

聚氨酯-泡沫铝复合材料的性能研究

刘运学,贾旭,范兆荣,谷亚新,王晓丹

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 制备一种具有可恢复阻尼机制的聚氨酯-泡沫铝(PU-AF)减震复合材料,研究PU-AF减震复合材料的阻尼机制,泡沫铝体积质量对PU-AF静态压缩力学性能、吸能性能的影响。方法 将制备的PU-AF复合材料在万能材料试验机上进行单调循环压缩试验,由应力-应变曲线研究复合材料的阻尼机制和吸能性能。结果 当泡沫铝体积质量为 $0.70 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$ 时,在相同应变值下,随着泡沫铝体积质量的增加,PU-AF复合材料的屈服强度、弹性模量均增大。吸能效率在应变为30%以后有所降低,最佳吸能效率对应的应变为25%~35%。结论 聚氨酯可以显著提高复合材料的应变恢复率;PU-AF是一种很好的减震复合材料。

关键词 聚氨酯;开孔泡沫铝;体积质量;应变恢复率;吸能特性

中图分类号 TB333

文献标志码 A

引用格式:刘运学,贾旭,范兆荣,等.聚氨酯-泡沫铝复合材料的性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):529-535.(LIU Yunxue, JIA Xu, FAN Zhaorong, et al. Preparation and properties of polyurethane/aluminum foam composites[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 529-535.)

Preparation and Properties of Polyurethane/Aluminum Foam Composites

LIU Yunxue, JIA Xu, FAN Zhaorong, GU Yaxin, WANG Xiaodan

(School of Material Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To prepare a polyurethane/foam aluminum shock absorption composite (PU-AF) with recoverable damping mechanism. Study the damping mechanism of PU-AF shock-absorbing composite materials; The influence of foam aluminum bulk density on the static compression mechanical properties and energy absorption properties of PU-AF. The method involves conducting monotonic/cyclic compression tests on the prepared PU-AF composite material on a universal material testing machine, and studying the damping mechanism and energy absorption performance of the composite material through stress-strain curves. When the bulk density of foam aluminum was $0.70 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$, the yield strength and elastic modulus of PU-AF composites increased with the increase of the bulk density of foam aluminum at the same strain value. The

收稿日期:2023-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51908378)

作者简介:刘运学(1969—),男,教授,主要从事高分子建筑材料等方面研究。

energy absorption efficiency decreases after reaching a strain of 30% ,and the optimal strain range for energy absorption efficiency is between 25% and 35% . Polyurethane can significantly improve the strain recovery rate of composite materials; PU - AF is a good shock-absorbing composite material.

Key words: polyurethane; open-cell aluminum foam; volume density; strain recovery rate; energy absorption characteristics

近年来,世界各国发生了多次大型地震。20世纪70年代在河北发生的唐山大地震,使得唐山市区几乎所有的房屋倒塌,伤亡人数达到了二十多万^[1];2008年发生在四川的汶川大地震,造成10万km²的建筑物倒塌,伤亡人数达到四十五万^[2]。为此,各国都在研究如何有效地抵御地震所带来的破坏。传统的工程抗震结构试图把建筑材料做的更结实,以求用硬碰硬的方式去抵抗地震^[3-5]。这种方法对于一些小型地震是可以的,但不足以抵抗中大型地震,所以要寻找一种新型减震缓冲材料来抵抗地震所带来的危害。泡沫铝具有一定力学强度和阻尼性能,但这种阻尼属于不可恢复性阻尼^[6-7]。而地震属于外部交互变化的作用,要求减震材料具有可恢复的阻尼机制,而向球形开孔泡沫铝中填充高分子黏弹性材料聚氨酯形成的聚氨酯-泡沫铝(PU-AF)复合材料可以实现这种阻尼机制的可恢复性,使其既具有泡沫铝金属材料的强度,又具有聚氨酯高分子材料的弹性,这是目前研制金属/高分子减震缓冲复合材料中较为成功的例子^[8-11]。

