

文章编号: 1007-2993(2022)06-0502-05

地下厂房岩壁梁爆破松弛试验及稳定性影响研究

周春国¹ 王荣富¹ 刘兴堂¹ 封磊² 刘刚¹

(1. 华电云南发电有限公司以礼河电厂, 云南会泽 650000;
2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 310014)

【摘要】 针对特殊地质构造下岩壁梁区域围岩开挖成型困难、岩壁梁稳定性难以评估等问题, 在某工程岩壁梁区域开展了爆破试验及声波测试, 研究岩梁区域的加固措施以及应力松弛圈深度, 通过试验数据修正岩壁梁稳定性评估结果。结果表明, 爆前各测点松弛圈平均深度为 1.73 m, 爆后各测点平均深度约 2.51 m, 对比各试验段结果, 岩壁梁树脂锚杆预加固方案围岩成型效果较好。利用测试数据对围岩及结构面参数进行复核, 修正数值模拟计算结果, 计算得到未考虑应力松弛圈深度时岩壁吊车梁与岩壁结合面的抗滑稳定性安全系数为 6.89, 考虑应力松弛圈深度时, 安全系数降至 3.13, 岩壁梁处于稳定状态。该岩壁梁爆破松弛试验方法及稳定性计算方法可为类似工程提供参考。

【关键词】 岩壁梁; 爆破试验; 应力松弛圈; 稳定性分析

【中图分类号】 TV 542

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.06.014

Study on Blasting Relaxation Test and Stability Influence of Underground Powerhouse Rock Wall Beam

Zhou Chunguo¹ Wang Rongfu¹ Liu Xingtang¹ Feng Lei² Liu Gang¹

(1. Huadian Yunnan Power Generation Co., Ltd., Yilihe Power Plant, Huize 650000, Yunnan, China; 2. China Power Construction Group East China Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

【Abstract】 In view of the difficulty in forming the surrounding rock in the rock wall beam area under special geological structures, and the difficulty of assessing the stability of the rock wall beam, a blasting test and sonic test were carried out in the rock wall beam area of an engineering to study the reinforcement measures and stress in the rock beam area. The depth of the relaxation zone was used to modify the results of the stability evaluation of rock wall beams through experimental data modification. The results show that the average depth of the relaxation zone at each measuring point before blasting is 1.73 m, and the average depth of each measuring point after blasting is about 2.51 m. Comparing the results of each test section, the rock wall beam resin anchor pre-reinforcement scheme has a better surrounding rock forming effect. Use the test data to recheck the surrounding rock and structural surface parameters, and modify the numerical simulation calculation results. The safety factor of anti-sliding stability of the rock wall crane beam and the joint surface of the rock wall is 6.89 when the depth of the stress relaxation zone is not considered. When considering the depth of stress relaxation zone, the safety factor is reduced to 3.13, and the rock wall beam is in a stable state. The blasting relaxation test method and stability calculation method of rock wall beam can provide reference for similar projects.

【Key words】 rock wall beam; blasting test; stress relaxation zone; stability analysis

0 引言

岩梁区域的开挖成型对岩梁的稳定性有很重要的影响,但在实际工程中往往由于多种原因造成岩梁区域开挖成型较差、岩梁区域缺失等现象^[1]。在我国西南地区水电工程中,因地质条件复杂、地应力高等因素,多数工程在岩壁吊车梁岩梁区域开挖过程中出

现相对严重的开挖成型差、岩梁区域缺失的现象,如锦屏二级、乌东德和白鹤滩。当岩梁区域缺失较严重时,围岩往往出现松弛、岩体裂隙卸荷张开、在高地应力环境下围岩出现片帮或板状开裂等现象,致使围岩条件出现一定程度的劣化^[2-4]。对围岩松弛范围的测试主要依靠声波测试技术^[5-6],爆破方式对围岩

