

新淬火状态铝合金 2A12 薄板 V 型弯曲回弹及硬度研究*

Study on Spring-Back and Hardness of New Quenching Aluminum Alloy 2A12

西北工业大学陕西省数字化制造技术工程中心 张 毫 王永军 刘 瑞 吴建军

[摘要] 对采用新淬火自然时效 1h、2h、4h、8h、12h、24h 的铝合金 2A12 板料分别进行单向拉伸试验,测出不同时效时间的材料属性;采用 V 型弯曲试验测量不同时效时间的回弹;采用钢球坠落试验测量其不同时效时间的硬度变化。针对不同的 V 型弯曲试验状态进行了有限元模拟计算分析,并与试验结果进行对比分析。

关键词: 新淬火态 自然时效 硬度变化 V 型弯曲

[ABSTRACT] In order to get the V-bending spring-back law, the material hardness change rule and material property of new quenching state aluminum alloy 2A12 sheet after natural aging 1, 2, 4, 8, 12 and 24 hours are obtained. Through the uniaxial tensile tests the material properties at different aging time are obtained. According to the actual experimental status, the finite element simulation analysis is accomplished, then the experimental results are compared with analysis results.

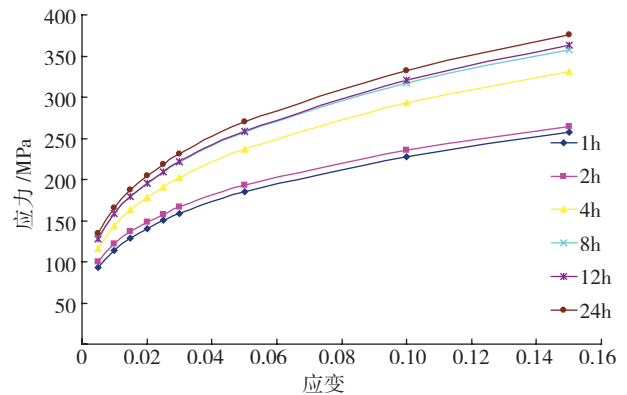
Keywords: New quenching state Natural aging Hardness change V-bending

退火状态铝合金板料在成形过程中具有较好的塑性,但强度低。如果成形后再淬火,工件变形大;如果直接使用淬火后的铝合金,虽然工件的强度提高了,但成形后回弹角度较大,且成形精度低。新淬火铝合金具有塑性好、硬度低、易成形等优点,且通过自然时效后,强度和硬度均能达到淬火铝合金状态。因此,生产中越来越多地采用新淬火铝合金成形易淬火变形的工件,称为“一步法”成形铝合金件。目前对新淬火态铝合金的研究主要集中在通过单向拉伸试验研究其屈服应力、厚向异性指数、成形极限等方面^[1-3]。

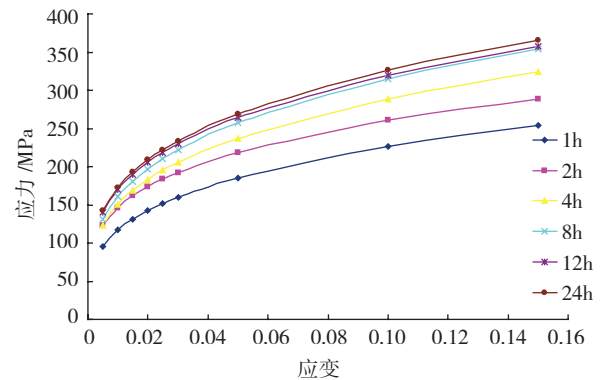
本文对新淬火态铝合金 2A12 在不同时效时间进行单向拉伸试验、V 型弯曲和硬度测试试验,并针对 V 型弯曲进行了有限元数值模拟分析。

