

# 高应变率下开孔泡沫铝压缩性能仿真研究

谢灵肯<sup>1,2</sup>, 王可慧<sup>2</sup>, 赵生伟<sup>2\*</sup>, 谌勇<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为研究在高应变率下, 材料参数和应变率对开孔泡沫铝压缩性能的影响, 进行了一系列仿真研究。采用基于三维Voronoi技术的建模方法, 得到多种参数的开孔泡沫铝, 使用ABAQUS/explicit软件构建算例进行仿真, 与对应参数的分离式霍普金森杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SPHB)实验结果进行对比, 验证了该建模方法的准确性。建立了不同孔隙率(55%, 65%, 75%)、不同孔径(1.5, 1.0, 0.5mm)和不同应变率的多个开孔泡沫铝模型并进行仿真, 讨论分析了高应变率下各个材料参数和应变率对其压缩性能的影响。结果表明, 在高应变率下, 仿真所涉及的参数范围内, 减小孔隙率、增大孔径或增大应变率, 都能提高开孔泡沫铝的平台应力与吸能能力, 提升其压缩性能。

**关键词:** 泡沫铝; Voronoi技术; 高应变率; 压缩性能

**中图分类号:** O347.3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025052

**引用格式:** 谢灵肯, 王可慧, 赵生伟, 等. 高应变率下开孔泡沫铝压缩性能仿真研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 388-396.

XIE Lingken, WANG Kehui, ZHAO Shengwei, et al. Simulation study on compression performance of open cell aluminum foam under high strain rate[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 388-396.

## Simulation Study on Compression Performance of Open Cell Aluminum Foam Under High Strain Rate

XIE Lingken<sup>1,2</sup>, WANG Kehui<sup>2</sup>, ZHAO Shengwei<sup>2\*</sup>, CHEN Yong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** To explore the influence of material properties and strain rate on the compressive performance of open-cell aluminum foam under high strain rate, a series of simulations were conducted. A modeling approach based on 3D Voronoi technology was used to generate models with various parameters. Simulations were performed using ABAQUS/Explicit, and the simulation outcomes were compared with the corresponding SPHB experimental data to verify the accuracy of the modeling method. Models with varying porosities (55%, 65%, and 75%), pore sizes (1.5, 1.0, and 0.5 mm), and strain rates were generated for simulation. The influence of material parameters and strain rate on the compressive performance was discussed and analyzed. The results demonstrate that within the range of parameters considered in the simulations, reducing porosity, enlarging pore size or increasing strain rate can enhance the plateau stress and energy absorption capacity of open-cell aluminum foam, thereby enhancing the compressive performance.

**收稿日期:** 2024-10-09

**作者简介:** 谢灵肯(1998-), 男, 硕士生, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: xlklincoln@163.com。

\* **通信作者:** 赵生伟(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: zhaoshengwei@nint.ac.com。

**Key words:** aluminum foam; Voronoi technology; high strain rate; compressive performance

## 0 引言

泡沫金属是一种以金属为基体材料,内部分布着大量孔洞的材料,具有优秀的吸能效果。在各类泡沫金属材料中,泡沫铝最为常见,被广泛应用于航空航天、车辆、船舶、建筑、军事防爆等领域中。泡沫铝材料抗压缓冲性能研究为我国高速侵彻性能相关研究提供了理论支持,也为高性能武器装备的研究做出了贡献。

仿真模型是研究材料参数对材料性能影响的重要工具,目前针对泡沫金属的仿真模型种类繁多,大致可分为三类。一类为宏观均质模型,如王佳铭等<sup>[1]</sup>建立了实心圆柱材料模型,基于 LS-DYNA 平台进行仿真,并结合实验结果对材料参数进行标定,建立了可反映应变率效应的不同密度泡沫铝的等效模型。类似地,韩雨莹等<sup>[2]</sup>采用 LS-DYNA 中 63 号可压溃泡沫材料本构模型的参数进行数值模拟,对泡沫铝的冲击压溃过程进行了计算和仿真分析。第二类为实物扫描模型,如 Veyhl 等<sup>[3]</sup>通过 CT 扫描技术获得了泡沫铝的真实三维结构,并对获得的模型进行有限元模拟,模拟结果与试验结果之间的误差较小。第三类为孔洞模型,包括规则孔洞和随机孔洞。时文超等<sup>[4]</sup>建立的是规则孔洞模型,先建立一个开孔单胞泡沫铝,随后在此基础上进行阵列,得到规则孔洞的泡沫铝模型;Warren 等<sup>[5]</sup>通过对低密度开孔泡沫铝的线弹性行为进行微观力学分析,建立了 Kelvin 十四面体规则孔洞模型。该类模型能够较真实地反映泡沫铝的几何特征和力学行为,应用较为广泛。程振等<sup>[6]</sup>基于孔洞的偏椭圆形状,提出了随机椭球体三维细观模型建模方法,这种方法得到的模型能够较好地反映泡沫金属材料的力学性能和细观损伤破坏机理。

在众多泡沫金属仿真建模技术中,Voronoi 技术是目前常用的、能较好反映泡沫金属真实细观特征的方法。这是一种在空间内随机布点后,通过数学方法划分空间并建立模型的技术。该技术在闭孔泡沫铝的相关研究中较为常见,如 Zhang 等<sup>[7]</sup>利用该技术建立模型对泡沫铝夹芯板进行了数值分析;Song 等<sup>[8]</sup>利用 Voronoi 技术研究了泡沫材料的动态破碎响应,分析了材料破碎带的形

