

# 7075铝合金固溶后延迟时效对组织及力学性能的影响

韩冰<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>1,3\*</sup>, 张振峰<sup>2</sup>, 杨毅<sup>4</sup>, 徐严谨<sup>5</sup>

<sup>1</sup>中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>江苏江顺精密科技集团股份有限公司, 江苏 无锡

<sup>3</sup>山东省高强韧铝合金型材与技术重点实验室, 山东 临沂

<sup>4</sup>陕西飞机工业(集团)有限公司, 陕西 汉中

<sup>5</sup>中国航空制造技术研究院金属材料技术研究所, 北京

收稿日期: 2025年11月10日; 录用日期: 2025年12月14日; 发布日期: 2025年12月24日

## 摘要

本文研究了7075铝合金在固溶处理后经延迟时效工艺下的显微组织演化及力学性能变化。通过对固溶后自然时效0~40 d的硬度变化规律进行系统分析, 确定自然时效30 d为典型延迟时效状态, 并与固溶后直接人工时效状态进行对比研究。结果表明, 固溶后经自然时效30 d再进行人工时效的样品, 其抗拉强度和屈服强度均较固溶后直接人工的时效低, 但塑性较高。EBSD结果显示, 三种状态下7075铝合金均呈现明显的纤维状长条晶粒形貌, 平均晶粒尺寸差异较小, 分别为2.92  $\mu\text{m}$ 、2.91  $\mu\text{m}$ 和2.99  $\mu\text{m}$ 。KAM分析表明, 延迟时效工艺能有效调控局部应变分布与位错密度, 固溶后自然时效30 d再人工时效的样品的平均KAM值为0.69, 介于固溶态(0.59)与直接人工时效态(0.76)之间。结合位错密度计算结果( $1.03 \times 10^{15}$ 、 $1.21 \times 10^{15}$ 、 $1.33 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ), 可推断自然时效引起的原子偏聚和初生GP区形成影响了MgZn<sub>2</sub>相的析出行为。综合分析表明, 延迟时效过程对合金组织及析出相调控具有显著影响, 为高强铝合金热处理工艺的优化设计提供了理论依据。

## 关键词

7075铝合金, 力学性能, 位错密度, MgZn<sub>2</sub>相

# Influence of Delayed Aging after Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy

Bing Han<sup>1,2</sup>, Yong Zhang<sup>1,3\*</sup>, Zhenfeng Zhang<sup>2</sup>, Yi Yang<sup>4</sup>, Yanjin Xu<sup>5</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 韩冰, 张勇, 张振峰, 杨毅, 徐严谨. 7075 铝合金固溶后延迟时效对组织及力学性能的影响[J]. 材料科学, 2025, 15(12): 2226-2234. DOI: 10.12677/ms.2025.1512237

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Giansun Precision Technology Group Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

<sup>3</sup>Shandong Key Laboratory of High-Strength and Toughness Aluminum Alloy Profiles and Technology, Linyi Shandong

<sup>4</sup>Shanxi Aircraft Industry (Group) Corporation, Ltd., Hanzhong Shaanxi

<sup>5</sup>Institute of Metal Materials Technology, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing

Received: November 10, 2025; accepted: December 14, 2025; published: December 24, 2025

## Abstract

This study investigates the microstructural evolution and mechanical property changes of 7075 aluminum alloys subjected to a delayed aging process after solution treatment. The hardness evolution during natural aging after solution treatment for 0~40 days was systematically analyzed, and a 30-day natural aging condition was selected as the representative delayed aging state for comparison with the direct artificial aging condition after solution treatment. The results show that the specimen subjected to natural aging for 30 days followed by artificial aging exhibits slightly lower tensile and yield strengths, but improved ductility compared with the direct artificial aging specimen after solution treatment. EBSD observations reveal that all three states of 7075 aluminum alloys display a distinct fibrous elongated grain morphology with comparable average grain sizes of 2.92  $\mu\text{m}$ , 2.91  $\mu\text{m}$ , and 2.99  $\mu\text{m}$ , respectively. KAM analysis indicates that the delayed aging process effectively regulates local strain distribution and dislocation density; the average KAM value of the specimen with solution treatment and artificial aging after natural aging for 30 days (0.69) lies between that of the solution-treated state (0.59) and the directly aged state (0.76). Combined with dislocation density calculations ( $1.03 \times 10^{15}$ ,  $1.21 \times 10^{15}$ , and  $1.33 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ), it is inferred that atomic clustering and the formation of initial GP zones during natural aging influence the precipitation behavior of the  $\text{MgZn}_2$  phase. Overall, the results demonstrate that delayed aging significantly affects the microstructural evolution and precipitation behavior of the alloy, providing theoretical guidance for optimizing the heat treatment process of high-strength aluminum alloys.

