

高压物理学报

冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性

赵转 李世强 刘志芳

Stress Waves Propagation in Layered Graded Cellular Materials under Dynamic Crush Loading

ZHAO Zhuan, LI Shiqiang, LIU Zhifang

引用本文:

赵转, 李世强, 刘志芳. 冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):064102. DOI: 10.11858/gywlb.20190724

ZHAO Zhuan, LI Shiqiang, LIU Zhifang. Stress Waves Propagation in Layered Graded Cellular Materials under Dynamic Crush Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):064102. DOI: 10.11858/gywlb.20190724

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190724>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

轴向冲击载荷作用下梯度圆管的动力学行为

Dynamic Crushing Behavior of Graded Hollow Cylindrical Shell under Axial Impact Loading

高压物理学报. 2017, 31(6): 778 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.06.013>

聚苯乙烯泡沫材料的动态压缩特性

Dynamic Compression Characteristics of Polystyrene Foam Materials

高压物理学报. 2019, 33(2): 024202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180655>

基于Lagrangian分析法的梯度泡沫金属 动态力学行为研究

Dynamic Mechanical Behavior of Graded Metallic Foams Based on Lagrangian Analysis Method

高压物理学报. 2019, 33(1): 014104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180534>

轴向荷载下功能梯度材料圆柱壳的动力屈曲

Dynamic Buckling of Functionally Graded Cylindrical Shells under Axial Loading

高压物理学报. 2018, 32(5): 054102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180502>

轴向荷载下功能梯度材料Timoshenko梁动力屈曲分析

Dynamic Buckling of Functionally Graded Timoshenko Beam under Axial Load

高压物理学报. 2018, 32(4): 044104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180509>

金属内冲击波跨晶界传播的应力分配机制初探

Preliminary Investigation on Stress Distribution Mechanism of Shock Propagating across Grain Interface in Metal

高压物理学报. 2019, 33(5): 052201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180608>

冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性

赵 转¹, 李世强², 刘志芳²

(1. 运城职业技术学院建筑工程系, 山西 运城 044000;

2. 太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要:以一维应力波传播理论为基础,建立了3层金属泡沫材料受到刚性块撞击时的理论模型,研究了刚性块撞击3层泡沫圆杆时的动力响应过程,从理论上给出了刚性块在撞击过程中的速度衰减规律数值解。利用ANSYS/LS-DYNA分析了受刚性块撞击时塑性应力波在3层泡沫材料中的传播过程,比较了刚性块以及层间界面处节点速度的变化规律。通过对比有限元结果与理论结果发现:理论模型能够较好地预测冲击载荷下分层泡沫材料各界面的速度衰减规律;3层梯度泡沫材料比相同质量的单层均质泡沫材料具有更加高效的吸能和缓冲能力。由于理论假设忽略了反射波以及泡沫材料应变硬化效应的影响,理论解与有限元模拟结果之间存在一定的误差。

关键词:分层泡沫材料;动态压缩;应力波;理论模型

中图分类号:O347

文献标识码:A

多孔材料因其压缩应力-应变曲线包含一段较长的平台区域,在受到冲击载荷时能够吸收较多的能量,起到缓冲减震的功能,在航空航天、交通运输等领域具有广泛的应用。然而受工业生产中金属发泡工艺本身的限制,泡沫材料的厚度、平台应力以及密实化应变有限,压缩效率较低,单层泡沫材料作为吸能填充层在爆炸冲击中的缓冲和能量吸收能力受到制约^[1]。分层泡沫材料在用作防护层时没有厚度限制,可以根据载荷工况进行梯度及分层优化设计^[2],合理的分层泡沫组合能够对冲击波产生有效的衰减作用,提高结构的抗冲击能力^[3-4]。与均质多孔材料相比,梯度和分层设计可以便捷地对不同性质的材料进行有序的组合,并结合不同材料的特点,充分发挥材料的吸能特性,使之具有更加优越的性能,因此分层梯度金属多孔材料及结构冲击动力学行为引起了广泛的关注^[5-7]。

本研究以一维应力波传播理论为基础,建立了3层梯度金属泡沫材料受到刚性块撞击时的理论模型,分析各层界面速度的衰减规律,并利用ANSYS/LS-DYNA分析受刚性块撞击时应力波在3层泡沫材料中的传播过程,再与理论结果进行对比。

