

加热与热处理

## 自然时效与冷藏工艺对 2195 铝锂合金型材性能的影响

王妍琴<sup>1</sup>, 王 东<sup>2</sup>, 冯越文<sup>1</sup>, 梁立冬<sup>1</sup>, 窦鹏程<sup>1</sup>, 马晋峰<sup>1</sup>, 谷春杰<sup>1</sup>

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 天津市职业大学 机电工程与自动化学院, 天津 300410)

**摘要:** 淬火后新淬火态铝锂合金具有良好的塑性, 可进行塑性成形加工。但新淬火态铝锂合金有自然时效趋势, 针对此现象, 通过冷藏可以延缓自然时效趋势。通过单轴拉伸试验, 获得了自然时效时间、冷藏温度和时间对新淬火态铝锂合金力学性能的影响规律。结果表明: 新淬火态下, 随着自然时效时间的不断增加, 合金的强度和硬度呈现不断增加的趋势, 伸长率则不断降低, 自然时效 30 min 后, 合金的抗拉强度为 340.65 MPa、伸长率为 20.2%; 随着冷藏温度逐渐降低、冷藏时间逐渐增加, 合金的强度值出现增加趋势, 而伸长率则出现下降趋势, 冷藏温度为 -20 °C、冷藏时间在 48 h 以内, 铝锂合金的抗拉强度为 332.72 MPa、伸长率为 20.48%, 塑性保持较好。

**关键词:** 铝锂合金; 自然时效; 冷藏工艺; 强度; 新淬火态

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.022

**中图分类号:** TG166.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0162-07

## Influence of natural aging and cold storage process on properties of 2195 Al-Li alloy profile

Wang Yanqin<sup>1</sup>, Wang Dong<sup>2</sup>, Feng Yuewen<sup>1</sup>, Liang Lidong<sup>1</sup>, Dou Pengcheng<sup>1</sup>, Ma Jinfeng<sup>1</sup>, Gu Chunjie<sup>1</sup>

(1. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

**Abstract:** After quenching, Al-Li alloy has good plasticity in the newly quenched state, and can be processed by plastic forming. However, the Al-Li alloy in newly quenched state has a natural aging trend, which can be delayed by cold storage. Therefore, the influence laws of natural aging time, cold storage temperatures and time on the mechanical properties of the newly quenched Al-Li alloy were obtained by uniaxial tensile test. The results show that in the newly quenched state, with the continuous increasing of natural aging time, the strength and hardness of the alloy show an increasing trend, and the elongation continuously decreases. After natural aging for 30 min, the tensile strength of the alloy is 340.65 MPa, the elongation is 20.2%. With the decreasing of cold storage temperature and the increasing of cold storage time, the strength values of the alloy show an increasing trend, while the elongation shows a decreasing trend. When the cold storage temperature is -20 °C and the cold storage time is within 48 h, the tensile strength of the Al-Li alloy is 332.72 MPa, the elongation is 20.48%, and the plasticity is well maintained.

**Key words:** Al-Li alloy; natural aging; cold storage process; strength; newly quenched state

2195 铝锂合金具有低密度、高比强度、高比刚度、高耐腐蚀性及可焊接等优势, 在航空航天领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。在航空航天领域, 逐渐采用铝锂合金代替常规的高强度铝合金, 不仅可以使结构质量减轻 10%~20%, 刚度也会提高 15%~

20%<sup>[3]</sup>。为了提高 2195 铝锂合金的综合力学性能, 优化其热处理工艺<sup>[4-5]</sup>是常用的方法。淬火<sup>[6-7]</sup>结合人工时效处理<sup>[8-11]</sup>是提高铝锂合金综合力学性能的常规处理方法。淬火后的新淬火态铝锂合金具有良好的塑性, 可进行加工成形。随着自然时效时间的延长, 一般铝合金强度会逐渐升高, 伸长率逐渐降低<sup>[12]</sup>, 但是, 针对铝锂合金自然时效趋势的研究却鲜有报道。冷藏时效工艺可以延缓其自然时效的速度<sup>[13-14]</sup>, 使零件保持新淬火态的良好塑性。目前, 国内几个大型钣金制造厂, 如石家庄飞机制造厂、洪都航空工业集团等采用低温冷库研制过 2A12 和

收稿日期: 2024-02-23; 修订日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1937205)

