

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.005

岩体水平结构面对爆破块度的影响机制及控制技术研究^{*}

苏俊鹏¹, 刘青欣^{2a}, 南星¹, 吴礼军^{2a}, 张平化³, 吴晓东^{2b}, 彭国庆³

(1. 泉州国储石油基地有限责任公司, 泉州 362000; 2. 北京科技大学 a. 资源与安全工程学院;
b. 大安全科学研究院, 北京 100083; 3. 中化(舟山)兴海建设有限公司, 舟山 316000)

摘要: 超大断面硬岩洞室爆破块度大将严重影响爆破施工效率和工序衔接, 工程实践表明: 岩石水平结构面是造成硬岩洞室爆破块度大的主要原因之一。为研究硬岩岩体水平结构面对爆破能量传播的影响机制, 提出适配复杂节理岩体的布孔优化方法, 以某超大断面硬岩洞室中层台阶爆破施工为工程背景, 通过数值模拟的方法, 建立基于 RHT 模型的三维含水平节理岩体爆破模型, 利用 LS-DYNA 有限元分析软件分析结构面-爆破能量耦合机制, 及布孔方式对块度分布的影响规律。结果表明: 爆破损伤及裂隙会优先沿结构弱面扩展, 应力波在结构面反射叠加促使径向裂隙优先沿垂直或近垂直结构面方向发育, 且会使能量释放延缓; 梅花形布孔通过多向应力干涉使得能量分布更均匀, 抑制贯通性主裂隙生成, 形成蜂巢状裂隙结构, 有效降低爆破大块率, 块度分布均匀性显著提升。最后, 通过现场试验验证了结论的正确性及可行性, 该研究将为水平结构面发育硬岩岩体爆破块度控制提供理论依据和实践指导。

关键词: 超大断面洞室; 水平结构面; 爆破块度; 布孔方式; 数值模拟

中图分类号: TD235.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)01-0038-11

Influence Mechanisms and Control Techniques of Horizontal Rock Mass Structural Planes on Blasting Fragmentation

SU Jun-peng¹, LIU Qing-xin^{2a}, NAN Xing¹, WU Li-jun^{2a},
ZHANG Ping-hua³, WU Xiao-dong^{2b}, PENG Guo-qing³

(1. Quanzhou State Reserve Petroleum Base Co., Ltd., Quanzhou 362000, China;

2. a. School of Resources and Safety Engineering; b. Research Institute of Macro-safety Science,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Sinochem(Zhoushan) Xinghai Construction Co., Ltd., Zhoushan 316000, China)

Abstract: The significant size of blasting blocks in super-large cross-section hard rock caverns will have a profound impact on blasting construction efficiency and process connectivity. Engineering practice has demonstrated that the horizontal structural planes within the rock are among the primary factors contributing to the large blasting block size in hard rock caverns. To investigate the mechanism by which the horizontal structure of a hard rock mass affects

收稿日期 (Date of reception): 2025-05-21

网络首发日期 (Published online): 2025-07-21

作者简介: 苏俊鹏 (1982-), 男, 湖北襄阳人, 本科、高级工程师, 从事土木和水工工程方面的工作, (E-mail) sujunpeng@sinochem.com。

通信作者: 吴晓东 (1992-), 男, 江西九江人, 博士、副研究员, 从事地下工程爆破理论与技术方面的研究, (E-mail) wuxiaodong@ustb.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52304204) 滨海储油洞室电子雷管精确延时爆破破岩机理研究

About the author: SU Jun-peng (1982-), male, born in Xiangyang city, Hubei province, bachelor's degree, senior engineer, engaged in civil and hydraulic engineering, (E-mail) sujunpeng@sinochem.com.

Corresponding author: WU Xiao-dong (1992-), male, born in Jiujiang city, Jiangxi province, Ph. D, associate researcher, engaged in underground engineering blasting theory and technology research, (E-mail) wuxiaodong@ustb.edu.cn.

Fund Programs: Youth fund of national natural science foundation projects (52304204) Study on rock breaking mechanism of precise delay blasting using electronic detonator in coastal oil storage cavern

the propagation of blasting energy, a hole layout optimization method tailored for complex jointed rock masses is proposed. Using the blasting construction of the middle step in a specific super-large hard rock chamber with a particular cross-section as the engineering background, a three-dimensional blasting model of the rock mass with horizontal joints is established through numerical simulation, based on the RHT model. The LS-DYNA finite element analysis software was employed to elucidate the coupling mechanism between structural planes and blasting energy, as well as the influence of hole distribution patterns on block size distribution. The results indicate that blasting-induced damage and fractures preferentially propagate along the weak surface of the structure. The reflection and superposition of stress waves at the structural surface facilitate the preferential development of radial fractures along vertical or near-vertical structural planes, thereby delaying energy release. The plum blossom-shaped hole distribution ensures more uniform energy distribution through multi-directional stress interference, inhibiting the formation of dominant through-fractures and resulting in a honeycomb-like fracture structure. This effectively reduces the incidence of blasting large blocks and significantly enhances the uniformity of block size distribution. Finally, the validity and feasibility of the conclusion were confirmed through field tests. This study offers a theoretical foundation and practical guidance for controlling the blasting block size in hard rock masses characterized by prominent horizontal structural planes.

Key words: super-large cross-section cavern; horizontal structural plane; blasting block size; hole layout method; numerical simulation

近年来,洞室工程逐渐大型化复杂化,超大断面洞室需求量日益增加。岩体爆破作为洞室开挖的核心技术手段,其破碎效果直接影响施工效率与成本。然而,天然岩体内发育着大量复杂的水平结构面,如断层、节理及裂隙等,会导致应力波反射、爆生气体逃逸及能量分布失衡等问题,进而致使岩石破碎不均匀、大块率增加,对后续铲装、运输效率产生不利影响。因此,探究岩体水平结构面对爆破块度的影响从而进行爆破块度控制是一个极为重要的课题。

国内外学者围绕节理岩体爆破块度先后开展了多项研究:Gama 模型考虑了节理裂隙对破碎的影响^[1],但只涉及节理的密度,未考虑其分布特征,对节理裂隙分布变化大的岩体其预测爆破块度的精度难以保证。KUZ-RAM 模型通过等效岩体强度系数反映节理弱化效应^[2],但忽略了应力波在节理界面的动态反射-透射行为;BMMC 模型能够模拟节理网络对爆破能量的耗散特征^[3],但其计算复杂度限制了工程适用性。近年来,有关研究多聚焦于节理自身特性对爆破效果的影响,工程实践中常采用经验性孔网参数设计,对布孔方式与结构面耦合关系的调控机制缺乏系统研究,特别是水平结构面与布孔方式的协同效应尚未明晰^[4-9],在复杂节理岩体爆破实践中仍易有破碎过度与大块率高的情况。

