

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.003

## 仿真预测泡沫铝弹道极限和弹丸侵彻冲击力

周冰, 李良春, 宋桂飞

(军械技术研究所, 石家庄 050000)

**摘要:** 为考察泡沫铝在弹道冲击下的临界破坏, 应用数值仿真方法分析预测平头弹侵彻泡沫铝的弹道极限速度以及弹丸冲击力大小。泡沫铝采用 LS-DYNA 的 Mat26 模型, 输入参数基于材料力学测试, 解算过程应用抑制“负体积”算法。对于研究设定的泡沫铝, 其弹道极限速度为 59.7 m/s。研究表明: 在侵彻初始阶段, 平头弹冲击力最大; 中后段冲击力均匀变小。侵彻初始泡沫铝破坏以压剪为主; 侵彻后段当冲塞体被压实到一定程度, 破坏以拉伸断裂为主。该研究有助于优化试验设计和理论分析。

**关键词:** 数值仿真; 泡沫铝; 弹道极限; 平头弹; 冲击力

**中图分类号:** TJ302 **文献标志码:** A

## Numerical Stimulation for Predicting Ballistic Limit and Impact Force in Penetration of Aluminum Foam by Blunt-nosed Projectile

Zhou Bing, Li Liangchun, Song Guifei

(Ordnance Engineering Institute, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** Numerical simulating methodology is developed to predict the ballistic limit and impact force in order to investigate the critical failure of aluminum foam under the penetrating by blunt-nosed projectile. Mat26 in LS-DYNA was selected as the constitutive model for aluminum foam modeling on the basis of mechanical tests. Moreover, two control algorithms being executed in LS-DYNA helped in preventing the negative volume error. For the implementing aluminum foam, the ballistic limit velocity was obtained as 59.7 m/s. The research results show that impact force of blunt-nosed projectile acted with the maximum magnitude in the initial stage, but uniformly decreased at the plugging stage. The failure of aluminum foam majored with a compress-shear pattern when the penetration commenced. Until the plugging foam was compacted in some extent, tension crack may arise as the main failing. This work could help to optimize the experiment design and theoretical analysis.

**Keywords:** numerical simulation; aluminum foam; ballistic limit; blunt-nosed projectile; impact force

### 0 引言

泡沫铝是一种较为理想的抗冲击材料<sup>[1]</sup>, 其在缓冲减震、爆炸吸能和高速冲击等领域的研究应用引起了人们广泛的兴趣。许多学者对泡沫铝夹芯结构的爆炸载荷和抗弹道冲击响应进行了集中报道, 但对泡沫铝本身抗弹道冲击性能的研究却局限于分析泡沫铝的破坏机制和吸能特性问题, 采用的方法分别是压进实验、撞针试验、落锤冲击试验和 ABAQUS 仿真模拟等<sup>[2-4]</sup>。闫晓鹏等<sup>[5]</sup>采用空穴膨胀理论推导出锥头弹侵彻半无限厚泡沫铝的侵彻深度公式。弹道极限是衡量防护材料抗侵彻能力的重要指标。从公开的文献看, 到目前为止对泡沫铝弹道极限的观察很缺乏。与之相似的研究仅见 Alavi Nia 等<sup>[6]</sup>实验及理论分析了铝蜂窝的弹道极限速度; 贾斌和刘文祥等<sup>[7-8]</sup>通过数值模拟绘制出填充式泡

沫铝 Whipple 防护屏的弹道极限曲线。可见, 确定泡沫铝的弹道极限对于泡沫铝夹芯结构的合理设计具有重要意义。

与试验测量和理论解析相比, 数值仿真可直观地获取更多的细节信息, 经济性和可重复性更优, 并可大大缩短解决问题的时间。有限元技术的进步使得数值模拟确定材料弹道极限可以得到较可靠的结果。数值模拟泡沫铝的难点在于材料本构模型的定义和“负体积”控制<sup>[9]</sup>。LS-DYNA 发展了 Mat26 (MAT\_HONEYCOMB) 材料模型, 能有效模拟各向同性金属泡沫材料的非线性弹-塑应变<sup>[10]</sup>。Haidar 等<sup>[11]</sup>采用 Mat26 模型模拟夹芯结构中闭孔泡沫铝的抗冲击响应取得了很高的精度, 对于优化实验设计具有较大帮助。在侵彻中, 冲击力的分析也很重要。确定冲击力才能进行材料内应力分析和结

