

真三轴应力条件下钻孔围岩塑性区及增透半径研究

尹光志^{1,2}, 鲁俊^{1,2}, 张东明^{1,2}, 李铭辉^{1,2}, 邓博知^{1,2}, 刘超^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030)

摘 要: 深部岩体处于三维应力场中受开挖扰动影响钻孔、巷道围岩处于明显的真三轴应力状态。钻孔抽采技术是煤矿广泛用于瓦斯治理的重要措施, 钻孔周围塑性区是瓦斯流动的优质通道, 研究钻孔围岩塑性区特性对于抽采钻孔的优化布置至关重要。为研究钻孔围岩的塑性区特性, 基于广义平面应变理论分析围岩应力分布, 比较几种常用强度准则(MC、Mises、D-P、MLC、SMP)的适用性和精确性, 对比试验结果表明, MLC 准则能较好地表征岩石的真三轴强度特性。基于 MLC 准则推导了围岩塑性区半径公式, 分析偏应力、中间主应力、岩石内摩擦角、岩石黏聚力和钻孔半径对增透半径的影响, 结果表明, 增透半径随着偏应力的增大而增大, 随中间主应力的增加先减小后增大, 随岩石内摩擦角、岩石黏聚力的增加而逐渐减小, 随钻孔半径的增加而线性增大。研究结果可为实际工程中巷道支护、煤层瓦斯抽采等技术的参数设计等提供重要参考。

关 键 词: 真三轴应力; 强度准则; 钻孔; 塑性区; 增透半径

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)增1-0001-10

Study on plastic zone and permeability-increasing radius of borehole surrounding rock under true triaxial stress conditions

YIN Guang-zhi^{1,2}, LU Jun^{1,2}, ZHANG Dong-ming^{1,2}, LI Ming-hui^{1,2}, DENG Bo-zhi^{1,2}, LIU Chao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The deep rock mass is in a three-dimensional stress field, and the surrounding rock of the borehole or roadway is in an obvious true triaxial stress state due to the excavation-induced disturbance. Extraction technology is widely used as an important measure for gas control in coal mines. The plastic zone around a borehole is a good channel for gas flow. Therefore, it is important to study the characteristics of the plastic zone of the surrounding rock for the optimal layout of the extraction borehole. To study the plastic zone characteristics of drilling borehole surrounding rock, we analyze the stress distribution of surrounding rock based on the generalized plane strain theory, and compare the applicability and accuracy of several commonly used strength criteria (e.g. MC, Mises, DP, MLC, SMP). The results show that the MLC criterion can better characterize the true triaxial strength of rocks. Based on the MLC criterion, we derive a formula for the radius of the surrounding rock plastic zone, and analyze the effects of deviatoric stress, intermediate principal stress, internal friction angle, cohesion and radius of drilling hole on the permeability-increasing circular area. It is found that the permeability-increasing radius increases with the increase of deviatoric stress, decreases first and then increases with the increase of the intermediate principal stress, decreases with the increase of the internal friction angle or the cohesion of rock, and increases linearly as the radius of drilling hole increases. This research results can provide an important reference for the parameter design of engineering technology such as roadway support and coal seam gas drainage in practical projects.

Keywords: true triaxial stress; strength criterion; borehole; plastic zone; permeability-increasing radius

1 引 言

在地下岩土工程和采矿工程中硐室、巷道、钻孔的布置以及围岩稳定性问题是保证其安全生产的

重要研究内容, 随着人类地下工程活动深度、广度的不断增加, 高地应力的显现对巷道的塑性变形、破坏影响更为明显。针对深井煤炭开采中巷道围岩的稳定性和控制问题, 许多学者已进行了研究, 并

收稿日期: 2018-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51434003, No.51374256, No.51804049)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51434003, 51374256, 51804049).

第一作者简介: 尹光志, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学、渗流力学、煤矿动力灾害机理及防治等方面的研究。

E-mail: gzyin@cqu.edu.cn

取得了一定的成果^[1-3]。研究表明,深部地应力的各向异性 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) 对巷道、钻孔围岩塑性区的演化和分布以及瓦斯优质流通通道等有重要的影响^[4-5]。

关于巷道、钻孔围岩塑性区的实验研究和解析分析已有较大的进展,李术才等^[6]、高富强等^[7]进行的巷道围岩变形现场监测和数值模拟,结果表明巷道围岩存在明显的分区裂隙化现象。郭晓菲等^[8]、马念杰等^[9]、吕爱钟等^[10]基于平面应变假设和摩尔-库仑准则得到了非等压条件下钻孔围岩塑性区的范围和形态参数,并研究了不同偏应力条件下塑性区的演化规律。潘阳等^[11]采用应力-应变三线段模型,基于摩尔-库仑准则研究了非均匀场下巷道的弹性区、塑性软化区和塑性残余区的应力状态。张强等^[12]基于摩尔-库仑准则和岩石峰后应变软化模型,得到了巷道围岩的弹塑性解析式。还有学者根据岩石应力-应变关系在弹性-塑性阶段表现为不同软化类型,进行了一系列假设和理论计算,得到了巷道围岩不同分区的应力、位移特性^[13-14]。上述模型在求解时多采用不考虑中间主应力影响的摩尔-库仑准则为判别依据,但大量研究表明中间主应力对岩石的强度等性质存在较大影响,不宜忽略其作用^[15-17]。张小波等^[16]基于 Drucker-Prager(D-P)准则得到了圆形巷道的弹塑性解析解,分析了中间主应力对塑性区半径和应力分布的影响。徐栓强等^[19]、尹万蕾等^[20]基于双剪统一强度理论,分析了考虑衬砌支护条件下围岩应力场、位移场和弹塑性半径的解析解,但上述考虑中间主应力影响的 D-P 准则、双剪强度准则均是直接将圆形巷道的径向应力、切向应力简化为最大、最小主应力,中间主应力取二者的平均值进行计算,实际工程中在巷道周围还存在剪应力,这些简化模型虽在一定程度上考虑了中间主应力的影响,但在计算精确性方面存在较大差异。

