

# 粘接界面泡沫铝夹芯板的 三点弯曲失效数值模拟

Numerical Simulation for Three-point Bending Failure of Aluminum  
Foam Sandwich Panels with Cohesive Interface

强 斌,刘宇杰,阚前华

(西南交通大学 力学与工程学院,成都 610031)

QIANG Bin, LIU Yu-jie, KAN Qian-hua

(School of Mechanics and Engineering, Southwest  
Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**摘要:** 对粘接界面泡沫铝夹芯板三点弯曲载荷下的变形特性进行了实验和数值模拟方面的研究。基于有限元软件 ABAQUS 建立了泡沫铝夹芯板的三维有限元模型,应用内聚力模型对三点弯曲过程中典型的破坏模式——面板与芯层的界面脱粘给予了合理的模拟,模拟所得的结果与实验结果比较吻合。并在此基础上分析了面板和芯层厚度对夹芯板承载能力和吸收能量能力的影响。结果表明,增加芯层的厚度能够更大程度上提高泡沫铝夹芯板的承载能力和吸收能量的能力。

**关键词:** 泡沫铝夹芯板;内聚力模型;三点弯曲实验;数值模拟

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.11.017

**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2014)11-0097-05

**Abstract:** The deformation characteristics on three-point bending of aluminum foam sandwich panels were investigated by the experimental observation and numerical simulation. The 3-D finite element (FE) model for aluminum foam sandwich panels was developed by FE software ABAQUS. The bonding layer was described by the cohesive zone model. The interfacial debonding between the face sheet and the core of aluminum foam, a typical failure mode of bonding aluminum foam sandwich panels under three-point bending, was simulated reasonably. The numerical results show a good agreement between the load-displacement responses and the failure mode observed in experiments. Furthermore, the influence of the thickness of face sheet and the core of aluminium foam on bearing force and energy absorption capacity was analyzed. The results show that an increased core thickness of aluminum foam can provide higher bearing force and energy absorption capacity of aluminum foam sandwich panels.

**Key words:** aluminum foam sandwich panel; cohesive zone model; three-point bending; numerical simulation

泡沫铝具有低密度,高比强,高阻尼,吸声吸能等特性,在工程界被广泛用作为结构填充材料,在减轻自重的前提下提高结构的承载能力和吸收能量的能力<sup>[1-4]</sup>。对于应用最广泛的泡沫铝夹芯板、填充管等构件而言,弯曲是其常见的承载形式。Kallina 等<sup>[5]</sup>指出高达 90% 的结构件的破坏是由于弯曲破坏所引起,对于泡沫铝夹心结构弯曲行为的研究成为了工程界关注的焦点。

目前针对泡沫铝填充结构的三点弯曲研究集中在实验研究和数值模拟两个方面。Nassar 等<sup>[6]</sup>对泡沫铝夹芯板的三维气压成型进行了实验和数值研究,二

者吻合较好。Zarei 等<sup>[7]</sup>对泡沫铝夹芯梁进行了在弯曲荷载作用下的实验和数值研究。赵桂平等<sup>[8]</sup>模拟和分析了两种厚度不同的泡沫铝夹层板、方孔蜂窝型夹层板和波纹型夹层板在冲击荷载下的动态响应。谢中友等<sup>[9]</sup>在实验的基础上对空管和泡沫铝全填充管结构进行了三点弯曲下力学行为的数值模拟。查海波等<sup>[10]</sup>对泡沫铝层合梁的弯曲性能进行了实验研究,指出泡沫铝层合梁具有良好的复合性能。泡沫铝夹芯板在工程中通常应用粘接技术将面板和芯层连接在一起,但这也使得粘接结构界面的脱粘成为了其失效的主要模式。尚金堂等<sup>[11]</sup>实验研究指出泡沫铝层合梁

三点弯曲过程中由于粘接的强度不够会发生面板与芯层的分层破坏,引起载荷的突然下降,导致承载能力降低。

综上所述,泡沫铝填充结构的三点弯曲实验和数值模拟已取得丰富的成果。然而现有的泡沫铝夹芯板三点弯曲数值模拟中,泡沫铝芯层和面板多视为固定连接,对于粘接界面破坏的研究还较少。因此有必要对泡沫铝夹芯板三点弯曲过程中粘接界面破坏进行深入研究。