针对上述问题,本研究以某超大断面硬岩洞室群为研究对象,基于 HyperMesh/LS-DYNA 实现数值模拟耦合仿真,探究水平结构面对爆破裂隙传播路径的导向机制,对比矩形与梅花形布孔两模式下的能量分配特性及块度演化规律,可为含结构面岩体精细化爆破设计提供理论参考,对降低钻爆成本、提

升复杂地质条件下的施工效率具有参考价值。

1 隧道工程概况

该工程为典型的硬岩洞室,施工场区结构面复杂,发育多组水平结构面,片麻状花岗岩、辉长岩与二长花岗岩三种岩性不同的火成岩相互穿插,紧密相连,且接触面不规则(如图 1),爆后大块率较高(如图 2)。综合多种勘察方法结果,围岩分级以 Q 法分级为主,场区岩体以 I 级、II 级围岩为主。



图 1 岩体中存在的水平结构面

Fig. 1 Horizontal joints existing in rock mass



图 2 爆后岩石块度

Fig. 2 Fragments after blasting

洞室高度为 30 m, 跨度为 22 m, 开挖面积约 616 m², 根据国际隧道协会对断面面积的分类标准, 该洞室断面属于超大断面。施工过程采用分部爆破开挖法, 将洞室分为三层开挖。为探究水平结构面对爆破块度的影响与控制机制, 选取水平结构面发育较多的中层进行分析及实验, 如图 3 所示, 中层为高度 10 m, 跨度 22 m 的矩形断面, 实际施工情况如图 4 所示。

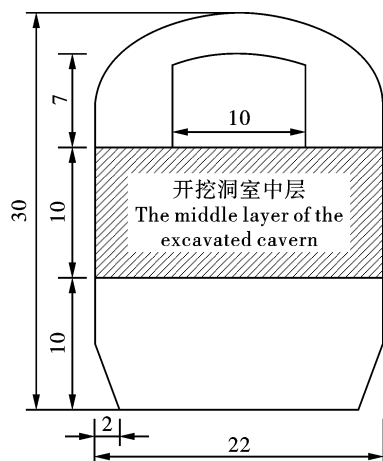


图 3 洞室断面示意图(单位:m)

Fig. 3 Section diagram of the cavern(unit:m)

2 研究思路与方法

2.1 整体研究思路

为解决场区水平结构面较发育岩体爆破施工过程中遇到的爆破能量分布失衡、爆后大块率较高等问题, 需探究岩体水平结构面对爆破裂隙传播的影响以及布孔方式对爆破块度的影响。但现有技术手

段难以清晰探明结构面具体形状, 且爆破实验岩体中结构面形状不尽相同, 无法精确控制变量实验, 爆破裂隙产生过程也不易观察, 无法记录爆破损伤全过程。因此, 采用数值模拟方法构建三维模型进行计算模拟成为更优的解决方法。



图 4 洞室中层开挖施工图

Fig. 4 Middle excavation construction diagram of the cavern

首先通过 HyperMesh 软件建立有/无水平结构面的单孔爆破模型, 数值求解基于 LS-DYNA 平台, 使用 RHT 本构模型描述岩石动态损伤, 通过损伤变量 D 量化损伤以表征岩体损伤、裂纹扩展行为, 对比分析得到水平结构面对能量分布、裂隙扩展的导向机制。为进一步得到适配复杂结构面岩体的布孔优化方法, 建立含水平结构面岩体的矩形布孔与梅花形布孔局部爆破模型, 探究不同孔网布局下裂隙发育情况与爆后块度差异, 分析结构面-爆破能量耦合机制及布孔方式对块度分布的影响, 为优化含复杂结构面岩体爆破设计提供理论支撑。

技术路线图如图 5 所示。

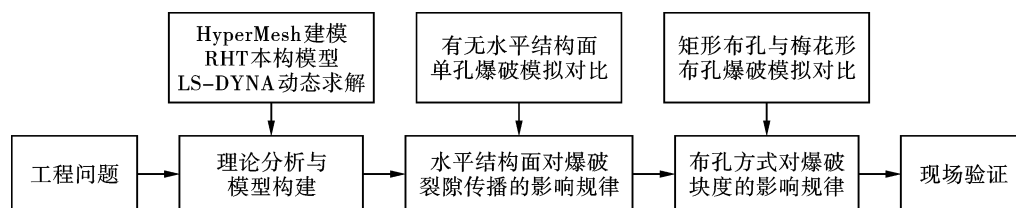


图 5 技术路线图

Fig. 5 Technology roadmap

2.2 数值模型

通过对比有、无水平结构面模型的单孔爆破损伤情况, 探究岩体水平结构面对爆破裂隙传播的影响。采用 HyperMesh 软件建立单孔爆破模型, 为方便计算, 先将爆破岩体的二维模型简化为半径尺寸 500 mm 的圆, 使用 HyperMesh 软件进行网格划分, 由于炮孔周边岩石单元网格尺寸将直接影响数值模

拟结果, 因此对炮孔周边网格分层加密: 炮孔半径周边 50 mm 内采用 5 mm 单元小尺寸; 炮孔半径周边 50 ~ 100 mm 范围内采用 10 mm 单元尺寸; 炮孔半径周边 100 ~ 500 mm 范围内采用 20 mm 单元大尺寸。而后将模型纵向拉长, 使之成为厚度为 300 mm 的柱状体。为消除边界处反射波对岩体结构的影响, 除了横截面外, 其余边界均采用无反射边界, 模

型网格如图 6 所示,该模型共有 1.66×10^5 节点和 1.60×10^5 单元。

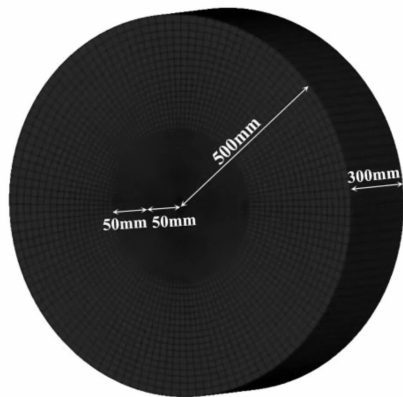


图 6 单孔无结构面模型网格
Fig. 6 Single-hole model grid without joints

在无结构面模型的基础上,修改部分岩石参数,得到单孔含水平结构面模型。无结构面模型网格中岩石岩性为辉长岩(红色),有结构面模型中岩石岩

性为辉长岩(红色)与二长花岗岩(蓝色)交错,岩体水平结构面沿预设方向均匀分布,如图 7 所示,二长花岗岩代表水平结构面,炮孔中心点距结构面-岩体交界处垂直距离为 75 mm。两种岩石物理力学参数均由地勘期间钻孔岩芯通过室内实验获得,如表 1 所示。

