

加热与热处理

固溶-时效对 2195 铝锂合金型材力学性能的影响

马 康¹, 王清峰^{2,3}, 宋 健¹, 初冠南^{2,3}

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209;
3. 哈工大(威海) 创新创业园有限责任公司, 山东 威海 264209)

摘要: 2195 铝锂合金作为可热处理强化新型铝锂合金的代表, 具有高比强度、高耐腐蚀和抗疲劳等优点, 常作为受力结构件被广泛应用于航天航空领域, 因此, 有必要对其热处理制度展开研究。通过室温单轴拉伸试验和硬度测试, 获得了在不同固溶温度、不同固溶时间、不同人工时效温度和不同人工时效时间下的型材的强度、伸长率和硬度值, 研究了固溶-时效参数对 O 态 2195 铝锂合金型材力学性能的影响。结果表明: 在 520 ℃ 下固溶 1.5 h 以上, 再在高于 160 ℃ 的环境下至少保温 24 h 进行人工时效, 可使 2195 铝锂合金型材满足工程需求。运用最小二乘法建立了 2195 铝锂合金型材的硬度值与抗拉强度值之间的线性关系, 可以较快地得出强度值。

关键词: 铝锂合金; 固溶处理; 时效处理; 强度; 硬度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.026

中图分类号: TG166.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 02-0203-07

Influence of solution-aging on mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile

Ma Kang¹, Wang Qingfeng^{2,3}, Song Jian¹, Chu Guannan^{2,3}

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

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology-Weihai, Weihai 264209, China;

3. Harbin Institute of Technology-Weihai Innovation Park Co., Ltd., Weihai 264209, China)

Abstract: 2195 Al-Li alloy as a representative of the new Al-Li alloy which can be strengthened by heat treatment, it has the advantages of high specific strength, high corrosion resistance and fatigue resistance, and it is often used as a stressed structural part in the aerospace field, so it is necessary to study its heat treatment process. Therefore, the strength, elongation and hardness values of profile at different solution temperatures, different solution times, different artificial aging temperatures and different artificial aging times were obtained by the uniaxial tensile test at room temperature and the hardness test, and the influence of solution-aging parameters on the mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile in O state was studied. The results show that 2195 Al-Li alloy profile meets the engineering requirements by solution treatment at 520 ℃ for more than 1.5 h, and then artificial aging at an environment higher than 160 ℃ for least 24 h. The linear relationship between hardness and tensile strength values of 2195 Al-Li alloy profile is established by the least square method, and the strength value can be obtained quickly.

Key words: Al-Li alloy; solution treatment; aging treatment; strength; hardness

在航空航天领域中, 减轻结构零件重量的需求十分迫切。相关数据显示, 重型运载火箭每减重 1 kg, 可节省发射费用约 20000 美元^[1]。为了实现结构零件轻量化^[2-4], 密度低、比强度高的铝合

金^[5-8]被广泛应用于零部件的制造。其中, 2195 铝锂合金^[9-10]因其优异的性能在航空航天飞行器以及运载火箭中被广泛应用。2195 铝锂合金既为变形铝合金也为可热处理强化铝合金^[11]。为了获得具有优异力学性能的 2195 铝锂合金, 优化其热处理工艺^[12-13]具有重要意义。固溶^[14-15]加时效处理^[16-19]是提高铝锂合金力学性能的一种重要的处理手段。肖代红等^[20]通过差热分析、扫描电子显微镜观察和单轴拉伸试验, 研究了 2195 铝锂合金板材的固溶温度区间以及区间温度对板材微观组织演变、强度和伸长率的影响, 得出在 530 ℃ 下保温 1 h 获得的合金性能最好。胡铁牛^[21]研究了不同固溶时间对

收稿日期: 2022-04-02; **修订日期:** 2022-07-05

基金项目: 山东省重大科技创新工程 (2020CXGC010303); 国家自然科学基金重点项目 (U1937205); 山东省重大科技创新工程 (2019TSLH0103)

作者简介: 马 康 (1986-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: wqf1826@163.com

通信作者: 初冠南 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: chuguannan@hit.edu.cn

