引文格式:张靖宇,李竹,高瑞,等. 采动覆岩高抽巷钻孔围岩变形规律与失效特征研究[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):990-1000.

ZHANG Jingyu, LI Zhu, GAO Rui, et al. Deformation rule and failure characteristics of surrounding rock of borehole in high extraction roadway of mining overburden[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(5):990-1000.

采动覆岩高抽巷钻孔围岩变形规律与失效特征研究

张靖宇[1],李 竹[1],高 瑞[1],吴文达[1],王 博[1],胡国忠[2],秦 伟[2]

(1. 太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原;2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发国家重点实验室,江苏 徐州)

摘 要:**【目的】**高抽巷抽采煤层气的关键在于抽采钻孔的稳定性。**【方法】**综合理论分析和数值模拟得出钻孔围岩的受力情况,根据破坏判据$F(\rho, \varphi)$得出钻孔围岩的破坏条件及破坏范围,研究水平钻孔在开采过程中的受力变化和破坏形式,并以耗散能增长为指标,定量表征钻孔的破坏程度,研究揭示不同围压情况钻孔的稳定机制。**【结果】**结果表明:钻孔在两向压力的作用下,径向应力竖直方向较大,切向应力水平方向较大,随水平压力增大受力小的方向应力增大,当压力相等时径向应力和切向应力大小分布成圆形,钻孔切应力呈现蝴蝶结状分布随水平压力的增大而减小,当压力相等时钻孔切应力为0;钻孔在最大切应力的作用下发生破坏,在各围压条件下水平钻孔距离孔壁0.1 m处整个孔周都发生了破坏,0.2 m处在10 MPa围压时破坏范围最大占孔周的67%,围压为12 MPa及以上不发生破坏;峰值前后耗散能的增长是衡量孔壁破坏程度的主要依据,耗散能与围压成正比,耗散能越多孔壁破坏的程度越大。

关键词:瓦斯高抽巷;钻孔围岩应力;破坏特征;耗散能

中图分类号:TD712.6 **文献标识码**:A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240482 **文章编号**:1007-9432(2026)05-0990-11

Deformation Rule and Failure Characteristics of Surrounding Rock of Borehole in High Extraction Roadway of Mining Overburden

ZHANG Jingyu[1], LI Zhu[1], GAO Rui[1], WU Wenda[1], WANG Bo[1], HU Guozhong[2], QIN Wei[2]

(1. *College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*; 2. *State Key Laboratory of Fine Coal Exploration and Intelligent Development, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, China*)

Abstract:**【Purposes】**The stability of borehole is the key to the extraction of coalbed methane in high pumping roadway. **【Methods】** One the basis of theoretical analysis and numerical simulation, the stress situation of the surrounding rock of the borehole was obtained, and the failure condition and range of the surrounding rock of the borehole were obtained according to the failure criterion $F(\rho, \varphi)$. The stress change and failure form of the horizontal borehole during the mining process were studied, and the damage degree of the borehole was quantitatively characterized with the increase of dissipative

收稿日期:2024-06-15;**修回日期**:2024-09-05

基金项目:山西省基础研究自然科学研究项目(202303021211060);国家自然科学基金资助项目(U22A20169,52274135)

第一作者:张靖宇,硕士生,(E-mail)13994361243@163.com

通信作者:李竹,博士,副教授,主要从事岩层移动与绿色开采,(E-mail)cumtlizhu@cumt.edu.cn

energy as the index, and the stability mechanism of the borehole under different confining pressures is studied. 【**Results**】The results show that: Under the pressure from two directions, the vertical direction of radial stress is larger, and the horizontal direction of tangential stress is larger. With the increase of horizontal pressure, the direction of stress with small stress increases. When the pressure is equal, the radial stress and tangential stress are distributed in a circular shape. Borehole failure occurs under the action of the maximum shear stress. The entire circumference of the horizontal borehole failure occurs at 0.1 m from the hole wall under every confining pressure. When the confining pressure of 0.2 m is 10 MPa, the maximum damage range accounts for 67% of the circumference of the hole, and when the confining pressure is 12 MPa or above, no damage occurs. The increase of dissipated energy before and after the peak is the main basis to measure the damage degree of drill hole wall. The dissipated energy is proportional to the confining pressure, and the more dissipated energy, the more serious the damage degree of drill hole wall.

Keywords: high pumping roadway of gas; surrounding rock stress of borehole; failure characteristics; dissipated energy

煤层气属于非常规天然气的重要组成部分，兼具能源利用、煤矿安全、环境保护三重属性[1,2]。瓦斯抽采是防治矿井瓦斯灾害事故的重要举措[3]。抽采钻孔失稳坍塌是阻碍煤层瓦斯高效抽采的关键问题之一[4]。因此研究采动影响下瓦斯抽采钻孔围岩变形规律及破坏失效特征对维护钻孔稳定、提升瓦斯抽采效率具有重要意义。

近年来，众多专家针对高抽巷瓦斯抽采进行了诸多研究。朱红青[5]等、李胜[6]等基于工作面上覆岩层破坏的“O”形圈理论，提出了走向高抽巷布置方法。徐永胜[7]、肖峻峰[8]等根据倾向覆岩裂隙特征，对采空区上覆岩层裂隙演化规律进行了研究。康建宏[9]等通过数值模拟研究了不同抽采方式和抽采位置对采空区瓦斯流场和体积分数的影响规律，据此优化了高抽巷的布置。苗磊刚[10]等采用理论计算、相似模拟和现场施工等方式，研究了高抽巷合理布置层位和瓦斯抽采效果的影响规律。郭明杰[11]等通过理论分析、数值模拟与工程实测等方法，研究了采动覆岩内水平定向长钻孔的位置特征与卸压瓦斯抽采机理。杨英杰[12]等采取了高位钻场高位裂隙和低位裂隙钻孔相结合的抽采方式进行瓦斯抽采。

钻孔坍塌是造成抽采效率降低的主要因素，因此研究钻孔的稳定性具有重要意义。石占山[13]等数值分析了不同加卸载应力的变化速率等因素对钻孔周边破坏及孔壁变形的影响。王猛[14]、李竹[15]等通过对FLAC^{3D}模型的二次开发，反演了岩体力学参数，系统研究了卸压钻孔参数对深部巷道围岩稳定性的动态作用规律，提出了影响卸压效果的各关键参数的确定方法。韩颖等[16]、吴顺川等[17]基于Hoek-Brown准则数值分析了不同侧压系数条件下不同煤体结构煤层钻孔周围塑性区分布规律，并对煤层钻孔失稳破坏类型进行了划分。张天军等[18]、王志明等[19]采用双向加载试验装置开展竖直应力下带孔试件的单轴压缩试验，研究了抽采钻孔周围裂隙的发育情况及失效特征。张学博等[20]、朱德福等[21]基于实验室试验及变质量流压降等理论分析，建立了综合考虑钻孔变形、瓦斯运移及钻孔负压动态衰减的耦合数学模型，分析了抽采钻孔失稳坍塌对瓦斯抽采的影响机制。秦雨樵等[22]在钻孔局部壁面应力解除法（BWSRM）的基础上，考虑各向异性、孔壁温度变化及压力的影响，推导出适用于深部页岩的三维地应力计算方法。徐超等[23]构建了钻孔扰动煤体的力学模型，推导了扰动煤体的应力、应变及位移的解析解，分析了侧压系数、载荷条件、黏聚力及扩孔行为等因素对扰动煤体“三区”分布的影响规律。赵耀江[24]通过对关键层、“O”形圈与瓦斯抽采最优汇集区域的分析，建立了瓦斯运移规律的数值模型，确定了顶板大直径长钻孔瓦斯抽采的钻孔布置方式和参数。张超林等[25]、许江[26]等研究了不同钻孔数量、长度及布置间距等参数对瓦斯抽采效率的影响。当前研究大多是对于试验方式、理论分析、钻孔布置的研究，对于钻孔围压造成的影响研究较少。

