梯度泡沫铝复合结构缓冲研究

韩其辰[1]，吴晓军[1]，邢联大[2]，孟宏志[3]，郭永[3]，王洋[1]
（1.中北大学 机电工程学院，太原 030051；
2.中国人民解放军空军驻山西地区去军事代表室，太原 030024；3.淮海工业集团有限公司，长治 046012）

摘要：目的 为了有效降低冲击能量对仪器带来的损伤，从而对内部装置进行有效的保护。**方法** 在薄壁金属管内填充倾斜功能金属材料，并对其进行仿真试验。随后基于能量吸收缓冲原理，并分析传统吸能装置，以提出新的能量吸收缓冲方案。**结果** 相较于传统缓冲吸能结构，新复合结构的吸能性能平均增幅为 4.67%。利用数值模拟计算，并结合试验对比论证了方案的技术可行性。**结论** 提出的新型填充结构在能量吸收方面有明显效果，基本上达到了预期要求。

关键词：吸能装置；胀环结构；泡沫铝；过载
中图分类号：TJ04 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)05-0131-06
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.017

Cushioning of Composite Structure of Inclined Aluminum Foam

HAN Qi-chen[1], *WU Xiao-jun*[1], *XING Lian-da*[2], *MENG Hong-zhi*[3], *GUO Yong*[3], *WANG Yang*[1]
(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2.Military Representative Office of the People's Liberation Army Air Force in Shanxi, Taiyuan 030024, China;
3.Huaihai Industry Group Co., Ltd., Changzhi 046012, China)

ABSTRACT: The paper aims to effectively reduce the damage of instrument caused by the impact energy to protect the internal device effectively. Tilt functional metal materials were filled in thin-walled metal tubes and simulated. Then, based on the energy absorption and buffering principles, the traditional energy absorption devices were analyzed, and a new energy absorption and buffering scheme was proposed. Compared with the traditional energy absorption structure, the energy absorption performance of the new composite structure was increased by an average of 4.67%. The technical feasibility of the scheme was demonstrated by numerical simulation and experimental comparison. The new filling structure proposed in this paper has obvious effect on energy absorption. It basically meets the expected requirements.

KEY WORDS: energy absorbing device; expansion ring structure; aluminum foam; overload

飞行器、交通运输等行业采用薄壁金属管缓冲结构，可通过金属材料塑性变形和摩擦吸收飞行器的冲击动能、减少冲击过载[1]。在工程应用中，道路桥梁防护栏等均利用金属管[2—3]塑性变形的特性实现缓冲吸能的目的[4—6]。通过对薄壁金属管的径向冲击研究，在实际应用中针对各种工况环境合理设计和改进薄壁金属管的结构，可提高金属管在碰撞冲击环境条件下的吸能效率，从而减小经济损失。

薄壁金属管缓冲器通过弹塑性变形的形式吸收冲击碰撞能量，因其缓冲力平稳、结构紧凑、适应力强等特点，被广泛应用于各个工程领域。徐磊[7]利用吸能器的吸能能力、平均压溃载荷和理想吸能效率等

收稿日期：2018-10-13
作者简介：韩其辰（1993—），男，中北大学硕士生，主攻探测制导。
通信作者：赵明河（1968—），男，中北大学教授，主要研究方向为探测制导、机电系统设计。

3 个吸能评价指标，对薄壁金属管的吸能特性进行综合评估。卢富德[8]根据对泡沫系统动力学响应分析的结果，得到梯度泡沫系统对小能量的冲击响应比均匀泡沫密度系统要小的结论。Koohbor[9]提出了 1 种半解析方法来研究分级泡沫中分级函数的影响。在高速碰撞条件下时[10—12]，碰撞会产生巨大的冲击能量，导致内部零部件极易造成严重的结构性损坏失灵，影响设备的工作效率。传统的缓冲器无法满足要求，相较于传统缓冲器，胀环复合结构可以有效地降低高过载，进而降低冲击效应，有效地保护内部设备。设计相对应的缓冲吸能装置，保证内部设备在高速冲击时的安全可靠是十分重要的。泡沫铝是多孔工程结构材料，当梯度泡沫金属受到压缩载荷作用时，可以保持相对恒定的应力水平，且由于塑性变形度高、吸能效果好等诸多特点，被广泛应用在汽车、包装材料等领域。

