

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.03.009

PVDF 薄膜传感器用于测试块状岩石表面爆炸应力的研究*

孙 飞^① 陈友文^② 顾 云^① 刘 迪^① 陈顺禄^{①③} 丁 建^④

①核工业南京建设集团有限公司(江苏南京,211102)

②浙江省交通投资集团有限公司(浙江杭州,310020)

③南京君缘科爆工程技术有限公司(江苏南京,211103)

④南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 采用 PVDF(聚偏二氟乙烯)薄膜传感器对岩石表面爆炸应力进行测量,并分析炮孔内不同填塞介质对爆炸应力波在岩石介质中传播的影响。在直径为 28 mm、孔深为 25 cm 的炮孔内填塞不同的介质(空气、水或沙子),采用不同的装药结构分别进行爆破试验,通过 PVDF 薄膜传感器得到了不同工况下岩石表面应力波时程曲线。分析炮孔内不同填塞介质对爆炸应力波透射的影响发现,水作为炮孔填塞介质时,爆炸应力波透射能力强,炸药爆炸产生的能量用于岩石破碎的比例高。水作为炮孔填塞介质时,为达到岩石开裂效果,装药结构设计为 1 发 8[#]雷管加 2 g 传爆药(聚黑-14);当沙子作为炮孔填塞介质时,为达到岩石的开裂效果,装药结构设计为 1 发 8[#]雷管、2 g 传爆药(聚黑-14)和 20 g 炸药(聚黑-2);前者炸药用量仅为后者的 15.3%。炸药使用量减少,也降低了爆破次生危害的影响程度。用 PVDF 薄膜传感器在岩石表面直接测量爆炸应力的方法是可行的。

[关键词] 爆炸力学;爆炸应力;PVDF 薄膜;岩石介质

[分类号] TD235

Application of PVDF Thin Film Sensor in Explosive Stress Measurement on the Surface of Massive Rock

SUN Fei^①, CHEN Youwen^②, GU Yun^①, LIU Di^①, CHEN Shunlu^{①③}, DING Jian^④

①Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 211102)

②Zhejiang Communications Investment Group Co., Ltd. (Zhejiang Hangzhou, 310020)

③Nanjing Junyuan Kebao Engineering Technology Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 211103)

④School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] PVDF (polyvinylidene fluoride) thin film sensor was used to measure explosive stress on the surface of rocks, and the influences of different filling media in the blast hole on the propagation of explosive stress waves in rock media were analyzed. Different media, such as air, water, or sand, were filled into the borehole with a diameter of 28 mm and a depth of 25 cm. Blasting tests were conducted using different charging structures, and the time history curves of rock surface stress waves under different working conditions were obtained from PVDF. It was found that when water is used as the filling medium in the blast hole, the transmission ability of explosion stress waves is strong, and the proportion of energy generated by explosion used for rock fragmentation is high. When water is used as the filling medium in the blast hole, in order to achieve rock cracking, the charging structure is designed with one 8[#] detonator and 2 g booster explosive (Juhei-14). When sand is used as the filling medium in the blast hole, in order to achieve rock cracking, the charging structure is designed with one 8[#] detonator, 2 g booster explosive (Juhei-14), and 20 g of explosive (Juhei-2). The amount of explosives used in the former is only 15.3% of that in the latter. The reduction in the use of explosives also reduces the impact of secondary hazards caused by blasting. The method of directly measuring explosive stress on rock surface using PVDF thin film sensors is feasible.

