

DOI: 10. 11973/jxgccl230398

# 预时效-温成形工艺参数对 7075 铝合金组织与性能的影响

张晓蕾<sup>1,2</sup>, 彭 则<sup>2</sup>, 彭玉青<sup>2</sup>, 梁 肖<sup>2</sup>, 王子健<sup>1,2</sup>

(1. 苏州大学沙钢钢铁学院, 苏州 215137; 2. 江西豪斯特汽车零部件有限公司, 九江 332400)

**摘 要:** 对7075-T6铝合金进行了不同预时效温度(85, 100, 120 °C)、预时效时间(0~32 h)、成形温度(150, 200, 250, 300 °C)的预时效-温成形处理, 研究了工艺参数对合金组织和性能的影响, 确定了最佳工艺参数。结果表明: 随着预时效时间延长, 7075铝合金晶粒尺寸无明显变化, 析出相数量增加, 硬度和强度均先增大后减小; 相比预时效温度为100, 120 °C时, 预时效温度为85 °C时析出相的数量较少, 尺寸较小, 硬度和强度较大, 断后伸长率较小; 随着温成形温度升高, 硬度和强度均减小; 最佳预时效-温成形工艺参数为预时效温度85 °C、预时效时间24 h、温成形温度150 °C, 此时合金综合性能最佳, 抗拉强度和断后伸长率分别为T6态的95%和163%; 成形后经180 °C×30 min烘烤处理可提升其强度、降低塑性。

**关键词:** 7075 铝合金; 预时效; 温成形; 烘烤工艺**中图分类号:** TG146.21**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2024)10-0016-05

## 0 引 言

近些年, 轻量化一直是汽车行业的研究热点<sup>[1]</sup>。汽车结构质量每减轻10%, 燃油消耗可降低6%~10%, 尾气排放量可减少4%<sup>[2-5]</sup>, 基于节能环保的需求, 轻量化对于汽车的发展具有重大意义。铝合金具有比强度高、易加工等优点, 广泛应用于汽车轻量化发展, 常用的铝合金包括5083、6061、7075铝合金等<sup>[6]</sup>。高强铝合金在室温下的断后伸长率较低, 成形时回弹难以控制, 容易出现破裂, 成形性较差<sup>[7]</sup>。相比室温成形, 热成形可以提高材料塑性, 改善成形性能。传统的热成形工艺一般将板料加热到固溶温度, 保温一段时间后降到一定温度进行冲压成形, 成形以后进行淬火, 最后进行时效处理; 其工序繁多, 时效时间过长, 且难以保证成形精度。已有研究表明通过化学成分调整<sup>[8]</sup>、时效工艺优化<sup>[9]</sup>等方法可以缩短时效时间, 提高生产效果。此外, 采用预时效-温成形工艺也可以有效缩短时效时间以及降低成本。预时效-温成形在材料固溶淬火后, 增加一道低温预时效处理, 再在一定温度成形。作

者对7075-T6铝合金进行了不同预时效温度、预时效时间、成形温度的预时效-温成形处理, 研究了工艺参数对合金组织和性能的影响, 确定了最佳工艺参数。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为7075-T6铝合金板, 市售, 厚度为2 mm, 化学成分(质量分数/%)为5.2Zn, 2.3Mg, 1.5Cu, 0.13Fe, 0.03Si, 0.18Mn, 0.2Cr, 余Al; 抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和硬度分别为557.05 MPa, 488.62 MPa, 13.5%, 174 HV。铝合金的预时效-温成形工艺如下: 切取尺寸为300 mm×200 mm×2 mm的试样, 加热至480 °C保温30 min固溶, 水淬, 再分别进行85, 100, 120 °C保温0~32 h的预时效处理, 将预时效后的试样分别升温至150, 200, 250, 300 °C, 保温3 min进行成形。为模拟汽车制造最后一步的烤漆硬化处理, 对成形试样进行180 °C×30 min的烘烤处理。

在预时效-温成形试样上采用线切割取样并进行镶样, 依次使用200#~5 000#砂纸进行水磨, 抛光至表面无划痕, 使用凯勒试剂腐蚀, 采用DS-300型光学显微镜观察显微组织并统计晶粒尺寸。根据GB/T 228.3—2019, 制取如图1所示的拉伸试样, 在英斯特朗3382型拉伸试验机上进行室温拉伸试验, 拉伸速度为3 mm·min<sup>-1</sup>, 采用的引伸计长度为

**收稿日期:** 2023-08-21; **修订日期:** 2024-09-18**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(51905189); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题项目(P2022-006)**作者简介:** 张晓蕾(1998—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生**通信作者(导师):** 王子健副教授

