

# 缺陷对高温合金蜂窝板弯曲力学性能的影响<sup>\*</sup>

王琦, 童国权, 陈峰, 马振武, 杨钦鑫

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 采用预埋缺陷的方法, 制备含有面芯脱焊缺陷的高温合金蜂窝板, 进行了三点弯曲试验, 研究了缺陷形状、大小、位置和蜂窝芯取向对蜂窝板三点弯曲损伤模式和承载能力的影响。研究发现, 含面芯脱焊缺陷的蜂窝板在缺陷受压部位产生反向鼓包, 并沿着宽度方向扩展为完全破坏; 随着缺陷尺寸的增大, 蜂窝板承载能力逐渐降低; 当缺陷位于三点弯曲受拉面时, 蜂窝板具有更高的三点弯曲极限载荷, 且矩形缺陷试样的弯曲极限载荷要高于相同缺陷面积的圆形试样。最后, 利用 LS-DYNA 对含圆形缺陷高温合金蜂窝板的三点弯曲性能进行了数值模拟分析, 得到其三点弯曲过程中的应力分布状态。

**关键词:** 缺陷; 蜂窝板; 三点弯曲; 损伤模式; 弯曲极限载荷; 数值模拟

## Effect of Defects on Bending Mechanical Property of High Temperature Alloy Honeycomb Panels

WANG Qi, TONG Guoquan, CHEN Feng, MA Zhenwu, YANG Qinxin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** In the method of defects presets, high temperature alloy honeycomb panels with desoldering are made and the influence on damage mode and load capacity caused by defects shape, size, location and core tropism are studied by three point bending test. The investigation shows that reverse bulge appears in the defects compression area and extends to complete damage along the width direction and the load capacity of the honeycomb panel reduces along with the rising of defect size. When the defect is located in the extruded area, the honeycomb panels will have higher ultimate bending load and that of rectangular defect sample is higher than that of circular defect sample. Finally, in order to get the stress distribution state in bending process, the three point bending performance of high temperature alloy honeycomb panels with circular defect is analyzed by numerical simulation based on LS-DYNA.

**Keywords:** Defect; Honeycomb panel; Three point bending; Damage mode; Ultimate bending load; Numerical simulation

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.106

航空航天技术的迅速发展使得飞行器的速度不断提高, 由此增加了飞行器因高速飞行而产生的气动热。为保护飞行器免受气动热的损伤, 热防护系统成为航天飞行器的重要结构和组成部分<sup>[1]</sup>。目前, 高速飞行器上的热防护系统主要有金属热防护系统, 超高温陶瓷热防护系统和 C/C 复合材料热防护系统。金属热防护系统由于具有高比强度, 良好的抗冲击和热稳定性能, 易于安装和维修检测等优点, 在高速飞行器上的应用比例不断增大, 成为飞行器热防护系统的首要选择<sup>[2-4]</sup>。

金属热防护系统主要由外层的金属蜂窝板和内部的隔热材料构成。金属蜂窝板由上下两层较薄的面板

和中间一层厚而质轻的蜂窝芯组成, 其最大特点是高比强度和良好的隔热性能, 结构形式如图 1 所示。作为金属热防护系统的最外层结构, 金属蜂窝板直接承受着气动热和太空碎片的冲击, 起着重要的防热和承力作用,

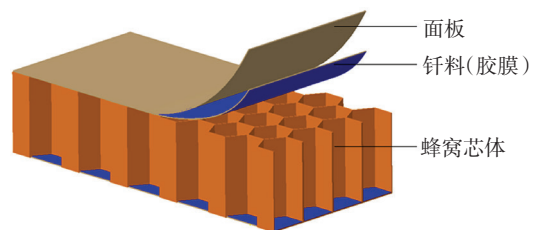


图1 蜂窝板结构示意图

Fig.1 Structure diagram of honeycomb panel

<sup>\*</sup> 基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(ykfjj20150511)资助。