作者简介: 王妍琴 (1987-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 1124337718@qq.com

通信作者: 谷春杰 (1987-), 男, 学士, 工程师

E-mail: gcj2008jie@163.com

LY10 铝合金零件，但针对铝锂合金的冷藏工艺参数未进行过研究。本文针对大型截面的铝锂合金铝型材在新淬火态下的自然时效趋势和冷藏工艺参数进行研究，进一步对铝锂合金的热处理工艺进行优化，并对力学性能进行调控。

1 研究对象及设备

本次的研究对象为 2195 大型 r 截面铝锂合金型材，材料状态为新淬火态。型材截面尺寸如图 1a 所示。在型材截断面上，按照 GB/T 228.1—2021<sup>[15]</sup>对型材进行取样，以横向试样作为单向拉伸试样，如图 1b 所示。本次试验研究的 2195 铝锂合金材料的化学成分见表 1<sup>[16]</sup>。所取试样的热处理工作在 OTF-1200X 管式炉中进行；使用 UTM5105X 电子万能材料试验机进行拉伸试验；冷藏试验在 DW-25 低温试验箱中进行。

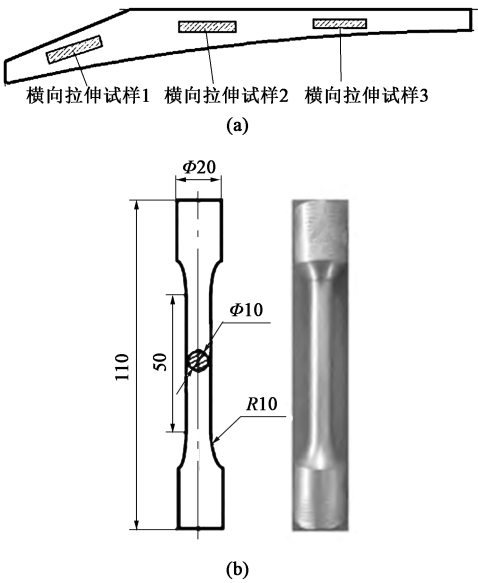


图 1 2195 铝锂合金型材 (a) 和单轴拉伸试样 (b)

Fig. 1 2195 Al-Li alloy profile (a) and uniaxial tensile sample (b)

表 1 2195 铝锂合金型材的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of 2195 Al-Li alloy profile（%，mass fraction）

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ag	Li	Zr	Ti	其他杂质		Al
										单个	合计	
≤0.12	≤0.15	3.7~4.3	≤0.25	0.25~0.80	≤0.25	0.25~0.60	0.8~1.2	0.08~0.16	≤0.1	≤0.05	≤0.15	余量

2 试验结果及分析

2.1 自然时效时间对新淬火态 2195 铝锂合金力学性能的影响

型材淬火后，随着自然时效的进行，力学性能逐渐增加，而伸长率降低，这对于零件的塑性加工是不利的。为了探索最佳加工时间范围，研究了自然时效时间对力学性能的影响。通过单向拉伸试验得到 2195 铝锂合金型材的部分力学性能，如表 2 所示，力学性能变化趋势曲线如图 2 所示，微观组织变化如图 3 所示。

通过分析试验数据可知，随着自然时效时间的不断增加，强度呈现不断增加的趋势，伸长率不断降低。进一步观察可以发现，当自然时效时间低于 30 min 时，塑性保持较好；当自然时效时间低于 420 min 时，强度值随着自然时效时间的增加而增长得很快；当自然时效时间超过 420 min 后，强度值虽然也在增长，但是增长速度变得越来越慢。图 3 给出了未经腐蚀的 2195 铝锂合金在不同自然时效时间下的扫描电镜（Scanning Electron Microscope, SEM）照片，

表 2 不同自然时效时间下 2195 铝锂合金型材的力学性能

Table 2 Mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile under different natural aging time

自然时效时间/min	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
0	146.92	324.57	21.95
10	149.64	329.64	21.00
20	151.73	335.47	20.50
30	156.41	340.65	20.20
40	162.34	342.46	19.95
50	167.54	350.43	19.61
60	170.26	355.55	19.46
120	173.51	362.43	19.35
180	176.94	370.70	19.20
240	183.76	393.43	18.78
300	190.84	393.23	18.45
420	200.15	401.51	18.10
1440	205.46	404.07	17.94
2880	211.74	411.08	17.83
5760	214.84	416.70	17.81

