

# 蜂窝夹层结构复合材料应用研究进展

刘杰<sup>1</sup> 郝巍<sup>1</sup> 孟江燕<sup>2</sup>

(1 北京航空材料研究院,北京 100095)

(2 南昌航空大学材料科学与工程学院,南昌 330063)

**文 摘** 综述了有关铝蜂窝芯、芳纶纸蜂窝芯及其复合材料在制造工艺上的研究成果;蜂窝夹层结构复合材料在隔音、隔热、耐老化、冲击性能等方面的最新研究进展,并对蜂窝夹层结构复合材料的研究方向提出了几点建议。

**关键词** 铝蜂窝,芳纶纸蜂窝,复合材料,力学性能

## Progress in Applied Research of Honeycomb Sandwich Composites

Liu Jie<sup>1</sup> Hao Wei<sup>1</sup> Meng Jiangyan<sup>2</sup>

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(2 School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

**Abstract** In this paper, the manufacturing process of the aluminum honeycomb core, Nomex honeycomb core and composite materials have been reviewed. Furthermore, the latest research progress of the honeycomb sandwich composites sound insulation, heat insulation, anti-aging, impact properties and other aspects has been overviewed. And some suggestions of research directions of honeycomb sandwich composites are presented.

**Key words** Aluminum honeycomb, Nomex honeycomb, Composites, Mechanical property

### 0 引言

蜂窝夹层结构复合材料因其具有比强度高、抗冲击性能好、减振、透微波、可设计性强<sup>[1-2]</sup>等优点,目前已经被广泛应用,特别是航空航天领域,蜂窝夹层结构以其优越的性能成为该领域不可缺少的结构材料之一。早期的蜂窝夹层结构复合材料芯材大多数为金属芯材,随后出现了纸蜂窝夹层结构复合材料以及纤维增强树脂蜂窝等蜂窝芯材。

目前的蜂窝夹层结构复合材料主要分为铝蜂窝夹层结构复合材料、Nomex 纸蜂窝夹层结构复合材料、玻璃钢夹层结构复合材料、棉布蜂窝夹层结构复合材料等<sup>[3]</sup>,其中玻璃钢夹层结构复合材料已得到广泛的研究和应用,研究人员对于玻璃钢夹层结构复合材料的力学、隔音、隔热、抗冲击性能的研究都比较深入<sup>[4-6]</sup>。蜂窝夹层结构复合材料的性能主要由蒙皮和蜂窝芯材的性能所决定<sup>[7]</sup>,这些性能主要包括蒙皮的厚度与材质、蜂窝芯材的高度、材质、密度、孔格大小以及形状等<sup>[8]</sup>。近些年,研究人员围绕蜂窝夹层结构复合材料做了大量研究并取得了一定成

果,本文对此作以简介。

### 1 铝蜂窝夹层结构

铝蜂窝芯材主要由铝箔以不同的胶接方式胶接,通过拉伸而制成不同规格的蜂窝,芯材的性能主要通过铝箔的厚度和孔格大小来控制,再将铝蜂窝芯材和不同的蒙皮材料复合,形成铝蜂窝夹层结构复合材料。铝蜂窝夹层结构复合材料具有较高的力学性能,其芯材铝蜂窝的制造成本也相对较低。但铝蜂窝夹层结构复合材料在某些环境中使用时易腐蚀,在受到冲击后,铝蜂窝芯材会发生永久变形,使蜂窝芯材与蒙皮发生分离<sup>[9-10]</sup>,导致材料的性能降低。

部分研究者从胶接工艺对铝蜂窝夹层结构复合材料进行了研究。张京等<sup>[11]</sup>从胶黏剂筛选、表面处理方法和固化工艺三个方面对铝蜂窝夹层结构的胶接工艺进行了研究。选择了流动性较好的 J-47 胶膜;在对表面处理方式的研究中采用磷酸阳极化处理;通过对剪切强度的对比确定了夹层结构的最佳固化工艺。铝蜂窝夹层结构的大面积粘接成型一直是夹层结构批量生产的难题,为此,韦生文<sup>[12]</sup>对铝蜂窝