关系到整个飞行器的安全,所以其承载能力成为人们不得不考虑的重要安全因素。

金属蜂窝板的制备工艺比较复杂,在制备过程中由于工艺参数的不稳定性和材料缺陷等原因,不可避免地会产生一些工艺缺陷和损伤,其中对蜂窝板力学性能影响比较严重的缺陷有面芯脱焊、芯子缺失和芯子脱焊等。其中,面芯脱焊缺陷是最普遍也是对夹层结构危害最大的缺陷形式<sup>[5-6]</sup>。目前,金属蜂窝板的力学性能研究已经得到广泛关注,但关于缺陷对蜂窝板力学性能影响的研究较少,更鲜见缺陷对GH4099镍基高温合金蜂窝板弯曲力学性能影响的相关研究。

Casavola等<sup>[7]</sup>对完整的以及含有开口缺陷的泡沫夹芯结构进行了平面压缩试验,并建立了线性的粘结模型来预测开口缺陷的承载能力,最后将试验结果与理论预测值进行了对比,发现试验结果与理论值的误差在9%以内。Gdoutos等<sup>[8]</sup>研究了铝合金蜂窝板在四点弯曲条件下的破坏模式,由于所用蜂窝芯子具有较高的面外压缩模量,蜂窝板在弯曲过程中发生了面板压缩破坏而没有发生皱曲,说明蜂窝板在弯曲过程中的皱曲变形会受到蜂窝芯强度的影响。Ai和Mao等<sup>[9]</sup>利用ABAQUS建立了含有面芯脱焊缺陷的铝蜂窝板模型,并对含有不同大小缺陷面积的蜂窝板进行了面外拉伸、压缩以及面内剪切性能模拟,模拟结果表明随机缺陷会引起面外拉伸性能的急剧下降,而面外压缩强度则随着缺陷面积的增大缓慢降低。Toribio等<sup>[10]</sup>对含有圆形和长条形贯穿缺陷的蜂窝板进行了单轴压缩试验,试验结果表明,贯穿缺陷对蜂窝板的承载能力有较大影响,因此在蜂窝板制造过程中要尽量避免贯穿缺陷的产生。刘颖等<sup>[11]</sup>采用数值模拟的方法研究了冲击性能对铝蜂窝板芯子缺失不均匀的敏感度,发现不同的蜂窝芯子缺失分布对蜂窝板的变形模式有不同的影响,且冲击载荷速度越高,蜂窝板的力学性能受缺陷分布不均匀性的影响越小。刘智良等<sup>[12]</sup>对含有面芯分层缺陷的蜂窝板抗压性能进行了理论和试验研究,应用子层屈曲模型计算了蜂窝板的压缩强度,通过试验分析发现含分层缺陷的蜂窝板的破坏模式随分层形状和大小的不同而不同。泮世东、吴林志和孙雨果<sup>[13]</sup>对含有面芯脱焊缺陷的蜂窝板进行侧压力学性能试验,试验发现,含有面芯脱焊缺陷的蜂窝板破坏模式基本上为先在缺陷处发生局部屈曲失稳,随后裂纹扩展直至蜂窝板发生完全失稳破坏。尉坤<sup>[14]</sup>提出一种求解蜂窝夹芯结构等效刚度矩阵的方法,考虑了蜂窝芯的内部结构,只用单个蜂窝胞元即可求得整个蜂窝板的等效刚度。同时,对含有面芯脱焊缺陷的GH5188蜂窝板进行了三点弯曲试验,发现蜂窝板的破坏模式并不统一。廖明顺和左孝青<sup>[15]</sup>利用有限元

法研究了不同缺陷对蜂窝板压缩性能的影响,发现断边和打孔缺陷是影响模型变形机制的主要缺陷。邵文全等<sup>[16]</sup>对含有脱胶缺陷的纸蜂窝板进行了试验研究,总结了侧压载荷作用下纸蜂窝板的破坏特征,分析了侧压强度对脱胶缺陷的敏感度。