30 mm。采用SU-5000型扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸断口形貌。采用HVS-50型维氏硬度计测试显微硬度,载荷为98 N,保载时间为10 s,测7个点取平均值。

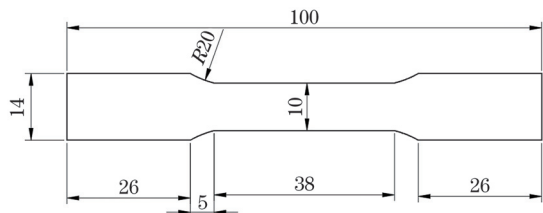


图1 拉伸试样的尺寸

Fig. 1 Size of tensile specimen

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 对组织的影响

在时效过程中,7075铝合金会依次析出过饱和固溶体、GP区、 $\eta'$ 相、 $\eta$ 相<sup>[10-13]</sup>。由图2可见:85℃下预时效不同时间并在150℃下温成形后7075铝合金的晶粒尺寸相差不大,这说明预时效时间对晶粒尺寸的影响不大;随着预时效时间延长,基体中析出相的数

量增多,当预时效时间为24 h时,成形合金中的析出相数量较多,晶粒尺寸最小,大量的 $\eta'$ 相分布在基体中。由图3可见,相比预时效温度为100,120℃时,85℃下预时效24 h-温成形后产生析出相的数量较少,尺寸较小。

### 2.2 对性能的影响

由图4可见,随着预时效时间延长,预时效-温成形7075铝合金的硬度和强度均先增加后减小。这主要是因为固溶淬火后合金中的析出相以GP区为主,在预时效处理过程中,随时效时间延长,GP区成为 $\eta'$ 相形核的核心并逐渐转变为 $\eta'$ 相,GP区和 $\eta'$ 析出相的数量不断增加并在预时效24 h后达到峰值, $\eta$ 相数量相对较少,析出强化导致材料的硬度和强度提升;预时效一定时间后,发生过时效, $\eta'$ 相转变为稳态的 $\eta$ 相,GP区和 $\eta'$ 相发生粗化,导致材料性能下降<sup>[13]</sup>。随着预时效温度上升,7075铝合金的硬度和强度增大,这是因为较低预时效温度下析出的GP区数量较少;相比预时效温度100,120℃下,预时效温度85℃下的断后伸长率较高,这是因为较低温度下预时效析出的第二相尺寸较小。

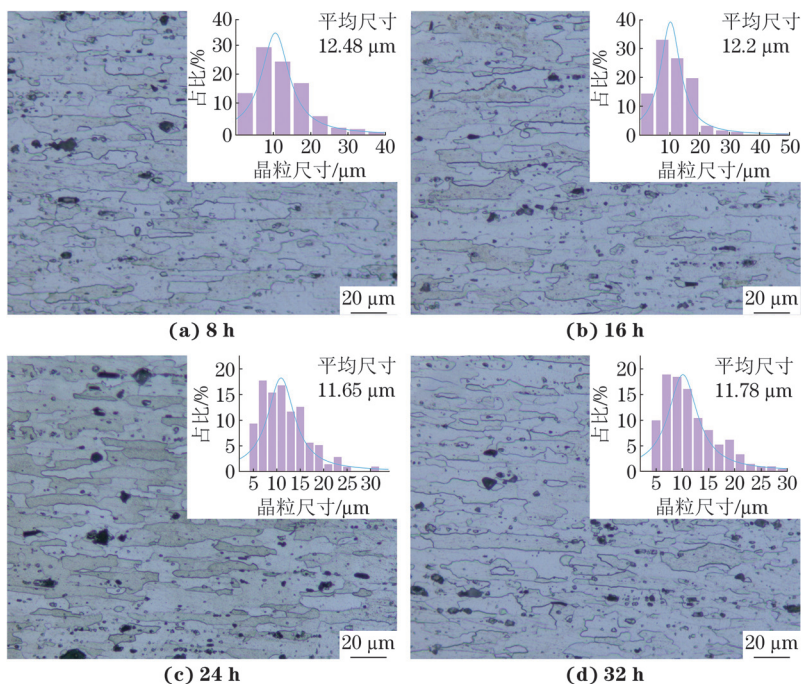


图2 85℃下预时效不同时间并在150℃下温成形后7075铝合金的显微组织与晶粒尺寸

Fig. 2 Microstructures and grain size of 7075 aluminum alloy after pre-aging at 85℃ for different times and warm forming at 150℃