收稿日期:2013-02-05

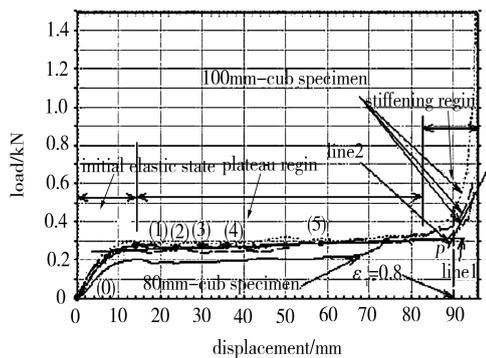
基金项目:航空自然科学基金资助(2010ZF56025)

作者简介:刘杰,1985 年出生,硕士,助理工程师,主要从事芳纶纸蜂窝的生产与研制,E-mail:dnlaijie@126.com

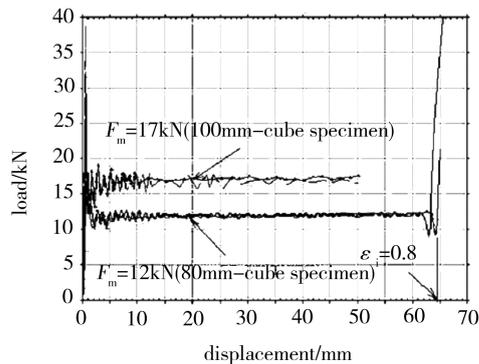
和面板进行了磷酸阳极化,选择粘接效果较好的 J-47 胶膜,并在固化过程中对铝蜂窝夹层结构复合材料进行真空袋加压,试验所得铝蜂窝夹层结构复合材料具有较好的性能。

Said 等<sup>[13]</sup>研究了铝蜂窝芯在压缩载荷作用下其载荷—位移曲线的特征以及在准静态压缩载荷作用下铝蜂窝的变形特征。从 3 个方向对铝蜂窝芯进行准静态压缩后发现,由于材料的不断致密化, $x$  轴和  $y$  轴方向上的载荷—位移曲线分为弹性区域、平缓区

域、快速加强区域 3 个部分[图 1 (a)]。而在轴向压缩过程中,试样在载荷最大值位置发生失稳,失稳后载荷—位移曲线陆续出现了一些较小的峰,表明铝蜂窝芯是逐步折叠失稳的[图 1 (b)]。而王飞等<sup>[14]</sup>则运用数值模拟的方法对不同密度铝蜂窝芯在压缩载荷作用下的失效过程进行了模拟,分析了结构失稳和破坏的三种不同特征,数值模拟所得铝蜂窝芯失稳分岔时的宏观应力与实验所得宏观极限应力吻合。



(a)  $y$  轴方向



(b)  $z$  轴方向

图 1 铝蜂窝芯在压缩载荷作用下的载荷—位移曲线

Fig. 1 Compression load-displacement curves of aluminum honeycomb

Yi-Ming Jen 等<sup>[15]</sup>对 3 种不同蒙皮厚度的铝蜂窝夹层结构试样进行了 4 点弯曲疲劳试验,研究蒙皮厚度对其疲劳性能的影响。结果表明:在施加同样的弯曲载荷的情况下,疲劳寿命和蒙皮厚度之间没有明显的联系,失效模式主要为蜂窝和蒙皮之间的界面脱粘。并通过有限元模拟确定了试样的界面应力,预测了界面剥离的初始位置。

胡玲玲等<sup>[16]</sup>采用显式动力有限元法研究了不同胞元结构的铝蜂窝芯在冲击载荷下的力学性能。研究发现:在准静态模式下,蜂窝的承载力主要受胞元的几何形状影响,它随着胞壁夹角的增大而减小;在动态模式下,惯性效应对蜂窝承载力起决定作用;而在过渡模式下,几何形状和惯性效应共同影响蜂窝的承载力,蜂窝承载力随着胞壁夹角的增大而减小,冲击速度越高,承载力降幅越小。文献[17]采用细观力学分析方法对细观胞元的温度场和应力场进行计算,考虑了蜂窝芯内部的辐射换热并提出了层间辐射换热系数近似表示蜂窝芯内部的辐射换热;通过对比发现,计算线胀系数时不能忽略芯层热膨胀的影响。

