



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

巷道围岩蝶形塑性区蝶叶方向性形成机制及工程应用

李季¹, 强旭博¹, 马念杰², 张荣光¹, 李博¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要:针对经典巷道矿压理论在进行深部巷道矿压分析时适用性不强的问题,以非等压条件下圆孔周围塑性区边界方程及蝶形破坏理论为基础,理论推导出非静水压力场条件下圆形巷道围岩主应力方向偏转角度与塑性区边界上一点的极坐标角度的余弦四次隐性方程。基于此隐性方程,采用理论分析、数值模拟和现场试验等综合研究方法,研究了巷道蝶形塑性区分布特征随围岩主应力方向偏转的演化规律,揭示了巷道蝶形塑性区蝶叶方向性的形成机制,并对不同巷道断面形状(圆形、矩形、拱形)、围岩力学参数(软岩、中硬岩、硬岩)以及层状顶板结构(下软上硬型、下硬上软型、软弱夹层型、坚硬夹层型)条件下围岩蝶形塑性区蝶叶方向性的适用性进行了分析;在此基础上,探讨了蝶叶方向性与围岩变形破坏特征的关系,并对赵固二矿回采工作面运输巷围岩非对称变形破坏机理进行了研究。研究结果表明:蝶形塑性区蝶叶会随主应力方向的偏转而发生偏转,且两者的偏转角度基本相等;同时,巷道断面形状、围岩力学参数以及层状岩层顶板结构均对蝶叶方向性无显著影响,蝶叶方向性具有普适性;受蝶叶方向性的影响,巷道蝶形塑性区的分布特征与围岩变形破坏形态具有一致性,导致蝶形塑性区蝶叶位置的围岩变形破坏相对其他位置严重,造成巷道呈现非均匀变形破坏特征,工作面运输巷围岩现场探测破坏形态与数值模拟塑性区形态基本吻合。

关键词:蝶形塑性区;巷道;非静水压力场;应力方向;围岩稳定性

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2021)09-2838-15

Formation mechanism and engineering application of the directionality of butterfly leaf in the butterfly plastic zone of roadway rock surrounded

LI Ji¹, QIANG Xubo¹, MA Nianjie², ZHANG Rongguang¹, LI Bo¹

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The classical roadway pressure theory is not applicable to the analysis of deep roadway pressure. To solve this problem, based on the boundary equation of plastic zone around circular hole under non-isobaric conditions and butterfly failure theory, the cosine fourth-order implicit equation of the principal stress direction deflection angle of the surrounding rock of circular roadway and the polar coordinate angle of a point on the boundary of the plastic zone under the condition of non-hydrostatic pressure field was deduced theoretically. Then, theoretical analysis, numerical simulation, and field test were used to study the evolution law of butterfly plastic zone distribution characteristics with the deflection of surrounding rock principal stress direction, and the formation mechanism of butterfly directionality in but-

收稿日期:2021-07-22 修回日期:2021-08-31 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1150

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804243)

作者简介:李季(1992—),男,陕西汉中,讲师,硕士生导师。E-mail:liji@xust.edu.cn

引用格式:李季,强旭博,马念杰,等.巷道围岩蝶形塑性区蝶叶方向性形成机制及工程应用[J].煤炭学报,2021,46(9):2838-2852.

LI Ji, QIANG Xubo, MA Nianjie, et al. Formation mechanism and engineering application of the directionality of butterfly leaf in the butterfly plastic zone of roadway rock surrounded[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2838-2852.



移动阅读

terfly plastic zone of roadway was revealed. The applicability of butterfly directionality in the butterfly plastic zone of surrounding rock under different roadway section shapes (circular, rec-tangular, arch), the mechanical parameters of surrounding rock (soft rock, medium hard rock, hard rock) and layered roof structure (lower soft upper hard type, lower hard upper soft type, weak interlayer type, hard interlayer type) were analyzed. Based on this, the relationship between butterfly directionality and the deformation and failure characteristics of surrounding rock was discussed, and the asymmetric deformation and failure mechanism of surrounding rock of transport roadway in the working face of Zhaogu No. 2 mine was studied. The results show that the butterfly leaf in the butterfly plastic zone will deflect with the deflection of principal stress direction, and the deflection angles of the two are approximately equal. The shape of roadway section, mechanical parameters of surrounding rock and roof structure of layered rock have no significant effect on the directionality of butterfly leaf, and the butterfly directionality is universal. Affected by the directionality of butterfly leaf, the distribution characteristics of butterfly plastic zone in the roadway are consistent with the deformation and failure mode of the surrounding rock, resulting in its deformation and failure at the butterfly leaf position in the butterfly plastic zone is more serious than that at other positions, and leading the non-uniform deformation and failure characteristics of roadway. The failure mode of surrounding rock in the transportation roadway of working face is basically consistent with that of numerically simulated plastic zone.

Key words: butterfly plastic zone; roadway; non-hydrostatic pressure field; stress directions; surrounding rock stability

一直以来,巷道矿压理论分析的基础是经典的支承压力理论,其核心是利用支承压力集中系数来反应围岩所处应力场的大小,但并未涉及围岩所处应力场的方向。由于该理论具有简单易行的优点,在巷道矿压理论分析中被广泛应用并发挥了重要的作用。然而,相关研究和实践表明^[1],深部巷道在受到大埋深和强采掘的影响下,其所处应力场会变得相对复杂,其复杂性不仅体现在应力场大小的增减,而且其应力场方向也会发生改变^[2-3],进而导致深部巷道出现一些新的巷道矿压现象,例如矩形巷道尖角处围岩变形破坏并非最严重、巷道围岩呈现非均匀变形破坏特征等^[4-7]。众所周知,地下巷道围岩的变形破坏是由围岩产生的塑性区引起的,塑性区的形态和范围决定了围岩变形破坏的模式和程度,而塑性区的产生是围岩所处应力场和自身力学性质共同作用的结果。此时,采用经典支承压力理论进行分析时,便会忽视应力场方向对深部巷道围岩塑性区分布特征的影响,导致其无法很好地解释深部巷道出现的一些新的矿压现象。因此研究应力场方向对围岩变形破坏特征的影响对于深部巷道矿压理论分析具有重要的理论意义。

针对应力场方向对巷道围岩变形破坏的影响,国内外学者先后进行了有益地探索。最早关于应力方向对巷道稳定性的研究即为澳大利亚学者 GALE W J 提出的最大水平应力理论^[8],该理论认为巷道围岩的所受应力具有明显的方向性,且巷道顶底板破坏主要受水平应力影响,即巷道与水平应力的夹角越小,顶底板的稳定性越好;此后,众多

学者以此为基础进一步研究了围岩应力方向与巷道轴向之间的关系对巷道围岩稳定性的影响,孙玉福^[9]利用数值模拟得到围岩塑性区会随着巷道轴向与最大水平主应力间夹角的不同而发生改变,且夹角与巷道围岩稳定性有很大关系;朱志洁等^[10]通过分析得出巷道围岩稳定性会随着最大水平主应力与巷道轴向间夹角的改变呈现复杂变化;高圣元等^[11]通过研究发现背斜构造中巷道轴向布置角度会对围岩稳定性产生重要影响,夹角在 60°附近时可降低围岩变形;赵亮等^[12]研究发现巷道与最大水平主应力以一定角度斜交时,巷道顶底板的变形会偏向某一侧;高富强^[13]认为最大水平主应力方向与巷道轴向的夹角越大时,巷道稳定性越差;赵龙^[14]通过研究发现巷道轴线与最大主应力方向夹角在 20°~70°时,对巷道围岩变形及破坏范围影响最为严重;田成东和白海波^[15]认为巷道变形量会随着巷道轴向与最大水平应力间夹角的增大而增大。近年来,部分学者开始关注采动应力场方向对围岩变形破坏的影响,黄炳香等^[16]通过研究发现在高地应力和强烈采动应力共同作用下,围岩行为迅速表现为复杂的非稳态、非线性特征;张文忠^[17]利用数值模拟的方法研究了断层附近采动主应力方向偏转情况及断层面剪应力及剪应力增量的分布规律;周钢等^[18]研究认为原岩地应力的最大主应力以铅垂应力为主,在采动过程中最大主应力方向与水平面夹角逐渐减小,且会严重影响巷道围岩稳定性;陈上元等^[19]认为采动应力造成巷道围岩应力场的大小和方向发生改变,从而导致了巷道的非对称变

形;王家臣等^[20]采用理论分析、数值模拟及现场实测的方法研究了采动应力旋转角度对围岩稳定性的影响,采动应力旋转造成围岩承载能力降低,采动应力旋转角度愈大,围岩稳定性愈差。

以上研究分别从围岩应力方向与巷道轴向关系,采动应力场方向变化等方面入手,研究了围岩应力场方向与巷道布置的关系,并开始关注到采矿活动引起采场顶板岩层运动,会造成围岩所处应力场方向改变^[16-18],但并未涉及围岩应力场方向对塑性区形态影响的定量规律。因此,笔者以巷道蝶形破坏理论为基础,采用理论计算和数值模拟等方法,重点研究主应力方向对围岩蝶形塑性区形态的影响规律及蝶形塑性区蝶叶方向性的形成机制。

1 塑性区蝶叶形态表征

实际工程中,巷道所处的天然应力场并非均匀应力场,而是会因巷道理深、地质构造作用等因素,水平应力与垂直应力存在大小差异(侧压系数 $\neq 1$),在受采掘扰动后,井下巷道围岩所处非静水压力场的非均匀程度将更加明显。因此,研究巷道处于这一非静水压力场中的围岩塑性区具有重要工程意义。关于非静水压力场下圆形巷道围岩塑性区问题,于学馥等^[21]给出了双向非等压条件下圆孔周围的塑性区边界方程,此后由多位学者进行分析修正,后经马念杰等^[22-23]详细推导后对圆形巷道围岩塑性区形态进行了归纳总结,提出了蝶形塑性区的概念,并对其形成机制及工程意义进行了详细阐述。虽然对非静水压力场中圆形巷道围岩塑性区边界方程的研究已经基本成熟,但对于塑性区蝶叶方向性及其工程应用的相关研究却鲜有涉及。