[KEYWORDS] explosive mechanics; explosive stress; PVDF thin film; rock medium

* 收稿日期:2022-04-07

第一作者:孙飞(1989-),男,硕士,工程师,主要从事爆炸与毁伤作用机理方面的研究。E-mail:1326662880@qq.com

通信作者:陈友文(1984-),男,硕士,高工,主要从事铁路及轨道交通项目的建设管理。E-mail:42211271@qq.com

0 引言

工程爆破的主要对象之一为岩石介质。由于漫长的地质构造作用,岩石本构关系较为复杂。自然界中岩石本身既不是均质材料,也不是线性材料,造成研究岩石在爆炸载荷下的动态响应十分困难。而工程爆破作为国民经济发展的重要行业,开展针对岩石介质的爆炸效应研究具有重要意义。

PVDF(聚偏二氟乙烯)压电薄膜是一种高分子聚合物。PVDF 薄膜厚度为微米级,灵敏度高、动态响应快、频响范围宽且具有优越的抗冲击性能和机械韧性。经极化后的 PVDF 具有良好的压电特性^[1]。这使得 PVDF 薄膜可作为爆炸冲击条件下应力测试的理想材料。因此,在爆炸测量方面,各国学者对 PVDF 的应用也做了相应的尝试及摸索^[2-4]。

孙权等^[5]利用分离式霍普金森杆对 PVDF 薄膜进行动态压力标定,发现 PVDF 薄膜在 0 ~ 200 MPa 压力区具有良好的的一致性和线性度,能满足实际工程中的测量需要。黄家蓉等^[6-7]在混凝土靶中埋设 PVDF 薄膜及碳阻传感器,对比测量梯恩梯(TNT)爆炸混凝土靶板中的应力波,试验结果表明:PVDF 测得的应力波波形更为光滑,规律性更好,且与数值仿真结果吻合度更高。Uddin 等^[8]研究了 PVDF 传感器结构、比表面积、厚度等因素对 PVDF 传感器输出响应的影响。Kim 等^[9]系统地研究了 PVDF 传感器的冲击特性。张旭等^[10]研究了 PVDF 柔性压电传感器敏感单元设计的关键技术和工艺,自主研发的传感器能够满足 0.3 ~ 10.0 GPa 动态压力的测量需求。

赵红平等^[11]介绍了 PVDF 的标定试验,并采用定制的 PVDF 压力传感器测量了不同类型介质在冲击载荷作用下的压力衰减,说明了 PVDF 压力传感器在压力测量中有着很好的前景。余尚江等^[12]自研了 PVDF 传感器,通过传感器的标定试验和传感器灵敏度修正的方法减少了应力测量误差,最后减少了其他类别的传感器在混凝土结构内药包爆炸应力波测试中的应用。

各国学者将 PVDF 薄膜传感器用于测量的爆炸试验对象主要为混凝土介质,而 PVDF 薄膜在岩石介质中直接测量爆炸应力的研究则未见报道。且由于岩石内部本构关系较为复杂,传感器埋设较为困难,至今对强冲击载荷作用下岩石材料中的动态应力波传播特性研究很少。

本文中,将 PVDF 传感器粘贴在岩石表面,测量

岩石介质中的应力波载荷幅值,为研究岩石中动态力学特性及相关测试技术提供参考。

1 PVDF 测试原理

基于 PVDF 压电薄膜,介质内压力的测量方式主要有两种:电荷模式和电流模式。电荷模式测量压力的基本原理是:将 PVDF 薄膜直接与一个电容相连,电容两端的电压与 PVDF 的电荷输出量成正比,通过测量电容两端的电压来计算 PVDF 所受到的压力。电流模式测量压力的基本原理是:将 PVDF 两端用一个电阻进行连接,测量电阻两端的电压后,再表征通过该电阻的电流时程曲线,将瞬态电流 $I(t)$ 积分后,可得到 PVDF 薄膜的电荷输出量;对于线性度良好的 PVDF 薄膜,所受的压力与电荷输出量的大小成正比。

