

式中： $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ 分别为径向应力、环向应力和剪应力； r 为极径坐标； θ 为极角坐标； a 为巷道半径。

选取简单而又实用的 Mohr-Coulomb 屈服准则，其屈服条件式为

$$\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2}{4} + \tau_{r\theta}^2 = \left[\frac{(\sigma_r + \sigma_\theta)^2}{4} - c^2 \right] \frac{(1 - \cos 2\varphi)}{2} + \frac{(\sigma_r + \sigma_\theta)}{2} c \sin 2\varphi + c^2. \quad (2)$$

式中： c 为黏聚力； φ 为内摩擦角。

令塑性区边界为 R ，将式(1)代入式(2)，得出文献[16]推导出的非均匀应力场中圆形巷道围岩塑性区边界隐性方程为

$$\begin{aligned} & 9\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \left(\frac{a}{r}\right)^8 - \left[12\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 - 6\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \cos 2\theta\right] \left(\frac{a}{R}\right)^6 + \\ & \left[10\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos^2 2\theta - 4\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \sin^2 \varphi \cos^2 2\theta - 2\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \sin^2 2\theta - 4\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \cos 2\theta + \left(1 + \frac{P_1}{P_3}\right)^2\right] \left(\frac{a}{R}\right)^4 + \\ & \left[-4\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos 4\theta + 2\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \cos 2\theta - 4\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \sin^2 \varphi \cos 2\theta - \frac{4c(P_3 - P_1) \sin 2\varphi \cos 2\theta}{P_3^2}\right] \left(\frac{a}{R}\right)^2 + \\ & \left[\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 - \sin^2 \varphi \left(1 + \frac{P_1}{P_3} + \frac{2c \cos \varphi}{P_3 \sin \varphi}\right)^2\right] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

通过编制计算机程序，可将式(3)绘制成塑性区边界分布图(如图2)，其中 $P_1 = 20$ MPa, $\lambda = P_3/P_1$, $a = 1$ m, $c = 2.5$ MPa, $\varphi = 25^\circ$, λ 值分别取 1.0, 1.3, 1.6, 1.9, 2.2, 2.5。

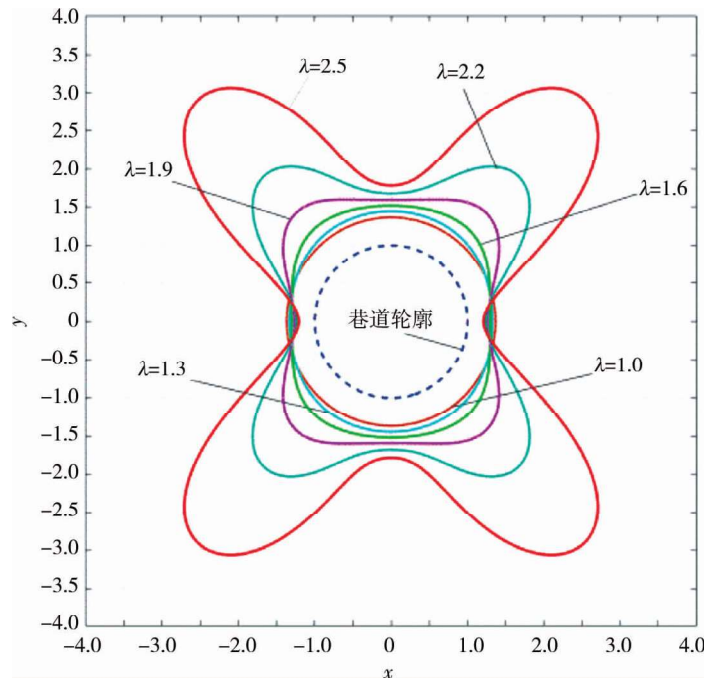


图2 理论计算下不同 λ 塑性区分布

由图2分析可知，随着 λ 值的增大，塑性区由圆形→椭圆形→圆角矩形→蝶形发展，并且塑性区最大尺寸也逐渐增加。为研究塑性区最大尺寸与 λ 值的关系，设 $K = \Delta R_{\max} / \Delta \lambda$ ，其中 K 为塑性区敏感系数， $\Delta \lambda$ 为 λ 的变化绝对值， ΔR_{\max} 为塑性区最大半径变化绝对值，这里令 $\Delta \lambda = 0.1$, $P_1 = 20$ MPa, $a = 1$ m, $c = 2.5$ MPa, $\varphi = 25^\circ$ ，当 λ 不同时，可以得到不同的 P_3 值，分别代入式(3)可得到 K 值曲线图。