在非静水压力场中,巷道围岩塑性区形态将不再是经典的巷道围岩塑性区理论(如卡斯特奈公式和芬纳公式)所计算出的如圆形或椭圆形等均匀形态,而是呈轴对称的“蝶形”非均匀形态分布^[22-23],如图1所示。由图1可以看出,蝶形塑性区的边界轮廓分别在4个象限内凸出,将此凸出部分定义为塑性区蝶叶^[24]。蝶叶最大半径即为塑性区的最大半径,其位

置用极坐标 $(r_{\max}, \theta_{\max})$ 表示, a 为圆形巷道的半径; P_1 为最大主应力; P_3 为最小主应力。

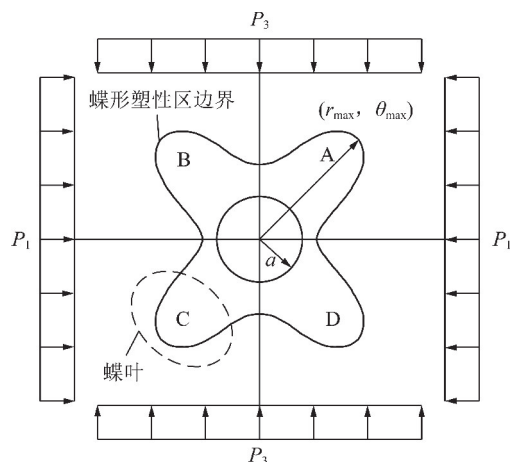


图1 蝶形塑性区形态示意

Fig. 1 Schematic diagram of butterfly plastic zone

同时根据笔者已有研究成果^[25]表明,在受到围岩岩性和应力方向等因素的影响下,井下巷道围岩蝶形塑性区蝶叶形态并不会和图1所示的蝶叶形态严格一致,而是会发生一定程度地改变,如图2所示。

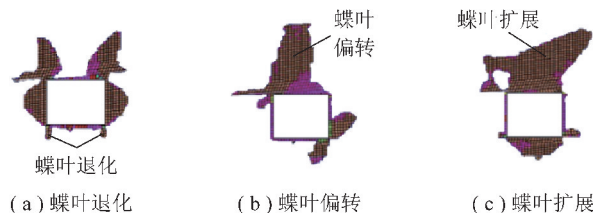


图2 巷道围岩塑性区形态变化示意

Fig. 2 Schematic diagram of plastic zone morphology change of roadway surrounding rock

根据蝶形破坏理论,导致此类现象出现的原因不仅是由于反映应力场大小的非均匀系数 η 对蝶形塑性区蝶叶分布范围及尺寸产生影响,应力场方向也会对蝶形塑性区蝶叶位置产生重要影响。

2 蝶叶方向性形成机制

2.1 理论分析

于学馥^[21]和马念杰^[26-27]等给出了非等压条件下圆形巷道围岩塑性区边界隐性方程为

$$9(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^8 + [-12(1-\eta)^2 + 6(1-\eta^2)\cos 2\theta]\left(\frac{a}{r}\right)^6 + \left[10(1-\eta)^2\cos 2\theta - 4(1-\eta)^2\sin^2\varphi\cos^2 2\theta - 2(1-\eta)^2\sin^2 2\theta - 4(1-\eta^2)\cos 2\theta + (1+\eta)^2\right]\left(\frac{a}{r}\right)^4 + [-4(1-\eta^2)\cos 4\theta + 2(1-\eta^2)\cos 2\theta(1-2\sin^2\varphi) - \frac{4C(1-\eta)\sin 2\varphi\cos 2\theta}{P_3}]\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left[(1-\eta)^2 - \sin^2\varphi\left(1+\eta + \frac{2C\cos\varphi}{P_3\sin\varphi}\right)\right] = 0 \quad (1)$$

为分析非静水压力场条件下围岩塑性区蝶叶方向性,在式(1)中引入围岩塑性区主应力方向偏转角度 α 并进行因式分解可得

$$9(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^8 - 12(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^6 + 6(1-\eta^2)\left(\frac{a}{r}\right)^6 [2\cos^2(\theta-\alpha) - 1] + 10(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 \times \\ [2\cos^2(\theta-\alpha) - 1]^2 - 4(1-\eta)^2\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^4 [2\cos^2(\theta-\alpha) - 1]^2 - 2(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 \sin^2 2(\theta-\alpha) - \\ 4(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 [2\cos^2 2(\theta-\alpha) - 1] + 2(1-\eta^2)(1-2\sin^2\varphi)\left(\frac{a}{r}\right)^2 [2\cos^2(\theta-\alpha) - 1] - \\ \frac{4C(1-\eta)\sin 2\varphi}{P_3}\left(\frac{a}{r}\right)^2 [2\cos^2(\theta-\alpha) - 1] + (1-\eta)^2 - \sin^2\varphi\left(1+\eta+\frac{2C\sin 2\varphi}{P_3\sin\varphi}\right)^2 = 0 \quad (2)$$

$$\cos^2 2(\theta-\alpha) + \sin^2 2(\theta-\alpha) = 1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)并提出公因式,变形可得

$$\left[40(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 16(1-\eta)^2\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^4 + 8(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 32(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2\right]\cos^4(\theta-\alpha) + \\ \left[12(1-\eta^2)\left(\frac{a}{r}\right)^6 - 40(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 + 16(1-\eta)^2\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 8(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 + \right. \\ \left.32(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 4(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 8(1-\eta^2)\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^2 - \frac{8C(1-\eta)\sin 2\varphi}{P_3}\left(\frac{a}{r}\right)^2\right]\cos^2(\theta-\alpha) + \\ \left[9(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^8 - 12(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^6 - 6(1-\eta^2)\left(\frac{a}{r}\right)^6 + 10(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 4(1-\eta)^2\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^4 + \right. \\ \left.4(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 8(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 2(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 4(1-\eta^2)\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \right. \\ \left.\frac{4C(1-\eta)\sin 2\varphi}{P_3}\left(\frac{a}{r}\right)^2 + (1-\eta)^2 - \sin^2\varphi\left(1+\eta+\frac{2C\sin 2\varphi}{P_3\sin\varphi}\right)^2\right] = 0 \quad (4)$$

令:

$$K_1 = 16(3 - \sin^2\varphi)(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 32(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 \\ K_2 = 12(1-\eta^2)\left(\frac{a}{r}\right)^6 - 48(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 + 36(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 16(1-\eta)^2\sin^2\varphi 2\left(\frac{a}{r}\right)^4 - \\ 8(1-\eta^2)\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^2 - \frac{8C(1-\eta)\sin 2\varphi}{P_3}\left(\frac{a}{r}\right)^2 \\ K_3 = 9(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^8 - 6(\eta-1)(\eta-3)\left(\frac{a}{r}\right)^6 + 10(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 6(1-\eta)^2\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 4(1-\eta)^2\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^4 + \\ 4(1-\eta^2)\sin^2\varphi\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \frac{4C(1-\eta)\sin 2\varphi}{P_3}\left(\frac{a}{r}\right)^2 + (1-\eta)^2 - \sin^2\varphi\left(1+\eta+\frac{2C\sin 2\varphi}{P_3\sin\varphi}\right)^2$$

则式(4)可化简为围岩塑性区主应力方向偏转角度 α 与极坐标位置角度 θ 的余弦四次隐性方程:

$$K_1\cos^4(\theta-\alpha) + K_2\cos^2(\theta-\alpha) + K_3 = 0 \quad (5)$$

式中, r 为塑性区边界上任一点的半径; C 为黏聚力; φ 为内摩擦角; η 为围压非均匀系数(定义其为最大主应力与最小主应力的比值); θ 为塑性区边界上任一点的极坐标角度; α 为主应力方向偏转角度(定义其为 P_3 与竖直方向的夹角,顺时针为正)。

分析式(5)隐形方程可知, K_i 是关于巷道半径、围岩性质参数、围压以及塑性区半径的函数,而当围岩性质及围压大小一定时,巷道围岩塑性区半径也会为定值,则 K_i 可以看作常数。此时,塑性区边界上对应点的极坐标角度与主应力方向偏转角度存在如隐形方程所示的函数关系,2者之间的变化会同步发生。当塑性区边界上每一点的极坐标角度因主应力方向偏转而发生改变时,则

围岩塑性区整体会发生偏转。

对于井下巷道而言,其原岩应力场中,最大主应力主要以水平应力为主,而采矿活动加载效应引起的采动支承压力集中系数会达到 2~3 倍,导致巷道围岩所处的应力场中最大主应力不再以水平应力为主。

根据式(5),通过改变主应力方向的偏转角度 α ,固定其他计算参数不变,得到不同主应力方向下的塑性区边界分布图,并将其与初始主应力方向(最小主应力为竖直方向,最大主应力为水平方向)的塑性区边界分布图进行对比,如图 3 所示。

