

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.020

带防弹钢板的钢纤维混凝土靶抗侵爆性能分析

杨 锐, 王 健

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要: 为使防护工程具有更好的抗侵彻抗爆性能, 对不同钢纤维混凝土靶板的抗侵彻抗爆性能进行研究。分别对侵彻后的靶板和带有普通钢板的钢纤维混凝土靶板进行静爆试验, 根据靶板破坏情况、侵彻深度和防弹钢板的裂纹长度, 结合应变测量, 分析爆炸后靶板钢筋上的应变数据, 得出最优的防护靶板参数。试验结果表明: 15 mm 厚的防弹钢板可提高钢纤维混凝土靶板的抗侵彻性能, 450 mm 厚的钢纤维混凝土靶板拥有最优的抗侵彻抗爆性能。

关键词: 抗侵彻; 抗爆; 钢纤维混凝土; 防弹钢板

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A

Anti-penetration and Anti-explosion Performance Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Target with Bulletproof Steel Plate

Yang Rui, Wang Jian

(School of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to make the protection project have better anti-penetration and anti-explosion performance, studies the anti-penetration and anti-explosion performance of different steel fiber concrete target plates. The static explosion test is carried out on the target plate after penetration and the steel fiber concrete target plate with ordinary steel plates. According to the destruction of the target plate, the penetration depth and the crack length of the bulletproof steel plate, combined with the strain measurement, the strain data on the steel bar of the target plate after the explosion is analyzed to obtain the optimal protective target plate parameters. The test results show that the 15 mm thick bulletproof steel plate can improve the penetration resistance of the steel fiber reinforced concrete target plate, and the 450 mm thick steel fiber reinforced concrete target plate has the best penetration resistance and anti-knock performance.

Keywords: penetration resistance; explosion resistance; steel fiber reinforced concrete; bulletproof steel plates

0 引言

在现代战争中, 随着远射程、高精度以及大威力的武器投入到战场, 对于防护工程的要求也越来越高。为使防护工程拥有更好的抗侵彻抗爆性能, 需要对防护材料以及结构进行优化和改进^[1-2]。混凝土作为世界上最常用的工程材料, 其特性为抗拉不抗压, 加入钢纤维后, 表现出更好的抗拉、抗剪、吸能效果^[3-4]。E M Almasan 和 H Langberg 等^[5-6]对钢纤维混凝土的抗侵彻能力进行了研究, 并基于实验结果提出了临界厚度预测模型。Liu Y 等^[7]采用直径 57 和 80 mm 的穿甲弹对钢纤维含量 5% 的混凝土靶板进行侵彻试验。通过对比得出, 含钢纤维的混凝土靶板的贯入阻力是普通 C30 混凝土靶板的 3 倍。孙文彬等^[8]通过试验研究普通钢筋混凝土抗爆性能的动力响应和破坏特征。Coughlin A M 等^[9]对不同钢纤维含量的混凝土靶板进行抗爆性能试验研究, 发现纤维含量 3.8% 和 5% 的混凝土抗爆水平基

本相同。上述研究仅针对钢纤维混凝土靶板抗侵爆性能开展, 而对带有防弹钢板层的钢纤维混凝土复合靶板抗侵爆性能研究较少。笔者对预先设计好的钢纤维混凝土靶板进行优化, 在打击面加上一层防弹钢板, 再对其进行侵彻和静爆试验, 以研究该防护结构的抗侵彻抗爆性能。

1 试验方案

1.1 试验靶板

如图 1 所示, 靶板由防弹钢板、钢纤维混凝土、螺纹钢、钢筋及柔性钢丝网构成, 其共性尺寸为: 长 2 000 mm, 宽 1 000 mm, 厚度分别为 400, 450, 500 mm, 防弹钢采用 F602 型防弹钢, 钢纤维混凝土型号为 CF50, 钢纤维体积含量 2%, 密度 156 kg/m³。如图 2 所示, 该靶板内钢筋结构 18 根钢筋以及其底端钩住钢筋网构成, 在钢筋网下方, 还铺有一层钢丝网。

