

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.05.007

水介质不耦合爆破载荷作用下隧道围岩的损伤范围 计算方法及裂隙损伤分形研究*

陈泽屹^① 王林峰^{①②} 周龙^① 刘余^①

①重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校市级重点实验室(重庆,400074)

②三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室(湖北宜昌,443002)

[摘要] 为了研究水介质不耦合爆破载荷作用下隧道围岩的损伤裂隙范围,基于弹性波动理论、摩尔-库仑强度理论和断裂力学原理,在考虑环向应力的影响下,提出了粉碎区、裂隙I区、裂隙II区围岩损伤范围的计算方法。并通过LS-DYNA软件模拟,验证了水介质不耦合爆破载荷下单孔围岩的损伤范围计算公式的可靠性。结合分形维数理论,探究了不同不耦合系数情况下,砂岩在水介质条件下的单孔爆破损伤规律。结果表明:粉碎区半径为373 mm,位于模拟结果300~400 mm范围内;裂隙I区半径为490 mm,位于模拟结果470~500 mm范围内;裂隙II区半径为1 597 mm,略大于模拟结果。与已有计算方法相比,该计算方法精确性较高,误差控制在10%以内。随着水介质不耦合系数的增大,围岩在水介质不耦合装药条件下的损伤范围会逐渐减小,减小幅度为15%~90%,可以使岩壁得到有效保护。水介质面的增大会提高爆轰波作用于孔壁的冲击波峰值压力,提高炸药作用于围岩的能量,并使围岩破碎程度提升,产生较多的主裂纹与次生裂纹,破碎程度增长率分别为0.03%、0.10%、12.68%、44.00%。

[关键词] 水介质不耦合爆破;不耦合系数;分形维数;围岩裂隙

[分类号] TD235

Calculation Method for Damage Range and Fractal Analysis of Crack Damage of the Tunnel Surrounding Rock under Water-Uncoupled Blasting Load

CHEN Zeyi^①, WANG Linfeng^{①②}, ZHOU Long^①, LIU Yu^①

① Key Laboratory of Mountainous Area Highway Transportation and Transportation Geological Disaster Reduction in University of Chongqing, Chongqing Jiaotong University (Chongqing, 400074)

② China Three Gorges University Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education (Hubei Yichang, 443002)

[ABSTRACT] In order to study the damage and fracture range of tunnel surrounding rock under water-uncoupled blasting load, based on elastic wave theory, Mohr-Coulomb strength theory, and fracture mechanics principles, a calculation method for the damage range of the surrounding rock in the crushed zone, fracture zone I, and fracture zone II was proposed, considering the influence of circumferential stress. Simulations were conducted using LS-DYNA software to verify the reliability of the calculation formula for the damage range of single hole surrounding rock under water-uncoupled blasting load. Combining fractal dimension theory, the damage law of single-hole blasting in sandstone under water medium conditions was explored under different uncoupling coefficients. The results indicate that the radius of the crushed zone is 373 mm, located within the range of 300-400 mm in the simulation results. The radius of fracture zone I is 490 mm, located within the range of 470-500 mm in the simulation results. The radius of fracture zone II is 1 597 mm, slightly larger than the simulation results. Compared with existing calculation methods, this method has higher accuracy and error control within 10%. As the uncoupling coefficient increases, the damage range of the the surrounding rock under the water-uncoupled

* 收稿日期:2024-10-21

基金项目:国家自然科学基金联合基金(U22A20600);重庆市研究生导师团队建设项目(JDDSTD2022009);三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放研究基金(2023KDZ07)

第一作者:陈泽屹(1999—),男,硕士研究生,主要从事岩土与地下工程领域的相关研究工作。E-mail: 993360471@qq.com

通信作者:王林峰(1983—),男,博士,教授,主要从事岩土与地下工程领域的相关研究及教学工作。E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn

charge conditions will gradually decrease by 15% to 90% ,which can effectively protect the rock wall. The increase of the water medium surface will increase the peak pressure of the shock wave acting on the hole wall, enhance the energy of the explosive acting on the surrounding rock, and increase the degree of rock fragmentation, resulting in more primary and secondary cracks, with growth rates of 0.03% , 0.10% , 12.68% , and 44.00% , respectively.

[KEYWORDS] water-uncoupled blasting; uncoupling coefficient; fractal dimension; cracks in the surrounding rock

0 引言

如今,不耦合爆破已经成为最常见的爆破施工手段。因爆破在水中的强度高、作用时间长且具有较高的能量传递效率,水介质不耦合装药被应用于隧道爆破中^[1]。但水介质不耦合爆破在开挖效率高的同时,不可避免地使围岩产生扰动和损伤,致使围岩破碎。而在围岩破碎的地区,爆破易使隧道产生新的裂隙,为地下水的流通提供通道,给工程衬砌结构带来不利影响。因此,研究水介质不耦合装药爆破载荷作用下损伤范围的计算方法,对于爆破破岩机理及隧道爆破设计的完善具有重要指导意义。

在水介质不耦合装药爆破理论研究方面,宗琦等^[2]就耦合装药、空气不耦合装药、水介质不耦合装药 3 种装药结构对爆破能量的影响进行了探讨。Li 等^[3]指出,不同耦合介质爆破扰动的差异主要是由于炮孔孔壁的峰值压力和不耦合介质的波衰减规律造成的。邵珠山等^[4]发现,水介质不耦合爆破岩石时,随着不耦合系数的增大,水中冲击波作用于孔壁的入射初始压力和透射初始压力均呈指数型衰减。冯涵等^[5]通过公式推导对水介质爆破的振动效应进行了分析,得到了围岩弹性模量对水介质段作用产生的爆破振动影响较大的结果。

计算岩石爆破损伤范围时,通常将爆轰波作用下的岩石分为粉碎区、裂隙区 2 个区域^[6-7]。冷振东等^[8]根据岩石爆破时受环向压力作用的大小将岩石破坏范围分为粉碎区、裂隙 I 区、裂隙 II 区 3 个部分。李涛等^[6]基于 DP(drucker-prager)准则,对爆破破坏粉碎区进行了计算。费鸿禄等^[9]和李芳涛等^[10]分别基于摩尔-库伦强度准则和统一强度准则建立了粉碎区和裂隙区计算模型。Ye 等^[11]通过分析炸药在水介质面的透射及水中冲击波与孔壁的作用形式,推导出了水介质不耦合爆破孔壁压力的计算公式。Wang 等^[12]开展了水、空气、沙土 3 种耦合介质的不耦合爆破实验,研究了不同介质装药爆破后围岩的裂纹形状及爆生裂纹的动态力学行为。杨跃宗等^[13]通过有限元软件建立了二维炮孔模型,以损伤、孔壁压力为依据,对不耦合系数、装药位置等因素进行了对比分析。严鸿海等^[14]采用相似模拟实验对间隔装药的爆破效果进行了分析。王琪

