

# 国产5056铝蜂窝芯的制备与性能评价

徐挺 刘星 武海生 黎昱 吕琦 荣健

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

**文 摘** 针对太阳翼基板用高性能低密度5056铝蜂窝芯的需求,开展了国产5056超薄铝箔制备及配套阳极氧化表面处理、国产5056铝蜂窝的制备和性能评价。研制的国产5056铝蜂窝芯公称密度 $17.28\text{ kg/m}^3$ ,节点强度为 $1.87\text{ kN/m}$ ,蜂窝芯裸压缩、平面压缩、 $L$ 向剪切、 $W$ 向剪切强度分别达到了 $0.29$ 、 $0.31$ 、 $0.38$ 、 $0.27\text{ MPa}$ ,力学性能均达到了进口蜂窝芯的水平。蜂窝芯胶膜热破工艺性能较好,网格夹层结构节点无脱开,弯曲刚度和强度测试值均达到了进口蜂窝测试值的水平,可以满足使用需求。试验结果可为后续高性能低密度铝蜂窝芯的型号应用及原材料国内自主保障提供数据基础及技术基础。

**关键词** 高性能低密度,国产5056铝蜂窝芯,力学性能,网格夹层结构

中图分类号:V45

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.009

## Preparation and Performance Evaluation of Domestic 5056 Aluminum Honeycomb Core

XU Ting LIU Xing WU Haisheng LI Yu LYU Qi RONG Jian

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** Aiming at the requirements of the high-performance low-density 5056 aluminum honeycomb core for solar wing substrate, the preparation of domestic 5056 ultra-thin aluminum foil and corresponding anodized surface treatment was carried out, the preparation and performance evaluation of domestic 5056 aluminum honeycomb was carried out. The nominal density of domestic 5056 aluminum honeycomb core is  $17.28\text{ kg/m}^3$ , and the joint strength is  $1.87\text{ kN/m}$ . The bare compression, plane compression,  $L$ -direction and  $W$ -direction shear strength of honeycomb core reach  $0.29$ ,  $0.31$ ,  $0.38$  and  $0.27\text{ MPa}$ , respectively. The mechanical properties are equivalent to the test values of imported honeycomb core. The hot-breaking process performance of honeycomb core rubber film is good, the nodes of grid sandwich structure are not disconnected, and the bending stiffness and strength are equivalent to the test values of imported honeycomb, which can meet the use requirements. The test results can provide data and technical basis for the subsequent spacecraft application of high-performance low-density aluminum honeycomb core and the domestic independent guarantee of raw materials.

**Key words** High performance low density domestic, 5056 aluminum honeycomb core, Mechanical properties, Grid sandwich structure

### 0 引言

针对卫星、飞船等航天器的发射环境、长期在轨服役环境等,要求其结构具有轻量化、高比强度、高比刚度的特性。蜂窝夹层结构是由蜂窝芯和上下面板通过胶黏剂连接形成的一种“三明治”构型,具有较高的强度/质量比、较优的刚度/质量比、较好的抗疲劳性能、良好的阻尼减振、吸/隔声降噪等优异综合性能,在航天器结构中得到了广泛使用<sup>[1-3]</sup>。太阳翼是卫星在轨服役时将太阳光转换为电能的重要结

构,通常由多块太阳翼基板及其表面承载的太阳能电池/电路、连接结构、连接机构组成,对基本结构的轻量化以及比强度、比刚度、耐空间环境性能提出了更加苛刻的要求<sup>[4-6]</sup>。目前,国内外主要采用美国Hexcel公司生产的、规格为CR III-3/8-5056-.0007P-1.0的超低密度铝蜂窝芯解决这一难题。该型铝蜂窝芯采用厚度仅为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 的超薄5056铝箔制备,芯格尺寸(芯格内切圆直径)达到 $9.52\text{ mm}$ ,体密度 $16\text{ kg/m}^3$ ,是目前世界上商品化供应最轻

收稿日期:2022-08-25

第一作者简介:徐挺,1990年出生,硕士,工程师,主要从事星船复合材料研究工作。E-mail:xuting202106@163.com

的铝蜂窝芯之一,具有超轻、耐高低温交变、耐盐雾腐蚀、耐空间环境、良好导电性、良好侧壁透气性等特性<sup>[7-10]</sup>。

目前国产普通铝蜂窝芯,主要采用5系(5052、5A02等,面向军品及航空航天应用)和3系(3003,面向民用)铝合金箔,最小厚度30 μm,通过“拉伸法”制备而成,而国内高性能国产铝蜂窝芯尚处于研究阶段,未实现型号应用。因此,国产太阳翼基板现完全依赖于进口Hexcel和Plascore超低密度5056铝蜂窝芯,本文针对国产5056铝蜂窝芯开展制备实验研究与性能评价,实现高性能铝蜂窝芯国产化替代,拟提升我国航天器关键材料的自主保障能力。