文中拟在薄壁金属管内填充梯度泡沫铝[13—15]，组成新型的吸能缓冲结构，并对其在高速冲击条件下的吸能效果进行仿真试验，分析缓冲装置的能量吸收性能，并使用数值模拟计验证这种新的缓冲能量吸收方案。最后结合试验结果对比论证方案的可行性。

1　梯度泡沫铝材料仿真研究

梯度泡沫铝由 2 种或更多种具有不同密度比的材料构成，因此倾斜功能泡沫的性质和功能沿厚度方向变化。梯度泡沫铝在一定应力范围内，具备非常良好的能量吸收性质。为了研究梯度泡沫铝的吸能性能，采用 Ansys 仿真软件对梯度泡沫铝进行实体建模，实体单元类型采用 3D Solid 164，使用六面体网格，移动刚性墙沿柱形梯度泡沫铝轴线 z 轴负方向运动。模型几何尺寸为 3 mm×10 mm×Φ30 mm。泡沫铝选用 MAT_CRUSHABLE_FOAM，中间分别填充了 3 层同样厚度的泡沫铝材料，在计算过程中使用面面接触，温度条件为常温。得到模型见图 1。

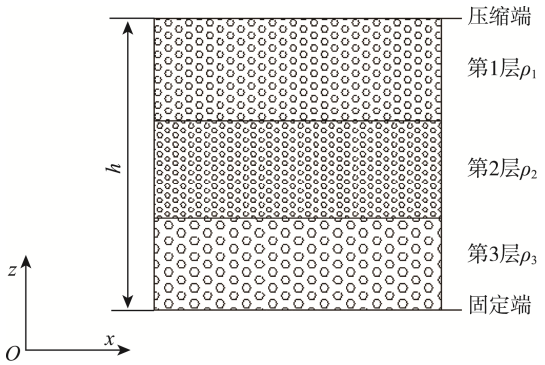


图 1　3 层梯度泡沫铝模型

Fig.1 Three-layer gradient foam aluminum model

图 1 中，ρ_1 表示第 1 层材料密度；ρ_2 表示第 2 层材料密度；ρ_3 表示第 3 层材料密度。当第 2 层泡沫层密介于第 1 层材料密度与第 3 层材料密度中间且依次升高时，称这时的状态是正梯度，反之是负梯度。泡沫铝基体材料的本构模型选择理想的弹塑性模型，采用 Cowper-Symonds 模型来描述基体材料的应变率效应。

$$\sigma_y^d = \sigma_y^s\left(1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/P}\right) \tag{1}$$

式中：σ_y^d 和 σ_y^s 为基体材料的动态和静态屈服应力；$\dot{\varepsilon}$ 为应变率；C，P 为 Cowper-Symonds 模型应变率参数。

2　梯度泡沫铝仿真试验分析

在应变率为 100~10 000 s^{-1} 时，分别选取了 6 种不同应变率进行模拟仿真，并得到了应变率和泡沫铝动态力学性能关系曲线，正负梯度泡沫铝固定端与压缩端的应力和应变曲线见图 2。

通过观察图 2 可知，当泡沫铝模型的应变率增长时，其屈服应力总体呈上升趋势。由图 2a 可知，应变率大于 2500 s^{-1} 的曲线与应变率范围是 100~1000 s^{-1} 的曲线相比，应变率大于 2500 s^{-1} 时，曲线的屈服

