

文章编号: 1001-4888(2007)02-0104-07

## 泡沫铝合金填充圆管三点弯曲实验研究<sup>\*</sup>

谢中友, 虞吉林, 李剑荣

(中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

**摘要:** 用实验方法研究了三种不同管壁厚度、两种跨径的泡沫铝合金填充圆管的三点弯曲力学性能, 得到了泡沫铝合金填充管结构承载过程中的三种变形模式, 即压入、压入弯曲和管壁下缘拉裂破坏。给出了空管和泡沫铝合金填充管的载荷位移曲线, 并进行了比较。实验发现泡沫铝合金填充管结构的承载能力随泡沫铝合金密度的增大而增大, 但破坏应变则随之减小。结构承载力的相对提高量随着管壁厚度的减小和跨径的增大而增大。此外, 分析了泡沫铝合金提高填充管结构承载能力的机理。泡沫铝合金填充使管壁压入量和管截面抗弯刚度的损失显著减小, 从而提高了结构的抗弯能力。

**关键词:** 泡沫铝; 圆管; 三点弯曲

**中图分类号:** O34      **文献标识码:** A

### 0 引言

圆管结构是汽车、航空、船舶等行业的常用结构, 一般可分为紧凑、非紧凑和细长三类, 三种圆管结构的变形模式和承载力有较大的差别。分类方法有两种, 一是按几何特征参数即直径与壁厚之比  $D/t$  值进行分类, 另外学术上通常按  $\lambda_s = D\sigma_y/250t$  的值分类<sup>[1]</sup>, 其中  $\sigma_y$  为管壁材料的屈服应力。

横向弯曲是一种较为常见的承载模式, Mamalis 等<sup>[2]</sup> 和对  $25 < D/t < 40$  的圆管弯曲行为进行了研究, 得到了三种变形模式。Elchalakani 等<sup>[3]</sup> 对  $20 < D/t < 40$  的圆管作了进一步研究, 建立了简化星形、钻石形、星形三种模型, 结果表明简化星形模型的结果与实验结果拟合较好。Elchalakani 等<sup>[4]</sup> 研究了  $88 < D/t < 122$  的圆管纯弯曲行为, 实验结果表明圆管弯曲时沿截面环向将产生多个褶皱, 理论方面主要采用钻石形模型对结构大变形时进行塑性分析。

Soares 等<sup>[5]</sup> 的分析表明, 随着跨径与直径之比  $L/D$  的增大, 圆管结构表现为环、短梁、长梁的行为, 其临界值随  $D/t$  变化而有所改变, 长梁结构可不考虑局部压入而按经典梁理论进行理论分析。Pacheco 等<sup>[6]</sup> 通过实验和数值模拟方法研究了圆管短梁的局部压入和垮塌行为。Wierzbicki 等<sup>[7]</sup> 进一步建立了较为完备的压入载荷表达式。对于短梁结构, Thomas 等<sup>[8]</sup> 研究表明, 薄壁圆管三点弯曲要经历三个变形阶段: 局部压入、局部压入弯曲和结构垮塌。Reid 等<sup>[9]</sup> 在理论上建立了载荷与局部压入深度的关系式, 并得到了载荷与压头总位移的半经验半理论关系。但因压头总位移与局部压入深度关系式是由实验拟合得到的数值解, 其结果无法推广应用。

近年来, 由于生产工艺的发展, 泡沫金属的应用越来越广泛, 其中包括泡沫金属填充薄壁结构。Santosa 等<sup>[10]</sup> 用实验和数值模拟的方法研究了泡沫铝填充方管结构弯曲行为, 结果表明泡沫铝能有效减小局部压入变形, 使结构保持较高的承载力。许坤等<sup>[11]</sup> 对泡沫铝填充薄壁方管弯曲行为进一步作了理论研究, 在实验基础上提出了一个分析填充结构弯曲行为的理论方法。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-01-08; 修订日期: 2007-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90205003, 10532020, 10672156)资助

