

爆炸载荷下聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性

王海福 冯顺山

(北京理工大学爆炸灾害预防与控制国家重点实验室 北京 100081)

摘要 采用间接测压法,对爆炸载荷作用下聚氨酯泡沫材料中的冲击波压力特性进行了研究。结果表明,在装药特性相同的爆炸载荷作用下,聚氨酯泡沫材料中的初始冲击波压力随初始孔隙度增大而显著下降;冲击波传播衰减效应受初始孔隙度影响同样显著,但不呈单一加快或减慢趋势;当初始孔隙度在 0.25 左右时,聚氨酯泡沫材料对爆炸载荷具有较强的抗冲击减压效能。

关键词 多孔材料 泡沫材料 冲击绝热线 冲击波衰减

中图法分类号 TB39*

1 引 言

聚氨酯泡沫材料在国防、军事领域广泛用于抗冲击防护材料,如复合装甲防护板、导弹头防护罩、大炮气密垫、飞机正流罩等。关于准静态加载条件下聚氨泡沫材料的压缩行为和能量吸收机理问题,人们已进行过多方面的研究,并取得了不少研究成果^[1-2],但对于爆炸载荷作用下冲击波压力传播衰减问题,研究则不多。爆炸载荷作用下聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性,是评价其抗冲击防护性能的前提与基础,对爆炸防护设计有重要的参考和应用价值。

采用传统锰铜压阻传感器对具有较大孔隙度的泡沫材料中的冲击波压力进行实验测试时,往往因孔隙与锰铜计敏感部分尺寸相当或更大,而导致锰铜计无法获得较理想的压阻信号,从而影响测试精度。我们提出了一种间接测压实验方法,并就初始孔隙度对爆炸载荷作用下聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性的影响进行了研究。

2 实验系统与测试原理

实验测试系统如图 1 所示,其中平面波发生器直径为 50mm,加载 TNT 药柱密度,直径和高度分别为 $1.58\text{g}/\text{cm}^3$ 、45mm 和 50mm,聚氨酯泡沫材料试件直径为 50mm。鉴于标准材料须有准确冲击 Hugoniot 数据的要求,实验中选用直径为 50mm 的 LY-12 铝作标准材料,锰铜计埋放在距分界面 5mm 处。实验测试原理为,先测出 LY-12 铝对冲击波压力传播的衰减系数 T ,将不同初始密度和厚度的聚氨酯泡沫材料试件放置在 LY-12 铝板上,分别测出距分界面 5mm 处 LY-12 铝中冲击波压力,并借助 T 值推算出入射到 LY-12 铝中的初始冲击波压力;最后,借助分界面阻抗匹配原理和聚氨酯泡沫材料高压 Hugoniot 方程,换算出聚氨酯泡沫材料中的冲

