卫星用蜂窝板常温胶接工艺

赵　鑫　　刘图远　　李宗周　　沈　辉　　邱保强

（上海复合材料科技有限公司，上海　201112）

文　摘　对J-133常温胶接蜂窝板的工艺特性进行对比分析，优选出合适的工艺方法，通过正交试验研究刷胶量、均压板厚度、打压压力对胶接质量的影响，优选出最佳的工艺参数，成功制备验证件。研究表明：最佳涂胶方式为“在面板胶接面依次涂胶，垫一层30 g/m^{2}碳毡，再刷上剩余胶液”；热压罐打压方式优于真空袋加压；在一定范围内的均压板厚度对蜂窝板的90°剥离强度影响最大，刷胶量的影响次之，打压压力影响最小；最优的工艺参数组合为：刷胶量350 g/m^2，均压板厚度为1.5 mm，打压压力0.15 MPa。根据最佳工艺参数制备出的J-133常温胶接蜂窝板，其胶接质量和力学性能与J78B胶膜中温固化的蜂窝板相近，满足航天设计要求。

关键词　蜂窝板，常温胶接，工艺特性，最优工艺参数

中图分类号：TB333　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2019.02.018

Bonding Process of Honeycomb Sandwich Panels for Satellite at Room Temperature

ZHAO Xin　　LIU Tuyuan　　LI Zongzhou　　SHEN Hui　　QIU Baoqiang

（Shanghai Composite Material Science & Technology Co., Ltd, Shanghai　201112）

Abstract　The process characteristics of J-133 adhesive sandwich plate at room temperature were compared and analyzed. The suitable process method was selected. The effects of brushing amount, thickness of pressure equalizing plate and pressing pressure on the quality of bonding were studied by orthogonal test. Screen out the optimal process parameters and produced verification parts successfully. The research shows that the best way to apply glue is to “apply the glue on the panel’s adhesive surface, then put a layer of 30 g/m^2 carbon fiber felt on the glue and brush the remaining glue”; the maximum effects on 90°peeling strength of honeycomb sandwich plate is the thickness of the plate, the second effects is the amount of brush and the pressure is the least; the best process parameters is that the amount of brush glue is 350 g/m^2, the thickness of plate is 1.5 mm, the pressure is 0.15 MPa. According to the optimum process parameters, the quality of the honeycomb plate bonding at the room temperature meet the requirements of aerospace, which is similar to that bonding with heating.

Key words　Honeycomb sandwich panel, Bonding at room temperature, Processing behavior, Processing parameter

0　引言

蜂窝板为卫星上许多单机仪器的安装及管路电缆的固定提供安装接口和结构支撑[1]，现航天使用的蜂窝板大部分为中高温固化成型。为适应新型号产品试验和使用要求，部分蜂窝板产品需采用常温胶接的工艺方法成型。

蜂窝板常温胶接过程为蜂窝芯、埋件、热管等在中高温下先固化为中间层如图1所示，中间层与上面板和下面板分别常温胶接[2]。

蜂窝板常温胶接工艺方法研究少，特性了解不足，实际使用中易发生胶接质量问题。如某型号的顶板为高导热碳纤维复合材料蒙皮与蜂窝夹层的常温胶接结构，成型后存在多处区域脱粘，最大区域近50 mm×50 mm，胶接质量不能满足要求。

J-133胶黏剂为航天工程中常用的常温固化液态胶黏剂，胶接性能优良，经过长时间的在轨考验。本文

收稿日期：2018-04-08

第一作者简介：赵鑫，1982年出生，高级工程师，主要从事复合材料构件的胶接装配成型工艺工作。E-mail：13667152485@139.com

对 J-133 蜂窝板常温胶接的工艺特性进行对比分析，通过正交试验研究不同刷胶量、均压板厚度、打压压力对胶接质量和的影响，解决蜂窝板常温胶接质量差的问题，为蜂窝板常温胶接工艺设计提供指导和参考。

