

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.008

## 地应力对含裂隙岩体爆破影响分析研究\*

岳万友<sup>1</sup>, 李建国<sup>2</sup>, 柴修伟<sup>2</sup>, 王文科<sup>2</sup>

(1. 中铁大桥局集团第五工程有限公司, 九江 332000; 2. 武汉工程大学资源与安全工程学院, 武汉 430073)

**摘要:** 随着深部开采环境逐渐复杂,为实现安全高效的工程爆破施工,针对深部开采爆破作业所面临的高地应力和穿越破碎带的问题展开分析研究。运用有限元分析软件 ANSYS-LS/DYNA 中的隐式-显式耦合分析程序对双向等压、双向不等压下单含裂隙岩体进行数值模拟,研究高地应力区对含裂隙、弱面等岩体进行爆破开挖这一特殊工况。研究表明:深部含裂隙岩体爆破开采过程中,在各向等压地应力场开采环境下,随着围压增加单元的拉应力逐渐降低而单元的压应力并未得到显著提升,同时靠近裂隙右侧部分单元的压应力达到该测线压应力的峰值,并且压应力随围压增大而增大;在各向不等压地应力场环境下,当侧压系数为 1.33 时,炮孔与裂隙区域处该测线拉应力达到了峰值。因此,在深部开采爆破过程中应重点关注含有裂隙等破碎带处的地应力场,对爆破开挖的安全高效实施有着重大影响。

**关键词:** 高地应力; 侧压系数; 裂隙岩体; 爆破开挖; 隐显式耦合分析

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)01-0051-07

## Influence Analysis of Ground Stress on Blasting of Fractured Rock Mass

YUE Wan-you<sup>1</sup>, LI Jian-guo<sup>2</sup>, CHAI Xiu-wei<sup>2</sup>, WANG Wen-ke<sup>2</sup>

(1. The 5th Engineering Co., Ltd., MBEC, Jiujiang 332000, China;

2. School of Resource and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** As the deep mining environment becomes increasingly complex, the problems of high ground stress and passing through fracture zones were analyzed and studied in order to achieve safe and efficient deep mining blasting construction. The implicit and explicit coupling analysis program in the finite element analysis software ANSYS-LS/DYNA was used to simulate the fractured rock mass under bidirectional equal pressure and bidirectional unequal pressure. Then, this program was used to study blasting excavation in the special condition of fractured rock mass with weak plane under high ground stress. The research results show that during the blasting mining process of deep fractured rock mass, the tensile stress of the unit gradually decreases with the increase of the confining pressure, but the compressive stress of the unit does not increase significantly in an isobaric in-situ stress field in all directions. At the same time, the compressive stress of the element near the right side of the crack reaches the peak value of the survey line, and the compressive stress increases with the confining pressure. In anisotropic stress field environment, the tensile stress of the survey line in the hole and crack area reaches its peak value when the lateral pressure coefficient is 1.33. Therefore, in the process of deep mining and blasting, attention should be paid to the in-situ stress field in the fracture zone including cracks, which has a significant impact on the safe and efficient implementation of blasting excavation.

**Key words:** high ground stress; lateral pressure coefficient; fractured rock mass; blasting excavation; implicit and explicit coupling analysis

随着地表浅部资源开采殆尽,为了适应经济发展的需求,能源开采呈现全面向深部进军的趋势。深部开采地质环境和应力环境的复杂性不同于地表浅部,诸多学者和专家从理论分析、数值模拟和实验等方面开展了地应力对开采过程中影响研究,戴俊等通过理论分析的方法研究对地应力条件下的爆破参数进行分析推导<sup>[1]</sup>。陈明等基于地应力下的爆炸产生的爆生裂隙,认为地应力对生成爆生裂隙有显著影响<sup>[2]</sup>。褚怀保等应用断裂力学、损伤力学理论对煤体在爆破过程中的应力波、爆生气体、瓦斯压力作用过程进行深入分析<sup>[3]</sup>。王立武等研究深部围岩在爆炸载荷或卸荷下的损伤特性,认为侧压力系数增加抑制围岩损伤破坏<sup>[4]</sup>。魏晨慧等对地应力条件下切缝药包爆破进行数值分析,发现地应力与切缝的方向关系对裂纹扩展有较大的影响<sup>[5]</sup>。郭双等基于 DDA 对双向等压和不等压应力条件下的爆破模型进行分析<sup>[6]</sup>。杨建华等采用 SPH + FEM 耦合算法,研究了初始应力场对爆破岩石开裂地震波能量的影响,同时基于应力场研究了双孔爆破的裂纹传播和贯通情况以及炮孔周围的应力场情况<sup>[7,8]</sup>。陈洋等通过试验和数值模拟结合的方法对在应力场作用下的岩石爆破应变特征进行分析<sup>[9]</sup>。蔡济勇等应用数值模拟方法对地应力下岩石爆破的频率特性进行分析<sup>[10]</sup>。李新平等对地下深部工程中掏槽爆破过程中的应力波进行研究分析<sup>[11]</sup>。李萧翰等分析在不同地应力下的爆破,认为不同侧压力系数对于岩石水平和垂直质点振动速度不同<sup>[12]</sup>。肖正学等对几种材料在不同初始应力下进行室内试验和矿山爆破实验,认为初始应力场改变裂纹发展方向和应力波传播规律<sup>[13]</sup>。刘殿书等通过光弹实现方法研究初始地应力对应力波形传播过程的影响<sup>[14]</sup>。谭卓英等进行实地测量,揭示了断层附近地应力场特性<sup>[15]</sup>。张西良等对不同深度下的岩体开展不同围压实验研究其对爆破损伤范围<sup>[16]</sup>。