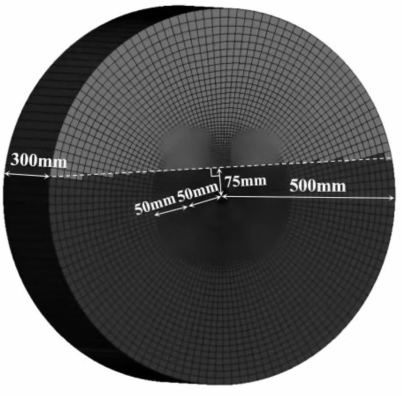


图 7 单孔含水平结构面模型网格
Fig. 7 Single-hole model grid with horizontal joints

表 1 岩石物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock

参数 Parameter	密度 Density ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength f_c /MPa	弹性模量 Elastic modulus E /GPa	泊松比 Poisson's ratio	抗拉强度 Tensile strength f_t /MPa
辉长岩	2860.00	140.00	39.40	0.21	7.20
二长花岗岩	2630.00	96.60	39.70	0.20	8.20

为进一步探究不同布孔方式对含水平结构面岩体爆破块度的影响机制,需将单孔模型拓展为多孔模型。本研究基于 HyperMesh 软件分别建立了矩形与梅花形布孔的三维爆破数值计算模型。模型采用分级网格划分策略,对炮孔附近的单元加密:炮孔周边半径 50 mm 范围内采用 5 mm 小尺寸单元,50 ~ 100 mm 范围内采用 10 mm 单元,100 ~ 500 mm 范围内采用 20 mm 大尺寸单元。

由于尺寸限制,矩形布孔方式选取其中九个孔眼进行模拟,如图 8 所示,共三排,每排三个孔,排间

距 600 mm,孔间距 700 mm,该数值模型共有约 1.79×10^6 节点和 1.76×10^6 单元。梅花形布孔的网格如图 9 所示,选取其中十个孔眼进行模拟,共三排,采用 3、4、3 炮孔交错布置,排间距 600 mm,孔间距 700 mm,该数值模型共有 2.16×10^6 节点和 2.12×10^6 单元。模型包含辉长岩(红色)、二长花岗岩(蓝色)及片麻状花岗岩(绿色),其中片麻状花岗岩力学参数同样由地勘期间钻孔得到的岩芯进行室内实验获得,如表 2 所示,岩体水平结构面沿预设方向均匀分布,具体位置关系如图 8、图 9 所示。

表 2 岩石物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock

参数 Parameter	密度 Density ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength f_c /MPa	弹性模量 Elastic modulus E /GPa	泊松比 Poisson's ratio	抗拉强度 Tensile strength f_t /MPa
片麻状花岗岩	2600.00	121.00	40.40	0.18	7.90

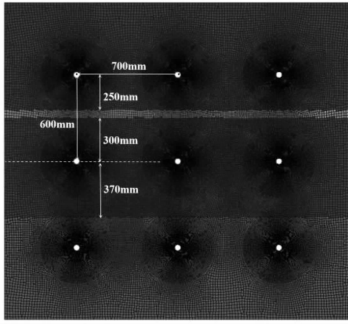


图8 矩形布孔模型网格

Fig. 8 Rectangular hole layout model grid

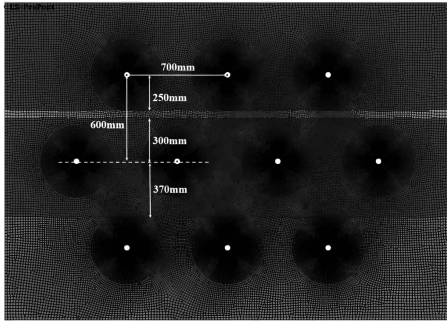


图9 梅花形布孔模型网格

Fig. 9 Triangle hole layout model grid

2.3 岩石的本构模型

在数值模拟计算中,可用于研究爆炸冲击问题

的材料模型众多。其中,RHT模型可用于模拟岩石、混凝土等脆性材料在动态加载下的力学行为,该模型可分成以下五个基本部分:失效面、弹性极限面、应变硬化、残余失效面损伤模型。从硬化阶段开始,材料额外塑性应变导致了损伤和强度的降低。损伤通过下式进行累积

$$D_r = \sum \Delta \varepsilon_{pl} / \varepsilon_p^{failure} \quad (1)$$

$$\varepsilon_p^{failure} = D_1 (P^* - P_{spall}^*)^{D_2} \geq \varepsilon_f^{min}$$

式中: $\varepsilon_p^{failure}$ 为破坏时的等效塑性应变; ε_f^{min} 为最小破坏应变; D_1 和 D_2 为损伤常数; P^* 为单轴抗压强度的归一化压力; P_{spall}^* 为归一化层裂强度;岩体损伤范围 D_r 可通过后处理中历史变量#4来查看。

RHT模型由关键字*`MAT_RHT`进行添加。

2.4 爆炸荷载的施加方法

准确确定爆炸荷载是深入分析岩体爆破破碎过程以及爆破损伤演化过程的关键所在,数值模拟中爆破荷载的施加方法主要有四种,其中将爆炸作用按三角形或指数型荷载曲线直接施加在炮孔壁上是最为高效的方法。结合具体情况分析,选择三角形函数能体现动力荷载的波动特性并较好地描述爆炸弹性区的应力场,且计算简单、省时,因此本文选择将三角形爆破荷载曲线施加到炮孔壁上的方法^[10,11]。见图10。

