

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.007

隧道掘进周边孔间隔装药结构选取及优化*

刘江超,高文学,张声辉

(北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

摘要: 在隧道掘进施工过程中采用水间隔装药爆破时,炮孔中同时存在空气和水两种间隔介质,其形成的爆炸应力相比单一空气间隔要复杂。为了选取合适的装药结构并确定合理的爆破参数指导现场施工,以温泉隧道为工程背景采用数值模拟的方法对周边孔水间隔和空气间隔装药爆炸应力进行模拟分析,然后选取合适的装药结构进行参数优化,最后通过现场试验进行验证。研究表明:在药量相同的情况下,周边孔采用水间隔爆破能够将爆炸能量比较均匀的传递到孔壁,对孔壁周围和炮孔上部围岩的破碎情况要好于空气间隔爆破,意味着达到相同的爆破效果,采用水间隔装药结构能够降低炸药单耗;当周边孔采用水间隔装药结构时,装药量为三段药卷0.9 kg,孔底水介质长度0.5 m,孔口水介质长度0.8 m,药卷间隔0.3 m较为合适,通过现场试验是合理可行的。

关键词: 周边孔;水间隔装药;空气间隔装药;参数优化

中图分类号: U455.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0038-07

Selection and Optimization of Interval Charge Structure of Surrounding Holes in Tunnel Excavation Blasting

LIU Jiang-chao, GAO Wen-xue, ZHANG Sheng-hui

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: There are air and water in the bore hole worked as interval media when the water-decked charge blasting is used in the process of tunnel excavation, and the explosion stress is more complex than single air interval. In order to select the appropriate charge structure and determine the reasonable blasting parameters to guide the site construction, taking Wenquan tunnel blasting excavation as an example, the numerical simulation method is used to simulate and analyze the blasting stress of the peripheral hole with water-decked charge, then the appropriate charge structure is selected for parameter optimization, and finally verified by the field test. The results show that in the case of the same amount of charge, the peripheral hole with water-decked charge blasting can transfer the explosion energy to the hole wall more evenly, and the surrounding rock around the hole and the rock above the holes is damaged smaller than the air-decked charge blasting, which means that the same blasting effect can be achieved, and the powder factor can be reduced by using the water-decked charge blasting. It is suitable to use 0.9 kg charge with three cartridges, 0.5 m water at the bottom of the hole, 0.8 m water at the mouth of the hole, and 0.3 m cartridge interval when the peripheral hole with water-decked charging structure.

Key words: peripheral hole; water-decked charge; air-decked charge; parameter optimization

收稿日期:2021-04-05

作者简介:刘江超(1991-),男,博士研究生,主要从事隧道及地下工程爆破方面的研究,(E-mail)ljcbjut@163.com。

通讯作者:高文学(1962-),男,博士、教授、博士生导师,主要从事爆破工程、隧道工程等方面研究,(E-mail)wxgao@bjut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(51778025、51678018)

目前空气间隔装药结构在隧道光面爆破中得到大量应用,它能够保证开挖轮廓的光滑平整减小对围岩的损伤,以及围岩的完整性和自身承载力^[1,2]。国内外研究人员通过数值模拟、理论分析和相关实

验等多种方法对其进行了研究。谢烽等在炸药单耗相同的情况下对三种不同孔径的合理空气间隔长度进行研究,结果表明采用空气间隔爆破形成的大块率及级配情况好于连续装药^[3];张迅结合爆破设计及实际施工情况,介绍了不耦合装药系数对施工的影响^[4];王圣涛等在施工现场进行多次空气间隔光面爆破试验^[5],通过不断优化爆破参数提出了适合的爆破方案;Fourney W L 和 Moxon N T 也先后通过实验、理论进行了空气间隔爆破技术的研究及应用^[6,7]。

后来发现水介质相对空气具有不可压缩性,传递爆炸能量的效果更好而且爆炸后形成的水雾能够降低爆破粉尘,因此水间隔装药在隧道掘进过程中得到了应用。刘江超等对常见的三种水封爆破装药结构进行模拟并结合现场试验,得到了最优的水封爆破装药结构^[8];李启月等采用预留光爆层水压爆破技术进行爆破施工,有效的解决了线性超挖大、光爆效果差等问题^[9],证明预留光爆层水压爆破技术对大断面特长公路隧道掘进爆破危害控制的可行性。万嗣鹏等从水压爆破、掏槽形式和延时时间三个方面对爆破方案进行优化^[10],结果表明水压爆破技术结合准直眼掏槽形式能较好地改善爆破效果,形成较好的隧道轮廓和掏槽效果。