本文以GH4099镍基高温合金蜂窝板为试验件,系统研究了蜂窝板面芯脱焊缺陷对三点弯曲力学性能的影响。钎焊所用的钎料带为矩形的长条状,在钎焊装配时需要拼接到所需宽度,若间距调整不当会造成脱焊缺陷。另外,若钎料带有部分缺失,在钎料熔化流动过程中由于表面张力的作用,会发生近似圆形的脱焊缺陷。因此,综合考虑蜂窝板可能发生的缺陷形状及计算的简便性,本文对含有圆形和正方形缺陷的蜂窝板进行试验研究。试验所用正六边形蜂窝芯格的边长为4mm,为了研究脱焊缺陷对蜂窝板力学性能的影响,要使圆形缺陷的最小面积大于蜂窝芯格的外接圆面积。蜂窝芯格的外接圆直径为8mm,考虑到在钎焊过程中熔化的钎料会发生积聚现象而使缺陷面积减小,设置圆形缺陷的最小直径为10mm。预置的圆形缺陷直径 $\phi$ 分别为10mm,20mm,30mm,正方形缺陷的边长 $l$ 为17.72mm和26.59mm,其面积分别与直径20mm和30mm的圆形缺陷的面积相等。最后,利用LS-DYNA对含有圆形面芯脱焊缺陷的蜂窝板三点弯曲试验进行了有限元模拟,进一步研究了含缺陷蜂窝板的三点弯曲变形情况和应力分布状态。

## 1 含缺陷高温合金蜂窝板制备

本文试验所用蜂窝板的芯胞为正六边形,结构参数如表1所示。其中, $L$ 为试样长度, $B$ 为试样宽度, $h$ 为蜂窝芯高度, $H$ 为蜂窝板厚度, $t_w$ 为芯子单层壁厚度, $t_f$ 为面板厚度, $a$ 为蜂窝芯格边长。

表1 蜂窝板结构参数 mm

参数	$h$	$t_w$	$a$	$t_f$	$L$	$B$	$H$
值	4	0.07	4	0.13	100	40	4.26

高温合金蜂窝板的制备分为两大部分:蜂窝芯体的制备以及面板与蜂窝芯体的连接。蜂窝芯体制备工艺流程如下:首先通过专用齿轮辊压装置和校形模制备半瓦楞板,然后将瓦楞板通过点焊连接在一起,制备成蜂窝芯体,最后通过线切割和平磨工艺制备出所需厚度的蜂窝芯。面板与蜂窝芯体通过真空钎焊工艺焊接在一起,钎料类型为Ni基非晶箔带。

采用预埋缺陷的方法制备含有缺陷的蜂窝板,即在相应缺陷位置去除所需大小的钎料,并在该位置的面板

上涂覆缺陷大小的阻焊剂,然后再进行真空钎焊。制备完成的试样如图 2 所示,试样上可以明显观察到预制缺陷。

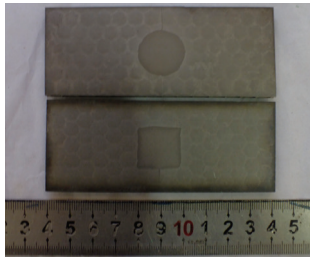


图2 含缺陷高温合金蜂窝板弯曲试样  
Fig.2 Bending samples of high temperature alloy honeycomb panel with defects

## 2 三点弯曲试验

### 2.1 试验设备及试验步骤

参考文献 [17] 进行三点弯曲试验,试验装置如图 3 所示。试验设备为 EGER 公司设计的 RG2000-2A 电子万能试验机,最大吨位是 10t。试验跨距为 80mm,试验加载速度为 2mm/min,试验载荷和位移由试验机自动记录。

