**请作者投稿时不要刷示例格式，更欢迎您单栏排，那样更清晰。**

**我们要求的是文章撰写要规范，而不是单双栏和具体字号的大小。**

**例如：标题不要超过20个字，单位实验室的写法，摘要是否突出四要素，最好不少于400字。**

**参考文献一般在第一作者姓上标注，如：Franco等[6]进行了带现浇板边节点的拟静力对比试验，Zerbe等[7]对带现浇板…..；也可直接用文献序号的形式提出，如：文献[2-3]对组合节点进行了单向荷载试验研究…..。如果采取了其中一种格式，就要尽量统一，不要一会儿标注在姓上，一会儿又文献序号，尤其在一个段落里。**

注意，三线表是否竖读？图的横纵轴是不是变量/单位？变量是否斜体？参考文献著录的是不是引用信息所在页？等等，欢迎您先阅读网站作者指南里的“**哈工大学报投稿要求**”。

———————————————————————————

DOI:10.11918/201810170

**RPUF填充薄壁圆钢管短柱构件的轴压力学性能**

支旭东1,2，郭梦慧[[1]](#footnote-1),2，武启剑1,2，李奇训1,2，周军3

（1.结构工程灾变与控制教育部重点实验室（哈尔滨工业大学），哈尔滨 150090；

2.土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室（哈尔滨工业大学），哈尔滨150090；

3.中国铁路哈尔滨局集团有限公司土地房产管理处，哈尔滨 150006）

**摘 要：**基于建筑工程领域存在的碰撞、冲击等工程背景，提出密度为300kg/m3的硬质聚氨酯泡沫（RPUF, rigid polyurethane foam）填充建筑圆钢管短柱吸能构件，为获得该类构件在轴压荷载作用下的基本力学性能及吸能能力，开展了3组空钢管和3组RPUF填充圆钢管短柱构件的轴压试验。试验结果表明：轴压荷载作用下，填充RPUF能够有效改善建筑圆钢管在轴压荷载作用下的叠缩变形模式，使构件趋于对称叠缩变形；同时，RPUF填充圆钢管构件较空钢管的首个峰值荷载及各项吸能指标都有了较大幅度的提升，且壁厚越薄，提升幅度越大，体现了填充RPUF对建筑圆钢管的力学性能及吸能能力的提升。基于ABAQUS/Explicit求解器建立RPUF填充圆钢管短柱构件的轴压有限元模型，将仿真结果与试验结果对比，以验证有限元模型的准确性，随后开展参数分析，结果表明RPUF填充圆钢管耗能能力随壁厚和管径的增大而增大。在Alexander经典叠缩模型的基础上，推导了平均压缩力预测公式，与试验结果和数值模拟结果对比发现该公式能够有效预测RPUF填充圆钢管短柱构件在轴压荷载作用下的平均压缩力。

**关键词：**聚氨酯泡沫；钢管；短柱；轴压；平均压缩力

**中图分类号：TU398+.9**  **文献标志码：A**  **文章编号：**

**Axial-crushing performance of RPUF-filled short circular thin-walled steel tube**

ZHI Xudong1,2, GUO Menghui1,2 , WU Qijian1,2 , LI Qixun1,2, ZHOU Jun3

(1. Key Lab of Structural Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology) , Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China; 3. Land Property Management Office of China Railway Harbin Group Co., Ltd., Harbin 150006, China)

**Abstract:** Circular steel tube filled with rigid polyurethane foam (RPUF) with density of 300kg/m3 was proposed for energy absorbing components according to the requirement of civil engineering. Three groups of empty steel tubes and Three groups of RPUF-filled short circular steel tubes were tested under axial compressive load to gain their mechanical properties and ability of energy absorbing. Experimental results show that filling RPUF could effectively transform the plastic bucking behavior of circular steel tube under axial compressive load from asymmetric mode towards symmetric mode. The first peak load and structural crashworthiness indicators of the RPUF-filled steel tube increased significantly. The thinner the wall thickness was, the greater the increased. Moreover, a finite element model of RPUF-filled short circular steel tube was built based on the ABAQUS/Explicit, and simulation results showed good agreement with experimental results, which confirmed the accuracy of the model. Parameters analysis was carried out subsequently, which showed that the energy absorbing ability of the RPUF-filled circular steel tube increased with its wall thickness and tube diameter increase. An effective prediction formula for mean crush load (MCL) was also deduced based on the classical progressive collapse model proposed by Alexander. After comparison with the experimental and simulation results, it is found that this formula can effectively predict the average compressive force of the RPUF-filled short circular steel tube.