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-16

作者简介: 周冰(1982—), 男, 山东人, 博士, 从事爆炸防护研究。

构稳定性分析，有助于更好地理解材料破坏机制。由于动态材料力学行为的复杂性，足尺试验测量冲击力大小十分困难。动力学仿真方法可以较精确地预测低速冲击力大小<sup>[12-13]</sup>。笔者基于一种高密度泡沫铝的材料力学测量，运用 LS-DYNA 动力学仿真方法计算出平头弹侵彻泡沫铝的弹道极限速度，并预测了平头弹侵彻冲击力大小，在此基础上对平头弹侵彻泡沫铝的破坏机制做了简要分析。

## 1 模拟

### 1.1 材料力学性能

闭孔泡沫铝购自北京金艾伯特泡沫金属有限公司，制备基体材料为韧性纯铝，平均孔径 0.90 mm，孔隙率 70%~80%，体积密度 0.81 g/cm<sup>3</sup>。泡沫铝准静态压缩和拉伸试验(10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) 在 Instron M1361 材料试验机上进行，压应力-应变曲线和拉应力-应变曲线分别如图 1 和图 2 所示。平头弹 10 材料为 45# 低碳钢，材料力学性能参数如表 1 所示。

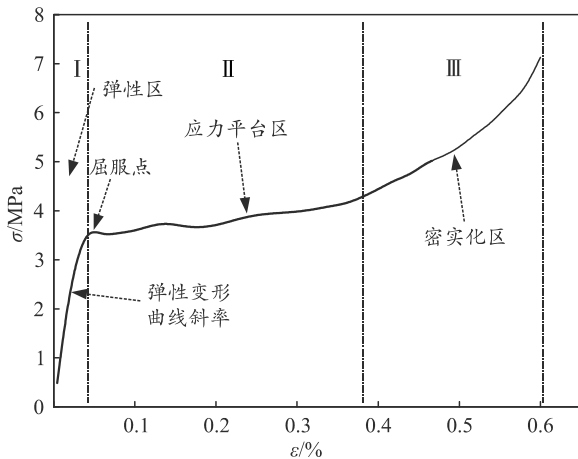


图 1 闭孔泡沫铝的压缩应力-应变曲线

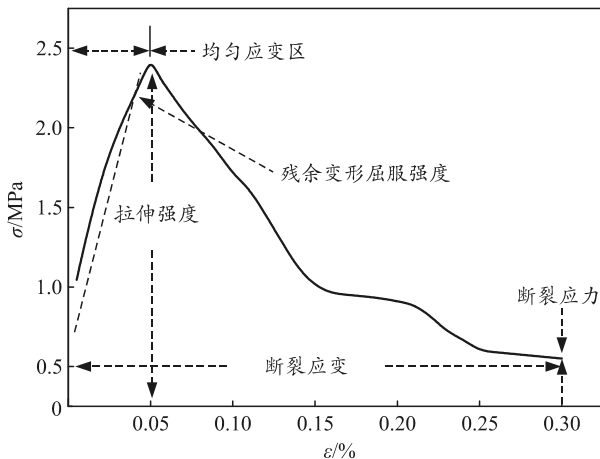


图 2 闭孔泡沫铝的拉伸应力-应变曲线

表 1 低碳钢材料力学参数<sup>[14]</sup>

材料力学参数	杨氏模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	切线模量/ MPa	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	硬化指数
数值	203	0.30	270	470	7 830	1

### 1.2 有限元建模及分析

数值模拟应用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学仿真平台。泡沫铝尺寸为 20 cm×20 cm×3 cm，边界固定；平头弹为直径  $d=1.5$  cm、长度  $L=4.3$  cm 的圆柱形弹体，材料为低碳钢，以一定速度垂直侵彻泡沫铝板。泡沫铝和平头弹均采用 3 维 Lagrange 实体，二者的 3 维网格模型如图 3 所示。计算时为 1/4 建模，对称面施加对称边界约束，泡沫铝靶板四外边界面施加全约束，平头弹与泡沫铝之间采用面-面侵蚀接触算法。使用带失效准则的 Mat26 材料模型定义各向同性泡沫铝材料，输入参数(根据材料力学性能测试)如表 2 所示。平头弹应用 JOHNSON\_COOK 本构模型和 GRUNEISEN 状态方程描述。设置 HOURGLASS 和 CONTACT\_INTERIOR 关键词、并将所有 ERODE 选项设为 1，以克服“负体积”问题。