由于钻孔布置在工作面顶板，随着工作面推进裂隙带形成及地层间的相互作用，钻孔围压会随着工作面的推进发生变化，考虑工程实际情况，有必要研究钻孔围压对围岩应力分布和破坏特征的影

响。本文结合上述研究，对钻孔围岩在不同围压情况下的受力情况进行理论分析，通过离散元数值模拟软件FLAC^{3D}进行水平钻孔在不同围压条件下的单轴压缩模拟，并浇筑带有水平预制孔洞的试样通过刚性压力机进行单轴压缩试验；使用孔洞内窥影像监测设备对试样预制孔进行实时监测，得到试样孔壁的破坏特征，对数值模拟进行验证，研究抽采钻孔围岩采动应力场、钻孔失效与破坏特征，对高抽巷瓦斯抽采钻孔布设具有重要的意义。

1 抽采钻孔围岩内应力场及其失效特征

1.1 力学模型的建立与解析

将钻孔布设情况简化，如图1所示。上覆岩层的应力增高区随着煤层的推进而前移，并逐渐影响到抽采钻孔使得钻孔围岩的围压发生变化。

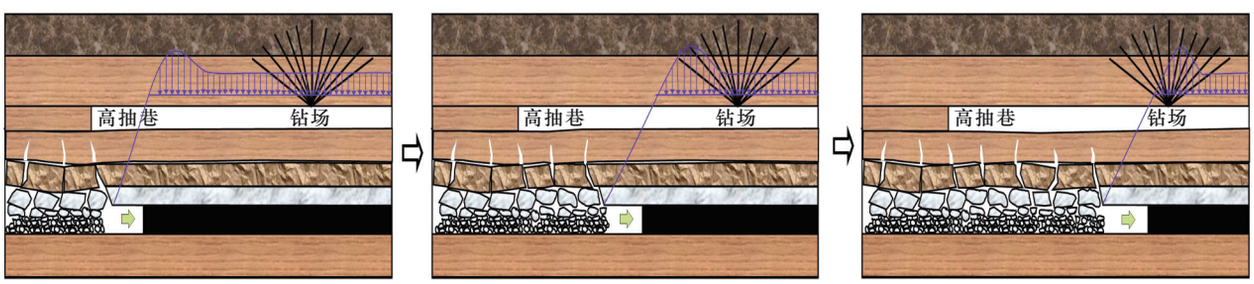


图1 抽采钻孔受力变化示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of stress change of extraction borehole

鉴于图1每个钻孔垂直切面受力方式相同，为了方便计算，将其简化为弹性体薄板中圆孔的孔口应力集中问题。基于此，建立钻孔切面均布载荷分布条件下圆孔的孔口应力计算力学模型。其中，Q_1、Q_2分别为钻孔所受水平应力和垂直应力，MPa；ρ为钻孔中心到A点距离，m；σ_ρ、σ_φ、$\tau_{\rho\varphi}$为极坐标中应力分量，MPa。

将钻孔围岩切面原载荷应力分为两个部分，第一部分如图2(b)，解答为

$$\begin{cases}\sigma_\rho=\dfrac{Q_1+Q_2}{2}\left(1-\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\\ \sigma_{\varphi=}\dfrac{Q_1+Q_2}{2}\left(1+\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\\ \tau_{\rho\varphi}=\tau_{\varphi\rho}=0\end{cases}. \tag{1}$$

第二部分如图2(c)，设应力函数为

$$\phi=\cos 2\varphi\left(A\rho^4+B\rho^2+C+\frac{D}{\rho^2}\right). \tag{2}$$

可得各应力分量为

$$\begin{cases}\sigma_\rho=-\cos 2\varphi\left(2B+\dfrac{4C}{\rho^2}+\dfrac{6D}{\rho^4}\right)\\ \sigma_\varphi=\cos 2\varphi\left(12A\rho^2+2B+\dfrac{6D}{\rho^4}\right)\\ \tau_{\rho\varphi}=\tau_{\varphi\rho}=\sin 2\varphi\left(6A\rho^2+2B-\dfrac{2C}{\rho^2}-\dfrac{6D}{\rho^4}\right)\end{cases}. \tag{3}$$

其中，A、B、C、D为待定系数。

可求得各应力分量的最后表达式：

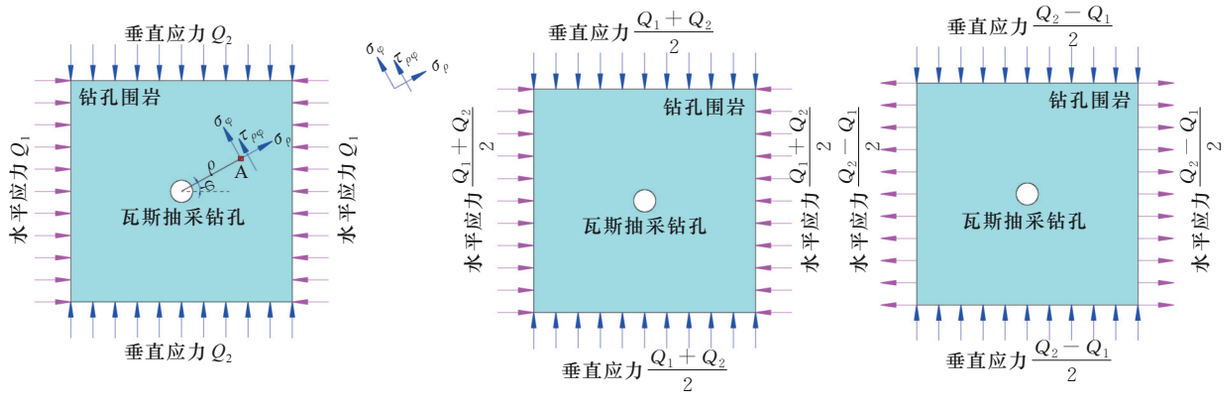
$$\begin{cases}\sigma_\rho=\dfrac{Q_2-Q_1}{2}\cos 2\varphi\left(1-\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\left(1-3\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\\ \sigma_\rho=-\dfrac{Q_2-Q_1}{2}\cos 2\varphi\left(1+3\dfrac{r^4}{\rho^4}\right)\\ \tau_{\rho\varphi}=\tau_{\varphi\rho}=-\dfrac{Q_2-Q_1}{2}\sin 2\varphi\left(1-\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\left(1+3\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\end{cases}. \tag{4}$$

将两部分解答叠加，即得图2(a)所示原载荷作用下的应力分量

$$\begin{cases}\sigma_\rho=\dfrac{Q_1+Q_2}{2}\left(1-\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)+\dfrac{Q_2-Q_1}{2}\cos 2\varphi\left(1-\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\left(1-3\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\\ \sigma_{\varphi=}\dfrac{Q_1+Q_2}{2}\left(1+\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)-\dfrac{Q_2-Q_1}{2}\cos 2\varphi\left(1+3\dfrac{r^4}{\rho^4}\right)\\ \tau_{\rho\varphi}=\tau_{\varphi\rho}=-\dfrac{Q_2-Q_1}{2}\sin 2\varphi\left(1-\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\left(1+3\dfrac{r^2}{\rho^2}\right)\end{cases}. \tag{5}$$