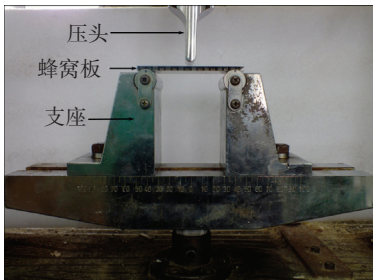


图3 三点弯曲试验装置  
Fig.3 Three point bending device

### 2.2 三点弯曲试验结果

#### 2.2.1 缺陷形状和大小对蜂窝板弯曲力学性能的影响

不同缺陷形状和大小的横向蜂窝板弯曲载荷-位移曲线如图 4 所示,含矩形缺陷试样的弯曲极限载荷要稍高于含相同面积的圆形缺陷试样,这与文献 [18] 的结论相一致,且随着缺陷尺寸的增大,试样到达弯曲极限载荷的位移量逐渐减小,这说明缺陷的存在严重影响了蜂窝板的弯曲承载能力。

在弯曲过程中,含矩形和圆形缺陷试样的变形模式基本相同:随着压头位移量的逐渐增大,首先在缺陷位置压头的某一侧产生反向的变形鼓包,且鼓包沿着宽度方向不断扩展,并伴随着面芯脱焊面积的扩大,最终导致试样产生弯曲破坏。鼓包的扩展是由最初的脱焊缺陷引起,缺陷部位的面板由于缺少蜂窝芯子的约束,使

得其在受压情况下的屈曲临界载荷降低,试样容易发生屈曲失稳。在试验中发现,缺陷尺寸越大,反向鼓包越明显,弯曲失稳载荷也越小。在弯曲过程中,面板和蜂窝芯子之间的脱焊面积是不断增大的,其变形过程如图 5 所示。

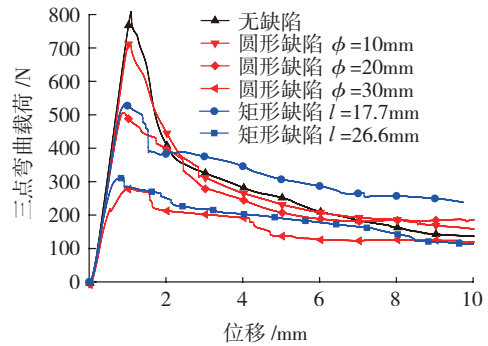


图4 不同缺陷形状和大小试样的弯曲载荷-位移曲线  
Fig.4 Load-displacement curve of bending samples with different defects

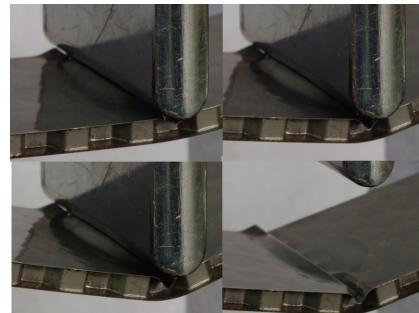


图5 含圆形缺陷试验三点弯曲损伤过程  
Fig.5 Damage process of bending samples with circular defect

#### 2.2.2 蜂窝芯取向对蜂窝板弯曲力学性能的影响

不同蜂窝芯取向的缺陷蜂窝板试样变形模式基本相同,都为缺陷区域的反向变形鼓包沿着宽度方向扩展,导致蜂窝板的最终失稳破坏。但是,纵向蜂窝板的弯曲极限载荷要略高于横向蜂窝板,其弯曲载荷-位移曲线如图 6 所示。

#### 2.2.3 缺陷位置对蜂窝板弯曲力学性能的影响

缺陷分别位于受拉面和受压面时试样的变形结果如图 7 所示。

当缺陷位于受压面时,上面板在缺陷部位出现反向鼓包,在无缺陷部位产生压入形凹陷,下面板除了弯曲折痕外则没有明显的变形损伤;当缺陷位于受拉面时,上面板在宽度方向产生明显的压入形凹陷,而下面板在弯曲过程中,缺陷部位产生了局部凸起。凸起的产生是由于在弯曲过程中,下面板处于受拉状态,但缺陷部位的面板由于没有蜂窝芯体的约束,导致蜂窝芯体和面板的位移不一致,从而使得蜂窝芯侧壁的交接处有穿透下