等^[15]通过数值模拟确定了深孔位置最佳的水间隔装药方式。Li 等^[16]建立了一种水介质不耦合的裂隙控制爆破新方法,并采用 ANSYS/LS-DYNA 模拟软件对水介质不耦合爆破下的压力衰减、裂隙演化和能量消耗等连续过程进行了研究。

采用水介质不耦合装药方式进行围岩爆破时,炸药爆炸产生爆轰波的过程、爆轰波在水介质中的传递以及冲击波与孔壁相互作用的过程均十分复杂。现有理论通常是对空气不耦合计算公式进行拟合修正;或者直接采用普通炸药计算公式,忽略了不耦合系数、水中波透(反)射效应等条件的综合影响。这显然与水介质不耦合爆破实际受力条件不符,计算得到的围岩损伤范围与实际相差大,只能应用于对爆破精度要求低的隧道工程。

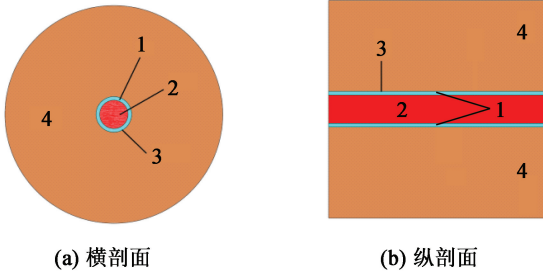
目前,基于摩尔-库伦强度准则,爆炸冲击波作用下岩石破坏的损伤范围、粉碎区半径、裂隙区半径、裂隙扩展规律已经有了相对规范的计算公式。但将水作为介质的不耦合爆破的围岩损伤范围却还没有成熟的计算方法。已有的理论计算大多是通过大量数据拟合来确定相关参数计算,没有考虑爆炸冲击波在水介质面的透(反)射效应、冲击波在水中的衰减规律及冲击波与孔壁的相互作用。

在考虑爆炸冲击波在水介质面的透(反)射效应、冲击波在水中的衰减规律及冲击波与孔壁的相互作用下,推导出爆炸冲击波穿过水介质面充满孔壁的压力计算公式。然后,考虑环向应力,提出了水介质不耦合爆破的围岩损伤计算公式。最后,通过有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,建立水介质不耦合爆破的三维模型,对计算结果进行验证。计算结果能更好地运用于爆破隧道工程中。

1 水介质不耦合爆破中冲击波与孔壁的相互作用

1.1 水中冲击波的产生与传播

采用水介质不耦合爆破时,由于介质的不同,爆轰过程与普通的爆破有所区别。水介质不耦合爆破的横、纵剖面见图 1。



1 - 水; 2 - 炸药; 3 - 孔壁; 4 - 岩石。

图1 水介质不耦合爆破示意图

Fig.1 Schematic diagram of water-uncoupled blasting

在水介质不耦合爆破过程中, 爆轰产物急剧向外膨胀, 在水中形成初始冲击波, 冲击波与孔壁相互作用关系复杂。为便于计算, 将水中冲击波与孔壁的相互作用简化为一平面。冲击波在到达水介质面的过程中, 压力及速度保持恒定。冲击波到达水介质面后, 向炮孔方向入射一个冲击波。同时, 会往相反方向反射一个稀疏波。

冲击波与水介质面持续接触, 在与水的交界面上, 速度需满足连续条件:

$$v_x = v_j + v_r. \quad (1)$$

式中: v_x 为水介质面上的质点速度; v_j 为冲击波的质点速度; v_r 为反射波的质点速度。 v_x 和 v_j 可根据非定常连续流动基本公式计算^[17]。

$$v_r = \int_{p_j}^{p_x} \frac{dp}{\rho_a c}. \quad (2)$$

式中: p_x 为水介质面压力; p_j 为爆轰波到达水介质面前的初始压力; ρ_a 为炸药的初始密度; c 为声速。

联立式(1)、式(2), 可计算出水介质面压力 p_x 。

文献[18]明确了波的传播原理, 并由此提出了水介质不耦合装药爆破时水中压力 Δp 随相对距离的衰减关系:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{A_1}{r^{2.49}}, & 1 \leq r' \leq 2; \\ \frac{A_2}{r^{1.45}}, & 2 < r' \leq 5; \\ \frac{A_3}{r^{0.63}}, & 5 < r' \leq 240. \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 为常数, 由 p_x 确定; r' 为相对距离, 为质点离炸药中心的距离与炸药装药半径的比。

1.2 孔壁初始冲击压力

水中冲击波经过一段时间传递至孔壁时, 必会发生反射, 孔壁上的压力也会发生变化。基于弹性波理论, 可计算冲击波传递至孔壁上的压力 p ^[17]:

$$p = \frac{2\rho_r c_p}{\rho_r c_p + \rho_w D_1} \Delta p. \quad (4)$$

式中: ρ_r 为岩石的密度; c_p 为岩石的弹性纵波波速; ρ_w 为水的密度; D_1 为冲击波波速。 D_1 可根据冲击波作用下水的状态方程确定^[17]。

1.3 岩体应力的衰减

水中冲击波传递到孔壁界面, 形成的孔壁初始冲击压力会透射岩体, 形成应力波; 随着距离的增加, 波速会降低, 应力自然发生衰减。故岩体中任一点的径向应力 σ_r 与环向应力 σ_θ 为

$$\sigma_r = p\bar{r}^{-\alpha}; \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = -b\sigma_r; \quad (6)$$

$$\bar{r} = \frac{r}{r_b}. \quad (7)$$

式中: \bar{r} 为比例距离; r 为炮孔中心到围岩某点的距离; r_b 为炮孔半径; α 为冲击波衰减指数, 取 $\alpha = 3$; 当 α 为应力波衰减指数, $\alpha = 2 - u_d / (1 - u_d)$, u_d 为岩石的动态泊松比; b 为侧压力系数。

