

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.003

空气冲击波在爆炸塔有限空间内传播规律研究*

陆路^{1,2}, 蒲传金^{1,2}, 肖定军^{1,2}, 刘向前^{1,2}, 薛冰^{1,2}, 秦晓星^{1,2}

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 绵阳 621010; 2. 非煤矿山安全技术四川省高等学校重点实验室, 绵阳 621010)

摘要: 为了研究爆炸塔内乳化炸药爆炸冲击波的传播规律, 利用冲击波传感器对不同药量和不同距离条件下冲击波超压进行了测试。结果表明: 空爆冲击波超压随着爆心距的增加而减小但并不是呈线性递减, 并且随着药量的增大而增大; 反射波平均超压约为入射波的1.2倍。通过比较实验测试值与传统的理论经验公式计算值, 发现入射冲击波超压相对误差在5%~40%, 主要因为乳化炸药的TNT当量系数选择偏小; 而反射冲击波超压相对误差在50%~133%, 其原因为传统的反射超压计算公式主要针对刚性壁面, 但爆炸塔内地表和墙壁铺设的为多孔隙材料, 具有一定的吸能作用, 且雷管碎片及爆炸产物飞出影响爆炸塔内流场。最后, 基于实验测试结果及爆炸相似律原理回归拟合出适用于爆炸塔的冲击波超压计算公式, 经过拟合修正后平均相对误差约在12%左右。

关键词: 爆炸塔; 乳化炸药; 壁面反射; 冲击波超压; 相似律

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)02-0013-07

Propagation Law of Air Shock Wave of Emulsion Explosive in Explosion Tower

LU Lu^{1,2}, PU Chuan-jin^{1,2}, XIAO Ding-jun^{1,2}, LIU Xiang-qian^{1,2}, XUE Bing^{1,2}, QIN Xiao-xing^{1,2}

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Non-Coal Mine Safety Technology Key Laboratory of Sichuan Province Colleges and Universities, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to further investigate the propagation law of the blast shock wave of emulsion explosive in the blast tower, the shock wave overpressure of different dosages with different distances were measured by the shock wave sensor. And the results show that the overpressure of air explosion shock wave decreases with the increase of the blast center distance, but not decreases linearly, and increases with the increase of the amount of explosive quantity. The average overpressure of the reflected wave is about 1.2 times that of the incident wave. The relative error of the overpressure of the incident shock wave is 5%~40% through comparing the experimental test value with the theoretical calculating value, mainly because the selection of the TNT equivalent coefficient of emulsion explosive is small. Moreover, the relative error of reflected shock wave overpressure is between 50% and 133%. The reason is that the traditional calculation formula of reflected overpressure is mainly aimed at the rigid wall surface. But the surface and wall of the explosion tower are made of multi-porous materials, which have the effect of energy absorption. Finally, based on the experimental test results and the explosion similarity law, the formula for calculating the shock wave overpressure applicable to the explosion tower was obtained by regression, and the average relative error after fitting correction was about 12%.

Key words: explosion tower; emulsion explosive; wall reflection; shock wave overpressure; similarity law

近年来,乳化炸药的使用量非常大且用途非常广,绝大多数矿山、隧道和路基施工、以及爆破拆除等方面使用乳化炸药居多,但乳化炸药爆炸时产生的空气冲击波超压使邻近建筑物门窗玻璃破碎、人和动物受伤的案例时有发生。因此研究乳化炸药爆炸冲击波传播规律尤为重要^[1]。

目前国内外已有不少学者对炸药爆炸冲击波特性进行了研究:王建灵等利用空中爆炸测试系统比较了3种炸药在相同测点处的冲击波峰值超压和冲量的大小,并研究了冲击波峰值超压和冲量与比例距离的关系^[2]。段晓瑜等研究了空中爆炸冲击波的地面反射超压,并采用幂指数公式对空中爆炸冲击波超压与对比距离之间关系进行拟合^[3]。赵新颖等采用温压炸药在野外进行近地空爆实验,并用TNT作对比实验,获取了温压炸药与TNT的冲击波参数并拟合得到相似律公式^[4]。宫婕等利用柱形爆炸容器内炸药爆炸实验测试结果和爆炸相似律原理拟合出了适用于柱形爆炸容器环境下的冲击波超压计算公式^[5]。而关于乳化炸药空爆冲击波的传播规律等方面的文章非常少。很多研究者在针对乳化炸药爆炸冲击波参数的选择上,依然采用的类比推理的方法,这个为类似爆炸危害性影响等提供了一定的参考,但是一般误差较大。

