2195 铝锂合金应力松弛时效成形工艺制度

郑 强^{1,2}, 湛利华^{1,2,3}, 杨有良^{1,2}, 王 庆^{1,2}

(1.中南大学 机电工程学院,湖南 长沙 410083;2.中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室,湖南 长沙 410083;
 3.中南大学 轻合金研究院,湖南 长沙 410083)

摘 要:以2195-T8态铝锂合金为研究对象,探究工艺参数对其应力松弛时效行为的影响规律。试样经过固 溶、淬火,进行不同预变形、时效温度及时效时间条件下的应力松弛时效实验。通过室温拉伸,测得应力松弛时效 后试样的力学性能。基于正交试验的极差分析和方差分析,探究了预变形、时效温度和时效时间3个工艺参数对应 力松弛量、屈服强度和延伸率的影响权重占比;进一步研究发现预变形不仅可以提高2195铝锂合金时效后的强度, 还降低了应力梯度对材料力学性能不均匀性的影响;查明了实现2195铝锂合金应力松弛时效形性协同制造的合理 工艺制度:180℃+4% 预变形+时效时间12~16 h。研究工作为大型铝锂合金构件应力松弛时效形性协同制造工 艺窗口的确定提供了重要支撑。

关键词:铝锂合金;应力松弛;力学性能;正交试验;应力松弛时效成形工艺
 中图分类号:TG 174 文献标志码:A DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.009

Stress Relaxation Aging Forming Process System of 2195 Al-Li Alloy

ZHENG Qiang^{1,2}, ZHAN Lihua^{1,2,3}, YANG Youliang^{1,2}, WANG Qing^{1,2}

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. State Key Laboratory of High-Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083,

Hunan, China; 3.Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In this paper, 2195-T8 Al-Li alloy is taken as the research object to explore the influence rules of process parameters on its stress relaxation aging behavior. After solid solution and quenching, the samples are subjected to stress relaxation aging experiments under different pre-deformation, aging temperature, and aging time conditions. The mechanical properties of the samples after stress relaxation aging are measured by stretching at room temperature. Based on the range and variance analyses of the experimental results, the influence weight proportions of three process parameters, i.e., aging temperature, pre-deformation, and aging time, on the stress relaxation amount, yield strength, and elongation are investigated. Further research shows that the pre-deformation can not only improve the strength of 2195 Al-Li alloy after aging, but also reduce the stress gradient influence on the mechanical property nonuniformity of the material. The reasonable technological system for the precision-property collaborative manufacturing of 2195 Al-Li alloy with stress relaxation aging is found out: $180 \,^{\circ}C + 4\%$ pre-deformation + aging time in the range from 12 h to 16 h. The research work provides an important support for the determination of the precision-property cooperative manufacturing process window of large Al-Li alloy components with stress relaxation aging.

Key words: Al-Li alloy; stress relaxation; mechanical property; orthogonal test; stress relaxation aging forming process

收稿日期:2020-01-29;修回日期:2020-04-06

作者简介:郑 强(1995-),男,硕士,主要研究方向铝合金应力松弛时效成形。

通信作者: 湛利华(1976—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高性能材料与构件形性一体化制造技术。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0306300);国家科技重大专项资助项目(2017ZX04005001);国家自然科学基金资助项目(51905551,51675538,51601060)

%

0 引言

随着我国航天事业的飞速发展,轻量化已成为 航天制造业的主流^[1]。2195铝锂合金作为近年来快 速发展的新型铝合金,由于其具有密度低、弹性模 量高、比强度和比刚度高、低温力学性能好等特性, 在航天结构件上的应用越来越广泛[2-4]。航天装备 运载能力的提升对其主要组成结构——蒙皮、壁板 或瓜瓣等大型构件的成形精度和性能均提出了更 高的要求。对于这类大型构件,采用传统的制造工 艺面临成形精度与性能协同调控的难题。为了解 决大型构件高精度高性能制造的问题,时效成形技 术应运而生。大型构件时效成形主要可分为3个阶 段:加载阶段、应力松弛(蠕变)时效阶段和卸载阶 段^[5]。在应力松弛时效阶段中,坯料在外加压力(气 压或机械加载)作用下始终保持与成形模具的表面 接触,即在这个过程中坯料的总变形不变,在外力 和热激活共同作用下,部分弹性变形逐渐转化成蠕 变变形,同时坯料内部应力发生松弛。应力松弛时 效成形是将应力松弛、蠕变变形和时效强化结合起 来的一种成形工艺,在保证构件能获得一定的塑性 变形的同时也能使其获得较好的力学性能[6-7]。通 过应力松弛时效成形制造的大型结构件具有成形 精度高、重复性好、残余应力小等诸多优点[8]。