**Keywords:** polyurethane foam; steel tube; short column; axial compression; average compressive force

耗能构件能够通过自身的变形和屈曲耗散外部能量，在冲击、爆炸等偶然荷载作用下起到保护主体结构的作用，减少主体结构因破坏而造成的损失[1]。耗能构件在工业领域已有大量的应用，如汽车制造领域的吸能盒、航天器的着陆器、火车等轨道交通领域的防爬器[2-3]。薄壁构件因其优良的力学性能，是最早被用于工程结构中作为耗能构件的形式，大量学者对其耗能特性开展了研究。Alexander[4]提出了薄壁圆管在轴压荷载作用下的经典渐进叠缩模型，并通过理论分析，推导了圆管在轴压荷载作用下的平均压缩力公式。Wierzbicki等[5]则通过引入塑性动力学方法并扩展到大变形问题，得到了轴压过程中四边形方管和六边形管的平均压缩力公式。

多胞材料填充薄壁结构形成的复合形式构件是近来兴起的一种耗能构件，如汽车领域的泡沫材料填充薄壁管吸能盒[6]和轨道交通领域的泡沫铝填充结构形式的缓冲吸能防爬装置[7]，这类构件的能量耗散由泡沫材料的耗能、薄壁金属管的塑性变形耗能共同组成，同时试验也证明，泡沫与金属管之间的相互作用还能够改变管件的叠缩变形模式使其吸收更多的能量[8]。Reid等[9]研究了硬质聚氨酯泡沫填充薄壁锥形管和方管在准静态轴压和轴向冲击下的吸能特性，并基于Wierzbicki[5]的棱柱管叠缩模型提出了聚氨酯泡沫填锥形管和方管的平均压缩力公式。余晓琦等[10]研究了硬质聚氨酯泡沫填充薄壁圆钢管在横向压缩下的吸能特性，并提出了泡沫填充双管嵌套和三管嵌套系统。

已有耗能构件的研究多集中于汽车制造及轨道交通领域，采用的泡沫材料密度一般较低（60~200kg/m3），而近年来的研究表明，建筑结构领域，也存在着诸多碰撞、冲击荷载，如隔震层位置在地震荷载下地基与隔震结构的碰撞[11]和密集邻近高层在地震荷载作用下的顶端碰撞[12]，为避免建筑结构在此类的冲击碰撞荷载下因局部构件破坏而造成连续倒塌的严重后果，研究具有良好耗能表现的构件逐渐受到国内外学者的重视，本文基于这一工程背景，提出将高密度（300kg/m3）硬质聚氨酯泡沫填充到建筑圆钢管构成复合短柱耗能构件，希望其消耗碰撞过程的冲击能量，从而保护主体建筑结构。通过试验和数值仿真方法研究了构件的轴压力学性能，并在Alexander[4]的研究基础上基于能量关系推导了构件的平均压缩力公式。

**1材性实验**

本文所用硬质聚氨酯泡沫（RPUF, rigid polyurethane foam）采用自发泡方式填充，将多元醇和多异氰酸酯混合物注入一端封口的1.5m长钢管中，然后将注入端封口，自然发泡完成得到试验所用短柱试件，试件总长度为150mm，其中50mm为锚固用长度，计算长度为100mm。RPUF填充圆钢管截面见图1。



**图1 RPUF填充薄壁圆钢管**

Fig.1 RPUF-filled thin-walled steel circular tube

RPUF设计密度为300kg/m3，薄壁圆钢管采用Q235B直缝焊管，钢管壁厚选用1.5、2.0和2.5mm三种尺寸。在进行静力轴压试验之前，首先开展了相关材料的材性试验，按照国家标准GB/T 8813－2008[13]的要求，制取100mm×100mm×50mm的长方体材性试块，进行单轴静力压缩试验，加载速度选用2mm/min，得到的单轴压缩试验应力-应变曲线见图2，由弹性段(*AB*)，平台段(*BC*)和密实段(*CD*)三部分组成，主要材性参数见表1。*σ*f为平台段应力，取应变为10%时对应的应力值，泊松比*ν* 近似为0。