-196.15℃条件下 2195 铝锂合金拉伸性能的影响,发现在低固溶温度下保温时间越长,材料强度越小,而伸长率则越大。崔帅^[22]研究了时效处理对 2195 铝锂合金轧制板材硬度和强度的影响,发现轧制板材的硬度和强度值随着时效温度的增加呈上升的变化趋势,直至峰值时效时达到最大值。冯博^[23]在时效温度为 155℃的条件下,研究了不同时效保温时间对板材力学性能的影响,发现对合金板材在 155℃条件下保温 32 h 可获得最佳的综合性能。而我国对于 2195 铝锂合金型材研究起步较晚,其热处理参数-性能对应关系研究并不深入。因此,有必要进一步对 2195 铝锂合金型材热处理工艺进行优化以及性能调控。

通过室温单轴拉伸试验和硬度测试,获得在不同固溶温度、不同固溶时间、不同人工时效温度 and 不同人工时效时间下的型材的强度、伸长率和硬度值,研究固溶-时效参数对 O 态 2195 铝锂合金型材力学性能的影响,确定合适的热处理制度以及强度-硬度之间的关系,从而为 2195 铝锂

合金型材的性能调控与工程应用提供理论指导。

1 试验材料与设备

本文以退火态(O态)2195 铝锂合金大规格异型截面弯曲型材为研究对象,规格如图 1a 所示。按照国家标准 GB/T 228.1—2021^[24]设计拉伸试样并在型材弯曲方向(横向)加工单轴拉伸试样和硬度样品,如图 1b 和 1c 所示。所研究材料的化学成分见表 1。材料热处理、室温拉伸试验和硬度测试分别在 OTF-1200X 管式炉、WGL-45B 鼓风干燥箱、UTM5105X 电子万能材料试验机和 TIME6166 硬度计上进行,这些设备参数均满足测试分析需求。值得注意的是硬度计调整好后,先打 1 个测试点检验试样与砧座的接触情况,待硬度计处于正常运行机制的状态下时再进行正式测试,记录后续 10 个试验点的硬度值,如图 1c 所示。其中,拉伸数据取 3 组试样的均值,硬度数据取 10 个试验点的均值,排除试验偶然性误差。

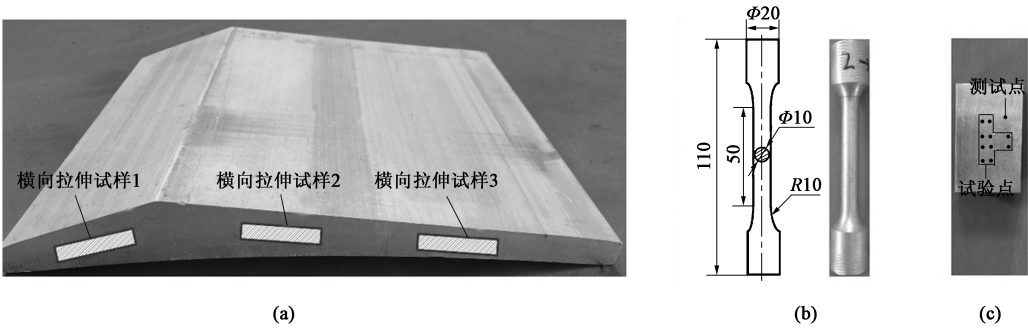


图 1 型材和试验样品
(a) 2195 铝锂合金型材 (b) 拉伸试样 (c) 硬度试样
Fig. 1 Profile and test samples
(a) 2195 Al-Li alloy profile (b) Tensile sample (c) Hardness sample

表 1 2195 铝锂合金型材化学成分(%,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 试验结果与分析

2.1 固溶参数对力学性能的影响

固溶处理是指将 2195 铝锂合金型材在某一温度区间内保温一定时间后迅速水淬得到过饱和固溶体,实现对 2195 铝锂合金型材的初步强化。在此工艺中,影响最大的两个参数为固溶温度和固溶时间。

就固溶温度而言,随着固溶温度的增高,固溶体的饱和度增大,但是固溶温度过高,合金会发生过烧;而固溶时间越长,越有利于溶质原子回溶,但固溶时间过长,合金晶粒就会变得粗大。因此,优化固溶参数至关重要。