Caserta 等<sup>[18]</sup>将铝蜂窝材料和聚苯乙烯泡沫材料设计为摩托车头盔内衬,用于吸收冲击能量,研究压缩载荷作用下铝蜂窝和泡沫之间的相互作用。在铝蜂窝和聚苯乙烯泡沫材料制成的双层结构上施加准静态和冲击压缩载荷,观察其变形模式,确定它们的能量吸收特性和加载速度对其力学响应的影响,并将

蜂窝层与聚乙烯泡沫层分开进行以上试验。对比试验结果发现,虽然铝蜂窝吸收了较高的冲击能量,但它与聚苯乙烯泡沫之间的耦合能使头部受到最好的保护。

## 2 Nomex 蜂窝夹层结构

Nomex 蜂窝制作工艺见图 2,因其比强度高、耐腐蚀、吸振、透电磁波等特性,已广泛应用于航空结构件上<sup>[19-21]</sup>。研究人员针对 Nomex 蜂窝的这些优异性能展开了大量的研究<sup>[22-23]</sup>。尽管其具有诸多的优点,但 Nomex 蜂窝因制造成本高,限制了其在非航空航天领域的发展。原崇新等<sup>[24]</sup>在对 Nomex 蜂窝和蒙皮之间胶接质量的研究中发现:在树脂黏度较高时加压可使面板与蜂窝胶接良好,而树脂黏度较低时加压会造成上下面板与蜂窝胶接处胶瘤存在较大差异;蜂窝夹层结构的剥离强度随着胶瘤的增大而升高,但是侧压强度与其无明显关联。还有人针对不同固化压力下 Nomex 蜂窝夹层结构力学性能进行研究<sup>[25]</sup>,发现固化压力在 0.2 ~ 0.5 MPa 下,夹层结构的主要力学性能无明显变化,但其侧压强度随着固化压力的增大而增大,弯曲强度则随着固化压力的增大而呈现出先增大后减小的趋势。

郝巍等<sup>[26]</sup>从压缩、剪切和燃烧性能这三个方面出发,对间位芳纶蜂窝芯和对位芳纶蜂窝芯进行了较为系统的研究,研究发现对位 Nomex 制备的 HN 系列蜂窝芯的压缩、剪切性能远远优于间位 Nomex 制备

的 YT 系列蜂窝芯。在对中、高密度 Nomex 蜂窝力学性能的研究中发现<sup>[27]</sup>:选择厚度适合的 Nomex,并严格控制环境温湿度,在浸渍胶液中加入适量的渗透剂

可制造出高性能的中、高密度 Nomex 蜂窝。并对中外 Nomex 蜂窝的性能进行了对比,见表 1。

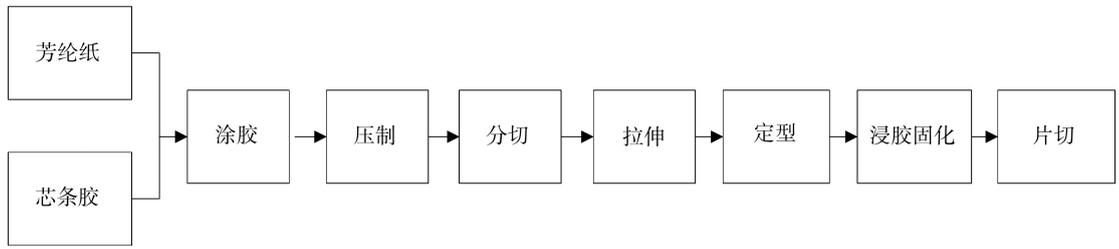


图 2 Nomex 蜂窝制作工艺流程图

Fig. 2 Process flow diagram of Nomex honeycomb

表 1 中外蜂窝力学性能对照<sup>[27]</sup>

Tab. 1 Mechanical properties of national honeycomb in comparison with that of inputted honeycomb<sup>[27]</sup>