* 王海福:男,1966年 12月生,博士,副教授。
1998-03-31收到原稿,1998-07-21收到修改稿。

击波压力。

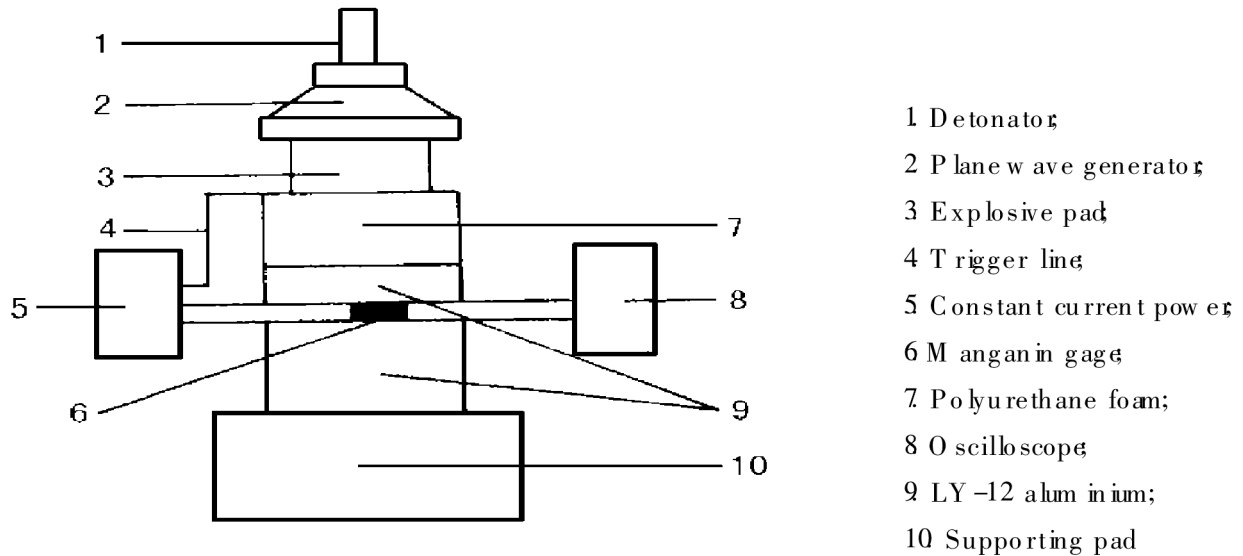


图 1 实验测试系统

Fig 1 Schematic diagram of experimental system

3 实验结果与冲击波压力换算

3.1 实验结果

研究表明^[3], 冲击波峰值压力在密实介质中的传播行为呈指数衰减规律, 衰减系数取决于介质的冲击 Hugoniot 参数, 与冲击波强度基本无关。 鉴此, 实验中首先对冲击波在 LY-12 铝中的衰减系数进行了测试。 表 1 给出了冲击压力与 LY-12 铝板厚度间的对应实验结果, 表中 L 为锰铜计与加载面间的距离, p_L 为锰铜计所测冲击波峰值压力。

对表 1 中实验数据用最小二乘法进行指数拟合, 即 $p_L = p_0 \exp(-\Gamma L)$, 得到 LY-12 铝中冲击波压力传播衰减系数为 $\Gamma = 0.0583$

表 1 冲击波压力与 LY-12 铝板厚度间的对应实验结果

Table 1 Experimental shock pressure corresponding to thickness of LY-12 aluminum

L / mm	4	6	8	10	12	14	16	18
p_L / GPa	17.8	15.1	13.9	11.8	11.3	9.8	8.4	7.9

在此基础上, 对爆炸载荷作用下聚氨酯泡沫材料中的冲击波压力特性进行了实验测试, 表 2 给出了聚氨酯泡沫材料初始孔隙度及厚度与冲击波压力间的对应实验结果。 表中 H 为聚

表 2 冲击波压力与聚氨酯泡沫材料初始孔隙度及厚度间的对应实验结果

Table 2 Experimental shock pressure corresponding to initial porosity and thickness of polyurethane foam

d_{00} / d_0	0.85		0.75		0.65		0.55		0.45	
H / mm	p_{LH} / GPa	p_f / GPa	p_{LH} / GPa	p_f / GPa	p_{LH} / GPa	p_f / GPa	p_{LH} / GPa	p_f / GPa	p_{LH} / GPa	p_f / GPa
5	12.6	16.8	11.8	15.8	12.6	16.9	13.6	18.2	15.3	20.5
8	11.7	15.4	10.5	14.1	10.8	14.5	12.8	17.1	14.4	19.2
11	9.8	13.1	8.3	11.1	10.3	13.7	10.9	14.6	13.2	17.8
14	9.1	12.2	7.2	9.7	8.5	11.4	10.1	13.3	11.6	15.5
17	7.7	10.3	6.6	8.8	7.6	10.1	8.4	11.3	10.7	14.4
20	7.1	9.5	5.5	7.4	6.9	9.7	7.9	10.6	10.3	13.7

酯泡沫材料厚度, p_{LH} 为距聚氨酯泡沫材料-铝板分界面 5mm 处所测得的冲击波峰值压力, p_f 为根据 LY-12 铝中冲击波衰减规律外推而得到的入射到铝板中的初始冲击波峰值压力, d_0 、 d_0 分别为聚氨酯泡沫材料及相应密实材料的初始密度。

3.2 冲击波压力计算

聚氨酯泡沫材料中冲击波压力换算如图 2 所示, 图中曲线 I 和 III 分别为聚氨酯泡沫材料中右传入射冲击波和左传反射冲击波 Hugoniot 曲线, 且两者成镜像对称关系^[4], 曲线 II 为 LY-12 铝中右传透射冲击波 Hugoniot 曲线。

