

二氧化硅气凝胶的防爆震性能及机理研究^{*}

杨 杰 李树奎[†] 闫丽丽 王富耻

(北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

(2010 年 3 月 7 日收到; 2010 年 6 月 1 日收到修改稿)

利用聚偏二氟乙烯压电传感器研究了爆炸加载下冲击波在二氧化硅气凝胶中的传播特性, 并对冲击波在二氧化硅气凝胶和泡沫铝中的传播特性进行了比较. 结果表明: 在二氧化硅气凝胶中冲击波的强度随传播距离的增加呈现指数衰减的趋势. 冲击波在二氧化硅气凝胶中衰减比在泡沫铝中衰减明显. 由于二氧化硅气凝胶内部特殊的纳米多孔网状结构, 导致冲击波在二氧化硅气凝胶中的衰减效果较好. 冲击波在二氧化硅气凝胶中的传播速度极低, 因此冲击波在二氧化硅气凝胶中传播时卸载波的追赶卸载效应非常明显, 这又进一步促进了冲击波的衰减.

关键词: 二氧化硅气凝胶, 冲击波衰减, 防护机理, 纳米多孔网状结构

PACC: 8190, 4630M, 6220

1. 引 言

在军事工程中, 爆炸产生的冲击波的破坏作用受到了各界的广泛重视. 随着科技的发展, 冲击波的强度大幅提高, 学者们越来越重视研究冲击波在各种物质中的衰减特性^[1, 2], 以降低冲击波的破坏作用. 多孔材料作为一种轻质工程材料, 已经广泛应用于吸能缓冲和防爆震等领域^[3, 4]. 研究新型多孔材料对爆炸产生的冲击波的防护性能具有非常重要的意义.

气凝胶是一种新型的纳米多孔材料. 气凝胶的密度极低, 其孔隙率高达 80%—99.8%, 典型的孔洞尺寸为 1—100 nm^[5, 6]. 气凝胶具有许多独特的物理性质, 在隔热、催化、光学、力学等领域都具有广阔的应用前景^[7—9]. 气凝胶中的机械波波速极低, 且在受到冲击时可以吸收大量能量, 因此一些学者提出将气凝胶作为一种冲击吸收材料应用在防护领域^[7]. 国外已经有将气凝胶用于防爆震领域的测试. 据英国《泰晤士报》报道, 气凝胶可以经受住 1 kg 炸药爆炸时产生的冲击波的威力. Luo 等^[10, 11]对气凝胶的动态压缩性能进行了研究, 并认为气凝胶在吸能缓冲领域有广阔的应用前景. 由以上所述可知, 气凝胶在防护领域已经展现出一定的应用潜力, 但国内外对气凝胶在防爆震领域的实验

及理论研究还鲜有报道.

纯二氧化硅气凝胶由于强度低、脆性大, 在工程应用上受到很多限制. 在气凝胶中添加少量纤维可以在不改变气凝胶特性的情况下改善其力学性能^[12]. 本文利用聚偏二氟乙烯 (PVDF) 压电传感器, 测量了爆炸加载下冲击波在纤维增强二氧化硅气凝胶中的传播特性, 然后将冲击波在气凝胶和泡沫铝中的衰减效果进行了比较. 通过对气凝胶的微观结构分析, 进一步研究了气凝胶的防爆机理. 本工作为气凝胶在防爆震领域的应用提供了一定的实验和理论依据.

2. 实 验

2.1. 实验材料

实验采用的材料是玻璃纤维增强二氧化硅气凝胶 (以下简称气凝胶). 玻璃纤维增强气凝胶的制备由溶胶凝胶和超临界干燥两步完成. 将正硅酸乙酯和乙醇混合后搅拌一段时间, 加入氨水对混合溶液进行催化, 得到二氧化硅溶胶. 然后将玻璃纤维均匀浸入二氧化硅溶胶中, 待其形成凝胶并老化一段时间后可以得到纤维增强二氧化硅醇凝胶. 再将醇凝胶进行超临界干燥即可得到玻璃纤维增强气

^{*} 国防科技预研基金 (批准号: 151241) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: bitleesk@bit.edu.cn

凝胶. 纤维增强气凝胶的密度为 0.2 g/cm^3 . 玻璃纤维的体积分数为 4.3% .