等效电路如图 1 所示。

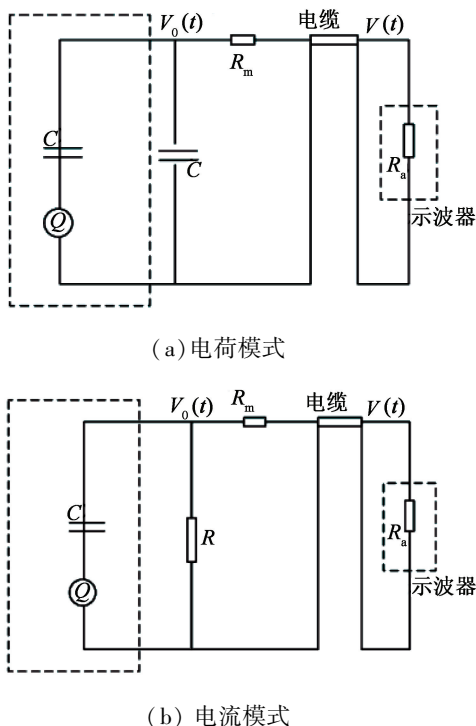


图 1 等效电路

Fig. 1 Equivalent circuits

电流模式测量电路和电荷模式测量电路的响应时间远远小于传感器对应力波的响应时间。因而,在应力波剖面的测量上,对应力波剖面的分辨率最终取决于传感器的厚度^[13-15]。

电荷模式测量中,波形直观易读,不用积分,不要求示波器具有极高的采样频率和带宽,因而是一种更实用的方法^[15]。

本次试验过程中,采用电荷模式对岩石介质中

爆炸载荷的应力进行测量, PVDF 测试应力波的原理如图 2 所示。

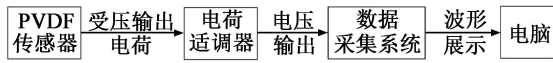


图 2 PVDF 传感器应力波测试原理

Fig. 2 Diagram of stress wave testing principle of PVDF sensors

2 现场试验

使用 1#、2# 两个 PVDF 薄膜传感器测试并分析炮孔内不同的填塞介质和不同的装药结构对爆炸应力波在岩石介质中传播的影响。

针对直径为 28 mm、孔深为 25 cm 的炮孔, 炮孔内填塞不同的介质(空气、水或沙子)。采用不同的装药结构分别进行爆破试验, 并在岩石表面粘贴 PVDF 薄膜, 对不同工况下的爆炸应力波进行测量, 具体工况布置如表 1 所示。表 1 中, 使用 8# 雷管, 传爆药为聚黑-14, 炸药为聚黑-2。利用 2 块尺寸相近的方形花岗岩 I 和 II, 共进行 6 种工况的试验。

在试验石材顶部中心打孔, 孔径约 28 mm, 钻孔深度约 25 ~ 35 cm。在石材表面选择较平整部位, 选定的位置应与炮孔底部在同一高度, 对选定位置进行表面处理并完成 PVDF 薄膜传感器的粘贴。具体操作步骤如下:

- 1) 选定位置, 用记号笔进行标记;
- 2) 用角磨机砂轮片在选定位置处进行打磨, 打磨尺寸约 5 cm × 5 cm, 再用细砂纸进一步打磨, 直至表面粗糙度参数 Ra 为 6.3 μm 左右;
- 3) 打磨完成后, 用酒精擦拭, 直至酒精棉球上没有污渍;
- 4) 将强力型石材胶均匀地涂抹在 PVDF 的表面, 然后在选定区域上进行按压固定;
- 5) 固定完成后, 用 704 硅橡胶对 PVDF 薄膜及接线处进行涂抹, 做好防水绝缘措施。

粘贴完成后如图 3 所示。现场试验见图 4。



图 3 PVDF 薄膜传感器粘贴效果

Fig. 3 Adhesion of PVDF thin film sensor



图 4 现场试验图片

Fig. 4 Site test photo

3 试验结果及分析

工况 A 的装药 TNT 当量为 3.6 g, 两个 PVDF 薄膜测得的应力曲线如图 5 所示。1# PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.251 MPa, 2# PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.233 MPa。在工况 A 药量作用下, 炮孔未被破坏, 岩石未产生明显裂缝。