1 试验过程

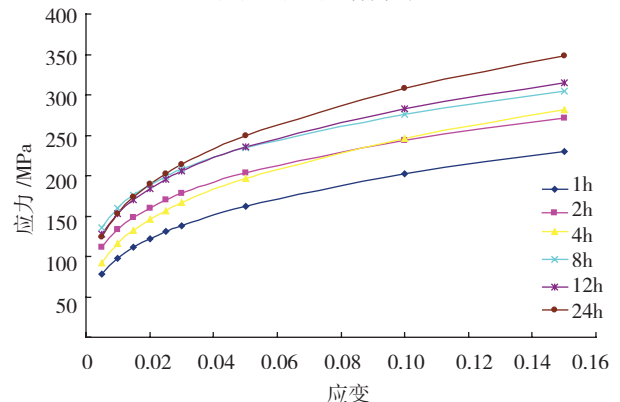
1.1 材料属性



(a) 0° 方向拟合曲线



(b) 45° 方向拟合曲线



(c) 90° 方向拟合曲线

图1 单向拉伸应力应变拟合曲线

Fig.1 Uniaxial tensile stress-strain curve

* 国家自然科学基金项目(51075332)资助。

试件尺寸为 $10\text{mm} \times 100\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 。沿与轧制方向 0° 、 45° 、 90° 切制单向拉伸试件,并淬火自然时效 1h、2h、4h、8h、12h、24h^[4]后,分别进行单向拉伸试验,得材料性能参数,每个试验重复 3 次,试验结果取平均值。不同时效时间的单向拉伸应力应变拟合曲线如图 1 所示。

采用幂指数应力应变公式(1)拟合单向拉伸试验数据,结果如表 1 所示。材料屈服应力随时效时间变化如图 2 所示。

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (1)$$

表1 0.5mm厚2A12经过不同时效时间后幂指数硬化曲线参数

t/h	σ_s/MPa	k/MPa	n
1	123.5	437.533	0.301
2	150.3	455.537	0.267
4	174.4	557.257	0.306
8	201.2	575.623	0.277
12	207.0	590.660	0.282
24	220.4	633.677	0.294

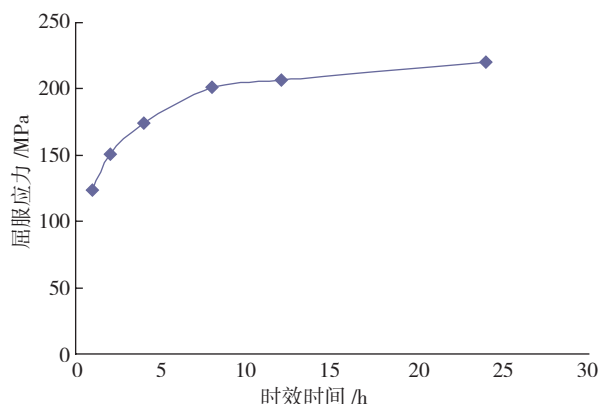


图2 屈服应力随时效时间的变化

Fig.2 Yield stress with aging time variation

1.2 固溶强化

由于材料厚度只有 0.5mm,在淬火过程中试件容易翘曲变形。为保证淬火后试件的平整度,在保温和淬火过程中将试件固定在平整度较好的 4mm 厚铝合金平板上。将箱式电阻炉中加热至 $(495 \pm 5)^\circ\text{C}$,放入试件并保温 20min,而后从保温炉中取出试件,迅速放入室温水中进行水淬,试件淬火转移时间不超过 5s。试件在水中停放 2~3min 以保证淬火完全,而后将其置于室温环境下进行自然时效,并记录时效时间。

1.3 弯曲试验及角度的测量

对时效时间为 1h、2h、4h、8h、12h、24h 的试件分别进行 V 型弯曲试验。试验设备如图 3 所示,使用



图3 试验设备

Fig.3 Experimental equipment

KTC-300 数字式显微投影仪测量试件成形后角度,仪器精度为 0.001mm。测量方法为在试件投影线的两直边各取两点,如图 4 所示。为减小测量误差,多次测量求平均值,计算出两矢量的夹角 α :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{(x_1 - x_2, y_1 - y_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \cdot \frac{(x_4 - x_3, y_4 - y_3)}{\sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}}\right) \quad (2)$$