2.1.1 固溶温度对力学性能的影响

首先,研究不同固溶温度(490、500、510、520 和 530℃)对 2195 铝锂合金型材力学性能的影响。

响，固溶时间为 1.5 h，人工时效温度为 160 ℃，人工时效时间为 36 h。通过拉伸试验和硬度测试得到

的不同固溶温度下 2195 铝锂合金型材的屈服强度、抗拉强度、伸长率和硬度如表 2 所示。

表 2 不同固溶温度下 2195 铝锂合金型材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile at different solution temperatures

条件				结果			
固溶温度/℃	固溶时间/h	人工时效温度/℃	人工时效时间/h	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度/HRBW
490	1.5	160	36	426.68	447.67	10.00	78.6
500				446.41	465.37	9.30	82.9
510				482.17	509.74	9.18	85.1
520				496.21	519.81	9.00	85.8
530				488.51	506.85	8.70	84.9

2195 铝锂合金型材力学性能随固溶温度的变化趋势如图 2 所示。试验结果显示，随着固溶温度的增加，屈服强度和抗拉强度先增大后减小，伸长率持续降低。当固溶温度增加至 520 ℃时，屈服强度和抗拉强度达到峰值，此时的屈服强度和抗拉强度增大至 496.21 和 519.81 MPa，伸长率降至 9.0%；而当固溶温度升高至 530 ℃时，屈服强度、抗拉强度和伸长率明显降低。强度升高的原因为：经固溶处理后大量的 Al-Cu 等第二相粒子回溶于铝基体中，实现固溶强化。当固溶温度为 490 ℃，即固溶温度

较低时，第二相粒子溶解数量较少，此时固溶体过饱和度偏低，不利于铝锂合金的强化。随着固溶温度的升高，第二相粒子溶解数量增多，强化效果也随之提高，但当固溶温度达到 530 ℃，即固溶温度过高时，铝锂合金组织会发生过烧反应，导致材料的性能下降。硬度随固溶温度的变化趋势类似于抗拉强度，先增大后降低。在实际工程应用中，此弯曲型材热处理强化后要求横向的屈服强度高于 470 MPa，抗拉强度高于 510 MPa，伸长率大于 6%。结合图 2 和表 2 可以得出，当固溶温度为 520 ℃时，力学性能可满足要求。

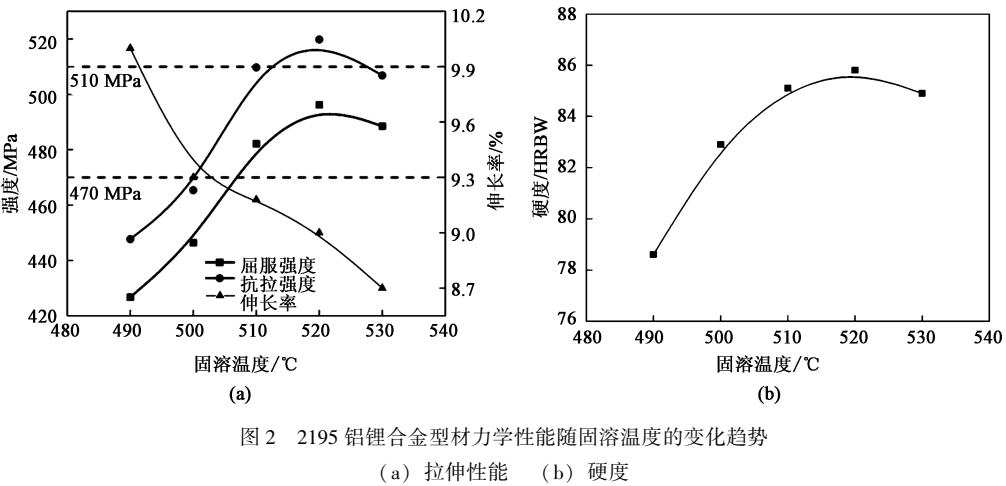


图 2 2195 铝锂合金型材力学性能随固溶温度的变化趋势

Fig. 2 Change trends of mechanical properties for 2195 Al-Li alloy profile with solution temperature

2.1.2 固溶时间对力学性能的影响

固溶时间也是影响力学性能的重要工艺参数，因此，试验过程中分别进行 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h 的固溶保温，其固溶温度为 520 ℃，人工时效温度为 160 ℃，人工时效时间为 36 h。试验测得的 2195 铝锂合金力学性能如表 3 所示。