计算巷道围岩塑性区时决定计算准确性的重要因素之一取决于强度准则的选取,目前有较多的真三轴强度准则,但不同的强度准则对于不同岩石的适用性和精确性存在有一定差异的^[4, 15, 21-23]。文献^[5, 7]将基于巷道、钻孔围岩塑性区的相关理论应用到煤矿瓦斯抽采中,为钻孔瓦斯优质流通通道方位、范围的确定提供了参考,但这些模型的建立和求解则是以平面应变理论和摩尔-库仑准则为基础,未考虑中间主应力的影响。

本文以不同强度准则为基础,对比分析了几个典型强度准则的适用性、精确性和与之匹配的塑性

区形态、半径的差异,系统地分析了真三轴应力条件下瓦斯增透圈半径随主应力大小、岩石基本力学参数及钻孔半径的变化规律。

2 广义平面应变理论应力分析

岩体开挖后,由于巷道、钻孔的存在围岩发生应力重分布,主应力的方位和大小相应改变,其应力分布如图 1 所示。图中, σ_H 、 σ_h 为垂直钻孔轴线的水平大、小主应力; σ_v 为平行钻孔轴线的主应力; σ_r 、 σ_θ 、 $\sigma_{r\theta}$ 、 σ_z 分别为钻孔围岩单元的径向应力、切向应力、剪应力和平行钻孔轴向的应力; R 为钻孔半径, r 为围岩距钻孔中心的距离; θ 为钻孔单元与水平方向应力的夹角。

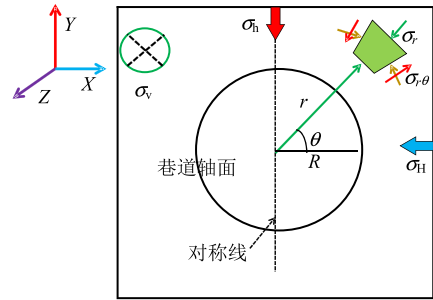


图 1 钻孔围岩应力分布

Fig.1 Stress distribution of surrounding rock of borehole

由广义平面应变理论可得巷道、钻孔围岩的径向应力、切向应力、剪应力关于围岩远场应力和钻孔半径的关系^[24]为

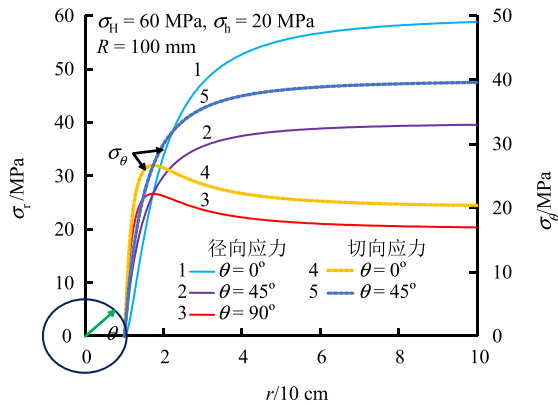
$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) \\ \sigma_z &= \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} \cos(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中符号意义同前。基于上述应力关系可得垂直钻孔轴线平面的围岩单元的两个主应力:

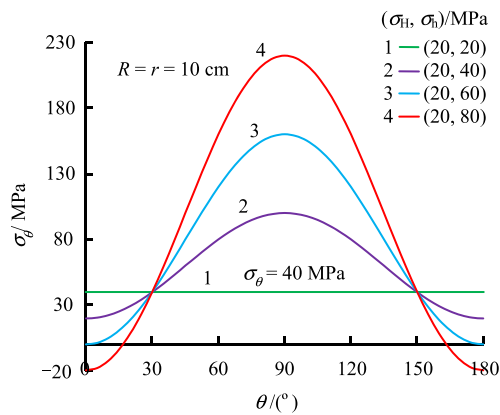
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \right)^2 + \sigma_{r\theta}^2} \quad (2)$$

中间主应力取 $\sigma_2 = \sigma_z$, 由此即可得到围岩单元的 3 个主应力, 将其代入相应的强度准则即可得到

弹性区、塑性区的分界、形态和范围。由式 (1) 可得钻孔围岩应力随钻孔中心距离的变化情况, 如图 (2) 所示。



(a) 径向应力、切向应力随钻孔距离的变化



(b) 切向应力随方位角的变化

图 2 钻孔围岩径向应力、切向应力变化

Fig.2 Variations of radial stress and tangential stress of surrounding rock

从图 2(a)中可以看出, 不同切向角度 θ 条件下切向应力、径向应力在随钻孔中心距离较远时均趋于稳定值, 不再变化, 但在距钻孔中心较近 ($r < 4R$) 时, 不同角度时的切向、径向应力随 r 的变化呈现出明显的差异: 切向应力 (径向应力) 在 $\theta = 0^\circ$ 、 45° (45°) 时随 r 的增加呈现先快速增加后趋于平稳, 在 $\theta = 90^\circ$ (0°) 时呈现先快速增加后缓慢降低最后趋于平稳, 可见钻孔围岩应力分布呈现复杂的变化。从图 2(b)钻孔围岩壁 ($R=r$) 处切向应力随周向角度 θ 的变化情况可知, 切向应力随 θ 变化具有明显的对称性和区间性, 且其大小与围岩应力大小密切相关, 因此钻孔围岩塑性区应与围岩应力、切向角度 θ 的变化密切相关。

