DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0675-07

泡沫材料对冲击波的衰减特性*

周佩杰[1],王 坚[2],陶 钢[1],周 杰[1]
(1.南京理工大学能源与动力工程学院,江苏 南京 210094;
2.北京跟踪与通信技术研究所,北京 100000)

摘要:对冲击波与开式、闭式泡沫作用及其在空气中的传播特性开展实验研究,探讨不同结构的泡沫材料对冲击波衰减的力学特征。通过定量分析泡沫材料对冲击波的超压峰值、正冲量的损失,分析冲击波入射、反射、透射的正冲量。实验结果表明,泡沫材料对冲击波的衰减体现在对冲击波的反射衰减等方面,其中开式泡沫对冲击波的衰减效果比闭式泡沫稍好,且它们衰减冲击波的具体力学过程也不尽相同。

关键词:爆炸力学;衰减特性;超压峰值;泡沫材料;冲击波;正冲量
中图分类号:O382 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

在爆炸冲击波防护材料研究中,如何采用有效、轻便的材料削弱冲击波的强度是研究者一直关注的问题。因为泡沫材料具有低密度、非线性力学及吸能等特征,已经广泛应用于冲击波的防护研究[1]。

泡沫材料是由相互连接的网状单元构成,单元结构分为开式与闭式,开式结构的边界由丝状的固体构成,允许单元间的气体相互流通和吸水特性,而闭式结构的边界由薄膜构成,阻止单元间的气体流通[2-4]。J. J. Lee 等[5]进行了冲击波在空气中传播与开式泡沫材料作用的实验,他们发现在几厘米处冲击波与泡沫作用的压力与在空气中传播时几乎一致,但是大于此距离,冲击波与泡沫作用后的压力迅速衰减;作者指出在近距离处是因为实验采用的开式泡沫材料仅含 5%固体材料,在远距离随着爆炸冲击波的衰减开式泡沫材料的内部结构发挥至关重要的作用。H. Kleine 等[6]进行了冲击波与不同密度的开式泡沫与闭式泡沫作用的实验,他们发现在低强度冲击波与泡沫材料作用时,压力峰值降低,因为此时泡沫材料只在线弹性及倒塌应力区域;在高强度冲击波与泡沫材料作用时,压力峰值升高,因为此时泡沫材料在致密化区域。作者指出冲击波与开式泡沫作用后压力曲线相对于入射冲击波更圆滑,与闭式泡沫作用后压力曲线比开式泡沫作用后更陡峭。但是作者并没有就开式、闭式泡沫对冲击波的衰减能力做研究。

本文中,开展冲击波在空气中的传播及其与木板、开式泡沫、闭式泡沫作用的实验,研究不同结构泡沫材料对冲击波衰减的力学特性。通过定量分析冲击波与不同结构的泡沫材料作用后超压峰值和正冲量的损失,分别计算冲击波的入射、反射和透射正冲量,了解不同结构的泡沫材料对冲击波的衰减规律。

1 实验方案

采用的实验样品为木板、开式及闭式泡沫材料,样品尺寸均为 300 mm×300 mm×30 mm。木板为常见三合板;泡沫材料的基体为聚乙烯,开式泡沫的密度为 0.026 g/cm^3,质量为 70 g,空隙直径约为 1.0 mm;闭式泡沫的密度为 0.019 g/cm^3,质量为 51 g,空泡直径约为 1.5 mm。开式、闭式泡沫材料的显微结构如图 1 所示。实验中冲击波发生装置,通过发射药产生定向的冲击波场。

实验样品放置于装置内,以装置的中心轴线为压力测试线,在实验样品的前、后布置 2 个传感器,压力传感器 1、2 距离枪口中心位置分别为 210、300 mm,将压力传感安装在固定装置中,保证传感器测试端面与压力测试线的高度一致。为取得实验的一致性,实验过程中传感器与冲击波发生器的相对位置

* **收稿日期**:2014-03-19;**修回日期**:2014-06-18
第一作者:周佩杰(1990—),男,博士研究生,archibrad@163.com。