## 1 实验

### 1.1 原材料

(1)5056铝箔,北京卫星制造厂有限公司联合西南铝业(集团)有限责任公司研制;

(2)铝蜂窝芯,规格3/8-5056-0.000 7P-1.0,北京卫星制造厂有限公司联合河北东恒宇功能材料新技术有限公司研制;

(3)BS-2环氧树脂,自制;

(4)CCM40J碳纤维,威海拓展纤维有限公司;

(5)J-312L热破胶膜,黑龙江石油化工研究院。

### 1.2 实验方法

#### (1)重铬酸钾点滴测试

采用重铬酸钾点滴测试来检测封孔涂层的耐蚀性,耐蚀标准为样品表面颜色出现绿色时间。操作流程:用滴管蘸取重铬酸钾溶液对特殊表面处理完成后的50 mm×50 mm样品选取不同部位、正反两面进行重铬酸钾滴定[环境温度(23±5)℃,湿度58%],每隔1 min拍照记录滴定实验后样品形貌,直至样品表面颜色变绿。

#### (2)盐雾实验

按照HB5443—1990夹层结构用耐久铝蜂窝芯规范进行盐雾实验,测试铝蜂窝芯材盐雾实验30 d后样品平均失重;试验前将测试样品置于(175±5)℃的烘箱中加热6 h±10 min,取出放入干燥器中冷却至室温;试验时利用盐雾环境箱连续喷雾开展试验,盐雾沉降率1.0~2.0 mL/(80 cm<sup>2</sup>·h),盐雾环境箱中环境温度(35±1)℃。

#### (3)接触角测试

在测试环境温度(23±5)℃,湿度58%条件下,利用表面接触角-张力测定仪将特殊表面处理完成后的试验铝箔样品置于固定试验平台,在固体表面滴一液滴,拍照记录铝箔样品固体表面上的固-液-气三相交界点处,其气-液界面和固-液界面两切线把液相夹在其中时所成的角。

#### (4)蜂窝芯基本物理性能测试

按照HB5443—1990夹层结构用耐久铝蜂窝芯规范对制备铝蜂窝的芯格尺寸和芯格节距进行测量;采用称重法对铝蜂窝的质量进行测量;采用万用表测试试样1 m×1 m范围内导通电阻。

#### (5)力学性能测试

采用胶接铝蜂窝芯子节点强度试验方法、胶接铝蜂窝夹芯结构和芯子平面压缩性能试验方法、胶接铝蜂窝夹层结构和芯子平面剪切试验方法对铝蜂窝的相应力学性能进行测试。

#### (6)胶膜热破工艺性能测试

针对国产5056高性能铝蜂窝芯进行胶膜热破试验,开启胶膜热破设备,对热破工作舱预热,将热破胶膜表贴至固定于胶膜热破夹具工件的蜂窝芯表面,放入热破工作舱中,调试工作舱预热温度、热风刀温度、石英灯加热功率、热风刀/石英灯水平移动速率等胶膜热破工作参数,开始热破,热破完成后将热破夹具工件取出。参照GB/T 20967—2007、GB/T 20968—2007使用目视检验结合10倍放大镜辅助检验方式对铝蜂窝芯端面的胶黏剂形貌、热破率进行评估。

热破率计算公式:热破完成的蜂窝芯格数/蜂窝芯格总数×100%。

预固化度测定:基于DSC差式扫描量热仪法,通过测定经胶膜热破工艺与原始胶膜的固化放热焓值,计算胶膜热破后胶黏剂的固化度。

预固化度计算公式:(1-热破完成后胶膜固化放热焓/原始胶膜固化放热焓)×100%。

对热破完成后的胶膜蜂窝芯组合体与正交缠绕网格复合制备网格夹层结构试验件,按照相关标准的要求测试网格夹层三点弯曲刚度和四点弯曲强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 国产5056超薄铝箔的设计制造