目前,国内外学者针对泡沫铝性能研究较多,针对PU-AF复合材料的研究相对较少,多局限于作为包装材料使用。张伟等^[12]通过准静态压缩实验,研究了泡沫铝相对密度、聚氨酯含量、聚氨酯硬段质量分数对泡沫铝-聚氨酯复合材料力学性能的影响,研究结果表明,PU-AF复合材料力学性能和缓冲性能均随泡沫铝密度增大而增强。贺高峰等^[13]通过准静态压缩实验研究了泡沫铝相对密度、孔径对聚氨酯-泡沫铝复合材料准静态压缩力学性能、吸能性能、吸能效率和理

想吸能效率的影响,研究结果表明,聚氨酯-泡沫铝复合材料压缩性能和吸能性能随相对密度的增大而增大,随孔径的增大而增大。上述研究的PU-AF复合材料主要用于包装缓冲材料,对一些精密仪器进行包装缓冲。为了拓宽泡沫铝材料在土木工程领域中的应用,尤其是土木工程减震控制领域中的应用,就要设法提高泡沫铝材料的力学性能,改善泡沫铝材料与振幅相关的阻尼机制。传统复合材料的基体大多数是连续结构,增强体是以间断的状态分散在基体内部,这种复合方式对于复合材料力学性能的提高并不明显,而采用互穿网络结构可有效解决上述问题^[14]。S. Liu^[15]使用不同体积分数的泡沫铝制备了三种互穿相复合材料,并进行了压缩和循环压缩试验,对其力学行为进行研究。通过压缩试验发现,PU-AF复合材料的抗压强度随着铝体积分数的增加而增加。通过循环压缩试验发现,泡沫铝骨架和聚氨酯的弹性变形可以造成PU-AF复合材料的可恢复变形现象。基于此,笔者通过制备聚氨酯-泡沫铝网络互穿复合材料,将制备的PU-AF复合材料在万能材料试验机上进行单调循环压缩试验,由应力-应变曲线研究复合材料的阻尼机制和吸能性能,为PU-AF复合材料应用于土木工程结构振动控制提供技术依据。

1 实验

1.1 原材料及仪器设备

原材料主要包括:上海光胜保温建材有限公司生产的异氰酸酯(黑料)、组合聚醚(白料);帝蓝化工原料有限公司生产的脱模

剂:白凡士林;成都立辰安科技有限公司生产的负催化剂:亚磷酸三苯酯(TPP);北京中实强业泡沫金属材料有限公司生产的球形开孔泡沫铝。其规格为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,孔隙率为 70%,体积质量为 $0.70 \sim 0.85\text{ g/cm}^3$,形态如图 1 所示。

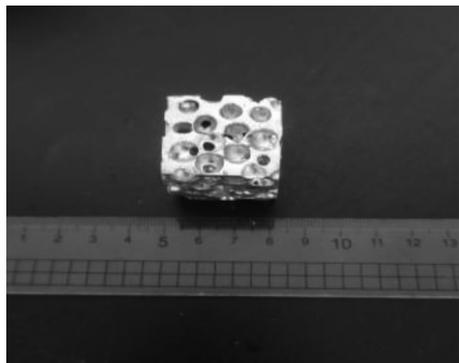


图 1 球形开孔泡沫铝

Fig. 1 Spherical opening aluminum foam

实验主要仪器为高铁科技股份有限公司生产的 TCS-2000 型万能试验机;上海穗兴机电发展有限公司生产的 SEM 多功能高速分散机。

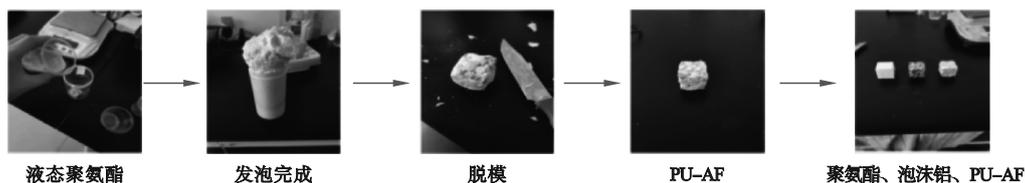


图 2 PU-AF 复合材料的制备

Fig. 2 Preparation of PU/AF Composites

表 1 PU-AF 试样基本参数

Table 1 Basic parameters of PU-AF sample

试样	体积质量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率/ %	孔径/ mm	数量/ 个
PU-AF-70	0.70 ~ 0.75	70	5.5	8
PdU-AF-75	0.75 ~ 0.80	70	5.5	8
PU-AF-80	0.80 ~ 0.85	70	5.5	8