松弛区范围的影响以及爆破松弛区范围的计算已有一些成熟的成果^[7-8]。岩壁吊车梁是坐落在稳定围岩上的混凝土结构,故当围岩条件变化后,势必会对岩梁的稳定性产生影响,目前国内外对岩壁吊车梁的爆破成型试验成果较少。国内规范中对岩壁吊车梁安全系数的计算主要采用刚体平衡法及数值计算,而数值计算中往往难以把握岩梁部位的围岩松弛范围。为准确掌握和评价岩壁吊车梁的稳定状态,需要在岩壁梁附近进行爆破试验,根据试验结果分析围岩状态变化对岩梁稳定性的影响,以及围岩与岩梁区域加固结构之间的相互作用关系。

1 岩梁爆破松弛试验方案

爆破试验段位置见图1,有A、B、C、D、E共5个试验段,其中A、E段在下游侧,B、C、D段在上游侧。厂房区域地层岩性为古生界下二叠统栖霞-茅口组(P_1q+m)厚—巨厚层状灰岩,饱和抗压强度55~60 MPa。造孔间距35 cm,斜孔线药密度55 g/m,垂直孔线药密度65 g/m,要求质点爆破振动 ≤ 6.0 cm/s。爆前爆后对各孔分别开展钻孔声波测试,具体试验方案见表1,试验A、B段孔深12 m,C、D、E段孔深9 m,钻孔直径76 mm,每个试验段两个测试孔。爆破后,对各测试孔进行扫孔作业。

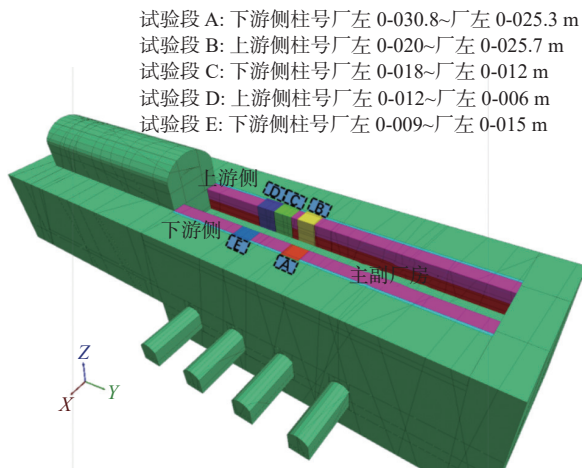


图1 地下厂房岩梁试验段位置示意图

表1 各试验段开展钻孔声波测试具体方案

项目	试验段	每孔孔深/m	钻孔孔径/mm	工作量/m	实施时间
岩梁爆破前 岩体声波造孔	A、B	12	76	共24	II层中间 拉槽结束
	C、D、E	9	76	共27	保护层 开挖结束
岩梁爆破后 岩体声波 原孔位扫孔	A、B、C、D、E	9	76	共90	岩梁试验段 爆破开挖后

测试孔和爆破位置见图2,岩梁与围岩接触斜面布置倾向安装场方向 30° 的斜爆破孔,岩梁上、下垂直里面布置垂直爆破孔,斜爆破孔与垂直爆破孔在上拐点相交,两个测试孔分别位于岩梁上垂直立面以及岩梁与围岩接触斜面上,两孔垂直距离3 m。

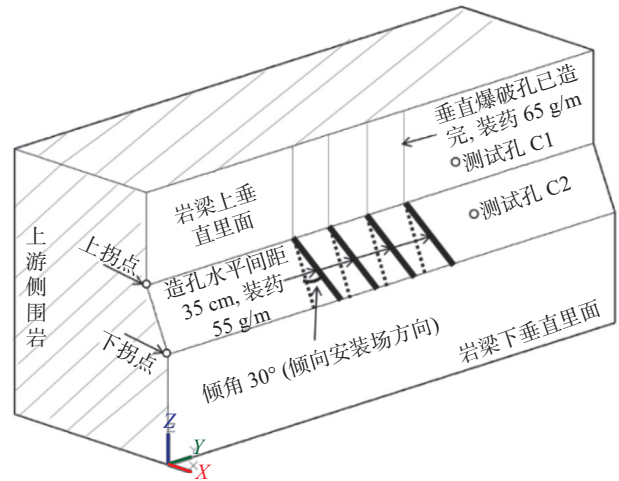


图2 地下厂房爆破孔布置示意图

岩梁区域加固措施有以下两种(见图3):

