工程科学学报 第 38 卷 第 8 期: 1153-1159 2016 年 8 月

Chinese Journal of Engineering , Vol. 38 , No. 8: 1153–1159 , August 2016 DOI: 10.13374/j.issn2095–9389.2016.08.015; http://journals.ustb.edu.cn

聚氨酯/蜂窝铝复合材料的压缩力学行为及缓冲吸能 特性

宋玉环,肖久梅[∞]

北京科技大学应用力学系 , 北京 100083 🖂 通信作者 , E-mail: jiujiu@ sas. ustb. edu. cn

摘 要 对空芯蜂窝铝(六边形孔)、聚氨酯、聚氨酯/蜂窝铝复合材料进行压缩试验,分析蜂窝铝和聚氨酯复合后的压缩力学 行为及缓冲吸能特性. 结果表明:复合材料的应力一应变曲线表现出弹性、屈服和密实三个阶段,初始刚度和屈服应力较空芯 蜂窝铝有很大提高;蜂窝铝的加入使聚氨酯的变形回复降低25%;复合材料的最大吸能效率是单纯聚氨酯的1.47倍,且较大 应力下复合材料具有比单纯聚氨酯更好的吸能效率;聚氨酯填充1mm 孔径蜂窝铝复合材料的最大吸能效率是聚氨酯填充 2mm孔径蜂窝铝复合材料的1.37倍;加载速率越大,吸能效率的峰值越大,且在达到最大吸能效率时的应力越大. 关键词 复合材料;蜂窝铝;聚氨酯;压缩试验;吸能 分类号 TB333

Compression behavior and energy-absorption characteristic of aluminum honeycomb material with polyurethane filler

SONG Yu-huan , XIAO Jiu-mei[⊠]

Department of Solid Mechanics "University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China Corresponding author , E-mail: jiujiu@ sas. ustb. edu. cn

ABSTRACT Static compression experiments were conducted on hollow aluminum honeycomb (hexagon aperture), polyurethane, and aluminum honeycomb filled with polyurethane. The mechanical behavior and energy absorption characteristics of the composite were analyzed. Experimental results show that the stress—strain curve of the composite exhibits three stages: elasticity, yield and compaction. The initial stiffness and yield stress greatly increase compared to the hollow aluminum honeycomb. Because of the addition of the aluminum honeycomb, the deformation recovery of the polyurethane decreases by 25%. The maximum energy absorption efficiency of the composite is 1.47 times that of the pure polyurethane, and the composite materials show a better energy absorption efficiency than the pure polyurethane under a larger stress. The maximum energy absorption efficiency of the 1 mm aperture aluminum honeycomb with polyurethane filler is 1.37 times that of the 2 mm aperture aluminum honeycomb with polyurethane filler. The larger the loading rate, the greater the peak value of the energy absorption efficiency and the stress at the time of reaching the maximum energy absorption efficiency are.

KEY WORDS composite materials; aluminum honeycomb; polyurethane; compression testing; energy absorption

安全、环保和节能是 21 世纪汽车设计研发所面 临的三大热点问题.随着汽车保有量不断上升,交通 事故也呈上升趋势,所以汽车碰撞安全问题在当今 社会越来越受到人们的关注. 在汽车碰撞过程中发 生最多的是汽车前部的碰撞,这就涉及到前保险杠 的碰撞,到目前为止很多国产车安装的保险杠仍是

收稿日期: 2015-10-14

基金项目:北京科技大学冶金工程研究院基础理论研究基金资助项目(32001049)

非吸能式保险杠¹¹,因此如何提高保险杠装置在碰 撞过程中的吸能特性,已经成为保险杠装置研制的 重要方向.