考虑到 λ 取值的有意义性,即在开挖巷道前围岩不能为塑性状态,取 $1 \leq \lambda \leq 2.85$.如图3所示的 K 值曲线图, K 值随着 λ 值的增加逐渐增加,当 $1.0 \leq \lambda \leq 2.0$ 时, K 值增加较平稳,并且其值在2以下,此时为稳态塑性区; $2.0 < \lambda \leq 2.4$ 时, K 值有较大幅度增加,但其值小于5,为亚稳态塑性区; $2.4 < \lambda \leq 2.85$, K 值急剧增加,并趋向无穷,此时为恶化塑性区.

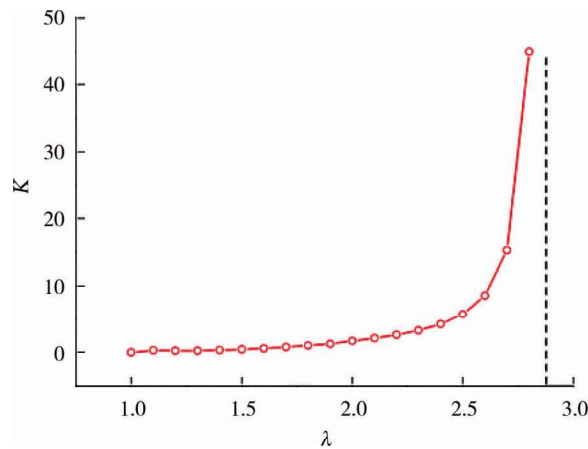


图3 K 值曲线图

2 巷道围岩塑性区数值模拟分析

理论公式是利用经典弹性力学理论推导出的,将围岩设为理想弹塑性体,并未考虑岩石的剪胀效应和岩石扩容等,因而还需借助模拟软件对理论公式进行对比和分析,同时相较于塑性区位移解析解,数值模拟更加直观,易懂.为便于分析塑性区形态与巷道位移之间的关系,利用大型有限差分商业程序 FLAC^{3D} 进行建模,并对模型进行如下简化处理:(1)不计岩体自重;(2)巷道为深埋圆形平巷,围岩看作均质、连续、各向同性的岩体材料;(3)模型在 Y 向的尺寸远大于其他两向的尺寸,作平面应变问题处理;(4)模型四周边界及前后约束全部法向位移.模型大小为 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$,为与理论公式代入参数相同,巷道半径为 1 m , λ 值分别取 $1.0, 1.3, 1.6, 1.9, 2.2, 2.5$,体积模量和剪切模量分别为 1.8 GPa 和 1.1 GPa ,内摩擦角 25° ,内聚力 2.5 MPa ,抗拉强度 2.1 MPa ,岩体密度为 1500 kg/m^3 .

2.1 不同 λ 塑性区形态分析

图4为不同 λ 值时塑性区形态分布,其基本与理论计算所得的塑性区形态一致,理论计算解能体现塑性区的一般形态变化规律,但数值模拟塑性区范围较理论计算大.