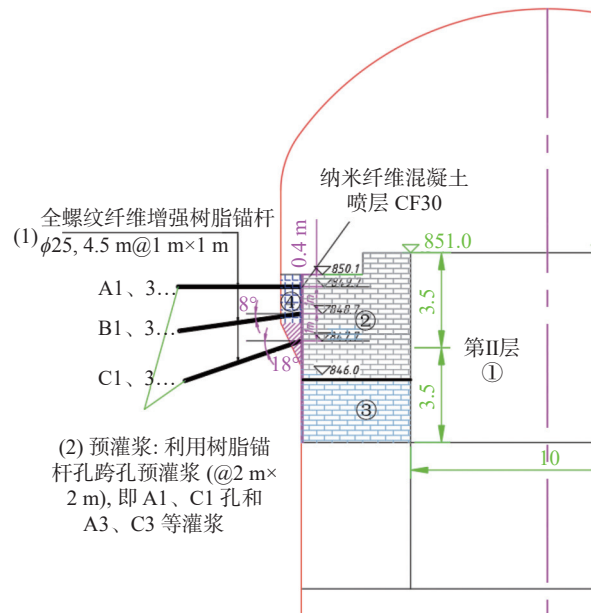


图3 岩壁梁加固方案示意图

(1)树脂锚杆预加固措施: 开挖面需喷钢纤维混凝土(强度等级CF30)进行表面封闭,喷射厚度不小于10 cm;采用全螺纹纤维增强树脂锚杆,锚杆参数为 $\phi 25$ mm, 4.5 m @ 1 m \times 1 m,数量约18根(3排,每排6根)。

(2)预灌浆措施: 利用树脂锚杆孔,采用跨孔预灌浆(4.5 m @ 2 m \times 2 m),即图3所示的A1、C1孔和A3、C3孔等灌浆。采用浓浆预灌,灌浆压力采用0.2~0.3 MPa,采用浓浆预灌(具体浓度据现场预灌

确定)。

试验 C 段、D 段和 E 段采用预灌浆措施,其中试验 E 段采用树脂锚杆预加固措施。

2 爆破前后岩体松弛变化特征

根据爆破后现场照片(见图 4),各试验段半孔率均较高。其中,试验 C 段成型较差,主要受镶嵌碎裂结构岩体和优势节理特征控制,厂房岩梁斜面钻孔与优势节理大角度相交角度越大越有利于岩梁成型;试验 E 段成型较好,该段采用树脂锚杆预加固措施,且优势节理中缓倾倾向厂房侧比较发育,岩梁斜面造孔方向竖直向也基本可以实现与优势节理大角度相交,其他各段成型尚可。

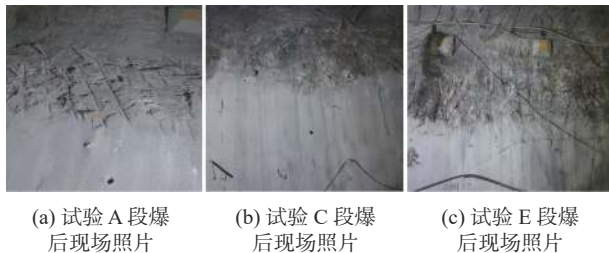


图 4 爆破试验后现场照片

采用声波测试爆前爆后的平均波速与应力松弛圈深度(见图 5),大部分测点爆破后的应力松弛圈相比于爆破前有所增加,增量均在 0.5 m 以上,其中 D1 测点增量近 2.5 m, C2 测点爆前爆后松弛圈近乎持平。局部松弛圈增量较大可能由炸药量过大、炮孔间距偏小等因素造成。爆前各测点松弛圈平均深度为 1.73 m,爆后各测点平均深度约 2.51 m。爆前各测点平均波速为 4000 ~ 4600 m/s,爆后各测点波速为 3000 ~ 3800 m/s,爆后波速减少了约 20%。综合图 4 及图 5,试验段 E 采用树脂锚杆预加固措施后,围岩成型效果好,应力松弛圈增量较小,是相对合理的支护措施。