2195 铝锂合金型材力学性能随固溶时间的变化趋势如图 3 所示。试验结果显示，固溶温度为

520 ℃ 时，当固溶时间从 0.5 h 增加至 1.5 h 时，屈服和抗拉强度增大，而伸长率降低；而当固溶时间继续增加至 2.5 h 时，强度增大缓慢，伸长率降低也减慢。其原因为第二相粒子固溶到基体需要一定的时间。当固溶时间为 0.5 h，即固溶时间较短时，第二相粒子来不及固溶到基体，不利于铝锂合金的固溶强化。随着固溶时间的不断增加，第二相粒子的固溶也更加充分，但当固溶时间过长，晶粒就会

表 3 不同固溶时间下 2195 铝锂合金型材的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile at different solution times

条件				结果			
固溶温度/℃	固溶时间/h	人工时效温度/℃	人工时效时间/h	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度/HRBW
520	0.5	160	36	435.38	469.74	10.20	81.0
	1.0			479.34	506.44	9.55	85.1
	1.5			496.21	519.81	9.00	85.8
	2.0			498.00	521.00	8.95	86.2
	2.5			501.60	523.88	8.89	86.3

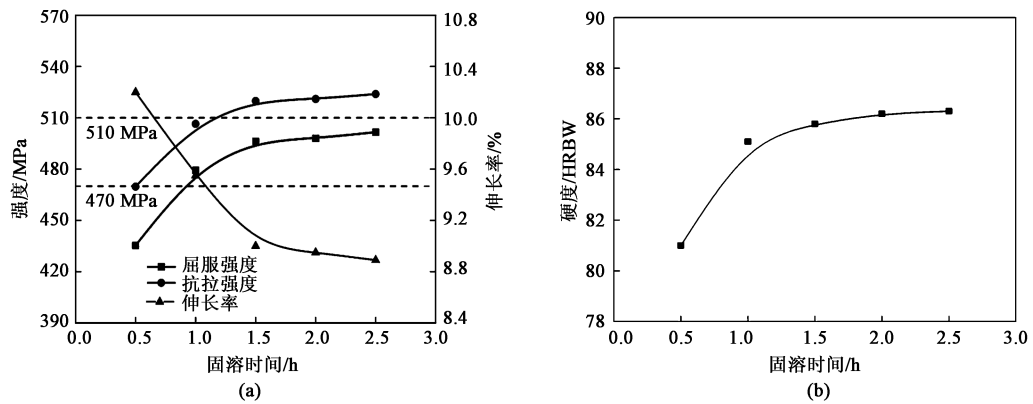


图 3 2195 铝锂合金力学性能随固溶时间的变化趋势

(a) 拉伸性能 (b) 硬度

Fig. 3 Change trends of mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile with solution time

(a) Tensile properties (b) Hardness

粗化，导致材料的性能恶化，所以确定合适的固溶时间也是非常重要的。硬度随固溶时间的变化趋势类似于抗拉强度，先迅速增大，后缓慢增大。结合图 3 和表 3 可以得出，固溶时间超过 1.5 h 时，力学性能可满足要求。

2.2 人工时效参数对力学性能的影响

固溶处理后的过饱和固溶体处于不稳定的状态，通过时效处理，形成溶质原子偏聚区，实现强化。人工时效工艺同样有温度与时间两个重要参数需要优化。

2.2.1 人工时效温度对力学性能的影响

在人工时效工艺中，人工时效温度为一个重要的工艺参数，因此，将其作为单一变量进行研究。选取 2195 铝锂合金型材的固溶温度为 520 ℃，固溶时间为 1.5 h，其人工时效温度分别为 150、155、160、165 和 170 ℃，人工时效时间为 36 h。通过拉伸试验和硬度测试得到的不同人工时效温度下 2195 铝锂合金型材的力学性能如表 4 所示。

表 4 不同人工时效温度下 2195 铝锂合金型材的力学性能

Table 4 Mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile at different artificial aging temperatures

条件				结果			
固溶温度/℃	固溶时间/h	人工时效温度/℃	人工时效时间/h	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度/HRBW
520	1.5	150	36	460.03	489.07	10.61	79.4
		155		473.09	504.83	9.80	83.0
		160		496.21	519.81	9.00	85.8
		165		497.00	521.52	8.96	86.0
		170		498.10	525.26	8.88	86.4