1 理论模型

Reid等^[8]最早运用波阵面上的动量守恒条件,研究了应力波在木头圆杆中的传播特性,提出了有关应力波在多孔材料中传播的刚性理想塑性锁定模型(RPPL模型)。Tan等^[9]通过对冲击载荷下金属泡沫铝的动态压缩性能实验研究,提出了有关泡沫铝材料在冲击作用下的冲击模型。Karagiozova^[10]针对刚性质量块撞击单层和双层梯度泡沫圆杆的动力响应及应力波传播问题,利用能量守恒原理,结合波阵面上的质量守恒及动态连续条件,分析了质量块速度变化及衰减特征。

* 收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(11602161, 11772216); 山西省自然科学基金(201601D021025)

作者简介: 赵 转(1984—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: zhaozhuan001@163.com

通信作者: 李世强(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事冲击动力学、爆炸力学研究.

E-mail: lishiqiang@tyut.edu.cn

本研究以一维应力波传播理论为基础,建立质量为 M 的刚性质量块撞击一端固定的3层泡沫圆杆的理论模型,设泡沫圆杆的截面积为 A_0 , 时间为 t , 撞击过程如图1所示。假设整个过程分为3个相互耦合的阶段:第1阶段($0 < t \leq t_1$)为塑性冲击波通过第1层泡沫之前;第2阶段($t_1 < t \leq t_2$)为塑性冲击波通过第1层泡沫至通过第2层泡沫之前;第3阶段($t_2 < t \leq t_3$)为塑性冲击波通过第2层泡沫至到达固定端之前。由于各层之间的波阻抗发生间断,压缩过程中前驱波可能导致各层之间的耦合压缩作用,这种耦合作用通过假设层间压缩区(Assumption of Compression Zone, 如图1所示)来描述。理论模型中忽略泡沫材料界面间的反射作用,并且假设每层泡沫都符合RPPL模型^[8]。