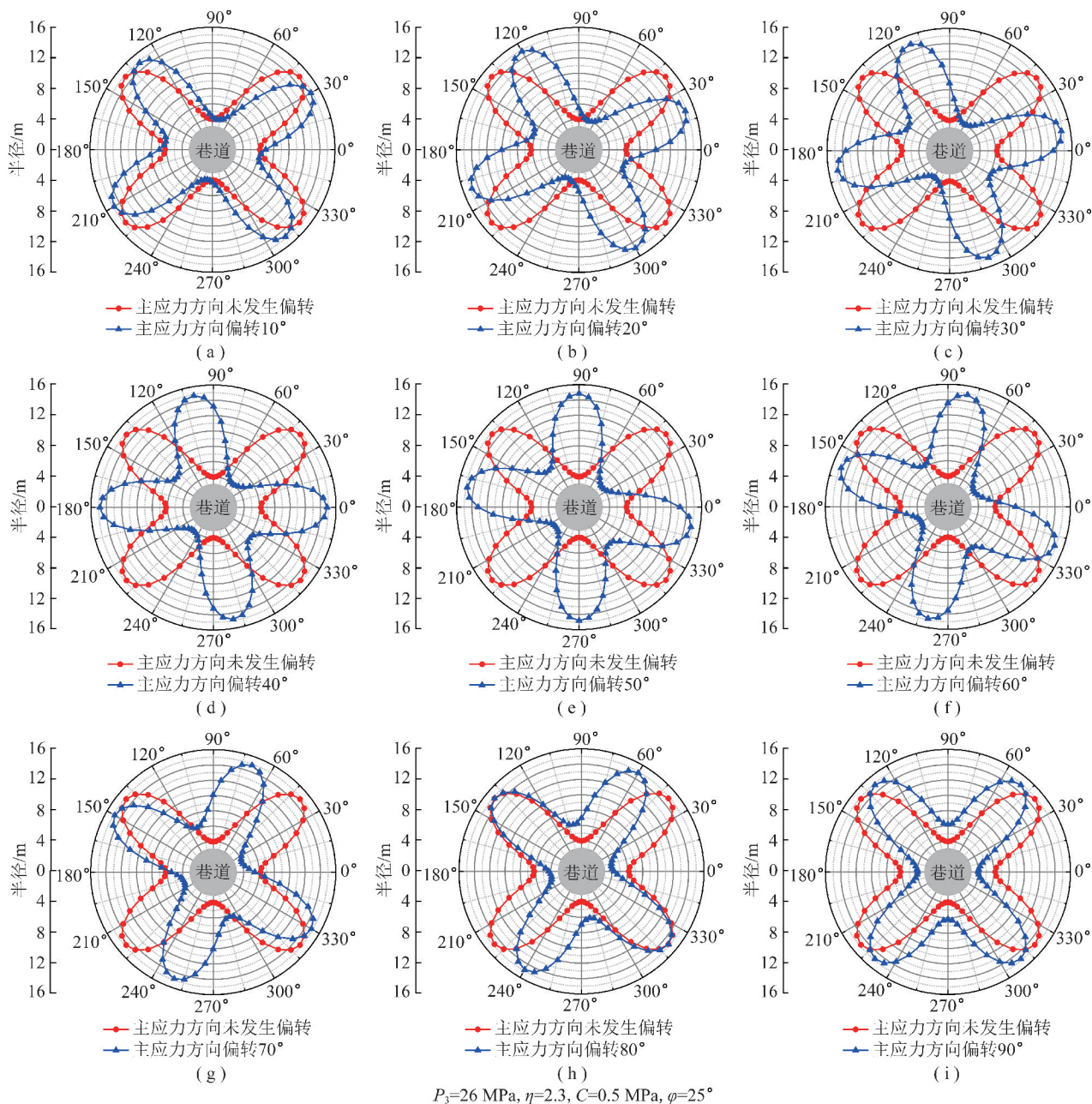


图 3 圆形巷道围岩塑性区边界分布对比(理论计算)

Fig. 3 Comparison of the distribution of the plastic zone boundary of circular roadway rock surrounded (Theoretical calculation)

通过图 3 可以看出,在非静水压力场环境下,均质圆形巷道围岩会形成蝶形塑性区,且蝶形塑性区的 4 个蝶叶会随着主应力方向的偏转而随之发生偏转。当主应力方向未发生偏转时,将第 1,2,3,4 象限的蝶叶分别标记为 A,B,C,D,表 1 为主应力方向偏转不同角度时塑性区 4 个蝶叶位置的极坐标。由表 1 可

知,围岩塑性区的 4 个蝶叶位置会随着主应力方向的偏转而改变,且蝶叶位置的偏转角度与主应力方向的偏转角度相等,如图 4 所示。

2.2 数值模拟验证

为了验证理论计算解的可靠性和普适性,利用 FLAC^{3D} 数值模拟验证圆形巷道围岩塑性区蝶

叶的方向性。数值模拟围岩本构模型采用摩尔—库伦模型,模型边界采用应力约束,施加最大主应力 60 MPa,最小主应力为 26 MPa;当主应力方向

发生偏转时,根据弹塑性力学中的应力转换公式进行主应力换算。数值模型巷道半径 $a=3\text{ m}$;其余数值模拟参数见表 2。

表 1 主应力偏转不同角度时塑性区蝶叶位置(理论计算)

Table 1	Butterfly leaf position of plastic zone when principal stress deflects different angles(Theoretical calculation)									
$\alpha/(\text{ }^\circ)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\theta_A/(\text{ }^\circ)$	45	35	25	15	5	355	345	335	325	315
$\theta_B/(\text{ }^\circ)$	135	125	115	105	95	85	75	65	55	45
$\theta_C/(\text{ }^\circ)$	225	215	205	195	185	175	165	155	145	135
$\theta_D/(\text{ }^\circ)$	315	305	295	285	275	265	255	245	235	225

注: $\theta_A,\theta_B,\theta_C,\theta_D$ 为蝶叶在极坐标中的位置角度。

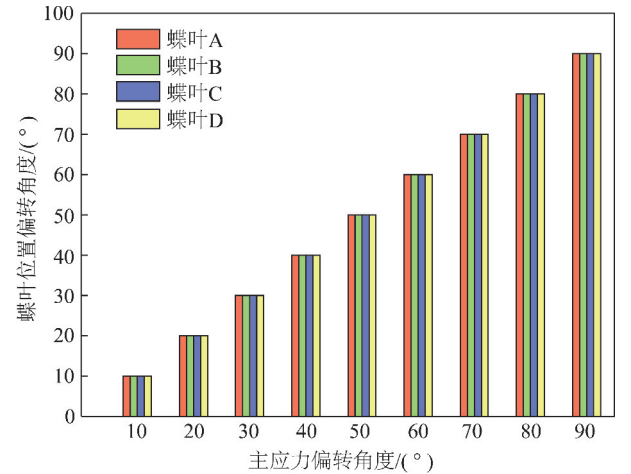


图 4 主应力偏转角度与蝶叶偏转角度关系

Fig. 4 Diagram of relationship between deflection angle of principal stress and deflection angle of butterfly leaf

表 2 模型力学参数

Table 2	Mechanical parameters of model					
模型 介质	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/ (°)	抗拉强 度/MPa
岩体	25	3.75	0.25	0.5	25	0.9

数值模拟得到的圆形巷道围岩塑性区分布形态如图 5 所示,以左上角的蝶叶为研究代表,随着主应力方向发生偏转,其与竖直方向的夹角随之改变,蝶叶的偏转角度与主应力方向的偏转角度近似相等(2 者差值不超过 3°),见表 3。

表 3 圆形巷道塑性区蝶叶偏转角度(数值模拟)

Table 3	Butterfly leaf deflection angle in plastic zone of circular roadway(Numerical simulation)			
主应力方向偏转角度/ (°)	0	20	45	80
蝶叶偏转角度/ (°)	0	18	44	79

综合理论分析和数值模拟可以看出,在相同参数条件下,理论分析和数值模拟得到的结果基本一致。

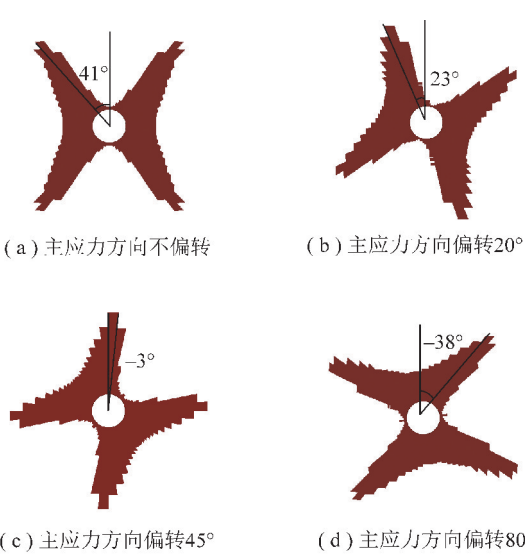


图 5 圆形巷道围岩塑性区分布形态示意(数值模拟)

Fig. 5 Distribution pattern of plastic zone in circular roadway rock surrounded(Numerical simulation)

当主应力方向发生偏转时,围岩蝶形塑性区的蝶叶会随之发生偏转,且偏转的角度与主应力方向的偏转角度基本相同,蝶形塑性区蝶叶具有显著的方向性。

3 蝶叶方向性的适用性分析

3.1 巷道断面形状对蝶叶方向性的影响

目前,煤矿井下常见的巷道断面形状有圆形、矩形和拱形。因此,本节将分别通过理论计算和数值模拟的方法研究断面形状对蝶形塑性区蝶叶方向性的影响。受制于现有数学力学方法的限制,矩形巷道和拱形巷道围岩的塑性区无法通过理论计算得到精确解。因此,对拱形巷道与矩形巷道塑性区边界进行理论计算时,采取外接圆的方式并利用式(5)计算得到其主应力方向发生偏转前后的塑性区形态对比图,如图 6,7 所示,并利用数值模拟进行验证分析。矩形巷道尺寸为 $4\text{ m}\times 3\text{ m}$;拱形巷道尺寸为上部半径 3 m ,下部尺寸 $6\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。由图 6,7 可以看出,随着主应力方