聚氨酯弹性体具有相对较高的损耗因子,在受到 外力冲击或振动作用时 能有效地吸收高达 60% 以上 的能量 使外力有效地衰减 因此聚氨酯被广泛应用于 各种缓冲装置中^[2-5].如果将聚氨酯弹性体作为吸能 缓冲元件用在汽车保险杠中,能有效地吸收汽车碰撞 过程的能量^[6]. 但是,聚氨酯仍具有以下问题:(1)体 积不可压缩性 横向变形较大 且汽车碰撞时方向也具 有不确定性,容易使汽车碰撞后回弹方向不确定,大大 增加发生交通事故的风险;(2)变形回复率较高使得 汽车在接触完缓冲装置后又以一定的速度被回弹出 去 容易造成汽车的二次损伤. 因此 如果单纯用聚氨 酯作汽车保险杠的缓冲吸能构件就有很多局限性.为 了改进上述不足并进一步提高聚氨酯的缓冲吸能特 性 我们以聚氨酯为基体材料 采用具有格栅结构^[7-8] 和优良吸能特性的薄壁空芯蜂窝铝[9-12]作为改性材 料 形成聚氨酯/蜂窝铝复合材料^[13] 用空芯蜂窝铝来 改善聚氨酯的体积不可压缩性 降低变性回复率并提 高其缓冲吸能性能^[14],为研制具有更好缓冲吸能性能 的汽车保险杠提供参考.

1 试验

- 1.1 试验原料与制样
- 1.1.1 试验原材料

空芯蜂窝铝: 六边形孔,孔边长分别为1 mm 和2 mm,孔壁厚0.04 mm,生产厂家为百世德利.

聚氨酯(PU):品牌为德克,牌号PU-1166,100%聚 氨酯,高弹强,黏结力强.

1.1.2 聚氨酯/蜂窝铝复合材料的制备

将单组份聚氨酯注入到空芯蜂窝铝中,直至蜂窝 铝孔隙被注满,常温固化24小时.

1.2 试验方法

采用电子万能试验机(美特斯工业系统中国公司 型号 CMT4000) 对试样进行单轴压缩试验,按照国家标准 GBT 1041—2008 进行,试验速度设置为 2、20和 50 mm•min⁻¹ .最大施加载荷为 10 kN.

2 试验结果及分析

2.1 聚氨酯/蜂窝铝复合材料的压缩力学行为

本文对聚氨酯、蜂窝铝和聚氨酯/蜂窝铝复合材料 进行静态压缩试验.图1为压前的试样和压缩受力示 意图.



图 1 压缩试件. (a) 空芯蜂窝铝; (b) 聚氨酯填充蜂窝铝; (c) 试件尺寸及受力示意图(长 10 mm ,宽 10 mm ,高 5 mm)

Fig. 1 Compression specimens: (a) hollow aluminum honeycomb; (b) aluminum honeycomb filled with polyurethane; (c) specimen size and force (length 10 mm, width 10 mm, and height 5 mm)

图1为压缩前空芯蜂窝铝和聚氨酯/蜂窝铝复合 材料的试件.由图1(b)可见 聚氨酯均匀的填充在蜂 窝铝的孔隙中 蜂窝铝孔隙被聚氨酯填充满后蜂窝铝 胞壁仍保持纵向竖直状态.

图2为空芯蜂窝铝、聚氨酯、聚氨酯/蜂窝铝的应

力一应变曲线. 由图 2 可见 (1) 空芯蜂窝铝的屈服平 台非常低,即在非常小的应力下空芯蜂窝铝就发生结 构屈服,当应变达到 0.62 左右时开始发生结构强化, 既达到压实阶段^[15→6],因此整个压缩过程蜂窝铝的吸 收能^[17→18]很少;(2)纯聚氨酯的应力一应变呈现明显的 超弹性材料行为;(3)聚氨酯/蜂窝铝复合材料的应 力-应变曲线则呈现出明显的弹性、屈服和压实三个 阶段.