honeycomb designation	compressive		L direction shear			W direction shear				
	strength /MPa		modulus /MPa	strength /MPa		modulus /MPa	strength /MPa		modulus /MPa	
	Avg.	Min.	Avg.	Avg.	Min.	Avg.	Avg.	Min.	Avg.	
BIAM	NH-1-3-48	2.12	1.49	136	1.20	0.96	42.8	0.65	0.48	24.0
	NH-1-3-64	3.72	2.43	240	2.17	1.84	60.3	1.14	1.05	33.9
	NH-1-3-80	5.11	4.77	283	2.59	2.31	107	1.45	1.27	40.8
Hexcal	NH-1-3-48	2.10	1.47	140	1.12	0.91	40.6	0.63	0.49	24.5
	NH-1-3-64	3.50	2.24	196	1.71	1.50	54.6	0.98	0.77	32.9
	NH-1-3-80	4.64	4.20	-	2.28	1.65	-	1.23	0.84	-

罗玉清等<sup>[28]</sup>从蜂窝制造工艺途径、芯条胶型号及其黏度等方面出发,研究了这些因素对 Nomex 蜂窝节点强度的影响。研究确定芯条胶牌号为 SY-2B 高温芯条胶,黏度为 20 ~ 25 Pa·s,压制压力在 0.3 ~ 0.8 MPa 时,Nomex 蜂窝可以获得较高的节点强度,定型温度对节点强度的影响不明显。

赵宏杰等<sup>[29]</sup>从蜂窝芯高度、蒙皮厚度和蜂窝芯增重三个方面对 Nomex 蜂窝夹层结构复合材料的吸波性能进行了研究,研究发现:夹层结构复合材料反射率在-10 dB 以下的有效带宽随着蜂窝芯高度的增加逐渐向低频扩展;18 mm 高的蜂窝芯随着蒙皮厚度的增加,其吸收峰频率向低频移动,且在 2 ~ 18 GHz 频段的反射率均保持在-10 dB 以下;随着黏附吸收剂质量的增加,蜂窝夹层复合材料的吸收峰频率向低频移动。

Kim<sup>[30]</sup>研究了声音在穿过复合材料夹芯板时自由波的传输损耗情况,对 Nomex 蜂窝夹芯板进行了详细研究:在数值计算过程中,对蜂窝芯材料及其面板的性能进行了计算。预测过程中选择了适当的数值,运用到波损耗和自由波传播模型中,通过对蜂窝夹芯板三个方向的声音损耗系数进行了预测,其中 z

轴方向上的吸声系数为 0.32,从理论上说明 Nomex 蜂窝夹芯板为良好的隔音材料;将 Nomex 蜂窝夹芯板的吸声系数与聚氯乙烯树脂基泡沫吸声材料做对比,泡沫的平均吸声系数为 0.45<sup>[31]</sup>,吸声性能较好,但其力学性能较差。当产品对强度和隔音要求都较高时,应当优先选择 Nomex 蜂窝夹芯板。

武燕<sup>[32]</sup>对 Nomex 蜂窝芯受到准静态压缩、子弹撞击和落锤冲击载荷下的塑性动力响应进行了研究。在准静态压缩载荷的研究中发现:孔径为 4.76 mm 的 Nomex 蜂窝芯塑性变形均为屈曲重叠褶皱变形,而孔径为 3.18 mm 的蜂窝则在弹性阶段就发生了整体失稳;在子弹撞击研究中发现,蜂窝夹层结构适用于高速冲击,冲击能量越大,蜂窝芯吸收的能量越多;落锤试验研究中发现,落锤压缩位移随着落锤能量的增加而增大。

Aminanda<sup>[33]</sup>对压缩载荷下 Nomex 蜂窝芯的失效机理进行了研究。失效过程中孔壁屈曲速度非常快,峰值载荷出现在三个蜂窝单元共有的蜂窝壁位置。进一步对拐角部分结构进行模拟研究发现蜂窝结构表现出与实验结果相类似的结果。模拟过程中假设载荷主要在蜂窝单元之间垂直的边缘,将蜂窝芯的压