1.2 内应力场分布规律

阳煤一矿埋深为600 m左右，Q_2的范围为15 MPa，Q_1的范围为10～15 MPa，此处以与煤层夹角为0°的钻孔为例，研究钻孔内应力的分布规律。



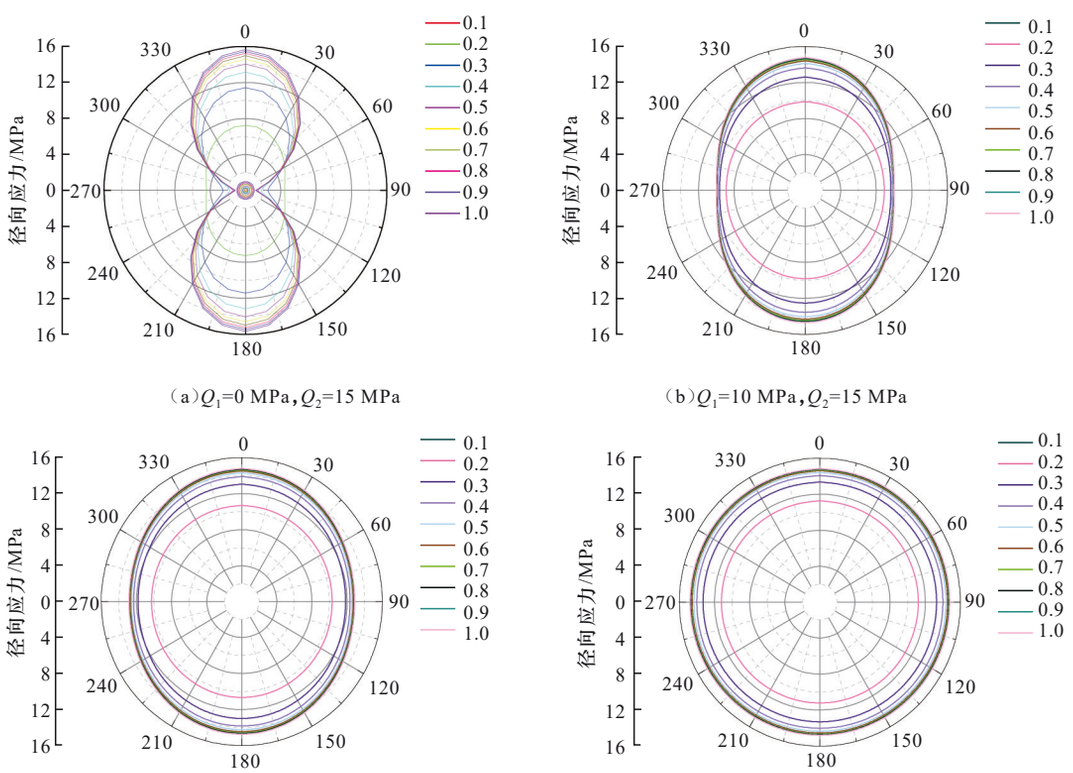
(a)原载荷　　(b)第一部分　　(c)第二部分

图 2　钻孔围岩切面应力示意图

Fig. 2　Sectional stress diagrams of surrounding rock of borehole

钻孔在不同围压条件下所受径向应力分布情况如图 3(a)—3(d)所示，图中橘黄色圆圈代表钻孔围岩的孔壁处。在无水平应力时钻孔在水平方向径向径向应力很小，整体呈现蝴蝶结状，在加上水平应力后水平方向径向应力增大到与所加水平应力大致相等；钻孔所受径向应力在孔壁处为 0，此后由内向外逐渐增大，增大速率在 0.2～0.3 m 时最大此后逐渐降低，且在竖直方向所受径向应力显著大于水平方向；当水平应力为 10 MPa 时，钻孔竖直与水平方向应力峰值分别为 14.77 MPa 和 9.97 MPa，随着水平应力增大钻孔围岩径向应力也逐渐增大，水平方向径向应力增大较多且在靠近孔壁处径向应力增大的速率较快，当水平应力等于竖直应力为 15 MPa 时，钻孔在各方向所受径向应力相等基本等于围岩应力大小。

钻孔围岩在不同水平应力的情况下，所受切向应力分布情况如图 4(a)—4(d)，在无水平应力时，钻孔孔壁处竖直方向切向应力为负值，当施加水平应力后钻孔竖直方向切向应力增大为正值；钻孔孔壁处围岩所受切向应力最大，离孔壁越远切向应力



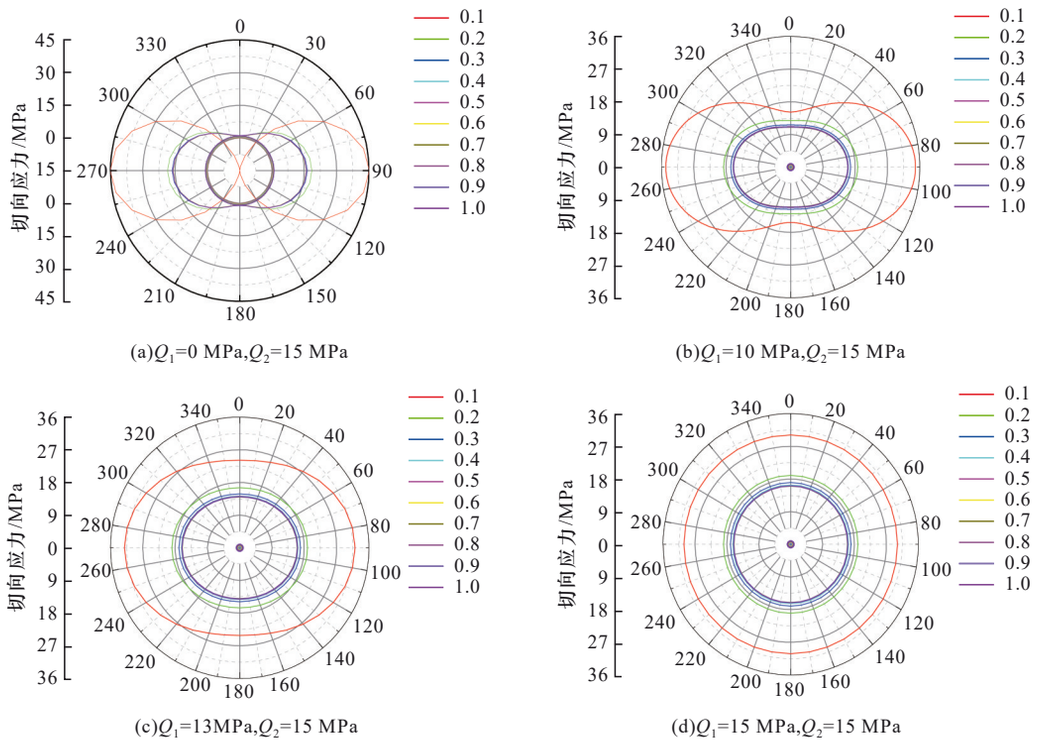
(a)Q_1=0 MPa，Q_2=15 MPa　　(b)Q_1=10 MPa，Q_2=15 MPa

(c)Q_1=13 MPa，Q_2=15 MPa　　(d)Q_1=15 MPa，Q_2=15 MPa

图 3　钻孔围岩不同深度处径向应力分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of radial stress at different depths of borehole surrounding rock