对泡沫铝填充薄壁圆管横向弯曲力学行为的研究尚处于起步阶段,通过实验方法进行定性研究是定量分析的基础。Kim 等<sup>[12]</sup>用实验和数值模拟的方法研究了泡沫铝合金填充薄壁圆管的弯曲行为,结果表明填充泡沫铝后结构承载力有很大提高。但是, Kim 等只研究了一种管壁厚度和一种跨径时的结构弯曲行为,而  $D/t$  和  $L/D$  对圆管三点弯曲行为的影响非常大,需要对此作进一步研究。本文主要通过实验方法,研究了两种不同密度的闭孔泡沫铝合金分别填充三种不同壁厚的铝合金圆管在  $L/D=5.3, 6.6$  两种跨径下三点弯曲变形模式和承载特点。实验给出了泡沫铝合金填充薄壁圆管的三点弯曲变形模式和载荷位移曲线,着重分析了泡沫铝合金密度、管壁厚度和跨径对结构承载力的影响,同时分析了泡沫铝合金在提高结构承载力中所起的作用机理。

1 实验材料的力学性质

实验采用的薄壁圆管为 AA6063T6 铝合金圆管,外径  $D=38\text{mm}$ ,有三种不同的壁厚:  $t=1\text{mm}, 1.5\text{mm}, 1.8\text{mm}$ 。在管壁材料性质的测试中,拉伸试件是从平行于管的方向上切割出的。图 1 给出了管壁材料单轴拉伸的工程应力应变曲线,表 1 列出了三种管壁材料的基本力学性能。

表 1 三种管壁材料的基本力学性能

Tab.1 Mechanical properties of the pipe wall material

| 编 号  | 壁厚 $t/\text{mm}$ | 弹性模量 $E/\text{GPa}$ | 屈服应力 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | 最大应力 $\sigma_u/\text{MPa}$ | 特征应力 $\sigma_0/\text{MPa}$ |
|------|------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| AA10 | 1.0              | 51.9                | 153.1                          | 159.7                      | 156.4                      |
| AA15 | 1.5              | 54.3                | 143.7                          | 149.4                      | 146.6                      |
| AA18 | 1.8              | 62.9                | 149.1                          | 152.7                      | 150.9                      |

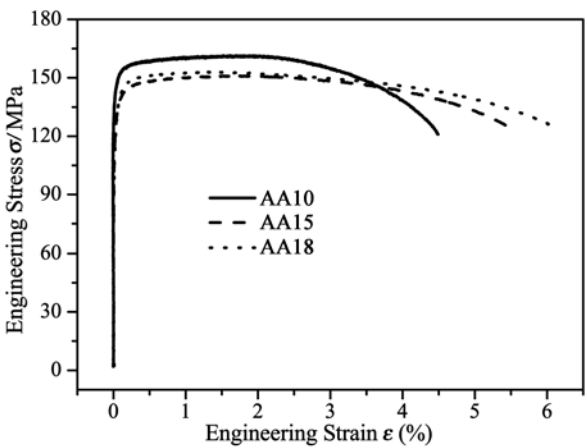


图 1 管壁材料工程应力工程应变曲线

Fig.1 Engineering stress-strain curves of the pipe wall material

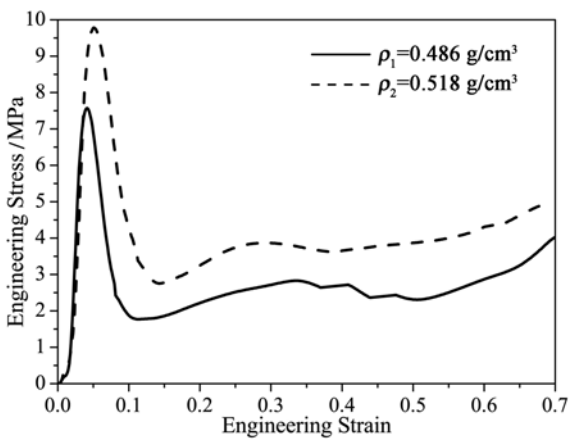


图 2 泡沫铝合金单轴压缩的工程应力应变曲线

Fig.2 Engineering stress-strain curves of aluminum alloy foams under uniaxial compression