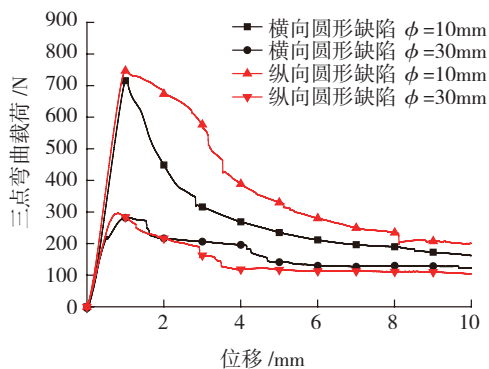
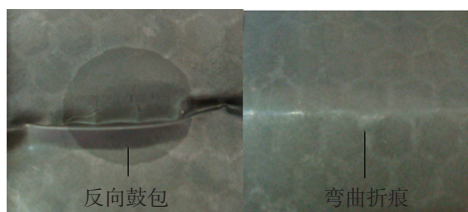
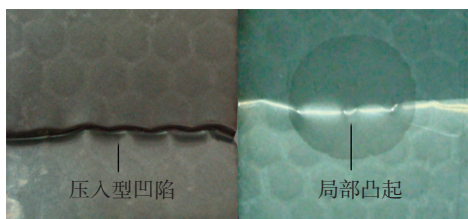


图6 横向和纵向蜂窝板试样弯曲载荷-位移曲线  
Fig.6 Load-displacement curve of horizontal and vertical samples



(a) 缺陷位于受压面时的变形结果



(b) 缺陷位于受拉面时的变形结果

图7 不同缺陷位置弯曲试样变形结果

Fig.7 Deformation results of bending samples with different defect location

面板的趋势,进而导致了凸起的产生。

试验结果表明,缺陷位于受拉面时的弯曲极限载荷要明显大于缺陷位于受压面时的弯曲极限载荷,这是由弯曲试样上下面板的承载能力共同决定的。首先,当缺陷位于受压面时,其受压承载能力大大降低,容易发生压缩起皱失稳;其次,缺陷位于受拉面时,缺陷位置由于缺少蜂窝芯子的约束,其抗拉承载能力得到更充分发挥。综合以上因素,使得缺陷位于受拉面的试样具有更高的弯曲极限载荷。缺陷直径为20mm的蜂窝板试样弯曲载荷-位移曲线如图8所示。

### 3 含缺陷高温合金蜂窝板三点弯曲数值模拟

在研究了缺陷对高温合金蜂窝板三点弯曲强度影响的基础上,利用 LS-DYNA 以横向缺陷直径为20mm的试样为例,对其进行了有限元模拟,得到高温合金蜂窝板在三点弯曲变形过程中的应力分布情况。

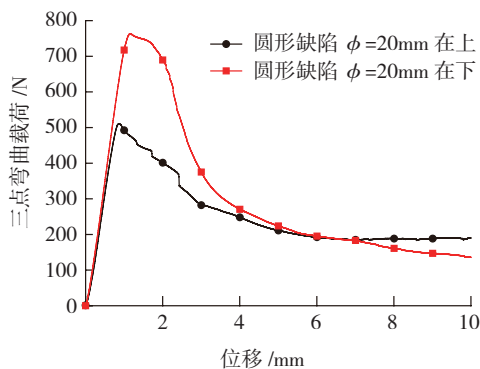


图8 不同缺陷位置试样的弯曲载荷-位移曲线  
Fig.8 Load-displacement curve of bending samples with different defect location

#### 3.1 建立有限元模型

首先,利用命令流的方式自底向上分别建立蜂窝芯体和面板的有限元模型,并利用 ASBA 命令在面板上相应位置去除与缺陷大小相同的面积,然后将上下面板与蜂窝芯体通过 OVERLAP 命令连接在一起,最后再重建上面板的缺陷面积,并仅与面板 GLUE 为一体,通过此方法即可以建立含有面芯脱焊缺陷的蜂窝板模型。高温合金采用 Bilinear Isotropic 双线性各向同性硬化材料模型,支座和压头均选用刚体材料模型,其材料性能参数如表2所示。