本工作在实验的基础上,通过在有限元计算中设置内聚力模型界面层来模拟粘接界面脱粘这一典型的失效模式,同时还分析了面板和芯层的厚度对夹芯板三点弯曲荷载下的承载能力和吸收能量能力的影响。

1 实验

1.1 实验过程

泡沫铝夹芯板的面板采用 1.5mm 厚的 5052 铝合金板,芯材为中船重工 725 所生产的厚度为 20mm 闭孔泡沫铝,孔隙率大于 80%,采用线切割将铝板和泡沫铝切割成尺寸为 180mm×25mm 的板。应用环氧树脂胶将面板与芯层粘接成泡沫铝三明治夹芯板结构。

泡沫铝夹芯板三点弯曲试验在 MTS809 试验机上完成,实验中采用高强度钢作为压头和支座。其中跨距为 80mm,两端悬臂的长度各为 50mm。采用准静态位移加载,利用计算机绘制出实验过程中压头的载荷-位移曲线,并用数码相机实时记录加载过程中夹芯板的变形状态。

1.2 实验结果

图 1 给出了泡沫铝芯层单调压缩的应力应变曲线,图 2 给出了厚度为 1.5mm 的铝合金面板和夹芯板在三点弯曲载荷作用下压头的载荷-位移曲线。从图 2 所示载荷-位移曲线可知,夹芯板的承载能力和吸能

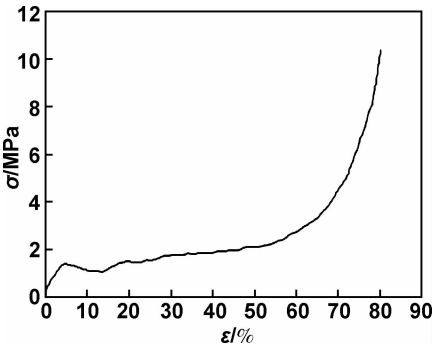


图 1 泡沫铝芯层单调压缩名义应力-应变曲线

Fig. 1 The compressive nominal stress-strain curve of aluminum foam

能力都远远高于纯铝板。夹芯板三点弯曲过程主要分为三个阶段:开始时载荷位移曲线成线性,夹芯板主要发生线性弯曲变形;而后进入非线性段,夹芯板局部的面板和芯层达到屈服发生非线性变形;随着压头位移的增长曲线进入失稳段,此时夹芯板的芯层和面板之间的胶层发生破坏,载荷值发生突降,夹芯板的承载能力降低并保持一个较低的水平。

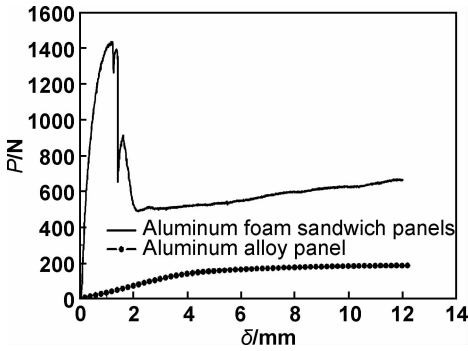


图 2 面板和夹芯板三点弯曲载荷-位移实验曲线

Fig. 2 Experimental load-displacement curves of aluminum foam sandwich panels and aluminum alloy panel under three-point bending

2 有限元模拟

2.1 有限元模型

首先建立与夹芯板实际试样大小相同的几何模型,如图 3 所示。泡沫铝夹芯板模型的长宽高为 180mm×25mm×25mm,其中面板厚度为 1.5mm,芯层厚度为 20mm,面板与芯层之间嵌入厚度为 1mm 的粘接层。泡沫铝夹芯板跨距为 80mm,外伸端部分为 50mm。压头和支座为直径 20mm 的圆柱,同时网格在压头和支座处进行了细化。面板和泡沫铝芯层采用三维实体单元 C3D8,粘接层利用粘接单元 (cohesive element) COH3D8 模拟,压头和支座采用刚体单元 R3D4。支座采用固定约束,压头采用位移加载。压头和支柱与面板的接触为面-面接触,考虑有限滑动,摩擦因数设为 0.2。分析采用 ABAQUS/explicit 模块,计算中通过采用适当的质量放大,来增大稳定时间增量步,缩短计算时间。