3 几种强度准则的适用性分析

计算钻孔围岩塑性区时需要由强度关系求解塑性区的形状和范围, 不同的强度准则在预测岩石强度方面存在较大差异, 本文先讨论几种常用强度准则的适用性和精确性。

3.1 MC 准则

摩尔-库伦(MC)准则是工程中最常用的岩石破坏准则, 主应力的表达式为

$$\sigma_1 = m\sigma_3 + n \quad (3)$$

式中: m 、 n 为关于岩石物理参数黏聚力和内摩擦角的表达式:

$$m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad n = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

MC 准则作为典型的线性单剪强度准则, 只考虑了最大、最小主应力的影响, 忽略了中间主应力的影响, 与实际工程有一定的偏差, 基于此设计的工程岩体参数往往偏小。

3.2 Mises 准则

Mises 破坏准则是材料领域发展较早的屈服关系之一, 其认为当材料的弹性形变能达到某一常数时材料发生屈服, 表达式为

$$f(J_2, J_3) = J_2 - k^2 = 0 \quad (5)$$

式中: J_2 为偏应力张量第二不变量:

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (6)$$

k 为与材料物理性质有关的参数。将式 (3) 在单轴压缩应力条件下 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) 的强度与 MC 准则匹配, 可得

$$k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (7)$$

Mises 准则未能体现不同主应力对强度影响的差异, 且只包含了一个材料参数, 只适应于拉压强度相同的材料, 未考虑静水压力的影响。

3.3 D-P 准则 (广义 Mises 准则)

为克服 Mises 准则没有考虑静水压力对材料屈服和破坏的影响, Drucker 和 Prager 提出了 D-P 准则。D-P 准则是基于 Mises 准则并考虑了中间主应力的影响, 是广义 Mises 准则的一种线性表达形式:

$$f(I_1, J_2, J_3) = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (8)$$

式中: I_1 为主应力第一不变量:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (9)$$

D-P 准则中 α 、 k 的取值根据 π 平面匹配点的选取有 4 种情况，本文中选取：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} \\ k &= \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3.4 修正 Lade 准则 (MLC)

Lade 和 Duncan 根据砂土真三轴试验提出 L-D 准则，为了能够反映黏聚力对岩石的影响，提出了修正 Lade 准则^[22]，其表达式：

$$\frac{(I_1'')^3}{I_3''} = f = 27 + \eta \quad (11)$$

式中：

$$\left. \begin{aligned} I_1'' &= (\sigma_1 + S_a - P_p) + (\sigma_2 + S_a - P_p) + (\sigma_3 + S_a - P_p) \\ I_3'' &= (\sigma_1 + S_a - P_p)(\sigma_2 + S_a - P_p)(\sigma_3 + S_a - P_p) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： P_p 为围岩中的流体压力； S_a 、 η 分别为与岩石黏聚力、内摩擦角有关的常数：

$$\eta = 4(\tan \varphi)^2 \left\{ \frac{9 - 7 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right\} \quad (13)$$

$$S_a = \frac{c}{\tan \varphi} \quad (14)$$

3.5 MN 准则 (SMP)

Matsuoka 和 Nakai 根据砂土试验结果，提出了空间滑动面概念，并将其用于单剪和八面体剪应力强度理论，又称“SMP”准则，后推广至粘结摩擦材料^[25]：

$$\frac{\bar{I}_1 \bar{I}_2}{\bar{I}_3} = k_{MN} \quad (15)$$

式中： $\bar{I}_2$ 、 $\bar{I}_3$ 分别为有效主应力第二、三不变量：

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3 \\ \bar{I}_2 &= \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2 \bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_3 \bar{\sigma}_1 \\ \bar{I}_3 &= \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 \bar{\sigma}_3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

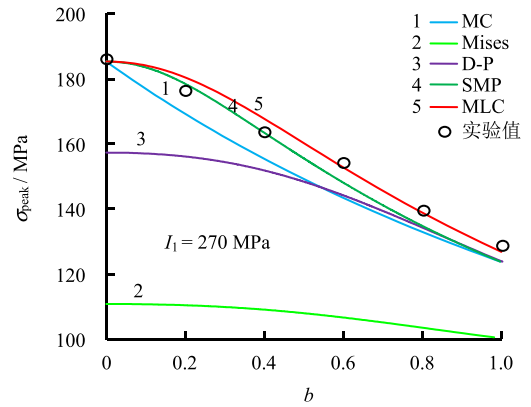
$$\bar{\sigma}_i = \sigma_i + c \cot \varphi \quad (17)$$

同理，将式 (15) 在单轴压缩应力 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) 条件下强度和 M-C 准则匹配，可得

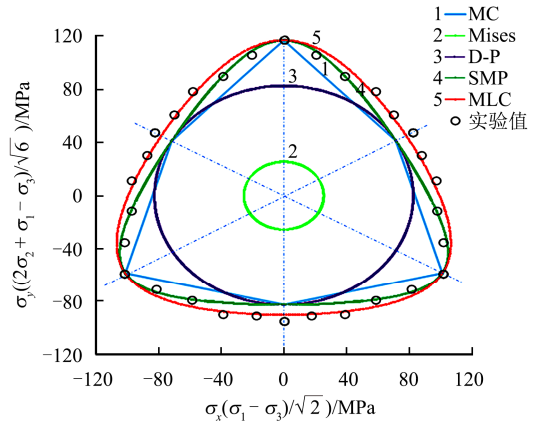
$$k_{MN} = \frac{(3 + \sin \varphi)(3 - \sin \varphi)}{1 - \sin^2 \varphi} \quad (18)$$

3.6 强度准则适用性分析

为研究上述所列几种强度准则的适用性和精确性，先将真三轴应力条件下砂岩强度数据与上述准则在 π 平面进行匹配分析，为此笔者进行了等 b ($b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$) 等 I_1 试验，得到了砂岩在 π 平面的完整破坏轨迹^[15]，图 3 为试验数据与几种强度准则的对比分析。