实验中采用的两种闭孔泡沫铝合金由沈阳东大先进材料发展有限公司提供,基体材料为铝硅合金,主要成分为:工业铝 88%,硅 7%,钙 4%,铁 1%,基体密度约为  $2.98\text{g}/\text{cm}^3$ ,平均胞孔尺寸为  $4\sim 6\text{mm}$ ,密度分别为  $0.486\text{g}/\text{cm}^3$  和  $0.518\text{g}/\text{cm}^3$ 。图 2 给出了这两种不同密度泡沫铝合金的单轴压缩应力应变曲线,其弹性模量分别为  $393\text{MPa}$  和  $461\text{MPa}$ 。由于所提供的材料比较脆,在压缩初期部分胞壁已经破坏,导致应力应变曲线出现一个明显的峰,但这并不影响我们对复合管变形模式的分析研究。

2 准静态三点弯曲实验

2.1 实验方法和装置

准静态三点弯曲实验主要是研究泡沫铝合金填充管在横向载荷作用下的结构响应行为和变形破坏规律。填充管总长  $300\text{mm}$ ,泡沫铝内芯由线切割得到,管壁与泡沫铝内芯间未粘接,间隙为  $0.15\text{mm}$ 。试件由两个距离为  $250\text{mm}$  的固定支座上的刚性圆柱支撑,管中点受压,压头和支撑圆柱直径均为  $10\text{mm}$ 。此外,为研究跨径的影响,另做了一组跨径  $L=200\text{mm}$  的辅助实验。实验在中国科学技术大学

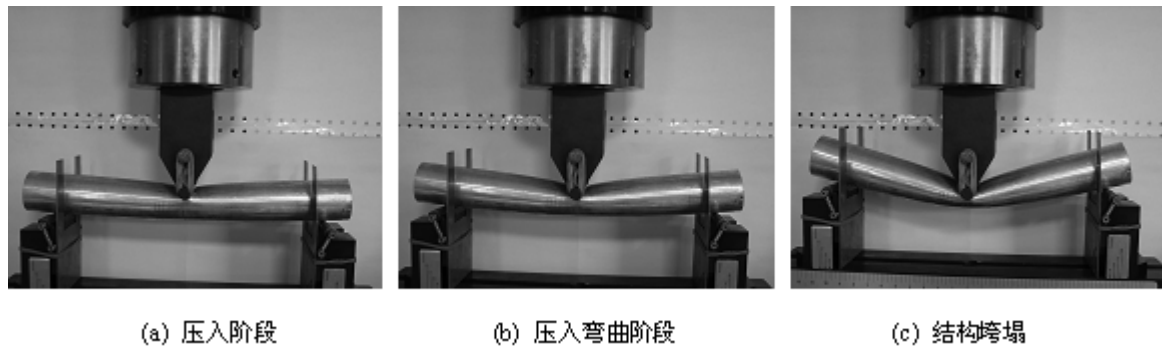
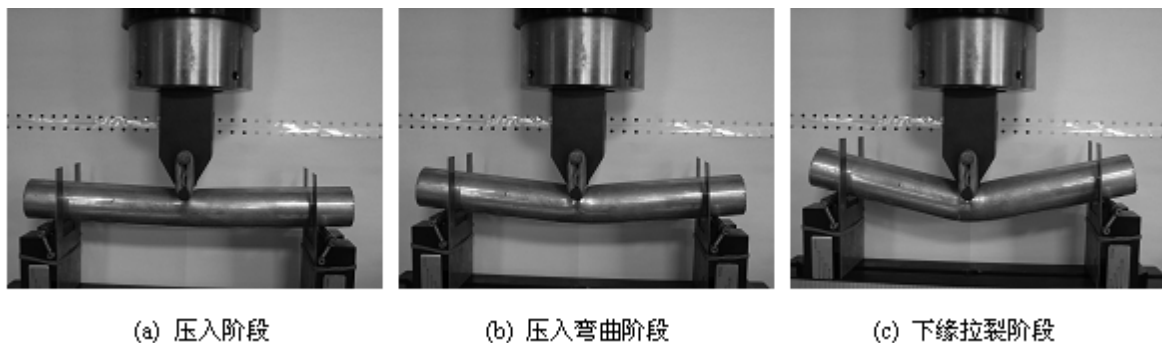
工程材料实验中心 MTS810 材料试验机上进行,其中载荷和位移数据分别由力传感器和位移传感器给出。实验中采用位移加载控制方式,压头加载速率设为  $0.1\text{mm/s}$ 。试件编号方法,以 CS101a 为例,C 表示圆管,S 表示准静态,10 表示壁厚  $1.0\text{mm}$ ,1 表示泡沫铝合金密度为  $\rho_1$ ,a 为重复实验试件序号,其它依次类推。表 2 给出了跨径  $L=250\text{mm}$  实验的试件编号。