#### 3.2 网格划分

对蜂窝芯体和面板均采用 shell163 壳单元进行自由网格划分,在蜂窝芯高度方向上设置网格数量为6,在网格划分时要分别对面板和蜂窝芯体的单、双层壁进行定义。支座和压头采用 solid164 实体单元进行自由网格划分,网格划分后的模型如图9所示,由图可见划

表2 模型材料性能参数

性能参数	GH4099	压头
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8.47E3	7.85E3
弹性模量 $E/\text{Pa}$	210E9	250E9
泊松比 $\mu$	0.3	0.3
屈服强度 $\sigma_s/\text{Pa}$	632E6	—
切线模量 $G/\text{Pa}$	1.042E9	—



图9 网格划分后的有限元模型  
Fig.9 Meshed finite element model

分后的模型足以满足有限元模拟的精度要求。

### 3.3 约束设置及求解

考虑高温合金蜂窝板三点弯曲试验的实际情况,将支座上所有节点施加全部方向的约束;对上压头约束除Z方向以外的全部自由度。对于加载速度的设定,如果采用与三点弯曲试验相同的速度,求解时间将会过长。根据文献[19]得出的结论,对加载速度进行了适当的放大,为保证计算的准确性,放大速度后计算得出的动能与内能之比应尽量小,一般要低于2%。本文在不同加载速度下进行了模拟对比,其求解时间及动能与内能的比值如表3所示,综合考虑动能与内能比值和求解时间,最终确定加载速度为1m/s,终止时间为0.01s,输出子步为50。

表3 不同加载速度下能量对比结果

加载速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	动能 $K/J$	内能 $I/J$	求解时间 $t/min$	$(K/I)/\%$
2	4.9E-2	2.351	292	2.08
1	1.4E-2	2.304	432	0.61
0.4	2.6E-3	2.186	1115	0.12

### 3.4 求解结果分析

含圆形缺陷的试样在三点弯曲过程中的变形和应力分布情况如图10所示。在弯曲加载初期,蜂窝板上的应力以压头为中心成对称分布,缺陷边缘和压头两侧的应力较为集中。随着压头位移量增大,在压头的一侧逐渐产生反向的变形鼓包,并沿着宽度方向不断扩展,在子步7时,弯曲载荷达到最大值,蜂窝板开始发生失稳。在蜂窝板失稳以后,产生鼓包一侧的应力峰值要始终高于另一侧,且蜂窝板上的应力分布范围开始逐渐减小。

三点弯曲试验与有限元模拟的载荷-位移曲线如图11所示,由图11可知,模拟与试验得到的曲线基本吻合,但由于对加载速度进行了适当放大,使模拟得到的极限载荷值比试验值高了20%左右。

在弯曲模拟过程中,缺陷位置会发生明显的反向鼓包,且随着压头位移量增大,鼓包不断扩展,这与试验结果相吻合,在鼓包的扩展过程中会伴随着面板与蜂窝芯体之间的脱焊,最终破坏模式如图12所示。