成、分布和变形模式;张国栋等<sup>[9]</sup>建立了基于 Voronoi 技术的泡沫铝夹心柱壳有限元模型,对泡沫铝夹心柱壳在内部爆炸载荷下的动态响应特性进行了数值模拟。对于开孔泡沫铝,该技术的使用相对较少,Sepehri 等<sup>[10]</sup>使用该技术生成了不同孔隙率的开孔泡沫铝模型,通过仿真研究了孔隙率、固体材料和雷诺数对流动特性和传热性能的影响。

在应变率大于  $10^3 \text{ s}^{-1}$  的高速冲击环境下进行开孔泡沫铝的压缩性能实验,往往会出现材料的局部变形现象,难以直接获得其本构关系,因此,使用仿真进行研究具有很高的现实价值。然而现有对泡沫铝的仿真研究中,其研究对象多为闭孔泡沫铝,研究环境也多为中低应变率,对高应变率下开孔泡沫铝相关仿真研究较少。

本文针对以上问题,采用 Voronoi 技术建立了开孔泡沫铝的细观孔洞模型。首先,基于该类模型进行数值仿真,并与分离式霍普金森杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)实验的结果数据进行对比,验证该类模型的准确性。随后针对不同材料参数、应变率建立若干仿真模型,分别进行仿真分析,讨论在高应变率下各材料参数及应变率对泡沫铝材料压缩性能的影响。

## 1 开孔泡沫铝 SHPB 实验

SHPB 实验是研究材料中高应变率下动态力学性能的常见实验。常规的 SHPB 实验需要满足应力均匀性假设,即试样中的应力应变随厚度方向均匀分布。对于泡沫铝类材料,这一假设往往无法直接满足。要解决这一问题,常用的做法是在入射杆前加入波形整形器<sup>[11]</sup>,将入射波由方波整形为梯形波。如此入射波形将拥有一段平滑的上升沿,这使得泡沫铝类试件在加载过程中有足够的时间实现前后端面的应力平衡,也能避免试件产生局部惯性效应和弥散效应<sup>[12-13]</sup>。本文实验也采用了以上方法,在入射杆前端增加了波形整形器。

本实验在西北核技术研究院的 SHPB 装置上进行。实验所用的杆件材料为钢,直径为 50 mm,撞击杆长度为 350 mm,入射杆和透射杆长度均为 2 000 mm。在入射杆和透射杆正中心位置和靠近

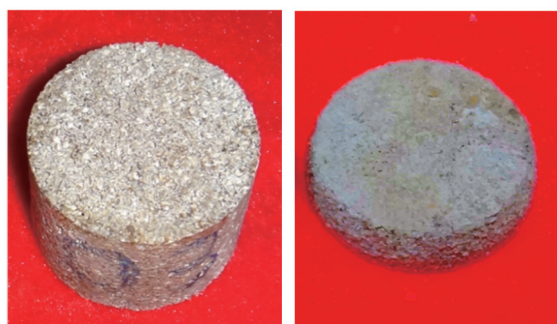
试样侧 450 mm 处, 分别贴有 1 组应变片, 共计 4 组应变片, 用以测量应变信号。信号经过半桥法的桥盒测量后再经应变放大仪放大, 最后由示波器读取。实验所用的泡沫铝试样尺寸为  $\phi 40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 试样材料参数如表 1 所示。

表 1 SHPB 实验材料参数

Tab. 1 Material parameters of SHPB experiment

序号	孔隙率/%	孔径/mm
1	65	2.0
2	65	1.0
3	65	0.5
4	75	1.0

以孔隙率 65%, 孔径 1.0 mm 的试样为例, 试样在实验前后的变化如图 1 所示。



(a) 实验前试样

(b) 实验后试样

图 1 泡沫铝试样实验前后对比

Fig. 1 Comparison of foam aluminum sample before and after experiment

实验所得应变信号经滤波处理后, 使用二波法<sup>[14]</sup>进行分析, 其公式为

$$\dot{\epsilon} = \frac{2C}{l_0} \epsilon_R, \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{2C}{l_0} \int_0^t \epsilon_R d\tau, \quad (2)$$

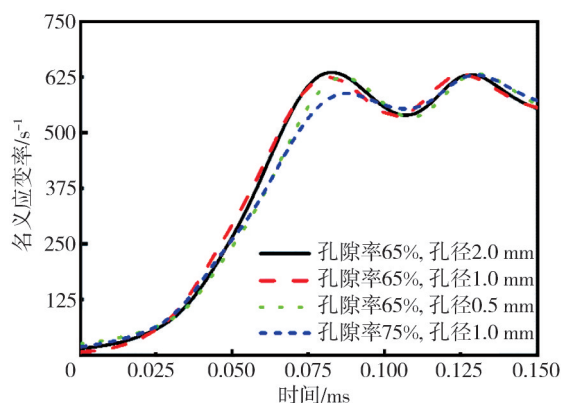
$$\sigma = \frac{A}{A_0} E \epsilon_T, \quad (3)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$ 、 $\epsilon$  和  $\sigma$  为试样的应变率、应变和应力;  $\epsilon_R$  和  $\epsilon_T$  为所测得的反射和透射应变;  $l_0$  和  $A_0$  为试样原始厚度和截面积;  $C$ 、 $A$  和  $E$  为杆的波速、截面积和杨氏模量。