按照GB/T 228－2010[14]和GB/T 2975－1998[15]的要求进行了钢管单轴拉伸试验，加载速率2mm/min，得到不同壁厚钢管的材性数据见表2。

**表1 RPUF材性参数**

Tab.1 Mechanical properties of RPUF

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ρ*/(kg∙m-3) | *E*/MPa | *ν* | *σ*f/MPa |
| 337.0 | 136.1 | 0 | 5.8 |

**表2 钢管材性参数**

Tab.2 Mechanical properties of steel tube

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *T*/mm | *E*/105MPa | *ν* | *σ*y/MPa | *σ*u/MPa | *ε*u |
| 1.5 | 1.96 | 0.27 | 326.8 | 504.8 | 0.181 |
| 2.0 | 2.01 | 0.27 | 306.2 | 431.0 | 0.182 |
| 2.5 | 1.90 | 0.27 | 293.4 | 418.0 | 0.112 |



**图2 RPUF轴压应力-应变曲线**

Fig.2 Stress-strain curve of RPUF under axial compression

**2 轴压试验**

**2.1 试件设计及试验方案**

为研究RPUF填充圆钢管和空钢管在轴压荷载下的力学特性和耗能能力，考虑不同径厚比对RPUF填充圆钢管短柱构件耗能能力的影响，共加工了3根RPUF填充圆钢管和3根空钢管进行轴压试验，轴压试件尺寸见表3。试件编号中的A、B、C分别表示钢管壁厚为1.5、2.0、2.5mm，E0T表示空钢管，P3T表示RPUF填充管。表格中*D*、 *t*和*L*分别为试件所用钢管实测的外径、壁厚和试件总长度，*ρ*为填充密度。

**表3 轴压试件参数**

Tab.3 Parameters of specimens

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 试件编号 | *D*/mm | *t*/mm | *L*/mm | *ρ*  /(kg∙mm-3) |
| AE0T-100 | 58.00 | 1.52 | 157 | － |
| BE0T-100 | 58.52 | 2.10 | 155 | － |
| CE0T-100 | 59.32 | 2.52 | 156 | － |
| AP3T-100 | 58.00 | 1.54 | 156 | 300 |
| BP3T-100 | 58.20 | 2.12 | 155 | 300 |
| CP3T-100 | 59.10 | 2.60 | 155 | 300 |

轴压试验在哈尔滨工业大学WAW-10000微机控制电液伺服万能试验机上进行，轴向位移和荷载数据通过试验机系统自动采集，试验过程中为固定试件，采用图3（a）所示的夹具对短柱试件进行锚固，试验装置见图3（b）。采用位移控制加载的方式，加载速率选用2mm/min。

|  |  |
| --- | --- |
| E:\试验汇总\5、第一批500短柱轴压试验\试验照片\短柱轴压500（Canon）\夹具.JPG |  |
| （a）夹具 | （b）轴压装置 |
| **图3 轴压试验**  Fig.3 Axial compression experiment | |

**2.2 试验现象及分析**

试件轴压变形模式见4，空钢管均发生了不同程度的非对称的叠缩变形，随着壁厚的增加，变形模式逐渐趋于对称叠缩。而RPUF填充管则一律发生了对称的叠缩变形。Azarakhsh等[16]的研究表明，薄壁管件的力学性能和吸能特性与其变形模式密切相关，而薄壁钢管短柱的轴压变形模式，主要与薄壁钢管的初始缺陷有关，壁厚越薄，在相同的制造误差和运输条件下造成的缺陷就越明显；当填充聚氨酯泡沫后，能够有效改善薄壁圆钢管的轴向压缩变形模式，使构件趋于对称叠缩变形，说明聚氨酯泡沫作为芯体填充到薄壁构件中能够有效地改善薄壁管件因初始缺陷对其力学性能的影响。

