

光面爆破椭圆双极线性聚能药柱有效功及 不耦合系数模拟研究

郭浩然, 季茂荣, 郭涛, 武双章

(解放军理工大学, 江苏南京 210007)

摘要:基于动力学仿真软件 AUTODYN, 对椭圆双极线性聚能药柱(EBLSC)进行了数值模拟。采用二维面对称计算方法, 花岗岩岩体, 空气夹层不耦合装药条件, 研究了 EBLSC 结构及不耦合系数对光面爆破效果的影响, 并建立有效体积功模型以评价爆破效果。结果表明, 炮孔连线方向和垂直方向上的比冲量相近, 偏差 < 10%, 故总能量沿周向近似均匀分布, 但炮孔连线方向产生明显侵彻裂隙, 且粉碎圈厚度和腔体扩张程度要小得多, 表明该装药结构能够明显提高炸药能量的利用率和爆破效果; 随着不耦合系数增大, 炮孔连线方向上的损耗体积功先减小后增大, 存在最大有效功。利用曲线拟合, 得到最优不耦合系数约 3.62, 与相关文献的试验结果相近。

关键词:EBLSC; 光面爆破; 有效功; 不耦合系数

中图分类号:TD235 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)11-0074-06

Simulation Study on Effective Work and Non-coupling Coefficients of Elliptic Bipolar Linear Shaped Charge for Smooth Blasting/GUO Hao-ran, JI Mao-rong, GUO Tao, WU Shuang-zhang (PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: Numerical simulation was done on the elliptic bipolar linear shaped charge (EBLSC) based on dynamics simulation software AUTODYN. First, through two-dimensional planar symmetric method and considering granite characteristics, air sandwich and decouple condition, the effects of EBLSC structure and decouple coefficient for smooth blasting were studied. Then, the effective volume work model was established to evaluate blasting results. The results indicated that the specific impulses on blasthole line connecting direction and in vertical direction were similar with deviation below 10%, so the whole energy of charge uniformly was distributed along the circumferential direction approximately. However, there were obvious penetration cracks in blasthole connecting direction with lower crushing and expanding degree of the rock. It indicated that EBLSC could improve significantly the charge energy efficiency and blasting result. In addition, with the decouple coefficient increasing, the loss or waste volume work in blasthole connection direction first decreased and then increased with the existence of maximum effective power. Through curve fitting, the optimal decouple coefficient of about 3.62 was obtained, which was similar to the result of relevant experiments.

Key words: EBLSC; smooth blasting; effective work; decouple coefficient

光面爆破能够合理利用和有效控制炸药能量以形成平整的断面轮廓, 成为了井巷掘进爆破中的重要手段之一, 因而对光面爆破的优化设计具有重要意义^[1]。宗琦^[2]等人利用理论分析研究了不同岩石中爆破总能量的分布, 表明冲击波能量占 40% 左右。吴亮^[3]等人的研究表明岩石中耦合柱形装药的能量主要用作岩石破碎 40%, 扩腔和扩展主要裂隙 23%, 及增加裂纹数目三部分 37%, 而其中大部分能量无法得到有效利用。梁为民^[4]等人结合实验与数值方法, 研究了不耦合装药对岩石爆破的影

响, 对比耦合装药, 表明了空气夹层对冲击波的良好缓冲效果, 并且能量利用率和爆破效果得到提高。杨哲峰^[5]等人利用仿真和工程实例, 对光面爆破中的柱形药不耦合系数进行了优化, 通过比较分析关键部位的应力值大小及分布, 验证了经典爆破理论, 并得出最优不耦合系数为 1.4 ~ 2.1。秦健飞^[6]等人结合预裂和光面爆破工程长期经验, 提出了椭圆双极线性聚能药柱(EBLSC)结构, 并通过实践验证了该装药结构相比于传统装药结构的巨大优势。李必红^[7]等人基于所研制的 EBLSC, 提出了基于橡胶

收稿日期: 2015-05-27; 修回日期: 2015-07-08

作者简介: 郭浩然, 男, 汉族, 1987年生, 在读硕士研究生, 从事炸药爆炸及其爆破开挖方面的研究, 江苏省南京市秦淮区海福巷1号工院研二队, 261319314@qq.com。