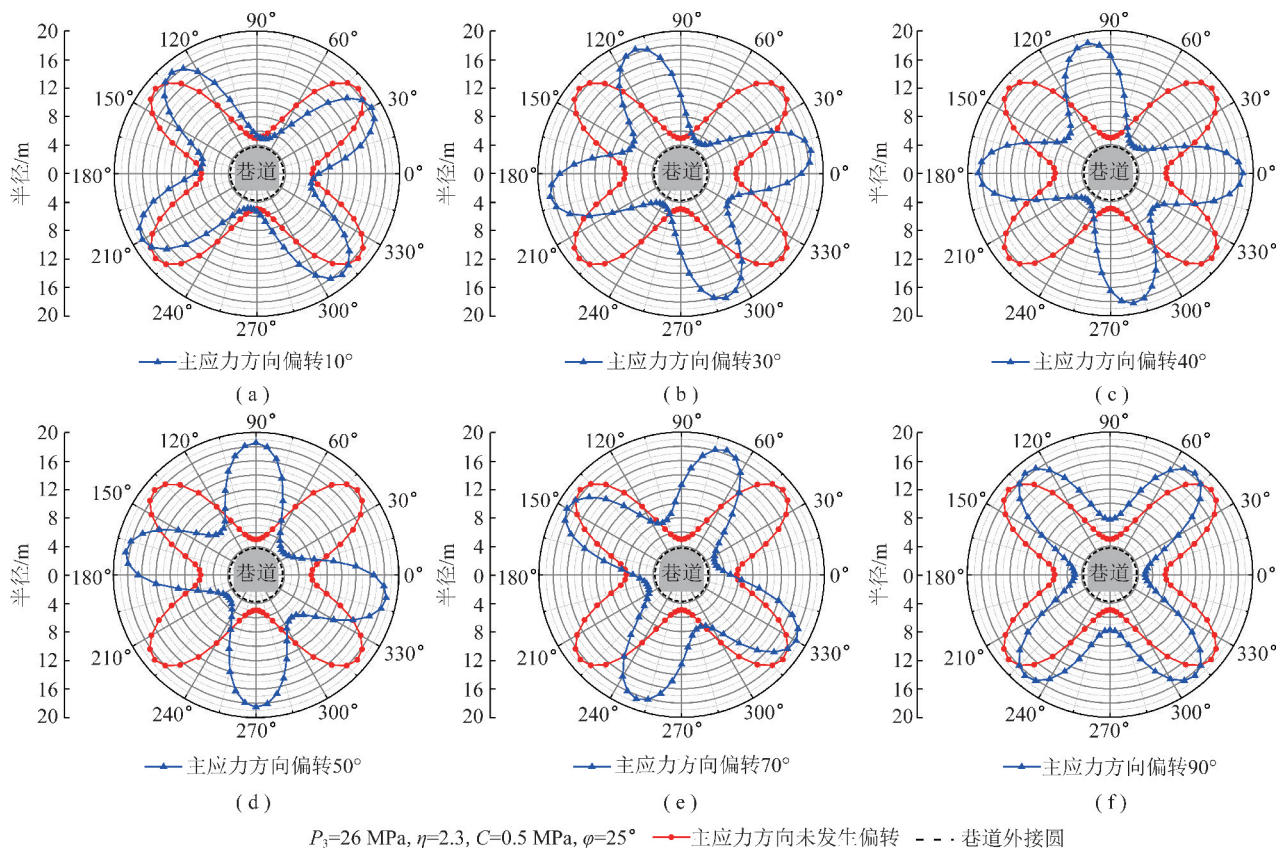


图 6 拱形断面巷道塑性区理论计算结果

Fig. 6 Theoretical calculation result of plastic zone in arched roadway

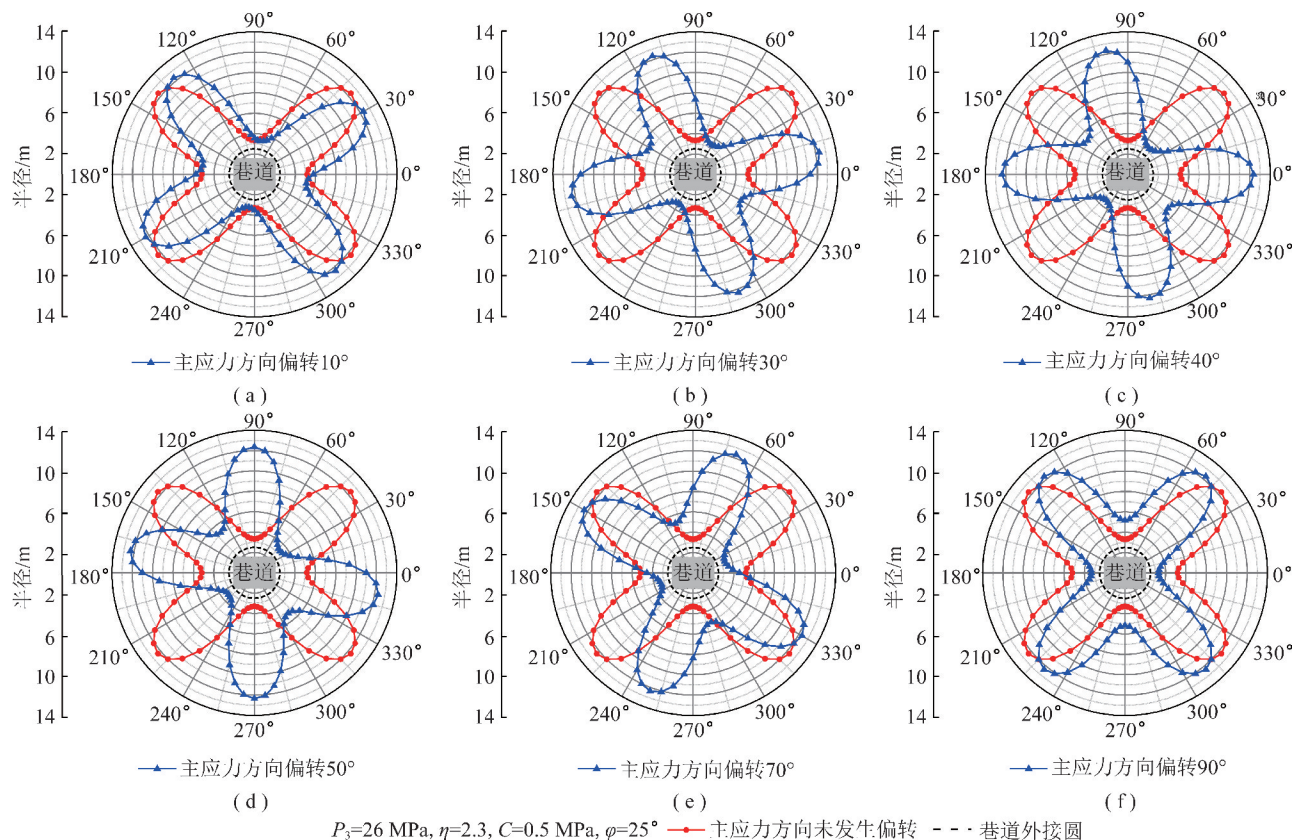


图 7 矩形断面巷道塑性区理论计算结果

Fig. 7 Theoretical calculation result of plastic zone in rectangular roadway

向的偏转,拱形巷道与矩形巷道的蝶形塑性区蝶叶同样会随之发生偏转,且两者的偏转角度相等(表 4)。

表 4 不同巷道断面形状塑性区蝶叶偏转角度(理论计算)
Table 4 Deflection angle of butterfly leaf in plastic zone of different roadway shapes (Theoretical calculation)

主应力偏转角度/(°)		10	30	40	50	70	90
蝶叶偏转	拱形巷道	10	30	40	50	70	90
角度/(°)	矩形巷道	10	30	40	50	70	90

为了验证上述理论计算的可靠性,采用数值模拟对矩形和拱形巷道的塑性区分布进行验证分析,数值模拟参数与理论计算保持一致,见表 5,其他模拟初始条件参数与圆形巷道相同。

数值模拟得到的不同巷道断面形状的塑性区

分布形态如图 8 所示,并以左上角的蝶叶为例,得到了蝶叶随主应力方向发生偏转时,其与竖直方向的夹角。由图 8 可以看出,当主应力方向发生偏转时,不同巷道断面形状条件下的围岩塑性区蝶叶位置均会发生偏转,且蝶叶位置的偏转角度与主应力方向的偏转角度基本一致,误差不超过 3°,见表 6。因此,围岩蝶形塑性区蝶叶的方向性与巷道断面形状无关。

表 5 数值模拟力学参数
Table 5 Numerical simulation of mechanical parameters

模型 介质	容重/ (kN·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
岩体	25	3.75	0.25	0.5	25	0.9

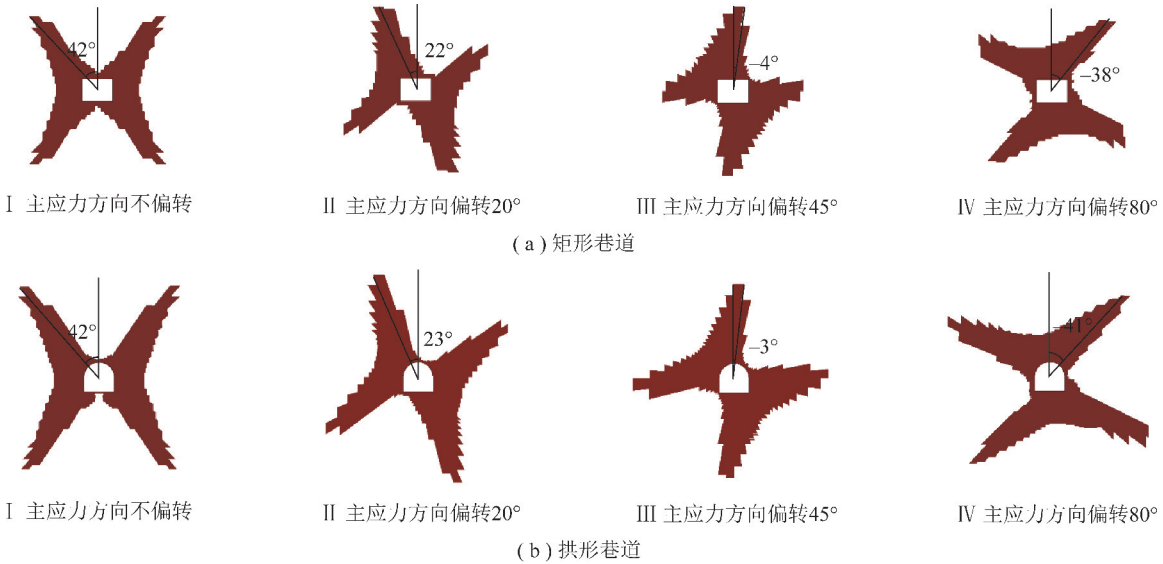


图 8 不同巷道断面形状塑性区分布形态
Fig. 8 Distribution pattern of plastic zone in different shape of roadway

表 6 不同巷道断面形状塑性区蝶叶偏转角度(数值模拟)
Table 6 Deflection angle of butterfly leaf in plastic zone of different roadway shapes (Numerical simulation)