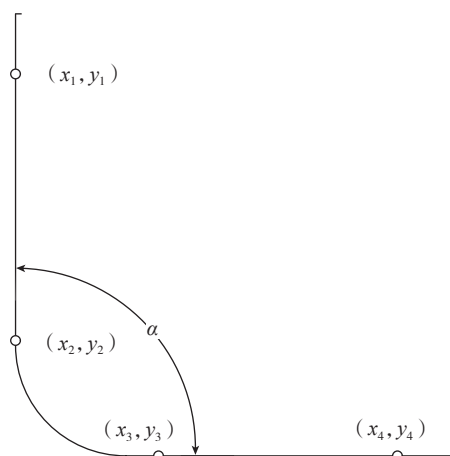


图4 点坐标测量与夹角计算示意图

Fig.4 Coordinates measurement and angle calculation diagram

2 试验及弯曲模拟结果

2.1 有限元建模与分析

采用通用商业有限元分析软件 ABAQUS 进行模拟分析。采用壳体建模,模型尺寸与实际尺寸一致,网格采用线性缩减积分 S4R 单元类型,板料网格大小为 1mm,如图 5 所示,厚度方向积分点选择 51 个^[5]。采用动态显式算法求解弯曲过程^[6],采用静态隐式算法求解回弹过程,回弹模拟结果如图 6 所示,虚影部分表示回弹前试件。

2.2 有校正力的弯曲试验与模拟结果

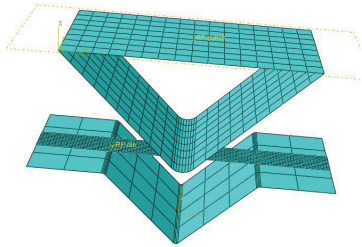


图5 有限元模型与网格划分
Fig.5 Finite element model and mesh

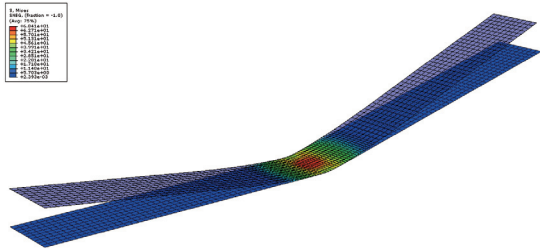
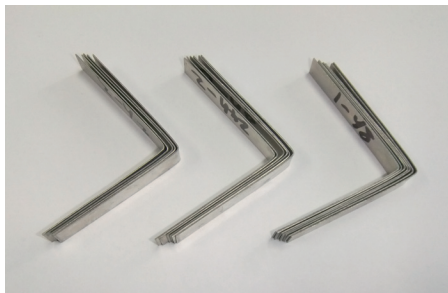
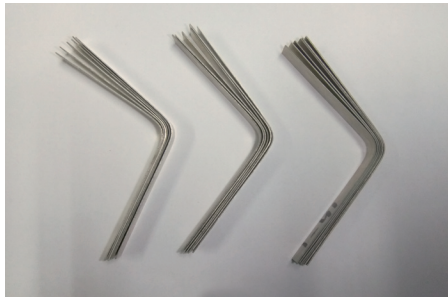


图6 有限元模拟回弹结果示例
Fig.6 Finite element simulation spring-back results



(a) 凸模圆角 R1



(b) 凸模圆角 R5



(c) 凸模圆角 R10

图7 有校正力弯曲试验件

Fig.7 Bending test pieces with correction force

分别使用圆角半径为 1mm、5mm 和 10mm 的凸模进行有校正力的弯曲试验。凸凹模角度为 90°，凸模慢慢速向下运动，当模柄上的拉压力传感器示数达到 3500N 时试验结束。不同时效时间试件成形结果如图 7 所示，角度测量与模拟结果如图 8 所示。