板侵彻深度的评价试验法,并结合数值方法验证了试验法的正确性,最终确定出该装药的最佳不耦合系数为 3.43。可见,当前对岩石光面爆破不耦合系数的研究主要集中在传统圆柱装药上,对于 EBLSC 这一新型结构的研究尚少;此外,现有对 EBLSC 不耦合系数优化只考虑了对定向裂隙的影响,未能结合光面爆破岩石后期应力波作用,因而还不完善。

本文旨在用现有椭圆双极线性聚能药柱 (EBLSC),对比圆柱形药柱,使用 AUTODYN 数值仿真研究该新型装药结构及不耦合系数对爆破效果的影响,并提出一种新的不耦合系数优化思路。基于岩石破碎和腔体扩展程度,定义损耗体积功,以描述炸药能量损耗,建立炮孔连线方向上的有效体积功模型,并以其为优化目标确定最佳不耦合系数,为 EBLSC 这一新型装药的应用提供参考。

1 岩石中光面爆破冲击波能量分布

装药在岩石中的爆破能量是通过冲击波和气体产物传递给岩石的。起爆后,冲击波对岩石进行剧烈冲击压缩而形成粉碎区,并使岩石中的质点位移,使得腔体扩张,此时,岩石可以视作不可压缩流体。冲击波对岩体做功,能量将迅速衰减,到粉碎区边缘时,衰变为应力波。在光面爆破中,一方面,应力波会使岩石发生切向拉伸产生径向裂纹,且应力波的强度不断降低,另一方面,两股应力波相遇后,会产生径向拉伸波,继而从炮孔中间位置开始产生较长的裂纹,形成光整的开挖断面。在冲击波之后,气体产物膨胀扩腔,并在裂纹中产生“气楔效应”使初始裂纹进一步延伸。故爆破能量可分为冲击波能量,气体膨胀能量,前者主要用于产生岩石破碎圈,以及后期应力波作用,后者则主要用于进一步扩腔和扩展初始径向裂纹。在光面爆破中,产生开挖断面的那部分应力波能为主要的有效功形式。根据相关文献^[2-3],给出冲击波能量和气体膨胀能量的理论表达式。

(1) 岩石破坏消耗的能量:

$$W_1 = 2\pi r_b P_d (1 - r_b/R_1) \quad (1)$$

式中: r_b ——炮孔半径; P_d ——孔壁冲击波初始压力; R_1 ——冲击波引起的扩腔半径。

(2) 气体产物扩腔消耗的能量:

$$W_2 = \begin{cases} \frac{\pi P_0 r_b^2}{2} \left(\frac{r_b}{R_1}\right) \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2\right] & (P_s \geq P_k) \\ \frac{4\pi P_k r_b^2}{3} \left(\frac{P_0}{P_k}\right)^{4/9} \left(\frac{r_b}{R_1}\right)^{2/3} \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{2/3}\right] & (P_s < P_k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_0 ——膨胀开始的气体压力; R_2 ——与 P 相对应的爆腔瞬时半径; P_k ——与临界爆腔半径对应的临界压力。

此外,还有冲击波和应力波引起的岩石弹性变形能,爆炸裂纹及驱使裂纹生长所消耗的能量等形式,可查阅文献^[2-3]。光面爆破中,对带有聚能效果的药柱爆破,存在方向性(X 为聚能方向),其能量分布可按下式:

$$W = W_x + W_y \quad (3)$$

式中: W_x ——炮孔连线方向的做功分量; W_y ——与炮孔连线垂直方向的做功分量。

考虑岩石破碎和扩腔消耗的功作为主要损耗功,拉伸裂纹和促进裂隙发展的功作为有效功,则有:

$$\begin{cases} W_x = W_{xw} + W_{xe} \\ W_y = W_{yw} + W_{ye} \end{cases} \quad (4)$$