主应力偏转角度/(°)		0	20	45	80
蝶叶偏转角度/(°)	矩形巷道	0	20	46	80
	拱形巷道	0	19	45	83

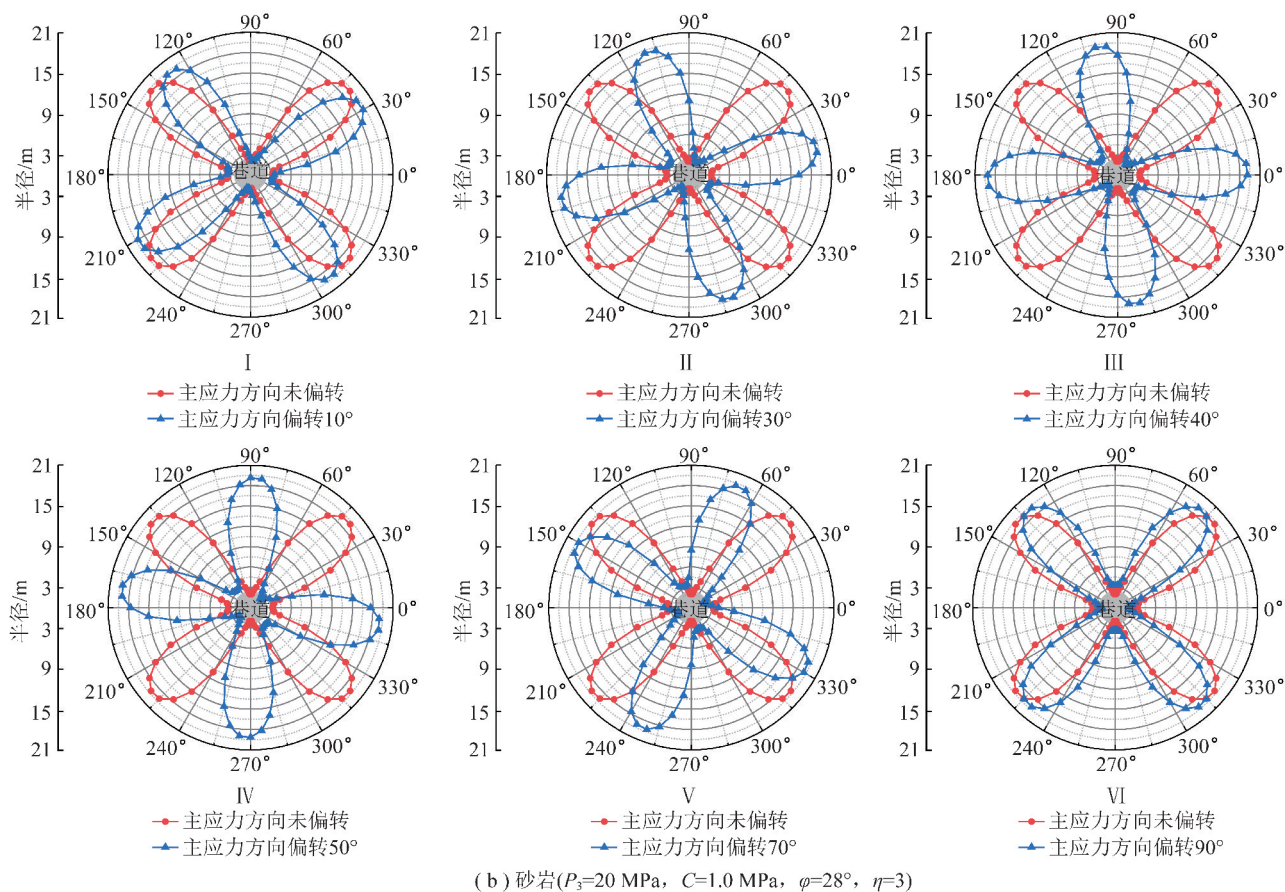
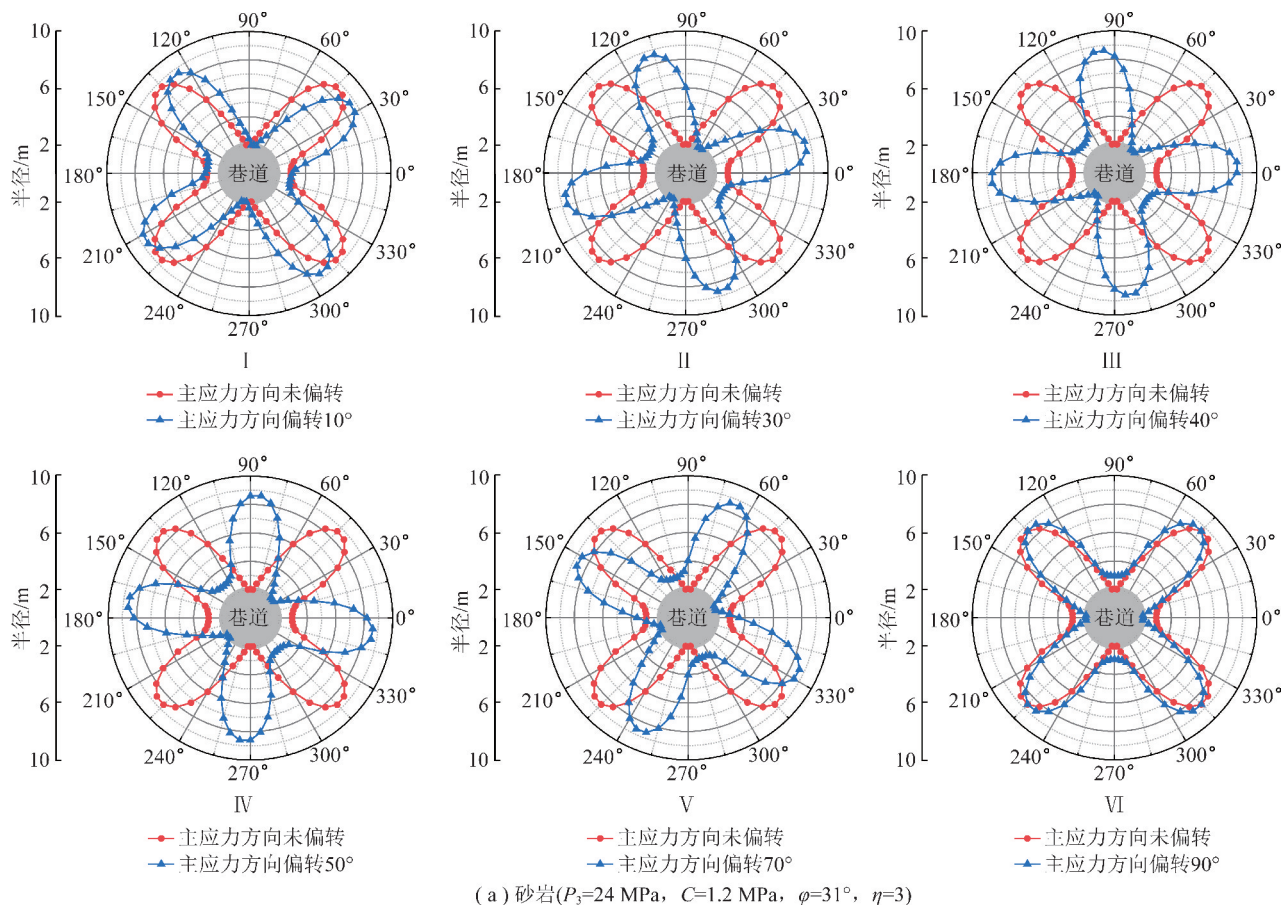
3.2 围岩性质对蝶叶方向性的影响

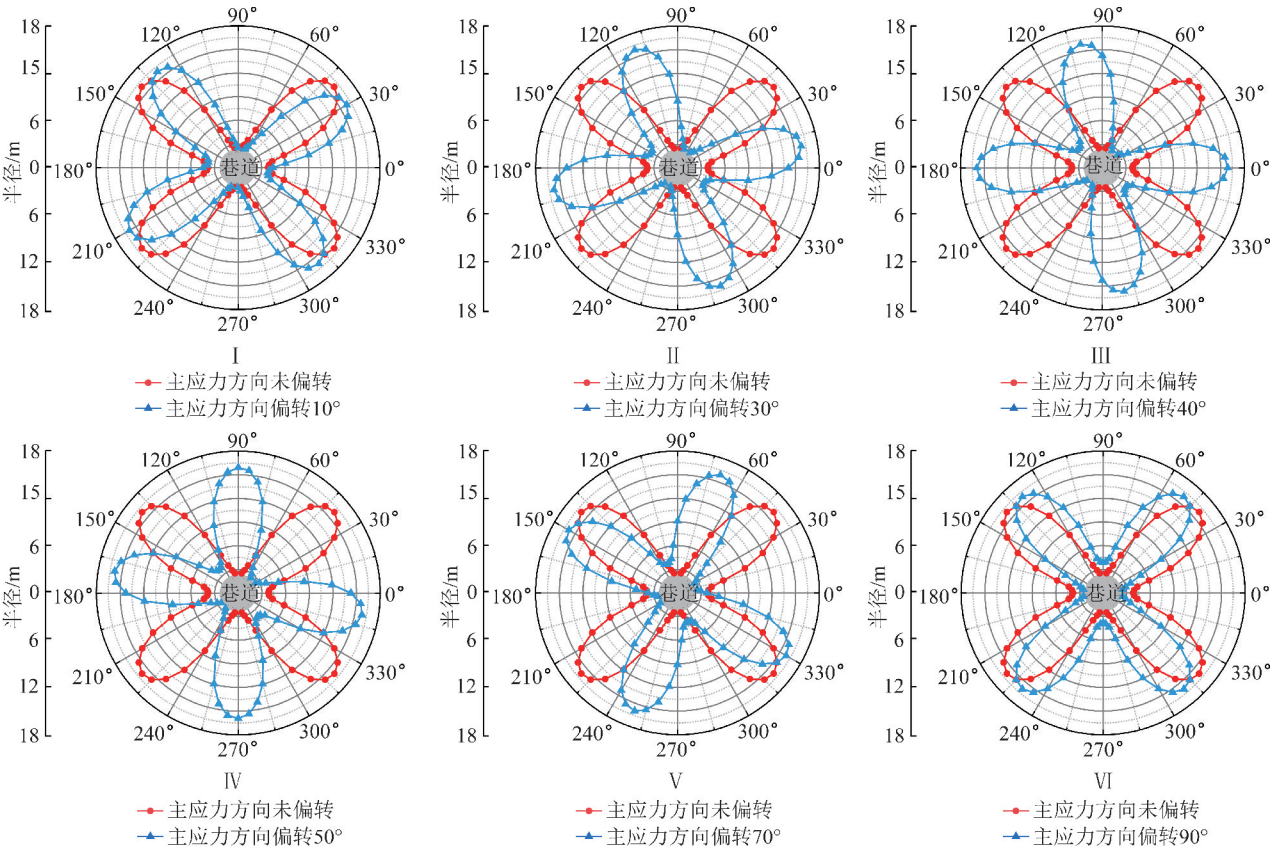
由于煤系地层多为沉积形成的层状岩体^[28],井下巷道围岩基本为沉积岩,造成不同岩层之间的围岩力学性质差异明显。因此,为了研究围岩性质对蝶形塑性区蝶叶方向性的影响,本节先对不同力学参数条件下围岩蝶形塑性区蝶叶方向性进行研究,再通过数值模拟研究巷道复合顶板条件对蝶形塑性区蝶叶方向性的影响。

