

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.01.010

采石场开采爆破炮孔的布置优化^{*}

门金龙^① 陈邑星^② 郑鸿区^① 蔡冲冲^① 熊碧波^①

①广东石油化工学院(广东茂名,525000)

②中国核工业二三建设有限公司(北京,101300)

[摘 要] 采用数值模型与理论计算相结合的方法,对某露天采石场爆破开采作业中的单孔爆破、双孔爆破以及多孔爆破进行研究,并进行了现场试验验证。结果表明:同等 TNT 当量下,双孔爆破时的有效爆破半径比单孔爆破时大 53.04%;双排矩形炮孔爆破时的有效爆破面积比双排三角形炮孔时大 3.11%。提出了露天采石场爆破开采时双炮孔布置、多炮孔双排矩形炮孔布置以及 $\sqrt{3}/2$ 倍孔距的多炮孔双排三角形炮孔布置的优化措施。

[关键词] 采石场;爆破半径;炮孔布置;数值模拟

[分类号] TQ560;TD235.4

Layout Optimization of Blasting Holes in Quarry Mining

MEN Jinlong^①, CHEN Yixing^②, ZHENG Hongqu^①, CAI Chongchong^①, XIONG Bibo^①

① Guangdong Institute of Petrochemical Technology (Guangdong Maoming, 525000)

② China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd. (Beijing, 101300)

[ABSTRACT] Single-hole blasting, double-hole blasting and multi-hole blasting in the blasting mining operation of an open-pit quarry were studied using a combination of numerical models and theoretical calculations, and the field test verification was carried out. Results show that, under the same TNT equivalent, the effective blasting radius in double-hole blasting is 53.04% larger than that in single-holes blasting, and the effective blasting area in double-row rectangular hole blasting is 3.11% larger than that in double-row triangular hole blasting. The optimization measures for blasting mining in open-pit quarry, including double blast hole arrangement, double-rows rectangular blast hole arrangement of multi-blast holes, and double-row triangular blast hole arrangement with $\sqrt{3}/2$ hole spacing of multi-blast holes, were put forward.

[KEYWORDS] quarry; blasting radius; blast hole layout; numerical simulation

引言

岩石爆破是国内外常用的矿产资源开采手段。但爆破开采存在成本较高、爆破效率较低、安全隐患较大等问题。因此,降低爆破成本、提高爆破质量以及加强爆破作业安全系数一直是矿产爆破开采的主要研究方向^[1]。相关研究始于 20 世纪 70 年代。Kutter 等^[2]对岩石的爆破过程进行研究,并提出爆炸气体压力场和爆炸应力波致使岩石碎裂的理论。Yang 等^[3]利用试验研究爆破应力波的叠加与干涉对岩石裂纹的影响,对采矿的裂纹研究提供了依据。

Yi 等^[4]研究了相邻爆破炮孔对应力波传播的影响,结果表明,两相邻炮孔延长线上的拉应力由于应力波叠加而减小。高士才等^[5]通过水泥砂浆台阶爆破试验,提出一种能够增强爆炸气体催生爆炸孔周围裂隙的方案。陈浩哲^[6]采用有限元仿真研究不同起爆时差对爆破效果的影响规律,提高了光面爆破的爆破效果。李洪伟等^[7]采用数值模拟研究岩石爆炸裂纹发现,炮孔周围裂纹与粉碎数量随炮孔间距离的增加而增多。然而,国内外对矿山岩石的爆破理论研究大多基于地下开采的爆破机理、炮孔布置和爆破作业安全等问题,对露天开采的多炮孔爆破布置的研究相对较少。

^{*} 收稿日期:2021-05-26

基金项目:广东省自然科学基金面上项目(2021A151010166);广东省高校特色创新项目(2020ktsx080);茂名市科技计划项目(2020543);广东石油化工学院引进人才科研项目(517164)

第一作者:门金龙(1988-),男,博士,副教授,主要从事安全科学技术、化工安全、应急管理、化工园区智慧化等的研究。E-mail:523033589@qq.com

通信作者:熊碧波(1996-),男,学士,科研助理,主要从事安全与应急、消防技术的研究。E-mail:179543028@qq.com

结合广东省茂名市某露天采石场爆破作业的实际问题,采用数值模拟与理论计算相结合的方法,分析采石场爆破机理,优化炮孔排布方式,为提高采石场爆破开采效率提供技术支持。

1 岩石爆破理论

岩石爆破的破碎效应影响着工程项目的实际进程和效益,同时也关系到矿山、公路等基础工程的地质稳定性^[8]。研究并揭示岩石爆破的破碎机理对促进爆破理论及相关技术的发展、提高实际工程效益具有重大的实际意义^[9]。