2.2. 实验方法

实验装置如图 1 所示. 将炸药直接放在试件上方, 通过炸药起爆产生冲击波, 由 PVDF 压电传感器测量两层试件之间的应力值, 从而得到冲击波在试件中的衰减情况. 每层试件的厚度均为 4 mm . 实验使用的炸药是密度为 1.0 g/cm^3 的黑索金, 每次实验中黑索金的药量均为 34.5 g . 通过理论计算可以得到初始爆轰应力为^[13] 8.94 GPa .

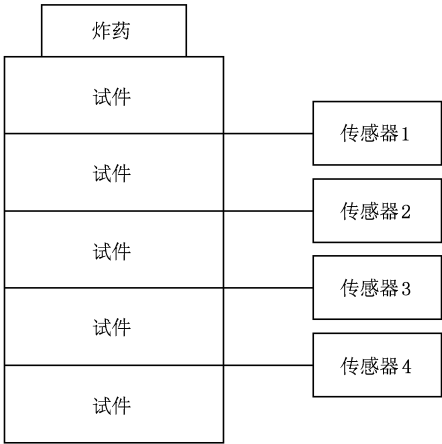


图 1 实验装置示意图

PVDF 压电传感器的测试原理如图 2 所示. PVDF 压电传感器受到压力作用后产生的电荷量 Q 经过电阻 R 形成电流回路 $I(t)$ 后, 由示波器采集电阻 R 上的电压 $V(t)$, 据此可求得 PVDF 压电计在瞬态过程中释放的总电荷量

$$Q(t) = \frac{\int_0^t V(t)}{R} dt.$$

(1)

PVDF 压电传感器测得的瞬间应力 $\sigma(t)$ 可表示为

$$\sigma(t) = \frac{Q(t)}{KA},$$

(2)

式中 K 为 PVDF 的灵敏度系数, A 为 PVDF 的工作面积. 本文实验所使用的 PVDF 压电传感器的灵敏度系数 $K=2\times 10^{-11}\text{ C/N}$, PVDF 的工作面积 $A=36\text{ mm}^2$, 电阻 $R=5\text{ }\Omega$.

设计了四组爆炸实验来研究气凝胶的防爆震性能, 并与泡沫铝的防爆震性能做了对比. 四组爆炸实验的实验条件如下: 第一组和第二组实验分别以四层气凝胶和四层泡沫铝为面板, 钢板为背板;

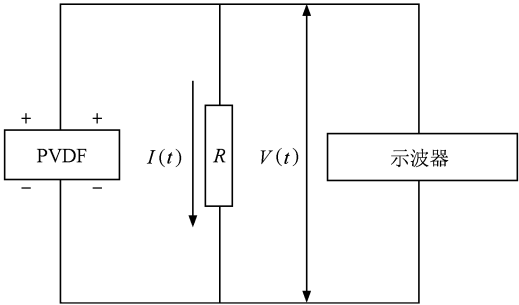


图 2 PVDF 压电传感器的测试原理

第三组和第四组实验以钢板为面板, 分别以四层气凝胶和四层泡沫铝为内衬材料. 通过四组实验同时研究了气凝胶和泡沫铝作为面板和内衬材料时的防爆震性能.

使用 S4800 型扫描电子显微镜观察爆炸加载前后气凝胶的微观结构, 使用 NOVA4200e 型比表面积及孔隙度分析仪测试气凝胶的平均孔径, 同时利用光学显微镜对爆炸加载前后泡沫铝的微观形貌和孔径尺寸进行观察和测量. 通过分析气凝胶和泡沫铝的微观结构来研究气凝胶的防爆震机理.

3. 实验结果及讨论

3.1. 冲击波在气凝胶中的传播特性分析

四组实验中由 PVDF 压电传感器采集到的原始波形如图 3 所示. 由原始波形图可见, 冲击波在 4 mm 气凝胶中的传播时间要长于在 4 mm 泡沫铝中的传播时间, 即冲击波在气凝胶中的传播速度要小于在泡沫铝中的传播速度.

将所采集到的原始波形按照公式(1), (2)换算得到的冲击波波形如图 4 所示. 由图 4 可见, 冲击波在气凝胶和泡沫铝中传播时均有比较明显的衰减现象, 冲击波在传播过程中形状发生了变化, 上升沿逐渐被拉长. 四组实验中不同位置测得的应力峰值如表 1 所列. 比较第一组和第二组实验的结果可以看出: 在冲击波初始强度一定的情况下, 经过四层气凝胶后冲击波的最大强度为 144 MPa , 小于经过四层泡沫铝后冲击波的最大强度 (241 MPa). 实验结果表明, 气凝胶作为面板时对冲击波的衰减效果要好于泡沫铝.

