

DOI: 10.3901/JME.2022.12.075

胞孔孔径对泡沫铝压缩力学性能影响的仿真研究*

庄蔚敏 王恩铭

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130022)

摘要: 为研究胞孔孔径对泡沫铝压缩力学性能的影响,使用基于 Voronoi 模型的 ABAQUS 泡沫铝建模插件建立了三维实体泡沫铝模型。根据泡沫铝孔隙率关于胞孔数量及平均壁厚的响应面模型,建立了三种孔隙率(90%、80%、70%)下具有不同胞孔孔径的泡沫铝模型。使用 ABAQUS 有限元仿真软件进行准静态压缩仿真,对比分析了胞孔孔径对泡沫铝压缩力学性能的影响。在考虑胞孔孔径的影响下,对现有泡沫铝单轴压缩刚塑性硬化模型(R-PH 模型)进行了修正。结果表明,相同孔隙率下,具有较小胞孔孔径的泡沫铝在压缩过程中各阶段的应力值更大,其单位体积吸能量增大,最大吸能效率降低,吸能能力减弱,致密应变及平台应力增加;在低孔隙率的泡沫铝中,胞孔孔径对泡沫铝平台应力影响显著;考虑胞孔孔径的修正 R-PH 模型能很好地预测不同孔隙率及胞孔孔径的泡沫铝的压缩力学行为。

关键词: 闭孔泡沫铝; 三维 Voronoi 模型; 准静态压缩; 胞孔孔径; 本构模型

中图分类号: TG146

Simulation Study on the Influence of Pore Size on the Compression Mechanical Properties of Aluminum Foam

ZHUANG Weimin WANG Enming

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: In order to study the influence of pore size on the compression mechanical properties of aluminum foam, ABAQUS aluminum foam modeling plug-in based on Voronoi model is used to build three-dimensional solid foam aluminum models. According to the response surface model of porosity on cell number and average cell wall thickness, foam aluminum models with different pore sizes under porosity (90%, 80%, 70%) are built. Quasi-static compression simulation with ABAQUS finite element simulation software is used to compare and analyze the influence of pore size on the compressive mechanical properties of aluminum foam. The rigid-plastic hardening model (R-PH model) of aluminum foam under uniaxial compression considering the influence of pore size is modified. The results show that with the same porosity, aluminum foam with smaller pore size has greater stress values at each stage during compression, the energy absorption per unit volume increases but the maximum energy absorption efficiency and the energy absorption capacity decrease, the densification strain and the plateau stress increase. Pore size has a significant influence on the plateau stress of aluminum foam with low porosity. The modified R-PH model considering pore size can well predict the compression mechanical behavior of aluminum foam with different porosity and pore size.

Key words: closed cell aluminum foam; three-dimensional Voronoi model; quasi-static compression; pore size; constitutive model

0 前言

泡沫铝是一种力学性能和物理性能优良的轻质多孔材料,特别是孔隙率大于 70% 的泡沫铝在吸能、

缓冲及防爆等方面表现优异,已经在汽车交通、铁路运输和航空航天等领域得到广泛的应用^[1-4],国内外很多学者都对泡沫铝的相关力学性能及吸能特性进行了研究^[5-8]。

孔隙率和胞孔孔径是泡沫铝的重要参数,泡沫铝材料的力学性能不仅与孔隙率密切相关,同一孔隙率的泡沫铝在胞孔孔径不同时,其力学性能也呈

* 国家自然科学基金(51775227)和吉林省自然科学基金(20210101054JC)资助项目。20210831 收到初稿,20220116 收到修改稿

现差异化。很多学者都针对胞孔孔径的影响进行了相关研究,陈哲等^[9]使用二维规则泡沫铝模型研究了孔隙率、孔径大小和胞孔结构对泡沫铝力学性能及吸能特性的影响;SU 等^[10]通过试验和数值模拟的方法研究了胞孔孔径的分散性对泡沫铝弹性模量的影响;YANG 等^[11]在孔隙率和孔径耦合的条件下,研究了孔隙率和胞孔孔径对泡沫铝合金准静态压缩行为的影响。但由于某些研究假设和模拟技术的简化,使得研究结论具有相对局限性。

泡沫铝细观几何模型是研究胞孔孔径影响的重要工具。相较于规则孔洞模型或 Kelvin 模型,Voronoi 模型的建立过程更接近于真实泡沫铝发泡的物理过程^[12-13],在细观几何特征上具有很好的一致性,是模拟泡沫铝的理想模型,已经在泡沫铝的压缩力学性能、尺寸效应、应变率效应以及基体材料等方面的研究中得到了广泛应用^[14-17]。但是目前 Voronoi 模型建模方式的参数化程度不高,无法准确建立特定孔隙率的泡沫铝模型,难以分析特定孔隙率下不同胞孔孔径对泡沫铝力学性能的影响;胞孔孔径对各孔隙率下的泡沫铝压缩力学性能的影响程度还无统一结论;同时在仿真分析时,本构方程中忽略胞孔孔径的影响,将会影响泡沫铝力学性能预测的准确性。

