

固溶-预拉伸-时效协同提升7075铝合金强塑性研究

杜 威 白益诚 陈文轩 史秋月 陈 祥
(湖北汽车工业学院汽车材料学院, 十堰 442000)

摘 要 采用固溶结合预拉伸以及后续时效处理的策略,研究了不同预拉伸变形量下时效态合金的微观组织及力学性能的影响。通过光学显微镜、扫描电镜及其配备的电子背散射衍射仪和万能力学性能试验机等进行测试表征分析。能谱测试分析表明,所有试样中均存在粗大的白色AlCuFeZn相和相对细小的AlZnMgCu相。当预拉伸5%并后续时效处理(120℃×12h),可以得到较为理想的强塑性匹配,其屈服强度为490 MPa,抗拉强度达558 MPa,伸长率为15.1%,这可能归功于位错强化和沉淀强化。拉伸断口分析表明,所有试样均呈现出韧脆混合断裂特征,不同预拉伸量对韧窝的数量、尺寸和分布等特征影响不大。

关键词 预变形;7075铝合金;时效处理;微观组织;力学性能

中图分类号 TG166.3;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250141

Synergistic Enhancement of Strength and Ductility of 7075 Aluminum Alloy via Solution, Pre-stretching, and Aging Processes

DU Wei, BAI Yicheng, CHEN Wenxuan, SHI Qiuyue, CHEN Xiang

(College of Automotive Materials, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442000)

Abstract: A combined strategy of solution treatment, pre-stretching, and subsequent aging was employed to investigate the influence of varying pre-stretching deformations on microstructure evolution and mechanical properties of as-aged 7075 alloys. Characterizations were investigated by optical microscopy, scanning electron microscopy integrated with electron backscatter diffraction, and a universal mechanical testing machine. EDS results reveal the presence of coarse white AlCuFeZn intermetallic phases and relatively fine AlZnMgCu precipitates in specimens. Optimal strength-ductility combination is achieved in specimens subjected to 5% pre-stretching followed by aging at 120 °C for 12 h, where the yield strength, tensile strength and elongation reach 490 MPa, 558 MPa, and 15.1%, respectively. The superior mechanical performance can be attributed to the synergistic effects of dislocation strengthening and precipitation strengthening. Tensile fracture indicates that specimens are characterized by mixed ductile-brittle fracture, and pre-stretching magnitude has negligible effects on quantity, size, and distribution of dimples.

Key Words: Pre-deformation, 7075 Aluminum Alloy, Aging Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

7075铝合金属于Al-Zn-Mg-Cu系高强轻质合金,具备高强度、低密度以及出色的疲劳性能等特点,被广泛应用于交通运输、船舶应用、航空航天等领域^[1-2]。相较于传统金属材料,7xxx系列铝合金可显著减轻构件质量,提升燃油效率与飞行性能,在复杂载荷条件和恶劣环境中,仍能维持稳定的力学性能与良好的耐久性。此类合金在航空航天领域被大量应用于制造机身蒙皮、机翼、起落架以及其他对强度和疲劳性能要求极高的关键结构部件^[3-5]。

形变热处理可以提升铝合金的强度和韧性,其中预拉伸变形是一个关键环节^[6-7]。LI G A等^[8]研究表

明,经10%预变形后再进行后续人工时效能够促进2219铝合金中 θ' 相的弥散析出,屈服强度提升至387.5 MPa,较未预变形试样提高了22%,同时加速G.P.区向 θ''/θ' 相的转变,强化效果显著。LONG M J等^[9]对含有高Zn的Al-Zn-Mg-Cu合金进行了自然时效、预拉伸处理及再时效等多阶段策略,促使Al-Zn-Mg-Cu合金中高密度 η' 相弥散析出,抗拉强度达800 MPa,伸长率较传统工艺提高了18%。NIU F J等^[10]研究表明,在180℃时效过程中,6%的预变形能够促进Al-Cu-Mg合金中S相的弥散析出,起到显著的强化效果。此外,适当预拉伸不仅提高了力学性能,还对

收稿日期:2025-03-28;修订日期:2025-06-05

基金项目:湖北省联合基金资助项目(2024AFD113);湖北省教育厅重点资助项目(D20231804)

第一作者:杜威,男,2005年出生,本科生,E-mail:2538828865@qq.com

通信作者:陈祥,男,1992年出生,讲师,E-mail:chenxiang@huat.edu.cn

引用格式:杜威,白益诚,陈文轩,等.固溶-预拉伸-时效协同提升7075铝合金强塑性研究[J].特种铸造及有色合金,2026,46(10):1537-1542.

