



填充泡沫混凝土铝管组合挂板的吸能性能

周宏元 樊家乐 王小娟 刘浩

Energy absorption of foam concrete filled aluminum tube composite cladding

ZHOU Hongyuan, FAN Jiale, WANG Xiaojuan, LIU Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220811.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

泡沫铝填充碳纤维增强树脂复合材料薄壁管的压缩变形行为与吸能特性

Compressive deformation behavior and energy absorption of Al foam-filled carbon fiber reinforced plastic thin-walled tube

复合材料学报. 2020, 37(8): 1850–1860 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191206.002>

负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能

In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete

复合材料学报. 2020, 37(8): 2005–2014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191207.001>

球磨对碳纳米管增强泡沫铝基复合材料压缩与吸能性能的影响

Effect of ball milling on the compressive property and energy absorption capacity of the carbon nanotube reinforced aluminum composite foams

复合材料学报. 2018, 35(6): 1518–1524 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170713.002>

碳纤维增强环氧树脂复合材料圆管多胞填充结构吸能特性的准静态压缩试验

Quasi-static compression experimental study on energy absorption characteristics of multicellular structures filled with carbon fiber reinforced epoxy composite tubes

复合材料学报. 2021, 38(9): 2894–2903 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201201.003>

新型并联梯度蜂窝结构的面内力学性能

In-plane crushing behaviors of honeycombs with a novel parallel graded design

复合材料学报. 2020, 37(1): 155–163 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190417.003>

不同编织角碳纤维增强聚合物复合材料-Al方管的吸能特性

Energy-absorbing characteristics of carbon fiber reinforced polymer composite-Al square tubes with different braiding angles

复合材料学报. 2020, 37(3): 591–600 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190528.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220811.004

填充泡沫混凝土铝管组合挂板的吸能性能

周宏元^{1,2},樊家乐¹,王小娟^{*1},刘浩¹

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为提高金属圆管组合挂板的吸能性能, 提出一种填充泡沫混凝土铝管组合挂板。在铝管中分别填充不同密度(300 kg/m^3 、 700 kg/m^3 、 1100 kg/m^3)的泡沫混凝土, 并对单根填充泡沫混凝土铝管和填充泡沫混凝土铝管组合挂板在准静态压缩下的变形模式、力学性能和吸能性能进行试验研究。结果表明: 与单根空铝管相比, 填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土会小幅降低填充铝管的吸能性能, 随着填充物密度增加至 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 , 填充铝管的吸能性能大幅提升, 能量吸收总量分别提高 286% 和 815%; 与单根铝管压缩相比, 组合挂板中填充铝管产生的挤压作用会大幅提升空铝管和填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的比吸能, 分别提升 28.6% 和 68.9%, 而降低填充 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的比吸能, 分别降低 42.7% 和 38.1%。因此, 考虑组合挂板实际应用, 当泡沫混凝土填充物密度较小时, 建议选择较小铝管间距; 当泡沫混凝土填充物密度较大时, 建议选择较大铝管间距防止芯层铝管发生挤压。

关键词: 泡沫混凝土; 金属铝管; 组合挂板; 变形模式; 吸能性能

中图分类号: TB301; TB333 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)05-2885-12

Energy absorption of foam concrete filled aluminum tube composite cladding

ZHOU Hongyuan^{1,2}, FAN Jiale¹, WANG Xiaojuan^{*1}, LIU Hao¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To improve the energy absorption performance of metal circular tube composite cladding, foam concrete filled aluminum tube composite cladding was proposed in the present study. With consideration of different foam concrete densities of 300 kg/m^3 , 700 kg/m^3 and 1100 kg/m^3 , the deformation mode, mechanical properties and energy absorption performance of single foam concrete filled aluminum tube, as well as foam concrete filled aluminum tube composite cladding under quasi-static compression, were experimentally investigated. The results show that the energy absorption of the aluminum tube filled with 300 kg/m^3 foam concrete is slightly inferior to that of the hollow aluminum tube. With increasing the foam concrete density to 700 kg/m^3 and 1100 kg/m^3 , the energy absorption performance of the filled aluminum tube is significantly improved with the increased total energy absorption by 286% and 815%, respectively. Compared to the single aluminum tube, the mutual extrusion among tubes would greatly improve the specific energy absorption of the hollow aluminum tube and 300 kg/m^3 foam concrete filled composite claddings, which are increased by 28.6% and 68.9%, respectively. Nevertheless, the specific energy absorptions of 700 kg/m^3 and 1100 kg/m^3 foam concrete filled aluminum tube composite cladding decrease by 42.7% and 38.1% due to the mutual extrusion effect of aluminum tubes. Therefore, from the point view of the

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-07-16; 录用日期: 2022-07-28; 网络首发时间: 2022-08-12 13:37:48

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220811.004>

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1101005); 国家自然科学基金(52178096; 51808017; 51778028)

National Key Research and Development Program (2019YFD1101005); National Nature Science Foundation of China (52178096; 51808017; 51778028)

通信作者: 王小娟, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为建筑材料力学性能 E-mail: xiaojuanwang@bjut.edu.cn

引用格式: 周宏元, 樊家乐, 王小娟, 等. 填充泡沫混凝土铝管组合挂板的吸能性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2885-2896.

ZHOU Hongyuan, FAN Jiale, WANG Xiaojuan, et al. Energy absorption of foam concrete filled aluminum tube composite cladding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2885-2896(in Chinese).

practical application of the proposed foam concrete filled aluminum tube composite cladding, a small aluminum tube spacing is suggested with the low density of foam concrete filler, meanwhile, a large aluminum tube spacing is recommended to prevent the extrusion of aluminum tube with the high density of foam concrete filler.

Keywords: foam concrete; aluminum tube; composite cladding; deformation model; energy absorption

轻质夹层挂板具有轻质、比强度高、隔音隔热性能好、吸能效率高的特点，在航空航天、车辆舰船等领域已有广泛应用^[1-2]。随着研究的不断深入，其在防护领域也有了一定的应用^[3-4]。轻质夹层挂板的芯层通常由吸能材料或可压缩结构组成，因其存在较长的应力平台，故具有较好的吸能性能。近年来研究人员提出了大量的新型挂板芯层，包括聚合物^[5]、金属泡沫^[6]、负泊松比结构^[7]、折纸结构^[8]和蜂窝结构^[9]等。上述芯层虽具有良好的力学性能和吸能性能，但是其结构复杂、难以制作并且成本偏高，较难实现土木工程领域的广泛应用。

薄壁金属圆管作为传统的能量吸收器，具有易制作、成本低、延性好、吸能效率高等特点^[10-11]。但是，薄壁金属圆管的吸能性能受到其较低的平台力限制，研究人员为改善其吸能性能在金属圆管内部填入多种多孔材料，例如在铝管中填充泡沫铝^[12]，结果发现填充泡沫铝可以有效提高铝管的平均压溃力和初始最大屈服载荷，吸能性能显著增强。此外，研究人员对比了泡沫钢和泡沫铝填充金属圆管的吸能性能^[13]，结果发现二者皆可有效提高金属圆管的吸能性能，并且在铝管中填充泡沫钢比填充泡沫铝的单位体积能量吸收值更高。填充金属圆管组合挂板同样表现出较好的吸能性能。例如，研究人员通过试验和模拟的方法研究了填充聚合物泡沫铝管组合挂板的力学性能^[14-15]，与空铝管组合挂板相比，结果发