****

**图4 试件轴压变形模式**

Fig.4 Deformation mode of specimens

空钢管和RPUF填充管的轴压荷载-位移曲线见图5。同壁厚的空钢管和RPUF填充管的弹性段斜率一致，说明在弹性段，RPUF填充管承受的荷载主要由外部薄壁钢管承担；随着轴向位移的增大，钢材发生屈服，空钢管的荷载-位移曲线斜率迅速减小，荷载达到极限荷载，在这个阶段RPUF填充管的荷载-位移曲线斜率大于空钢管，此时，轴压荷载由外部薄壁钢管和内壁填充的硬质聚氨酯泡沫共同承担，RPUF填充管的首个峰值承载力高于对应壁厚的空钢管。轴向位移进一步增大，钢管发生叠缩变形，空钢管发生非对称叠缩变形时，叠缩段荷载下降到远低于极限承载力的水平，且波动较小，见图5（a）、（b），而当变形模式趋近对称叠缩变形时，叠缩段荷载波动较大，见图5（c）。RPUF填充管的变形模式均为对称叠缩变形，此阶段随着变形的增大，聚氨酯泡沫逐步压缩密实，承载能力逐步提高，对构件整体承载力贡献逐步增强，最后叠缩段的峰值荷载有超过首个峰值荷载的趋势。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| (a) *T*=1.5mm | (b) *T*=2.0mm | (c) *T*=2.5mm |

**图5 轴压荷载-位移曲线**

Fig.5 Load-displacement curves under axial compressive load

**2.3 吸能能力分析**

文献[16]定义了对于吸能构件的常用吸能评价指标：总吸能*E*abs（energy absorption）、平均压缩力MCL（mean crush load）、压缩力效率CFE（crush load efficiency）和比吸能SEA。各试件的各吸能指标统计见表4。RPUF填充圆钢管的各项吸能指标较同壁厚的空钢管都有了大幅度提升，且壁厚越小，提升幅度越大。

**表4试件吸能指标**

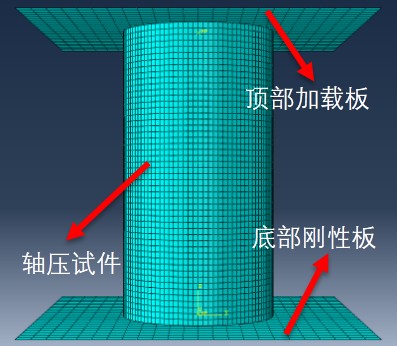
Tab.4 Crashworthiness indicators of specimens

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | *E*abs/J | MCL/kN | CLE | *m*/g | SEA/(J∙g-1) |
| AE0T-100 | 1811.8 | 39.30 | 0.49 | 95.6 | 18.94 |
| AP0T-100 | 3705.0 | 79.80 | 0.78 | 126.0 | 29.39 |
| BE0T-100 | 3058.1 | 66.00 | 0.49 | 133.7 | 22.86 |
| BP0T-100 | 5145.0 | 107.20 | 0.70 | 162.0 | 31.76 |
| CE0T-100 | 4789.2 | 98.80 | 0.62 | 177.4 | 26.98 |
| CP0T-100 | 6401.8 | 132.80 | 0.69 | 200.7 | 31.89 |

**3 数值模拟**

**3.1 有限元模型**

采用ABAQUS/Explicit模拟薄壁圆钢管和RPUF填充薄壁圆钢管构件的轴压过程。图6为试件的轴压数值模型，共分三部分：轴压试件、顶部加载板和底部刚性板。采用4节点缩减积分薄壳单元S4R对薄壁圆钢管进行单元划分，内部聚氨酯泡沫采用8节点缩减积分实体单元C3D8R，上下刚性板均采用R3D4单元，并通过在刚性板上设置参考点，进行荷载和约束的施加，钢管和RPUF的单元尺寸均选用2mm，上下刚性板的网格尺寸为5mm。



