

Doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.03.006

铜丝电爆炸载荷下红砂岩破裂行为实验

王兆寒,张晨晖,于航,匡春霖,张凤鹏,彭建宇

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室,沈阳 110819)

摘要:金属丝电爆炸破碎岩石是一种环保且有前景的爆破技术。为进一步认识岩石在金属丝电爆炸载荷下的破裂行为,基于高压脉冲放电实验平台,开展了直铜丝电爆炸破碎红砂岩的模型实验研究。借助超高速相机观测了试件表面裂纹的起裂和扩展过程,探讨了放电电压和爆源位置等因素对岩石破裂效果的影响,具有一定的创新性。结果表明,随着放电电压增加,岩石破裂程度变得更加严重。30 kV 电压下,金属丝发生电爆炸,但并未有效破裂岩石;40 kV 电压下,试件出现数条宏观裂纹,红砂岩破裂成碎块状。此外,爆源到试件表面的距离越近,试件表面的裂纹越发育,试件的破碎程度越严重。

关键词:金属丝电爆炸;红砂岩;放电电压;爆源;裂纹扩展;岩石爆破

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)03-0036-06

Fracture behavior of red sandstone under copper wire electric explosion

WANG Zhaohan, ZHANG Chenhui, YU Hang, KUANG Chunlin, ZHANG Fengpeng, PENG Jianyu

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Wire electric explosion for breaking rock is a kind of environmental and promising technology. To understand the fracture behavior of rocks under wire electric explosion, this study carried out model experiments of copper wire electric explosion for breaking red sandstone by using a high voltage pulse discharges apparatus. The process of crack initiation and propagation on the surface of the specimen was observed by using an ultra-high speed camera. The effects of discharge voltage and explosion source location on the rock fracturing were analyzed. This experimental study is innovative. The experimental results show that the fracture behavior was related to the discharge voltage. Under the discharging voltage of 30 kV, the electric explosion of metal wire did not effectively break the red sandstone. However, under the discharging voltage of 40 kV, there are several macroscopic cracks in the red sandstone, and the specimen was broken into fragments. In addition, as the distance between the explosion source and the surface of the specimen decreases, the cracks on the surface become more developed and the fracture degree of red sandstone becomes more serious.

Key words: electric explosion of wires; red sandstone; discharge voltage; explosion source; crack propagation; rock blasting

目前,常见的破岩方法主要有钻爆法与机械破岩法,然而钻爆法存在可控性差、危险性高与爆后产生有毒有害气体等问题,而机械破岩设备在硬岩环

境中磨损严重且工作效率低,成为制约机械破岩在硬岩地下工程应用的一大难题。由此,在当前的破岩技术领域亟需一种绿色、安全、高效的破岩手段。金属丝电爆炸技术破碎岩石,即通过在金属丝两端施加高功率脉冲电压,在很短的时间内使金属丝发生电爆炸,经历“固态—液态—气态—等离子态”的相态转变,产生高温和强冲击波致裂岩石^[1-2]。通过金属丝电爆炸的方法能够产生可控且稳定的冲击波,且无有毒有害气体产生,被认为是一种非常有

收稿日期:2021-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104119);大学生创新创业计划项目(211140)