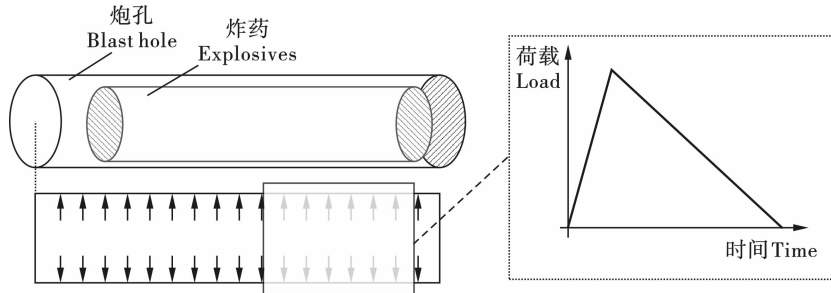


图10 爆炸荷载的施加

Fig. 10 Application of explosive loads

2.4.1 爆炸荷载峰值的计算

爆炸荷载受炸药种类、装药方式、岩体特性等多种因素影响,且由于爆破的瞬时性、复杂性以及岩体的多样性导致爆炸荷载难以准确量化。目前,一般按爆轰产物等熵膨胀方法,采用C-J模型计算爆炸荷载峰值,根据凝聚态炸药爆轰波的C-J理论和守恒关系,炸药起爆后波阵面上的气体压力为^[12]

$$P_H = \frac{1}{1 + \gamma} \rho_e (VOD)^2 \quad (2)$$

式中: P_H 为波阵面上气体压力; ρ_e 为炸药密度; VOD 为炸药的爆速; γ 为等熵指数,对于爆轰产物,近似取 $\gamma = 3.0$ 。

爆轰产物开始膨胀时,其初均压力为波阵面上最大的一半。而对于不耦合装药条件,根据多方气体状态方程,爆轰产物在碰撞炮孔壁之前的压力峰值为^[13,14]

$$P_0 = P_c \left(\frac{V_c}{V_b} \right)^3 = \frac{1}{8} \rho_e (VOD)^2 \left(\frac{V_c}{V_b} \right)^3 \quad (3)$$

式中: V_c 和 V_b 分别为炸药体积和炮孔体积。

对于隧道掘进中的柱状装药结构, $V_c = \frac{1}{4} \pi l_c d_c^2$, $V_b = \frac{1}{4} \pi l_b d_b^2$,其中, l_c 和 l_b 分别为炮孔装药段长度和炮孔深度; d_c 和 d_b 也分别为装药直径和炮孔直径。

爆轰产物碰撞炮孔壁时,压力将明显增大,作用在炮孔壁上的径向应力峰值应为

$$P_0 = \frac{1}{8} \rho_e (VOD)^2 \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^6 \left(\frac{l_c}{l_b} \right)^3 n \quad (4)$$

式中: n 为爆轰气体产物膨胀撞击炮孔壁时的压力增大系数, $n \approx 8 \sim 11$,在本项研究中,取 $n = 10$ 。

依据工程情况,炸药选用 2 号岩石乳化炸药,密度为 1000 kg/m^3 ,炸药爆速 4200 m/s ;装药采用不耦合装药结构,药卷直径 32 mm ,炮孔直径 42 mm ,装药长度与炮孔深度之比约为 0.7 ,根据式(4)可以计算得到,炮孔壁岩体受到冲击压力 $P_0 = 1.48 \text{ GPa}$ 。

2.4.2 爆炸荷载时间历程

通过测试元件和仪器可以测量出较为准确且可靠的炮孔中爆炸荷载的时程曲线,但该方法受限于测试元件性能和经济性难以实现。因此,半经验半理论公式描述爆炸荷载的变化历程更值得关注,采用三角形爆破荷载曲线,其中三角形函数包括爆炸荷载峰值、荷载上升时间和正压时间 3 个重要参数,其表达式为^[15]

$$P(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_r} P_0, & 0 \leq t \leq t_r \\ \frac{t_r - t}{t_d - t_r} P_0, & t_r < t < t_d \\ 0, & t > t_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P(t)$ 为任一时刻爆炸荷载; t_r 为爆炸荷载的上升时间,ms; t_d 为爆炸荷载的正压作用时间,ms。

一般认为,炸药爆炸产生的冲击波作用时间为 $10^{-6} \sim 10^{-1} \text{ s}$,爆生气体压力的作用时间为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}$,结合现有的研究成果和工程实践经验^[16],本文数值计算取 $t_r = 0.6 \text{ ms}$, $t_d = 2 \text{ ms}$ 。得到炮孔三角形爆炸荷载曲线如图 11 所示,将计算得到的三角形荷载施加到炮孔中。

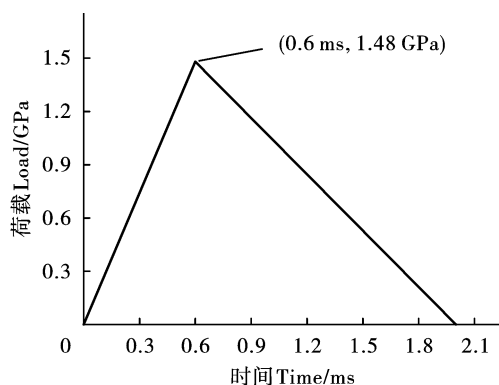


图 11 炮孔壁爆炸荷载曲线

Fig. 11 Explosion load curve of blast hole wall

3 结果与分析

3.1 岩体水平结构面对爆破裂隙传播的影响规律

炸药爆炸作用在岩体介质上的冲击动荷载会引发冲击波,冲击波在爆源的附近迅速衰减成应力波。当应力波遇到水平结构面时,由于结构面充填物的物理和力学性质一般都不同于岩体的物理和力学性质,充填物的波阻抗特性也不同于岩体的波阻抗特性,因此应力波在传播到结构面处会发生反射和透射现象,从而使结构面处发生能量的显著衰减和耗散。

为计算炮孔起爆后的岩石损伤、破碎情况,探究水平结构面对爆破裂隙扩展的影响规律,在 HyperMesh 软件中建立数值模型后,采用 LS-DYNA 软件进行求解计算。

3.1.1 计算结果与损伤云图分析

对有、无结构面的单孔爆破引起的围岩损伤过模拟,使用 LS-DYNA 软件计算求解,得到爆破后 8 ms 损伤云图,如图 12、图 13 所示。

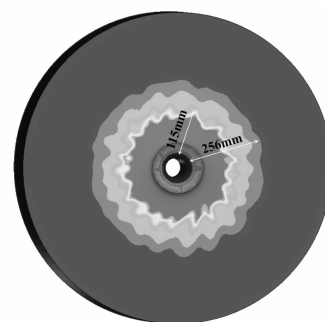


图 12 无结构面模型单孔爆破损伤云图

Fig. 12 Damage cloud map of single hole blasting without joint

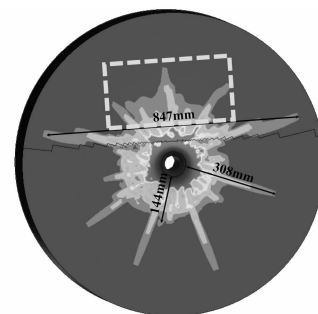


图 13 含结构面模型单孔爆破损伤云图

Fig. 13 Damage cloud map of single hole blasting with joint

对比无结构面岩体(图 12)与含结构面岩体(图 13)的爆破损伤云图可知,在无结构面时,损伤呈现以炮孔为中心的规则同心圆状分布,中心区域为红色粉碎区,向外逐渐过渡至蓝色振动区。此时,爆破

