

泡沫铝填充薄壁圆管的三点弯曲实验的数值模拟*

谢中友 李剑荣 虞吉林**

(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 泡沫金属填充薄壁结构的应用日趋广泛,建立合理的数值计算模型对结构设计和工程应用非常重要.该文通过对泡沫铝填充薄壁铝合金圆管的三点弯曲实验的数值模拟,研究了它的力学行为.采用 ABAQUS 软件,建立了空管和泡沫铝全填充管的有限元模型,并对这两种结构在三点弯曲下的力学行为进行了数值模拟,所得结果与实验结果符合得较好.通过数值模拟分析了结构的承载机理和不同压头直径对结构承载能力的影响.此外,还研究了泡沫铝部分填充圆管的三点弯曲行为,分析了不同填充长度对结构承载能力的影响.

关键词 泡沫铝填充管,薄壁圆管,三点弯曲实验,数值模拟

0 引言

泡沫金属填充薄壁结构可以在结构总重量增加不多时大幅度提高结构承载能力和能量吸收性能.近几十年来,由于各种泡沫金属制备工艺的发展,泡沫金属的应用前景越来越广. Seizberger 等^[1]研究了泡沫铝填充圆管轴向压缩行为,发现填充泡沫铝改变了空管结构的变形模式,提高了结构能量吸收量,填充结构的单位质量吸能高于空管结构. Santosa 等^[2]用实验和数值模拟方法分析了泡沫铝填充方管的力学行为,结果表明泡沫铝填充结构会产生多个褶皱,部分填充能够大量提高单位质量结构承载能力.许坤等^[3]研究了泡沫铝填充薄壁方管的弯曲崩毁行为,说明泡沫铝填充显著提高了结构承载能力.圆管是汽车、航空、船舶等行业的常用结构, Reid 等^[4]曾对薄壁圆管三点弯曲力学行为做过研究,得到一种载荷与压头总位移的半经验半理论关系. Kim 等^[5]用实验和数值模拟的方法研究了泡沫铝合金填充圆管的弯曲行为,但缺乏对填充结构承载能力内在机理的研究分析.

本文对泡沫铝填充薄壁圆管的三点弯曲实验进行了有限元数值模拟,分析了泡沫铝填充物对提高结构承载能力的作用机理,并将数值模拟结果与实验结果进行了对比.最后,进一步研究了压头直径和局部填充泡沫铝对结构承载能力的影响.

1 材料性能实验和三点弯曲实验

实验采用外径为 38 mm,壁厚 1.0 mm 的 AA6063 T6 铝合金圆管,其杨氏模量为 51.9 GPa,屈服应力 153.1 MPa,极限强度 159.7 MPa. 闭孔泡沫铝的平均密度约为 0.393 g/cm³ (相对密度 0.146),胞孔尺寸约为 1-2 mm,基体为工业纯铝.图 1 给出了泡沫铝单轴压缩的应力应变曲线,其杨氏模量为 253 MPa,平台应力(定义为应变范围 0-0.5 间的平均应力)为 6.29 MPa.

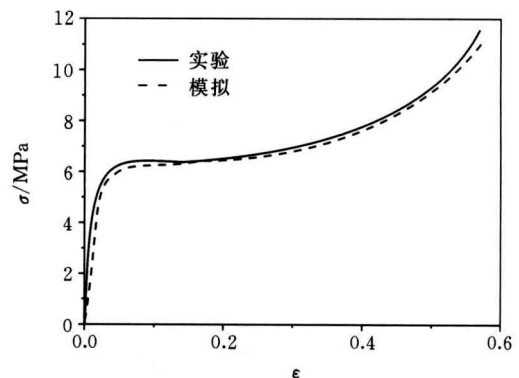


图 1 泡沫铝的单轴压缩应力应变曲线

三点弯曲试件总长 300 mm,跨径为 250 mm,刚性支座和压头直径均为 10 mm,管壁和泡沫铝之

* 国家自然科学基金项目(90205003,10532020,10672156)资助.
2006-08-31 收到第 1 稿,2007-04-09 收到修改稿.