本文提出了特定孔隙率泡沫铝模型参数化建模方法,通过建立孔隙率关于胞孔数量及平均壁厚的响应面模型,实现了特定孔隙率的泡沫铝模型的建立。使用基于 Voronoi 模型和 ABAQUS 仿真软件开发的三维泡沫铝建模插件建立 90%、80% 和 70% 三种孔隙率下胞孔孔径在 3~4 mm 之间的泡沫铝模型,并进行了准静态压缩仿真,对比分析了胞孔孔径对泡沫铝的应力-应变曲线、吸能量、吸能效率、致密应变及平台应力的影响。考虑胞孔孔径影响,对现有的泡沫铝本构模型进行了修正,建立了以孔隙率和胞孔孔径为变量的单轴压缩刚塑性硬化模型。

1 三维泡沫铝模型建立

本文使用基于 Voronoi 模型及 Python 语言的 ABAQUS 三维泡沫铝建模插件建立了泡沫铝模型,其用户界面如图 1 所示。通过输入模型尺寸、胞孔数量、平均壁厚、壁厚随机范围及孔隙率等建模参数,即可在 ABAQUS 软件中生成具有随机壁厚的三维实体泡沫铝模型。

基于 Voronoi 模型建立的泡沫铝模型的生成控

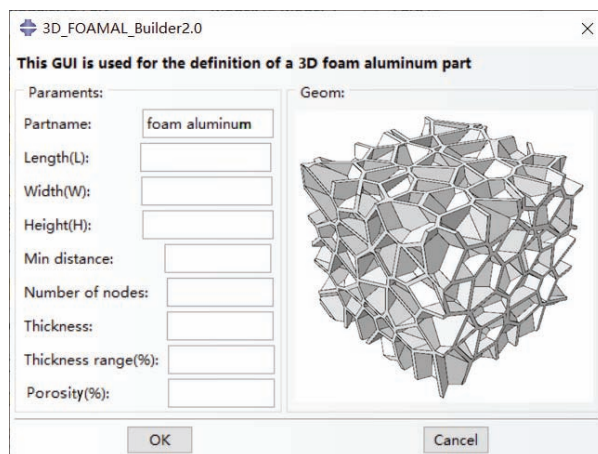


图 1 泡沫铝建模插件界面

制参数主要有模型空间边界尺寸、控制点数量 N 、控制点间最小距离 D_m 。对于给定边界尺寸与控制点数量 N 的模型,控制点间最小距离 D_m 可以采用以下公式进行计算

$$D_m = (1-k) \frac{\sqrt{6}}{2} \left(\frac{V}{\sqrt{2}N} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中, k 为不规则度系数,其取值范围为 0~1,用来衡量模型的随机程度,本文所建模型 k 取值为 0.2, V 为模型生成空间总体积。从模型生成的角度来讲,Voronoi 模型中的控制点个数 N 即可以认为是该泡沫铝模型中的胞孔数量 n 。为方便计算,可对上述公式进行简化处理

$$D_m = \left(\frac{2V}{3n} \right)^{1/3} \quad (2)$$

孔隙率 P 表示泡沫铝中孔隙体积占总体积的百分比,本文所建实体泡沫铝模型的孔隙率可以由以下公式计算得出

$$P = \left(1 - \frac{V_s}{V} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, V_s 表示泡沫铝实体部分体积。

基于 Voronoi 模型建立的泡沫铝中胞孔的结构均为凸多面体,其胞孔孔径可以使用平均等效孔径进行表征。假设某泡沫铝模型中共有 n 个胞孔,其中第 i 个胞孔的等效孔径 D_i 表示与该胞孔体积 V_i 相等的球体的直径

$$D_i = \left(\frac{6V_i}{\pi} \right)^{1/3} \quad (4)$$

则整个泡沫铝模型的平均等效孔径 \bar{D} 可表示为

$$\bar{D} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{6V_i}{\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{6VP}{\pi n} \right)^{1/3} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 当泡沫铝模型的孔隙率一定时, 泡沫铝的孔径主要是由胞孔数量 n 所决定的, 泡沫铝内胞孔数量越多, 则孔径越小。在建模过程中给定孔隙率 P 与平均等效孔径 \bar{D} 时, 可以使用以下公式对胞孔数量 n 进行计算

$$n = \frac{6VP}{\pi \bar{D}^3} \quad (6)$$

在泡沫铝建模插件中, 使用响应面模型来表示不同泡沫铝模型中孔隙率与胞孔数量 n 及平均壁厚 \bar{T} 之间的关系。建立孔隙率与胞孔数量及平均壁厚的二次响应面模型

$$P = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 \bar{T} + \beta_{11} n^2 + \beta_{22} \bar{T}^2 + \beta_{12} n \bar{T} \quad (7)$$

对模型尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的样本模型参数进行拟合后得到各待定系数 β 的值, 忽略系数影响较小的次要项后得到泡沫铝模型孔隙率的响应面方程为

$$P = 0.985 - 0.451\bar{T} - 8.57 \times 10^{-4} n \bar{T} \quad (8)$$

该响应面模型(图 2)的 R^2 系数为 0.998, 调整 R^2 系数为 0.998, 两值均极为接近 1, 表明该响应面模型的拟合程度很好, 响应面方程式(8)也可以表示为

$$P = 0.985 - 0.451\bar{T} - 6.86\rho_n \bar{T} \quad (9)$$

式中, $\rho_n = \frac{n}{V}$, 表示胞孔密度, 即单位体积泡沫铝中所包含的胞孔数量, 式(9)即可表示任意尺寸的立方体泡沫铝的响应面方程。