## Keywords

7075 Aluminum Alloys, Mechanical Properties, Dislocation Density,  $\text{MgZn}_2$  Phase

Copyright © 2025 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

Al-Zn-Mg-Cu 超高强度铝合金由于其优异的强度和重量比, 广泛应用于航空航天、军事和轨道交通等领域[1][2]。其力学性能的优化, 依赖于合金中的强化析出相(如 GP 区、 $\eta'$ 相等)在不同热处理条件下的调控。固溶时效是其主要的强化机制[3]。合理的热处理工艺能够显著改善铝合金的微观组织和化学成分均匀性, 改善析出相的尺寸、形状、位置和分布, 最终达到提高合金综合力学性能的目的[4]。

对于 7075 铝合金而言, 自然时效作为一种重要的强化手段, 它的研究较少。近年来, 许多学者深入研究了自然时效对合金组织和力学性能的影响。Liu 等人[5]研究发现, 在再时效之前增加自然时效, 可以同时提高合金的强度和塑性。李承波[6]对 7055 合金在不同自然时效时间下及 121 $^{\circ}\text{C}$ /24 h 人工时效后的硬度变化进行了研究, 发现随着自然时效时间的延长, 合金的强化相尺寸有所增大, 数量逐渐增多, 从

而导致硬度值的提升。Waterloo 等人[7]研究发现,在人工时效前引入自然时效,可以显著减少预变形导致的屈服强度下降。赵小莲等人[8]对 7A04 铝合金的研究表明,人工时效前增加自然时效可以优化 7A04 铝合金的组织性能,使其晶内析出相的尺寸更加细小、分布更加均匀,进而提高 7A04 铝合金在慢速率冷却条件下的抗拉强度、屈服强度和硬度等力学性能,并保持较好的塑性。黄元春等人[9]的研究表明,通过延迟时效工艺,合金中的析出相尺寸可以被有效调控,进而实现力学性能的优化。在 7075 铝合金的研究中, Ma 等人[10]的研究表明,随着自然时效时间的延长,7075 铝合金的屈服强度和抗拉强度均显著提高,塑性略有下降。Al-Zn-Mg-Cu 合金通常可热处理合金,时效过程中形成的析出相因其抑制位错运动的作用,能显著增强强度。当析出相尺寸较小且与基体保持完全共格时(如 GP 区),位错主要通过切割机制穿过析出相;而当析出相尺寸超过临界值时,位错运动方式将转变为 Orowan 绕过机制[11]。相关研究表明,该临界尺寸通常约为 2 nm [12]。高川等人 and Zou 等人[13] [14]系统分析了固溶强化、晶界强化、位错强化及析出强化在 Al-Zn-Mg-Cu 合金强度中的相对贡献,明确  $\eta$  相及位错结构在提高强度中的作用。然而,这类研究多聚焦于标准人工时效制度,而对工程中普遍存在自然时效数十天再人工时效这一延迟时效路径关注较少。特别是,对于延迟时效过程中溶质原子再分布、位错结构演化与析出动力学变化如何协同影响最终力学性能,仍缺乏清晰且体系化的定量研究。

本研究以固溶后自然时效 30 天再人工时效的延迟时效工艺为研究对象,系统对比其与固溶后直接人工时效在显微组织与力学性能方面的差异。通过硬度、拉伸性能测试、位错密度分析及析出相尺寸统计,进一步基于 Taylor 位错强化模型及 Kocks 析出强化模型对两种热处理路径的强度贡献进行定量分析,为高强铝合金时效制度的调控与优化提供了可量化的理论依据和工艺指导。

2. 实验材料和方法

本研究使用的实验材料为 7075 铝合金挤压棒材,直径为 35 mm,其化学成分列在表 1 中。本文研究固溶后延迟时效对组织及力学性能的影响,因此设计了 2 种热处理工艺路线,一种在 475℃固溶 75 min 后直接在 120℃时效 24 h,一种在 475℃固溶 75 min 后停放 30 天后再在 120℃时效 24 h,其热处理工艺如图 1 所示。

Table 1. Chemical compositions of 7075 aluminum alloy extruded bars (mass fraction)

表 1. 7075 铝合金挤压棒材的化学成分(质量分数)

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
7075	0.04	0.17	1.76	0.04	2.28	5.28	0.05	0.21	Bal.

