文章编号：1003-1480（2023）01-0042-04

浅埋爆炸空气冲击波峰值压力计算方法研究

杨 峰[1]，翟红波[1]，苏健军[1]，李尚青[1]，肖 洋[1]，刘 伟[2]

（1. 西安近代化学研究所，陕西 西安，710065；2. 军事科学院防化研究院，北京，102205）

摘 要：为研究装药比例埋深和比例距离对浅埋爆炸空气冲击波峰值压力的影响，测试了 3 种比例埋深工况下，7 种比例距离处浅埋爆炸空气冲击波的峰值压力，结合量纲分析对试验数据进行拟合，得到了浅埋爆炸空气冲击波峰值压力的经验公式。结果表明：空气冲击波峰值压力随着比例埋深和比例距离的增加而减小；随着比例距离增加，比例埋深对空气冲击波峰值压力的影响减弱；空气冲击波峰值压力ΔP_D与装药量 Q、爆心距 R 和埋深 L 有关，其经验公式为：$\Delta P_D = 0.018\ 74\left(\frac{R}{L}\right)^{-1.157} \cdot D^{-1.924}$。

关键词：浅埋爆炸；空气冲击波；峰值压力；比例埋深；比例距离

中图分类号：TJ55 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.009

Research on the Calculation Method of Peak Pressure of Shallow Buried Explosion Air Shock Wave

YANG Feng[1], ZHAI Hong-bo[1], SU Jian-jun[1], LI Shang-qing[1], XIAO Yang[1], LIU Wei[2]

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065; 2. Research of Chemical Defense Academy of Military Science, Beijing, 102205)

Abstract: In order to study the influence of proportional burial depth and proportional distance of charges on the peak pressure of shallow buried explosion air shock wave, the peak pressure of shallow buried explosion air shock wave at 7 proportional distances under 3 proportional burial depth conditions was tested. The test data were fitted combined with dimensional analysis, and the empirical formula of the peak pressure of shallow buried explosion air shock wave was obtained. The results show that the peak pressure of air shock wave decreases with the increase of proportional burial depth and proportional distance; With the increase of proportional distance, the influence of proportional burial depth on the peak pressure of air shock wave decreases; Peak pressure of air shock wave ΔP_D is related to charge quantity Q, explosion center distance R and burial depth L, its empirical formula is: $\Delta P_D = 0.018\ 74\left(\frac{R}{L}\right)^{-1.157} \cdot D^{-1.924}$.

Key words: Shallow buried explosion; Air shock wave; Peak pressure; Proportional burial depth; Proportional distance

地雷和钻地弹等侵彻武器浅埋爆炸时产生的冲击波会对人员与建筑目标造成严重毁伤，因此对浅埋爆炸空气冲击波超压传播规律的研究至关重要。为此，各国研究人员从装药设计、爆炸机理与毁伤方式等方面开展了大量研究工作，取得了丰富成果[1-5]。穆朝民等[6]测试了饱和土爆炸破坏效应的宏观特征和压力波形，发现峰值压力与动量随着比例埋深的增加而增加。吴祥云等[7]试验研究了岩石中装药埋深对地表空气冲击波超压的影响，提出了不同埋深条件下地表空气冲击波超压峰值影响系数概念，并建立了计算公式，给出了超压峰值的预估方法。Bergeron 等[8]测试了不同埋深 100g C4 炸药正上方处地表空气冲击波的

收稿日期：2022-08-24

作者简介：杨峰（1995-），男，硕士研究生，从事毁伤评估技术研究。

通讯作者：刘伟（1979-），男，副研究员，从事核爆炸探测与核辐射监测技术研究。

峰值压力，并对其传播规律进行了分析。刘琦等[9]通过土中接触爆炸和半埋爆炸试验，发现随着炸药爆速和爆压增加，地面空气冲击波超压的冲量增大，在一定范围内，地冲击作用区角度与地面空气冲击波超压冲量和直接地冲击应力冲量之比呈线性相关关系。赵振宇等[10]研究发现浅埋爆炸在空气中产生冲击波的传播速度大于爆炸产物与砂土的喷射速度。但现有文献对浅埋爆炸空气冲击波强度的影响因素研究不足，缺乏空气冲击波峰值压力的经验公式。

本文试验研究了装药比例埋深和比例距离对浅埋爆炸空气冲击波峰值压力的影响，通过对试验数据进行拟合，并结合量纲分析，得到了不同比例埋深和比例距离条件下空气冲击波峰值压力的经验公式。