上述研究主要针对炮孔中存在水或空气单一介质时的间隔装药爆破过程及效果,而在实际施工过程中采用水间隔爆破时,装药结构比较复杂,同时涉及到空气和水两种介质作为间隔物。当这两种介质同时存在时,爆破装药结构以及参数对爆破效果的影响有待进一步研究。因此本文以延崇高速温泉隧道为工程背景,采用 LS-DYNA 模拟分析水和空气两种介质做间隔物时周边孔爆破效果,并与常规空气间隔爆破进行对比得出最优的爆破装药结构,然后进行装药结构参数优化为工程施工提供参考。

1 工程背景

1.1 场地概况

以延崇高速公路为工程背景,该公路是北京和张家口联合举办 2022 年冬奥会的重点配套工程。进京线桩号:ZK21+044~ZK26+111,全长 5067 m;出京线桩号:YK21+105~YK26+141,全长 5036 m。其中主要结构温泉隧道出京线 2376 m,进京线 2345 m,其中 V 级围岩占比 40%,IV 级围岩占比 45%,III 级围岩占比 15%,围岩性质较差。

1.2 爆破设计参数

由于隧道围岩性质较差,为了保证施工安全,采用上下台阶法进行施工。其中上台阶循环进尺为 3 m,辅助孔、周边孔深度为 3.3 m,掏槽孔深度 3.5 m,炮孔孔径 42 mm,炮孔布置以及起爆顺序如图 1 所示。

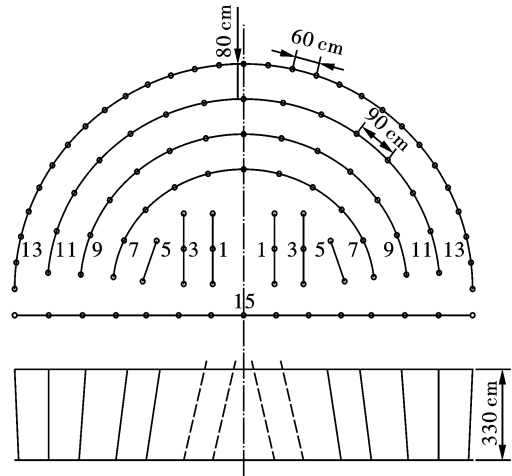


图 1 炮孔布置及起爆顺序(雷管段别)
Fig. 1 Blast hole layout and initiation sequence (detonator segment)

2 模型建立及参数的选取

2.1 模型建立

在隧道掘进爆破过程中,周边孔对最终的爆破效果具有重要影响。为了形成良好的光爆效果,周边孔通常采用空气间隔进行施工。目前温泉隧道周边孔空气间隔装药结构如图 2(a),为了进行对比在药量相同情况下的爆破情况,周边孔水间隔爆破装药结构如图 2(b)。爆破相关参数为:循环进尺 3 m,炮孔长度 3.3 m,直径 42 mm;单个药卷长度 0.3 m (共 4 个药卷,1.2 kg),直径 32 mm。装药结构随间隔介质的不同进行变化,采用空气间隔装药结构时,空气间隔为 0.4 m。当采用水间隔时,孔口水介质长 0.4 m,其余间隔长度均为 0.3 m。

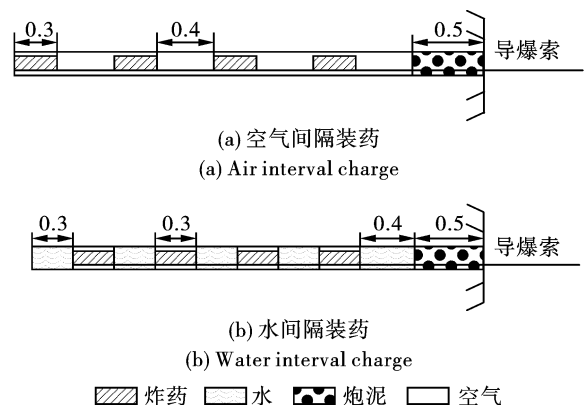


图 2 四段炸药装填结构(单位:m)
Fig. 2 Four stage explosive loading structure(unit:m)

以周边孔为研究对象建立三维立体模型如图 3 所示,长×宽×高=10 m×0.8 m×7 m,其中宽度是以光爆层厚度为依据,孔间距为 0.6 m。将上方和后方界面定义为自由边界,左右、下方和前方界面定