将第三组和第四组实验进行比较后发现, 由于气凝胶和泡沫铝的波阻抗不同, 相同的爆炸载荷产

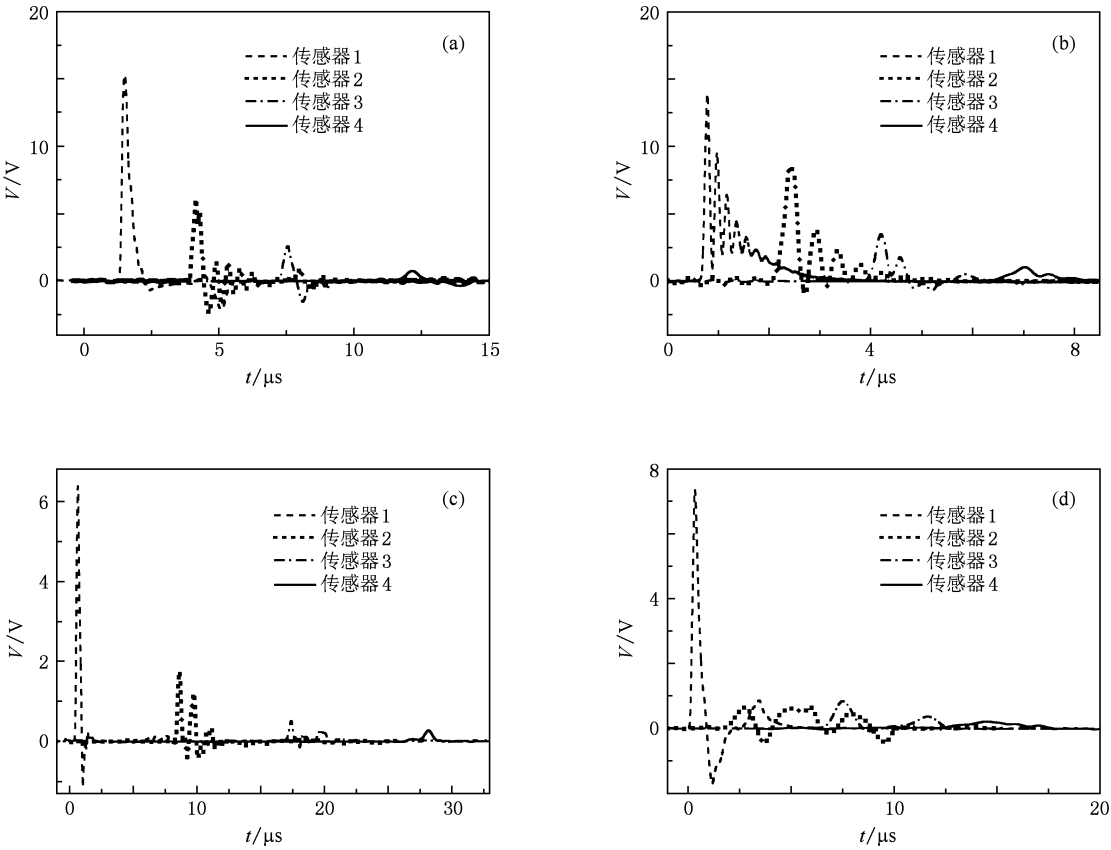


图3 四组实验中PVDF压电传感器测得的电压波形 (a)第一组,(b)第二组,(c)第三组,(d)第四组

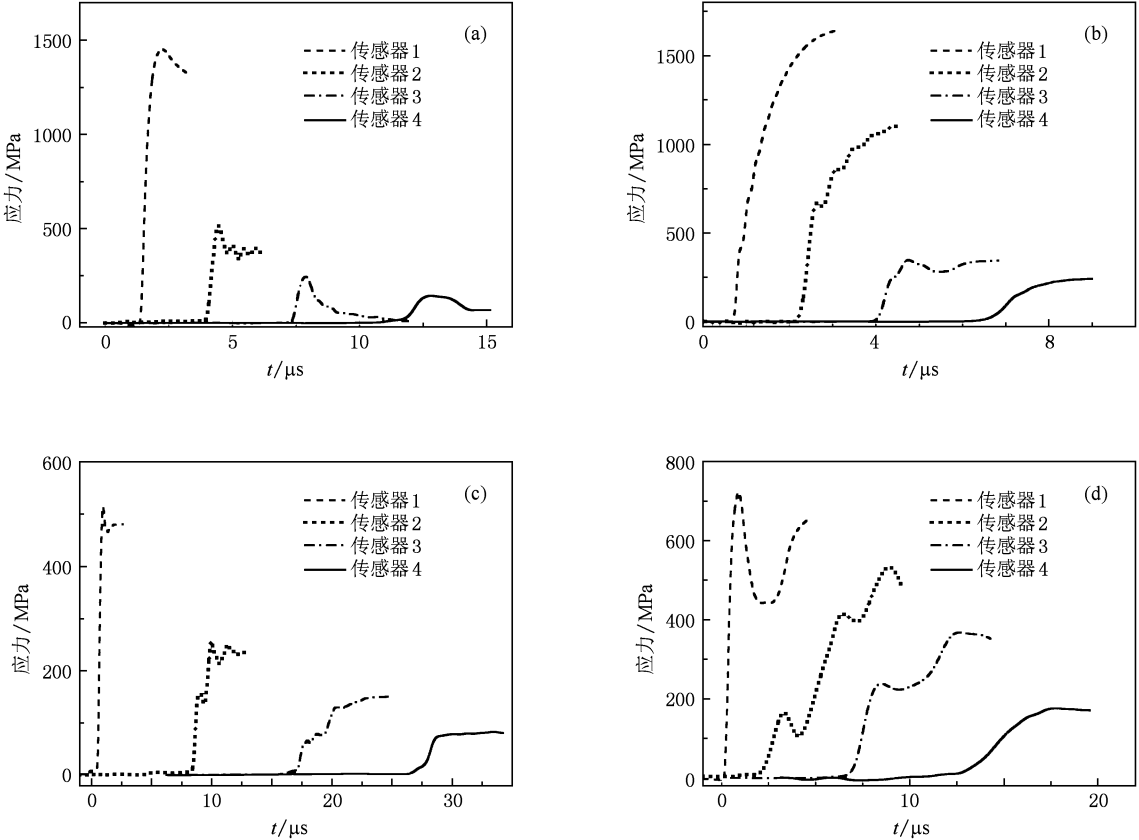
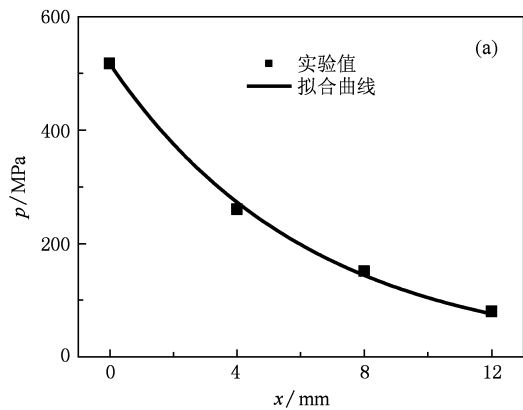


图4 四组实验中不同位置的冲击波波形 (a)第一组,(b)第二组,(c)第三组,(d)第四组

表 1 四组实验中不同位置测得的应力峰值的比较 (单位为 MPa)				
	传感器 1	传感器 2	传感器 3	传感器 4
第一组	1453	505	245	144
第二组	1641	1108	345	241
第三组	517	260	151	80
第四组	720	533	367	176

生的冲击波经过钢板传播到第一层气凝胶或泡沫铝时的强度也不相同. 可以将实验得到的强度分别除以冲击波经过钢板传播到第一层多孔材料时的强度来进行无量纲化, 然后再进行比较, 这样就可以更清楚地判断两种材料中冲击波的衰减效果. 实验发现, 冲击波在多孔材料中传播基本上呈现指数衰减的趋势, 因此本文采取下列指数方程对冲击



波在气凝胶和泡沫铝中的衰减规律进行拟合:

$$p = p_0 e^{-ax}, \quad (3)$$

式中 p_0 为冲击波产生的初始应力峰值; a 为冲击波产生的应力峰值随传播距离 x 的衰减系数, 单位为 mm^{-1} ; p 为冲击波的应力峰值, 单位为 MPa. 材料的衰减系数 a 的值越大, 说明材料中冲击波的衰减就越明显. 气凝胶和泡沫铝中冲击波应力峰值 p 随传播距离 x 的衰减规律如图 5 所示. 在气凝胶中, 冲击波的应力峰值随传播距离的衰减规律为 $p = 517e^{-0.16x}$, 衰减系数 $a = 0.16 \text{ mm}^{-1}$; 在泡沫铝中, 冲击波的应力峰值随传播距离的衰减规律为 $p = 720e^{-0.10x}$, 衰减系数 $a = 0.10 \text{ mm}^{-1}$. 气凝胶的 a 值要大于泡沫铝的 a 值, 表明气凝胶作为内衬材料时对冲击波的衰减效果要好于泡沫铝.