** 通讯作者. Tel :0551-3600792, Fax :0551-3606459, E-mail : jlyu@ustc.edu.cn.

间无粘结,间隙约 0.15 mm. 实验得到的压头载荷位移曲线如图 2 所示.

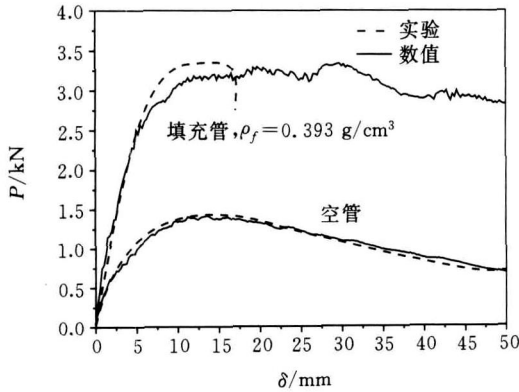


图 2 空管和填充管三点弯曲的压头载荷位移曲线

2 数值模拟

2.1 有限元模型

数值计算采用 ABAQUS/ EXPLICIT 有限元分析软件. 考虑到结构的对称性, 只选了 1/4 结构加对称边界条件, 如图 3 所示. 管壁采用三维壳单元 (S4R), 网格尺寸在半长 25 mm 的跨中加密区为 2×2 mm, 其余为 3×3 mm; 泡沫铝芯采用三维实体单元 (C3D8R), 网格划分在跨中加密区为 $2 \times 2 \times 2$ mm, 其余为 $2 \times 4 \times 4$ mm. 压头和支座均采用刚体单

元. 管壁材料采用各向同性弹塑性模型和 Mises 屈服准则, 泡沫铝材料采用可压缩泡沫 (Crushable Foam) 模型. 将实验测得的泡沫铝的单轴压缩工程应力应变曲线转化为真应力真应变曲线时, 考虑到泡沫铝材料准静态压缩时基本上没有横向变形, 真应力值取为单轴压缩应力的实验值, 而真应变值按 $\epsilon_{true} = -\ln(1 - \epsilon_{nom})$, $\sigma_{pl} = \sigma_{true} - \sigma_{true} / E$ 计算. 作为比较, 数值模拟得到的泡沫铝材料单轴压缩工程应力应变曲线也画在图 1 中.

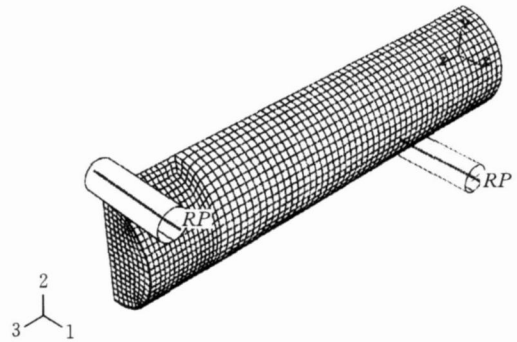


图 3 三点弯曲实验有限元分析模型

模型采用位移加载, 速度设为 0.5 m/s. 管壁与压头、支座之间的接触设为光滑接触 (Frictionless), 管壁与泡沫铝之间的接触设为粗糙接触 (Rough).