## 4 结论

(1) 通过预埋缺陷的方法,在所需缺陷位置将钎料去除并在面板上涂覆缺陷大小的阻焊剂,经过真空钎焊工艺,制备出含有面芯脱焊缺陷的高温合金蜂窝板。

(2) 缺陷形状对蜂窝板的三点弯曲破坏模式的影

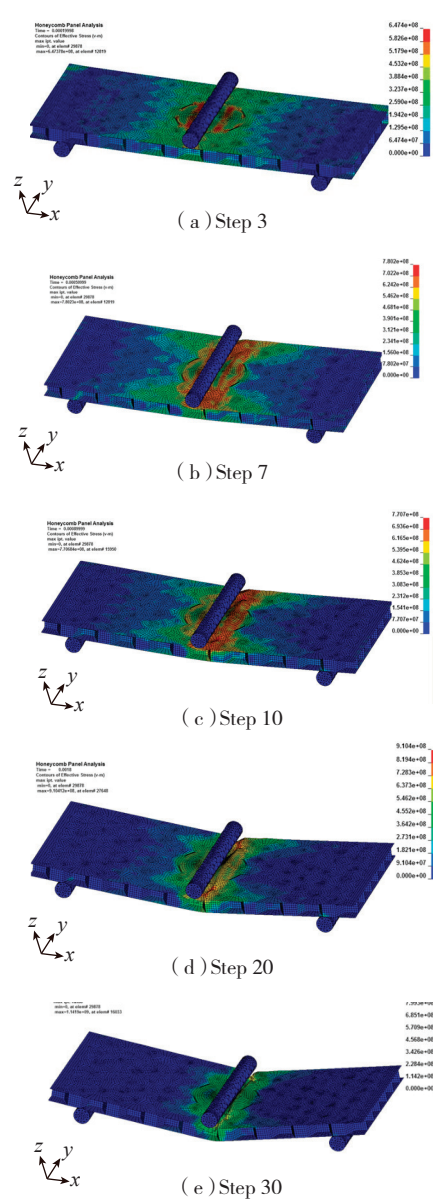


图10 含圆形缺陷试样三点弯曲应力分布状态

Fig.10 Stress distributing state of bending sample with circular defect

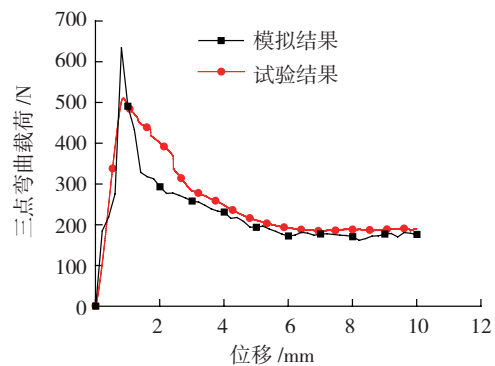


图11 弯曲试验与有限元模拟载荷-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curves of bending test and finite element simulation

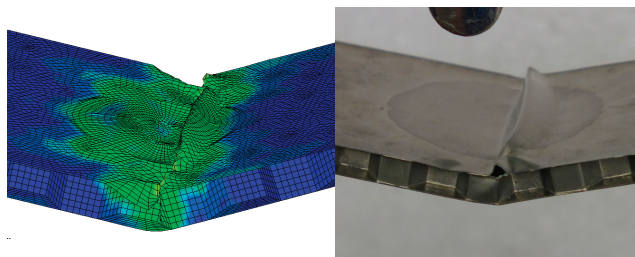


图12 模拟与试验结果破坏模式对比

Fig.12 Damage form comparison of simulation and test

响不大,缺陷处产生沿着宽度方向的起皱破坏,并伴随着面板与芯体的脱焊。

(3)在缺陷面积相同的情况下,纵向弯曲试样比横向的具有更高的弯曲极限载荷,矩形缺陷试样的弯曲极限载荷要高于圆形缺陷试样;当缺陷位于弯曲受拉面时,试件具有较高的弯曲承载能力。

(4)在三点弯曲加载初期,含缺陷蜂窝板上的应力以压头为中心成对称分布,在缺陷边缘和压头两侧较为集中;发生起皱破坏以后,鼓包一侧的应力峰值要始终高于另外一侧,且蜂窝板上的应力分布范围不断减小,弯曲承载能力逐渐降低。