1.1 有限元理论

以典型的八节点实体单元为例,初始时刻的任意空间点 (a_1, a_2, a_3) 的运动轨迹方程^[10]为

$$x_i = x_i(a, t)。(1)$$

式中: a 为物质点的初始位置 (a_1, a_2, a_3) 。

运动初始条件为

$$\begin{aligned} x_i(a, 0) &= a_i; \\ \dot{x}_i(a, 0) &= v_i(a)。 \end{aligned} (2)$$

运动微分方程为

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \int_v \sum_{i=1}^3 (\rho \ddot{x}_i - f_i) \delta u_i dv + \\ &\int_v \sum_{i,j=1}^3 \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dv - \int_{\partial b_i} \sum_{i=1}^3 \bar{T}_i \delta u_i dS = 0。 \end{aligned} (3)$$

式中: $\delta \Pi$ 为总势能; δ 为势能; u_i 为满足位移边界条件的虚位移场。

设 (ξ, η, ζ) 为单元的自然坐标,形状函数为

$$f_j(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi \xi_j)(1 + \eta \eta_j)(1 + \zeta \zeta_j)。(4)$$

式中: (ξ_j, η_j, ζ_j) 为单元第 j 节点的自然坐标。

单元节点坐标矢量

$$\{x\}^e = [x_1^1, x_2^1, x_3^1, \cdots, x_1^8, x_2^8, x_3^8]。(5)$$

插值矩阵为

$$[N(\xi, \eta, \zeta)] = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & L & f_8 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & L & 0 & f_8 & 0 \\ 0 & 0 & f_1 & L & 0 & 0 & f_1 \end{bmatrix}_{3 \times 24}。(6)$$

将式(6)代入式(3),得矩阵形式的表达式

$$\delta \Pi = \sum_{m=1}^n \delta x^m \left[\int_{v_m} \rho N^T dv \dot{x}^e + \int_{v_m} B^T \sigma dv - \int_{v_m} \rho N^T f dv - \int_{s_m} N^T dS \right] = 0。(7)$$

式(7)中的柯西应力矢量经计算优化,可得

$$M \dot{x}(t) = P(x, t) - F(x, \dot{x})。(8)$$

式中: M 为总质量矩阵; $\dot{x}(t)$ 为总节点的加速度矢量; P 为总载荷矢量; F 为单元应力场的等效节点力

矢量。

1.2 岩石爆破过程理论计算

岩石中发生爆炸时,形成一团高温、高压气体,在高压气体和空气介质的界面处,爆炸产物以极高的速度向周围扩散,压缩周围的空气,像活塞一样把能量传给压缩的空气层,使其压力、密度等急剧升高,产生一系列的压缩波,最终叠加形成冲击波。冲击波作用于岩石体,产生远大于岩石抗压强度的径向和切向压应力^[11],使岩壁受到强烈压缩而形成一个空腔,并不断扩大,从而形成岩石的压碎区^[12]。研究爆炸径向应力优化开采炮孔布置时,忽略爆炸法向应力的影响,岩石爆破过程理论计算^[13]的参考公式如下。

岩石中的初始应力

$$p_c = \frac{2\rho c \rho_0 v_0^2}{3 \cdot 1(\rho c + \rho_0 v_0)}。(9)$$

式中: p_c 为岩石中冲击波的初始压力,MPa; ρ 为原岩密度,kg/m³; c 为岩石中冲击波的传播速度,m/s; v_0 为炸药爆速,m/s; ρ_0 为炸药密度,kg/m³。

岩石初始损伤因子

$$D_0 = 1 - \left[1 + \frac{16(1 - \mu_c^2)}{9 + (1 - 2\mu_c)} C_d \right]^{-1}。(10)$$

式中: D_0 为岩石初始损伤因子; μ_c 为岩石受崩落爆破损伤后泊松比,取 0.25; C_d 为裂纹密度。

岩石抗压强度

$$\sigma_{cd} = \sigma_c \varepsilon^{\frac{1}{3}}。(11)$$

式中: σ_{cd} 为岩石的抗压强度; σ_c 为岩石的单轴抗压强度; ε 为岩石的加载应变率,一般为 10 ~ 10³ s⁻¹^[14]。

冲击波作用下岩石的粉碎区半径

$$R_1 = \left[\frac{\sqrt{2} p_c B}{2(1 - D_0) \sigma_{cd}} \right]^{\frac{1 - D_0}{\alpha}} r_b。(12)$$