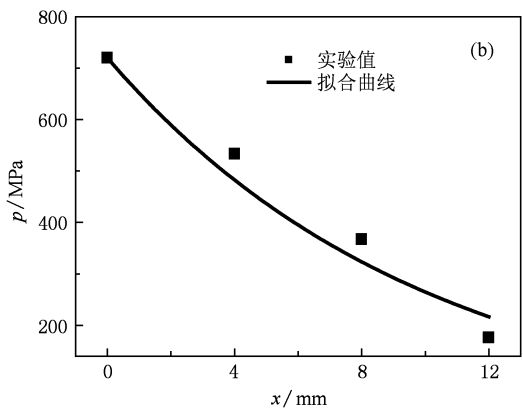


图 5 冲击波产生的应力峰值 p 在气凝胶和泡沫铝中随传播距离 x 的衰减规律 (a) 在气凝胶中, (b) 在泡沫铝中

钢板在爆炸实验后的变形情况如图 6 所示. 由图 6(a) 可见, 当以四层气凝胶为面板, 钢板为背板时, 钢板在爆炸加载后保持完整, 背面有轻微突起变形, 钢板正面凹坑最大深度为 9 mm. 由图 6(b) 可见, 当以四层泡沫铝为面板, 钢板为背板时, 钢板在爆炸加载后保持完整, 背面有明显突起变形, 钢板正面凹坑最大深度为 12 mm. 由图 6(c) 可见, 当钢板与炸药直接接触时, 钢板在爆炸加载下其中心区域被炸裂, 背面有严重突起变形, 钢板正面凹坑最大深度为 33 mm. 实验结果表明, 气凝胶和泡沫铝放在钢板外侧均能够有效防止爆炸冲击波对钢板的损伤. 气凝胶对钢板的防护效果要好于泡沫铝, 这与 PVDF 压电传感器测得的冲击波在气凝胶和泡沫铝中的衰减规律相符.

3. 2. 气凝胶的防爆震机理

由于泡沫材料的黏性耗散作用, 冲击波在泡沫材料中会出现衰减和弥散的现象^[14]. 冲击波在泡

沫材料中衰减的程度受到泡沫材料微观结构的影响. 冲击波在气凝胶中衰减比在泡沫铝中的衰减要更加明显, 这与气凝胶的结构特性相关. 冲击波在密实的固体中传播时衰减程度较小. 气凝胶的微观结构如图 7(a) 所示. 由图 7(a) 可见, 气凝胶中的孔洞和胶体粒子尺寸为纳米量级, 比表面积与孔隙度测试显示气凝胶内部的平均孔径为 16.9 nm. 气凝胶胶体粒子之间相互交联形成气凝胶的“梁”, 气凝胶的“梁”的尺寸为纳米量级且呈现弯曲状态, 这导致冲击波在气凝胶中传播时不会在气凝胶内部的局部区域出现近似于在密实的固体二氧化硅中传播的现象, 因而冲击波在气凝胶中的衰减效果较好. 图 7(c) 所示为气凝胶在爆炸加载后的微观形貌. 由图 7(c) 可见, 气凝胶的“梁”在冲击波传播过程中发生了断裂破坏. 由于气凝胶的“梁”的尺寸为纳米级别, 因此气凝胶的“梁”强度较低, 在冲击波的加载下难以承载和传递较强的应力, 从而发生断裂破坏, 这也导致冲击波在气凝胶中的衰减较为明