2 不耦合爆破围岩的损伤范围计算

2.1 粉碎区损伤范围计算

2.1.1 基于摩尔-库伦强度准则

炸药爆炸时, 产生的爆轰波冲击炮孔孔壁周围, 岩石受冲击作用向外运动, 临近孔壁周围的岩石受到的压力超过抗压极限值, 被彻底破坏, 形成粉碎圈。往外, 岩石在拉剪应力作用下产生破坏, 形成裂隙圈。基于此, 根据离孔壁的距离, 由近及远依次划分为粉碎区、裂隙区和弹性区。

取冲击波作用范围内的任一单元体进行分析, 其受力如图2(a)所示。

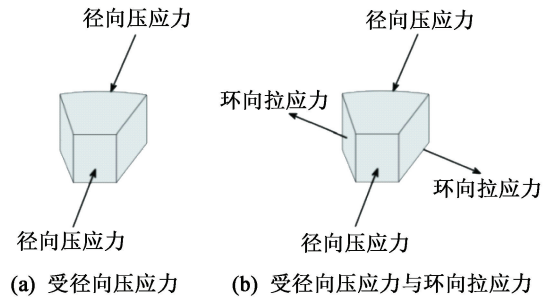


图2 炮孔周围岩石单元体的受力

Fig.2 Stress on the rock unit around the blast hole

岩体在径向上所发生的塑性破坏是剪应力大于岩体抗剪强度的结果。根据摩尔-库伦强度准则, 破坏面上的正应力、剪应力分别为

$$\sigma_n = \frac{1}{2}\sigma_r - \frac{1}{2}\sigma_r \cos 2\beta; \quad (8)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2} \sigma_r \sin 2\beta. \quad (9)$$

式中： σ_n 为破坏面上的正应力； τ_n 为破坏面上的剪应力； β 为岩体破坏面与径向应力 σ_r 的夹角。

岩石的抗剪强度 τ_f 为岩体破坏面上正应力 σ_n 的函数： $\tau_f = f(\sigma_n)$ 。根据摩尔-库伦强度准则，岩石的破坏条件为

$$\tau_n \geq \tau_f = f(\sigma_n) = \sigma_n \tan \varphi + C. \quad (10)$$

式中： φ 为岩体的内摩擦角； C 为岩体的黏聚力。

岩体发生破坏时， $\tau_n - f(\sigma_n)$ 应取得最大值。即 $\beta = \pm (\pi/4 - \varphi/2)$ 。

联立式(5)、式(7)、式(8)、式(9)，可求得粉碎区损伤范围(半径)

$$R_1 = \left[\frac{\rho_r c_p \Delta p (1 - \sin \varphi)}{(\rho_r c_p + \rho_w D_1) C \cos \varphi} \right]^{\frac{1}{\alpha}} r_b. \quad (11)$$

2.1.2 基于摩尔-库伦强度准则及考虑环向应力

传统计算方法按照摩尔-库伦强度准则计算，忽略了环向应力的影响。但在实际的爆破过程中，环向应力也发生着作用，如图 2(b) 所示。

将软弱结构面的强度曲线绘制于表示应力状态的摩尔应力圆中，可计算得出破坏面上的正应力、剪应力分别为

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_\theta) - \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_\theta) \cos 2\beta; \quad (12)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin 2\beta. \quad (13)$$

同理，岩石破坏时， $\tau_n - f(\sigma_n)$ 应取得最大值，即 $\beta = \pm (\pi/4 - \varphi/2)$ 。

故粉碎区损伤范围为

$$R_1 =$$

$$\left[(1+b) \cos \varphi - (1-b) \tan \varphi + (1+b) \sin \varphi \tan \varphi \right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot (\rho_r c_p \Delta p)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot [(\rho_r c_p + \rho_w D_1) C]^{-\frac{1}{\alpha}} r_b. \quad (14)$$

2.2 裂隙区损伤范围计算

2.2.1 裂隙 I 区

在岩石爆破的实际过程中，环向上受到的应力作用明显，不可能在径向上产生完全的破坏^[8]。因此，根据受环向应力作用的大小，将裂隙区划分为：裂隙 I 区，受环向应力作用明显；裂隙 II 区，受环向应力作用不明显，可忽略。如图 3 所示。

岩石属于脆性材料。在实际爆破工程中，岩石呈三向应力状态。粉碎区与裂隙区的产生分别是岩石受压破坏和受拉破坏的结果^[19]。

将岩石在水介质不耦合爆破下的破坏视作平面应变。岩石中任一点的应力强度^[19] σ_i 可表示为

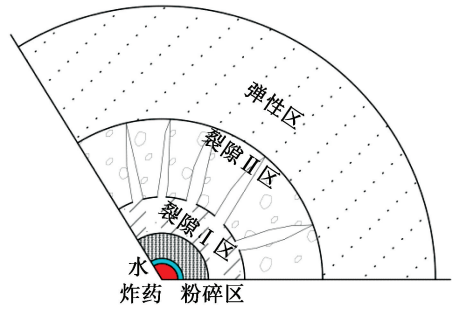


图 3 水介质不耦合爆破下围岩破坏分区示意图

Fig.3 Schematic diagram of damage zoning of the surrounding rock in water-uncoupled blasting

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_r \left[(1+b)^2 - 2\mu_d (1-b)^2 (1-\mu_d) + (1+b^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

裂隙 I 区与裂隙 II 区的主要区别为岩石是否受到环向应力的作用。如果满足 $\sigma_i \geq \sigma_{td}$ ，则岩石发生破坏。 σ_{td} 为岩石的动态抗拉强度。

结合式(5)、式(15)，得到岩石裂隙 I 区损伤范围(半径)

$$R_1 =$$

$$\left[(1+b)^2 - 2\mu_d (1-b)^2 (1-\mu_d) + (1+b^2) \right]^{\frac{1}{2\alpha}} \cdot (2\rho_r c_p \Delta p)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \left[\sqrt{2} \sigma_{td} (\rho_r c_p + \rho_w D_1) \right]^{-\frac{1}{\alpha}} r_b. \quad (16)$$