义为无反射边界。计算时炸药、水和空气采用多物质 ALE 算法,围岩采用常规拉格朗日算法。

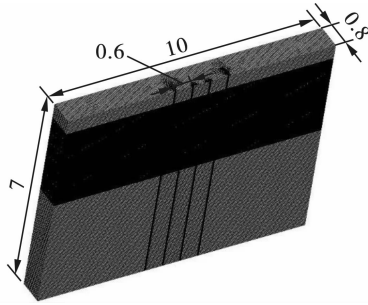


图3 数值模型(单位:m)
Fig. 3 Numerical model(unit:m)

2.2 材料本构模型与参数

(1) 岩石

在炸药爆炸过程中,临近炸药的部分岩石发生屈服形成破碎区,此时岩石应变很大,应变率效应非常明显,JHC 模型适用于高应变率、大变形的混凝土和岩石,其等效屈服强度是与压力、应变率以及损伤的函数,其相关参数为^[11,12]:密度 $\rho = 2586 \text{ kg/m}^3$, 剪切模量 $G = 6.52 \text{ GPa}$, $A = 0.79$, $B = 1.6$, $C = 0.007$, $N = 0.61$, $f_c = 0.048 \text{ GPa}$, $T = 0.004 \text{ GPa}$, $E_{f \min} = 0.01$, $S_{f \max} = 7$, $P_{\text{crush}} = 0.016 \text{ GPa}$, $u_{\text{crush}} = 0.001$, $P_{\text{lock}} = 0.8 \text{ GPa}$, $u_{\text{lock}} = 0.1$, $D_1 = 0.04$, $D_2 = 1$, $k_1 = 85 \text{ GPa}$, $k_2 = -171 \text{ GPa}$, $k_3 = 208 \text{ GPa}$, $EPS_0 = 1\text{E}-6$ 。

(2) 炸药

采用 2# 岩石乳化炸药,材料模型选用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN,该材料模型需与 JWL 状态方程联用,JWL 方程为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: P 为压力; V 为初始相对体积(P 无量纲量); E_0 为初始比内能^[12]; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为试验确定的参数,炸药相关参数为:密度 $\rho = 1240 \text{ kg/m}^3$ 、爆速 $D = 3200 \text{ m/s}$ 、爆压 $P_{\text{CJ}} = 7.4 \text{ GPa}$ 、 $A = 214.4 \text{ GPa}$ 、 $B = 0.182 \text{ GPa}$ 、 $R_1 = 4.2$ 、 $R_2 = 0.9$ 、 $\omega = 0.15$ 、 $E_0 = 4.192 \text{ GPa}$ 、 $V = 1.0$ 。

(3) 炮泥

炮泥选择土壤和泡沫模型 MAT_SOIL_AND_FOAM 来表示,炮泥计算参数:密度 $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ 、剪切模量 $G = 0.02 \text{ GPa}$ 、体积模量 $B = 0.035 \text{ GPa}$ 、 $A_0 = 0.161 \text{ GPa}$ 、 $EPS_2 = 0.05$ 、 $EPS_3 = 0.09$ 、 $EPS_4 = 0.11$ 、 $P_2 = 34 \text{ GPa}$ 、 $P_3 = 45 \text{ GPa}$ 、 $P_4 = 66 \text{ GPa}$ 。其中 A_0 为塑性屈服函数的屈服函数常数; EPS_2 、 EPS_3 、 EPS_4 为体积应变值; P_2 、 P_3 、 P_4 为与体积应变值相对应的压力。

(4) 水

水作为一种流体材料,一般需要本构方程和状态方程来描述其行为,水采用空物质材料本构 MAT_NULL,状态方程采用 Gruneisen 方程,其相关参数为:密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、 $C = 1480$ 、 $S_1 = 2.56$ 、 $S_2 = -1.986$ 、 $S_3 = 0.227$ 、 $GAMA_0 = 0.5$ 、 $A = 1.3937$ 、 $E_1 = 256$ 、 $V_0 = 1.0$ 。其中 E_1 为初始内能; V_0 为初始相对体积^[12]。

(5) 空气

空气与水介质一样采用空物质材料本构 MAT_NULL 表示,状态方程采用 LINEAR_POLYNOMIAL_TITILE,其相关参数为:密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_4 = 0.4$ 、 $C_5 = 0.4$,初始内能 $E_0 = 0.25 \text{ MPa}$ 。