上述研究发现,在地应力作用下对含裂隙的岩体进行爆破动力分析有待于更细致的研究,可为深部开采穿越高应力破碎带提供理论指导。

## 1 爆生气体和应力波综合作用理论

理论认为爆生气体理论和应力波理论是相辅相成的,体现在爆炸不同的阶段。爆轰波使岩体产生初始的岩体径向和环向裂隙,爆生气体楔入裂隙对裂隙进行膨胀做功,促进裂隙进一步扩展与环向裂隙沟通交错切割岩体,进一步切割的岩体在爆生气体的膨胀压力下飞出槽腔。这表明裂隙在岩土爆破过程的重要性,不论是岩土爆破过程中产生的径向、环向裂隙还是原生存在于岩土体内的裂隙,都会在裂纹面尖端产生极强的应力集中,这有助于在爆生气体楔入使得裂纹进一步扩展,以及在裂纹面处应力波产生反射、透射破坏作用等。根据断裂力学原理在岩土爆破过程中裂纹尖端的应力场受到应力强度因子的影响,而应力强度因子受控于岩体的应力场,不同的应力场对其裂纹尖端应力强度影响不同。

## 2 含裂隙岩体破坏数值模拟

### 2.1 模型建立

结合某矿山基建巷道掘进工程的基本情况,采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立基于地应力的含裂隙岩体爆破模拟数值模型,为了便于分析研究,将模型简化为平面应变模型,采用 cm-g- $\mu$ s 基本单位制。模型具体尺寸为 80 cm × 80 cm × 0.25 cm (分别对应长(X)、宽(Y)、高(Z)),裂缝尺寸为 60 cm × 1 cm × 0.25 cm 分别对应长(Y)、宽(X)、高(Z),如图 1 所示。本模型中,岩石选用 Lagrange 网格,空气和炸药材料选用 Euler 网格,通过关键字 \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 来实现各部分物质的相互作用。模型建立分两部分完成:隐式分析+显式分析。隐式分析:1)单元类型采用 SOLID185;2)模型左侧和下侧施加位移约束;3)上部和右侧施加压力荷载;4)由于用的是平面应变模型,因此在厚度方向施加 Z 方向位移约束。显式分析:1)空气和炸药模型施加无反射边界条件以有限域模拟无限空间;2)厚度方向施加 Z 方向位移约束。模型材料采用 2 号岩石乳化炸药参数如表 1 所示,石灰岩岩石的力学参数如表 2 所示。

表 1 炸药参数

Table 1 Explosive parameters

密度 $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	爆速 $D$ / ( $\text{cm} \cdot \mu\text{s}$ )	压力 $P_{\text{CJ}}$ / MPa	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa
1.05	0.35	3.24E+03	0	0

收稿日期:2020-12-24

作者简介:岳万友(1980-),男,高级工程师,主要从事土木工程施工与管理的研究,(E-mail)37367562@qq.com。

通讯作者:柴修伟(1980-),男,博士,副教授,主要从事爆破破岩理论与技术、岩土工程与安全监测技术研究,(E-mail)xwchai@wit.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年基金(NO.51709257)

表 2 岩石力学参数  
Table 2 Rock mechanical parameters

密度 $\rho$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	弹性模量 $E/MPa$	泊松比 $\mu$	体积 模量/ $MPa$	剪切 模量/ $MPa$	抗拉 强度/ $MPa$
2.73	4.0E+04	0.3	60.0	4.0	9.53