2.2.2 裂隙 II 区

炮孔装药爆破后，岩石首先产生了粉碎区和裂隙 I 区。爆生气体的进一步作用使裂隙继续扩展，形成裂隙 II 区。

假若爆轰波气体膨胀使裂隙进一步扩展时损伤范围不变化，则裂隙扩展停止时的压力为

$$p_n = p_m \left[\frac{\pi R_1^2}{\pi R_1^2 + 2b'(R_{II} - R_1)} \right]^\gamma. \quad (17)$$

式中： R_1 为粉碎区半径； γ 为绝热指数，取 1.4； b' 为裂隙扩展的平均宽度^[20]； p_m 为冲击波充满炮孔时的压力； R_{II} 为裂隙 II 区半径。

爆破过程中，岩石的断裂韧性小于裂隙尖端的应力强度因子时，就会发生断裂，裂隙尖端的应力强度因子

$$K_n = p_m F \sqrt{\pi R_{II}}. \quad (18)$$

式中：系数 F 与裂隙区半径有关，当 $R_{II}/R_1 > 1.5$ 时， F 取值趋近于 1。

当 $K_n > K_I$ 时，裂隙开始扩展，裂隙 I 区扩展前的应力强度因子

$$K_I = p_m F \sqrt{\pi R_1}. \quad (19)$$

联立式(17)~式(19),可化简为下式:

$$\sqrt{\frac{R_{II}}{R_I}} = \left[\frac{\pi R_I^2}{\pi R_I^2 + 2b'(R_{II} - R_I)} \right]^{\gamma} \quad (20)$$

将裂隙 I 区损伤范围 R_I 、粉碎区损伤范围 R_{II} 及裂隙扩展的平均宽度 b' 代入式(20),即可求出裂隙 II 区的损伤范围 R_{II} 。

裂隙 I 区为塑性破坏区,不能忽视环向承载力的作用,在裂隙 I 区产生了大量裂缝;而裂隙 II 区的岩石介质受到裂缝破坏,环向承载力可忽视不计。将裂隙范围分为裂隙 I 区、裂隙 II 区,分别采用摩尔-库伦强度准则和断裂力学裂隙强度因子计算损伤范围,符合实际,计算更加准确。

3 应用分析

3.1 有限元模型

采用有限元模拟的方法对提出的水介质不耦合爆破围岩损伤计算方法进行验证。采用 ANSYS 软件建模,将建立的模型导入 LS-DYNA 模块中求解。模型是直径为 5 000 mm、高为 5 500 mm 的圆柱体,炮孔长度为 2 400 mm,半径取 42 mm;装药条件为非耦合装药,炸药长度为 2 400 mm,半径取 35 mm;炮孔与炸药之间的间隙用水填充。岩石采用 HJC 模型;炸药采用 RHT 模型。建模如图 4 所示。

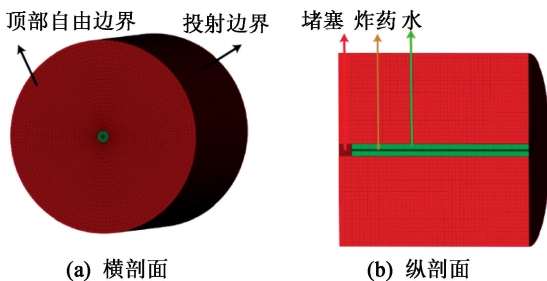


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

有限元模型中,空气建模直径略小于岩石直径。其中,将水、空气、炸药视为流体,将岩石视为固体,采用流固耦合算法。

3.2 计算结果对比分析

选取 2 种不同岩石作为计算对象。以巫溪至开州高速公路 WYKTJC1 合同段岩湾隧道为工程背景,对隧道爆破后的围岩裂隙范围进行研究。该隧道位于重庆市云阳县江口镇新里村境内,拟建隧道围岩全部为 IV 级、V 级围岩,围岩多为粉砂质泥岩,参数如表 1 所示。

隧道掘进爆破过程中,采用水介质不耦合装药

表 1 岩石参数

$\varphi/$ ($^{\circ}$)	$C/$ MPa	$c_p/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	μ
37.7	2.01	2 406	2 630	0.24

的方式。为改变不耦合系数的水介质宽度,计算参数后,通过悬挂装置固定炸药,将水装入专用的柔性水囊后,放入炮孔内。既可以避免水直接流入孔壁裂缝,保持水介质完整性;也能防止炸药受水影响。炸药选择乳化炸药,参数如表 2。

表 2 炸药参数

炮孔 直径/ mm	装药 直径/ mm	炸药 爆速 $D/$ ($m \cdot s^{-1}$)	密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	炮孔 长度/ mm
42	35	4 100	1 050	2 400

对水介质不耦合爆破粉碎区计算方法提供了 2 种方法:方法 I 基于摩尔-库伦强度准则计算损伤范围,与传统方法差异不大,将不耦合装药的裂隙计算方法应用于水介质不耦合爆破中;方法 II 基于摩尔-库伦强度准则及考虑环向应力对粉碎区范围进行计算,考虑到了实际的爆破过程中,任一岩石单元体不仅受径向应力作用,还会受到环向应力的作用。将 2 种计算方法、常见计算模型与模拟计算得到的损伤范围进行对比,如表 3 所示。

表 3 不同模型计算得到的损伤范围对比

Tab. 3 Comparison of damage ranges calculated by different models

	粉碎区 R_I	裂隙 I 区 R_I	裂隙 II 区 R_{II}
文献[19]	133.98		
文献[6]	242.00	290	1 473
文献[21]	358.68		
文献[10]	280.00	375	974
方法 I	292.00	435	1 375
方法 II	373.00	490	1 597
数值模拟	300.00 ~ 400.00	470 ~ 500	1 200 ~ 1 548

相关学者认为,当炮孔压力一定时,围岩岩性不同,所导致的损伤范围结果差异较大。对于强度较大的硬岩,粉碎区仅不到 3 倍的炮孔半径;对于强度较小的软岩,粉碎区是炮孔半径的 3 ~ 10 倍^[17]。各模型结果差异较大,主要原因是各模型对与爆破损伤分区范围的定义不同,以及各模型在计算过程中是否考虑塑性破坏的影响。

