

基于滚弯预变形的新型 Al-Li-Cu-Mg 合金蠕变时效成形试验研究

张荣霞^{1,2,3}, 高志勇^{1,2,3}, 吴 为^{1,2,3}, 吕凤工^{1,2,3}, 曾元松^{1,2,3}

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
3. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 开展新型 Al-Li-Cu-Mg 合金薄壁板蠕变时效成形试验研究。通过对固溶态和 T8 态板料的蠕变拉伸性能和单速率弯曲回弹率进行对比, 掌握了新型铝锂合金蠕变时效成形特征, 发现新型铝锂合金蠕变时效成形能力较差, 单纯靠蠕变时效成形, 无法成形出最终零件型面。本文提出基于滚弯预变形的蠕变时效复合成形工艺方法, 满足了目标零件型面要求, 对新一代飞机机身结构件的制造提供理论及数据参考。

关键词: Al-Li-Cu-Mg 合金; 蠕变时效; 成形

Research on Creep Age-Forming Test of New Al-Li-Cu-Mg Alloy Based on Performing of Rolling Bend

ZHANG Rongxia^{1,2,3}, GAO Zhiyong^{1,2,3}, WU Wei^{1,2,3}, LÜ Fenggong^{1,2,3}, ZENG Yuansong^{1,2,3}

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, China;
3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Research of the Creep age-forming about new Al-Li-Cu-Mg alloy thin sheet has been finished. Through the correlation between performance of the creep tensile test of T8 sheet and the spring rate of bend-forming, the forming character of new Al-Li-Cu-Mg alloy has been discovered. It was impossible to reach the last shape only on the method of age forming process. A new age-forming method based on performing of rolling bend has been extracted. This compound forming method can meet the requirement of complex curved surface part, which can supply reference for the manufacture of new era plane body skin.

Keywords: Al-Li-Cu-Mg alloy; Creep age; Forming

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.090

Al-Li-Cu-Mg 系合金是近年来开发的新型第三代铝锂合金, 以其低密度、良好的高低温综合力学性能、低疲劳裂纹扩展速率等特点, 在航空航天领域具有广泛的应用前景, 其已经被我国某型号客机选中, 作为机身结构件选材^[1-4]。Al-Li-Cu-Mg 系合金利用添加 Zn、Ag、Zr 等多种合金元素, 通过一系列的时效热处理工艺实现强化。对于这种可时效强化材料的成形, 蠕变时效成形工艺是一种最佳的成形方法之一。

蠕变时效成形是将人工时效工艺与成形加工工艺相结合, 利用铝合金在弹性应力作用与时效温度下发生蠕变变形, 从而得到一定形状的结构件, 同时利用时效处理获得铝合金所需性能^[5-8]。

国内外对铝合金的时效成形已有较多的研究成果, 但对铝锂合金的时效成形研究较少, 缺乏理论研究和工程应用的数据积累; 且时效成形一般用于厚板的成形加工, 对铝锂合金薄板而言, 相关研究较少, 主要集中在热处理制度对性能和组织演变的影响规律研究。美国的 Romios 等研究了多级时效热处理制度对 2099 铝锂合金力学性能的影响, 找到近 T8 态的热处理工艺方案^[9]; 上海飞机制造有限公司潘毅、孙中刚等研究了时效热处理制度对新型 Al-Li-Cu-Mg 合金 T3 态薄板力学性能和微观组织的影响规律, 确定了该合金理想的时效强化工艺参数^[6]; 凝固技术重点实验室的杜子龙等研究了时效热处理制度对固溶态 Al-Li-Cu 系新型铝锂合金微观组

织演变和力学性能的影响规律,指出了强度和塑性匹配较好的热处理制度^[10];南京航空航天大学的李华冠系统研究了 Al-Li-Cu-Mg 合金固溶处理、人工时效及预拉伸对材料力学性能的影响规律及微观组织的演变特征^[11]。国内有关 Al-Li-Cu-Mg 合金的蠕变时效成形性能鲜见报道,因此,对这种新型铝锂合金的蠕变时效成形性能的研究,是目前急需探索的关键问题。本文首次开展固溶态和 T8 态 Al-Li-Cu-Mg 合金薄板蠕变时效成形试验研究,初步探讨了其蠕变成形特征,提出一种基于滚弯预变形的蠕变时效复合成形工艺方法,以期为铝锂合金机身壁板的制造技术提供基础试验方法及数据参考。