工况 B 的装药 TNT 当量为 3.6 g。与工况 A 不同的是, 在工况 B 中将雷管和炸药都放置在 PVC 套筒内。工况 A 中, 岩石未产生明显的破坏。因此, 工况 B 试验仍在 I 号石材中进行, PVDF 薄膜的位置不变。两个 PVDF 薄膜测得的应力时程曲线如图 6 所示。

工况 B 中, 1# PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.239 MPa, 2# PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.217

表 1 各工况的布置条件

Tab. 1 Layout of each working condition

工况 序号	石材 编号	1#PVDF 距爆心 距离/cm	2#PVDF 距爆心 距离/cm	装药结构
A	I	28.0	31.3	1 发雷管 + 2 g 传爆药
B	I	28.0	31.3	1 发雷管 + 2 g 传爆药 + 套筒
C	I	28.0	31.3	1 发雷管 + 2 g 传爆药 + 套筒 + 10 g 炸药
D	I	28.0	31.3	1 发雷管 + 2 g 传爆药 + 套筒 + 10 g 炸药 + 沙子填塞
E	I	28.0	31.3	1 发雷管 + 2 g 传爆药 + 套筒 + 20 g 炸药 + 沙子填塞
F	II	26.0	36.0	1 发雷管 + 2 g 传爆药 + 孔内注满水