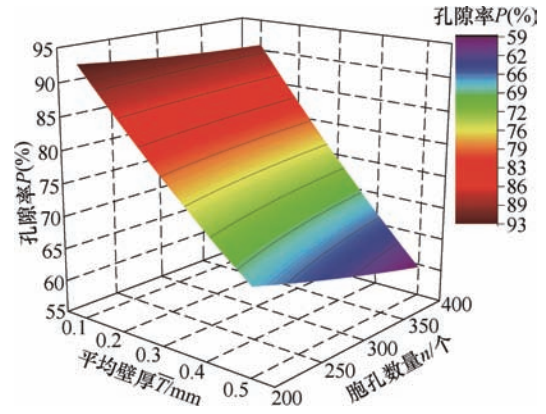


图 2 响应面模型

响应面模型是内嵌在泡沫铝建模插件的算法中的, 实现了孔隙率及建模参数之间的耦合。当给定泡沫铝模型尺寸、孔隙率 P 及胞孔孔径 \bar{D} 时, 根据式(6)可以计算出胞孔数量 n , 然后插件即可使用响应面方程式(8)计算出平均壁厚 \bar{T} , 并根据胞孔数量 n 及平均壁厚 \bar{T} 建立泡沫铝模型, 实现了特定孔隙率泡沫铝的参数化建模。泡沫铝建模插件在 ABAQUS 软件中的脚本运行方式及建模流程图如图 3 所示。通过循环算法得到 Voronoi 多面体的每个顶点坐标后, 对顶点进行连线从而生成 Voronoi 多面体线框模型, 然后使用闭合曲面和填充实体功能得到 Voronoi 多面体实体模型, 每一个 Voronoi 多面体实体模型为泡沫铝中的一个胞孔, 将所得全部 Voronoi 多面体实体模型装配, 并与模型生成空间进行减布尔运算即可得到泡沫铝模型。



图 3 插件建模流程图

2 泡沫铝压缩仿真

2.1 仿真模型建立

建立尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 孔隙率为 90%、80%、70% 的泡沫铝模型, 且每种孔隙率下分为三种胞孔孔径, 共建立 9 个泡沫铝模型用于准静态压缩仿真分析。设定泡沫铝胞孔孔径在 $3 \sim 4 \text{ mm}$ 之间, 且在同种孔隙率下, 各泡沫铝之间胞孔孔径差值均为 0.4 mm , 详细模型参数见表 1。

表 1 泡沫铝模型参数

模型序号	孔隙率 $P(\%)$	胞孔孔径 \bar{D}/mm
1	90	4.0
2	90	3.6
3	90	3.2
4	80	3.9
5	80	3.5
6	80	3.1
7	70	3.8
8	70	3.4
9	70	3.0

使用 ABAQUS 有限元仿真软件的显示动力学模块进行准静态压缩仿真。泡沫铝基体材料为纯铝,

采用理想弹塑性本构模型进行表征^[16],其塑性段屈服强度为 80 MPa,具体材料参数见表 2。支撑端和加载端设置为 30 mm×30 mm×2 mm 的刚性平板,下板(支撑端)固定,其自由度被完全约束,上板(加载端)向下匀速运动对泡沫铝模型进行压缩。在保证准静态效果的前提下可以适当提高加载速度,以提高仿真计算效率。本仿真中设置加载速度为 2 mm/s,并设置总压缩行程为 16 mm,即认为泡沫铝高度被压缩至 4 mm 时为完全压实。装配好的模型如图 4a 所示,泡沫铝模型采用四面体单元(C3D4)进行划分(图 4b)。通过单元的有效性验证,当网格近似全局尺寸小于 0.3 mm 时对仿真结果的影响很小,因此在保证计算效率的前提下选用 0.3 mm 的网格对泡沫铝进行划分。孔隙率为 90%,胞孔孔径为 3.6 mm 的泡沫铝有限元模型中网格数量为 514 000 个,节点数量为 163 000 个。泡沫铝与刚性平板及泡沫铝自身之间采用通用接触,法向设置为硬接触,切向的摩擦因数设置为 0.05。

表 2 泡沫铝材料属性

密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
2 700	70 000	0.33	80

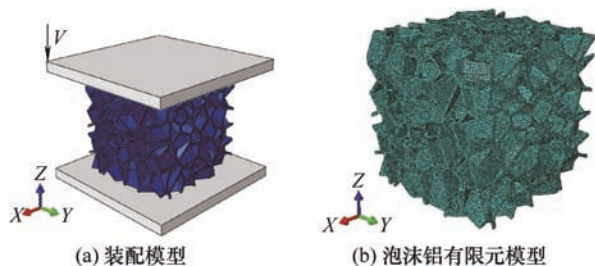


图 4 泡沫铝压缩有限元模型

2.2 仿真模型验证

本文试验中泡沫铝试样采用平均孔径为 3.5 mm、孔隙率在 90%±2% 范围内的闭孔泡沫铝,并使用线切割加工为 20 mm×20 mm×20 mm 的立方体小块(图 5)。压缩试验平台为 MTS810 电液伺服试验系统(图 6),设置压头的加载速度为 1.8 mm/min,整个压缩行程为 16 mm。将孔隙率为 90%、胞孔孔径为 3.6 mm 的泡沫铝模型的压缩仿真结果与试验结果进行对比。从压缩变形图(图 7)可以看出,仿真中泡沫铝模型(图 7a)内部结构受力及形变相对均匀的,呈现整体式下沉趋势,符合准静态加载条件下的均匀变形模式,其在压缩过程中各阶段的变形情况均与试验中泡沫铝变形情况(图 7b)相似。