其中，自然时效时间分别为 0、60、180 和 420 min。

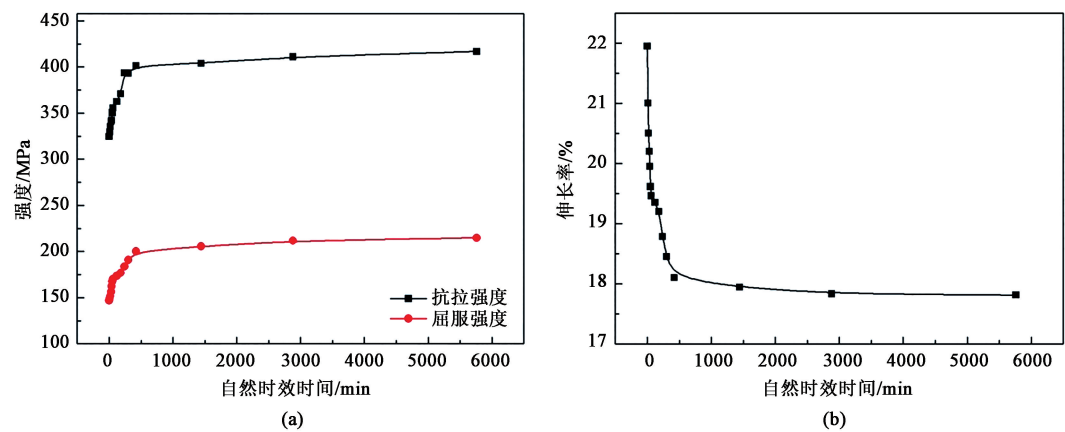


图 2 2195 铝锂合金型材的力学性能随自然时效时间的变化趋势  
(a) 强度 (b) 伸长率

Fig. 2 Change trends of mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile with natural aging time  
(a) Strength (b) Elongation