3.2.1 力学参数

通过理论计算得到不同力学参数条件下圆形巷道围岩蝶形塑性区分布图,如图 9 所示。由图 9 可以看出,不同力学参数条件下,蝶形塑性区蝶叶均会随着主应力方向的偏转发生偏转,且偏转角度与主应力方向偏转角度一致,见表 7。因此,蝶形塑性区蝶叶的方向性与围岩力学参数条件无关。

同时,通过数值模拟得到了不同围岩力学参数条件下巷道围岩塑性区分布图,并以左上角的蝶叶为代表,得到其与竖直方向的夹角,如图 10 所示。可以看出,不同围岩力学参数条件下的围岩塑性区的形态均呈蝶形形态,虽然蝶叶的形状会因围岩力学参数的不同存在差异,但当主应力方向发生偏转时,围岩塑性区都会随之偏转,蝶叶位置也会随之发生改变,且偏转角度都与主应力方向偏转角度基本相同,误差不超过 3°,见表 8。





(c) 煤($P_3=17\text{ MPa}$, $C=1.0\text{ MPa}$, $\varphi=23^\circ$, $\eta=3$)

图 9 不同力学参数下塑性区边界理论计算分布

Fig. 9 Theoretical calculation distribution of plastic zone boundary under different mechanical parameters

表 7 不同力学参数下塑性区蝶叶偏转角度(理论计算)

Table 7 Deflection angle of butterfly leaf in plastic zone under different mechanical parameters (Theoretical calculation)

主应力方向偏转角度/(°)		10	30	40	50	70	90
蝶叶偏转角度/(°)	砂岩	10	30	40	50	70	90
	泥岩	10	30	40	50	70	90
	煤	10	30	40	50	70	90

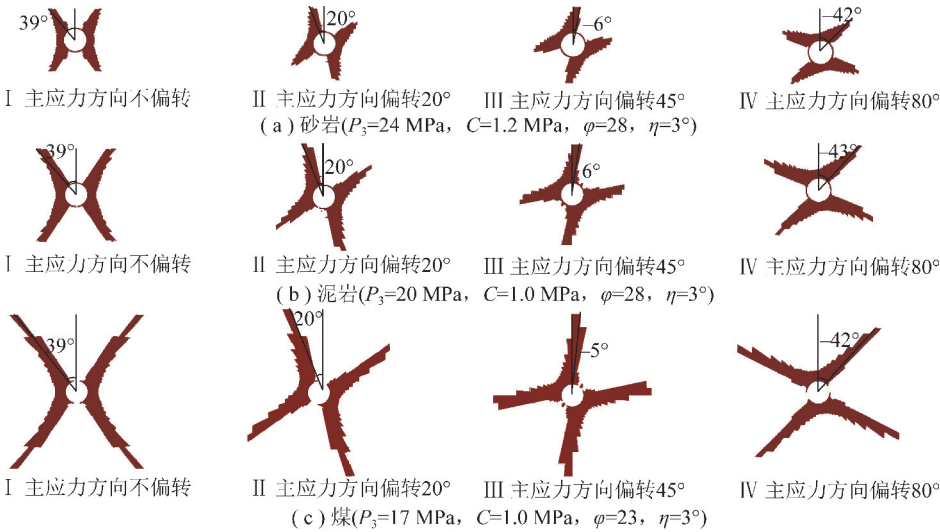


图 10 不同力学参数下塑性区分布形态数值模拟

Fig. 10 Numerical simulation of plastic zone distribution under different mechanical parameters

表 8 不同力学参数下塑性区蝶叶偏转角度(数值模拟)
Table 8 Deflection angle of butterfly leaf in plastic zone of different mechanical parameters (Numerical simulation)

主应力方向偏转角度/(°)		0	20	45	80
蝶叶偏转角度/(°)	砂岩	0	19	45	81
	泥岩	0	19	45	82
	煤	0	19	44	81

3.2.2 层状岩层

由于层状岩层条件下的塑性区无法利用理论计算得到,故利用数值模拟对 4 种类型的层状岩层顶板

结构的围岩塑性区分布形态进行研究,分别为下软上硬型、下硬上软型、软弱夹层型及坚硬夹层型顶板结构,各结构组成见表 9,岩层及其岩石力学参数见表 10,模拟结果如图 11 所示。

表 9 层状结构顶板岩性组成 Table 9 Lithologic composition of layered roof	
顶板结构岩层类型	岩性组成(由下至上)
下软上硬型	煤—泥岩—砂岩
下硬上软型	砂岩—砂质泥岩—泥岩
软弱夹层型	砂岩—泥岩—砂岩
坚硬夹层型	泥岩—砂岩—泥岩

表 10 模型岩层力学参数
Table 10 Mechanical parameters of model rock stratum

岩性	容重/(kN·m ⁻³)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
砂岩	2 500	1.9	3.8	1.20	31	0.50
砂质泥岩	2 350	1.5	2.2	1.15	30	0.48
泥岩	2 100	1.3	1.5	1.00	28	0.46
煤	1 800	0.9	1.2	1.00	23	0.40

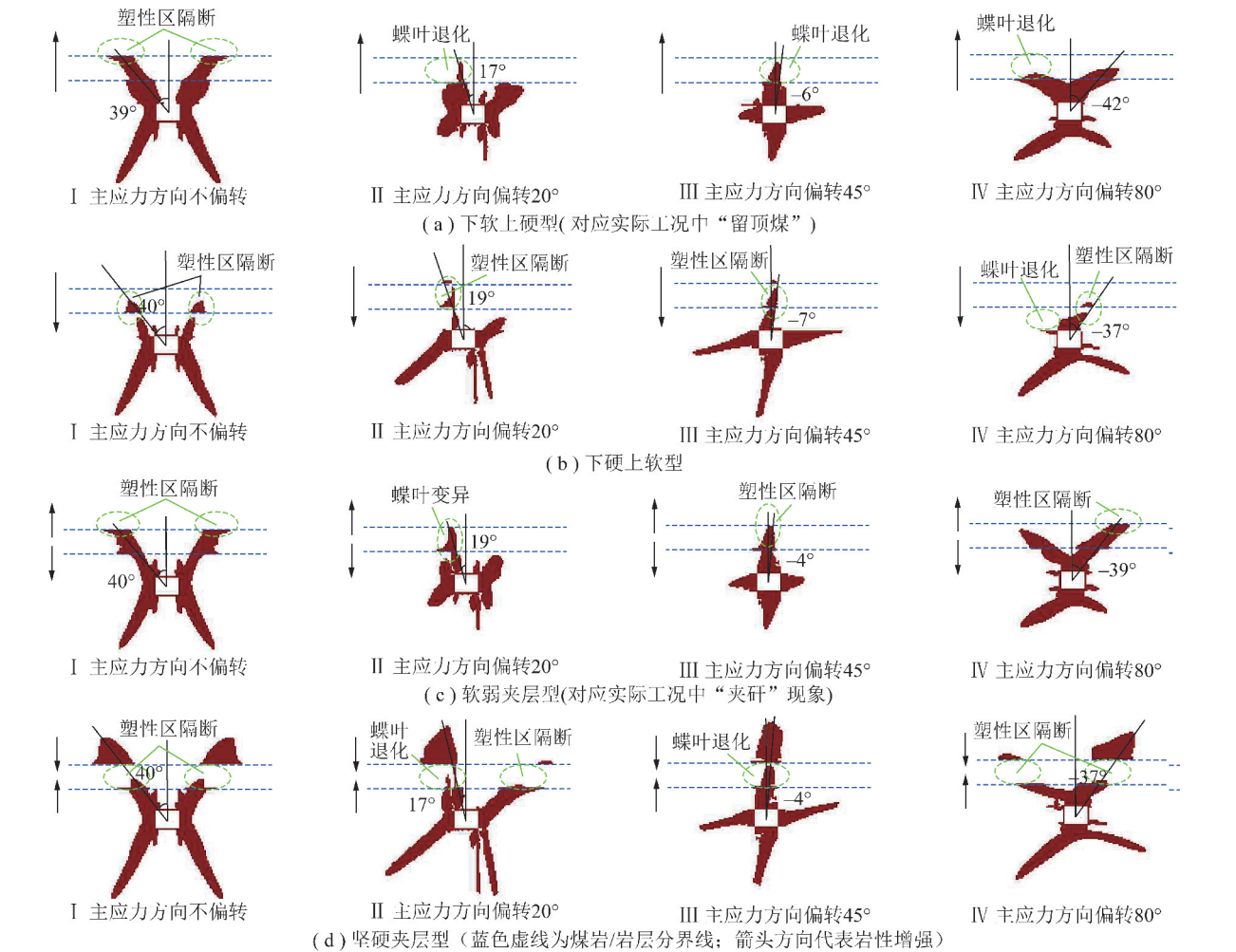


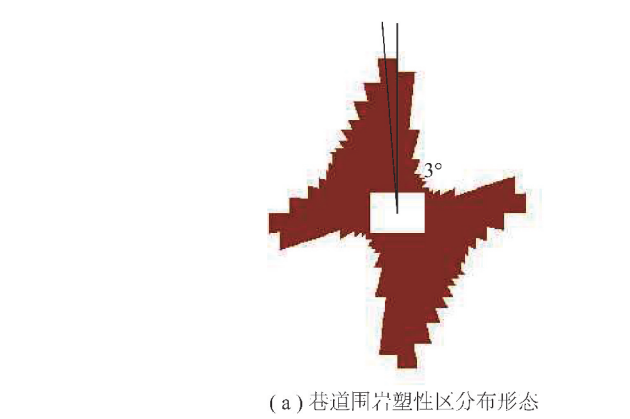
图 11 层状岩层顶板条件巷道围岩塑性区形态

Fig. 11 Plastic zone of surrounding rock of roadway under condition of layered rock roof