而爆炸塔作为一种特殊的抗爆建筑结构,爆炸物在其内部爆炸,能够有效约束爆炸产生的冲击波,故其被广泛应用于工业、交通、水利、军事科研及矿山开采等领域。但爆炸塔内冲击波超压计算不能直接根据前人经验公式计算,需要对其进行修正。基于此,主要通过爆炸塔内小药量的乳化炸药空爆冲击波测试实验,测得不同药量和不同距离条件下冲击波压力时程曲线,并分析2号岩石乳化炸药空爆入射波和木质地表反射波之间的关系,根据爆炸相似律原理对冲击波超压计算公式进行拟合,得出了适用于爆炸塔内的超压计算公式。

1 空爆冲击波基本理论

1.1 空爆冲击波的传播机制

近地表空爆冲击波类型有爆炸入射波和爆炸反射波。爆炸冲击波在近地表传播规律非常复杂,在

炸药空爆后,前期空爆冲击波与无限空间传播规律一致,随着冲击波的传播,冲击波将作用于地面或壁面后会发生压缩反射,由于冲击波入射角度、地表或壁面刚度、距离等原因造成反射的种类不同,如正反射、正规反射和马赫反射^[6]。

如图1所示,将炸药悬置一定高度空爆,空爆时产生的冲击波入射波(A波阵面)以球形向外传播,当传播到地表后,在地表附近进行压缩反射,形成反射冲击波(B波阵面)。由于反射波速大于入射波速度,在距离地面一定距离处会发生交叉会合(D、E、F点),同时在会合处激发形成一个新的波(C波阵面)向前传播^[2]。

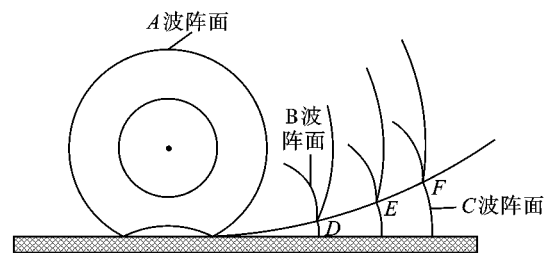


图1 空爆冲击波地表反射示意图

Fig. 1 Sketch of surface reflection of air explosion shock wave

1.2 空爆冲击波超压计算方法

关于无限空间空爆冲击波的预测很多人给出了不同的计算方法,各计算公式如下所示:

萨多夫斯基公式^[7]

$$\Delta P = \frac{1.07}{R^3} - 0.1, \bar{R} \leq 1 \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{0.076}{R} + \frac{0.255}{R^2} + \frac{0.65}{R^3} - 0.1, 1 \leq \bar{R} \leq 15 \quad (2)$$

Mills 公式^[8]

$$\Delta P = \frac{0.108}{R} - \frac{0.114}{R^2} + \frac{1.772}{R^3} \quad (3)$$

H L Brode 公式^[9]

$$\Delta P = \frac{6.7}{R^3} + 1, \Delta P \geq 10 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (4)$$

K-G 公式^[10]

$$\Delta P = 808 \times P \cdot \frac{1 + \left(\frac{\bar{R}}{4.5}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{0.048}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{R}{0.032}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{R}{1.35}\right)^2}} \quad (5)$$

W E Baker 公式^[11]

$$\Delta P = \frac{2.006}{R} + \frac{0.194}{R^2} - 0.004, \bar{R} [0.05 - 0.5] \quad (6)$$