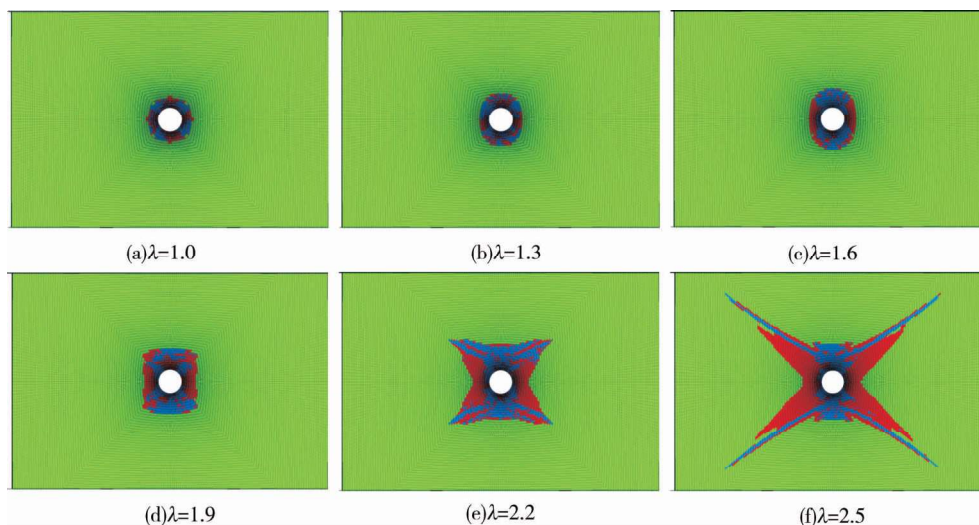


图4 数值模拟不同 λ 下巷道塑性区分布

同时由图4可以看出,随着侧压的增加,塑性区面积逐渐增大,塑性区形态由圆形→椭圆→圆角矩形→蝶形发展,塑性区最大半径 R_{max} 随着侧压的增加而加大,但是增加的幅度却有很大差别:塑性区由圆形→椭圆→圆角矩形(如 λ 由1.0→1.6→1.9)时,其最大半径 R_{max} 由 $1.93a$ 增加至 $2.52a$ 直至 $3.13a$,相比之下,当出现蝶形塑性区时($\lambda=2.2$),塑性区最大半径达到了 $5.44a$,可见蝶形塑性区围岩的塑性破坏深度明显比其他形状塑性区偏大, λ 继续增大,塑性区最大半径 R_{max} 急剧扩展(R_{max} 由 $5.44a$ 增大到 $11.43a$),出现恶化塑性区,此时巷道蝶叶部分围岩处于不稳定状态,极易发生大变形或者垮落^[9,17,18]。

2.2 不同 λ 巷道位移分析

巷道开挖后位移云图如图5,塑性区为圆形时,位移云图也是圆形,云图中位移变化量在浅部数值较大,巷道开挖后主要影响的是围岩浅部的位移,随着 λ 值的增加,位移云图开始呈 ∞ 形,巷道周边的位移也随之增大,影响范围也逐渐增加,但 λ 值在1.3~2.5时水平方向的位移影响深度比竖向的大,并且竖向位移影响区域从 $\lambda=2.2$ 时开始明显增大。