保持不变,其中实验场地的布置,如图 2 所示。

测试装置采用高频响应自动化数字测量系统。所用仪器型号:KISTLER 211B 型压电式石英传感器,PCB 402A 型数据调理仪,DEWE-2010 型数据采集仪。压力传感器、实验样品的安装装置均为自制。其中,为了很好地固定实验样品,安装装置尺寸为 600 mm×600 mm×44 mm,装置内部设计为中空,几何形状与样品尺寸一致,在两端开口的迎风面积为 200 mm×200 mm,保证实验样品受到冲击波作用时受到位移的约束。为了更全面研究冲击波与泡沫材料作用的动力学过程,实验设计方案:(1)测试冲击波在空气自由场中传播的特征,压力测试线上不放任何实验样品;(2)在传感器之间加入木板,了解冲击波绕流现象及其对其他测试结果的影响;(3)测试冲击波与泡沫材料作用的力学过程。

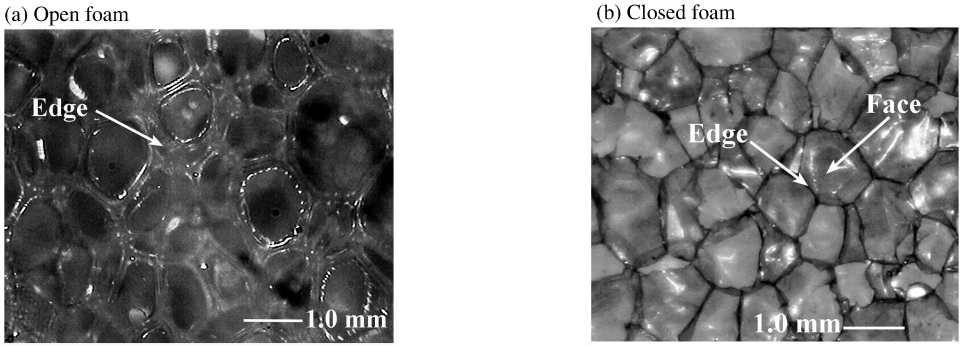

图 1 泡沫材料的显微结构

Fig. 1 Microstructure of the foam material

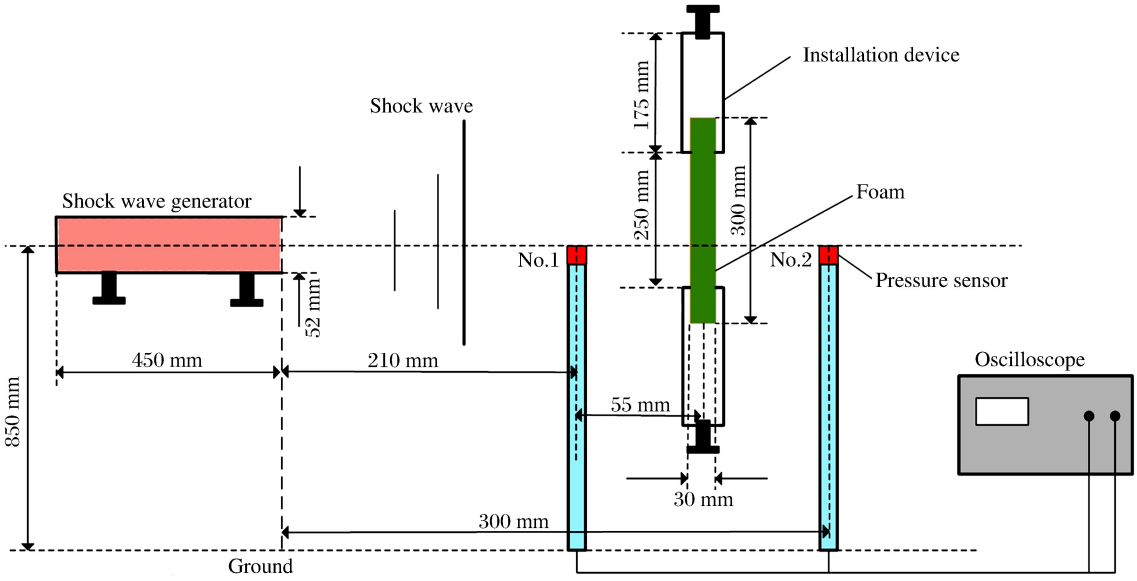

图 2 实验场地布局示意图

Fig. 2 Sketch map of test layout

2 实验结果

2.1 自由场中冲击波场的衰减

首先进行自由场中冲击波的衰减实验。图 3 为实验测得的冲击波超压 p 波形,实验重复 3 次,具体冲击波参数见表 1。传感器 1 测得冲击波波形有 2 个峰值,第 1 个波峰是冲击波的超压值,第 2 个波峰是气流的压力。冲击波超压值为 78.4、78.8、75.7 kPa,平均值为 77.6 kPa。冲击波的正冲量为:

$$I=\int_{t_1}^{t_2} p(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：I 为冲击波的正冲量值，$\Delta t=t_2-t_1$ 为冲击波的正压作用时间，$p(t)$ 为冲击波压力值随时间的变化函数。