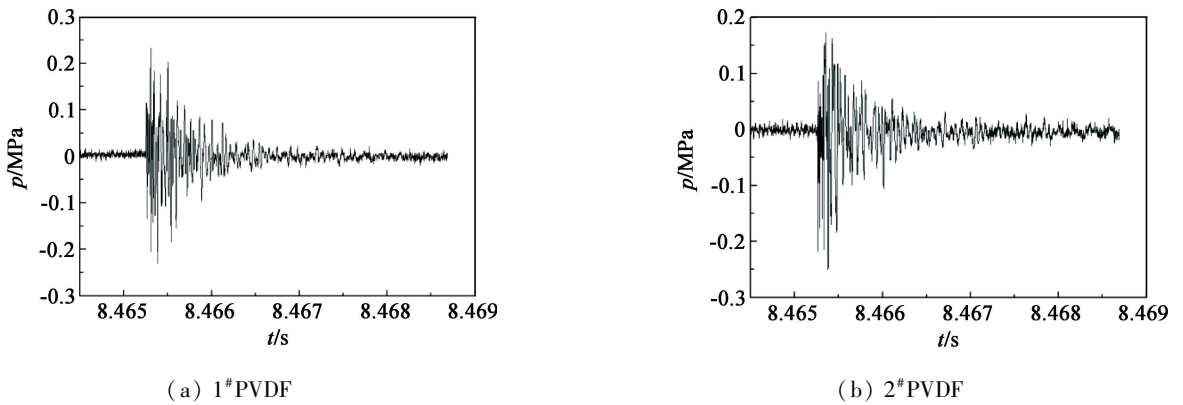


图5 工况 A 中 PVDF 测得的压力时程曲线

Fig. 5 Pressure time history curves measured by PVDF in working condition A

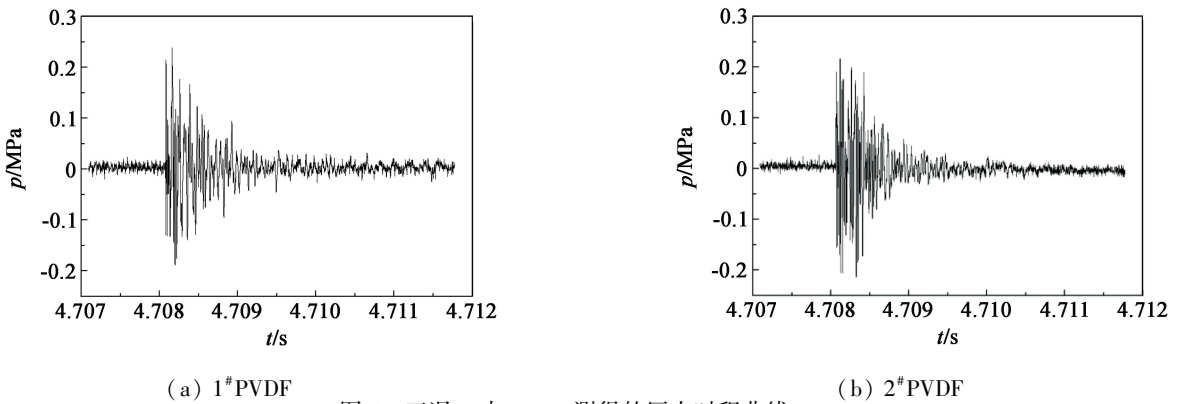


图6 工况 B 中 PVDF 测得的压力时程曲线

Fig. 6 Pressure time history curves measured by PVDF in working condition B

MPa。在工况 B 药量作用下,炮孔未被破坏,岩石未产生明显裂缝。

由图 5~图 6 可以看出,总药量不变,仅将雷管和传爆药放置在 PVC 套筒内,再将 PVC 套筒放置在炮孔内,PVDF 薄膜测得的应力变化量不大。其中:工况 B 中 1#PVDF 薄膜的应力测量值比工况 A 中 1#PVDF 薄膜的应力测量值小 0.012 MPa;工况 B 中 2#PVDF 薄膜的应力测量值比工况 A 中 2#PVDF 薄膜的应力测量值小 0.016 MPa,两者的差值十分接近。分析工况 B 较工况 A 测量值偏小的原因是,工况 B 中造成 PVC 套筒的破坏会耗散部分能量,差值相近也间接证明了 PVDF 应力测量值的准确性。

工况 C 的装药 TNT 当量 13.6 g,全部放置在 PVC 套筒内,再将 PVC 套筒放置在炮孔内。工况 B 中,岩石未产生明显破坏。因此,工况 C 试验仍在 I 号石材中进行,PVDF 薄膜位置不变。工况 C 中 PVDF 薄膜测得的应力时程曲线如图 7 所示。1#PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.508 MPa,2#PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.437 MPa。在工况 C 药量

作用下,炮孔未被破坏,岩石未产生明显裂缝。

工况 D 的装药情况与工况 C 相同,不同的是,待 PVC 套筒放置于炮孔后,用沙子对炮孔进行填塞。工况 C 中,岩石未产生明显破坏。因此,工况 D 试验仍在 I 号石材中进行,PVDF 薄膜的位置不变。工况 D 中 PVDF 薄膜测得的应力时程曲线如图 8 所示。1#PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.426 MPa,2#PVDF 薄膜测得的应力峰值为 0.385 MPa。在工况 D 药量作用下,炮孔未被破坏,岩石未产生明显的裂缝。

对比图 7~图 8 可以看出,药量不变,炮孔内是否填塞细沙,对同一位置 PVDF 薄膜测得的应力变化有影响。其中:工况 D 中 1#PVDF 薄膜的应力测量值比工况 C 中 1#PVDF 薄膜的应力测量值小 0.082 MPa;工况 D 中 2#PVDF 薄膜的应力测量值比工况 C 中 2#PVDF 薄膜的应力测量值小 0.052 MPa,两者的差值较为接近。分析工况 D 较工况 C 测量值偏小的原因是,同等药量情况,炸药产生的能量在沙子中的耗散程度大于空气中。