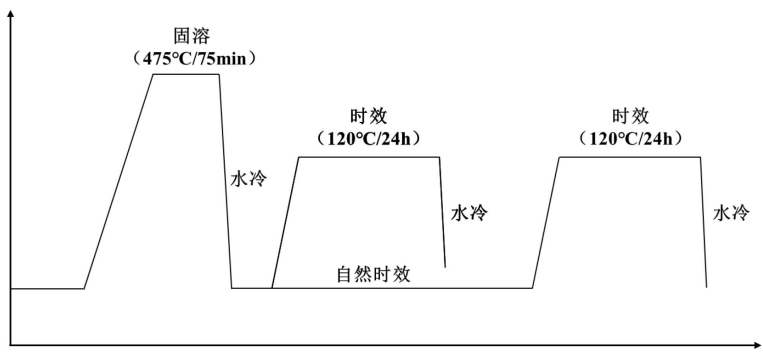
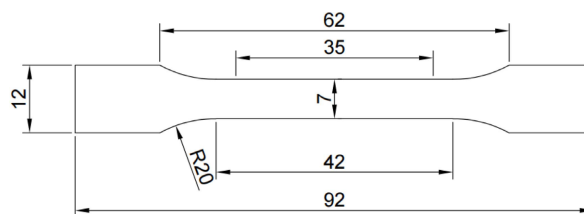


Figure 1. Schematic diagram of heat treatment process  
图 1. 热处理过程示意图

硬度测试依据国标《金属材料维氏硬度试验第 1 部分: 试验方法》(GB/T 4340.1-2009)标准进行实验,

采用的设备为 VH1202 型维氏硬度计。样品经水磨砂纸和金相砂纸磨至镜面状态后进行测试, 设定的加载载荷为 0.5 kg, 单位为 HV。按照国家标准 GB/T 228-2002 《金属材料室温拉伸试验》进行室温拉伸试验。拉伸试样的形状和尺寸如图 2 所示。使用最大量程为 100 kN 且配备有引伸计的 Landmark MTS 370.10 型拉伸机进行拉伸性能测试, 拉伸速度为 2 mm/min。



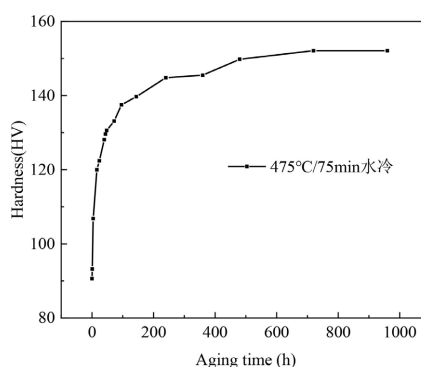
**Figure 2.** Dimension diagram of tensile specimen for the 7075 aluminum alloy  
**图 2.** 7075 铝合金拉伸试样尺寸图

使用配备有能量分散谱仪的场发射扫描电子显微镜(SEM, JEOL-IT800)表征 7075 铝合金样品的显微组织形貌, 利用 ImageJ 软件统计第二相的平均粒径与面积分数。将试样表面依次用 800#和 1500#砂纸打磨, 然后用 1.0  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$  金刚石抛光膏抛光, 最后进行电解抛光(电解液: 高氯酸 + 乙醇 = 1:9, 电压 20 V, 时间 10 s)。采用场发射扫描电子显微镜配备的背散射电子衍射(EBSD)探测器进行测试, 利用 OIM 软件分析晶粒结构及位错密度。采用透射电子显微镜(TEM)进行观察, 利用 ImageJ 软件统计析出相的平均尺寸。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 7075 铝合金的硬度与力学性能

图 3 为 7075 铝合金自然时效阶段(0~30 d)的硬化曲线。从图 3 可以看出, 合金在固溶处理后初始硬度为约 90.6 HV, 随后随时效时间的延长硬度逐渐升高, 表现出典型的自然时效硬化规律。至 96 小时, 硬度迅速提升至 137.5 HV, 表明合金中溶质原子(主要为 Zn、Mg、Cu)开始扩散并形成大量溶质原子团簇(即 GP 区), 对位错运动产生显著钉扎作用。随着时效时间的进一步延长(96 h), 硬度快速上升至 137.5 HV。此后硬度上升速率逐渐减缓, 在 30 天(约 720 h)左右趋于稳定, 最高硬度约为 152 HV, 说明自然时效过程基本完成。根据自然时效硬化曲线分析, 为了研究自然时效对后续人工时效强化效果的影响, 本文选择自然时效 30 h 的样品作为后续实验的代表。该时间点对应硬度显著上升阶段, GP 区已开始形成, 但析出尚未饱和, 能很好体现自然时效对后续时效强化潜力的影响。