3 水间隔爆破与空气爆破对比

由图 4 可以看到,炸药完全起爆以后在围岩中主要以拉应力的形式存在,同时伴随少量的压应力。其中水间隔爆破完全起爆后,除药柱周围存在压应力以外,在间隔水介质周围同样存在一定的压应力,这是因为水作为一种不可压缩介质,能够将爆炸能量有效的传递到炮孔围岩中,起到了等效药柱的作用。空气间隔爆破完全起爆后,爆炸形成的压应力几乎全部集中在药柱周围。因此采用水间隔装药进行爆破能够将爆炸能量比较均匀的传递到孔壁,爆破效果更好。

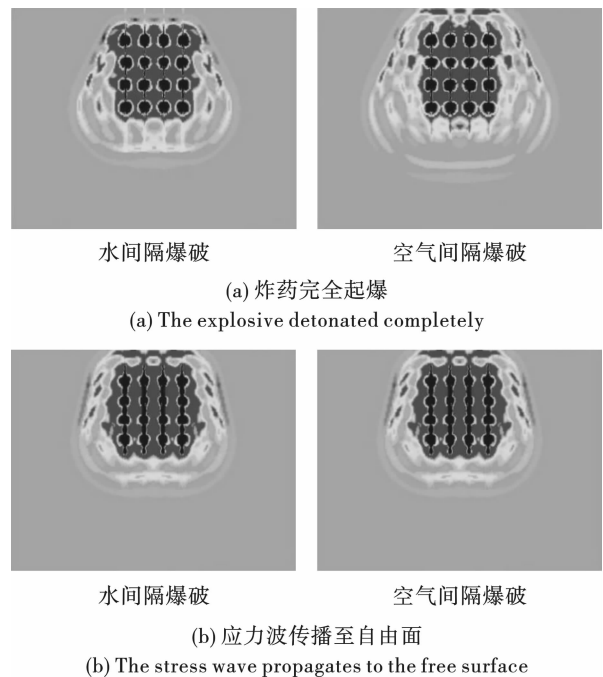


图4 水间隔与空气间隔爆破应力云图

Fig. 4 Stress nephogram of water and air interval blasting

岩石作为一种抗压不抗拉的介质,在爆破过程中以拉应力破坏为主。当炸药完全起爆时,水间隔爆破炮孔周围和上部的拉应力作用范围大于空气间

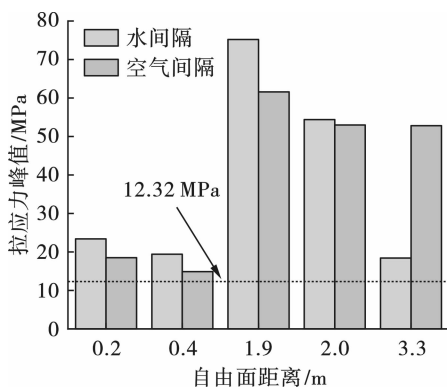
隔爆破,孔底拉应力作用范围小于空气间隔爆破。当爆炸应力波继续传播至自由面后,水间隔爆破炮孔周围和炮孔上部的拉应力作用范围依然大于空气间隔爆破,孔底拉应力作用范围小于空气间隔爆破。说明采用水间隔爆破对孔壁周围和炮孔上部的围岩破碎情况要好于空气间隔爆破,同时还能降低对掌子面后方围岩的扰动以及损伤,保证新开挖掌子面的平整,减少后续施工压力。

为了更加准确的研究围岩爆破破碎效果,需要对围岩的受力和围岩的力学参数进行对比从而进行判断。通过参考文献[13、14]进行计算得到相关力学参数如表 1。

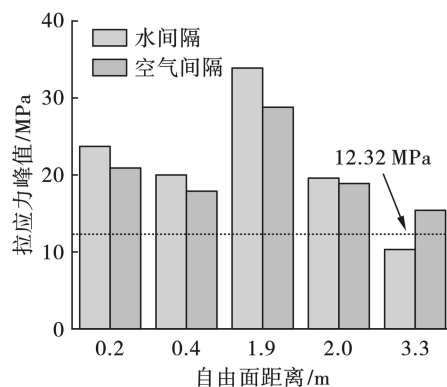
表 1 斑状花岗岩动态力学参数
Table 1 Dynamic mechanical parameters of porphyry granite

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	动态抗拉 强度/MPa
2586	0.26	16.55	12.32

岩石爆破过程中以拉应力破坏为主,因此在两个炮孔连心线中部以及光爆层处沿炮孔轴向在距离自由面 0.2 m、0.4 m、1.9 m、3 m、3.3 m 处提取单元进行拉应力分析,并提取峰值应力与表 1 中的岩石动态抗拉强度对比,具体见图 5。



(a) Central unit of blast hole connecting center line



(b) Unit at smooth detonation layer

图 5 水间隔与空气间隔爆破拉应力峰值对比

Fig. 5 Comparison of peak tensile stress between water interval and air interval blasting

