# TNT在钢筋混凝土靶中爆炸的试验研究

顾晓辉[1]，宋 浦[1,2]，王晓鸣[1]
(1.南京理工大学机械工程学院，江苏 南京 210094；
2.西安近代化学研究所，陕西 西安 710065)

**摘 要**：对TNT炸药进行了不同装药量、不同装药位置钢筋混凝土靶中爆炸作用的模拟试验，用传感器测量了典型位置处的质点压力和质点加速度，对爆炸后效进行了观察。结果表明，装药的爆炸作用与多个因素有关，其中装药量以及埋深对其影响很大；对于直径为1m，长为1m的C-35钢筋混凝土靶，药量小于100g时，无法将其破坏；爆炸近区端面质点的加速度达到$10^4$g量级。

**关键词**：爆炸力学；钢筋混凝土；靶中爆炸；冲击波；质点加速度
**中图分类号**：TJ760.3+1 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-7812(2009)05-0033-04

## Experimental Study on Explosion of TNT in Reinforced Concrete Targets

GU Xiao-hui[1], SONG Pu[1,2], WANG Xiao-ming[1]
(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract**: The simulative experiments of explosion effect in the reinforced concrete targets with different charge mass and charge positions were carried out. The particle pressure and acceleration of critical positions were measured by the sensor. The burst damage effect was observed. The results show that there are several parameters that affect the explosion effect. The charge mass and burial depth have reinforcing effect on the explosion power. The C-35 reinforced concrete targets, whose diameter and thickness both are 1m, can not be completely destroyed when the charge mass was less than 100g. The quantity of particle acceleration of near field region can reach to $10^4$g.

**Key words**: explosion mechanics; reinforced concrete; explosion in targets; shock wave; particle acceleration



## 引 言

对深埋于地下的工事进行有效打击，单靠动能弹的侵彻破坏作用是远远不够的，需要在保证战斗部足够强度的基础上不断提高战斗部的装填比。国内外对这方面的研究主要采取经验法、数值模拟和理论分析3种途径。郑应民等[1]采用新的测试方法得到了混凝土靶中不同位置处的压力和加速度随时间的变化曲线。王清洁等[2]通过量纲分析得到了多层复合介质中爆破破坏效应的计算公式。周宁等[3]应用量纲分析方法对装药在多层复合介质的破坏效应进行了分析。宋浦等[4]利用爆炸相似理论讨论了在相同装药情况下不同埋深时爆坑、炸深与埋深之间的关系。谭可可等[5]对钢纤维混凝土的抗接触爆炸性能进行了初步的研究，得到了其爆炸压缩半径系数。李小军等[6]对多层介质中装药起爆位置对爆炸能量传递影响进行了数值仿真研究。武海军[7-9]采用TCK和HJC模型建立了钢筋混凝土内爆炸的计算模型，对钢筋混凝土内爆炸毁伤破坏效应进行了数值计算分析。

为探索靶中爆炸及爆轰后效的威力毁伤规律，本研究对TNT炸药进行了相同装药位置、不同装药量以及相同装药量、不同装药位置的钢筋混凝土靶中爆炸作用模拟试验，测试了不同情况下的压力曲线以及典型位置的质点加速度并观测爆炸后效。

**收稿日期**：2009-03-21； **修回日期**：2009-07-15
**基金项目**：国家重大安全基础研究项目资助
**收稿日期**：顾晓辉(1964—)，男，教授，博士生导师，主要从事弹药侵彻及其爆炸研究。

## 1 试 验

### 1.1 炸药和靶体

药柱为压装 TNT，尺寸分别为 Φ30 mm × 60 mm、Φ30 mm × 90 mm 和 Φ50 mm × 50 mm，$\rho \geqslant 1.58 \times 10^3$ kg/m$^3$ 的裸露药柱，质量分别为 67、100 和 155 g。

靶材为 C-35 混凝土，无侧限抗压强度约为 35 MPa，密度约为 2 500 kg/m$^3$，预制 28 d。钢筋混凝土的体积含筋率为 2%。

### 1.2 试验方法

测试系统的布置如图 1 所示。试验前将药柱置于炮孔底部，炮孔轴线与钢筋混凝土靶中轴线重合，药柱（炮孔底面）距靶板右端面 200 mm 或 400 mm 处（如图 1 所示），装药初始参数见表 1，试验时采用 8 号电雷管起爆。