其中,下标“w”表示损耗功,“e”表示有效功。对于光面爆破, W_{xe} 决定爆破效果,为真正有效功。

不妨设:

$$\begin{cases} W_x = k_1 W_y \\ W_{yw} = k_2 W_{yw} \end{cases} \quad (5)$$

将方程(4)和(5)代入(3)得:

$$W_{xe} = [k_1/(1+k_1)]W - [k_2/(1+k_2)]W_w \quad (6)$$

式中: W_w ——两个方向上的总损耗功。

由此得到了 W_{xe} 表达式,可反映光面爆破效果,其值越大,用于炮孔连线方向拉伸裂纹和促进裂隙发展消耗的功越多,效果越好。

2 数值计算模型

为研究带空气夹层条件下,椭圆双极线性聚能药柱 (EBLSC) 及不耦合系数对岩石作用效果的影响,采用 AUTODYN 软件进行数值模拟研究。

2.1 材料参数设定

在仿真模型中,壳体为聚苯乙烯 (POLYETHYL),采用 SHOCK 状态方程进行描述;炸药为 TNT,采用 JWL 状态方程进行描述;对于花岗岩岩体采用

EOS 状态方程,Johnson Cook 强度模型,拉伸失效模型进行描述;对于空气采用理想气体状态方程进行

描述,设置内能为 $2.066 \times 10^5 \text{ kJ/m}^3$ 。各材料参数设置如表 1。

表 1 材料参数

聚苯乙烯	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	格林乃森系数	$C_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1				
	0.915	1.64	2.9×10^3	1.48				
TNT	$Q_v/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A/kPa	B/kPa	R_1	R_2	ω
	4227	1.63	6930	3.7×10^8	3.747×10^6	4.15	0.9	0.35
花岗岩	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量/kPa	剪切模量 kPa	屈服应力/kPa	拉伸极限/kPa			
	2.63	5×10^7	1.25×10^7	4×10^4	2.4×10^4			

2.2 计算模型

仿真包括椭圆双极线性聚能药柱和圆柱形药柱起爆对照模型。采用 2 维面对称模型,药柱,空气夹层采用欧拉模型,物质沿网格边界可以自由流动;EBLSC 药柱尺寸与当前定型产品一致^[7],聚苯乙烯壳厚 2 mm,药型罩厚度 1 mm,半顶角 35°,长轴 30 mm,短轴 22 mm,对照圆柱药保持药量一致,岩石采用拉格朗日模型,炮孔直径分别为 40, 50, 65, 80, 95, 110 mm,岩石外边界设置冲击波透射条件。为观察岩石质点应力和位移变化,在 X 方向和 Y 方向间隔 10 mm,分别设置 5 个观测点。如图 1 所示。

的爆破效果。首先对照圆柱形药柱,分析 ESPLC 的作用结果以及爆破效果的影响,然后分析不耦合系数对光面爆破效果的影响。

3.1 有效体积功

假设单位体积花岗岩破碎和扩展消耗功的均值为 w ,且对于微压缩问题^[4],不妨假设其为定值 w 。对于方程(6)两边同时除以 wL (其中 L 为炸药长度),得:

$$S_{Xe} = [k_1/(1 + k_1)]S - [k_2/(1 + k_2)]S_w \quad (7)$$

式中: S_{Xe} ——单位长度药柱下 X 方向有效功用于花岗岩破碎和扩展对应的体积; S ——单位长度药柱总能量完全用于花岗岩破碎和扩展对应的体积; S_w ——单位长度药柱对应的花岗岩破碎和扩展的实际体积。

对于二维模型,单位长度体积即为区域对应面积大小。

3.2 EBLSC 爆破效果评价

以 $\varnothing 80 \text{ mm}$ 炮孔为例,EBLSC 和对照圆柱形药柱仿真结果如图 2 所示。

由图 2(a)和(b)可知,EBLSC 起爆后在聚能方向产生了明显的射流,相比于非聚能方向,射流更早地作用到了岩石内壁,且具有强力开槽作用,这表明 EBLSC 结构能够很好地产生聚能效果;从图 2(c)和(d)可知,两种装药结构下,都发生了岩石破碎和扩腔现象,且前者聚能方向上的岩石破碎和扩展程度要比非聚能方向上小得多,最终腔体结构近似为椭圆形,这表明 EBLSC 在 X 方向上的损耗的能量较少,炸药总能量利用率较高;对于 EBLSC,在聚能方向还产生了明显的裂隙(深度约 10 mm),并且该裂隙在气体膨胀作用下进一步发生切向和径向扩展,有利于炮孔连线方向上应力波的传播和作用,引导裂纹沿着炮孔连线方向发展,从而形成更长,更为光整的开挖断面,大大改善光面爆破效果。

