

# K-cor 夹层结构制备工艺

段沐枫 李 宁 郑莹莹 肖 军 李 勇

(南京航空航天大学材料学院,南京 211106)

**文 摘** K-cor 是应用 Z-pin 增强技术的一种新型高性能结构。本文以 NHZP-1 树脂为基体研究适合 K-cor 结构的半固化 Z-pin 拉挤工艺,得到固化度为 51.25% 的 Z-pin 为满足制备要求的最佳参数,并制作悬空装置采用两步法进行半固化 Z-pin 的植入和压弯,探索出压弯和后固化工艺。在此基础上,对试制的 K-cor 夹层结构进行平拉和剪切试验研究。结果发现,折弯长度是 K-cor 夹层结构的另一重要参数,较长的折弯长度会增加 Z-pin 与蒙皮的结合面积从而提高结构的拉伸性能。

**关键词** 复合材料,半固化 Z-pin,K-cor 夹层结构,制备工艺,力学性能

## Manufacturing Processes of K-cor Sandwich Structure

Duan Mufeng Li Ning Zheng Yingying Xiao Jun Li Yong

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106)

**Abstract** The K-cor sandwich construction is a new kind of foam sandwich structure reinforced by Z-pin technique. There are seldom studies available at present. The NHZP-1 resin was used as matrix for partial-cured Z-pin's pultrusion processing. 51.25% of the cure degree is the optimum parameter based on a series of experiments. And an impending device was made for insertion and flushing for the protruding pin using the two-step method. The parameters of flushing and post-cure were also explored. On the basis of the completion, static shear and stretching tests were conducted under different loads. The pin flattened length is also critical for the configuration. The increased bonded area between Z-pin and the two skins can enhance the resistance of stretching test behavior.

**Key words** Composites, Partial-cured Z-pin, K-cor sandwich structure, Manufacturing process, Mechanical properties

### 0 引言

夹层结构是一种轻质结构,由面板、芯子通过胶层连接在一起构成<sup>[1-2]</sup>,包括蜂窝夹层结构和泡沫夹层结构等。面板通常采用高强度、高模量材料,芯子使用蜂窝、泡沫等轻质材料,以适应航空航天、船舶、车辆、体育运动器材以及风力发电等工程中对结构质量的要求。

针对泡沫结构中面板和芯材易发生胶接面脱粘破坏的缺点,国外学者提出了许多界面增强技术,其中以缝纫和 Z-pin 增强技术最具代表性<sup>[3-5]</sup>。X-cor 和 K-cor 结构皆为 Z-pin 增强技术的应用。X-cor 结构是将经过预制的细长杆(Z-pin,可以是复合材料拉挤棒或者金属丝)按一定角度插入闭孔泡沫芯材

中,并在两头预留出一小段植入上下面板,经固化形成的整体结构(图 1)。X-cor 具有高比强度、高比模量、高损伤容限和优良的耐环境性等优点。K-cor 结构是 X-cor 结构的演化;如图 2 所示,K-cor 制造过程中,采用半固化 Z-pin,在适当的温度和压力下,Z-pin 露出泡沫的端部被折弯到泡沫表面,并与预浸料中树脂发生共固化反应或与胶膜发生共胶联而粘结在一起<sup>[6]</sup>。

K-cor 较 X-cor 结构有以下优势:(1)在 Z-pin、面板和泡沫相同的情况下,其独特的结构设计使 K-cor 中 Z-pin 对面板的损伤更小,构件表面光滑;(2)X-cor 要求面板有基本工艺厚度,若面板过薄易导致 Z-pin 拔出失效,而 K-cor 对面板厚度无要求,在性

能满足的条件下,K-cor 在减重和降低成本上更有优势;(3)X-cor 的固化过程中,Z-pin 会发生转动,削弱了和蒙皮的机械连接强度,K-cor 中的 Z-pin 与蒙皮充分交联后角度稳定性更好;(4)K-cor 对面板种类要求低,一些特殊金属也可做面板材料,材料可设计性更强。