能量以各向同性形式均匀扩散,损伤带间过渡平滑无突变,表明均质岩体中应力波衰减遵循各向同性规律,径向裂隙沿主应力方向均匀扩展。

含结构面岩体的爆破损伤云图则表现出显著异质性:①炮孔周围区域仍为破碎区,但形态由同心圆转变为不规则放射状结构,且平均损伤范围变小。这是由于爆破能量从岩石-结构面交界处逸出,使得爆破效果欠缺。②结构面与岩体交界处损伤加剧,裂隙沿结构面方向优先延伸,尤其当结构面与炮孔距离较近时,会形成明显的损伤带,此时结构面起到了引导裂缝传播的作用,成为裂缝优先扩展方向。③云图分析还表明,结构面界面处有效应力显著集中,且距离炮孔越近应力集中效应越强。这是由于结构面填充物质的强度通常低于岩体基质,爆破应力波在岩石-结构面界面发生反射时会形成拉-压应力叠加区。④此外,当径向裂隙扩展至结构面附近时,受界面应力集中驱动,裂隙优先沿垂直或近垂直结构面方向发育(图 5 中黄色虚线部分)。这是因为在结构面中,通过炮孔并垂直于结构面方向上的应力波反射作用最强,且此方向上的炮孔距离结构

面最近,因此此方向上的损伤最大,损伤、裂隙主要沿着垂直或近乎垂直于结构面的方向上分布。

对比有无结构面情况下粉碎区、裂隙区的平均大小,含结构面模型的粉碎区平均半径较无结构面模型减小约 51%,裂隙区最长裂隙增大约 18%。

3.1.2 结构面对爆破能量传播的影响

为探究爆破能量在岩体中及岩石-结构面交界处的传播、变化规律,对比图 14 模型中 a 、 b 、 c 、 d 四个点的应力时程变化曲线(如图 15),分析不同位置应力变化的差异性,得到结构面对爆破能量传播的影响规律。

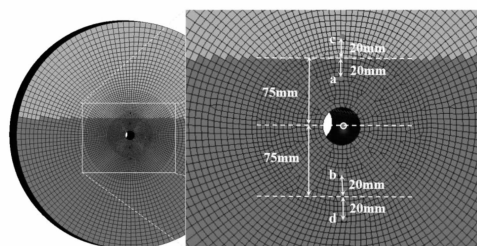
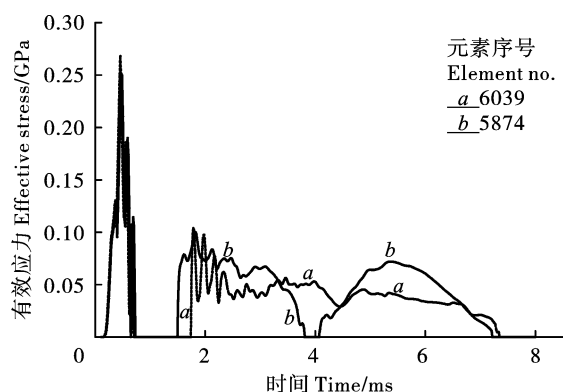
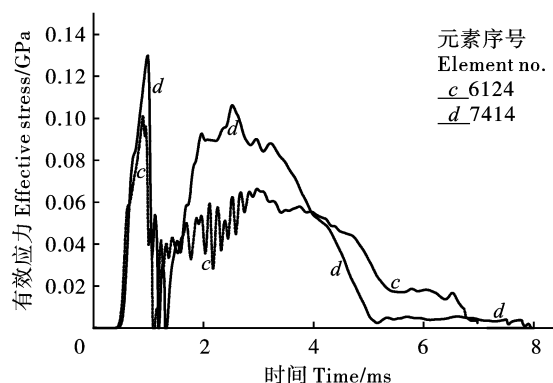


图 14 a 、 b 、 c 、 d 四点位置关系

Fig. 14 The positional relationship among points a , b , c , d



(a) a 、 b 点应力变化曲线
(a) Stress change curve at points a and b



(b) c 、 d 点应力变化曲线
(b) Stress change curve at points c and d

图 15 a 、 b 、 c 、 d 点应力时程变化曲线

Fig. 15 Stress change curve at points a , b , c and d

图 15(a) 为近爆源对称两点 a 、 b 应力变化曲线。在 0~0.6 ms 区间爆破荷载施加到炮孔内壁,应力陡升,此时 a 、 b 点应力变化曲线相似,且峰值应力相近;在 1.5 ms 后, a 曲线较 b 曲线发生明显震荡,这是爆破能量在岩石-结构面交界处多次反射导致的。

图 15(b) 为远爆源对称两点 c 、 d 应力变化曲线, c 点位于与 d 点岩性不同的结构面中。在 0~1 ms 区间, c 、 d 两点的应力曲线变化相似但峰值不同,主要原因是爆破能量穿过界面过程中有衰减,导致应力峰值降低。在 1~3 ms 内, c 点曲线有密集

波动,源于应力波在结构面处多次反射, d 点曲线则仅单峰凸显。在 1~4 ms 内, c 的峰值明显低于 d ,这是因为能量在结构面中消耗、逸散,从而导致应力变小。但 c 点应力持续时间(7 ms)较 d 点(5 ms)延长约 40%,表明结构面反射效应对能量释放过程起延缓作用。

综上所述,水平结构面对爆破裂隙具有双重调控作用:①岩石-结构面交接处作为弱面引导爆破能量沿其走向集中释放,形成优势破裂路径,使得裂隙分布更加不规则和复杂。②应力波在结构面反射叠加,使垂直结构面方向损伤范围扩大,消耗爆破能