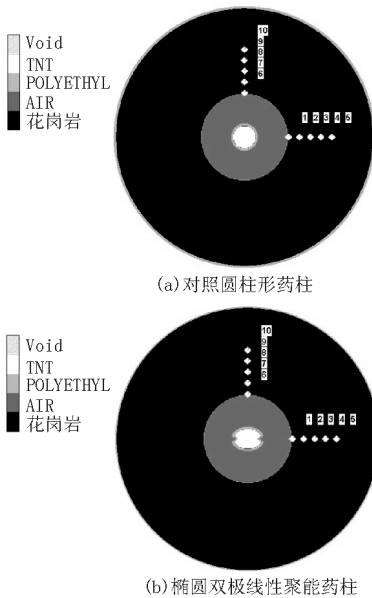


图 1 计算模型(以 80 mm 炮孔为例)

3 数值模拟与计算结果分析

对不同工况下的计算模型,采用欧拉-拉格朗日耦合算法求解。考虑岩石破碎和腔体扩展程度,从能量角度入手,定义有效体积功,并利用损耗体积功,侧面反映有效做功的大小,以此分析不同工况下

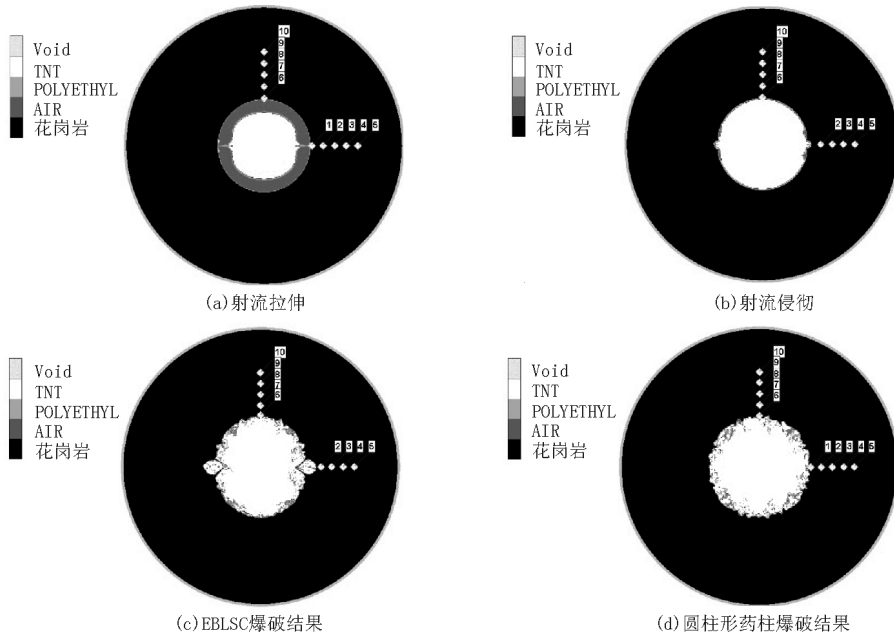


图 2 EBLSC 与圆柱形药柱仿真结果

由图 3 可知, EBLSC 炮孔连线方向和连线垂直方向上产生的比冲量, 与圆柱形装药在炮孔连线方向上产生的比冲量相近, 偏差 < 10%, 这表明炮孔调整了对炸药总能量分配, 一定程度上将其沿周向均匀化了。因此, 对于 EBLSC 的能量分布, 可以大致认为在 X 和 Y 方向上相近, 从而得到:

$$W_x \approx W_y \rightarrow k_1 \approx 1 \quad (8)$$

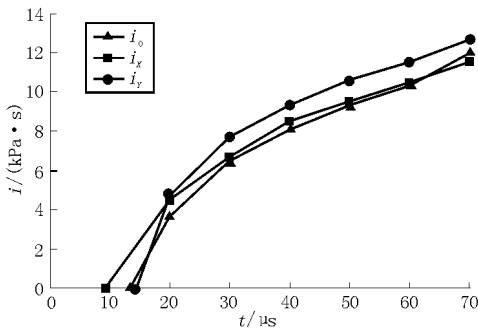


图 3 比冲量图

此外, 由于假设单位体积岩体破碎和扩展消耗功相等, 故有:

$$k_2 = S_{xw}/S_{yw} \approx \Delta x_w/\Delta y_w \quad (9)$$

式中: Δx_w 、 Δy_w ——分别表示在 X 方向和 Y 方向上腔体半径的变化量。

将方程(8)和(9)代入方程(7), 可得:

$$S_{xe} = (1/2)S - [\Delta x_w/(\Delta x_w + \Delta y_w)]S_w \quad (10)$$

由于对于同量炸药, 方程(10)中的 S 相同, 故

S_{xe} 随着 S_{xw} 的增大而减小。

由表 2 可知, EBLSC 的总损耗体积功小于圆柱形药, 这表明有更多的能量用于拉伸裂纹和扩展裂隙; EBLSC 在炮孔连线方向上的损耗体积功约为圆柱形药的 50%, 产生了更多有效体积功, 大大提高了炮孔连线方向上的能量利用率, 这也正是光面爆破中所需要达到的效果。由此知, EBLSC 的光面爆破效果明显优于传统圆柱药柱。

表 2 圆柱形药柱与 EBLSC 单位长度损耗体积功

类型	$\Delta x_w/\text{mm}$	$\Delta y_w/\text{mm}$	S_w/π	S_{xw}/π
圆柱形药柱	3.4	3.4	283.5	141.8
EBLSC	1.9	4.1	247.8	78.5

3.3 不耦合系数的影响

3.3.1 仿真结果

随着炮孔直径 D 的变化, 不耦合系数随之变化。保持 EBLSC 药柱不变进行数值模拟。

由图 4 可知, 爆破后的炮孔近似于椭圆形, 且逐渐趋于球形, 这表明随着炮孔直径的增大, 气体产物的膨胀作用越来越充分和均匀化; 当不耦合系数较小时, 腔体壁岩石破碎程度较大, 随着不耦合系数的增大, 腔体壁越来越平整, 这表明岩石破碎作用削弱, 气体扩腔逐渐占主导; 在炮孔连线方向均有刻槽, 深度为 9 ~ 12 mm, 表明在该不耦合系数范围下, 射流侵彻能力变化不大。