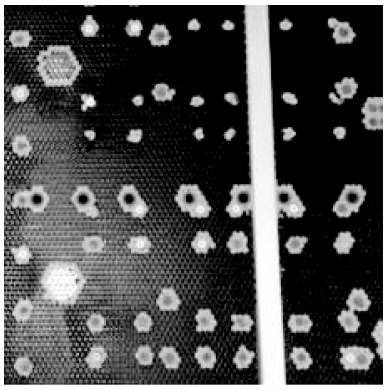


图 1 中间层结构示意图

Fig.1 Structure figure of middle interlayer

1 实验

1.1 原材料

实验所用的原材料如表 1 所示。

表 1 原材料表

Tab.1 The table of raw material

原材料	规格	厂家
铝蒙皮	0.30mm	中国铝业有限公司
碳蒙皮	0.50mm	自制
铝蜂窝	5mm×0.04mm×29.3mm	中国铝业有限公司
铝热管	300mm×29.1mm	自制
铝埋件	Φ15mm×29.1mm	自制
J-133	-	黑龙江石化研究院
J78B	0.15mm	黑龙江石化研究院
$J78D_2$	1mm	黑龙江石化研究院
碳毡	30g/m^2	日本东丽株式会社

1.2 仪器和设备

实验所用的仪器和设备如表 2 所示。

表 2 仪器和设备表

Tab.2 The table of instruments and equipment

仪器或设备	规格	厂家
热压罐	5m	美洲豹特种设备有限公司
探伤仪	WP632AM	日本啄木鸟检测仪器有限公司
万能力学试验机	RGT-4000	深圳瑞格尔仪器有限公司

1.3 试样的制备

涂胶量试验：制备在面板上涂 J-133 量分别为 180、240、300 g/m^{2}三种规格为 500 mm×1 000 mm 铝蒙皮蜂窝夹层试样，每种试样 3 件，试样的固化条件是 25℃，打压 0.15 MPa，均压板为厚 1.5 mm 的铝板，固化时间为 72 h。

涂胶方式试验：制备在面板上涂 J-133 刷胶量为 240 g/m^2，按三种涂胶方式的 500 mm×1 000 mm 铝蒙皮蜂窝夹层试样，每种试样 3 件，试样的固化条件是 25℃，打压 0.15 MPa，均压板为厚 1.5 mm 的铝板，固化时间为 72 h。3 种试样涂胶方式为：1#试样在面板上 1 次将胶全部涂刷完；2#试样在面板上涂 2/5 胶黏剂，放置 30 min 预固化，然后涂刷 2/5 胶黏剂，蜂窝芯涂刷 1/5 胶黏剂；3#试样在面板上涂胶，然后垫一层 30 g/m^{2}碳毡，将剩余胶液刷在碳毡上。

打压方式试验：制备在面板上涂 J-133 刷胶量为 300 g/m^2，按真空袋加压和热压罐打压方式的 500 mm×1 000 mm 铝蒙皮蜂窝夹层试样，每种试样 3 件，试样的固化条件是 25℃，压力 0.1 MPa，均压板为厚 1.5 mm 的铝板，固化时间为 72 h。

正交试验：按 L9(3×3)正交表 3 制备 9 件规格为 1 000 mm×1 000 mm 的 J-133 常温胶黏剂铝蒙皮铝蜂窝夹层试样，3 因素和 3 水平对应参数如表 3 和表 4 所示，涂胶方式为在面板胶接面依次涂底胶，垫一层 30 g/m^{2}碳毡，刷上剩余胶液，加压方式为热压罐打压方式，埋件数目均为 50，热管数目均为 2 根，发泡胶为 $J78D_2$，试样的固化条件是 25℃，固化时间为 72 h。

表 3 正交试验表

Tab.3 Table of orthogonal test

试样	因素		
	A	B	C
1#	1	1	1
2#	1	2	3
3#	1	3	2
4#	2	1	3
5#	2	2	2
6#	2	3	1
7#	3	1	2
8#	3	2	1
9#	3	3	3