目前,对于铝合金应力松弛时效行为的研究主要集中2000系、7000系和部分6000系合金上。如 YANG等^[9]研究了2219铝合金不同初始应力下的 应力松弛行、时效行为和微观组织演变规律。 CHEN等^[10]研究发现Al-Zn-Mg-Cu合金的应力松 弛行为分为3个阶段,并通过计算应力指数和激活 能确定各阶段的应力松弛行为的变形机制。 ZHENG^[11]研究了应力和预变形对7050合金应力松 弛行为、微观组织和力学性能演化的影响。RONG 等^[12]研究了不同初始变形(弹性变形和塑性变形) 对AA6082合金应力松弛行为的影响,并根据蠕变 应力指数分析了材料的应力松弛机理。关于铝锂 合金,部分学者主要从蠕变时效行为的角度开展了 相关研究,如胡立彬等^[13-14]研究了初始应力、预变形 和时效时间对Al-Li-S4合金的蠕变性行为、时效后 力学性能和微观组织的影响规律。目前,关于铝锂 合金的应力松弛行为的研究则鲜有报道。

对于应力松弛时效成形而言,工艺参数(预变 形、时效温度和时效时间)对构件的成形精度和力 学性能都可能存在较大的影响,而各参数对形性的 影响规律及权重如何不得而知。为了将应力松弛 时效成形技术应用于2195铝锂合金构件,实现其形 性协同一体化制造,研究其应力松弛时效行为,制 定相应的应力松弛时效成形工艺制度具有重要工 程意义。

1 实验材料和方法

本次实验研究的材料为2195-T8态铝锂合金, 原始板材的厚度为8.6 mm,其主要化学成分见表1。 实验试样按照国标《金属拉伸蠕变及持久方法》 (GB/T 2039—1997)的标准及三思泰捷提供的 RDL50 蠕变试验机的板状夹具的要求,采用 DK7735型线切割设备沿板材的轧制方向进行加 工,试样的标准尺寸如图1所示。

表1 合金实测主要化学成分(质量分数)

Tab.1 Main measured chemical composition of the alloy (mass fraction)

合金	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ag	Zr	Li	Ti	Al
质量分数	3.95	0.32	0.25	0.028	0.25	0.25	0.27	0.15	0.96	Bal.

根据相关资料对 2195 铝锂合金固溶制度的研究,确定了 2195 铝锂合金最佳固溶制度为 510 ℃+30 min,固溶和水淬转移时间不超过 20 s。在试样固溶前后,都需要用砂纸对试样表面进行打磨,去掉表面的毛刺和氧化物。然后用 MTS-5105型电子万能试验机对固溶后的试样进行 0、2% 和 4% 的预变形。将不能及时开展应力松弛时效实验的试样放在冰箱里储存,以减小合金自然时效对实验结果

的影响。

本次实验的时效温度为170、180和190℃。试 样经固溶淬火后进行0、2%和4%的预变形,通过 蠕变试验机测出样在不同温度和不同预变形下的 屈服强度,然后按照设置的初始应力进行12、16和 20h的应力松弛时效。在进行实验时,用夹具将试 样装夹在蠕变试验机上,调整好引伸计,关闭炉门, 通过与蠕变机相连的计算机设置实验参数。先以



