

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.002

围压作用对爆破裂纹空间形态影响的试验研究*

赵海洋^{1,2}, 陈大勇³, 刘志远^{1,2}, 黄炳香³, 金峰³, 黄燕飞^{1,2}, 赵兴龙³, 邢岳堃³, 焦雪杰³

(1. 中国石化西北油田分公司 石油工程技术研究院, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石化缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 徐州 221116)

摘要: 爆破裂纹的空间形态是进行爆破设计的理论依据。地下超深孔爆破炮孔处在围压作用之中, 无爆破自由面, 此种条件下爆破裂纹空间形态有待进一步的研究。采用 4000 kN 大型真三轴加载设备和煤矿许用导爆索分别提供围压静载和爆炸动载, 并浇筑 300 mm × 300 mm × 300 mm 尺寸水泥砂浆立方体试块, 采用的等效炸药量均为 3 g, 围压条件下试块加载的第一、第二、第三主应力分别为 8.50 MPa、7.00 MPa、5.75 MPa, 对比分析有、无围压两种条件爆破裂纹的空间形态差异。研究发现: 围压条件下的爆破裂纹空间形态与拥有爆破自由面条件的爆破裂纹空间形态差异极大, 四周拥有爆破自由面条件下试块爆破破碎为碎块, 在块度尺寸 $L < 100$ mm 和 $100 \text{ mm} \leq L \leq 200$ mm 范围内的破碎块度质量分别占试块总质量的 30% 和 70%, 其中大尺寸 $150 \text{ mm} \leq L < 200$ mm 范围内的块度质量占比达到 55.32%, 但是数量较少, 并且都产生于试块表面; 围压条件下, 在垂直于第二主应力方向产生一个以封孔器为中心对称的宏观破裂面, 在试块的其它表面上产生了几条宏观裂纹。试块剖开后, 在炮孔壁部产生微裂纹, 在预先射孔方向的孔壁处产生明显的裂纹。

关键词: 爆炸致裂; 围压; 真三轴设备; 裂纹空间形态

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0009-07

Experimental Study on Influence of Confining Pressure on Spatial Morphology of Blasting crack

ZHAO Hai-yang^{1,2}, CHEN Da-yong³, LIU Zhi-yuan^{1,2}, HUANG Bing-xiang³, JIN Feng³,
HUANG Yan-fei^{1,2}, ZHAO Xing-long³, XING Yue-kun³, JIAO Xue-jie³

(1. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Northwest Oilfield Branch, Urumqi 830011, China; 2. Sinopec Key Laboratory for EOR of Fractured-vuggy Reservoirs, Urumqi 830011, China; 3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The spatial morphology of blasting crack is the theoretical basis for a blasting design. The blasting hole of underground ultra-deep hole blasting is under the action of confining pressure, and there is no blasting free surface. Under such condition, the spatical morphology of blasting crack needs to be further studied. In order to study the influence of confining pressure on the spatial morphology of blasting crack, large scale 4000 kN true triaxial loading equipment and permitted detonating cord of coal mine are used to provide confining static load and explosive dynamic load respectively. For this study, a 300 mm × 300 mm × 300 mm size cement mortar cube test block is used, the equivalent explosive content is 3 g, the first, and the second and the third principal stress of the test block under confining pressure is 8.50 MPa, 7.00 MPa and 5.75 MPa, respectively. The spatical morphology difference of blasting crack with and without confining pressure is compared and analyzed. It is found that the spatial morphology of the

blasting crack under confining pressure is very different from that under a blasting free surface condition. Under the condition of surrounding blasting free surface, the test block was broken into fragments by blasting. The mass proportion within the range of the fragmentary size $L < 100$ mm and $100 \text{ mm} \leq L < 200$ mm accounts for 30% and 70% of the total mass of the test block respectively, among which the mass of the large size $150 \text{ mm} \leq L < 200$ mm accounts for 55.32%. However, the quantity was small and they were all generated on the surface of the test block. Under confining pressure, a symmetrical macroscopic fracture surface which is on the hole sealing device is formed perpendicular to the direction of the second principal stress. Meanwhile, more cracks appear on other surfaces of the test block. After the test block is cut, microcracks appear on the hole wall, and obvious cracks appear on the hole wall in the pre-perforated direction.