缩用非线性弹性体进行建模,研究了在大小不同的球形压头作用下 Nomex 蜂窝芯的变形情况,模型可以较好的模拟蜂窝夹层复合材料的压痕情况。

Samarah<sup>[34]</sup>通过曲面响应法表征了材料结构对损伤容限和剩余强度的影响。研究从蒙皮数量、蜂窝芯密度、芯材厚度出发,对冲击后材料的损伤演化以及剩余强度进行了探讨;芯材厚度以及蒙皮的铺层方向对损伤演化和剩余强度影响最大;提高蜂窝芯的厚度和增加碳/环氧织物层的数量可以提高剩余强度。损伤容限和剩余强度模型可以指导我们更好的了解夹层结构复合材料冲击损伤后的力学性能,从而提高其设计性和扩展其应用。

陈金宝等<sup>[35]</sup>对用于月球探测器缓冲机械的正六边形铝蜂窝缓冲材料进行了模拟着陆冲击试验,研究了不同着陆条件对其缓冲性能的影响。研究表明:对铝蜂窝缓冲机构施加相应的预紧力可以有效提高铝蜂窝材料的缓冲性能;铝蜂窝材料的缓冲效率随着探测器在月球表面着陆速度的提高而降低,在探测器多级铝蜂窝缓冲装置中,一级缓冲器设计对探测器能否实现软着陆至关重要。

### 3 其他蜂窝夹层结构

目前真正得到广泛应用的蜂窝只有铝蜂窝、Nomex 蜂窝等少数蜂窝芯材料,其余的蜂窝大多停留在实验室阶段。如钢质蜂窝,虽然其制造成本较低,强度也较高,但其质轻的优势不是很明显;织物蜂窝具有较高的抗损伤性,各方面性能均优于铝蜂窝和 Nomex 蜂窝,但其制造工艺复杂,蜂窝骨架织造难度大。这些缺点使其广泛应用受到一定的限制。

Yu'an Jing 等<sup>[36]</sup>在真空炉中通过钎焊制造出了 Q215 碳钢蜂窝夹芯板,其特征参数包括沿着  $z$  轴方向和面内的等效密度、弹性模量和抗压强度。在试验数据的基础上,采用 810 材料测试系统,得出了该夹芯板的压缩应力—应变曲线,对比试验结果和计算结果;测量的等效杨氏模量和初始抗压强度与计算值吻合, $x$  轴方向上的最大压应变接近 0.5~0.6,而面内的最大压应变达到 0.6~0.7。该碳钢蜂窝板的比强度在六边形铝蜂窝和方形不锈钢蜂窝之间,但其峰值压缩强度大于六边形铝蜂窝。

周祝林等<sup>[37]</sup>对玻璃钢蜂窝夹层结构的热导率进行了研究。分别对传导、对流、辐射进行分析,最后得到可供设计使用的热导率计算公式及曲线。通过计算得出采用多层夹层结构可以使蜂窝夹层结构板具有良好的隔热性能。玻璃钢制成的蜂窝夹层结构板,热导率为 0.07~0.22 W/(m·K),而泡沫塑料的隔热性能较好,热导率在 0.029~0.070 W/(m·K)<sup>[38-39]</sup>,单从隔热性能上来考虑,泡沫塑料夹层结

构适用于对隔热性能要求较高而受力不大,同时对强度刚度要求都较高的产品,最好使用蜂窝泡沫夹层结构。

刘长雷<sup>[40]</sup>通过反复试验探索,改善了玄武岩纤维集束性差、不耐磨等缺点,利用玄武岩纤维织造出蜂窝立体织物从而制成了玄武岩蜂窝织物增强复合材料。该蜂窝复合材料结构整体性和力学性能优异。对于密度为 0.249 g/cm<sup>3</sup> 的玄武岩织物蜂窝芯,其平压强度最高可达到 19.527 MPa,制品具有较好的耐候、隔音、隔热、透波等功能。