现填充聚合物后可有效提高挂板的吸能性能。然而，大部分填充的多孔材料都具有成本过高、填充技术复杂或污染环境的缺点。

泡沫混凝土作为一种轻质填充材料不仅具有成本低、易制作和环保的优点，还具有质量轻^[16]、保温性能好^[17]、耐火性能优异^[18]和能量吸收效率高^[19]等特点。近年来，泡沫混凝土优良的吸能性能受到越来越多的关注^[20-21]。然而，尽管泡沫混凝土的吸能性能有很大潜能，但易发生脆性破坏^[22]，导致泡沫混凝土无法充分发挥其吸能能力，因此通常将泡沫混凝土结合其他结构协同工作^[23]。本文提出了一种新型填充泡沫混凝土铝管组合挂板，通过准静态压缩试验研究填充泡沫混凝土铝管和填充泡沫混凝土铝管组合挂板的变形模式、力学性能和吸能性能。

1 填充泡沫混凝土铝管吸能性能

1.1 试件原材料和制作

铝管采用东莞市凯达金属材料科技有限公司所生产的6063-T6铝合金圆管，同时，采用相同铝合金材料制作了3个狗骨头标准试件进行准静态拉伸试验，测得铝合金的弹性模量为69.9 GPa，拉伸屈服强度为277 MPa，延伸率为13.6%；采用唐山北极熊建材有限公司生产的快硬硫铝酸盐水泥(R.SAC 42.5)制备泡沫混凝土，水泥基本参数见表1；发泡剂的主要材料是动物角蛋白，具有良好的气泡稳定性，泡沫密度为70 kg/m³；拌合水为实验室自来水。

表1 水泥基本参数

Table 1 Basic parameters of cement

Cement	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final	1 d	3 d	1 d	3 d
R.SAC 42.5	40	10	15	6.1	6.5	37.2	45.1

为保证泡沫混凝土具有良好的流动性可均匀密实的填入铝管中，根据JGJ/T 341—2014^[24]试验方法对泡沫混凝土浆体流动度进行测试。将内径80 mm、高80 mm的两端开口圆筒放置在水平玻璃板(500 mm×500 mm)上，将制备的泡沫水泥浆体灌入圆筒中直至装满，并将圆筒表面泡沫水泥

浆体刮平，随后将圆筒缓慢地竖直提起，使泡沫水泥浆体自然塌落。静置1 min后，采用直尺测量塌落体最大水平直径，即为泡沫水泥浆体的流动度。图1为3种不同密度泡沫混凝土水泥浆体流动度测试，每种密度泡沫混凝土浆体流动度测试3次取其平均值，300 kg/m³、700 kg/m³和

$1\ 100\ \text{kg/m}^3$ 3 次测试结果平均值分别为 $282\ \text{mm}$ 、 $361\ \text{mm}$ 和 $338\ \text{mm}$ ，结果表明制备的 3 种密度泡沫混凝土浆体具有良好的流动性，可均匀密实地填入铝管。

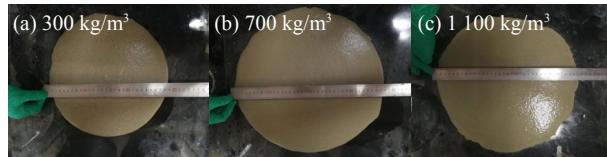


图 1 不同密度泡沫混凝土浆体流动度

Fig. 1 Slurry fluidity of foam concrete with different densities

试验制备了 3 种填充不同密度泡沫混凝土铝管，分别为 $300\ \text{kg/m}^3$ 、 $700\ \text{kg/m}^3$ 和 $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ ，

作为对照试验，同时制备了未填充的空铝管（等同填充 $0\ \text{kg/m}^3$ 泡沫混凝土），铝管的长度为 $400\ \text{mm}$ ，外径为 $40\ \text{mm}$ ，壁厚为 $1\ \text{mm}$ 。此外，为研究填充物的力学性能，制作了上述 3 种不同密度的 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 泡沫混凝土立方体试块，同时制作了水泥净浆立方体试块（等同于未引入泡沫的 $1\ 700\ \text{kg/m}^3$ 泡沫混凝土）。填充泡沫混凝土铝管、空铝管、泡沫混凝土和水泥净浆立方体试块均进行 3 组重复试验，综上，填充泡沫混凝土铝管 (AT-FC) 试件 9 件，空铝管试件 3 件，泡沫混凝土 (FC) 试块 9 块，水泥净浆试块 3 块。本试验中的 FC 配合比见表 2。试件汇总见表 3。

表 2 不同密度的泡沫混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of foam concrete with different densities

Foam concrete density/(kg·m ⁻³)	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				Water-cement ratio
	Cement	Water	Water reducer	Foam	
300	159.92	79.96	0.48	60.12	0.5
700	438.04	219.02	1.31	42.95	0.5
1 100	716.16	358.08	2.15	25.77	0.5
1 700	1 133.33	566.67	3.40	0	0.5

表 3 泡沫混凝土和填充泡沫混凝土铝管试件汇总

Table 3 Summary of foam concrete and aluminum tubes filled with foam concrete

Specimen	Foam concrete density/(kg·m ⁻³)	Specimen	Foam concrete density/(kg·m ⁻³)
FC-300	345	AT-FC-0	0
FC-700	713	AT-FC-300	313
FC-1100	1 126	AT-FC-700	689
FC-1700	1 784	AT-FC-1100	1 098

Notes: FC—Foam concrete; AT-FC—Aluminum tubes filled with foam concrete.

FC 制作过程如下：(1) 将发泡剂和水以 $1:40$ 的体积比混合并充分搅拌制发泡液，将发泡液灌入发泡机中制备出气泡稳定、细小且均匀的泡沫；(2) 将水泥、水和减水剂充分混合并搅拌成均匀泥浆；(3) 保持搅拌的同时，将制备好的泡沫逐渐添加到浆液中，直至充分混合；(4) 将带气泡的水泥浆浇铸到尺寸为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 的塑料模具中， $4\ \text{h}$ 后试件脱模，并送入温度为 $(20 \pm 3)\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $90\% \sim 95\%$ 的养护室养护 3 天。

AT-FC 制备过程如下：(1) 用保鲜膜和胶带密封住铝管一端，如图 2 所示；(2) 将制备的泡沫混凝土浆体从未封闭的一端灌入铝管中，同时不断小幅度振动铝管并用小棒在管内缓慢搅拌使其填

充均匀密实；(3) 将填充泡沫混凝土铝管竖直放置在养护室内 $4\ \text{h}$ ；(4) 当泡沫混凝土填充物具有一定强度后，将铝管端部的胶带和保鲜膜拆除，水平放置在养护室中养护 3 天。



图 2 填充泡沫混凝土铝管试件制作过程

Fig. 2 Fabrication process of foam concrete filled aluminum tube

1.2 准静态压缩试验

由于泡沫混凝土立方体试块和填充泡沫混凝土铝管的承载力不同，因此对两类不同试件采用不同的试验机开展准静态压缩试验。对于泡沫混凝土试块，采用美特斯工业系统有限公司生产的

MTS Exceed E45 电子万能试验机 (300 kN) 进行加载，并且为了使试块受力均匀，在试块两端放置面积略大于试块截面积的钢片作为加载板。对于空铝管和填充泡沫混凝土铝管，采用深圳三思检测技术有限公司生产的 YAW6306 电液伺服试验机 (3 000 kN)。对于两类不同试件，加载方式均采用位移控制加载，加载速度为 2.5 mm/min (泡沫混凝土试块和填充管的名义应变率分别为 $0.417 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.04 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)，并记录压缩过程中试件的变形模式和载荷-位移数据。加载装置分别如图 3 所示。

