

含金属微粉泡沫材料中爆炸波衰减规律实验研究

刘 睿 陈 力¹⁾ 丁雁生

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190)

摘要 设计并制备了一种新型的聚氨酯泡沫材料, 研究了爆炸波在该材料中的衰减规律. 材料的主要设计原理是在聚氨酯材料中均匀混合了 $10\mu\text{m}$ 量级的金属微粉, 以提高骨架的吸热能力, 从而提高其抗爆性能. 搭建了实验平台并分别测量了爆炸波在相同孔隙率下含金属微粉和不含金属微粉的聚氨酯材料, 同时测量了不同金属微粉含量的聚氨酯材料中的传播特性. 实验结果表明: 含金属微粉的聚氨酯材料具有更好的抗爆性能.

关键词 爆炸力学, 含金属微粉聚氨酯材料, 爆炸波衰减, 实验研究

中图分类号: O383.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)03-077-04

EXPERIMENTAL STUDY OF ATTENUATION OF BLAST WAVES IN POLYURETHANE FOAMS WITH METALLIC PARTICLES

LIU Rui CHEN Li¹⁾ DING Yansheng

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract To improve the capability of energy absorption, a new type of polyurethane foams is designed and produced; the process of the blast wave propagating into this material is investigated. The main design principle of the material is as follows: by adding a certain amount of metallic particles with diameter of about $10\mu\text{m}$ into polyurethane foams, the heat absorption capacity of the material is enhanced so that its capacity for resisting blast is improved. The pressures of blast wave propagating into polyurethane foams with or without metallic particles, and with different amounts of metallic particles, are measured by using piezoelectric pressure transducers, respectively. The results show that the polyurethane foams with metallic particles have a better performance in resisting blast wave than those without metallic particles.

Key words mechanics of explosion, polyurethane foams with metallic particles, attenuation of blast waves, experimental study

引 言

爆炸近区的防护问题因涉及公众生活领域而受到人们的重视. 在没有质量、泄爆空间等条件限制的情况下, 通常采用厚壁钢筒作为防爆容器, 但在质量、泄爆空间有严格限制的情况下 (如处于民航客机、飞行器等环境下), 金属材料往往由于其密度大而无法满足设计要求, 必须选用轻质的材料、设计合理的结构来达到防爆要求.

近几年来, 泡沫材料以其轻质和良好的吸能效

果受到国内外学者的关注^[1]. 目前, 已经开展了一系列关于泡沫金属材料的静态和动态力学响应的研究, 建立了不同的材料模型, 并解释了材料吸能的机理过程. 胡时胜等^[2]利用聚偏四氟乙烯 (PVDF) 压电式压力传感器与低阻锰铜计相结合的动态测量技术, 直接测量了爆轰波作用下泡沫铝材料中传播的压力波形, 并进行了相应的数值研究. 田杰^[3]对泡沫铝材料在抗爆结构上的应用进行了实验研究, 利用 LS-DYNA 软件对不同性能泡沫铝中冲击波衰

2009-09-08 收到第 1 稿, 2010-01-22 收到修改稿.

1) 陈力, 主要从事爆炸力学研究工作. E-mail: chenli@imech.ac.cn

减规律进行了数值研究. 这些工作为爆炸波在泡沫金属传播规律提供了一定的实验理论依据, 也为抗冲击防护提供指导和评价标准.

然而, 当爆炸防护设计对质量、泄爆空间有更为苛刻的要求时, 如民航客舱爆箱的设计^[4], 泡沫金属由于密度大不能满足质量设计上的要求, 密度更小的聚氨酯泡沫材料成为设计者的首选. Seitz等^[5]通过激波管实验对聚氨酯材料在相对较弱的冲击波作用下的动态力学响应进行了研究. 但由于爆炸区域具备高压、高温、材料处于高应变率状态的特点, 激波管实验无法准确地预测材料在爆炸载荷下的力学行为.

本文提出通过在普通聚氨酯中均匀混合少量金属微粉, 来改善材料骨架吸热能力以达到在爆炸近区有更好抗爆效果的设计思路. 在爆炸近区爆炸载荷作用下, 对冲击波在普通聚氨酯材料和含金属微粉聚氨酯材料中传播特性进行对比实验研究, 为进一步的理论分析和数值模拟提供了可靠的实验依据, 同时, 也为爆炸近区防护设计提供一定的帮助.