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-10-09

作者简介: 杨 锐(1993—), 男, 河南人, 硕士, 从事侵彻与爆炸、固体力学研究。E-mail: 464362253@qq.com。

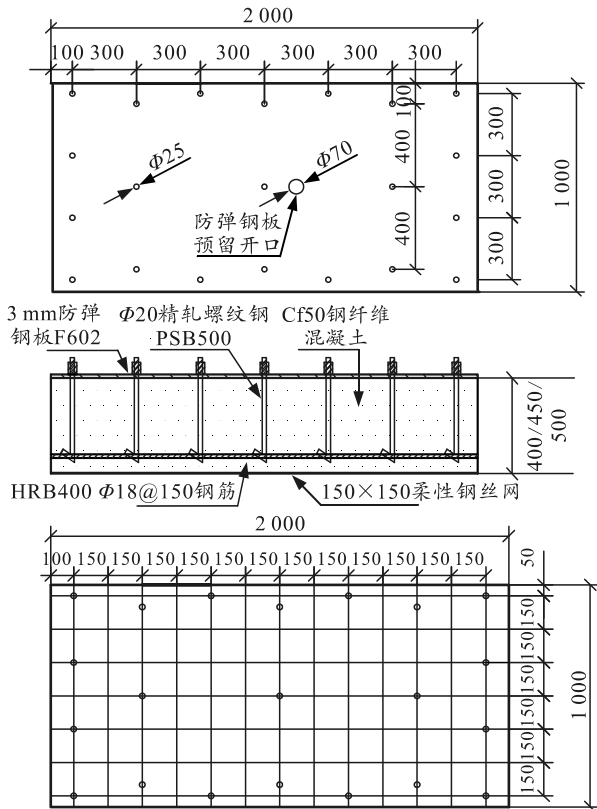


图 1 靶板尺寸



图 2 试验现场靶板

侵彻和静爆试验使用靶中参数不同的靶板，具体数据如表 1 所示。其中进行侵彻试验的是 1~6 号靶板，进行静爆试验的是 7, 8 号，以及进行过侵彻试验的 2, 4, 5, 6 号靶板。

表 1 钢纤维混凝土靶板参数 mm

靶板标号	混凝土厚度	防弹钢板厚度	普通钢板厚度
1,2	450	3	0
3	450	12	0
4,5	450	15	0
6	500	0	0
7	400	3	10
8	500	3	50

1.2 侵彻试验发射平台

如图 3 所示，侵彻试验发射弹丸采用某型 57 mm 某型榴弹，试验用的惰性弹丸外形、质量、质心、弹体、引信体等结构与原弹一致，将炸药、钨球破片等改为普通 45 号钢配重物，其侵彻能力略强于制式薄壁预制破片榴弹。

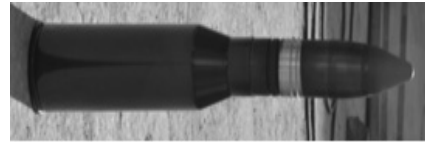


图 3 57 mm 某型弹

侵彻试验如图 4 所示，在试验靶板背弹面后用钢板搭设支撑桁架，支撑背弹面，用于固定试验靶板，避免靶板在弹丸冲击作用下翻倒。靶板前 0.5 cm 处设置 2 块测速网靶，网靶间距 1 m，用于测量弹丸的着靶速度。在试验靶板侧面布置高速摄像机，记录弹丸的侵彻过程。

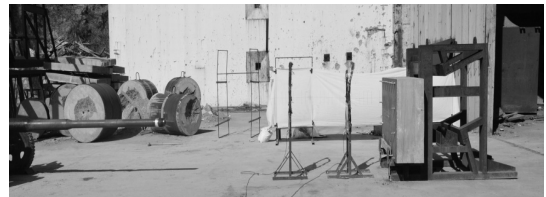


图 4 侵彻试验发射平台

1.3 静爆试验平台

在地面上放置 2 根木梁，将需要测试的靶板放置于梁上，根据侵彻试验结果确定钢板面或者混凝土面在上，在相应位置放置试验装药药柱，进行抗爆性能试验。静爆药柱采用等效的 TNT 装药，铸制成直径为 55 mm 的柱状，装药量为 0.68 kg。试验靶板用等效药量的 TNT 炸药对试件进行爆炸震塌试验，等效 TNT 药量计算：

$$W = W_0 \cdot c_1 \cdot c_2$$

式中： W_0 为 57 mm 榴弹装药量 0.454 kg，奥克托纳儿炸药； c_1 为裸装系数，1.2； c_2 为装药当量系数，1.5；经计算得到 $W=0.68$ kg。