作者简介:王兆寒(2001—),男,采矿工程专业,研究方向为电爆炸爆破破岩技术。

通信作者:张凤鹏(1967—),男,教授,博士研究生导师,研究方向为深部采矿高效爆破理论与技术。

前景的岩石破碎技术。

国外学者已经开展了利用金属丝电爆炸技术破碎岩石、混凝土等脆性材料的研究。例如, KUZNETSOVA 等^[3]分析了铜丝电爆炸时冲击波的形成以及破碎混凝土的机理。YUDIN 等^[4]的研究结果表明金属丝电爆炸电流曲线的前半个周期内有 50%~80% 的储存能量被释放。YUDIN 等^[5]还开展了金属丝电爆炸破碎混凝土实验, 比较了同时起爆和逐孔起爆时的能量利用情况。LOEFFLER 等^[6]详细分析了金属丝电爆炸的成本, 讨论了使用电爆炸技术作为能量源替代炸药破碎岩石的可行性。此外, VOITENKO 等^[7]使用金属丝电爆炸联合生成气体的材料来提高固体材料的破碎效率。国内金属丝电爆炸应用研究多集中在化石能源开发领域, 其金属丝电爆炸环境为液相介质, 例如张永民等^[8]和周海滨等^[9]提出利用金属丝电爆炸驱动含能材料释能, 进而增强冲击波效应, 来改善储层物性, 提高岩石样品的透气性和渗透率。而本文使金属丝电爆炸载荷直接作用于岩石, 不依赖于液相介质而

直接爆破, 从而实现高效破岩目的。目前, 这种金属丝电爆炸直接破岩技术在国内的研究较少。

本文将铜丝通过钻孔预埋在红砂岩试件内部, 利用电爆炸设备将高电压、大电流的电脉冲注入铜丝, 使之发生爆炸形成强冲击波破碎试件; 借助超高速相机观测试件的动态断裂过程, 研究不同放电电压和不同爆源位置下红砂岩的破裂模式, 研究结果能够为利用金属丝电爆炸载荷破碎岩石提供进一步的认识。

1 实验方案及设备

1.1 试件与方案

采用图 1 所示红砂岩试件开展爆破实验, 其尺寸为 200 mm × 200 mm × 150 mm, 基本力学参数见表 1。试件准备过程中, 沿试件的厚度方向钻通孔, 孔径为 6 mm。所用铜丝的长度为 80 mm, 直径为 0.4 mm。采用胶水进行填充并固定金属丝。24 h 后, 胶水完全凝固, 即可开展电爆炸破岩实验。

表 1 红砂岩基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of red sandstone

密度/(g · cm ⁻³)	波速/(m · s ⁻¹)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2.11	2 541	92.69	6.11	20.52	0.28

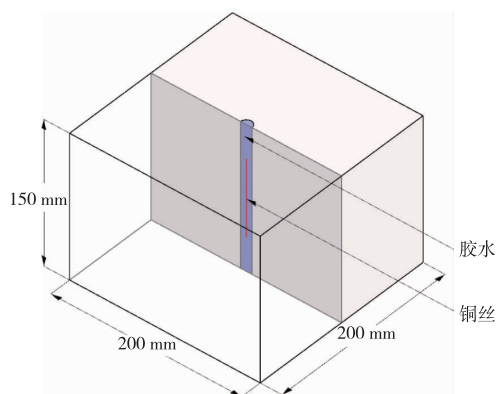


图 1 试件示意图

Fig. 1 Diagram of specimen

本文共设计了五组实验, 分别研究放电电压及爆源位置对岩石破裂模式的作用。具体方案见表 2。其中试件 S1、S2 和 S3 采用不同的放电电压, 用于研究不同爆炸能量下试件的破裂情况。试件 S3、S4 和 S5 采用不同的钻孔位置, 用于研究爆破位置对红砂岩破裂行为的影响。

表 2 实验方案

Table 2 Experimental scheme

试件编号	放电电压/kV	爆源与表面距离/mm
S1	30	100
S2	35	100
S3	40	100
S4	40	30
S5	40	40

1.2 实验设备

实验采用图 2 所示电爆炸综合实验系统。该系统主要用于向金属丝注入能量, 使其发生电爆炸, 产生冲击波效应破碎岩石。实验系统主要由电爆炸爆源、双极性充电电源、光电延时同步触发系统、放电保护开关及示波器等几部分组成。实验系统的工作步骤如下: 1) 利用双极性充电电源给电爆炸爆源充电; 2) 充电完成后, 光电延时同步控制系统发出触发信号; 3) 高压脉冲发生器触发电爆炸爆源破碎岩石, 示波器采集电流曲线, 超高速相机记录岩石破裂过程。



