

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.03.010

保护层开采爆破技术数值模拟研究与应用*

张紫晗 胡光球 郑建礼 余 晖 李庆松 张兆阳 汪啸林
广东锡源爆破科技股份有限公司(广东惠州,516007)

[摘 要] 为保证保护层开采的爆破效果,提高施工效率并降低爆破成本,采用垂直炮孔底部填充波阻抗差异较大的垫层材料的技术进行保护层开采爆破。在分析爆炸应力波的特点、作用范围、反射与透射原理后,选取泡沫混凝土加松砂作为复合垫层材料。使用 LS-DYNA 对不同保护层开采爆破高度和不同泡沫混凝土高度的保护层开采爆破进行模拟分析,探索保护层开采爆破的合理高度。分析认为,采用 25 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂复合垫层时,保护层开采爆破高度宜为 4 m。研究结果在广东太平岭核电站建设中得到运用,建基面岩体得到良好的保护。

[关键词] 保护层爆破;开采爆破高度;数值模拟;复合垫层

[分类号] TU746.5

Numerical Simulation and Application of Blasting Technology for Protective Layer Excavation

ZHANG Zihan, HU Guangqiu, ZHENG Jianli, YU Hui, LI Qingsong, ZHANG Zhaoyang, WANG Xiaolin
Guangdong Xiyuan Blasting Technology Co., Ltd. (Guangdong Huizhou, 516007)

[ABSTRACT] In order to ensure the blasting effect of protective layer, improve the construction efficiency and reduce the blasting cost, the technology of filling cushion material with large difference in wave impedance at the bottom of vertical blast hole was used in protective layer excavation blasting. After analyzing the characteristics, scope of action, reflection and transmission principles of explosive stress wave, the foam concrete and loose sand were selected as composite cushion materials. LS-DYNA was used to simulate and analyze the excavation blasting of protective layer with different blasting height of protective layer and different blasting height of foam concrete, to explore the reasonable height of protective layer excavation blasting. Analysis shows that when the 25 cm foam concrete and 10 cm loose sand composite cushion are used, the blasting height of the protective layer excavation is 4 m. This technology has been applied in the construction of Guangdong Taipingling Nuclear Power Station, and the foundation surface rock mass has been well protected.

[KEYWORDS] protective layer blasting; excavation blasting height; numerical simulation; composite cushion

引言

保护层开采爆破技术的研究得益于光面爆破和预裂爆破技术的发展与成熟。20 世纪 70 年代初,随着边坡光面爆破、预裂爆破技术在葛洲坝工程的成功运用^[1],研究人员开始改进人工撬挖保护层的开采方式,把预裂爆破、光面爆破技术也应用到保护层开采爆破中。随着研究的深入,保护层爆破垂直孔底部充填柔性垫层方法和水平光面(预裂)法逐渐成熟。复合垫层、聚能爆破理论等相继运用到保

保护层开采爆破中。吴新霞等^[2]提出在保护层爆破中采用大孔径复合垫层的爆破方法,将向上反射爆炸能量的刚性罩和柔性垫层相结合,减小爆破对孔底的影响。黄霖^[3]在保护层爆破中采用无垫层、柔性垫层、新型复合垫层 3 种保护层,运用有限元软件进行数值模拟,分析了应力波的发展、传播、衰减规律。黄庆明^[4]研究了聚能水平预裂爆破技术在生产中的应用,但对于聚能管的选材和聚能管本身的聚能效应未做深入分析。胡浩然等^[5]提出用于垂直炮孔的聚能、消能复合垫层结构,研制了聚能、消能结构的高波阻抗混凝土材料,并通过数值模拟分

* 收稿日期:2021-07-14

基金项目:广东省爆破工程技术研究中心建设项目(191119075799737)

第一作者:张紫晗(1991-),男,硕士研究生,工程师,从事爆破技术与施工方面的研究。E-mail:826745798@qq.com

通信作者:胡光球(1990-),男,硕士,从事爆破技术与施工方面的研究。E-mail:597715410@qq.com

析后成功用于工程实践,加快了施工效率,拓展了研究方向。

目前,因施工速度快、操作简单等优点,垂直孔底部填充柔性垫层的保护层开采爆破法被工程人员广泛运用。在工程实践中,为兼顾施工效果、效率和成本,通常会尽量增加保护层开采爆破高度。然而,现阶段专门对保护层开采爆破合理高度的研究较少。为探索保护层开采爆破的合理高度,在分析爆炸应力波特点、作用范围和反射、透射原理后,选取泡沫混凝土加松砂作为复合垫层材料,以削弱爆破对孔底建基面的损伤;运用 LS-DYNA 软件对不同高度的保护层开采爆破方法进行数值模拟,确定保护层爆破的合理高度。研究结果在广东太平岭核电站的建设中进行实际运用,取得了良好的爆破效果。