表 2 实验试件编号( $L=250\text{mm}$  时)Tab. 2 Numbering method of specimens for  $L=250\text{mm}$ 

| 截面形状        | 加载方式      | 管壁厚度/mm | 泡沫铝合金密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^3$ | 重复     |
|-------------|-----------|---------|---------------------------------------|--------|
| C(circular) | S(static) | 1.0     | 空管                                    | a<br>b |
|             |           | 1.5     | $\rho_1$                              |        |
|             |           | 1.8     | $\rho_2$                              |        |
| 参数数目        | 1         | 1       | 3                                     | 2      |

## 2.2 变形模式

空管三点弯曲变形模式可分为三个阶段:压入阶段、压入弯曲阶段和结构垮塌,如图 3 所示。在压入阶段,结构变形以局部压入为主,整体弯曲变形很小。在压入弯曲阶段,随着压入量的增加,截面抗弯刚度减小,结构的整体弯曲变形越来越大,局部压入和整体弯曲变形一起发展。当结构承载力达到最大值,局部压入量不再增加,结构变形转向整体弯曲为主,截面抗弯刚度随转角增大而减小。

图 3 跨径  $L=250\text{mm}$  时空管三点弯曲变形模式Fig. 3 Deformation modes of hollow-pipe under three-point bending ( $L=250\text{mm}$ )图 4 跨径  $L=250\text{mm}$  时泡沫铝合金填充管三点弯曲变形模式Fig. 4 Deformation modes of aluminum alloy foam-filled pipe under three-point bending ( $L=250\text{mm}$ )

泡沫铝合金填充管的变形模式与空管有所不同,图 4 给出了泡沫铝合金填充管三点弯曲变形模式。主要分为三个阶段:压入阶段、压入弯曲阶段和管壁下缘拉裂破坏阶段。与空管类似,填充管经历压入阶段和压入弯曲阶段,但因泡沫铝合金的支撑作用,局部压入深度较小,而且泡沫铝合金密度越大局部压入深度越小。随后截面的抗弯能力保持在较高的水平上,最后以管壁下缘拉裂形式破坏。

另外,比较空管和填充管的变形模式可发现,空管轴向扁化区域较长,而填充管跨中塑性铰集中在较短的区域内,两边部分变形很小,位移场趋于三角形分布。

### 2.3 结构承载力

根据量纲分析,对泡沫铝合金填充圆管三点弯曲结构有  $P = f(\delta; L, D, t, \sigma_0, \sigma_f)$ , 其中  $P, \delta, L, D, t, \sigma_0, \sigma_f$  分别为压头载荷、压头位移、梁跨径、圆管直径、管壁厚度、管壁材料特征应力和泡沫铝合金的特征应力,  $\sigma_0 = (\sigma_{0.2} + \sigma_u)/2$ 。由此可得

$$\frac{P}{m_0} = f\left(\frac{\delta}{D}; \frac{D}{t}, \frac{L}{D}; \frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right) \quad (1)$$