2.2 变形模式和计算结果分析

图 4 给出了压头位移为 $\delta = 50$ mm 时的空管结

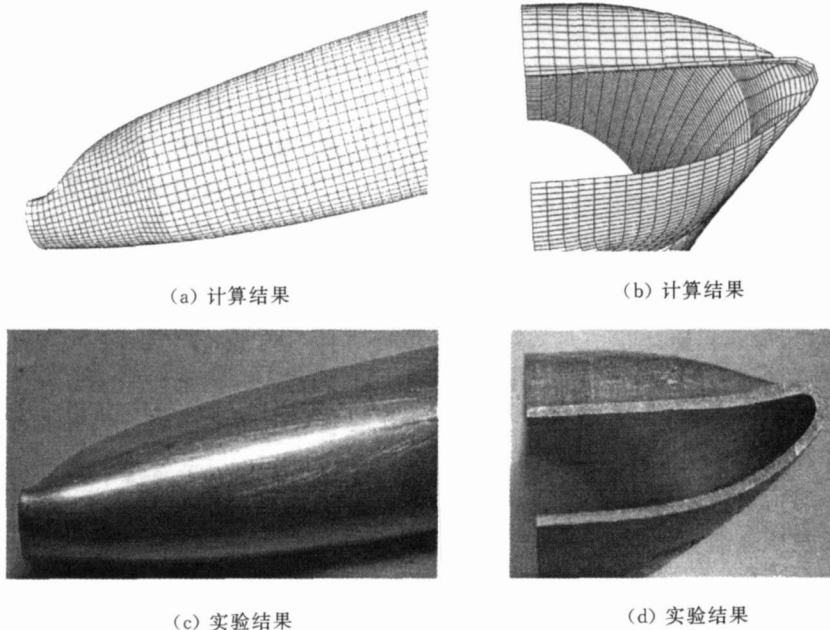


图 4 $\delta = 50$ mm 时空管结构的变形

构变形图.可以看出,数值模拟结果与实验结果符合较好,空管结构扁化区域较长,截面变形量大.图 5 给出了压头位移为 $\delta = 18 \text{ mm}$ 时的填充结构变形图.可以看出,填充管变形集中在压头下方一小段长度内,余下部分扁化不明显、变形很小.比较可知,泡沫铝起了支撑管壁、减小截面扁化的作用.另外,不论填充与否,结构在受压区压头下方都产生一个垂直方向内陷褶皱和两个侧向外突褶皱,导致截面抗弯能力降低.因管壁材料延伸率较低,填充结构在压

头位移约为 $\delta = 18 \text{ mm}$ 时发生下缘管壁拉裂破坏.

计算得到的三点弯曲压头载荷位移曲线也画在图 2 中.由于在模型中没有引入管壁材料拉裂失效机制,填充管的计算曲线没有计及破坏.可以看出,数值计算结果和实验符合得较好.比较可知,填充泡沫铝后结构承载能力有很大提高.空管结构由于截面扁化量较大,截面抗弯刚度损失较多,承载能力较低,而填充后因泡沫铝对管壁内侧的支撑作用,减小了截面扁化,从而提高了结构承载能力.