越小，当水平应力为10 MPa时，切向应力分布呈现中间凹陷的椭圆状且水平方向显著大于竖直方向，随着远离孔壁，切向应力在水平方向变化较大，且变化逐渐减小；随水平应力的增大，水平方向切向应力减小而竖直方向则增大，切向应力分布形状逐渐由椭圆变为圆球状，水平应力与竖直应力均为15 MPa时两方向切向应力大小相等。



(a)Q_1=0 MPa,Q_2=15 MPa　(b)Q_1=10 MPa,Q_2=15 MPa

(c)Q_1=13MPa,Q_2=15 MPa　(d)Q_1=15 MPa,Q_2=15 MPa

图4　钻孔围岩不同深度处切向应力分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of tangential stress at different depths of borehole surrounding rock

钻孔围岩在不同围岩应力的情况下，所受切应力分布情况如图5(a)—5(d)所示呈现蝴蝶结状，在距孔壁0.1 m处的围岩所受切应力为0，切应力在45°方向为负，与其相垂直方向为正且大小相等，在距孔壁0.2 m处切应力为最大值；随着与孔壁距离的逐渐增大其所受切应力逐渐减小，当水平应力为0时切应力最大，0.2 m处切应力最大值为9.69 MPa；随水平应力增大，钻孔围岩切应力逐渐减小，当水平应力等于垂直应力为15 MPa时，钻孔围岩所受切应力为0。

1.3　破坏准则

通常在工程中用摩尔-库伦准则，地下岩层中某点的最大剪切应力[27]可表示为

$$\tau_{\max}=\sqrt{\tau_{xy}^2+\left(\frac{\sigma_y-\sigma_x}{2}\right)^2}. \tag{6}$$

根据应力分量变换式

$$\begin{cases}\sigma_x=\sigma_\rho\cos^2\varphi+\sigma_\varphi\sin^2\varphi-2\tau_{\rho\varphi}\sin\varphi\cos\varphi\\ \sigma_y=\sigma_\rho\sin^2\varphi+\sigma_\varphi\cos^2\varphi+2\tau_{\rho\varphi}\sin\varphi\cos\varphi\\ \tau_{xy}=(\sigma_\rho-\sigma_\varphi)\sin\varphi\cos\varphi+\tau_{\rho\varphi}(\cos^2\varphi-\sin^2\varphi)\end{cases}. \tag{7}$$

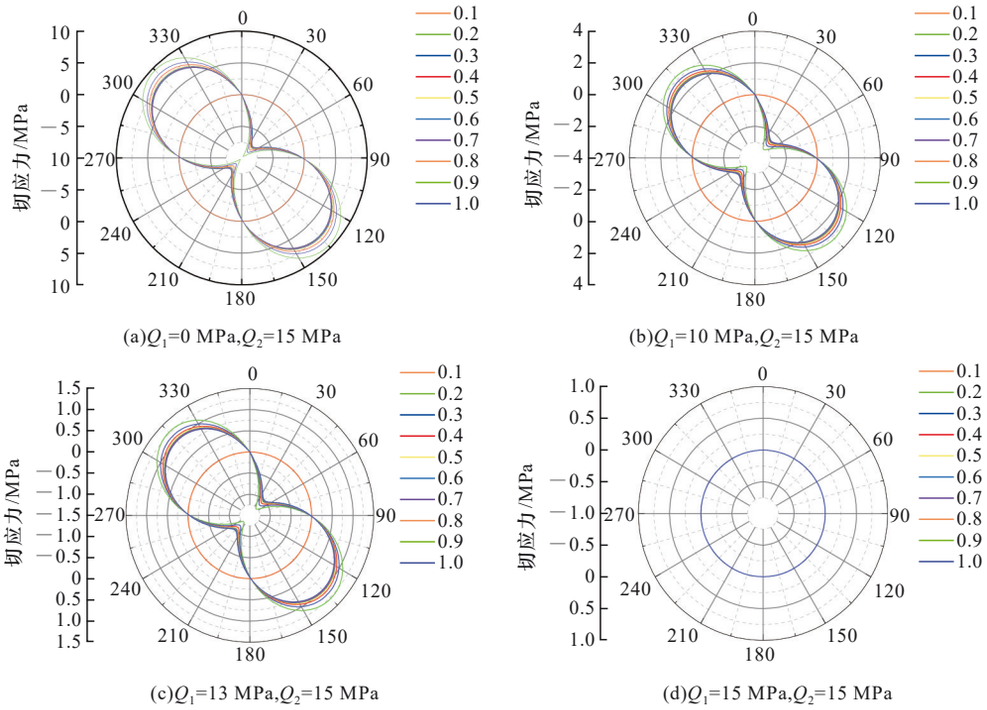
将式(5)和式(7)代入式(6)可得最大剪切应力表达式为

$$\tau_{\max}=\sqrt{\frac{(Q_2-Q_1)^2}{4}\left[\left(1-12\frac{r^6}{\rho^6}+9\frac{r^8}{\rho^8}\right)+\sin^2 2\varphi\left(4\frac{r^2}{\rho^2}-2\frac{r^4}{\rho^4}\right)-\cos^2 2\varphi\left(4\frac{r^2}{\rho^2}-10\frac{r^4}{\rho^4}\right)\right]+\frac{(Q_1+Q_2)^2}{4}\frac{r^4}{\rho^4}-\frac{\cos 2\varphi}{2}(Q_2^2-Q_1^2)\left(\frac{r^2}{\rho^2}-2\frac{r^4}{\rho^4}+3\frac{r^6}{\rho^6}\right)}. \tag{8}$$

假定岩层的破坏是由其抗剪强度决定的，构建破坏判据为

$$F(\rho,\varphi)=\frac{\frac{\sigma_\rho+\sigma_\varphi}{2}\tan\beta+c}{\sqrt{\tan^2\beta+1}}-\tau_{\max}. \tag{9}$$

钻孔围岩在不同水平应力的情况下其所受最大切应力分布如图6(a)—6(d)所示，当无水平应力时，钻孔孔壁处在30°、150°、210°、330°处最大切应力接近于0；加上水平应力后最大切应力在孔周呈现



(a)Q_1=0 MPa,Q_2=15 MPa　(b)Q_1=10 MPa,Q_2=15 MPa

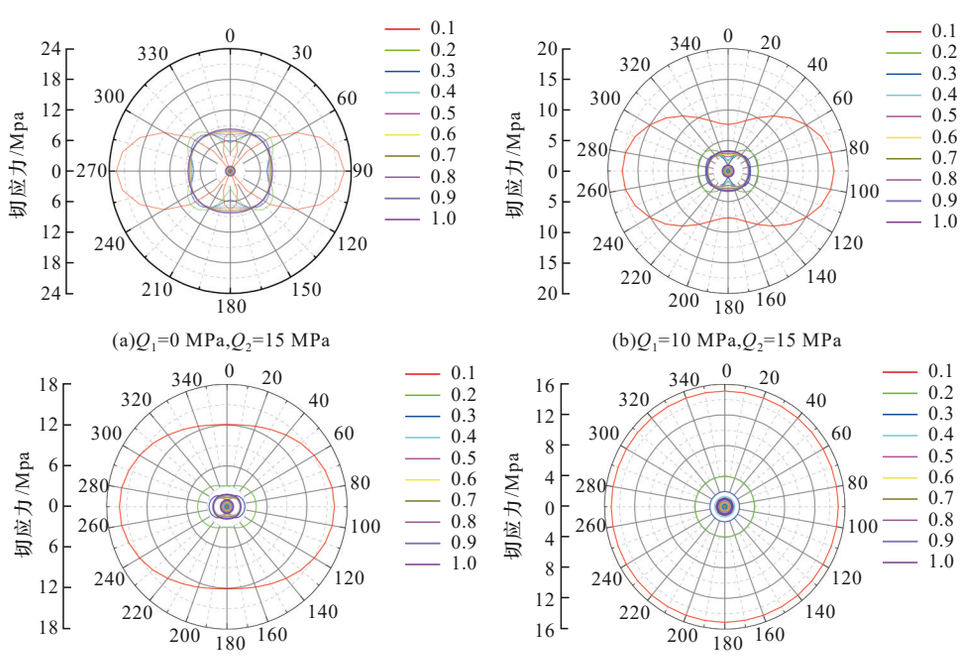
(c)Q_1=13 MPa,Q_2=15 MPa　(d)Q_1=15 MPa,Q_2=15 MPa