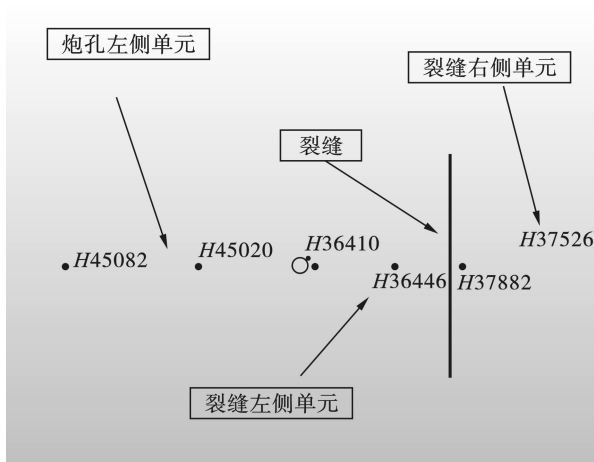


图 1 单元应力监测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of unit stress monitoring points

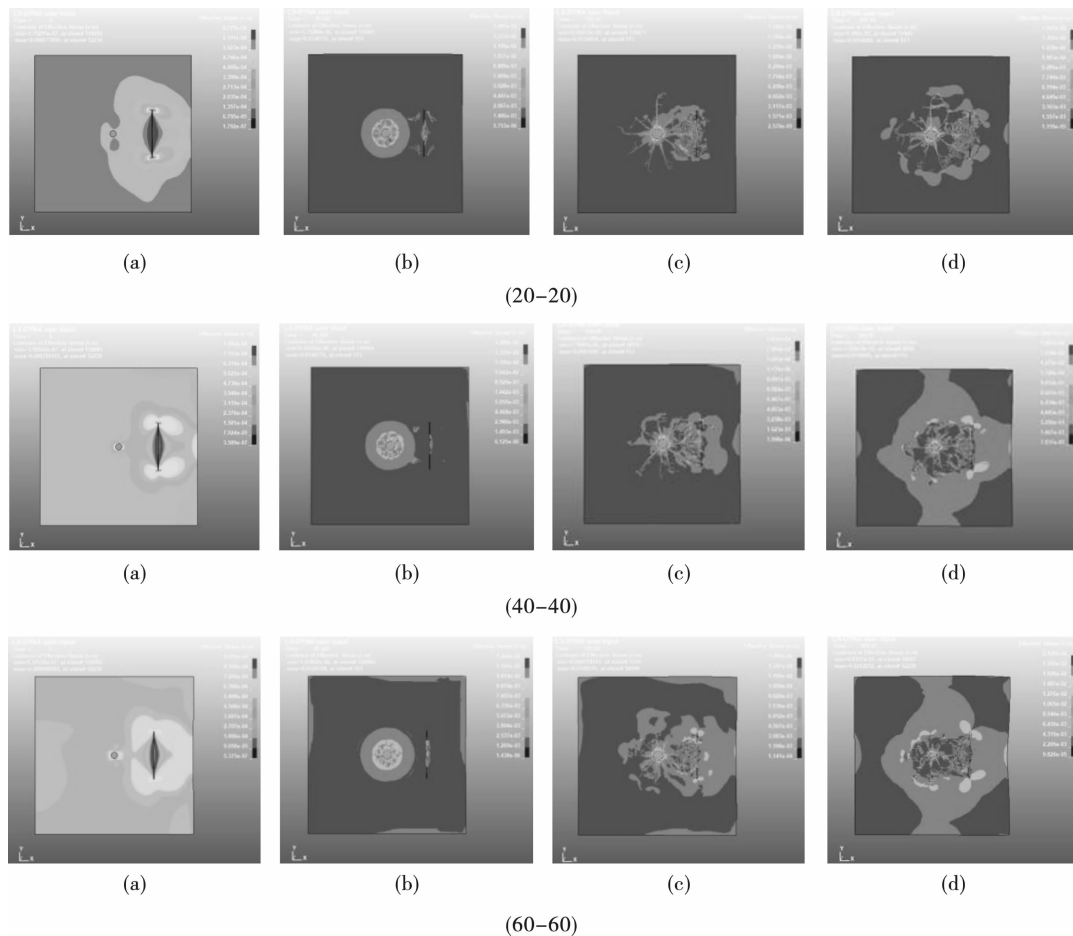
## 2.2 含裂隙岩体数值模拟结果对比分析

### 2.2.1 双向等压分析

图 2 中 20-20、40-40、60-60 (a) 图是 0 时刻的应力云图, 可从炮孔周围附近和裂隙附近尤其是裂纹两端, 看出模型在地应力作用下的应力集中程度, 同时发现随着预应力的加大岩体发生了变形, 其中 60-60 的图 (a) 受到的夹制作用最大。图 2 中 20-20、40-40、60-60 (b) 图是 50  $\mu s$  后的应力云图, 可以发现在应力波的作用下 20-20 中的 (b) 图炮孔周围以及裂纹周围破坏最为剧烈。