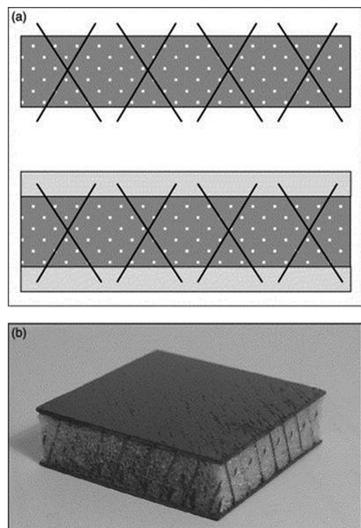


图1 X-cor<sup>TM</sup>结构示意图  
Fig. 1 X-cor<sup>TM</sup> preform

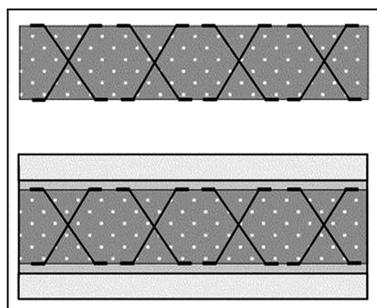


图2 K-cor<sup>TM</sup>结构示意图  
Fig. 2 K-cor<sup>TM</sup> preform

X-cor 和 K-cor 结构的早期研究皆源于国外。对于 X-cor 结构,国外有较多的研究报道<sup>[7-11]</sup>,国内南京航空航天大学、西北工业大学、北京航空航天大学等对其进行多年深入的研究,并取得了一定的成果。关于 K-cor 结构,国外报道较少,其工艺和性能的研究在国内尚属空白,对此本文开展 K-cor 结构制备工艺研究。

## 1 实验

### 1.1 设备和原料

设备:Z-pin 拉挤机(自制),Z-pin 自动植入机(自制),平板热压机(青岛嘉瑞橡胶机械有限公司),新三思力学试验拉伸机(深圳三思公司),热流型差示扫描量热仪 DSC 200 F3 Mara(德国 Netzsch 公司)。

原料:NHZP-1 树脂(自制),T300 碳纤维(日本东丽公司),3K,Rohacell<sup>®</sup>31 型 PMI 泡沫(德国 Evonik Degussa 公司)。

### 1.2 半固化 Z-pin 拉挤工艺

探索适用 K-cor 结构的半固化 Z-pin 拉挤工艺是试制的第一步,也是最关键的一步。衡量 Z-pin 能否满足要求取决于其能否解决 K-cor 制备工艺中存在的主要矛盾——刚度和塑性:合适的 Z-pin 既要有足够的刚度可以植入泡沫,又要有足够的塑性可以在特定工艺条件下折弯,同时保证 Z-pin 无损伤或损伤较小。

拉挤试验中,K-cor 对 Z-pin 有三方面的要求:一是含胶量,Z-pin 含胶量高纤维增强优势变弱、含胶量低会造成 Z-pin 切断时断口发毛并影响泡沫与上下面板的结合;二是 Z-pin 的刚度和塑性均衡,这需要调控 Z-pin 中树脂固化程度;三是从增强机理方面考虑<sup>[11]</sup>,K-cor 结构中 Z-pin 端部和蒙皮的结合区是强度薄弱处,也是结构强度的决定性因素。综合上述分析,调控 Z-pin 含胶量和固化度的大小是制备 K-cor 结构的工艺关键。

NHZP-1 是南京航空航天大学自行研发的 Z-pin 专用树脂,常温下为固态、加热熔融。调控工艺条件可以制备半固化 Z-pin,常温下有足够的刚度植入泡沫,升至一定温度时,Z-pin 中未完全固化的树脂可软化,实现折弯。

利用 DSC 对 NHZP-1 树脂进行功率补偿差热分析,升温速率为 5℃/min,测得放热曲线如图 3 所示,NHZP-1 树脂反应 I 的固化速率最大值的温度范围在 148 ~ 197℃,峰值面积为 152.7 J/g,反应 II 的固化速率最大值在 207 ~ 279℃,峰值面积为 25.63 J/g。据此,为得到半固化的 Z-pin,拉挤采用双区加热方式,拉挤模具温度尽量低,确保 Z-pin 的圆柱形外形,出模后经过温度在 150 ~ 190℃ 之间的烘道,使反应 I 以较高的速率进行,此处为 Z-pin 的主要固化反应区。