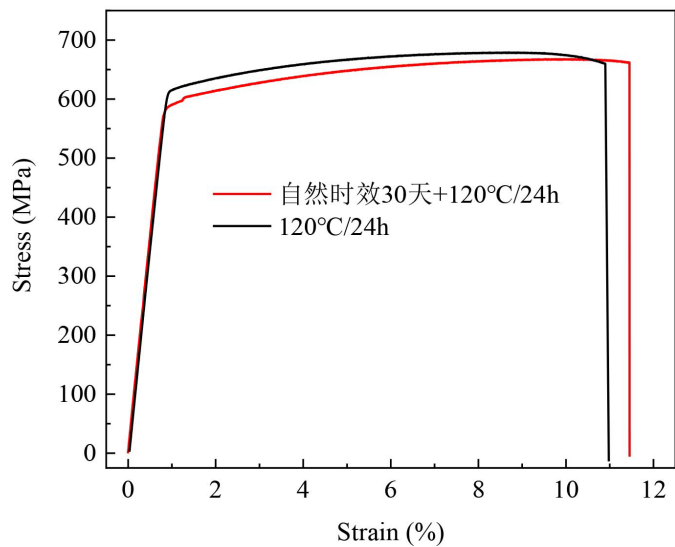
**Figure 3.** Hardening curve of 7075 aluminum alloy during the natural aging stage  
**图 3.** 7075 铝合金自然时效阶段的硬化曲线

图 4 为固溶后直接人工时效与固溶后自然时效 30 h 再进行人工时效样品的应力应变曲线。表 2 为两种时效状态的拉伸性能数据。结果表明, 7075 铝合金经过不同的时效处理工艺后, 其力学性能显示出差异。通过固溶处理后, 7075 铝合金经过 120℃/24 h 的人工时效, 其抗拉强度达到 681.0 MPa, 屈服强度为 619.0 MPa, 延伸率为 10.43%。与此相比, 经过自然时效 30 天后再进行 120℃/24 h 人工时效的样品, 其抗拉强度为 668.0 MPa, 屈服强度为 604.1 MPa, 延伸率为 11.76%。这一结果表明, 虽然自然时效 30 天后再进行人工时效的样品在抗拉强度和屈服强度上有所下降, 但延伸率得到了提高。说明自然时效 30 d 这一阶段对析出强化起到了明显的调控作用。

**Table 2.** Tensile properties of 7075 aluminum alloy under two aging processes

**表 2.** 7075 铝合金两种时效工艺的拉伸性能

时效工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
自然时效 30 d + 120℃/24 h	668.0	604.1	11.76
120℃/24 h	681.0	619.0	10.43