1.3 性能测试

本次 PU-AF 复合材料压缩试验加载方法为位移加载控制,加载速度为 3 mm/min 。试验按照《多孔状和蜂窝状金属材料压缩试验方法》(GB/T 31930—2015)执行:首先将

1.2 聚氨酯-泡沫铝复合材料的制备

1.2.1 聚氨酯的制备

将异氰酸酯和组合聚醚按 1:1 的比例各量取 30 g 混合在一起,并加入 5 g 负催化剂亚磷酸三苯酯,采用多功能分散机高速搅拌 $10 \sim 15\text{ s}$ 后,得到聚氨酯泡沫的液态混合料,需现用现配。

1.2.2 PU-AF 复合材料的制备

复合前,在模具的四周涂上脱模剂白凡士林,使聚氨酯和泡沫铝复合固化后可顺利脱模。试块放入模具后,将制备的液态聚氨酯混合料迅速倒入模具中,然后封闭模具。此时聚氨酯体积不断膨胀,聚氨酯由于压力的作用会充分挤入到泡沫铝孔隙内部。复合完成后,脱模取出试样,打磨掉试块外围聚氨酯,自然风干 4 h ,即得到 PU-AF 复合材料。采用不同体积质量大开孔泡沫铝与液态聚氨酯泡沫混合料进行复合可得到不同体积质量的 PU-AF 复合材料。PU/AF 复合材料的制备过程如图 2 所示。三组泡沫铝试样基本参数见表 1。

万能试验机上下压片固定,将试块放在下压片上,调节上压片的位置开始测试^[15],所有试验均在室温下进行。

2 结果与分析

2.1 PU-AF、泡沫铝、聚氨酯力学性能比较

试验采用的泡沫铝体积质量为 0.80 g/cm^3 。PU-AF、纯泡沫铝和纯聚氨酯试块的长 \times 宽 \times 高均为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。试验得到三者的应力-应变曲线如图 3 所示。

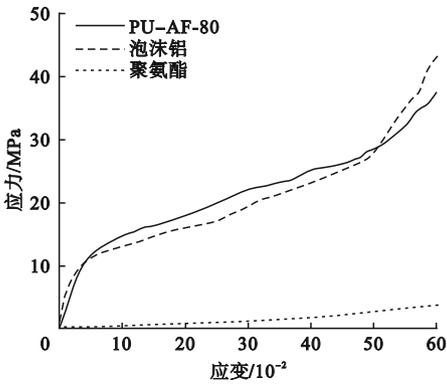


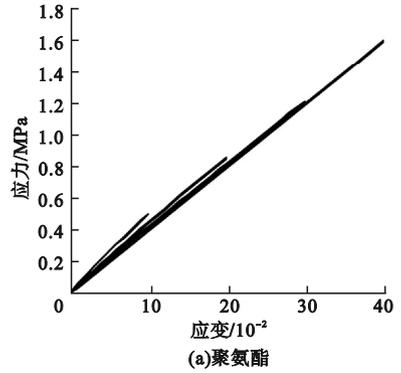
图3 PU-AF、泡沫铝、聚氨酯单调压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Monotonic compressive stress-strain curves of PU-AF, aluminum foam and polyurethane