图 2 空芯蜂窝铝、聚氨酯和聚氨酯填充蜂窝铝的应力一应变曲 线

Fig. 2 Stress-strain curves of the hollow aluminum honeycomb , polyurethane and aluminum honeycomb filled with polyurethane

三种材料中聚氨酯/蜂窝铝复合材料的初始刚度 最大(见图2).其原因主要是:聚氨酯/蜂窝铝复合材 料在初始时主要是内部聚氨酯和蜂窝铝发生弹性变 形 由于蜂窝铝对聚氨酯的格栅作用,使聚氨酯的横向 变形速度减慢,同时由于内部聚氨酯对蜂窝铝胞壁弯 曲的遏制作用,从而使复合材料表现出初始刚度较高.

聚氨酯/蜂窝铝复合材料的屈服平台高度较空芯 蜂窝铝高. 原因主要是: 屈服阶段聚氨酯/蜂窝铝复合 材料的蜂窝铝胞壁开始发生弯曲变形. 聚氨酯纵向受 压,由于其体积不可压缩性,它会发生横向弹性变性, 这种横向变形导致蜂窝铝胞壁内压重分布^[19],一定程 度上遏制胞壁的弯曲变形,使蜂窝铝在较高的应力才 能发生屈服,从而表现出屈服平台的提高.

通过观察压缩后的试样的高度,我们发现空芯蜂 窝铝受压后其高度变得很小,聚氨酯的高度和受压之 前几乎没有什么差别,聚氨酯/蜂窝铝复合材料也和受 压前的高度差别不大,根据经验我们知道,试样变形回 复越大,对冲击物体的反弹作用越大,从而造成二次损 伤的可能性越大.表1为各种试样的具体变形回 复率.

表1 日	缩试验数据结果
------	---------

Table 1 Results of the compression test				
试样	压前高 度/mm	最终 应变/%	压后 高度/mm	变形回 复率/%
空芯蜂窝铝	5.00	89.95	0.50	0
聚氨酯	5.00	84.33	5.00	100.00
聚氨酯/蜂窝铝复合材料	斗 5.00	81.80	4.00	75.00

另外 我们将三种试样分别取六个试件,分别测出 六个试件压前高度的平均值和压后高度的平均值,其 中压后高度为变形回复后的高度,最终应变由压缩试 验得到并取六个试件的平均值(试验中每个试件都是 压缩到10kN 停止的).根据下面公式

变形回复率 = [压后高度 - 压前高度 × (1 - 最终 应变)]/(压前高度 × 最终应变) × 100% 计算出变形回复率.其中压前高度、压后高度、最终应 变分别取的是六个试件的平均值.

表1表明,蜂窝铝的加入有效降低聚氨酯的变形 回复率,比例为25%,减少聚氨酯弹性能的释放,在一 定程度上减轻汽车碰撞后被回弹速度,从而降低汽车 碰撞过程中二次损伤的可能.

2.2 聚氨酯/蜂窝铝复合材料的缓冲吸能特性分析

图 3 为聚氨酯/蜂窝铝复合材料压缩后扫描电镜 照片(横向箭头的方向表示压缩时受力的方向).

由图 3 可见: 蜂窝铝胞壁呈弯曲变形 胞壁挤入聚 氨酯的一侧 ,聚氨酯与胞壁结合的较好; 胞壁脱离聚氨 酯的一侧 ,聚氨酯与胞壁有发生脱黏的趋势.如 图 3(c) ,聚氨酯受到胞壁的横向拉伸而产生图示变 形 ,聚氨酯发生变形的方向正好与试件所受压力的方 向垂直. 由此判断 ,聚氨酯的拉伸变形发生在受压过 程 ,并非受压后的变形回复阶段. 聚氨酯/蜂窝铝复合 材料受压后内部聚氨酯发生弹性变形 ,蜂窝铝胞壁发 生弯曲变形(见图 3(a)),故聚氨酯/蜂窝铝复合材料 主要是以内部聚氨酯的挤压弹性变形和蜂窝铝的胞壁 弯曲变形来吸能.