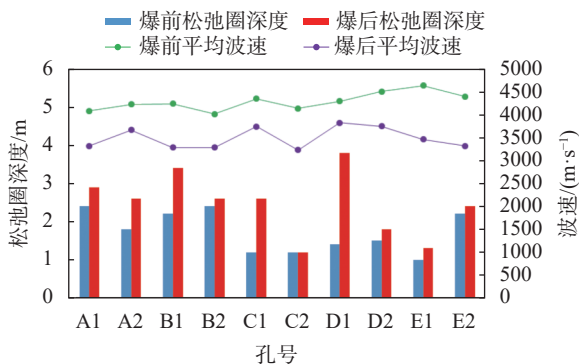


图 5 声波测试平均波速与应力松弛圈深度数据统计

对声波测试爆前爆后的各测点岩体完整性进行统计(见图 6),爆前较完整及完整占比 50% 以上,爆

后降低至 25% 左右,完整性差和较破碎岩体占比各增加了 5% ~ 10%。

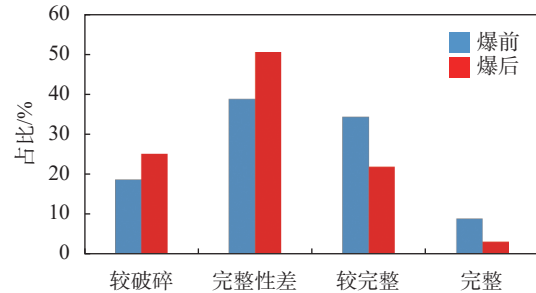


图 6 岩体完整性统计图

3 考虑松弛效应岩壁梁开挖响应监测与计算分析

根据试验得到的应力松弛圈深度,结合地质构造与洞室的空间分布关系,对岩壁梁开挖响应进行模拟计算。数值模型见图 7,模型中考虑了 24 条对厂房影响较大的结构面。依据岩壁梁爆破开挖前的测试数据进行围岩、结构面参数反演,反演结果见表 2、表 3。

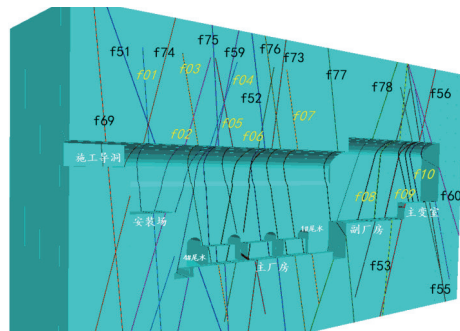


图 7 地下厂房结构面空间位置示意图

表 2 岩体物理力学参数取值表

围岩分类	密度 ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	岩体变形 模量/GPa	岩体弹性 模量/GPa	泊松比 ν	抗剪断(岩/岩)	
					f'	c'/MPa
IV	2.1	2.5	3.5	0.32	0.57	0.35
V	2.1	1	0.8	0.35	0.45	0.10

表 3 结构面物理力学参数

结构面类型	抗剪断强度		代表性结构面
	f'	c'/MPa	
硬性结构面	0.54	0.15	节理
软弱结构面	岩块岩屑型	0.46	F_{12} 、 f_{32}
	岩屑夹泥型	0.37	F_{10} 、 F_{15} 、 f_{34} 、 f_{56}
	泥夹岩屑型	0.25	F_2 、 F_7 、 f_{50} 、 f_{53} 、 f_{55} 、 f_{71}

计算结果见图 8 和表 4,未考虑松弛圈时,孔口 0 m 及 2 m 相对误差为 10% ~ 30%,考虑松弛圈后,孔口附近测点相对误差降至 5% 以内。而对于 5 m

及 10 m 附近测点, 由于其不在应力松弛圈影响范围内, 相对误差基本在 20% 以上, 考虑松弛圈后, 相对误差有所增加。

近开挖面测点相对误差相较于远开挖面测点小, 原因是围岩类别与结构面产状在距开挖面较远处无法精确刻画, 且相对误差这一统计量放大了远开挖面测点的误差程度, 事实上, 监测值与计算值的绝对误差基本在 2 m 以内。总体来看, 考虑围岩应力松弛

圈深度后, 对围岩变形的模拟效果较好。

依据式(1)计算岩壁吊车梁与岩壁结合面的抗滑稳定性安全系数:

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \sigma_i + c_i) A_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i A_i} \quad (1)$$