由图5可见,在85℃预时效24 h并在150℃下温成形后7075铝合金的拉伸断口中的韧窝数量最多,深度最大,且穿晶断裂占比较高,说明该条件下成形的合金塑性较好、强度较低。断口形貌所得结论与性能测试结果吻合。综合考虑,最佳预时效工艺参

数为预时效温度85℃,预时效时间24 h,在该条件下预时效并在150℃下温成形后合金的综合性能优异,抗拉强度达到528 MPa,接近T6态的95%,断后伸长率高达22.03%,相比T6态提升了63%。

由图6可见:经85℃×24 h预时效后进行温成



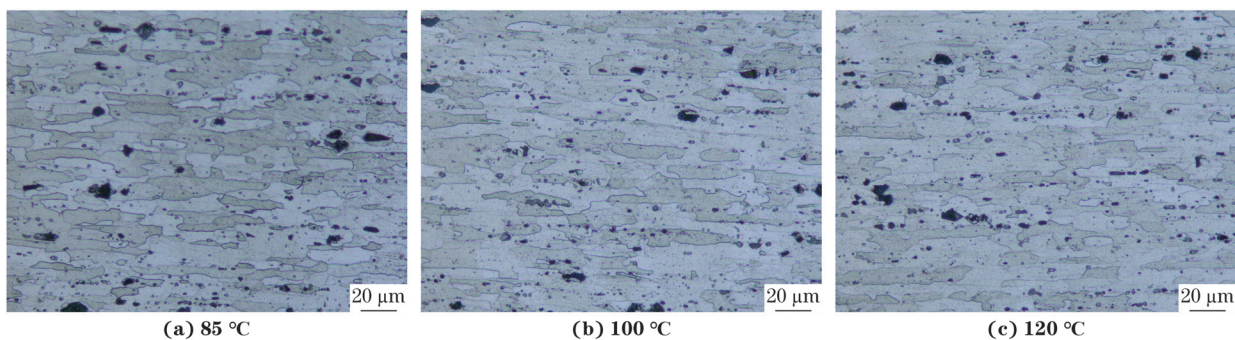


图3 不同温度下预时效 24 h 并在 150 °C 下温成形后 7075 铝合金的显微组织

Fig. 3 Microstructures of 7075 aluminum alloy after pre-aging at different temperatures for 24 h and warm forming at 150 °C

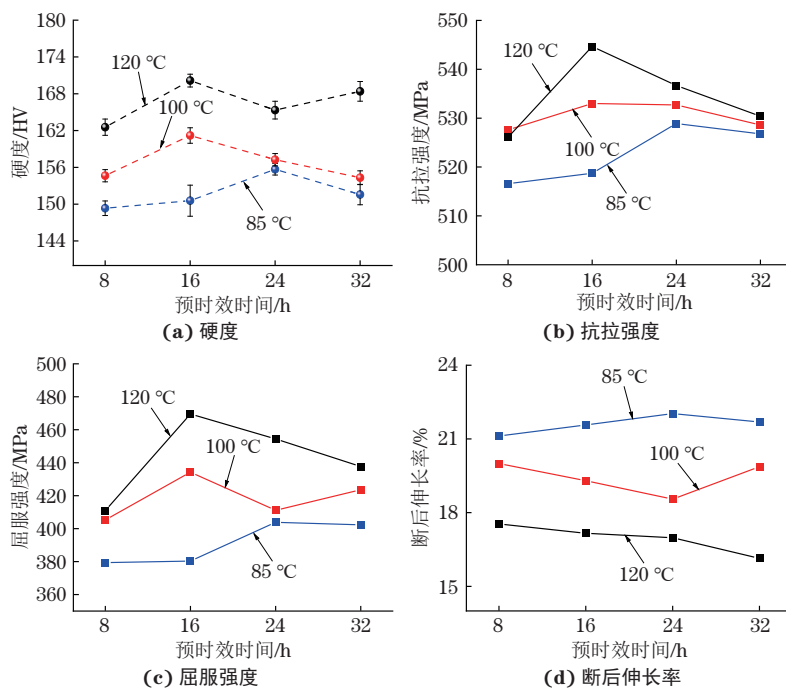


图4 不同温度预时效不同时间并在 150 °C 下温成形后 7075 铝合金的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of 7075 aluminum alloy after pre-aging at different temperatures for different times and warm forming at 150 °C: (a) hardness; (b) tensile strength; (c) yield strength and (d) percentage elongation after fracture