1 垫层材料的选取

1.1 保护层爆破垫层材料的作用

保护层开采爆破技术中,常用的垫层有柔性垫层、消能与聚能复合垫层等。

柔性垫层是在炮孔底部填充空气、泡沫、竹片、松砂等柔性材料。一方面,通过材料的缓冲吸能作用,降低孔底的爆炸峰值压力,达到保护基岩的目的;另一方面,由于柔性材料的波阻抗小于岩石,当爆炸产生的应力波在柔性垫层和岩石之间传播时,因两者的波阻抗差异较大,应力波在两者接触面发生强烈的反射和一定程度的透射,大部分应力波发生反射,小部分应力波发生透射进入岩石,孔底基岩得到保护。

聚能、消能复合垫层爆破技术是一种在炮孔底部填充高波阻抗垫块加柔性缓冲层的爆破技术。原理是利用特定形状的高波阻抗垫块聚能和消能,减弱垂直方向的应力波,增强水平方向的应力波,从而减弱传入底部建基面的应力波,保护建基面岩体;利用应力波在波阻抗相差大的介质界面之间的反射作用,在空气-高波阻抗垫块-柔性垫层 3 种介质界面之间形成强烈反射,减弱透射进入建基面岩体的应力波;同时,利用柔性缓冲垫层的吸能作用消耗应力波的能量,以保护建基面岩体。

垫层材料在保护层爆破中的作用通常可以分为两种,即波阻抗差异大的不同垫层材料界面对应力波的反射和柔性材料的吸能作用。

1.2 垫层材料的选择

垫层材料的选择和布置应当充分考虑爆炸应力波的传播和衰减情况。爆炸应力波的传播可分为 3

个作用区域^[6],即冲击波作用区、压缩波作用区和地震波作用区,如图 1 所示。冲击波作用区在距离爆源 3~7 倍药包半径距离内,冲击波强度极大,破坏能量巨大,衰减快,峰值压力大大超过岩石的动抗压强度,使岩石粉碎。冲击波衰减后,成为不具陡峻波峰的压缩波,压缩波作用区范围可达 120~150 倍药包半径,波阵面趋于平缓,波速接近于声速。压缩波作用下的岩体趋于非弹性状态,出现残余变形。

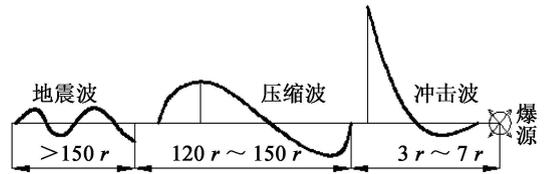


图 1 爆炸应力波及其作用范围

Fig. 1 Explosive stress wave and its action range

垫层材料的布置应最大限度地降低冲击波和应力波对建基面的破坏。根据波的反射与透射公式,假设应力波从介质 I 进入到介质 II 中,其反射系数 R 和透射系数 T 分别为:

$$R = \frac{\rho_2 c_{p2} - \rho_1 c_{p1}}{\rho_1 c_{p1} + \rho_2 c_{p2}}; \quad (1)$$

$$T = \frac{2\rho_2 c_{p2}}{\rho_1 c_{p1} + \rho_2 c_{p2}}. \quad (2)$$

式中: ρ 为介质材料的密度; c_p 为介质材料的纵波速度。

由式(1)、式(2)可知,材料的波阻抗 ρc_p 决定了反射系数 R 和透射系数 T 的大小。材料吸能作用的大小不仅取决于均匀材料本身的弹性模量、泊松比等,还取决于材料的宏观结构和微观结构。因此,材料的吸能作用极其复杂,很难定量分析。

基于以上研究,确保爆炸冲击波不会作用在建基面上时,垫层材料厚度应大于 7 倍的药包半径。根据波的反射与透射公式,为最大限度地减弱进入建基面的应力波,上部选取波阻抗大且吸能作用较好的泡沫混凝土圆柱体,在 7 倍药包半径以外的区域选择波阻抗小的松砂作为柔性材料。