量,并延缓能量释放。在实际工程实践中,可以基于结构面状态优化炮孔布置与装药结构,例如改变炮孔轴线与结构面走向夹角,为复杂岩体的精细化爆破设计提供理论依据。

3.2 布孔方式对爆破块度的影响规律

对不同布孔方式下爆破引发的围岩损伤进行模拟,使用 LS-DYNA 软件计算求解,得到 8 ms 时损伤云图如图 16、图 17 所示。

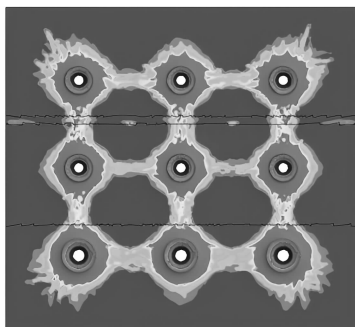


图 16 矩形布孔爆破损伤云图

Fig. 16 Damage cloud map of rectangular layout hole blasting

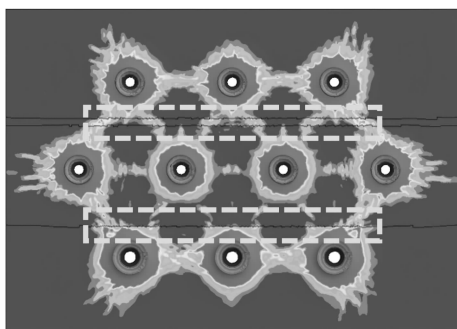


图 17 梅花形布孔爆破损伤云图

Fig. 17 Damage cloud map of plus-shaped layout hole blasting

数值模拟结果表明,矩形布孔方式爆破损伤区呈矩形网格状,在炮孔周围和炮孔连线处形成连续的粉碎区带,即图 16 红色区域;结构面中附近出现条带状高应力集中区,发育出贯通性裂隙,这是由于能量过度集中于弱面并沿弱面优先释放,而裂隙的过度延伸也会造成能量浪费;相邻炮孔应力波同相位叠加,导致裂隙主要在平行或垂直于炮孔连线上产生,形成少量长损伤带;四个炮孔围成的中央矩形区域因应力叠加效应微弱,几乎无损伤无裂隙,出现应力空白区,整体能量利用率较低,但局部又存在过粉碎现象,块度分布不均、两极分化严重。

相较之下,梅花形布孔通过交错孔位设计显著改善能量分布与裂隙扩展模式,其损伤云图呈六边形蜂窝状,如图 17 所示。梅花形布孔使有效应力多极集中,破碎单元相互嵌套,避免了单一方向的能量过度集中,从而形成蜂窝状裂纹结构,抑制贯通性主

裂隙生成。相邻炮孔损伤带在岩石-结构面交界处交错重叠,形成密集的黄绿色应力干涉区。由云图可知,在水平结构面处,梅花形布孔方式的损伤带明显长于矩形布孔方式,这是由于梅花形布孔方式迫使应力波异相位交织,在岩石-结构面处发生多次反射与叠加,爆破能量在交界面处重新分配。

使用 Image J 软件精确测量出各色块占比,利用自建比例尺计算出各色块实际面积。比较两种布孔方式下最外侧炮孔连线区域内大块岩石区的平均面积,如图 18 所示,矩形布孔方式的大块岩石区平均面积为 0.325 m^2 ,梅花形布孔方式的大块岩石区平均面积为 0.086 m^2 ,大块岩石区面积减小约 70%;比较两种布孔方式下大块岩石区总面积占最外侧一圈炮孔连线区域围成的面积(炮孔承担破岩区域)之比,如图 18 所示,矩形布孔方式大块岩石区总面积占比 77.38%,而梅花形布孔方式大块岩石区总面积占比仅 36.9%,可见梅花形布孔方式能够有效减小岩石块度,抑制大尺寸岩块产生。

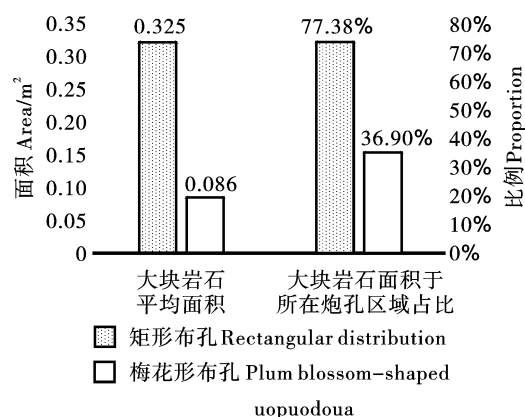


图 18 爆破后大块岩石平均面积及所在炮孔区域的占比

Fig. 18 Average area of the fragmented rock after blasting and ratio of it to the area of nearby blastholes

两者破岩块度差距亦与炮孔形成爆破漏斗的条件有关,如图 19 所示。排距相同的情况下,两种布孔方式炮孔的最小抵抗线是相等的,而梅花形布孔方式后排炮孔承担的破岩体积小,与前排炮孔呈三角形分布,有利于炮孔之间的协同破岩作用,而矩形布孔方式下后排炮孔与前排炮孔呈矩形分布,承担的破岩体积大,因此在相同的单孔药量下产生的爆破块度大。

此外,结合上文 3.1 中垂直结构面方向上的应力波反射特性,在梅花形布孔中,裂隙会优先沿垂直或近乎垂直于岩石-结构面交界方向上发育,图 20(a)中白色矩形框线区域验证了这一结论。炮孔垂直于结构面方向上会生成额外损伤裂隙,这种裂隙在一

定程度上有助于减小爆破大块率。而在矩形布孔中,该特性所致损伤会与炮孔连线重叠,垂直于结构

面方向炮孔连线上的岩石会因此过度粉碎,加剧块度不均问题,如图 20(b) 中白色框线区域所示。

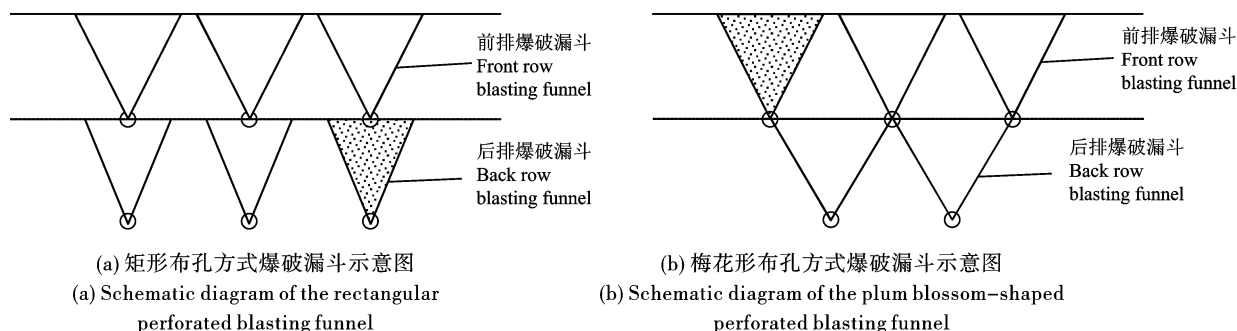


图 19 不同布孔方式的爆破漏斗示意图

Fig. 19 Schematic diagrams of blasting funnels under different hole layout methods