#### 2.1.1 合金成分设计

对国内外铝蜂窝常用铝箔的关键性能参数进行研究,如表1所示,可以看出当前广泛使用的国产铝箔主要是力学性能较低的3003/5A02(LF2)铝箔,最小铝箔厚度30 μm;国外主要是力学性能更好的5052和5056,最小箔厚能达到18 μm,制成的铝蜂窝芯的体密度更小,比力学性能更高。

优异的5056铝合金具有更高的Mg含量及其他元素含量,见表2,屈服强度更高,制备的铝蜂窝力学性能也更高。

根据理化测试的分析,设计两种5056超薄铝箔的研制方案。方案A使用高Mg含量,目的在于提高

表1 国内外铝蜂窝芯用铝合金箔参数对比

Tab. 1 Comparison of parameters of aluminum alloy foil for aluminum honeycomb core at home and abroad

铝合金牌号	$\sigma$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	最小箔厚/ $\mu\text{m}$	热处理状态	备注
3003	200	166	30	H19	国内,量产
5A02(LF2)	265	-	30	H18	国内,量产
5052	369	-	18	H19	国内,研发
	290	255	18	H39	国外,量产
5056	400	359	18	H39	国外,量产

表2 5056 铝合金成分

Tab. 2 Composition of 5056 aluminum alloy % (w)

铝合金牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5056 国标	0.30	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.6	0.05~0.20	0.10	-
5052 国标	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	-
5056 方案 A	0.10	0.25	0.06~0.09	0.05~0.15	4.8~5.4	0.06~0.10	0.05	0.05
5056 方案 B	0.10	0.25	0.07~0.10	0.15~0.20	4.6~5.0	0.12~0.18	0.05	0.05

合金的抗拉强度,对提高蜂窝强度有利。方案B有较高的Mn、Cr能形成弥散相有利于抵抗退火强度的下降且中间退火工艺有利于促进Mg、Si的固溶,Mg固溶有强化作用而对电阻影响不明显,Si固溶量增加有利后续AlMnSi的析出。因此综上选用B方案作为5056超薄铝箔的成分设计方案。

### 2.1.2 铝箔生产工艺

根据选取的合金成分设计方案,制定5056超薄铝箔的生产工艺流程,如图1所示。

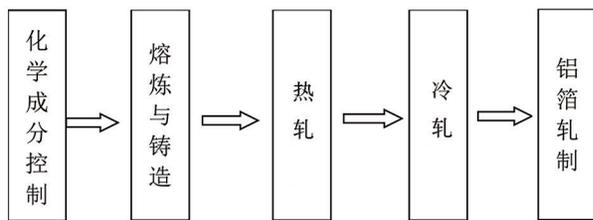


图1 5056超薄铝箔生产流程图

Fig. 1 The production flow chart of 5056 ultra-thin aluminum alloy foil

其中冷轧+铝箔轧制工艺铝箔厚度变化为:4.1 mm→1.3 mm→清洗切边→第一次中间退火→0.32 mm→清洗→第二次中间退火→0.20 mm→纵切切边→铝箔轧制到0.055 mm→切边至930 mm→第三次中间退火→0.022 mm→成品低温回火→分切→包装。图2为研制铝箔实物图。



图2 5056超薄铝箔实物图

Fig. 2 Photos of ultra-thin 5056 aluminum alloy foil

## 2.2 国产5056铝箔表面处理工艺

### 2.2.1 表面处理工艺

国外Hexcel公司5056蜂窝芯高性能铝箔主要采用耐蚀性、胶接强度较好但环境污染较大的铬酸阳极化工艺,基于环保的原则,采用胶接强度好、环保性好、但耐蚀性欠佳的磷酸阳极化工艺。同时阳极氧化工艺辅以前处理和后处理工艺,以保证铝箔的表面胶接、耐腐蚀和导电性能。通过前处理铝箔在保证表面清洁、充分活化和组织均匀的前提下,尽可能减少对铝箔厚度的要求,是获得良好阳极氧化膜的基础。阳极氧化是铝箔表面处理的核心工艺,通过在酸性溶液中进行阳极氧化,获得耐腐蚀性能、导电性能、表面吸附性能更优的多孔型阳极氧化膜。由于典型的阳极氧化膜具有多孔特性,如不对纳米微孔进行有效封闭,阳极氧化膜的耐蚀性能就无法达标,但过厚的封闭层不仅增加铝箔的质量,而且还可能降低阳极氧化膜的表面吸附性能,因此阳极氧化完成后还需开展相应的后处理工序,以保证后续节点胶强度以及整个蜂窝芯的力学性能。