2 保护层开采爆破的合理高度

保护层开采爆破的合理高度与施工效率、工程成本和爆破效果密切相关。在保证爆破效果的前提下,尽量地提高爆破高度,能够加快施工进度,降低施工成本。现行国家标准^[7]中保护层厚度的确定方式是取台阶爆破药卷直径的 25~40 倍,见表 1。保护层开采爆破法在国内大多数水利水电项目运

表1 保护层开采爆破高度取值规定

Tab.1 Regulations of blasting height of protective layer

岩体特性	完整和坚硬岩体	较完整、较破碎岩体	破碎和较软岩体
保护层厚度: 药卷直径	25	30	40

用,部分工程保护层爆破参数见表2。

虽然经过几十年的发展,保护层开采爆破法依旧采用短分层、弱爆破的方式进行,在孔底设置柔性垫层来减弱爆破对建基面的损伤。由于建基面验收标准严格,大部分工程保护层开采爆破的高度都控制在3 m以下。部分工程预留保护层超过5 m,但仍采用分层爆破并辅助用机械方法找平。

3 模型参数与数值模拟分析

3.1 模型的基本尺寸

运用LS-DYNA建模并进行数值模拟分析。分别建立高度为4、5 m的保护层爆破单孔模型,单孔模型的炮孔结构参数见表3。模型中,炮孔底部的建基面设置为3 m。

3.2 模型材料的物理力学参数

为了更好地模拟泡沫混凝土在爆炸载荷下的动

力响应和建基面岩体损伤情况,选择JHC方程构建损伤模型。炸药单元采用流固耦合算法模拟炸药材料在岩石等材料中的流动,用以计算爆轰过程中的大变形问题。使用Euler方程对炸药、泡沫混凝土、砂等进行多物质流固耦合。

砂选取SAFF材料单元^[11]。根据压力与体积应变曲线,其塑性屈服极限函数 φ 为:

$$\begin{cases} \varphi = J_2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2); \\ J_2 = \frac{S_{ij} S_{ji}}{2} = \frac{1}{2} (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2). \end{cases} \quad (3)$$

式中: J_2 为应力第二不变量; p 为压力; a_0 、 a_1 、 a_2 为常数; S_1 、 S_2 、 S_3 为偏力张量的分量。

砂材料^[11]物理力学性能见表4。

泡沫混凝土选用CF材料单元^[12]。根据屈服应力与体积变化曲线,假定弹性模量为常数且修正的应力假定为弹性特性,则试验应力为:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^n + E \varepsilon_{ij}^{\frac{n+1}{2}} \Delta t^{\frac{n+1}{2}}. \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量。

检查试验应力主值 σ_{ij} 是否超过屈服应力 σ_y ,如果超过,则 σ_{ij} 按比例回到屈服面

$$\sigma^{\frac{n+1}{2}} = \sigma_y \frac{\sigma_i}{|\sigma_i|} \sigma_y < |\sigma_i|. \quad (5)$$

泡沫混凝土^[13]物理力学性能见表5。

炸药选取Mat_High_Explosive_Burn材料^[14]。使

表2 部分工程保护层开采爆破参数^[8-11]

Tab.2 Blasting parameters of protective layer excavation in some projects

工程名称	岩石性质	保护层开采爆破高度/m	孔径/mm	孔距×排距/(m×m)	垫层
南公1#水电站	完整硬岩	0.7~3.0	120	2.5×2.0	聚能、消能复合垫层
贵州港运枢纽工程	完整硬岩	1.5~2.5	40	1.0×0.8	柔性垫层
汾河二库	较破碎岩体	1.3~2.0	40	1.3×1.0	柔性垫层
台山核电站	完整硬岩	1.6	76	1.3×1.3	柔性垫层

表3 单孔模型炮孔结构参数

Tab.3 Structural parameters of single-hole model

模型编号	保护层开采爆破高度/ m	孔径/ mm	堵塞长度/ m	装药长度/ m	垫层材料高度	
					泡沫混凝土/cm	松砂/cm
I	5	76	1.2	3.45	25	10
II	4	76	1.0	2.65	25	10
III	4	76	1.0	2.55	35	10

表4 砂的主要物理力学性能

Tab.4 Main physical mechanics properties of sand

密度/ (kg·m ⁻³)	剪切模量/ GPa	弹性体积 参数	单元压碎 选择项	a_0 / GPa	a_1 / GPa	a_2 / GPa
1 800	6.385×10^{-4}	0.3	0	3.4×10^{-13}	7.033×10^{-7}	0.3