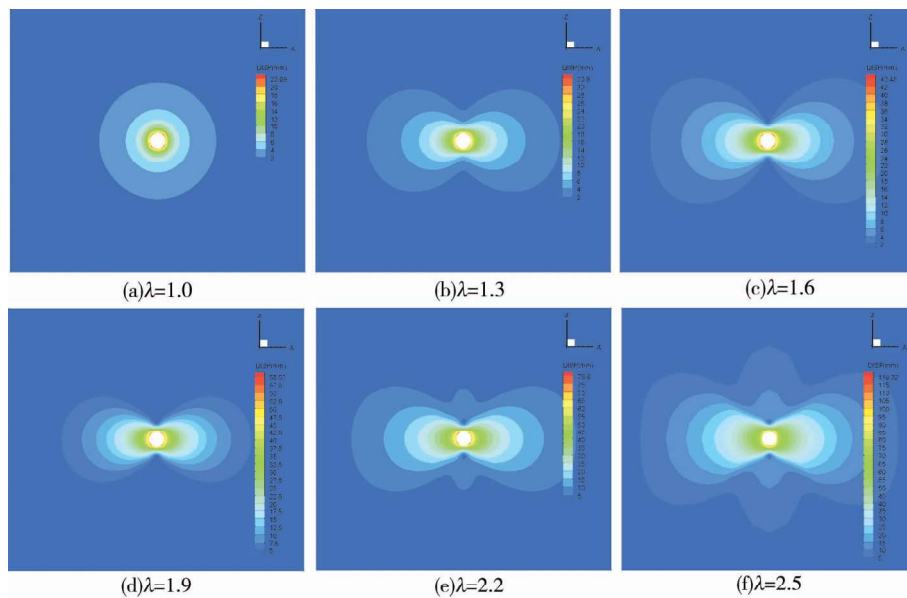


图5 不同 λ 下巷道位移分布

巷道围岩支护往往关注的是巷道表面的位移变化,因此在圆形巷道表面上下顶点和左右侧帮布置监测点,取均值后得到不同 λ 值下巷道顶板和两帮变形情况如图6.结合2.1分析,从图中可以看出,随着 λ 值的增加,蝶形塑性区特征越明显时顶底板和帮部变形量越大,且两者增加的幅度相差不多,即在相同埋深的情况下,蝶形塑性区所对应的巷道围岩变形较其他形态塑性区大,但当 $\lambda=2.2, 2.5$ (蝶形塑性区)时,巷道顶底板位移较帮部位移小。

在圆形巷道表面顶点到右帮按顺时针方向每过 10° 布置位移测点,共计10个,得出数据统计如图7.当 $\lambda=1$ 时,巷道周边位移基本相同,此状态下巷道表面变形量与 θ 无关, λ 值增加时,巷道表面变形量也增加,并且变形最大处随着 λ 值增加逐渐明显.具体来说, $\lambda=1.3$,巷道各处位移量相差不大,最大与最小位移差仅为3 mm; $\lambda=1.6$ 和1.9时,变形最大值均出现在 $\theta=40^\circ$,但表面变形差仍旧不明显; $\lambda=2.2, 2.5$ (蝶形塑性区)时,变形最大值出现在 $\theta=50^\circ$ 处,量测蝶形塑性区蝶叶中心线所对应的 θ 均为 51° ,变形最大方位与蝶形塑性区蝶叶方位具有高度的一致性,通过对 $\lambda=2.5$ 时位移图放大后发现(如图8),巷道表面最大变形处的影响深度为巷道半径的 $1/10\sim 1/5$,即蝶形塑性区蝶叶处对巷道表面对应处的变形有一定的影响,但影响主要在于巷道浅部较小范围.当 $\lambda=2.5, \theta=20^\circ$ 时,围岩表面变形出现最小值.如图9为 $\lambda=2.5$ 情况下的位移矢量图,图9可以看出在巷道顶底板 $\theta=0^\circ\sim 30^\circ$ 位移矢量线较为集中.在高侧向压力下(即 λ 值较大的情况下),由于侧向高应力的作用,巷道受到两侧高应力的“挤压”后,顶底板以及两帮同时向形变耗能较小的方向发生转移,侧向应力高,位移转移多,因而顶底板与两帮位移转移“交界面”处在顶底板 $\theta=0^\circ\sim 30^\circ$,在“交界面”处岩体相互“挤压”作用使位移在此出现了最小值。