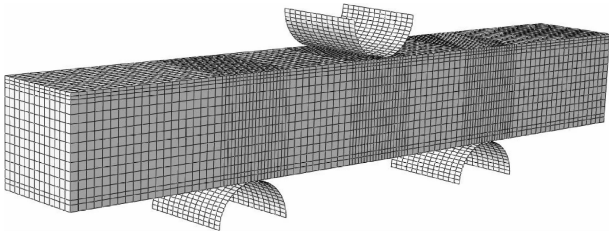


图 3 三点弯曲有限元模型

Fig. 3 The finite element model for three-point bending

2.2 材料模型和内聚力模型

面板采用各向同性多线性弹塑性模型,材料参数取自 5052 铝合金拉伸时的应力应变曲线,弹性模量  $E=70\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,密度  $\rho_{\text{al}}=2700\text{kg/m}^3$ 。塑性硬化参数见表 1。泡沫铝芯层的材料参数来至泡沫铝单轴压缩的应力应变关系,弹性模量为  $28\text{MPa}$ ,弹性泊松比  $\nu=0$ ,密度  $\rho_{\text{foam}}=500\text{kg/m}^3$ 。泡沫铝塑性部分

采用可压缩泡沫塑性(crushable foam)材料本构模型,取压缩屈服应力比  $\alpha=1.732$ ,塑性泊松比  $\nu_p=0$ 。由于泡沫铝单调压缩时基本上没有横向变形,通常所采用的基于塑性变形体积不变假设的真应力-真应变换算公式已经不再适用。故塑性强化部分直接输入泡沫铝单轴压缩的名义流动应力-塑性应变关系的实验数据。具体参数见表 1。

表 1 材料硬化参数  
Table 1 Hardening parameters of materials

Flow stress/MPa	Aluminum alloy 5052					Closed aluminum foam				
	200	220	230	240	260	1.40	1.51	1.85	4.03	7.32
Plastic strain	0	0.01	0.02	0.03	0.07	0	0.21	0.54	0.70	0.75

环氧树脂粘接层利用 ABAQUS 中基于内聚力模型的粘单元模拟,其遵循内聚力双线性本构关系<sup>[12-15]</sup>,即张力-位移关系,如图 4 所示。初始阶段应力随着相对位移的增加而增加,当相对位移达到  $\delta_n^0$  (切向位移为  $\delta_s^0, \delta_t^0$ ) 时,切向应力和法向应力将分别达到最大值  $\sigma_n^{\max}, \tau_s^{\max}$  和  $\tau_t^{\max}$ 。进入损伤阶段后,位移持续增加,应力开始下降,直至为零。此时内聚力单元完全破坏,对应的临界位移为  $\delta_n^{\max}, \delta_s^{\max}$  和  $\delta_t^{\max}$ 。内聚力模型的材料参数为:密度  $\rho_c=980\text{kg/m}^3$ ,弹性模量和剪切模量均为  $1000\text{MPa}$ 。初始破坏准则采用二次应力准则,其能够同时考虑法向和切向的损伤破坏,法向和两个切向的最大破坏应力为  $1\text{MPa}$ ;破坏扩展准则采用能量准则,定义为线性破坏,断裂能为  $0.025\text{J}$ 。

变形之外还有局部的压入变形,故上部粘接层先破坏。从图 5 中应力分布可见,在压头正下方应力最大,但此处粘接层所受应力为压应力,不会导致粘接层的破坏。在靠压头正下方附近区域存在较大的拉应力和剪应力,故粘接层的初始破坏发生在压头正下方附近区域。