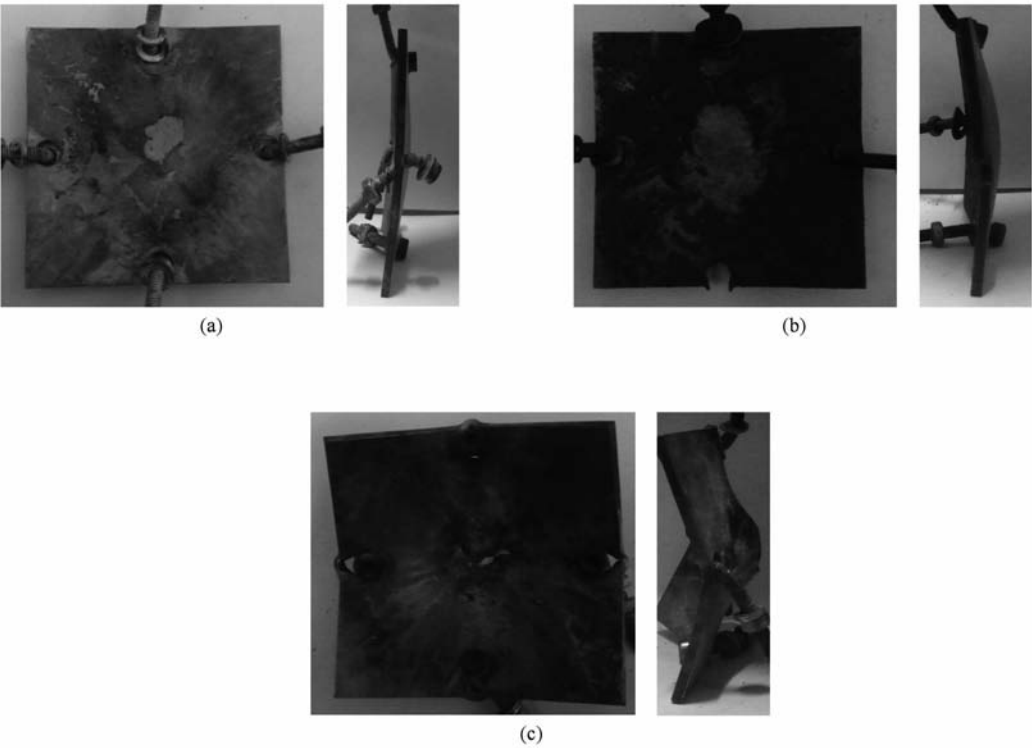


图 6 爆炸实验后发生变形的钢板照片 (a)第一组实验后,(b)第二组实验后,(c)第三组实验后

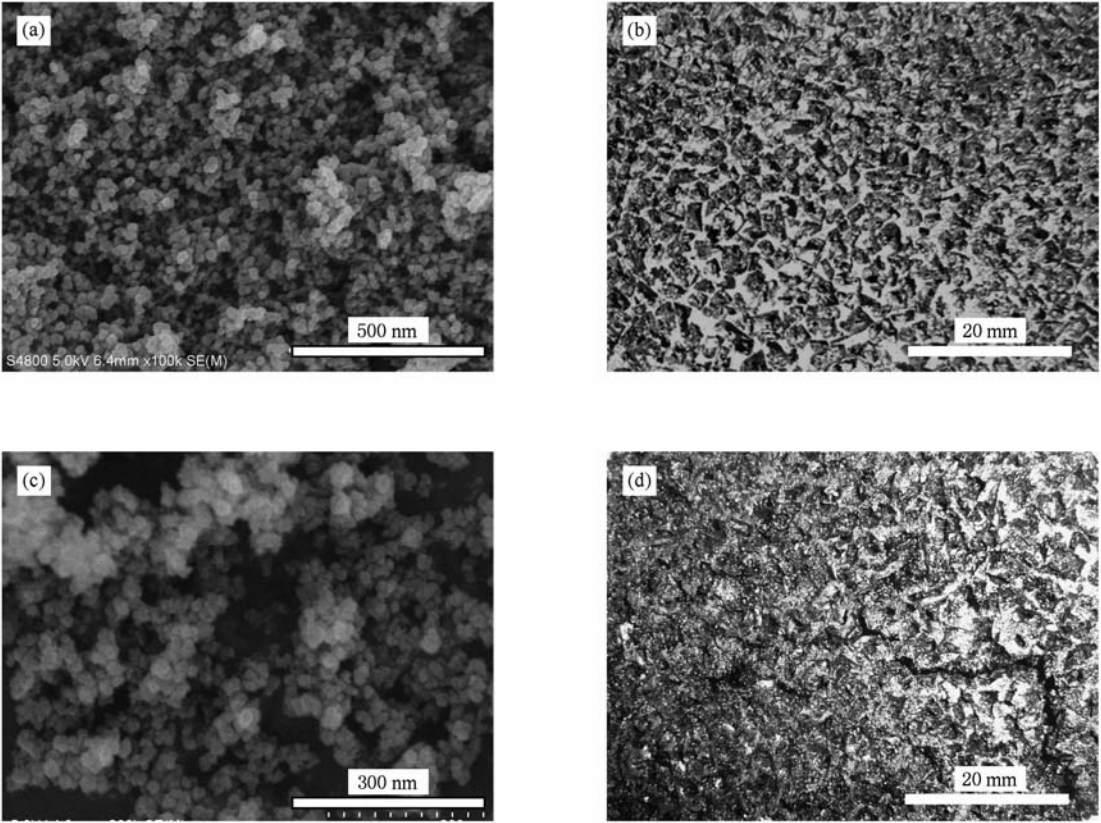


图 7 气凝胶和泡沫铝在爆炸前后的微观形貌 (a)原始气凝胶的微观结构,(b)原始泡沫铝的微观结构,(c)气凝胶在爆炸加载后的微观形貌,(d)泡沫铝在爆炸加载后的微观形貌

显. 气凝胶试件在冲击波传播过程中, 由于其结构遭到破坏而发生了粉碎的状态. 气凝胶的“梁”呈现弯曲的状态, 因此冲击波在气凝胶的“梁”中出现曲线传播现象, 这进一步促进了冲击波的衰减. 泡沫铝的光学显微照片如图 7(b) 所示. 由图 7(b) 可见, 泡沫铝中的“梁”的尺寸为毫米级别, 平均孔径约为 2 mm. 由于泡沫铝中“梁”的尺寸较大, 故固体铝之间接触面积大. 冲击波在泡沫铝中传播时会在泡沫铝的局部区域出现近似于在固体铝中传播的现象, 这就弱化了冲击波在泡沫铝中传播时的衰减效果. 图 7(d) 所示为泡沫铝在冲击波加载后的微观形貌. 由图 7(d) 可见, 泡沫铝在冲击波的作用下产生裂纹且出现密实化的现象. 由于泡沫铝的“梁”的尺寸为毫米级别, 因此泡沫铝的“梁”强度较高, 在冲击波的作用下可以承载和传递较强的应力, 并在冲击波的作用下发生密实化. 因此, 气凝胶粒子的纳米尺寸效应是导致冲击波在气凝胶中衰减比在泡沫铝中衰减明显的一个重要原因.