根据式(1)计算 3 次实验中前部的传感器 1 测得的冲击波(以测试结果的第 1 个波形为准)正冲量值分别为 9.11、9.24 和 9.13 Pa·s，平均值为9.16 Pa·s。传感器 2 测得的冲击波的超压值为 48.3、50.3 和 53.7 kPa，平均值为 50.8 kPa；正冲量值分别为 7.71 、8.00 和 7.30 Pa·s，平均值为 7.67 Pa·s。可知冲击波从 210 mm 处到 300 mm 处，超压值平均下降了 34.5%，正冲量值平均下降了 16.3%。

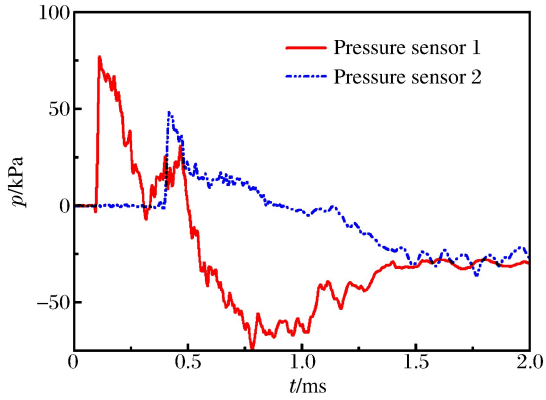

图 3 实验 1 中压力传感器的测试波形

Fig. 3 Typical shock wave profiles measured by pressure sensors in experiment 1

表 1 自由场中冲击波的测试结果

Table 1 Experimental results of shock wave propagating in air

实验编号	p/kPa		Δt/ms		I/(Pa·s)	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
1	78.4	48.3	0.210	0.510	9.11	7.71
2	78.8	50.3	0.220	0.525	9.24	8.00
3	75.7	53.7	0.225	0.495	9.13	7.30
平均	77.6	50.8	0.218	0.510	9.16	7.67

2.2 有木板情况下的冲击波测试结果

为了解冲击波绕流对实验结果的影响，将木板代替泡沫材料(位置见图 2 中的方孔)进行测试。假设木板表面具有刚性特征，不吸收冲击波的能量。传感器 1、2 测得的冲击波的波形如图 4 所示。其中传感器 1 测得的冲击波波形是入射、反射冲击波的叠加波形，以自由场实验测得冲击波波形为本底信号，利用简单的数学叠加方法，将反射冲击波分离出来(见图 5)：