图 5 泡沫铝试样



图 6 MTS810 电液伺服试验系统

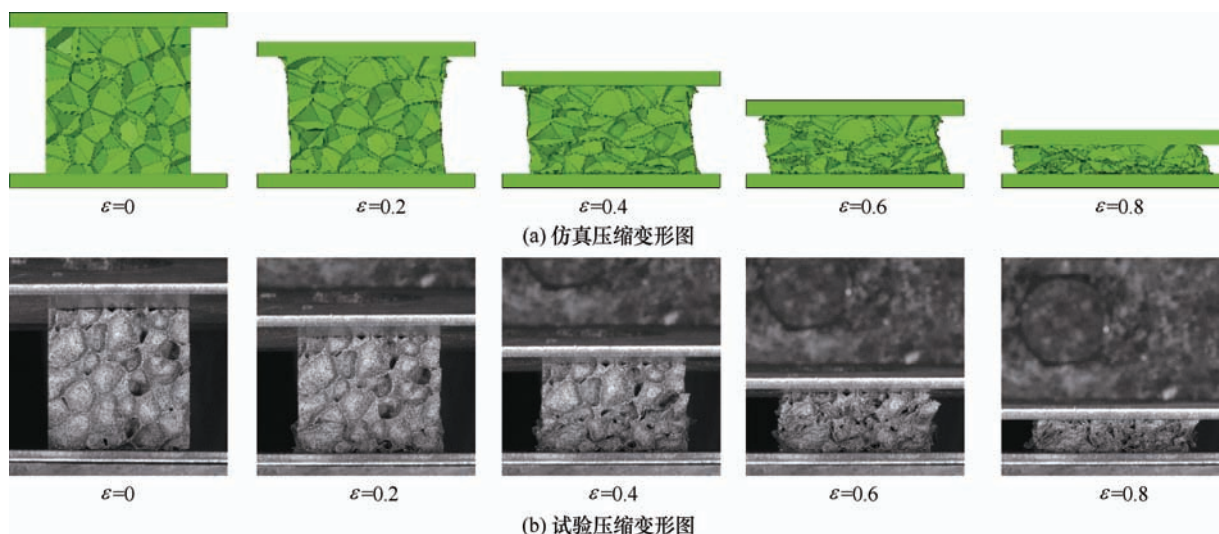


图 7 泡沫铝模型试验和仿真压缩变形图

提取加载端的载荷及位移计算工程应力及工程应变, 得到泡沫铝压缩应力-应变曲线如图 8 所示。对比仿真数据与试验数据发现, 仿真结果中应力-应变曲线变化趋势基本和试验结果的变化趋势具有较好的一致性, 且两者间的误差较小。在使用 ABAQUS 显示动力学模块进行仿真分析时, 泡沫铝在初始瞬时载荷作用下会出现一个较大的接触反力, 产生仿真曲线弹性段的斜率较试验曲线更大的现象。

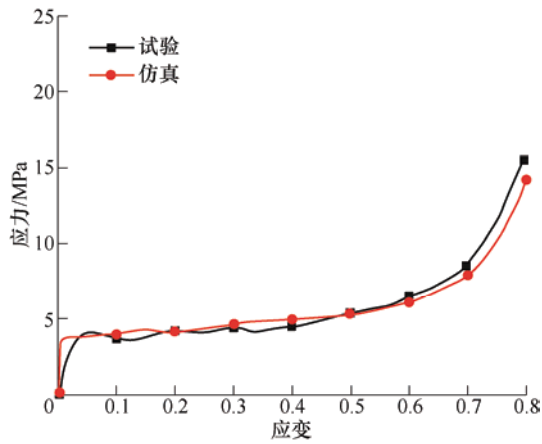


图 8 试验及仿真应力-应变曲线

3 仿真分析结果

3.1 应力-应变曲线

对表 2 中各泡沫铝模型分别进行准静态压缩仿真, 处理仿真结果后得到应力-应变曲线如图 9 所示。相同孔隙率的泡沫铝随着胞孔孔径的逐渐减小, 在压缩过程中各阶段的应力逐渐增大; 同一孔隙率下不同胞孔孔径的泡沫铝压缩应力-应变曲线呈现不同的离散, 在弹性阶段差异很小, 随着压缩的逐渐进行, 在平台阶段及压实阶段的差异逐渐增大。