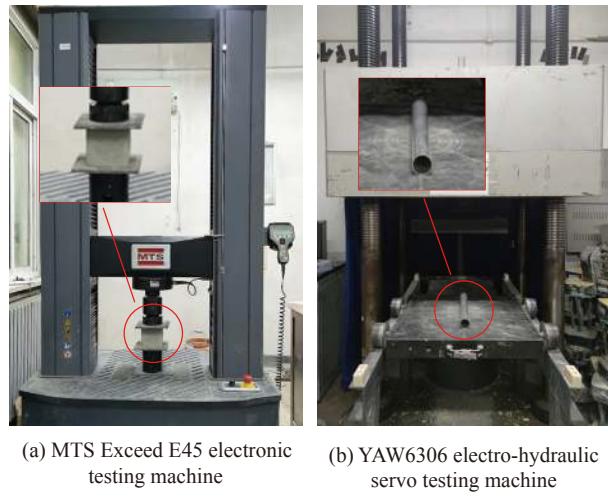


图 3 准静态压缩试验装置

Fig. 3 Experimental set-up for quasi-static compressive test

1.3 试验结果与讨论

1.3.1 泡沫混凝土

通过观察泡沫混凝土试块在准静态压缩试验下的破坏过程发现，不同密度的泡沫混凝土试块表现出基本相同的破坏模式，图 4 列举了以 700 kg/m^3 泡沫混凝土试块为例的破坏模式。在加载初始阶段，试件基本保持完整。随着压缩位移的增加，试件表面出现大量垂直裂缝，继续加载导致垂直裂缝发展为贯穿裂缝，同时外部大量泡

沫混凝土剥落。最终，当压缩位移到一定程度后，泡沫混凝土压缩密实。

图 5 绘制了上述 4 种不同密度泡沫混凝土试块的名义应力-应变曲线。除密度为 1700 kg/m^3 (水泥净浆) 的泡沫混凝土试块外，其他密度泡沫混凝土试块均表现出 3 个阶段，即弹性阶段、平台阶段和致密化阶段。在弹性阶段，较小的压缩变形使试块主要表现出弹性力学性能。在试块达到峰值应力后，形成的贯穿裂缝导致其承载力迅速降低，泡沫混凝土进入平台阶段。不断增加的压缩位移致使泡沫混凝土试块逐渐被压溃，试块承载力呈现稳定的平台阶段。当压缩位移较大时，试块进入致密化阶段，应力迅速增加。试验数据表明随着密度的增加，泡沫混凝土的峰值应力和平台应力显著增加。值得注意的是，水泥净浆试块在达到峰值应力后发生脆性破坏，伴随着临界垂直贯穿裂缝的形成，其承载力突然丧失。因此，水泥净浆试块在峰值应力后无法提供稳定的承载力，其平台应力及能量吸收可忽略不计。

材料的吸能性能通常可采用在压实应变之前的能量吸收总量和单位质量的比吸能等参数进行评估。本文采用能量吸收效率 E_f 来确定材料的压实应变 ε_D ^[25]，图 6 绘制了 300 kg/m^3 泡沫混凝土的压实应变和能量吸收效率关系，其中 σ_a 是泡沫混凝土在应变为 ε_a 时的应力， ε_D 和 σ_D 分别是压实应变和对应的应力。能量吸收效率 E_f 定义为

$$E_f(\varepsilon_a) = \frac{1}{\sigma_a} \int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, 0 < \varepsilon_a < 1 \quad (1)$$

其中： $\sigma(\varepsilon)$ 为材料在准静态压缩下的应力应变曲线。当吸能效率 E_f 达到最大值时所对应的应变即为压实应变 ε_D ，可由下式求出：

$$\left. \frac{dE_f(\varepsilon_a)}{d\varepsilon_a} \right|_{\varepsilon_a=\varepsilon_D} = 0, 0 < \varepsilon_a < 1 \quad (2)$$

在确定压实应变 ε_D 后，其所对应的压缩位移 l_1



图 4 700 kg/m^3 的泡沫混凝土立方体试块准静态压缩变形破坏模式

Fig. 4 Deformation process and failure mode of cubic foam concrete specimen with density of 700 kg/m^3 under quasi-static compression

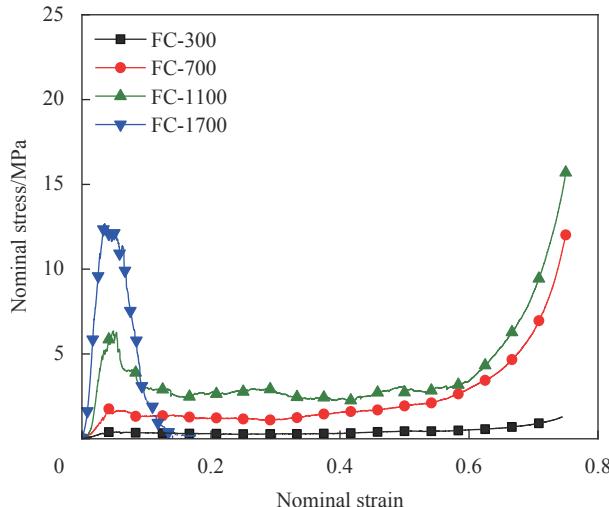
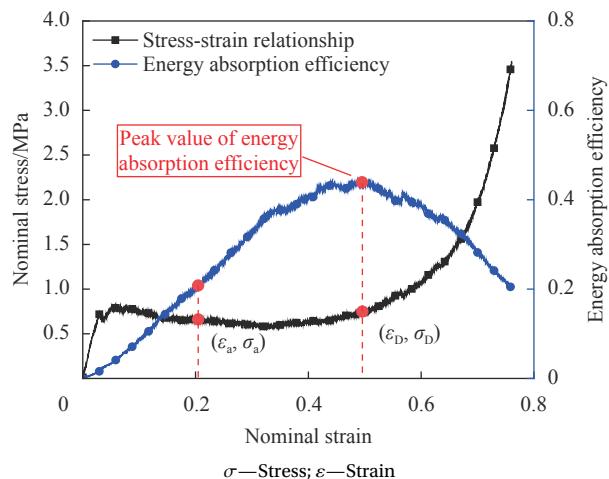


图 5 4种不同密度泡沫混凝土名义应力-应变曲线

Fig. 5 Nominal stress-strain curves of foam concrete with four different densities

图 6 300 kg/m³ 泡沫混凝土压实应变测定Fig. 6 Determination of densification strain of 300 kg/m³ foam concrete

用于计算材料的能量吸收总量 E ，如下式所示：

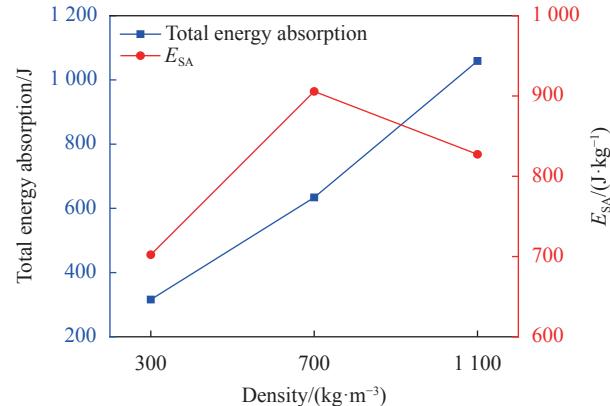
$$E = \int_0^{l_1} P dl \quad (3)$$

其中： P 是材料对应于压缩位移为 l 时的力； l_1 是压实应变所对应的压缩位移。比吸能 E_{SA} 定义为材料的能量吸收总量 E 与材料质量 m 的比值，如下式所示：

$$E_{SA} = \frac{\int_0^{l_1} P dl}{m} \quad (4)$$

图 5 中不同密度泡沫混凝土试块的名义应力-应变曲线，利用式(3)和式(4)计算试块的能量吸收总量 E 和 E_{SA} ，相应结果如图 7 所示。结果显示，随着密度的增加，泡沫混凝土试块的能量吸收总