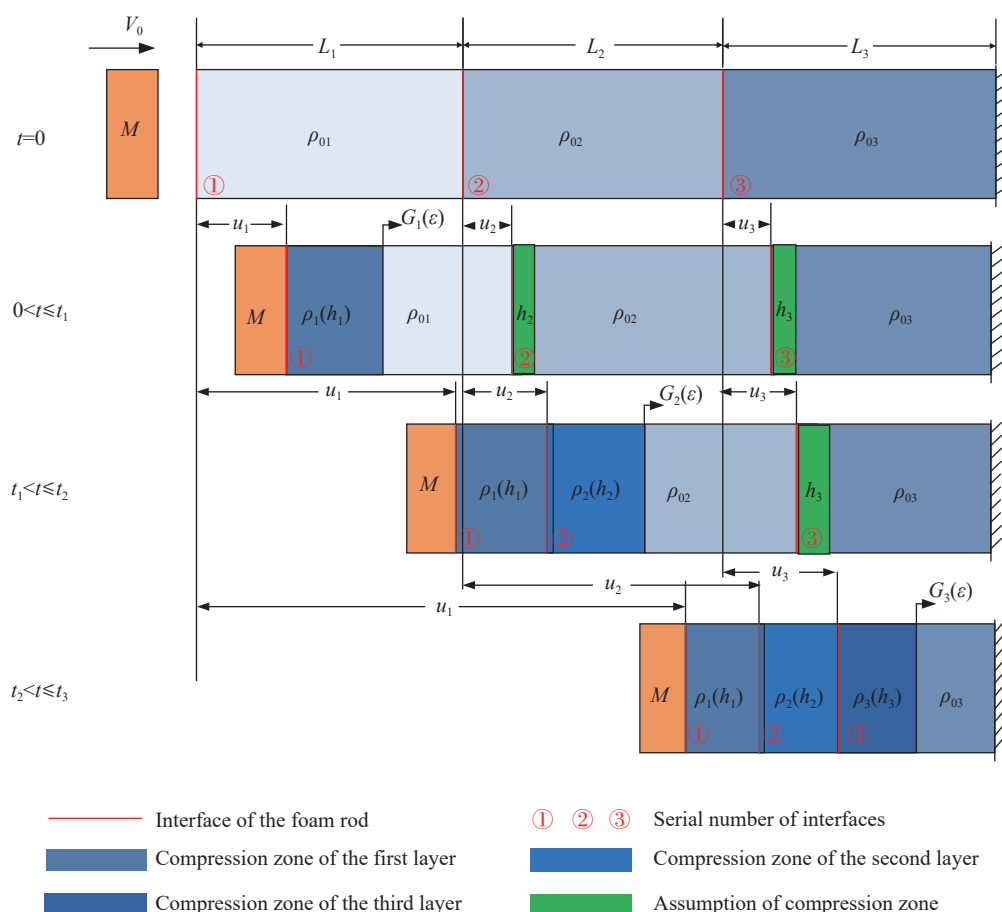


图1 刚性质量块撞击一端固定的3层泡沫材料

Fig. 1 Impact of a rigid mass against a triple-layered foam material

假设刚性质量块的初始速度为 V_0 , 3层泡沫圆杆的初始密度分别为 ρ_{01} 、 ρ_{02} 、 ρ_{03} , 初始长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 , 初始平台屈服应力分别为 σ_1^Y 、 σ_2^Y 、 σ_3^Y , 泊松比均假设为零。根据波阵面上的质量守恒及动量守恒定律^[8, 11], 得到如下结果。

(1) 第1阶段。当 $0 \leq t \leq t_1$ 时, 初始条件为: 各界面速度 $V_1(0) = V_0$, $V_2(0) = 0$, $V_3(0) = 0$; 各压缩区长度 $h_1(0) = 0$, $h_2(0) = 0$, $h_3(0) = 0$; 各界面位移 $u_1(0) = 0$, $u_2(0) = 0$, $u_3(0) = 0$; 压缩过程中假设自由端速度 $V_1 = du_1/dt$, 第1界面处速度为 $V_2 = du_2/dt$, 第2界面处速度为 $V_3 = du_3/dt$ 。对刚性质量块和第1层泡沫杆压缩区域(压缩长度为 h_1 , 如图1(b)所示)列动量守恒方程

$$\{M/A_0 + \rho_{01}[u_1 + \delta u_1 + h_1 + \delta h_1 - (u_2 + \delta u_2)]\}(V_1 + \delta V_1) - [M/A_0 + \rho_{01}(u_1 + h_1 - u_2)]V_1 - \rho_{01}(\delta u_1 + \delta h_1 - \delta u_2)V_2 = -\sigma_1^Y \delta t \quad (1)$$

即

$$[M/A_0 + \rho_{01}(u_1 + h_1 - u_2)]\delta V_1 + \rho_{01}(V_1 - V_2)(\delta u_1 + \delta h_1 - \delta u_2) = -\sigma_1^Y \delta t \quad (2)$$

由于 $\frac{dh_1}{dt} = G_1 - (V_1 - V_2)$, 冲击波波速 $G_1(\varepsilon) = \frac{V_1 - V_2}{\varepsilon_1}$, ε_1 为第 1 层泡沫材料的密实化应变, 所以当 $\delta t \rightarrow 0$ 时, (2) 式可写为

$$\begin{aligned} [M/A_0 + \rho_{01}(u_1 + h_1 - u_2)] \frac{dV_1}{dt} + \rho_{01}(V_1 - V_2) \frac{du_1 + dh_1 - du_2}{dt} &= [M/A_0 + \rho_{01}(u_1 + h_1 - u_2)] \frac{dV_1}{dt} + \\ \rho_{01}(V_1 - V_2) \{ [G_1 - (V_1 - V_2)] + V_1 - V_2 \} &= [M/A_0 + \rho_{01}(u_1 + h_1 - u_2)] \frac{dV_1}{dt} + \rho_{01} \frac{(V_1 - V_2)^2}{\varepsilon_1} = -\sigma_1^Y \end{aligned} \quad (3)$$

于是

$$\frac{dV_1}{dt} = - \left[\sigma_1^Y + \rho_{01} \frac{(V_1 - V_2)^2}{\varepsilon_1} \right] \frac{1}{M/A_0 + \rho_{01}A_0(u_1 + h_1 - u_2)} \quad (4)$$

在此阶段, 可以记②号界面(如图 1 所示)上的压力为 p_1 , 通过假设右侧第 2 层泡沫杆压缩段的长度为 h_2 来考虑耦合压缩作用, 对第 2 层泡沫杆压缩段列动量守恒方程

$$\rho_{02}[h_2 + u_2 + \delta h_2 + \delta u_2 + (u_3 + \delta u_3)](V_2 + \delta V_2) - \rho_{02}(h_2 + u_2 - u_3)V_2 = (p_1 - \sigma_2^Y)\delta t \quad (5)$$