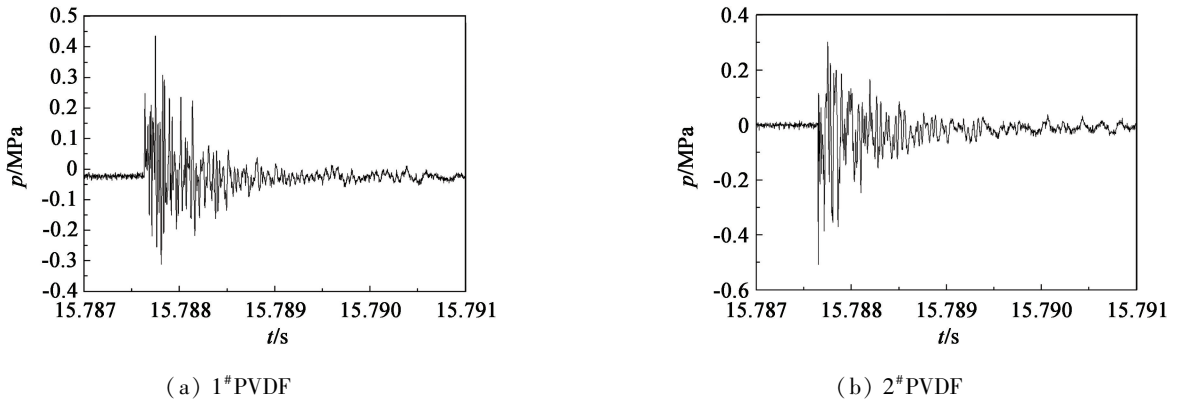


图 7 工况 C 中 PVDF 测得的压力时程曲线

Fig. 7 Pressure time history curves measured by PVDF in working condition C

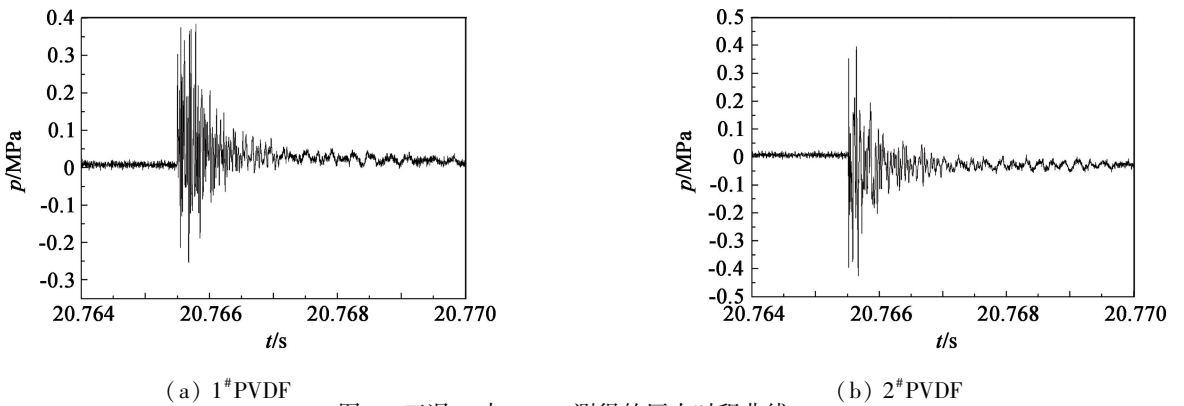


图 8 工况 D 中 PVDF 测得的压力时程曲线

Fig. 8 Pressure time history curves measured by PVDF in working condition D

工况 E 的装药 TNT 当量 23.6 g,全部放置在 PVC 套筒内,再将 PVC 套筒放置在炮孔内。工况 D 中,岩石未产生明显破坏。因此,工况 E 试验仍在 I 号石材中进行,PVDF 薄膜位置不变,爆破效果如图 9 所示。



图 9 工况 E 爆破效果

Fig. 9 Blasting outcome in working condition E

由图 9 可以看出,石材 I 在爆炸作用下已分裂成 3 部分,3 块岩石夹角为 120°,其中一块石块被抛掷,抛掷距离为 1 m。石材被破坏且裂纹靠近 PVDF 传感器,因此未测得有效波形。工况 A ~ 工况 D 都

在石材 I 中进行试验,在重复试验的情况下,岩石虽未见明显裂缝,但对炮孔内壁不可避免地造成损伤及岩石内部产生细小裂缝,使得岩石更容易开裂。因此,若在岩石未受破坏的情况下造成工况 E 的爆破效果,实际装药量要比工况 E 的装药量大。