**Figure 4.** Stress-strain curves of 7075 aluminum alloy under two aging processes

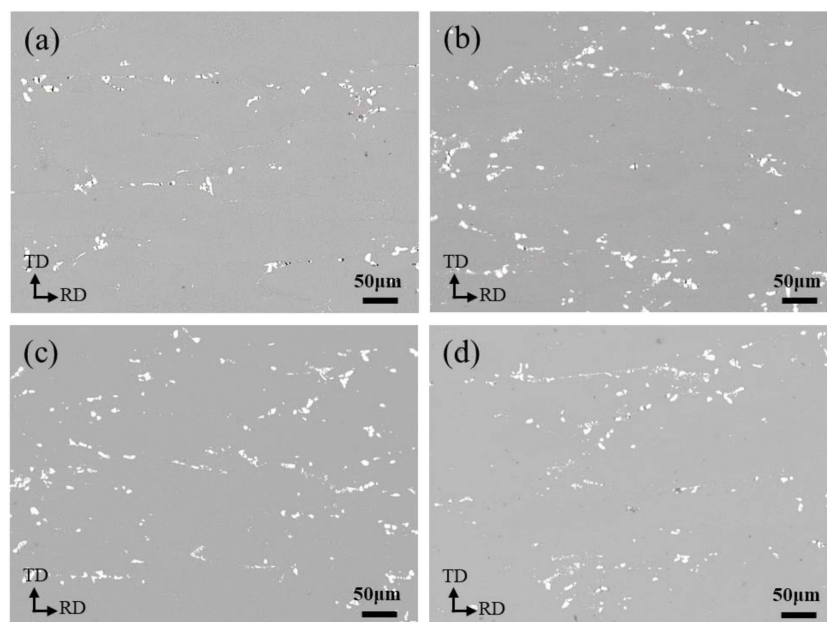
**图 4.** 7075 铝合金两种时效工艺的应力应变曲线

### 3.2. 微观组织对 7075 铝合金力学性能的影响

从图 5 中可以看出, 7075 铝合金基体中存在大量白色不规则的第二相粒子呈带状沿挤压方向分布。7075 铝合金中的粗大第二相颗粒以  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  相为主。使用图像分析软件分析 7075 铝合金挤压棒材基体中微米级第二相的面积分数。结果表明, 固溶态合金、固溶 + 自然时效 30 天 + 人工时效和固溶后直接人工时效基体中第二相的尺寸分别为 4.80  $\mu\text{m}$ 、4.95  $\mu\text{m}$  和 4.86  $\mu\text{m}$ , 面积分数分别为 0.82%、0.89%和 0.85%。对比三组数据可知, 尽管不同时效工艺对 7075 铝合金的力学性能可能产生影响, 但对基体中微米级第二相的尺寸与分布密度影响极小, 三者在数值上几乎无差异。

图 6 为 7075 铝合金两种时效工艺状态下的 TEM 图像。图 6(a)、图 6(b)分别对应自然时效 30 天再人工时效与固溶后直接人工时效处理后的析出相微观形貌。通过 ImageJ 图像分析软件对 TEM 图像中析出相的粒径进行统计量化。结果显示, 自然时效 30 天再人工时效样品的析出相的平均尺寸为 4.5 nm, 而固溶后直接人工时效样品的析出相的平均尺寸更小, 为 3.7 nm, 两者存在差异。

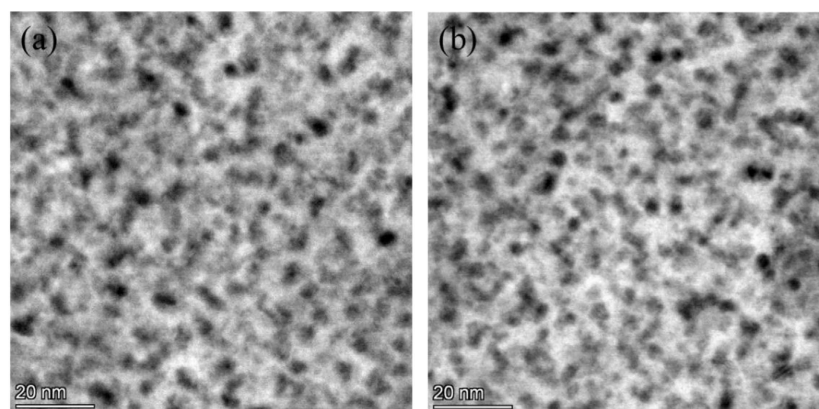




**Figure 5.** SEM images of 7075 aluminum alloy after solution treatment and under different aging treatments: (a) Solution-treated state; (b) Solution treatment and artificial aging after natural aging for 30 days; (c) Direct artificial aging after solution treatment

**图 5.** 7075 铝合金固溶后及不同时效处理后的 SEM 图像: (a) 固溶态; (b) 固溶后自然时效 30 天后再人工时效; (c) 固溶后直接人工时效

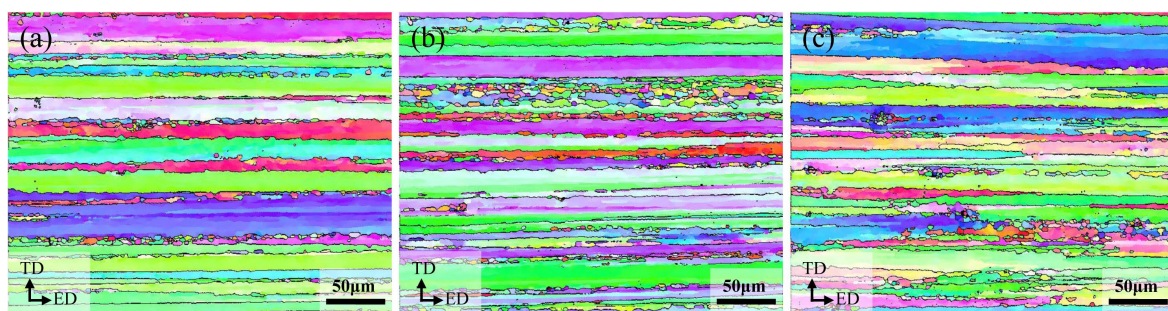
7075 铝合金的时效强化主要依赖于基体中弥散分布的细小析出相( $\text{MgZn}_2$ )对位错运动的阻碍作用,析出相尺寸与分布状态直接影响合金的力学性能。结合统计数据可知,经自然时效 30 天预处理后再进行人工时效,样品析出相平均尺寸较大,这一现象可能是由于自然时效阶段已形成的早期析出相(如 GP 区)在后续人工时效过程中进一步长大,导致其对位错的阻碍能力减弱,导致其强度低于固溶后直接人工时效的 7075 铝合金。与此同时,较大的析出相可减少位错的钉扎效应,进而提升了 7075 铝合金的塑性变形能力,提高了延伸。这为 7075 铝合金在兼顾强度与塑性的工艺优化方向提供了微观层面的理论依据。