单位体积吸收的能量可用单位体积的形变功 表示:

$$C = \int_{0}^{\varepsilon_{\rm m}} \sigma_{\rm m} \mathrm{d}\varepsilon. \tag{1}$$

式中: C 表示为应力—应变曲线下方的面积,可通过对 曲线积分获得 ε_m 为压缩过程的任意工程应变; σ_m 为 ε_m 所对应的工程应力.通过应力和应变的积分求出 材料的吸收能并绘出曲线如图 4.

图 4 为聚氨酯和聚氨酯/蜂窝铝复合材料的吸收 能一应力曲线. 由图可见:(1) 在应力到达 3 MPa 左右 之前(图中下部箭头所指的位置既为应力为 3 MPa 左 右,对应图 2 的聚氨酯/蜂窝铝复合材料的初始屈服平 台应力) 相同应力下聚氨酯/蜂窝铝复合材料的吸收 能比聚氨酯少. 其原因主要是:应力在 3 MPa 左右之 前,聚氨酯已经产生较大应变(见图 2),而聚氨酯/蜂 窝铝复合材料还处于弹性阶段,此时主要是填充在内 部的聚氨酯和蜂窝铝胞壁发生弹性变形,由于蜂窝铝 对聚氨酯的格栅作用使聚氨酯较难发生变形.(2) 应 力在到达 3 MPa 左右之后 相同应力下聚氨酯/蜂窝铝 复合材料的吸收能比聚氨酯多且随应力增大吸收能增



图 3 聚氨酯/蜂窝铝复合材料扫描电镜照片. (a) 弯曲的蜂窝铝胞壁; (b) 聚氨酯与蜂窝铝结合处; (c) 聚氨酯拉伸变形 Fig. 3 SEM images of deformation: (a) curved aluminum honeycomb cell wall; (b) junction of the polyurethane and aluminum honeycomb; (c) tensile deformation of the polyurethane



加的幅度越来越大. 其原因主要是: 应力在 3 MPa 左 右之后 ,聚氨酯/蜂窝铝复合材料进入屈服阶段 ,由于 聚氨酯和蜂窝铝的相互作用使蜂窝铝胞壁发生相对于 单纯蜂窝铝胞壁产生更多弯曲变形; 同样 ,蜂窝铝的胞 壁变形又促使聚氨酯产生更多的(不同方向的) 弹性 变形 ,即蜂窝铝胞壁的格栅作用破坏了填充在其内部 聚氨酯自身的整体性 ,蜂窝铝胞壁对内部聚氨酯的弹 性变形的横向阻挡作用大幅减弱 ,使该复合结构相对 于纯聚氨酯更易发生变形 吸收能量更多.

通过积分应力-应变曲线得到的应变能只能在一 定程度上反映材料对外力的响应速度及所吸收能量的 变化趋势 ,为更好地说明材料的吸能特性 ,Josefh 和 Gruenbaum^[20]最早在研究泡沫铝压缩吸能特性时提出 了吸能效率 *E* 和理想吸能效率 *I* 的概念:

$$E = \frac{\int_{0}^{0} \sigma_{\rm m} \mathrm{d}\varepsilon}{\sigma_{\rm m}}.$$
 (2)

$$I = \frac{\int_{0}^{\infty} \sigma_{\rm m} d\varepsilon}{\sigma_{\rm m} \varepsilon_{\rm m}}.$$
 (3)

吸能效率 E 代表吸收能与对应应力的比值 ,E 值 越大 表示在对应的应力处吸能状态越好;理想吸能效 率 I 表示真实材料与理想材料在达到相同应力和应变 时吸收能的比值 ,即材料的吸能理想程度 / 值越大表 示真实材料与理想材料的接近程度越好 ,吸能特性也 越接近理想材料.最高理想吸能效率出现在材料的屈 服阶段 最高吸能效率出现在屈服到强化的拐点区域. 曾斐等^[21]对这两个指标的应用意义做了进一步评估 , 吸能效率用以确定在产品设计阶段的最佳工作应力 , 理想吸能效率一应力曲线进行分析.