$$p_{\mathrm{ref}}(t)=p_{\mathrm{in}}(t)-p_{\mathrm{free}}(t) \tag{2}$$

式中：$p_{\mathrm{ref}}(t)$ 为反射冲击波的压力值，$p_{\mathrm{in}}(t)$ 为木板(或泡沫材料)实验中传感器 1 测得的冲击波压力值，$p_{\mathrm{free}}(t)$ 为自由场实验中前部传感器 1 测得的冲击波压力值，t 为冲击波压力值对应的时刻，本方法忽略了传感器测得冲击波的负压区域。前部传感器 1 测得冲击波是入射、反射冲击波叠加的结果，入射与反射冲击波叠加后的波形有 3 个波峰(存在火药燃烧气流的影响)，如图 4 所示。冲击波与木板表面作用后形成的反射冲击波也有 2 个，波峰大小分别为 68.99、66.98 kPa，如图 5 所示。后部传感器 2 测得冲击波绕流过木板的波形。研究冲击波的绕流的实验，3 次实验的入射冲击波的超压的平均值为 88.3 kPa，与木板作用后冲击波绕流测得的冲击波的超压值平均值 3.0 kPa，超压值衰减了 96.6%；冲击波的入射冲量值(参考自由场的测试结果)为 9.16 Pa·s，绕过木板的正冲量值衰减为 0.11 Pa·s，正冲量衰减了 98.8%。研究发现，冲

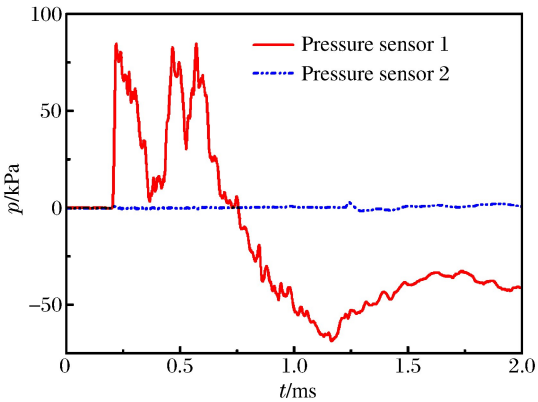

图 4 实验 6 中压力传感器的测试波形

Fig. 4 Typical shock wave profiles measured by pressure sensors in experiment 6

击波绕流过木板的超压值及正冲量均非常小，可以认为在研究泡沫材料对冲击波衰减实验中，冲击波的绕流对测试结果的影响可以忽略。

2.3 开式泡沫材料的实验结果

冲击波与开式泡沫材料作用时，前部传感器 1 测得的波形是由入射、反射冲击波的叠加而成的，测试结果如图 6 所示，冲击波的入射超压值、正冲量值分别为 80.5 kPa、9.16 Pa·s。根据式(2)将反射冲击波分离出来，图 7 为分离出来的反射冲击波的波形，反射波明显有 2 个波峰(存在火药燃烧气流的影响)，压力值分别为 45.0、28.66 kPa。由图 6 可知，冲击波透过材料后，后部压力传感器 2 测得的波形已经没有明显间断面，冲击波已衰减为等熵波，其中压力值、正冲量值分别为10.5 kPa、2.65 Pa·s。可知冲击波与开式泡沫材料作用后，压力值、正冲量值得到了大幅度衰减，具体的数据处理结果见表 2。

表 2 为开式泡沫材料与冲击波作用后的实验结果，实验重复了 3 次。入射冲击波的正冲量的大小是参照自由场实验中测试结果为 9.16 Pa·s。前部传感器 1 测得的冲击波的波形的第 1 个波峰值为入射冲击波的超压值，冲击波与泡沫材料作用后，冲击波的超压值、正冲量的衰减率的计算公式为：

$$\Phi_p = \frac{p_{\mathrm{in}} - p_{\mathrm{tran}}}{p_{\mathrm{in}}}, \qquad \Psi_I = \frac{I_{\mathrm{in}} - I_{\mathrm{tran}}}{I_{\mathrm{in}}} \tag{3}$$

式中：Φ_p、Ψ_I 分别为冲击波超压值、正冲量的衰减率，p_{in}、I_{in}分别为入射冲击波的超压值、正冲量值，p_{tran}、I_{tran}分别为冲击波透射过材料后的压力波的超压值、正冲量。