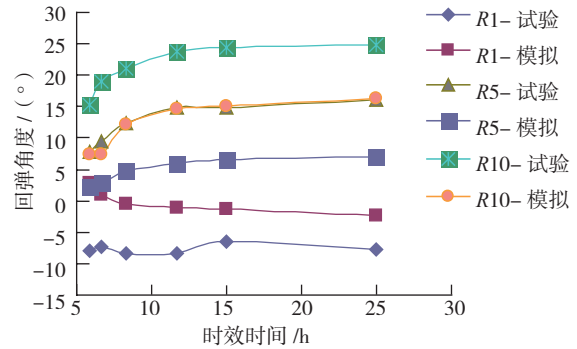


图8 不同凸模圆角不同时效时间回弹角度曲线

Fig.8 Spring-back angle curve with different convex die fillet and different aging time

当凸模圆角半径为 5mm、10mm 时，随着时效时间的增加回弹角度逐渐增大，且时效初始的 4h 内回弹角增加明显，随后趋于平缓；当凸模圆角半径为 1mm 时回弹角度为负值。在相同试验条件下，凸模圆角半径越大回弹角度越大。数值模拟结果与试验结果趋势一致。

2.3 自由弯曲试验与模拟结果

将试件在不同时效时间(1h、2h、4h、8h、12h、24h)、不同凸模圆角半径(1mm、5mm、10mm)、不同凸模行程(8mm、16mm、24mm)下进行自由弯曲试验。通过在模具导柱下方放置不同高度限位块来实现凸模行程的控制，如图 9、10 所示，成形后试件如图 11 所示，试验结果如图 12 所示，其中“R1-h”表示圆角半径为 1mm 的凸



