

孔内爆炸冲击波衰减规律研究

张宇鹏, 谢兴博, 钟明寿, 陈一曦

陆军工程大学, 江苏 南京

Email: 18031951427@163.com, heixiu_ren@126.com

收稿日期: 2020年12月20日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月28日

摘要

炮孔会对炸药产生的爆炸冲击波产生较大的影响, 这种影响主要表现在岩石约束对爆炸冲击波的传播方式、衰减速度、孔壁反射等方面。采用理论计算分析炸药爆炸时爆炸冲击波在开放环境和炮孔中传播方式的差异性, 运用ANSYS/LS-DYNA数值模拟两种工况, 验证理论计算和软件数据, 通过分析表明孔壁的约束作用, 削弱了爆炸冲击波在空气中的衰减速度, 通过拟合爆炸冲击波衰减曲线, 得出开放环境与炮孔中冲击波衰减系数比为1.65; 炮孔底部最大反射波叠加压力是入射波的21.5倍, 会极大增强炮孔底部压力。

关键词

岩爆, 衰减规律, 数值模拟

Study on the Propagation Law of Explosion Shock Wave in Hole

Yupeng Zhang, Xingbo Xie, Mingshou Zhong, Yixi Chen

Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

Email: 18031951427@163.com, heixiu_ren@126.com

Received: Dec. 20th, 2020; accepted: Jan. 20th, 2021; published: Jan. 28th, 2021

Abstract

The blasthole will have a great influence on the explosion shock wave produced by explosives, which is mainly manifested in the propagation mode, attenuation velocity and hole wall reflection of the explosion shock wave caused by rock restraint. The difference of the propagation mode of explosion shock wave in open environment and blast hole during explosive explosion is analyzed

by theoretical calculation. ANSYS/LS-DYNA numerical simulation is used to verify the theoretical calculation and software data. The analysis shows that the restraint effect of hole wall weakens the attenuation velocity of explosion shock wave in air. By fitting the explosion shock wave attenuation curve, it is concluded that the shock wave attenuation coefficient ratio between the open environment and the blasthole is 1.65; the maximum reflected wave superimposed pressure at the bottom of the blasthole is 21.5 times that of the incident wave, which will greatly increase the pressure at the bottom of the blasthole.

Keywords

Rockburst, Attenuation Law, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

装药在自由空气中爆炸时,空气冲击波以球形向四周扩散,且随爆距的增大快速衰减,在有限空间内,爆炸冲击波受到空间限制,呈现出不同的特点[1]。在钻孔爆破中,研究爆炸冲击波在孔内衰减规律特点对指导工程爆破实践具有重要意义。赵建平[2]等通过实验方法定量研究了混凝土孔中区激起的瞬时爆炸冲击能、爆生气体膨胀能等能量分配及衰减基本特征;冷振东[3]在研究岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制后指出炮孔近区损伤会引起炸药约束条件的弱化,从而导致孔内爆轰压力降低,王梓昂[4]等通过实验研究不同炸药在圆筒装置内爆炸冲击波传播规律与分布特性,得出柱状空间多波叠加,且叠加效应随爆心距的增加而增强的规律。张玉磊[5]、宫婕[6]、孙中博[7]、宋水舟[8]等分别对方形和柱形空间内的爆炸冲击波传播规律进行了实验研究和数值模拟,对孔内爆炸冲击波衰减规律的研究具有重要借鉴意义。这些研究多以实验为主分析爆炸冲击波在密闭空间内的传播规律,对孔内爆炸冲击波的衰减规律研究较少,且多数研究未提到孔内爆炸造成的岩体破碎对爆炸冲击波的衰减的影响,目前未有成形的理论揭示孔内爆炸冲击波的衰减规律。本文通过理论计算、数值模拟等方法对比分析了爆炸冲击波在空气和炮孔中演化过程,研究了影响两种条件下爆炸冲击波衰减的差异性及原因,对孔内爆炸冲击波衰减规律进行了总结。