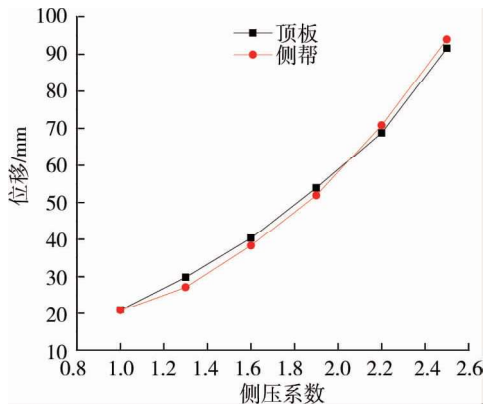


图 6 不同 λ 值巷道顶板和侧帮表面位移监测

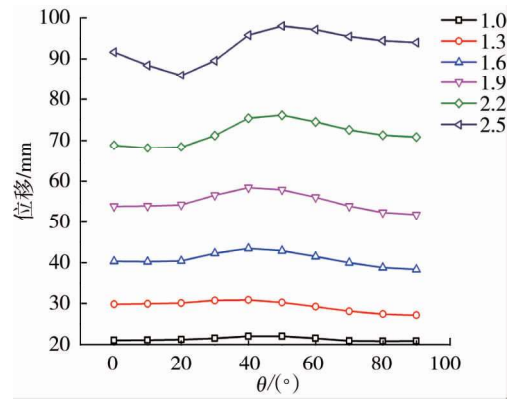


图 7 不同角度下巷道表面位移监测

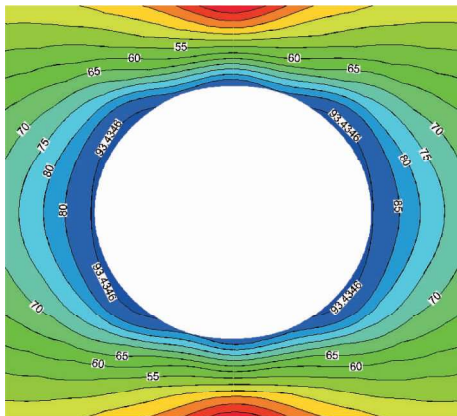


图 8 巷道浅部位移云图(mm)

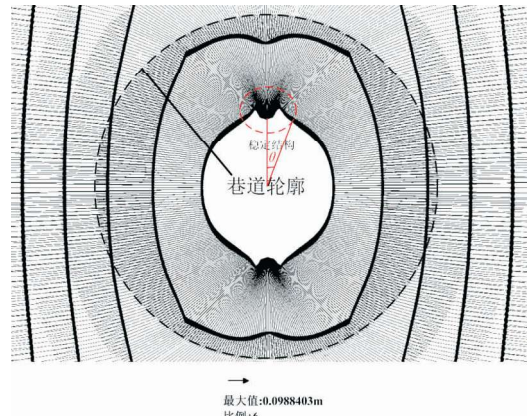


图 9 巷道周边位移矢量图

3 现场实例分析

3.1 工程背景

江西曲江矿目前开采水平为-850 m,埋深超过 900 m.主采 B4 煤层平均厚度约 2.8 m,煤体主要为半暗半亮型,煤层平均倾角约 12°,B4 煤直接顶主要有砂质泥岩、泥岩与煤线互层组成,底板主要为黑褐色粉砂岩和炭质泥岩.

212 工作面风巷为位于该煤层中的煤巷,断面为梯形,上宽 3.0 m,下宽为 3.4 m,净高为 2.6 m.其支护方式为高强预应力桁架支护,其中顶板桁架锚索装在钢带中间部位,距离巷帮约 250 mm,排距 1 600 mm,经槽钢及锁具连接,锚杆为 $\Phi 22 \times 2\ 600$ mm 高强预应力锚杆,间排距 750 mm 和 800 mm,锚索为 7.3 m 长锚索,预紧力要求达 60~70 kN,间排距分别为 850 mm 和 1 250 mm;高帮同顶板一道布置一套桁架锚索,锚杆间排距为 700 mm 和 800 mm;低帮布置锚索梁,排距 1 400 mm,锚杆间排距同高帮,其他锚杆及锚索具体布置方式如图 10.由于底板为强度较低的泥岩,以及受高应力以及临近巷道采动的影响,巷道两帮及顶底板发生了非对称变形,最为显著的特征是巷道底板长期不稳定,加强支护后仍然要进行卧底处理.