式中: σ_i 为结合面上第 i 个单元的法向压应力, kPa; τ_i

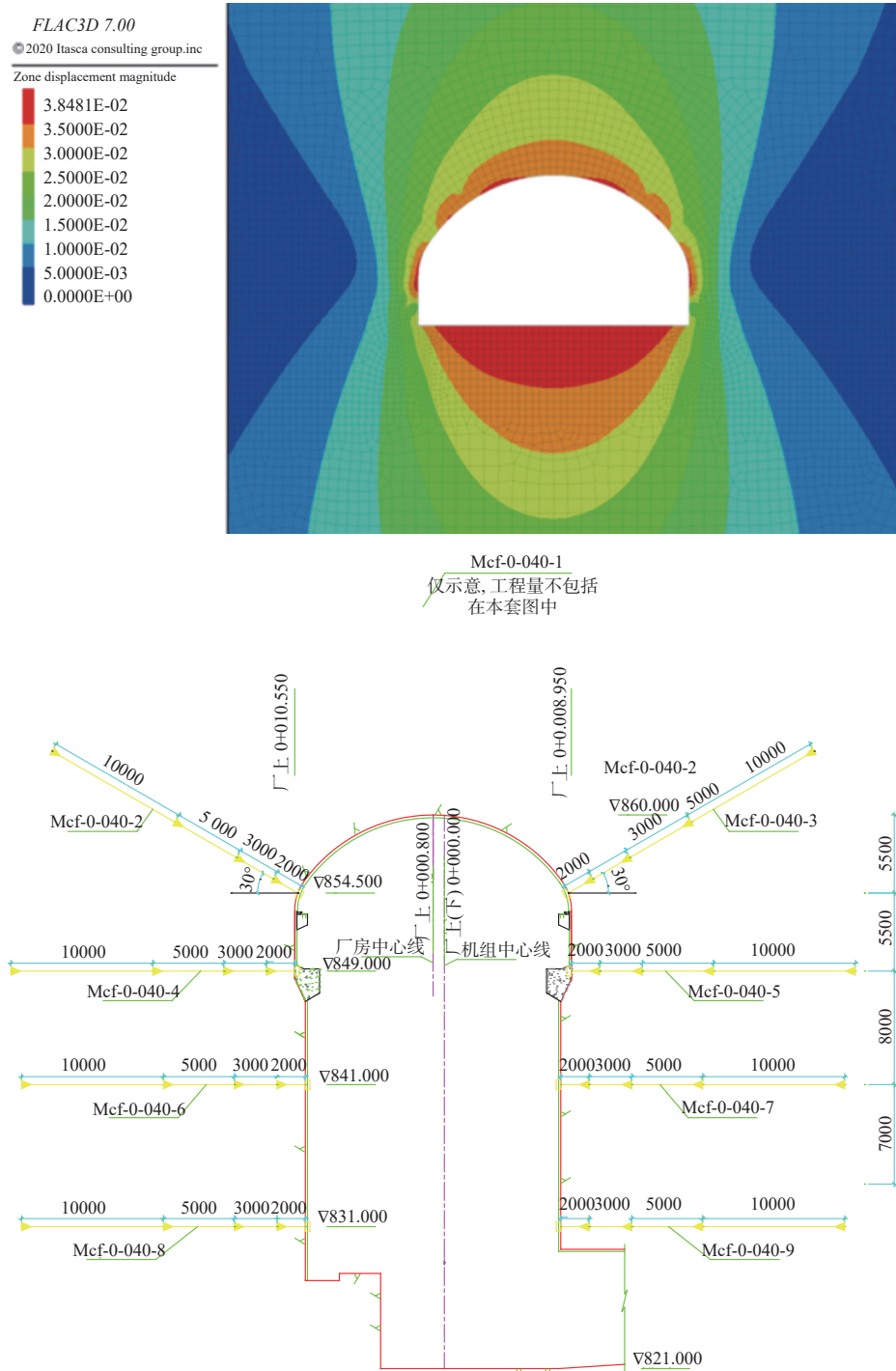


图 8 地下厂房变形云图与监测设备位置示意图(单位:mm)