岩土爆破中, 地质裂隙、弱面等改变岩石物理性质也影响炸药和岩石的相互作用过程, 为了研究爆炸应力波和地应力对含有裂隙的岩体的影响, 现引入 3 条测线, 分别布置在炮孔右侧和裂隙左侧 (测线 1)、裂隙右侧区域 (测线 2) 以及炮孔左侧区域 (测线 3)。最后应用 Lsprepost 软件对获得的数据进行分析处理。

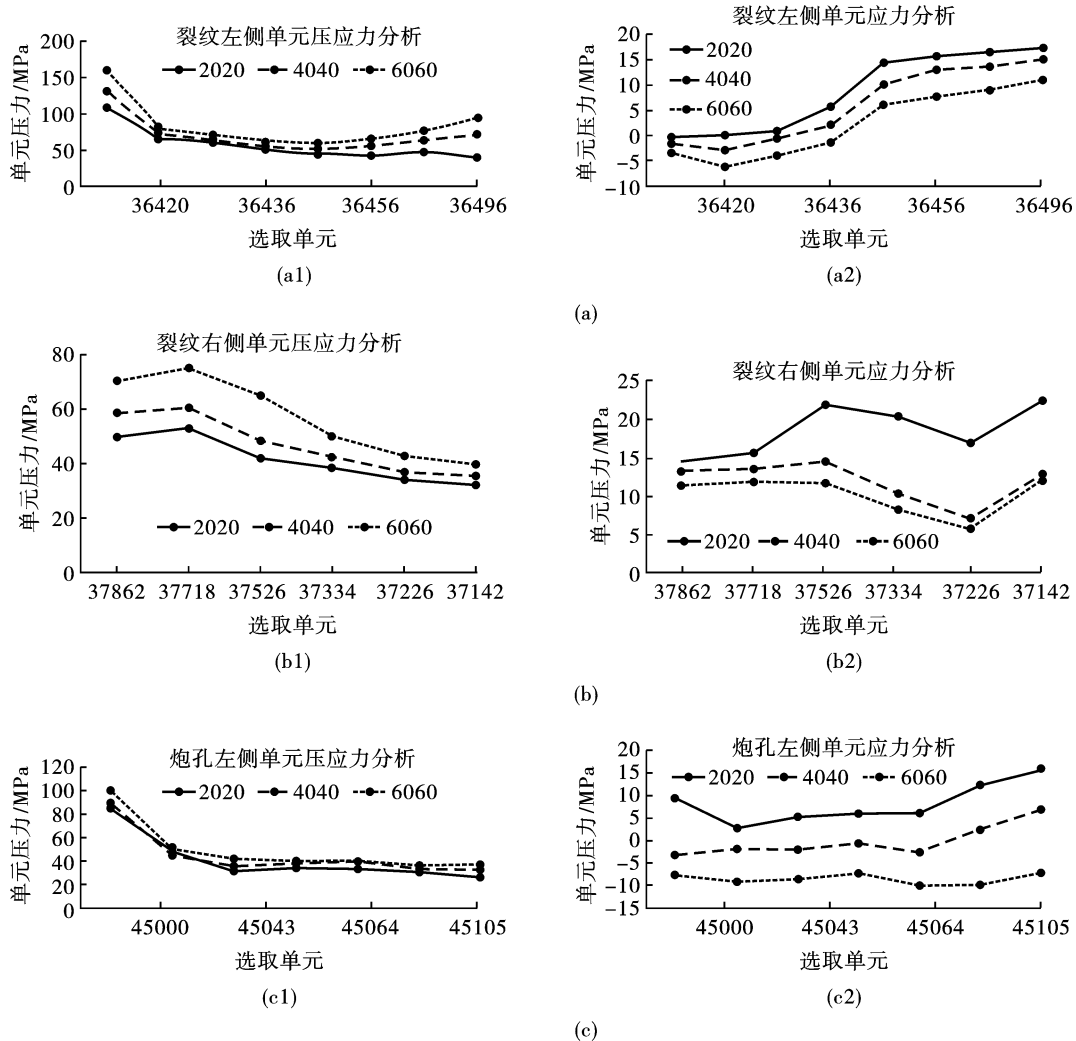
图 3(a)、(b)、(c) 分别是对炮孔左侧测线、炮孔右侧和裂隙左侧测线以及裂隙右侧的三条侧线上的应力进行的分析。