Key words: blasting fracturing; confining pressure; true triaxial equipment; spatial morphology of crack

依靠炸药爆炸作用促使矿体裂纹的产生,是资源、能源开采过程中一个非常重要的环节,以此达到矿石的破碎、强度弱化、渗透率提高、应力转移等目的。超深孔爆破在此环节中得到了广泛的应用如在油气开采过程中储层的致裂、煤矿超前工作面实施的厚硬顶板超深孔爆破,金属矿超深孔爆破等。这些爆破类型的共同之处是炮孔(或其作用的介质)处在围压作用之中,无爆破自由面。核心共性问题是在此约束条件下的爆破裂纹的空间形态,此问题的解决是爆破参数设计的理论基础。

围压条件下的爆破问题已经引起国内外的学者关注,并进行了一些研究。黄文尧^[1]、Tao Jian 研究发现在围压条件下^[2],爆破裂纹的宽度较细、数目较少,并且得出围压对裂纹的发展具有明显的导向作用,随着初始地应力的增大,裂隙区半径减小;理论分析认为爆破裂纹主要是由压缩波和卸载波共同作用形成的^[3],前期裂纹扩展主要由塑性剪切造成,后期裂纹由压缩波和卸载波复合作用形成,地应力对裂纹的发展具有抑制作用;岳万友研究发现^[4],在各向等压地应力场爆破开采环境下,随着围压增加环向拉应力逐渐降低而压应力并未得到显著提升;郭双^[5]、Zhao Jian-Jian 研究发现侧压力系数对爆破裂纹的扩展有直接影响^[6],爆破裂纹区呈扁平形,裂纹主要朝较大压应力方向扩展。王长柏^[7]、汪海波^[8]、白羽^[9]、范光华^[10]、崔建斌^[11]、尤元元等人也获得了基本类似的结论^[12]。赵建平研究发现地应力的大小对岩体爆破效果并无线性关系^[13]。

在深部岩巷掘进方面,戴俊指出原岩应力的有利于光面爆破炮孔间贯通裂纹的形成,不利于预裂爆破炮孔间贯通裂纹的形成^[14-16],分析得出地应力的作用相当于增大了岩石的抗拉强度。卢文波在进行地下水电站硐室爆破施工过程同样发现^[17],原岩应力是影响周边爆破的一个重要参数,当原岩应力大于 $10 \sim 12$ MPa 时,首先采用预裂爆破是不合适的,需要首先进行掏槽孔爆破,而后采取预裂爆破或光面爆破,并且发现当地应力超过 32 MPa 时,掏槽孔爆破会出现炮孔之间的裂纹难以连通^[18]。Han Hao-yu 研究提出^[19],减小周边孔齐发爆破时的起爆误差,有利于光滑壁面的形成。陈明研究发现初始地应力对爆生裂隙范围有显著影响^[20],在压剪破坏模式下,爆生裂隙区比例半径随地应力的增大而减小。李启月研究发现在炸药爆炸前期和中期^[21],初始地应力场对爆破效果影响较小,主要是掏槽孔爆炸应力场起主导作用,在爆炸后期,初始地应力场对爆破后裂纹的扩展具有导向作用,裂纹扩展主方向趋向于最大初始地应力方向;李新平^[22]、谢亮波^[23]、曾庆田认为初始地应力的加制作用对掏槽爆破有明显的抑制作用^[24],在爆破设计时需充分考虑地应力的影响;杨建华研究发现^[25],垂直于炮孔连线方向传播的爆生裂纹更易受到地应力的抑制,沿最大主应力方向布置炮孔、缩短炮孔间距有利于炮孔间裂纹的连接贯通,形成良好的爆破开挖面。Chang-ping Yi^[26]、Li Xiao-han 也得出类似的结论^[27]。

在实验室物理模拟实验方面,刘殿书^[28]、肖正学^[29]、高全臣以激光动光弹为实验手段^[30],结果表明较低的静应力可以隐设在动应力场中,而较高的静应力可以影响甚至改变动应力场的传播过程,初始应力场的存在不仅改变了爆轰波的传播规律并且对裂纹发展起着导向作用,在高应力岩巷实施控制爆破时,炮孔间的应力夹制作用较强,爆炸载荷在炮孔间的相互反射作用减弱。