对于核心的阳极氧化处理工艺,选取不同的阳极氧化工艺参数进行多轮试验研究。对磷酸浓度、磷酸速度、电流密度、蜂窝节点胶浓度、浸胶环境湿度等工艺参数进行逐一试验和确定。考虑到J-70溶液浓度、铝箔行进速度以及整体能耗成本问题,将实验条件最终确定为:碱+酸清洗前处理,磷酸浓度145 g/L,速度3 m/min,电流密度0.22 A/dm<sup>2</sup>,J-70浓度1%(v)。以该条件为标准,对超薄5056铝箔进行前处理,阳极氧化处理和后处理,使作为高性能低密度铝蜂窝芯的原材料铝箔拥有适宜的铝箔厚度,耐盐雾腐蚀性能,较佳表面接触角以及良好的导通性能。

### 2.2.2 处理后表面性能

#### (1)重铬酸钾滴定实验

重铬酸钾实验滴定结果如图3所示。重铬酸钾滴定实验利用Cl<sup>-</sup>与铝合金表面的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜反应产生的点蚀通道,使K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>进入基体与其发生氧化还原反应,进而橙色的Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>与HCl作用而被还原为绿色的Cr<sup>3+</sup>,以此来评价膜层的耐蚀性能。变色时间越短耐蚀性越差,时间越长则耐蚀性能越好。从测试结果可以看出,该工艺处理的铝箔耐重铬酸钾滴定时间约为17~18 min;此外,还可以看出,铝箔表面不同

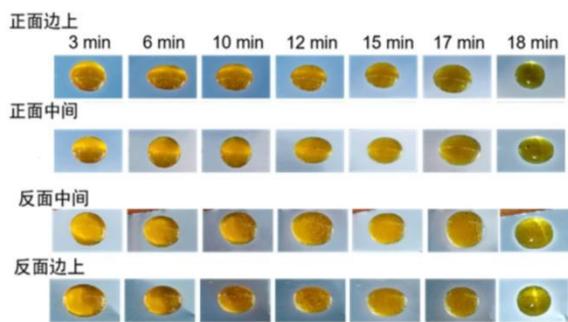


图3 不同部位重铬酸钾滴定照片

Fig. 3 The titration photos of different location potassium dichromate

位置滴定结果相差小于1 min,说明处理涂层均匀性良好。

### (2) 盐雾试验

盐雾实验结果如表3所示,铝蜂窝芯材盐雾实验

30 d后样品平均失重为  $112 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,满足 HB5443 中质量损失不应大于  $135 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的项目要求。

表3 铝蜂窝芯材盐雾实验30 d后样品失重

Tab. 3 Mass loss of aluminum alloy honeycomb core after 30 d of salt spray test

试样	平均失重/ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
铝蜂窝芯材	112
Hexcel	13
Plascore	65

### (3) 接触角测试

国产样品及进口样品接触角测试结果如图4所示。观察发现国产样品接触角均在  $60^\circ\sim 70^\circ$ ,Hexcel样品接触角为  $58^\circ\pm 1^\circ$ ,Plascore样品接触角为  $80^\circ\pm 1^\circ$  国产样品接触角介于Hexcel样品和Plascore样品之间,可以满足使用需求。



(a) Hexcel 样品



(b) 国产样品



(c) Plascore 样品

图4 接触角测试

Fig. 4 The test of contact angle

综上,经表面处理后的铝箔表面平整均匀,表面接触角在  $60^\circ\sim 70^\circ$ ,连续30 d盐雾试验后的质量损失为  $112 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,各项检测数据都满足相应指标要求。

### 2.3 国产5056铝蜂窝芯制备及性能评价

在确定铝箔和含前后处理的阳极化工艺表面处理的制备工艺后,通过调节点胶浓度、行进速率、烘干参数、刺孔参数、凹印辊图案和宽度、热压制度等工艺参数,按图5所示工艺制备了高性能低密度国产5056铝蜂窝芯。

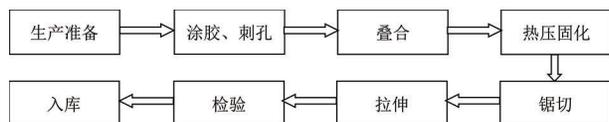


图5 高性能铝蜂窝芯研制工艺流程图

Fig. 5 The process flow chart of high performance aluminum honeycomb core manufacture