图9 试验模具改进

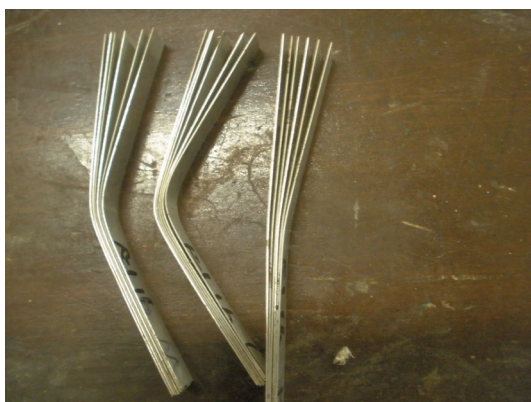
Fig.9 Improved experimental tools

模下行 8mm;“R1-m”表示凸模下行 16mm;“R1-l”表示凸模下行 24mm。



图10 3种不同高度限块

Fig.10 Three different height limit block



(a)凸模圆角 R1



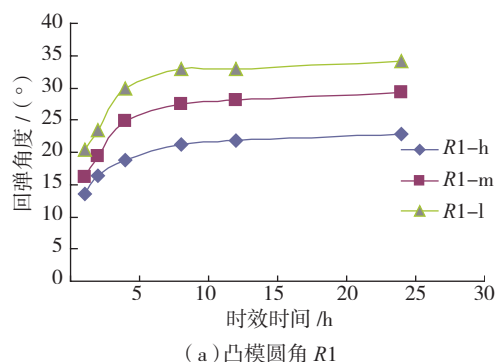
(b)凸模圆角 R5



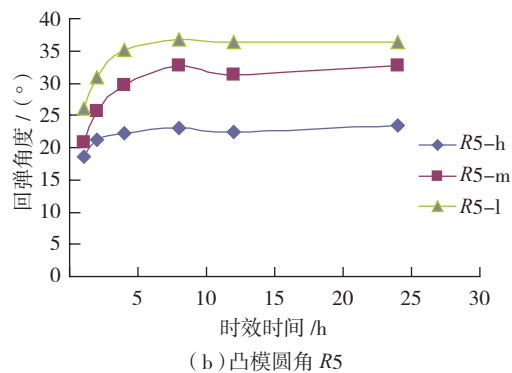
(c)凸模圆角 R10

图11 自由弯曲试验件

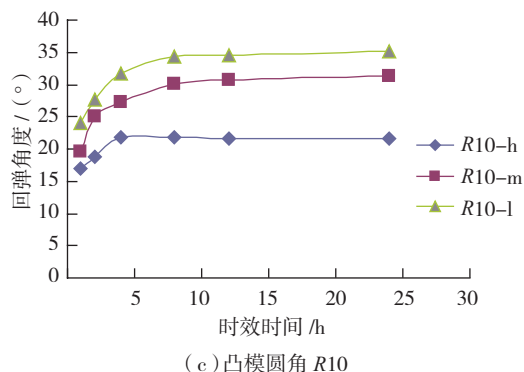
Fig.11 Free bend test pieces



(a)凸模圆角 R1



(b)凸模圆角 R5



(c)凸模圆角 R10

图12 不同凸模圆角行程和不同时效时间回弹曲线

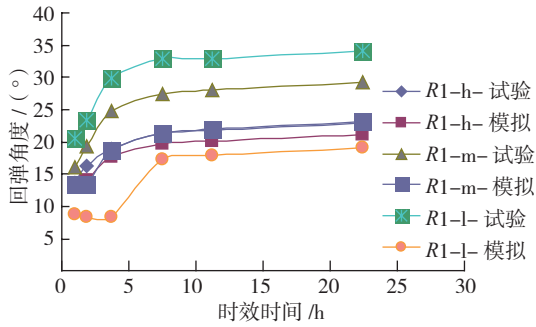
Fig.12 Spring-back angle curve with different convex die fillet, die stroke and different aging time

由图 12 可以看出,在相同凸模圆角半径条件下,当凸模行程为 24mm 时回弹角最大,凸模行程为 16mm 时回弹角次之,凸模行程为 8mm 时回弹角最小。

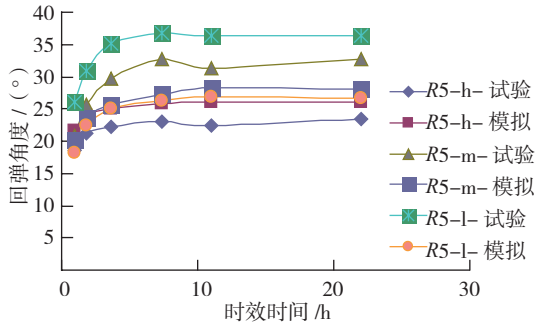
由图 12、13 可以看出:对不同凸模圆角半径和凸模下行量,板料在淬火后随着时效时间的增加,试件回弹角度呈逐渐增大趋势,而且时效初始 4h 内回弹角增大趋势明显,随后回弹角增大趋于平缓。

2.3 淬火后时效时间对硬度的影响

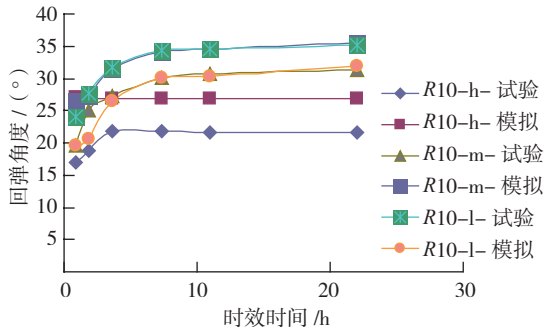
利用摄像头、500mm 游标高度尺、300mm 游标高度尺、贴尺、钢尺、直径 15mm、12mm、10mm 钢球及相同直径的导正环、台灯、笔记本电脑、通用视频录制软件 AMCAP 等组成测量装置,如图 14 所示。对时效时间为 1h、2h、4h、8h、12h、24h 的 0.5mm 厚 2A12 铝合金板料分别进行硬度测试实验,得出材料硬度随时效时间变



(a) 凸模圆角 R1



(b) 凸模圆角 R5



(c) 凸模圆角 R10

图13 不同凸模圆角不同时效时间试验和模拟数据对比

Fig.13 Data contrast between different convex die fillet different aging time experiment and simulation results