由图 11 可知,由于顶板层状岩层的围岩性质存在差异,因此围岩中较为坚硬岩层的存在会限制蝶叶塑性区的扩展,甚至使塑性区出现彻底隔断^[29],同时,受到围岩岩性的影响,塑性区蝶叶会发生不同程度的退化等变异现象^[25]。但蝶叶方向性不会因发生变异或塑性区隔断现象而消失,塑性区蝶叶同样会随着主应力方向的偏转而偏转,且两者偏转角度基本保持一致,误差同样不超过 3°,见表 11。

表 11 层状岩层顶板条件巷道围岩塑性区蝶叶偏转角度 (数值模拟)

Table 11 Butterfly leaf deflection angle in plastic zone of roadway surrounding rock under roof condition of layered strata (numerical simulation)					
主应力方向偏转角度/(°)		0	20	45	80
蝶叶偏转 角度/(°)	下软上硬型	0	22	45	81
	下硬上软性	0	21	47	77
	软弱夹层型	0	21	44	79
	坚硬夹层性	0	23	44	77



综上所述,不同巷道断面形状和围岩性质条件下,蝶形塑性区蝶叶均会随主应力方向偏转而发生偏转,且两者的偏转角度基本相等(误差不超过 3°),蝶形塑性区蝶叶方向性与断面形状和围岩性质无关,具有普适性。

4 蝶叶方向性对围岩稳定性的影响

为了分析巷道围岩变形量与围岩蝶形塑性区形态的联系,利用 FLAC^{3D} 数值模拟得到了围岩主应力方向偏转 40°时(图 12)的围岩塑性区分布形态及巷道变形量等值线图。

由图 12 可以看出,巷道顶板左侧上方岩层、巷道左帮上部围岩、巷道右帮下部围岩和顶板右侧下部围岩由于形成了蝶叶塑性区,其塑性区尺寸较大,且与之对应的左侧上方岩层的下沉量、巷道左帮上部围岩和巷道右帮下部围岩的变形量、顶板右侧下部岩层的底臃量也比巷道其他位置围岩变形量大,巷道围岩变形量和塑性区尺寸呈正相关性。

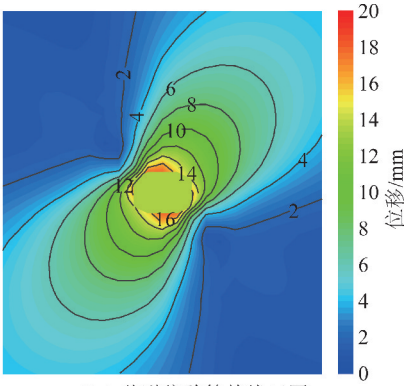


图 12 主应力方向偏转 40°时塑性区与位移关系对比

Fig. 12 Comparison of the relationship between plastic zone and displacement when the principal stress direction is deflected by 40°

同时,通过对比分析不同主应力方向下矩形巷道蝶形塑性区分布图(图 8(a))可以看出,主应力方向未发生偏转时,巷道塑性区蝶叶主要位于巷道 4 个尖角处的深部围岩中,这与普遍认为矩形巷道尖角处围岩的变形破坏较严重是相符的;而当主应力发生偏转时,巷道塑性区蝶叶不再位于巷道尖角处位置围岩中,其会随着主应力方向偏转而位于巷道不同位置的围岩中,这就解释了在某些深部巷道中其变形破坏严重的位置并非一定出现在巷道尖角处,蝶叶方向性会导致围岩的变形破坏具有非对称性。

综上所述,蝶形塑性区的蝶叶即为围岩塑性破坏范围,而蝶形塑性区尺寸与围岩变形量呈正相关性。当围岩塑性区的形态不再呈现均匀形态而呈现为蝶形分布形态时,蝶形塑性区蝶叶方向性会使蝶叶位于巷道围岩的不同位置,导致巷道围岩不同位置的变形

破坏呈现差异化分布特征。尤其当塑性区蝶叶位于巷道顶板位置时,蝶叶塑性破坏范围会成为巷道顶板的冒顶高风险区域。在实际工程中,由受围岩低抗拉特性及节理化等特征的影响,巷道的实际冒顶形态与顶板塑性区蝶叶形态无法完全吻合,但产生蝶叶塑性区的顶板位置仍是冒顶的高发区域。

5 工程应用

赵固二矿 11030 工作面运输巷与 11011 采空区留设 8 m 窄煤柱掘进(图 13),断面尺寸高 3.3 m×宽 4.8 m,埋深 700 m 左右,巷道顶板岩层主要为泥岩、砂质泥岩和大占砂岩,底板岩层为砂质泥岩和泥岩。该巷道掘进期间,巷道断面收敛严重,矿压显现剧烈。现场矿压监测数据显示,巷道围岩变形呈现明显的非均匀大变形特征,如图 14 所示。

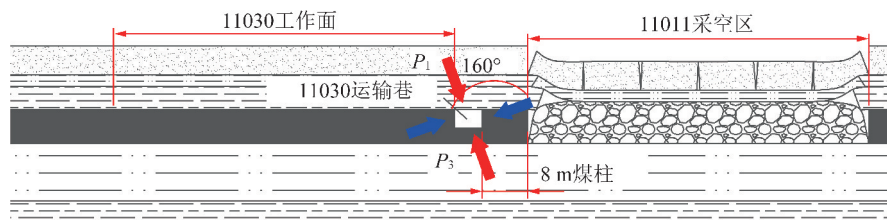
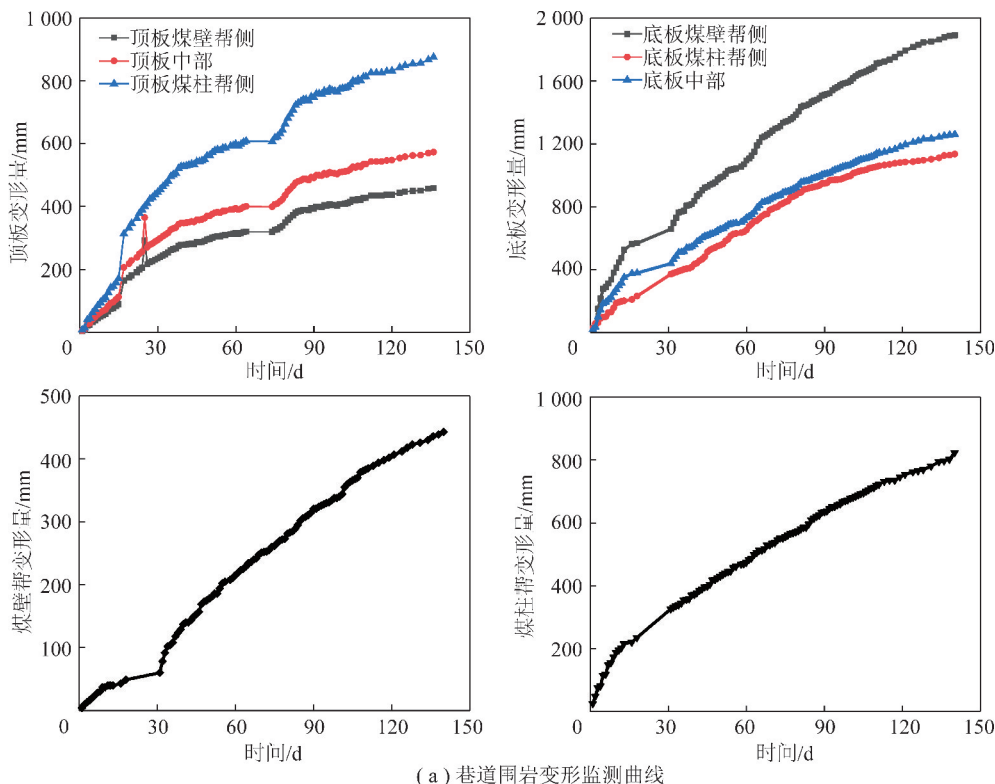
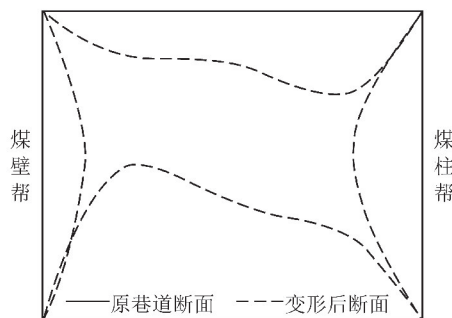


图 13 巷道位置与工作面布置

Fig. 13 Roadway location and working face layout



(a) 巷道围岩变形监测曲线



(b) 巷道变形轮廓

图 14 11030 运输巷非均匀变形特征

Fig. 14 Non-uniform deformation characteristics of 11030 headgate

11030 运输巷围岩破坏现场探测如图 15 所示, 根据文献[30]研究, 当煤柱尺寸为 8 m 时, 围岩应力场主应力方向大致会逆时针偏转 20° 左右, 导致其围岩塑性区分布特征如图 16 所示, 塑性区蝶叶分别位于巷道顶板煤柱帮侧、底板煤壁帮侧、煤柱帮煤体及煤壁帮煤体, 与围岩现场探测破坏形态基本吻合。