其中  $m_0 = \sigma_0 t^2/4$ , 有三个无量纲参数  $D/t, L/D, \sigma_f/\sigma_0$ 。

圆管结构三点弯曲的承载能力与  $D/t, L/D, \sigma_f/\sigma_0$  三个无量纲参数都有关系, 图5给出了跨径  $L=250\text{mm}$  时压头载荷和压头位移之间的关系曲线。从图上可以看出, 填充泡沫铝合金后结构承载力都有很大的提高, 结构发生管壁下缘拉裂破坏, 随着泡沫铝合金密度的增大, 结构最大承载力增大, 但破坏应变减小。

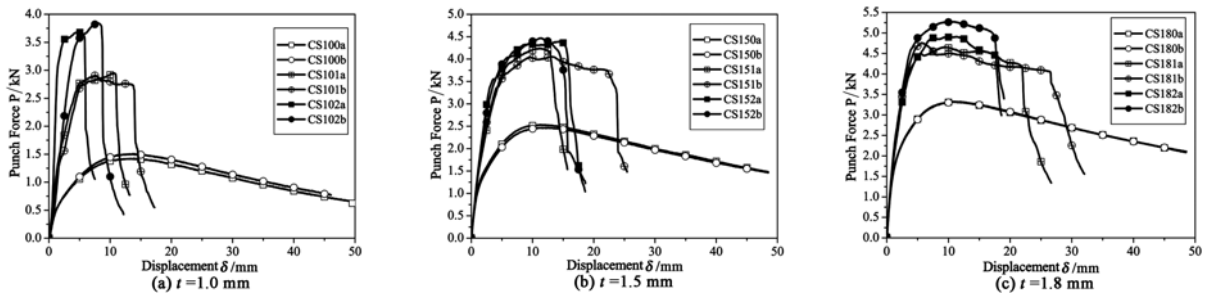


图5 跨径  $L=250\text{mm}$  的空管和泡沫铝合金填充管三点弯曲时的压头载荷位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of hollow and foam-filled pipes under three-point bending ( $L=250\text{mm}$ )

为简单起见, 跨径为  $L=200\text{mm}$  的试件编号方式为, 在跨径为  $L=250\text{mm}$  试件编号的基础上省去 S, 例如 CS100 改为 C100, 依次类推, 其它符号含义不变。图6给出了跨径  $L=200\text{mm}$  时压头载荷位移曲线, 载荷变化趋势与  $L=250\text{mm}$  时相同。与跨径  $L=250\text{mm}$  相比, 压头载荷普遍增大。

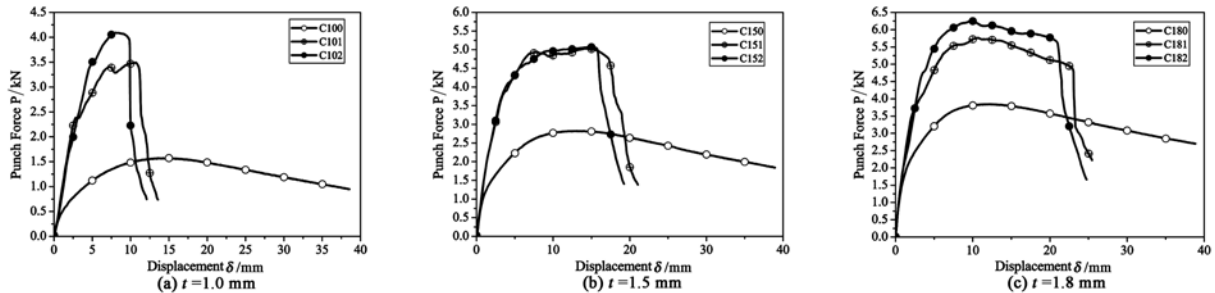


图6 跨径  $L=200\text{mm}$  的空管和泡沫铝合金填充管三点弯曲时的压头载荷位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of hollow and foam-filled pipes under three-point bending ( $L=200\text{mm}$ )