2195 铝锂合金型材力学性能随人工时效温度的变化趋势如图 4 所示。试验结果显示，随着人工时

效温度的增加，屈服强度和抗拉强度不断增加，但当人工时效温度超过 160 ℃ 后，其值增长变慢；而

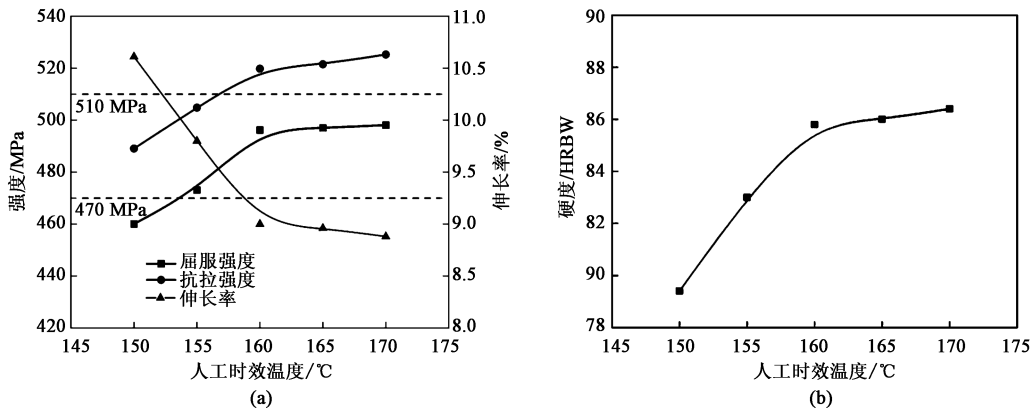


图 4 2195 铝锂合金型材力学性能随人工时效温度的变化趋势

(a) 拉伸性能 (b) 硬度

Fig. 4 Change trends of mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile with artificial aging temperature

(a) Tensile properties (b) Hardness

伸长率随着人工时效温度的增加不断降低，当人工时效温度超过 160 ℃ 后，其值降低变慢。强度大幅度提高的原因在于：固溶处理后，进行人工时效会析出 θ' 相和 T_1 相等强化相，其中 T_1 相起主要作用。当人工时效温度为 150 ℃ 时，析出的第二相数量比较少，对铝锂合金的强化作用弱。随着人工时效温度的升高，第二相的析出量增多，铝锂合金的强度不断提高。当人工时效温度超过 160 ℃ 后，对合金的强化作用减弱，如果人工时效温度过高，析出相会发生粗化，降低合金的性能。硬度与抗拉强度的变化类似，随着人工时效

温度的增加而不断增大，当人工时效温度超过 160 ℃ 后，硬度值增大变慢。结合图 4 和表 4 可以得出，人工时效温度超过 160 ℃ 时，力学性能可满足要求。

2.2.2 人工时效时间对力学性能的影响

在人工时效工艺中，人工时效时间也是一个重要的工艺参数。选取 2195 铝锂合金型材的固溶温度为 520 ℃，固溶时间为 1.5 h，人工时效温度为 160 ℃。人工时效时间则作为单一变量进行研究，其选值分别为 24、30、36、42 和 48 h，测得的 2195 铝锂合金的力学性能如表 5 所示。

表 5 不同人工时效时间下 2195 铝锂合金型材的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile at different artificial aging times

条件				结果			
固溶温度/℃	固溶时间/h	时效温度/℃	时效时间/h	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度/HRBW
520	1.5	160	24	487.07	516.3400	9.50	85.8
			30	490.20	517.1200	9.30	85.9
			36	496.21	519.8104	9.00	86.1
			42	503.99	539.0936	8.78	86.8
			48	512.08	541.7877	8.65	87.0

从图 5 中可以看出，随着人工时效时间的增加，强度整体呈现增加的趋势；当人工时效时间到达 42 h 后，强度增加的趋势降低；伸长率的变化趋势与强度相反，整体呈现下降的趋势。其原因为：随着人工时效时间的延长，促进了 T_1 相等第二相粒子的析出，铝锂合金的强度不断提