表 5 泡沫混凝土的物理力学性能

Tab. 5 Physical mechanics properties of foamed concrete

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	抗拉强度/ MPa	泊松比	阻尼系数
788	342.2	0.2	0.1	0.1

用 JWL 状态方程来模拟爆炸过程中的压力与体积的关系, JWL 状态方程表达式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

式中: p 为 Chapman-Jouguet 爆轰压力; V 为相对体积; E_0 为初始能量密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为描述 JWL 方程的独立常数。

炸药的性能和 JWL 状态方程参数见表 6^[14]。岩石的性能参数见表 7。空气采用 ANSYS 软件内置 *MAT_009 空材料模型, 并结合状态方程(7)控制空气在炮孔中的作用。

$$p' = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) e \quad (7)$$

式中: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$; $\mu = \rho/\rho_0$, 其中, ρ 为初始材料密度, ρ_0 为当前材料密度; e 为质量热力学能。

表 6 炸药的性能及 JWL 状态方程参数

Tab. 6 Parameters of performances and JWL state equation of explosives

密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆压/GPa	A /GPa
1 100	3 600	3.24	220
B /GPa	R_1	R_2	ω
0.2	4.5	1.1	0.35

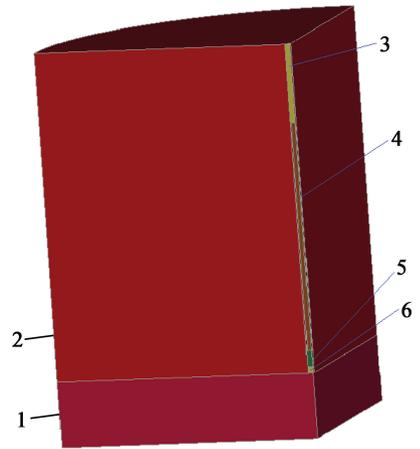
表 7 岩石的性能参数

Tab. 7 Performance parameters of rock

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	A_1	B_1	C_1	N_1
2 800	13.2	0.3	0.79	1.6	0.007	0.61

3.3 数值模拟分析

根据表 3 的数据, 建立三维单孔模型, 结构如图 2 所示。表 7 为岩石的性能参数, 炮孔内部根据填充的材料不同分别采用相应的材料参数。为监测不同高度保护层爆破对底部建基面的影响, 在距离炮孔底部的基岩 2.50、3.75、5.00 cm 和 6.25 cm 处分别设置 4 个损伤测点 A、B、C、D, 见图 3。通过测点的损伤因子大小判断建基面岩体的损伤程度。



1 - 基岩层; 2 - 保护层; 3 - 填充段; 4 - 装药段; 5 - 泡沫混凝土; 6 - 松砂。

图 2 构建的三维单孔模型

Fig. 2 Constructed 3D single-hole model

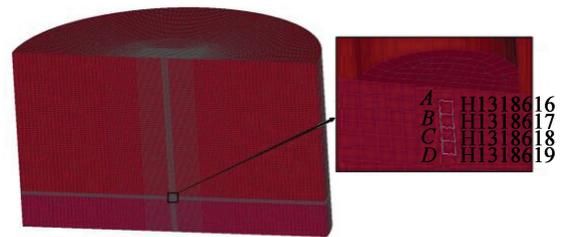


图 3 测点布置图

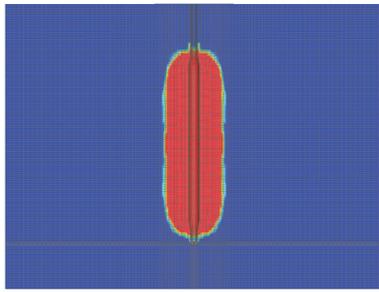
Fig. 3 Layout of monitoring points

根据文献[15]的研究, 损伤因子 D 和表征建基面岩体损伤的岩体纵波速度的降低率 η 的关系为

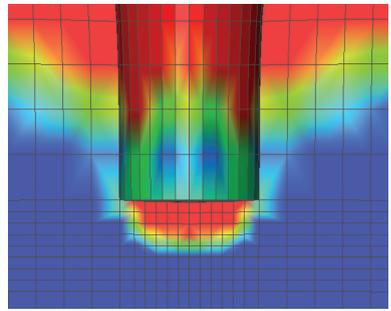
$$D = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (8)$$