图2 电爆炸实验系统

Fig. 2 Experimental platform of electric explosion

图3给出了试件表面爆破裂纹演化过程的非接触观测系统,其中超高速相机型号为Kirana-05M。该相机能够全分辨率来支持所有的拍摄速率,也就是提高拍摄速率并不会导致照片像素的降低。超高速相机最高拍摄速度为500万帧/s,一次可获取180张图片。



图3 超高速相机

Fig. 3 Ultra-high speed camera

2 实验结果

2.1 放电电压对岩石破裂的影响

图4给出了不同电压下红砂岩试件的破裂结果。可以看出,30 kV电压下,试件S1仅在电极附近出现了轻微的破坏,并没有宏观裂纹的产生。35 kV电压下,试件S2发生了破碎。可见三条宏观径向裂纹由炮孔中心一直扩展至试件边界,将试件切割成三个碎块。此外,在炮孔周边可见黑色的灼烧痕迹,这是金属丝发生电爆炸后的高温作用导致的。继续增加电压至40 kV,试件S3的破裂程度进一步增强,四条宏观径向裂纹扩展至边界。在35和

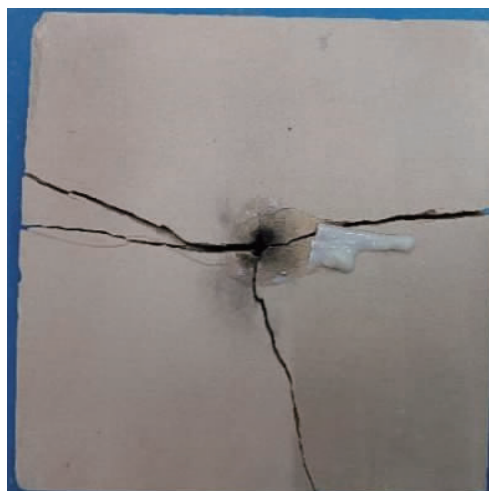
40 kV电压条件下,炮孔的周边均可见少量的次生裂纹。



(a) S1(30 kV电压)



(b) S2(35 kV电压)



(c) S3(40 kV电压)

图4 不同放电电压下红砂岩的破裂结果

Fig. 4 Fracture results of red sandstone under different discharge voltages

公式(1)给出了电压和爆炸能量之间的关系:

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

式中: W 为设备存储能量; C 为电容, $4 \mu\text{F}$; U 为放电电压。

30、35 和 40 kV 电压对应的爆炸能量分别为 1.8、2.45 和 3.2 kJ。也就是说放电电压越大, 高压脉冲设备注入铜丝中的爆炸能量越大, 从而能够产生更强的冲击波, 导致了试件破裂程度的加剧。

2.2 不同爆源位置下的破裂过程

保持放电电压 40 kV 不变的条件下, 研究爆源位置对红砂岩破裂过程的影响。图 5 给出了试件 S4 平行炮孔的侧表面裂纹扩展过程, 爆源与该试件侧面距离为 30 mm。结果表明, 起爆后 $50 \mu\text{s}$ 时, 试件表面中部出现平行金属丝的竖向裂纹, 这些裂纹宽度较小。随着爆破过程的进行, 裂纹数量不断增加, 裂纹宽度不断增大。80 μs 时, 试件端部区域出

现斜裂纹, $120 \mu\text{s}$ 时, 试件中部区域出现横向裂纹。随着爆破过程的进行, 试件表面的裂纹密度进一步变大。可见, 该试件表面的裂纹网由竖向裂纹、横向裂纹及斜裂纹共同构成。

图 6 给出了试件 S5 平行炮孔的侧表面裂纹扩展过程, 爆源与侧面距离为 40 mm。可以看出, 起爆 $60 \mu\text{s}$ 后, 试件侧表面中部出现两条主要的竖向裂纹。80 μs 时贯通试件表面的裂纹形成, 之后, 试件表面出现向端部延伸的斜裂纹及近似水平方向扩展的裂纹。