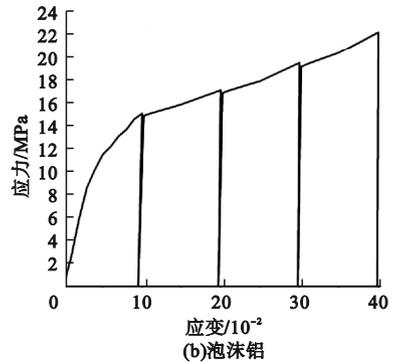
从图3可以看出,在相同应变下,纯聚氨酯泡沫材料承受的应力较泡沫铝、聚氨酯-泡沫铝复合材料小很多。当应变在0~5%时,PU-AF复合材料曲线与纯泡沫铝的应力-应变曲线差别不大。此阶段,聚氨酯还没有发挥作用,应力主要由泡沫铝承担;当应变在5%~50%时,逐渐进入塑性平台阶段,PU-AF的应力-应变曲线始终在纯泡沫铝曲线的上方,且二者的差值呈先增大后减小的趋势,这是由于在PU-AF中填入的聚氨酯具有压实缓冲吸能的特性,使得PU-AF的应力-应变曲线高于纯泡沫铝曲线;当应变大于50%时,纯泡沫铝的孔洞被压实,其应力增长速度明显加快。但PU-AF中加入的聚氨酯使得PU-AF复合材料的孔洞不能被完全压实,所以PU-AF的应力在此阶段的增长速度比纯泡沫铝要缓慢。

2.2 不同加载幅值下加/卸载压缩试验

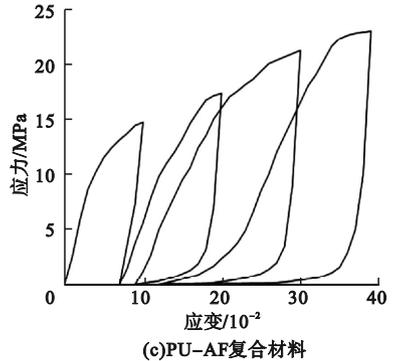
由于减震缓冲材料要具有可承受外界反复冲击加载的性能,所以只对缓冲减震材料做单调加载试验是不够的,因此本轮压缩试验对PU-AF试块进行不同加载幅值的加/卸载循环试验。分别在PU-AF、泡沫铝和聚氨酯压缩应变幅值为10%、20%、30%、40%处卸载,得到三者加/卸载应力-应变曲线如图4所示。



(a)聚氨酯



(b)泡沫铝



(c)PU-AF复合材料

图4 不同加载幅值下材料应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under different loading amplitudes

在压缩试验中,材料的应变恢复率 λ 可表示为^[16]

$$\lambda = \frac{\theta_{\max} - \theta_u}{\theta_{\max}} \quad (1)$$

式中: θ_{\max} 为卸载前最大应变; θ_u 为卸载后的应变。

泡沫铝、聚氨酯、PU-AF复合材料在不同加载幅值下应变恢复率与应变的大致函数关系曲线如图5所示。从图中可以看出,在不同幅值下的加/卸载试验中,聚氨酯的应变恢复率始终保持在50%左右,说明聚氨酯在卸载后具有一定的恢复能力。纯泡沫铝的应

变恢复率随着应变的增加,由4%左右逐渐下降至0,说明纯泡沫铝金属材料在卸载之后,体积几乎是不可恢复的。而PU-AF复合材料的应变恢复率由7%持续上升,最后维持在20%左右,说明球形开孔泡沫铝在填入聚氨酯以后,聚氨酯能够在一定程度上提高复合材料的应变恢复率,进而实现PU-AF可恢复的阻尼机制。所以PU-AF复合材料可以作为减震缓冲材料应用在土木工程领域中。

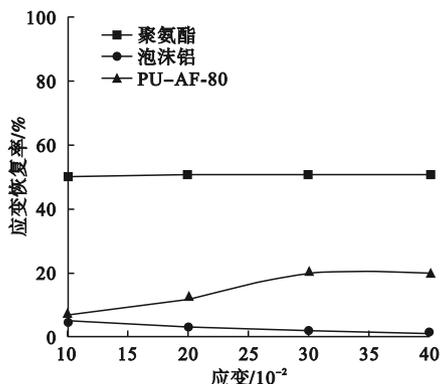


图5 不同加载幅值下的应变恢复率

Fig. 5 Strain recovery rate under different loading amplitudes

2.3 不同体积质量的PU-AF力学性能比较

对于泡沫铝来说,铝的体积分数、孔径、体积质量、孔隙率等都会影响PU-AF的力学性能,而泡沫铝的体积质量是主要影响因素。体积质量的计算方法是用物体的质量除以多孔材料在三维空间内的体积:

$$\rho = \frac{M}{V_1 + V_2 + V_3} \quad (2)$$

式中: ρ 为材料的体积质量; M 为物体的质量; V_1 为材料实体的体积; V_2 为闭孔空隙的体积; V_3 为开孔空隙的体积。多孔材料体积示意图如图6所示。