1 试验材料及方案

试验采用的原材料为 T8 态 Al-Li-Cu-Mg 合金,厚度为 2mm,合金成分见表 1,力学性能见表 2。

本试验以某型飞机机身壁板典型构件为目标零件,分别对固溶态和 T8 态 Al-Li-Cu-Mg 合金进行蠕变拉伸试验和单曲率弯曲试验,测试蠕变拉伸性能和蠕变时效成形回弹率,分析两种状态材料的蠕变时效成形性能,从而制定最佳蠕变时效成形工艺方案。

表1 T8态Al-Li-Cu-Mg合金板材化学成分

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
≤0.05	≤0.07	3.40~4.20	0.10~0.50	0.60~1.10
Zn	Ag	Li	Zr	Al
0.30~0.45	0.10~0.50	0.60~0.90	0.04~0.18	余量

表2 T8态Al-Li-Cu-Mg合金板材力学性能

断裂强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延伸率 / %	弹性模量 / GPa	方向
550	497	10.7	99	轧制方向
553	438	12.2	104	与轧制垂直方向
500	386	15.7	79	与轧制呈 45° 方向

2 固溶态 Al-Li-Cu-Mg 合金蠕变时效成形试验研究

本文选择 T8 态 Al-Li-Cu-Mg 合金,作为初始状态板料,进行固溶处理,研究固溶态 Al-Li-Cu-Mg 合金的蠕变时效成形性能。蠕变拉伸试验件和弯曲试验件在 530℃盐浴炉固溶处理 80min,水淬至室温;再进行蠕变时效拉伸和成形,蠕变时效成形参数为:温度 153℃,保温时间 25h。固溶态 Al-Li-Cu-Mg 合金屈服强度为 242

表3 蠕变拉伸试验方案

材料	蠕变前状态	蠕变温度 /℃	蠕变时间 /h	蠕变应力 / MPa
Al-Li-Cu-Mg 合金	固溶态 (530℃ +80min)	153	25	110
				130
				150
				170

MPa,由此制定的蠕变拉伸试验方案见表 3。

蠕变试验完成后,对数据进行处理,其蠕变曲线如图 1 所示。由图 1 可知,不同应力状态下的蠕变试样在蠕变第二阶段,蠕变量几乎没发生变化,在 18h 左右开始进入蠕变第三阶段,此时蠕变速率迅速增大。但最大蠕变量只有 0.055% 左右,说明 Al-Li-Cu-Mg 合金固溶后蠕变时效成形性能非常差。

利用上述固溶时效参数,开展了一组单曲率弯曲试

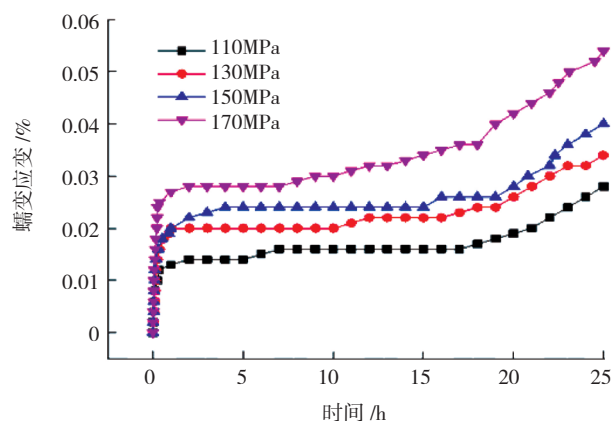


图1 固溶态试件蠕变拉伸曲线

Fig.1 Creep tensile curves of solution specimen



图2 单曲率弯曲试验件

Fig.2 Specimen of single-curvature bending specimen

表4 单曲率弯曲试验结果

预弯半径 / mm	试件贴模半径 / mm	试件卸载后半径 / mm	回弹率 / %	目标零件最小曲率半径 / mm
450	456	12272	25912	1711
600	609	21600	3446.8	
800	814	30000	3585.5	

验(图2),试验结果见表4。从试验结果来看,通过固溶处理后,Al-Li-Cu-Mg合金的回弹率非常大,最大达到3585.5%,同样说明固溶态铝锂合金蠕变时效成形性能非常差。图3为模具半径与回弹率的关系曲线,可见,回弹率随模具半径的增大而增大。

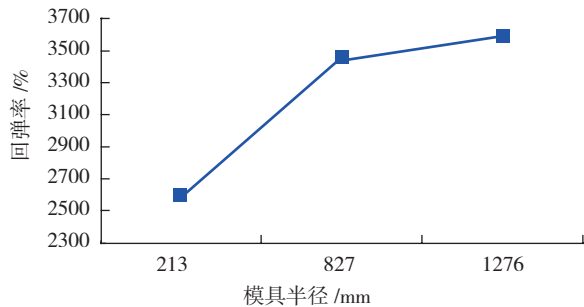


图3 固溶态Al-Li-Cu-Mg合金蠕变时效回弹变化规律
Fig.3 Spring back regularity of solution Al-Li-Cu-Mg alloy

