

文章编号: 1000-4750(2011)08-0248-04

泡沫金属填充圆管横向线载荷作用下的压入分析

谢中友^{1,2}, 虞吉林¹, *郑志军¹

(1. 中国科学技术大学中科院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥 230027; 2. 铜陵学院土木建筑系, 铜陵 244000)

摘 要: 泡沫金属填充薄壁圆管结构越来越广泛地应用于各种工程结构。压入是这种复合结构在侧向承载时出现的一种重要的变形模式, 但尚缺乏有效的理论分析模型。该文在 Wierzbicki 等提出的空管侧向压入的理论模型的基础上, 建立了泡沫金属填充薄壁圆管侧向压入的理论分析模型, 给出了压头载荷的解析表达式。通过实验比较表明, 理论预测值合理地吻合于实验结果。另外, 对加载过程中变形区域的演化、结构各组成部分的能量耗散特点进行了分析。

关键词: 复合结构; 泡沫金属; 虚功率原理; 圆管; 压入

中图分类号: O341 文献标志码: A

INDENTATION ANALYSIS OF METALLIC FOAM-FILLED CYLINDRICAL PIPE UNDER TRANSVERSELY LINEAR LOADING

XIE Zhong-you^{1,2}, YU Ji-lin¹, *ZHENG Zhi-jun¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Department of Civil and Architectural Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China)

Abstract: Thin-walled structures filled with metallic foam are more and more widely applied in engineering structures. Indentation is an important deformation mode for the structures in application, but no theoretical models have been addressed. Based on the theoretical model of lateral indentation of hollow pipe presented by Wierzbicki et al., an analytical model of lateral indentation of pipes filled with foam is established in this paper, and load-bearing expression of indenter is presented. The theoretical results agree with those from the experiment. Finally, variation of the length of deforming zone and energy dissipation ratios of components of the foam-filled pipes in the loading process are also analyzed.

Key words: composite structures; metallic foam; principle of virtual power; cylindrical pipe; indentation

泡沫铝具有低密度、高比强度和比刚度以及良好的吸能、隔音、阻热和抗腐蚀的特点, 可用于各种夹芯结构。泡沫铝夹芯结构在服役过程中可能会受到侧向压入、轴向压缩、横向弯曲等各种载荷作用。泡沫金属填充薄壁圆管的三点弯曲实验及数值模拟结果表明填充泡沫金属材料有效地提高了结构承载力^[1-2]。通过实验观察发现其变形经历了压

入、压入弯曲和管壁下缘拉裂 3 个阶段^[1], 而压入作为变形的重要阶段尚缺乏有效的理论分析模型。

空管的侧向压入行为在 20 世纪研究较多。Wierzbicki 和 Suh^[3]对圆管在侧向压入、弯矩和轴力综合作用时的变形和承载做了理论分析, 建立了相应的理论模型。Pacheco 和 Durkin^[4]采用实验和数值计算的方法研究了圆管在先受侧压后受轴压时

收稿日期: 2009-12-14; 修改日期: 2010-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(90916026, 11002140, 10672156); 铜陵学院院级科研项目(2010tlyx02)

作者简介: 谢中友(1976—), 男, 安徽怀宁人, 讲师, 博士生, 从事轻型复合结构的力学行为与设计研究(E-mail: zyxie@mail.ustc.edu.cn);

虞吉林(1946—), 男, 浙江镇海人, 教授, 博士, 从事冲击冲动力学、材料力学行为与设计等研究(E-mail: jlyu@ustc.edu.cn);

*郑志军(1979—), 男, 福建漳州人, 副教授, 博士, 从事材料力学行为与设计研究(E-mail: zjzheng@ustc.edu.cn).