图 5 为单纯聚氨酯与聚氨酯/蜂窝铝复合材料的 吸能效率-应力曲线. 从图中可以看到 .在达到最大吸 能效率(即吸能效果最佳点)时 ,聚氨酯/蜂窝铝复合 材料和单纯聚氨酯所对应的应力几乎相同 ,但是复合 材料的最大吸能效率为 0.22 ,单纯聚氨酯的最大吸能 效率为 0.15. 这就是说 ,复合材料的最大吸能效率是 单纯聚氨酯的 1.47 倍. 聚氨酯和复合材料相比 ,复合 材料有着更好的吸能效率 ,故蜂窝铝成功的改善了聚





2.3 聚氨酯填充不同孔径蜂窝铝复合材料的压缩力 学行为及缓冲吸能特性

本文对聚氨酯填充 1 mm 孔径蜂窝铝的复合材料 和聚氨酯填充 2 mm 孔径蜂窝铝的复合材料分别进行 静态压缩试验,并将二者进行对比,以分析蜂窝铝孔径 对复合材料的压缩性能的影响.具体曲线图见下图 6 所示.

由图 6(a) 看出:(1) 1 mm 孔径复合材料的初始刚 度较大. 其原因主要是初始两种复合材料都主要是以 聚氨酯和蜂窝铝的弹性变形为主,由于孔径为1 mm 的 蜂窝铝的格栅作用更强,对聚氨酯横向变形的阻挡作 用更强,使得聚氨酯填充较小孔径蜂窝铝的横向变形 速率较慢,从而表现出较大的初始刚度.(2) 1 mm 孔 径复合材料的屈服平台更高,屈服平台更长. 其原因 主要是较小孔径蜂窝铝有更高的刚度和强度,与内部 聚氨酯的接触面积更大,格栅作用更好,使受压过程中



图 6 聚氨酯填充不同孔径蜂窝铝(r=1mm和r=2mm)的比较.(a)应力一应变曲线;(b)吸收能一应力曲线;(c)吸能效率一应力曲线 Fig. 6 Comparison between the large and small aluminum honeycombs filled with polyurethane: (a) stress-strain curves; (b) energy-stress curves; (c) efficiency-stress curves

80

聚氨酯与蜂窝铝胞壁结合得更好,聚氨酯弹性变形对 蜂窝铝胞壁弯曲变形的遏制作用更强,故复合结构在 较大的应力下才发生屈服,并产生较多屈服应变,从而 表现出较高、较长的屈服平台.

由图 6(b) 可看出,在相同应力下,吸收能大小为 1 mm 孔径复合材料 > 2 mm 孔径复合材料,图中 1 mm 孔径和 2 mm 孔径的复合材料压后形貌图和吸收 能一应力曲线用箭头已对应标出.

图 6(c) 为 1 mm 孔径复合材料与 2 mm 孔径复合 材料的吸能效率一应力曲线. 从图中可以看到,在达到 最大吸能效率(即吸能效果最佳点)时,聚氨酯/蜂窝 铝复合材料和单纯聚氨酯所对应的应力几乎相同.



1 mm 孔径复合材料的最大吸能效率为 0.21 左右, 2 mm孔径复合材料的最大吸能效率为 0.15 左右. 这 就是说,1 mm 孔径复合材料的最大吸能效率是 2 mm 孔径复合材料的 1.37 倍左右.因此,1 mm 孔径蜂窝铝 对聚氨酯的吸能方面的改性效果比 2 mm 孔径蜂窝铝 明显.

2.4 加载速率对聚氨酯填充蜂窝铝复合材料的缓冲 吸能特性的影响

本文对相同尺寸的聚氨酯/蜂窝铝复合材料试样 进行不同压缩速率下的静态压缩试验,以分析静态压 缩下,压缩速率对复合材料的压缩性能的影响,具体曲 线见图7.