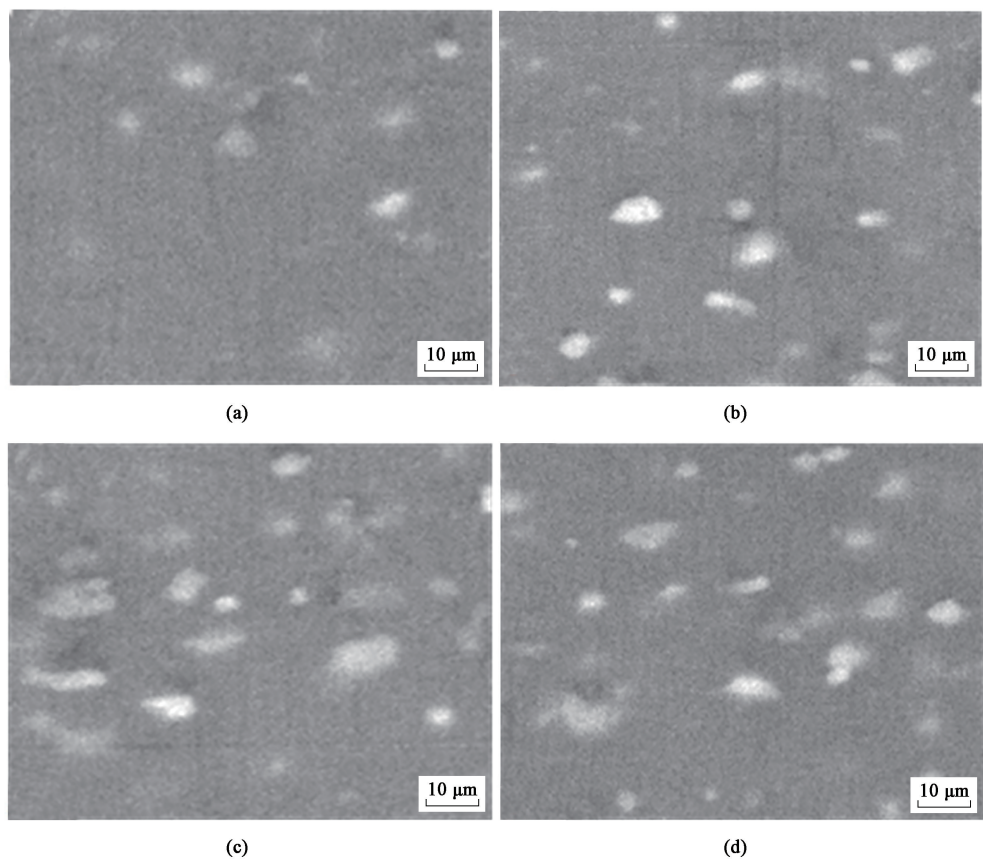


图 3 2195 铝锂合金型材的微观组织随自然时效时间的变化  
(a) 0 min (b) 60 min (c) 180 min (d) 420 min

Fig. 3 Change trends of microstructures for 2195 Al-Li alloy profile with natural aging time

从图 3 中可以看出，淬火后在室温下放置不同时间合金中可生成弥散分布的析出相。当放置时间较短时，析出相较少，随着放置时间的增加，析出相的数量增加，但放置时间超过 420 min 后，析出相的数

量增加缓慢。析出相的增加对铝锂合金起到了强化作用，这与抗拉强度的变化趋势相一致。结合表 2 和图 2、图 3 可以得出，零件在淬火后 30 min 内的塑性最好，推荐在 30 min 内完成成形工作。

2.2 冷藏工艺对 2195 铝锂合金力学性能的影响

冷藏技术可以有效地降低零件的自然时效趋势。目前，冷藏技术已成功应用至 2A12 铝合金和 7A09 铝合金中。冷藏温度为 $-15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ，一般情况下要求零件的冷藏时间不得超过 4 天，特殊情况下不得超过 6 天。

针对 2195 铝锂合金材料，以其他铝合金的历史生产参数为基础进行研究，对淬火后冷藏延迟时效进行试验，研究冷藏温度和冷藏时间对变形铝合金性能的影响，摸索出合理的冷藏延迟时效工艺参数，以实现热处理炉的高效利用，适应不同产品和不同操作者的技能水平，减少淬火等待时间，提高生产效率，满足高密度发射的生产需求。

2.2.1 冷藏温度对力学性能的影响

选取室温、 $-15$ 、 $-20$  和  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，分别保持冷藏 48 h，以研究冷藏温度对力学性能的影响。试验测得的 2195 铝锂合金的力学性能如表 3 所示，力学性能的变化趋势如图 4 所示，微观组织变化如图 5 所示。

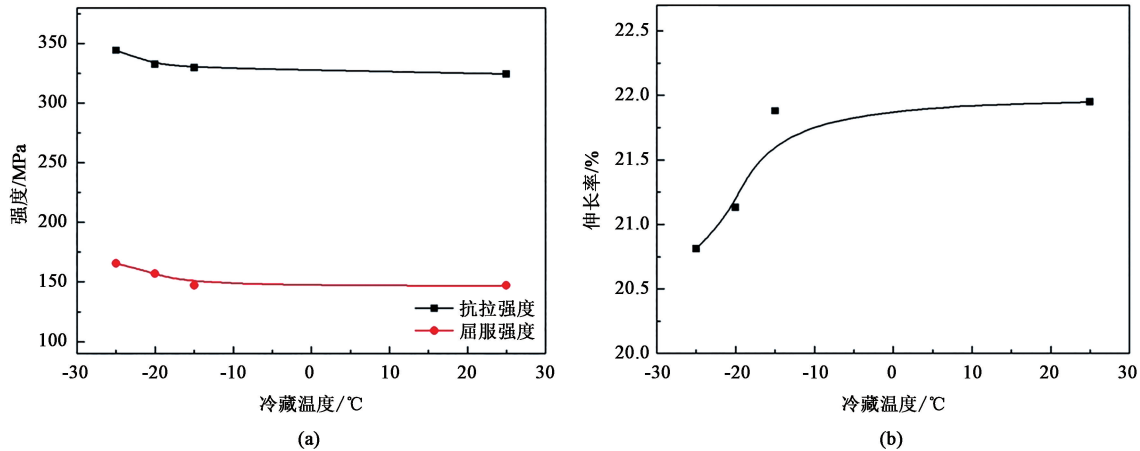


图 4 2195 铝锂合金型材的力学性能随冷藏温度的变化趋势  
(a) 强度 (b) 伸长率

Fig. 4 Change trends of mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile with cold storage temperature  
(a) Strength (b) Elongation