量增加，然而试块的 E_{SA} 先增加后减少。由式(3)和式(4)可知，材料的能量吸收总量由平台应力和压实应变共同决定，材料的比吸能由能量吸收总量和材料总质量决定。如图 5 所示，随着泡沫混凝土密度增加，虽压实应变呈现小幅度降低，但其平台应力大幅增加，促使泡沫混凝土的能量吸收总量逐渐增大。对于低密度泡沫混凝土，虽具有较小的质量和较大的压实应变，但其平台应力非常低，最终导致其 E_{SA} 较低。虽然高密度泡沫混凝土具有较高的能量吸收总量，但更大的质量导致其 E_{SA} 不高。在密度 300 kg/m³、700 kg/m³ 和 1 100 kg/m³ 泡沫混凝土试块中，尽管密度 700 kg/m³ 的试块未具备最高的能量吸收总量，但其具有最高的 E_{SA} ，表现出最优越的能量吸收能力，更适合用作理想吸能材料。

图 7 不同密度泡沫混凝土的能量吸收总量和比吸能 E_{SA} Fig. 7 Total energy absorption and specific energy absorption E_{SA} of foam concrete with different densities

1.3.2 填充泡沫混凝土铝管

为研究空铝管和填充泡沫混凝土铝管的力学性能，对填充不同密度泡沫混凝土铝管试件进行了准静态压缩试验，其破坏模式如图 8 所示，其中试件标号 AT-FC 后的数字代表填充泡沫混凝土的密度，例如：AT-FC-300 试件为填充 300 kg/m³ 泡沫混凝土铝管，其中填充泡沫混凝土密度为 0 kg/m³ 即为空铝管。空铝管在加载初始阶段产生横向变形，直到空铝管顶部、底部和两侧分别出现一个塑料铰，形成的塑性铰使空铝管可发生更大的变形。最后，铝管在顶部和底部产生大程度内凹变形，导致顶部和底部分别增加了两个塑性铰，最终空铝管形成共计 8 个塑性铰的“花生状”变形模式，如图 9(a) 所示，这与之前的研究结果一致^[26]。对于填充泡沫混凝土铝管，在加载初期

与空铝管具有相似的变形模式，即在铝管的顶部、底部和两侧分别出现一个塑性铰，同时观察到一些竖向裂缝在泡沫混凝土中出现并迅速发展。在进一步压缩后，由于泡沫混凝土的持续支撑作用，铝管的顶部和底部分别只增加了一个塑性铰，最终填充泡沫混凝土铝管形成共计6个塑性铰的“椭圆形”变形模式，如图9(b)所示。随着压缩位移的继续增加，泡沫混凝土开始破碎，但因铝管约束泡沫混凝土的横向变形，导致其迅速进入致密化阶段，填充泡沫混凝土铝管被压实。此外，铝管的两端并未进行封闭处理，因此有少量的泡沫混凝土碎片从铝管端口挤出。

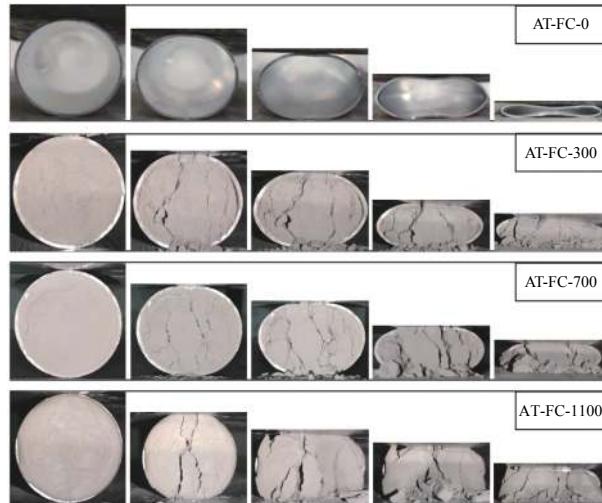


图8 填充不同密度泡沫混凝土铝管破坏模式

Fig. 8 Failure modes of aluminum tubes filled with different densities of foam concrete

图10展示了各试件在准静态压缩下的载荷-位移曲线，其中 F_D 指的是在材料达到压实力移 X_D 时的力。结果表明：与空铝管相比，随着泡沫混凝土密度的增加，填充泡沫混凝土铝管表现出更高的平台力，但压实力移迅速减小。值得注意

的是，当空铝管产生较大程度变形时，其两侧内外壁处较大的压缩和拉伸变形导致空铝管两侧产生了少量裂纹。当压缩位移达到约27 mm时，两侧形成的裂纹导致空铝管的载荷稍有下降，如图10(a)所示。对于填充泡沫混凝土铝管，由于泡沫混凝土的连续支撑作用，铝管两侧未观察到明显裂纹，因此填充泡沫混凝土铝管的载荷随着压缩位移的增加而持续增加。

根据图10所示的载荷-位移曲线，结合式(3)和式(4)计算各试件的能量吸收总量 E 和比吸能 E_{SA} ，如图11所示。结果表明，随着填充物密度的增加，填充泡沫混凝土铝管的能量吸收总量和比吸能 E_{SA} 先下降后升高。相较于空铝管，虽然填充300 kg/m³泡沫混凝土铝管的平台力略有提高，但压实力移显著降低，从32.3 mm降至22.6 mm，导致其能量吸收总量降低，同时总质量增加导致其 E_{SA} 进一步下降。当泡沫混凝土的密度进一步增加至700 kg/m³和1100 kg/m³时，虽然压实力移继续减小，但其载荷大幅增加，促使其能量吸收总量和 E_{SA} 增加。由于不同密度泡沫混凝土铝管中填充物的质量不同，导致铝和泡沫混凝土材料所占质量分数不同，因此很难采用各试件的 E_{SA} 对其吸能性能进行公平比较。根据图11所示各试件的能量吸收总量趋势，填充700 kg/m³和1100 kg/m³泡沫混凝土更有利于试件能量吸收。

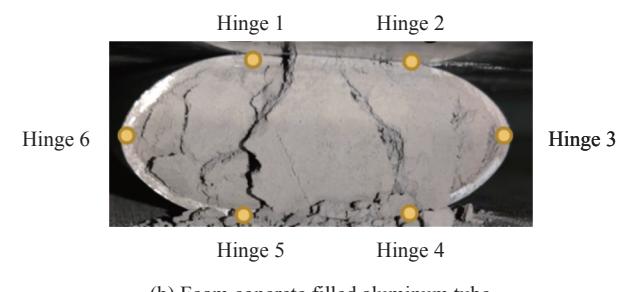
通过填充铝管在压缩过程中塑性铰消耗的能量可计算出压缩位移至 a 时铝管所消耗的能量，铝管的塑性弯曲能 E_T 计算如下^[27]：