**Figure 6.** TEM images of 7075 aluminum alloy under different aging treatments: (a) Artificial aging after natural aging for 30 days; (b) Direct artificial aging after solution treatment

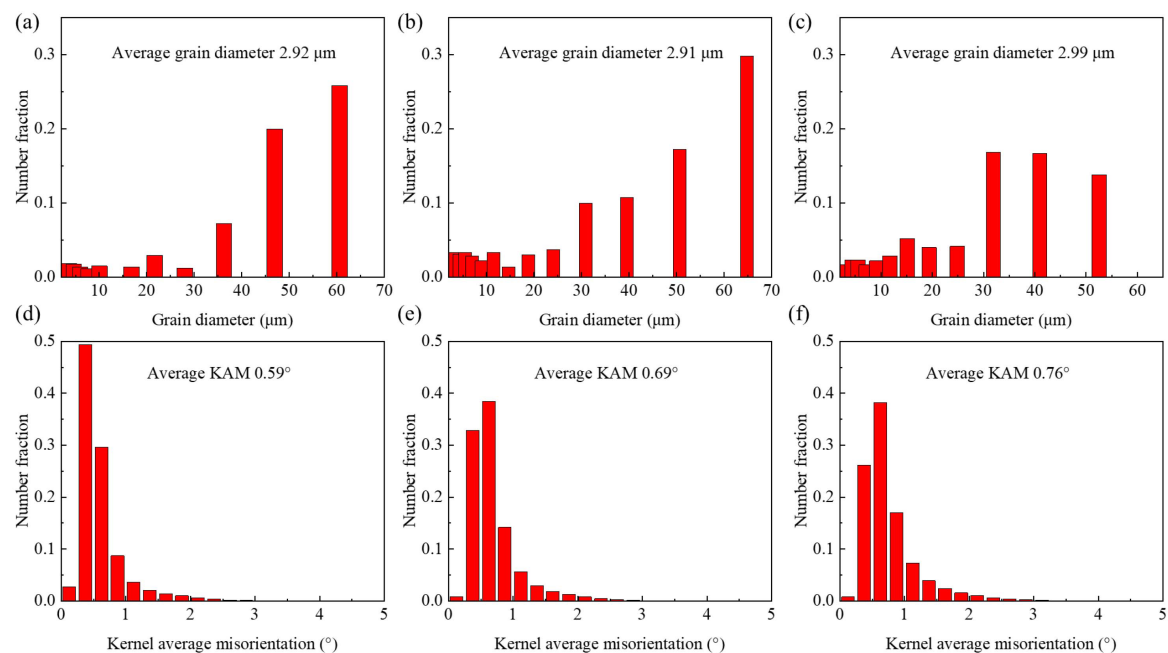
**图 6.** 7075 铝合金不同时效处理后的 TEM 图像: (a) 自然时效 30 天后人工时效; (b) 固溶后直接人工时效

图 7 展示了 7075 铝合金在固溶及不同时效处理状态下的 EBSD 取向分布图像, 包括固溶态、固溶后自然时效 30 天再人工时效以及固溶后直接人工时效三种状态。可以观察到, 三种样品均呈现出明显的纤维状长条晶粒结构, 晶粒沿挤压方向分布, 显示出典型的挤压组织特征。这说明在后续时效过程中, 组织整体保持稳定, 未发生显著的再结晶或晶粒粗化。由图 8 的统计结果可知, 固溶态样品的平均晶粒尺寸为  $2.92\ \mu\text{m}$ , 固溶后自然时效 30 天再人工时效样品为  $2.91\ \mu\text{m}$ , 而固溶后直接人工时效样品为  $2.99\ \mu\text{m}$ , 三者差异极小, 表明不同时效工艺对晶粒尺寸的影响有限。



**Figure 7.** EBSD images of 7075 aluminum alloy after solution treatment and under different aging treatments: (a) Solution-treated state; (b) Solution treatment and artificial aging after natural aging for 30 days; (c) Direct artificial aging after solution treatment

图 7. 7075 铝合金固溶后及不同时效处理后的 EBSD 图像: (a) 固溶态; (b) 固溶后自然时效 30 天后人工时效; (c) 固溶后直接人工时效



**Figure 8.** Grain diameter and KAM images of 7075 aluminum alloy after solution treatment and under different aging treatments: (a) (c) Solution-treated state; (b) (d) Solution treatment and artificial aging after natural aging for 30 days; (c) (e) Direct artificial aging after solution treatment