当 $\delta t \rightarrow 0$ 时

$$\rho_{02}(h_2 + u_2 - u_3) \frac{dV_2}{dt} + \rho_{02}V_2 \frac{d(h_2 + u_2 - u_3)}{dt} = p_1 - \sigma_2^Y \quad (6)$$

同样有如下关系: $\frac{dh_2}{dt} = G_2 - (V_2 - V_3)$, 冲击波波速 $G_2(\varepsilon) = \frac{V_2 - V_3}{\varepsilon_2}$, ε_2 为第 2 层泡沫材料的密实化应变, $V_3 = \frac{du_3}{dt}$ 。代入 (6) 式, 可得

$$\rho_{02}(h_2 + u_2 - u_3) \frac{dV_2}{dt} = p_1 - (\sigma_2^Y + \rho_{02}V_2G_2) \quad (7)$$

由于惯性效应, 压缩区动态应力符合如下关系

$$\sigma_2^d = \sigma_2^Y + \rho_{02}(V_2 - V_3)G_2 \quad (8)$$

联合 (7) 式和 (8) 式, 得到

$$\rho_{02}(h_2 + u_2 - u_3) \frac{dV_2}{dt} = p_1 - \sigma_2^d \quad (9)$$

对第 1 层泡沫杆未压缩段列动量守恒方程

$$\rho_{01}[L_1 - (h_1 + u_1 - u_2)]\delta V_2 - \rho_{01}(V_1 + \delta V_1)(\delta h_1 + \delta u_1 - \delta u_2) + \rho_{01}V_2(\delta h_1 + \delta u_1 - \delta u_2) = (\sigma_1^d - p_1)\delta t \quad (10)$$

略去无穷小量 $(\delta h_1\delta V_1 + \delta u_1\delta V_1 - \delta u_2\delta V_1)$, 则

$$\rho_{01}[L_1 - (h_1 + u_1 - u_2)] \frac{dV_2}{dt} - \rho_{01}V_1 \frac{d(h_1 + u_1 - u_2)}{dt} + \rho_{01}V_2 \frac{d(h_1 + u_1 - u_2)}{dt} = \sigma_1^d - p_1 \quad (11)$$

式中: $\sigma_1^d = \sigma_1^Y + \rho_{01}(V_1 - V_2)G_1$ 。由此可得

$$\frac{dV_2}{dt} = - \left[\sigma_2^Y + \rho_{02} \frac{(V_2 - V_3)^2}{\varepsilon_2} - \sigma_1^Y \right] \frac{1}{\rho_{02}(h_2 + u_2 - u_3) + \rho_{01}[L_1 - (u_1 + h_1 - u_2)]} \quad (12)$$

同样, 在此阶段记③号界面上的压力为 p_2 , 通过假设右侧第 3 层泡沫杆压缩段的长度为 h_3 来考虑耦合压缩作用, 对第 3 层泡沫杆压缩段列动量守恒方程

$$\rho_{03}(h_3 + u_3 + \delta h_3 + \delta u_3)(V_3 + \delta V_3) - \rho_{03}(h_3 + u_3)V_3 = (p_2 - \sigma_3^Y)\delta t \quad (13)$$

当 $\delta t \rightarrow 0$ 时

$$\rho_{03}(h_3 + u_3) \frac{dV_3}{dt} + \rho_{03}V_3 \frac{d(h_3 + u_3)}{dt} = p_2 - \sigma_3^Y \quad (14)$$

因为 $\frac{dh_3}{dt} = G_3 - V_3$, 冲击波波速 $G_3(\varepsilon) = \frac{V_3}{\varepsilon_3}$, ε_3 为第 3 层泡沫材料的密实化应变, $V_3 = \frac{du_3}{dt}$, 则

$$\sigma_3^d = \sigma_3^Y + \rho_{03} V_3 G_3 \quad (15)$$

联合 (14) 式和 (15) 式, 有

$$\rho_{03}(h_3 + u_3) \frac{dV_3}{dt} = p_2 - \sigma_3^d \quad (16)$$

对第 2 层泡沫杆未压缩段列动量守恒方程

$$\rho_{02}[L_2 - (h_2 + u_2 - u_3)]\delta V_3 - \rho_{02}(V_2 + \delta V_2)(\delta h_2 + \delta u_2 - \delta u_3) + \rho_{02}V_3(\delta h_2 + \delta u_2 - \delta u_3) = (\sigma_2^d - p_2)\delta t \quad (17)$$