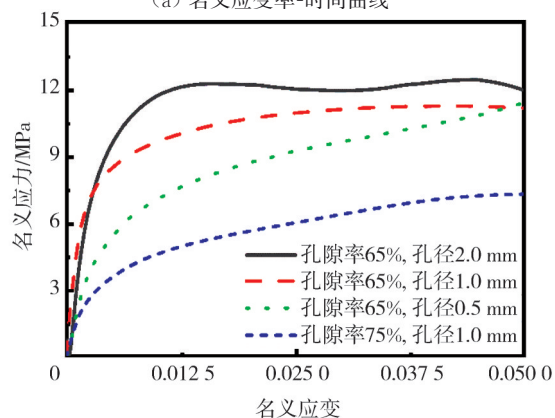
得到泡沫铝材料的应变率和应力应变关系曲线如图 2 所示。

4 组实验所得的应变率变化过程较为相似, 上升最大值均为  $600 \text{ s}^{-1}$  左右。受材料尺寸的影响, 所测得的数据仅能反映泡沫铝在压缩过程中名义应变低于 0.05 的区间, 但该应变区间已足以清晰地揭示泡沫铝的应力阶段特性。在载荷作用下,

泡沫铝首先经历弹性阶段, 随后迅速过渡到平台阶段。通常情况下, 泡沫铝材料的平台阶段可达到最大名义应变 0.6 以上, 而在此阶段内, 尽管名义应变持续增大, 但应力几乎保持恒定。因此, 尽管本实验未能涵盖大应变范围内的泡沫铝应力应变曲线, 但通过对小应变区间内平台阶段特性的分析, 仍能较为准确地描述该类开孔泡沫铝的压缩特性, 并为后续的仿真研究提供实验验证依据。从所得结果来看, 该类开孔泡沫铝的平台应力随着孔径增大而增大, 也会随着孔隙率的增大而减小。相比之下, 孔隙率的影响更加显著。



(a) 名义应变率-时间曲线



(b) 名义应力-名义应变曲线

图 2 SHPB 实验结果

Fig. 2 Results of SHPB experiment

## 2 仿真设置和对比较验证

将模型仿真结果与 SHPB 实验结果进行对比较验证是相关研究中较为实用的方法<sup>[15]</sup>。本文所使用的开孔泡沫铝细观孔洞模型采用经典的三维 Voronoi 技术, 由 MATLAB 和 ABAQUS 共同计算完成。使用三维 Voronoi 技术构建开孔泡沫铝模型的过程如下<sup>[16]</sup>: 首先, 在给定空间内随机生成若干点作为泡沫铝胞元的核点, 随后由这些核

点计算形成三维 Voronoi 图,再以梁单元替换三维 Voronoi 图中各个多边形体的棱边,最后,设置计算梁截面形状和大小。一般将截面设置为圆形截面,截面半径  $R$  可由泡沫铝孔隙率的计算公式推导得到,公式为

$$R = \sqrt{\frac{(1-\alpha)V_0}{\pi \sum l_i}}, \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为孔隙率;  $V_0$  为给定区域的体积;  $\sum l_i$  为各段梁的长度总和。

本文采用有限元软件 ABAQUS/explicit 模拟开孔泡沫铝的动态冲击过程。为验证由三维 Voronoi 技术构建的该类模型及后续仿真条件的可行性,参考上述 SHPB 实验的条件建立仿真模型进行计算,并与实验的实际结果对比分析。

验证可行性所采用的仿真设置如下:如图 3 所示,建立圆柱形开孔泡沫铝模型,模型尺寸与实验相同,孔径、孔隙率与 SHPB 实验依次对应。在模型的两侧构建两个紧贴底面的刚性平面,其中一侧为冲击端,另一侧为支撑端。

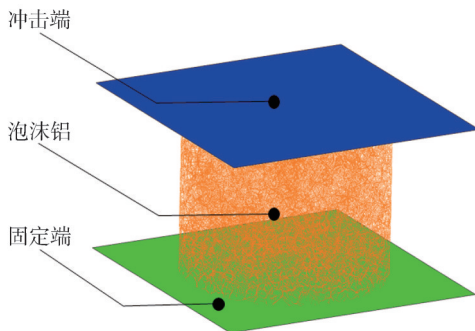


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

根据 SHPB 实验所得的应变率曲线,赋予冲击端平面一定的速度,用以控制泡沫铝的应变率。依据 SHPB 实验所加波形整形器的原理,以及对实验所得应变率曲线的分析,将仿真冲击端的应变率曲线设置为如图 4 所示的梯形波,其最大值为  $600 \text{ s}^{-1}$ 。

接触设置为一般通用接触,摩擦系数为 0.02。泡沫铝材料设置为纯铝,其密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,弹性模量为 73 GPa,泊松比为 0.33,塑性采用 J-C 本构模型,损伤采用 J-C 失效模型,二者的公式为

$$\sigma_p = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^m], \quad (5)$$

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*)(1 + D_5 T^*), \quad (6)$$

式中:  $\sigma_p$ ,  $\epsilon_p$  为塑性应力和应变;  $\epsilon_f$  为断裂应变;  $\sigma^*$  为三轴应力;  $\dot{\epsilon}^*$  为相对应变率;  $T^*$  为无量纲温度; 其

余为模型参数。根据 SPHB 实验材料供应商提供的部分原料性能参数,查询参考书<sup>[17]</sup>,确定最相近模型对应的其余参数,将各个参数设置如表 2 所示。