图 8. 7075 铝合金经固溶及不同时效处理后的晶粒直径与 KAM 图像: (a) (c) 固溶态; (b) (d) 固溶后自然时效 30 天后人工时效; (c) (e) 固溶后直接人工时效

从 KAM (Kernel Average Misorientation) 分析结果可见, 固溶态样品的平均 KAM 值为 0.59, 固溶后

自然时效 30 天再人工时效样品的平均 KAM 值增至 0.69, 而固溶后直接人工时效样品的平均 KAM 值进一步提高至 0.76。KAM 值的上升表明晶内取向偏差增大, 局部应变水平升高, 意味着在时效过程中位错累积更为显著。

进一步的位错密度分析结果与此一致。固溶态样品的平均位错密度为  $1.03 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ , 固溶后自然时效 30 天再人工时效样品为  $1.21 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ , 而固溶后直接人工时效样品达到  $1.33 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 。位错密度的升高说明人工时效促进了位错与析出相的相互作用。固溶后直接人工时效样品的位错密度最高, 与其较高的屈服强度和抗拉强度结果相对应。而经过自然时效 30 天后再人工时效的样品, 其位错密度略低, 位错累积相对较小, 有助于改善合金的塑性, 从而表现出更高的延伸率。

为深入理解延迟时效导致的力学性能差异, 本研究基于位错强化与析出相强化模型对 2 种时效状态铝合金的强度进行了定量分析。根据 Taylor 关系式计算位错强化  $\sigma_d$  [13]-[15]:

$$\sigma_d = \alpha M G b \rho^{1/2} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为几何常数(取 0.3),  $M$  为 Taylor 因子( $M=2$ ),  $G$  为剪切模量(26 GPa),  $b$  为伯氏向量(0.286 nm),  $\rho$  为实验测得的位错密度。将 2 种时效状态的 7075 铝合金的位错密度代入后发现, 直接人工时效样品的  $\sigma_d$  为 162.7 MPa, 固溶后自然时效 30 天后人工时效的  $\sigma_d$  为 155.2 MPa, 由此可见, 延迟时效样品相较于直接人工时效在位错强化项上降低了约 7.5 MPa。因此, 位错强化的差异虽非主导, 但对总强度的贡献不可忽视, 应与析出相强化一起解释 7075 铝合金约 13~15 MPa 的强度差异。

析出强化受到析出相的形态、尺寸、体积分数的影响。统计 TEM 相中晶内析出相的平均尺寸和总数量, 并计算其体积分数  $f_v$ , 再用 Kocks 统计方程计算析出强化  $\sigma_p$  [11] [12]:

$$\sigma_p = 0.6 M G b (\pi f_v^{1/2} / 2 D_p) \quad (2)$$

其中,  $D_p$  为析出相的平均直径;  $f_v$  通过析出相的数密度乘以单个析出相的平均体积来计算,  $f_v = N \pi D_p^3 / (6 S t)$  方程计算(式中,  $N$  为拍摄区域为  $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$  的 TEM 照片中的析出相数量,  $S$  为拍摄区域的实际面积( $S = 10,000 \text{ nm}^2$ ),  $t = 50 \text{ nm}$  为 TEM 样品平均厚度)。直接人工时效样品的  $\sigma_p$  为 436.3 MPa, 固溶后自然时效 30 天后人工时效的  $\sigma_p$  为 430.3 MPa, 由此可见, 延迟时效样品相较于直接人工时效在析出强化项上降低了约 6.0 MPa。位错强化与析出强化两项的变化合成后能够解释约 13 MPa 的强度差异。综合两类强化机制的定量分析可以看出, 延迟时效导致的位错密度下降与析出相粗化共同造成强度下降。

三种状态下的合金均呈现纤维状长条晶粒形貌, 第二相主要为  $\text{MgZn}_2$  相及  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  等, 未观察到显著的相团聚或异常粗化现象。由此可见, 固溶后延迟时效主要影响的是析出相的尺寸与密度, 而对宏观晶粒形态及第二相分布影响较小。综合 EBSD、KAM 及位错密度分析结果可知, 固溶后直接人工时效样品中具有较高的 KAM 值和位错密度, 具有最高的强度; 而经自然时效 30 天后人工时效的样品其 KAM 值和位错密度较固溶后直接人工时效小, 在保持较高强度的同时, 获得更好的延伸率。这表明, 适当的自然时效可实现强度与延伸率之间的协调平衡。