式中: R_1 为岩石的粉碎区半径,m; α 为应力波衰减系数, $\alpha = 2.25$; r_b 为炮孔半径, $r_b = 0.04$ m。

$$B = \{1 + [1 + b(D_0)]^2 + [1 + b^2(D_0)] -$$

$$2\mu_d(1 - \mu_d)[1 - b(D_0)]^2\}^{\frac{1}{2}}。(13)$$

式中: μ_d 为岩石泊松比, $\mu_d = 0.2$; $b(D_0)$ 为损伤岩体侧向应力系数,则

$$b(D_0) = \frac{\mu_d(1 - \frac{16}{9} C_{d1})}{1 - \mu_d(1 - \frac{16}{9} C_{d1})}。(14)$$

1.3 开采炮孔有限元模型的建立及参数设置

某露天采石场位于广东省茂名市南部,占地面积为 0.082 km²,设计生产规模为 3 × 10⁵ m³/a,探明

资源储量为 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$,主要开采建筑用花岗岩。

1.3.1 有限元模型的建立

运用有限元处理软件 Hypermesh 建立 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的数值模型。单炮孔爆破模拟和双炮孔爆破模拟分别采用 1/4、1/2 模型,对称面上施加对称约束。数值模型采用非反射边界以模拟无限远的冲击波传播过程,如图 1 ~ 图 2 所示。

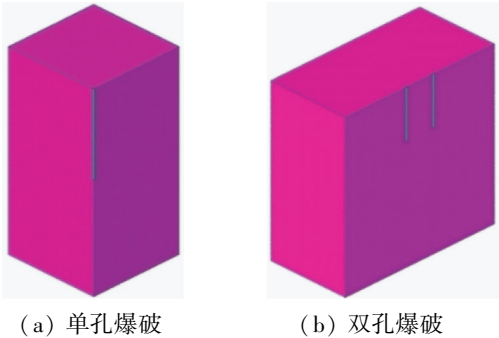


图 1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

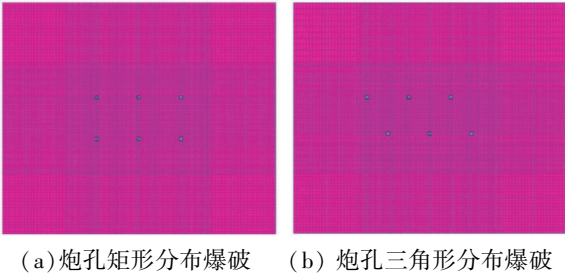


图 2 炮孔分布模型
Fig.2 Distribution model of blast holes

为避免在炸药爆炸瞬间应力的急剧衰减,模型中对炮孔周边区域的六面体网格进行细化,如图 3。

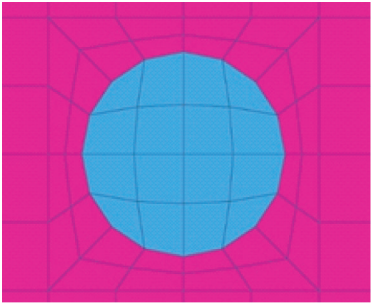


图 3 炮孔周边网格局部细化
Fig.3 Local refinement of the mesh around the blast hole

1.3.2 材料参数

选用 2#乳化炸药,材料参数见表 1。
选取 3#岩石材料,主要力学参数见表 2。
在采石场爆破数值模拟中,炮孔孔径设为 0.15 m ,爆破高度为 3 m 。起爆点为药柱上平面中心位置。爆破后,分析各孔径排布方式的爆炸效果,并根

表 1 2#乳化炸药材料参数
Tab.1 Material parameters of 2# emulsion explosive

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_0 / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2
1 200	1 100	4.5	213.0	0.53	3.5	0.9

表 2 3#岩石材料参数
Tab.2 Material parameters of 3# rock

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松比	屈服 强度/ MPa	切线 模量/ GPa	抗压 强度/ MPa
2 720	140	0.2	25	12	250