注: 20-20、40-40、60-60 分别为竖向应力 20、40、60 和水平应力 20、40、60, 单位: MPa

图 2 各向等压应力云图

Fig. 2 Cloud diagram of isostatic stress in all directions



注:20-20、30-40 分别表示水平压力是 20 MPa、竖向压力是 20 MPa,水平压力是 40 MPa、竖向压力是 30 MPa,也即是侧压系数分别为 1 和 1.33,其它的参数意义据此依次类推。为了便于描述,在图 3 中,左侧图表正值反映的是单元的压应力。右侧图表正值反映的是拉应力负值反应的是压应力。

图 3 双向等压模型单元应力分析

Fig. 3 Stress analysis of bidirectional isobaric model element

图 3(a<sub>1</sub>) 表明在爆破过程中,压力仅在炮孔附近和裂隙附近较大,在该条测线上其它单元应力没有随围压增加有显著的提升,测线上的单元应力曲线呈现凹型。在临近裂隙处压应力逐渐增大且地应力越大压应力越大,压应力较大主要原因是此处属于爆炸应力波、地应力还有裂隙的共同作用区,裂隙的存在对能量起到阻隔限制作用;图 3(a<sub>2</sub>) 表明,围压为 20 MPa 时的工况拉应力明显大于围压是 40 MPa 和围压是 60 MPa 应力工况,再结合图 3(a<sub>1</sub>) 可得,在炮孔附近随围压增加拉应力逐渐减小而压应力绝大部分区域没有大的提升。

图 3(b<sub>1</sub>) 表明在爆破过程中,围压的增加与单元体压应力的增加呈现正相关关系,靠近裂隙处的应力不为 0,即自由面处的应力不为 0,这种现象与应力状态相关,此处应力状态是三部分组成:围压

(预应力) + 爆炸应力波的透反射 + 应力集中,故应力较大。图 3(b<sub>2</sub>) 表明围压的增加与拉应力呈现负相关关系且低围压下的拉应力明显大于高围压下的拉应力。

图 3(c<sub>1</sub>) 表明在爆破过程中,炮孔左侧的单元压应力在三种围压的情况下其衰减规律保持一致。不同围压下的单元压力最小值是模型边界处施加的围压值,这与爆破应力波的传播规律有关,距离爆心越远,炸药爆炸对介质做功越小。对比发现测线上的单元都有不同程度的震荡特征,这与爆炸应力波在预应力场中的传播有关。图 3(c<sub>2</sub>) 表明在爆破过程中,随着围压的增大单元受压应力的比例较大,符合在爆破过程中期望岩石所受拉应力大和压应力小的情况,这与岩石具有抗压不抗拉的物理性质有关。