Fig.1 Standard sample size

5℃/min的升温速率升至设定的温度,保温10min, 再以15N/s的加载速率升至设定的应力,然后保持 1min再进行恒变形的应力松弛时效。实验结束后, 打开炉门,将试样尽快冷却至室温状态,再用MTS-5105型电子万能试验机测试样应力松弛时效后的 力学性能,整个实验的流程如图2所示。



Fig.2 Schematic diagram of the experiment flow

在应力松弛时效成形过程中,当构件加载后, 由于各部位产生不同程度的变形(包括弹性变形和 塑性变形),各部位受到的初始应力是有所差异的, 而在不同初始应力下,工艺参数(预变形、时效温度 和时效时间)对松弛量和时效后的力学性能也是有 所差别的,故本实验选两个初始应力:各状态下屈 服强度的0.6倍(低应力)和1.2倍(高应力)。

应力松弛时效成形后,材料的屈服强度和延伸 率是重要的力学性能检测指标。在本文中,设计正 交实验,研究预变形、时效温度以及时效时间3个因 素对2195铝锂合金时效后的应力松弛量、延伸率和 屈服强度的影响,通过极差分析以及方差分析方 法,确定3个因素对应力松弛量、延伸率和屈服强度 的影响顺序,再根据项目以及工程实际应用的要求,最终确定2195铝锂合金应力松弛时效成形工艺 制度。

本文设计的正交试验中选取预变形、时效温度 和时效时间3个因素,每个因素对应3个水平,组成 L9(3³)正交表。

预变形设置的3个水平是0、2%和4%,时效温度设置的3个水平是170、180和190℃,时效时间设置的3个水平是12、16和20h。本文设计的正交实验因素水平表见表2。

表2 正交实验因素水平表

 Tab.2
 Level table of the orthogonal experimental

factors

노교	因素A	因素B	因素C	
小十	预变形/%	时效温度/℃	时效时间/h	
1	0	170	12	
2	2	180	16	
3	4	190	20	

2 结果与讨论

2.1 基于正交试验的分析

2.1.1 正交试验结果

按照上述的设计的正交实验方案,分别测得在低/高应力下每组试样的应力松弛量 $R_s(MPa)$ 、屈服强度 $\sigma_{0.2}(MPa)$ 和延伸率 $\delta(\%)$,在低/高应力下,应力松弛时效后的应力松弛量、屈服强度和延伸率的结果见表3。

Tab.3 Results of the orthogonal experiments under low/ high stresses							
实验 序号	A/%	B/℃	C/h	应力松弛量 低/高应力/MPa	屈服强度 低/高应力/MPa	延伸率 低/高应力/%	
1	0	170	12	43.6/76.1	433.3/521.3	11.2/8.9	
2	0	180	16	56.7/92.7	487.8/567.1	8.5/7.9	
3	0	190	20	73.5/110.4	467.1/485.4	6.8/7.0	
4	2	170	16	56.8/94.9	540.7/551.6	9.2/7.9	
5	2	180	20	65.2/101.8	545.8/550.2	7.9/7.1	
6	2	190	12	78.8/120.6	540.6/509.7	6.7/6.3	
7	4	170	20	71.0/99.4	540.3/572.3	7.8/7.2	

72.9/96.8

86.1/134.4

表3 低/高应力下的正交试验结果

2.1.2 正交试验极差分析

4

4

180

190

12

16

8

9

在正交试验的极差分析中,各因素对试验指标 影响由区间内最好的水平和范围内最差的水平的 差值来确定,即极差 $R = \overline{A}_{max} - \overline{A}_{min}$ 。R的大小/ 差异反映了每个因素的水平对试验的影响指数,R 值越大说明该因素对考察指标的影响越大且越重 要。通过比较极差的大小差异,确定每个因素对应 力松弛量、屈服强度和延伸率综合影响。

在低/高应力下,各因素(预变形、时效温度和 时效时间)对应力松弛量、屈服强和延伸率的正交 试验极差结果见表4。

从表4中的极差分析结果可以看出:

 1)对于应力松弛量而言,无论是高低应力,温 度因素的极差值最大,时效时间因素的极差值最 小,说明温度对该合金应力松弛量的影响最大,时 效时间对该合金的应力松弛量影响最小,因此,这 3个因素按照对应力松弛量的影响大小可以排序 为:时效温度>预变形>时效时间。