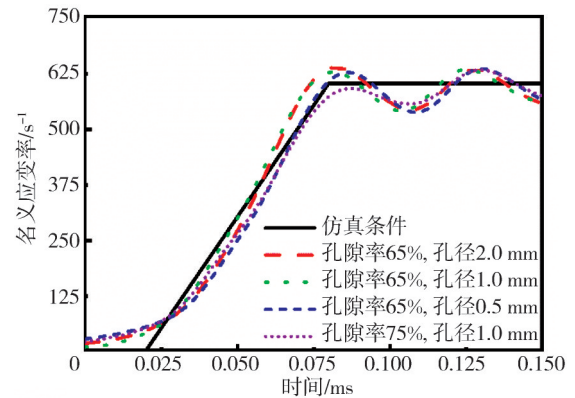


图 4 仿真过程的应变率设置

Fig. 4 Strain rate setting of simulation process

表 2 J-C 本构模型和 J-C 失效模型参数

Tab. 2 Parameters of J-C constitutive model and J-C failure model

A/MPa	B/MPa	C	n	m	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
140	75.2	0.012 5	0.647 4	1.25	0.22	0.12	2.8	0	0

计算得到仿真结果文件,在后处理中读取冲击端刚性面所受到的反作用力  $F$  和位移  $U$ 。则泡沫铝的名义应力、名义应变为

$$\sigma = \frac{4F}{\pi\phi^2}, \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{U}{L_0}, \quad (8)$$

式中:  $\phi$  为泡沫铝初始直径;  $L_0$  为泡沫铝初始厚度。在计算结果的基础上,对数据进行一定程度的去噪滤波,由此可得到仿真结果的应力应变曲线。仿真结果与实验数据的结果对比如图 5 所示。

分析对比结果可以发现,采用三维 Voronoi 技术建立的开孔泡沫铝模型成功模拟了泡沫铝压缩过程的前两个阶段,即线弹性阶段和平台阶段。仿真结果与实验数据表现出良好的吻合性。具体而言,对于孔隙率为 65%、孔径分别为 2.0 mm 和 1.0 mm 的两组模型,实验与仿真数据之间的误差始终保持在 10% 以下,表明仿真具有较高的精确度。然而,在其他两组模型的对比中,相对误差较大,最大误差出现在名义应变介于 0.01~0.015 的范围内,特别是孔隙率为 75%、孔径为 1.0 mm 的组别,其误差达到了约 35%。

这些最大误差出现在线弹性阶段与平台阶段的交界处,这一阶段泡沫铝的性能转变复杂,仿真过程中易产生误差。对于孔隙率为 75%、孔径

1.0 mm的泡沫铝试样,其仿真误差可能源于加工导致的不同孔隙率的材料性能差异,而仿真仍采用了与65%孔隙率相同的参数。当压缩过程进入

平台阶段后,各组仿真结果与实验数据之间的误差都在逐渐减小,最终保持在10%以内,这表明该仿真方法具有一定的准确性和有效性。

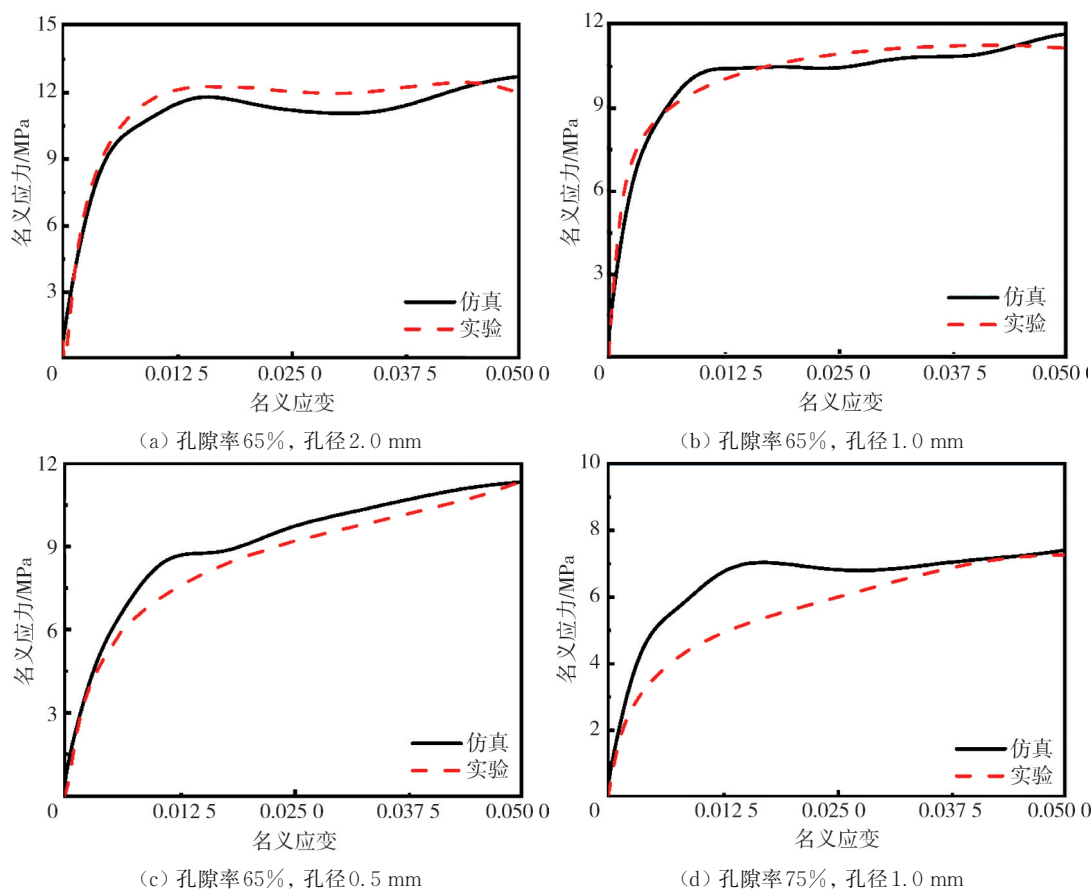


图5 仿真结果与SHPB实验应力应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of stress-strain curves between simulation results and SHPB experiment