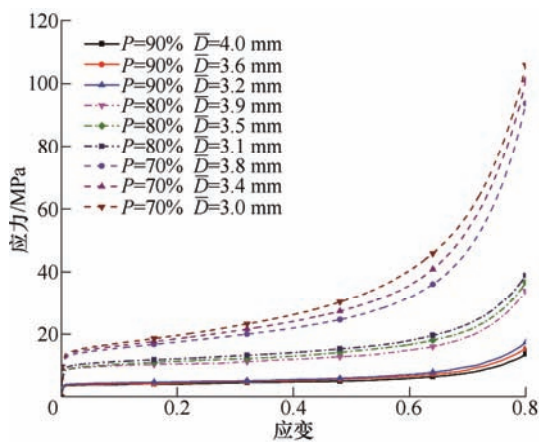


图 9 泡沫铝应力-应变曲线

3.2 准静态压缩变形分析

图 10 所示为 70% 孔隙率, 胞孔孔径分别为

3.8 mm、3.4 mm 及 3.0 mm 的三个泡沫铝模型在准静态压缩下的变形示意图, 设模型完全压实时的变形量为 100%, 研究变形量分别为 25% 和 75% 时刻的泡沫铝结构变形特征。从图 10a 可以看出, 泡沫铝胞孔孔径减小, 则胞孔数量增加, 壁面数量及壁面总面积均增大。随着泡沫铝压缩变形量的增加(图 10b、10c), 胞孔孔径更小的泡沫铝中壁面间挤压现象明显, 密集的胞孔和壁面在压缩过程中产生更强的阻碍, 在一定程度上提高了泡沫铝的整体承载能力, 提升了泡沫铝压缩时各阶段的应力, 这与图 9 展现的力学特征一致。

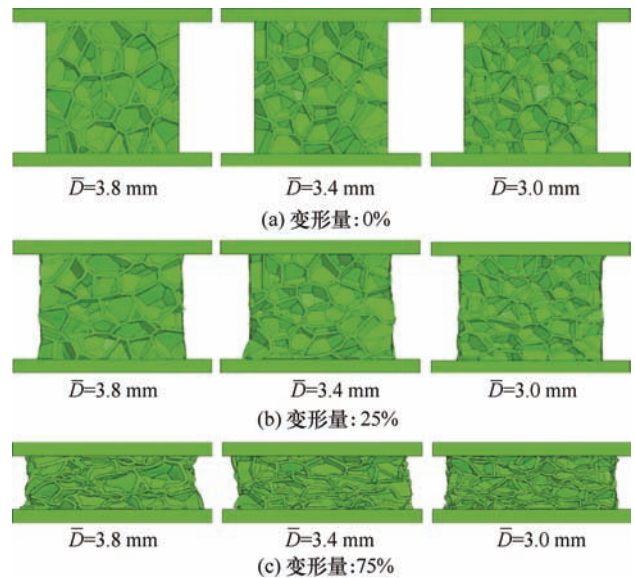


图 10 70% 孔隙率泡沫铝压缩变形示意图

3.3 吸能特性

泡沫铝单位体积的吸能量 W 可以表示为

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (10)$$

从图 11 可以看出, 在相同应变下随着孔隙率的降低, 泡沫铝单位体积的吸能量在逐渐增大, 而当孔隙率相同时, 孔径更小的泡沫铝的吸能量更大。

使用吸能效率来衡量泡沫铝的吸能能力, 在某应变 ϵ_a 下, 泡沫铝的吸能效率 $\eta(\epsilon)$ 定义为^[18]

$$\eta(\epsilon_a) = \frac{1}{\sigma_a(\epsilon)} \int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (11)$$

式中, $\sigma_a(\epsilon)$ 为对应应变为 ϵ_a 时的应力。泡沫铝吸能效率曲线如图 12 所示。从图中可以看出, 孔隙率更高的泡沫铝的最大吸能效率更大, 吸能能力更强。在相同孔隙率下, 胞孔孔径较小的泡沫铝的最大吸能效率较低, 这是因为胞孔孔径较小的泡沫铝中胞孔更加密集, 胞孔孔壁间的相互挤压阻碍压缩变形, 缩短了平台阶段, 使泡沫铝更早进入压实阶段, 从

而减弱了泡沫铝的吸能能力。当孔隙率为 70% 时, 孔径为 3 mm 的泡沫铝的最大吸能效率将比孔径为 3.8 mm 的泡沫铝降低 3%。

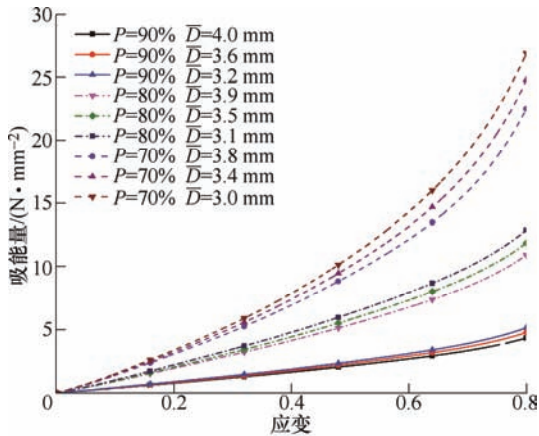


图 11 泡沫铝吸能量曲线

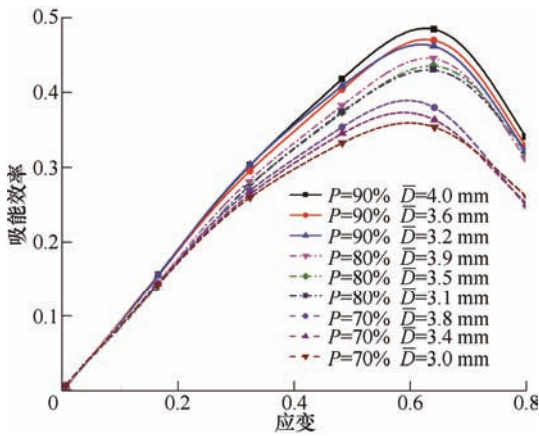


图 12 泡沫铝吸能效率曲线

3.4 致密应变和平台应力

致密应变和平台应力两参数是衡量泡沫铝力学性能的重要指标, 致密应变 ε_d 是满足最大效率条件时, 即吸能效率最大时应变 ε 的值

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (12)$$

平台应力 σ_p 可通过致密应变计算得到

$$\sigma_p = \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d} \quad (13)$$