表4 低/高应力下极差分析结果

7.9/7.6

6.1/6.4

546.8/553.5

541.2/520.6

Tab.4 Range analysis results under low/high stresses

试验值	试验因素	А	В	С			
	k_1	57.9/93.1	57.1/90.1	65.1/97.8			
应力松弛量 低/高应力/MPa	k_2	66.9/105.8	64.9/97.1	63.2/107.3			
	k_3	76.7/110.2	79.5/121.8	69.9/103.9			
	R	18.8/17.1	22.4/31.7	6.7/9.5			
	因素主次	B>A>C/B>A>C					
屈服强度 低/高应力/MPa	k_1	462.7/524.6	504.8/547.5	506.9/528.2			
	k_2	542.4/537.2	526.8/556.9	523.2/536.4			
	k_3	542.8/548.8	516.3/5050.2	517.7/536.0			
	R	80.1/24.2	22.0/51.7	16.3/18.2			
	因素主次	A>B>C/B>A>C					
	k_1	8.83/7.93	9.4/7.97	8.4/7.60			
	k_2	7.93/7.07	8.1/7.53	7.93/7.37			
延伸率 低/高应力/%	k_3	7.27/7.07	6.53/6.57	7.50/7.10			
	R	1.56/0.66	2.87/1.40	0.91/0.50			
	因素主次	B>A>C/B>A>C					

2)对于屈服强度而言,在低应力下,预变形因素的极差值最大,时效时间因素的极值最小,说明预变形对该合金时效后的屈服强度的影响最大,时效时间对该合金时效后的屈服强度的影响最小,因此,这3个因素按照对屈服强度的影响大小可以排序为:预变形>时效温度>时效时间。

而高应力下3个因素的影响规律发生了一定的 变化,温度因素的极值最大,即:时效温度>预变形> 时效时间。

3)对于延伸率而言,无论是高低应力,温度因素的极值最大,时效时间因素的极差值最小,说明温度对该合金时效后的延伸率影响最大,时效时间对该合金时效后的延伸率影响最小,因此,这3个因素按照对延伸率的影响大小可以排序为:时效温度>预变形>时效时间。

4) 从极差分析结果表4可以看出,对于应力松 弛量和延伸率而言,在低/高应力下,各因素对其的 影响排序是相同的,皆为:时效温度>预变形>时 效时间。合金材料的应力松弛时效过程是一个热 激活的过程,随着时效温度升高,会导致基体内的 位错运动加快,提高合金的松弛速率进而提高整体 的松弛量,且温度升高可以使材料的临界剪切应 力,可移动的滑移系增加,也可以促进应力松弛 过程。

此外,在一定温度和外力作用下的铝合金的应 力松弛行为主要归因于因位错产生的蠕变变 形[11,15], 预变形的引入可以在基体内产生大量位 错,在外力作用下促进位错运动,进而促进应力松 弛过程,时效温度和预变形对合金的松弛量影响较 大,在时效后期,应力松弛速率较小,延长时效时间 对松弛量的提升较小。所以在本文中对于松弛量 而言,时间温度和预变形对应力松弛量影响较大, 时效时间影响较小。但对于屈服强度而言,在低应 力下,预变形对其影响最大,而在高应力下,温度对 其的影响最大。这是因为在一定范围内,预变形对 该合金的时效强化起正面的促进作用,随着预变形 的增大(0~4%),合金的屈服强度不断增大,在高 应力下增加幅度相对较小。温度由170℃升高至 180℃,合金屈服强度有所增大;而温度由180℃升 高至190℃,合金屈服强度减小,在高应力下,减小 的幅度更大,这是由于析出相的粗化导致的。在低 应力下,预变形的引入在铝基体内引入大量的位 错,在一定程度下,预变形量越大,在基体内产生的 位错数量越大,位错强化作用明显,且位错为T₁相 的形成提供有利的位置[15],促进了析出相的形成。 而温度升高也可以促进析出相的形成,促进了析出 相强化。在低应力下,由预变形产生位错强化效应 可能大于由温度产生的析出相强化效应,这就导致 在低应力下,预变形对屈服强度的影响大于温度。 然而,在高应力(初始状态屈服强度1.2倍),试样 加载后,在基体约引入3.5%预变形,由于存在位错 的缠结合和湮灭,位错数量和位错密度不会无限增 加^[16-17]。此时,随着预变形量的增大,位错数量和 位错密度达到饱和,位错强化效应提升较小。且在 高应力下,可能会导致析出相粗化,随着温度升高, 导致析出相的粗化更加明显,进而导致性能弱化。 此时,由预变形增加带来正面效应的绝对值小于由 温度升高带来负面效应的绝对值,所以在高应力 下,温度对曲屈服强度的影响大于预变形。