2. 基本理论

炸药爆炸在极短时间内产生高温高压的气体爆轰产物,这些高温高压气体扩张冲击周围临近介质,在接触面上形成冲击波并向外传播,同时,爆轰产物也向外膨胀[9]。由于空气介质中约束性较弱,冲击波可以向四周发散,所以强度衰减速度也很快。爆炸冲击波在炮孔中传播时炸药周围有密闭介质的约束,使主发装药的爆轰产物和冲击波拥有一定的方向性,主要沿着炸药的轴向进行传播,同时侧壁对冲击波的反射叠加作用,使孔内爆炸形成的冲击波超压大于自由场内相同爆心距的超压[10],导致炮孔中爆炸冲击波的衰减远低于自由环境。

2.1. 自由环境中爆炸冲击波

爆炸空气冲击波的主要破坏参数包括超压、冲量和正压作用时间等。

当球形装药在空气中爆炸时的超压,可根据大量的实验结果得到。TNT 球形装药[11]在无限空气中爆炸时,空气冲击波峰值超压的计算式为:

$$\Delta P_m = 0.084 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right) + 0.27 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^3 = \frac{0.084}{\bar{r}} + \frac{0.27}{\bar{r}^2} + \frac{0.7}{\bar{r}^3} \quad (1) \quad (1 \leq \bar{r} \leq 10 \sim 15)$$

式中： ΔP_m ——无限空气中爆炸时冲击波的峰值超压(10^6Pa)； C ——TNT 的装药质量(kg)； r ——距爆心的距离(m)； \bar{r} ——比例距离($\text{m/kg}^{1/3}$)。

2.2. 炮孔中爆炸冲击波计算

炸药在炮孔中的爆炸规律，可以看作无限介质的爆轰波只能沿着一个或两个通道进行传播。根据超压相等时，有

$$\frac{C}{2S} = \frac{C_e}{4\pi r^2} \quad (2)$$

于是

$$C_e = C \frac{4\pi r^2}{2S} = 2\pi \frac{r^2}{S} C \quad (3)$$

式中 S 为一个方向传播的空气冲击波面积，等于密闭介质的管道截面积。

将(3)代入(1)式中，得

$$\Delta P_m = 0.084 \left(\frac{2\pi C}{Sr} \right)^{1/3} + 0.27 \left(\frac{2\pi C}{Sr} \right)^{2/3} + 0.7 \left(\frac{2\pi C}{Sr} \right) \quad (4)$$

若装药一端填塞时，爆轰波只能沿单方向传播，这时只需将式(3)换算成单方向，然后代入(1)式就可得到。

3. 数值模拟

为了更直观比较炮孔对爆炸冲击波的影响，用 ANSYS/LS-DYNA 的 SOLID164 单元建立圆柱型模型，将 B 炸药分别放置于空气介质和岩石炮孔中，装药直径 5.5 cm、长 10 cm 的圆柱形药柱，炮孔直径为 6 cm，孔深 55 cm 采用不耦合装药结构。

3.1. 有限元模型及算法

计算模型包括两个部分：一是由装药、空气两个部分组成；二是由装药、空气、岩石三个部分组成。其中装药、空气采用欧拉网格建模，单元使用多物质 ALE 算法；岩石采用 LAGRANGE 算法，在岩石和空气之间采用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID [12] 实现流固耦合算法。装药采用圆柱体中心起爆，根据模型特点，采用 1/4 有限元模型减少计算量。选择 SOLID164 单元和相应的材料属性对几何模型划分网格，创建 PART，施加对称约束和无发射边界条件，模型如图 1 所示。