图 5　钻孔围岩不同深度处切应力分布特征

Fig. 5　Distribution characteristics of shear stress at different depths of borehole surrounding rock

椭圆状分布，在钻孔围岩 0.1 m 处所受最大切应力最大，此后由内而外逐渐减小，且水平方向最大切应力显著大于竖直方向；当水平应力为 10 MPa 时，钻孔围岩在 0.1 m 处所受最大切应力最大值为 17.5 MPa，在 0.2 m 处最大值为 4.9 MPa，差值为 12.6 MPa 最大，此后随着与孔壁距离的增大最大切应力的变化逐渐减小；随着水平应力的增大，0.1 m 处围岩所受最大切应力的最大值逐渐减小。

所构建的函数式(9)代表抗剪强度与最大剪应力的差值，若 $F(\rho,\varphi)\leqslant 0$，则岩体发生破坏。如图 7(a)—7(d)所示，围岩等值线是通过式(9)计算所得到，小于 0 的部分表示围岩受到破坏，棕色充填部分



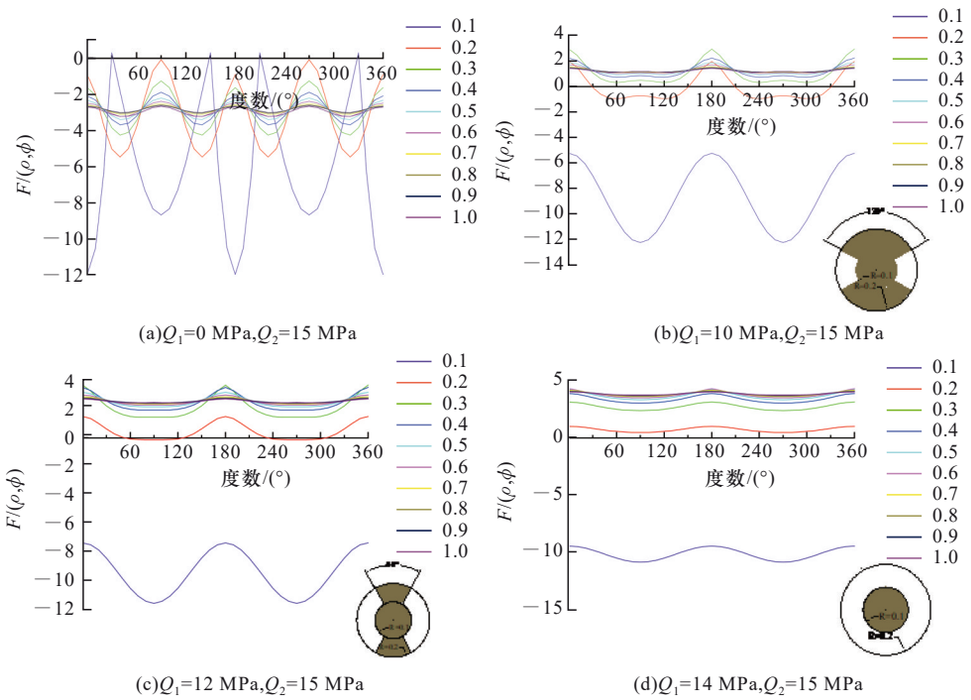
(a)Q_1=0 MPa,Q_2=15 MPa　(b)Q_1=10 MPa,Q_2=15 MPa

(c)Q_1=13 MPa,Q_2=15 MPa　(d)Q_1=15 MPa,Q_2=15 MPa

图 6　钻孔围岩不同深度处最大切应力分布特征

Fig. 6　Distribution characteristics of maximum shear stress at different depths of borehole surrounding rock

为钻孔发生破坏的区域。在无水平应力时，钻孔孔周几乎都被破坏，仅在孔壁处有部分区域未破坏；加上水平应力后在0.1 m处，水平应力为10～15 MPa时孔壁都发生了破坏。在0.2 m处，当水平应力为10 MPa时，孔壁在30°～150°和210°～330°的范围$F(\rho,\varphi)\leqslant 0$故钻孔该位置发生了破坏，破坏范围占孔周的67%；当水平应力为12 MPa时孔壁在60°～120°和240°～300°的范围内发生了破坏，占孔周的33%；当水平应力大于12 MPa时孔壁没有发生破坏。通过对钻孔围岩发生破坏的范围及受力情况进行分析，发现最大切应力是影响钻孔孔壁破坏的主要因素，揭示了钻孔孔壁的破坏机制。



(a)Q_1=0 MPa,Q_2=15 MPa　(b)Q_1=10 MPa,Q_2=15 MPa

(c)Q_1=12 MPa,Q_2=15 MPa　(d)Q_1=14 MPa,Q_2=15 MPa

图7　水平钻孔围岩理论破坏分布

Fig. 7　Theoretical failure distributions of horizontal borehole surrounding rock

2　水平钻孔不同围岩压力作用下内应力分布及破坏特征

为得出钻孔围岩的破坏规律，利用FLAC^{3D}数值模拟软件，对钻孔在不同围岩压力作用下的内应力分布及破坏特征进行分析，破坏准则选取摩尔库伦准则，模型如图8所示，模型长、宽、高都为0.1 m，钻孔的半径为0.01 m，模型的底部设置为固定边界，四周设置为应力边界，顶部加载板施加速度0.000 1 mm/s，两侧的围压分别设置为11、13和15 MPa，模型的单元和节点总数分别是88 432和73 498个。

2.1　最大切应力分布

按照前述方案给模型四周施加不同大小围压，各围压条件下带孔试件在达到峰值强度时最大切应力的应力云图，如图9所示。在达到峰值强度时，没有围压条件下最大切应力的最大值为24.2，11、13、15 MPa围压条件下，最大切应力的最大值分别为36、39、42 MPa。最大切应力随围压增大而增大，且没有围压和有围压情况下最大切应力的分布

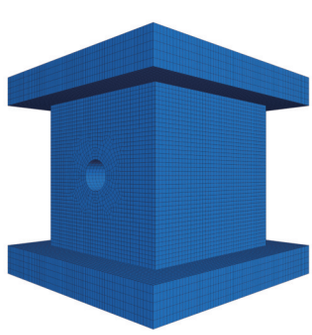


图8　FLAC^{3D}模型图

Fig. 8　FLAC^{3D} model diagram

情况大致相同。

不同围压条件下模型的应力应变曲线如图10所示，并将破坏过程划分为5个阶段。无围压时峰值强度为31.6 MPa，而在有围压的条件下峰值强度迅速升高，在11、13、15 MPa围压条件下峰值强度分别是47.8、50.7和51.7 MPa，围压从无升到11 MPa峰值强度由31.6 MPa提升到47.8 MPa，升幅为51.2%，围压从11 MPa升到13 MPa峰值强度由47.8 MPa提升到50.7 MPa，升幅为6%，从13 MPa升高