2.1.3 正交试验方差分析

极差分析的优点是简单而直观,可以直接通过 极差值R的大小来判断各因素对结果的影响排序, 但不能确定某个因素对试验结果影响的权重。此 时,则可以考虑另一种科学的分析方法——方差分 析。方差分析又被称为多元方差分析,它可以得出 各因素对某个试验结果影响的权重占比。

本试验的F值呈现的是因子的显著影响水平, 为了更为贴切地看出每个因子对目标值的影响贡 献值,本文在F值的基础上进行归一化处理,通过贡 献值的百分比来量化呈现每个因子对试验目标值 的影响程度:

$$C(\%) = \left| \frac{F_i}{F_{\&}} \right|, F_{\&} = F_{\mathrm{A}} + F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{C}} \qquad (1)$$

通过方差分析的计算,得到参数的估计值,进 而得到方差分析的结果,各个目标值的方差分析结 果见表5。

通过正交试验方差分析表5可知,温度因素对 3个试验衡量的目标值的贡献度最大,预变形因素 其次,时效时间因素对3个试验衡量的目标值的贡 献度最小,且在低/高应力下,不同因素对3个试验 衡量的目标值影响的程度存在一定的差异,具体的 各因素排列顺序如下。

1) 在低应力下。

应力松弛量:温度(55.8%)>预变形(38.2%)>

		-						
试验值	误差来源	А	В	С	误差			
应力松弛量 低/高应力/MPa	离差平方和	530.5/473.1	775.8/1 664	83.3/1 663	-31.8/139.1			
	自由度	2	2	2	2			
	均方	265.2/236.5	387.9/831.9	47.7/69.51	-15.9/11.28			
	F值	-16.67/20.97	-24.38/73.76	-2.62/6.16	_			
	贡献度 C	38.2%/20.8%	55.8%/73.1%	6.0%/6.1%	_			
	因素主次	B>A>C/B>A>C						
	离差平方和	12 768.3/878.9	726.5/4 551.1	430.4/500.2	384.3/797.98			
	自由度	2	2	2	2			
屈服强度 低/高应力/MPa	均方	6 384.2/439.5	363.3/2 275.7	215.2/250.1	192.1/398.9			
	F值	33.23/1.103	1.89/5.704	1.12/0.628	_			
	贡献度 C	91.7%/14.9%	5.22%/76.6%	3.08%/8.5%	_			
	因素主次	A>B>C/B>A>C						
	离差平方和	3.68/1.48	12.39/3.076	1.26/0.376	-0.83/0.252			
	自由度	2	2	2	2			
延伸率	均方	1.84/0.74	6.20/1.54	0.628/.0.188	-0.415/0.126			
低/高应力/%	F值	-4.43/5.873	-14.93/12.20	-1.513/1.49	_			
	贡献度 C	21.24%/30.0%	71.51%/62.4%	7.25%/7.6%	_			
	因素主次	B>A>C/B>A>C						

表 5 低/高应力下方差分析结果 Tab.5 Variance analysis results under low/high stresses

时效时间(6.0%);

屈服强度:预变形(91.7%)>温度(5.22%)> 时效时间(3.08%);