表4 监测值与计算值相对误差统计表

监测仪器编号	测点深度/m	监测值/mm	未考虑应力松弛圈		考虑应力松弛圈	
			计算值/mm	相对误差/%	计算值/mm	相对误差/%
Mcf-0-000-1	10	3.82	5.35	28.60	5.79	34.02
	5	8.1	10.64	23.87	11.71	30.83
	2	14.37	12.15	-18.27	14.96	3.94
	0	19.26	17.55	-9.74	19.55	1.48
Mcf-0-000-4	10	3.15	4.00	21.15	4.86	35.23
	5	5.73	8.08	29.08	9.84	41.75
	2	12.78	10.32	-23.81	12.57	-1.70
	0	17.35	13.49	-28.62	16.42	-5.65
Mcf-0-000-5	10	2.78	2.95	5.86	3.42	18.62
	5	4.37	5.97	26.83	6.91	36.75
	2	9.25	7.63	-21.24	8.83	-4.80
	0	11.54	9.97	-15.74	11.53	-0.05

为结合面上第*i*个单元的剪应力, kPa; f_i 为结合面上第*i*个单元的摩擦系数; c_i 为结合面上第*i*个单元的黏聚力, kPa; A_i 为第*i*个单元沿滑裂面的面积, m^2 ; n 为结合面上的单元个数。

未考虑松弛圈时, 岩壁吊车梁与岩壁结合面的抗滑稳定性安全系数为 6.89, 考虑松弛圈时, 安全系数降至 3.13, 岩壁梁处于稳定状态。岩体应力松弛对岩梁安全系数影响较大, 考虑松弛圈后岩壁梁安全系数降低了超过 50%, 因此在岩壁梁附近精确刻画松弛圈范围是十分必要的。

4 结论

对某工程岩壁梁区域围岩进行了爆破试验, 根据爆破试验结果对岩壁梁爆破后的围岩状态进行分析, 将松弛圈深度结果应用于数值模拟计算中, 结论如下:

(1) 爆前各测点松弛圈平均深度为 1.73 m, 爆后各测点平均深度约 2.51 m; 爆前各测点平均波速为 4000 ~ 4600 m/s, 爆后各测点波速为 3000 ~ 3800 m/s, 爆后波速减少了约 20%; 爆前较完整及完整占比 50% 以上, 爆后降低至 25% 左右。

(2) 试验段 E 采用树脂锚杆预加固措施后, 围岩成型效果好, 应力松弛圈增量较小, 是相对合理的支护措施。

(3) 未考虑松弛圈时, 孔口 0 m 及 2 m 数值模拟计算值与监测值相对误差为 10% ~ 30%, 岩壁吊车梁与岩壁结合面的抗滑稳定性安全系数为 6.89, 考虑松弛圈时, 孔口附近测点相对误差降至 5% 以内, 安全系数降至 3.13, 数值模拟结果可靠, 岩壁梁处于稳

定状态。

(4) 结合岩壁梁区域围岩爆破实验, 对岩壁梁结构的抗滑稳定性安全系数进行精细化的数值模拟计算, 确保岩壁梁在运行期的安全性, 该技术可在类似工程中推广应用。

参 考 文 献

- [1] 洪 燕, 田正宏, 孙 啸, 等. 碾压混凝土薄弱区域压实质量精细评价方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 80-83.
- [2] 邱 鑫, 林 缅, 郑思平, 等. 基于Voronoi模型的脆性岩石微观结构数值模拟[J]. 力学与实践, 2021, 43(2): 244-251.
- [3] 张开雨, 夏开文, 刘 丰. 基于Voronoi多边形离散的DDA方法模拟岩石破坏[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 725-738.
- [4] 孙治新, 赵 秋, 赵洪鹏. 应用干孔声波法测试隧洞围岩松弛圈[J]. 水利水电工程设计, 2019, 38(1): 36-37, 56.
- [5] 李 月, 刘 立, 梁 伟, 等. 岩石松动层声波测试技术[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2006, (2): 95-96, 102.
- [6] 刘康和. 弹性波测试技术的应用与分析[J]. 人民长江, 1991, (7): 18-21.
- [7] 冷振东, 卢文波, 范 勇, 等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(4): 661-669.
- [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.

收稿日期: 2021-06-10