(a) 峰值强度随主应力系数的变化



(b) 砂岩强度在 π 平面的轨迹

图 3 几种强度准则与试验结果对比
Fig.3 Comparison of several strength criteria and test results

由图 3(a)可见，在等 b 等 I_1 试验中岩石强度随主应力系数 b 的增加而逐渐降低，各强度准则预测的强度存在较大差异。由图 3(b)可见，MC 准则在 π 平面为一个不等边六边形，Mises 准则为内嵌于 MC 准则的一个圆形（远远低估了岩石的强度），D-P 准则为内接于 MC 准则双轴拉伸角点的圆（预测强度整体偏低），MLC、SMP 准则均为曲边三角形（二者预测的强度在双轴拉伸时相等，双轴压缩

时不等, SMP 准则在中间主应力较大时预测的强度低于试验值, MLC 准则在中间主应力较小时预测的强度偏大)。由此可见, MLC 准则在整体上与试验砂岩强度有较好的匹配性。

4 钻孔围岩塑性区分析

计算钻孔围岩塑性区时需要确定岩石屈服准则, 但研究岩石屈服准则较少, 多采用破坏准则计算, 且已有研究认为岩石屈服准则与破坏准则有一定的自相似性^[4, 26-27]。本文采用破坏准则计算钻孔塑性区特性。由式 (1) ~ (4) 和 (11) ~ (14) 可得由 MC、MLC 准则计算的塑性区形态, 计算方法见文献^[4, 8]。图 4 为基于 MC、MLC 准则计算的钻孔围岩塑性区形态。

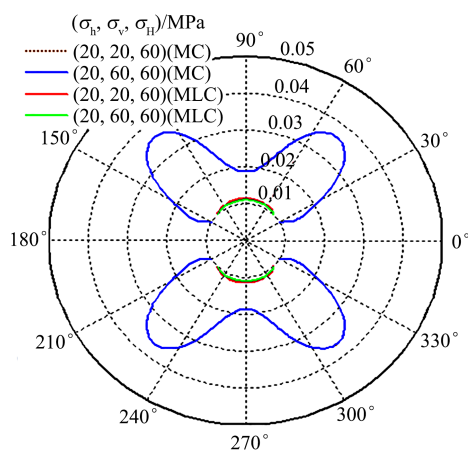


图 4 基于 MC、MLC 准则的钻孔围岩塑性区形态分析

Fig.4 Morphological analysis of plastic zone of surrounding rock of borehole based on MC and MLC criteria

从图 4 中可以看出, (1) MC 准则计算的塑性区范围远远大于 MLC 计算的塑性区范围, 前者过多估算了塑性区范围; (2) 不同中间主应力计算的 MC 准则未有差异, 与实际工程不符。需要注意: 钻孔围岩的应力在钻孔直径一定的条件下是周向角的函数, 在不同区域内换算出的主应力大小是变化的, 且在变化过程中会出现 3 个主应力相对大小的改变, 造成钻孔围岩真三维破裂区计算的复杂性。在 (20 MPa, 20 MPa, 60 MPa) 应力条件下即使外载荷是常规对称应力状态, 但 MC、MLC 准则计算结果仍然是不同的 (垂直应力是不断变化的, 不等于 20 MPa), 可见 MLC 准则能够较为准确地预测岩石强度和钻孔围岩塑性区特性, 本文主要基于 MLC 准则计算不同条件下钻孔围岩塑性区形态。

在前期研究中笔者发现, 主应力方位与钻孔 (巷道) 轴线的相对位置对围岩塑性区有较大影响^[4], 本文暂不考虑主应力方位问题, 所有应力条件均为钻孔轴线平行于中间主应力。图 5 为基于 MLC 准则计算的不同最大主应力条件下钻孔围岩塑性区形态 (应力依次为最小、中间、最大主应力)。从图中可以看出, 随最大主应力的增加, 钻孔围岩塑性区形态由圆形到椭圆形再到蝶形过渡; 塑性区范围随应力增加逐渐增大, 表明钻孔围岩破坏范围逐渐增大, 稳定性变差。同时, 塑性区具有明显的中心对称性, 为了研究方便, 下文以 1/4 周向角 ($0^\circ \sim 90^\circ$) 区域为研究对象。

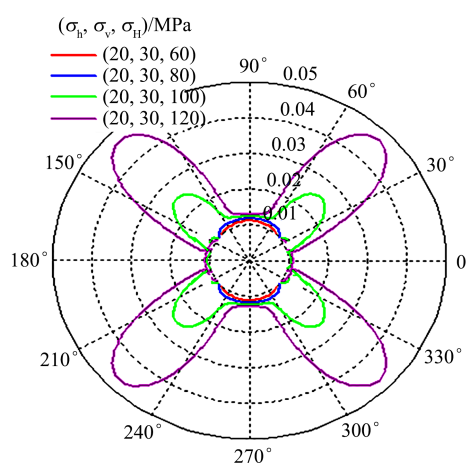
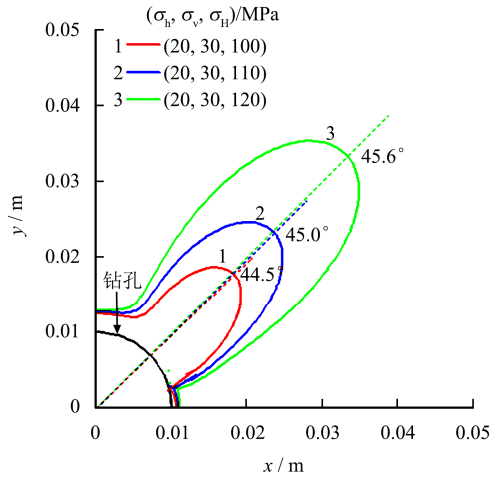