### 3 分析讨论

圆管的三点弯曲既有压入问题又有弯曲问题, 故应从压入和弯曲两个角度分析其承载特点。Reid 等<sup>[9]</sup>的研究表明, 在空管局部压入阶段存在下列关系:  $\xi/R = \sqrt{\pi\delta_p/2t}$ ,  $P/m_0 = 8\sqrt{2\pi\delta_p/t}$ , 其中  $\xi$  为压入区轴向长度的一半,  $R$  为变形前的圆管半径,  $\delta_p$  为压入深度。另外, 为消除材料差异的影响, 可用  $M/M_0$  的值来研究结构的弯曲承载性能, 其中  $M = PL/4$  为简支梁跨中截面弯矩,  $M_0$  为圆截面空管全塑性弯矩承载力:

$$M_0 = \int_A \sigma_0 y dA = \sigma_0 (D - t)^2 t \quad (2)$$

最大承载力是结构承载能力的表征, 可通过研究最大承载力来分析结构承载特点。对于空管, 压头压力主要由上缘受拉区和侧边承担, 下缘受拉区不直接承担横向压力, 因此上缘受拉区的局部压入量较

大。图 7(a)给出了实验得到的  $P_{\max}/m_0 \sim D/t$  关系,可以看出  $P_{\max}/m_0$  随着  $D/t$  的增大而增大,另外当跨径减小时压头载荷  $P_{\max}/m_0$  增大。图 8 所示的实验结果还表明,最大压入深度随  $D/t$  增大而增大,随跨径减小而增大。显然,当局部压入深度  $\delta_p^{\max}/D$  增大时截面抗弯能力下降,从图 7(b)所示的  $M_{\max}/M_0 \sim D/t$  变化关系也可以看出,当跨径减小时截面抗弯能力下降。