因为入射冲击波为前部传感器 1 测得的第 1 个波形，所以研究材料对冲击波的超压值的反射效果时参考反射冲击波的第 1 个波峰值，反射冲击波的正冲量的值大小是对整个波形的积分计算值，其中反射冲击波相对入射冲击波的强度的计算公式为：

$$\eta_p = \frac{p_{\mathrm{ref}}}{p_{\mathrm{in}}}, \qquad \theta_I = \frac{I_{\mathrm{ref}}}{I_{\mathrm{in}}} \tag{4}$$

式中：η_p、θ_I 分别为反射冲击波超压值、正冲量相对入射冲击波的强度，p_{ref}、I_{ref}分别为反射冲击波的超压值、正冲量值。

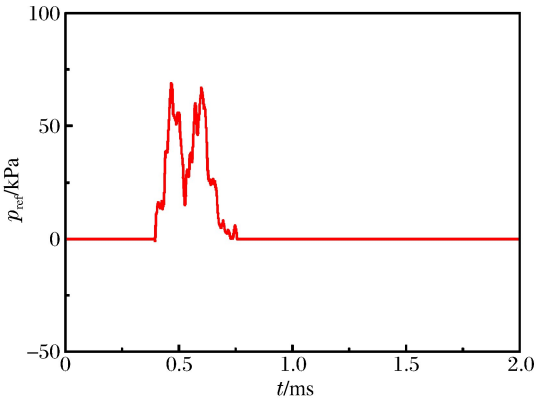

图 5 实验 6 中木板反射冲击波波形

Fig. 5 Shock wave reflected by a wooden plate in experiment 6

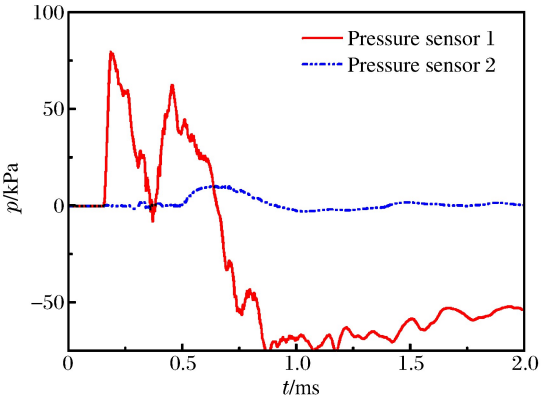

图 6 实验 7 中压力传感器的测试波形

Fig. 6 Typical shock wave profiles measured by pressure sensors in experiment 7

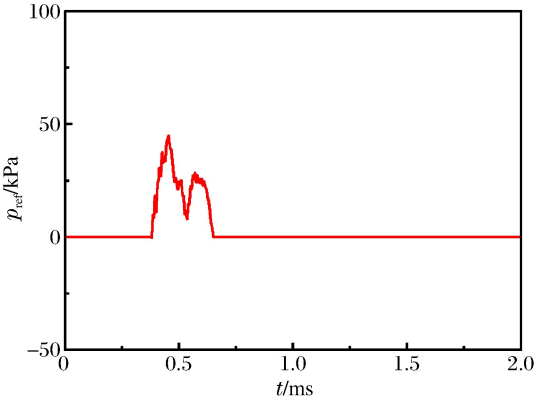

图 7 实验 7 中开式泡沫反射的冲击波波形

Fig. 7 Shock wave reflected by open foam in experiment 7

由于自制弹药的差异，所以冲击波发生器产生的冲击波的超压值会有一定差异。实验中入射冲击波的超压平均值为 81.0 kPa，与开式泡沫材料作

用后衰减为等熵波，其超压平均值为 10.9 kPa，衰减率为 86.5%；冲击波的入射冲量值为 9.16 Pa·s，其正冲量平均值为 2.60 Pa·s，衰减率为 71.6%。冲击波与开式泡沫材料作用后，反射冲击波相对于入射冲击波的超压值、正冲量分别为 49.3%、56.7%。