化的规律。

测量原理：用一定质量钢球作为冲击体，在一定高度下做自由落体运动冲击试件表面，由于材料硬度不同，撞击后的反弹高度也不同。通过摄像头和标尺记录钢球反弹高度，以钢球首次反弹高度作为硬度大小判断的标准^[7]。由图 15 可以看出，随着时效时间的增加材料硬度逐渐增大，且增大趋势和屈服应力、回弹角度趋势相似；在相同的时效时间下，钢球直径越大反弹高度越高。

3 结论

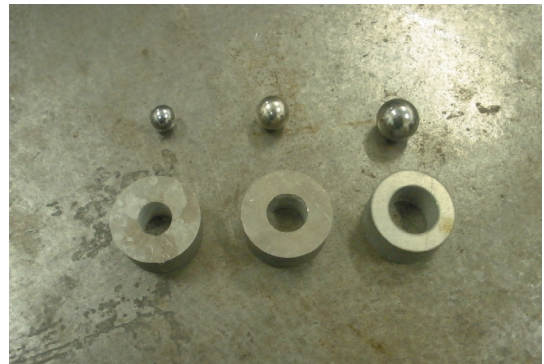
材料的屈服应力和硬度在其初始时效 4h 内增加明显，随后增大趋势平缓；由 V 型弯曲过程的有限元模拟分析和试验结果可以看出，弯曲回弹角度在其初始时效 4h 内增加明显，随后增大趋势平缓。



(a) 高度尺位置



(b) 夹持装置



(c) 导正环和钢球

图14 试验装置

Fig.14 Experiment devices

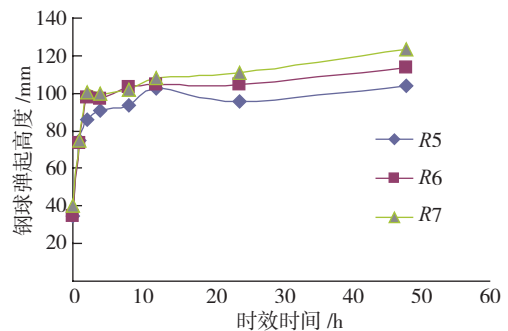


图15 不同钢球直径淬火时效不同时间反弹高度

Fig.15 Spring-back height of steel balls with different diameters after different aging time

(下转第 80 页)

容易受影响而改变方向。为了避免这种现象,可以在铺叠数层后增加一次预压实过程。这可以保证碳纤维的角度方向,减小固化后的变形,还可以提高蒙皮厚度的均匀性,降低孔隙率。

在组装胶接过程中,为了使法兰能够顺利安装,以及蒙皮与蜂窝芯紧密贴合提高其胶接性能,将内外蒙皮均分成数瓣,相邻两瓣之间采用楔形口搭接,如图8所示。

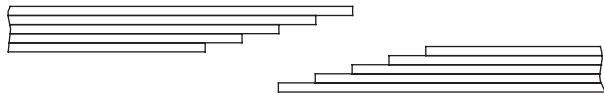


图8 蒙皮搭接示意图

Fig.8 Overlapping diagram of skins

(3) 组装胶接。

法兰与主体夹层结构的连接也很重要,考虑到内外蒙皮均已等分成数瓣,降低了装配过程的难度,因此法兰采取与主体结构一体胶接成型的工艺方法。通过在模具两端增加补偿量的方法,解决法兰宽度尺寸不稳定的问题。

由于法兰胶接面为封闭圆柱体,其与蒙皮间隙过小则装配困难,反之间隙过大必然脱粘。在组装胶接过程中,采用温差法,可提高装配质量,也能够杜绝脱粘缺陷。

(4) 固化成形。

由于模具为铸铁材料,受热时模具和端框的膨胀量相同;在模具和端框的装配间隙合适并装配时预先加压的情况下,筒体固化成型过程中,模具始终对内蒙皮和端框施加压力,使端框与蒙皮的脱粘现象得到有效的改善。具体固化工艺如图9所示。