根据标准 SL47—1994^[7] 的要求, η 为 10% ~ 15% 时, 岩体轻微影响, 建基面可认为是不受损的; 当 $\eta > 10\%$ 时, 爆破使建基面岩体受损明显。以此标准判断岩体受损程度。经式(8)计算, D 的阈值约为 20%。

经模拟, 5 m 的保护层开采爆破高度、25 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂模型(模型 I)的损伤情况见图 4; 4 m 的保护层开采爆破高度、25 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂的复合垫层模型(模型 II)的损伤情况见图 5; 4 m 的保护层开采爆破高度、35 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂的复合垫层模型(模型 III)的损伤情况见图 6。爆破完成后, 炮孔径向一定范围内形成柱状损伤区, 炮孔装药段端口附近呈漏斗状分布。这是由于岩石的夹制作用, 水平向损伤范围随着孔深的增加而变小。对比模型 I 和模型 II 的炮孔底部损伤情况发现, 两种模型在炮孔底部的损伤范围分布大致相同。根据复合垫层附近的损伤分布



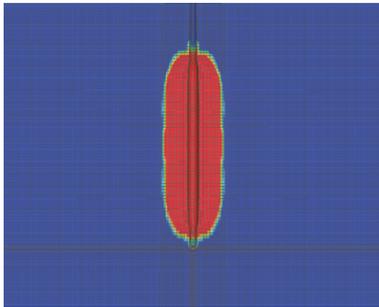
(a) 损伤云图



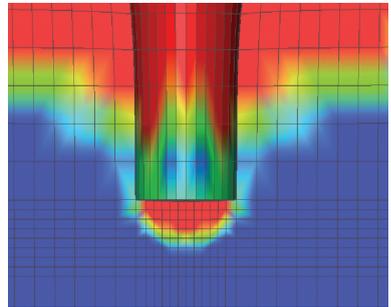
(b) 炮孔底部损伤情况

图4 模型 I 损伤情况

Fig. 4 Damage of Model I



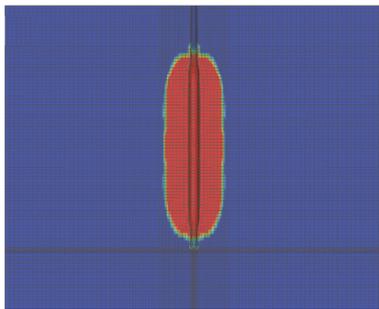
(a) 损伤云图



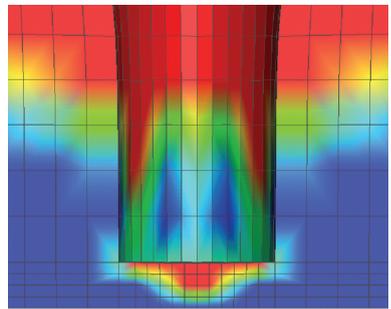
(b) 炮孔底部损伤情况

图5 模型 II 损伤情况

Fig. 5 Damage of of Model II



(a) 损伤云图



(b) 炮孔底部损伤情况

图6 模型 III 损伤情况

Fig. 6 Damage of of Model III

局部放大图可以发现,由于底部复合垫层的存在,爆破损伤整体分布在保护层内,仅炮孔底部的部分损伤侵入建基面基岩中,其分布顺着炮孔底部的垫层边缘呈锥状。

为进一步分析底部建基面的损伤情况,对3种不同模型的测点A、B、C、D进行监测,得到损伤因子曲线,分别如图7-图9所示。3种模型的减损效果对比如表8所示。

模型 I: 距离炮孔底部 2.50、3.75 cm 和 5.00 cm 的建基面完全破坏,其损伤因子达到 100%,在 D 点的损伤因子达到 72% 左右,损伤超过标准要求。爆

炸对底部建基面的损伤大于 6.00 cm。

模型 II: 测点 A、B、C、D 的损伤因子分别为 100%、100%、82%、25%。表明模型 II 下,保护层爆破对建基面的损伤深度达到 6.25 cm。

模型 III: 测点 A、B、C、D 的损伤因子分别为 100%、100%、65%、11%。表明模型 III 的情况下,保护层爆破对建基面的损伤深度小于 6.25 cm。

三者对比表明,随着保护层开采爆破高度的降低,建基面岩体的损伤深度减小;随着复合垫层高度的增加,建基面岩体的损伤深度随之减小。降低保护层开采爆破高度和增加复合垫层厚度均可以减少