3 T8态Al-Li-Cu-Mg合金蠕变时效成形性能研究

对T8态Al-Li-Cu-Mg合金直接进行时效热处理,参数为:温度153℃,保温时间25h,热处理后的力学性能与T8态的力学性能比较见表5,可见经时效热处理后强度有所提高,延伸率略降低,说明单从力学性能上来讲T8态Al-Li-Cu-Mg合金还未达到峰值时效,可以进一步进行时效强化。

按此参数分别进行蠕变拉伸试验(表6)和弯曲成形试验。蠕变拉伸试验结果如图4所示,可见,在蠕变第二阶段,蠕变量稳定增长,最大蠕变量为0.15%,相比固溶态,有所改善,但总体来说,蠕变量仍然不大。

对T8态Al-Li-Cu-Mg合金进行单曲率弯曲试验,测试其蠕变时效成形的回弹率,试验结果见表7。预弯半径为800mm时,T8态的铝锂合金板材蠕变时效回弹率为1099.9%,相比固溶态的3585.5%显著降低。但回

表5 T8态试件蠕变拉伸试验方案

材料	蠕变前状态	蠕变温度/℃	蠕变时间/h	蠕变应力/MPa
Al-Li-Cu-Mg合金	T8	153℃	25h	240
				290
				340

表6 材料性能对比

材料状态	断裂强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	方向
T8	550.52	497.01	10.67	L
T8经153℃+25h	558	532.6	9.62	L

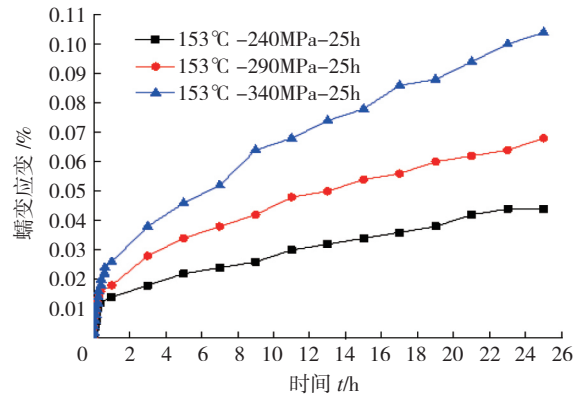


图4 T8态蠕变拉伸曲线
Fig.4 Creep tensile curves of T8 specimen

表7 T8态Al-Li-Cu-Mg合金单曲弯曲试验结果

预弯半径/mm	试件贴模半径/mm	试件卸载后半径/mm	回弹率/%	备注	目标零件最小曲率半径/mm
210	213	2076	874.6	极限预弯半径	1711
800	827	9923	1099.9	1099.9	
1200	1276	16200	1169.6	1169.6	

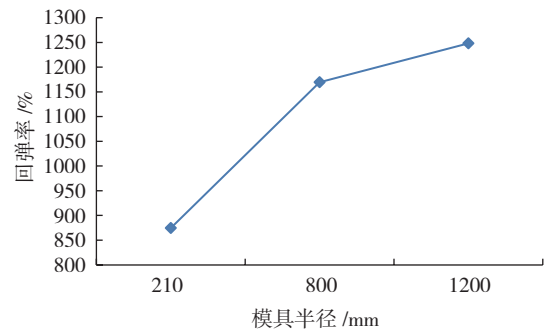


图5 T8态Al-Li-Cu-Mg合金蠕变时效回弹变化规律
Fig.5 Spring back regularity of T8 Al-Li-Cu-Mg alloy

弹仍然很大,即使预弯半径达到极限半径210mm时也无法达到目标零件的最小曲率半径。图5为T8态Al-Li-Cu-Mg合金蠕变时效回弹变化规律,可见,回弹率随预弯模具半径的增大而增大。

4 新型Al-Li-Cu-Mg合金最佳蠕变时效成形工艺方案的确定

通过对固溶态和T8态Al-Li-Cu-Mg合金板材蠕变时效成形性能的分析可以得出,对于新型Al-Li-Cu-Mg合金薄板来说,由于蠕变时效成形性能较差,单纯靠单一的蠕变时效成形工艺,无法满足机身壁板的型面要求。本文提出一种基于滚弯预变形的蠕变时效复合成形工艺方案,以目标零件最大曲率半径为过渡型面