表 2 开式泡沫材料实验结果

Table 2 Experimental results of shock wave interacting with open foam

实验编号	p_{in}/kPa	p_{tran}/kPa	p_{ref}/kPa	Φ_p/%	η_p/%	I_{in}/(Pa·s)	I_{tran}/(Pa·s)	I_{ref}/(Pa·s)	Ψ_I/%	θ_I/%
7	80.7	11.3	45.0	86.0	55.8	9.16	2.52	6.28	72.5	68.6
8	80.5	10.5	29.6	87.0	36.8	9.16	2.65	4.88	71.1	53.3
9	81.8	11.0	45.1	86.6	55.1	9.16	2.64	4.42	71.2	48.3
平均	81.0	10.9	39.9	86.5	49.3	9.16	2.60	5.19	71.6	56.7

2.4 闭式泡沫材料的实验结果

冲击波在与闭式泡沫材料作用时，前部传感器 1 测得的波形是由入射、反射冲击波的叠加而成的，测试结果如图 8 所示，冲击波的入射超压值、正冲量值分别为 103.9 kPa、9.16 Pa·s。根据式(2)分别将反射冲击波分离出来，图 9 为分离出来的反射冲击波波形，反射波明显有 2 个波峰，压力值分别为 48.8、51.6 kPa，可以知道闭式泡沫材料对冲击波的反射效果要比开式泡沫材料明显。由图 8 可知，冲击波透过材料后，后部压力传感器 2 测得的波形已经没有明显的间断面，冲击波已衰减为等熵波，其中压力值、正冲量值分别为 19.40 kPa、2.75 Pa·s。可知冲击波与闭式泡沫材料作用后，压力值、正冲量值也得到大幅度衰减，具体的数据处理结果见表 3。

表 3 中给出了闭式泡沫材料与冲击波作用后的实验结果，实验重复了 3 次。入射超压的平均值为 103.2 kPa，与泡沫材料作用后测得的等熵波的超压平均值为 19.8 kPa，衰减了 80.8%；冲击波的入射冲量值为 9.16 Pa·s，与泡沫材料作用后测得的正冲量平均值为 2.95 Pa·s，衰减了 67.8%。冲击波与闭式泡沫材料作用后，反射冲击波相对于入射冲击波的超压值、正冲量分别为 44.2%、65.0%。