DU W, BAI Y C, CHEN W X, et al. Synergistic enhancement of strength and ductility of 7075 aluminum alloy via solution, pre-stretching, and aging processes[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1537-1542.

铝合金的腐蚀行为有着积极影响。ZHAO X Y等^[11]研究表明,对预拉伸2.5%~3.0%的7075铝合金,三级时效可促进晶界 η 相(MgZn_2)的不连续分布,同时在基体中形成高密度的纳米 η' 相,使腐蚀电流密度显著降低,阻抗值明显提升。应力腐蚀敏感性指数较单级时效下降了65%,实现耐蚀性与强塑性的协同优化。

已有研究表明,预拉伸工艺在铝合金时效析出行为中发挥关键调控作用。适度的预变形能通过位错促使纳米级强化相弥散析出,协同提升合金力学性能。针对传统T6态7075铝合金,尽管其具备高强度(抗拉强度 $>550\text{ MPa}$),但伸长率通常不足10%,限制了其工程应用潜力。同时针对小应变预拉伸如何影响时效组织演变的作用机制尚未阐明。基于此,本研究将预拉伸与人工时效工艺相结合,系统探究了其力学性能和微观组织的演变规律,旨在为高强韧铝合金设计提供参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料及热处理工艺

本研究所用材料为商用轧制7075铝合金(尺寸为 $1\,300\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$),其化学成分见表1。图1为试样的热处理工艺过程。首先使用KSL-1200X数显型箱式电阻炉以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率进行固溶处理($475\text{ }^\circ\text{C}$ 保温60 min),板材经固溶处理后迅速放至水中淬火以形成过饱和固溶体,随后分别进行0%、1%、3%和5%的预变形处理,最终通过时效处理($120\text{ }^\circ\text{C}$ 保温720 min),保温后空冷至室温。

表1 7075 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy %

w_B							
Mg	Cu	Cr	Ti	Fe	Zn	Mn	Al
2.1~2.8	1.2~2.0	0.13~0.25	0.05~0.1	0.13~0.30	5.2~6.0	0.1~0.2	余量

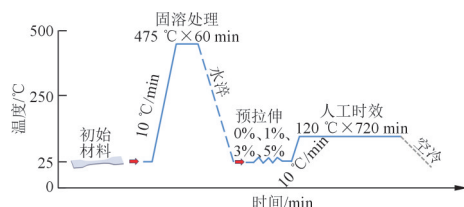


图1 7075 铝合金形变热处理示意图

Fig.1 Schematic diagram of deformation heat treatment for 7075 aluminum alloy

1.2 试验方法

使用PG-2A型自动金相试样磨抛机对试样进行研磨与抛光。采用Keller试剂(1 mL的 $\text{HF}+1.5\text{ mL}$ 的 $\text{HCl}+2.5\text{ mL}$ 的 $\text{HNO}_3+95\text{ mL}$ 的 H_2O)对试样进行腐

蚀,腐蚀时间为25 s。采用蔡司光学显微镜(Orion Zeiss Microscopy,OZM)观察经过预拉伸时效处理的合金微观组织。使用JSM-7900F型热场发射扫描电镜及配备的背散射电子(BSE)成像技术对合金的第二相及拉伸断口形貌进行表征,并借助能谱仪(EDS)分析该第二相的组成。EBSD试样制备时,首先使用不同粒度的砂纸进行研磨,采用由体积分数为10%的高氯酸+90%的乙醇组成的电解液对试样进行电解抛光,抛光电压维持在20 V,抛光时间设定为15 s。室温拉伸试验在CMT6 305-300 kN电子万能试验机上进行,拉伸速度为 $0.75\text{ mm}/\text{min}$,各试样进行3次拉伸测试。试样尺寸见图2。