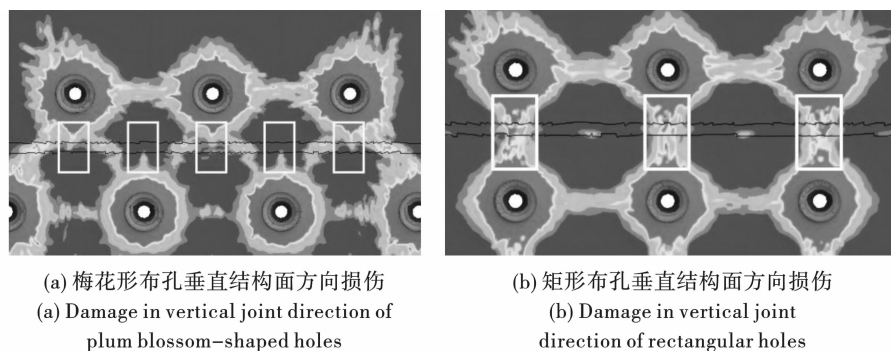


图 20 不同布孔方式垂直结构面方向的损伤

Fig. 20 Damage in the direction perpendicular to the structural plane under different hole layout methods

综上,在含水水平结构面岩体中,梅花形布孔通过几何优化与能量-结构面耦合调控,显著提升爆破块度均匀性。其核心在于利用交错孔位诱导多向裂隙网络,抑制贯通性主裂隙形成,同时通过应力波反射叠加增强破碎效果,将结构面的“劣势”转化为“可控优势”,为复杂地质条件下的精细化爆破设计提供理论依据。

4 工程应用

在某超大断面洞库群开挖工程中,场区内存在三种岩性不同的岩体穿插且接触面不规则,岩体结构面复杂。原爆破方案采用矩形布孔方式进行爆破,爆破后大块率高,导致铲装效率低下且需要二次破碎,大大增加爆破成本。针对这一情况,结合振速和损伤的模拟计算,在保证振速不超标的前提下,基于本文第 3、4 节数值模拟计算结果与结论优化爆破设计方案,将原本的矩形布孔方式调整为梅花形布孔设计,现场的炮孔布置设计如图 21 所示。

调整爆破设计方案后,梅花形布孔通过多向应力干涉与结构面协同调控,改善了复杂岩体的爆破块度均匀性,爆后爆堆如图 22 所示,块度尺寸明显

减小,未出现需二次爆破破岩的大块,铲装时间由常规方案的 8 h 降低至 6 h,提高了工序效率,降低了钻爆成本,因此,在洞室中台阶和下台阶的爆破设计均采用了梅花型布孔方式,效果显著。此次应用过程验证了上述规律在水平结构面发育区域工程中的适用性,为类似地质条件下的精细化爆破设计提供了实践范例。

5 结论

运用 HyperMesh 软件构建含水水平结构面岩体的三维爆破模型,基于 RHT 本构模型与 LS-DYNA 动态求解器,探究水平结构面对爆破能量及裂隙传播的影响规律,研究不同布孔方式下爆破损伤演化和裂隙发展规律及其对块度分布的影响,得到结论如下:

(1) 水平结构面通过弱面导向,引导爆破能量沿其走向集中释放,形成优势裂隙发展路径,使得裂隙传播更加不规则和各向异性,较无结构面情况下粉碎区平均半径减小 51%,裂隙区最长裂隙增大 18%;应力波会在岩石-结构面交界处反射叠加,形成拉-压应力叠加区,促使径向裂隙沿垂直结构面方

向优先扩展,同时使能量释放过程延缓40%;爆生气体在岩石-结构面交界处逸散,爆破能量会在交界

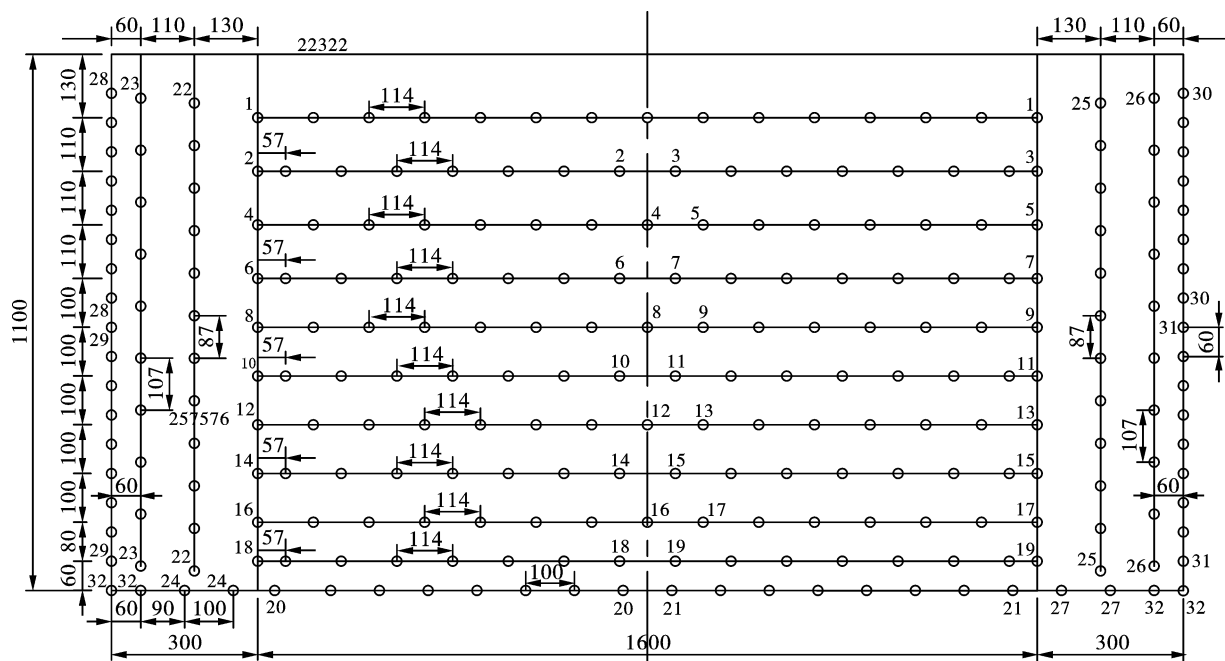


图21 优化后中层爆破设计图(单位:cm)

Fig. 21 Optimized middle-level blasting design(unit:cm)



图22 优化爆破方案后爆堆块度

Fig. 22 Optimized blasting plan after blasting bulk degree

(2)梅花形布孔方式通过交错孔位设计进行多向应力干涉诱导多向裂隙网络,形成六边形蜂窝状损伤区,相较于矩形布孔,其相邻炮孔应力波异相位叠加效应显著。且数值模拟结果显示,梅花形布孔在结构面交界处通过应力波反射叠加增强破碎效果,损伤程度较矩形布孔更深,能有效抑制贯通性主裂隙生成,使得大块率下降,块度分布均匀性显著提升。

(3)研究揭示了结构面-爆破能量耦合机制,提出了将结构面劣势转化为可控破碎效果的技术路径,为矿山开采与地下工程爆破设计优化提供了新思路。

参考文献 (References)

[1] 汪义龙,牛海成,李奇,等. 节理岩体爆破块度预测

模型分析[J]. 建井技术,2006(4):19-22.