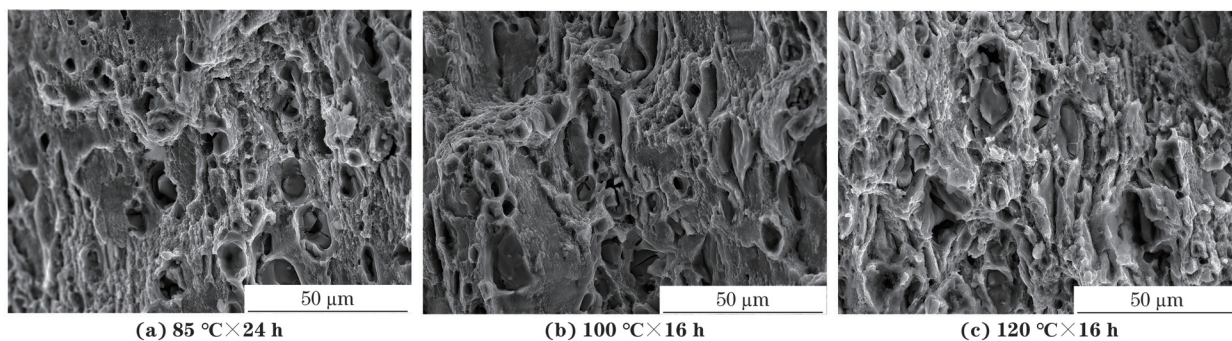


图5 不同温度下预时效不同时间并在 150 °C 下温成形后 7075 铝合金的拉伸断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphology of 7075 aluminum alloy after pre-aging at different temperatures for different times and warm forming at 150 °C

形,随着温成形温度升高,7075铝合金的硬度和强度均减小,当成形温度为150 °C时,硬度和强度均最大。温成形加热保温时间均仅为3 min,较短,析出相没

有足够的时间进行转化,但升高温度会促进 $\eta'$ 向 $\eta$ 相的转化以及 $\eta$ 相的粗化,因此,150 °C下成形时保留了较多的 $\eta'$ 相,而 $\eta$ 相成为较高温度的主要析

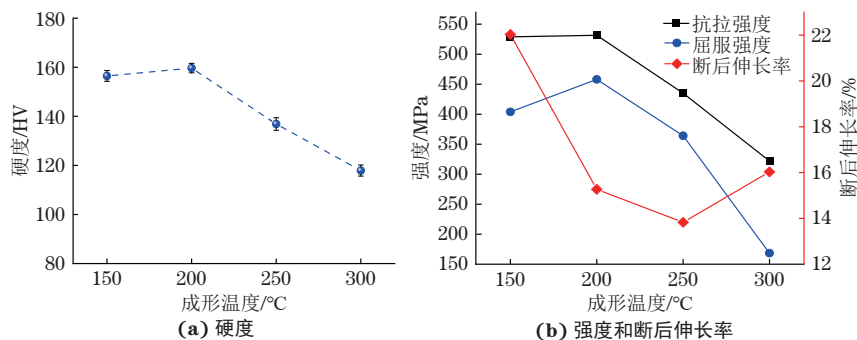


图6 85 °C × 24 h 预时效并不同温度下温成形后 7075 铝合金的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of 7075 aluminum alloy after 85 °C × 24 h pre-aging and warm forming at different temperatures :

(a) hardness and (b) strength and percentage elongation after fracture

出相。较高温度成形时产生的较多 $\eta$ 相和析出相的粗化,导致了性能的下降。

综上,最佳预时效-温成形工艺参数为预时效温度85 °C,预时效时间24 h,成形温度150 °C。最佳预时效-温成形工艺参数下,烘烤前后7075铝合金的抗拉强度分别为528.91, 544.23 MPa,屈服强度分别为403.86, 448.26 MPa,断后伸长率分别为22.03%, 16.52%。在预时效-温成形后进行烘烤处理,可以提高铝合金强度,但略微降低了其塑性。推测强度的提升是因为烘烤后已溶解的GP区和 $\eta'$ 相重新析出。

### 3 结 论

(1) 随着预时效时间延长,预时效-温成形后7075铝合金晶粒尺寸无明显变化,析出相数量增多;相比预时效温度为100, 120 °C时,预时效温度为85 °C时析出相的数量较少,尺寸较小。

(2) 随着预时效时间延长,预时效-温成形后7075合金的硬度和强度均先增加后减小;相比预时效温度为100, 120 °C时,预时效温度为85 °C时硬度和强度较大,断后伸长率较小;随着温成形温度升高,硬度和强度均减小。最佳预时效-温成形工艺参数为预时效温度85 °C、预时效时间24 h、温成形温度150 °C,此时合金综合性能最佳,抗拉强度达到528 MPa,接近T6态的95%,断后伸长率高达22.03%,相比T6态提升了63%。

(3) 对预时效-温成形铝合金进行180 °C × 30 min的烘烤处理可以提升强度,但会降低塑性。

#### 参考文献:

[1] MORI K I, ABE Y. A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation[J]. International Journal of Lightweight

Materials and Manufacture, 2018, 1(1): 1-11.