根据镜像对称原理, 曲线 III、I 满足如下恒等函数关系

$$p_{III}(U_{III}) = p_I(\mathcal{X}_H - U_{III}) \quad (1)$$

考虑冲击波阵面动量守恒以及分界面压力和速度连续条件, 有

$$p_{II}(U_{II}) = d_H(C_{II} + S_{II}U_{II})U_{II} \quad (2)$$

$$p_{III}(U_{III}) = d [A + B(\mathcal{X}_H - U_{III}) + C(\mathcal{X}_H - U_{III})^2](\mathcal{X}_H - U_{III}) \quad (3)$$

$$p_{III}(U_f) = p_f = p_{II}(U_f) \quad (4)$$

式中: U_{III} 、 U_{II} 分别为曲线 III 和 II 上任一点处的粒子速度, C_{II} 、 S_{II} 为 LY-12 铝中冲击波速度与粒子速度间的经验关系常数, d 、 d_H 分别为聚氨酯泡沫材料和 LY-12 铝的初始密度, A 、 B 和 C 为聚氨酯泡沫材料中冲击波速度与粒子速度间的拟合关系系数, 并可通过联立以下三个方程而得到^[5]

$$p_{H0} = \frac{C_I^2(v_0 - v)}{[v_0 - S_I(v_0 - v)]^2} \cdot \frac{1 - (0.5\Gamma_0/h_0)(v_0 - v)}{1 - (0.5\Gamma_0/h_0)(v_{00} - v)} \quad (5)$$

$$vD = v_{00}(D - U) \quad (6)$$

$$v_{00}p_{H0} = DU \quad (7)$$

式中 v_{00} 、 v_0 分别为聚氨酯泡沫材料及其相应密实体的初始比容; C_I 、 S_I 为密实聚氨酯材料中冲击波速度与粒子速度间的经验关系常数; Γ_0 为常态 Grüneisen 系数; p_{H0} 为聚氨酯泡沫材料在终态比容 v 时的 Hugoniot 压力, D 、 U 分别为冲击波速度和粒子速度。

利用表 2 实验数据 p_f 和 U_f (对应于图 2 中 f 点), 联立方程 (1)~(7) 式, 可求得图 2 中 H 点对应的聚氨酯泡沫材料中的冲击波峰压 p_H 及粒子速度 U_H 。

4 结果与分析

初始孔隙度对爆炸载荷作用下聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性的影响如图 3a 图 3b 所示。在图 3a 中, 实验点 ●、○、■、□ 及 ▲ 所对应的聚氨酯泡沫材料的初始孔隙度分别为 0.15、0.25、0.35、0.45 和 0.55 (初始密度分别为其密实材料的 85%、75%、65%、55% 和 45%), 各实曲线为相应实验结果的拟合曲线, p 为冲击波峰值压力, X 为传播距离, 换算中所使用的材料参数列于表 3。

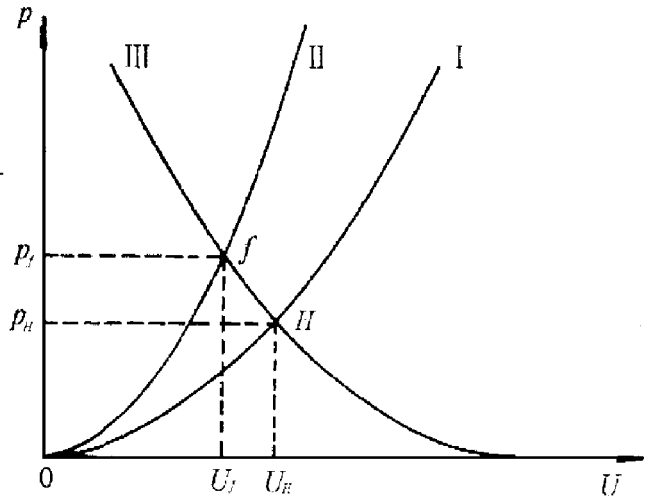


图 2 聚氨酯泡沫材料中冲击波压力换算原理图

Fig. 2 Schematic diagram of converting to shock pressure in polyurethane foam

表 3 材料参数

Table 3 Parameters of materials

$d_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$d_f / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$C_I / (\text{km}/\text{s})$	$C_{II} / (\text{km}/\text{s})$	S_I	S_{II}	Γ_0
1.265	2.785	2.468	5.328	1.577	1.338	1.55