### 3 仿真结果分析和讨论

完成以上有效性验证后,进一步使用ABAQUS/explicit进行仿真,对不同材料参数、不同应变率作用下的开孔泡沫铝进行仿真研究。泡沫铝模型的尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,且加载方式改为等应变率加载,其余仿真设置与上述对照仿真模型相同。

根据泡沫铝模型的孔隙率、孔径以及加载应变率的不同,将仿真分为若干组,各组模型对应的序号和具体参数如表3所示。

得到仿真结果后,与上述对照仿真模型类似,在后处理中读取冲击端刚性面所受到的反作用力 $F$ 和位移 $U$ ,随后结合式(7)和式(8)计算得出仿真结果的应力、应变等数据。

当泡沫铝承受压缩载荷时,应力做功并被泡沫铝吸收,因此泡沫铝的能量吸收能力可以用其在变形过程中吸收的功 $w$ 表示。在计算所得的应

力应变数据基础上,当应变为 $\epsilon_a$ 时,其单位体积吸收的能量为

$$w = \int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon_0 \quad (9)$$

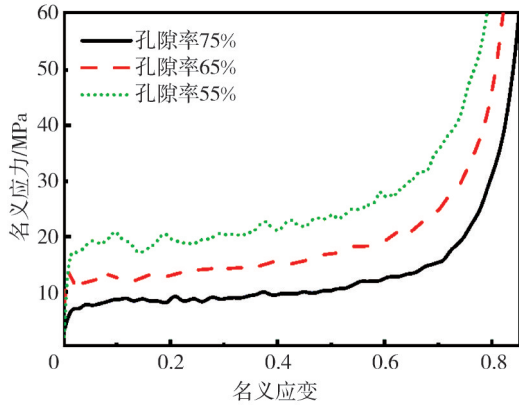
表3 仿真模型的材料参数和应变率

Tab. 3 Material parameters and strain rates of simulation models

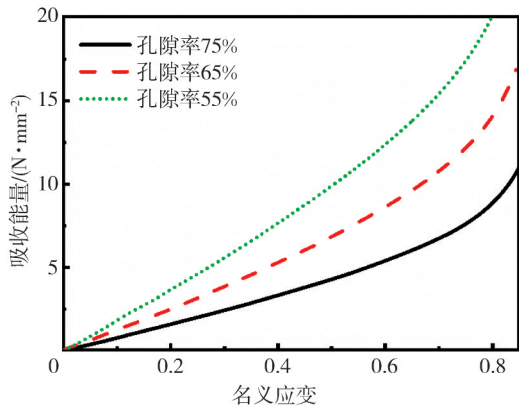
序号	孔隙率/%	孔径/mm	应变率/ $\text{s}^{-1}$
1	65	1.5	1 000
2	55	1.5	1 000
3	75	1.5	1 000
4	65	1.0	1 000
5	65	0.5	1 000
6	65	1.5	200
7	65	1.5	500
8	65	1.5	2 000
9	65	1.5	5 000

#### 3.1 孔隙率对泡沫铝压缩力学性能的影响

对表3中序号1~3的3种不同孔隙率的开孔泡沫铝模型进行仿真,经计算后所得应力应变曲线和吸收能量曲线如图6所示。



(a) 名义应力-名义应变曲线



(b) 吸收能量-名义应变曲线

图 6 不同孔隙率情况下的仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results for different porosities

从图中可以看出,由三维 Voronoi 技术建立的开孔泡沫铝模型,其压缩过程的应力应变曲线具有多孔泡沫材料明显的 3 个阶段特征,即线弹性阶段、平台阶段以及密实化阶段。由结果数据分析,在  $1\ 000\ s^{-1}$  的高应变率下,孔隙率对泡沫铝的动态压缩特性有十分显著的作用。计算其在  $0.1 < \epsilon < 0.6$  的平台应力,如图 7 所示,可以发现,随着孔隙率减小,泡沫铝的相对密度增加,平台阶段的平台应力也相应显著增大。密实化阶段所对应的压实应变没有出现明显区别,但对应的压实应力也随着平台应力增大而提高。此外,与平台应力的情况相对应,孔隙率小的泡沫铝在同体积同应变下吸收的能量也更多。

开孔泡沫铝的孔隙率反应其相对密度,是一个非常重要的结构特征参数,它的微小变化都会对泡沫铝的压缩力学性能有较大影响。随着孔隙率的降低,泡沫铝的特性更接近于铝单质,平台阶段和密实化阶段有着更高的应力。75% 孔隙率的开孔泡沫铝相对于 55% 孔隙率的泡沫铝,其平台应力的变化幅度最多高达 61%,可见孔隙率对

泡沫铝力学性能的重要性。

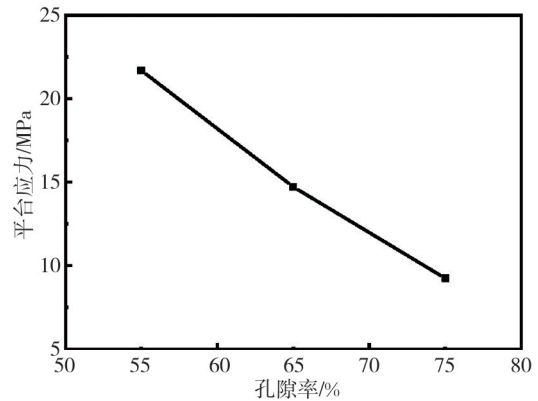
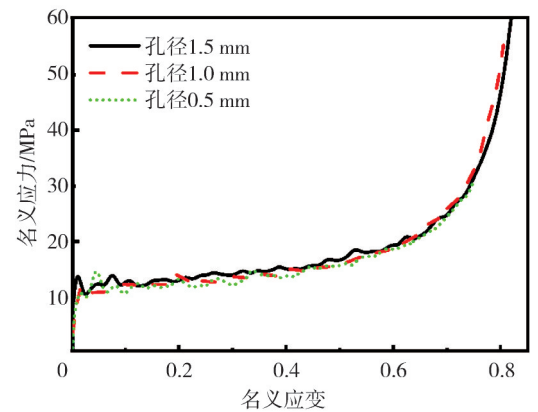