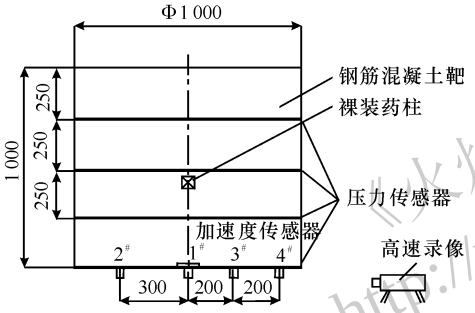



**图 1 试验布置示意图**

Fig. 1 Sketch map of experiment

**表 1 装药的初始参数**

Table 1 Initial parameters of explosive charge

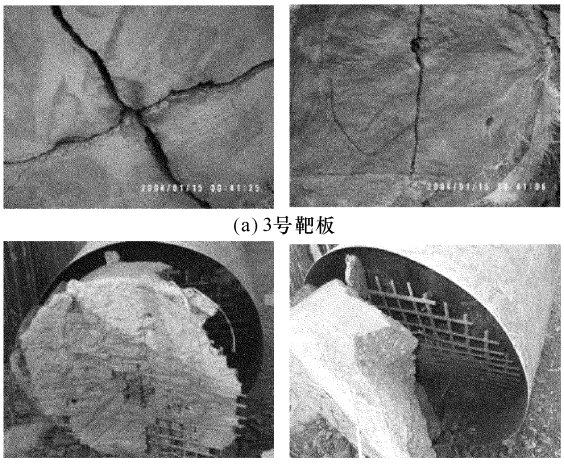
| 序号 | 药柱尺寸/mm | 药柱质量/g | 炸点位置/mm |
|---|---|---|---|
| 1 | Φ30×60 | 67 | 400 |
| 2 | Φ30×60 | 67 | 200 |
| 3 | Φ30×90 | 100 | 400 |
| 4 | Φ30×90 | 100 | 200 |
| 5 | Φ50×50 | 155 | 400 |
| 6 | Φ50×50 | 155 | 200 |

钢筋混凝土靶的直径和厚度均为 1 m，试验靶材用厚约为 2 mm 的钢箍箍紧，保证其径向可近似看作无限介质，轴向近似于实际情况。试验时，为避免无限地面的影响，将靶体水平放置。分别在药柱轴线下方及径向中心的不同距离处预埋多个压力传感器，并留出引线。同时在试验靶的下端面典型位置处预设加速度传感器，并留出引线。现场试验前，将各传感器的引线通过导线经电荷放大器与动态数据采集系统进行连接，当药柱引爆后即可通过动态数据采集仪测试并记录靶中不同位置的压力及下端面典型点的自由加速度。若端面有抛掷体崩落现象，利用动态分析仪观察并测试抛掷体的初速，并回收抛掷体，称其质量；同时测量炸坑形状及各种数据。试验中预制了多个钢筋混凝土靶，并预设砂坑，用来回收抛掷体，最后拍摄照片存档。

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验现象

试验后可观察到：1 号试验靶体下端面的钢筋漏斗形状突出 140 mm，直径约为 600 mm，下端面底座钢垫飞出约 6.5 m；2 号试验靶体上、下端面基本无变化，且无典型飞片飞出；3 号试验靶体上端面钢筋层外的混凝土层全被震出，向外抛散，漏斗形状底部尺寸约为 240 mm × 190 mm，漏斗上部直径约为 700 mm，下端面的底座钢垫突出约 30 mm，但未被震离靶体下端面，下端面无典型飞片飞出；4 号试验靶体上端面有一贯穿靶面的长裂纹，但宽度较小，下端面基本无变化，且无典型飞片飞出；5 号试验靶体下端面爆洞长度约为 110 mm，截面尺寸约为 120 mm × 130 mm，外漏斗坑深度约为 200 mm，直径约为 700 mm，最下处钢筋网被震飞出，底座钢垫飞出约 5.4 m，靶材上端面 1 mm 厚的钢护板冲出一个大孔，尺寸约为 120 mm × 100 mm，钢筋网飞出 6.4 m 后被另一靶挡住，又折飞出 3.4 m；6 号试验下端面的钢筋层间的混凝土全被震出，向外抛散，底座钢垫飞出约 7.8 m，典型的试验结果见图 2。



(a) 3号靶板

(b) 6号靶板

**图 2 3 号靶板和 6 号靶板破坏照片**

Fig. 2 Photograph of the damage state of number 3 target and 6 target

装药起爆后，压力、加速度传感器的敏感器件发生变形，将相应的信号转化为电压信号，通过电荷放大器放大后，输入动态数据采集仪。测得不同装药质

量、不同炸点位置情况下，典型位置处介质的质点加速度及压力结果如表 2 所示。考虑到本试验的主要目的在于测试装药对钢筋混凝土靶的爆炸作用，所关心的两个重要参数为压力和加速度的峰值，因此只将测到的数据经过动态数据采集仪自带的滤波程序进行了简单的处理。需要指出的是通过压力、加速度传感器测到的是电压－时间历程，需通过一定的转换公式换算成相应的压力、加速度时间曲线。本研究给出典型位置的压力（电压值）随时间的变化曲线如图 3 和图 4 所示。