通过对比 11030 运输巷巷道变形特征和 11030

运输巷由数值模拟得到的围岩塑性区分布形态可以看出(图 16), 巷道围岩塑性区分布形态与围岩的非均匀大变形特征高度一致。围岩应力场主应力方向偏转导致塑性区蝶叶分别位于巷道围岩不同位置, 塑性区深度较大的蝶叶位置的围岩变形量相对较大。因此, 蝶叶方向性是导致巷道围岩出现非均匀大变形的的主要原因。

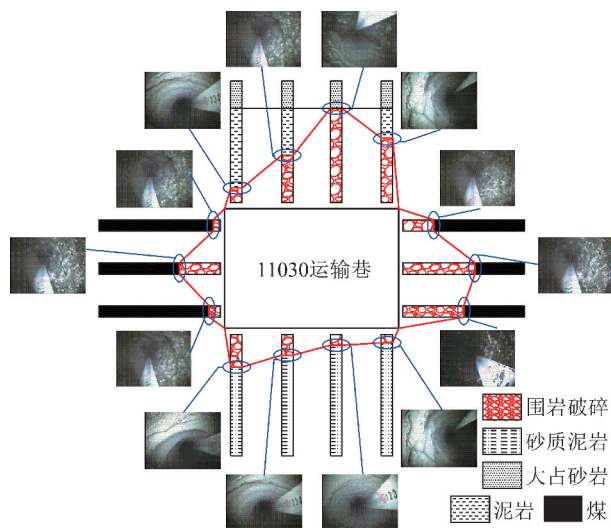


图15 11030运输巷围岩破坏现场探测

Fig. 15 Field detection diagram of surrounding rock failure of 11030 headgate

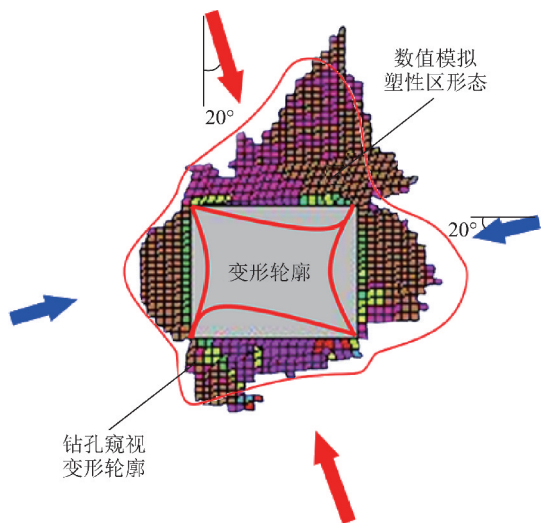


图16 11030工作面运输巷围岩非均匀变形破坏机理

Fig. 16 Non-uniform deformation failure mechanism diagram of 11030 headgate rock surrounded

6 结 论

(1)当主应力方向发生偏转时,蝶形塑性区蝶叶会随之发生一定的偏转,且主应力方向偏转角度与蝶叶偏转角度基本相等,蝶形塑性区蝶叶具有显著的方向性。

(2)不同断面形状和围岩性质条件下的巷道蝶形塑性区蝶叶,均会随主应力方向偏转而随之发生偏转,即蝶叶方向性不受断面形状及围岩性质的影响,具有普适性。

(3)蝶形塑性区蝶叶方向性决定了蝶叶产生的位置,导致蝶叶位置的围岩变形破坏程度相对严重,且巷道围岩的变形破坏特征与蝶形塑性区分布特征

高度一致。

参考文献 (References) :

- [1] ZUO Jianping, WANG Jintao, JIANG Yunqian. Macro/meso failure behavior of surrounding rock in deep roadway and its control technology [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2019, 6(3): 301-319.
- [2] 吴拥政,何杰,司林坡,等. 义马矿区深部矿井地应力分布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 16-21.
WU Yongzheng, HE Jie, SI Linpo, et al. Study on geostress distribution law of deep mine in Yima Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 16-21.
- [3] 于洋,柏建彪,张树娟,等. 双翼采动大巷群围岩灾变机理与修复加固体系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1133-1141.
YU Yang, BAI Jianbiao, ZHANG Shujuan, et al. Disaster mechanism of surrounding rock with double wing mining roadway group and its repair and reinforcement system [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1133-1141.
- [4] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 969-978.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 969-978.
- [5] 赵志强,马念杰,郭晓菲,等. 大变形回采巷道蝶叶型冒顶机理与控制 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2932-2939.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, et al. Falling principle and support design of butterfly-failure roof in large deformation mining roadways [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2932-2939.
- [6] 李学华,姚强岭,张农. 软岩巷道破裂特征与分阶段分区控制研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 618-623.
LI Xuehua, YAO Qiangling, ZHANG Nong. Fracture characteristics of a soft rock roadway: Staged and zoned control [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 618-623.
- [7] 王其洲,谢文兵,荆升国,等. 非均称变形巷道变形破坏规律及支护对策 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 985-991.
WANG Qizhou, XIE Wenbing, JING Shengguo, et al. Support countermeasure and deformation law of roadway with non-symmetrical deformation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6): 985-991.
- [8] A. π. 希罗科夫. 锚杆支护手册 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [9] 孙玉福. 水平应力对巷道围岩稳定性的影响 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 891-895.
SUN Yufu. Affects of in-situ horizontal stress on stability of surrounding rock roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 891-895.
- [10] 朱志洁,张宏伟,韩军,等. 不同应力场条件下巷道稳定性研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 11-16.
ZHU Zhijie, ZHANG Hongwei, HAN Jun, et al. Research on stability of roadway under different conditions of stress field [J]. Journal

- of Safety Science and Technology, 2015, 11(11): 11–16.
- [11] 高圣元, 赵维生, 赵铁林, 等. 深埋背斜软层巷道围岩稳定性演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 495–503.
GAO Shengyuan, ZHAO Weisheng, ZHAO Tielin, et al. The stability evolution law of surrounding rock of deep-buried roadway with anticlinal soft strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 495–503.
 - [12] 赵亮, 陈渊, 封金权. 东滩煤矿围岩水平应力对巷道影响分析[J]. 煤炭工程, 2009(8): 82–84.
ZHAO Liang, CHEN Yuan, FENG Jinquan. Analysis of the effect of the horizontal stress on the roadway of Dongtan coal mine surrounding rock[J]. Coal Engineering, 2009(8): 82–84.
 - [13] 高富强. 最大水平主应力对巷道围岩稳定性影响的数值分析[J]. 矿业研究与开发, 2008(1): 62–64.
GAO Fuqiang. Numerical analysis on the influence of maximum horizontal principal stress on surrounding rock stability of roadway[J]. Mining Research and Development, 2008(1): 62–64.
 - [14] 赵龙. 水平应力对巷道布置影响的数值模拟[J]. 山西焦煤科技, 2016(S1): 38–40.
ZHAO Long. Numerical simulation of the effect of horizontal stress on lane layout[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2016(S1): 38–40.
 - [15] 田成东, 白海波. 巷道尺寸及布置对围岩稳定性的影响分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(8): 220–223.
TIAN Chengdong, BAI Haibo. Impact analysis of roadway size and layout on stability of surrounding rock[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(8): 220–223.
 - [16] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911–926.
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JIN Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911–926.
 - [17] 张文忠. 地堑状断层组影响下采动主应力偏转规律研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 44–49.
ZHANG Wenzhong. Research on the law of the principal stress deflection for the underground coal mining with the graben fault[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 39(6): 44–49.
 - [18] 周钢, 李玉寿, 张强, 等. 陈四楼矿综采工作面采场应力监测及演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1087–1092.
ZHOU Gang, LI Yushou, ZHANG Qiang, et al. Research on monitoring technique and evolution law of the disturbance stress in Chensilou Colliery[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1087–1092.
 - [19] 陈上元, 宋常胜, 郭志飏, 等. 深部动压巷道非对称变形力学机制及控制对策[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 246–254.
CHEN Shangyuan, SONG Changsheng, GUO Zhibiao, et al. Asymmetric deformation mechanical mechanism and control countermeasure for deep roadway affected by mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 246–254.
 - [20] 王家臣, 王兆会, 杨杰, 等. 千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 876–888.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, YANG Jie, et al. Mining-induced stress rotation and its application in longwall face with large length in kilometer deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 876–888.
 - [21] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983: 161–169.
 - [22] 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 Nianjie, LI Ji, ZHAO Zhiqiang. 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.
 - [23] 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 Nianjie, LI Ji, ZHAO Xidong, 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.
 - [24] 郭晓菲, 郭林峰, 马念杰, 等. 巷道围岩蝶形破坏理论的适用性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 646–653, 660.
GUO Xiaofei, GUO Linfeng, MA Nianjie, et al. Applicability analysis of the roadway butterfly failure theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(4): 646–653, 660.
 - [25] 李季, 马念杰, 赵志强. 回采巷道蝶叶形冒顶机理及其控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 46–52.
LI Ji, MA Nianjie, ZHAO Zhiqiang. Butterfly leaf type roof falling mechanism and control technology of mining gateway[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 46–52.
 - [26] MA Nianjie, GUO Xiaofei, ZHAO Xidong, et al. Theoretical analysis and application about permeability-increasing radius of drilling for simultaneous exploitation of coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 120–127.
 - [27] 王卫军, 董恩远, 袁超. 非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 105–114.
WANG Weijun, DONG Enyuan, YUAN Chao. Boundary equation of plastic zone of circular roadway in non-axisymmetric stress and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 105–114.
 - [28] 蒋力帅, 马念杰, 白浪, 等. 巷道复合顶板变形破坏特征与冒顶隐患分级[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1205–1211.
JIANG Lishuai, MA Nianjie, BAI Lang, et al. Deformation and failure characteristics and roof caving hidden danger classification of roadways compound roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1205–1211.
 - [29] 贾后省, 马念杰, 朱乾坤. 巷道顶板蝶叶塑性区穿透致冒顶机理与控制方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1384–1392.
JIA Housheng, MA Nianjie, ZHU Qiankun. Mechanism and control method of roof fall resulted from butterfly plastic zone penetration[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1384–1392.
 - [30] 李季. 深部窄煤柱巷道非均匀变形破坏机理及冒顶控制[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016: 48–49.
LI Ji. The non-uniform deformation failure mechanism and roof control of narrow coal pillar roadway in depth[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2016: 48–49.