略去无穷小量 $(\delta h_1 \delta V_1 + \delta u_1 \delta V_1 - \delta u_2 \delta V_1)$, 则

$$\rho_{02}[L_2 - (h_2 + u_2 - u_3)] \frac{dV_3}{dt} - \rho_{02}V_2 \frac{d(h_2 + u_2 - u_3)}{dt} + \rho_{02}V_3 \frac{d(h_2 + u_2 - u_3)}{dt} = \sigma_2^d - p_2 \quad (18)$$

所以有

$$\frac{dV_3}{dt} = - \left(\sigma_3^Y + \rho_{03} \frac{V_3^2}{\varepsilon_3} - \sigma_2^Y \right) \cdot \frac{1}{\rho_{03}(h_3 + u_3) + \rho_{02}[L_2 - (u_2 + h_2 - u_3)]} \quad (19)$$

(2) 第 2 阶段。 $t_1 < t \leq t_2$, $V_1 = V_2$, $\frac{dh_2}{dt} = G_2 - (V_2 - V_3)$, $G_2(\varepsilon) = \frac{V_2 - V_3}{\varepsilon_2}$, $\frac{du_2}{dt} = V_2$, $\frac{du_3}{dt} = V_3$, 根据波阵面上的动量守恒条件

$$\{ M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}[u_2 + \delta u_2 + h_2 + \delta h_2 - (u_3 + \delta u_3)] \} (V_2 + \delta V_2) - [M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}(u_2 + h_2 - u_3)]V_2 - \rho_{02}(\delta u_2 + \delta h_2 - \delta u_3)V_3 = -\sigma_{y2}\delta t \quad (20)$$

$$[M/A_0 + \rho_{01}(u_1 + h_1 - u_2)]\delta V_1 + \rho_{01}(V_1 - V_2)(\delta u_1 + \delta h_1 - \delta u_2) = -\sigma_{y1}\delta t \quad (21)$$

$$\begin{aligned} [M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}(u_2 + h_2 - u_3)] \frac{dV_2}{dt} + \rho_{02}(V_2 - V_3) \frac{du_2 + dh_2 - du_3}{dt} = \\ [M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}(u_2 + h_2 - u_3)] \frac{dV_2}{dt} + \rho_{02}(V_2 - V_3) \{ [G_2 - (V_2 - V_3)] + V_2 - V_3 \} = \\ [M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}(u_2 + h_2 - u_3)] \frac{dV_2}{dt} + \rho_{02} \frac{(V_2 - V_3)^2}{\varepsilon_2} = -\sigma_{y2} \end{aligned} \quad (22)$$

可得

$$\frac{dV_2}{dt} = - \left[\sigma_{y2} + \rho_{02} \frac{(V_2 - V_3)^2}{\varepsilon_2} \right] \frac{1}{M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}A_0(u_2 + h_2 - u_3)} \quad (23)$$

$$\frac{dV_3}{dt} = - \left(\sigma_3^Y + \rho_{03} \frac{V_3^2}{\varepsilon_3} - \sigma_2^Y \right) \cdot \frac{1}{\rho_{03}(h_3 + u_3) + \rho_{02}[L_2 - (u_2 + h_2 - u_3)]} \quad (24)$$

其中初始条件: $V_2(t_1) = V_1(t_1)$, $h_2(t_1) = 0$, $h_3(t_1) = 0$, $u_2(t_1) = \bar{u}_2$, $u_3(t_1) = \bar{u}_3$ 。

(3) 第 3 阶段。 $t_2 < t \leq t_3$, $V_1 = V_2 = V_3$ 时

$$\frac{dV_3}{dt} = - \left(\sigma_3^Y + \rho_{03} \frac{V_3^2}{\varepsilon_3} \right) \frac{1}{M/A_0 + \rho_{01}L_1 + \rho_{02}L_2 + \rho_{03}(u_3 + h_3)} \quad (25)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = G_3 - V_3, \quad G_3(\varepsilon) = \frac{V_3}{\varepsilon_3}, \quad \frac{du_3}{dt} = V_3 \quad (26)$$