$$E_T = 2bT^2\sigma_y \arcsin\left(\frac{a}{D}\right) \quad (5)$$

其中： b 为铝管轴向长度； T 为铝管壁厚； σ_y 为铝的拉伸屈服强度； D 为铝管外径。



(a) Hollow aluminum tube



(b) Foam concrete filled aluminum tube

图9 空铝管和填充泡沫混凝土铝管的变形模式

Fig. 9 Deformation modes of hollow and foam concrete filled aluminum tube

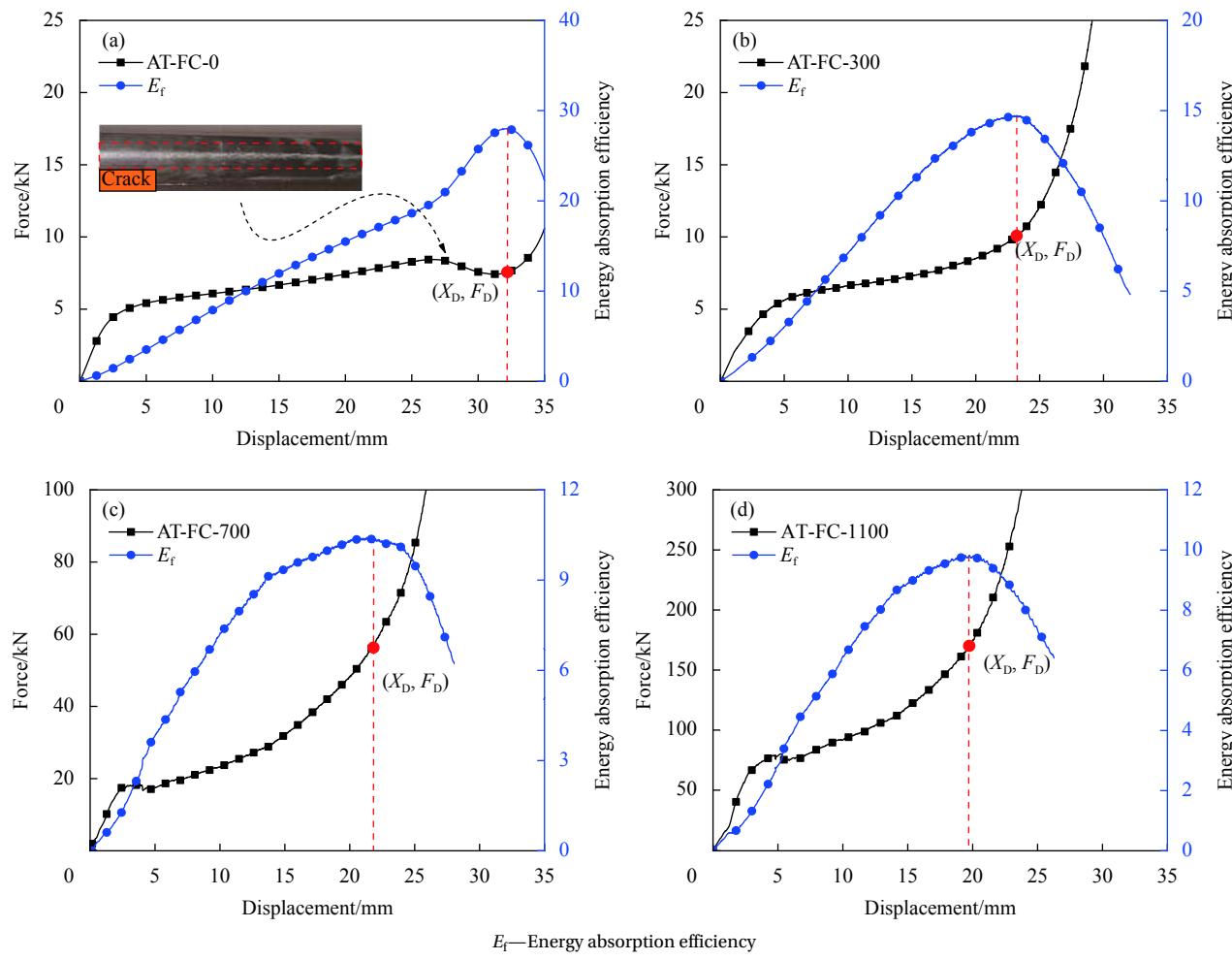
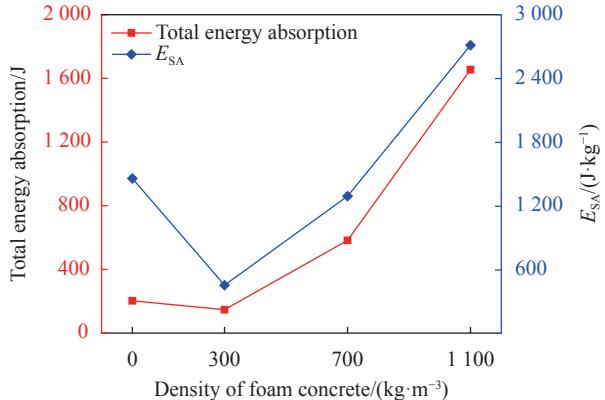


图 10 填充不同密度泡沫混凝土铝管的载荷-位移曲线

Fig. 10 Force-displacement curves of aluminum tubes filled with different densities of foam concrete

图 11 填充不同密度泡沫混凝土铝管的能量吸收总量和 E_{SA} Fig. 11 Total energy absorption and specific energy absorption E_{SA} of aluminum tubes filled with different densities of foam concrete

根据式(5)计算填充 300 kg/m^3 、 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管分别压缩至压实位移时，铝管所产生的塑性弯曲能，即铝管在压缩过程中的能量吸收量分别为 133.0 J 、 124.7 J 和 68.6 J 。

填充泡沫混凝土铝管吸能性能见表 4，填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管在准静态压缩试验中 91.3% 的能量由铝管吸收。但随着泡沫混凝土密度增加，填充铝管的压实应变减小，导致相同变形模式的铝管所吸收的能量减少，同时高密度泡沫混凝土因具有较高的平台应力，促使其能量吸收总量大幅增加。当填充物泡沫混凝土密度增大至 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 时，泡沫混凝土分别吸收了 78.6% 和 95.8% 的填充铝管的能量吸收总量。

2 组合挂板的吸能性能

2.1 组合挂板制备及试验设计

组合挂板由两块钢板和 8 根填充泡沫混凝土铝管组成，如图 12 所示。两块钢板分别用于前表板和后背板，尺寸均为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。8 根填充泡沫混凝土铝管用于组合挂板的能量吸收芯层，铝管长度为 400 mm ，外径为 40 mm 、壁

表 4 泡沫混凝土填充铝管的吸能性能

Table 4 Energy absorption of the foam concrete filled aluminum tube

Specimen	Densification displacement/mm	Total energy absorption/J			Specific energy absorption/(J·kg ⁻¹)
		Aluminum tube	Foam concrete filler	Foam concrete filled aluminum tube	
AT-FC-0	32.3	203.1	—	203.1	1 460.9
AT-FC-300	22.6	133.0	13.9	146.9	457.8
AT-FC-700	21.4	124.7	458.0	582.7	1 294.8
AT-FC-1100	17.7	68.6	1 586.4	1 655.0	2 713.1