1　空气冲击波峰值压力量纲分析

浅埋爆炸空气冲击波强度的主要影响因素有炸药、土壤和空气的相关参数及测点位置。其中，炸药形状一般有球形、柱形及其它形状 3 类。对于爆炸冲击效应问题，其研究对象为炸药充分燃烧条件下，距离爆心一定距离外区域内物理量的演化，因此炸药形状的影响可忽略不计。为了更好的进行量纲分析，进行如下假设：（1）炸药满足多方指数状态方程，多方指数为γ_e，装药密度为ρ_e，装药量为 Q，爆速为 v，单位质量炸药所释放的能量为 E，炸药埋深为 L；（2）周围空气的初始密度为ρ_a，初始压力为 p_0，假设爆炸瞬间是绝热的，绝热指数为γ_a；（3）土壤的内摩擦角为σ，土壤密度为ρ_s，假设其压力与体应变的状态方程关系满足双线性，锁体应变为ε_l，压实段近似模量为 K。测点所在的水平爆心距为 R，则浅埋爆炸自由场冲击波峰值压力 ΔP_D 为：

$$\Delta P_D = f(Q,E,L,v,\rho_e,\gamma_e,\rho_a,p_0,\gamma_a,\rho_s,\sigma,\varepsilon_l,K,R) \quad (1)$$

式（1）中 14 个物理量有 3 个基本量纲，选取ρ_a、L 和 E 为参考物理量，根据π理论可得无量纲表达式：

$$\frac{\Delta P_D}{\rho_a E} = f\left(\frac{p_0}{\rho_a E},\frac{Q}{\rho_a L^3},\frac{v}{\sqrt{E}},\gamma_e,\frac{\rho_e}{\rho_a},\gamma_a,\frac{\rho_s}{\rho_a},\frac{\sigma}{\rho_a E},\varepsilon_l,\frac{K}{\rho_a E},\frac{R}{L}\right) \quad (2)$$

从工程应用角度考虑，空气密度可视为不变量，空气绝热指数为固定常数。相对于爆炸产生的压力，空气的初始大气压可忽略不计，则式（2）可化简为：

$$\frac{\Delta P_D}{E} = f\left(\frac{1}{E},\frac{Q}{L^3},\frac{v}{\sqrt{E}},\gamma_e,\rho_e,\rho_s,\frac{\sigma}{E},\varepsilon_l,\frac{K}{E},\frac{R}{L}\right) \quad (3)$$

采用相同的炸药进行缩比试验，则多方指数γ_e、装药密度ρ_e、单位质量炸药所释放的能量 E、爆速 v、空气的初始密度ρ_a、初始压力 p_0以及绝热指数γ_a均为常数。式（3）可进一步化简为：

$$\Delta P_D = f\left(\frac{Q}{L^3},\rho_s,\sigma,\varepsilon_l,K,\frac{R}{L}\right) \quad (4)$$

对于近地表爆炸，土壤压实段状态方程参数可以忽略。当缩比模型与最初使用的土壤材料完全相同时，土壤的内摩擦角σ、土壤密度ρ_s均为常数，则式（4）可进一步化简为：

$$\Delta P_D = f\left(\frac{L}{Q^{1/3}},\frac{R}{L}\right) \quad (5)$$

2　试验

2.1　试验样品及仪器

试验样品为 TNT 裸药，质量为 1 kg，密度为 1.6 g·cm^{-3}，TNT 裸药及其布设位置如图 1 所示。图 1 中传爆药柱为 JH-14 炸药，质量为 12.5 g，尺寸为Φ20mm×20mm。起爆雷管为 8 号电雷管，采用上端面中心起爆方式。由于传爆药柱质量相对于 TNT 装药过小，在工程实际中不考虑传爆药柱的影响。



（a）TNT 裸药　　（b）TNT 布设位置

图 1　试验采用的 TNT 样品及其布设位置

Fig.1　TNT samples used in the test and its layout position

冲击波压力测试装置由压电传感器、ICP 信号适配器和数据采集仪组成。采用 PCB 公司的 113 系列压电传感器，其性能指标满足：（1）谐振频率大于 500 kHz；（2）非线性度小于 1%；（3）上升时间小于 1 μs。采用 PCB 公司的 482C05 型信号适配器对压电传感器

进行动态解调，输出信号直接连接 HBM 数据采集仪。单通道冲击波采样速率不低于 1 MS/s，单通道记录长度不小于 100 kS。

2.2 试验布置

在靶场平整地面上根据试验工况确定爆心位置，在与爆心距离分别为 1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，3.5，4.0 m 处布设 7 个压电传感器，使传感器上表面与地表面保持平齐，用于测量掠过地表的爆炸冲击波，如图 2 所示。根据比例距离 $Z=R\cdot Q^{-1/3}$（R 为爆心距，m；Q 为装药质量，kg），7 个测点对应的比例距离 Z 分别为 1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，3.5，4.0 m·kg$^{-1/3}$。