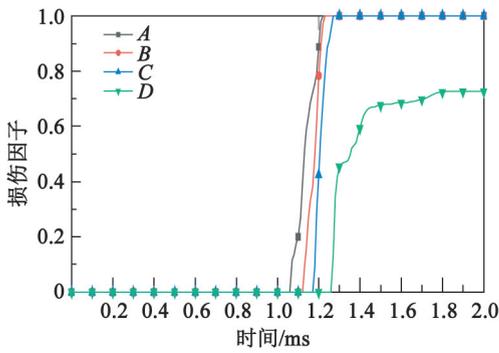


图 7 模型 I 各测点的损伤因子曲线

Fig. 7 Damage factor curves of monitoring points in Model I

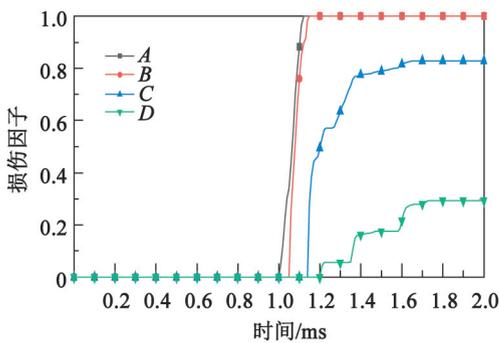


图 8 模型 II 各测点的损伤因子曲线

Fig. 8 Damage factor curves of monitoring points in Model II

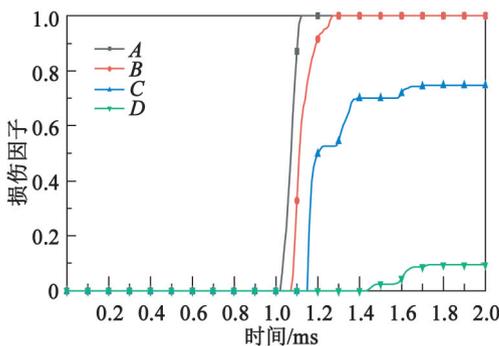


图 9 模型 III 各测点的损伤因子曲线

Fig. 9 Damage factor curves of monitoring points in Model III

对建基面岩石的损伤, 相比较而言, 降低保护层开采

爆破高度的作用更加明显。

上述模拟结果表明, 保护层开采爆破高度为 4 m, 建基面的损伤范围控制在 6.25 cm 内。在实际工程中, 可将保护层开采爆破高度提升至 4 m, 并合理地设置泡沫混凝土加松砂复合垫层高度。

4 工程应用

模拟结果依托广东中广核太平岭核电站一期工程负挖工程开展工程应用。炮孔孔径 76 mm, 炸药采用 2# 岩石乳化炸药, 直径 60 mm, 保护层开采爆破高度为 3.5~4.5 m。为确保底部基岩不受损伤, 建基面以上 5 cm 不钻孔。孔深设计为 3.45~4.45 m, 孔排×排距为 1.5 m×1.0 m。填塞段 1.0 m, 前 3 排炮孔底部填充 25 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂作为复合垫层(区域 I); 后 3 排炮孔底部填充 35 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂作为复合垫层(区域 II)作为对比。试验过程严格控制钻孔深度和炮孔底部松砂的填充高度, 原则上各炮孔底部位于同一高程。爆破网路和试验区域布置如图 10 所示。

清渣结束后, 用高压风机清理碎石, 露出完整的爆后控制基面。在试验区域沿着每排炮孔设置 1 条测量控制线, 共 6 条; 每隔 1.5 m 设一测点, 使测点尽量位于原炮孔中心点, 共布置 45 个测点, 测量爆后控制基面的高程。以建基面的高程为基准, 统计超挖与欠挖, 结果见表 9。

从表 9 可知, 采用 35 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂复合垫层的保护层爆破, 超挖控制在 11 cm 内, 平均超挖 3 cm, 达到设计要求; 欠挖最大达到 57 cm, 平均 35 cm, 欠挖偏高。而采用 25 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂复合垫层的保护层爆破, 平均超挖控制在 20 cm 内, 平均欠挖控制在 30 cm 内。

通过分析可知, 为确保建基面的损伤深度得到控制, 保护层开采爆破采用的复合垫层材料中, 泡沫混凝土高度较大, 在确保建基面损伤深度得到控制的同时, 不可避免地导致欠挖较大。对比两种垫层结构发现, 采用 25 cm 泡沫混凝土加 10 cm 松砂复