图 7 不同压缩速率下聚氨酯/蜂窝铝复合材料(孔径为1mm)的比较.(a)吸收能一应力曲线;(b)吸能效率一应力曲线 Fig. 7 Comparison of the 1mm aperture aluminum honeycomb filled with polyurethane at different compression rates: (a) energy-stress curve; (b) efficiency-stress curve

由图 7(a) 可知,在应力为 8 MPa 左右之后,加载 速率越大相同应力下的吸收能越多.这是因为相同 条件下,压缩速率较小时,压缩过程中聚氨酯的弹性变 形会有部分恢复,表现为材料的收缩弹性变形.此弹 性收缩变形作为能量耗散^[22],势必会减少其总吸收 能,且压缩速率越大聚氨酯发生的弹性收缩变形越少, 能量耗散越少,总吸收能越多.

图 7(b) 中可以看到,加载速率越大,吸能效率的 峰值越大,在达到最大吸能效率(即吸能效果最佳点) 时的应力也越大. 经计算,2、20和50mm•min⁻¹加载 速率下的最大吸能效率分别为0.24、0.26和0.27.由 此数据可以看出,在2~50mm•min⁻¹的加载速率范围 内,材料的最大吸能效率相差不大.

3 结论

(1)聚氨酯/蜂窝铝复合材料表现出明显的弹性 阶段、屈服阶段和压实阶段,蜂窝铝对聚氨酯的格栅作 用减缓了聚氨酯的横向变形速率,使聚氨酯的变形回 复降低25%.聚氨酯的超弹性和体积不可压缩性,在 一定程度上遏制蜂窝铝胞壁弯曲变形 使聚氨酯/蜂窝 铝复合材料在较大的应力下才屈服 ,从而表现出复合 材料的最大吸能效率是单纯聚氨酯的 1.47 倍.

(2)由于小孔径蜂窝铝的格栅作用较大孔径蜂窝 铝的更强,使压缩过程中蜂窝铝与聚氨酯结合得更好, 更有利于二者的相互作用,从而使小孔径蜂窝铝复合 材料有着较大孔径蜂窝铝复合材料更大的初始刚度和 更高、更长的屈服平台,进而表现出1mm 孔径复合材 料的最大吸能效率是2mm 孔径复合材料的1.37倍.

(3) 压缩速率越大,压缩过程中材料的弹性收缩 变形越少,能量耗散越少,吸收能越多.加载速率越 大,吸能效率的峰值越大,在达到最大吸能效率时的应 力也越大.

参考文献

 [1] Qiao W G , Zhang J H. Energy-absorbing bumpers for the study of the status quo and developing trends. *Automot Technol*, 2009, 27 (1): 9

(乔维高 涨金虎. 吸能式保险杠的研究现状及发展趋势. 汽

车科技,2009,27(1):9)

- [2] Luo H, Hou X H, Kang Y. The research & application of polyurethane elastomer. *Tianjin Chem Ind*, 2011, 25(1):9
 (罗红,侯晓辉,康永.聚氨酯弹性体研究应用.天津化工, 2011, 25(1):9)
- [3] Velankar S , Coope S L. Microphase separation and rheological properties of polyurethane: 2. Effect of block incompatibility on the microstructure. *Macro-molecules* , 2000 , 33(2): 382
- [4] Xu G D, Han B L, Yu W J. Recent status of polyurethane material in application of the automobile Industry. *Polyurethane Ind*, 2006, 21(6):1
 (徐归德,韩宝乐,于文杰. 聚氨酯材料在现代汽车工业上的应用. 聚氨酯工业,2007,21(6):1)
- [5] Guo Z C. New research progress on direct synthesis of hydrogen peroxide from hydrogen and oxygen. *Chem Propell Polym Mater*, 2010,8(1):4
 (郭智臣.中国聚氨酯发展的九大亮点及八大热点.化学推进

和与高分子材料,2010,8(1):4)