收稿日期:2020-01-19

作者简介:陆路(1996-),男,河南省南阳人,硕士研究生,主要从事爆炸安全和爆炸力学性能研究,(E-mail) FindingLU@163.com。

通讯作者:蒲传金(1979-),男,四川省射洪人,副教授,主要从事工程爆破及矿山安全等方面的教学与科研工作,(E-mail) puchuanjin@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金青年基金(11802255)

$$\Delta P = \frac{0.67}{R} + \frac{3.01}{R^2} + \frac{4.31}{R^3}, \bar{R}[0.5 - 70.9] \quad (7)$$

$$\bar{R} = \frac{R}{Q^{1/3}} \quad (8)$$

叶晓华修正公式^[12]

$$\Delta P = \frac{0.084}{R} + \frac{0.27}{R^2} + \frac{0.7}{R^3} \quad (9)$$

式中: \bar{R} 为比例距离, $m/kg^{1/3}$; R 为爆心距, m ; Q 为炸药量(TNT当量), kg 。

对于无限空间空爆时,装药的对比高度应该满足公式^[13]

$$\frac{H}{\sqrt[3]{Q}} \geq 0.35 \quad (10)$$

式中: H 为药包悬置高度, m ; Q 为炸药量(TNT当量), kg 。

空爆冲击波传播特征为,炸药空爆后,空爆冲击波遇到理想(刚性)壁面时,速度突变为零,然后经过压缩聚集形成反射冲击波。关于冲击波反射计算公式,是由冲击波的基本关系式和绝热方程联立整理后得到的公式^[7,13]

$$\Delta P_2 = 2\Delta P_1 + \frac{(k+1)\Delta P_1^2}{(k-1)\Delta P_1 + 2kP_0} \quad (11)$$

式中: ΔP_1 为入射波峰值; ΔP_2 为反射波峰值; P_0 为未经扰动介质的压力; k 为空气的比热比。一般情况下 $k = 1.4$ 。

2 空爆冲击波测试实验

2.1 实验设计

实验分四组进行,装药均为球状,分别测量 10 g、20 g、30 g 和 40 g 药包距离传感器不同距离处的冲击波超压值。冲击波入射角大于 40° 时会形成马赫反射^[6],实验药包悬置高度为 0.8 m 时,爆心距 $R > 0.8 \sin 40^\circ = 1.07 \text{ m}$ 即可满足本次实验条件。故传感器布置位置如图 2 所示,选择爆心距为 1.2 m、1.6 m 和 2.0 m 三个位置处分别布置冲击波传感器 1 个。

2.2 冲击波测试系统

爆炸塔内空爆冲击波测试体系是由冲击波传感器、冲击波采集器、电子计算机构成。冲击波测试系统如图 3。

3 实验结果与分析

3.1 数据与分析

由于叶晓华修正公式应用比较普遍,在实验前,根据式(9)和(11)可以近似计算出空爆冲击波入射

超压峰值和反射超压峰值。计算结果和测试结果见表 1。空爆冲击波典型时程曲线如图 4。

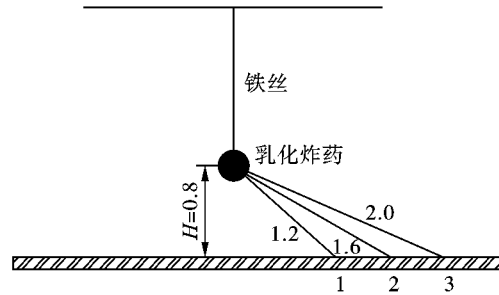


图 2 测点布置图(单位:m)

Fig. 2 Survey station layout(unit:m)

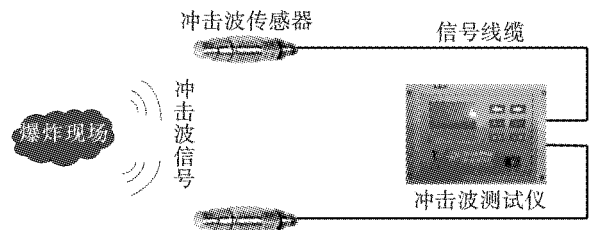


图 3 冲击波测试系统

Fig. 3 Shock wave testing system

表 1 冲击波计算值和测试值

Table 1 Shock wave calculation values and test values

药量/kg	测试类型	距离/m		
		1.2	1.6	2.0
0.01	入射值/kPa	37	26	14
	入射计算值/kPa	28	18	13
	反射值/kPa	41	33	20
	反射计算值/kPa	85	57	30
0.02	入射值/kPa	46	40	37
	入射计算值/kPa	41	25	18
	反射值/kPa	54	44	43
0.03	反射计算值/kPa	108	92	85
	入射值/kPa	55	43	33
	入射计算值/kPa	52	32	22
0.04	反射值/kPa	57	53	43
	反射计算值/kPa	133	100	75
	入射值/kPa	67	48	44
	入射计算值/kPa	62	37	26
	反射值/kPa	77	59	56
	反射计算值/kPa	168	114	103