#### 2.3.1 基本物理性能

按照上述确定的蜂窝芯成型工艺制备的铝蜂窝芯样品照片和外观照片及正反面刺孔照片如图6~8所示。可以看出,芯格呈正六边形,表面洁净、无润

滑脂、金属屑和杂质。蜂窝芯材各侧壁均有孔,在蜂窝高度方向孔间距不大于  $6.35 \text{ mm}$ ,孔径  $\Phi(0.2\pm 0.1) \text{ mm}$ ,孔边规整。

制备铝蜂窝的芯格尺寸和芯格节距测试数据如表4所示,芯格尺寸为  $9.42 \text{ mm}$ ,芯格节距为  $16.81 \text{ mm}$ ,满足标准要求。

公称密度为  $17.28 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,满足公称密度  $16\times(1\pm 10\%) \text{ kg}/\text{m}^3$  的要求。 $1 \text{ m}\times 1 \text{ m}$  范围内,导通电阻均小于  $0.1 \Omega$ ,满足蜂窝芯使用要求。



图6 整张蜂窝样品照片

Fig. 6 Photos of whole sheet honeycomb



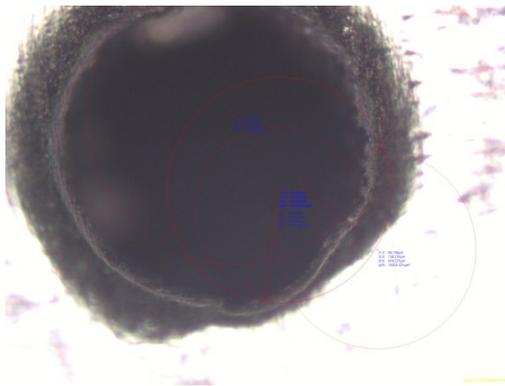
(a) 叠层块表面刺孔分布照片



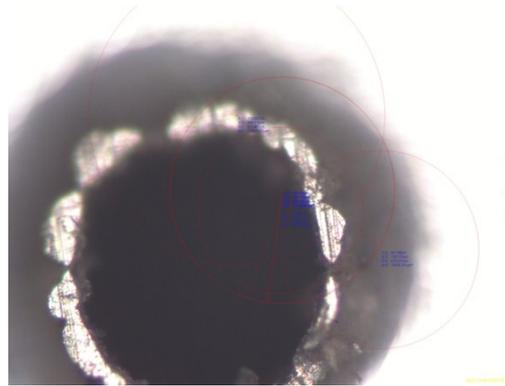
(b) 蜂窝孔格照片

图7 蜂窝芯外观实物照片

Fig. 7 Appearance of honeycomb core



(a) 正面



(b) 反面

图8 蜂窝芯正反面刺孔照片

Fig. 8 The front and back piercing photos of honeycomb core

表4 芯格尺寸和芯格节距

Tab. 4 Size and pitch of core lattice

芯格尺寸/mm	芯格节距/mm	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	导电电阻/ $\Omega$
9.42	16.81	17.28	<0.1

### 2.3.2 力学性能

铝箔涂胶刺孔后,胶条均匀,胶液无拉丝、缺胶等现象。

表5 蜂窝芯力学性能测试结果

Tab. 5 Mechanical properties of aluminum core

项目	节点强度 $/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	裸压强度 $/\text{MPa}$	平压强 度/ $\text{MPa}$	L向剪切强 度/ $\text{MPa}$	W向剪切 强度/ $\text{MPa}$
MIL7438指标	1.47	-	0.16	0.2	0.11
进口试样	1.90	0.27	0.32	0.37	0.27
国产试样	1.87	0.29	0.31	0.38	0.27

铝蜂窝力学实测数据如表5所示,由表中数据可以看出国产高性能低密度铝蜂窝芯节点强度、平面裸压强度、L向剪切、W向剪切力学性能均能达到MIL7438指标要求或进口蜂窝芯实测值。

## 2.4 国产5056铝蜂窝芯夹层结构

### 2.4.1 胶膜热破工艺性能

针对国产5056高性能铝蜂窝芯进行胶膜热破试验,图9为胶膜热破完成后的芯格照片。



图9 胶膜热破完成后的芯格照片

Fig. 9 Hot-break gluing photos of core lattice

由照片可以看出,国产铝蜂窝芯胶膜热破工艺性能较好,热破完成后表面上胶均匀,热破率>98%,经DSC差式扫描量热仪测试双面热破完成后胶膜的预固化度为8.7%,可以满足使用要求。