初始条件: $V_3(t_2) = V_2(t_2)$, $h_3(t_2) = 0$, $u_3(t_2) = \bar{u}_3$ 。

利用 Runge-Kutta 方法, 将各阶段初始条件代入 (4) 式、(12) 式、(19) 式、(23) 式、(24) 式和 (25) 式, 可求得各界面速度随时间变化规律的数值解。

2 有限元计算

为了验证理论模型的可靠性, 建立如图 2 所示的有限元模型 (1/4 模型)。刚性块的质量 M 为 370 g, 泡沫杆直径为 100 mm, 3 层泡沫杆的参数如表 1 所示。

表 1 泡沫杆参数

Table 1 Parameters of the foam rod

L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	$\rho_{01}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{02}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{03}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
30	40	60	570	410	253

在有限元计算中, 泡沫材料通过 Crushable Foam 模型模拟其压缩变形, 图 2 给出了 3 种不同密度的 Cymat 泡沫铝的准静态压缩应力-应变曲线。为了记录压缩过程中各界面的速度变化规律, 分别在刚性块与第 1 层泡沫杆及中间泡沫杆界面处选择节点 1、2、3, 记录压缩过程中层间界面的速度时程曲线。

图 3 对比了有限元模拟结果和理论模型计算结果, 并且与相同质量的单层泡沫圆杆(单层泡沫杆长度 $L_1=200\text{ mm}$, 密度 $\rho=253\text{ kg/m}^3$)的理论和有限元结果进行了比较。从图 3 可以看出, 理论结果与有限元模拟结果吻合较好, 说明理论模型能够较好地预测冲击载荷下分层泡沫材料各界面的速度衰减规律。

由图 3 可知, 在整体质量一定的情况下, 增加泡沫材料的层数时, 理论结果与有限元模拟结果之间的相对偏差增加。这是由于: 理论计算中将连续的压缩过程假设为相互耦合的 3 个阶段, 各阶段之间的计算误差不断累积; 并且在有限元计算中泡沫铝材料的应力-应变关系为单轴压缩实验曲线, 随着应变的增加有明显的硬化现象, 而理论计算并未考虑应变硬化的影响, 压缩过程中平台应力保持恒定, 所以在整个压缩过程中刚性块速度的有限元结果略高于理论结果。从图 3 中还可以看出, 在理论模型中第 1 阶段和第 2 阶段对应的时间分别为 $t_1=0.16\text{ ms}$ 和 $t_2=0.33\text{ ms}$, 数值模拟中则分别为 $t_1=0.15\text{ ms}$ 和 $t_2=0.39\text{ ms}$ 。在 3 层泡沫材料的有限元结果中, 节点 2 的速度与节点 1 速度相等之后会略微超越节点 1 的速度, 节点 3 也有类似情况, 这是由于: 冲击波在截面处发生反射, 反射波抑制了波阵面后方节点的运动, 而在理论计算中并未考虑界面处反射波的作用。

比较单层和 3 层泡沫材料节点 1 的结果发现: 在相同的冲击速度下, 3 层梯度泡沫材料对刚性块的衰减作用更明显, 且相同质量的 3 层泡沫材料的总长度更短, 所以分层梯度泡沫材料具有更高的压缩效率^[11]以及更有效的吸能和缓冲效果。

3 结 论

在理论分析刚性质量块撞击分层梯度泡沫材料的动力响应过程的基础上, 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立了相应的有限元模型, 分析了受刚性块撞击时应力波在 3 层泡沫材料中的传播过程, 比较了层间界面的速度变化规律。根据波阵面上动量守恒关系与一维应力波传播理论, 建立了刚性块撞击分层泡沫材料时各界面速度衰减规律的理论模型, 利用 Runge-Kutta 方法给出了理论模型的数值解, 理