根据表 1 冲击波计算值和实测值,发现入射波计算值均小于实测值,这可能是由于乳化炸药 TNT 当量系数选择偏小。而反射波计算值远大于测试值,主要原因有:1)在有限空间中爆炸冲击波受到壁面的约束,在壁面间产生多次反射,在装药量不是

很大的情况下,各个反射波之间相互作用相互叠加,会对冲击波超压的计算产生很大影响,而且刚性壁面对冲击波的反射作用较强^[14],传统的反射超压计算大多针对刚性壁面,但是塔内地表与墙壁均铺设

的木板;2)炸药爆炸后,雷管碎片以及爆炸产物向不同的方向飞去,对爆炸塔内流场产生影响;3)炸药爆炸产生的高温高压气体会对传感器测量精度产生影响。

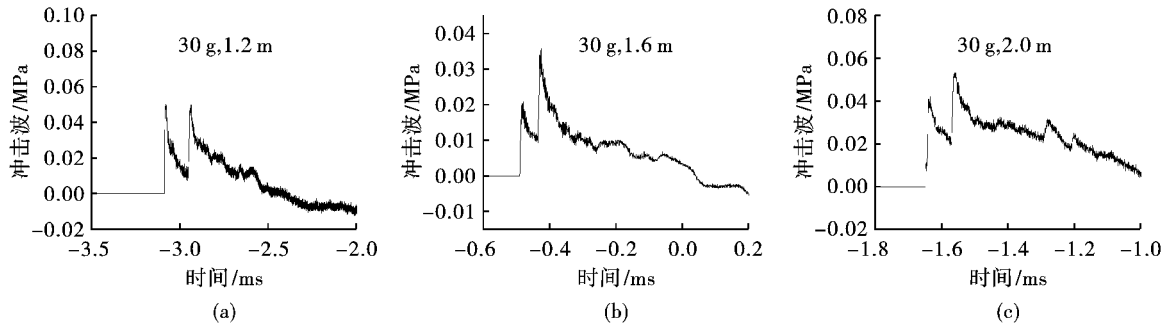


图4 30 g药包距传感器不同距离处的冲击波时程曲线

Fig. 4 Shock wave time-history curves of 30 g charge at different distances from the sensor

依据图4可以看出:1)爆炸塔内地表附近冲击波超压存在有两个峰值,一个为空爆冲击波入射超压峰值,一个为反射超压峰值,反射超压滞后于入射超压,且反射超压峰值大于入射超压峰值。2)随着爆心距的增加,入射波和反射波波形峰值之间时间间隔逐渐增大(时间间隔从0.1 ms增加到0.35 ms),与Damse R S结论一致^[15]。

3.2 爆炸塔内空爆冲击波传播规律

3.2.1 入射冲击波的传播规律

根据实验测得的空爆冲击波超压峰值来绘制出入射波超压峰值随爆心距变化曲线如图5,从图中可以看出,爆炸塔内空爆入射冲击波超压随着爆心距的增加而减小,随着药量的增大而增大且爆炸入射冲击波并不是随着爆心距的增加而呈线性递减。

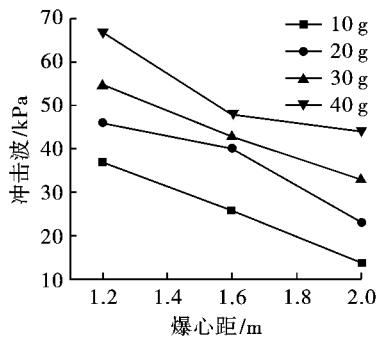


图5 冲击波入射超压随爆心距变化曲线

Fig. 5 Curve of incidental overpressure of shock wave with detonation center distance