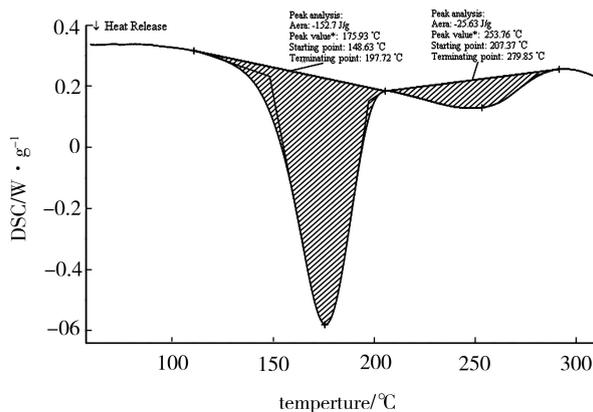


图3 NHZP-1 树脂 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curve of NHZP-1 resin

Z-pin 含胶量的大小由浸胶槽和模具温度参数共同控制,拉挤工艺要求树脂在较长时间内保持相对宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 5 期

比较稳定的低黏度,一般在 0.6~3 Pa·s 维持 2 h 以上。对于 NHZP-1 树脂,胶槽温度采用 90℃ 可以满足较长时间的正常拉挤。另外,多次试验表明,模具温度维持在 105℃ 为最佳。

### 1.3 Z-pin 的植入

根据已有 X-cor 的研究经验,制备三种不同植入规格的 K-cor 结构,列于表 1。在自制的 Z-pin 数控植入机上完成 Z-pin 的自动化植入。植入角定义为 Z-pin 与泡沫表面法线方向所成角度。

表 1 植入规格

Tab.1 Implant standard

直径 /mm	列间距×行距 /mm	上下端预留 长度/mm	植入角度 /(°)
0.5	7×7	3	20
0.5	7×7	5	20
0.5	5×5	3	20

植入后的 Z-pin 需压入泡沫中,由于本实验要比较不同预留长度对拉伸性能的影响,因此压入时要严格控制两端的长度。考虑到已植入的 Z-pin 有 20° 的倾斜角,两排之间间隔小,直尺的测量很不方便。采用自制工具(角度可自由调节),分别标记 3 和 5 mm 的基准线,对 Z-pin 的预留长度进行校对。

### 1.4 压弯和后固化工艺

K-cor 与 X-cor 结构最大的区别为 Z-pin 顶端的处理方案,折弯过程对 K-cor 的性能有重要影响,折弯的工艺方法成为 K-cor 研制的主要研究内容。Z-pin 折弯的实现需要热和压力的共同作用,不同固化度的 Z-pin 需要不同的折弯工艺参数,所得到的折弯效果也不同。为研究本文所制的 Z-pin 在不同的处理温度和处理时间下刚性和塑性的变化,制备多组试样件。

为选择后处理参数,制作两组试样,分别在 130℃ 下后处理 2 和 1 h,冷却后挖掉边缘泡沫,观察 Z-pin 的弯曲程度。

另外,为方便植入,保证压弯效果,通过反复摸索,提出两步法植入与压弯,即植入的 20° 方向的 Z-pin 进行压弯后,再进行 -20° 方向的植入和压弯。并根据需要制作了简易的悬空装置。

悬空装置需要确保压弯过程中泡沫不发生弯曲变形和损伤,同时尽量避免 Z-pin 损伤。因此装置中间悬空部分的长和宽要略小于泡沫;表面光滑,能够与泡沫充分的贴合,且支撑作用要足够好。经不断的尝试,选定压弯支撑模具的尺寸为 308 mm×308 mm,厚度为 12 mm 的钢框,每隔 7 mm 有宽度为 6 mm 的支架,可以满足以上要求,设计图见图 4。