**图6 轴压有限元模型**

Fig.6 Axial compressive FEA model of specimens

简化处理底部夹具，考虑为试件底部与底部刚性板固接。RPUF与钢管间采用摩擦接触，摩擦系数设置为1.5以防止侧向的滑移。通过通用接触设置其它部分的摩擦接触，摩擦系数为0.2。轴压加载采用位移加载的方式，通过控制顶部加载板的竖向位移进行加载，底部刚性板设置固接约束。



**图7 可压缩泡沫的体积硬化模型**

Fig.7 Volumetric hardening model for crushable foam

钢管的材料本构模型选用各项同性弹塑性模型，材料参数由钢材的单轴拉伸试验获得，见表2。而RPUF材料则采用ABAQUS中提供的基于体积硬化（volumetric hardening）的可压缩泡沫材料（crushable foam）模型来描述其压缩行为，见图7，其中，*p、q* 分别表示压应力和Mises应力，*σ*0 c为轴压屈服应力 ，*p*0c为静水压屈服应力，*p*t为静水拉伸屈服应力。图2中的RPUF单轴压缩应力-应变曲线用于标定\*CRUSHABLE FOAM HARDENING 模型。参考ABAQUS用户手册，RPUF体积硬化可压缩本构材料设定见表5。

轴压分析之前先进行了构件的屈曲分析，并通过其1阶模态对构件施加初始缺陷[12]，缺陷大小定义为钢管壁厚的2%。

**表5可压缩本构模型参数**

Tab 5. Parameters used in crushable foam

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *E*f | *v* | *k*t | *k* |
| 136.1 | 0 | 1.1 | 0.1 |

**3.2 仿真结果验证**

以壁厚1.5mm的填充管与空钢管为例，仿真结果与试验结果的变形模式对比，见图8。为更加直观地对比仿真结果与试验的变形模式，试验照片只截取了试件的试验段长度部分。空钢管与RPUF填充圆钢管的仿真变形模式与试验结果吻合良好。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Administrator\Desktop\图片1.png | C:\Users\Administrator\Desktop\图片3.png |
| (a) AE0T-100 | (b) AP3T-100 |

**图 8 仿真与试验变形模式对比**

Fig 8. Failure modes of experiment and simulation

以壁厚1.5mm的空钢管与填充管为例，仿真结果的荷载-位移曲线与试验结果对比见图9，仿真结果得与试验结果吻合良好。



(a) AE0T-100



(b) AP3T-100

**图9 仿真荷载-位移曲线与试验结果对比**

Fig.9 Load-displacement curves of experiment and simulation

**表6 仿真与试验平均压缩荷载对比**

Tab. 6 Comparison of MCL between experiment and simulation

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 试件编号 | MCL-EXP  /kN | MCL-SIM  /kN | 误差  /% |
| AE0T-100 | 39.30 | 38.47 | -2.11 |
| AP3T-100 | 79.80 | 74.95 | -6.08 |
| BE0T-100 | 66.00 | 76.64 | 16.12 |
| BP3T-100 | 107.20 | 114.25 | 6.58 |
| CE0T-100 | 98.80 | 97.63 | 1.18 |
| CP3T-100 | 132.80 | 128.35 | -3.35 |

综上，可看出该数值模型的仿真结果，总体上与试验结果吻合良好，可用于模拟此类试件的轴压过程。

**3.3 参数分析**

为研究几何参数管径、壁厚及试件高度等因素对RPUF填充圆钢管短柱构件的轴压耗能特性的影响，通过上节提出的有限元模型对以上参数进行了参数分析，结果给出了各参数对平均压缩荷载MCL的影响，见图10。随着管径和壁厚的增大，试件的平均压缩力均不断增大，与管径和壁厚均呈正比关系。当高度在300mm以下时，平均压缩荷载波动较小，当高度大于300mm时，发现试件的平均压缩力随试件高度的增大呈反比关系快速下降，这是由于当试件高度大于300mm时，构件在轴压荷载作用下发生了整体失稳破坏，不再适宜作为耗能构件使用。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| (a) 管径的影响 | (b) 壁厚的影响 | (c) 试件高度的影响 |