为了保证仪器测试时间一致性,在实验开始前,冲击波测试仪的每个通道都提前进行同步处理。实验时,由于测点距离爆源较近,假设空爆冲击波是在均匀介质中无阻力传播,则可以通过冲击波时程曲线以及时间差值与测点位置差值计算出入射冲击波

的平均速度,不同实验药量下入射冲击波的速度见表2,入射冲击波速度随乳化炸药药量的增加并未呈现一定的规律性,且入射冲击波平均速度仅仅略大于声速,这可能与实验场地、采集设备、炸药质量等因素有关。

表2 入射冲击波速度表

Table 2 Incident shock wave velocity meter

药量/kg	0.01	0.02	0.03	0.04
入射冲击波速度/(m·s ⁻¹)	352	356	347	346

3.2.2 反射冲击波的传播规律

塔内空爆冲击波反射超压峰值随爆心距变化曲线如图6,可以看出,爆炸塔内空爆冲击波反射超压峰值随着爆心距增加变化规律与冲击波入射超压峰值变化规律一致。

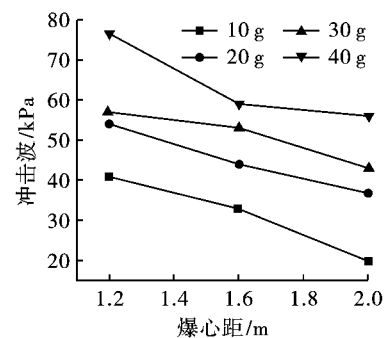


图6 冲击波反射超压随爆心距变化曲线

Fig. 6 Shock wave reflection overpressure versus detonation center distance

测试时受冲击波测试底座影响,冲击波传感器头部距离地表3.5 cm,通过冲击波入射超压峰值与反射超压峰值之间的时间间隔,可以计算出反射波平均波速见表3。

表 3 反射冲击波速度表

Table 3 Reflected shock wave velocity table

药量/kg	0.01	0.02	0.03	0.04
反射冲击波速度/(m·s ⁻¹)	472	551	534	513

经过表 2 和表 3 比较发现,反射波波速大于入射波波速,且反射波波速约为入射波的 1.5 倍。这是因为在靠近爆源投影点的地方,入射冲击波阵面和反射冲击波阵面始终保持分离状态,不过传播反射冲击波阵面的空气已经被初始冲击波加热和压缩,在已被加热压缩的空气中,反射波的传播速度要比入射波快的多。

3.2.3 入射超压和反射超压的关系

(1) 根据传统经验公式分析入射超压和反射超压的关系

根据表 1 的计算和实测结果,分别计算出爆炸塔内空爆入射冲击波超压和反射冲击波超压的相对误差见表 4。

表 4 空爆超压传统经验公式相对误差

Table 4 Relative errors of traditional empirical formula for air explosion overpressure

药量/kg	误差类型	距离/m		
		1.2	1.6	2.0
0.01	入射误差/%	-24.3	-30.8	-7.1
	反射误差/%	107.3	72.7	50.0
0.02	入射误差/%	-10.9	-37.5	-51.4
	反射误差/%	100.0	109.1	97.7
0.03	入射误差/%	-5.5	-25.6	-33.3
	反射误差/%	133.3	100.0	75.0
0.04	入射误差/%	-7.5	-22.9	-40.9
	反射误差/%	118.2	93.3	83.9

由表 4 可以看出,爆炸塔内入射冲击波超压均大于传统的计算值,相对误差约为 5% ~ 40% 之间,除 0.01 kg 实验药量外,其他实验相对误差随着爆心距的增加而增加,而反射波超压误差较大,实验误差在 50% ~ 133% 之间,这说明采用传统的自由场的预测公式进行爆炸塔内空爆冲击波超压预测具有很大的局限性。

(2) 根据实验数据分析入射波超压与反射波超压的关系

为了进一步分析入射波超压与反射波超压的关系,做相同实验药量不同测点实际测试得到的入射超压和反射超压随爆心距的变化关系曲线如图 7。从图中可以看出相同测点反射超压均大于入射超压,且通过计算比较发现反射波平均超压约为入射波平均超压的 1.2 倍,这与赵新颖的结论一致^[6],是由于入射波的压缩反射造成的。