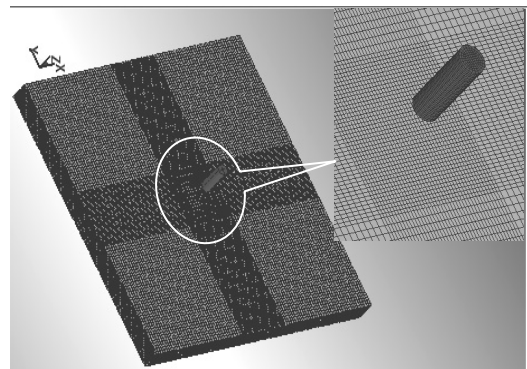


图 3 有限元模型

表 2 Mat26 模拟泡沫铝的输入参数

符号	描述	数值
RO	材料密度/(g/cm <sup>3</sup> )	0.81
E	泡沫基体材料杨氏模量/GPa	68.3
PR	泡沫基体材料的泊松比	0.32
SIGY	泡沫基体材料的屈服应力/MPa	241
VF	压缩相对体积比	0.4
MU	阻尼系数(缺省值=0.05)	0.5
BULK	本体黏度	0.0
LCA	加载曲线标识 ID, 压缩应力-应变曲线	SF <sup>(1)</sup> =0.1
LCS	加载曲线标识 ID, 剪切应力-应变曲线	SF=1.0
LCSR	加载曲线标识 ID, 应变率效应曲线	0.0
EAAU	泡沫铝弹性模量 $E_{aau}$ /GPa	1.10
GABU	泡沫铝剪切模量 $G_{abu}$ /GPa	0.57
AOPT	材料坐标系选择	2.0
XP YP ZP	点坐标 $p$	1, 0, 0
A1 A2 A3	向量坐标 $a$	1.0, 0.0, 0.0
D1 D2 D3	向量坐标 $d$	0.0, 1.0, 0.0
TSEF	单元拉伸断裂应变	0.40
SSEF	单元剪切断裂应变	0.30

Note: (1) SF 加载曲线中的比例因子。

## 2 结果与讨论

### 2.1 弹道极限分析

弹道极限通常指弹丸或破片贯穿靶板的临界速度。在用试验方法确定弹道极限速度 ( $v_{limit}$ ) 时, 它定义为弹丸或破片部分侵入靶板的最高速度和完全穿透靶板的最低速度的平均值, 用  $v_{50}$  来表示。这种方法定义的弹道极限速度实际上是一种统计平均值, 对于精确地表达弹丸贯穿靶板的临界速度可能存在不足。数值模拟方法不受试验测量条件的局限, 可以精确地计算出侵彻过程中弹体的剩余速度 ( $v_r$ )。根据不同初速的弹丸对靶板的侵彻情况, 笔者将弹丸对靶板的破坏分为“嵌入”和“贯穿”2种模式。笔者将弹丸刚好穿透靶板(不嵌在靶板上, 完全脱离靶板), 而剩余速度  $v_r$  等于零时, 对应的弹体初始速度 ( $v_i$ ) 定为弹道极限  $v_{limit}$ 。

图 4 为侵彻过程中平头弹的速度-时间历程曲线。初速在 110~60 m/s 区间内的平头弹均可贯穿设定的泡沫铝板。随着初始冲击速度的降低, 弹丸贯穿靶板的侵彻耗能降低; 但侵彻耗能变化呈非线性关系(如图 5)。假设平头弹侵彻贯穿泡沫铝的主要耗能方式为弹体变形耗能、泡沫铝变形耗能(包括压缩和拉伸)、剪切耗能、摩阻耗能和冲塞体动能等。根据侵彻过程分析, 在不同的侵彻事例中冲塞体动能的变化应最大。当初始冲击速度为 60 m/s 时, 弹体贯穿泡沫铝板后的剩余速度  $v_r$  为 5.75 m/s,  $v_r$  已接近零。假设此时 ( $v_i = 60$  m/s) 与以  $v_{limit}$  侵彻时的冲塞体动能相等, 则  $v_{limit}$  应稍小于此刻 ( $v_i^2 - v_r^2$ ) 的平方根 59.72。由数值仿真分析可知: 当  $v_i = 59.7$  m/s 时, 平头弹恰好穿透泡沫铝靶板且剩余速度为零, 此速度即为所设泡沫铝的弹道极限。该弹道极限速度与 Alavi Nia 等<sup>[6]</sup>所报道平头弹侵彻同厚度铝蜂窝的弹道极限速度 (57.6 m/s) 基本在同一水平。