对比试件 S4 和 S5 的破裂过程可以看出, 不同爆源距离下红砂岩试件均是先出现竖向裂纹, 随后出现斜裂纹和近水平方向的裂纹, 也就是说裂纹出现的时序基本是一致的, 且均以平行金属丝的竖向裂纹为主导。但二者的破裂过程存在显著差异, 试件 S4 表面裂纹密集且分布均匀, 岩石破碎充分, 而试件 S5 表面裂纹以单条竖向裂纹为主, 其他类型的裂纹发育程度较差。

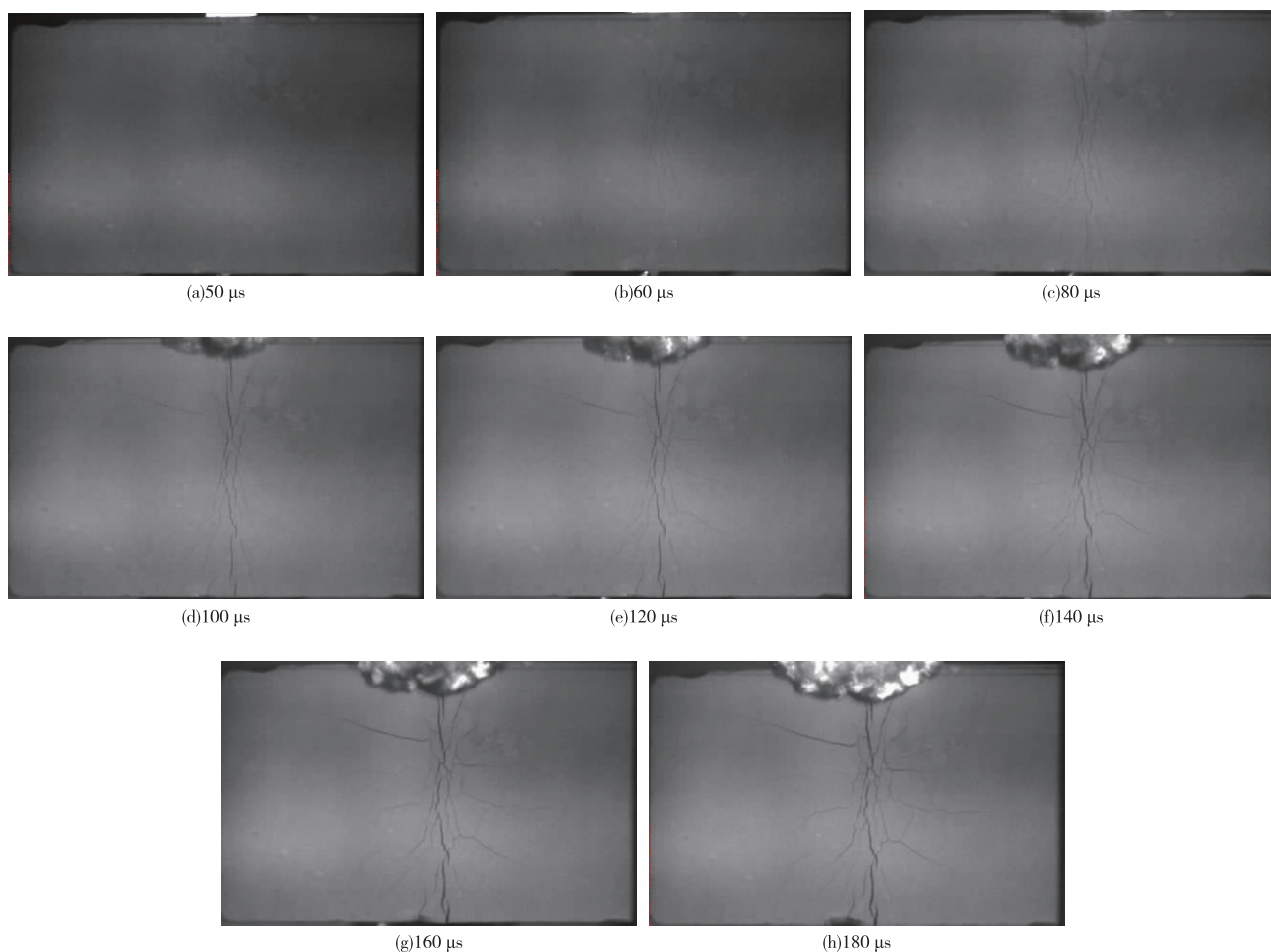


图 5 超高速相机观测的试件 S4 的破裂过程

Fig. 5 Fracture process of specimen S4 observed by an ultra-high speed camera