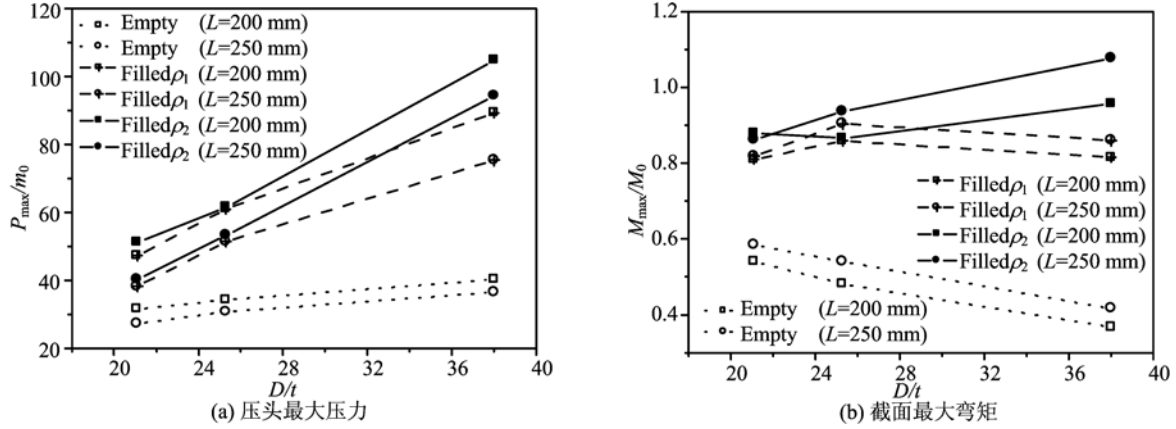


图 7 结构最大承载力与  $D/t$  的关系

Fig. 7 Relationship between the limit of load-bearing capacity and  $D/t$

填充泡沫铝合金后,由于它的支撑作用,压头压力有很大部分由泡沫铝合金承担,并通过它传递到管壁下缘受拉区,从而使管壁局部压入量减小,结构能保持较高的承载力。从图 7 给出的  $P_{\max}/m_0 \sim D/t$  和  $M_{\max}/M_0 \sim D/t$  关系可以看出填充泡沫铝合金后结构承载力的相对提高量。总体来说,结构承载力的相对提高量随泡沫铝合金密度增大而增大,随管壁厚度和跨径的减小而增大。图 8 给出了不同管壁厚度、不同填充状态下圆管三点弯曲当载荷最大时的相对压入深度随  $D/t$  的变化关系,其中压入深度定义为管截面竖直方向直径的减小量。从图 8 可以发现,填充同种密度的泡沫铝合金时,相对压入深度随壁厚减小而减小,随跨径减小而增大。压入深度较小时,截面能保持较大的相对承载力  $M/M_0$ 。

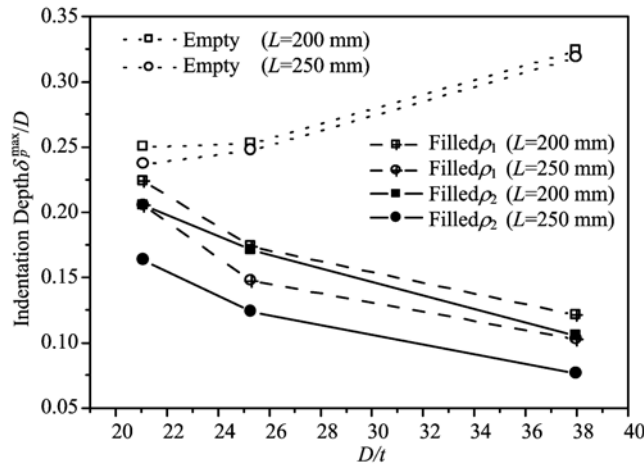


图 8 最大载荷时的压入深度随  $D/t$  的变化关系

Fig. 8 Variation of indentation depth at maximum load with  $D/t$

局部压入位移与总位移之间的关系是研究三点弯曲短梁结构需要解决的第二个问题。Reid 等<sup>[9]</sup>在空管三点弯曲研究中给出压入位移与总位移成正比的结论,即  $\delta_p/\delta = f(D/t, L/D)$ 。因该结论是在实验拟合基础上建立的,有待于进一步研究论证。对于填充管,压入位移/总位移比值  $\delta_p/\delta$  应存在下列一般关系式

$$\frac{\delta_p}{\delta} = g\left(\frac{\delta}{D}; \frac{D}{t}, \frac{L}{D}; \frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right) \quad (3)$$

因涉及参数较多,同时结构变形较为复杂,建立一个完备解析解有一定的困难,可以考虑采用有限元数

值计算的方法进行分析。

泡沫铝的抗拉强度很低,因此泡沫铝梁本身的弯矩承载力很低,泡沫铝填充管梁弯矩主要由管壁承担。泡沫铝主要起支撑管壁,减小局部压入量,从而减小管壁截面抗弯刚度损失、提高结构抗弯能力的作用。

Santosa 等<sup>[13]</sup>的研究表明,泡沫铝填充不锈钢方管结构三点弯曲时,只有压头下、支座上的一段泡沫铝产生较大的应变和应力,其它部分的泡沫铝承担的应力很小,泡沫铝材料的利用率不高,泡沫铝部分填充结构可以在大大减轻结构总重量时保持较高的承载力。当然圆管结构也可以采用部分填充的方法,其具体填充长度可用有限元数值模拟的方法确定。