表 4 3 因素 3 水平对应表

Tab.4 Table of 3 factor and 3 level

水平	刷胶量/g·m^{-2}	均压板厚度/mm	打压压力/MPa
	A	B	C
1	250	1.5	0.10
2	300	3.0	0.15
3	350	4.0	0.20

验证试验：按刷胶量 350 g/m^2，涂胶方式为在面

板胶接面依次涂胶,垫一层 30 g/m^{2}碳毡,刷上剩余胶液,均压板厚度 1.5 mm,打压压力 0.15 MPa 条件下制备 1 000 mm×1 000 mm 铝蒙皮(0.3 mm)铝蜂窝芯和碳蒙皮(0.5 mm)铝蜂窝芯的常温胶接蜂窝板验证试样各 1 件,同时制备 1 件同材质的 J78B 胶黏剂的蜂窝板作参比,试样制备参数如表 5 所示。

表 5　4 种蜂窝板制备参数

Tab.5　Parameters of 4 kinds of honeycomb plates

试件类型	碳毡	胶黏剂	固化温度/℃	固化压力/MPa	固化设备
常温胶接铝蒙皮蜂窝板	30 g/m^2	J-133 (350 g/m^2)	25	0.15	热压罐
常温胶接碳蒙皮蜂窝板	30 g/m^2	J-133 (350 g/m^2)	25	0.15	热压罐
中温胶接铝蒙皮蜂窝板	-	J78B (0.15 mm)	90	0.15	热压罐
中温胶接碳蒙皮蜂窝板	-	J78B (0.15 mm)	90	0.15	热压罐

1.4　性能测试

蜂窝板试样无损探伤按 Q/PqF 44 — 2016《蜂窝夹层结构敲击法无损检测规范》进行,蜂窝板的剪切性能按 GB/T 1455 — 2005《夹层结构或芯子剪切性能试验方法》进行,蜂窝板的 90°剥离性能按 GB/T 130.8 — 1986《胶结铝蜂窝夹层结构 90°剥离试验方法》测试,蜂窝板弯曲性能按 GB/T 1456-2005《夹层结构弯曲性能试验方法》测试。夹层结构试验方法板材探伤后按测试标准,制备力学性能测试试样各 5 件(碳蒙皮蜂窝板无 90°剥离试样),在万能试验机上进行力学性能测试。

2　结果与讨论

2.1　涂胶量对胶接缺陷的影响

表 6 为不同 J-133 涂胶量下铝蒙皮蜂窝夹层试样的胶接缺陷统计表。涂胶量为 300 g/m^{2}的蜂窝板无脱粘缺陷,这是因为 J-133 常温下黏度为 2~3 Pa·s,流动性较强,在面板上形成的胶层厚度均匀性差,在用胶量少于 300 g/m^{2}的情况下,蜂窝芯与蜂窝板面板上的胶液局部无接触,无法形成有效连接[2]。

表 6　3 种试样探伤结果

Tab.6　Testing results of 3 kinds of specimens

试件类型	脱粘处数
涂胶 180 g/m^{2}试样	5-8
涂胶 240 g/m^{2}试样	1-2
涂胶 300 g/m^{2}试样	0

提高涂胶量能降低常温胶接蜂窝板缺陷,而航天应用中对结构的质量有严格的要求,而蜂窝板胶接最佳胶层厚度在 0.10~0.30 mm[3],当用胶量超过一定值时增加用胶量对胶接质量的影响极小。常温胶接蜂窝板的刷胶量选择在 240~360 g/m^2。