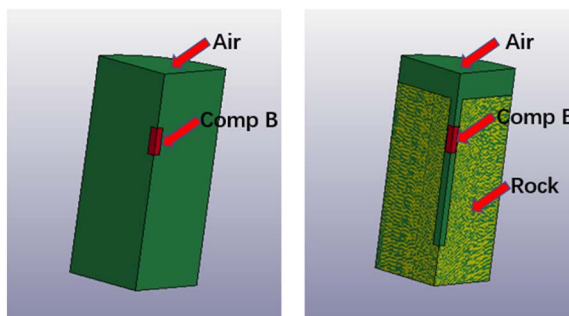


Figure 1. Numerical simulation of geometric model

图 1. 数值模拟几何模型

3.2. 材料及状态方程

装药采用 B 炸药, 使用材料模型采用 LS-DYNA 材料库中提供的炸药模型 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 状态方程采用适合表征炸药材料的 *EOS_JWL, 炸药材料参数如表 1 所示。

Table 1. Parameter B explosive material model

表 1. B 炸药材料模型参数

密度(kg/m ³)	爆速 D (m/s)	爆压 PCJ (GPa)
1717	7980	29.50
A (GPa)	B (GPa)	R1
524	7.67	4.20
R2	初始内能 E0 (GJ/m)	OMGA
1.1	8.5	0.34

空气材料采用空材料模型 *MAT_NULL, 状态方程采用适合表征空气的 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, 空气密度为 1.29 kg/m³。

岩石材料采用适合表征高应变率作用下的岩石混凝土等结构的 HJC 本构模型, 材料参数设置如表 2 中所示。

Table 2. HJC model of rock material parameter table

表 2. 岩石材料的 HJC 模型参数设置表(*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE)

密度(kg/m ³)	G (Gpa)	A	B	C	N	Pcrush (Mpa)
2600	16	0.79	1.6	0.007	0.61	16
evercrush	Plock (Mpa)	evlock	Tc (Mpa)	Fc (Mpa)	D1	D2
0.001	800	0.10	4	40	0.04	1.0
K1 (Gpa)	K2 (Gpa)	K3 (Gpa)	rate0	EFmin	Smax	
85	-171	208	1.0	0.01	7.0	

采用一般石灰岩的抗压强度, 为岩石材料添加失效准则, 即达到抗压强度 80 Mpa 时, 岩石单元破坏, 不再提供承载能力, 删除单元。

3.3. 数值模拟结果及分析

相同时刻爆炸冲击波在空气和炮孔中压力云图如图 2 所示, 装药在空气中爆炸时爆炸冲击波以球形向外扩散, 峰值压力在各个方向上基本一致, 且炸药中心压力较高, 压力随爆心距的增加而逐渐衰减。

装药在岩石中爆炸时, 爆炸冲击波会迅速向装药四周传播。由于岩石孔壁在装药径向上的约束, 会使冲击波径向压力高于轴向压力, 装药在破碎岩石后形成的角隅和棱线会有压力集中, 同时沿着炮孔轴向传播的冲击波由于没有岩石的约束峰值压力衰减的很快, 炮孔中爆炸冲击波前沿压力大于空气中传播的前沿压力。