延伸率:温度(71.51%)>预变形(21.24%)> 时效时间(7.25%)。

2) 在高应力下。

应力松弛量:温度(73.1%)>预变形(20.8%)> 时效时间(6.1%);

屈服强度:温度(76.6%)>预变形(14.9%)> 时效时间(8.5%);

延伸率:温度(62.4%)>预变形(30.0%)>时 效时间(7.6%)。

由此可以看出,方差分析结果和极差分析的结 果基本一致,说明分析结果的可靠性。与极差分析 结果不同的是,方差分析结果不仅得到了各因素对 3个试验衡量值的影响大小的排序,还给出了定量 的分析信息,即得到了各因素对3个试验衡量值的 权重占比。

2.2 2195 铝锂合金应力松弛时效成形工艺制度的 确定

由以上的方差分析和极差分析可知,温度和预 变形对该合金应力松弛时效后应力松弛量、屈服强 度和延伸率的影响较大,且在一定范围内,随着温 度和预变形量的升高和时效时间的延长,对该合金 的应力松弛量和时效后的屈服强度有正面的促进 作用,对延伸率的作用刚好相反。根据实际工程应 用和项目的要求,应满足 2195 铝锂合金时效成形 后,合金的抗拉强度 $U_{\rm TS} \gg 520$ MPa,屈服强度 $Y_{\rm S} \gg$ 480 MPa,延伸率 $\delta \gg 7\%$ 。在力学性能满足的前提 下,应尽量提高合金的松弛量,以便于构件成形。

结合前面的分析,温度的综合影响是最大的, 优先确定应力松弛时效成形工艺的时效温度。从 各个温度的实验数据来看,当时效温度达到190℃ 时,虽然可以显著提高合金的松弛量,但也使得塑 性弱化较为严重,致使延伸率*δ*<7%,不能满足项 目要求。

在180℃下,合金的力学性能均可以满足要求, 且与170℃的时效温度相比,时效后合金的应力松 弛量提高16.8%,平均抗拉强度U_{Ts}提升4.6%,平 均屈服强度 Y_s提升4.2%,因此,时效温度定为 180℃。

从应力松弛量的角度来看,预变形量增加时, 可以提高应力松弛量。在180℃下,与0和2%预变 形相比,4%预变形下时效后平均应力松弛量分别 提升13.6%和7.8%,在满足要求力学性能的情况 下,可优先选择4%的预变形量。图3(a)、(b)、(c) 分别展示了在180℃下,0、2%、4%预变形的合金在 应力松弛时效16h后的力学性能随初始应力变化 的曲线,其中U_{TS}、Y_S、E_{lo}分别表示抗强度、屈服强度 和延伸率。

通过对比可以发现:在0、2%、4% 预变形的合金 在不同初始应力下,抗拉强度/屈服强度/延伸率最大 值与最小值差值分别分 39.1 MPa/49.2 MPa/1.3%、 30.6 MPa/36.3 MPa/1.1%、14.3 MPa/17.6 MPa/ 1.0%,即与0和2% 预变形相比,在4% 预变形下可 以降低在不同初始应力下经应力松弛时效后力学 性能的不均匀性,而当预变形超过4%时,应力松弛 量提升不明显且会导致延伸率低于7%,不满足力 学性能的要求。因此,对于预变形量选择为4% 是 合理的。



图 3 各预变形(0、2%、4%)在不同初始应力下应力松弛时效后的力学性能 Fig.3 Mechanical properties of pre-deformations (0,2%,4%) under different initial stresses after stress relaxation aging

随着时效时间的延长(从12到20h),屈服强度 和应力松弛量略有增大,但延伸率有所降低。通过 实验数据发现,在4%预变形量下,时效超过16h后 延伸率降低至7%以下。综合考虑时效时间应小于 16h,且与时效12h相比,时效16h合金的平均应力 松弛量提升5.2%,平均抗拉强度U_{TS}提升2.6%,平 均屈服强度 Y_s提升 3.2%,综合考虑成形和成性以 及经济性等因素,时效时间可选择 12~16 h之间。