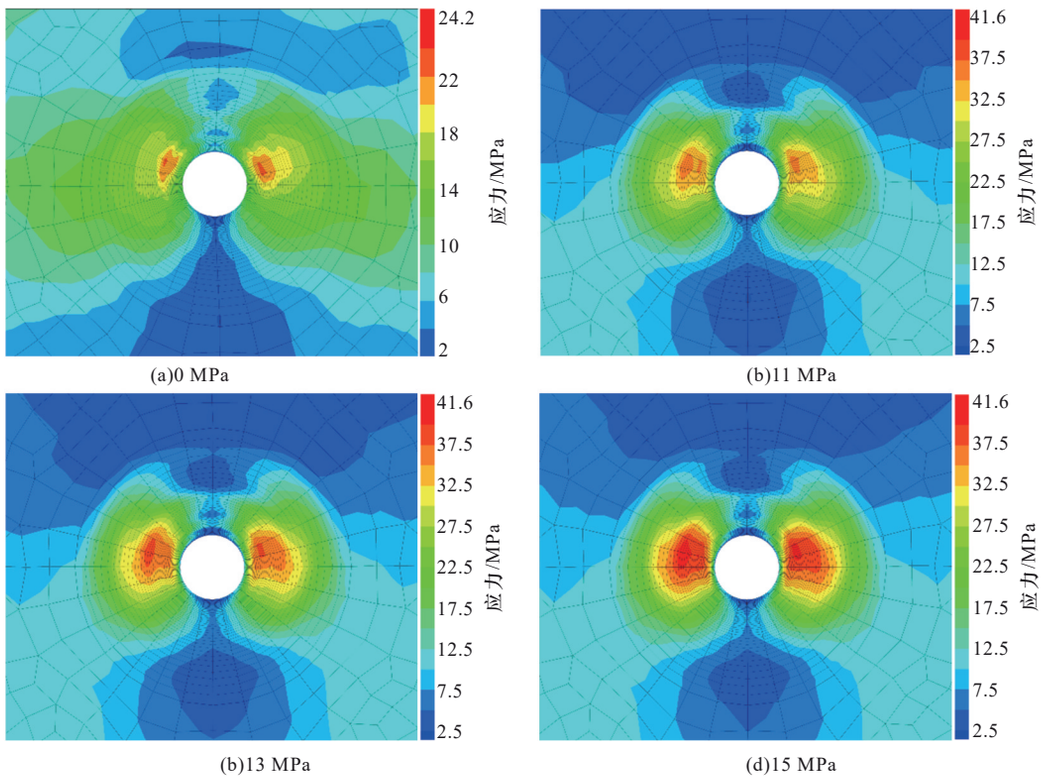


图 9　不同围压峰值点最大切应力分布云图

Fig. 9　Maximum shear stress distribution cloud maps at different peak confining pressure points

到 15 MPa峰值强度由 50. 7 MPa提升到 51. 7 MPa，升幅为 1. 9%。表明升高围压可以提升岩石的抗压能力，但提升作用逐渐降低。

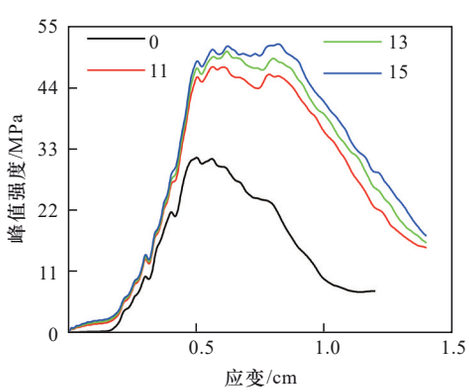


图 10　不同围压应力应变曲线

Fig. 10　Stress-strain curves of different confining pressures

2. 2　塑性区分布

按照前述方案给围岩施加不同的围压，各围压条件下岩块不同阶段的塑性区发育规律如图 11 所示，从上到下依次是 0、11、13 和 15 MPa。在 OA 段围压为 0 时钻孔塑性破坏未贯通，加上围压后竖直方向发生贯通钻孔的张拉破坏并向两侧延伸发生剪切破坏，剪切破坏区域随着围压的升高而增加，当围压由 11 MPa 变为 15 MPa 时破坏范围增加了 50%。前述围压提升增大岩石的抗压能力故 AB 段在压缩过程中钻孔水平方向发生剪切破坏的区域随围压增大而减小。加上围压后 BC 段发生剪切破坏的区域增大，且竖直方向发生张拉破坏的区域开始向远离孔壁的位置扩散。加上围压后 DE 段远离孔壁处的位置没有发生张拉破坏，且正在发生的剪切破坏开始沿着钻孔孔口的方向由下而上扩散。

2. 3　耗散能分布

由能量守恒原理可知，在岩石进行压缩的过程中产生的总能量是不变的。外载所做的总功 W 将转化为弹性能 E_e 和耗散能 E_d[28]。耗散能（E_d）会在塑性区形成即岩石发生破坏时增加，故耗散能的变化是评价岩石破坏程度的关键性指标。无围压及 3 组不同围压（11、13、15 MPa），将其破坏过程分为 5 个阶段其对应破坏过程及部位如图 12 所示。通过观察孔壁受最大切应力最大点的耗散能变化情况及塑性区的生成分析钻孔的破坏情况。不同围压下试件的耗散能变化规律大致相同：在 OA 段没有产生塑性区所以耗散能很小；AB 段开始产生小部分塑性区耗散能上升；BC 段随着加载的继续到达 C 点时达到了峰值点，此时岩石发生塑性破坏耗散能迅速增多；CD 段通过峰值点后岩石破坏耗散能增大；DE 段岩石还未达到残余强度耗散能继续增大。