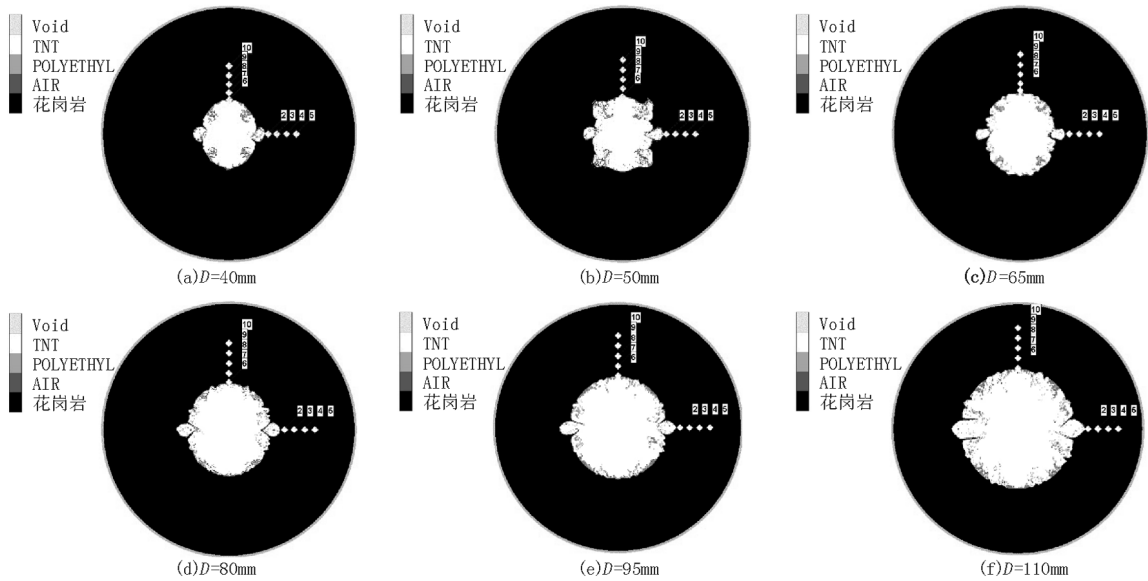


图4 不同炮孔直径下的爆破结果

3.3.2 有效体积功评价与不耦合系数优化

同样采用单位长度的有效体积功对不同炮孔直径下的爆破效果进行评价, D 和 d 分别为炮孔直径和等药量圆柱形药直径。

由表3可知,随着不耦合系数的增大, X 方向和 Y 方向上的岩石破碎和扩展距离不断减小,产生的总损耗功和聚能方向上的损耗功先减小后增大,即有效功先增大后减小,存在最优值。根据最小二乘法基本原理和多项式拟合一般方法^[9],运用 Matlab 作出炮孔连线方向上的损耗体积功 S_{Xw} 和不耦合系数 D/d 的关系曲线并进行4次多项式拟合:

$$S_{Xw} = -13.4(D/d)^4 + 182.6(D/d)^3 - 874(D/d)^2 + 1688(D/d) - 959 \quad (11)$$

表3 EBLSC 单位长度损耗体积功

D/d	$\Delta x_w/\text{mm}$	$\Delta y_w/\text{mm}$	S_w/π	S_{Xw}/π
1.63	6.7	13.5	494.4	164.0
2.04	6.0	10.8	484.8	173.1
2.65	2.9	8.4	391.6	100.5
3.26	1.9	4.1	247.8	78.5
3.88	1.1	2.6	178.6	53.1
4.49	1.4	3.1	251.8	78.3

$R^2 = 0.97$,因此拟合效果是比较好的(见图5)。根据方程(11)可以求出对应炮孔连线方向最小损耗功的最优不耦合装药系数为3.62,这与文献[7]中试验给出的最优不耦合系数3.43是比较相近的。因此验证了有效体积功评价方法的正确性,具有一定的可信度。

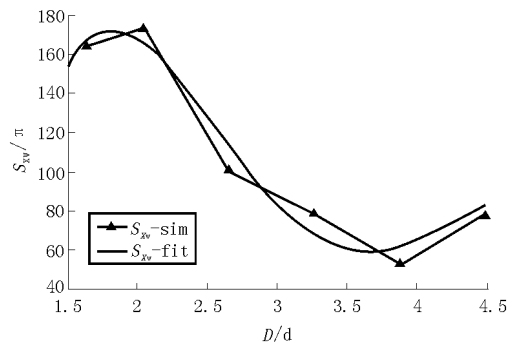


图5 单位长度损耗体积功拟合曲线

4 结论

(1)对 EBLSC 和圆柱形药柱进行数值模拟对比,EBLSC 在聚能方向产生明显射流,有强力开槽作用;聚能方向上的岩石破碎和扩展程度要比非聚能方向上小得多,损耗能量少,炸药总能量利用率较高;圆柱形药柱和 EBLSC 的能量沿周向都近似均匀分布,后者在各方向上的能量利用率有差异,聚能方向上能量利用率最高,绝大部分用于拉伸和发展裂纹;聚能方向还产生了明显的裂隙,有利于引导炮孔连线方向上的裂纹沿着炮孔连线方向发展,进一步改善爆破效果。

(2)建立炮孔连线方向上的有效体积功模型以评价爆破效果,并通过对不同炮孔直径的工况进行数值模拟,发现不耦合系数在1.5~4.5时对炮孔连线方向上的裂隙深度影响不大;随着不耦合系数增大,总有效功先增大后减少,存在最大能量利用率;

在炮孔连线方向上的有效功也存在对应最优不耦合系数约为3.62,与相关文献试验结果相近。

(3)对于EBLSC,当不耦合系数较小时,冲击波作用占据主导,岩石破碎区域较大,且射流未能充分拉伸,使得聚能方向上的有效功也较少;随着不耦合系数增大,壳体产生的气刃和射流逐渐占主导,岩石破碎和扩展区域减小,且在聚能方向上的炸药能量得到更多有效利用;随着不耦合系数进一步增大,气刃和射流减速,冲击波大幅度衰减,气体产物膨胀占据主导,扩腔区域增大,损耗功小幅度增加。