根据公式(11)和表 1,采用经验公式计算空爆冲击波反射超压与入射超压关系时,反射波超压峰值约为入射波超压峰值的 2 倍左右,而实际测试结果为反射波平均超压峰值约为入射波平均超压的 1.2 倍,这可能是由于乳化炸药爆轰性能低于 TNT 和爆炸塔地表铺设厚度 50 mm 木板造成的。乳化炸药爆轰性能较低,本身产生爆炸冲击波就小于 TNT 爆炸冲击波;且地表铺设的木板是一种多孔材料,具有一定的吸能作用。因此,对于塔内乳化炸药空爆冲击波预测,不能完全采用军事领域有关 TNT 等一些烈性炸药经验预测公式进行预测计算。同时,证明了爆炸塔在设计时,沿爆炸塔墙壁内侧和地表铺设厚度 50 mm 木板是合理的,木板起到了很好的缓冲降振作用。

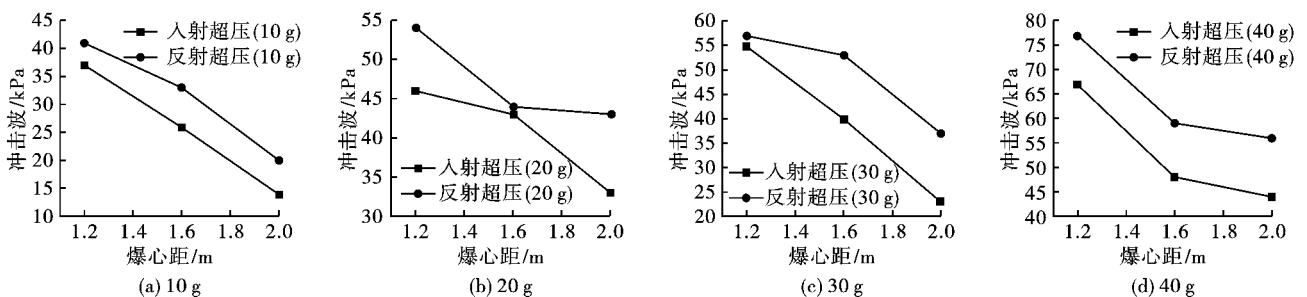


图 7 反射超压与入射超压随爆心距变化关系曲线

Fig. 7 Relation curve of reflective overpressure and incidental overpressure with detonation core distance

3.3 爆炸塔内空爆冲击波相似预测分析

关于空爆冲击波的传播规律,许多学者认为,炸药空爆冲击波在空气中的传播是经历从爆炸冲击波到声波的衰减过程^[16,17]。由 3.2 分析可知,直接采

用空爆冲击波经验公式进行预测,预测精度较低。因此,在对爆炸塔内空爆冲击波超压预测时,采用相似预测回归分析方法。经过文献阅读发现叶晓华修正公式运用较为广泛,因此,对塔内空爆冲击波超压

采用叶晓华修正公式进行相似回归预测。爆炸塔内空爆冲击波入射超压相似分析预测式(12)所示。

$$\Delta P_{\lambda} = \frac{k_1}{R} + \frac{k_2}{R^2} + \frac{k}{R^3} \quad (12)$$

式中: ΔP_{λ} 为空爆入射超压,MPa; \bar{R} 为装药对比距离,m/kg^{1/3};Q 为炸药量(TNT 当量),kg。

对4次实验数据进行回归分析得出回归预测公式见式(13)

$$\Delta P_{\lambda} = \frac{0.152}{R} + \frac{0.637}{R^2} - \frac{1.368}{R^3}, r^2 = 0.99 \quad (13)$$

式中: ΔP_{λ} 为爆炸塔内入射超压,MPa; r^2 为拟合优度系数。

式(13)的拟合优度系数 r^2 为0.99,表明运用该方法进行回归拟合是合理的。

将入射冲击波实验值与回归拟合式(13)中的计算值进行比较,得出实测值与预测值见表5,由表中数据可知,将入射冲击波超压实际测试值与预测值进行对比发现测点入射波误差在10%左右,平均绝对误差约为12.1%。证明了式(13)运用于爆炸塔内小药量乳化炸药空爆冲击波的入射超压预测是合适的。