据爆破效果选出最优布孔方式。

2 采石场单孔爆破开采

结合露天采石场的现场情况,建立数值模型模拟现场单孔爆破。由图 4 可知,单孔爆破的岩石最上层应力云图整体呈圆环状,应力随着扩散半径的增加而减小。在距单孔爆破中心 $R = 1.48 \text{ m}$ 的爆破范围内,单元应力全部达到岩石材料的抗压强度,即岩石发生破碎。因此,在 2#乳化炸药单孔爆破作业时,有效爆破半径为 1.48 m 。

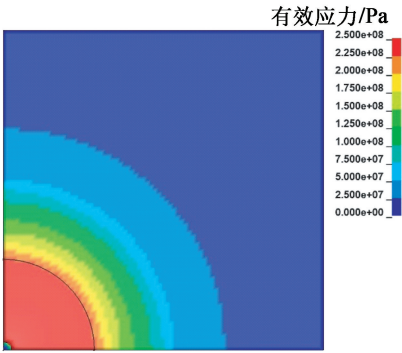
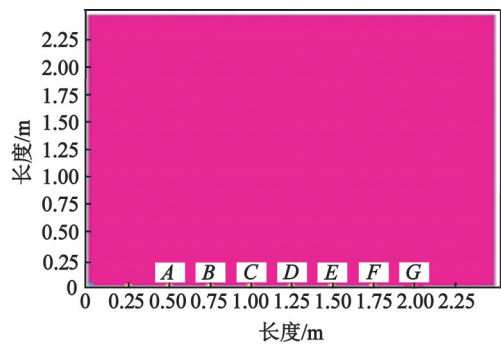
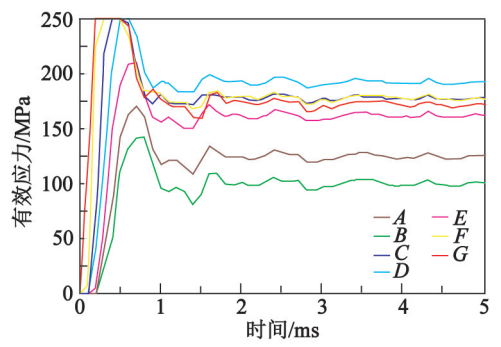


图 4 单孔爆破时岩石的应力云图
Fig.4 Stress cloud diagram of rock during single-hole blasting

在距离单孔爆破中心 0.50 、 0.75 、 1.00 、 1.25 、 1.50 、 1.75 m 和 2.00 m 处,分别选择 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 建立 7 个单元爆炸的应力输出点。输出点位置及应力变化曲线如图 5 所示。结果表明: E 、 F 、 G 点处,单元爆炸峰值应力均未达到岩石抗压强度 250 MPa ;在距离单孔爆破中心不足 1.25 m 半径范围内的 A 、 B 、 C 、 D 4 个点,单元爆炸应力均达到了岩石的抗压强度 250 MPa 。因此可知,在 2#乳化炸药作用下,单孔爆破的有效爆炸半径范围为 $1.25 \sim 1.50 \text{ m}$,与图 4 岩石应力云图的有效爆破半径 1.48 m 相



(a) 输出点位置



(b) 输出点应力变化

图 5 单孔爆破输出点位置及有效应力变化曲线
Fig.5 Output points position and effective stress variation curves during single-hole blasting

对应。

3 采石场多孔爆破及布局优化

3.1 多孔爆破理论计算

3.1.1 双孔爆破

1) 爆破孔间距。

研究表明,爆破孔间距 a 的取值范围在 $R \sim 2R$ 、最小抵抗线 $W < R$ 时,双孔爆破裂隙区覆盖了单孔爆破区的所有岩石介质,此时单孔爆破区的面积为 $S = aW^{[10]}$ 。以最小抵抗线为爆破位置,研究炸药的破坏程度能否满足要求,双孔爆破时应力叠加的最小抵抗线 W 应低于半径 R (图 6)。

当 $W < R < a$ 时,单孔爆破区的面积为 $S = aW$,

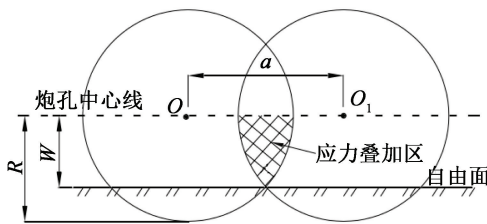


图 6 双孔爆破应力叠加图

Fig.6 Stress superposition diagram during double-hole blasting

双孔爆破破碎区刚好覆盖单孔爆区内的所有岩体,双孔爆破的破碎区叠加消除了破碎力。此时,可认为炮孔爆炸影响区内的岩石均破碎。因此,以 S 的最大值确定 a 的值,由几何关系可得 $a = 1.23R$;代入有效爆破半径 $R = 1.48\text{ m}$,则 $a = 1.82\text{ m}$,故其最小抵抗线距离 $W = 1.175\text{ m}$ 。