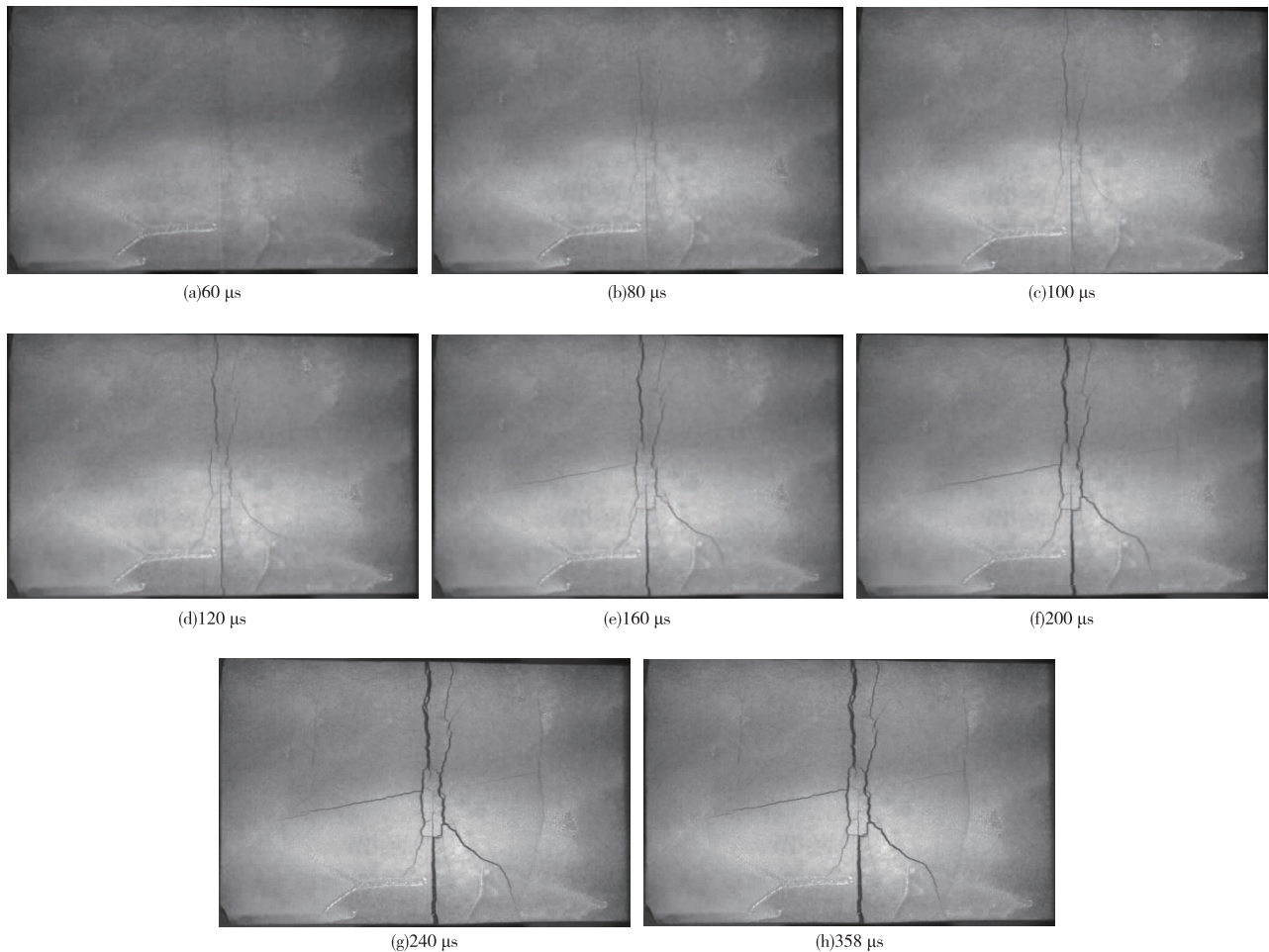


图6 超高速相机观测的试件 S5 的破裂过程

Fig. 6 Fracture process of block S5 observed by ultra-high speed camera

2.3 不同爆源位置下的破裂结果

图7给出了不同爆源位置红砂岩试件的破坏结果。在试件垂直炮孔的上表面, S4和S5的裂纹模式基本一致, 主要是由炮孔中心向外扩展的径向裂纹。而试件侧面, 两个试件的破裂差异显著, 试件S4的碎块多且破碎块度更小, 而S5仅出现四个较大的块体, 这与前文高速相机的观测结果相吻合。出现这种差异的原因可归结为: 试件S4金属丝爆源与自由面距离较小, 造成试件局部破坏, 形成类似漏斗爆破的效果, 而增大爆源与自由面的距离, 试件局部漏斗爆破破坏效果减弱, 岩石碎裂成少量大块(见图4c、图7b和图7d)。

3 结论

1) 本文利用高压脉冲设备将能量注入铜丝, 使之发生电爆炸破碎红砂岩试件。结果表明铜丝电爆炸产生的载荷能够有效地破碎红砂岩试件。

2) 金属丝布置在试件中间时, 红砂岩试件的破裂以径向裂纹为主。随着放电电压的增加, 试件的破裂程度变大。30 kV电压下, 试件上没有形成宏观裂纹; 电压增大到40 kV时, 四条宏观裂纹贯通整个试件。

3) 超高速相机的观测结果显示, 试件侧面的裂纹主要由竖向裂纹、斜裂纹及横向裂纹构成。爆源与试件表面距离影响爆生裂纹的发育程度, 铜丝与试件表面的距离越近, 形成的裂纹网越密集。