的力学响应。Reid 和 Goudie^[5]研究了圆管的压入和弯曲行为，给出了从局部压入到整体弯曲的变形过程。Liu 和 Francis^[6]对内外受压的圆管的局部压入行为进行了理论分析，发现内外压强差对圆管局部压入变形有很大的影响。

目前，对泡沫夹芯层状复合结构的压入行为已经有了一些研究，例如，Shuaeib 和 Soden^[7]研究了 GRP 表皮、PVC 泡沫芯组成的层状夹芯结构的侧向压入性能；Zenkert 等^[8]对两种芯层的夹芯结构加卸载过程进行了实验，并建立了一个理论模型；Koissin 等^[9]通过对夹芯梁和加芯板在局部荷载作用响应的分析，得到平面和轴对称时的解析解；Rizov 等^[10-11]采用球形压头对夹芯板的压入性能进行了实验研究。

本文在 Wierzbicki^[3]对空管复合加载方式时压入行为的研究结果基础上，引入泡沫铝的吸能作用，以分析泡沫铝填充管的承载能力。为检验理论结果的合理性，做了两种壁厚的圆管及其泡沫填充管的侧向压入实验作为比较。

1 理论分析

泡沫金属填充圆管在承受横向线载荷作用下产生压入变形模式如图 1 所示。

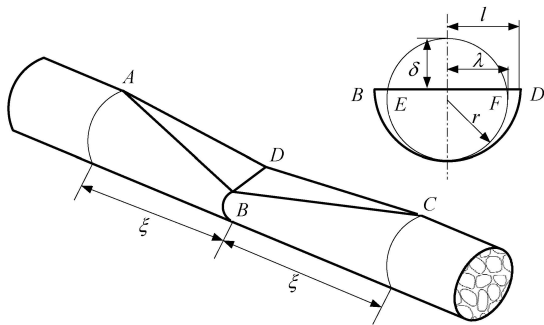


图 1 泡沫金属填充圆管侧向压入示意图
Fig.1 Schematic diagram of indentation of cylindrical pipe filled with metallic foam

根据虚功率原理，外力功的功率 \dot{E}_e 等于结构塑性应变能耗散率 \dot{E}_i ，即：

$$\dot{E}_e = \dot{E}_i \tag{1}$$

其中，主动力只有压头载荷 P ，外力功的功率为：

$$\dot{E}_e = P\dot{\delta} \tag{2}$$

泡沫金属填充结构的塑性应变能耗散率等于管壁和泡沫金属的塑性应变能耗散率之和：

$$\dot{E}_i = \dot{E}_i^p + \dot{E}_i^f \tag{3}$$

其中， \dot{E}_i^p 和 \dot{E}_i^f 分别表示管壁和泡沫金属芯的应变

能耗散率。图 1 中，管壁在 BD 处产生固定塑性铰，而 ABD 区域和 CBD 区域产生移动塑性铰，其分布长度 2ξ 待定。在 BD 下的泡沫金属，当不考虑塑性泊松比时，泡沫铝芯圆截面 EF 上面的部分逐渐被压入 EF 下面，长度方向的变形分布形式与管壁一致。

管壁结构的应变能耗散率可采用 Wierzbicki 和 Suh^[6]关于空圆管侧向压入力学行为的研究结果。由于泡沫金属芯的抗弯作用，因而忽略填充管的整体弯曲变形，此时管壁塑性应变能耗散率为：

$$\dot{E}_i^p = \frac{8M_0\xi\dot{\delta}}{R} + \frac{\pi N_0R\delta\dot{\delta}}{\xi} \tag{4}$$

其中， R 为圆管的平均半径；而 $M_0 = \sigma_0 t^2 / 4$ ， $N_0 = \sigma_0 t$ ， σ_0 为管壁材料的屈服应力， t 为圆管壁厚。

泡沫金属芯的应变能耗散可由泡沫金属芯的平台应力 σ_p 以及体积变化率计算：

$$\dot{E}_i^f = \int_V \sigma_p d\dot{V} = \int_A \sigma_p \dot{W} dA \cos \alpha \tag{5}$$

其中， \dot{W} 为泡沫金属面积元的虚速度，如图 2 所示，圆管内径即泡沫金属芯的半径为 r 。另外假设泡沫金属变形的速度场按线性分布，根据几何关系可得 $\dot{W} = \dot{\delta}x / \xi$ ， $dA = 2\lambda x' / \xi' \cdot dx'$ ， $x' / \xi' = x / \xi$ ， $dx = dx' \cos \alpha$ ， $\lambda = \sqrt{2r\delta - \delta^2}$ 。