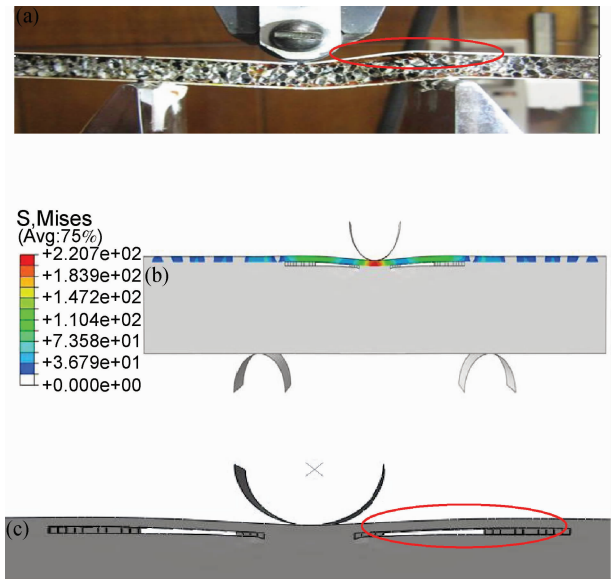


图 5 泡沫铝夹芯板三点弯曲时的结构变形  
(a)实验结果;(b)数值模拟应力云图;(c)数值模拟局部破坏图  
Fig. 5 The structural deformation of aluminum foam sandwich panels under three-point bending  
(a) experimental results; (b) stress contour of numerical simulation; (c) local failure of numerical simulation

图 4 内聚力模型张力位移响应曲线

Fig. 4 The traction separation curve of cohesive zone model

2.3 模拟结果

图 5 为泡沫铝夹芯板三点弯曲荷载下的变形图,可见数值模拟能够合理的模拟出界面的脱粘。数值模拟结果显示:位于上部的粘接层首先在压头正下方附近区域发生破坏,随着位移的增加,裂纹也逐渐向两端扩展,这与实验观察到的现象一致。这是由于在弯曲过程中与下方的粘接层相比上方压头处除了发生弯曲

图 6 给出了泡沫铝夹芯板三点弯曲时压头的载荷-位移关系。从图 6 可见,数值模拟的结果与实验结果在趋势上吻合较好,并且最大荷载也比较接近。数值模拟的载荷位移曲线也大致经历了与实验结果相似的三个阶段:位移在  $0.5\text{mm}$  之前载荷位移的关系呈线性关系;随着位移的增加夹芯板局部的铝板

和泡沫铝芯层的屈服所引起的非线性段,当位移为 0.7mm 时载荷达到其最大值 1370N,此时粘接层的环氧树脂胶也达到了破坏时的临界值;当位移继续增加,胶层也随之逐渐损伤,最终完全破坏,载荷位移曲线会出现突降,进入失稳状态,整个夹芯板的承载能力也随之降低。当压头位移达到 2mm 后载荷进入一个平台区,此时上层粘接层已经大面积开裂,上层面板也随之逐渐退出工作,主要是靠泡沫铝芯层和下层铝板来承载,平台段的模拟值要高于实验值,这是因为模拟时未考虑泡沫铝芯层的剪切破坏和孔壁的垮塌。

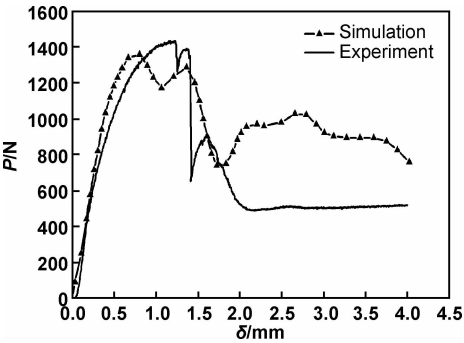


图 6 泡沫铝夹芯板三点弯曲压头载荷-位移曲线  
Fig. 6 Load-displacement curves of aluminum foam sandwich panels under three-point bending

2.4 面板和芯层厚度对夹芯板承载能力的影响

为了进一步研究面板和芯层厚度对泡沫铝夹芯板三点弯曲承载能力的影响,为泡沫铝夹芯板优化设计提供参考。本工作还分别对面板和芯层厚度不同的两种泡沫铝夹芯板进行了模拟,夹芯板一:面板厚度为 0.8mm,芯层厚度为 20mm,简记为 0.8+20;夹芯板二:面板厚度为 1.5mm,芯层厚度为 10mm,简记为 1.5+10,并将模拟结果与前述 1.5+20 夹芯板进行对比。材料参数和边界条件与 2.1 节相同。