[2] KARBASIAN H, TEKKAYA A E. A review on hot stamping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2103-2118.

[3] ZHENG K L, POLITIS D J, WANG L L, et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(2): 55-80.

[4] 马鸣图, 毕祥玉, 游江海, 等. 铝合金汽车板性能及其应用的研究进展[J]. 机械工程材料, 2010, 34(6): 1-5. MA M T, BI X Y, YOU J H, et al. Research progress of property and its application of aluminium alloy auto sheet [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(6): 1-5.

[5] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 1-16. FAN Z J, GUI L J, SU R Y. Research and development of automotive lightweight technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 1-16.

[6] 张新明, 邓运来, 张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271. ZHANG X M, DENG Y L, ZHANG Y. Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(3): 257-271.

[7] 徐振海, 单德彬. 车身制造中的铝合金板热处理-冲压一体化技术[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(3): 1-9. XU Z H, SHAN D B. Heat treatment-stamping integrated techniques for aluminum alloy sheets in the automotive body manufacture[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(3): 1-9.

[8] XU X F, ZHAO Y G, WANG X D, et al. The rapid age strengthening induced by Ag additions in 7075 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 648: 367-370.

- [9] 董宇, 费文慧, 王新宇, 等. 7050 合金电流场时效析出行为[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(7): 26-32.  
DONG Y, FEI W H, WANG X Y, et al. Aging precipitation behavior of 7050 alloy under applied current[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(7): 26-32.
- [10] KU M H, HUNG F Y, LUI T S, et al. Enhanced formability and accelerated precipitation behavior of 7075 Al alloy extruded rod by high temperature aging[J]. Metals, 2018, 8(8): 648.
- [11] 吴思昕. 7075 铝合金预时效-温成形工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
WU S X. Study on pre-aging-warm forming process of 7075 aluminum alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [12] MARLAUD T, DESCHAMPS A, BLEY F, et al. Evolution of precipitate microstructures during the retrogression and re-ageing heat treatment of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2010, 58(14): 4814-4826.
- [13] 李红英, 程勇胜, 郑子樵. 时效制度对 7475 铝合金挤压件组织与性能的影响[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(4): 394-397.  
LI H Y, CHENG Y S, ZHENG Z Q. Effects of aging on microstructure and properties of 7475 alloy extrusions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2001, 32(4): 394-397.

## Effect of Pre-aging - Warm Forming Process Parameters on Microstructure and Properties of 7075 Aluminum Alloy

ZHANG Xiaolei<sup>1,2</sup>, PENG Ze<sup>2</sup>, PENG Yuqing<sup>2</sup>, LIANG Xiao<sup>2</sup>, WANG Zijian<sup>1,2</sup>

(1. School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215137, China;

2. Jiangxi Hot Stamping Tech Auto Parts Co., Ltd, Jiujiang 332400, China)

**Abstract:** The 7075 aluminum alloy was pre-aged and warm formed at different pre-aging temperatures (85, 100, 120 °C) for different pre-aging times (0–32 h) and forming temperatures (150, 200, 250, 300 °C). The effect of process parameters on the microstructure and properties of alloy was studied. The optimum process parameters were determined. The results show that with the extension of pre-aging time, the grain size of 7075 aluminum alloy had no obvious change, the amount of precipitated phase increased, and the hardness and strength increased first and then decreased. Compared with those at pre-aging temperature of 100, 120 °C, the number and the size of precipitated phases were smaller, the hardness and strength were larger, and the percentage elongation after fracture was smaller at the pre-aging temperature of 85 °C. The hardness and strength decreased with the increase of warm forming temperature. The optimum pre-aging-warm forming process parameters were listed as follows: pre-aging temperature of 85 °C, pre-aging time of 24 h, and warm forming temperature of 150 °C. At this time, the alloy had the best comprehensive properties, which had the tensile strength and percentage elongation after fracture were 95% and 163% of those of the 7075-T6 aluminum alloy, respectively. Baking at 180 °C for 30 min after forming could improve the strength and reduce the ductility.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; pre-aging; warm forming; baking