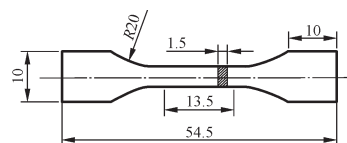


图2 7075 铝合金拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen dimension of 7075 aluminum alloy

2 试验结果及讨论

2.1 微观组织分析

图3为7075铝合金于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时效12 h后不同预拉伸量下纵截面的金相组织。可以看出,合金晶粒沿着轧制方向(RD)呈现出拉长的特征。在晶内和晶界区域观察到少量呈连续分布的粗大相,这些粗大相可能是在固溶处理后未能完全溶解,经形变热处理后仍然保留,致使组织呈现出一定程度的不均匀性,这些区域为裂纹萌生提供潜在位点^[12]。研究表明,预拉伸引入的位错增加了晶体内部的形核位点,有利于后续时效进程中 η' - MgZn_2 析出相的形成^[13]。大量细小的 η' 相在基体中弥散分布,能有效阻碍位错运动,进而强化合金的力学性能,但是由于其尺寸为纳米级,在光学以及扫描电镜中无法观察到。从图3d可以看出,5%的预拉伸时效状态时,合金的显微组织中析出相数量增多,粒子尺寸更为细小且分布均匀。已有研究表明,在7000系Al-Zn-Mg-Cu合金的时效过程中,析出相的演变顺序为:SSSS(过饱和固溶体) $\rightarrow$ G.P.区(Guiner-Preston区,脱溶原子偏聚区) $\rightarrow\eta'$ 相(亚稳态 MgZn_2) $\rightarrow\eta$ 相(稳态 MgZn_2)^[14-15]。其中,G.P.区和 η' 相与基体 α -Al之间存在共格及半共格关系,这会导致晶格产生畸变,从而提高基体的力学性能。 η 相与基体之间则呈非共格关系,具备低密度、高熔点及高比强度等特点,同时也表现出一定的脆性。在过时效状态下,形成的平衡相 η 由于其高密度和较大尺寸,可能引发沿晶界处的脆性断裂,导致合金的力学性能下降^[16]。

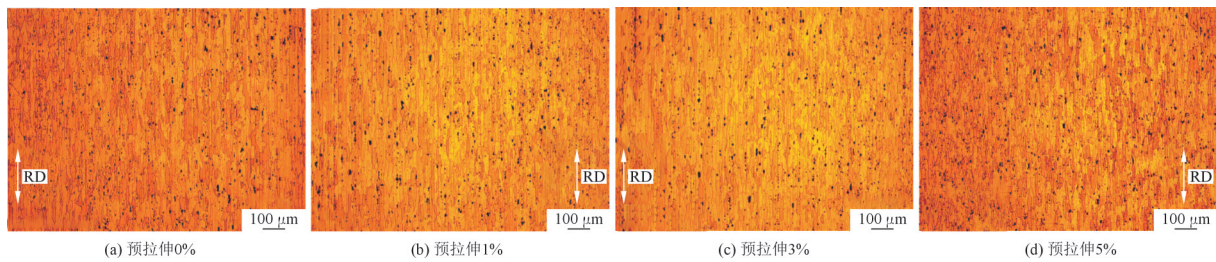


图3 不同拉伸预变形后的时效态 7075 铝合金纵截面微观组织

Fig.3 Microstructure of longitudinal section of as-aged 7075 aluminum alloy after different pre-tensile deformation

2.2 第二相分析

对于 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金中的第二相粒子,其溶质原子在时效中的扩散速率主要受温度和

空位浓度的控制。因此,第二相粒子的尺寸对温度非常敏感,而 7075 铝合金的强度则主要依赖于晶内半共格的纳米级析出相。图 4 为预拉伸 0% 和 5% 下时效态 7075 铝合金的能谱分析。可以看出,晶粒内部均存在