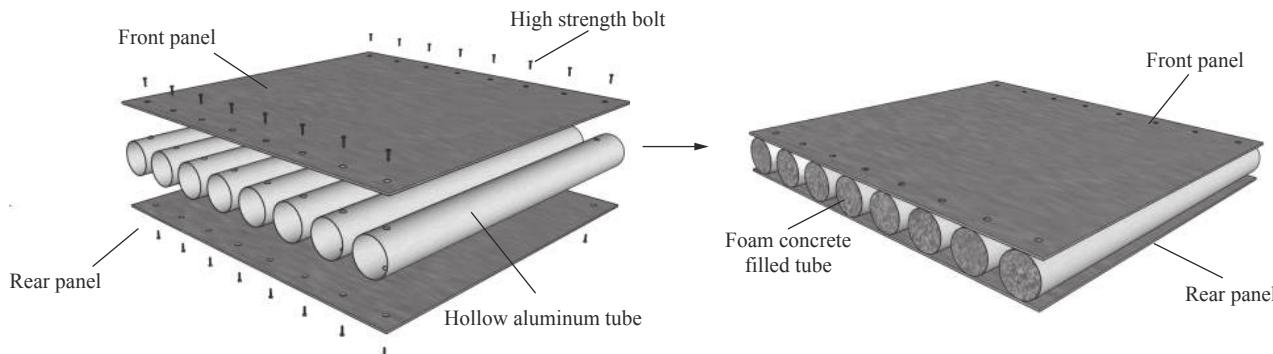


图 12 组合挂板安装示意图

Fig. 12 Installation diagram of composite cladding

厚为 1 mm。考虑 3 种不同密度的泡沫混凝土填充，即 300 kg/m^3 、 700 kg/m^3 和 $1 100 \text{ kg/m}^3$ ，且泡沫混凝土的填充方式与 1.1 节中相同。前表板与芯层、芯层与后背板均由 M6 高强平头螺栓连接。最终共制作了 4 种不同芯层的组合挂板，即空铝管芯层、填充 300 kg/m^3 、 700 kg/m^3 和 $1 100 \text{ kg/m}^3$ 泡沫混凝土铝管芯层。

采用 YAW6306 电液伺服试验机 (3 000 kN) 对试件进行准静态压缩试验，试验设备如图 3(b) 所示。加载方式采用位移控制加载，加载速度为 2.5 mm/min (名义应变率为 $1.04 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)，并在加载过程中记录挂板变形模式和载荷-位移数据。在试验过程中，每 6 mm 压缩位移捕捉挂板的变形模式。由于填充 $1 100 \text{ kg/m}^3$ 泡沫混凝土铝管组合挂板的压实应变较小，因此每 4 mm 压缩位移记录其变形模式。

2.2 试验结果与讨论

2.2.1 组合挂板中芯层的响应过程

组合挂板在准静态压缩试验下的响应过程和组合挂板最终变形状态如图 13 所示，图中试件号 CC-AT-FC 分别表示组合挂板、铝管和泡沫混凝土的缩写，其后的数字代表泡沫混凝土填充物的密度。对于空铝管组合挂板，其芯层空铝管的初期变形模式与 1.3.2 节的单根空铝管压缩的变形

模式相似，在形成 4 个塑性铰后，芯层空铝管产生了更大的横向变形，导致了相邻的空铝管发生接触并相互挤压，使其顶部和底部产生内凹变形并分别增加了两个塑性铰。最终，在大程度压缩位移下，空铝管之间产生严重的相互挤压，每根空铝管形成 8 个塑性铰，其变形模式从单根压缩下的“花生状”变成“蝴蝶结”型。虽然组合挂板芯层空铝管与单根空铝管的塑性铰数相同，但组合挂板内的空铝管产生了更大程度的塑性变形，并且在其两侧形成了塑性区域。

对于填充泡沫混凝土铝管组合挂板，在加载初期其芯层填充铝管与 1.3.2 节的单根填充铝管表现出相似的变形模式，即在填充铝管的顶部、底部和两侧分别形成一个塑性铰，并随着压缩位移的增加，填充铝管的顶部和底部分别增加了一个塑性铰，形成 6 个塑性铰的变形模式。当压缩位移增大到一定程度后，组合挂板中的芯层填充铝管发生接触并相互挤压，使其产生了更大程度的塑性变形，且填充铝管两侧出现了大面积的塑性区域，导致组合挂板芯层填充铝管的变形模式从单根压缩时的“椭圆形”改变为“四边形”。

2.2.2 组合挂板芯层与单管能量吸收

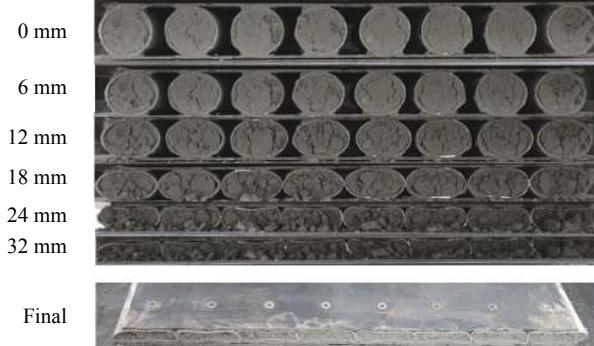
图 14 展示了组合挂板的载荷-位移曲线，再结合图 13 所示的变形模式，总结出组合挂板在准

Compressive displacement



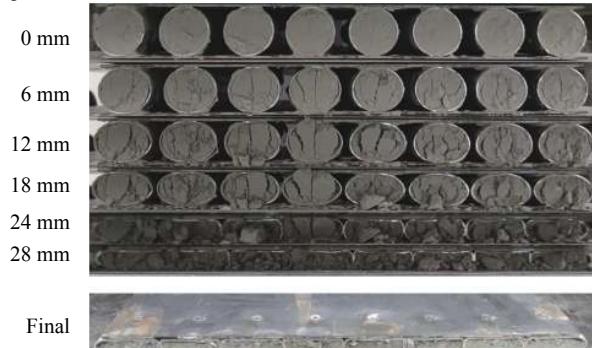
(a) CC-AT-FC-0

Compressive displacement



(b) CC-AT-FC-300

Compressive displacement



(c) CC-AT-FC-700

Compressive displacement



(d) CC-AT-FC-1100

CC—Composite hanging plate

图 13 填充不同密度泡沫混凝土组合挂板的破坏模式

Fig. 13 Failure mode of composite cladding with hollow and different densities of foam concrete filled aluminium tubes

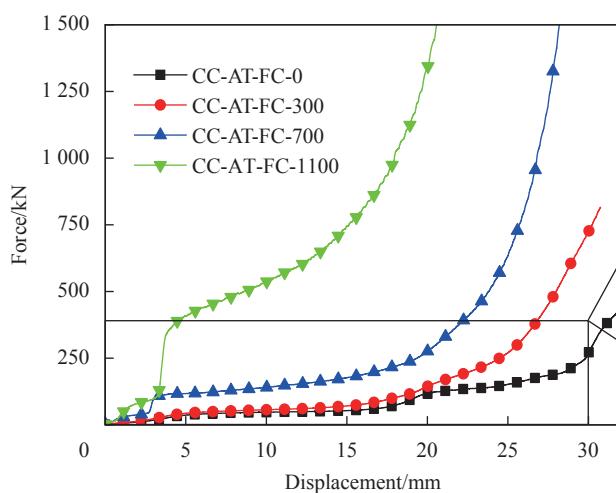
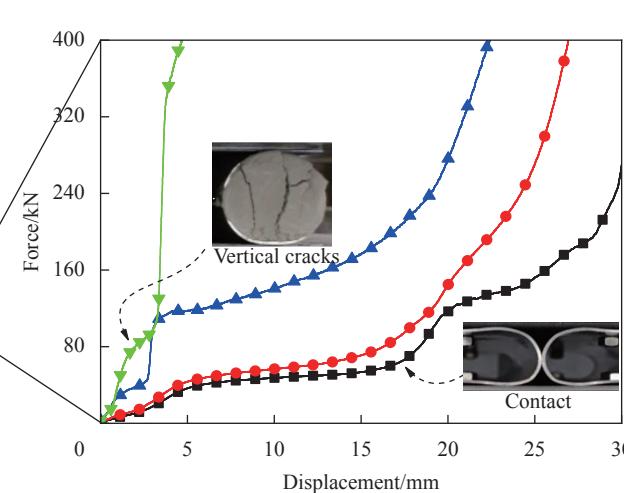