上述研究对于无爆破自由面围压条件下的爆破

收稿日期:2022-01-22

作者简介:赵海洋(1973-),男,新疆乌鲁木齐人,博士、教授级高级工程师,从事油气开采技术的研究工作,(E-mail) zhaohy.xbsj@sinopec.com。

通讯作者:刘志远(1984-),男,湖北荆州人,博士、副研究员,现从事超深非均质油气藏储层改造基础理论与工程技术方面的研究工作,(E-mail) oilspe@126.com。

基金项目:十三五国家科技重大专项“缝洞型油藏堵调及靶向酸压工艺技术”(编号:2016ZX05014-005-003);国家自然科学基金青年项目(No. 51604261)

裂纹扩展提供了重要参考,但是这些研究多是针对双向应力二维试块条件下进行的研究,三向条件下三维试块的某些关键爆破裂纹形态不能完全展现,基于此,我们采用 300 mm × 300 mm × 300 mm 水泥砂浆试块和 4000 kN 真三轴加载设备着重研究围压条件下爆破裂纹空间形态。

1 试验设计

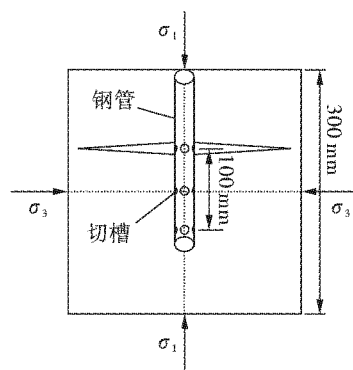
1.1 试块制作

试块尺寸定为 300 mm × 300 mm × 300 mm, 选定 425# 硅酸盐水泥、细河沙和水为基础材料,用来浇筑试块,质量配比为水泥:砂子:水 = 1:1.66:0.41, 试块浇筑后,养护 28 d。浇筑试块时,同时浇筑标准试块(50 × 50 × 100 mm³), 养护 28 d 之后,所测试的基本力学参数列于表 1。

表 1 试块的基本力学参数

Table 1 The basic mechanical parameters of the test block

密度/ (g · cm ³)	单轴抗压 强度/MPa	单轴抗拉 强度/MPa	弹性模量/ MPa	泊松比
2.1	28.2	2.5	1743	0.27



(a) 封孔器尺寸及加载方向

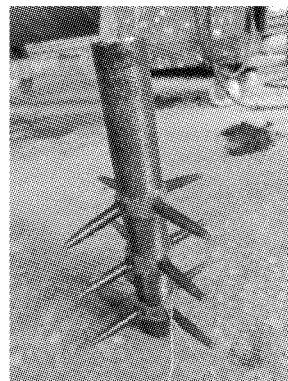
(a) Hole sealing device size and loading direction

1.2 加载系统

实验系统采用自主研发的真三轴水压致裂实验系统^[31]。该系统由实验台框架、加载系统和监控系统组成。可实现 300 × 300 × 300 mm³ 或 500 × 500 × 500 mm³ 立方体试样的真三轴加载以模拟地应力,且三个方向加载的压力均能达到 4000 kN。当试块尺寸为 300 × 300 × 300 mm³ 时,所能模拟的地应力最大为 44.4 MPa,当试块尺寸为 500 × 500 × 500 mm³ 时,所能模拟的地应力最大为 16.0 MPa,为了体现出地应力对爆破裂纹扩展的影响,本项目选用的试块尺寸为 300 × 300 × 300 mm³。

1.3 封孔器

封孔器可以密封试验过程的爆炸作用以及模拟真实井筒中射孔条件。为提高靶向方向的成缝效果,拟在封孔器上三个位置处钻孔,每个位置钻平均分布四个孔(相位角 90°),孔半径 5 mm,共 12 个孔。采用钢管(封孔器)径向钻孔加射孔模拟部件的组合方式,(射孔模拟部件采用圆珠笔下端,用热熔胶将其与钢管钻孔粘连),以达到在钻孔方向上产生能量集中,成缝效果好。见图 1。



(b) 封孔器实物图

(b) The picture of the hole sealing device

图 1 封孔器

Fig. 1 Hole sealing device

1.4 药包制作

试验采用导爆索(规格:10 g/m)提供爆炸能量,所用炸药量 3 g,所需导爆索的长度为 30 cm,1 发 8# 电雷管起爆。将导爆索切割成 10 cm 每段,将 3 段 10 cm 的导爆索和 1 发电雷管用电工胶带捆绑好,制作成图 2 所示药包。