2) 双孔爆破分析。

图 7 为孔间距 1.82 m 的双孔爆破应力云图。由图 7 可知,双孔爆破时,横向最大破碎半径 R_1 在 $2R \sim 3R$ 之间,单元应力全部达到岩石材料的抗压强度。因此,可以判定,双孔爆破的横向最大破碎有效影响半径约为 4.53 m 。在双孔爆破中,各炮孔爆破半径内的岩石全部达到了抗压强度,即发生破碎。此外,爆炸应力波导致炮孔叠加区域上方的部分岩石材料达到抗压强度,出现破碎。

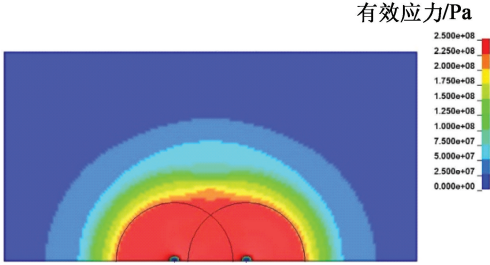


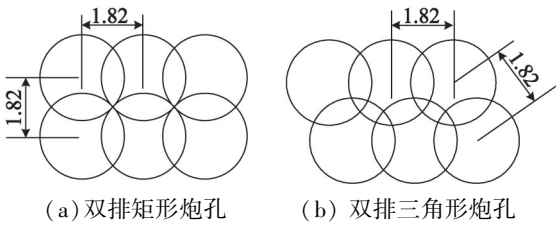
图 7 双孔爆破时岩石的应力云图

Fig.7 Stress cloud diagram of rock during double-hole blasting

3.1.2 多孔爆破半径

1) 多孔分布方式。

常用的布孔方式有单排布孔和多排布孔两种^[15]。现以多排炮孔布置为研究对象,分别分析双排矩形炮孔布置和双排三角形炮孔布置。当双孔爆破间距为 1.82 m 时,其爆破范围内所有岩石受到的冲击波均达到破碎要求。为达到最佳爆破效果,分别设置炮孔间距为 1.82 m 的双排矩形炮孔与孔间距 1.82 m 、排距为 1.57 m 的双排三角形炮孔,如图 8 所示。



(a) 双排矩形炮孔 (b) 双排三角形炮孔

图 8 双排炮孔分布示意图(单位:m)

Fig.8 Schematic diagram of the distribution of double-row blast holes (unit:m)

2) 多孔爆破分析。

由图 9 可知,双排矩形炮孔和双排三角形炮孔

爆破时,各炮孔爆破半径内的岩石应力达到了抗压强度极限,表明在该区域内岩石全部破碎。根据图 9(a)可知,爆破影响范围以外,应力逐层降低;受两排端部应力波共同作用,部分区域应力也达到了抗压强度,形成岩石破碎。根据两种排布方式的影响范围,得到三角形分布和矩形分布的双排炮孔爆破有效面积分别为 27.43、28.30 m²。由于三角形炮孔分布的排距为 1.57 m、矩形炮孔分布的排距为 1.82 m,进而导致了双排矩形炮孔布置时有效爆破面积比双排三角形炮孔布置时大3.11%。