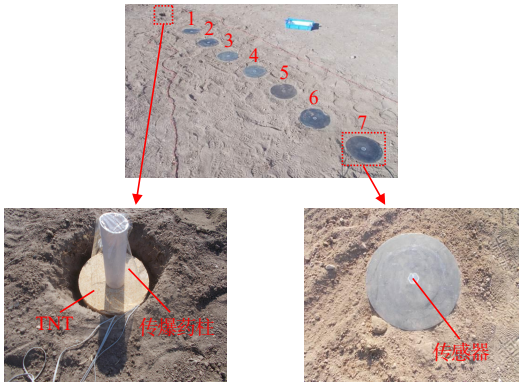


图 2 试验现场布设图

Fig.2 Schematic diagram of test site layout

2.3 试验工况

3 种试验工况参数如表 1 所示。其中，埋深 L 为地表面到炸药中心的垂直距离；比例埋深 $D=L\cdot Q^{-1/3}$，m·kg$^{-1/3}$；Q 为装药质量，kg。

表 1 试验工况参数

Tab.1 The test parameters

试验编号	TNT			埋深 L/m	比例埋深 D/(m·kg$^{-1/3}$)
	质量/kg	直径/mm	高度/mm		
1	1	98	85	0.1	0.1
2	1	98	85	0.2	0.2
3	1	98	85	0.3	0.3

3 结果分析与讨论

3.1 装药比例距离对空气冲击波峰值压力的影响

比例埋深为 0.1 m·kg$^{-1/3}$ 时，7 个测点的冲击波压力波形如图 3 所示。由图 3 可知，7 个测点的冲击波压力均在极短时间内达到峰值，然后缓慢减小、出现负压，最后稳定在 0 MPa 附近。且随着比例距离增加，峰值压力递减，递减幅度随比例距离增加而减小。比例距离小的测点峰值压力大，波峰陡峭，正压作用时间短，产生的负压也较大。

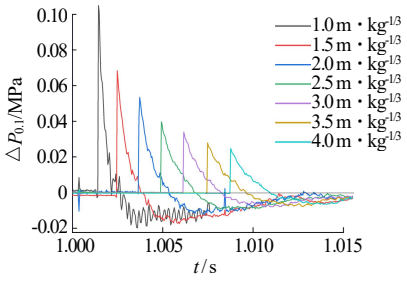


图 3 不同比例距离处实测冲击波压力波形（D=0.1m·kg$^{-1/3}$）

Fig.3 Measured pressure waveform at different propotional distances（D=0.1m·kg$^{-1/3}$）

3.2 装药比例埋深对空气冲击波峰值压力的影响

比例埋深分别为 0.1，0.2，0.3 m·kg$^{-1/3}$ 时，冲击波峰值压力随比例距离的变化规律如图 4 所示。由图 4 可知，随着比例埋深和比例距离增加，冲击波峰值压力呈减小趋势，并最终稳定在大气压附近。随着比例距离从 1.0 m·kg$^{-1/3}$ 逐渐增加至 4.0 m·kg$^{-1/3}$，比例埋深分别为 0.1，0.2，0.3 m·kg$^{-1/3}$ 处的峰值压力衰减率依次为 76.34%、86.74%、85.63%。当比例距离为 1.0 m·kg$^{-1/3}$ 时，比例埋深分别为 0.2 m·kg$^{-1/3}$ 和 0.3 m·kg$^{-1/3}$ 处冲击波峰值压力是比例埋深为 0.1 m·kg$^{-1/3}$ 处的 67.17%和 47.66%。当比例距离为 4.0 m·kg$^{-1/3}$ 时，比例埋深分别为 0.2 m·kg$^{-1/3}$ 和 0.3 m·kg$^{-1/3}$ 处冲击波峰值压力是比例埋深为 0.1 m·kg$^{-1/3}$ 处的 37.66%和 28.96%。由此可见，随比例距离增加，比例埋深对浅埋爆炸空气冲击波峰值压力的影响减弱。