冲击波在多孔材料中传播时后方卸载波的追赶卸载效应是造成多孔材料中冲击波衰减的重要原因之一^[15]. 宋博^[14]对冲击波在多孔材料中的传播特性进行了研究, 发现冲击波在多孔材料中的传播速度越慢, 后方卸载波的追赶卸载效应就越明显, 多孔材料中冲击波的衰减效果就越好. 机械波在气凝胶中的传播速度极低. 比较第一组和第二组实验结果可以发现, 冲击波经过 12 mm 气凝胶和泡沫铝分别用了 10.4 和 5.6 μs , 冲击波在气凝胶和泡沫铝中的平均波速为 1154 和 2143 m/s. 比较第三组和第四组实验结果可以发现, 冲击波经过 12 mm 气凝胶和泡沫铝分别用了 26.8 和 12.5 μs , 冲击波

在气凝胶和泡沫铝中的平均波速为 448 和 960 m/s. 在四组实验中, 不同强度的冲击波在相同的多孔材料中传播速度不同, 这是由于气凝胶和泡沫铝等多孔材料均属于递增硬化材料, 在递增硬化材料中, 冲击波的波速随着冲击波强度的衰减而逐渐减小^[15]. 实验结果表明, 无论是作为面板还是作为内衬材料, 冲击波在气凝胶中的传播速度均低于在泡沫铝中的传播速度, 因此冲击波在气凝胶中传播时的追赶卸载效应要强于冲击波在泡沫铝中传播时的追赶卸载效应. 这是冲击波在气凝胶中衰减比在泡沫铝中衰减明显的另一个重要原因.

4. 结 论

利用 PVDF 压电传感器技术成功地测出了冲击波在气凝胶中传播特性, 并与泡沫铝中冲击波的传播特性进行了比较. 实验结果表明, 冲击波在气凝胶中传播基本上呈现指数衰减的趋势. 无论是作为面板还是作为内衬材料, 冲击波在气凝胶中衰减都比在泡沫铝中衰减明显. 气凝胶在防爆震领域具有一定的应用前景.