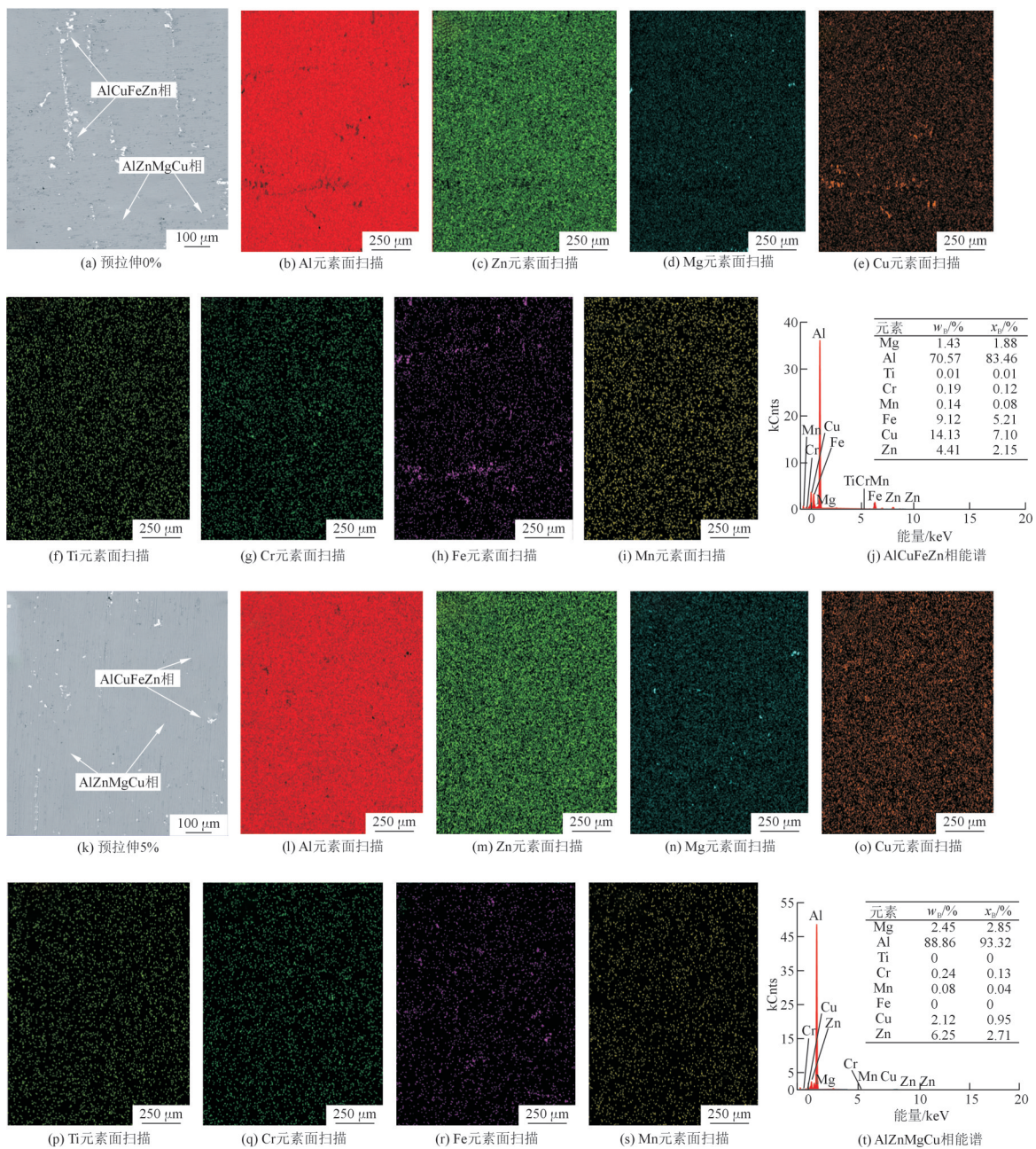


图4 不同预变形后的时效态 7075 铝合金第二相 EDS 能谱分析

Fig.4 EDS analysis of the second phase in as-aged 7075 aluminum alloy after different pre-deformation