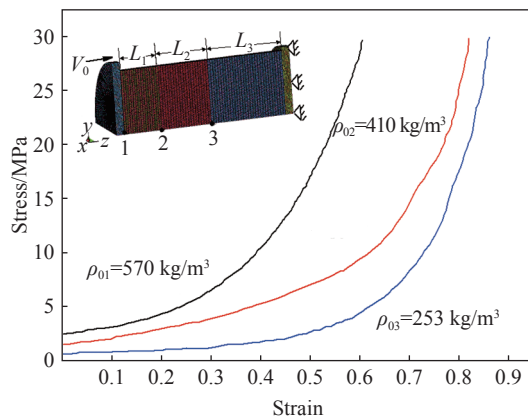


图 2 3 层泡沫铝圆杆受刚性块撞击的有限元模型及 3 种 Cymat 泡沫铝压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Triple layer foam rod impacted by a rigid mass and stress-strain curves of three Cymat foam

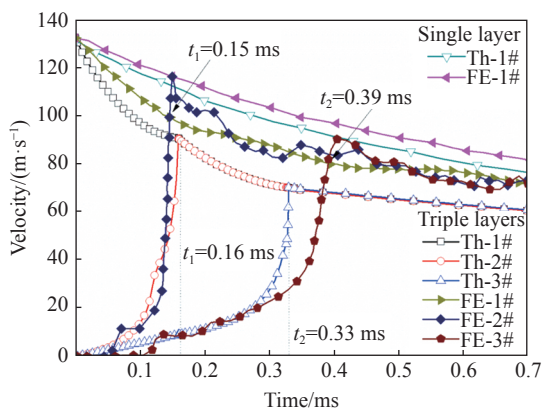


图 3 各节点速度变化规律对比

Fig. 3 Comparison of velocity profiles

论计算结果与有限元模拟结果吻合较好,说明理论模型能够较好地预测冲击载荷下分层梯度泡沫材料各界面的速度衰减规律。然而,由于在理论计算中忽略了反射波以及泡沫材料应变硬化效应的影响,理论解与有限元模拟结果之间存在一定偏差。从有限元结果还发现,在相同质量和冲击速度下,与单层泡沫材料相比,3层梯度泡沫材料具有更高效的吸能和缓冲能力。

参考文献:

- [1] MA G W, YE Z Q. Energy absorption of double-layer foam cladding for blast alleviation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(2): 329–347.
- [2] GARDNER N, SHUKLA A. The blast response of sandwich composites with a functionally graded core and polyurea interlayer [M]//*Dynamic Behavior of Materials*. New York: Springer, 2011: 215–223.
- [3] WANG E, GARDNER N, SHUKLA A. The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(18/19): 3492–3502.
- [4] LI S, LI X, WANG Z, et al. Sandwich panels with layered graded aluminum honeycomb cores under blast loading [J]. *Composite Structures*, 2017, 173: 242–254.
- [5] LI S, LI X, WANG Z, et al. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 1–12.
- [6] LIU X, TIAN X, LU T J, et al. Blast resistance of sandwich-walled hollow cylinders with graded metallic foam cores [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(8): 2485–2493.
- [7] ZHANG L, HEBERT R, WRIGHT J T, et al. Dynamic response of corrugated sandwich steel plates with graded cores [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 185–194.
- [8] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 531–570.
- [9] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II—‘shock’ theory and comparison with experimental data and numerical models [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2206–2230.
- [10] KARAGIOZOVA D. Velocity attenuation and force transfer by a single-and double-layer claddings made of foam materials [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(4): 417–437.
- [11] GURUPRASAD S, MUKHERJEE A. Layered sacrificial claddings under blast loading Part I—analytical studies [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(9): 957–973.

Stress Waves Propagation in Layered Graded Cellular Materials under Dynamic Crush Loading

ZHAO Zhuan¹, LI Shiqiang², LIU Zhifang²

(1. *Department of Architecture and Civil Engineering, Yuncheng Polytechnic College, Yuncheng 044000, China;*

2. *Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)*

Abstract: The theoretical mode of velocity attenuation of rigid mass and the stress wave propagation in layered cellular materials under dynamic impact loading has been proposed based on the 1-D wave theory and the dynamic response process of a foam rod strike by a rigid mass has been studied. A finite element (FE) validation has been conducted by employing ANSYS/LS-DYNA software, agreeing well with the theoretical results. The compared results show that the triple layered graded foam material has better impact reduction and energy absorption capacity than the uniform foam with the same mass. Due to the reflected wave and the strain hardening effects not considered in the theoretical model, there are some acceptable errors between the theoretical and FE results.

Keywords: layered cellular material; dynamic crushing; stress wave; theoretical model