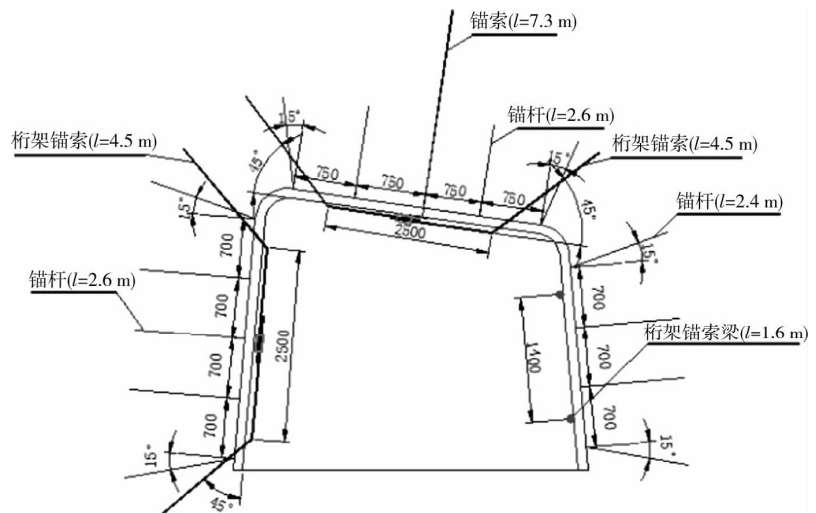


图 10 现场支护布置图

为检测巷道实际变形的情况,在212风巷布置监测站,采用十字断面法布置测点,共计监测58d,采集变形数据后整理如图11,由图看出底板变形量最大,达到了227mm,其次是高帮166mm,低帮变形94mm,顶板下沉最小,仅为33mm.

3.2 现场情况数值模拟

依据现场地质资料,运用大型三维离散元软件3DEC对212工作面煤巷围岩特征进行数值模拟,建立相应的分析模型.模型尺寸为:倾斜方向水平长100m,走向长200m,整体高度40m.模型采用Mohr-Coulomb准则,岩石的参数选取如表1,开挖及巷道支护参数按照实际情况模拟,模型除上部自由外其他面固定位移约束,上部施加应力模拟上覆岩层重力.

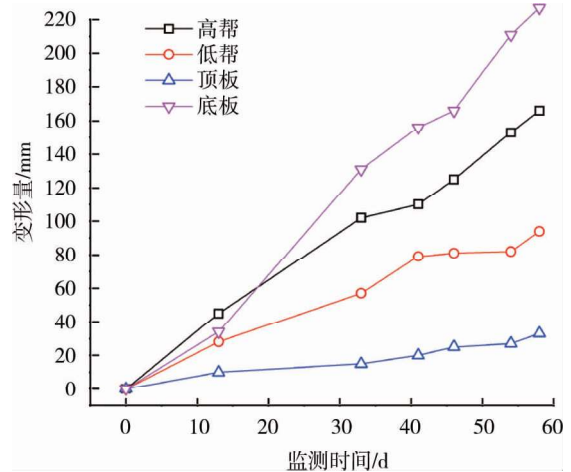


图11 现场变形曲线

表1 岩石参数选取

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m ³)
粉砂岩1	14.06	11.42	32	13.20	3.2	2 580
粉砂岩2	11.53	11.35	30	10.00	2.8	2 400
泥岩	1.50	0.50	25	1.50	2.1	2 000
煤	2.10	0.80	29	1.10	1.5	1 400
粉砂岩3	5.35	3.65	31	4.21	2.4	2 500
细砂岩	10.80	8.70	30	11.69	4.5	2 700

数值模拟后得到的巷道周边位移云图如图12,巷道四周出现了非对称变形,其中底鼓量最大,约达220mm,其次为高帮,变形量集中在160~180mm之间,低帮变形较小,变形在100~140mm,顶板的变形量最小,仅约40mm.通过对照现场实际监测,模拟能较好的反映了现场巷道的变形情况.

如图13为212风巷塑性区分布图,由图可知,在巷道两底角以及高帮处出现了较大的蝶叶塑性区,顶板处塑性区形态较为规则,低帮塑性区与顶板塑性区范围基本相同,但存在不太明显的蝶叶.由文献[11,12,16,17]可知,深部巷道埋深大,应力高,回采巷道容易遭受开采扰动等的影响,巷道围岩一般处在高偏应力的非均匀应力场中,其周边塑性区通常为蝶形,由于受采动的重复影响,围岩应力场的大小不断变化,极易造成侧向压力突然变大的情况(λ 值突然增加).由1节和2节分析可知,巷道处在蝶形塑性区时侧压系数 λ 增大,可能会使塑性区最大半径 R_{max} (蝶叶处)急剧扩展,出现恶化塑性区,因此,蝶形塑性区蝶叶部分围岩较不稳定,而底角两处蝶叶塑性区较大,其影响的底板也最为不稳定,与现场实际情况一致.其次,蝶叶尺寸对巷道浅表面变形有影响,具体为两底角蝶叶影响底板,塑性区蝶叶最大尺寸分别约7.0m和6.8m,高帮蝶叶影响高帮变形,所对应的蝶叶最大尺寸约6.6m,低帮则影响低帮,蝶叶尺寸仅4.4m,塑性区蝶叶尺寸大小与其所影响的巷道变形监测量呈正相关.巷道顶板塑性区为类圆形,在同等埋深情况下,圆形塑性区影响的巷道围岩变形较蝶形塑性区小,因而顶板的变形量也最小,现场变形情况符合2.1和2.2分析.