比较不同围压下耗散能的变化，随着围压的增

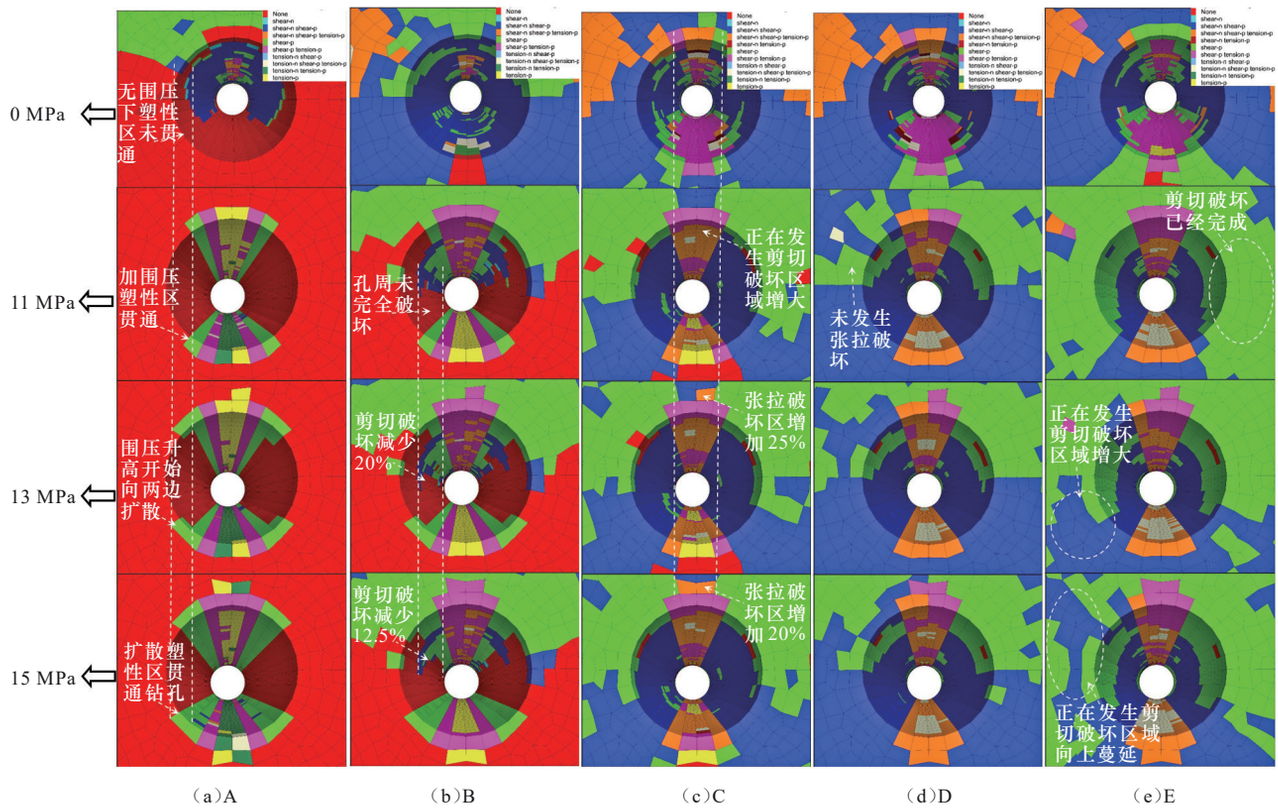


图11　各阶段钻孔塑性区随围压变化规律

Fig. 11　Variations of plastic zone of borehole with confining pressure at each stage

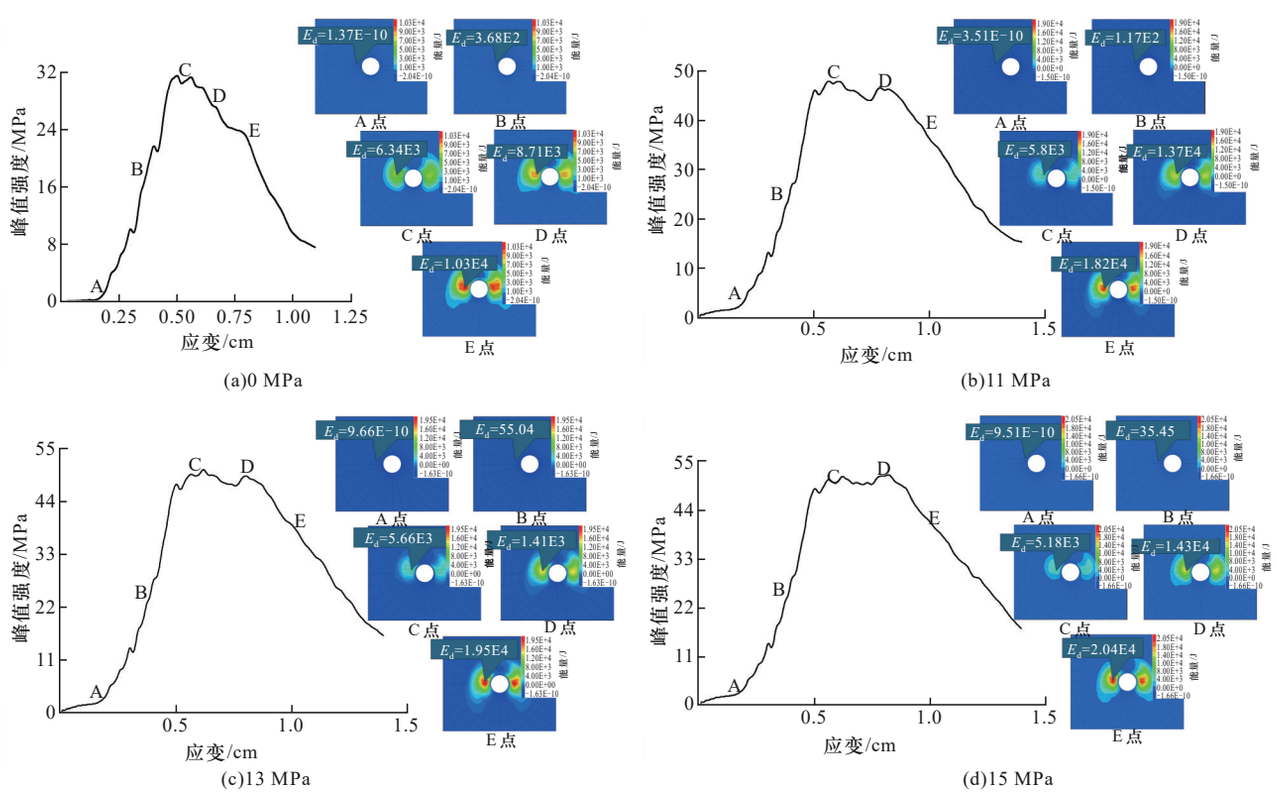


图12　不同围压各阶段耗散能变化特征

Fig. 12　Characteristics of dissipated energy change at different confining pressure stages

大，峰值点前耗散能明显减少，主要是围压升高使的强度增大在峰值点前发生的破坏减少得岩石，在B点处随着围压增大产生的塑性区减少所以耗散能减少；在峰值点围压对耗散能的影响增大，无围压

时耗散能为 6.34×10^3，围压为 11 MPa时耗散能为 5.8×10^3，变化率为8.5%，围压为 13 MPa时耗散能为 5.66×10^3，变化率为2.4%，围压为 15 MPa时耗散能为 5.18×10^3，变化率为8.48%；通过峰值点后钻孔孔壁发生破坏耗散能增大，钻孔在CD段开始通过了峰值点开始发生破坏，围压从无增长到15 MPa时，钻孔D点耗散能分别为 8.71×10^3、1.37×10^4、1.41×10^4、1.43×10^4，耗散能越大孔壁发生的破坏越严重且围压对耗散能的影响逐渐减小。

3　钻孔围岩破坏特征窥视

为了验证理论分析及数值模拟的正确性，我们对其进行相似模拟试验进行验证，浇筑带有水平钻孔的试样进行单轴压缩的试验，并使用钻孔窥视器观察试件破坏过程中钻孔孔壁出现的破坏现象及破坏范围，通过与数值模拟的结果进行对比进而得出结论。前述钻孔在有无水平压力情况下其应力分布及破坏范围大致相同，故此处我们不给试样施加水平应力仅施加竖直方向的速度，在试验过程中将岩石刚性压缩机通过控制系统使其以0.001 mm/min的加载速度对试样进行压缩，在压缩破坏的过程中试样内部产生的微小裂隙改变了钻孔周边结构使其在压缩过程中在各方向的受力情况发生了变化。

3.1　实验设备介绍

制备带有水平钻孔的类岩石试样，并进行单轴压缩实验。实验设备包括岩石刚性试验机、钻孔窥视器（包括摄像探头、探头数据线、监控器）。在实验过程中将摄像头放入试样钻孔内，通过电视电缆连接监控器对试样钻孔破坏过程进行监控并保存。