2.2.2 冷藏时间对力学性能的影响

选取 0、2 和 4 h，直到 120 h，保持冷藏温度为 $-20^{\circ}$ ，研究了冷藏时间对力学性能的影响。试验测得的 2195 铝锂合金的力学性能如表 4 所示，力学性能的变化趋势如图 6 所示，微观组织变化如图 7 所示。

从图 6 中可以看出，在冷藏温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，随着冷藏时间的增加，合金的强度值和硬度值呈现

表 3 2195 铝锂合金型材在不同冷藏温度下的力学性能  
Table 3 Mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile at different cold storage temperatures

冷藏温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷藏时间/ h	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/%
室温 (仅淬火)		146.92	324.57	21.95
$-15$	48	147.3	329.62	21.88
$-20$		157.14	332.72	21.13
$-25$		165.7	344.25	20.81

从图 4 中可以看出，随着冷藏温度的降低，强度值呈现增加的趋势，而伸长率则呈现下降的趋势。图 5 给出了未经腐蚀的 2195 铝锂合金在不同冷藏温度下的微观组织，其中，冷藏温度分别为 $-15$ 、 $-20$  和  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 5 中可以看出，淬火后在不同冷藏温度冷藏合金中可生成弥散分布的析出相，但当冷藏温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，变形分配时析出相较少，随着冷藏温度的增加，析出相数量增加，所以，其强度不断增加。由于生产大环境要求，冷库设定的工作温度要求保持平稳，因此，取冷藏温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

增加的趋势，而伸长率不断降低。图 7 给出了 2195 铝锂合金在不同冷藏时间下未经腐蚀的微观组织，其中，冷藏时间分别为 2、12 和 24 h。从图 7 中可以看出，淬火后冷藏不同时间后合金中可生成弥散分布的析出相，但当冷藏时间为 2 h 时，析出相的数量较少；12 h 时，析出相的数量明显增多；24 h 时，析出相的数量还在增多，但是增长幅度减小，这也与抗拉强度的增大趋势一致。



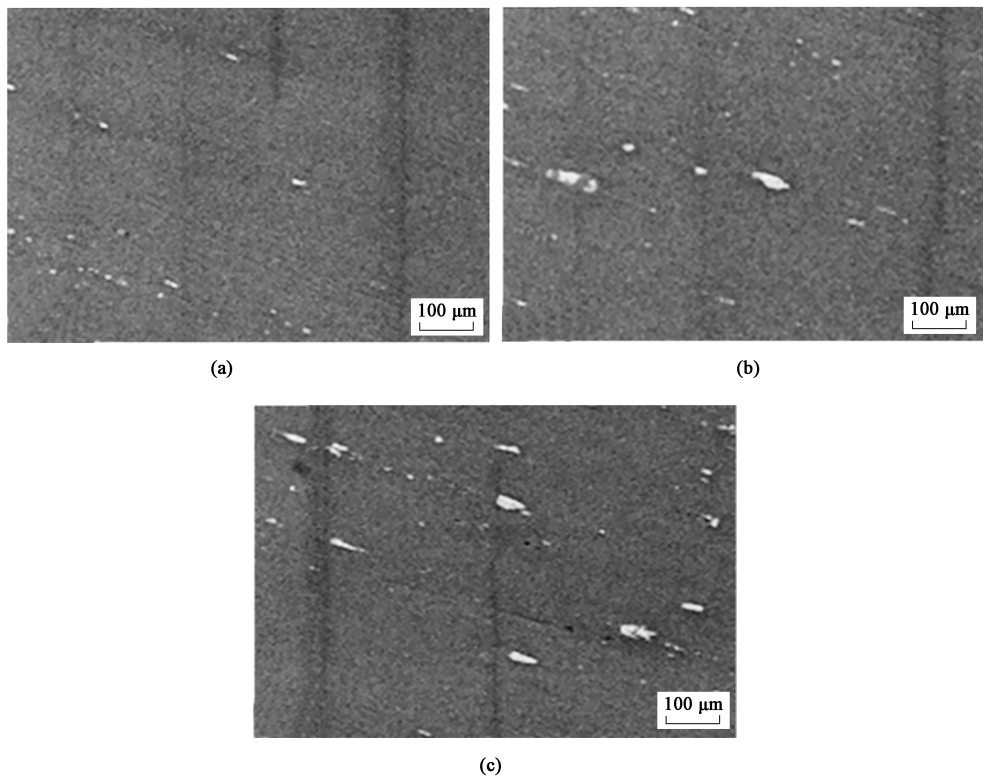


图 5 2195 铝锂合金型材的微观组织随冷藏温度的变化  
(a) -15 ℃ (b) -20 ℃ (c) -25 ℃

Fig. 5 Change of microstructures for 2195 Al-Li alloy profile with cold storage temperature