图 7 不同孔隙率情况下的平台应力对比

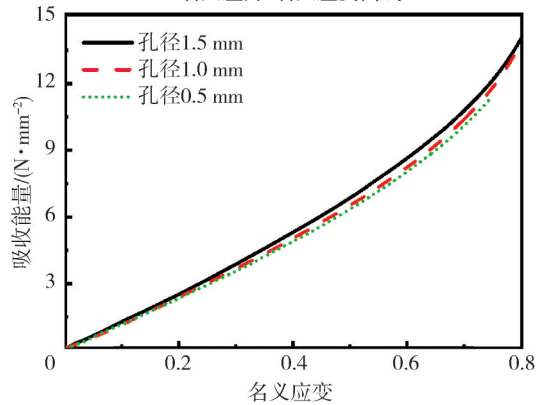
Fig. 7 Comparison of plateau stress for different porosities

### 3.2 孔径对泡沫铝压缩力学性能的影响

对序号 1、4、5 的 3 种不同孔径的开孔泡沫铝模型进行仿真,所得结果如图 8 所示。



(a) 名义应力-名义应变曲线



(b) 吸收能量-名义应变曲线

图 8 不同孔径情况下的仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results for different pore sizes

在  $1\ 000\ s^{-1}$  的高应变率下,孔径对泡沫铝的应力应变曲线作用有限。计算各曲线在  $0.1 < \epsilon < 0.6$  的平台应力,如图 9 所示,表明孔径越大平台应力越大。此外,孔径也影响泡沫铝的能量吸收

能力,孔径大的泡沫铝在相同应变条件下具有更高的能量吸收能力。然而,与孔隙率所产生的变化幅度相比,孔径的影响远不如孔隙率的影响大。

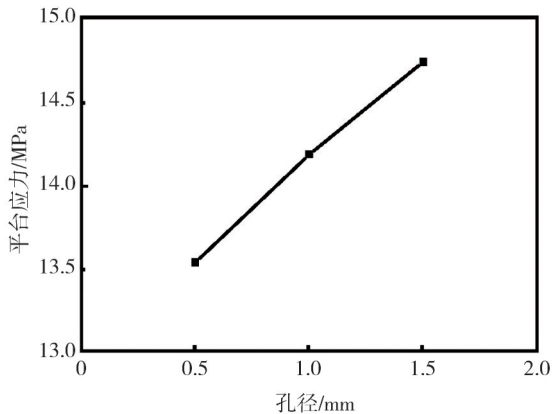


图9 不同孔径情况下的平台应力对比

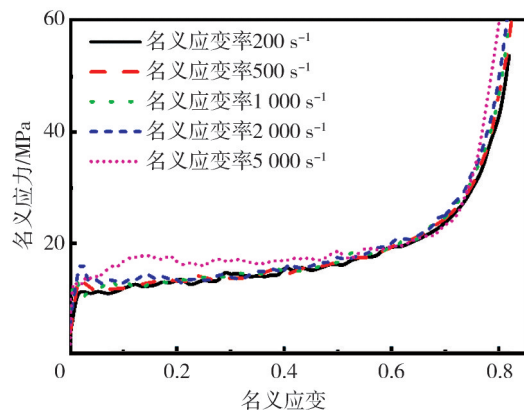
Fig. 9 Comparison of plateau stress for different pore sizes

不少学者的研究都表明<sup>[18-19]</sup>,孔径对于开孔泡沫铝的压缩性能有影响,但对于本文所研究的0.5~1.5 mm孔径范围,孔隙率的影响更大。在该范围内,孔径增大可以产生使泡沫铝结构更加稳固的作用,从而导致平台应力更高。在相同密度下,大孔径的泡沫铝具有更大的胞元和相对较厚的胞元壁,这使得材料变形更加困难,最终引发新的变形模式。这个由结构不同而产生的新变形过程对泡沫铝材料参数的影响十分有限,相应地,泡沫铝应力应变曲线变化也较为不明显。

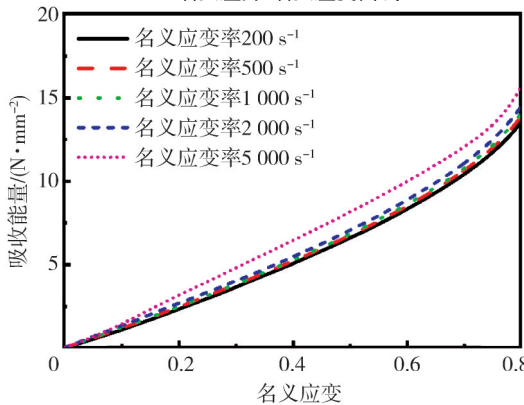
### 3.3 应变率对泡沫铝压缩力学性能的影响

对序号1、6、7、8、9的5种不同应变率的开孔泡沫铝模型进行仿真,所得应力应变曲线与吸收能量曲线如图10所示。

在所选200~5 000 s<sup>-1</sup>应变率范围内,应变率对泡沫铝材料性能的影响较为明显。当应变率在2 000 s<sup>-1</sup>以下时,开孔泡沫铝的应力应变曲线受影响较小,计算其在0.1< $\epsilon$ <0.6的平台应力,如图11所示,可以发现应力随着应变率的提高而增大。随着应变率上升至5 000 s<sup>-1</sup>,平台应力有着较为明显的增大。随着应变率增大,开孔泡沫铝也更早进入密实化阶段,这意味着泡沫铝能够吸收能量的应变范围减小,其缓冲作用受到了削弱。此外,单位体积材料吸收的能量也随着应变率上升而增大,且在2 000 s<sup>-1</sup>上升至5 000 s<sup>-1</sup>时变化幅度尤其大。