**表 2　传感器测量得的质点加速度和压力**

Table 2　Pressure and particle acceleration determined by sensor

| 传感器 | 质点加速度/$10^3$ g | 传感器 | $p$/MPa |
|---|---|---|---|
| 1-1 | ＞6 | 1-2 | 46 |
| 3-1 | | 1-4 | 10 |
| 5-1 | ＞12 | 2-1 | |
| 2-1 | ＞10 | 3-1 | 40 |
| 4-1 | ＞9 | 1-3 | 48 |
| 6-1 | | 2-2 | 30 |

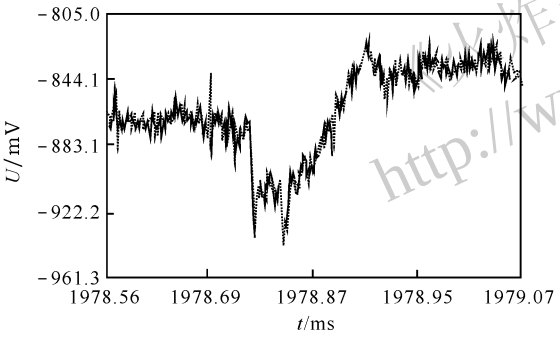



**图 3　典型位置的压力－时间曲线**

Fig. 3　Experimental pressure curve of critical positions

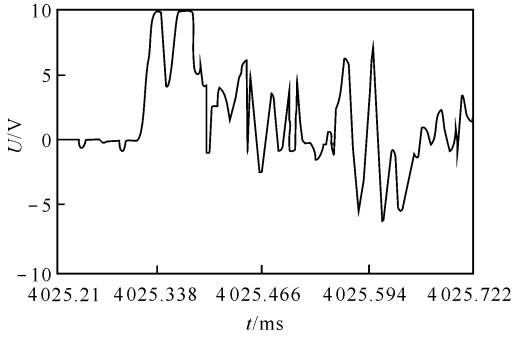



**图 4　典型位置的质点加速度曲线**

Fig. 4　The particle acceleration curve of critical position

### 2.2　结果分析

由图2 可知，在C-35 混凝土固体介质中，不论药柱长径比如何，药量小于100 g 的实验靶体均未被破坏，仅在端面产生了裂缝。由于靶体大小的不同，产生的裂缝大小也不同，但形状基本相近。而药量大于100 g 的实验靶体基本都被炸开，主要是靶体自身整体的破坏，被炸成较大的碎块，而抛掷体的飞片现象不多。

由表 2 可知，TNT 在混凝土介质中爆炸后，一部分能量对周围的介质引起扰动，并以波动形式向外传播。所测得的端面质点加速度信号波形相近，重复性较好，且数量级均在 $10^3$～$10^4$ g 量级上，可以初步断定无论装药量大小如何，在近距的端面质点加速度值非常大，为 $10^4$ g 量级。

试验中所测得的压力信号，在较近处所测值较大，较远处衰减很快。由于混凝土介质认为是不可压缩介质，因而在较远处可借鉴水中爆炸的研究成果进行研究。

考虑到TNT 装药和靶体的不同情况，试验基本无完整的炸坑现象，即靶体本身破坏或产生裂缝现象，同时基本上未形成典型的抛掷体飞片现象。靶体本身破坏后产生的全是较大的碎块，而无较小的碎粒，大多数情况下本身也无抛掷体。

综合测试结果表明，所测得的端面质点加速度、回收的抛掷体飞片质量和数量、所拍摄的飞行轨迹以及炸坑的形状和大小等，均说明混凝土靶中的爆炸作用与主装药的药量、最佳埋深、飞片的质量与速度分布、固体介质中的压力精确测试及其传播过程的精确理论描述等问题密切相关，其中埋深与装药量对爆炸作用的影响很大，需进行深入研究。

## 3　结　论

（1）TNT 的装药量小于100 g 时，无法将靶体破坏。药量大于100 g 时，靶体产生整体破坏，但无爆炸抛掷体飞片。爆炸近区端面质点加速度达到 $10^4$ g 量级。

（2）装药的爆炸作用与多个因素有关，包括主装药的药量、最佳埋深，其中装药量以及埋深对其影响很大。上述试验结论为后续的理论及工程研究提供可靠的数据参考。

**参考文献：**

[1]　郑应民，顾晓辉，王树有. 混凝土靶中炸测试方法研究[J]. 弹道学报，2003，15(4)：51-54.
ZHENG Ying-min，GU Xiao-hui，WANG Shu-you. A study on test methods of explosion in concrete targets[J]. Journal of Ballistics，2003，15(4)：51-54.