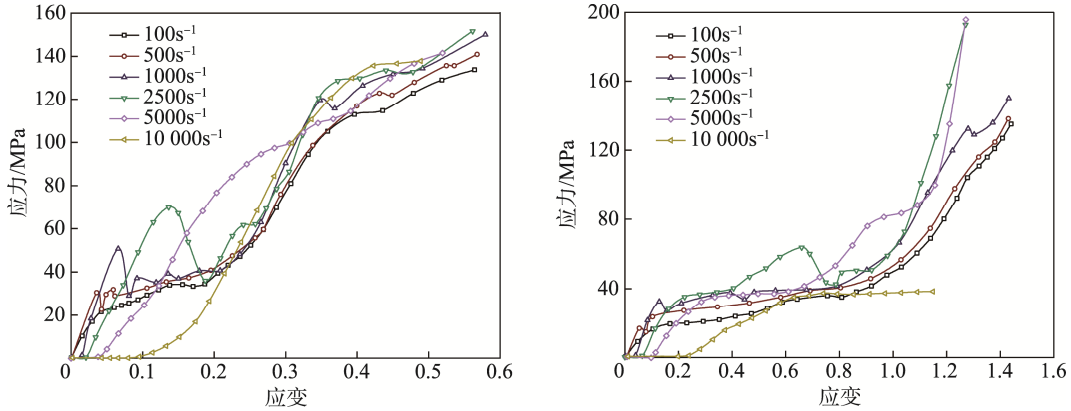


图 2　固定端的应变与应力关系曲线

Fig.2 Fixed-end strain-stress curve

应力有滞后现象。由图 2b 可知，当应变率越来越大时，对应的曲线越来越不均匀。通过对梯度泡沫铝进行仿真得出，在应变率范围不同的情况下，梯度泡沫铝吸能关系曲线见图 3—4。

观察并分析图 3—4 得出，梯度泡沫铝的能量吸收性能随着应变率的增长而上升。在 100~2500 s^{-1} 的应变率范围内，正梯度（+）泡沫铝与负梯度（−）泡沫铝的能量吸收曲线变化基本一样。应变率在 5000 s^{-1} 以上时，其能量吸收性能明显优于低于 5000 s^{-1} 阶段的能量吸收性能，在负梯度泡沫铝曲线中，其曲线变化程度更为明显，能量吸收性能更强。