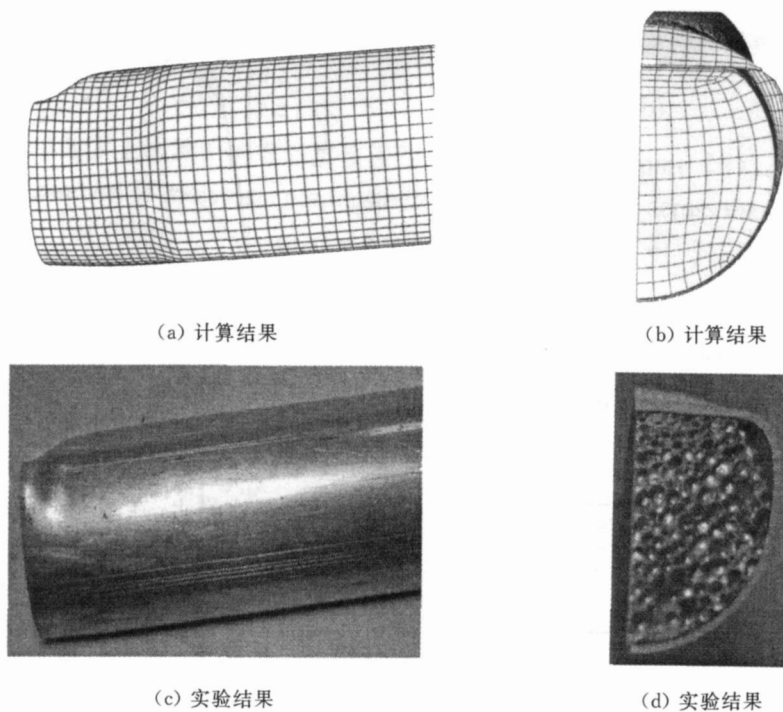


图 5 $\delta = 18 \text{ mm}$ 时填充结构的变形

为了进一步研究填充结构中泡沫铝的承载机制,需要对加载过程中泡沫铝应力应变的分布和变化情况进行分析.图 6 给出了跨中截面泡沫铝的等效塑性应变图,可以看出,随着压头位移增大,受压区的泡沫铝逐渐压实,由此抗压强度增大,部分截面压力转由受压区的泡沫铝承担,结构承载能力随之提高.

局部压入量与压头直径有关,因此压头直径可能对结构承载能力产生一定的影响.不同压头直径的数值模拟结果如图 7 所示.可以看出,与空管相比,压头直径对填充管的影响更大.当压头直径较小时,局部压入量较大,截面局部压入变形量较大导致抗弯能力损失较多,所以承载能力随之降低较多.

2.3 部分填充泡沫铝圆管的数值模拟

Santosa 等^[6]曾对部分填充泡沫铝方管进行过研究,发现部分填充能有效降低结构总重量,同时仍保持较高的承载能力.图 8 给出了全填充泡沫铝圆管的 Mises 应力分布情况.从图中可以看出,泡沫铝只在跨中和支座处承受较大应力,其它部分几乎不承载.由此我们计算了填充长度为 $L_f = 20 \text{ mm}$ 、 40 mm 和 60 mm 三种情况下的结构承载能力.考虑到部分填充需要对泡沫铝和管壁进行粘结这一实际情况,泡沫铝与管壁之间由粗糙接触 (Rough) 改为固定约束 (Tied).作为比较,计算了接触为固定约束 (Tied) 时的全填充结构.图 9 给出了填充不同长度泡沫铝时的结构载合力-位移曲线.结果表明,与空

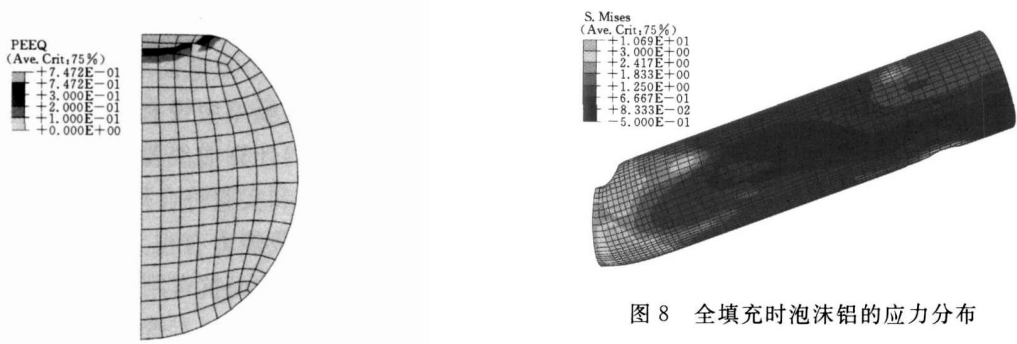
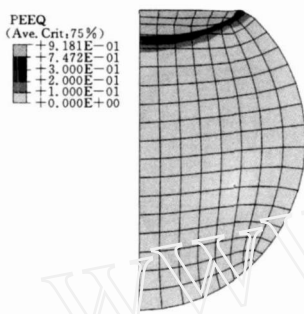