### 参 考 文 献

- [1] FREEMAN D C, TALAY T A, AUSTIN R E. Reusable launch vehicle technology program[J]. *Acta Astronautica*, 1997, 41(11): 777-790.
- [2] KUMAR R R, PALININATHAN R, KISHOR E, et al. Role of thermal contact conductance on sandwich-type metallic thermal protection system profile[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(10): 2194-2201.
- [3] BLOSSER M L, CHEN R R, SCHMIDT I H, et al. Advanced metallic thermal protection system development[C]. AIAA. The 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 2013.
- [4] BLOSSER M L. Development of metallic thermal protection systems for the reusable launch vehicle[C]. NASA Technical Memorandum, Hampton, Virginia, 1996.
- [5] 夏明凯. 含缺陷金属蜂窝夹层结构的力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- XIA Mingkai. Research on the mechanical properties of metal honeycomb sandwich structure with defects[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [6] DORNHEIN M A. Bonding bugs delay X-33 first flight [J]. *Aviation Week & Space Technology*, 1999, 150(4):94-97.
- [7] CASAVOLA C, GIANNOCCARO R, PAPPALETERE C, et al. Open hole compressive strength of composite laminates and sandwich panels: comparison between Budiansky-Fleck-Soutis model and experiments[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2012, 41(4/5): 199-208.
- [8] GDOUTOS E E, DANIEL I M, WANG K A. Compression facing wrinkling of composite sandwich structures[J]. *Mechanics of Materials*, 2003, 35: 511-522.
- [9] Ai S, Mao Y, Pei Y, et al. Study on aluminium honeycomb sandwich panels with random skin/core weld defects[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2013, 15(6):704-717.
- [10] TORIBIO M G, SPEARING S M. Compressive response of notched glass-fiber epoxy honeycomb sandwich panels[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(6): 859-870.
- [11] 刘颖, 张新春. 缺陷分布不均匀性对蜂窝材料面内冲击性能的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(3): 237-242.
- LIU Ying, ZHANG Xinchun. Effects of inhomogeneous distribution of defects on in-plane dynamic properties of honeycombs[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(3): 237-242.
- [12] 刘智良, 程小全, 胡仁伟, 等. 含不同形状分层缺陷蜂窝夹层板的压缩性能[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(5): 153-158.
- LIU Zhiliang, CHENG Xiaoquan, HU Renwei, et al. Compression properties of honeycomb sandwich plates with different shape delamination defects[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(5): 153-158.
- [13] 洋世东, 吴林志, 孙雨果. 含面芯界面缺陷的蜂窝夹层板侧向压缩破坏模式[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(6): 121-127.
- PAN Shidong, WU Linzhi, SUN Yuguo. End compression failure of honeycomb sandwich panels containing interfacial debonding[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(6): 121-127.
- [14] 尉坤. 含缺陷蜂窝夹层板的弯曲力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WEI Kun. Analysis of bending mechanical properties of honeycomb sandwich structure with defects[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] 廖明顺, 左孝青, 潘晓亮, 等. 缺陷对蜂窝铝压缩变形机制及性能的影响[J]. *材料导报*, 2005, 19(12): 129-131.
- LIAO Mingshun, ZUO Xiaoqing, PAN Xiaoliang, et al. Effect of defects on compression properties and deformation behaviour of aluminum honeycomb[J]. *Materials Review*, 2005, 19(12): 129-131.
- [16] 邵文全, 李砚明, 孟宪文, 等. 脱胶缺陷对蜂窝纸板侧压强度的影响[J]. *包装工程*, 2008, 29(12): 59-61.
- SHAO Wenquan, LI Yanming, MENG Xianwen, et al. Influence of the unglued defect on edgewise compressive strength of honeycomb paperboard[J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(12): 59-61.
- [17] GB/T1456-2005 夹层结构弯曲性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- GB/T1456-2005 Test method for flexural properties of sandwich constructions[S]. Beijing: China Standards Press, 2005.
- [18] 杨宇. 金属蜂窝夹层结构的力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- YANG Yu. Research on mechanical properties of metal honeycomb sandwich plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] 王青春, 范子杰. 利用 LS-DYNA 计算结构准静态压溃的改进方法[J]. *力学与实践*, 2003, 25(3): 20-23.
- WANG Qingchun, FAN Zijie. Improvement in analysis of quasi-static collapse with LS-DYNA[J]. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(3): 20-23.

通讯作者: 童国权, 教授、博导, 主要从事钣金成形工艺、材料超塑性变形和钛板成形专用装备等的研究, E-mail: meegqtong@nuaa.edu.cn.

(责编 慕雪)