表5 入射冲击波实测值与预测值的关系

Table 5 Relationships between measured and predicted values of incident shock waves

药量/ kg	测试 类型	距离/m			平均 误差/%
		1.2	1.6	2.0	
0.01	实测值/kPa	37	26	14	12.1
	预测值/kPa	40	29	22	
0.02	实测值/kPa	46	40	37	
	预测值/kPa	51	37	29	
0.03	实测值/kPa	55	43	33	
	预测值/kPa	58	44	34	
0.04	实测值/kPa	67	48	44	
	预测值/kPa	63	48	38	

4 结论

(1) 冲击波速度与乳化炸药药量并没有必然的联系,可能与实验场地、采集设备、炸药质量等有关,因此有待进一步的探究;冲击波超压随着爆心距的增加而减小,随着药量的增大而增大且冲击波超压并不是随着爆心距的增加而呈线性递减。

(2) 实验设计的入射角大于40°,入射波发生压缩反射后,所测得的反射波为马赫波,这导致反射波波速和超压均大于入射波波速和超压,且反射波波

速约为入射波波速的1.5倍,反射波平均超压约为入射波平均超压的1.2倍。

(3) 采用相似回归拟合进行爆炸塔内空爆冲击波超压预测,预测效果较好,为进一步研究爆炸塔等密闭容器内空爆冲击波的预测提供了理论参考。

参考文献 (References)

- [1] 乔小玲,胡毅亭,彭金华,等. 岩石型乳化炸药的 TNT 当量[J]. 爆破器材,1998(6):5-8.
- [1] QIAO Xiao-ling, HU Yi-ting, PENG Jin-hua, et al. TNT equivalent of rock-type emulsion explosives [J]. Blasting Equipment, 1998(6):5-8. (in Chinese)
- [2] 王建灵,郭 炜,冯晓军. TNT、PBX 和 Hexel 空中爆炸冲击波参数的实验研究[J]. 火炸药学报,2008,31(6):42-44,68.
- [2] WANG Jian-ling, GUO Wei, FENG Xiao-jun. Experimental study on the parameters of TNT, PBX and Hexel blast wave in air [J]. Journal of Explosives, 2008, 31(6):42-44,68. (in Chinese)
- [3] 段晓瑜,崔庆忠,郭学永,等. 炸药在空气中爆炸冲击波的地面反射超压实验研究[J]. 兵工学报,2016,37(12):2277-2283.
- [3] DUAN Xiao-yu, CUI Qing-zhong, GUO Xue-yong, et al. Experimental study on overpressure reflected from the ground of explosive blast wave in air [J]. Journal of Military Engineering, 2016, 37(12):2277-2283. (in Chinese)
- [4] 赵新颖,王伯良,李 席. 温压炸药在野外近地空爆中的冲击波规律[J]. 爆炸与冲击,2016,36(1):38-42.
- [4] ZHAO Xin-ying, WANG Bo-liang, LI Xi. Law of shock wave in near-ground and air explosion of temperature and pressure explosives in the field [J]. Explosion and Impact, 2016, 36(1):38-42. (in Chinese)
- [5] 官 婕,汪 泉,李志敏,等. 柱形爆炸容器内爆炸冲击波的传播规律研究[J]. 爆破,2017,34(4):17-21,51.
- [5] GONG Jie, WANG Quan, LI Zhi-min, et al. Study on propagation law of blast wave in cylindrical explosion vessel [J]. Blasting, 2017, 34(4):17-21,51. (in Chinese)
- [6] 赵新颖,王伯良,李 席,等. 温压炸药爆炸冲击波在爆炸堡内的传播规律[J]. 含能材料,2016,24(3):231-237.
- [6] ZHAO Xin-ying, WANG Bo-liang, LI Xi, et al. Propagation law of blast wave in blast bunker of temperature and pressure explosive [J]. Energy-containing Materials, 2016, 24(3):231-237. (in Chinese)
- [7] 杜红棉,曹学友,何志文,等. 近地爆炸空中和地面冲击波特性分析和验证[J]. 弹箭与制导学报,2014,