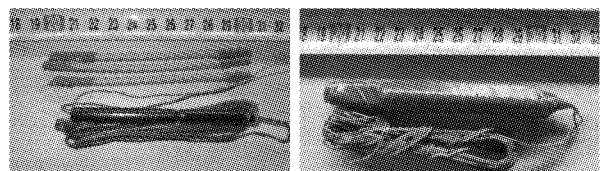


图 2 药包实物图

Fig. 2 Picture of explosive package

2 试验结果及分析

2.1 有爆破自由面条件下的爆破效果

首先试验了四周拥有爆破自由面的条件下,试块爆破前后的爆破效果如图 3 所示。

从图 3 中可以直观看出,试块处于自由状态时,在爆破作用下变为碎块。经块度分析,如表 2 和图 4,在块度尺寸 $L < 100$ mm 和 100 mm $\leq L < 200$ mm 范围内的破碎块度质量分别占试块总质量的 30%

和70%,其中在 $150\text{ mm} \leq L < 200\text{ mm}$ 范围内的破碎块度质量达到了试块总质量55.32%;质量小的破碎块度数量多,质量大的碎块数量少; $150\text{ mm} \leq L < 200\text{ mm}$ 范围内的破碎块度基本都在试块的表面产生,这从试块表面上画的网格线可以看出,这也证明了在实际的爆破工程中,在远离炮孔的位置容易产生大块,在炮孔周边容易导致过度粉碎,这分别是远离炮孔的位置爆炸能量不足和炮孔附近的爆炸能量过剩引起的。

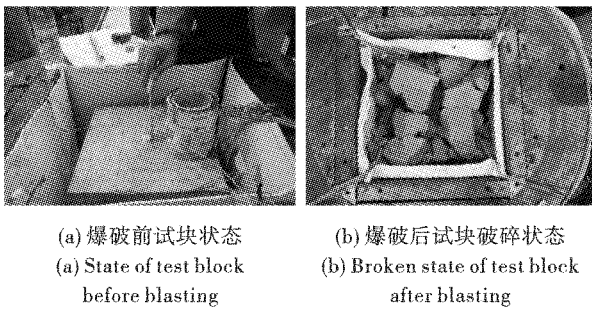


图3 自由状态下爆破效果图
Fig. 3 Blasting effect in free state

表2 爆破块度质量分布

Table 2 Blasting fragmentation mass distribution

块度尺寸 L/mm	质量/kg	质量占比/%
$L < 30$	4.26	7.33
$30 \leq L < 50$	3.31	5.70
$50 \leq L < 70$	3.65	6.28
$70 \leq L < 100$	6.38	10.98
$100 \leq L < 150$	8.37	14.40
$150 \leq L < 200$	32.15	55.32

2.2 围压条件的爆破效果

试块的三向加载压力为 $\sigma_1 = 8.50\text{ MPa}$, $\sigma_2 = 7.00\text{ MPa}$, $\sigma_3 = 5.75\text{ MPa}$,其中 σ_1 为封孔器轴向方向,对应试块1-6面; σ_2 、 σ_3 如试块上标识,其中 σ_2 对应试块2-5面, σ_3 方向对应试块3-4面。真三轴加载压力以 0.01 MPa/s 速率加载,加载结束后,至少稳压5 min后起爆。试块起爆后裂纹形态如图5~12所示。

从图5中可以看出,围压条件下试块起爆后,在垂直于第二主应力方向产生了一条宽度较大的宏观裂纹,该裂纹以封孔器为中心,呈对称关系。

从图6~图11可以看出,面1产生的宏观主裂纹的扩展,沟通了面3和面4,在第二主应力方向形成了开裂面,并可以沿此开裂面轻易将试块分成两半;在面6产生了4条宏观裂纹,裂纹1、2、3呈现平行关系,裂纹4垂直于裂纹3、4,但是并没有从裂纹3、4穿过。从图12可以看出,在炮孔壁部产生微裂