3　胀环结构能量吸收特性分析

胀环结构由锥台和具有一定长度的胀环组成，且锥台大端的直径大于胀环的内径。主要依靠薄壁金属管扩径变形过程中的弹塑性变形和摩擦发热来吸收冲击能量。

为了研究胀环结构的能量吸收性能，对胀环结构进行模拟试验。测试条件为：冲击速度约为 100 m/s、质量体碰撞锥角为 15°时，胀环在不同时间的应力云图见图 5。

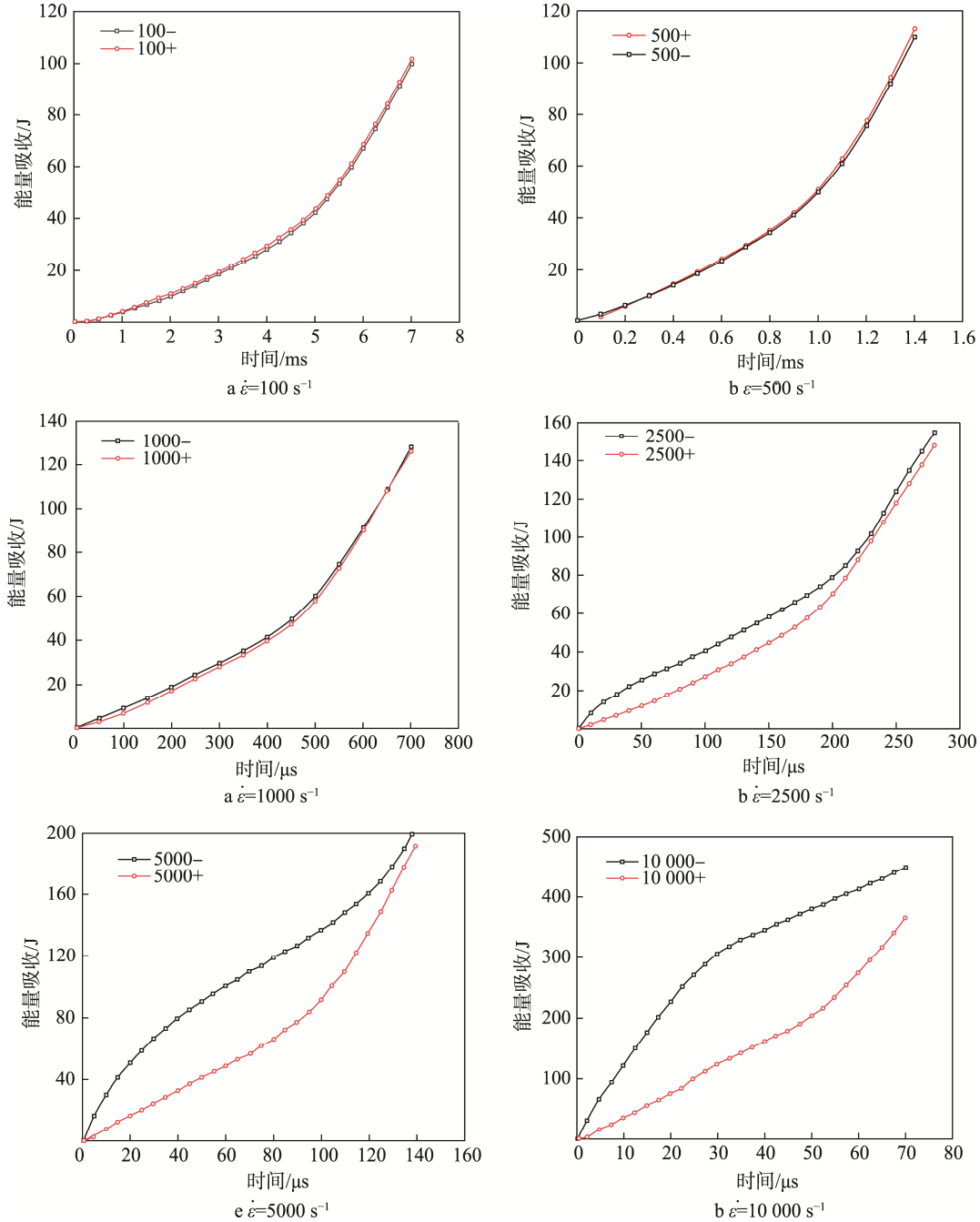
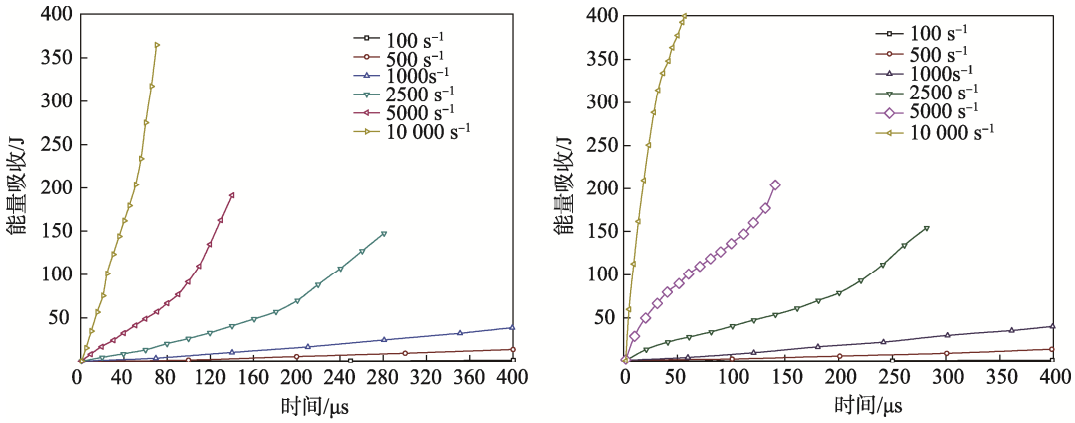