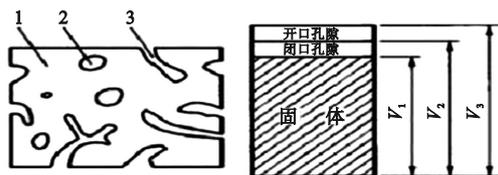


图6 多孔材料体积示意图

Fig. 6 Diagram of porous materials volume

选取的球形开孔泡沫铝按照体积质量的大小共分为三组,每组8个试块。第一组体积质量为 $0.70 \sim 0.75 \text{ g/cm}^3$,第二组体积质量为 $0.75 \sim 0.80 \text{ g/cm}^3$,第三组体积质量组为 $0.80 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$ 。分别进行单调压缩试验,进一步考察PU-AF的力学性能。不同体积质量的PU-AF应力-应变曲线如图7所示。从图中可以看出,泡沫铝体积质量直接影响PU-AF试样的抗压强度,在相同应变值下,泡沫铝的体积质量越高,对应的应力值越大。可见PU-AF复合材料的抗压强度随着泡沫铝体积质量的增加而增大。

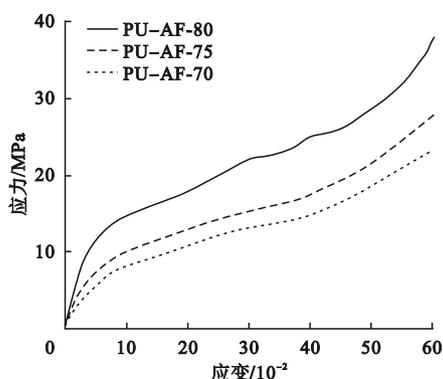


图7 不同体积质量PU-AF的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of PU-AF with different bulk densities

三组PU-AF复合材料的屈服强度和弹性模量如图8所示。从图中可以看出,PU-AF-70的屈服强度约为2.5 MPa,弹性模量约为50 MPa;PU-AF-75的屈服强度约为4.3 MPa,弹性模量约为90 MPa;PU-AF-80的屈服强度约为10 MPa,弹性模量约为200 MPa。PU-AF复合材料的屈服强度和弹性模量随着泡沫铝体积质量的增加而增大。PU-AF-75的屈服强度和弹性模量约为PU-AF-70的1.7倍,而PU-AF-80的屈服强度和弹性模量约为PU-AF-75的2.3倍。研究表明,PU-AF复合材料在体积质量为 $0.70 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$ 时,PU-AF的刚度和强度会随着泡沫铝体积质量的增加而得到不同程度的提高。

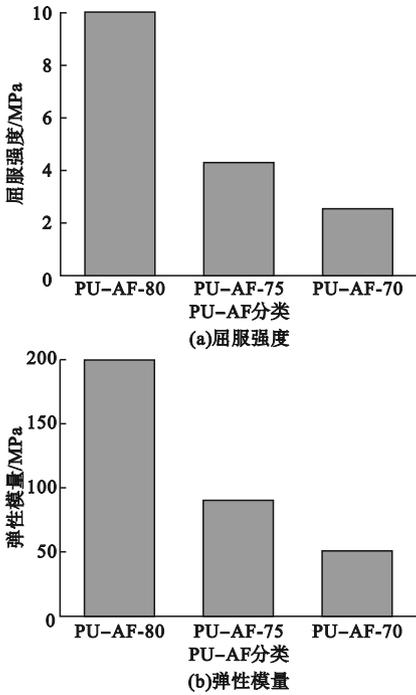


图8 不同体积质量的PU-AF单调压缩性能对比

Fig. 8 Comparison of monotonic compression properties of PU-AF with different bulk densities