图 7 给出了芯层厚度相同,面板厚度不同模型的载荷-位移曲线。当面板厚度由 1.5mm 变成 0.8mm 时,载荷-位移曲线线性段的初始加载刚度有小幅下降,由 2400N/mm 降为 1800N/mm,最大破坏载荷由 1370N 降为 1084N。由图 8 中不同芯层厚度夹芯板三点弯曲压头载荷-位移曲线可知,保证面板厚度一定的情况下当芯层的厚度从 20mm 降为 10mm 时,夹芯板的加载刚度和最大破坏载荷有明显的下降,线性段加载刚度由 1800N/mm 变为 900N/mm,最大破坏载荷也由 1084N 降为 493N。可见随着面板和芯层厚度减小,泡沫铝夹芯板三点弯曲载荷作用下的加载刚度和最大破坏载荷都有明显下降。比较而言,芯层厚度的

变化对夹芯板性能的影响更大。在 0.8+20 的夹芯板中,当位移达到 0.5mm 时在载荷位移曲线中出现拐点,这是由于在显式分析中粘接单元是逐渐损伤破坏的,在位移达到 0.5mm 时,部分粘接单元即开始破坏。

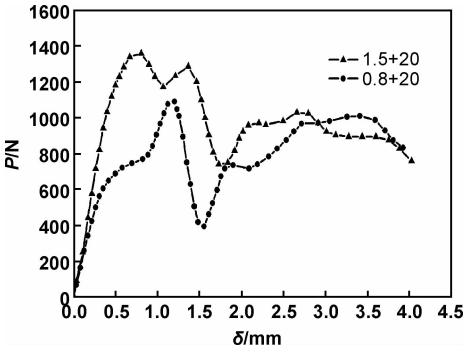


图 7 不同面板厚度的夹芯板三点弯曲压头载荷-位移曲线  
Fig. 7 Load-displacement curves of aluminum foam sandwich panels under three-point bending with different panel thicknesses

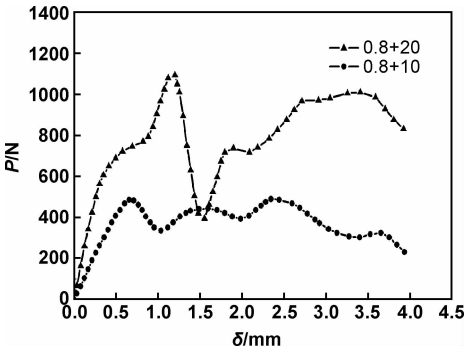


图 8 不同芯层厚度夹芯板三点弯曲压头载荷-位移曲线  
Fig. 8 Load-displacement curves of aluminum foam sandwich panels under three-point bending with different core thicknesses

为定量衡量面板和泡沫铝芯体厚度改变对夹芯板性能的影响,表 2 给出了不同面板、芯层厚度的泡沫铝夹芯板性能对比。这里吸收的能量定义为夹芯板在三点弯曲过程中压头载荷~位移曲线与横坐标轴围成的面积。由表 2 可知,在泡沫铝夹芯板增加相同质量为代价的情况下(忽略了环氧树脂胶的质量),改变芯层的厚度对于夹芯板在三点弯曲载荷作用下线性段的加载刚度、最大承载能力和变形过程中的吸收能量能力的提高远远高于改变面板厚度所提高的幅度。

表 2 泡沫铝夹芯板性能对比  
Table 2 Performance comparison of aluminum foam sandwich panels

	Mass	Loading stiffness	Maximum load	Energy absorption
Panel 0.8-1.5	+26%	+33%	+26%	+22%
Core 10-20	+54%	+100%	+120%	+120%

### 3 结论

(1)利用基于内聚力模型的粘接层能够合理地模拟泡沫铝夹芯板三点弯曲载荷作用下面板与芯层之间粘接层脱粘这一典型的破坏模式。在载荷达到最大破坏荷载时,粘接层发生破坏,载荷位移曲线会发生突降。数值模拟所得的结果与实验结果比较吻合。

(2)通过分别改变夹芯板面板和芯层的厚度,对夹芯板三点弯曲进行数值模拟的结果表明,在增加相同质量为代价的情况下,与增加面板厚度相比,增加芯层的厚度能够更大程度上提高泡沫铝夹芯板承载能力和吸收能量的能力。