图 3　应变率范围相同时的能量吸收曲线

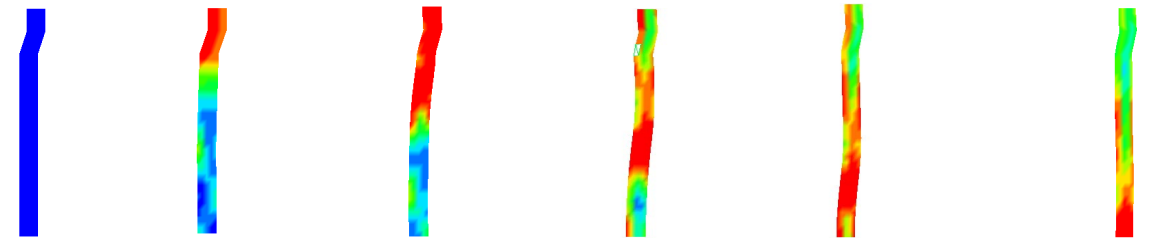
Fig.3 Energy absorption curve with the same strain rate range



a 正梯度　　b 负梯度

图 4　应变率范围不同时的能量吸收曲线

Fig.4 Energy absorption curve with different strain rate ranges



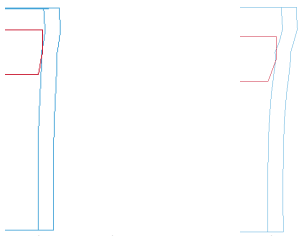
a t=0　b t=9.99 μs　c t=39.99 μs　d t=129.84 μs　e t=189.88 μs　f t=270 μs

图 5　不同时间的应力云图

Fig.5 Stress cloud at different times

质量块还未接触胀环结构时，胀环因为受到塑性横波的影响，一开始就会产生形变，当时间到达 39.99 μs 时，胀环结构的最大形变长度约为 1.27 mm。

质量块冲击速度一样时，锥角度数为 10°与 20°时的环结构变形见图 6，锥角为 10°时最大变形长度约为 0.65 mm，锥角为 20°时最大变形长度约为 1.54 mm。经多次试验得出，当质量块冲击速度一样时，胀环径向变形量随着胀环结构的锥角变大而变大。当冲击速度为 100 m/s 的质量体高速碰撞具有不同锥角度的胀环结构时，其冲击过程中受到的过载随时间的变化曲线见图 7。