2.2　涂胶方式对胶接缺陷和操作时间的影响

表 7 为在涂胶量为 240 g/m^{2}时 3 种不同涂胶方式方式下铝蒙皮蜂窝夹层试样的胶接缺陷和涂胶时间的统计表。可知,按 1#试样在面板上 1 次涂胶的蜂窝板脱粘缺陷最多,为 1~3 处,按 2#试样分 3 步涂胶和 3#试样在面板上加垫 1 层碳纤维毡后涂胶的蜂窝板均无脱缺陷。这是因为分 3 步涂胶的方式使贴近面板处的 J-133 胶液预固化提高了黏度,进而降低胶液的流动性,提高胶层均匀性,提高胶接质量。而在面板上垫碳毡是利用碳毡多孔酥松结构吸附胶液,降低胶液的流动性达到以上效果。

从表 7 可知,按 1#试样涂胶的操作时间最短为 20 min,按 2#试样分 3 步涂胶的操作时间最长为 70 min,按 3#试样在面板上加垫 1 层碳纤维毡后涂胶的操作时间为 30 min。3#试样相比 2#试样的涂胶时间减少了 57%。这说明在面板上垫碳毡的涂胶方法效率明显优于分 3 步涂胶法。J-133 的常温凝胶时间为 90~100 min[3],对大面积的常温胶接蜂窝板分 3 步涂胶法的涂胶操作时间过长,存在涂胶操作中胶液凝胶的风险,而在面板上垫碳毡的涂胶方法涂胶时间适宜,胶接质量良好。

常温胶接蜂窝板的涂胶方式选择在面板上依次涂 1 层胶,垫一层 30 g/m^{2}碳毡,将剩余胶液刷在碳毡上的涂胶方式。

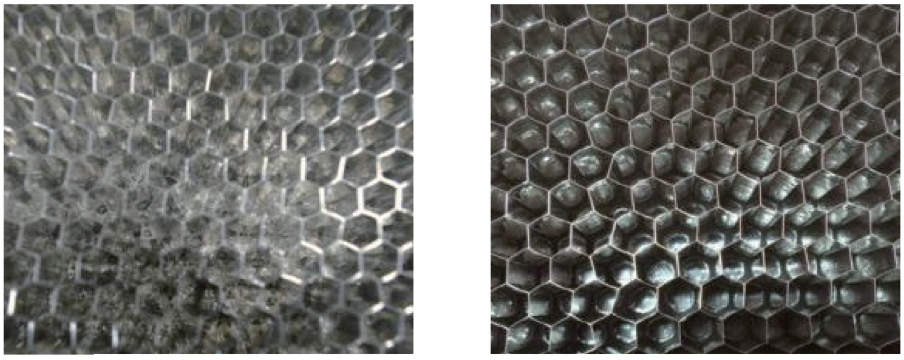
表 7　3 种涂胶方法结果统计

Tab.7　Statistical results of 3 kinds of coating methods

试件类型	脱粘处数	涂胶时间/min
1#试样	1~3	20
2#试样	0	70
3#试样	0	30

2.3　加压方式对胶接质量的影响

图 2 为 J-133 常温胶接蜂窝板真空袋加压和热压罐打压固化后的状态。可知,真空袋加压下胶层发泡严重,降低了有效胶接面积,而打压状态胶层无发泡现象,胶接质量良好。这是因为常温胶接蜂窝板在真空袋压固过程中,J-133 胶液中易挥发的胺类固化剂在真空下挥发,使胶层发泡,影响胶接质量,且固化剂的挥发可能改变胶黏剂的配比影响胶黏剂的性能[4]。蜂窝板常温胶接的加压方式选择热压罐打压。



(a) 真空袋压　　(b) 热压罐打压

图 2　抽真空和打压固化状态对比图

Fig.2　Contrast of vacuum and suppression curing state

2.3　不同工艺参数对胶接质量的影响

表 8 为 3×3 正交试验的 9 种常温胶接蜂窝的 90°剥离性能,无损探伤表明 9 种试样均未出现脱粘缺陷,胶接良好。因蜂窝板的 90°剥离强度对蜂窝夹层和面板的胶接质量最为敏感,以 90°剥离强度作为参考指标[4],正交试验的指标和极差如表 9 所示。