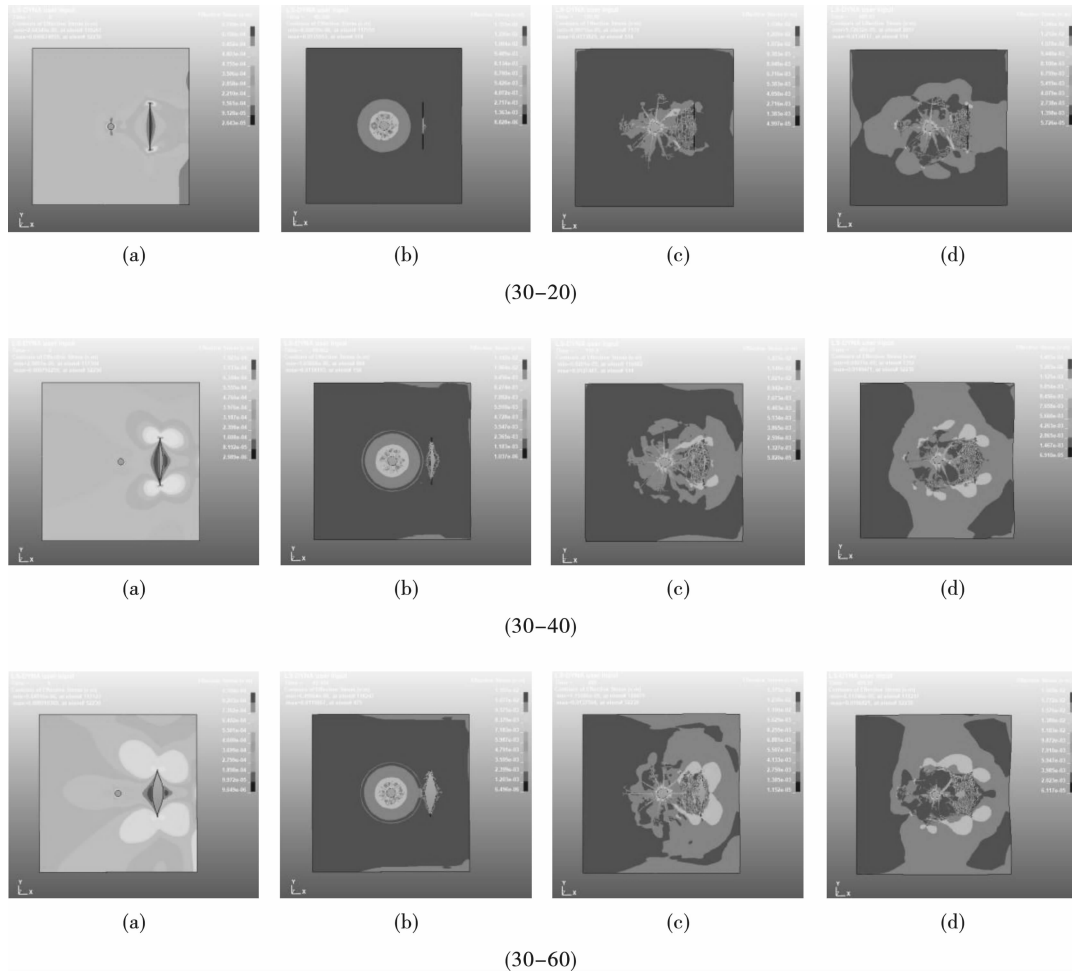
结合图 3(a)、图 3(b)、图(c),在岩土爆破过程

中, 围压的增加显著的提高单元的拉应力而单元的压应力并未显著的提升, 围压越大在爆破过程中压应力对单元破坏做功越明显, 这显然不符合爆破工程实践的要求。

### 2.2.2 双向不等压分析

图 4 中 30 - 20、30 - 40、30 - 60 中 (a) 图均是 0 时刻的应力云图, 从炮孔周围和裂纹两端附近两个方面研究地应力作用下的应力集中程度, 发现随着

侧压力系数的增加, 岩体的变形加大, 在 30 - 60 的图 (a) 受到的预应力作用最为明显。图 4 中 30 - 20、30 - 40、30 - 60 的 (b) 图是 50  $\mu$ s 后的应力云图, 发现在应力波的作用下 30 - 60 中的 (b) 图炮孔周围以及裂纹周围破坏程度最为剧烈。随着应力波的传播发现图 (c)、(d) 的应力云图亦符合上述情形, 炮孔附近破坏范围和裂隙处的破坏程度均较剧烈。



注: 30 - 20、30 - 40、30 - 60 分别为竖向应力 30、30、30 和水平应力 20、40、60, 单位: MPa

图 4 不等压工况应力云图

Fig. 4 Stress cloud diagram under unequal pressure conditions

图 5(d)、(e)、(f) 分别是在不同围压下对炮孔左侧测线, 炮孔右侧、裂隙左侧和炮孔右侧、裂隙右侧的三条侧线上的单元应力进行分析。

对于图 5(d<sub>1</sub>)、(e<sub>1</sub>)、(f<sub>1</sub>) 为 3 条不同围压下不同测线的单元压应力曲线, 可以发现测线 1 和测线 3 处的压应力曲线形态与等围压情况基本一致, 在测线 2 处, 在距离裂隙一定距离处均出现不同程度的应力下降, 这显然与侧压力有关且侧压力系数越小其值较小, 与各向等围压形成鲜明对比。

对于图 5(d<sub>2</sub>)、(e<sub>2</sub>)、(f<sub>2</sub>) 为 3 条不同围压下不同测线的单元压应力曲线, 可以发现测线 2 和测线 3 处的压应力的曲线形态与等围压情况基本一致。在不等压情况下, 发现测线 1 处出现围压为 30 - 40 (侧压系数为 1.33) 的单元拉应力大于围压为 30 - 20 (侧压系数为 0.67) 单元的拉应力的情况。表明在爆破过程中, 不同侧压系数以及裂隙对围岩形成的的应力状态与各向等压工况有所不同。