纹,在1面上产生了较垂直于第二主应力相对宽度较窄的裂纹。在围压爆破试验中,发现在预先射孔方向的孔壁处产生明显的裂纹,这是由于预先射孔在孔壁处产生应力集中造成的。

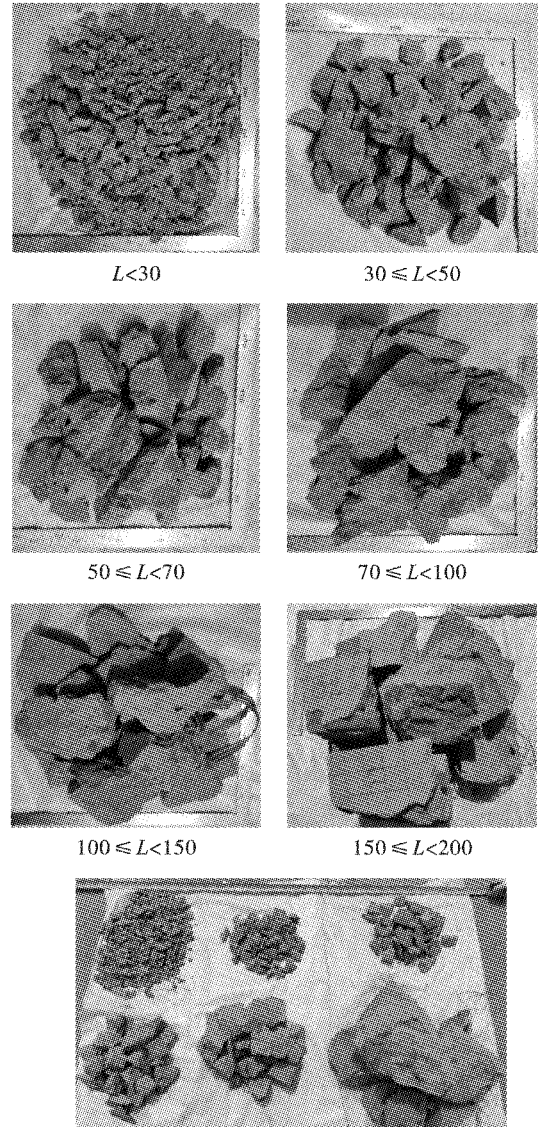


图4 爆破块度
Fig. 4 Blasting fragmentation mass

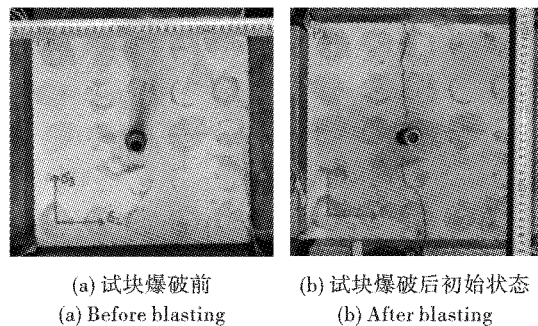


图5 围压条件下爆破效果图
Fig. 5 Blasting effect under triaxial stress condition



图 6 试块爆破后 1 面

Fig. 6 Surface 1 of test block after blasting

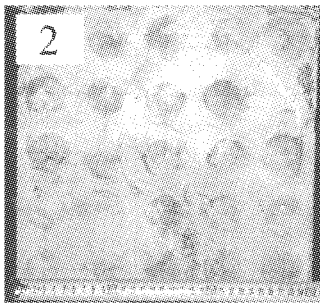


图 7 试块爆破后 2 面

Fig. 7 Surface 2 of test block after blasting

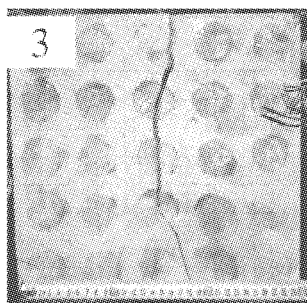


图 8 试块爆破后 3 面

Fig. 8 Surface 3 of test block after blasting

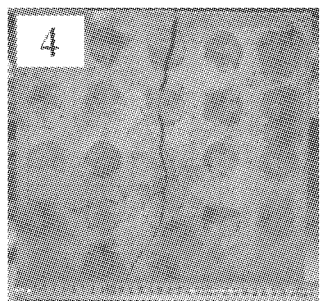


图 9 试块爆破后 4 面

Fig. 9 Surface 4 of test block after blasting

一些学者通过数值模拟手段,研究得出了二维条件下的爆破主裂纹一般垂直于最小主应力,如郭双通过 DDA 模拟^[5],得出了裂纹扩展方向从等值时的以炮孔为中心向四周呈放射状分布,转化为主要