工况 F 的装药 TNT 当量 3.6 g,并将炮孔内注满水。其中,1#PVDF 距爆心 26.0 cm;2#PVDF 距爆心 36.0 cm。

在炮孔注满水的工况下,石材 II 在当前药量的爆炸作用下,石材形成贯穿裂缝,最大裂缝宽度为 1 cm,爆破效果如图 10 所示。

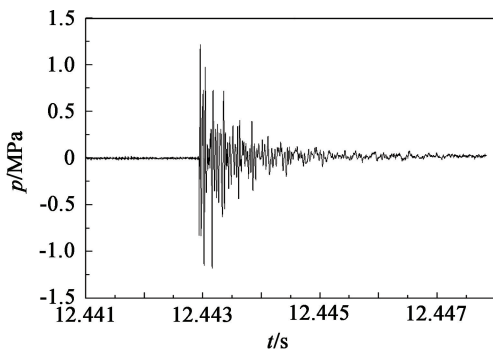
工况 F 中,1#PVDF 测得应力波峰值为 1.210 MPa,持续时间约为 2 ms;2#PVDF 测得应力波峰值为 0.896 MPa,应力振荡持续时间约为 2 ms。测得的应力波形如图 11 所示。

工况 F 条件下,PVDF 薄膜测得的应力峰值和应力振荡持续时间较前几次工况都得到增强,相比较工况 D 和工况 E,炸药的使用量却大大降低。且工况 D 条件下,爆破效果未能使岩石开裂;工况 E

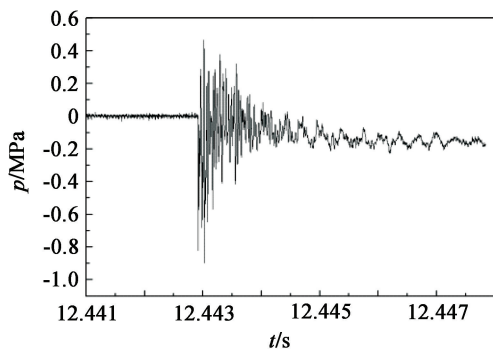


图 10 工况 F 爆破效果

Fig. 10 Blasting outcome in working condition F



(a) 1# PVDF



(b) 2# PVDF

图 11 工况 F 中 PVDF 测得的压力时程曲线

Fig. 11 Pressure time history curves measured by PVDF in working condition F

条件下,岩石虽然开裂,但炸药的使用量较工况 F 多了 20 g。这验证了水作为炮孔填塞介质传爆性能的优越性,炸药爆炸产生的能量用于岩石开裂的能量比例较高。另外,综合考虑雷管、传爆药及主装药,工况 F 的炸药用量仅占工况 E 的 15.3%,炸药用量大幅减少。因此,要达到同等爆破效果,采用水作为炮孔填塞介质,可使得炸药的使用量降低,爆破振动、爆破冲击波、爆破噪声等爆破次生灾害程度也可大幅降低。这在降低经济成本的同时,也减少了

对周围环境的影响。

4 结论

在方型花岗岩石材上布置 6 种工况,并使用 PVDF 薄膜传感器测量爆炸应力波的传播情况,得出如下结论:

1) 将 PVDF 薄膜粘贴在待爆破岩石表面,测得的爆炸应力波波形规律性较好,符合在岩石介质中爆炸、岩石介质界面反射的特点。PVDF 薄膜传感器在岩石表面直接测量爆炸应力的操作方法和测试工艺可行。

2) 通过 PVDF 薄膜传感器测得了岩石表面应力峰值及实际爆破效果,探索了空气、沙子和水这 3 种介质作为填塞介质时爆炸应力波的传播规律。结果表明,水作为炮孔填塞介质时,炸药爆炸作用于岩石开裂的能量利用率较高,有助于提高爆炸能量的利用率。