谷秀娥等<sup>[41]</sup>从蜂窝芯壁厚、蜂窝孔格边长、蜂窝芯高度、夹层结构面板厚度以及阻尼涂层等方面对镁合金蜂窝的隔声性能进行了研究。结果表明:隔音量随着频率的增加而增大;蜂窝芯的空腔越大,隔音效果越显著,增加阻尼层和阻尼涂料能显著提高隔音量。所研制的镁合金蜂窝可考虑不同的结构参数应用于现行动车组列车的内部结构中。

### 4 结语

蜂窝夹层结构复合材料具有广阔的应用前景,尤其是随着蜂窝夹层结构复合材料在战斗机、直升机、卫星、赛艇等方面的应用,对于其各方面性能的研究就越发显得重要。国内外对于铝蜂窝和 Nomex 蜂窝的应用研究最为广泛,研究方向主要侧重于对其力学性能、制造工艺、老化性能等方面,而对于隔音、隔热性能以及失效机理的研究缺乏深入和系统的探讨,研究者大多通过计算机模拟软件对这些问题进行探讨,模拟条件与蜂窝夹层结构的实际使用情况存在一定的差异,且缺少蜂窝夹层和泡沫夹层结构复合材料隔音、隔热的对比研究。对未来的研究重点提出以下建议:

(1)在借助数学方法和计算机模拟对蜂窝夹层结构复合材料进行研究的过程中,将其实际使用条件考虑在内,将理论计算与实际工况更加紧密地结合;

(2)从蜂窝夹层结构复合材料构件实际使用情况出发,对其隔音、隔热性能进行更加深入和系统的研究;将蜂窝夹层和泡沫夹层结构复合材料的对比研究作为重点,研究其在隔音、隔热性能上各自的优势;

(3)从微观上对蜂窝夹层结构复合材料在冲击和压缩载荷作用下的失效机理进行研究。

### 参考文献

- [1] 王兴业,杨孚标,曾竟成,等. 夹层结构复合材料设计原理及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007:4-8
- [2] 张广平,戴干策. 复合材料蜂窝夹芯板及其应用[J]. 纤维复合材料,2000,25(2):25-27
- [3] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京:化学工业出版社,2000
- [4] 孙杰,朱立新,钟兵,等. 玻璃钢蜂窝夹层复合材料抗爆性能研究[J]. 工程塑料应用,2003,31(3):40-42