2.4 不同体积质量的PU-AF吸能特性比较

吸能特性可以用吸能能力和吸能效率来表征^[17],PU-AF的应力-应变曲线与横坐标轴围成的面积表示该种材料的吸能能力。PU-AF实际吸收能量与理论吸收能量的比值就是吸能效率。吸能能力 W 和吸能效率 E 计算如下:

$$W = \int_0^{\theta} \sigma d\theta. \quad (3)$$

$$E = \frac{\int_0^{\theta} \sigma d\theta}{\sigma\theta}. \quad (4)$$

式中: θ 为应变; σ 为对应的压缩应力。

根据式(3)和式(4)可以分别计算出不同体积质量下PU-AF复合材料的吸能能力和吸能效率与应变的关系,其大致函数曲线关系如图9所示。从图中可以看出,PU-AF的吸能能力随着应变的增加而增加,体积质量相对较高的PU-AF-80,其吸能能力大于PU-AF-75和PU-AF-70。PU-AF的吸能

效率与应变的函数关系曲线呈抛物线型,先增大后减小,在应变为25%~35%时达到峰值。当PU-AF应变大于55%时,体积质量为0.80 g/cm³的PU-AF的吸能效率反而小于体积质量为0.75 g/cm³的PU-AF,这是由于聚氨酯对PU-AF的吸能能力起着主导作用,当PU-AF的形变过大时,体积质量过大的泡沫铝反而会限制聚氨酯的吸能能力,因此PU-AF的吸能效率有所降低。

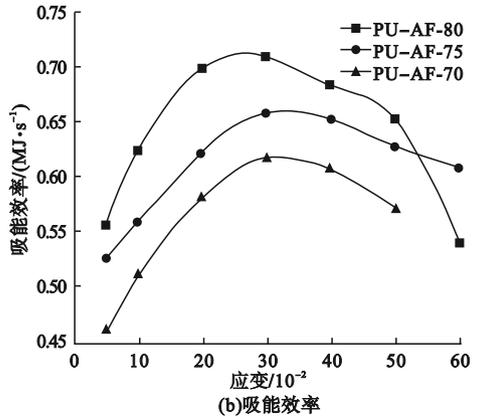
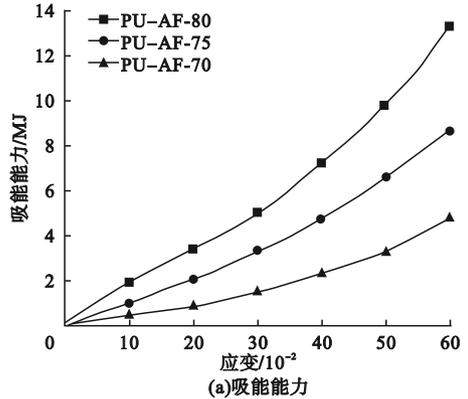


图9 应变率为1000/s的吸能特性曲线

Fig. 9 Energy-absorption efficiency curves at the strain rate of 1000/s

3 结论

(1)当应变为5%~50%时,PU-AF复合材料的抗压强度大于纯泡沫铝,且在应变为30%左右时,二者的差距达到最大。

(2)聚氨酯的压缩缓冲性能可以在一定程度上提高PU-AF的应变恢复能力,进而实现PU-AF复合材料可恢复的阻尼机制。

(3) 当泡沫铝的体积质量在 $0.70 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$ 变化时, PU - AF 复合材料的屈服强度、弹性模量均随泡沫铝体积质量的增加而增大。