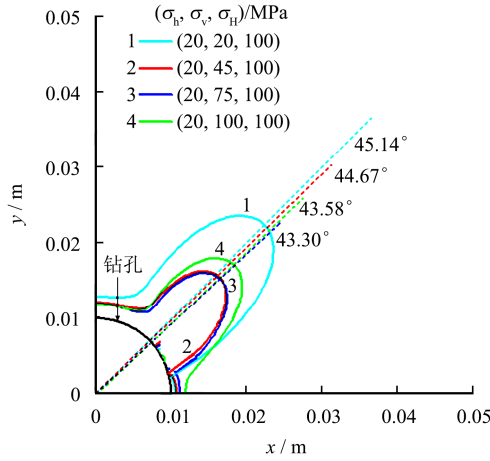
图 5 不同最大主应力条件下钻孔围岩塑性区

Fig.5 Plastic zone of surrounding rock of borehole under different maximum major principal stresses

图 6 为 1/4 周向角范围内不同应力条件下塑性区形态, 定义塑性区距钻孔中心距离最远时的角度为极值角。从图中可以看出, (1) 中、小主应力相同时塑性区范围和极值角均随着最大主应力的增加而增加, 见图 6(a); (2) 最大、小主应力一定时, 塑性区范围和极值角均随中间主应力的增加而先增大后减小, 因为中间主应力对强度的影响具有区间性, 见图 6(b); (3) 在最小主应力、 $b(\sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 一定时塑性区范围和极值角均随中、最大主应力的增加而增加, 见图 6(c)。此外, 出现蝶形塑性区后随主应力的变化, 极值角的变化范围较小, 基本都在 $\theta = 45^\circ$ 左右, 说明围岩在 $\theta = 45^\circ$ 左右塑性区范围最大, 稳定性最差 (在水平偏应力 $(\sigma_H - \sigma_h)$ 较小时出现圆形、椭圆形塑性区, 最大塑性区半径出现在 $\theta = 90^\circ$ 处)。这是因为围岩剪应力在 $\theta = 45^\circ$ 左右达到最大值, 而岩石在三轴应力条件下又以剪切破坏为主。



(a) 中、小主应力相同时



(b) 最大、最小应力一定时

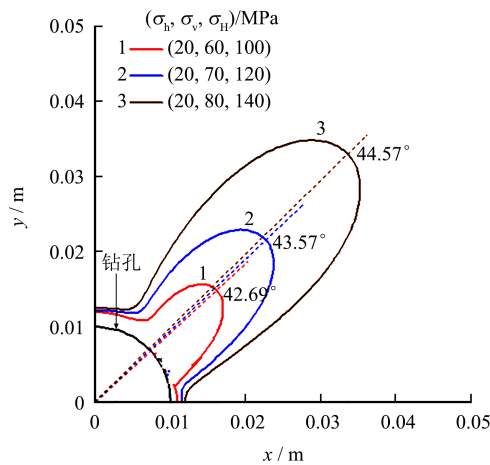
(c) 最小主应力、 $b(\sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 一定时

图 6 蝶叶最大半径对应极值角与应力关系 ($R = 0.01 \text{ m}$)
 Fig.6 Maximum radius of the butterfly leaf corresponds to relationship between extreme angle and stress ($R = 0.01 \text{ m}$)

5 钻孔增透半径影响因素分析

5.1 钻孔增透圈解析分析

煤岩中的孔隙、裂隙作为瓦斯流动的主要通道，在煤层瓦斯抽采过程中抽采钻孔周围会形成一定的塑性区，塑性区范围内煤岩裂隙增多，形成利于瓦斯流通的优质通道，瓦斯渗透率增大，钻孔周围形成一定的自增透区域。以塑性区范围极值角对应的周向距离为最大增透圈半径 r ，如图 7 所示。

为计算方便，统一取 $\theta = 45^\circ$ ，则极值角时的围岩应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \\ \sigma_z &= \sigma_v \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (11) ~ (14)，可得基于 MLC 准则计算的钻孔围岩塑性区，塑性区最大半径 r 关于三向应力的表达式：

$$\begin{aligned} &(\sigma_H + \sigma_h + \sigma_v + 3S_a)^3 = \\ &(27 + \eta)(\sigma_v + S_a) \left\{ \left[\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + S_a \right] \cdot \right. \\ &\left. \left[\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + S_a \right] - \left[\frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

整理可得塑性区半径关于应力、岩石物理性质参数的隐式方程：

$$\begin{aligned} &\left[\left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \right)^2 + \frac{9(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(\frac{R}{r} \right)^4 - 6(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{R}{r} \right)^3 - \right. \\ &(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{R}{r} \right)^2 + 2(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{R}{r} \right) + \frac{(\sigma_H + \sigma_h + \sigma_v + 3S_a)^3}{(27 + \eta)(\sigma_v + S_a)} + \\ &\left. \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} - \left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \right)^2 - (\sigma_H + \sigma_h)S_a - S_a^2 \right] = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

由此可知，当 $\sigma_H = \sigma_h$ (双向等压时)，式 (21) 简化为只有 4 次项的一元 4 次方程；当 $\sigma_H \neq \sigma_h$ (垂直钻孔轴线的两向不等压时)，式 (21) 为包含 1~4 次项的复杂一元 4 次方程。此外，由上述隐式关