显著分布差异的白色第二相,周围伴随着一些黑色底纹的白色第二相。从图4b~图4i和图4k~图4s中可以看出,Cu和Fe的分布较为一致,并且在局部区域有明显富集,尤其是在尺寸较大的连续白色相中,表明可能有Al-Cu-Fe金属间化合物(τ 相)存在, τ 相的析出会显著影响材料的性能。为了进一步获取相的元素组成,进行点扫描测试分析,其能谱图见图4j和图4t。可以看出,在不同预拉伸时效态试样中均存在AlCuFeZn以及AlZnMgCu相。同时,通过能谱测试可以检测到微量的Ti、Cr以及Mn元素,这些元素的添加对细化晶粒和抑制再结晶有着重要作用^[17-18]。基体中的第二相粒子通过阻碍位错运动发挥强化作用,有效提升材料性能。

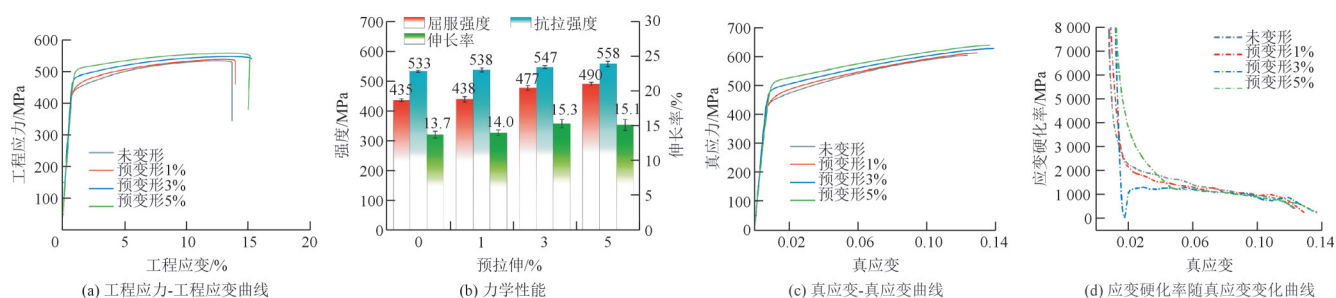


图5 不同预拉伸变形后时效处理7075铝合金的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of 7075 aluminum alloy with varied pre-tensile deformation and aging treatment

拉伸变形中通常会并存两种情形:其一,晶界处形成新的位错,这些位错与原有的位错相互结合形成位错缠结结构,使得位错密度上升,提高加工硬化能力;其二,原有的位错湮灭并发生重排,导致位错密度降低,进而使加工硬化能力减弱^[20]。当材料在拉伸变形前,位错密度处于较高状态,更利于第二种情形的发生,具体表现为较低的加工硬化率。反之,若拉伸前位错密度较低,则表现为较高的加工硬化率。基于此,经5%预拉伸的试样具备较高的位错密度,一般呈现出较低的伸长率。但根据实际拉伸试验可知,预拉伸试样不管是强度还是伸长率均得到了提升,推测这是位错和析出相之间的相互作用导致的。

图6为不同预拉伸下时效试样的显微组织、反极图和GND图。从图6a~图6d可以观察到与金相组织相同的特征,如晶粒均沿着轧制方向被拉长,且有些晶粒沿着厚度方向的界面间距相对较大。所有试样在大角度晶界(图中黑色加粗线条)的附近发现细小且近似等轴的小晶粒,这与人工低温时效处理中的回复及再结晶有关。从图6m~图6p可以看出,不同预拉伸量引入的位错密度各不相同。相关研究指出,在时效前引入