表8 基于滚弯预变形的T8态Al-Li-Cu-Mg合金单曲弯曲试验结果

预弯半径/mm	预弯半径/mm	试件成形前半径/mm	试件卸载后半径/mm	备注	目标零件最小曲率半径/mm
210	2040	213	1116	极限预弯半径	1711
800	2040	827	1849		
1200	2040	1276	1985		

半径,进行滚弯预变形,再进行蠕变时效成形,获得目标零件型面。表8为开展的系列单曲率弯曲试验结果,在极限预弯半径210mm下成形后,试件卸载后半径为1116mm,小于目标零件最小曲率半径1711mm,说明这种复合工艺可以满足目标零件要求。

5 结论

本文从试验的角度,对固溶态和T8态新型Al-Li-Cu-Mg合金板材蠕变时效成形特征进行了研究,研究表明:T8态Al-Li-Cu-Mg合金单从力学性能上来看,还未达到峰值时效,仍然可以进行时效强化;固溶态和T8态Al-Li-Cu-Mg合金蠕变时效成形性能较差,对于变形曲率较大的机身壁板来说,难以满足最终零件的型面要求。基于以上试验结果,本文提出一种基于滚弯预变形的蠕变时效成形复合工艺方法,解决了薄壁大曲率复杂型面零件的成形问题。

对于新型Al-Li-Cu-Mg合金,本文初步探索了其蠕变时效成形性及回弹规律,今后研究重点还应放在预变形对材料微观组织及表面完整性等综合性能的影响规律上,掌握成形与成性协调控制技术,为铝锂合金机身制造技术提供一套完整的理论及数据支持。

参考文献

- [1] 陈建. 铝锂合金的性能特点及其在飞机中的应用研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(1): 39-41.
- [2] 曾元松, 黄遐, 黄硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008(3): 1-7.
- [3] ZENG Yuansong, HUANG Xia, HUANG Shuo. The research situation and the developing tendency of creep age forming technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008(3): 1-7.
- [4] Airbus A380 takes creep age-forming to new heights[J]. Materials World, 2004(2): 10-11.
- [5] 李劲风, 郑子樵, 陈永来, 等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 11-19.
- [6] LI Jingfeng, ZHENG Ziqiao, CHEN Yonglai, et al. Al-Li alloys

and their application in aerospace industry[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 11-19.

[5] 李华冠, 陶杰, 孙中刚, 等. 固溶处理对新型铝锂合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(3): 74-76.

LI Huaguan, TAO Jie, SUN Zhonggang, et al. Effects of solution treatment on microstructure and properties of a aluminum-lithium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(3): 74-76.

[6] 潘毅, 孙中刚, 郭旋, 等. 时效工艺对Al-Li-Cu-Mg合金组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(7): 21-26.

PAN Yi, SUN Zhonggang, GUO Xuan, et al. Effects of aging treatment on microstructure and properties of Al-Li-Cu-Mg[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(7): 21-26.

[7] 赵建华. 蠕变时效成形对2124铝合金回弹、微结构及性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

ZHAO Jianhua. Effects of creep age forming on spring back and microstructure and properties of 2124[D]. Changsha: Central South University, 2003.

[8] HO K C, LIN J, DEAN T A. Modelling of springback in creep forming thick aluminium sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 20(4-5): 733-751

[9] ROMIOS M, TIRASCHI R. Design of multistep aging treatments of 2099(C458) Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(5): 641-646.

[10] 杜子龙, 曾卫东, 杨文华, 等. 时效处理对新型Al-Li-Cu系合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(8): 85-88.

DU Zilong, ZENG Weidong, YANG Wenhua, et al. Effect of age treatment on microstructure and mechanical properties of a new Al-Li-Cu alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(8): 85-88.

[11] 李华冠. 新型铝锂合金的热处理工艺及淬火态成形性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

LI Huaguan. Heat treatment and forming performance after quenching of a new aluminum-lithium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

通讯作者: 张荣霞, 高级工程师, 主要从事整体壁板成形技术及管件成形与连接技术方面工作, E-mail: zrxia1979@163.com。

(责编 大漠)

(上接第89页)

[5] 李凌飞. 基于变密度法的结构拓扑优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

LI Lingfei. The research of structure topology optimization based on variable density method[D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[6] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1988, 71(1): 197-224.

通讯作者: 王凤, 高级工程师, 研究方向为大涵道比发动机总体设计, E-mail: wangfengaaa767@126.com。

(责编 大漠)