表 4 在不同冷藏时间下 2195 铝锂合金型材的力学性能  
Table 4 Mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile at different cold storage time

冷藏温度/ ℃	冷藏时间/ h	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/%
-20	0	146.92	324.57	22.70
	2	149.00	325.70	22.3
	4	151.00	326.00	21.90
	8	152.40	327.40	21.20
	16	153.20	328.71	21.00
	24	155.01	330.29	20.71
	36	155.60	330.80	20.51
	48	157.14	332.72	20.47
	60	157.01	333.20	20.18
	72	160.40	333.61	20.00
	96	169.42	334.50	19.40
	120	179.82	334.92	19.00

3 结论

(1) 在新淬火态下，随着自然时效时间的不断

增加，2195 铝锂合金的强度和硬度呈现不断增加的趋势，伸长率则不断降低。推荐在零件淬火后 30 min 内完成成形工作。

(2) 如果不能在 30 min 内完成成形工作，可将其他零件放入冷库。在大生产环境下，冷藏温度为 -20 ℃，冷藏时间在 48 h 以内时，零件的各项力学性能较好。

参考文献：

[1] 刘龙聆. 2195 铝锂合金挤压成形工艺与组织性能研究 [D]. 上海：上海交通大学，2020.  
Liu L L. Study on Process, Microstructure and Properties of Extruded 2195 Al-Li Alloy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[2] 金阳. 新型铝锂合金的激光焊及其数值模拟分析 [D]. 南京：南京航空航天大学，2020.  
Jin Y. Simulation Analysis of New Al-Li Alloy Laser Beam Welding and Numerical [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[3] 胡丽敏，张帅，成桃，等. 热处理对 2195 铝锂合金组织及性能的影响 [J]. 航天制造技术，2021，12 (6)：22-23.  
Hu L M, Zhang S, Cheng T, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 2195 Al-Li alloy [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021, 12 (6)：22-23.

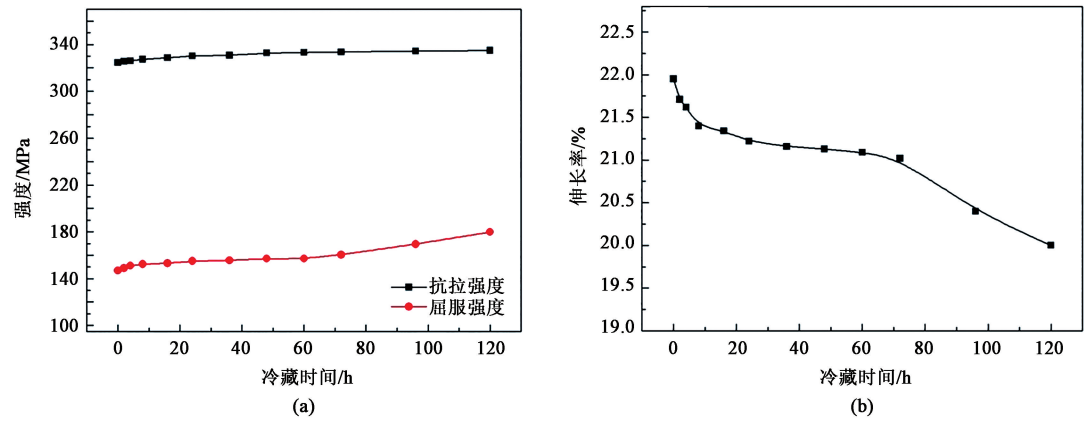


图 6 2195 铝锂合金型材的力学性能随冷藏时间的变化趋势  
(a) 强度 (b) 伸长率

Fig. 6 Change trends of mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile with cold storage time  
(a) Strength (b) Elongation