表 8　9 种蜂窝板试样性能测试结果表

Tab.8　Results of 9 kinds of test boards

试件	90°剥离强度/N·cm^{-1}
1#	20.00
2#	17.02
3#	13.11
4#	27.60
5#	24.00
6#	13.85
7#	28.70
8#	22.08
9#	17.02

表 9　试验指标和极差

Tab.9　Indicator and range of test boards

水平	因素		
	A	B	C
K_1	16.71	25.43	18.64
K_2	21.81	21.03	21.94
K_3	22.60	14.66	20.55
R	6.100	10.77	3.300

从表 9 可知 $R_B>R_A>R_C$,即对 90°剥离强度影响顺序为均压板厚度>刷胶量>打压压力。因蜂窝板的 90°剥离强度由蜂窝壁插入胶层深度控制,涂胶量越大,胶层厚度越大,蜂窝壁可插入深度越大,90°剥离强度越高[5];均压板厚度和打压压力共同决定面板的弯曲变形量,直接影响蜂窝与面板的贴合性,决定蜂窝壁插入胶层的深度。将面板加压变形简化为受均布载荷的简支梁模型,则在均布载荷下面板最大绕度在梁的跨中位置,其计算公式:

$$Y_{max}=\frac{5ql^4}{384EI} \tag{1}$$

式中,q 为局部线载荷;l 为跨距,蜂窝平面度特性决定;E 为均压板材料的弹性模量;I 为均压板惯性距。

对均压板上力微分得到:

$$q=\sigma \mathrm{d}x \tag{2}$$

$$I=h^3\mathrm{d}x/12 \tag{3}$$

式中,dx 为梁的微分宽度;h 为均压板厚度;σ 为打压压强。

由式(1)~式(3)得到:

$$Y_{max}=\frac{5l^4\sigma}{32Eh^3} \tag{4}$$

由公式(4)可知在一定范围内面板的最大弯曲变形量与打压压强成正比,与均压板厚度的 3 次方成反比。面板的最大弯曲变形越大,蜂窝芯能更好的贴合面板的胶接面,蜂窝壁插入胶层的深度越深,缺陷越少。由公式(4)可知均压板的厚度对 90°剥离的强度的影响比打压压力的影响要大。

通过表 9 可知蜂窝板常温胶接的最优工艺参数组合为 A_3—B_1—C_2,即刷胶量 350 g/m^2,均压板厚度 1.5 mm,打压压力 0.15 MPa。

2.4　最佳工艺参数验证

表 10 为验证件 4 种蜂窝板的性能数据表;从表 10 可知 4 种蜂窝板均无脱粘缺陷,J-133 常温胶接蜂窝板的各项力学性能与 J78B 中温胶膜固化蜂窝板性能相近,各项指标均大于设计要求值,均满足设计要求。

表 10　4 种蜂窝板性能

Tab.10 Testing results of 4 kinds of honeycomb plates

蜂窝板类型	脱粘与否	90°剥离强度 /N·cm^{-1}		剪切刚度 /10^{5}N·mm^2				剪切强度 /MPa				弯曲切刚度 /10^{8}N·mm^2			
				L 向		W 向		L 向		W 向		L 向		W 向	
		实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值
常温胶接铝蒙皮	否	28.7	14.0	2.4	1.5	1.4	0.5	0.61	0.4	0.42	0.3	1.4	1.0	1.4	1.0
中温胶接铝蒙皮	否	28.7	14.0	2.0	1.5	1.7	0.5	0.63	0.4	0.41	0.3	1.4	1.0	1.1	1.0
常温胶接碳蒙皮	否	/	/	1.9	1.5	1.5	0.5	0.54	0.4	0.42	0.3	2.2	1.0	1.9	1.0
中温胶接碳蒙皮	否	/	/	2.6	1.5	1.5	0.5	0.48	0.4	0.35	0.3	1.1	1.0	1.0	1.0