#### 参考文献

- [1] 魏鹏,柳林.孔径可调的泡沫铝材料制备研究[J],材料工程,2005,(9):30—33.  
WEI P, LIU L. Preparation of foamed aluminum with controllable size of pore [J]. Journal of Materials Engineering, 2005,(9):30—33.
- [2] 刘培生,马晓明.高孔率泡沫金属材料疲劳表征模型及实验研究[J].材料工程,2012,(5):47—58.  
LIU P S, MA X M. Fatigue model for foamed metals with high porosity and corresponding experimental study [J]. Journal of Materials Engineering, 2012,(5):47—58.
- [3] 谢中友,虞吉林,郑志军.泡沫金属填充圆管横向线载荷作用下的压入分析[J].工程力学,2011,28(8):248—256.  
XIE Z Y, YU J L, ZHENG Z J. Indentation analysis of metallic foam-filled cylindrical pipe under transversely linear loading [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8):248—256.
- [4] 寇玉亮,陈常青,卢天健.泡沫铝率相关本构模型及其在三明治夹芯板冲击吸能特性的应用研究[J].固体力学学报,2011,32(3):217—227.  
KOU Y L, CHEN C Q, LU T J. A rate-dependent constitutive model for aluminum foams and its application to the energy absorption of lightweight sandwich panels with aluminum foam cores[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(3):217—227.
- [5] KALLINA I, ZEIDLER F, BAUMANN K H, et al. The offset crash against a deformable barrier, a more realistic frontal impact [A]. In Proceedings of the 14th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles[C]. Washington DC, 1994, 1300—1304.
- [6] NASSAR H, ALBAKRI M, PAN H, et al. On the gas pressure forming of aluminium foam sandwich panels: Experiments and numerical simulations[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61:243—246.
- [7] ZAREI H R, KROGER M. Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization[J]. International Journal of

Impact Engineering, 2008, 35:521—529.

- [8] 赵桂平,卢天健.多孔金属夹层板在冲击荷载作用下的动态响应[J].力学学报,2008,40(2):194—206.  
ZHAO G P, LU T J. Dynamic response of cellular metallic sandwich plates under impact loading [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(2):194—206.
- [9] 谢中友,李剑荣,虞吉林.泡沫铝填充薄壁圆管的三点弯曲实验的数值模拟[J].固体力学学报,2007,28(3):261—265.  
XIE Z Y, LI J R, YU J L. Numerical simulation of three-point bending experiments of thin-walled cylindrical tubes filled with aluminum foam [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2007, 28(3):261—265.
- [10] 查海波,凤仪,朱琪琪,等.泡沫铝层合梁的弯曲性能[J].中国有色金属学报,2007,17(2):290—295.  
ZHA H B, FENG Y, ZHU Q Q, et al. Bending capability of foam aluminum sandwich beams [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(2):290—295.
- [11] 尚金堂,何德坪.泡沫铝层合梁的三点弯曲变形[J].材料研究学报,2003,17(1):31—38.  
SHANG J T, HE D P. Deformation of sandwich beams with Al foam cores in three-point bending [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(1):31—38.
- [12] 黄刘刚.内聚力模型的分析及有限元子程序开发[D].郑州:郑州大学,2010.  
HUANG L G. The Analysis of cohesive zone model and user-defined subroutine development in finite element method [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2010.
- [13] 滕锦,李斌太,庄苗.z-pin增韧复合材料层合板低速冲击损伤过程研究[J].工程力学,2006,23(增刊1):209—216.  
TENG J, LI B T, ZHUANG Z. A study on low-velocity impact damage of z-pin reinforced laminates [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Suppl 1):209—216.
- [14] 胡靖,钱振东.环氧沥青混合料细观尺度水损坏特性[J].东南大学学报,2013,43(2):355—359.  
HU J, QIAN Z D. Micro-scale moisture damage characteristics in epoxy asphalt concrete [J]. Journal of Southeast University, 2013, 43(2):355—359.
- [15] 许巍,杨金水,王飞,等.含曲线型膜基界面的高分子基金属薄膜延展性能[J].固体力学学报,2011,32(1):1—8.  
XU W, YANG J S, WANG F, et al. Ductility of polymer-supported metal films with curved interfaces[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(1):1—8.

基金项目:国家自然科学基金项目(11002119)

收稿日期:2013-05-04;修订日期:2014-07-26

通讯作者:刘宇杰(1978—),男,博士,副教授,主要从事材料循环本构关系、疲劳与损伤力学以及轻质材料的力学行为方面研究,联系地址:成都市二环路北一段111号西南交通大学力学与工程学院(610031),E-mail: yjliu6@163.com