静爆试验布置与炸药如图 5 所示。



图 5 静爆试验布置与炸药

1.4 应变测量

在试验靶板背面钢筋上预先贴好应变片，采用瞬态记录仪记录应变数据，并在试验后观察记录靶板迎弹面和背面宏观破坏情况，应变片位置如图 6 所示。应变测试仪的通道数为 32，采样速率 1~5 kHz，应变计灵敏度系数自动修正，最小分辨率 $0.5 \times 10^{-6} \epsilon$ ，非线性 0.05%FS，零漂 $\pm 3 \times 10^{-6} \epsilon/4$ h。

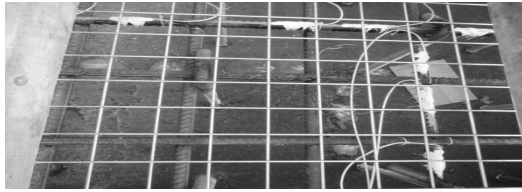


图 6 应变片测试位置

2 试验结果

2.1 侵彻试验结果

一共进行 6 次侵彻试验，射击位置均为靶板正中心，其中第 2 次试验的射击位置为靶板背面，即没有防弹钢板面。弹丸着靶速度为 495~505 m/s，着靶姿态垂直于靶板，着靶角度误差小于 5°，靶板的侵彻深度。防弹钢板及靶板的破坏情况如表 2 所示。侵彻试验靶板破坏情况如图 7 所示。

表 2 侵彻试验结果

靶板标号	侵彻深度/ mm	防弹钢板孔径/ cm	是否打穿防弹钢板
1	115	10.0	是
2	148	41.0	是
3	78	12.0	是
4	20	11.4	否
5	47	12.3	是
6	165	0	—

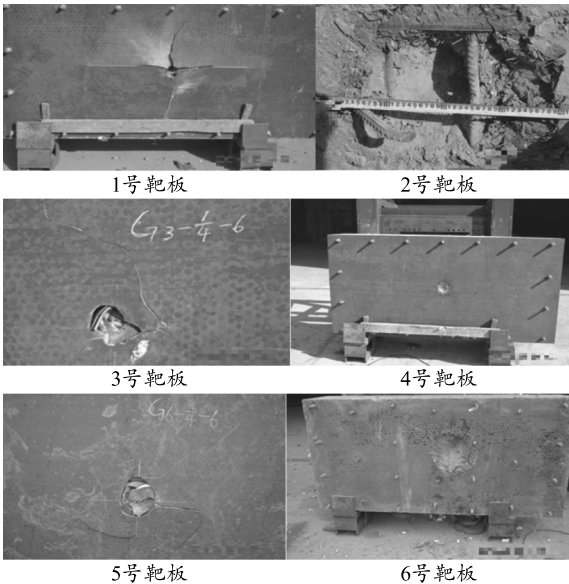


图 7 侵彻试验靶板破坏情况

综合上述侵彻试验结果可以看出：

- 1) 所有靶板均符合抗侵彻的标准，靶板整体都没有被穿透；
- 2) 抗侵彻性能和防弹钢板的厚度以及钢纤维混凝土的厚度呈正相关；
- 3) 防弹钢板有助于混凝土靶板的抗侵彻性能的提升，当防弹钢板厚度为 15 mm 的时候，抗侵彻