系可知, 影响钻孔增透半径的因素有 3 个主应力、岩石黏聚力、岩石内摩擦角和钻孔半径, 下文详细地分析各因素对钻孔增透半径的影响。

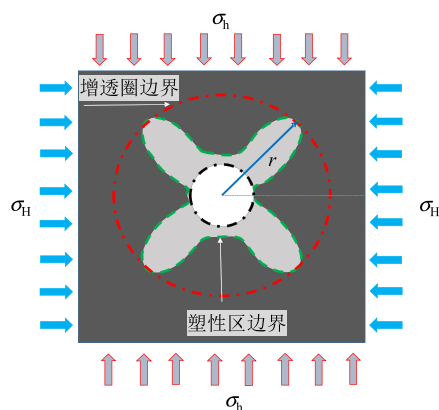


图 7 增透圈模型示意图

Fig.7 Model sketch of permeability-increasing circular area

5.2 水平主应力影响

钻孔所受围压值是影响增透半径的主要因素, 图 8 为最小主应力一定时增透半径随着最大主应力的变化情况。

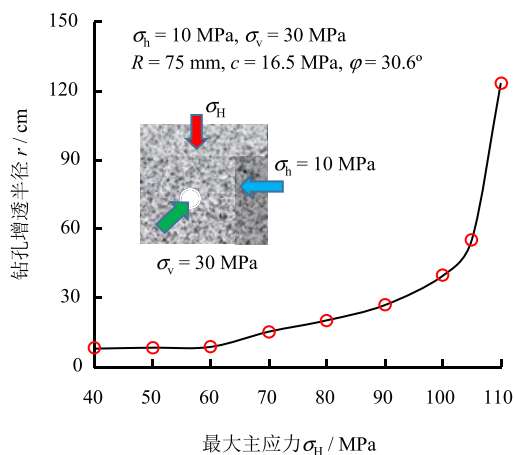


图 8 钻孔增透半径与最大主应力关系

Fig.8 Relationship between permeability-increasing radius of borehole and maximum principal stress

从图 8 中可以看出, 当岩石力学参数、钻孔半径一定、最大主应力较小时钻孔增透半径较小, 接近钻孔半径; 最大主应力较大时增透半径对主应力敏感性逐渐增强; 随最大主应力的增加, 增透半径呈现先平稳增大后近似呈线性增加最后急速增大的现象; 在应力达到一定值后增透半径可达到钻孔半径的十几倍。因此, 高偏应力差 ($\sigma_H - \sigma_h$) 易形成较

大的增透圈, 利于煤矿开采中的瓦斯抽采, 尤其在应力重分布形成应力集中区域内, 利于增透圈的形成。

5.3 中间主应力影响

在中深部地层中, 由于各种构造、工程活动等的影响, 地应力呈现出明显的三向不等压特性, 中间主应力的不同在一定程度上影响着岩石的强度, 使围岩塑性区表现出明显的中间主应力效应。图 9 为围岩蝶形塑性区半径随中间主应力的变化情况。

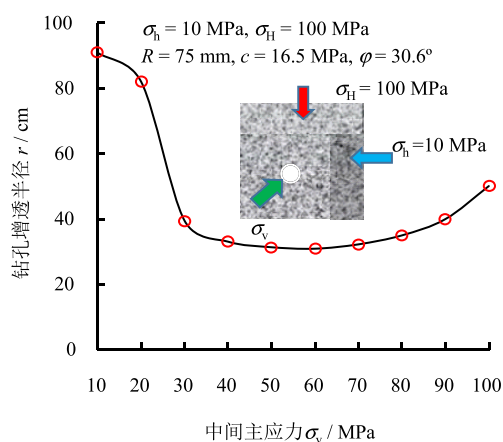


图 9 钻孔增透半径与中间主应力关系

Fig.9 Relationship between permeability-increasing radius of borehole and intermediate principal stress

从图 9 中可以看出, 当岩石物理参数、钻孔参数、最大和最小主应力一定时, 增透半径随着中间主应力的增大先快速降低后缓慢降低最后又缓慢增大, 因为岩石强度有明显的中间主应力效应; 随着中间主应力从 σ_h 变化到 σ_H , 增透半径从接近 13 倍钻孔半径减小到了接近 7 倍钻孔半径, 可见中间主应力的增大对瓦斯抽采不利; 对应于实际工程中钻孔深度增加, 平行于钻孔轴线的约束应力逐渐增大, 钻孔围岩塑性区范围逐渐减小, 抽采效果逐渐降低, 亦即钻孔深度的增加不利于瓦斯的高效抽采。

5.4 岩石黏聚力影响

围岩塑性区大小与岩石强度直接相关, 岩石的黏聚力作为表征岩石强度的重要参数, 必然成为影响钻孔增透半径的关键因素。当主应力、钻孔半径、岩石内摩擦角一定时增透半径随岩石黏聚力变化关系如图 10 所示。从图中可以看出, 随着岩石黏聚力的增加, 增透半径先迅速降低而后趋于平稳; 当黏聚力足够大时, 增透半径接近钻孔半径; 随着黏聚力的增大, 岩石强度逐渐增加, 钻孔围岩形成的塑性区范围逐渐缩小, 相应的增透半径不断减小, 气

体优质流动通道范围逐渐减小,对于瓦斯抽采不利。实际工程中采场受多次应力扰动,岩体结构逐渐遭到破坏,岩石黏聚作用逐渐减弱,有利于瓦斯流动。

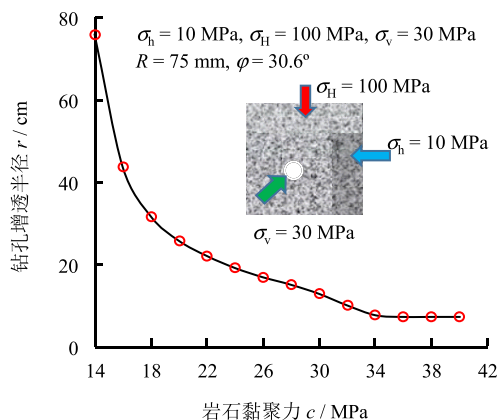


图 10 钻孔增透半径和岩石黏聚力关系

Fig.10 Relationship between permeability-increasing of borehole and rock cohesion