朝最大初始地应力方向扩展,最大压应力方向成为破岩的主导方向,如图 13 所示。

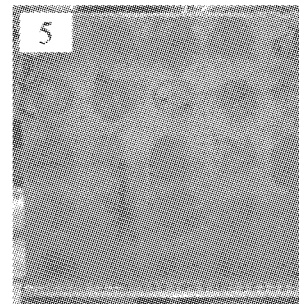


图 10 试块爆破后 5 面

Fig. 10 Surface 5 of test block after blasting

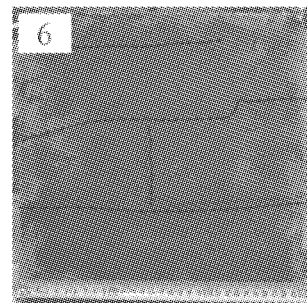


图 11 试块爆破后 6 面

Fig. 11 Surface 6 of test block after blasting

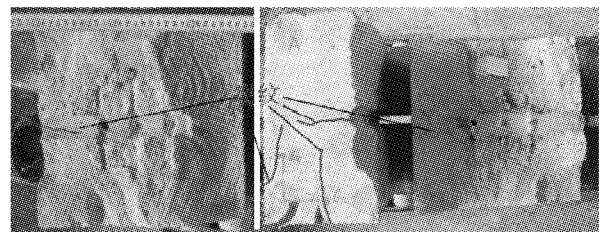


图 12 试块剖开整体图

Fig. 12 Overall view of the test block after cut up

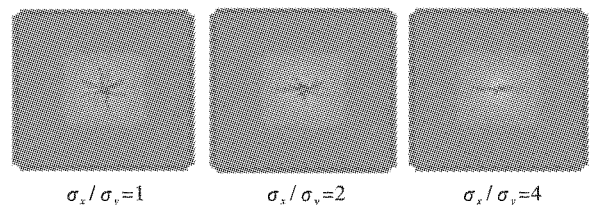


图 13 不等值初始地应力作用下的模拟结果^[5]

Fig. 13 Simulation results under unequal initial geostress

而在围压条件爆破试验中,面 1 产生的主裂纹为什么并未垂直于最小主应力,或许是由于第二、第三主应力数值差别较小,并且由于所浇筑试块具有一定的非均质性,在爆破过程中,爆破主裂纹产生的方向取决于第二、第三主应力的相近程度,若二者差别不大,则产生的主裂纹极有可能垂直于第二主应力。

3 结论

(1) 通过试块自由状态和围压状态爆破试验对比可知,围压对爆破效果影响非常大,在工程实践及爆破参数设计中,一定要着重考虑围压的影响。

(2) 在围压条件下爆破试验中,会产生1条垂直于非最大主应力的宏观裂纹(若第二、第三主应力相近,则主裂纹可能垂直于第二主应力),此宏观裂纹的长度和宽度均较大。

(3) 在围压爆破中,除产生受应力控制的宏观裂纹外,还产生一些相对较小爆破裂纹。

参考文献(References)