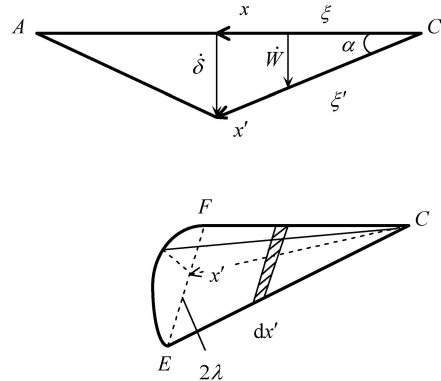


图 2 泡沫金属变形的速度场分布
Fig.2 Distribution of velocity field of metallic foam

由此，我们可以得到泡沫金属的塑性应变能耗散率为：

$$\dot{E}_i^f = \frac{4}{3} \sigma_p (2r\delta - \delta^2)^{1/2} \xi \dot{\delta} \tag{6}$$

进而可计算得到线压头的载荷表达式：

$$P = \left[\frac{8M_0}{R} + \frac{4}{3} \sigma_p (2r\delta - \delta^2)^{1/2} \right] \xi + \frac{\pi N_0 R \delta}{\xi} \tag{7}$$

由极小作用量原理^[6]，我们假设结构的承载力对变形区长度取极小值，即对式(7)求 $\partial P / \partial \xi = 0$ 得：

$$\xi = R \left[\frac{\pi N_0 \delta}{8M_0 + 4\sigma_p(2r\delta - \delta^2)^{1/2} R / 3} \right]^{1/2} \quad (8)$$

将式(8)代回式(7)，我们得到填充管承载力随压入深度变化的解析表达式：

$$P = 4\{\pi N_0 \delta [2M_0 + \sigma_p R(2r\delta - \delta^2)^{1/2} / 3]\}^{1/2} \quad (9)$$

对于空管结构，由于没有泡沫金属的抗弯作用，整体弯曲变形不受约束，其局部变形长度和压入载荷可按 Wierzbicki 和 Suh^[6]给出的公式计算：

$$\xi = R(\pi\delta / (8t))^{1/2} \quad (10)$$

$$P = 4M_0(2\pi\delta / t)^{1/2} \quad (11)$$

2 压入实验

我们对两种壁厚的圆管及其泡沫铝填充管进行了侧向压入实验。实验中采用的薄壁圆管材料为 AA6063T6，外径 38mm，壁厚为 1.0mm 和 1.8mm 两种，基本力学性能列于表 1。管内填充密度为 0.389g/cm³ 的泡沫铝，其平台应力为 5.23MPa。

试件长 200mm，泡沫铝内芯由线切割得到，管壁与泡沫铝内芯间未粘接。试件置于刚性平台上，管中点横向受压，压头为直径 10mm 的刚性圆柱。

实验在中国科学技术大学工程材料实验室中心 MTS810 材料试验机上进行，其中载荷和位移数据分别由力传感器和位移传感器给出。实验中采用位移加载控制方式，压头加载速率设为 0.1mm/s。

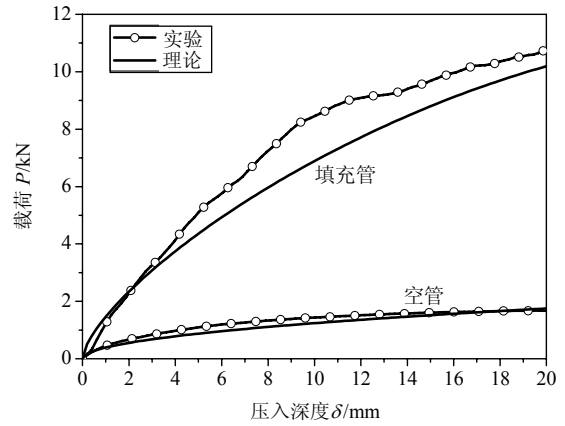
表 1 管壁材料的基本力学性能

Table 1 The basic mechanical properties of wall materials				
壁厚/mm	弹性模量/GPa	屈服应力/MPa	最大应力/MPa	特征应力/MPa
1.0	51.9	153.1	159.7	156.4
1.8	62.9	149.1	152.7	150.9