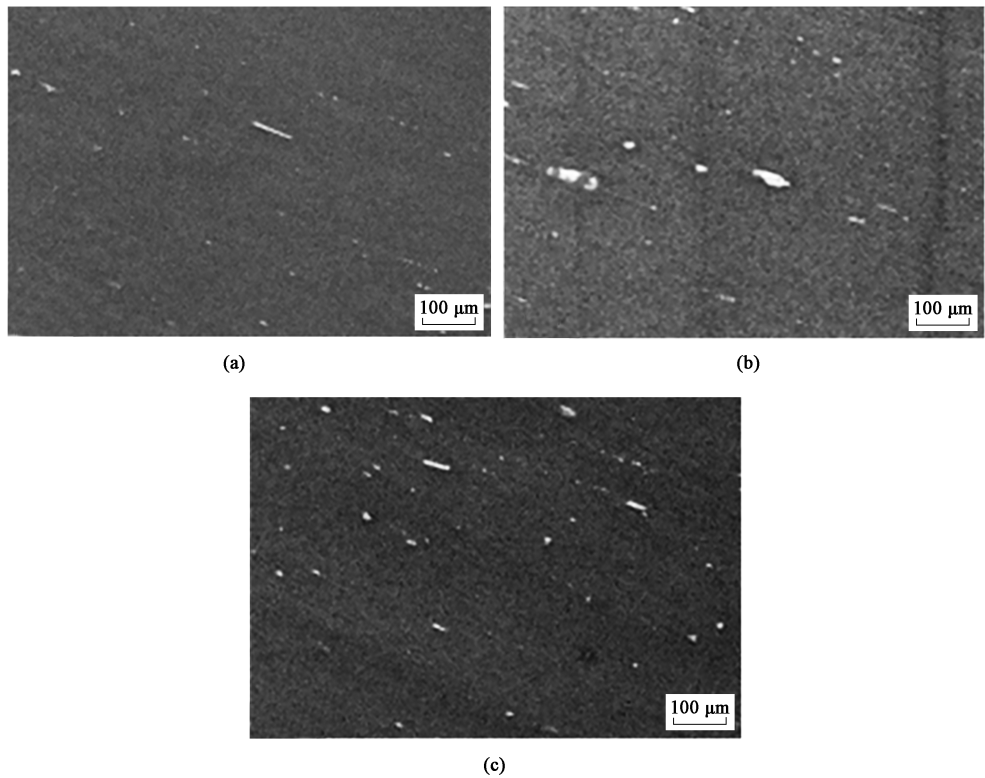


图 7 2195 铝锂合金型材的微观组织随冷藏时间的变化  
(a) 2 h (b) 12 h (c) 24 h

Fig. 7 Change of microstructures for 2195 Al-Li alloy profile with cold storage time

[4] Kim I S, Song M Y, Kim J H, et al. Effect of added Mg on the clustering and two-step aging behavior of Al-Cu alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 798: 140123.

[5] Chen H, Chen Z, Ji G, et al. Experimental and modeling assessment of ductility in a precipitation hardening AlMgScZr alloy [J]. International Journal of Plasticity, 2021, 139: 102971.

[6] 郑晖, 栾景旺, 孙凌崑, 等. 固溶温度对铝锂合金板料成形性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 46-53.