5.5 岩石内摩擦角影响

岩石内摩擦角是表征岩石强度性质的另一参数,也影响着围岩的塑性区发育。图 11 为主应力、钻孔半径、岩石黏聚力一定的条件下钻孔增透半径随岩石内摩擦角的变化关系。

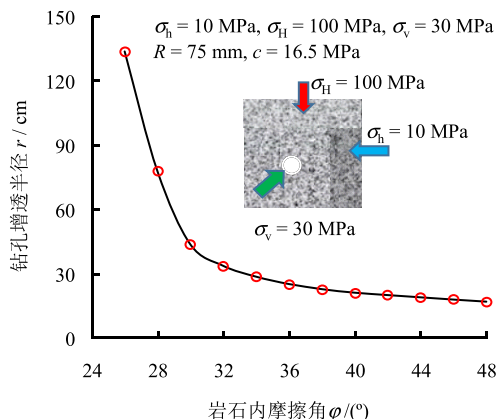


图 11 钻孔增透半径与岩石内摩擦角关系

Fig.11 Relationship between permeability-increasing radius of borehole and internal friction angle

从图 11 中可以看出,钻孔增透半径随岩石内摩擦角的增大先快速降低,而后缓慢降低最终在摩擦角无限大时趋于钻孔半径,因岩石内摩擦角增大,岩石强度逐渐增加,相应的围岩塑性区范围逐渐减小,钻孔增透半径随之减小;岩石内摩擦角的增大,对气体优质流通通道有一定的抑制作用,煤矿开采中的硬质煤岩(相对而言,煤质过软导致塌孔暂不

考虑,其他性质和赋存条件基本一致)对于瓦斯抽采不利;当岩石内摩擦角为 26° 时增透半径接近钻孔半径的 18 倍,对于煤层瓦斯抽采有利。

5.6 钻孔半径影响

钻孔半径的大小直接影响着钻孔围岩应力的分布,钻孔直径同样是影响增透半径的重要因素。图 12 为主应力、围岩参数不变条件下钻孔增透半径随钻孔直径的变化关系。从图中可以看出,增透半径随钻孔直径的增大呈线性增加,此性质也可由式 (21) 围岩增透半径关系看出,围岩塑性区半径与钻孔半径的比值为定值时表达式同解,即应力赋存条件和岩石性质一定时增透半径与钻孔半径的比值为定值(见图 12 中直线斜率),其中钻孔半径 R 从 5 cm 增加到 20 cm 时增透半径从 22 cm 增加到了 87.2 cm,增大了 3.96 倍,实际工程中钻孔半径的增大,有利于形成更大范围的优质气体流通通道,利于瓦斯抽采。

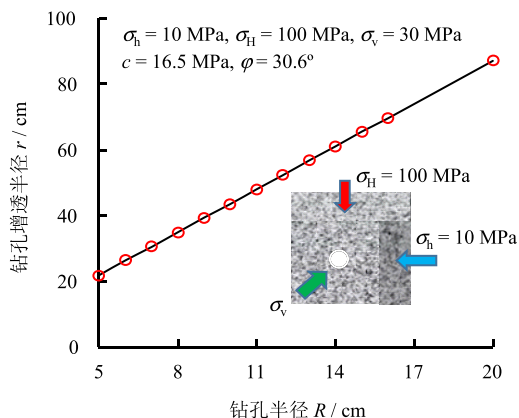


图 12 钻孔增透半径和钻孔半径关系

Fig.12 Relationship between permeability-increasing radius and radius of borehole

对于巷道开挖、支护工程,为维持巷道的稳定性应尽量避免在垂直巷道轴线方向形成较大的偏应力差,在巷道边角部位应重点支护,加大支护范围和深度,使塑性区得到有效加固。对于煤矿开采中瓦斯抽采、水力冲孔增透技术、水力压裂而言,为有效地增加增透半径,在保证钻孔稳定性的基础上宜在容易形成较大偏应力差的方向布置垂直钻孔(可增加塑性区半径,减小压裂所需压力),同时可采取相应技术改变煤层力学性质(软化岩石内摩擦角、岩石黏聚力),增加增透区范围。在考虑经济、安全基础上,可以适当增大抽采孔半径,以达到增加增透半径的效果,提高抽采效率。在赋存条件一定的情况下每个钻孔形成的塑性增透区是有限的,

增大抽采孔密集度可在有限空间内形成更大区域的增透圈, 利于提高瓦斯抽采效率。

6 结 论

(1) 各强度准则的适用性和精确性存在较大差异, 其中 MLC 准则能较好地表征岩石的真三轴强度特性。

(2) 中间主应力对巷道、钻孔围岩塑性区特性有较大影响, 实际工程中不应忽略中间主应力的影响。

(3) 基于钻孔增透圈模型, 分析了各因素对钻孔围岩塑性区半径的影响, 随着水平偏应力的增加, 增透半径逐渐增大。随中间主应力的增加, 增透半径呈现先减小后增大的趋势。随岩石物理参数(黏聚力、内摩擦角)的增加, 增透半径逐渐减小。随钻孔半径的增大, 增透半径呈线性增大。