1 实验

1.1 实验装置

为了测量爆炸波在聚氨酯材料中传播时压力随时间变化曲线, 设计了实验平台. 实验平台俯视示意图如图1所示, 装置中间由上下两块厚30 mm, 截面为300 mm×300 mm的方钢板和8块($a = 100$ mm)楔形钢块围成了十字形区域, 用以模拟约束环境. 方钢板区域示意图如图2所示, 上、下两块方板的中心均有 $\phi = 140$ mm的圆孔, 并由尺寸匹配的另一材料制成的圆板填充. 这样的设计是考虑到方钢板区域处于爆炸近区, 极易破坏, 只需更换圆板和

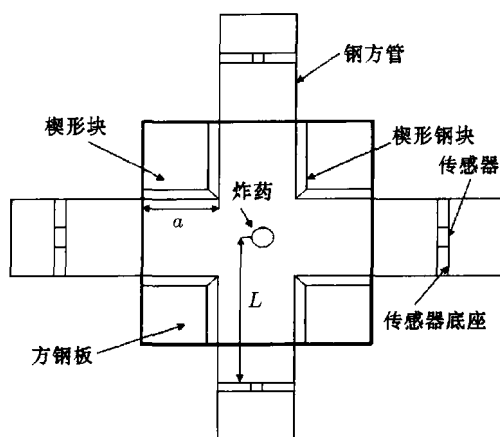


图1 实验平台俯视示意图

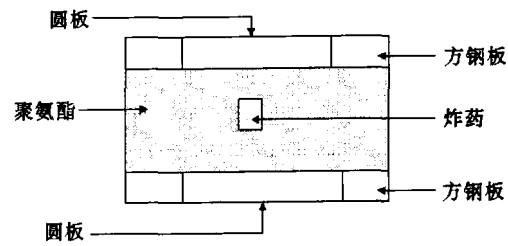


图2 方钢板区域示意图

楔形钢块就能达到实验装置重复实验, 并满足实验需求的目的. 在方板四周分布4根长500 mm, 截面为100 mm×100 mm钢方管, 钢管壁厚为2 mm, 聚氨酯材料填充于方管内和方板十字形区域, 方管内安装压力传感器, 一次实验可测量4组数据, 大大提高了实验效率.

1.2 测控系统

测控系统如图3所示, 实验过程由同步控制机(中科院力学所自行研制)控制起爆器和计算机数据采集的同步, 压力传感器捕捉压力信息, 电信号经电荷放大器(YE5853)放大, 存储于计算机中. 其中, 压力测量采用中科院力学研究所自行研制的石英晶体压力传感器. 该传感器量程为10 MPa, 具有较高的响应频率(> 100 kHz), 适合本实验的测量记录.

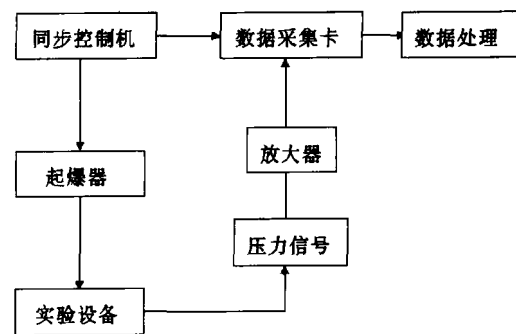


图3 测控系统示意图

1.3 实验材料

实验材料在容积 $V = 0.05$ m³(500 mm×500 mm×200 mm)的箱子里进行制备.

设计了3组不同实验材料, 实验材料相关参数如表1所示.

表1 实验材料相关参数

	$m_{\text{原料}}/\text{kg}$	$m_{\text{铝}}/\text{kg}$	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\phi/\%$	$\psi/\%$
A	2.460	0	49.2	95.9	0
B	2.586	0.424	60.2	95.7	14.1
C	2.600	0.700	66.0	95.7	21.2

表1中, $m_{\text{原料}}$ 为制备聚氨酯材料使用的化工材料的质量, $m_{\text{铝}}$ 为掺入聚氨酯材料的铝微粉质量, 实验

材料密度 $\rho_0 = \frac{m_{原料} + m_{铝}}{V}$, 材料的孔隙率 $\phi = \frac{V_{气}}{V} = 1 - \frac{V_{骨架} + V_{铝}}{V} \approx 1 - \frac{V_{骨架}}{V}$, 由于铝微粉的体积分数远小于骨架体积分数, 故可以忽略铝微粉的体积, 以 B 组样品为例, $\frac{V_{铝}}{V_{骨架}} = \frac{m_{铝}}{m_{骨架}} \approx \frac{m_{铝}}{m_{原料}} = 0.073$, 金属铝微粉质量分数 $\psi = \frac{m_{铝}}{m_{原料} + m_{铝}}$. 铝微粉平均粒径为 $30\mu\text{m}$, 每次实验均采用 B 炸药, B 炸药的配方为 TNT/RDX(40/60), 炸药质量 $m_{炸药} = 10\text{g}$.