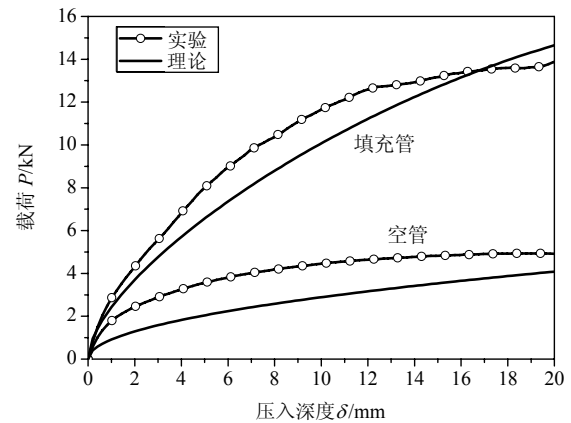
3 结果及分析

实验和理论计算的结构承载力随压入深度的变化曲线绘于图 3 中。可以看出，填充泡沫铝后结构承载力大大提高。

对于管壁厚度为 1.0mm 的空管，理论结果与实验结果吻合得较好，而壁厚为 1.8mm 的空管理论值与实验值差别较大。这是由于 Wierzbicki 和 Suh^[6]的理论模型将管壁视为壳，因此式(11)更适用于薄壁圆管。



(a) $t=1.0\text{mm}$



(b) $t=1.8\text{mm}$

图 3 空管和填充管侧向压入的载荷-深度曲线

Fig.3 Load-depth curves of lateral indentation of hollow and foam-filled pipes

对于填充管，理论值和实验值比较结果大致可分为 3 个阶段。压入深度较小时，两者符合较好。压入深度稍大时，理论值略低于实验值，这是因为理论模型中未考虑泡沫铝塑性泊松比的影响。当压入深度继续增大时，两者差别反而减小，这是由于部分泡沫铝发生了脆性破坏。泡沫铝的塑性泊松比以及后续的脆性破坏现象，在进行泡沫铝的单轴压缩试验中得知。对于泡沫铝密度变化很大时，有可能会影响变形模式。限于材料来源，本研究只对一种密度的泡沫铝进行了相关实验。

另外，由式(10)和式(8)可得到变形区域的长度，如图 4 所示。壁厚相同时，填充管的变形区域比空管短，即填充泡沫铝使变形更局部化，这与实验观察一致。外径相同时，变形区域随壁厚增加而增大。这是由于填充管的变形模式主要还是由管的容许变形条件所决定。对于壁厚较大时，填充材料对模式的变形模式的影响相对减弱，这反映在如下能量耗散的分析中。

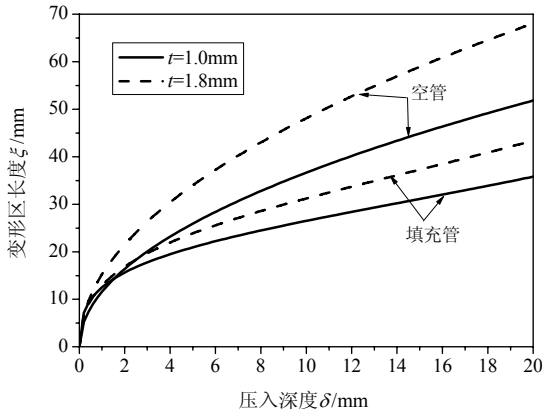


图 4 变形区域长度变化

Fig.4 Variations of the length of deforming zone

填充管在压入变形过程中,由式(6)可得泡沫铝在变形过程中耗散的能量。公式两边先对时间 T 积分得:

$$E_i^f = \int_0^\delta \frac{4}{3} \sigma_p (2r\delta - \delta^2)^{1/2} \xi d\delta \quad (12)$$