图 13 表示的是泡沫铝的致密应变及平台应力, 使用误差棒来表示不同胞孔孔径所导致两参数的离散。从图中可以看出, 随着孔隙率的降低, 不同胞孔孔径的泡沫铝的致密应变离散范围基本保持不变, 而平台应力的离散范围则在逐渐增大。

计算 90%、80% 和 70% 孔隙率下最小孔径与最大孔径泡沫铝的平台应力差值。从图 14 看出, 在 70% 孔隙率下各泡沫铝间的平台应力差值最大, 胞

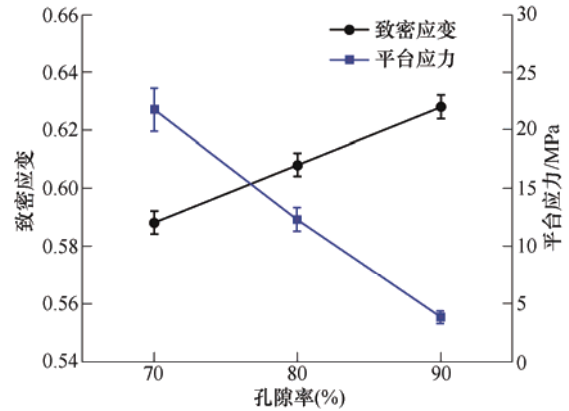


图 13 致密应变及平台应力

孔孔径对泡沫铝平台应力的影响显著, 孔径为 3 mm 与 3.8 mm 的泡沫铝的平台应力差值为 3.7 MPa, 平台应力离散程度达 16.8%。随着泡沫铝孔隙率 P 的增加, 平台应力差值近似线性下降, 其变化趋势可以使用线性方程表示

$$\Delta\sigma_p = -14.7P + 13.88 \quad (14)$$

式中, $\Delta\sigma_p$ 为平台应力差值。

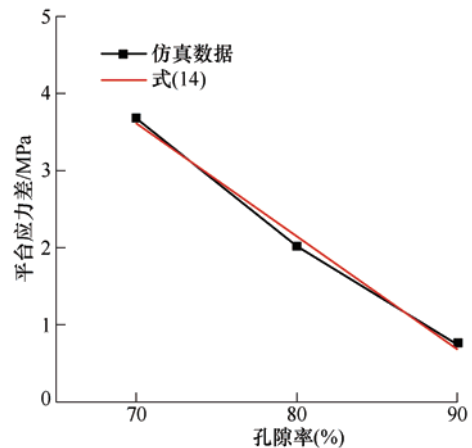


图 14 平台应力差

4 应力-应变关系预测

为预测泡沫铝压缩力学性能, 学者们提出了一系列的本构模型并用于有限元仿真分析。其中, ZHENG 等^[19]提出的速率无关的刚塑性硬化模型 (R-PH 模型) 能很好地描述泡沫金属的单轴压缩行为, 表征准静态下泡沫金属的压缩应力-应变曲线。R-PH 模型的表达式为

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0 + \frac{C\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2} \quad (15)$$

式中, σ_0 为泡沫金属在单轴压缩下的初始压溃应力, C 为应变硬化参数, 两者均与泡沫金属的相对密度 ρ 相关, 表达式^[20]为

$$\begin{cases} \sigma_0(\rho) = \sigma_y k_1 \rho^{n_1} \\ C(\rho) = \sigma_y k_2 \rho^{n_2} \end{cases} \quad (16)$$

式中, σ_y 为泡沫金属基体材料的屈服应力, k_1, k_2, n_1 和 n_2 为材料参数, 可通过对泡沫金属压缩试验的应力-应变曲线拟合得到。

在 R-PH 模型中, 泡沫金属的应力-应变关系仅是由相对密度所决定的。但在前文第 3 节对仿真结果的分析中发现, 相同孔隙率下不同胞孔孔径的泡沫铝应力-应变关系并不一致。因此需要在考虑胞孔孔径的影响后对式(16)进行修正, 以保证仿真的准确性。

添加胞孔孔径相关项 \bar{D}^m 并将相对密度 ρ 表示为 $1-P$, 得到 σ'_0 及 C' 的表达式为

$$\begin{cases} \sigma'_0(P, \bar{D}) = \sigma_y k_1 (1-P)^{n_1} \bar{D}^{m_1} \\ C'(P, \bar{D}) = \sigma_y k_2 (1-P)^{n_2} \bar{D}^{m_2} \end{cases} \quad (17)$$

式中, m_1, m_2 为与胞孔孔径相关的材料参数。根据图 9 中数据对式(17)中各参数进行拟合, 得到材料参数 $k_1 = 2.32, k_2 = 1.12, n_1 = 1.21, n_2 = 1.87$, 胞孔孔径相关项系数 $m_1 = -0.73, m_2 = -0.8$, 泡沫铝基体材料屈服强度 σ_y 取为 80 MPa, 则 σ'_0 及 C' 可表示为

$$\begin{cases} \sigma'_0(P, \bar{D}) = 80 \times 2.32 (1-P)^{1.21} \bar{D}^{-0.73} \\ C'(P, \bar{D}) = 80 \times 1.12 (1-P)^{1.87} \bar{D}^{-0.8} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)与式(15)联立, 即为考虑胞孔孔径的泡沫铝本构模型, 该模型适用于孔隙率 70%~90%, 胞孔孔径在 3~4 mm 之间的泡沫铝的压缩仿真研究。从图 15 中可以看出, 在添加胞孔孔径项 \bar{D}^m 后 R-PH 模型能很好地对仿真中应力-应变关系进行表征, 同时也能够准确模拟胞孔孔径的不同所导致应力-应变曲线的离散。