- [1] 黄文尧,穆朝民,宗琦,等.水胶药柱深孔预裂爆破弱化综采面硬岩断层分析[J].重庆大学学报,2013,36(7):102-107.
- [1] HUANG Wen-yao, MU Chao-min, ZONG Qi, et al. Analysis on weakening hard rock used by long-hole presplitting blast in fully mechanized coal face with water-gel explosive grain[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(7):102-107. (in Chinese)
- [2] TAO Jian, YANG Xing-guo, LI Hong-tao, et al. Effects of in-situ stresses on dynamic rock responses under blast loading[J]. Mechanics of Materials, 2020, 145:103374.
- [3] 穆朝民,潘飞.煤体在爆炸荷载和地应力耦合作用下裂纹扩展的数值模拟[J].高压物理学报,2013,27(3):403-410.
- [3] MU Chao-min, PAN Fei. Numerical study on the damage of the coal under blasting loads coupled with geostatic stress[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(3):403-410. (in Chinese)
- [4] 岳万友,李建国,柴修伟,等.地应力对含裂隙岩体爆破影响分析研究[J].爆破,2021,38(1):51-57.
- [4] YUE Wan-you, LI Jian-guo, CHAI Xiu-wei, et al. Influence analysis of ground stress on blasting of fractured rock mass[J]. Blasting, 2021, 38(1):51-57. (in Chinese)
- [5] 郭双,武鑫,甯允军.地应力条件下爆破载荷破岩的DDA模拟研究[J].工程爆破,2018,24(51):8-14.
- [5] GUO Shuang, WU Xin, NING You-jun. DDA simulations of rock fracture by blasting loads under geostress conditions[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(51):8-14. (in Chinese)
- [6] ZHAO Jian-jian, ZHANG Yong, RANJITH P G. Numerical modelling of blast-induced fractures in coal masses under high in-situ stresses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226:106749.
- [7] 王长柏,李海波,谢冰,等.岩体爆破裂纹扩展影响因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(10):31-34.
- [7] WANG Chang-bai, LI Hai-bo, XIE Bing, et al. Analysis on influencing factors of blasting crack expansion[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10):31-34. (in Chinese)
- [8] 汪海波,徐轩,宗琦,等.综掘硬岩段深孔超前爆破研究与应用[J].煤炭学报,2017,42(4):908-915.
- [8] WANG Hai-bo, XU Xuan, ZONG Qi, et al. Research and application of hard rock deep-hole advance blasting in comprehensive roadway excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4):908-915. (in Chinese)
- [9] 白羽,朱万成,魏晨慧,等.不同地应力条件下双孔爆破的数值模拟[J].岩土力学,2013,34(S1):466-472.
- [9] BAI Yu, ZHU Wan-cheng, WEI Chen-hui, et al. Numerical simulation on two-hole blasting under different in-situ stress conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1):466-472. (in Chinese)
- [10] 范光华.初始应力下岩石爆破过程模拟研究[D].沈阳:东北大学,2014.
- [10] FAN Guang-hua. Simulation studies of rock blasting process under initial stress[D]. Shenyang:Northeastern University, 2014. (in Chinese)
- [11] 崔建斌,张昆,赵苏文,等.地应力对岩体爆破特征影响规律分析[J].科学技术与工程,2021,21(28):12252-12258.
- [11] CUI Jian-bin, ZHANG Kun, ZHAO Su-wen, et al. Analysis of the influence law of in-situ stress on blasting characteristics rock mass[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28):12252-07. (in Chinese)
- [12] 尤元元,崔正荣,李二宝,等.深部高地应力爆破振动质点峰值速度变化特性数值模拟研究[J].爆破,2020,37(4):36-42.
- [12] YOU Yuan-yuan, CUI Zheng-rong, LI Er-bao. Numerical simulation on variation characteristics of blasting vibration particle peak velocity under high in-situ stress[J]. Blasting, 2020, 37(4):36-42. (in Chinese)
- [13] 赵建平,程贝贝,卢伟,等.深部高地应力下岩石双孔爆破的损伤规律[J].工程爆破,2020,26(5):14-20,41.
- [13] ZHAO Jian-ping, CHENG Bei-bei, LU Wei, et al. Damage law of rock double holes blasting under deep high in-situ stress[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5):14-20,41. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] DAI Jun. 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. (in Chinese)
- [15] 戴俊.深埋岩石隧洞的周边控制爆破方法与参数确定[J].爆炸与冲击,2004,24(6):493-498.
- [15] DAI Jun. The controlled contour blasting technique and its parameter determination for rock tunnel at depth[J].