(4) PU - AF 复合材料的吸能效率随着应变的增加先增大后减小, 当应变为 $25\% \sim 35\%$ 时, 吸能效率最佳。

参考文献

- [1] 苏幼坡, 张玉敏. 唐山大地震震害分布研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 18 - 21.
(SU Youpo, ZHANG Yumin. Research on distribution of disasters in Tangshan earthquake [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2006, 26(3): 18 - 21.)
- [2] 郭迅. 汶川大地震震害特点与成因分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 74 - 87.
(GUO Xun. Characteristics and mechanism analysis of the great Wenchuan earthquake. [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 29(6): 74 - 87.)
- [3] 李爱群, 丁幼亮. 工程结构抗震分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
(LI Aiqun, DING Youliang. Seismic analysis of engineering structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.)
- [4] 胡允棒. 地震与建筑抗震知识问答[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(HU Yunbang. Question and answer on earthquake and building seismic knowledge [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.)
- [5] 王亚勇, 戴国莹. 《建筑抗震设计规范》的发展沿革和最新修订[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 7 - 16.
(WANG Yayong, DAI Guoying. Evolution and present update of code for seismic design of buildings [J]. Journal of building structures, 2010, 31(6): 7 - 16.)
- [6] GOLOVIN I S, SINNING H R. Damping in some cellular metallic materials [J]. Journal of alloys and compounds, 2003, 355(1): 2 - 9.
- [7] MASSIMO G, VALERIO M, ANDREA R, et al. Procedures for damping properties determination in metal foams to improve FEM modeling [J]. Procedia materials science, 2014, (4): 233 - 238.
- [8] LIU Shaobo, LI Aiqun, HE Siyuan, et al. Cyclic compression behavior and energy dissipation of aluminum foam-polyurethane interpenetrating phase composites [J]. Composites part A: applied science and manufacturing, 2015, 78: 35 - 41.
- [9] 轩鹏. 高性能泡沫铝减振机理及力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
(XUAN Peng. Experimental study on the damping mechanism and mechanical properties of high-performance aluminum foam [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [10] ZHOU Xinhua, TU Weiping, HU Jianqing, et al. Preparation and characterization of two-component waterborne polyurethane comprised of water-soluble acrylic resin and HDI biuret [J]. Chinese journal of chemical engineering, 2006, 14(1): 99 - 104.
- [11] YOU Cao, YU Jiang, SHU Luzhao, et al. Effect of montmorillonite on kinetics of polyurethane preparation reaction [J]. Chinese chemical letters, 2008, 19(1): 115 - 118.
- [12] 张伟, 齐明思. 泡沫铝-聚氨酯复合材料制备及力学性能分析[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 35 - 40.
(ZHANG Wei, QI Mingsi. Preparation and mechanical property analysis of aluminum foam-polyurethane composites [J]. Packaging engineering, 2017, 38(21): 35 - 40.)
- [13] 贺高峰, 齐明思, 张伟, 等. 泡沫铝-聚氨酯复合材料力学及吸能性能分析[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 48 - 53.
(HE Gaofeng, QI Mingsi, ZHANG Wei, et al. Mechanical and energy absorption of foamed aluminum-polyurethane composites [J]. Packaging engineering, 2018, 39(21): 48 - 53.)
- [14] 贺克俭. 泡沫铝/聚氨酯复合材料阻尼器力学性能及其减震应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
(HE Kejian. Research on mechanical behaviors of aluminum foam/polyurethane composite dampers and their application in seismic energy dissipation [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.)
- [15] LIU S, LI A, XUAN P. Mechanical behavior of aluminum foam/polyurethane interpenetrating phase composites under monotonic and cyclic compression [J]. Composites part a: applied science and manufacturing, 2019, 116: 87 - 97.
- [16] 邵旭东. 泡沫铝-空心玻璃微珠/环氧树脂复合材料力学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
(SHAO Xudong. Foam aluminum-hollow glass microsphere/epoxy resin composite study of mechanical properties [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.)
- [17] 刘少波. 泡沫铝复合材料的力学性能及减震应用试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
(LIU Shaobo. Experimental study on mechanical behaviors of aluminum foam composites and their application in seismic energy dissipation [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.)
- [18] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 泡沫铝与聚氨酯泡沫铝吸能特性对比[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版) 2011, 27(2): 307 - 311.
(XIE Weihong, DU Hongtao, LI Shuncai. Comparative study of energy absorption performance for open-cell aluminum and polyurethane foam aluminum [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(2): 307 - 311.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)