3) 在达到同等爆破效果条件下,用水作为炮孔填塞介质可减少炸药用量,降低碳排放,同时也减少了爆破次生灾害对周围环境的影响。

参考文献

- [1] KAWAI H. The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride) [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1969, 8 (7): 975.
- [2] 余尚江, 曾辉, 丁世敬, 等. PVDF 土压力传感器[J]. 传感器技术, 2003, 22(9): 16-18.
YU S J, ZENG H, DING S J, et al. PVDF soil pressure sensor [J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22 (9): 16-18.
- [3] 刘剑飞, 胡时胜. PVDF 压电计在低阻抗介质动态力学性能测试中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19 (3): 229-234.
LIU J F, HU S S. Application of PVDF gauges to determine dynamic mechanical behaviour of low wave impedance material [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 229-234.
- [4] 巫绪涛, 胡时胜, 田杰. PVDF 应力测量技术及在混凝土冲击实验中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27 (5): 411-415.
WU X T, HU S S, TIAN J. Stress-measurement method by PVDF gauge and its application to impact test for concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 411-415.
- [5] 孙权, 于洋, 陈宝成. 基于 PVDF 的压电传感器动态

- 压力标定[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(14):24-28.
SUN Q, YU Y, CHEN B C. Dynamic pressure calibration of pyretric sensors based on PVDF [J]. Heilongjiang Science, 2021, 12(14): 24-28.
- [6] 黄家蓉, 刘光昆, 吴飏, 等. 爆炸冲击作用下混凝土中动态应力波测试与仿真[J]. 防护工程, 2020, 42(4): 23-28.
HUANG J R, LIU G K, WU B, et al. Testing and simulation of dynamic stress wave in concrete under explosion and impact [J]. Protective Engineering, 2020, 42(4): 23-28.
- [7] 黄家蓉, 王幸, 吴飏, 等. 混凝土靶内爆炸应力波测量方法研究[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 25-28.
HUANG J R, WANG X, WU B, et al. Research on stress wave measurement method in concrete target in explosion [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(10): 25-28.
- [8] UDDIN M, ALFORD S, AZIZ S M. Evaluating energy generation capacity of PVDF sensors: effects of sensor geometry and loading [J]. Materials, 2021, 14(8): 1895.
- [9] KIM S, SHIN J Y, YUN Y, et al. Characteristics of piezoelectric polymeric PVDF sensor by impact testing [J]. Polymer (Korea), 2019, 43(5): 764-770.
- [10] 张旭, 覃双, 杨舒棋, 等. PVDF 压电传感器及敏感单元设计关键技术[J]. 高压物理学报, 2020, 34(2): 023401.
ZHANG X, QIN S, YANG S Q, et al. Key design techniques for PVDF sensitive element used in dynamic compression experiments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2): 023401.
- [11] 赵红平, 叶琳, 陆中琪. PVDF 压电薄膜在应力波测量中的应用[J]. 力学与实践, 2004, 26(1): 37-41.
ZHAO H P, YE L, LU Z Q. Application of PVDF gauge to stress wave measurement [J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(1): 37-41.
- [12] 余尚江, 李科杰. 混凝土结构内冲击波应力传感器设计及其行为[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 350-354.
YU S J, LI K J. Design and performance of PVDF pressure sensor for shock wave measurement in concrete structures [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 350-354.
- [13] 张进秋, 高永强, 贾进锋, 等. PVDF 压电加速度传感器电荷灵敏度影响因素分析[J]. 传感器世界, 2008(10): 21-25.
ZHANG J Q, GAO Y Q, JIA J F, et al. Impact factor analyses on charge sensitivity of PVDF piezoelectric accelerometer [J]. Sensor World, 2008(10): 21-25.
- [14] 朱金海. PVDF 压电薄膜及其传感器的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHU J H. Preparation and performance study of PVDF piezoelectric film and sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [15] 盛振新, 刘建湖, 张显丕, 等. 水下爆炸气泡射流载荷阵列测量技术探索[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(3): 031405.
SHENG Z X, LIU J H, ZHANG X P, et al. On an array-sensor technology for measuring bubble jet load generated by underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(3): 031405.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部