(a) 名义应力-名义应变曲线



(b) 吸收能量-名义应变曲线

图10 不同应变率情况下的仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results for different strain rates

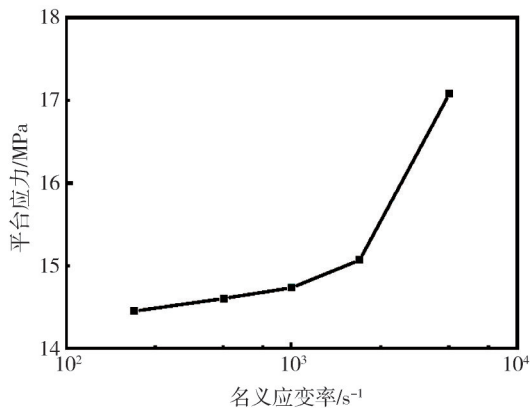


图11 不同应变率情况下的平台应力对比

Fig. 11 Comparison of plateau stress for different strain rates

平台应力随着应变率增大而增大、平台范围相应减小,都是典型的应变率效应。对于本次仿真的65%孔隙率、1.5 mm孔径的开孔泡沫铝,应变率效应依然存在,但在较低应变率下的表现并不明显。随着对数应变率的提升,应变率效应的影响逐渐体现,说明其影响系数也会随着应变率提高而增大。

### 3.4 压缩变形过程

对序号1,即孔隙率65%、孔径1.5 mm的模型

进行仿真所得的固定端和冲击端的应力曲线对比如图 12 所示,可以看出泡沫铝两端在受到应力作用初期发生的变化并不同步。冲击端率先受到冲击波作用,其应力迅速上升并达到应力平台阶段,而固定端的应力变化则相对较慢。在短暂的差异过程发生后,两侧的应力又重新平衡。

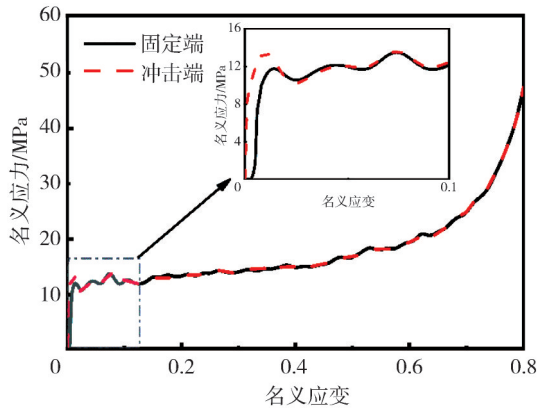
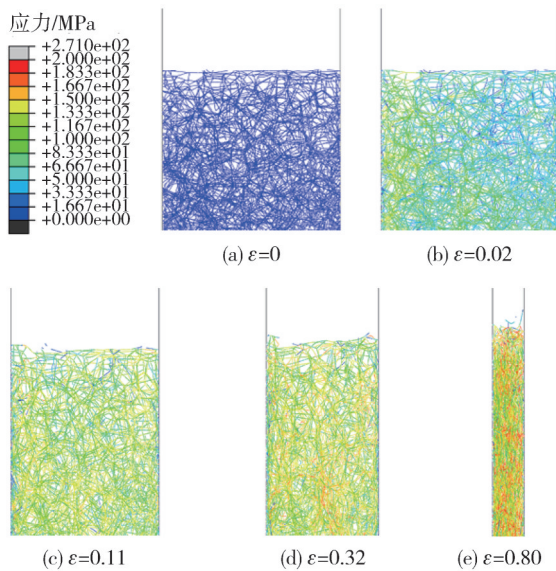


图 12 泡沫铝两端应力对比

Fig. 12 Stress comparison between two sides of aluminum foam

对比该次仿真的压缩过程图像来看,如图 13 所示,该过程在冲击发生初期展现了十分明显的局部变形特点。冲击端先发生压溃,随后支撑端和中部区域才发生压溃。在冲击发生的瞬间,冲击端一侧厚度较小的一层泡沫铝率先发生压溃变形。



注: 泡沫铝仿真模型参数为孔隙率65%, 孔径1.5 mm。

图 13 仿真中的泡沫铝冲击压缩过程

Fig. 13 Impact compression process of aluminum foam in simulation

之后,随着塑性波传向支撑端,其余各处的泡沫铝发生压溃。Zheng 等<sup>[20]</sup>在闭孔泡沫铝中的研究也得到了相似的结论。

## 4 结 论

本文基于三维 Voronoi 技术建立开孔泡沫铝模型,在 ABAQUS/explicit 中进行仿真计算,模拟了开孔泡沫铝的动态冲击过程。主要的成果和结论如下:

1) 进行 SHPB 实验,测量了 4 种不同材料参数的开孔泡沫铝应力应变曲线。在 ABAQUS 中构建相同条件下的开孔泡沫铝算例,将仿真计算结果与实验结果相对比。结果表明,二者在泡沫铝的应力平台阶段误差小于 10%,验证了该建模方法的有效性和准确性。

2) 建立一系列开孔泡沫铝模型进行仿真分析。在 1.5 mm 孔径和 1 000 s<sup>-1</sup>应变率下,随着泡沫铝孔隙率的减小,其动态压缩应力-应变曲线中各阶段应力上升,能量吸收能力也随着上升。对于 65% 孔隙率的开孔泡沫铝,在 0.5~1.5 mm 孔径范围内,孔径增大可以提高泡沫铝平台应力和能量吸收能力,但影响相对较弱。对于 65% 孔隙率、1.5 mm 孔径的开孔泡沫铝,应变率影响其平台应力、压实应变和吸能能力,且应变率的影响随着应变率提升而更加明显。

3) 高应变率下,开孔泡沫铝的压缩过程具有显著的局部压溃现象。两侧的泡沫铝率先发生压溃,随后中部的泡沫铝才受到影响。

### 参考文献:

[ 1 ] 王佳铭, 谭跃东, 靳智慧, 等. 泡沫铝压缩试验及等效仿真模型研究[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 91-99.  
WANG Jiaming, TAN Yuedong, JIN Zhihui, et al. Study on compression test and equivalent simulation model of aluminum foam[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 91-99. (in Chinese)

[ 2 ] 韩雨莹, 房兴波, 陈虎, 等. 组合式起落架缓冲器耐坠毁性能仿真与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 239-244.  
HAN Yuying, FANG Xingbo, CHEN Hu, et al. Crashworthiness performance simulation and analysis of oleo-pneumatic and foam-aluminum combined-type landing gear buffer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 239-244. (in Chinese)

[ 3 ] VEYHL C, BELOVA I V, MURCH G E, et al. Finite element analysis of the mechanical properties of

- cellular aluminium based on micro-computed tomography[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(13/14): 4550-4555.
- [4] 时文超, 梁增友, 陈智刚, 等. 开孔泡沫铝动态力学行为的有限元分析[J]. *轻金属*, 2016(9): 53-57.  
SHI Wenchao, LIANG Zengyou, CHEN Zhigang, et al. Finite-element analysis on dynamic mechanical behavior of open-cell aluminum foams[J]. *Light Metals*, 2016(9): 53-57. (in Chinese)
- [5] WARREN W E, KRAYNIK A M. Linear elastic behavior of a low-density kelvin foam with open cells [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1997, 64(4): 787.
- [6] 程振, 方秦, 张锦华, 等. 闭孔泡沫金属三维细观模型建模方法[J]. *工程力学*, 2017, 34(8): 212-221.  
CHENG Zhen, FANG Qin, ZHANG Jinhua, et al. Mesoscopic methodology for the three-dimensional modelling of closed-cell metallic foam[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 212-221. (in Chinese)
- [7] ZHANG X, CHEN Q, GAO J, et al. Numerical study on the plastic forming of doubly curved surfaces of aluminum foam sandwich panel using 3D voronoi model[J]. *Metals*, 2021, 11(5): 675.
- [8] SONG Y, WANG Z, ZHAO L, et al. Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(9): 4281-4289.
- [9] 张国栋, 李翔宇, 梁民族, 等. 内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳动态响应仿真研究[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(2): 79-84.  
ZHANG Guodong, LI Xiangyu, LIANG Minzu, et al. Dynamic response of sandwich cylinders cored with aluminum foam under internal blast loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(2): 79-84. (in Chinese)
- [10] SEPEHRI E, SIAVASHI M. Pore-scale direct numerical simulation of fluid dynamics, conduction and convection heat transfer in open-cell Voronoi porous foams[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 137: 106274.
- [11] EDWIN RAJ R, PARAMESWARAN V, DANIEL B S S. Comparison of quasi-static and dynamic compression behavior of closed-cell aluminum foam [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 526(1/2): 11-15.
- [12] 刘欢, 黄瑞源, 蒋东, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料的应变率效应研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(16): 192-203.  
LIU Huan, HUANG Ruiyuan, JIANG Dong, et al. Research on the strain rate effect of rigid polyurethane foam[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(16): 192-203. (in Chinese)
- [13] 石少卿, 康建功, 隋顺彬. 闭孔泡沫铝材料静动力性能试验[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S2): 150-154.  
SHI Shaoqing, KANG Jianguo, SUI Shunbin. Experimental study of quasi-static and dynamic compressive property of close-cell aluminum foam [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(S2): 150-154. (in Chinese)
- [14] LIU X, WANG Y, HE X, et al. Deformation failure mechanism and constitutive model of gradient aluminum foam under impact loading[J]. *Composite Structures*, 2024, 327: 117684.
- [15] 党泉勇, 徐鹏. 冲击载荷下结构陶瓷的失效与破碎特性研究[J]. *测试技术学报*, 2021, 35(6): 461-466.  
DANG Quanyong, XU Peng. Study on the failure and fracture characteristics of structural ceramics under impact loading[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2021, 35(6): 461-466. (in Chinese)
- [16] WANG S, DING Y, YU F, et al. Crushing behavior and deformation mechanism of additively manufactured Voronoi-based random open-cell polymer foams [J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101406.
- [17] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [18] JIANG B, WANG Z, ZHAO N. Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(2): 169-172.
- [19] XIAO Y, LIU H, DONG X, et al. Effect of cell diameter variations on the mechanical behavior of aluminum foams: experiments and modeling [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 109090.
- [20] 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.