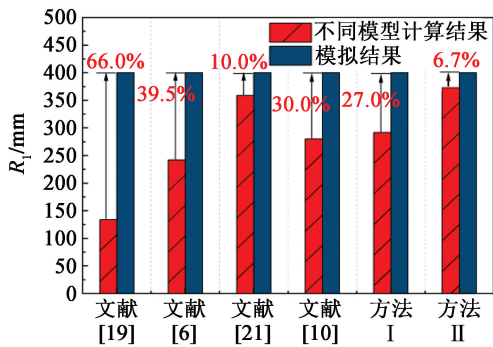
提出的计算方法不仅考虑了环向应力的影响,同时结合了弹性波动理论,更加符合水介质不耦合爆破的实际情况。与常规不耦合装药相比,水介质不耦合装药在炮孔与炸药间加入了水介质,作用强度更高、时间更长,比普通爆破的能量传递效率更高。因此,水介质不耦合爆破所产生的损伤范围会大于普通装药方式。

图 5(a)中,粉碎区的损伤计算范围与模拟计算结果的差分别为 66.0%、39.5%、10.0%、30.0%、27.0%、6.7%,与其余损伤模型相比,本文中的计算方法结果均大于前两者,这与水介质不耦合爆破损伤范围更大的结论相吻合。Kan 模型与本文中计算

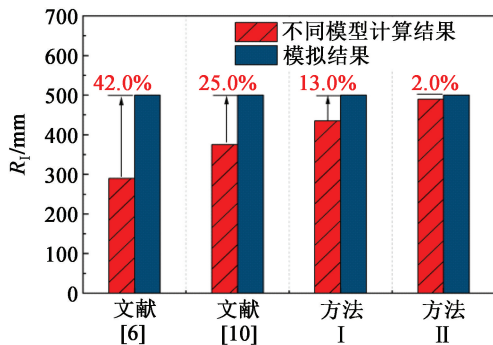
结果相似,是因为文献[21]认为,爆破过程中会产生塑性破坏,同时将塑性破坏的裂隙 I 区也归属于粉碎区。图 5(b)为裂隙 I 区的损伤计算范围,相应计算模型与模拟计算结果的差分别为 42.0%、25.0%、13.0%、2.0%。图 5(c)为裂隙 II 区的损伤计算范围,相应计算模型与模拟计算结果的差分别为 4.8%、37.0%、11.0%、3.0%。结果表明:裂隙 I 区与裂隙 II 区的损伤范围计算,方法 II 最为精确。相较于方法 I,方法 II 考虑了实际爆破过程中环向应力的影响;在考虑环向应力后,计算结果略大于方法 I,与模拟计算值更加接近。总的说来,对于水介质不耦合爆破的损伤范围计算,应选择方法 II 进行计算。

隧道掘进水介质不耦合爆破过程中,对围岩损伤程度影响最大的是水介质不耦合系数^[16]。为此,研究不同水介质不耦合系数对隧道围岩损伤范围的影响。

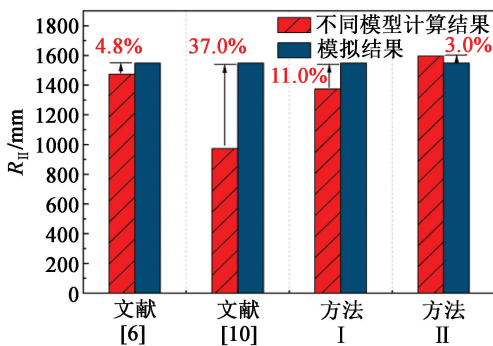
如图 6 所示,孔壁的峰值载荷随水介质不耦合系数 K_d 的增大而减小。原因有 2 个:冲击波后的压力随着水不耦合系数的增大而减小,影响了冲击波对孔壁的冲击力;其次,爆破过程中,冲击波的叠加导致峰值载荷增大,叠加效应随水介质不耦合系数的增大而逐渐减弱,相应的,峰值载荷增大的幅度也逐渐减小。



(a) 粉碎区



(b) 裂隙 I 区



(c) 裂隙 II 区

图 5 不同模型的损伤计算结果对比

Fig. 5 Comparison of damage calculation results of different models

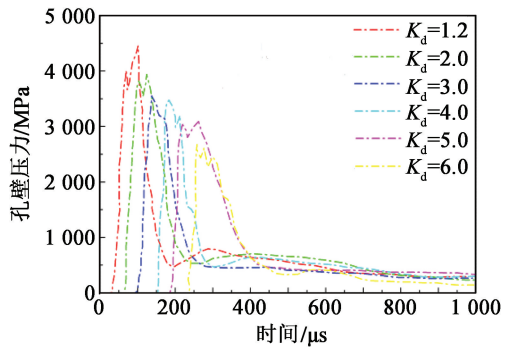


图 6 不同水介质不耦合系数下的爆破载荷曲线

Fig. 6 Blasting load curves under different water uncoupling coefficients

从图 7 可以看出,径向压应力和环向拉应力都随着水介质不耦合系数的增大而减小。说明在水介质不耦合爆破过程中, K_d 越大,对岩石的破坏越小。开挖岩体的爆炸峰值应力远高于预留岩体,使用水介质不耦合爆破开挖岩体时形成了更多的裂缝和破坏。此外,最大环向拉应力在传播过程中迅速衰减到较低水平,而最大径向压应力则随着孔壁距离的增加先上升、后下降,故开挖岩体与保留岩体之间的最大拉应力差随 K_d 的增大而增大,从而导致不

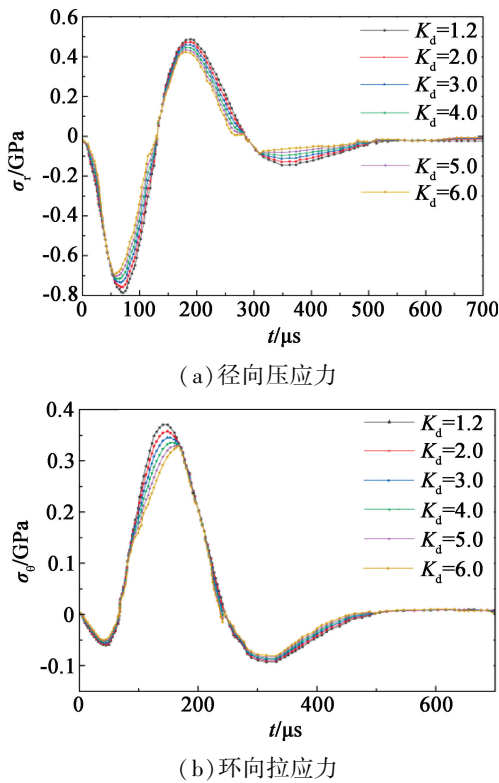


图7 水介质不耦合系数下的爆破应力曲线
Fig. 7 Blasting stress curves under different water uncoupling coefficients