a α=10°（t=30 μs）　b α=20°（t=40 μs）

图 6　锥角度为 10°和 20°的胀环变形

Fig.6 Expansion ring deformation with cone angles of 10° and 20°

胀环结构的锥角为 20°时，质量体最大加速度为 2.05×10^6 m/s^2，降幅最大可为 64.42%，所以胀环结构的能量吸收效果随着锥角的增大越明显。

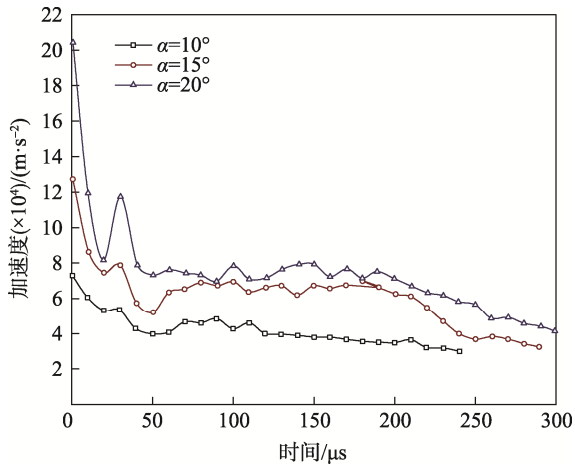


图 7　当锥角度不同时的过载曲线

Fig.7 Overload curve with different cone angles

4　复合结构能量吸收特性分析

为了研究胀环结构的能量吸收性能，在一定的条件下，通过胀环结构的载荷与位移关系可推出胀环结构的能量吸收表达式。

$$W_1=\int_0^s F(s)\mathrm{d}s \tag{2}$$

式中：s 为被压缩的长度；$F(s)$为当压缩距离为 s 时，胀环结构所受到的力。为了研究泡沫铝的能量吸收性能，通过分析一定条件下泡沫铝的的应力与应变

关系，推出能量吸收的表达式为：

$$W_2=\int_0^{\varepsilon_{\max}}\sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_{\max}$ 为当泡沫铝结构被压缩时的最大结果变量。新复合结构的吸能量为胀环结构的能量吸收与泡沫铝的能量吸收之和。经过仿真，当锥角为 20°时，正负梯度泡沫铝胀环复合结构在准静态压缩条件下能量的吸收曲线见图 8。

锥角 α^+表示正倾斜功能能量吸收曲线，锥角 α^-

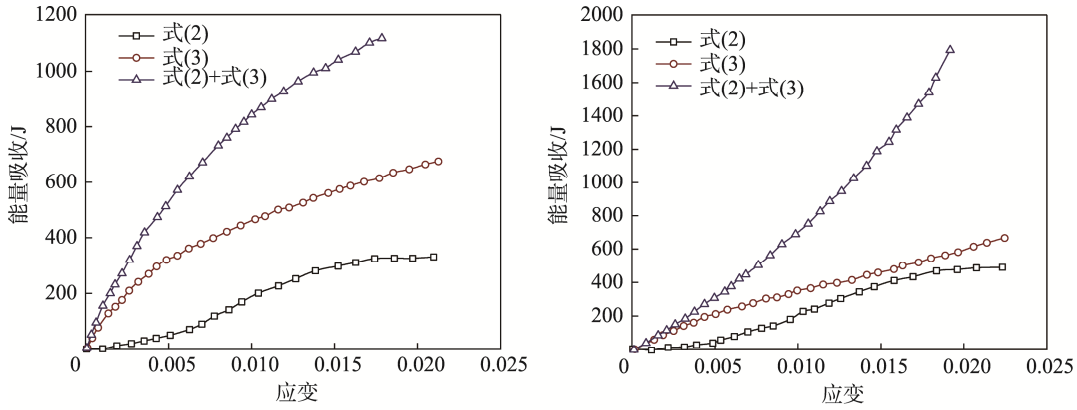


图 8　梯度泡沫铝复合结构能量吸收曲线

Fig.8 Energy absorption curve of gradient foam aluminum composite structure

表示负倾斜功能能量吸收曲线。对比总结可知，倾斜功能泡沫金属复合结构相比于传统的结构，其能量吸收更优，在负梯度条件下，能量吸收效果更明显。

5　结语

文中在分析传统缓冲吸能结构存在问题的基础上，结合泡沫铝能量吸收性能与胀环结构设计了新型复合结构。主要对梯度泡沫铝进行建模，并对梯度泡沫铝和胀环结构进行了能量吸收试验和分析。通过仿真试验和测试表明，所设计的复合结构基本上达到了预期的要求，与传统吸能结构相比，能量吸收率增幅为 4.67%，提高了能量吸收性能。此外，泡沫铝填充胀环复合结构的能量吸收效果随着胀环锥角度数的增加而增加。试验结果和仿真分析充分表明，文中提出的复合结构在理论上是可行的。

参考文献：

[1] 姜玉敬. 世界泡沫铝的发展及其市场分析[J]. 中国金属通报, 2017(4): 25—27.
JIANG Yu-jing. The Development of the World's Foam Aluminum and Its Market Analysis[J]. China Metal Bulletin, 2017(4): 25—27.

[2] 吴鸿超, 梁增友, 冯阳, 等. 薄壁金属管在中高速冲击下的缓冲特性研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(2): 325—331.
WU Hong-chao, LIANG Zeng-you, FENG Yang, et al. Buffering Characteristics of Thin-walled Metal Tubes under High and Medium Speed Impact[J]. Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2): 325—331.