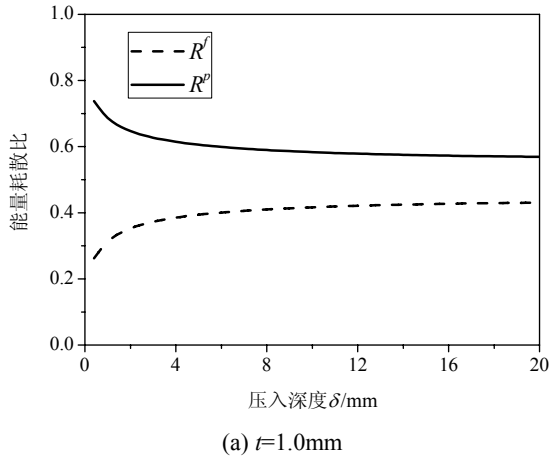
再由式(1)、式(2)和式(9)可得整个填充结构耗散的能量为:

$$E_i = \int_0^\delta Pd\delta \quad (13)$$

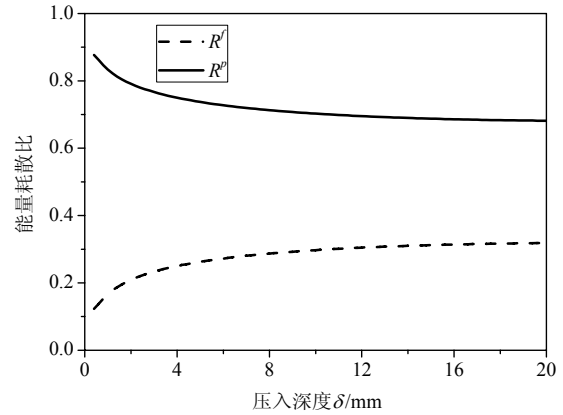
故填充管管壁耗散的能量为:

$$E_i^p = E_i - E_i^f \quad (14)$$

泡沫铝和管壁耗散的能量占总能量的比率分别为 $R^f = E_i^f / E_i$, $R^p = E_i^p / E_i$, 计算结果如图 5 所示。在压入深度较小的阶段,泡沫铝耗散的能量比率急剧增加,相应地管壁耗散的能量比率急剧减少。随着压入深度的继续增大,两者均趋近常量。另外,管壁厚度增大时,管壁耗散的能量比率增大。由此可见,对于壁厚较小的情况,泡沫铝填充物对变形模式影响较大,变形局部化表现尤为严重。



(a) $t=1.0\text{mm}$



(b) $t=1.8\text{mm}$

图 5 泡沫铝和管壁耗散的能量占总能量的比率

Fig.5 Energy dissipation ratios of aluminum foam and pipe wall against the total

4 结论

基于固定和移动塑性铰模型,本文建立了填充金属薄壁圆管的侧向压入的分析理论,给出了侧向承载力的解析表达式,并与实验结果进行了比较。填充泡沫铝后大大提高了圆管结构侧向压入时的承载力。文中提出的理论结果与实验结果符合得较好。对于同一壁厚,填充管的变形区域比空管短,变形更局部化。在压入深度较小时,泡沫铝耗散的能量比率急剧增加,而管壁耗散的能量比率相应地较少。随着压入深度的继续增大,两者均趋近常量。对于同一直径的填充管,壁厚越薄,泡沫填充物耗散的能量比率增加,变形局部化越突出。在工程结构的设计中既要考虑结构承载能力,还要防止结构由于变形的局部化导致结构承载的突降,本文的理论分析有助于泡沫填充材料的正确选择和几何结构的合理设计。

参考文献:

- [1] 谢中友, 虞吉林, 李剑荣. 泡沫铝合金填充圆管三点弯曲实验研究[J]. 实验力学, 2007, 22(2): 104-110. Xie Zhongyou, Yu Jilin, Li Jianrong. Numerical simulation of three-point bending experiments of thin-walled cylindrical tubes filled with aluminum foam [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(2): 104-110. (in Chinese)
- [2] 谢中友, 李剑荣, 虞吉林. 泡沫铝填充薄壁圆管三点弯曲实验的数值模拟[J]. 固体力学学报, 2007, 28(3): 261-265. Xie Zhongyou, Li Jianrong, Yu Jilin. An experimental study on three-point bending of aluminum alloy foam-filled cylindrical aluminum alloy pipe [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2007, 28(3): 261-265. (in Chinese)

(参考文献[3]-[11]转第 256 页)

疲劳裂纹形成寿命估算提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Kiple R C, Mackin T J, Noe S C. Thermal cracking in disc brakes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9: 63—67.
- [2] Tirovie M. 高速列车轮装式盘形制动器的开发[J]. 国外机车车辆工艺, 2000(1): 1—6.
Tirovie M. Development of a wheel mounted disc brake for a high speed train [J]. *Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2000(1): 1—6. (in Chinese)
- [3] Thomas Zeuner[德]. 高速列车使用铝基复合材料制动圆盘[J]. 国外机车车辆工艺, 1999(2): 19—21.
Thomas Zeuner. Brake disc made of composite materials used in high-speed train [J]. *Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology*, 1999(2): 19—21. (in Chinese)
- [4] [美]休尔施. 材料的疲劳[M]. 王中光, 译. 北京: 国防工业出版社, 1999.
Suresh S. *Material fatigue* [M]. Translated by Wang Zhongguang. Beijing: National Defense Industrial Press, 1999. (in Chinese)
- [5] Manson S S. Behavior of materials under conditions of thermal stress [J]. NACA, TN2933, 1953: 450—480.
- [6] Coffin L F. The problem of thermal stress fatigue in austenitic steels at elevated temperatures [J]. *ASTM STP*, 1954, 165: 31—52.
- [7] Velasco E, Colas R. A model for thermal fatigue in an aluminium casting alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 1995, 17(6): 399—406.
- [8] Lee H Y, Kim J B, Yoo B. Green's function approach for crack propagation problem subjected to high cycle thermal fatigue loading [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1999, 76: 487—494.
- [9] Gao C H, Lin X Z. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129: 513—517.
- [10] 郑剑云, 郭晓晖, 包子骞. 提速客车制动盘热应力有限元分析[J]. 机车车辆工艺, 2002(3): 4—6.
Zheng Jianyun; Guo Xiaohui, Bao Ziqian. FEM analysis of the thermal stress in the brake disc for speed-elevated passenger cars [J]. *Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2002(3): 4—6. (in Chinese)

(上接第 251 页)

- [3] Wierzbicki T, Suh M S. Indentation of tubes under combined loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988, 30(3-4): 229—48.
- [4] Pacheco L A, Durkin S. Denting and collapse of tubular members — a numerical and experimental study [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988, 30(5): 317—331.
- [5] Reid S R, Goudie K. Denting and bending of tubular beams under local loads [M]// Wierzbicki T, Jones N. *Structural failure*. New York, Wiley, 1989: 331—364.
- [6] Liu J H, Francis A. Theoretical analysis of local indentation on pressured pipes [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81(12): 931—939.
- [7] Shuaib F M, Soden P D. Indentation failure of composite sandwich beams [J]. *Composites Science and Technology*, 1997, 57(9-10): 1249—1259.
- [8] Zenkert D, Shipsha A, Persson K. Static indentation and unloading response of sandwich beams [J]. *Composites: Part B*, 2004, 35(6-8): 511—522.
- [9] Koissin V, Shipsha A, Rizov V. The inelastic quasi-static response of sandwich structures to local loading [J]. *Composite Structures*, 2004, 64(2): 129—138.
- [10] Rizov V, Shipsha A, Zenkert D. Indentation study of foam core sandwich composite panels [J]. *Composite Structures*, 2005, 69(1): 95—102.
- [11] Rizov V. Non-linear indentation behavior of foam core sandwich composite materials — A 2D approach [J]. *Computational Materials Science*, 2006, 35(2): 107—115.