效果较好。

2.2 静爆试验结果

对 2, 4, 5, 6, 7, 8 号靶板进行静爆试验，其中前 4 块靶板是进行过侵彻试验的靶板，炸药放置在侵彻后的坑内，7 号和 8 号靶板将炸药放置在上方普通钢板的正中心开口处。静爆试验靶板破坏情况如图 8 所示。7 号靶板爆炸后表面钢板隆起，将表面钢板拆掉，对孔径进行测量。开坑深度为 5 cm，防弹钢板上孔径为 10 cm，靶板侧面裂纹最长一条为 55 cm。8 号靶板爆炸后表面的 4 块钢板与靶板分开，靶板上孔径为 10 cm，并且侧面裂纹贯穿了靶板。

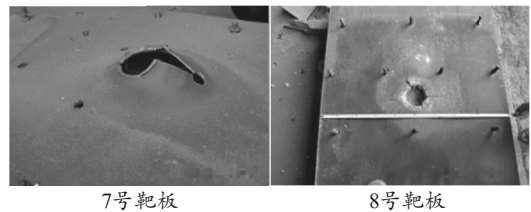


图 8 静爆试验靶板破坏情况

静爆试验靶板破坏情况如图 9 所示。综合 2 号和 6 号靶板的破坏情况，爆炸发生表面没有防弹钢板的保护，在原有侵彻的基础上，爆炸后开坑明显变大，由于 2 号靶板爆炸的表面为靶板背面，且在侵彻试验后钢筋已经露出，导致爆炸后钢纤维混凝土内的钢筋断裂明显。靶板孔径由侵彻后的 44 cm 扩大为 70 cm。2 次试验的靶板最长裂纹均贯穿靶板侧面。由于混凝土内的钢筋结构到爆炸位置的距离不同，导致靶板在到达抗拉极限后对剪切应力吸收效果不同，很明显 2 号靶板破坏最为严重，可见钢筋结构距离爆炸位置的远近对抗爆性能影响较大。对比 4 号和 6 号靶板，表面的防弹钢板大大提升了钢纤维混凝土靶板的防护效果。4 号靶板在原有基础上孔径基本没发生改变，开孔深度由 2.3 cm 增加到 4.5 cm。对比 2 次试验的侧面裂纹，带有防弹钢板的靶板侧面基本看不到裂纹，而没有防弹钢板的靶板侧面裂纹基本贯穿靶板表面无防弹钢板时，靶板四周都有明显的裂缝，且裂缝间距大，破坏严重。表明钢纤维混凝土达到极限抗拉强度后开裂，弯曲变形被靶板内钢筋拉住。防弹钢板厚度达到 15 cm 时，靶板显示出的破坏情况表明：钢纤维混凝土并没有达到极限抗拉强度，靶板四周裂纹不明显。综合 6 次静爆试验对靶板的破坏的情况，可以看出：4 号靶板破坏最小，靶板较为完整，而且经过了侵彻试验后，孔径基本不变，符合实际情况下对防护的要求。

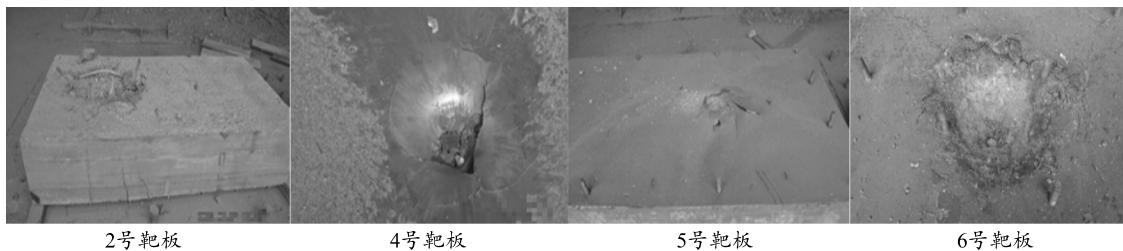


图 9 静爆试验靶板破坏情况

2.3 应变数据及分析

应变数据对比如图 10 所示。进行应变测量的是 7 号和 8 号靶板，取中心、最上方和最右边的通道进行对比，对比 2 次试验的 1,5,8 3 个通道。从这 3 点的变化可以看出，7 号靶板的应变变化要小于 8 号靶板。就靶板的通道 1 来看，7 号靶板的应变由-597.06(以下应变均为微应变)到 7 726.35，8 号的应变由-937.32~10 783.52。在起爆 12 ms 后，