3　结论

通过对 J-133 蜂窝板常温胶接的工艺特性进行分析和正交试验等得到以下结论：

(1)蜂窝板常温胶接最佳涂胶方式：面板胶接面依次涂一层底胶，垫一层 30 g/m^{2}碳毡，然后在碳毡上刷剩余胶液。

(2)蜂窝板常温胶接中热压罐打压加压方式优于真空袋抽真空加压方式。

(3)蜂窝板常温胶接中在一定范围内对 90°剥离强度影响最大为均压板厚度，其次为刷胶量，打压压力影响最小。

(4)蜂窝板常温胶接的最优工艺参数组合：刷胶量 350 g/m^2，均压板厚度 1.5 mm，打压压力 0.15 MPa。根据该参数制备出的常温胶接蜂窝板胶接质量和力学性能与 J78B 胶膜中温固化的蜂窝板相当，满足航天设计要求。

参考文献

[1] 高慎斌，杨庭相，赵仪，等. 卫星制造技术(下)[M]. 北京：宇航出版社，1998：100-102.

[2] 刘杰，郝巍，孟江燕.蜂窝夹层结构复合材料应用研究进展[J].宇航材料工艺，2013，43(3)：35-38.

[3] 付刚，匡弘. J—133 室温固化耐温 100℃结构胶黏剂[J].中国胶黏剂，1998，7(3)：15-17.

[4] 王华吉.复合材料蜂窝夹层结构制备及其力学性能分析[D]. 哈尔滨工业大学，2010：58-60.

[5] 林晓虎，杨庆生.航空航天夹层结构抗冲击性能的研究现状[J]. 航空制造技术，2013(10)：65-68.

[6] 张广成，赵景利.蜂窝夹层结构复合材料的力学性能研究[J].机械科学与技术，2003，22(2)：280-282.

(上接第 89 页)

[5] 何英，朱红钢，韩野. 航空发动机小孔特种加工技术[J]. 航空制造技术，2011(4)：56-60.

[6] 齐歆霞，朱海南. 航空发动机叶片气膜孔加工工艺分析[C]. 第 14 届全国特种加工学术会议，苏州：中国机械工程学会特种加工分会，2011：160-163.

[7] 崔智勇，刘遵友，王轶，等. 叶片气膜孔加工再铸层控制[J]. 机械工程师，2013(11)：208-209.

[8] KONONENKO T V，FREITAG C，SOVYK D N，et al. Influence of pulse repetition rate on percussion drilling of Ti-based alloy by picosecond laser pulses[J]. Optics and Lasers in Engineering，2018(103)：65-70.

[9] 彭国平，彭秀云. 发动机涡轮导向叶片气膜孔的加工工艺[J]. 航天制造技术，2008(6)：26-29.

[10] ZHANG Y，XU Z Y，ZHU Y，et al. Machining of a film-cooling hole in a single-crystal superalloy by high-speed electrochemical discharge drilling[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2016，29(2)：560-570.

[11] LIANG J W，AI X，WEN Z X，et al. Experimental investigation on low cycle fatigue of DZ125 with film cooling holes in different processes of laser drilling[J]. Engineering Failure Analysis，2016(59)：326-333.

[12] IZQUIERDO B，PLAZA S，SANCHEZ J A，et al. Numerical prediction of heat affected layer in the EDM of aeronautical alloys[J]. Applied Surface Science，2012(259)：780-790.

[13] MUHAMMAD A，MIZRA J，JUNAID A A，et al. Parametric analysis of recast layer formation in wire-cut EDM of HSLA steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2016(87)：713 - 722.

[14] WANG C C，ZHOU H M，YANG L D，et al. Recast layer removal after electrical discharge machining via Taguchi analysis：A feasibility study[J]. Journal of Materials Processing Technology，2009(209)：4134-4140.

[15] WEN Z，PEI H，ZHANG C，et al. Analysis of surface quality of multi-film cooling holes in nickel-based single crystal superalloy[J]. Metal Science Journal，2016，32(18)：1845-1854.