从图 3(a)、图 3(b)可以看出, 装药特性相同的炸药与聚氨酯泡沫材料作接触爆炸作用时。在聚氨酯泡沫材料中所形成的初始冲击波压力, 随初始孔隙度增大 (或初始密度减小) 而显著下降。对于这一实验现象, 可从材料声阻抗的角度得到很好的定性解释。理论计算表明^[6], 随着初始孔隙度增大, 多孔材料中声速 c_{00} 将显著下降。因而其声阻抗 $c_{00}d_0$ 也将随初始孔隙度增大而下降。因此, 根据阻抗匹配原理, 在装药特性相同的爆炸载荷作用下, 多孔材料所形成的初始冲击波压力将随初始孔隙度增大而下降。

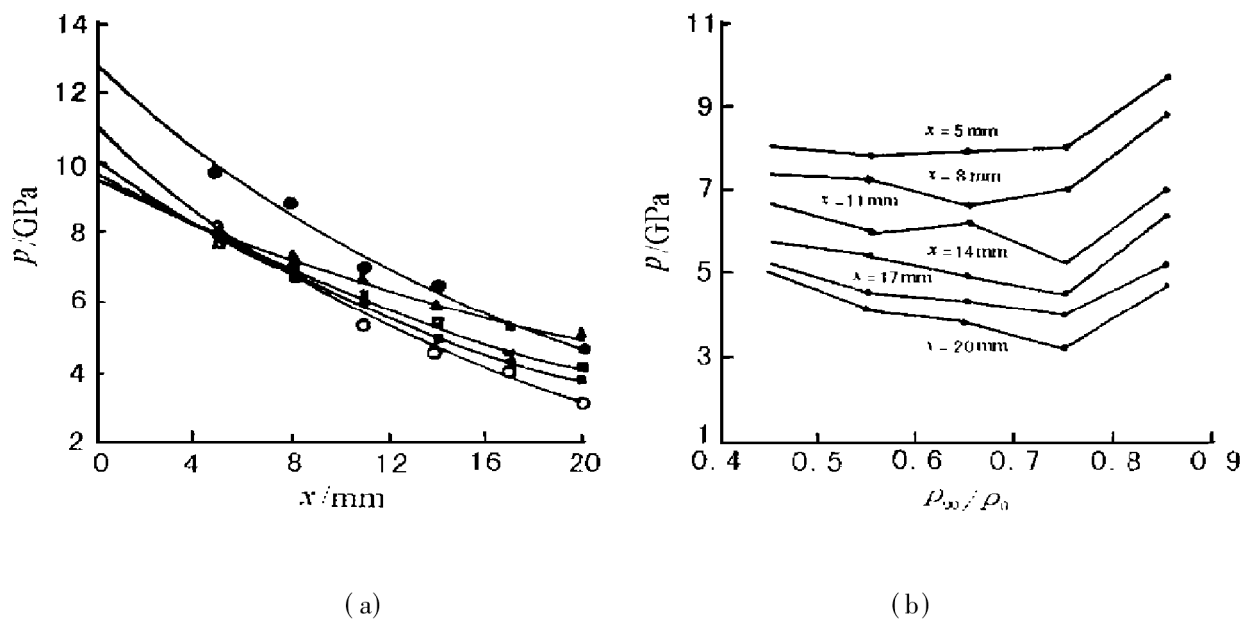


图 3 初始孔隙度对聚氨酯泡沫材料中冲击波压力影响特性

Fig 3 Effects of the initial porosity on the shock pressure in polyurethane foam

从图 3(a)、图 3(b)还可以看出, 当初始孔隙度在 0.15~ 0.25 范围内时, 冲击波压力传播衰减效应随初始孔隙度增大而增强; 当初始孔隙度在 0.25~ 0.55 范围内时, 冲击波压力传播衰减效应随孔隙度增大呈逐渐减弱趋势。对于这一实验现象, 下面从多孔材料在冲击载荷作用下的能量吸收机理角度对其作一定性分析。

多孔材料显著特征在于内部存在大量孔隙, 在冲击波作用下材料首先被致密, 以消除孔隙。致密过程可分为几个阶段^[7-8]: 首先孔壁发生弹性变形, 部分冲击能量转变为弹性能, 同时气隙被绝热压缩并吸收部分能量; 继而孔壁发生塑性塌缩或脆性破碎, 将部分冲击能量转变为塑性能, 气隙绝热压缩过程基本结束; 随后被逐渐压实直至接近密实材料。一旦多孔材料被完全致密, 冲击波在其中的传播行为与相应密实材料基本相同。这表明, 冲击波在多孔材料中的传播衰减效应, 很大程度上取决于致密过程各阶段所吸收或耗散的能量, 是初始孔隙度对多孔材料冲击压缩过程各阶段能量耗散效应的综合体现。由此可见, 孔隙度参数所表征的只是多孔材料的宏观物理特性, 其大小并不完全反映冲击压缩过程能量吸收或耗散的多少, 即孔隙度大小与冲击波传播衰减效应强弱之间并不存在单一趋势的对应关系。根据本文实验研究结果, 当初始孔隙度在 0.25 左右时, 冲击波在聚氨酯泡沫材料中具有较强的传播衰减效应。