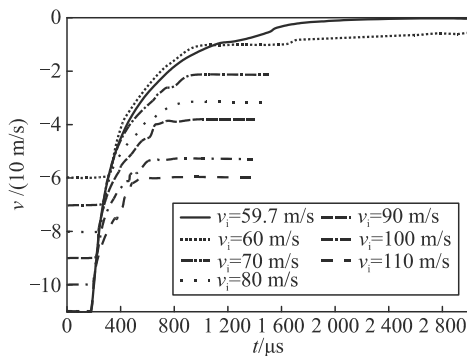


图 4 不同初速弹丸的速度-时间历程曲线

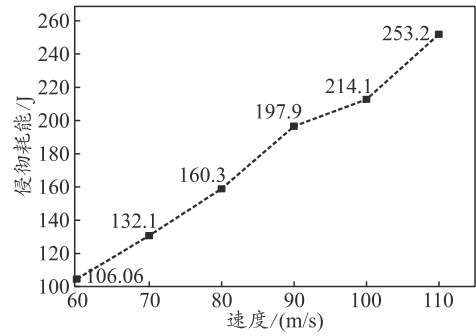


图 5 不同初速弹丸侵彻耗能

### 2.2 冲击力预测

LS-DYNA 数值仿真对于提供射弹侵彻过程中冲击力的定量信息有较大的优势。根据剩余速度曲线和力-加速度公式可以求出平头弹与泡沫铝发生初始撞击时的冲击力, 得弹丸冲击速度-初始冲击力曲线(图 6)。例如: 计算可知  $v_i = 60$  m/s 时初始冲击力为 37.18 kN,  $v_i = 110$  m/s 时初始冲击力为 51.1 kN。由 \*DATABASE\_RCFORC 计算输出 ( $v_i=110$  m/s 时) 的初始冲击力为 51.6 kN, 2 种方法得到的初始冲击力数值相符。根据 Origin 曲线拟合算法, 对初始冲击力-速度结果拟合可得弹丸初始冲击力符合公式  $F = a + bmv^\alpha$  ( $F$  代表力;  $m$  为弹体质量;  $v$  为弹体速度;  $a$ 、 $b$  和  $\alpha$  为常数)。图 7 同时给出了侵彻过程 ( $v_i=110$  m/s) 中冲击力和速度时程曲线。如图所示, 侵彻初始阶段冲击力最大, 此时弹体速度下降也最快; 侵彻中后段冲击力变化较均匀, 弹体速度呈台阶形下降。

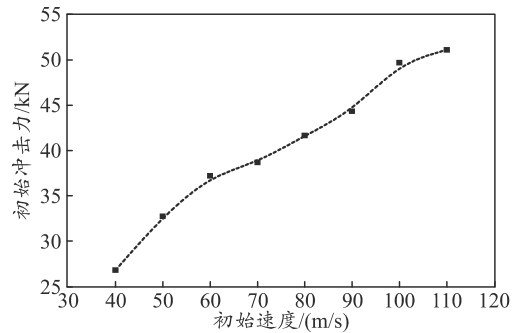


图 6 初始冲击力-速度曲线

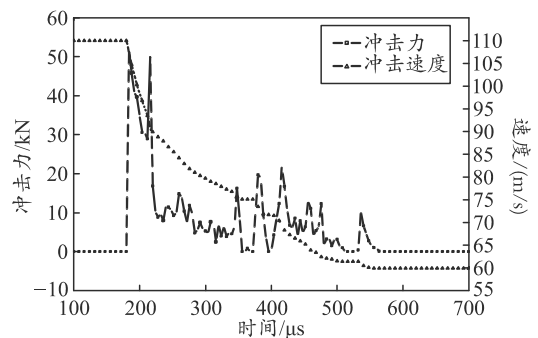


图 7 冲击力和速度时程曲线 ( $v_i=110$  m/s)

平头弹侵彻的 3 个不同时刻泡沫铝内部应力分布如图 8 所示。从图 8(a)可以看出, 初始时刻泡沫铝内部产生了很强的柱状分布应力。由初始碰撞力可计算出初始时刻碰撞面压强约为 288.7 MPa, 此压强稍大于弹体的屈服应力(270 MPa), 而远大于泡沫铝的屈服强度。在侵彻初始, 弹丸冲击区的泡沫铝即迅速崩塌, 剪切面开裂, 破坏以压剪为主。在侵彻中段时, 破坏仍然以压剪为主, 辅以底部的膜力拉伸, 平头弹体端面圆周与泡沫铝接触区产生了较强的集中应力(图 8(b)), 对应开始形成冲塞体。随着压剪的进行, 冲塞体被逐渐压实。Jung 等<sup>[3]</sup>在分析泡沫铝夹芯板的弹道冲击时也发现在泡沫铝底部有明显的拉伸破坏痕迹。本例中可看出(图 8(c)): 当冲塞体被压实到一定程度, 继续破坏应以拉伸开裂为主, 直至冲塞体完全形成。