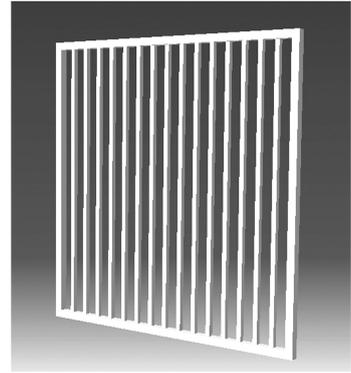


图 4 悬空装置

Fig. 4 Impending device

### 1.5 K-cor 结构性能测试

为获得 K-cor 结构的基本特性,作为初步探索,蒙皮采用光威公司生产的 12500 型单向碳纤维预浸料,采用 [0/90/0/90]<sub>n</sub> 铺层顺序,固化后的结构表面光滑。接着对试制的 K-Cor 结构进行基本力学性能测试。

拉伸试验按 GB1452—87 进行,加载速率为 0.5 mm/min,每组 5 个试样。为了研究 Z-pin 的折弯长度对拉伸性能的影响,设计折弯长度为 3 和 5 mm 的 2 组试样进行对比。

纵向剪切试验按照 GB—1455—88 进行,加载速率为 1 mm/min,采用自制的剪切试验夹具。设计的对比组为折弯长度为 3 mm 的 K-cor 组和空白组试样。

## 2 结果及分析

### 2.1 工艺参数的选择

拉挤过程中烘道温度和拉挤速率是决定 Z-pin 固化度的主要部分,两种参数的配合要能均衡刚度和塑性。选取典型拉挤实验参数见表 2。

表 2 不同工艺参数及测试结果<sup>1)</sup>

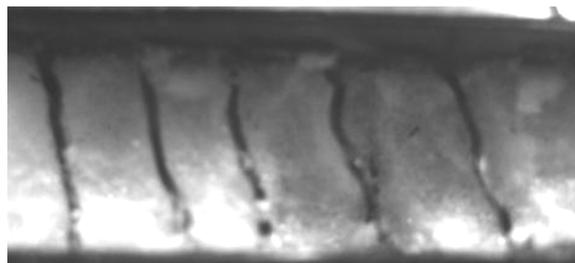
Tab.2 Results of different parameters

试样	烘道温度 /℃	牵引速率 /mm·s <sup>-1</sup>	含胶量 /%	固化度 /%	Z-pin 的测试 结果
1#	160	3.6	43.61	19.35	手工可植入的最低固化度,但 Z-pin 易在自动植入机导向管内失稳,刚度不足
2#	160	3.24	43.38	44.75	固化度为数控植入机允许植入的最小值
3#	167	3.24	44.15	51.25	最佳
4#	190	3.24	42.42	59.92	使用本文压弯方法固化度的最高值

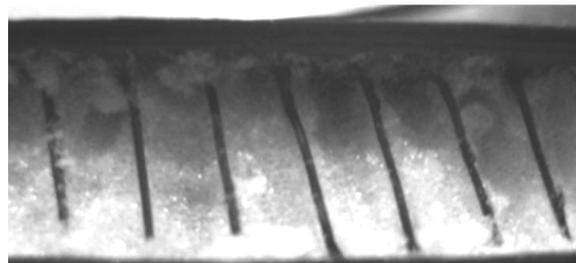
注:1) 以上参数中胶槽温度皆为 90℃,模具温度皆为 105℃。

经试验探索,制备的 Z-pin 在加热至约 40℃ 时开始变软,65℃ 时可被折弯至与泡沫表面自由贴合,冷却后变硬,并发生约 15° 翘起。由图 3 知,该树脂在 65℃ 反应程度极小,因此为降低两步法可能导致的两方向 Z-pin 固化度的差异,选定第一个方向的压弯工艺为 65℃/20 min,第二个方向压弯和下一步的后处理同时进行。

两组试样在 130℃ 下分别后处理 2 和 1 h 后,从



(a) 后处理 1 h



(b) 后处理 2 h

图 5 后处理 1 和 2 h 的试样

Fig. 5 Samples after curing for 1 h and 2 h

在经过以上探索,确定具体工艺为:

(1) Z-pin 单面植入后,利用悬空装置和特制工具进行压入,保证两端预留长度的精确性;

(2) 在悬空装置上进行第一个方向 Z-pin 的预压弯,温度 65℃,目的是给 Z-pin 一个趋向。在上下泡沫表面放置剪裁好的脱模布。用加热到 80℃ 的铝板沿 Z-pin 的趋向方向堆放,采用夹持装置保压,自然冷却后拆下,图 6 可以看到 Z-pin 贴合状态较好;

(3) 压入第二个方向的 Z-pin 后,温度为 135℃,操作方法类似步骤(2),进行第二个方向的压弯和后处理,2 h 取出后自然冷却。



图 6 单方向压弯后的 Z-pin

Fig. 6 Z-pin pressed one orientation flat

## 2.2 拉伸性能分析

拉伸过程中,载荷通过蒙皮分别传递给 Pin 及泡沫。由于泡沫能承受载荷小,故泡沫首先中间出现裂纹,随着载荷的增加,裂纹开始向两侧扩展,同时受到 Pin 两端的折弯部分的阻碍作用,直到 Pin 与蒙皮的结合失效或者两端折弯部分发生断裂,Pin 失效后所有载荷均由泡沫承担,此时强度远大于泡沫的拉伸强度,所以泡沫即刻被破坏,载荷突然下降,试样失效。

破坏模式为:多数 Z-pin 折弯部分与蒙皮结合的

图 5 的比较中看出,后处理 2 h 的 Z-pin 的状态较好。

在压弯过程中,若压力过大,尚未完全固化的 Z-pin 中所含纤维将发生折断损伤,因此应采用逐级加压的方法。另外,Z-pin 中的树脂在加热处理过程中会发生软化,黏着在加热板上难以分离,故在二者之间放置脱模布。

树脂层破坏,极少数 Z-pin 折弯部分被拉断。失效试样见图 7。拉伸结果如表 3 所示。

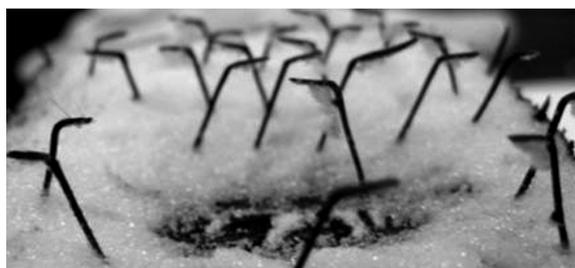


图 7 平拉失效试样

Fig. 7 Failing sample after stretching test

表 3 平拉性能实验结果

Tab. 3 Results of stretching tests

植入角 /(°)	直径 /mm	折弯长 度/mm	列间距× 行距 /mm	拉伸强度		拉伸模量	
				平均值 /MPa	离散系 数/%	平均值 /MPa	离散系 数/%
20	0.5	3	7×7	0.73	20.29	35.81	11.39
20	0.5	5	7×7	0.81	11.10	38.07	15.40

图 8 为不同折弯长度试样的载荷—位移曲线。折弯长度为 5 mm 的试样相对于 3 mm 的试样折弯部分与蒙皮的理论结合比面积 (Pin 结合面积/试样总面积) 从 2.67% 提高至 4.44%, 由表 3 得出,其拉伸强度提高 10.96%, 拉伸模量提高 6.31%, 这说明增加 Z-pin 与蒙皮的结合面积会提高结构的拉伸性能。