2.3 力学性能及断口分析

图5为不同预拉伸变形后时效处理合金的力学性能。从图5a可以看出,没有预先拉伸的试样强度和伸长率均低于经过预拉伸的试样。由图5b可以看出,经过预拉伸的试样其屈服强度明显提高。真应力-真应变曲线见图5c,预拉伸试样表现出更好的均匀伸长阶段。由图5d可以看出,相较于其他试样,5%预拉伸的试样具有更高的应变硬化率,特别是在应变的早期阶段($<4\%$)。高的加工硬化率推迟了不稳定性的开始,从而改善合金的均匀伸长率^[19]。此外,随应变不断增大,试样的应变硬化速率均保持在高应变水平,在应力-应变曲线上表现出高的伸长率。

的位错可以使得析出相在位错处异质形核,细化强化相分布,而细小的析出相会钉扎位错,阻碍位错运动从而提高强度^[21-22]。

图7为不同预变形下7075铝合金拉伸断口的微观形貌。试样断口形貌显示出明显的韧窝特征,且韧窝附近伴有清晰的撕裂棱。此外,在图7a局部区域也出现了准解理特征。所有试样的断裂方式均呈现出韧脆混合断裂特征。观察图7a~图7d发现,断口中分布着大韧窝和小韧窝,这些大韧窝往往是由于材料内部存在尺寸较大的第二相颗粒或夹杂物引发的,在拉伸变形过程中,这些颗粒或夹杂物与基体之间的界面易产生应力集中,出现“微孔聚合”现象,从而形成较大韧窝^[23]。而分布相对均匀、尺寸较大且深度较深的韧窝表明材料能够充分进行塑性变形。其中,图7c和图7d中出现了相对较多且均匀等轴的韧窝,材料表现出良好的塑性,这与拉伸试验中出现较高的伸长率相吻合。因此,不同预拉伸量对韧窝的数量、尺寸和分布等特征影响不大。但适度的预拉伸处理可使材料的伸长率得到一定程度的提升,进而优化材料的综合力学性能。