由图 5 可以看到,除了水间隔装药在光爆层处距离自由面 3.3 m 的拉应力峰值小于围岩的动态抗拉强度 12.32 MPa 外,两种装药结构爆炸后在其它单元处形成的拉应力峰值均大于围岩的动态抗拉强度 12.32 MPa,说明都能够满足设计要求的 3 m 循环进尺同时对围岩进行有效破碎。但是空气间隔装药由于炸药直接放置在孔底,所以对炮孔底部围岩破坏较大容易导致破裂,给后续施工(如钻孔、支护等)带来不便。

此外,水间隔爆破在距离自由面 0.2 m、0.4 m、1.9 m、3 m 处生成的拉应力峰值均大于空气间隔爆破,说明同等装药条件下采用水间隔爆破时,岩石破碎效果优于空气间隔爆破,形成的碎石块度更小,能量利用率更高。

4 水间隔爆破装药结构优化

4.1 三段炸药装填

通过第 3 节可以看到采用水间隔装药进行爆破优于空气间隔装药,但是现场周边孔采用的装药量爆破后产生的应力整体偏大,造成炸药浪费。因此

减少装药量,将药卷数量减少至 3 个,药卷间距为 0.3 m,装药结构如图 6。

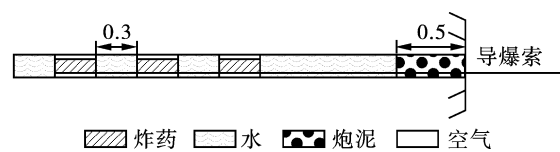


图 6 三段炸药装填结构(单位:m)

Fig. 6 Three stage explosive loading structure(unit:m)

为了得到最优的装药结构设计参数(主要为炮孔两端的水介质长度),通过调整炮孔两端水介质长度共得到六种装药参数,见表 2。

对上述六种装药参数进行数值模拟,由于装药结构不同,炸药起爆后在相同时刻的应力变化情况也不相同。为了更好的进行对比,以爆炸应力在自由面反射后的应力云图为对象进行分析,孔底水介质长度 0.3 ~ 0.8 m 装药结构爆破应力云图如图 7。

通过对比分析看到,随着孔底水介质长度的增大,孔底的高应力作用范围不断减小且向炮孔上方

逐步收缩,意味着对孔底围岩造成的损伤逐步减小。而孔口的高应力区域不断增大,导致孔口围岩破坏程度增大。炮孔周围爆炸形成的高应力整体区域随着孔底水介质长度的增大而减小,说明当孔底水介质长度过长时,炸药爆炸能量开始流失。为了得到最优的装药参数,在两个炮孔连心线中部以及光爆层处沿炮孔轴向在距离自由面 0.2 m、0.4 m、1.9 m、3 m、3.3 m 处提取单元进行拉应力分析,并提取峰值应力与表 1 中的岩石动态抗拉强度对比,具体见图 8。

表 2 三段装药参数

Table 2 Three stage charge parameters

装药结构	孔底水介质长度/m	药卷长度(m)/数量(个)	间隔水介质长度(m)/数量(个)	孔口水介质长度/m	炮泥填塞长度/m
I	0.3	0.3/3	0.3/2	1.0	0.5
II	0.4	0.3/3	0.3/2	0.9	0.5
III	0.5	0.3/3	0.3/2	0.8	0.5
IV	0.6	0.3/3	0.3/2	0.7	0.5
V	0.7	0.3/3	0.3/2	0.6	0.5
VI	0.8	0.3/3	0.3/2	0.5	0.5