对称的断裂模式。在这种情况下,水介质不耦合爆破可实现裂缝控制,较大的水介质不耦合系数更有

利于实现裂缝控制。

3.3 损伤分形维数计算

观察图8中不同水介质不耦合系数下的应力损伤云图可发现,当水介质不耦合系数增大时,裂隙长度减小,但分布更加密集、复杂。

爆后裂隙如图9所示。在环向方向均产生了一定长度的裂隙。模拟中,当 $K_d=1.2$ 时,爆炸产生的裂隙最长,炮孔周围的裂隙数量较密集;当 $K_d=2.0$ 与 $K_d=4.0$ 时,裂隙II区产生的裂隙长度逐渐减小,裂隙I区的裂隙数量变得更加密集,粉碎区部分粉碎得更彻底,残留岩块较少;随着水介质不耦合系数的进一步增大,当 $K_d=5.0$ 时,爆后裂隙I区的裂隙总体上逐渐减小,裂隙II区的裂隙逐渐消失;当 $K_d=6.0$ 时,肉眼已不见裂隙,此时的炸药含量过少,只破坏了炮孔周围粉碎区的少量部分。

爆后裂隙的扩展、伸长具有良好的自相似性质,可通过分析爆后裂隙损伤占比的分形维数,定量描述破坏程度。在计算分形维数 D 前,将水介质不耦合爆破后裂隙的彩色图像处理成灰度图像,并进行二值化处理,转化为黑白位图,见图10、图11。

图12为不同不耦合系数下,水介质不耦合爆破爆后裂隙破坏程度的分形维数 D 的拟合曲线。曲线斜率即为分形维数 D 。相关系数 R^2 可用于验证分形特征相关性。图12(a)-图12(d)4组拟合曲

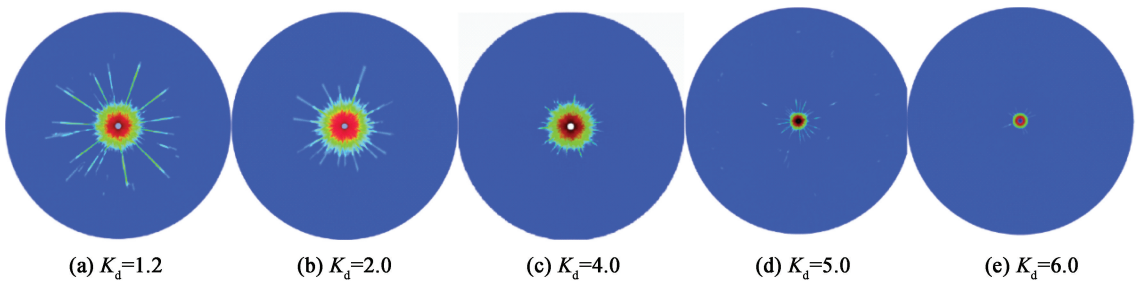


图8 水介质不耦合装药围岩爆破损伤的分布特征
Fig. 8 Distribution characteristics of rock blasting damage with water-uncoupled charges

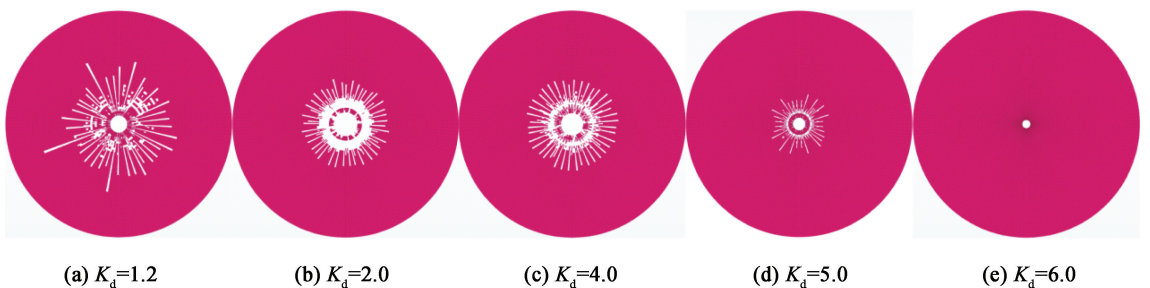


图9 水介质不耦合系数变化下围岩的爆后裂隙形态
Fig. 9 Morphology of cracks in the surrounding rock after blasting under different water uncoupling coefficients