2 实验结果及分析

利用自行设计的实验平台, 对相同孔隙率下具有不同金属微粉含量的聚氨酯材料进行 3 组对比实验. 各组实验如表 2 所示. L 为爆炸中心到传感器敏感面的距离.

表 2 实验的相关参数

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
A L/cm	21.0	25.7	35.4	18.5	22.5	32.4	20.6	33.2
B L/cm	23.4	26.8	32.0	20.7	22.7	29.4	-	-
C L/cm	20.9	22.7	25.6	29.3	29.7	33	-	-

图 4~ 图 6 给出了 3 组实验情况下所得到的爆炸波在不同材料中部分压力时间测量曲线. 由图可见, 无论聚氨酯中是否含有金属微粉, 爆炸波在其传播的过程中都具有明显的衰减现象. 压力波形特征反映了材料经历弹性变形、屈服阶段、塑性变形以及压实 4 个过程.

尽管波形特征具有相似性, 但是材料中是否含有铝微粉, 对爆炸波的吸收能力有明显的不同. 图 7 为 3 组试样中爆炸波压力随距离衰减曲线图, P_{max} 为传感器测得的压力峰值. 选用 $P = Ae^{-\alpha x}$ 经验公式描述爆炸波峰值在聚氨酯材料中传播衰减的规律, 其中, α 为衰减系数, 单位为 cm^{-1} , x 为爆炸中心

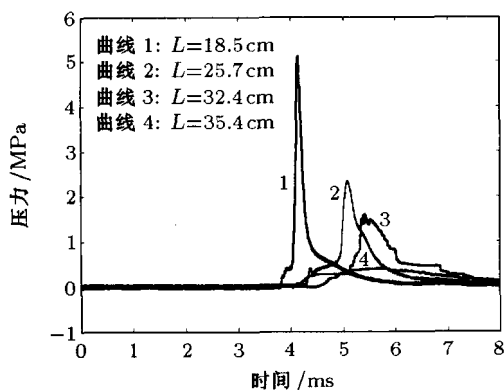


图 4 在不含铝微粉聚氨酯不同位置爆炸波压力时间曲线

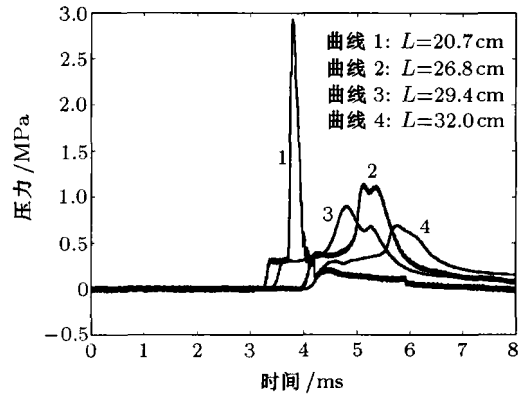


图 5 在含质量分数 14.1% 铝微粉聚氨酯爆炸波不同位置压力时间曲线

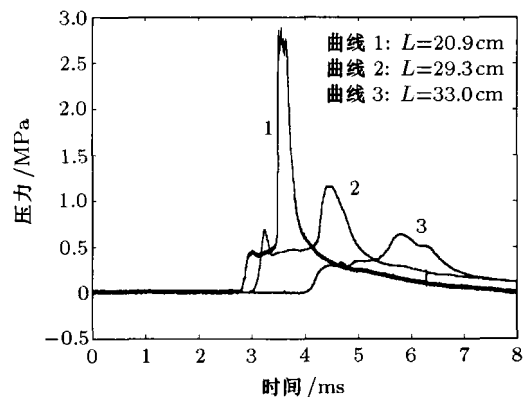


图 6 在含质量分数为 21.2% 铝微粉聚氨酯爆炸波不同位置压力时间曲线

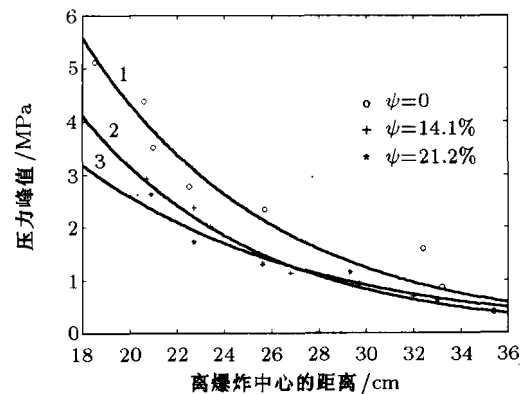


图 7 3 组试样中爆炸波压力峰值随距离的衰减曲线

到传感器的距离, 单位为 cm , A 的单位为 MPa , 压力 P 的单位为 MPa . 经最小二乘法拟合数据可得, 曲线 1 的经验公式为 $P = 52.9 \times e^{-0.12x}$, 曲线 2 的经验公式为 $P = 45.1 \times e^{-0.13x}$, 曲线 3 的经验公式为 $P = 20.7 \times e^{-0.10x}$. 在实验测量的离爆炸区近端, 含质量分数为 14.1% 铝微粉聚氨酯的压力峰值是不含铝微粉聚氨酯的压力峰值的 73%, 含质量分数为 21.2% 铝微粉聚氨酯的压力峰值是不含铝微粉