爆炸冲击波的衰减很大程度上取决于距离[13] [14], 选取距离装药中心径向 10、20、30 cm 处的单元的压力时程图进行比较, 如图 3 所示。

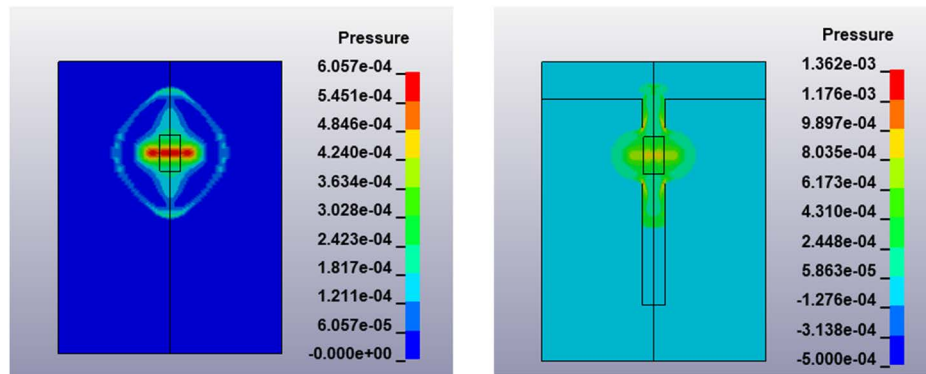
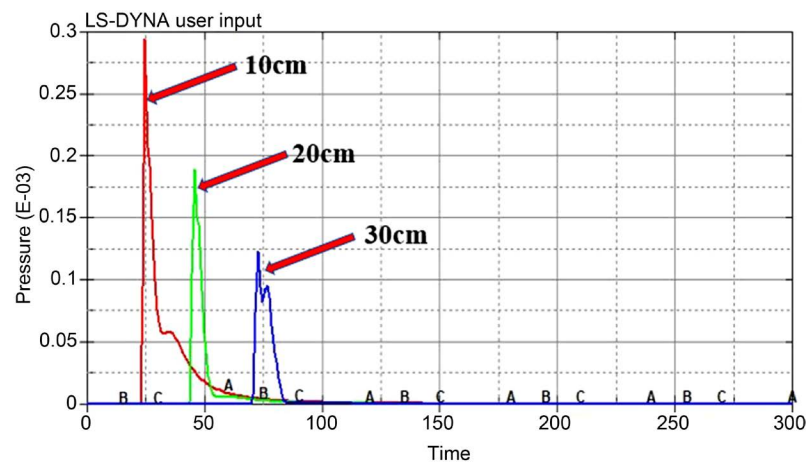
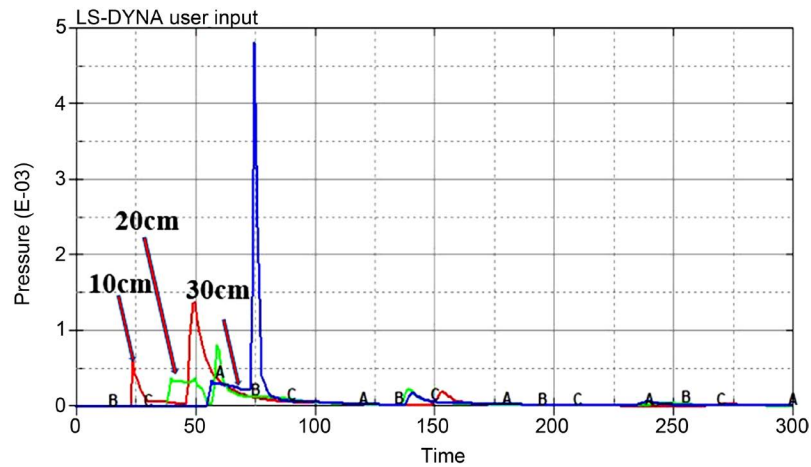


Figure 2. The same time under the condition of different explosion shock wave pressure contours
图 2. 相同时刻不同条件下爆炸冲击波压力云图



(a) 空气中爆炸冲击波压力时程曲线



(b) 炮孔中爆炸冲击波压力时程曲线

Figure 3. Pressure time history curve of contrast

图 3. 压力时程曲线对比

对比三个空气单元的压力时程曲线(图 3(a))可知,自由空气中爆炸冲击波衰减速度很快,峰值压力持续时间较短,波形极为陡峭,且无明显改变,衰减规律较为清晰,10 cm 处的峰值压力为 29.5 MPa,30 cm 处衰减为 12.3 MPa,峰值压力随距离指数衰减趋势明显。孔内爆炸冲击波(图 3(b))衰减较慢,第一个冲