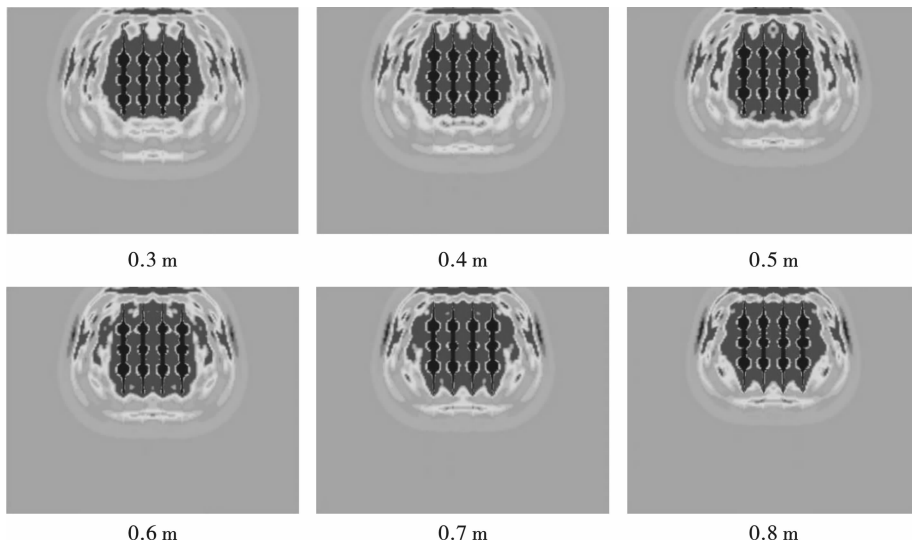


图 7 三段装药爆炸应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of three stage charge

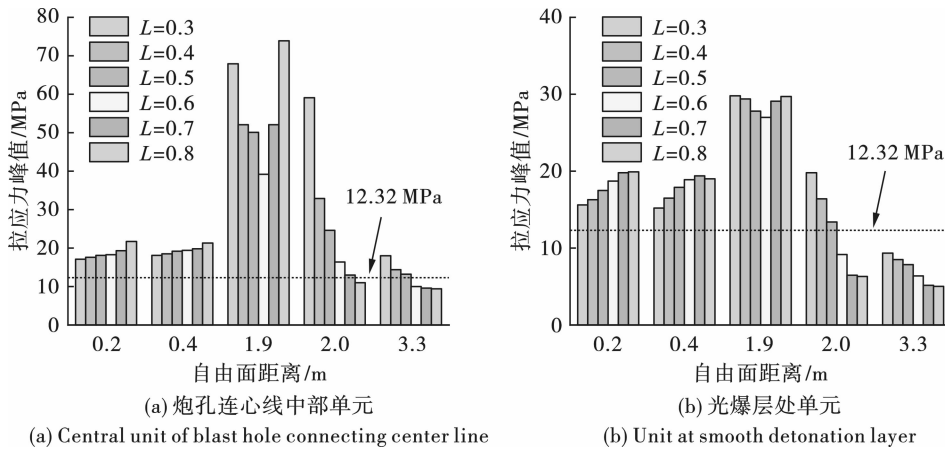


图 8 三段装药不同结构拉峰值应力

Fig. 8 Tensile peak stress of different structures of three stage charge

由图 8 可知,随着孔底水介质长度的增大以及孔口水介质长度的减小,距离自由面 0.2 m、0.4 m 处围岩受到的拉应力峰值增大,距离自由面 3 m、3.3 m 处围岩受到的拉应力峰值减小,距离自由面 1.9 m 处的围岩由于药卷位置的变化受到的拉应力

峰值随之变化。当孔底水间隔长度为 0.7 ~ 0.8 m 时,距离自由面 3 m 处围岩的拉应力峰值小于围岩的动态抗拉强度 12.32 MPa,此时已不能满足爆破施工要求的 3m 循环进尺。当孔底水间隔长度为 0.6 m 时,光爆层距离自由面 3m 处围岩受到的拉应

力峰值小于围岩的动态抗拉强度 12.32 MPa,同样不能进行有效爆破。当孔底水介质长度为 0.5 m 时,能够满足施工要求的循环进尺同时对围岩进行有效破碎。因此选择孔底水介质长度为 0.5 m,孔口水介质长度为 0.8 m 较为合适。

4.2 两段炸药装填

通过第 4.1 节可以看到将药卷数量减少至 3 个能够满足设计需求,那么继续减少药量是否还能满足设计要求需要进行探讨。因此继续减小药量,将药卷数量降低至两个,药卷间距设置为 0.5 m,装药基本结构如图 9。

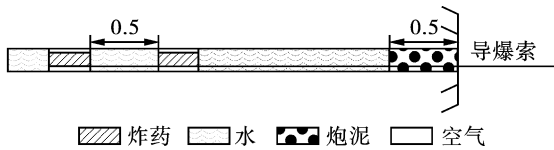


图 9 两段炸药装填结构(单位:m)

Fig. 9 Two stage explosive loading structure(unit:m)

同理为了得到最优的装药结构设计参数(主要

为炮孔两端的水介质长度),通过调整炮孔两端水介质长度共得到六种装药参数,具体参数见表 3。

表 3 两段装药参数

Table 3 Two stage charge parameters

装药结构	孔底水介质长度/m	药卷长度(m)/数量(个)	间隔水介质长度(m)/数量(个)	孔口水介质长度/m	炮泥填塞长度/m
I	0.3	0.3/2	0.5/1	1.4	0.5
II	0.4	0.3/2	0.5/1	1.3	0.5
III	0.5	0.3/2	0.5/1	1.2	0.5
IV	0.6	0.3/2	0.5/1	1.1	0.5
V	0.7	0.3/2	0.5/1	1.0	0.5
VI	0.8	0.3/2	0.5/1	0.9	0.5