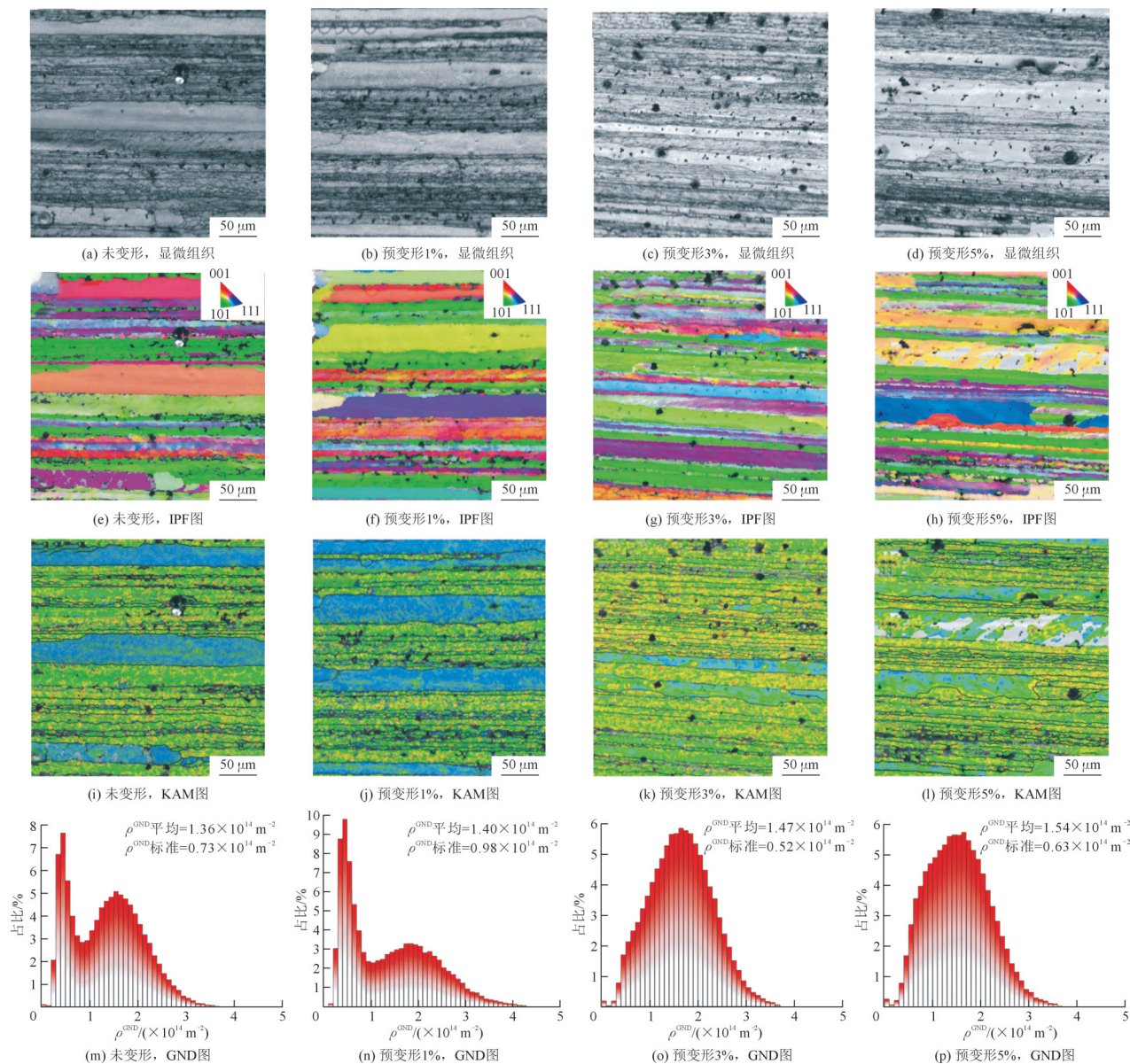


图6 不同预变形量下时效试样的显微组织、IPF图和GND图

Fig.6 Microstructures, IPF and GND plots of as-aged specimens under different pre-deformation

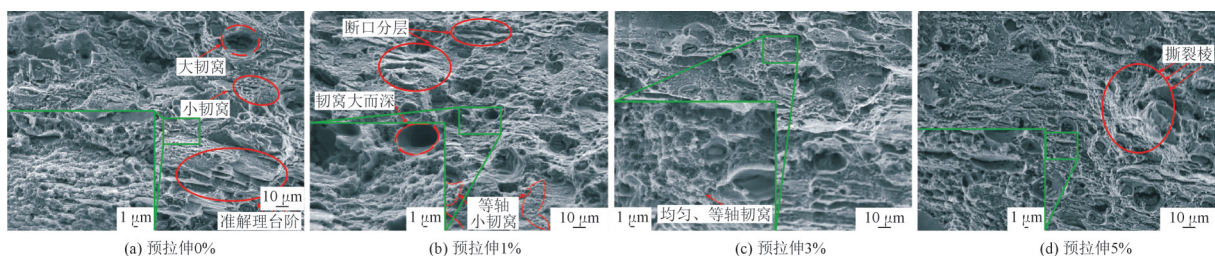


图7 不同预变形下的7075铝合金拉伸断口微观形貌

Fig.7 Tensile fracture morphologies of 7075 aluminum alloy with different pre-deformation

3 结 论

(1) 经过分析不同预变形量下时效态 7075 铝合金的显微组织和析出相特征, 发现在 5% 预拉伸变形下可通过提高位错密度和优化 η' -MgZn₂ 相的析出行为显著

增强合金的强度与塑性。不同预变形的试样中均检测到粗大的白色 Al-Zn-Mg-Cu 相, 以及细小的 Al-Zn-Mg-Cu 相。

(2) 预变形量为 5% 的条件下, 时效态合金展现出优良的强塑性匹配, 合金的最大抗拉强度为 558 MPa, 伸长率达到 15.1%。强度的提高主要归因于位错强化

和沉淀强化。

(3) 拉伸断口形貌特征表明,在同一时效水平下,材料的断裂方式均表现为韧脆混合断裂特征。不同预拉伸量对韧窝的数量、尺寸和分布等特征影响不大,但适当的预拉伸可以提高材料的塑性,整体力学性能增强。