表 8 建基面岩体损伤效果对比

Tab. 8 Comparison of damage results of rock mass on foundation surface

模型编号	保护层开采爆破高度/m	复合垫层高度/cm		损伤因子/%			
		泡沫混凝土	松砂	A 点	B 点	C 点	D 点
I	5	25	10	100	100	100	72
II	4	25	10	100	100	82	25
III	4	35	10	100	100	65	11

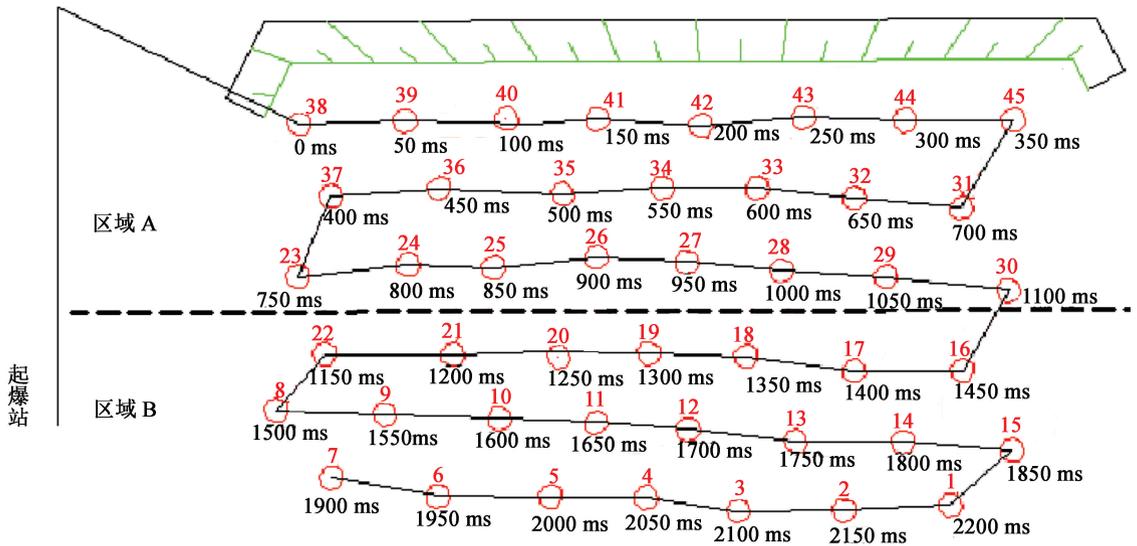


图10 爆破网络和试验区域布置图

Fig. 10 Layout of blasting network and experimental area

表9 爆后超挖与欠挖统计

Tab. 9 Statistics of overbreak and underbreak after

复合垫层结构		blasting cm			
泡沫混凝土	松砂	最大超挖	最大欠挖	平均超挖	平均欠挖
35	10	11	57	3	35
25	10	24	49	17	26

合垫层,保护层爆破的超挖整体控制在20 cm左右,符合规范要求,欠挖相对较少;而采用35 cm泡沫混凝土加10 cm松砂复合垫层,欠挖偏高,后续处理欠挖部分时成本更高。因此,保护层开采爆破高度4 m时,采用25 cm泡沫混凝土加10 cm松砂复合垫层更为合理。

爆后对欠挖部分采用液压锤进行破碎,辅以人工清扫措施,使欠挖控制在10 cm内。对建基面岩石损伤进行超声波检测并分析可知,建基面质量符合规范的要求和验收标准。

5 结论

1) 参照爆炸应力波的特点和作用范围,设置的垫层高度宜超过7倍药包半径,以保护建基面岩体;根据波的反射与透射原理,为最大限度地减弱进入建基面的应力波,可选取波阻抗大且吸能作用较好的泡沫混凝土圆柱体和柔性材料松砂,组成复合垫层。

2) 运用LS-DYNA构建3种模型,进行数值模拟

仿真,监测建基面岩体的损伤情况。结果发现,降低保护层开采爆破高度能够有效地保护基岩,采用25 cm泡沫混凝土加10 cm松砂复合垫层时,保护层开采爆破高度宜为4 m。