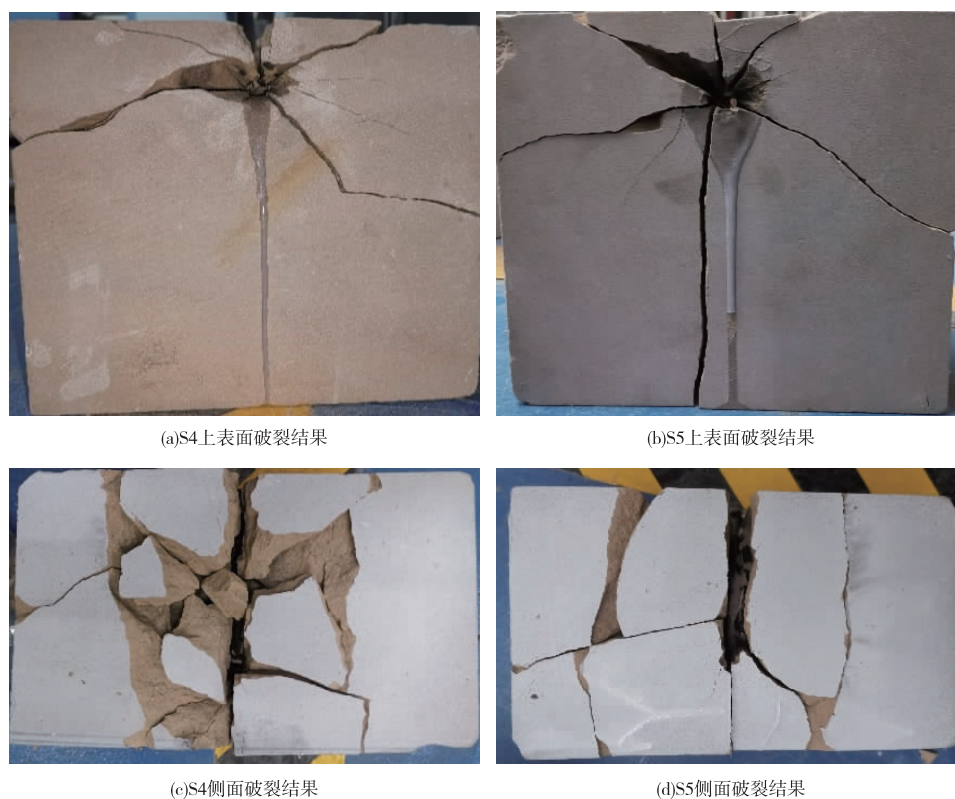


图7 不同爆源位置的破裂结果

Fig. 7 Fracture results at different explosion source locations

参 考 文 献

- [1] 张永民,姚伟博,邱爱慈,等. 金属丝电爆炸现象研究综述[J]. 高电压技术,2019,45(8):2668-2680.
ZHANG Yongmin, YAO Weibo, QIU Aici, et al. Review of wire electrical explosion phenomena [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2668-2680.
- [2] 闫广亮,张凤鹏,郝红泽,等. 电爆炸破碎岩石类脆性材料实验方法与应用[J]. 煤炭学报,2021,46(10):3203-3211.
YAN Guangliang, ZHANG Fengpeng, HAO Hongze, et al. Experimental method and application of electrical explosion for breaking rock-like brittle materials[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3203-3211.
- [3] KUZNETSOVA N S, YUDIN A S, VOITENKO N V. Characteristics of capillary discharge channel and its effect on concrete splitting-off by electro-blasting method[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2017, 830(1): 012043. DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012043.
- [4] YUDIN A S, VOITENKO N V, KUZNETSOVA N S. Computer simulation of energy release modes in discharge channel and its influence on stress-strained state formation in solid material under electro-blasting technology[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2017, 830: 012041. DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012041.
- [5] YUDIN A S, KUZNETSOVA N S, LOPATIN V V, et al. Multi-borehole electro-blast method for concrete monolith splitting off[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2014, 552: 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/552/1/012028.
- [6] LOEFFLER M, WIELAND H A, NEUMANN J, et al. Electrical wire explosions as a basis for alternative blasting techniques [C]//International Conference on Pulsed Power Applications, Gelsenkirchen, Germany, 2001: 27-29.
- [7] VOITENKO N V, YUDIN A S, KUZNETSOVA N S. Evaluation of energy characteristics of high voltage equipment for electro-blasting destruction of rocks and concrete[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2015, 652(1): 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/652/1/012011.
- [8] 张永民,邱爱慈,周海滨,等. 面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(4):1009-1017.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1009-1017.
- [9] 周海滨,刘巧珏,赵有志,等. 脉冲大电流放电引爆含能材料产生冲击波的储层改造[J]. 强激光与粒子束,2016,28(4): 049001. DOI: 10.11884/HPLPB201628. 049001.
ZHOU Haibin, LIU Qiaojue, ZHAO Youzhi, et al. Transformation of oil-and-gas reservoir with shock waves by high current pulsed discharge ignited energetic materials explosion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(4): 049001. DOI: 10.11884/HPLPB201628. 049001.

(编辑:周叶)