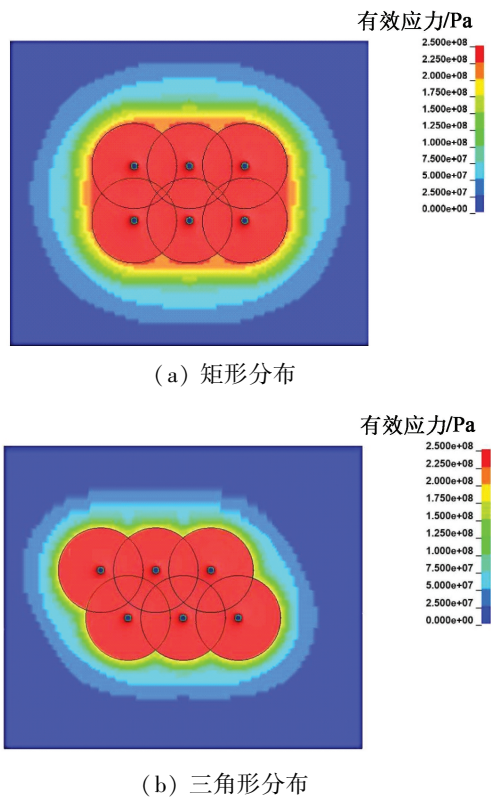


图 9 多孔爆破时岩石的应力云图

Fig.9 Stress cloud diagram of rock during multi-hole blasting

3.2 多孔爆破数值模拟及验证

3.2.1 双孔爆破

在露天采石场双孔爆破模拟中,沿着双孔爆破中心位置向两边选取距离中心点 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 和 3.0 m 的 6 个输出点 A、B、C、D、E、F,输出点及应力变化曲线如图 10 所示。由图 10(b)可知,除 E 点和 F 点峰值应力小于 250 MPa 外,A、B、C、D 4 个点的峰值应力均达到岩石的抗压强度 250 MPa。结果表明,双孔爆破横向最大破碎半径在 4~5 m 之间,其爆炸应力变化与峰值应力曲线基本一致,验证了孔间距 a 为 1.82 m、有效影响半径 R 为 4.53 m 的双孔爆破理论值。因此,该双孔爆破间距的选择较为科学。

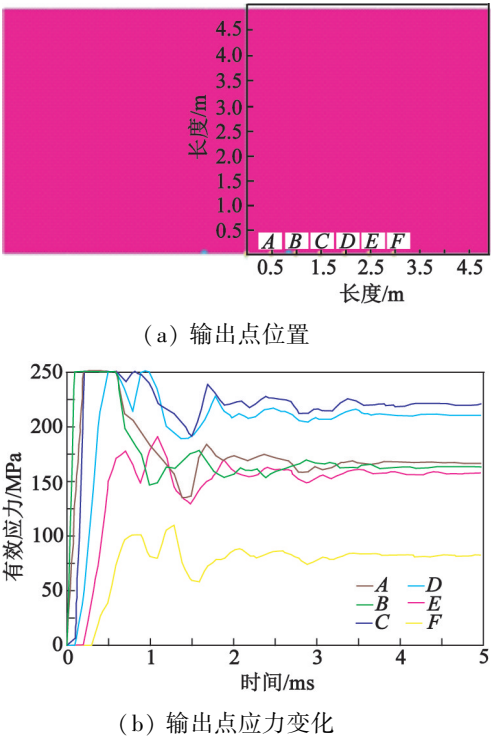


图 10 双孔爆破输出点位置及有效应力变化曲线
Fig.10 Output points position and effective stress variation curves during double-hole blasting

3.2.2 多孔爆破

分别在双排矩形分布和双排三角形分布中横向选取距离爆破中心 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m 的 A、B、C、D、E、F、G 7 个点,如图 11 所示。岩石应力变化曲线如图 12 所示。由图 11 和图 12 可知,除 G 点峰值应力未达到岩石的抗压强度,A、B、C、D、E、F 6 个点的抗压强度均达到 250 MPa,形成了岩石完全破碎。结果表明,多孔爆破双排中心线上的有效爆破范围在 3.0~3.5 m 之间;在多孔爆破的三角形排布中,3.0 m 处的 F 点应力达到了岩石的抗压强度 250 MPa,但与多孔爆破的矩形孔排布中 3.0 m 处的 F 点对比,三角形排布的 F 点应力下降明显。

3.3 采石场爆破作业的炮孔布置优化

3.3.1 炮孔布置优化措施

通过对单孔爆破、双孔爆破以及多孔爆破进行模拟研究与对比分析,结合某露天采石场的工程项目,提出采石场爆破作业的炮孔布置优化措施:

1) 露天采石场宜选用双炮孔布置爆破作业。在等同的TNT当量下,双孔爆破时的有效爆破半径为4.53 m,比单孔爆破时的有效爆破半径2.96 m (1.48 m×2)大53.04%。双孔爆破的工程效率明显高于单孔爆破,双炮孔布置爆破作业极大地提高了工程爆破效率,以较低的成本费用提供了同等岩