**图10 几何参数对平均压缩力的影响**

Fig.10 Influence of geometric parameters on MCL

**4 平均压缩力预测公式**

Alxander[4]、Wierzbicki等[5]对轴向压缩荷载下薄壁管构件和泡沫材料填充方管构件的平均压缩力公式进行理论研究，提出了相应的理论公式。本文参考上述研究成果，基于能量方法，对RPUF填充薄壁圆钢管短柱构件在轴压荷载作用下的平均压缩力公式进行了推导。

RPUF填充圆钢管的变形模式示意见图11，其耗散的能量主要由4部分组成：1)外部圆钢管管壁弯曲吸收的能量*W*b；2)管壁拉伸屈服吸收的能量*W*t；3)RPUF轴向压缩吸收的能量*W*r；4)RPUF与外部金属管壁的相互作用而提高的能量吸收量为*W*i。

其中*D*为钢管外径，*t*为钢管壁厚，*h*为发生均匀叠缩时的波长，每形成一个叠缩时，管壁弯曲将产生3个塑性铰，当*θ* 发生一个微小改变d*θ* 时，由钢管管壁弯曲吸收的能量d*W*b为

 ( 1 )



**图11 RPUF填充圆钢管叠缩示意**

Fig.11 Folding diagram of RPUF-filled circular steel tube

*M*0单位长度钢板全截面屈服时的弯矩[4]为

 ( 2 )

当材料服从Von-Misses屈服准则时

 ( 3 )

由此可得

 ( 4 )

叠缩过程中，*θ*角每发生微小改变d*θ*时，塑性铰之间钢材拉伸变形的平均应变为

 ( 5 )

拉伸屈服应力为*σ*y,故发生d*θ*变形时，由钢材拉伸吸收的能量d*W*t为

 ( 6 )

完成一个完整的叠缩时，内部泡沫材料一共被压缩的距离为*2h*，这个阶段RPUF吸收的能量为

 ( 7 )

Niknejad等[17]的研究成果表明，RPUF与外部金属管壁的相互作用而提高的能量吸收量为RPUF单独压缩时吸收能量的0.8倍，即

 ( 8 )

完成一次完整叠缩时，构件吸收的总能量为

 ( 9 )

Alexander[4]研究表明*h*是*D*和*t*的函数：

 ( 10 )

对本文的RPUF填充圆钢管的叠缩波长进行了测量，拟合得到*k*值为1.2，见图12。

最后由功能关系

 ( 11 )

综合上述各式可以推出RPUF填充圆钢管在轴压过程中的平均压缩力：

 ( 12 )



**图12 叠缩波长拟合公式**

Fig 12. Formula for folding length

由上述公式计算得到的试验中各试件的平均压缩力与由试验数据得到平均压缩力以及部分数值模拟得到的结果对比见表7。其中数值模拟部分试件编号以D80T2.0H100为例，表示试件的管径为80mm，壁厚2.0mm，高度100mm。

**表7 RPUF填充圆钢管平均压缩力预测值与试验值对比**

Tab.7 MCL of predicted value and the experiment value

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 试件编号 | *P*m试验值/kN | *P*m数值解/kN | *P*m预测值/kN | 误差/% |
| AP3T-100 | 79.80 | － | 73.29 | -8.16 |
| BP3T-100 | 107.20 | － | 97.85 | -8.72 |
| CP3T-100 | 132.80 | － | 121.17 | -8.75 |
| D60T3.0H100 | － | 147.81 | 151.65 | 2.60 |
| D60T3.5H100 | － | 179.78 | 183.81 | 2.24 |
| D60T4.0H100 | － | 217.88 | 219.17 | 0.59 |
| D80T2.0H100 | － | 126.21 | 126.38 | 0.13 |
| D90T2.0H100 | － | 139.32 | 144.32 | 3.59 |
| D100T2.0H100 | － | 159.90 | 163.65 | 2.35 |

上述结果表明，通过理论计算得到的平均压缩荷载与试验结果和数值模拟结果均吻合良好，证明了平均压缩力公式的正确性和适用性，可以用于指导RPUF填充圆钢管构件在工程中的设计应用。