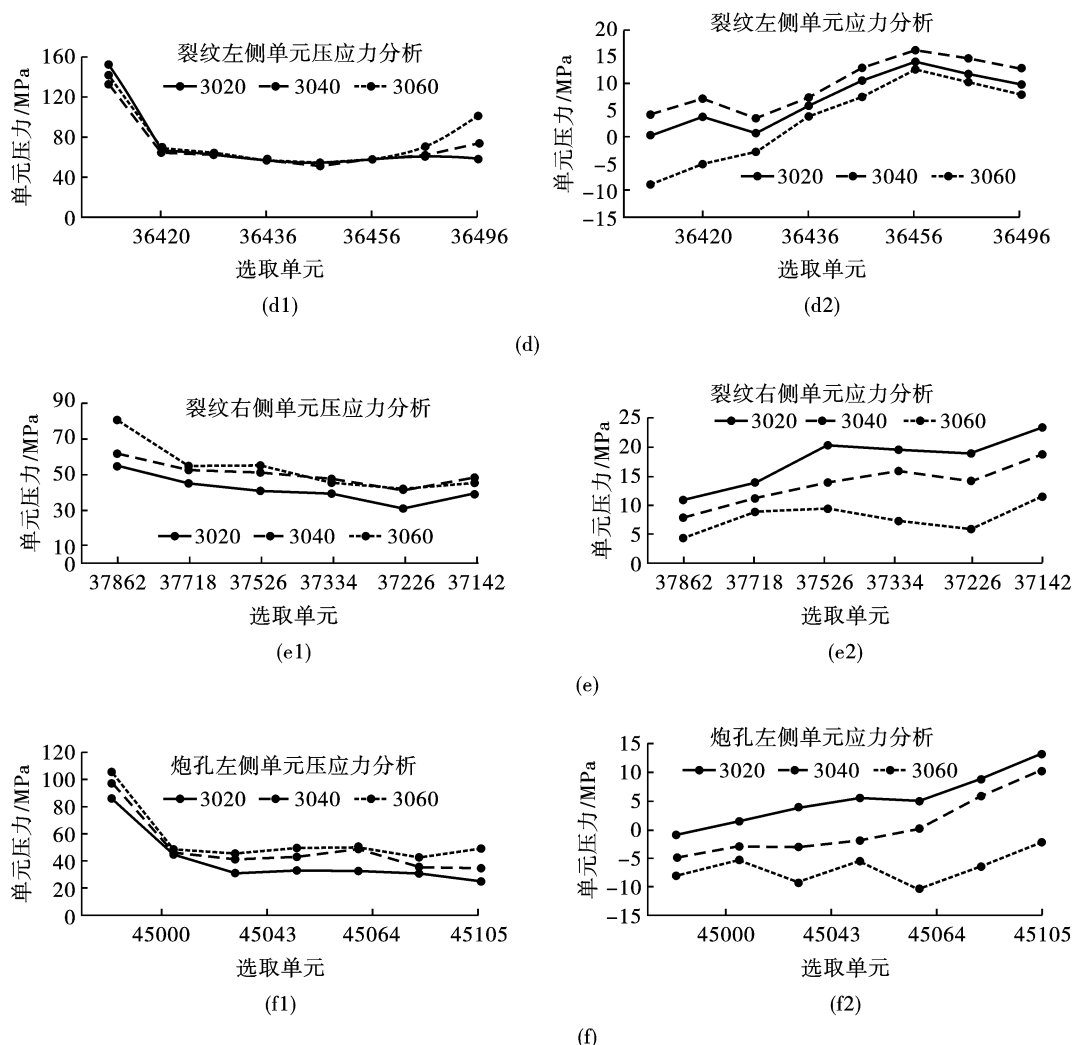


图5 双向不等压模型单元应力分析

Fig. 5 Element stress analysis of bidirectional unequal pressure model

### 3 结论

在深部开采爆破过程中,含裂隙岩体有助于爆生气体楔入使得裂纹进一步扩展。通过分析裂隙岩体爆生气体和应力波作用特性,采用有限元软件进行数值模拟计算,得出地应力场作用下裂纹体对爆炸应力波的影响规律,在各向等压和各向不等压地应力场下的裂纹体对爆炸应力波影响的两种情形进行细致的分析和研究。

(1)在各向等压地应力场的环境下,随着围压的增加导致单元的拉应力有所降低而单元的压应力并未得到显著的提升。

(2)在各向等压下的地应力场下,在裂隙右侧与围岩之间且靠近裂隙的局部区域单元压应力达到该测线的峰值且压应力随围压增大而增大。

(3)在各向不等压的地应力场下,当测压系数

为1.33时,在炮孔与裂隙之间测线单元拉应力达到了峰值。

### 参考文献 (References)

- [1] 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.
- [1] DAI Jun, QIAN Qi-hu. Break blasting parameters for driving a roadway in rock with high residual stress[J]. Explosion and Shock, 2007, 27(3): 272-277. (in Chinese)
- [2] 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.
- [2] 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)
- [3] 褚怀保.煤体爆破作用机理及试验研究[D].焦作:河