参 考 文 献

- [1] 袁松阳, 张亮, 吴国华, 等. 7000 系铝合金及其复合材料挤压铸造研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 1 304-1 310.
- [2] 顾恺迪, 高志良, 李世江, 等. 7 系铝合金在上海轨道交通车辆的应用现状及适用性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 141-145.
- [3] LI S S, YUE X, LI Q Y, et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 944-983.
- [4] KHALID M Y, UMER R, KHAN K A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications[J]. Results in Engineering, 2023, 20: 10 137.
- [5] 姬浩. 7000 系高强铝合金的发展及其在飞机上的应用[J]. 航空科学技术, 2015, 26(6): 75-78.
- [6] AN L H, CAI Y, LIU W, et al. Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 370-375.
- [7] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 预变形对 2519 铝合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004(12): 1 990-1 994.
- [8] LI G A, MA Z, JIANG J T, et al. Effect of pre-stretch on the precipitation behavior and the mechanical properties of 2219 Al alloy [J]. Materials, 2021, 14(9): 2 101.
- [9] LONG M J, JIANG F, WU F F, et al. Synergistic improvement of strength and ductility of an ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy through a new aging strategy [J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109 655.
- [10] NIU F J, CHEN J H, DUAN S Y, et al. The effect of pre-deformation on the precipitation behavior of AlCuMg (Si) alloys with low Cu/Mg ratios [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 823(1): 1-9.
- [11] ZHAO X Y, CHEN X, WANG X. Effect of aging processes on corrosion behavior and stress corrosion sensitivity of pre-stretched 7075 aluminum alloy[J]. Materials and Corrosion, 2018, 69(7): 850-857.
- [12] PENG G S, CHEN K H, CHEN S Y, et al. Evolution of the second phase particles during the heating-up process of solution treatment of Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2015, A641: 237-241.
- [13] YANG W C, JI S X, ZHANG Q, et al. Investigation of mechanical and corrosion properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy under various ageing conditions and interface analysis of η' precipitate [J]. Materials & Design, 2015, 85: 752-761.
- [14] WANG S S, JIANG J T, FAN G H, et al. Accelerated precipitation and growth of phases in an Al-Zn-Mg-Cu alloy processed by surface abrasion [J]. Acta Materialia, 2017, 131: 233-245.
- [15] LEE S H, JUNG J G, BAIK S I, et al. Precipitation strengthening in naturally aged Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A803: 140 719.
- [16] PENG W F, GAO Y H, LI H, et al. Effects of different initial states on dynamic tensile properties and microstructure of 7075 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2024, A891: 145 939.
- [17] YANG H B, QIAN Z, ZHANG G J, et al. The grain refinement performance of B-doped TiC on Zr-containing Al alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 731: 774-783.
- [18] FANG H C, LUO F H, CHEN K H. Effect of intermetallic phases and recrystallization on the corrosion and fracture behavior of an Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Yb-Cr alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2017, A684: 480-490.
- [19] MA E, WU X L. Tailoring heterogeneities in high-entropy alloys to promote strength-ductility synergy [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5 623.
- [20] OU L, LI L Y, FAN C H, et al. Enhancement of strength and ductility in 6061Al alloy processed by cross accumulative roll bonding [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(7): 2 001-2 013.
- [21] LIU T, JIANG H T, SUN H, et al. Effects of rolling deformation on precipitation behavior and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A847: 143 342.
- [22] 李海, 陈鹏, 王芝秀, 等. 时效对固溶+冷轧 7075 铝合金力学性能和显微组织的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(10): 1 999-2 008.
- [23] ZHANG Z, WU Y Q, HUANG F L. Extension of a shear-controlled ductile fracture criterion by considering the necking coalescence of voids [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 236: 111 324.

(编辑: 陈志辉)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金
领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态
及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家
最新研究成果)



特种铸造及有色
合金杂志
(文章动态时刻关注)