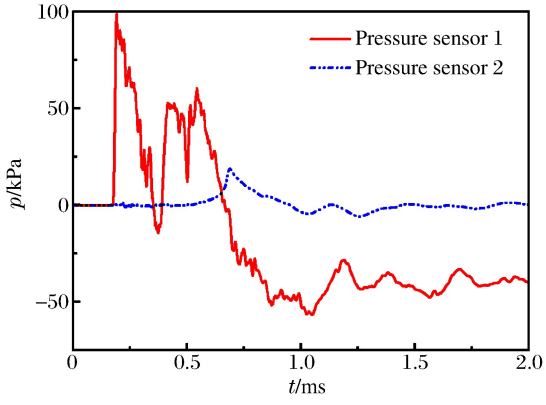

图 8 实验 12 中压力传感器的测试波形

Fig. 8 Typical shock wave profiles measured by pressure sensors in experiment 12

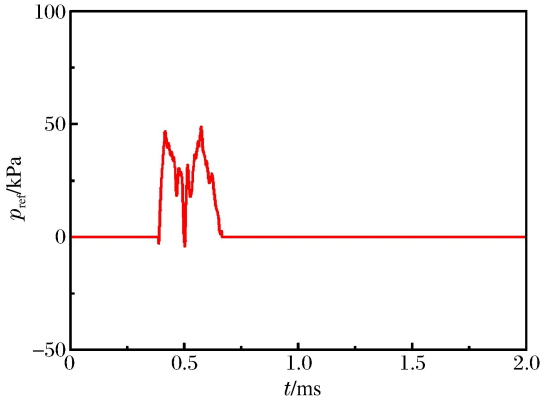

图 9 实验 12 中闭式泡沫反射冲击波波形

Fig. 9 Shock wave reflected by closed foam in experiment 12

表 3 闭式泡沫材料实验结果

Table 3 Experimental results of shock wave interacting with closed foam

实验编号	p_{in}/kPa	p_{tran}/kPa	p_{ref}/kPa	Φ_p/%	η_p/%	I_{in}/(Pa·s)	I_{tran}/(Pa·s)	I_{ref}/(Pa·s)	Ψ_I/%	θ_I/%
10	107.6	20.1	45.2	81.3	42.0	9.16	3.01	6.42	67.1	70.1
11	98.2	19.9	42.8	79.7	43.6	9.16	3.09	5.60	65.9	61.1
12	103.9	19.4	48.8	81.3	47.0	9.16	2.75	5.83	70.0	82.3
平均	103.2	19.8	45.6	80.8	44.2	9.16	2.95	5.95	67.8	65.0

3 结果讨论

3.1 冲击波超压衰减分析

表 4 为在压力测试线上传感器 1、2 位置固定的情况下，冲击波在空气自由场中传播时超压值的衰减以及冲击波与开式、闭式泡沫材料作用后超压值的衰减。由表 4 可知，冲击波在空气中传播时，冲击波超压值由 77.6 kPa 衰减到 50.8 kPa，衰减 34.5%；开式泡沫材料对冲击波的超压值由 81.0 kPa 衰减到 10.9 kPa，衰减 86.5%；而冲击波与闭式泡沫材料作用后，超压值衰减 80.8%，衰减效果稍弱于开式泡沫材料。因为冲击波在空气中传播时超压值也会受到衰减，所以以空气介质对冲击波的超压值的衰减效果为基准，利用下列公式定量了解泡沫材料对冲击波的衰减效果：

$$\lambda_p = \Phi_{p,\mathrm{free}} / \Phi_{p,\mathrm{foam}} \tag{5}$$

式中：λ_p 为冲击波超压衰减比率，$\Phi_{p,\mathrm{free}}$ 为自由场中冲击波传播时的超压衰减率，$\Phi_{p,\mathrm{foam}}$ 为泡沫材料实验中冲击波超压衰减率。

根据式(5)计算得到，开式、闭式泡沫对冲击波超压值衰减效果分别是空气介质的 2.51、2.34 倍。

表 4 冲击波超压值的衰减参数

Table 4 Attenuation parameters of three materials to shock wave overpressure

材料	p_{in}/kPa	p_{tran}/kPa	Φ_p/%	λ_p
空气介质	77.6	50.8	34.5	1.00
开式泡沫	81.0	10.9	86.5	2.51
闭式泡沫	103.2	19.8	80.8	2.34

3.2 冲击波正冲量衰减分析

表 5 为冲击波在空气中传播时的正冲量衰减及与开式、闭式泡沫材料作用后的正冲量衰减。由表可知，冲击波在空气介质中传播时，冲击波正冲量值从 9.16 Pa·s 衰减到 7.67 Pa·s，衰减 16.3%；冲击波与开式泡沫材料作用后，正冲量值由 9.16 Pa·s 衰减到 2.60 Pa·s，衰减 71.6%；而冲击波与闭式泡沫材料作用后，正冲量值由 9.16 Pa·s 衰减到 2.95 Pa·s，衰减 67.8%，衰减效果稍弱于开式泡沫材料。以空气对冲击波的超压值的衰减效果为基准，利用下式定量了解泡沫材料对冲击波正冲量的衰减：

$$\lambda_I = \Psi_{I,\mathrm{free}} / \Psi_{I,\mathrm{foam}} \tag{6}$$

式中：λ_I 为冲击波正冲量衰减比率，$\Psi_{I,\mathrm{free}}$ 为自由场中冲击波传播时的正冲量衰减率；$\Psi_{I,\mathrm{foam}}$ 为泡沫材料实验中冲击波正冲量衰减率。