- 34(4):65-68.
- [7] DU Hong-mian, CAO Xue-you, HE Zhi-wen, et al. Analysis and verification of characteristics of air and ground shock waves in near-earth explosions[J]. *Journal of Missile and Guidance*, 2014, 34(4):65-68. (in Chinese)
- [8] TOLBA A F F. Response of FRP-retrofitted reinforced concrete panels to blast loading[D]. Ottawa, Canada: Carleton University, 2001:12.
- [9] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge[J]. *Physics of Fluids*, 1959(2):217.
- [10] 龙建华, 苏红梅, 胡八一. 小当量密闭爆炸容器的设计[J]. *设计与计算*, 2005(11):86-87.
- [10] LONG Jian-hua, SU Hong-mei, HU Ba-yi. Design of small equivalent sealed explosive vessel[J]. *Design and Calculation*, 2005(11):86-87. (in Chinese)
- [11] BRAKE W E. Explosions in air[M]. Austin: University of Texas Press, 1974:6-10.
- [12] 叶晓华. 军事爆破工程[M]. 北京:解放军出版社, 1999:8.
- [13] 张晓光. 冲击波超压场重建技术研究[D]. 太原:中北大学, 2018.
- [13] ZHANG Xiao-guang. Research on the technique of shock wave superpressure field reconstruction[D]. Taiyuan: North China University, 2018. (in Chinese)
- [14] 刘晓峰, 年鑫哲, 王希之, 等. 冲击波反射超压沿刚性墙面的分布规律[J]. *工程爆破*, 2015, 21(5):28-31.
- [14] LIU Xiao-feng, NIAN Xin-zhi, WANG Xi-zhi, et al. Distribution rule of shock wave reflection overpressure along rigid wall[J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(5):28-31. (in Chinese)
- [15] DAMSE R S, SIKDER A K. Role of inorganic additives on the ballistic performance of gun propellant formulations[J]. *Hazardous Materials*, 2008, 154:888-892.
- [16] 赵宝友, 马震岳. 大型岩体洞室采用柔性垫层减震的可行性研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(5):138-144.
- [16] ZHAO Bao-you, MA Zhen-yue. Study on the feasibility of adopting flexible cushion for shock absorption in large rock cavern[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 31(2):138-144. (in Chinese)
- [17] AHMED Fahmy Farag Tolba. Response of FRP retrofitted reinforced concrete panels to blast loading[D]. Canada: Carleton University, 2001.

英文编辑:柯波

(上接第12页)

- [7] 钱七虎, 王明洋. 三相介质饱和土自由场中爆炸波的传播规律[J]. *爆炸与冲击*, 1994, 14(2):97-100.
- [7] QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang. Propagation of explosive wave in the free-field of three-phase saturated soil[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(2):97-100. (in Chinese)
- [8] 石教往, 佟锦岳, 熊长汉, 等. 爆炸压实饱和砂土的试验研究[J]. *长江科学院院报*, 1992, 9(4):25-32.
- [8] SHI Jiao-wang, TONG Jin-yue, XIONG Chang-han, et al. An experiment research on compaction of saturated sand soil by explosion[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1992, 9(4):25-32. (in Chinese)
- [9] 燕琳, 李世海, 刘以纲. 爆炸引起饱和砂地表沉降的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(3):50-53.
- [9] YAN Lin, LIU Shi-hai, LIU Yi-gang. A laboratory study on surface settlement of saturated sand caused by blasting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(3):50-53. (in Chinese)
- [10] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6):1714-1720.
- [10] QING Yue, MENG Qing-shan, WANG Ren, et al. A study on bearing characteristics of single pile in calcareous sand based on model experiment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6):1714-1720. (in Chinese)
- [11] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(7):1831-1836.
- [11] ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7):1831-1836. (in Chinese)
- [12] 徐学勇, 汪稔, 胡明鉴, 等. 饱和钙质砂爆炸压实动力特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(2):402-406.
- [12] XU Xue-yong, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Experimental study of dynamic characteristics of saturated calcareous soil explosion compaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(2):402-406. (in Chinese)

英文编辑:黄刚