[3] 梁增友, 高位. 泡沫金属/金属管塑性变形缓冲器降低弹载设备过载的数值模拟[J]. 兵工学报, 2013, 34(8): 1041—1045.
LIANG Zeng-you, GAO Wei. Numerical Simulation of Foam Metal/Metal Tube Plastic Deformation Buffer to Reduce the Overload of Missile Equipment[J]. Acta Armamentari SINICA, 2013, 34(8): 1041—1045.

[4] ZENG H B, PATTOFATTO S, ZHAO H, et al. Impact Behaviour of Hollow Sphere Agglomerates with Density Gradient[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(5): 680—688.

[5] 韩杰才, 徐丽, 王保林, 等. 梯度功能材料的研究进展及展望[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3): 207—215.
HAN Jie-cai, XU Li, WANG Bao-lin, et al. Research Progress and Prospect of Gradient Functional Materials[J]. Solid Rocket Technology, 2004, 27(3): 207—215.

[6] 曹立波, 丁海建, 李克, 等. 可伸缩式汽车碰撞缓冲吸能装置的试验与仿真研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(17): 2137—2141.
CAO Li-bo, DING Hai-jian, LI Ke, et al. Experimental and Simulation Study of Retractable Vehicle Collision Buffer Energy Absorbing Device[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(17): 2137—2141.

[7] 徐磊, 贾大伟, 俞麒峰. 薄壁金属管吸能器的吸能特性分析[J]. 计算机辅助工程, 2016, 22(S2): 1—5.
XU Lei, JIA Da-wei, YU Qi-feng. Analysis of Energy Absorption Characteristics of Thin-walled Metal Tube Energy Absorbers[J]. Computer Aided Engineering, 2016, 22(S2): 1—5.

[8] 卢富德, 高德. 功能梯度泡沫动力学响应分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 54—57.
LU Fu-de, GAO de. Dynamic Response Analysis of

Functionally Graded Foam[J]. Vibration and Shock, 2014, 33(15): 54—57.

[9] KOOHBOR B, KIDANE A. Design Optimization of Continuously and Discretely Graded Foam Materials for Efficient Energy Absorption[J]. Materials & Design, 2016, 102: 151—161.

[10] 邹猛, 魏灿刚, 许述财, 等. 汽车碰撞中锥形晶胞薄壁金属管吸能特性的仿真研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(4): 326—331.
ZOU Meng, WEI Can-gang, XU Shu-cai, et al. Simulation Study on Energy Absorption Characteristics of Tapered Cell Thin Wall Metal Tube in Automobile Collision[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(4): 326—331.

[11] SEITZBERGER M, RAMMERSTORFER F G, DEGISCHER H P, et al. Crushing of Axially Compressed Steel Tubes Filled with Aluminium Foam[J]. Acta Mechanica, 1997, 125(1/2/3/4): 93—105.

[12] REID S R, REDDY T Y, GRAY M D. Static and Dynamic Axial Crushing of Foam-filled Sheet Metal Tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1986, 28(5): 295—322.

[13] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5): 591—600.

[14] 胡杰, 路远, 刘志伟, 等. 泡沫金属复合相变材料传热特性的有限元仿真分析[J]. 功能材料, 2018, 49(11): 11200—11204.
HU Jie, LU Yuan, LIU Zhi-wei, et al. Finite Element Simulation and Analysis of Heat Transfer Characteristics of Foam Metal Composite Phase Change Material [J]. Functional Materials, 2018, 49(11): 11200—11204.

[15] 王展光, 汪洋, 潘昌仁, 等. 高比强泡沫铝填充方管的扭转性能及吸能能力研究[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(5): 33—36.
WANG Zhan-guang, WANG Yang, PAN Chang-ren, et al. Torsional Performance and Energy Absorption Capacity of High Aluminum Foam Filled Square Tubes[J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(5): 33—36.