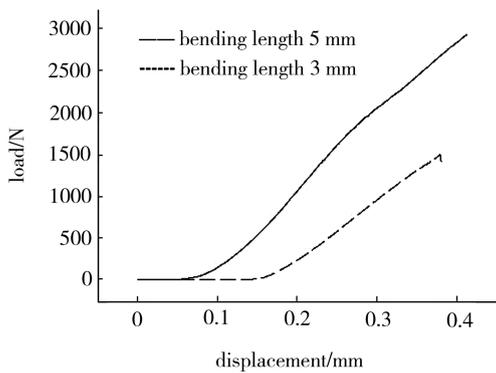


图8 试样的平拉载荷—位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of samples

### 2.3 剪切性能分析

在剪切试验过程中,裂纹仍开始于泡沫夹芯中,继续扩展受到 Z-pin 的阻隔,载荷继续增大,直到大部分 Z-pin 端部从泡沫中脱出或折弯部分断裂,部分发生屈曲,载荷下降。在破坏开始后看到泡沫中间出现 45°方向的裂纹,并伴有稀疏的噼啪声。残样如图 9 所示,泡沫从中间发生破坏,未出现和单一面板脱离的情况,说明芯子和上下面板结合界面性能较均匀。



图9 剪切失效试样

Fig. 9 Failing sample after shearing test

表 4 为剪切试验结果,可以得出折弯长度为 3 mm 的 K-cor 结构相对于空白试样强度增大 52.5%,模量提高 368.2%。

表 4 剪切性能试验结果

Tab. 4 Results of shearing tests

植入角 (°)	Z-pin 列间距× 直径		预留 长度 /mm	纵向剪切强度		纵向剪切模量	
	行间距 /mm	行间距 /mm		平均值 /MPa	离散系 数/%	平均值 /MPa	离散系 数/%
20	0.5	5×5	3	0.61	2.84	71.63	13.39
空白	-	-	-	0.40	1.80	15.30	6.00

### 3 结论

(1) K-cor 结构用半固化 Z-pin 的最佳拉挤参数为:胶槽温度为 90℃,拉挤模具温度为 105℃,后固化温度为 167℃,拉挤速率为 3 mm/s,固化度为 51.25%。

(2) 采用两步法完成 Z-pin 植入和压弯,具体工艺为:预压弯温度为 65℃;压弯和后处理的工艺参数为 130℃/2 h。

(3) K-cor 结构 Z-Pin 折弯长度的增加有利于提高拉伸强度和模量:折弯部分和蒙皮理论结合比面积提高 1.77%;其拉伸强度提高 10.96%;拉伸模量提高 6.31%。

(4) 与空白试样相比,K-cor 结构的剪切强度提高 52.5%,模量提高 368.2%。

### 参考文献

- [1] 李顺林,王兴业. 复合材料结构设计基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1993:120-121
- [2] 李河清,赵景丽,张元明,等. 固化压力对夹层结构力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(6): 16-18
- [3] Michale D, Wood K, Sun X N. The effect of stitch distribution on mode I delamination toughness of stitched laminated compression: experimental results and FEA simulation [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 1058-1072
- [4] Tsai G C, Chen J W. Effect of stitching on mode I strain energy release rate [J]. Composite Structures, 2005, 69(1): 1-9
- [5] Carstensen T, Cournoyer D, Kunkel E, et al. X-cor advanced sandwich core material [C]. Seattle: Proceedings of the 33<sup>rd</sup> International SAMPE Technical Conference, 2001
- [6] Marasco A I, Cartie D D R, Partridge I K, et al. Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: out-of-plane properties [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(2): 295-302
- [7] Kay B F, Airframe technology-foundation for the 21th century [C]. // American Helicopter Society 57th Annual Forum. Washington, 2001
- [8] O'Brien K T, Paris L, Exploratory investigation of failure mechanism in transition regions between solid laminates and X-cor truss sandwich [J]. Comp. Struct., 2002, 57: 189-204
- [9] Vaidya U K, Kamath M V, Hosur M V, et al. Low-velocity impact response of cross-ply laminated sandwich composites with hollow and foam-filled Z-pin reinforced core [J]. Compos. Technol. Res., 1999, 21(2): 84-97
- [10] Marasco A L, Cartie D D R, Partridge K, et al. Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: out-of-plane properties [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(2): 295-302
- [11] O'Brien K T, Paris I L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X-cor truss sandwich [J]. Composite Structures, 2002, 57: 189-204

(编辑 李洪泉)