[7] 易云静. 热处理及预变形对铝锂合金板材组织性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

Yi Y J. Effects of Heat Treatment and Pre-deformation on Micro-

- structure and Properties of 2195 Al-Li Alloy Sheet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] Dorin T, Deschamps A, Geuser F D, et al. Quantification and modeling of the microstructure/strength relationship by tailoring the morphological parameters of the T1 phase in an Al-Cu-Li alloy [J]. *Acta Materialia*, 2014, 75: 134-146.
- [9] Xu J J, Deng Y L, Chen J Q, et al. Effect of ageing treatments on the precipitation behavior and mechanical properties of Al-Cu-Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 773: 138885.
- [10] Zhang C S, Liu M F, Meng Z J, et al. Microstructure evolution and precipitation characteristics of spray-formed and subsequently extruded 2195 Al-Li alloy plate during solution and aging process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283: 116718.
- [11] Duan S W, Matsuda K, Wang T, et al. Microstructures and mechanical properties of a cast Al-Cu-Li alloys during heat treatment procedure [J]. *Rare Metals*, 2020, 40 (7): 1897-1906.
- [12] 冯银成, 李落星, 刘杰, 等. 自然时效对 6061 铝合金显微组织和力学性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 2011, 35 (3): 18-21.
- Feng Y C, Li L X, Liu J, et al. Effect of natural aging on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011, 35 (3): 18-21.
- [13] 冯冬云, 周如满. 2017 铝合金铆钉的应用 [J]. *国外金属热处理*, 1999 (6): 44-45.
- Feng D Y, Zhou R M. Application of 2017-aluminum alloy rivets [J]. *Heat Treatment of Metals Abroad*, 1999 (6): 44-45.
- [14] 颜娟娟, 唐保林. LY10 铆钉不同时效工艺对抗剪强度的影响 [J]. *教练机*, 2002 (1): 48-53.
- Yan J J, Tang B L. Influences of LY10 rivets with different aging on the shear strength [J]. *Trainer*, 2002 (1): 48-53.
- [15] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, *Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature* [S].
- [16] 马康, 王清峰, 宋健, 等. 固溶-时效对 2195 铝锂合金型材力学性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (2): 204-209.
- Ma K, Wang Q F, Song J, et al. Influence of solution-aging on mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile. [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (2): 204-209.

#### (上接第 154 页)

- [2] 孟玉喜. 汽车开关接触片冲裁拉深级进模设计 [J]. *模具工业*, 2017, 43 (3): 24-28.
- Meng Y X. Design of piercing and drawing progressive die for automobile switch contact sheet [J]. *Die & Mould Industry*, 2017, 43 (3): 24-28.
- [3] 熊大远. 实用钣金技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- Xiong D Y. *Practical Manual of Sheet Metal Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [4] 赵勇. 圆筒内六角阶梯级进模设计 [J]. *模具工业*, 2022, 48 (2): 14-19.
- Zhao Y. Design of progressive die for cylinder inner hexagonal step [J]. *Die & Mould Industry*, 2022, 48 (2): 14-19.
- [5] 赵德世, 杜坡, 刘杰. 汽车加强板多工位级进模设计 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (8): 219-223.
- Zhao D S, Du P, Liu J. Design on multi-station progressive die for automobile reinforcement plate [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (8): 219-223.
- [6] 王可胜, 吴大林. 带卡口的盒型零件多工位级进模设计 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (1): 202-207.
- Wang K S, Wu D L. Design on multi-position progressive die for box-shaped part with bayonet [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (1): 202-207.
- [7] 王巍, 李珍, 张贺, 等. 航空座椅连接件多工位级进模设计 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (10): 223-228.
- Wang W, Li Z, Zhang H, et al. Design on multi-station progressive die for aero seat connector [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (10): 223-228.
- [8] 武晓红. 左支架多工位级进模的设计 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (12): 189-192.
- Wu X H. Design on multi-position progressive die for left bracket [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (12): 189-192.
- [9] 冯晓杰. 卡箍卷圆级进模设计 [J]. *模具工业*, 2022, 48 (8): 26-30.
- Feng X J. Design of edge rolling progressive die for clip [J]. *Die & Mould Industry*, 2022, 48 (8): 26-30.
- [10] 杜建霞. 衔铁成形工艺与级进模设计 [J]. *模具工业*, 2023, 49 (9): 20-24.
- Du J X. Improvement design of forming process and progressive die for armature [J]. *Die & Mould Industry*, 2023, 49 (9): 20-24.
- [11] 王海平, 李林刚, 王跃. 半圆形支架多工位级进模设计 [J]. *模具制造*, 2023, 23 (2): 9-12.
- Wang H P, Li L G, Wang Y. Design of multi-position progressive die for the semicircle bracket [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2023, 23 (2): 9-12.
- [12] 李斌. 精密对称弹片级进模设计 [J]. *模具制造*, 2024, 24 (9): 4-6, 16.
- Li B. Design of progressive die for the precision symmetrical shrapnel [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2024, 24 (9): 4-6, 16.
- [13] 汪志敏, 肖国华, 王东钢, 等. 轴承坯料机械手轴盖 3D 多工位级进模设计 [J]. *模具技术*, 2024, 42 (2): 55-63.
- Wang Z M, Xiao G H, Wang D G, et al. Design of 3D multi-station progressive die for bearing blank robot shaft cover [J]. *Die and Mould Technology*, 2024, 42 (2): 55-63.