[2] WANG Yi-long, NIU Hai-cheng, LI Qi, et al. Analysis of prediction model for blasting fragmentation of jointed rock mass[J]. Mine Construction Technology, 2006(4): 19-22. (in Chinese) (未找到原翻译,该名称为自行翻译获得)

[2] 王民寿,谭顺仕,杨培忠,等. 坝料开采块度级配在线分析和反演分析[J]. 云南水力发电,2003(4):13-17, 44.

[2] WANG Min-shou, TAN Shun-shi, YANG Pei-zhong, et al. The dam materials excavation Lumpiness gradation on-line analysis and inversion analysis[J]. Yunnan Water Power, 2003(4):13-17,44. (in Chinese)

[3] 邹定祥. 计算露天矿台阶爆破块度分布的三维数学模型[J]. 爆炸与冲击,1984(3):48-59.

[3] ZOU Ding-xiang. A three dimensional mathematical model in calculating the rock fragmentation distribution of bench blasting in the open-pit[J]. Explosion and Shock Waves, 1984(3):48-59. (in Chinese)

[4] 张凤鹏,彭建宇,范光华,等. 不同静应力和节理条件下岩体爆破破岩机制研究[J]. 岩土力学,2016, 37(7):1839-1846,1913.

[4] ZHANG Feng-peng, PENG Jian-yu, FAN Guang-hua, et al. Mechanisms of blasting-induced rock fractures under different static stress and joint properties conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1839-1846, 1913. (in Chinese)

- [5] 朱子晗,尹岳降,陈 明,等. 长九神山灰岩矿开采爆破块度预测研究[J]. 爆破,2021,38(2):17-23,31.
- [5] ZHU Zi-han, YIN Yue-jiang, CHEN Ming, et al. Study on prediction of blasting fragmentation in Changjiu Shenshan limestone mine[J]. Blasting, 2021, 38(2): 17-23, 31. (in Chinese)
- [6] 杨仁树,许 鹏,杨立云,等. 节理岩体中爆炸应力波传播规律的研究[J]. 金属矿山,2016(6):49-54.
- [6] YANG Ren-shu, XU Peng, YANG Li-yun, et al. Study of regularity of explosive stress wave propagation in jointed rock mass[J]. Metal Mine, 2016(6): 49-54. (in Chinese)
- [7] AZIZI A, MOOMIVAND H. A new approach to represent impact of discontinuity spacing and rock mass description on the median fragment size of blasted rocks using image analysis of rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4): 1-26.
- [8] 张秀丽,焦玉勇,刘泉声,等. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学,2008(3):717-721.
- [8] ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(3): 717-721. (in Chinese)
- [9] 代青松,李 鸿,余红兵. 基于 3DEC 的节理裂隙岩体爆破传播规律的研究[J]. 采矿技术,2016,16(4):100-102.
- [9] DAI Qing-song, LI Hong, YU Hong-bing. Study on the propagation law of blasting in jointed and fractured rock mass based on 3DEC[J]. Mining Technology, 2016, 16(4): 100-102. (in Chinese)
- [10] YILMAZ O, UNLU T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 266-278.
- [11] 李新平,陈俊桦,李友华,等. 溪洛渡电站地下厂房爆破损伤范围及判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2042-2049.
- [11] LI Xin-ping, CHEN Jun-hua, LI You-hua, et al. Study of criterion and damage zone induced by excavation blasting of underground power-house of Xiluodu hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2042-2049. (in Chinese)
- [12] 严 鹏,李 涛,卢文波,等. 深埋隧洞爆破开挖荷载诱发围岩损伤特性[J]. 岩土力学,2013,34(S1):451-457.
- [12] YAN Peng, LI Tao, LU Wen-bo, et al. Properties of excavation damaged zone under blasting load in deep tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 451-457. (in Chinese)
- [13] 卢文波,杨建华,陈 明,等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1089-1096.
- [13] LU Wen-bo, YANG Jian-hua, CHEN Ming, et al. Mechanism and equivalent numerical simulation of transient release of excavation load for deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1089-1096. (in Chinese)
- [14] 杨建华,吴泽南,姚 池,等. 地下洞室爆破开挖诱发围岩损伤特性及 PPV 阈值研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2): 131-139.
- [14] YANG Jian-hua, WU Ze-nan, YAO Chi, et al. Characteristics and PPV thresholds of rock damages under underground blasting excavation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2): 131-139. (in Chinese)
- [15] 凌天龙. 长城站开挖围岩爆破损伤与累积效应研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.
- [15] LING Tian-long. Study on blasting damage and cumulative effect of surrounding rock in excavation of Great Wall Station[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2019. (in Chinese)
- [16] 张正宇,张文焯,吴新霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

(上接第 28 页)

- [17] JUNG M, LEE Y S, HONG S G, et al. Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference(EMI) shielding effectiveness (SE)[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 13: 1106017.
- [18] 秦 煜,胡魏凯,王威娜,等. 碳纳米管水泥基复合材料压阻效应研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(10): 2298-2304.
- [18] QIN Yu, HU Wei-kai, WANG Wei-na, et al. Research progress on piezoresistive effects of carbon nanotube cement-based composites[J]. Journal of the Chinese Society of Ceramics, 2021, 49(10): 2298-2304. (in Chinese)
- [19] CHEN Tao, WANG Zhi-hang, WANG Ang, et al. Comparative study on the static and dynamic mechanical properties and micro-mechanism of carbon fiber and carbon nanofiber reinforced concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01827.
- [20] 聂良学,许金余,任韦波,等. 玄武岩纤维混凝土冲击劈拉特性研究[J]. 混凝土, 2014, 11: 96-99.
- [20] NIE Liang-xue, XU Jin-yu, REN Wei-bo, et al. Research on impact splitting tensile characteristics of basalt fiber concrete[J]. Concrete, 2014, 11: 96-99. (in Chinese)