图 14 空铝管和填充不同密度泡沫混凝土铝管组合挂板的载荷-位移曲线

Fig. 14 Force-displacement curves of composite cladding with hollow and different densities of foam concrete filled aluminium tubes

静态压缩下的响应过程可分为两个阶段，即单管压缩阶段和多管相互挤压压缩阶段。对于空铝管组合挂板，在单管压缩阶段形成稳定的平台力，

当压缩位移达到 17 mm 时，铝管开始相互接触和挤压，促使其载荷显著提高。填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的芯层填充铝管接触后载荷



迅速提升，且由于填充铝管的约束作用及填充铝管的相互挤压，导致泡沫混凝土填充物迅速被压实。填充 700 kg/m^3 、 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的压实应变进一步减小，当填充铝管相互挤压时，泡沫混凝土已接近密实，挤压作用加速泡沫混凝土的密实。同时，芯层在致密化阶段载荷大幅增长，因此导致挤压作用所带来的载荷提升幅度不明显。根据式(3)和式(4)计算组合挂板中单根填充泡沫混凝土铝管的能量吸收总量 E 和 E_{SA} ，并与 1.3.2 节中填充泡沫混凝土铝管的能

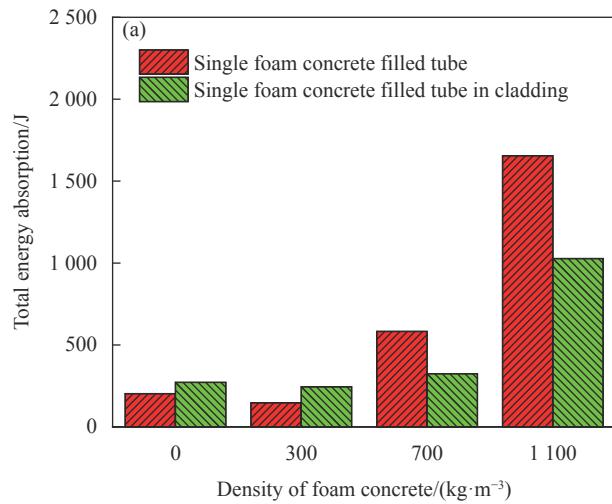


图 15 单根填充铝管和组合挂板中填充铝管在准静态压缩下的吸能性能

Fig. 15 Energy absorption of single foam concrete filled aluminium tube and filled aluminum tube in composite cladding under quasi-static compression

根据组合挂板的载荷-位移(图 14),芯层铝管的挤压作用在加载后期大幅提升了组合挂板的载荷。同时,芯层铝管的挤压作用对空铝管和填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的压实位移影响较小,如图 16 所示,因此提高了其吸能性能。芯层铝管的挤压作用大幅降低了填充 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的压实位移,导致其能量吸收急剧降低。相较于单独压缩填充铝管,空铝管和填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的压实位移降幅较小,但结合 2.2.1 节中组合挂板的变形模式(图 13),芯层铝管的挤压作用使组合挂板中铝管的塑性变形区域和程度均增大,因此铝管自身的能量吸收增加。填充铝管的挤压作用会进一步约束泡沫混凝土填充物,使其载荷提高,在压实位移相差较小的情况下提升了泡沫混凝土的吸能性能。因此,芯层铝管的挤压作用大幅提升了空铝管和填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的吸能性能。但芯层铝管的挤压作用

量吸收总量 E 和 E_{SA} 进行比较, 如图 15 所示, 泡沫混凝土密度对二者的吸能性能影响一致, 即随着泡沫混凝土密度的增加, 填充铝管的能量吸收总量和 E_{SA} 先降低后增加。此外, 与压缩单根填充铝管相比, 芯层铝管的挤压作用大幅提高了空铝管和填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板芯层的 E_{SA} , 分别提高 28.6% 和 68.9%。然而, 芯层铝管的挤压作用降低了填充 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板芯层的 E_{SA} , 分别降低 42.7% 和 38.1%。

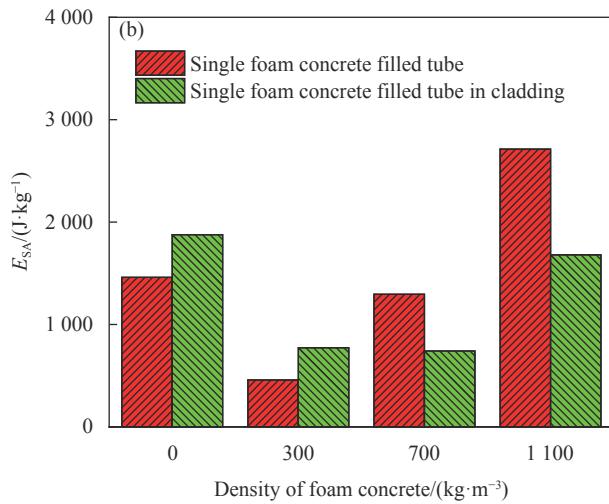


图 15 单根填充铝管和组合挂板中填充铝管在准静态压缩下的吸能性能

导致填充 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的压缩位移大幅降低，同时铝管均为

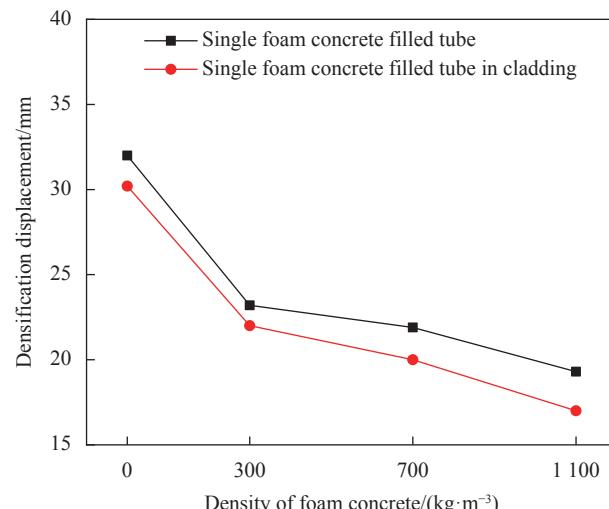


图 16 单根填充铝管和组合挂板中填充铝管的压实应变

Fig. 16 Densification displacement of single foam concrete filled aluminium tube and filled aluminum tube in composite cladding under quasi-static compression

6个塑性铰的变形模式，因此铝管的能量吸收减少。此外，芯层铝管的挤压作用会加速泡沫混凝土的密实，导致其快速达到压实位移，泡沫混凝土的能量吸收减少。因此，芯层铝管的挤压作用大幅降低了填充 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板的吸能性能。考虑组合挂板的实际应用，应当根据所选用的泡沫混凝土填充物密度来确定组合挂板芯层铝管的间距，当泡沫混凝土填充物密度较小时，应当选择小间距，利用挤压作用进一步提升组合挂板的吸能性能；当泡沫混凝土填充物密度较大时，应当选择大间距防止产生挤压作用降低组合挂板的吸能性能。

3 结论

提出了一种填充泡沫混凝土铝管组合挂板，通过对单根填充铝管和组合挂板的准静态压缩试验，研究了不同填充物密度、组合挂板芯层铝管的挤压作用对填充铝管的变形模式和吸能性能的影响，主要结论如下：