## 4. 结论

本文围绕 7075 铝合金固溶后延迟时效对组织演化与力学性能的影响展开研究。通过自然时效 0~40 天的硬度变化规律, 选择自然时效 30 天为延迟时效的研究对象。对比了固溶后直接人工时效与延迟时效样品的力学性能差异。结合 SEM、EBSD 及析出相尺寸统计分析, 揭示了延迟时效对第二相析出行为、晶粒结构及位错密度分布的影响规律。基于上述研究, 本文得出了以下主要结论:

1) 自然时效显著改变了后续人工时效过程中的溶质分布与析出行为。固溶后自然时效 30 导致人工时效过程中  $\text{MgZn}_2$  析出相的平均尺寸由直接人工时效的 3.7 nm 增大至 4.5 nm。

2) 延迟时效引起位错密度降低, 从而削弱位错强化。位错强化由 162.7 MPa 降至 155.2 MPa, 差值



约 7.5 MPa。该结果表明延迟时效导致位错强化贡献降低。

3) 直接人工时效析出强化为 436.3 MPa, 而延迟时效为 430.3 MPa, 下降约 6.0 MPa。延迟时效导致析出相粗化、数量密度降低, 是析出强化下降的主要原因。

## 基金项目

广西科技重大专项, “铝合金厚板工业化生产残余应力无损检测技术与应用研究”(桂科 AA23023027)。

## 参考文献

- [1] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [2] 田洪雷, 孙琳, 邓运来. 断续时效工艺对 7N01 铝合金组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(12): 29-35.
- [3] Sha, G. and Cerezo, A. (2004) Early-Stage Precipitation in Al-Zn-Mg-Cu Alloy (7050). *Acta Materialia*, **52**, 4503-4516. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.025>
- [4] Panigrahi, S.K. and Jayaganthan, R. (2011) Effect of Ageing on Microstructure and Mechanical Properties of Bulk, Cry-rolled, and Room Temperature Rolled Al 7075 Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 9609-9616. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.07.028>
- [5] Liu, Y., Jiang, D.M. and Li, W.J. (2016) The Effect of Multistage Ageing on Microstructure and Mechanical Properties of 7050 Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **671**, 408-418. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.266>
- [6] 李承波. 淬火速率和自然时效对 7055 铝合金厚板组织性能不均匀性的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [7] Waterloo, G., Hansen, V., Gjønnes, J. and Skjervold, S.R. (2001) Effect of Predeformation and Preaging at Room Temperature in Al-Zn-Mg-(Cu,Zr) Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **303**, 226-233. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01883-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01883-9)
- [8] 赵小莲, 刘东, 张珂星, 等. 自然时效对 7A04 铝合金力学性能和电化学腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(18): 122-125.
- [9] 黄元春, 邹偶, 陈斯卓, 等. 自然时效对 7A99 铝合金后续人工时效行为的影响中南大学[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(5): 1-8.
- [10] Ma, J., Wang, Q., Zhang, T., Cao, H., Yang, Y. and Zhang, Z. (2022) Effect of Natural Aging Time on Tensile and Fatigue Anisotropy of Extruded 7075 Al Alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, **18**, 4683-4697. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.151>
- [11] Wen, H., Topping, T.D., Isheim, D., Seidman, D.N. and Lavernia, E.J. (2013) Strengthening Mechanisms in a High-Strength Bulk Nanostructured Cu-Zn-Al Alloy Processed via Cryomilling and Spark Plasma Sintering. *Acta Materialia*, **61**, 2769-2782. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.036>
- [12] Hornbogen, E. and Starke, E.A. (1993) Overview No. 102 Theory Assisted Design of High Strength Low Alloy Aluminum. *Acta Metallurgica et Materialia*, **41**, 1-16. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(93\)90334-o](https://doi.org/10.1016/0956-7151(93)90334-o)
- [13] 高川, 邓运来, 王冯权, 等. 蠕变时效对欠时效 7075 铝合金力学性能的影响[J]. 金属学报, 2022, 58(6): 746-759.
- [14] Zou, Y., Wu, X., Tang, S., Zhu, Q., Song, H., Guo, M., *et al.* (2021) Investigation on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloys with Various Zn/Mg Ratios. *Journal of Materials Science & Technology*, **85**, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.045>
- [15] Zhang, X.X., Knoop, D., Andrä, H., Harjo, S., Kawasaki, T., Lutz, A., *et al.* (2021) Multiscale Constitutive Modeling of Additively Manufactured Al-Si-Mg Alloys Based on Measured Phase Stresses and Dislocation Density. *International Journal of Plasticity*, **140**, Article ID: 102972. <https://doi.org/10.1016/j.iplas.2021.102972>