 轻微过时效试样析出相呈断续分布, 切断了腐蚀扩展通道, 使试样获得较好的耐晶间腐蚀性能。

## 参考文献

- [1] 徐柱, 何锋, 曹占勇, 等. 某轿车白车身结构强度分析与优化研究[J]. 现代制造工程, 2020(2): 82-87.

- [2] 马尚标, 邱睿, 周甘华, 等. 复合材料汽车蓄电池托盘轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(11): 191-196.
- [3] 邓运来, 张新民. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [4] Chen, X., Xu, Q., Wei, X., Huan, P. and Wang, X. (2025) High-Temperature Baking Strengthen the Al-Mg-Si Alloy Laser-Arc Hybrid Weld Seam. *Metals and Materials International*, **31**, 3107-3112. <https://doi.org/10.1007/s12540-025-01922-x>
- [5] Sun, F., Wen, X., Sun, S., Lu, Y., Xiao, W. and Ma, C. (2024) Effects of Cr Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of an Al-Si-Cu-Mg Alloy. *Materials*, **17**, Article No. 3607. <https://doi.org/10.3390/ma17143607>
- [6] Li, Y., Kahlenberg, R., Retzl, P. and Kozeschnik, E. (2026) Thermal and Athermal Nucleation of MgSi Co-Clusters in Al-Mg-Si Alloys. *Scripta Materialia*, **273**, Article ID: 117114. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2025.117114>
- [7] Gao, K., Li, Z., Dong, Q., Liu, F., Liu, Y., Qin, J., et al. (2026) Achieving Enhanced Mechanical Property of an Al-Mg-Si Alloy with Reduced Homogenization Duration by Vanadium Addition. *Journal of Materials Science*, **61**, 4753-4772. <https://doi.org/10.1007/s10853-026-12161-9>
- [8] Liu, Y., Ge, M., Zeng, G., Chen, K., Liu, S., Tang, W., et al. (2026) Mechanical Properties, Microstructure Evolution, and Strengthening Mechanism of Al-Mg-Si Alloy Welded Joints Using Double-Sided Friction Stir Welding. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **117**, Article ID: 105987. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2025.105987>
- [9] Yang, Y., Cao, L., Wu, X., Couper, M.J. and Rometsch, P.A. (2026) Effect of Natural Ageing on the Early-Stage Ageing Response of an Al-Mg-Si-Cu Alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, **257**, 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.08.048>
- [10] Zhang, X., Zhou, X. and Nilsson, J. (2019) Corrosion Behaviour of AA6082 Al-Mg-Si Alloy Extrusion: The Influence of Quench Cooling Rate. *Corrosion Science*, **150**, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.030>
- [11] Kayani, S.H., Lee, S., Lee, Y., Lee, J., Euh, K. and Cho, Y. (2026) Atomic Structure of  $\beta''$  Precipitates in High-Si Containing Al-Si-Mg Alloy. *Applied Microscopy*, **56**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1186/s42649-026-00128-8>
- [12] Svenningsen, G., Larsen, M.H., Walmsley, J.C., Nordlien, J.H. and Nisancioglu, K. (2006) Effect of Artificial Aging on Intergranular Corrosion of Extruded AlmgSi Alloy with Small Cu Content. *Corrosion Science*, **48**, 1528-1543. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.045>
- [13] Yu, H., Tieu, A.K., Lu, C., Liu, X., Godbole, A. and Kong, C. (2013) Mechanical Properties of Al-Mg-Si Alloy Sheets Produced Using Asymmetric Cryorolling and Ageing Treatment. *Materials Science and Engineering: A*, **568**, 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.01.048>
- [14] Zeng, F., Wei, Z., Li, J., Li, C., Tan, X., Zhang, Z., et al. (2011) Corrosion Mechanism Associated with Mg<sub>2</sub>Si and Si Particles in Al-Mg-Si Alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**, 2559-2567. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)61092-3](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)61092-3)
- [15] Ando, M., Niikura, A., Suzuki, Y. and Itoh, G. (2014) Effects of Aging Conditions on Creep Behavior of an Al-Mg-Si Alloy. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **64**, 229-234. <https://doi.org/10.2464/jilm.64.229>
- [16] 陈凯亮, 刘春辉, 杨建使, 等. 结合自然时效和大预变形提升 Al-Mg-Si-Cu 合金蠕变时效响应研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(5): 103-112.
- [17] 罗书径, 邓运来, 戴青松, 等. 预处理对 Al-Mg-Si 合金蠕变时效行为及力学性能的影响[J]. 材料科学, 2021, 11(1): 40-47.
- [18] 晋坤. 6156 铝合金热变形及蠕变时效的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.