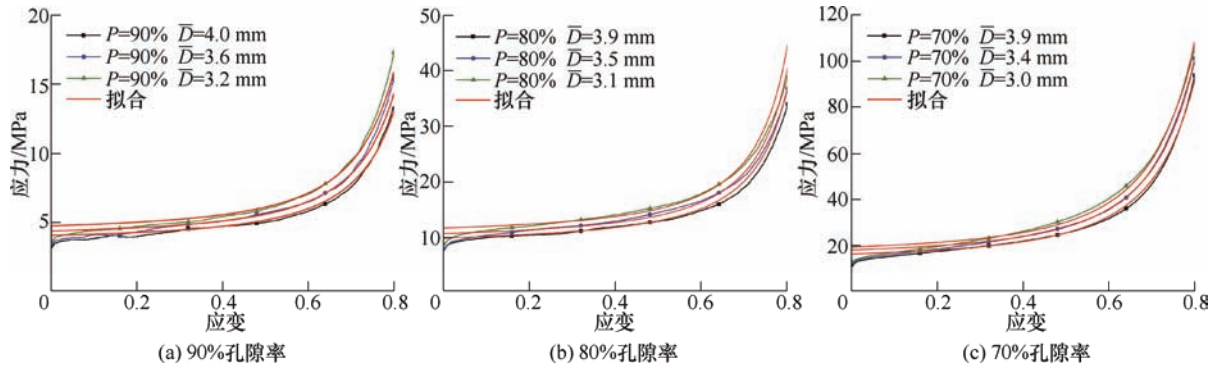


图 15 仿真应力-应变曲线拟合

为验证该修正 R-PH 模型的准确性, 对孔隙率为 85%, 平均胞孔孔径为 3 mm 的泡沫铝进行准静态压缩试验。将 $P = 0.85, \bar{D} = 3.0$ 代入式(18)计算得到初始压溃应力 $\sigma'_0 = 8.38$ MPa, 应变硬化参数 $C' = 1.07$, 绘制拟合的应力-应变曲线并与试验结果进行对比(图 16)。从图中可以看出, 修正后的 R-PH

模型能够较好地表示孔隙率为 85%、平均胞孔孔径为 3 mm 的泡沫铝单轴压缩应力-应变关系。

5 结论

(1) 使用基于 Voronoi 模型的 ABAQUS 泡沫铝建模插件建立了三维泡沫铝模型, 根据泡沫铝孔隙率关于胞孔数量及平均壁厚的响应面模型计算出相应的建模参数, 可以实现特定孔隙率泡沫铝的参数化建模。

(2) 在相同孔隙率下, 随着泡沫铝胞孔孔径的减小, 泡沫铝准静态压缩下的应力-应变曲线中各阶段应力上升, 单位体积吸能逐渐增加, 但最大吸能效率降低, 吸能能力减弱。当孔隙率为 70% 时, 孔径为 3 mm 的泡沫铝的最大吸能效率将比孔径为 3.8 mm 的泡沫铝小 3%。

(3) 在低孔隙率下, 胞孔孔径对泡沫铝平台应力的影响显著, 不同孔径泡沫铝的平台应力的离散

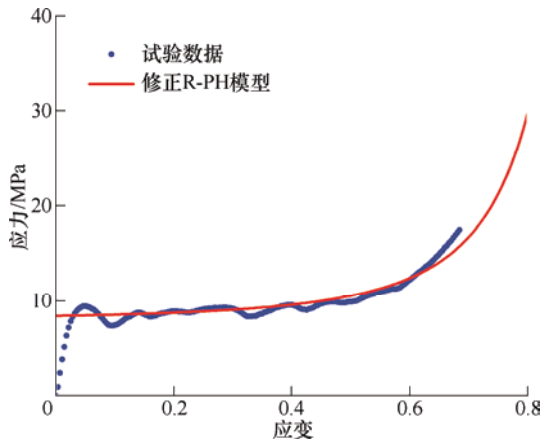


图 16 修正 R-PH 模型验证

现象明显。当孔隙率为 70% 时, 胞孔孔径为 3 mm 与 3.8 mm 的泡沫铝之间的平台应力差值将达到 3.7 MPa, 平台应力离散程度达 16.8%。随着孔隙率的增加, 不同孔径泡沫铝的平台应力差值近似线性下降。

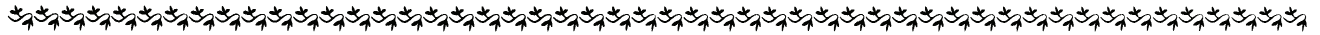
(4) 考虑胞孔孔径的影响, 修正现有的泡沫铝压缩刚塑性硬化(R-PH)模型。添加胞孔孔径相关项后的修正 R-PH 模型能够较好地表示不同孔隙率和胞孔孔径下的泡沫铝单轴压缩应力-应变关系, 更加准确地预测泡沫铝压缩行为。