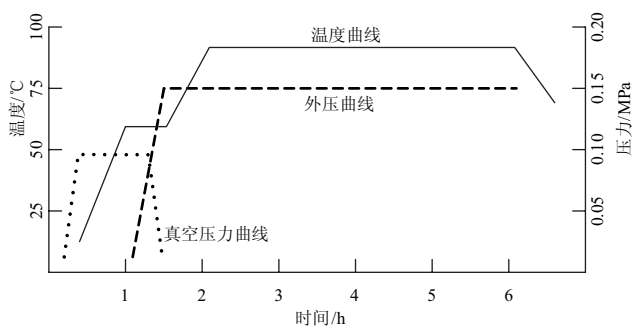


图9 镜筒固化工艺曲线

Fig.9 Curing curve of lens barrel

(5) 后加工。

考虑到固化成形过程中的变形,为了保证镜筒的形位精度,法兰在零件状态不加工各连接孔,端面预留加工余量,待镜筒固化成形后再加工两端面并打孔。

3.3 产品质量情况

镜筒固化成型后,对尺寸、形位公差及胶接质量

等进行了检验,筒高度、内外径、端面的平面度和平行度、端面与筒轴线的垂直度等均满足设计要求,重量31.3kg,经无损检测未发现胶接缺陷。

4 结束语

镜筒作为光学遥感系统最大的部件,如何兼顾光学遥感器的特殊要求和复合材料特点是工程化应用中要重点考虑的问题。本课题采用两次固化法制造了碳/氰酸酯蒙皮-铝蜂窝夹层结构镜筒,其各项性能满足设计要求,与传统的金属方案或者碳纤维复合材料薄壁加筋结构相比,尺寸稳定性和容错性好,减重效果明显。

参考文献

- [1] 谭维焯,胡金刚. 航天器系统工程. 北京:中国科学技术出版社,2009.
- [2] 陈世平. 空间相机设计与试验. 北京:宇航出版社,2003.
- [3] 林再文,刘永琪,梁岩,等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用. 光学精密工程, 2007, 15(8):1181-1184.
- [4] 王晓洁,梁国正,张伟,等. 氰酸酯树脂在航空航天领域应用研究进展. 材料导报, 2005, 19(5):70-72.
- [5] 盛磊,陈萍. 碳纤维复合材料在光学遥感器中的应用探讨. 航天返回与遥感, 2008, 29(3):33-37.
- [6] 夏利娟,金成定,汪庠宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算. 上海交通大学学报, 2000, 37(7):999-1001.
- [7] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法. 复合材料学报, 2000, 17(3):92-95.
- [8] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册. 北京:化学工业出版社,2009.
- [9] 高慎斌,杨庭相,赵仪,等. 卫星制造技术(下). 北京:宇航出版社,1998.

(责编 三丰)

(上接第76页)

参考文献

- [1] 高宏志,周贤宾. 新淬火状态铝合金板的成形极限. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9):1083-1086.
- [2] 高宏志,周贤宾. 新淬火状态硬铝合金板的成形性能及数值模拟[J]. 航空材料学报, 2008, 28(5):27-31.
- [3] 李小强,李东升. 淬火状态2B06铝合金板塑性成形各向异性行为研究. 塑性工程学报, 2008, 15(6):29-33.
- [4] Ashbridge M T J, Leacock A G. The effect of solution heat treatment and natural ageing on the yield characteristics of 2024-O aluminum alloy. American Society of Mechanical Engineers, 2000, 11 :675-686.
- [5] Wagoner R H, Li K P. Simulation of springback. Mechanical Sciences, 2002, 44:103-122.
- [6] 刁法玺,张凯峰. 板料V形弯曲回弹的动力显式有限元分析. 材料科学与工艺, 2002, 10(2):171-174.
- [7] 林巨才. 现代硬度测量技术及应用. 北京:中国计量出版社, 2008:180-187.

(责编 良辰)