鉴于上述结果是通过间接实验所得到,其中无疑存在一定的误差,造成误差的主要因素包括两个方面:一是 LY-12 铝中冲击波衰减系数所引起的实验误差,可通过增加测点数量得以减小;二是多孔材料 Hugoniot 方程所引起的换算误差,鉴于高温高压下 Grüneisen 系数 Γ 的复杂力学行为,采用在 Grüneisen 假设 ($v/\Gamma = v_0/\Gamma_0$) 基础上所导出的 McQueen 流体模型,进行冲击波压力换算无疑会造成一定的误差。但在相同实验条件和换算方法下,上述两方面均属非随机性误差,虽对结果绝对值有一定影响,但不影响结果可比性。

5 结 论

针对泡沫材料内部结构特征,提出了一种间接测压实验方法,并建立了间接测试参数外推计算关系。从而使根据间接实验结果获得泡沫材料中的冲击波参数成为可能,克服了利用锰铜计直接测量泡沫材料中冲击波压力的不足。

结果表明,在装药特性相同的爆炸载荷作用下,聚氨酯泡沫材料中所形成的初始冲击波压力随孔隙度增大而显著下降,冲击波传播衰减效应受孔隙度影响同样显著,但衰减速率不呈单一加快或减慢趋势;聚氨酯泡沫材料中的冲击波压力特性,主要取决于两个方面,一是初始孔隙度对初始冲击波压力的影响;二是初始孔隙度对冲击波传播衰减效应的影响,两方面综合影响效应决定聚氨酯泡沫材料中的冲击波压力特性;当初始孔隙度在 0.25 左右时,聚氨酯泡沫材料具有较强的抗冲击减压性能。

参 考 文 献

- Gibson L J, Ashby M F, Schajer G S, et al. The Mechanics of Two Dimensional Cellular Materials. *Proc R Soc Lond*, 1982, 382(1): 25~ 42
- Gibson L J, Ashby M F. The Mechanics of Three Dimensional Cellular Materials. *Proc R Soc Lond*, 1982, 382(1): 43~ 59
- 张春生. 凝聚材料中矩形脉冲的衰减. *爆轰波与冲击波*, 1986(1): 43~ 53
- Duvall G E. *High Pressure Physics and Chemistry*. New York: Academic Press, 1963
- McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W, et al. *High Velocity Impact Phenomena*. In: Kinslow R, ed. New York: Academic Press, 1970
- 邵丙璜, 刘志跃, 王晓林. 粉末的爆炸烧结机制和加卸载状态方程. 见: 王礼立, 余同希, 李永池, 编. *冲击动力学进展*. 合肥: 中国科学技术出版社, 1992
- Hermann W. Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials. *J Appl Phys*, 1969, 40(6): 2490~ 2499
- Carroll M M, Holt A C. Static and Dynamic Pore-collapse Relations for Ductile Porous Materials. *J Appl Phys*, 1972, 43(4): 1626~ 1630

PROPERTIES OF SHOCK PRESSURE CAUSED BY EXPLOSION LOADS IN POLYURETHANE FOAM

W ang H aifu, F eng Shunshan

(National Key Lab of Prevention and Control of Explosion Disasters, BIT, Beijing, 100081)

ABSTRACT Properties of shock pressure caused by explosion loads in polyurethane foam have been studied by means of an indirect experimental method. It is found that under the same charge and explosion condition, the initial shock pressure in polyurethane foam will decrease notably with increasing of the initial porosity. Effects of the initial porosity on propagating attenuation of the shock pressure are also notable, but its tendency is not completely corresponding to tendency of the initial porosity's changing. Polyurethane foam with an initial porosity about 0.25 are more effective as protective buffer materials.

KEY WORDS porous materials, cellular materials/foam, Hugoniot, shock attenuation