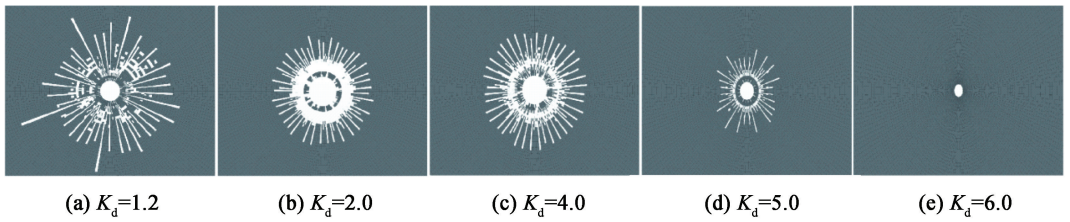


图 10 围岩爆后裂隙灰度图像

Fig. 10 Gray scale images of cracks in the surrounding rock after blasting

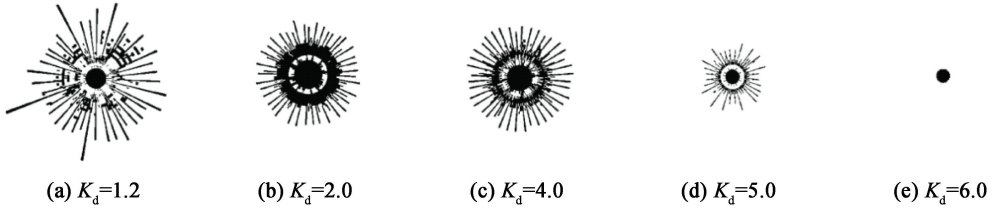


图 11 围岩爆后裂隙二值化图像

Fig. 11 Binarized images of cracks in the surrounding rock after blasting

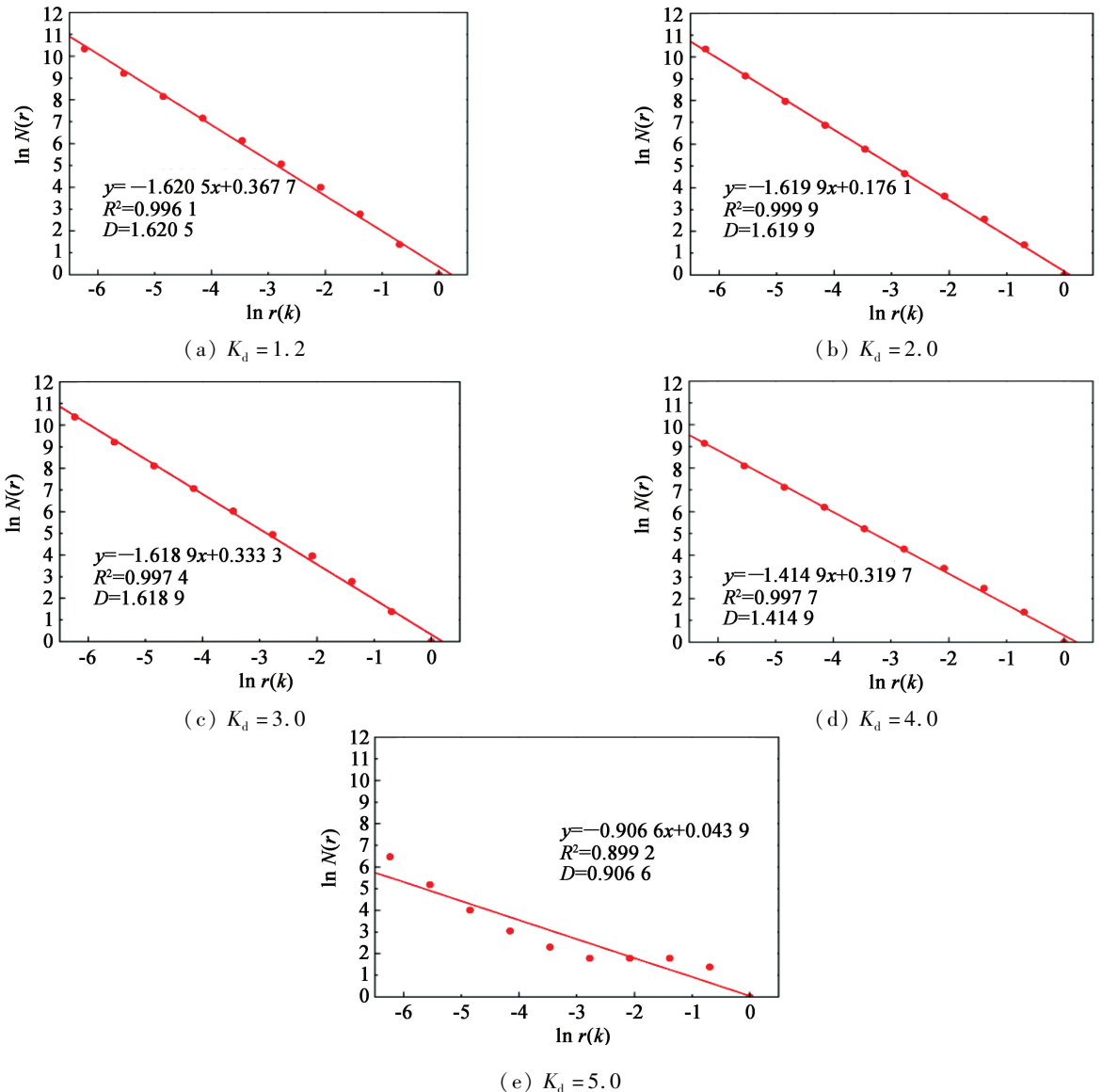


图 12 水介质不耦合爆破后裂隙的分形维数曲线

Fig. 12 Fractal dimension curves of the fracture after water-uncoupled blasting

线分形维数的相关系数 R^2 均接近 1, 线性拟合效果良好; 观察图 8、图 9 和图 11 中的裂隙损伤图像, 左边的图明显感觉纹理比右图粗糙, 这与分形维数 D 减小的关系也相对应。故水不耦合爆破后裂隙的分布符合分形理论, 裂隙具有良好的分形特征。

当水介质不耦合系数为 1.2、2.0、3.0、4.0、5.0 时, 裂隙对应分形维数 $D_1 \sim D_5$ 分别是 1.620 5、1.619 9、1.618 9、1.414 9、0.906 6。整体上, 随着水介质不耦合系数的增大, 爆后裂隙分形维数先维持不变, 接着缓慢减小, 最后快速递减。这说明当水介质不耦合系数从 1.2 增大至 2.0 和 4.0 时, 裂隙长度减小的同时, 裂隙占比增大, 水介质不耦合爆炸后的粉碎程度随之增大; 但当不耦合系数大于 4.0 后, 由于炮孔内炸药的进一步减少, 此时爆炸的能量已经不足以产生较多的裂隙, 粉碎区损伤区域也同时降低。相对于 D_1 , 由 $D_2 \sim D_5$ 计算得到破碎程度增长率分别为 0.03%、0.10%、12.68%、44.00%。

由此可得出结论: 水介质面会提高炸药作用于围岩的能量, 并使围岩粉碎程度提升。还会使爆炸产物在水中膨胀速度变慢, 产生的冲击波强度更高、作用的时间更长, 出现较高的爆炸峰值压力, 从而对围岩造成更强的破坏作用, 并使主裂纹扩展长度增长, 次生裂纹数量增多。

4 结论

基于水中冲击波理论和摩尔-库伦强度准则, 提出了采用水介质不耦合爆破方式的隧道围岩粉碎区和裂隙区损伤范围的计算方法。将本文中的计算方法与现有计算方法、LS-DYNA 有限元模拟计算结果进行了对比。同时, 基于有限元模拟结果, 对比分析了不同水介质不耦合系数下围岩的爆破损伤情况, 并对爆后裂隙损伤分形维数进行了计算分析。得到如下主要结论:

1) 采用水介质不耦合爆破的方式考虑了环向应力对损伤范围的影响, 基于水中冲击波理论和断裂力学原理, 提出了围岩粉碎区、裂隙 I 区、裂隙 II 区的 2 种计算方法。通过相关依托工程进行了计算, 与现有计算方法、LS-DYNA 有限元模拟计算结果进行了对比分析。方法 II, 考虑了环向应力的粉碎区半径 373 mm, 位于模拟结果 300~400 mm 范围内; 裂隙 I 区半径 490 mm, 位于模拟结果 470~500 mm 范围内; 裂隙 II 区半径 1 597 mm, 略大于模拟结果(允许最大值 1 548 mm)。与已有计算方法相对比, 本文中提出的计算方法精确度较高。

2) 随着水介质不耦合系数的增大, 围岩在水介质装药条件下的损伤范围会逐渐减小, 减小总体趋势为先上升、后平稳。在水介质面增大的情况下, 岩壁会得到有效保护。但过大的水介质面也会造成炮孔间不能贯通、岩壁残留未爆围岩的情况, 达不到围岩爆破的预期目标。

3) 水介质不耦合系数的增大, 分形维数不会立刻减小, 而是呈现出先平稳、后急剧下降的趋势。这是由于水介质面的增大, 会提高爆轰波作用于炮孔壁的冲击波峰值压力, 并提高炸药作用于围岩的能量, 并使围岩粉碎程度提升, 破碎程度增长率分别为 0.03%、0.10%、12.68%、44.00%。

参考文献

- [1] 冯叔瑜, 马乃耀. 爆破工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980.
- [2] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641-645.
ZONG Q, MENG D J. Influence of different kinds of hole charging structure on explosion energy transmission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 641-645.
- [3] LI T, CHEN M, WEI D, et al. Disturbance effect of blasting stress wave on crack of rock mass in water-coupled blasting [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(6): 2939-2951.
- [4] 邵珠山, 杨跃宗, 米俊峰, 等. 水压爆破中波衰减规律及致裂机理的理论研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(6): 820-826.
SHAO Z S, YANG Y Z, MI J F, et al. Theoretical study on the wave attenuation law about water pressure blasting [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(6): 820-826.
- [5] 冯涵, 张学民, 王立川, 等. 隧道钻爆法水封装药结构爆破引起振动计算分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 93-100, 124.
FENG H, ZHANG X M, WANG L C, et al. Calculation and analysis for water-sealed charge structure blasting vibration in tunnel drilling and blasting construction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(7): 93-100, 124.
- [6] 李涛, 王林峰, 李松, 等. 单孔爆破作用下隧道围岩损伤范围计算及影响因素分析研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 23-32, 66.
LI T, WANG L F, LI S, et al. Calculation of damage

- range of tunnel surrounding rock and analysis of influencing factors under single-hole blasting [J]. *Modern Tunneling Technology*, 2023, 60(4): 23-32, 66.
- [7] FAN Y, MIAO X Z, GAO Q D, et al. Influence of water depth on the range of crushed zones and cracked zones for underwater rock drilling and blasting [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(10): [2024-10-21]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002485).
- [8] 冷振东, 卢文波, 陈明, 等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(1): 101-107.
LENG Z D, LU W B, CHEN M, et al. Improved calculation model for the size of crushed zone around blasthole [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(1): 101-107.
- [9] 费鸿禄, 苏强, 蒋安俊, 等. 爆破荷载下隧道围岩破坏裂隙范围研究[J]. *爆破器材*, 2019, 48(2): 51-56.
FEI H L, SU Q, JIANG A J, et al. Damage fracture range of tunnel surrounding rock under blasting load [J]. *Explosive Materials*, 2019, 48(2): 51-56.
- [10] 李芳涛, 胡志平, 陈南南, 等. 爆破荷载作用下隧道围岩裂隙范围计算方法研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(8): 260-269.
LI F T, HU Z P, CHEN N N, et al. A study of fracture range of tunnel surrounding rock under blasting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8): 260-269.
- [11] YE Z W, CHEN M. Characteristics of peak load on a borehole wall in water-coupling blasting [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2023, 149(1): 04022087.
- [12] WANG Y B, LI S X, YANG R S, et al. Attenuation of hole wall pressure and the prediction model for crack length in the scenario of blasting with water-coupled medium [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2024, 30(9/10): 2072-2082.
- [13] 杨跃宗, 邵珠山, 熊小锋, 等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. *爆破*, 2018, 35(4): 26-33, 146.
YANG Y Z, SHAO Z S, XIONG X F, et al. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting [J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 26-33, 146.
- [14] 严鸿海, 张义平, 任少峰, 等. 孔底真空空间隔装药的爆破效果试验研究[J]. *爆破*, 2018, 35(1): 66-74.
YAN H H, ZHANG Y P, REN S F, et al. Experimental study on blasting effect of quasi vacuum-decking in hole bottom [J]. *Blasting*, 2018, 35(1): 66-74.
- [15] 王琪, 张世平, 林哲. 露天深孔不同位置水间隔装药爆破数值模拟[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(1): 27-29.
WANG Q, ZHANG S P, LIN Z. Open water deep hole position interval blasting numerical simulation [J]. *Coal Technology*, 2018, 37(1): 27-29.
- [16] LI X D, LIU K W, QIU T, et al. Numerical study on fracture control blasting using air-water coupling [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9: 29.
- [17] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 79-89.
NING J G, WANG C, MA T B. *Explosion and shock dynamics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 79-89.
- [18] 王伟, 李小春, 石露, 等. 深层岩体松动爆破中不耦合装药效应的探讨[J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2837-2842.
WANG W, LI X C, SHI L, et al. Discussion on decoupled charge loosening blasting in deep rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2837-2842.
- [19] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(2): 144-147.
DAI J. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001, 20(2): 144-147.
- [20] XU Z J, CAO Y, LI C, et al. Study on mechanism of static blasting-induced hard rock fracture expansion [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(20): 11310.
- [21] KANCHIBOTLA S S, VALERY W, MORREL S. Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding [C]//*Proceedings of EXPLO 99 Conference on Rock Breaking*. Kalgoorlie, AU: ECRB, 1999.