(4)文中花岗岩岩体采用EOS状态方程进行数值仿真,并未考虑到实际应用中节理岩体或软弱岩石等情况,通过研究得到的不耦合系数最优结果仍需要在实际应用中进一步验证调整。

参考文献:

- [1] 尚玉峰.影响光面爆破效果的因素分析[J].南方金属,2008,(3):53-55.
- [2] 宗琦,杨吕俊.岩石中爆炸冲击波能量分布规律初探[J].爆破,1999,(6):16-17.
- [3] 吴亮,卢文波,宗琦.岩石中柱状装药爆炸能量分布[J].岩土力学,2006,(5):735-739.
- [4] 梁为民,LIU Hongyuan,周丰峻.不耦合装药结构对岩石爆破的影响[J].北京理工大学学报,2012,(12):32-43.
- [5] 杨哲峰,高诗明,陈建平,等.光面爆破径向不耦合系数优化研究[J].科学技术与工程,2014,(35):121-125.
- [6] 秦健飞.双聚能预裂与光面爆破新技术评析[J].水利水电工程,2008,(1):17-22.
- [7] 李必红,崔伟峰,李是良.椭圆双极线性聚能药柱不耦合系数试验研究及数值模拟[J].爆破,2013,(6):30-31.
- [8] 马建军,程良奎,蔡路军.爆破应力波的传播及其远区破坏效应研究现状述评[J].爆破,2005,(2):17-21.
- [9] 徐亦唐.基于最小二乘法的曲线拟合及其在Matlab中的应用[J].电子世界,2013,(10):102-103.

(上接第69页)

6 抢险加固效果

6.1 帷幕灌浆质量检查

帷幕灌浆质量检查以钻孔取心观察和检查孔降水头注水试验为主,注水试验在坝段灌浆结束14天后进行。本工程质量检查孔均由监理单位、设计单位布置,共在10个单元中布置注水试验孔20个,每个单元2个孔,均位于2排灌浆孔中间,完成注水试验72段,测得各试验段的综合渗透系数为 $2.3 \times 10^{-6} \sim 8.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,均 $< 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,合格率100%。

6.2 运行效果评价

抢险加固工程结束后坝体外坡已没有渗出处出现,经过3个月的尾矿排放试运行后通过了主管部门的竣工验收,目前该赤泥库已经堆积至最终设计标高,进入到闭库程序,坝外坡未再出现渗漏情况,导渗管排渗正常,赤泥库整体运行良好。

7 结语

从坝体抢险加固后的钻孔取心、注水试验和运行情况看,针对该赤泥库渗漏采取的“内堵外排”措

施是行之有效的,尤其是灌浆施工前的试验工作,为该工程的钻孔施工工艺、灌浆压力、段长的划分及浆液水灰比的比级选取等参数的适宜性提供了直接的依据,尤其是在碎石较集中区域的钻探施工及灌浆参数的选取,得出了较为宝贵的经验,值得在类似地层中推广应用。

参考文献:

- [1] 张景秀.坝基防渗与灌浆技术(第2版)[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [2] 白永年,等.中国堤坝防渗加固新技术[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [3] 邓树密.伊朗TALEGHAN水利枢纽厂房封闭帷幕灌浆施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(8):66-69.
- [4] 毕明亮,等.深厚砂砾石地层帷幕灌浆质量检测与评价技术[J].灾害与防治工程,2008,(2):62-66.
- [5] 刘海波.砂砾石层坝基帷幕灌浆施工技术[J].西部探矿工程,2008,(5):39-41.
- [6] 马小七,吕建民,路学忠.宁夏太阳山供水工程刘家沟水库坝基帷幕灌浆试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(6):29-32.
- [7] 明义.某防渗墙底部帷幕灌浆施工技术浅析[J].西部探矿工程,2009,(2):36-37.
- [8] 党令宣.南沙水电站坝基帷幕灌浆施工控制[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):138-139.