的57%。在经验公式 $P = Ae^{-\alpha x}$ 中, A 从某种程度上反映了爆炸近区的综合效果。由图8可知, 在一定范围内, A 随着金属微粉含量 ϕ 的增加明显降低。那么, 通过在材料骨架中添加少量金属微粉的方法, 可以达到明显改善材料在爆炸近区吸能的目的, 这一方法对于爆炸近区的防护设计是有效的。

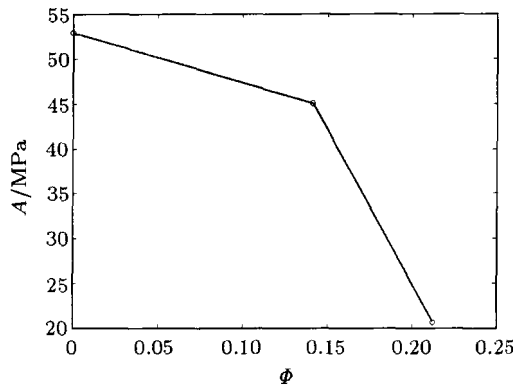


图8 压力峰值 A 随金属铝微粉质量分数 ϕ 变化的曲线图

在爆炸强载荷的作用下, 材料气相物质受到压缩而升温。如果压缩过程是绝热的, 那么气体压缩过程是可逆的, 这不利于爆炸波在材料中的衰减。由于材料中的气相介质相对于骨架具有更好的可压缩性, 在剧烈压缩之后, 气体温度远高于骨架温度, 那么, 气体与骨架之间存在热传导。而热传导是不可逆的过程, 通过增强骨架与气体之间的热交换, 骨架吸收压缩气体的热量, 减少压缩气体膨胀做功的能力, 从而达到进一步吸收冲击波能量的目的。在传热学中, $\sqrt{\rho ck}$ 表征物体从其接触的高温物体吸热的能力^[6]。由表3可知, 在骨架中添加铝微粉, 将大大提高骨架吸热的能力。3组对照实验证实了改变骨架的传热性能有助于爆炸波能量的吸收的想法。

表3 材料的物理参数 (常温常压下)

材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	热传导系数 / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	定压比热容 / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$\sqrt{\rho ck} /$ ($\text{W}\cdot\text{s}^{\frac{1}{2}}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
聚氨酯骨架	1.2×10^3	0.28	1.7×10^3	7.6×10^2
空气	1.205	0.0259	1.005×10^3	5.6
铝	2.7×10^3	230	1.08×10^3	2.59×10^4

3 结论

(1) 提出了一种新的防爆抗爆材料设计思路, 设计了一种新型的高效抗爆聚氨酯泡沫材料, 以应对对抗爆容器的质量、形状、泄爆空间等有着极其苛刻的防爆设计要求。

(2) 通过自行搭建的实验平台, 完成了3组材料的对比实验研究。实验结果表明, 在相同孔隙率下, 含金属微粉的聚氨酯材料比不含金属微粉的聚氨酯材料在爆炸近区具有更好的吸能效果。从实验结果看, 在远离爆炸中心处测量到的压力出现重叠, 这种重叠可能是由于实验误差所造成的, 有待进一步的实验论证。

参考文献

- Gibson LJ, Ashby MF. Cellular Solids: Structure and Properties. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸载荷下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 516-522(Wang Yonggang, Hu Shisheng, Wang Lili. Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 516-522(in Chinese))
- 田杰. 泡沫铝的冲击波衰减和抗爆震特性研究. [博士论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006(Tian Jie. The shock wave attenuation and anti-detonation property of aluminum foam. [Ph D Thesis]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006(in Chinese))
- 陈力, 丁雁生. 民航客机防暴箱的研制. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊): 168-169(Chen Li, Ding Yansheng. Study on explosion-proof tank used in airplane. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(Supp): 168-169(in Chinese))
- Seitz MW, Skews BW. Effect of compressible foam properties on pressure amplification during shock wave impact. *Shock Waves*, 2006, 15(3-4): 177-197
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1998. 85-90
- Ouellet S, Frost D, Bouamoul A. Using a shock tube to predict the response of polymeric foam to a blast loading. *Journal De Physique IV*, 2006, 134: 783-787

(责任编辑: 周冬冬)