(1) 填充泡沫混凝土会改变空铝管的变形模式，从八塑性铰变为六塑性铰变形模式。此外，与空铝管相比，填充泡沫混凝土密度为 300 kg/m^3 时，填充铝管的吸能性能小幅度降低。当泡沫混凝土密度增大至 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 时，填充铝管的吸能性能增加，能量吸收总量分别增加286%和815%；

(2) 在加载初期，组合挂板芯层填充铝管与单根填充铝管的变形模式相同。在加载后期，组合挂板芯层铝管的挤压作用使其变形模式有所改变。与单独压缩的填充铝管相比，空铝管的变形模式从“花生状”改变为“蝴蝶结”型；填充泡沫混凝土铝管的变形模式从“椭圆形”改变为“四边形”，并在其两侧产生大范围的塑性区域；

(3) 组合挂板芯层铝管的挤压作用可大幅提升空铝管和填充 300 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板芯层的吸能性能，比吸能 E_{SA} 分别提升28.6%和68.9%。然而，芯层铝管的挤压作用降低了填充 700 kg/m^3 和 1100 kg/m^3 泡沫混凝土铝管组合挂板芯层的吸能性能， E_{SA} 分别降低42.7%和38.1%。本文推荐根据所选用的泡沫混凝土密度来确定组合挂板芯层中合理的铝管间距，当泡沫混凝土密度较小时，应当选择小间距；当泡沫混凝土密度较大时，应当选择大间距防止芯层铝管发生挤压。

参考文献：

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 1-12(in Chinese).
- [2] WANG Z, ZHOU Y, WANG X, et al. Multi-objective optimization design of a multi-layer honeycomb sandwich structure under blast loading[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2017, 231(10): 1449-1458.
- [3] 周昊, 郭锐, 刘荣忠, 等. 碳纤维增强聚合物复合材料方形蜂窝夹层结构水下爆炸动态响应数值模拟[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1226-1234.
ZHOU Hao, GUO Rui, LIU Rongzhong, et al. Simulations on dynamic responses of carbon fiber reinforced polymer composite sandwich plates with square honeycomb cores subjected to water blast[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(5): 1226-1234(in Chinese).
- [4] ZHANG J, ZHOU R, WANG M, et al. Dynamic response of double-layer rectangular sandwich plates with metal foam cores subjected to blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 265-275.
- [5] 薛启超, 邹广平, 何建, 等. 聚氨酯弹性体隔板夹层结构的等效参数计算[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 564-573.
XUE Qichao, ZOU Guangping, HE Jian, et al. Equivalent parameters calculation for sandwich plate with polyurethane elastomer core reinforced by crossing walls[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(3): 564-573(in Chinese).
- [6] 宋延泽, 王志华, 赵隆茂, 等. 撞击载荷下泡沫铝夹层板的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(3): 301-307.
SONG Yanze, WANG Zhihua, ZHAO Longmao, et al. Dynamic response of foam sandwich plates subjected to impact loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(3): 301-307(in Chinese).
- [7] 周宏元, 贾昆程, 王小娟, 等. 负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 2005-2014.
ZHOU Hongyuan, JIA Kuncheng, WANG Xiaojuan, et al. In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 2005-2014(in Chinese).
- [8] 柯力, 王自力, 王哲, 等. 空中爆炸冲击载荷下折叠式夹层板塑性动力响应研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(6): 797-804.
KE Li, WANG Zili, WANG Zhe, et al. Plastic dynamic response of folded sandwich panels under air-blast

- loading[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(6): 797-804(in Chinese).
- [9] ZHOU H Y, ZHANG X J, WANG X J, et al. Response of foam concrete-filled aluminum honeycombs subject to quasi-static and dynamic compression[J]. *Composite Structures*, 2020, 239: 112025.
- [10] XU F X, ZHANG X, ZHANG H. A review on functionally graded structures and materials for energy absorption[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 309-325.
- [11] BAROUTAJI A, ARJUNAN A, STANFORD M, et al. Deformation and energy absorption of additively manufactured functionally graded thickness thin-walled circular tubes under lateral crushing[J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111324.
- [12] 刘伟明, 程和法, 黄笑梅, 等. 开孔泡沫铝填充圆管的准静态压缩行为[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(6): 654-658.
- LIU Weiming, CHENG Hefa, HUANG Xiaomei, et al. Quasi-static compression behaviors of cylindrical tubes filled with open-cell aluminum foam[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(6): 654-658(in Chinese).
- [13] 张光成, 郭超群, 闫治坤, 等. 泡沫钢填充管的准静态压缩变形模式、力学性能及吸能特性[J]. *材料导报*, 2021, 35(24): 24158-24163.
- ZHANG Guangcheng, GUO Chaoqun, YAN Zhikun, et al. Quasi-static compression deformation mode, mechanical property and energy absorption performance of steel foam filled tube[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(24): 24158-24163(in Chinese).
- [14] YUEN S C K, CUNLIFFE G, DU PLESSIS M C. Blast response of cladding sandwich panels with tubular cores[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110: 266-278.
- WANG C, XU B, YUEN S C K. Numerical analysis of cladding sandwich panels with tubular cores subjected to uniform blast load[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 133: 103345.
- [16] RAMAMURTHY K, NAMBIAR E K K, RANJANI G I S. A classification of studies on properties of foam concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(6): 388-396.
- [17] CRANE B, GOODWORTH A D, LIQUORI M, et al. Multi-disciplinary testing of floor pads on stability, energy absorption, and ease of hospital use for enhanced patient safety[J]. *Journal of Patient Safety*, 2016, 12(3): 132-139.
- [18] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 398-410.
- SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(2): 398-410(in Chinese).
- [19] 周明杰, 王娜娜, 赵晓艳, 等. 泡沫混凝土的研究和应用最新进展[J]. *混凝土*, 2009(4): 104-107.
- ZHOU Mingjie, WANG Nana, ZHAO Xiaoyan, et al. Latest development of research and application on foam concrete[J]. *Concrete*, 2009(4): 104-107(in Chinese).
- [20] 支旭东, 郭梦慧, 王臣, 等. 泡沫混凝土填充圆钢管的轴压力学性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(10): 1927-1935, 1945.
- ZHI Xudong, GUO Menghui, WANG Chen, et al. Mechanical properties of circular steel tube filled with foam concrete under axial loads[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(10): 1927-1935, 1945(in Chinese).
- [21] 李方贤, 李建新, 肖民, 等. 轻钢龙骨-泡沫混凝土复合墙板的抗冲击性能[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(1): 68-75.
- LI Fangxian, LI Jianxin, XIAO Min, et al. Impact resistance of lightweight steel-framed foamed concrete composite wall panels[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(1): 68-75(in Chinese).
- [22] ZHOU H Y, ZHANG X J, WANG X J, et al. Improving energy absorption capacity of foam concrete with gradient and layered architecture[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 319: 126140.
- [23] ZHOU H Y, JIA K C, WANG X J, et al. Experimental and numerical investigation of low velocity impact response of foam concrete filled auxetic honeycombs[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106898.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泡沫混凝土应用技术规程: JGJ/T 341—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of foamed concrete: JGJ/T 341—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014(in Chinese).
- [25] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1981, 21(15): 1010-1014.
- [26] BAO R H, YU T X. Impact and rebound of an elastic-plastic ring on a rigid target[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 91: 55-63.
- [27] SHEN J H, LU G X, RUAN D, et al. Lateral plastic collapse of sandwich tubes with metal foam core[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 91: 99-109.