根据式(6)，开式、闭式泡沫材料对冲击波正冲量衰减效果分别是空气的 4.39、4.16 倍。总体而言，开式泡沫材料对冲击波的衰减效果稍优于闭式泡沫材料。冲击波透射过开式泡沫材料后的压力波属于等熵波，波形是连续变化的，且其压力值在波峰值会持续一段时间。冲击波与闭式泡沫材料作用后，传感器 2 测得的压力波也是等熵波，测得的波形类似正态分布函数。形成不同的透射波是由于开式、闭式泡沫材料具有不同的材料结构，其中冲击波在开式泡沫材料中传播的衰减特征是由于固体显微结构对冲击波的反射、绕射的相互作用，并产生内耗的结果；而闭式泡沫材料与冲击波作用引起材料共振，材料发生形变及材料表面的反射而衰减冲击波。

表 5 冲击波正冲量值的衰减参数

Table 5 Attenuation parameters of three materials to shock wave positive impulse

材料	I_{in}/(Pa·s)	I_{tran}/(Pa·s)	Ψ_I/%	λ_I
空气	9.16	7.67	16.3	1.00
开式泡沫	9.16	2.60	71.6	4.39
闭式泡沫	9.16	2.95	67.8	4.16

4 结　论

(1)冲击波与开式、闭式泡沫材料作用后，泡沫材料后测得的压力波已经没有明显间断面属于等熵波，而闭式泡沫后部测得的波形类似于正态分布函数，这是由于泡沫的材料结构不同而产生的不同的力学现象；(2)开式泡沫材料对冲击波的超压峰值的衰减为 86.5%，相比于闭式泡沫的 80.8%，其衰减效果要好，两者对冲击波正冲量的衰减分别为 71.6%、67.8%。本文选用的开式泡沫对冲击波的衰减能力优于闭式泡沫；(3)开式泡沫材料与冲击波作用时，反射冲击波相对于入射冲击波正冲量分别为 56.7%，而闭式泡沫为 65.0%。闭式泡沫对冲击波的正冲量反射作用比开式泡沫强。

参考文献：

[1] Lu Guo-xing, Yu Tong-xi. Energy absorption of structures and materials[M]// Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. US: Woodhead Publishing Limited, 2003:385-400.

[2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1997.

[3] Gibson L J, Ashby M F, Zhang J, et al. Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads modeling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1989,31(9):635-663.

[4] Gibson L J, Ashby M F. The mechanics of three-dimensional cellular materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1982,382(1782):43-59.

[5] Lee J J, Frost D L, Lee J H S. Transmission of a blast wave through a deformable layer[M]// Shock Waves @ Marseille III. Springer Berlin Heidelberg, 1995:181-186.

[6] Kleine H, Diaconescu G, Lee J H S. Blast wave propagation in foam[M]// Shock Waves@ Pasadena III. World Scientific, 1996:1351-1356.

Attenuation characteristics of shock waves interacting with open and closed foams

Zhou Pei-jie[1], Wang Jian[2], Tao Gang[1], Zhou Jie[1]

(1. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;

2. *Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing* 100000, *China*)

Abstract: Experiments were carried out to explore the mechanical properties of the attenuation of shock waves respectively interacted with wooded plates, open and closed cellular foams. Based on the experimental data, the peak overpressure and positive impulse loss of shock waves were quantitatively analyzed as well as the positive impulses of the incidence, reflection and transmission shock waves. The experimental results show that the attenuation capacity of foams to shock waves is mainly due to the shock wave reflection and energy dissipation inside the foam microstructure. And the mechanical phenomena of open foam to shock wave are not fully consistent with those of closed foam, while the attenuation capacity of open foam to shock wave is more effective than that of closed foam.

Key words: mechanics of explosion; attenuation characteristics; peak overpressure; cellular foam; shock wave; positive impulse

(责任编辑　张凌云)