- Explosion and Shock Waves, 2004, 24(6):493-498. (in Chinese)
- [16] 戴俊,钱七虎.高地应力条件下的巷道崩落爆破参数[J].爆炸与冲击,2007,27(3):272-277.
- [16] DAI Jun, QIAN Qi-hu. Break blasting parameters for driving a roadway in rock with high residual stress[J]. Explosion and Shock Waves, 27(3):272-277. (in Chinese)
- [17] LU Wen-bo, CHEN Ming, GENG Xiang, et al. A study of excavation sequence and contour blasting method for underground powerhouses of hydropower stations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29: 31-39.
- [18] 谢理想,卢文波,姜清辉,等.深部岩体在掏槽爆破过程中的损伤演化机制[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(5):1252-1259.
- [18] XIE Li-xiang, LU Wen-bo, JIANG Qing-hui, et al. Damage evolution mechanism of deep rock mass in process of cut blasting[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(5):1252-1259. (in Chinese)
- [19] HAN Hao-yu, FUKUDA Daisuke, LIU Hong-yuan, et al. Combined finite-discrete element modelling of rock fracture and fragmentation induced by contour blasting during tunnelling with high horizontal in-situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127:104214.
- [20] 陈明,卢文波,周创兵,等.初始地应力对隧洞开挖爆生裂隙区的影响研究[J].岩土力学,2009,30(8):2254-2258.
- [20] CHEN Ming, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Influence of initial in-situ stress on blasting-induced cracking zone in tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2254-2258. (in Chinese)
- [21] 李启月,黄武林,吴正宇,等.不同地应力条件下直眼掏槽破岩的理论研究与数值模拟[J].中国安全生产科学技术,2016,12(11):58-62.
- [21] LI Qi-yue, HUANG Wu-lin, WU Zheng-yu, et al. Theoretical study and numerical simulation on rock failure process in cutting by parallel hole under different ground stress conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(11):58-62. (in Chinese)
- [22] 李新平,宋凯文,罗忆,等.高地应力对掏槽爆破及爆破应力波影响规律的研究[J].爆破,2019,36(2):13-18,53.
- [22] LI Xin-ping, SONG Kai-wen, LUO Yi, et al. Study on influence of high in-situ stress on cut blasting and blast waves[J]. Blasting, 2019, 36(2):13-18, 53. (in Chinese)
- [23] 谢亮波,李二宝,张西良,等.侧向荷载下组合孔爆破参数优化取值试验研究[J].金属矿山,2020(7):33-39.
- [23] XIE Liang-bo, LI Er-bao, ZHANG Xi-liang, et al. Test study on optimal values of blasting parameters of combined holes under lateral load[J]. Metal Mine, 2020(7):33-39. (in Chinese)
- [24] 曾庆田,胡正祥,刘科伟.高地应力条件下爆破漏斗实验及数值模拟研究[J].金属矿山,2021(2):36-40.
- [24] ZENG Qing-tian, HU Zheng-xiang, LIU Ke-wei. Experiment and numerical simulation of blasting crater under high in-situ stress[J]. Metal Mine, 2021(2):36-40. (in Chinese)
- [25] 杨建华,孙文彬,姚池,等.高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J].爆炸与冲击,2020,40(7):075202.
- [25] YANG Jian-hua, SUN Wen-bin, YAO Chi, et al. Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stressed rock masses[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7):075202. (in Chinese)
- [26] YI Chang-ping, JOHANSSON Daniel, GREBERG Jenny. Effects of in-situ stresses on the fracturing of rock by blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 321-330.
- [27] LI Xiao-han, ZHU Zheming, WANG Meng, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113:103968.
- [28] 刘殿书,王万富,杨吕俊,等.初始应力条件下爆破机理的动光弹实验研究[J].煤炭学报,1999,24(6):612-614.
- [28] LIU Dian-shu, WANG Wan-fu, YANG Lu-jun, et al. Holophotoelasticity study on mechanism of blasting under initiative stress field[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6):612-614. (in Chinese)
- [29] 肖正学,张志成,李瑞明.初始应力场对爆破效果的影响[J].煤炭学报,1996,21(5):497-501.
- [29] XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, LI Duan-ming. The influence of initial stress field on blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5):497-501. (in Chinese)
- [30] 高全臣,赫建明,冯贵文,等.高应力岩巷的控制爆破机理与技术[J].爆破,2003,20(S1):52-55.
- [30] GAO Quan-chen, HE Jian-ming, FENG Gui-wen, et al. Mechanism and technology of controlled blasting for high stress rock tunneling[J]. Blasting, 2003, 20(S1):52-55. (in Chinese)
- [31] 黄炳香.真三轴流压致裂、割缝、渗流、瓦斯驱赶一体化实验系统,中国:ZL201510100605.2[P].2016-03-18.
- [31] HUANG Bing-xiang. True triaxial flow compression cracking, slit, seepage, gas driving integrated experimental system, China: ZL201510100605. 2 [P]. 2016-03-18. (in Chinese)