高。当人工时效时间过长后，第二相的析出速度减缓，而且先析出的第二相粒子会粗化，降低合金的强化效果。硬度的变化与抗拉强度的变化趋势相同。结合图 5 和表 5 可以得出，当人工时效时间超过 24 h 时，弯曲型材的横向力学性能可满足要求。

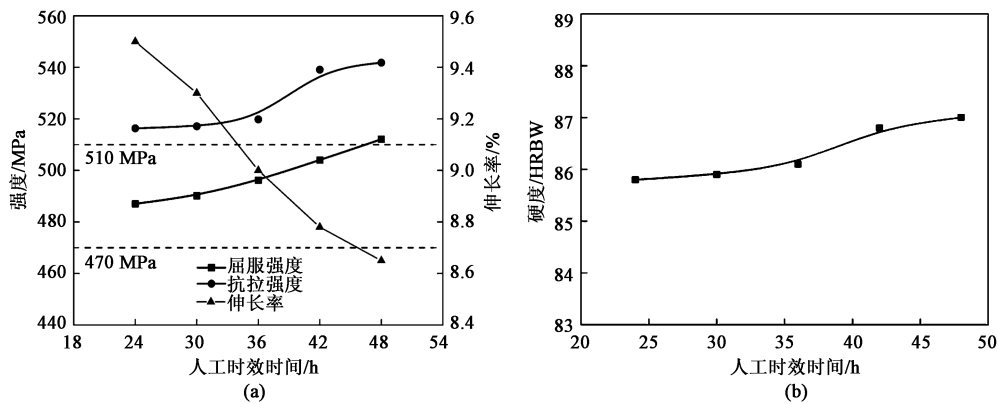


图 5 2195 铝锂合金型材力学性能随人工时效时间的变化趋势

(a) 拉伸性能 (b) 硬度

Fig. 5 Change trends of mechanical properties of 2195 Al-Li alloy profile with artificial aging time

(a) Tensile properties (b) Hardness

2.3 硬度与抗拉强度关系

在实际工程应用中, 固溶-时效后型材的抗拉强度要求高于 510 MPa, 此时对应的硬度值为 85.1 HRBW。为了更好地表达硬度与抗拉强度之间的关系, 将满足工程要求的数据进行统计, 结果如图 6 所示。利用最小二乘法将数据进行线性拟合, 得到不同热处理制度下 2195 铝锂合金弯曲型材硬度 H 和抗拉强度 R_m 之间的线性关系如式 (1) 所示, 可为工程应用提供理论指导。

$$R_m = -936.3 + 16.95H \quad (1)$$

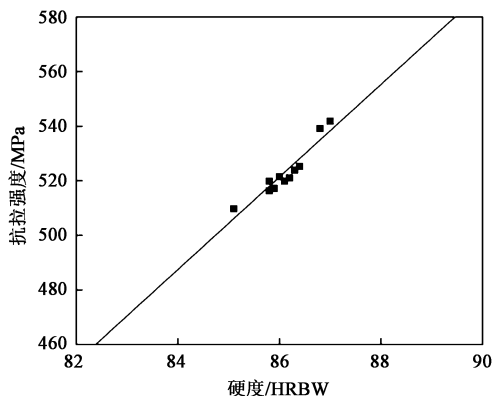


图 6 2195 铝锂合金型材硬度与抗拉强度之间的关系

Fig. 6 Relationship between hardness and tensile strength of 2195 Al-Li alloy profile

3 结论

(1) 确定了固溶+时效工艺参数为: 固溶温度为 520 ℃、固溶时间不少于 1.5 h、人工时效温度不少于 160 ℃、人工时效时间不少于 24 h 时, 弯曲型材横向的力学性能可满足工程实际需求。

(2) 使用最小二乘法建立了不同制度下硬度和抗拉强度之间的线性关系式, 提供了一种有效的预测 2195 铝锂合金型材抗拉强度的方法。

参考文献:

- [1] 徐进军, 康唯, 都昌兵. 航空航天铝锂合金及其成形技术的研究现状和发展趋势 [J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40 (3): 132-137.
Xu J J, Kang W, Du C B. Research status and development trends of Al-Li alloys for aeronautic and astronautic industry [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40 (3): 132-137.
- [2] Dursun T, Soutis C. Recent development in advanced aircraft aluminum alloys [J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [3] El-Aty A A, Xu Y, Guo X Z, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review [J]. Journal of Advanced Research, 2018, 10: 49-67.
- [4] Betsofen S Y, Antipov V V, Knyazev M I. Al-Cu-Li and Al-Mg-Li alloys: Phase composition, texture, and anisotropy of mechanical properties (Review) [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2016, (4): 326-341.
- [5] 张下陆, 张杰刚, 朱亚蓉, 等. 加热温度对新淬火态 2219 铝合金板材力学性能影响 [J]. 热加工工艺, 2022, (18): 135-137, 140.
Zhang X L, Zhang J G, Zhu Y R, et al. Effect of heating temperature on mechanical properties of newly quenched 2219 aluminum alloy sheet [J]. Hot Working Technology, 2022, (18): 135-137, 140.
- [6] 张下陆, 李继光, 赵鸿飞, 等. 加热温度对退火态 2219 铝合金板材力学性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 129-133.
Zhang X L, Li J G, Zhao H F, et al. Influence of heating temperature on mechanical properties for annealed 2219 aluminum alloy sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 129-133.

- [7] 李继光, 王一, 张下陆, 等. 加热温度对不同热处理状态 2A14 铝合金力学性能的影响分析 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (24): 134-137.
- Li J G, Wang Y, Zhang X L, et al. Analysis on effect of heating temperature on mechanical properties of 2A14 aluminum alloy under different heat treatment conditions [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (24): 134-137.
- [8] Zhang X S, Chen Y J, Hu J L. Recent advances in the development of aerospace materials [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [9] Xie B X, Huang L, Xu J H, et al. Effect of the aging process and pre-deformation on the precipitated phase and mechanical properties of 2195 Al-Li alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 832: 142394.
- [10] Rioja R J, Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43 (9): 3325-3337.
- [11] 胡丽敏, 曹俊生, 姚芳, 等. 2195 铝锂合金轧环制备工艺研究 [J]. 金属加工: 热加工, 2022, (2): 86-88.
- Hu L M, Cao J S, Yao F, et al. Research on the preparation process of 2195 aluminum-lithium alloy rolling ring [J]. MW Metal Forming, 2022, (2): 86-88.
- [12] 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.
- [13] Chen H, Chen Z, Ji G, et al. Experimental and modelling assessment of ductility in a precipitation hardening AlMgScZr alloy [J]. International Journal of Plasticity, 2021, 139: 102971.
- [14] 郑晖, 栾景旺, 孙凌崑, 等. 固溶温度对 2195 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.
- Zheng H, Luan J W, Sun L W, et al. Effect of solution temperature on formability of 2195 Al-Li alloy sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 46-53.
- [15] 易云静. 热处理及预变形对 2195 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 Microstructure and Properties of 2195 Al-Li Alloy Sheet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [16] Dorin T, Deschamps A, Geuser F D, et al. Quantification and modelling of the microstructure/strength relationship by tailoring the morphological parameters of the T_1 phase in an Al-Cu-Li alloy [J]. Acta Materialia, 2014, 75: 134-146.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Duan S W, Matsuda K, Wang T, et al. Microstructures and mechanical properties of a cast Al-Cu-Li alloy during heat treatment procedure [J]. Rare Metals, 2020, 40 (7): 1897-1906.
- [20] 肖代红, 王新凯, 陈伟斌, 等. 固溶温度对 2195 铝锂合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (10): 1193-1196.
- Xiao D H, Wang X K, Chen W B, et al. Effects of solid solution temperature on the microstructure and properties of 2195 Al-Li Alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41 (10): 1193-1196.
- [21] 胡铁牛. 热处理工艺对 2195 铝锂合金低温力学性能影响规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- Hu T N. The effect of Heat Treatment Technology on Cryogenic Mechanical Properties of 2195 Al-Li alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [22] 崔帅. 热处理制度对 2195 铝锂合金微观组织与性能影响规律的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- Cui S. Research on the Influence of Heat Treatment on Microstructure and Properties of 2195 Al-Li alloy [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [23] 冯博. 2195 铝锂合金板材热处理工艺优化及组织性能调控 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2021.
- Feng B. Optimization of Heat Treatment Process and Control of Microstructure and Properties of 2195 Al-Li Alloy Sheet [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2021.
- [24] 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 test—Part 1: Test method at room temperature [S].