对上述六种装药参数进行数值模拟,由于装药结构不同,炸药起爆后在相同时刻的应力变化情况也不相同。同样选择爆炸应力在自由面反射后的应力云图进行分析,孔底水介质长度 0.3 ~ 0.8 m 装药结构爆破应力云图如图 10。

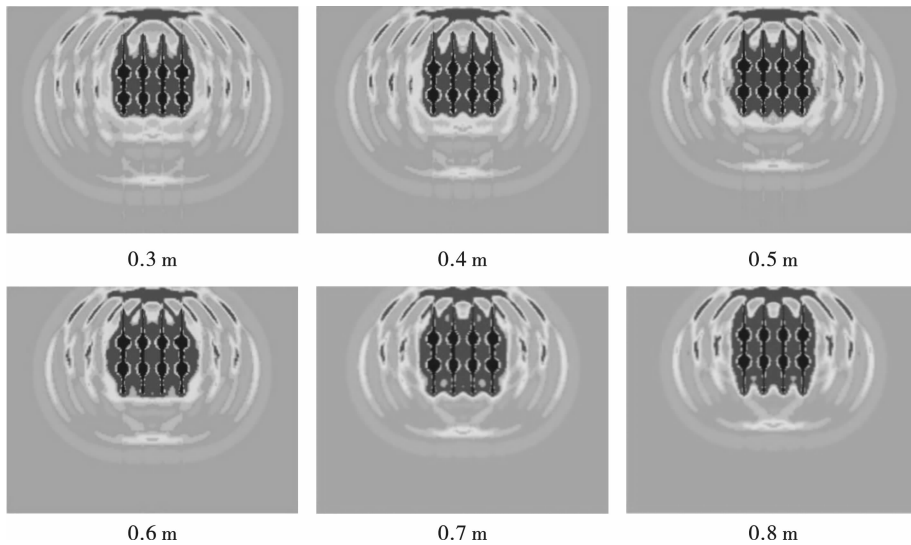


图 10 两段装药爆炸应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of two stage charge

可以看到爆炸应力变化情况与三段炸药装药结构一样,随着孔底水介质长度的增大,孔底的高应力作用范围逐步向上收缩,孔底围岩损伤逐步减小。同时孔口的高应力作用范围增大,导致孔口围岩破坏程度增大。而且在相同情况下爆炸形成的高应力区域和三段药卷爆炸相比明显减小。在两个炮孔连心线中部以及光爆层处沿炮孔轴向在距离自由面 0.2 m、0.4 m、1.9 m、3 m、3.3 m 处提取单元进行拉应力分析,并提取峰值应力与表 1 中的岩石动态抗拉强度对比,具体见图 11。

由图 11 可知,随着孔底水介质长度的增大以及孔口水介质长度的减小,孔底水介质长度为 0.6 m、

0.7 m、0.8m 已不能满足爆破施工要求的 3 m 循环进尺。当孔底水介质长度为 0.3 m、0.4 m、0.5 m 时,由于孔口水介质长度的增加导致孔口围岩不能有效破碎。因此当周边孔采用水间隔爆破时,两段装药已经不能满足施工要求。

5 工程应用

为了对上述结果进行验证,选取温泉隧道作为水间隔爆破试验地点,在施工现场进行爆破测试,并与空气间隔爆破效果进行对比。温泉隧道作为 2022 年冬奥会配套工程之一,围岩主要为斑状花岗岩,其密度为 2586 kg/m³,弹性模量为 16.55 GPa,