## 2.4.2 网格夹层力学性能

表6为网格夹层力学性能测试结果,由测试数据可以看出,国产蜂窝制备的网格夹层结构弯曲刚度和强度基本与进口蜂窝测试性能相当,刚度均大于 $1 \times 10^5$  GPa,强度均大于25 MPa,可以满足使用需求。

表6 网格夹层力学性能测试结果

Tab. 6 Mechanical property of grid sandwich structure

试样	蜂窝芯高度/mm	弯曲刚度/ $10^5$ GPa	弯曲强度/MPa
进口	24	4.14	25.86
国产	24	3.25	30.18

## 3 结论

(1)针对超薄5056铝箔开展了成分优选和加工工艺优化研究,确定了铝箔阳极氧化处理、蜂窝芯制备研制技术路线,成功研制表观满足要求的国产5056铝蜂窝芯。

(2)采用磷酸阳极氧化表面处理后的5056铝箔制备的蜂窝芯材经连续30 d盐雾试验后的质量损失为 $112 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,满足HB5443中不大于 $135 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的要求。

(3)国产5056高性能低密度铝蜂窝芯物理性能达标,蜂窝芯拉伸、压缩、 $L$ 向剪切、 $W$ 向剪切力学性能均能达到MIL7438指标要求,且达到了进口蜂窝芯的力学性能指标实测值。

(4)使用国产高性能低密度铝蜂窝芯进行胶膜热破工艺性能验证,胶膜热破工艺性能较好,制备的网格夹层结构无节点脱粘,节点胶接性能较好,可以满足使用需求。

### 参考文献

[1] 高慎斌. 卫星制造技术[M]. 北京:中国宇航出版社, 1998.

GAO S B. Satellite manufacturing technology[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 1998.

[2] 熊健. 轻质复合材料夹芯结构设计及力学性能最新进展[J]. 宇航学报, 2020, 41(6):749-760.

XIONG J. Research progress on design and mechanical properties of lightweight composite sandwich structures [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6):749-760.

[3] 徐挺,武海生,孙天峰,等. 卫星蜂窝夹层结构新型埋件工艺[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(5):128-133.

XU T, WU H S, SUN T F, et al. New post-insert technology

of honeycomb sandwich structure in satellite [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(5):128-133.

[4] 丁延卫,王晓耕,张立华,等. 碳纤维/铝蜂窝太阳翼基板热变形分析[J]. 航天器工程, 2009, 18(4):44-48.

DING Y W, WANG X G, et al. Analysis of thermal-elastic deformation for solar array substrate with CFRP / aluminum honeycomb sandwich [J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(4): 44-48.

[5] 李皓鹏,赵贺一,殷永霞,等. 耐 $150^\circ\text{C}$ 太阳翼基板结构胶黏剂性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(5): 99-102.

LI H P, ZHAO H Y, YIN Y X, et al. Properties research of  $150^\circ\text{C}$ -resistant structural adhesive on solar wing substrate [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(5):99-102.

[6] 张跃峰,周琳贇,沈辉,等. 太阳翼基板侧埋件热变形分析[J]. 航天制造技术, 2021(4):51-54, 78.

ZHANG Y F, ZHOU L Y, SHEN H, et al. Thermal deformation analysis of side embedded parts on solar wing substrate [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021(4): 51-54, 78.

[7] BAUN, WILLIAM L, MCDEVITT, N T, et al. Surface Characterization of Honeycomb Core Materials[R].

[8] 邹梦婷,熊菊,麻彦龙,等. 前处理工艺对5056铝箔磷酸阳极氧化膜的结构和耐蚀性能的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(11):95-101.

ZOU M T, XIONG J, MA Y L, et al. Effect of pretreatment processes on structure and corrosion resistance of the anodic film formed on 5056 aluminum foil in a phosphoric acid solution [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(11):95-101.

[9] 熊菊,邹梦婷,王维青,等. 温度及酒石酸对5182铝合金硫酸阳极氧化膜结构和耐蚀性能的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(11):102-108.

XIONG J, ZOU M T, WANG W Q, et al. Effect of temperature and tartaric acid on the structure and corrosion resistance of the anodic film formed on 5182 aluminum alloy in sulfuric acid solutions [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(11):102-108.

[10] 麻彦龙,赵旭晗,杨炳元,等. 铝合金阳极氧化膜封闭技术发展趋势[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(9):131-140.

MA Y L, ZHAO X H, YANG B, et al. Development trend of the sealing technology for anodic films on aluminum alloys [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(9):131-140.