- 南理工大学,2011.
- [3] CHU Huai-bao. Theoretical and experimental studies on coal blasting action mechanism[D]. Jiaozuo, :Henan University of Technology,2011. (in Chinese)
- [4] 王立武,朱传杰,卢细苗,等. 爆炸载荷诱发地应力瞬态卸荷对深部围岩的损伤特性[J]. 消防科学与技术,20-19,38(10):1349-1353.
- [4] WANG Li-wu,ZHU Chuan-jie,LU Xi-miao,et al. Damage characteristics of deep surrounding strata caused by transient unloading of ground stress under blast load disturbance[J]. Fire Science and Technology,2019,38(10):1349-1353. (in Chinese)
- [5] 魏晨慧,朱万成,白羽,等. 不同地应力条件下切缝药包爆破的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2016,36(2):161-169.
- [5] WEI Chen-hui,ZHU Wan-cheng,BAI Yu,et al. Numerical simulation on cutting seam cartridge blasting under different in-situ stress conditions [J]. Explosion and Shock,2016,36(2):161-169. (in Chinese)
- [6] 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(5):8-14.
- [6] GUO Shuang,WU Xin,NING You-jun. DDA simulations of rock fracture by blasting loads under geostress conditions[J]. Engineering Blasting,2018,24(5):8-14. (in Chinese)
- [7] 杨建华,吴泽南,姚池,等. 地应力对岩石爆破开裂及爆炸地震波的影响研究[J]. 振动与冲击,2020,39(13):64-70,90.
- [7] YANG Jian-hua,WU Ze-nan,YAO Chi,et al. Influences of in-situ stress on blast-induced rock fracture and seismic waves[J]. Vibration and Shock,2020,39(13):64-70,90. (in Chinese)
- [8] 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):118-127.
- [8] 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,2020,40(7):118-127. (in Chinese)
- [9] 陈洋,吴亮,陈明,等. 高应力岩体爆破卸荷过程中应变率及应变能特征[J]. 爆炸与冲击,2019,39(10):60-70.
- [9] CHEN Yang,WU Liang,CHEN Ming,et al. Characteristics of strain rate and strain energy during blasting unloading of high-stress rock mass[J]. Explosion and Shock,2019,39(10):60-70. (in Chinese)
- [10] 蔡济勇,杨建华,姚池,等. 深埋隧洞钻爆开挖瞬态卸荷诱发围岩振动特性研究[J]. 爆破,2019,36(2):19-25.
- [10] CAI Ji-yong,YANG Jian-hua,YAO Chi,et al. Characteristics of transient unloading inducing vibration during blasting excavation in deep tunnels[J]. Blasting,2019,36(2):19-25. (in Chinese)
- [11] 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.
- [11] 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)
- [12] 李萧翰,刘科伟,杨家彩,等. 不同地应力下爆破振动效应分析[J]. 黄金科学技术,2019,27(2):241-248.
- [12] LI Xiao-han,LIU Ke-wei,YANG Jia-cai,et al. Analysis of blasting vibration effects under different ground stress [J]. Gold Science and Technology,2019,27(2):241-248. (in Chinese)
- [13] 肖正学,张志呈,李端明. 初始应力场对爆破效果的影响[J]. 煤炭学报,1996(5):51-55.
- [13] XIAO Zheng-xue,ZHANG Zhi-cheng,LI Duan-ming. Influence of initial stress field on blasting effect[J]. Journal of China Coal Society,1996(5):51-55. (in Chinese)
- [14] 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(6):3-5.
- [14] LIU Dian-shu,WANG Wan-fu,YANG Lv-jun,et al. Dynamic photoelastic experiment study on blasting mechanism under initial stress conditions[J]. Journal of China Coal Society,1999(6):3-5. (in Chinese)
- [15] 谭卓英,夏志远,丁宇,等. 深部岩体地应力场分异特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3330-3337.
- [15] TAN Zhuo-ying,XIA Zhi-yuan,DING Yu,et al. Differentiation characteristics of insitu stress in deep rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(S2):3330-3337. (in Chinese)
- [16] 张西良,汪禹,崔正荣,等. 深部围压对岩体爆破损伤范围影响数值分析[J]. 爆破,2018,35(2):56-60.
- [16] ZHANG Xi-liang,WANG Yu,CUI Zheng-rong,et al. Numerical analysis on influence of deep confining pressure on blasting damage range of rock mass [J]. Blasting,2018,35(2):56-60. (in Chinese)