击波峰值压力不是最大峰值压力，10 cm 处卸载波时间明显大于空气中卸载波持续时间，说明冲击波衰减速度明显下降，20 cm、30 cm 处冲击波峰值压力出现平台，且压力平台持续时间逐渐增加，判断孔壁内多次叠加以及破碎岩石后形成角隅和棱线造成反射叠加，降低了峰值压力的衰减速度。将两者峰值压力随距离的衰减按照同一指数衰减模型($\Delta P = P_0 * \exp(-\alpha X)$)拟合衰减率曲线，如图 4 所示。

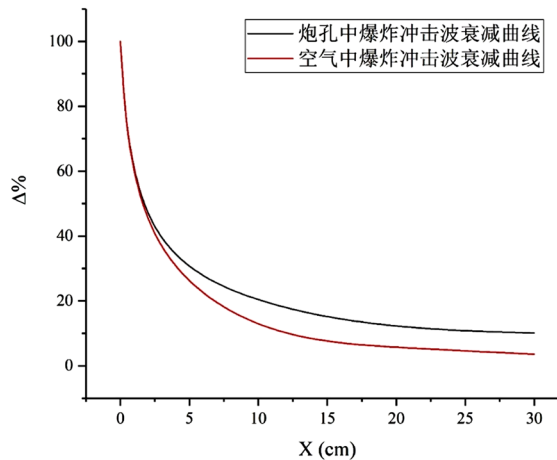


Figure 4. The explosion shock wave attenuation fitting curve
图 4. 爆炸冲击波衰减率拟合曲线

从图 4 可知，爆炸冲击波在孔内的衰减率与空气中不相同，孔内衰减低于空气中的衰减，经过拟合曲线得到，爆炸冲击波在炮孔中衰减系数 $\alpha_m = 0.04459 \text{ cm}^{-1}$ ，在空气中爆炸冲击波的衰减率 $\alpha_m = 0.07537 \text{ cm}^{-1}$ ，炮孔对爆炸冲击波的衰减系数的影响因子 k ，

$$k = \frac{\alpha_{\text{空气}}}{\alpha_{\text{炮孔}}} = 1.65$$

数值模拟的影响因子小于理论计算的影响因子，判断由于以下几个原因造成：1) 炸药起爆时部分能量用于破碎岩石，能量配级与空气中爆炸主要转换未冲击能不同；2) 破碎岩石造成了岩体空腔，空腔体积增大，导致后续冲击波能量扩散，冲击波峰值压力降低；3) 理论计算选用炸药和条件与数值计算存在差别，炮孔对爆炸冲击波造成的衰减影响不同。但是通过结果依然可以得出炮孔对爆炸冲击波的影响范围约为 1.65。