综上考虑,在本文研究参数范围内,2195铝锂 合金较为合理的应力松弛时效成形工艺制度为:时 效温度180℃+4%的预变形量+时效时间12~ 16 h。

3 结束语

1)通过正交试验的方差分析和极差分析,得到 了时效温度、预变形和时效时间对3个试验值(应力 松弛量、屈服强度和延伸率)的影响权重占比,即在 低应力下,应力松弛量:温度(55.8%)>预变形 (38.2%)>时效时间(6.0%);屈服强度:预变形 (91.7%)>温度(5.22%)>时效时间(3.08%);延伸 率:温度(71.51%)>预变形(21.24%)>时效时间 (7.25%)。在高应力下,应力松弛量:温度(73.1%)> 预变形(20.8%)>时效时间(6.1%);屈服强度:温 度(76.6%)>预变形(14.9%)>时效时间(8.5%); 延伸率:温度(62.4%)>预变形(30.0%)>时效时 间(7.6%)。

2)发现预变形不仅可以提高2195铝锂合金时效后的强度,还降低了应力梯度对材料力学性能不均匀性的影响。

3)结合工程应用中对应力松弛成形和时效热 处理成性的双重需求,查明了在本论文所研究的工 艺参数范围内,实现2195铝锂合金应力松弛时效形 性协同制造的合理工艺制度为:180℃+4%预变形 量+时效时间12~16 h。

参考文献

- [1]李中权,肖旅,李宝辉,等.航天先进轻合金材料及成形 技术研究综述[J].上海航天,2019,36(2):9-21.
- [2] 邱惠中.铝锂合金的发展概况及其应用[J].宇航材料 工艺,1993(4):42-49.
- [3] NAKAI M, ETO T. New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications
 [J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 285(1/ 2): 62-68.
- [4]李红萍,叶凌英,邓运来,等.航空铝锂合金研究进展[J].中国材料进展,2016(11):856-862.
- [5] SALLAH M. A mathematical model of autoclave age forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1991, 28(1/2): 211-219.
- [6] HO K C, LIN J, DEAN T A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4/5): 733-751.
- [7] GAN W, WAGONER R H. Die design method for sheet springback [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(7): 1097-1113.

- [8] ZHAN L H, LIN J G, DEAN T A. A review of the development of creep age forming: experimentation, modelling and applications [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(1): 1-17.
- [9] YANG Y L, ZHAN L H, LIU C H, et al. Stressrelaxation ageing behavior and microstructural evolution under varying initial stresses in an Al-Cu alloy: experiments and modeling [J]. International Journal of Plasticity, 2020, 127: 102646.
- [10] CHEN J F, JIANG J T, ZHEN L, et al. Stress relaxation behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy in simulated age-forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 775-783.
- [11] ZHENG J H, PAN R, LI C, et al. Experimental investigation of multi-step stress-relaxation-ageing of 7050 aluminium alloy for different pre-strained conditions [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 710: 111-120.
- [12] RONG Q, YONG L, SHI Z S, et al. Experimental investigations of stress-relaxation ageing behaviour of AA6082 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 750: 108-116.
- [13] HU L B, MA Z Y, SHEN R L, et al. Effects of uniaxial creep ageing on the mechanical properties and micro precipitates of Al-Li-S4 alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 688: 272-279.
- [14] HU L B, ZHAN L H, LIU Z, et al. The effects of predeformation on the creep aging behavior and mechanical properties of Al-Li-S4 alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 703: 496-502.
- [15] GABLE B M, ZHU A W, CSONTOS A A, et al. The role of plastic deformation on the competitive microstructural evolution and mechanical properties of a novel Al-Li-Cu-X alloy [J]. Journal of Light Metals, 2001(1): 1-14.
- [16] LI Y, SHI Z, LIN J, et al. A unified constitutive model for asymmetric tension and compression creepageing behaviour of naturally aged Al-Cu-Li alloy [J]. International Journal of Plasticity, 2017, 89: 130-149.
- [17] LIN J, LIU Y. A set of unified constitutive equations for modelling microstructure evolution in hot deformation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143/144: 281-285.