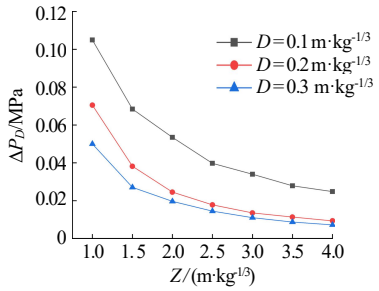


图 4 冲击波峰值压力变化规律

Fig.4 Peak pressure variation law

为了更好的分析比例埋深对空气冲击波峰值压力的影响，以比例埋深为 0.1 m·kg$^{-1/3}$ 时测得的冲击波峰值压力为基准，定义折减系数 $\beta=\Delta P_D/\Delta P_{0.1}$，$\Delta P_D$ 为比例埋深为 D 时的冲击波峰值压力，MPa；$\Delta P_{0.1}$ 为比例埋深为 0.1 m·kg$^{-1/3}$ 时冲击波峰值压力，MPa。不同比例埋深下折减系数的变化规律如图 5 所示。由图

5 可知，随着比例距离和比例埋深增加，折减系数逐渐减小。

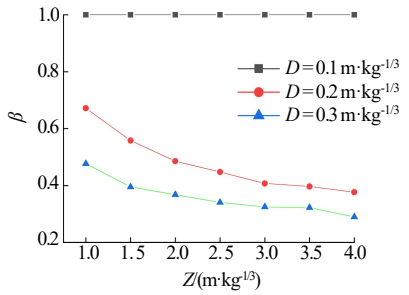


图 5　折减系数变化规律

Fig.5　Change law of reduction coefficient

3.3　空气冲击波超压经验公式

由公式（5）可知，浅埋爆炸空气冲击波的峰值压力ΔP_D与装药量 Q、爆心距 R 及埋深 L 有关。以 R/L 和比例埋深 D 为自变量，对 D 分别为 0.1，0.2，0.3 $m\cdot kg^{-1/3}$时的试验数据进行拟合，得到ΔP_D的经验公式：

$$\Delta P_D = 0.018\ 74\left(\frac{R}{L}\right)^{-1.157}\cdot D^{-1.924} \qquad (6)$$

式（6）中：$10/3\leqslant R/L\leqslant 40$，$0.1\leqslant D\leqslant 0.3$。

4　结论

试验研究了装药比例埋深和比例距离对浅埋爆炸空气冲击波超压传播规律的影响，得到以下结论：

（1） 空气冲击波峰值压力随着比例埋深和比例距离的增大而减小。随比例距离增加，比例埋深对浅埋爆炸空气冲击波峰值压力的影响减弱。

（2）以 R/L 和比例埋深 D 为自变量，结合量纲分析对试验数据进行拟合，得到不同比例埋深条件下不同比例距离处的空气冲击波峰值压力ΔP_D的经验公式：

$$\Delta P_D = 0.018\ 74\left(\frac{R}{L}\right)^{-1.157}\cdot D^{-1.924}$$

（$10/3\leqslant R/L\leqslant 40$，$0.1\leqslant D\leqslant 0.3$）。

参考文献：

[1] 杨石刚, 蔡炯炜, 杨亚, 等. 城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的灾害效应(I):冲击波在地面的传播[J/OL]. 爆炸与冲击, 2022: 1-15[2022-08-21].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51. 1148.03.20220715.0824.004.html.

[2] 赵红玲, 侯爱军, 童怀峰, 等. 石灰岩中不同埋深爆炸自由场直接地冲击参数的预计方法[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 290-294.

[3] Mussa M H, Mutalib A A, Hamid R, et al. Assessment of damage to an underground box tunnel by a surface explosion [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017(66): 64-76.

[4] Wu J, Zhou J, Xu Y, et al. Dynamic responses of blast- loaded shallow buried concrete arches strengthened with BFRP bars[J]. Materials, 2022, 15(2): 535.

[5] 顾晓辉, 宋浦, 王晓鸣. TNT 在钢筋混凝土靶中爆炸的试验研究[J].火炸药学报, 2009, 32(05): 33-36.

[6] 穆朝民,任辉启,李永池, 等.变埋深条件下饱和土爆炸能量耦合系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(05): 1 574-1 578.

[7] 吴祥云,曲建波,李宝宝,等.岩石中装药埋深对地表空气冲击波超压的影响[J]. 防护工程, 2013(04): 23-26.

[8] Bergeron D, Walker R. Detonation of 100-gram anti-personnel mine surrogate charges in sand: A test case for computer code validation[R]. DRES-SR 668, 1998.

[9] 刘琦,翟超辰,张跃飞,等.地面和埋置爆炸土中地冲击作用分区数值模拟及试验研究[J].爆炸与冲击, 2022, 42(8): 1-19.

[10] 赵振宇,周贻来,任建伟,等. 浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(4): 77-89.