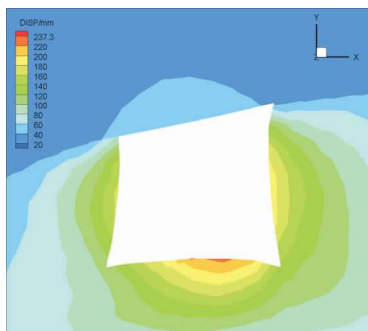


图12 212工作面风巷位移云图

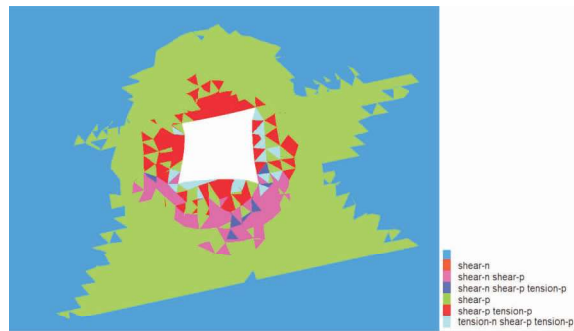


图13 212工作面风巷塑性区分布

4 结论

1)随着 λ 值的增大,塑性区由圆形→椭圆形→圆角矩形→蝶形发展,并且塑性区敏感系数 K 值在一定范围(有意义)内由缓慢增加→急剧增加→急剧减小, K 值反映了塑性区最大尺寸的变化特性: K 值较小时塑性区为圆形和椭圆形,圆角矩形,是稳态塑性区; K 值较大时,塑性区为蝶形; K 很大时,塑性区出现恶性扩展,为恶化塑性区。

2)巷道位移与塑性区形态具有相关性,随着塑性区由圆形向蝶形发展,巷道周边的位移也逐渐增大,当塑性区为蝶形时,围岩变形位移最大处与蝶叶中心线(塑性区最大尺寸)所在方位一致。

3)通过对曲江矿212工作面巷道围岩变形特征的研究以及监测,验证了塑性区形态与巷道变形关系的原理,为深部巷道变形支护提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部高应力巷道围岩预留变形控制技术[J].煤炭学报,2016,41(9):2156-2164.
- [2] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
- [3] 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.
- [4] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [5] 金淦,王连国,李兆霖,等.深部半煤岩回采巷道变形破坏机理及支护对策研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):963-967.
- [6] 臧龙.动压影响下回采巷道变形破坏机理及加固技术研究[J].煤炭工程,2016,48(1):59-61.
- [7] 杨军,孙晓明,王树仁.济宁2#煤深部回采巷道变形破坏规律及对策研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2280-2285.
- [8] 王卫军,郭罡业,朱永建,等.高应力软岩巷道围岩塑性区恶性扩展过程及其控制[J].煤炭学报,2015,40(12):2747-2754.
- [9] 贾后省,马念杰,朱乾坤.巷道顶板蝶叶塑性区穿透致冒机理与控制方法[J].煤炭学报,2016,41(6):1384-1392.
- [10] 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):1871-1877.
- [11] 赵志强,马念杰,郭晓菲,等.煤层巷道蝶型冲击地压发生机理猜想[J].煤炭学报,2016,41(11):2689-2697.
- [12] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等.均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(11):2679-2688.
- [13] 康红普.深部煤矿应力分布特征及巷道围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):12-17.
- [14] 蔡美峰.岩石力学与工程(第2版)[M].北京:科学出版社,2013.
- [15] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
- [16] 赵志强.大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [17] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
- [18] 刘迅,王卫军,吴海,等.矩形巷道围岩塑性区扩展规律分析[J].矿业工程研究,2017,32(1):14-18.