3.2　实验结果分析

钻孔电视对试验全程均进行了检测，检测的结果如下：试样钻孔孔壁在达到C点峰值点前没有发生破坏；在C点时孔壁开始出现裂隙；快速通过峰值点到达D点后孔壁出现对称的裂隙并且持续发育；到达E点时孔壁内部裂隙发育并出现了脱落可能造成堵孔的现象产生。

4　结论

1）在竖直应力及水平应力的作用下，钻孔围岩的径向应力和切向应力呈椭圆形分布，并随水平应力增大逐渐变化成圆形，而钻孔切应力呈蝴蝶结状分布随水平应力增大而逐渐减小，揭示了在钻孔径向切面周边围岩的受力情况。

2）通过对破坏判据进行数值计算，钻孔在最大切应力的作用下使钻孔水平方向发生剪切破坏，破坏位置为最大切应力的应力集中点，揭示了影响钻孔破坏的主要因素。

3）揭示了钻孔在不同围压情况下最大切应力分布特征与塑性区及耗散能分布的联系。塑性区的形成使得压缩过程中产生的能量转化为耗散能，耗散能越多钻孔孔壁发生的破坏越严重，钻孔围岩塑性区大部分为剪切破坏。通过相似模拟试验验证了水平方向耗散能较多故发生的破坏更为明显，钻孔孔壁出现了肉眼可见的脱落现象，容易出现堵孔的情况发生。

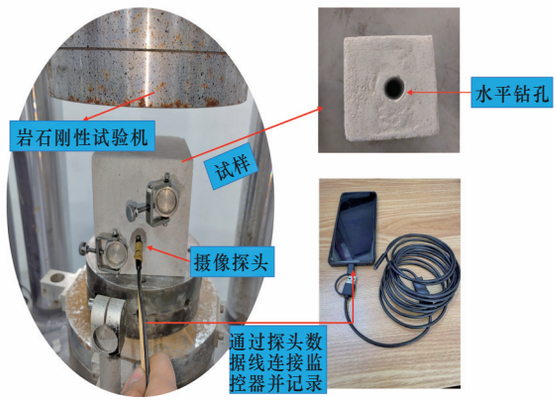


图13　实验设备

Fig. 13　Experimental equipment

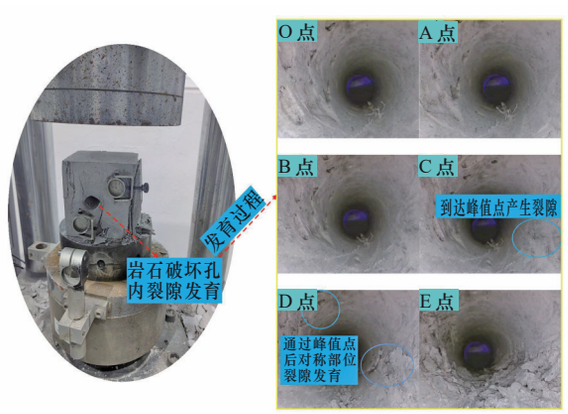


图14　钻孔窥视情况

Fig. 14　Borehole peep

参考文献：

[1]　孙钦平，赵群，姜馨淳，等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. 煤炭学报，2021，46(1)：65-76.

[2]　刘大锰，贾奇锋，蔡益栋. 中国煤层气储层地质与表征技术研究进展[J]. 煤炭科学技术，2022，50(1)：196-203.

[3] 王凯,周爱桃.煤与瓦斯突出的灾变规律[M].徐州:中国矿业大学出版社,2014.
[4] 张学博,王文元,沈帅帅.钻孔变形失稳条件下抽采负压及流量分布规律试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(10):45-51.
[5] 朱红青,霍雨佳,方书昊,等.寺家庄矿综采工作面顶板走向高抽巷合理层位研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):234-239.
[6] 李胜,毕慧杰,罗明坤,等.高瓦斯综采工作面顶板走向高抽巷布置研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):61-67.
[7] 徐永佳.高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):93-100.
[8] 肖峻峰,樊世星,卢平,等.近距离高瓦斯煤层群倾向高抽巷抽采卸压瓦斯布置优化[J].采矿与安全工程学报,2016,33(3):564-570.
[9] 康建宏,邬锦华,李绪明,等.采空区高抽巷及埋管抽采下瓦斯分布规律研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1):191-198.
[10] 苗磊刚,石必明,秦如祥.高瓦斯工作面高抽巷合理位置与抽采效果研究[J].煤矿开采,2016,21(6):77-80.
[11] 郭明杰,郭文兵,赵高博,等.长壁开采覆岩内水平定向长钻孔位置特征与卸压瓦斯抽采机理[J].煤炭学报,2023,48(10):3750-3765.
[12] 杨英杰,郭勇义,谢建林,等.高位钻场瓦斯抽采技术在高瓦斯复杂煤层回采中的应用研究[J].太原理工大学学报,2014,45(5):666-668,683.
[13] 石占山,梁冰,王岩,等.加载与卸载过程瓦斯抽采钻孔变形特征[J].煤炭学报,2017,42(6):1458-1465.
[14] 王猛,王襄禹,肖同强.深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J].煤炭学报,2017,42(5):1138-1145.
[15] 李竹,冯国瑞,崔家庆.掘进应力扰动下细砂岩破裂规律及其强度损伤的实验研究[J].太原理工大学学报,2021,52(3):327-334.
[16] 韩颖,张飞燕,刘晓,等.基于Hoek-Brown准则的煤层钻孔失稳破坏类型数值模拟研究[J].煤炭学报,2020,45(S1):308-318.
[17] 吴顺川,姜日华,张诗淮,等.修正Hoek-Brown强度准则在钻孔稳定性分析中的应用[J].岩土力学,2018,39(S2):1-13.
[18] 张天军,纪翔,张磊,等.瓦斯抽采钻孔孔周裂隙演化及等效裂纹宽度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3625-3633.
[19] 王志明,孙玉宁,张硕,等.竖直恒载循环作用下煤层钻孔失稳演化研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(2):262-271.
[20] 张学博,王豪,杨明,等.抽采钻孔失稳坍塌对瓦斯抽采的影响机制研究及应用[J].煤炭学报,2023,48(8):3102-3115.
[21] 朱德福,屠世浩,袁永,等.破碎岩体压实特性的三维离散元数值计算方法研究[J].岩土力学,2018,39(3):1047-1055.
[22] 秦雨樵,汤华,吴振君,等.基于钻孔局部壁面应力解除法的深部页岩三维地应力计算方法[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1468-1480.
[23] 徐超,秦亮亮,王凯,等.非均匀应力场瓦斯抽采钻孔扰动煤体变形破坏特征[J].煤炭学报,2023,48(4):1538-1550.
[24] 赵耀江,郭海东,袁胜军.综采面顶板走向大直径长钻孔瓦斯抽采技术参数的研究[J].太原理工大学学报,2009,40(1):74-77.
[25] 张超林,王恩元,许江,等.瓦斯抽采中煤层参数动态响应及其应用[J].煤炭科学技术,2021,49(5):127-134.
[26] 许江,宋肖徽,彭守建,等.顺层钻孔布置间距对煤层瓦斯抽采效果影响的物理模拟试验研究[J].岩土力学,2019,40(12):4581-4589.
[27] 孟祥瑞,徐铖辉,高召宁,等.采场底板应力分布及破坏机理[J].煤炭学报,2010,35(11):1832-1836.
[28] 彭瑞东,鞠杨,高峰,等.三轴循环加卸载下煤岩损伤的能量机制分析[J].煤炭学报,2014,39(2):245-252.

(编辑:万 佳)