图 8 全填充时泡沫铝的应力分布

(a) $\delta=5\text{ mm}$



(b) $\delta=10\text{ mm}$

图 6 跨中截面上泡沫铝的等效塑性应变分布

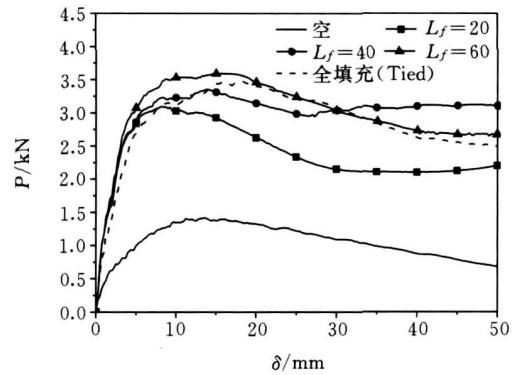


图 9 不同填充长度的泡沫铝填充圆管的荷载位移曲线

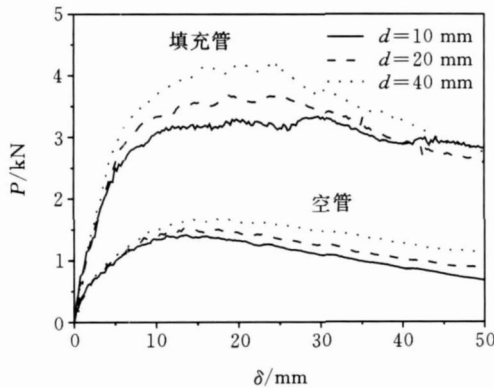


图 7 压头直径对承载能力的影响

管结构相比,适当部分填充泡沫铝能大大提高结构承载能力,且结构总质量增加不多.

3 结论

空管和泡沫铝填充管三点弯曲实验的数值模拟结果与实验结果吻合较好,说明本文的计算模型是合理的.实验和数值计算结果都表明,填充泡沫铝后,薄壁圆管三点弯曲承载能力有很大提高,且能保

持在一定的水平上.在填充结构中,泡沫铝主要起支撑管壁、减小截面变形的作用.计算结果还表明,压头直径对结构承载能力有一定的影响,部分填充可以在结构重量增加不多时大大提高结构承载能力.

对于泡沫铝填充薄壁结构,由于涉及的参数较多、结构变形复杂,建立简洁合理的理论模型有一定的难度,因此在实验基础上建立合理的数值计算模型对于结构力学性能研究和结构优化设计有着重要的现实意义.

参考文献

[1] Seitzberger M, Rammerstorfer F G, et al. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37: 4125-4147.

[2] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Experimental and numerical analysis of bending of foam-filled sections[J], Acta Mechanica, 2001, 148:199-213.

[3] 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.
- [4] Reid S R, Goudie K. Denting and bending of tubular beams under local loads[J]. *Structural Failure*, New York: Wiley, 1989, 331-364.
- [5] Kim A, Chen S S, Hasan M A, Cho S S. Bending behavior of thin-walled cylindrical tube filled with aluminum alloy foam [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 170-273:46-51.
- [6] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Bending crushing resistance of partially foam-filled sections [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2(4): 223-227.

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-POINT BENDING EXPERIMENTS OF THIN-WALLED CYLINDRICAL TUBES FILLED WITH ALUMINUM FOAM

Xie Zhongyou Li Jianrong Yu Jilin

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

Abstract Thin-walled structures with metallic foam filler have been applied more and more widely. It is of great importance to establish appropriate numerical models for their design and engineering application. In this paper, the mechanical behavior of thin-walled cylindrical aluminum alloy tube with aluminum foam filler is studied by simulating three-point bending experiments numerically. Finite element models of empty and fully foam-filled tubes are established and the three-point bending behavior of these structures is simulated with the use of ABAQUS software. The numerical results are in good agreement with those obtained experimentally. The mechanism of load-bearing capacity of the structure and the influence of the pressure head diameter on the load-bearing capacity are analyzed by numerical simulation. In addition, three-point bending behavior of partially foam-filled aluminum tubes is studied and the influence of the length of filled section is analyzed.

Key words aluminum-foam filled tube, thin-walled cylindrical tube, three-point bending test, numerical simulation