- [6] Liu J L. The Study and Design of Vehicle Energy Absorbing Airbag Bumper [Dissertation]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013
 (刘金龙 ,汽车吸能式气囊保险杠的设计与研究[学位论文].
- 哈尔滨:东北林业大学,2013) [7] Gou H M, Xu Z W, Li F, et al. Research on mechanical properties of composite grid structures. *Ordnance Mater Sci Eng*,2009, 32(6):19

(苟欢敏,徐志伟,李飞,等.复合材料格栅结构的力学性能研究.兵器材料科学与工程,2009,32(6):19)

- [8] Vasiliev V V, Barynin V A, Rasin A F. Anisogrid lattice structures: survey of development and application. *Compos Struct*, 2001, 54(2): 361
- [9] Evan A G , Hutchinson J W , Ashby M F. Multi-functionality of cellular metal systems. Prog Mater Sci , 1998 , 43(3): 171
- [10] Banhart J. Manufacture characterization and application of cellular metals and metal foams. *Prog Mater Sci*, 2001, 46(6): 559
- [11] Hao G L , Yang N X , Tian W , et al. A brief introduction to the application of porous metal materials. J Yan'an Coll Educ ,2008 , 22(2):69

(郝刚领,杨能勋,田炜,等.浅谈多孔金属材料的应用.延 安教育学院学报,2008,22(2):69)

- [12] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 203
- [13] Cheng H F , Han F S. Compressive behavior and energy absorb-

ing characteristic of open cell aluminum foam filled with silicate rubber. *Scripta Mater*, 2003, 49(6): 583

- [14] Markaki A E , Clyne T W. Energy absorption during failure of layered metal foam/ceramic laminates. *Mater Sci Eng*, 2002, 323(1): 260
- [15] Lu Z X ,Guo Y. Brief review of studies on mechanical behavior of metallic foams. J Beijing Univ Aeronaut Astronaut, 2004, 29 (11): 978
 (卢子兴,郭宇. 金属泡沫材料力学行为的研究概述. 北京
- [16] Fu S H , Zhen G Z. The mechanical behavior of foamed aluminum. J Mater Sci , 1999 , 34(2): 291

航空航天大学学报,2004,29(11):978)

- [17] Zhang Z H. Crashworthiness Analysis and Design Optimization of Lightweight Materials and Structure for Energy Absorption [Dissertation]. Dalian University of Technology, 2010
 (张宗华. 轻质吸能材料和结构的耐撞性分析与设计优化 [学位论文].大连:大连理工大学, 2010)
- [18] Lu X F , Pan Y S , Li Z H. Rigid-flexible energy absorbing structure with porous metal material and Its application to roadway support of rock bust. J Disaster Prev Mitigat Eng , 2011, 31 (2): 185

(吕祥锋,潘一山,李忠华.多孔金属材料刚柔吸能结构及 其在冲击地压巷道支护中的应用.防灾减灾工程学报, 2011,31(2):185)

- [19] Wang E H , Li J R, Yu J L, et al. Investigation of static compression behavior of cellular materials with silicate rubber filler. J Univ Sci Technol China, 2004, 34(5): 576
 (王二恒,李剑荣,虞吉林,等. 硅橡胶填充多孔金属材料静态压缩力学行为研究. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(5): 576)
- [20] Joseph M , Gruenbaum C. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements. *Polym Eng Sci* , 1981 , 21(15): 1010
- [21] Zeng F, Pan Y, Hu S S. Evaluation of cushioning properties and energy-absorption capability of foam aluminium. *Explos Shock Waves*, 2002, 22(4): 358
 (曾斐,潘芝,胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性. 爆炸 与冲击,2002,22(4): 358)
- [22] Jiang Y D, Li H T, Zhao Y X, et al. Effect of loading rate on energy accumulation and dissipation in rocks. J China Univ Min Technol, 2014, 43(3): 370
 (姜耀东,李海涛,赵毅鑫,等. 加载速率对能量积聚与耗散 的影响. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 370)