- [5] 周祝林,孙佩琼. 玻璃钢分夹层结构板弯曲试验分析[J]. 纤维复合材料,2003,27(3):27-29
- [6] 魏秀宾. 低温成型 Nomex 蜂窝 U 型夹层板研制[J]. 洪都科技,2005(3):30-34
- [7] 益小苏,杜善义,张立同. 中国材料工程大典. 第 10 卷,复合材料工程[M]. 北京:化学工业出版社,2006:272-273
- [8] 井玉安,果世驹. 钢质蜂窝夹芯复合板的开发和應用[J]. 材料导报,2005,19(专辑 V):434-436
- [9] Zhang Yan. The finite element analysis of low velocity impact damage in composite laminated plates [J]. Materials & Design,2006,27(6):513-519
- [10] Md Akil Hazizan, Cantwell W J. The low velocity impact response of an aluminum honeycomb sandwich structure[J]. Composites Part B:Engineering,2003,34(8):679-687
- [11] 张京,方芳,朱永明,等. 铝蜂窝夹芯板胶接工艺研究[J]. 电子机械工程,2005,21(2):41-43
- [12] 韦生文. 铝蜂窝复合材料的大面积粘接与应用[J]. 粘接,2004,25(4):40-41
- [13] Said M R, Tan C F. Aluminium honeycomb under quasi-static compressive loading: an experimental investigation [J]. Suranaree J. Sci. Technol.,2008,16(1):1-8
- [14] 王飞,李剑荣,虞吉林. 铝蜂窝结构单向压缩、失稳和破坏机制研究[J]. 力学学报,2001,33(6):741-747
- [15] Jen Yiming, Chang Liyen. Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16: 1282-1293
- [16] 胡玲玲,尤帆船. 铝蜂窝的动态力学性能及影响因素[J]. 爆炸与冲击,2012,32(1):23-27
- [17] 唐羽焯,薛明德. 蜂窝夹芯板的热学与力学特性分析[J]. 复合材料学报,2005,22(4):130-136
- [18] Caserta G, Galvanetto U, Iannucci L. Static and dynamic energy absorption of aluminum honeycombs and polymeric foams composites [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2010,17:366-376
- [19] 李勇. Nomex 蜂窝在俄罗斯航空领域的发展及应用[J]. 材料工程,1995(6):3-5
- [20] Simone A E, Gibson L J. Efficient structural components using porous metals[J]. Materials Science and Engineering, 1997,229:55-62
- [21] Torquato S, Gibiansky L V, Silva M J. Effective mechanical and transport properties of cellular solids. International Journal Mechanical Sciences, 1998,40(1):71-82
- [22] 胡建平,蔡吉喆,肇研,等. Nomex/氰酸酯树脂夹层复合材料耐湿热性研究[J]. 材料工程,2010(9):58-61
- [23] Song Keunll, Chai Jiyong, Kweon Jinhwe, et al. An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures[J]. Composite Structures,2008,86:107-113
- [24] 原崇新,顾轶卓,李敏,等. 蜂窝夹层结构胶接质量与面板质量工艺因素分析[C]//十五届全国复合材料学术会论文集,2008:521-524
- [25] 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
- [26] 郝巍,罗玉清,马科峰,等. 对位芳纶蜂窝芯与间位芳纶蜂窝芯的性能对比研究[J]. 高科技纤维与应用,2011,36(4):17-20
- [27] 郝巍,李勇,罗玉清. 中、高密度 Nomex 蜂窝力学性能研究[J]. 航空材料学报,2002,22(2):41-45
- [28] 罗玉清,郝巍. 影响 Nomex 蜂窝节点强度因素的研究[J]. 高科技纤维与应用,2006,34(3):27-30
- [29] 赵宏杰,嵇培军,胡本慧,等. 蜂窝夹层复合材料的吸波性能[J]. 宇航材料工艺,2010,40(2):72-74
- [30] Jeong Woo Kim. Sound transmission through lined, composite panel structures: transversely isotropic poro-elastic model[D]. Purdue University,2005
- [31] 钱军民,李旭祥. 聚氯乙烯树脂基泡沫吸声材料的研制[J]. 工程塑料应用,2000,28(6):10-12
- [32] 武燕. 中低速载荷作用下 NOMEX 蜂窝结构的塑性变形模式研究[D]. 太原理工大学,2008
- [33] Aminanda Y, Castanie B, Barrau J J, et al. Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores [J]. Applied Composite Materials,2005,12:213-227
- [34] Samarah I K, Weheba G S, Lacy T E. Response surface characterization of the mechanical behavior of impact damaged sandwich composites [J]. Journal of Applied Statistics, 2006,33(4):427-437
- [35] 陈金宝,聂宏,柏合民. 月球着陆条件对铝蜂窝材料缓冲性能的影响[J]. 机械工程材料,2008,32(1):47-50
- [36] Jing Yu'an, Guo Shiju, Han Jingtao, et al. Fabrication and compressive performance of plain carbon steel honeycomb sandwich panels[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2008,15(3):255-260
- [37] 周祝林,王亚雄,姚辉,等. 玻璃钢蜂窝夹层结构板热导率研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2006(2):18-22
- [38] 周祝林. 泡沫塑料性能及应用[J]. 机械工程材料,1981(6):50-53
- [39] 张建可. 聚氨酯软泡沫塑料隔热性能分析研究[J]. 真空与低温,2006,12(3):180-185
- [40] 刘长雷. 玄武岩纤维蜂窝织物增强复合材料的研究开发[D]. 天津工业大学,2007
- [41] 谷秀娥,权高峰,石琳. 镁合金蜂窝板隔声性能分析[J]. 噪声与振动控制,2011(4):165-168

(编辑 李洪泉)