3) 模拟研究的结果在广东中广核太平岭核电站一期场平工程负挖工程中得到运用。保护层开采爆破高度4 m时,采用25 cm泡沫混凝土加10 cm松砂复合垫层比采用35 cm泡沫混凝土加10 cm松砂复合垫层产生的欠挖更少,爆破效果更好,爆破设计更为合理。

数值模拟中,岩体是各向同性的均质岩体,无法完全模拟实际岩体的节理等结构;此外,群孔爆破的数值模拟研究也有待开展。

参考文献

- [1] 许华. 垂直孔水平聚能药包爆破保护层开挖施工技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
XU H. The Research of techniques for accumulative charge to excavate foundation protected level [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2004.
- [2] 吴新霞,赵根,张正宇,等. 复合垫层理论研究及计算机优化设计[J]. 爆破器材,2000,19(4):8-11.
WU X X, ZHAO G, ZHANG Z Y, et al. A Study of the theory of duplicate cushion and its optimized design by computer[J]. Explosive Materials,2000,19(4):8-11.
- [3] 黄霖. 大坝基岩保护层开挖中柔性垫层爆破方法及爆破效果研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2003.
HUANG L. Study on the pliability cushion explosion

- method and effectively of the protected level of dam foundation rock's excavating [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [4] 黄庆明. 聚能爆破技术在水电站建基面水平预裂爆破中的应用研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
HUANG Q M. Application of shaped charge blasting technology in horizontal presplitting blasting of foundation plane of hydropower station [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [5] 胡浩然, 卢文波, 席浩, 等. 聚-消能复合垫层保护下的水平建基面开挖方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (增刊 2): 4129-4138.
HU H R, LU W B, XI H, et al. Horizontal foundation surface excavation method under the protection of energy shaped and dissipation composite cushion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (Suppl. 2): 4129-4138.
- [6] 于亚伦. 工程爆破理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 181-184.
YU Y L. Theory and technology of engineering blasting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 181-184.
- [7] 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范: SL47—1994 [S]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [8] 陈育权, 刘广鑫, 柯昌佳, 等. 南公 1 水电站溢洪道保护层开挖孔底消能-聚能结构优选研究 [J]. 爆破, 2020, 37 (4): 10-17.
CHEN Y Q, LIU G X, KE C J, et al. Study on optimization of dissipation-accumulation energy structure at bottom of borehole during protective layer excavation of Namkong 1 Hydropower Station [J]. Blasting, 2020, 37 (4): 10-17.
- [9] 陈德志. 贵港航运枢纽工程船闸开挖爆破技术 [J]. 工程爆破, 2000, 6 (3): 59-61.
CHEN D Z. Blasting techniques for excavation of the shiplock in Guigang Water Conservancy Project [J]. Engineering Blasting, 2000, 6 (3): 59-61.
- [10] 常民生, 刘宏刚. 基岩保护层一次开挖爆破技术在汾河二库的应用 [J]. 爆破, 2000, 17 (增刊 1): 198-202.
CHANG M S, LIU H G. Application of one-through excavation blasting technique of foundation protective layer in Fenhe River [J]. Blasting, 2000, 17 (Suppl. 1): 198-202.
- [11] 蒋雷龙, 曾小平, 汪胜金, 等. 台山核电厂安全控制爆破技术研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7 (5): 122-125.
JIANG L L, ZENG X P, WANG S J, et al. Safety blasting construction plan of Taishan Nuclear Power Plant [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7 (5): 122-125.
- [12] 王代华, 刘殿书, 杜玉兰, 等. 含泡沫吸能层防护结构爆炸能量分布的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26 (6): 562-567.
WANG D H, LIU D S, DU Y L, et al. Numerical simulation of anti-blasting mechanism and energy distribution of composite protective structure with foam concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26 (6): 562-567.
- [13] 田志敏, 钱七虎, 吴步旭. 大压力爆炸动载作用下地下复合圆形结构研究 [J]. 特种结构, 1997, 14 (3): 40-43.
- [14] 杨国梁, 杨仁树, 佟强. 切缝药包掏槽爆破研究与应用 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (3): 385-388.
YANG G L, YANG R S, TONG Q. Research and application of cut blasting with slotted charge [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (3): 385-388.
- [15] 胡英国, 卢文波, 金旭浩, 等. 岩石高边坡开挖爆破动力损伤的数值仿真 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (11): 2204-2213.
HU Y G, LU W B, JIN X H, et al. Numerical simulation for excavation blasting dynamic damage of rock high slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (11): 2204-2213.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权, 并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有, 未经书面许可, 不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部