[2] 王清洁,顾文斌,夏为国,等. 多层介质中爆炸破坏效应的实验研究[J]. 工程爆破,2003(6):7-11.
WANG Qing-jie, GU Wen-bin, XIA Wei-guo, et al. An experimental study on damage effect caused by an explosion in multilayer medium [J]. Engineering Blasting, 2003(6):7-11.

[3] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏效应研究[J]. 中国工程科学,2006,8(8):55-60.
ZHOU Ning, REN Hui-qi, SHEN Zhao-wu, et al. Experimental study on the damage effect of projectile explosive in multi-layer medium [J]. Engineering Science, 2006,8(8):55-60.

[4] 宋浦,顾晓辉,王晓鸣,等. 混凝土中的爆坑实验研究[J]. 火炸药学报,2005,28(2):60-62.
SONG Pu, GU Xiao-hui, WANG Xiao-ming, et al. Experimental investigation on cratering of concrete [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2005,28(2):60-62.

[5] 谭可可,葛涛,陈伟,等. RPC力学参数及抗接触爆炸性能试验[J]. 爆破,2007,24(1):6-9.
TAN Ke-ke, GE Tao, CHEN Wei, et al. Tests on mechanical parameters of RPC and its capabilities under contact explosion[J]. Blasting, 2007,24(1):6-9.

[6] 李小军,陈智刚,陈秀文,等. 多层介质中装药起爆位置对爆炸能量传递影响的数值模拟[J]. 工程爆破,2007,13(1):20-25.
LI Xiao-jun, CHEN Zhi-gang, CHEN Xiu-wen, et al. Numerical simulation on effect of detonating position of charge on transmission of blast energy in multilayer medium[J]. Engineering Blasting, 2007, 13(1):20-25.

[7] 武海军,黄风雷,付跃升,等. 钢筋混凝土中爆炸破坏效应数值模拟分析[J]. 北京理工大学学报,2007,27(3):200-204.
WU Hai-jun, HUANG Feng-lei, FU Yue-sheng, et al. Numerical simulation of reinforced concrete breakage under internal blast loading[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(3):200-204.

[8] 肖川,宋浦,梁安定. 炸药水中爆炸规律的研究进展[J]. 火炸药学报,2006,29(6):19-26.
XIAO Chuan, SONG Pu, LIANG An-ding. Research development of underwater explosion mechanism[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(6):19-26.

[9] 施鹏,辛凯,杨秀敏,等. 土中装药不同埋深爆炸试验研究[J]. 工程力学,2006,23(12):171-174.
SHI Peng, XIN Kai, YANG Xiu-min, et al. Experimental study of explosion with different burial depths in soil [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(12):171-174.



(上接第20页)

**参考文献:**

[1] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995:98-118.

[2] 谭志宏,唐春安,朱万成,等. 含缺陷花岗岩破坏过程中的红外热像试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2977-2981.
TAN Zhi-hong, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Experimental study on infrared thermal image for failure process of granite with fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2977-2981.

[3] 刘浩,李飞. 红外热像技术在材料疲劳研究中的应用[J]. 机械管理开发,2008,24(2):79-80.
LIU Hao, LI Fei. Application of infrared thermographic technology in materials fatigue research[J]. Mechanical Management and Development, 2008, 24(2):79-80.

[4] Yang B, Liaw P K, Wang G, et al. Insitu thermographic observation of mechanical damage in bulk-metallic glasses guring fatigue and tensile experiments[J]. Intermetallics, 2004,12:1265-1274.

[5] 刘娜,才鸿年,王鲁,等. 三维连通网状SiC陶瓷/Zr基非晶复合材料动态变形特征[J]. 北京理工大学学报,2007,27(1):77-81.
LIU Na, CAI Hong-nian, WANG Lu, et al. Dynamic deformation and fracture behavior of 3D-Net SiC/ Zr2 based amorphous matrix composites[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007,27(1):77-81.

[6] 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 金属低周疲劳的能量耗散与热发射[J]. 机械科学与技术,2003,22(5):799-801.
YAO Lei-jiang, TONG Xiao-yan, Lü Sheng-li. Energy dissipation and thermal emission of metals under low cycle fatigue[J]. Mechanical Science and Technology, 2003,22(5):799-801.