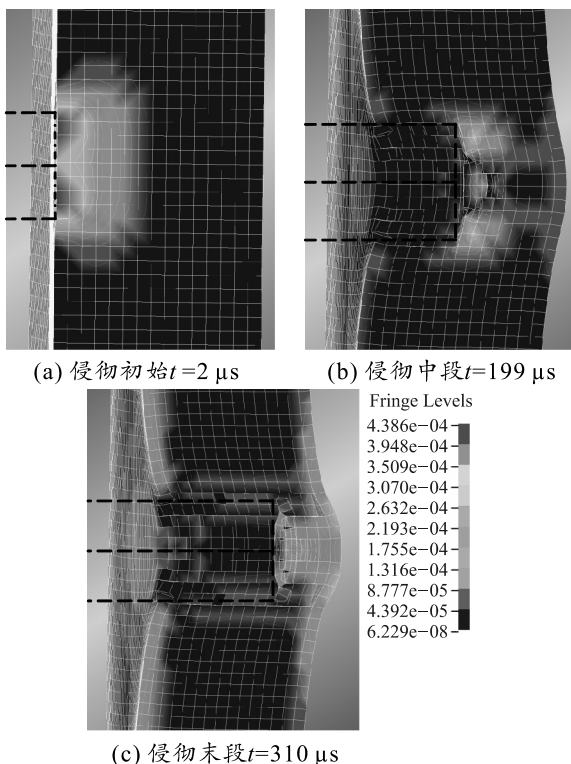


图 8 侵彻过程中泡沫铝破坏的演化 ( $v_i=110 \text{ m/s}$ )

### 3 结论

在材料力学测试的基础上, 笔者由 LS-DYNA 数值模拟分析可得设定的泡沫铝在平头弹侵彻时的弹道极限速度为 59.7 m/s。该数值仿真方法具有快速、准确的特点, 可扩展到不同密度和厚度泡沫铝弹道极限的求算预测。同时, 定量分析了平头弹冲击力大小; 侵彻初始阶段冲击力最大, 中后段冲击力均匀变小。综合速度、冲击力变化以及应力分布

的分析可知: 侵彻初始阶段泡沫铝破坏以压剪为主, 侵彻后段当冲塞体被压实到一定程度, 破坏以拉伸断裂为主。

### 参考文献:

- [1] SMITH R, ALTENHOG W, LAPAIN M. Transverse impact loading of aluminum foam filled braided stainless steel tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 88: 214-226.
- [2] CHO J U, HONG S J, LEE S K, et al. Impact fracture behavior at the material of aluminum foam[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 539(2): 250-258.
- [3] JUNG A, LACH E, DIEBELS S. New hybrid foam materials for impact protection[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 64: 30-38.
- [4] CHO H, CHO J. Damage and penetration behavior of aluminum foam at various impacts[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(9): 3442-3448.
- [5] 闫晓鹏, 张年梅, 杨桂通. 开孔与闭孔泡沫铝的抗侵彻性能研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 149-153.
- [6] ALAVI N A, RAZAVI S B, MAJZOBI G H. Ballistic limit determination of aluminum honeycombs-Experimental study[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 488(1-2): 273-280.
- [7] 贾斌, 马志涛, 张伟, 等. 泡沫铝防护屏的 Whipple 防护结构弹道极限数值模拟研究[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(3): 368-372.
- [8] 刘文祥, 张德志, 张向荣, 等. 填充式泡沫铝防护结构的弹道极限[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 43-46.
- [9] SHAH Q H, TOPA A. Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA[J]. Modeling and Simulation in Engineering, 2014, 26(1-3): 1-7.
- [10] HORTA L G, JACKSON K E, KELLAS S. A computational approach for model update of an LS-DYNA energy absorbing cell[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2010, 55(3): 032011-1-032011-8.
- [11] HAIDAR S, ROY S, GHOSE J. Software simulation for mechanical properties of aluminium MMC foam[J]. American Journal of Materials Synthesis and Processing, 2016, 1(1): 1-9.
- [12] ZHANG J K, ZHANG X. An efficient approach for predicting low-velocity impact force and damage in composite laminates[J]. Composite Structures, 2015, 130: 85-94.
- [13] 永胜, 赵艳勤, 黄坚, 等. 自行火炮综合传动装置非线性动力学仿真与疲劳可靠性寿命预测任[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 86-91.
- [14] IQBAL M A, SENTHIL K, BHARGAVA P, et al. The characterization and ballistic evaluation of mild steel[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 78(4): 98-113.