## 4 结论

空管变形主要分为压入、压入弯曲和结构垮塌三个阶段,填充管结构在经历压入、压入弯曲两个阶段后以管壁下缘拉裂破坏。填充泡沫铝合金后,结构承载力大大提高。结构最大承载力随泡沫铝合金密度的增大而增大,但破坏应变减小。填充泡沫铝合金后截面弯曲承载力的相对提高量随管壁厚度的减小而增大。当跨径减小时,压头载荷增大,局部压入量增大,截面抗弯能力下降。泡沫铝合金主要起支撑管壁,减小局部压入量,从而减小管壁截面抗弯刚度损失、提高结构抗弯能力的作用。

### 参考文献:

- [1] Elchalakani M, Zhao X L, Grzebieta R. Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58: 1407~1430.
- [2] Mamalis A G, Manolacos D E, Baldoukas A K, et al. Deformation characteristics of crashworthy thin-walled steel tubes subjected to bending[J]. *Proc Inst. Mech Eng C J Mech Eng Sci*, 1989, 203: 411~417.
- [3] Elchalakani M, Zhao X L, Grzebieta R H. Plastic mechanism analysis of circular tubes under pure bending[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44: 1117~1143.
- [4] Elchalakani M, Grzebieta R, Zhao X L. Plastic collapse analysis of slender circular tubes subjected to large deformation pure bending[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2002, 5: 241~257.
- [5] Guedes Soares C, Soreide T H. Plastic analysis of laterally loaded circular tubes[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109: 451~467.
- [6] Thomas S G, Reid S R, Johnson W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading-I[J]. *Int J Mechanical Science*, 1976, 18: 325~333.
- [7] Pacheco L A, Durkin S. Denting and collapse of tubular members-a numerical and experimental study[J]. *Int J Mech Sci*, 1988, 30: 317~331.
- [8] Wierzbicki T, Suh M S. Indenting of tubes under combined loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988, 30(3/4): 229~48.
- [9] Reid S R, Goudie K. Denting and bending of tubular beams under local loads[M]. *Structural failure*, New York, Wiley, 1989, 331~364.
- [10] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Experimental and numerical analysis of bending of foam-filled sections[J]. *Acta Mechanica*, 2001, 148: 199~213.
- [11] 许坤,寇东鹏,王二恒,虞吉林. 泡沫铝填充薄壁方形铝管的静态弯曲崩毁行为[J]. *固体力学学报*, 2005, 26(3): 261~266 (Xu Kun, Kou Dongpeng, Wang Erheng, Yu Jilin. Bending collapse behavior of square aluminum extrusions with aluminum foam filler. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2005, 26(3): 261~266 (in Chinese))
- [12] Amkee Kim, Seong-Sik Chen, Md Anwarul Hasan, et al. Bending behavior of thin-walled cylindrical tube filled with aluminum alloy foam[J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 170-273: 46~51.
- [13] Sigit Santosa, John Banhart, Tomasz Wierzbicki. Bending crushing resistance of partially foam-filled sections[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2: 223~227.

## An Experimental Study on Three-Point Bending of Aluminum Alloy Foam-Filled Cylindrical Aluminum alloy Pipe

XIE Zhong-you, YU Ji-lin, LI Jian-rong

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

**Abstract:** In this paper, three-point bending behavior of aluminum alloy foam-filled cylindrical aluminum alloy pipe with three different pipe thicknesses and two different spans was investigated experimentally. Three kinds of deformation modes, namely indentation, indentation-bending and tensile fracture of underneath pipe skin, were observed. Load-displacement curves of hollow and foam-filled pipes were obtained and compared with each other. It is found that the load-bearing capacity increases with the increase of the foam density but the failure strain decreases. The relative increase of the load-bearing capacity increases with the decrease of the pipe-wall thickness and the increase of the span. The mechanism of foam filler in enhancing the load-bearing capacity was also analyzed. It is found that foam filler will significantly reduce the indentation and the consequent degradation of the flexural rigidity of the cross-section, thus increase the load-bearing capacity.

**Keywords:** aluminum foam; cylindrical pipe; three-point bending