**5 结论**

本文开展了硬质聚氨酯泡沫填充薄壁圆钢管短柱构件的静力轴压试验，提出了较为准确的有限元仿真建模方法，并进行了平均压缩力预测公式的推导，主要结论如下：

1) 本文提出的填充硬质聚氨酯泡沫能够有效改善建筑薄壁圆钢管在轴压荷载作用下的变形模式，使构件趋于对称叠缩变形。

2) 硬质聚氨酯泡沫填充圆钢管构件较空钢管的轴压首个峰值荷载及各项吸能指标都有了较大幅度的提升，且壁厚越薄，提升幅度越大。

3) 采用体积硬化的可压缩泡沫本构模型，建立了构件的轴压数值仿真模型，能够准确模拟其轴压过程。参数分析结果表明RPUF填充圆钢管耗能能力随壁厚和管径的增大而增大。

4) 基于能量关系，推导了硬质聚氨酯泡沫填充薄壁圆钢管的轴压平均压缩力预测公式，预测结果与试验结果与数值模拟均吻合良好。

**参考文献：**

[1]AZARAKHSH S, RAHI A, GHAMARIAN A, et al. Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 95:60

[2]JGAO G, QTIAN H. Train’s crashworthiness design and collision analysis[J]. International Journal of Crashworthiness, 2007, 12(1):21

[3]GHADIANLOU A, ABDULLAH S B. Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 67(2):25

[4]ALEXANDER J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1960, 13(1):10

[5]Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures[J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(4):727

[6]张玉辉, 干年妃. 接触强度和诱导槽对泡沫铝锥管耐撞性分析[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 129

ZHANG Yuhui, GAN Nianfei. The study of contact strength and inducing groove on crashworthiness of aluminum foam-filled tapered thin-walled structure[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 129

[7]刘俊. 轨道车辆新型碰撞吸能装置的设计研究[D].上海:同济大学, 2008

LIU Jun. Study on the design of a new type of collision energy absorbing device for rail vehicles[D]. Shanghai: Tongji University, 2008

[8]Hanssen A G, Hopperstad O S, Langseth M. Crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler-numerical analyses[J]. Structures Under Shock and Impact, 1970(32):143

[9]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, 2011, 28(5): 295

[10]余晓琦, 石少卿, 李季, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料填充薄壁钢管横向压缩吸能特性分析[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(2): 17

YU Xiaoqi, SHI Shaoqing, LI Ji, et al. Energy absorption characteristics of rigid polyurethane foam filling thin-walled steel tube under lateral compression[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015,31(2):17

[11]谢云飞, 刘阳, 何文福. 考虑碰撞效应的土-单层隔震结构的损伤性能分析[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(2): 88

XIE Yunfei, LIU Yang, HE Wenfu. Damage performance analysis of soil-single-story isolated structure system considering impact[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(2):88

[12]杨永强, 戴君武, 公茂盛, 等. 芦山地震中相邻建筑碰撞破坏调查与分析[J].哈尔滨工业大学学报,2015, 47(12):102

YANG Yongqiang, DAI Junwu, GONG Maosheng, et al. Investigation and analysis on adjacent building pounding damage in Lushan earthquake[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 102

[13]硬质泡沫塑料压缩性能的测定:GB/T 8813－2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008

Rigid celluar plastics-Determination of compression properties: GB/T 8813－2008[S].Beijing: Standards Press of China, 2008

[14]金属材料室温拉伸试验方法: GB/T 228－2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010

Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature: GB/T 228－2010[S], Beijing: Standards Press of China, 2010

[15]钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975－1998[S].北京:中国标准出版社, 1998

Steel and steel products-Location and preparation of test pieces for mechanical testing: GB/T 2975－1998[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998

[16]Azarakhsh S, Rahi A, Ghamarian A, et al. Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 95:60

[17]NIKNEJAD A, ABEDI M M, LIAGHAT G H, et al. Absorbed energy by foam-filled quadrangle tubes during the crushing process by considering the interaction effects[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2015, 15(2): 379

1. **收稿日期：**2018-10-27

   **基金项目：**国家自然科学基金(51478144)

   **作者简介：**支旭东（1987—），男，教授，博士生导师

   **通信作者：**郭梦慧，guomenghui@sina.com [↑](#footnote-ref-1)