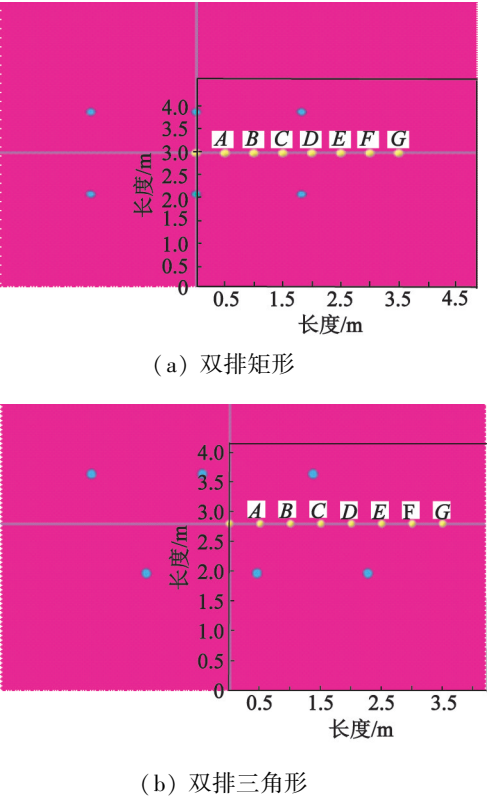


图 11 多孔爆破应力测点布置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of layout of stress measuring points during multi-hole blasting

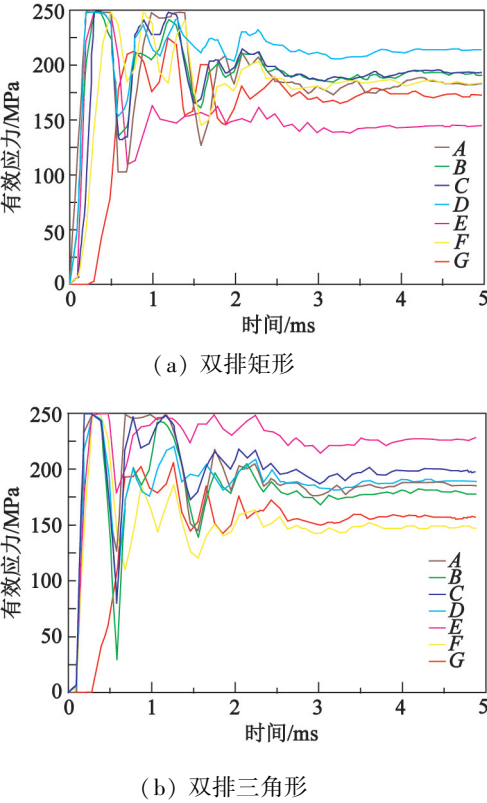


图 12 多孔爆破有效应力变化曲线

Fig. 12 Effective stress variation curves during multi-hole blasting

石爆破效果。

2)露天采石场多孔爆破作业宜选择双排矩形炮孔布置。在露天采石场实际工程作业中,双排矩形炮孔的有效爆破面积比双排三角形炮孔大 3.11%。矩形炮孔的排布方式可减少露天采石场在开采过程中的钻孔、搬运、储运、火药、人工等费用,保证整体的工程质量与工程效益。

3)露天采石场在特殊情况下采用多孔双排三角形爆破排布方式时,排距应为孔距的 $\sqrt{3}/2$ 倍。采用多孔双排三角形爆破,炮孔排列较为紧密,能更高效地利用乳化炸药的爆炸能量,使岩石开采的欠爆区和过爆区减小。

3.3.2 现场试验

以数值模拟与理论计算的炮孔布置优化措施为依据,孔间距 a 设为 1.82 m,使用 2[#]乳化炸药分别进行单、双炮孔爆破试验和双排矩形、三角形炮孔试验。将优化后的炮孔布置措施用于现场试验,与优化前的爆破情况进行对比,如图 13 所示。单孔爆破的有效爆破半径为 2.72 m (1.36 m × 2),双孔爆破的有效爆破半径为 4.28 m,比单孔爆破时提高了 57.36%。双排三角形炮孔爆破的有效爆破面积为 26.65 m²;双排矩形炮孔爆破的有效爆破面积为 27.48 m²,比双排三角形炮孔爆破时提高了 3.11%。炮孔布置优化后,采石场的有效爆破面积得到增大,证实开采炮孔布置优化措施的可行性,提高了采石场的工程效益。