7 号靶板的应变趋于稳定。在 5, 8 两点上，在起爆 10 ms 后应变趋于稳定。7 号靶板的应变残余为-11.32，为压应变。8 号靶板的应变残余为 432.23，为拉应变。从应变数据来看，爆炸产生的冲击对靶板内部钢筋结构的影响，7 号靶板要小于 8 号靶板，可能是因为 8 号靶板表面的普通钢板厚度大于 7 号；因此，炸药爆炸后的冲击对靶板内部的结构影响较大。

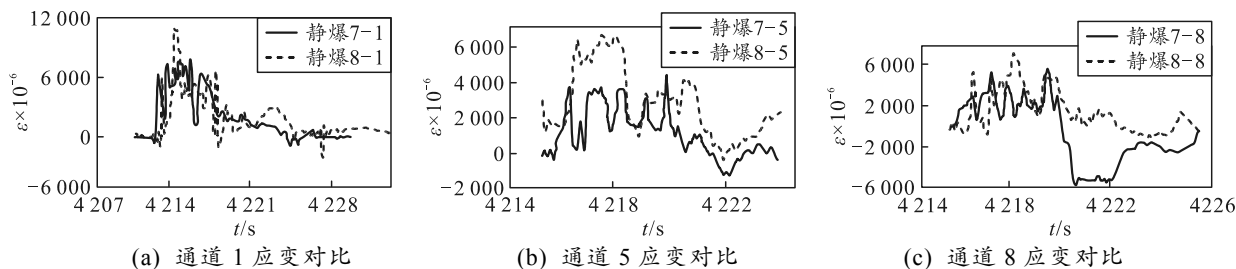


图 10 7 号和 8 号应变数据对比

3 结论

试验结果表明：防弹钢板可以有效地提高钢纤维混凝土靶板的抗侵彻抗爆性能，在一定范围内，钢板的厚度与抗侵彻抗爆性能呈正相关。普通钢板对于混凝土的保护效果远远低于防弹钢板。由应变数据测量可以看出，混凝土靶板的厚度在一定范围内对抗爆性能并不能起到有益的作用。从靶板的破坏状态来看，所预先设计好的靶板中，防弹钢板厚度为 15 mm，钢纤维混凝土厚度为 450 mm 的靶板拥有最好的抗侵彻抗爆性能，可以为复杂的结构设计提供参考。

参考文献：

[1] 张永亮. 钢纤维混凝土材料的抗爆抗侵彻性能研究及应力波演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
 [2] 赵晓宁. 高速弹体对混凝土侵彻效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
 [3] 冯君, 孙巍巍, 刘志林, 等. 带装甲钢背板的钢纤维混凝土靶抗侵彻试验及数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(6): 1041-1051.

[4] 董新龙, 洪志权, 高培正, 等. 混凝土及钢纤维混凝土板爆炸破坏研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 280-283.
 [5] ALMANSA E M, CANOVAS M F. Behaviour of normal and steel fiber reinforced concrete under impact of small projectiles[J]. Cement&Concrete Research, 1999, 29(11): 1807-1814.
 [6] LANGBERG H, MARKESET G. High Performance Concrete-penetration Resistance and Material Development[C]//Proceedings of 9th International Symposium on Interaction of the Efforts Munitions with Structures. Norwegian Defense Construction Service, 1999.
 [7] LIU Y, SONG C M, YUE S L. Tests on Mechanical Properties and Anti-Penetration Performance of Steel-Fiber Reactive Powder Concrete[C]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013, 671: 1761-1765.
 [8] 孙文彬. 钢筋混凝土对边简支板的爆炸试验[J]. 力学与实践, 2008(4): 58-60.
 [9] CONGHLIN A M, MUSSELMAN E S, SCHOKKER A J, et al. Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 521-5.