参 考 文 献

- [1] GARCÍA-MORENO F. Commercial applications of metal foams: Their properties and production[J]. *Materials*, 2016, 9(2): 85.
- [2] 陈明营, 纪箴, 贾成厂, 等. 泡沫铝及其复合材料的研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2019, 37(1): 68-73.
CHEN Mingying, JI Zhen, JIA Chengchang, et al. Research progress of aluminum foam and its composites[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2019, 37(1): 68-73.
- [3] WANG E, LI Q, SUN G. Computational analysis and optimization of sandwich panels with homogeneous and graded foam cores for blast resistance[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 147: 106494.
- [4] SUN Y, LI Q. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112: 74-115.
- [5] CHENG Y, LI Y, CHEN X, et al. Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with a wide range of relative densities[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(8): 4016-4024.
- [6] 李忠献, 张茂轩, 师燕超. 闭孔泡沫铝的动态压缩性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(5): 1-6.
LI Zhongxian, ZHANG Maoxuan, SHI Yanchao. Tests for dynamic compressive performance of closed-cell aluminum foams[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 1-6.
- [7] 闫畅, 宋绪丁, 荆传贺, 等. 工业闭孔泡沫铝压缩力学性能及变形机理[J]. *材料导报*, 2017, 31(18): 92-96, 101.
YAN Chang, SONG Xuding, JING Chuanhe, et al. Mechanical properties and deformation mechanism of industrial aluminum foams[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(18): 92-96, 101.
- [8] BIN MUHIT I, SHIM C, YUN N, et al. Effect of strain rate on impact behavior of aluminum foam[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(11): 4852-4863.
- [9] 陈哲, 刘宇杰, 康国政. 闭孔泡沫铝结构参数对其压缩性能影响的有限元分析[J]. *四川大学学报*, 2012, 44(S2): 84-87.
CHEN Zhe, LIU Yujie, KANG Guozheng. Finite element analysis for effect of structure parameters on compressive property of closed-cell aluminum foam[J]. *Journal of Sichuan University*, 2012, 44(S2): 84-87.
- [10] SU B, HUANG C, SHENG H, et al. The effect of cell-size dispersity on the mechanical properties of closed-cell aluminum foam[J]. *Materials Characterization*, 2018, 135: 203-213.
- [11] YANG D, WANG H, GUO S, et al. Coupling effect of porosity and cell size on the deformation behavior of Al alloy foam under quasi-static compression[J]. *Materials*, 2019, 12(6): 951.
- [12] 卢子兴, 王嵩. 闭孔 Voronoi 泡沫的几何特征分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008(1): 110-117.
LU Zixing, WANG Song. Investigation into the geometrical properties of closed-cell Voronoi foam[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008(1): 110-117.
- [13] 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 闭孔泡沫金属几种不同建模方法的对比性研究[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(4): 85-91.
GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, et al. Comparative study of several different modeling methods for closed-cell metal foam[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(4): 85-91.
- [14] ZHANG X, TANG L, LIU Z, et al. Yield properties of closed-cell aluminum foam under triaxial loadings by a 3D Voronoi model[J]. *Mechanics of Materials*, 2017, 104: 73-84.
- [15] VENGATACHALAM B, POH L, LIU Z, et al. Three dimensional modelling of closed-cell aluminium foams with predictive macroscopic behaviour[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 136: 103067.
- [16] CHEN J, ZHANG P, CHENG Y, et al. On the crushing response of the functionally graded metallic foams based on 3D Voronoi model[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107085.
- [17] SHI X, LIU S, NIE H, et al. Study of cell irregularity effects on the compression of closed-cell foams[J].

(下转第 92 页)

- GTN models[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 213: 264-279.
- [18] ALEGRE J M, LACALLE R, CUESTA I I, et al. Different methodologies to obtain the fracture properties of metallic materials using pre-notched small punch test specimens[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016, 86: 11-18.
- [19] 石磊. X80 管线钢焊接接头的断裂韧性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- SHI Lei. A study on the fracture toughness of X80 pipeline steel welded joint[D]. Tianjin : Tianjin University, 2014.
- [20] 帅健. 管道钢裂纹扩展阻力曲线测试研究[J]. 中国石油大学学报, 2013, 37(5): 168-174.
- SHUAI Jian. Study on crack growth resistance curve test of pipeline steel[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 168-174.
-
- 作者简介: 宋明, 男, 1984 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为先进能源材料与装备结构完整性技术。
E-mail: songmingx@gmail.com



(上接第 82 页)

- International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135: 215-225.
- [18] LI Q, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids[J]. Journal of Cellular Plastics, 2006, 42(5): 371-392.
- [19] ZHENG Z, WANG C, YU J, et al. Dynamic stress-strain states for metal foams using a 3D cellular model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 72: 93-114.
- [20] YANG J, WANG S, DING Y, et al. Crashworthiness of graded cellular materials: A design strategy based on a nonlinear plastic shock model[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 680: 411-420.
-
- 作者简介: 庄蔚敏, 女, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车身结构设计与优化, 有限元分析和金属成形技术。
E-mail: zhuangwm@jlu.edu.cn
- 王恩铭(通信作者), 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车身结构设计与优化, 多孔材料和有限元分析。
E-mail: wangem19@mails.jlu.edu.cn