泊松比 0.267, 爆破效果见图 12。

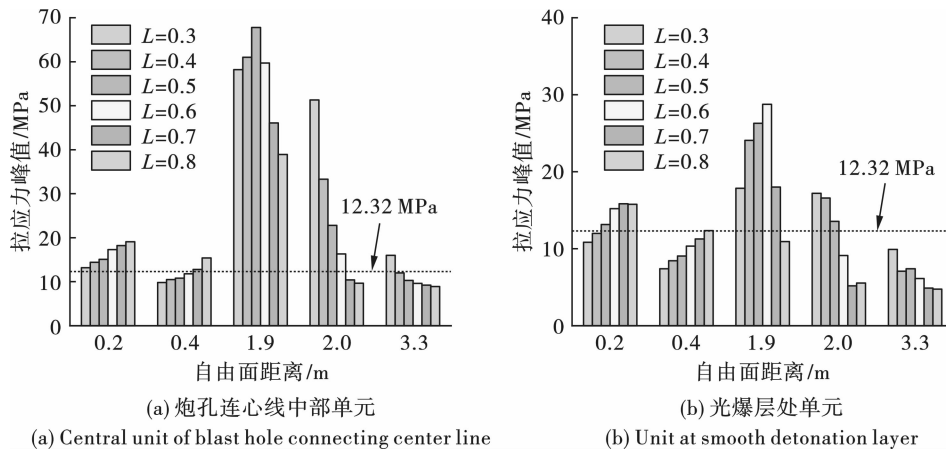
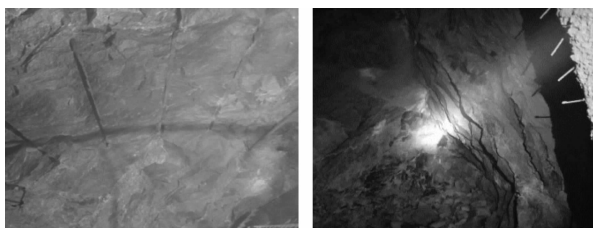


图 11 两段装药不同结构峰值应力

Fig. 11 Tensile peak stress of different structures of two stage charge



(a) 水间隔装药 (a) Water interval charge
(b) 空气间隔装药 (b) Air interval charge

图 12 爆破效果

Fig. 12 Blasting effect

通过图 12 的现场爆破效果可以看到, 采用孔底水介质长度 0.5 m, 孔口水介质长度 0.8 m, 药卷间距 0.3 m 的三段装药结构能够达到施工设计要求的 3 m 循环进尺, 同时可以看到残留的炮孔壁, 相较空气间隔装药形成更好的光爆效果, 说明采用上述装药结构是合理可行的。而且相比空气间隔采用的四段装药, 装药量减少降低了炸药单耗, 节约了施工成本。

6 结论

(1) 在药量相同的情况下, 周边孔采用水间隔爆破能够将爆炸能量比较均匀的传递到孔壁, 对孔壁周围和炮孔上部的围岩破碎情况要好于空气间隔爆破, 说明达到相同的爆破效果, 采用水间隔爆破装药结构能够降低炸药单耗。

(2) 对水间隔装药时的装药结构参数进行优化得到当周边孔装药量为三段药卷时, 相比四段药卷对孔壁围岩的损伤明显减小, 当孔底水介质长度为 0.5 m, 孔口水介质长度为 0.8 m 较为合理, 能够达到爆破设计要求。

(3) 通过现场试验证明周边孔采用三段药卷, 孔底水介质长度为 0.5 m, 孔口水介质长度为 0.8 m 能够达到施工设计要求的 3 m 循环进尺, 同时形成

较好的光爆效果。相比空气间隔采用的四段装药, 装药量减少降低了炸药单耗, 节约了施工成本。

参考文献 (References)

- [1] MANDAL S K, SINGH M M, DASGUPTA S. Theoretical concept to understand plan and design smooth blasting pattern [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(4): 399-416.
- [2] 徐帮树, 张万志, 石伟航, 等. 节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1248-1255.
- [2] XU B S, ZHANG Z W, SHI W H, et al. Experimental study of parameters of tunneling blasting in jointed layered rock mass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1248-1255. (in Chinese)
- [3] 谢 烽, 江雅勤, 余德运, 等. 钙结砾岩空气间隔装药爆破试验及应用 [J]. 爆破, 2020, 37(4): 63-68.
- [3] XIE F, JIANG Y Q, YU D Y et al. Test and application of calcium conglomerate air-decked charge blasting [J]. Blasting, 2020, 37(4): 63-68. (in Chinese)
- [4] 张 迅. 光面爆破不耦合装药参数优化的试验研究 [J]. 工程爆破, 2019, 25(6): 27-31.
- [4] ZHANG X. Experimental study on parameter optimization of decoupled charge in smooth blasting [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 27-31. (in Chinese)
- [5] 王圣涛, 潘 强, 郑爽英, 等. 光面爆破在广州地铁隧道 21 号线中的应用 [J]. 工程爆破, 2019, 25(4): 26-31.
- [5] WANG S T, PAN Q, ZHENG Y S et al. Application of smooth blasting in Guangzhou metro tunnel line 21 [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4): 26-31. (in Chinese)