气凝胶中的黏性耗散效应导致冲击波在气凝胶中的传播出现衰减和弥散的现象. 气凝胶内部特殊的纳米多孔网状结构导致冲击波在气凝胶中衰减比在泡沫铝中衰减明显. 冲击波在气凝胶中的传播速度低于在泡沫铝中的传播速度, 因此冲击波在气凝胶中传播时的追赶卸载效应要强于冲击波在泡沫铝中传播时的追赶卸载效应, 这又进一步促进了冲击波的衰减, 这是冲击波在气凝胶中衰减比在泡沫铝中衰减明显的另一个重要原因.

- [1] Bian B M, Yang L, Chen X, Ni X W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 809 (in Chinese) [卞保民、杨 玲、陈 笑、倪晓武 2002 物理学报 **51** 809]
- [2] Bian B M, Chen X, Xia M, Yang L, Shen Z H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 508 (in Chinese) [卞保民、陈 笑、夏 铭、杨 玲、沈中华 2004 物理学报 **53** 508]
- [3] Wang Y G, Hu S S, Wang L L 2003 *Explo. Shock Waves* **23** 516 (in Chinese) [王永刚、胡时胜、王礼立 2003 爆炸与冲击 **23** 516]
- [4] Wang H F, Feng S S 1997 *J. Beijing Inst. Technol.* **17** 41 (in Chinese) [王海福、冯顺山 1997 北京理工大学学报 **17** 41]
- [5] Scherer G W 1998 *Adv. Colloid Interfac.* **76—77** 321

- [6] Shen J, Wang J, Wu X 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 1501 (in Chinese) [沈 军、王 珏、吴 翔 1996 物理学报 **45** 1501]
- [7] Hrubesh L W 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **225** 335
- [8] Zhou B, Wang J, Shen J, Weng Z N, Deng Z S, Zhao L, Li Y F 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1437 (in Chinese) [周 斌、王 珏、沈 军、翁志农、邓忠生、赵 利、李郁芬 1997 物理学报 **46** 1437]
- [9] Wu G M, Lu H Y, Wang J, Shen J, Zhou B, Zhang Q Y, Deng Z S 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 104 (in Chinese) [吴广明、鲁鸿雁、王 珏、沈 军、周 斌、张勤远、邓忠生 2002 物理学报 **51** 104]
- [10] Luo H, Lu H, Leventis N 2006 *Mech. Time-Depend. Mater.* **10** 83

- [11] Luo H, Churu G, Fabrizio E F, Schnobrich J, Hobbs A, Dass A, Mulik S, Zhang Y, Grady B P, Capecelatro A, Sotiriou-Leventis C, Lu H, Leventis N 2008 *J. Sol-Gel Sci. Technol.* **48** 113
- [12] Parmenter K E, Milstein F 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **223** 179
- [13] Zhang B P, Zhang Q M, Huang F L 2006 *Detonation Physics* (Beijing: Weapon Industry Press) pp161—168 (in Chinese) [张宝平、张庆明、黄风雷 2006 爆轰物理学(北京:兵器工业出版社)第161—168页]
- [14] Song B 2000 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [宋 博 2000 博士学位论文(合肥:中国科学技术大学)]
- [15] Wang L L 2005 *Foundation of Stress Waves* (2nd ed) (Beijing: National Defence Industry Press) pp92—94 (in Chinese) [王礼立 2005 应力波基础(第二版)(北京:国防工业出版社)第92—94页]

Protective performance and protective mechanism of SiO_2 aerogel under explosive loading^{*}

Yang Jie Li Shu-Kui[†] Yan Li-Li Wang Fu-Chi

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 7 March 2010; revised manuscript received 1 June 2010)

Abstract

The propagation character of shock wave in SiO_2 aerogel under explosive loading is studied using a polyvinylidene fluoride piezoelectric sensor. The propagation character of shock wave in aluminum foam is also determined for comparison. The results show that the peak stress of the shock wave follows the exponential attenuation relation with the propagation distance of the shock wave in SiO_2 aerogel. The shock wave attenuates more obviously in SiO_2 aerogel than in aluminum foam. The special nano-porous network structure of SiO_2 aerogel results in better attenuation effect of shock wave in aerogel. The shock wave velocity in SiO_2 aerogel is extremely low, thus the chase of the unloading wave leads to the further attenuation of shock wave.

Keywords: SiO_2 aerogel, shock wave attenuation, protective mechanism, nano-porous network structure

PACC: 8190, 4630M, 6220

^{*} Project supported by the Advanced Research Foundation for National Defense Science and Technology of China (Grant No. 151241).

[†] Corresponding author. E-mail: bitleesk@bit.edu.cn