(4) 实际工程中可根据工程岩体参数、地应力分布并结合围岩塑性区理论、钻孔增透圈理论合理布置巷道、钻孔的位置、参数等。

参 考 文 献

- [1] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 23(12): 1233—1238.
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 23(12): 1233—1238.
- [2] 常聚才, 谢广祥. 深部巷道围岩力学特征及其稳定性控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 881—886.
CHANG Ju-cai, XIE Guang-xiang. Mechanical characteristics and stability control of rock roadway surrounding rock in deep mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(7): 881—886.
- [3] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433—438.
GU Jin-cai, GU Lei-yu, CHEN An-min, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 433—438.
- [4] 尹光志, 鲁俊, 李星, 等. 真三轴应力条件下钻孔围岩稳定性及塑性区特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2709—2717.
YIN Guang-zhi, LU Jun, LI Xing, et al. The stability and plastic zone characteristics of surrounding rock under true triaxial stress conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2709—2717.
- [5] 马念杰, 李季, 赵希栋, 等. 深部煤与瓦斯共采中的优质瓦斯通道及其构建方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 742—748.
MA Nian-jie, LI Ji, ZHAO Xi-dong, et al. High quality gas channel and its construction method applied to coal and gas simultaneous extraction in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 742—748.
- [6] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1545—1553.
LI Shu-cai, WANG Han-peng, QIAN Qi-hu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1545—1553.
- [7] 高富强, 康红普, 林健. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 21—25.
GAO Fu-qiang, KANG Hong-pu, LIN Jian. Numerical simulation of zonal distrigration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 21—25.
- [8] 郭晓菲, 马念杰, 赵希栋, 等. 圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1872—1877.
GUO Xiao-fei, MA Nian-jie, ZHAO Xi-dong, et al. General shapes and criterion for surrounding rock mass plastic zone of round roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 1872—1877.
- [9] 马念杰, 李季, 赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 206—213.
MA Nian-jie, LI Ji, ZHAO Zhi-qiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(2): 206—213.
- [10] 吕爱钟, 张晓莉, 王少杰. 两向不等压圆形隧洞弹塑性解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 14—22.
LÜ Ai-zhong, ZHANG Xiao-li, WANG Shao-jie. Analytic method for elasto-plastic analysis of circular tunnels under non-axisymmetric stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 14—22.
- [11] 潘阳, 赵光明, 孟祥瑞. 非均匀应力场下巷道围岩弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 1): 53—57.

- PAN Yang, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Elasto-plastic analysis on surrounding rock mass under non-uniform stress field[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(Suppl.1): 53—57.
- [12] 张强, 王水林, 葛修润. 圆形巷道围岩应变软化弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1031—1035.
- ZHANG Qiang, WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Elastoplastic analysis of circular openings in strain-softening rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 1031—1035.
- [13] OSVALDO P M V, TARCISIO B C, ANTONIO B. Analytical solution for tunnels not aligned with geostatic principal stress directions[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 82: 394—405.
- [14] ADELINA L, HOSSEIN M, STUART DCW, et al. Elastic-softening-plasticity around a borehole: An analytical and experimental study[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1650-7>.
- [15] 尹光志, 鲁俊, 李星, 等. 中间主应力对砂岩扩容及强度特性影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 879—885.
- YIN Guang-zhi, LU Jun, LI Xing, et al. Influence of intermediate principal stress on dilation and strength characteristics of sandstone[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(4): 879—885.
- [16] FENG X T, ZHANG X W, KONG R, et al. A novel mogi type true triaxial testing apparatus and its use to obtain complete stress-strain curves of hard rocks[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(5): 1649—1662.
- [17] 张传庆, 冯夏庭, 周辉. 岩石多轴与常规三轴强度的关系[J]. 固体力学学报, 2011, 32(3): 228—234.
- ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-tin, ZHOU Hui. Relationship between polyaxial strength and conventional triaxial strength for rock[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2011, 32(3): 228—234.
- [18] 张小波, 赵光明, 孟祥瑞. 基于 Drucker-Prager 屈服准则的圆形巷道围岩弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 1): 30—37.
- ZHANG Xiao-bo, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Elastoplastic analysis of surrounding rock on circular roadway based on Drucker-Prager yield criterion[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(Suppl.1): 30—37.
- [19] 徐栓强, 俞茂宏, 胡小荣. 基于双剪统一强度理论的地下圆形洞室稳定性的研究[J]. 煤炭学报, 2013, 28(5): 522—526.
- XU Shuan-qiang, YU Mao-hong, HU Xiao-rong. The stability analysis of circular tunnel based the twin shear unified strength theory[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 28(5): 522—526.
- [20] 尹万蕾, 潘一山, 李忠华. 考虑塑性区强度参数劣化的圆形巷道冲击地压临界条件研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 348—355.
- YIN Wan-lei, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua. Critical condition of rock burst in the circular tunnel based on the strength parameters of the degradation in the plastic zone[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(2): 348—355.
- [21] ZHANG L, ZHU H. Three-dimensional Hoek-Brown strength criterion for rocks[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(9): 1128—1135.
- [22] EWY R T. Wellbore stability prediction by use of a modified Lade criterion[J]. **SPE Drill Complete**, 1999, 14(2): 85—91.
- [23] 杨雪强, 区兆光, 冯颖匡, 等. Matsuoka-Nakai 与 Lade-Duncan 两破坏准则之间的相互关系[J]. 应用力学学报, 2008, 25(3): 475—479.
- YANG Xue-qiang, OU Zhao-guang, FENG Ying-kuang. Relationships between Matsuoka-Nakai and Lade-Duncan failure criteria[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**, 2008, 25(3): 475—479.
- [24] 郑雨天. 井巷和钻孔周围三维应力场的简化模式[J]. 煤炭学报, 1982, 4(12): 74—80.
- ZHENG Yu-tian. A simplified model of triaxial stress field around long openings[J]. **Journal of China Coal Society**, 1982, 4(12): 74—80.
- [25] MATSUOKA H, HOSHIKAWA T, UENO K. General failure criterion and stress-strain relation for granular materials to metals[J]. **Nihon Rinsho Japanese Journal of Clinical Medicine**, 2008, 30(2): 119—127.
- [26] 尹光志, 鲁俊, 李星, 等. 应力Lode角对砂岩变形特性影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2081—2091.
- YIN Guang-zhi, LU Jun, LI Xing, et al. Influence of stress Lode angle on deformation characteristics of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(9): 2081—2091.
- [27] LU Jun, YIN Guang-zhi, LI Xing, et al. Deformation and CO₂ gas permeability response of sandstone to mean and deviatoric stress variations under true triaxial stress conditions[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 84(2): 259—272.