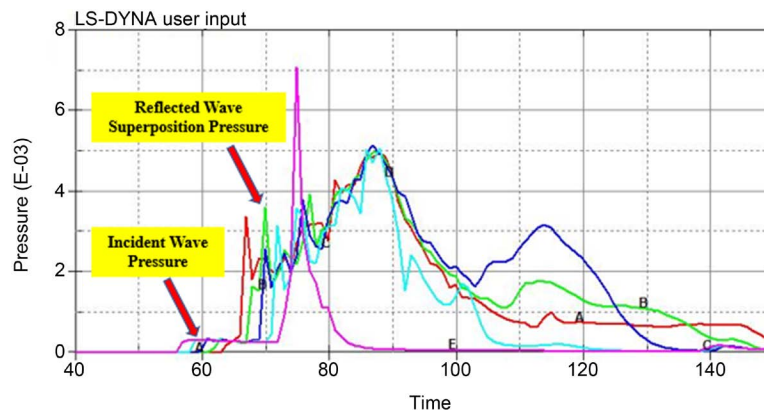


Figure 5. At the bottom of the hole pressure time history curve
图 5. 炮孔底部压力时程曲线

爆炸冲击波在接触孔底时,空气和岩石波阻抗相差较大,必然会产生较强的正反射作用[15]。取靠近炮孔底部空气单元做压力时程曲线,如图5所示,可知爆炸冲击波在炮孔底部会产生反射,叠加的爆炸冲击波峰值压力远高于入射压力,E点(单元35991),入射压力为32.9 MPa,反射叠加压力为709 MPa,叠加倍数为21.5倍,其它各点叠加倍数平均不低于10倍。从图5可以看出,孔底反射叠加后的冲击波,振荡剧烈,靠近孔底的点反射的峰值压力小于远离孔底的点的峰值压力,但随着时间逐渐增加,判断为冲击波到达孔底后破碎岩石,使峰值压力叠加次数迅速增加,导致后续反射峰值压力值随着增加到最大峰值,之后开始缓慢衰减。

4. 结论

通过对爆炸冲击波在空气和孔内的衰减规律的不同,可以得出以下结论:

1) 爆炸冲击波在空气与炮孔中传播演化规律不同,空气中爆炸冲击波以球形波形式向四周传播,孔内爆炸冲击波破碎岩体后,呈纺锤体形式传播,由于岩体约束径向峰值压力大于轴向峰值压力,轴向峰值衰减大于径向峰值压力衰减。

2) 与空气中冲击波相比,孔内冲击波峰值压力衰减降低主要是由于孔壁的多次反射叠加和岩体破碎后角隅和棱线反射叠加造成的,岩体破碎程度会影响冲击波衰减速度。

3) 比较空气和孔内爆炸冲击波的衰减率,空气中爆炸冲击波衰减率为孔内爆炸冲击波衰减率的1.65倍。

4) 孔底反射对爆炸冲击波的衰减影响很大,最大反射叠加压力为入射压力的21.5倍,平均反射叠加压力是入射压力的10倍。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(12072372)。

参考文献

- [1] 杨科之,刘盛.空气冲击波传播和衰减研究进展[J].防护工程,2020,42(3):1-10.
- [2] 赵建平,徐国元.结构近中区爆炸波能量分配和衰减特征[J].科技导报,2009,27(1):34-37.
- [3] 冷振东.岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制[D]:[博士学位论文].武汉:武汉大学,2017.
- [4] 王梓昂,翟红波,李芝绒,袁建飞,张玉磊.不同炸药在圆筒装置内爆炸冲击波载荷传播规律与分布特性[J].弹箭与制导学报,2019,39(1):11-14+20.
- [5] 张玉磊,王胜强,袁建飞,张俊锋,李尚青.方形坑道内爆炸冲击波传播规律[J].含能材料,2020,28(1):46-51.
- [6] 宫婕,汪泉,李志敏,程扬帆,汤有富,李成孝.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.
- [7] 孙中博,王海亮,贺晨,陈国防,刘涛.竖井横通道爆炸冲击波传播规律试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(30):12367-12371.
- [8] 宋水舟.不同真空度条件下结构内爆炸冲击波特性的数值模拟研究[D]:[硕士学位论文].太原:太原理工大学,2018.
- [9] 孙云厚,施存程,刘峥.均匀自由场中球形TNT装药爆炸数值计算分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2015,16(4):401-406.
- [10] 成凤生.密闭空间内爆炸冲击波压力测试及内壁超压分布研究[D]:[硕士学位论文].南京:南京理工大学,2012.
- [11] 徐全军,毛益明,武双章,等.爆炸及其作用[M].解放军理工大学,2014(9):437-439.
- [12] US ANSYS Co. (2017) ANSYS/LS-DYNA User's Manual.
- [13] Chi, L.Y., et al. (2019) Provide New Insights into Impact Engineering (Measurement of Shock Pressure and Shock-Wave Attenuation near a Blast Hole in Rock). *Journal of Engineering*, p. 125.
- [14] 张恒根,王卫华,王永强.空气不耦合装药孔壁初始冲击压力的计算[J].工程爆破,2020,26(3):8-15+22.
- [15] 雷帅.爆破冲击波在隧道内衰减规律及其应用研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2018.