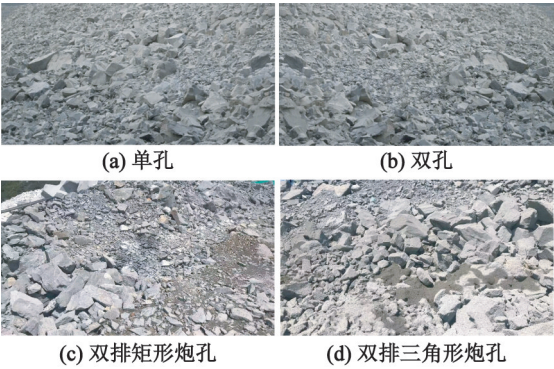


图 13 爆破试验的爆堆效果

Fig. 13 blasting outcomes

4 结论

结合某露天采石场实际情况,采用数值模型与理论计算相结合的方法,对单孔爆破、双孔爆破以及多孔爆破进行研究,结论如下:

1)露天采石场单孔爆破有效爆炸半径为 1.48

m;双孔爆破的最佳孔间距为 1.82 m,最小抵抗线为 1.175 m,破碎有效影响半径约为 4.53m。

2)多孔爆破的最佳炮孔布置为双排矩形炮孔。双排分布的矩形炮孔和三角行炮孔的有效爆破面积分别为 27.48、26.65 m²,矩形炮孔排布优于三角形炮孔排布。

3)采石场爆破作业中,炮孔布置宜选择双孔爆破、多孔的双排矩形炮孔和 $\sqrt{3}/2$ 倍孔距的双排三角形炮孔,该优化措施经现场试验验证可行。

参 考 文 献

[1] 戴俊. 爆破工程[M]. 北京:机械工业出版社,2007, 2:1-5.

[2] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1971, 8 (3): 181-202.

[3] YANG R S, WANG Y B, XUE H J, et al. Dynamic behavior analysis of perforated crack propagation in two-hole blasting [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 5: 254-261.

[4] YI C P, JOHANSSON D, NYBERG U, et al. Stress wave interaction between two adjacent blast holes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 1803-1812.

[5] 高士才,邢洪义,向远芝. 大孔距爆破技术与应用[J]. 爆破器材,1982(2): 25-28.

[6] 陈哲浩. 岩石中相邻炮孔爆破裂缝演化研究[D]. 西安:西安科技大学,2016.

CHEN Z H. Research on propagation of blasting crack between adjacent blast holes in rock [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.

[7] 李洪伟,雷战,江向阳,等. 不同炮孔间距对岩石爆炸裂纹扩展影响的数值分析[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 044103.

LI H W, LEI Z, JIANG X Y, et al. Numerical analysis of impact of shot hole spacing on crack growth in rock [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 044103.

[8] 王庆国. 隧道岩石爆破理论与数值模拟[D]. 成都:西南交通大学,2008.

WANG Q G. Theory study and numerical simulation on

rock blasting of tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[9] 张理维,王卫华,戴怡文. 基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 32-39.

ZHANG L W, WANG W H, DAI Y W. Blast hole arrangement optimization based on rock blasting damage [J]. Blasting, 2020, 37(1): 32-39.

[10] 杨坡. 巷道掘进爆破中围岩损伤范围的数值模拟[D]. 包头:内蒙古科技大学,2015.

YANG P. The numerical simulation of the blasting damage range of surrounding rock in roadway driveage [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.

[11] 李伟. 露天深孔台阶爆破合理炮孔超深的数值模拟与确定[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.

LI W. Numerical simulation and determination of reasonable blasting hole deep in deep-hole step blasting in open pit [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019.

[12] 周西华,门金龙,宋东平,等. 液态 CO₂ 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 524-529.

ZHOU X H, MEN J L, SONG D P, et al. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO₂ blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 524-529.

[13] 刘智权. 大间距无底柱分段崩落法回采爆破参数的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2005:25-28.

LIU Z Q. The research of stope blasting parameter in sublevel caving method with large space between [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2005: 25-28.

[14] 宗琦,柏杨,朱玉飞. 煤矿泥岩和砂岩冲击破碎与耗能特性试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(11): 156-161.

ZONG Q, BAI Y, ZHU Y F. Experiment of impact crushing and energy dissipation characteristics of mudstone and sandstone in coal mine [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(11): 156-161.

[15] 李增艺. 路基石方露天爆破孔布置有关问题研究[J]. 人民交通, 2018(9): 76-77.