

矩形巷道围岩塑性区扩展规律分析

刘迅¹, 王卫军^{1,2*}, 吴海², 袁超^{1,2}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为研究深部矩形巷道围岩塑性区形成与发展过程, 采用理论分析和数值模拟等手段, 分析了不同埋藏深度、巷道高宽比、侧压系数对巷道围岩塑性区的形成、发展以及形态范围的影响规律。分析表明: (1) 矩形巷道围岩失稳破坏是围岩塑性区畸变向巷道围岩深部非均匀恶性扩展的结果, 对于深部矩形巷道而言, 其经历了完整的塑性区恶性扩展过程, 对于浅部巷道而言, 巷道塑性区扩展过程并不完整; (2) 在矩形巷道高宽比较小时, 塑性区向巷道围岩深部非均匀扩展、恶性扩展的范围及巷道顶板变形量与高宽比呈正相关; (3) 垂直载荷一定情况下, 水平载荷过小或者过大, 围岩塑性区更容易形成不规则的塑性区, 侧压系数的改变直接改变了塑性区的几何形态。

关键词: 矩形巷道; 塑性区; 高宽比; 侧压系数; 恶性扩展

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2017)01-0014-05

On Expansion Regularity of Plastic Zone of Surrounding Rock in Rectangular Tunnel

LIU Xun¹, WANG Weijun^{1,2}, WU Hai², YUAN Chao^{1,2}

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining and Techniques of Coal Mine, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the formation and the development of the plastic zone of surrounding rock in deep rectangular tunnel, this paper, by using the theoretical analysis and the numerical simulation, the different burial depth, roadway length-width ratio, coefficient of lateral pressure on roadway surrounding rock plastic zone formation to development and form and range are analyzed and studied. Results show that (1) Rectangular roadway surrounding rock instability and failure of surrounding rock plastic distortion to roadway surrounding rock in deep non-uniform results in the malignant expansion. For deep roadway, rectangular underwent completes the plastic zone malignant expansion process, while for shallow tunnel, rectangular tunnel plastic zone expansion process are not complete; (2) In the high aspect ratio of rectangular roadway, the plastic zone extends to the surrounding rock of roadway, the range of the malignant expansion and the deformation of roadway roof are positively correlated with the length-width ratio; and (3) Under certain circumstances, the vertical load, horizontal load is too small or too large, plastic zones form the irregular plastic zone more easily, the alteration of the lateral pressure coefficient directly changes the geometry of the plastic zone.

Key words: rectangular tunnel; plastic zone; aspect ratio; side pressure coefficient; malignant extension

由于目前煤炭资源浅部开采殆尽, 深部开采已成为必然趋势, 随着开采的深入, 巷道围岩力学环境日趋复杂, 深部高应力巷道围岩呈现出大范围失稳破坏与大变形等一系列工程响应问题^[1-4]。大量研究成果

收稿日期: 2016-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51434006; 51374105)

* 通信作者, E-mail: wjwang@hnust.cn

表明,深部高应力巷道围岩变形破坏是围岩塑性区形成与发展的结果,塑性区的形态、范围决定了巷道破坏的模式和程度,其不仅是影响巷道稳定性的重要因素,也是巷道支护设计的重要依据^[5-9].在煤矿巷道形状选择中,矩形巷道由于成巷速度快,工艺简单等原因成为采区巷道的常用形式,如在上下顺槽、开切眼等处.但矩形巷道受力不均匀,边角处极易产生应力集中,承载能力差,巷道围岩稳定性控制难度大^[10],近年来研究也发现,大多数顶板事故多发生在上下顺槽中^[11],因此,了解和掌握矩形巷道围岩塑性区扩展规律对巷道支护有着重要的意义.

长期以来国内外学者对地下巷道围岩的弹塑性计算问题进行了深入研究,取得了许多有价值的成果.如曾钱帮^[12]等基于广义 Hoek-Brown 准则,运用 Newton-Raphson 迭代法求出了围岩弹塑性交界面上径向应力的近似解.朱以文^[13]等采用 Drucker-Prager 准则,从理论上推导了地应力中侧压力系统和材料参数与围岩塑性区之间的关系.李明^[14, 15]等推导出了圆形巷道围岩在双向等压条件下的塑性区半径的统一解.Yii-Wen Pan^[16]认为,只有当圆形巷道应力比 K 等于 1 时,才会存在对称的塑性区,初始应力状态和静水压力状态有所不同,沿着塑性区扩展方向初始应力的分量更小.Zhang Q^[17]等基于 Mohr - Coulomb 准则和 Hoek-Brown 准则,对圆形巷道无量纲位移进行分析,结果表明,随着塑性区杨氏模量的减小,岩石的变形量明显增大,但杨氏模量对塑性区半径和应力分布影响不大.以上诸多学者对巷道围岩应力分布及塑性区特征展开了大量研究,但主要针对的是圆形巷道和类圆形巷道,对矩形巷道研究较少,研究成果尚不多见.

1 矩形巷道塑性区分布的理论分析

对矩形巷道围岩应力的解析分析需要借助复变函数弹性理论,通过映射函数将直角坐标系 $o-x-y$ 平面上的矩形巷道转换到 ζ 平面的单位圆上,通过保角变换获得关于应力分量的复变函数表达式(如图1).命 $\zeta = \rho e^{i\varphi}$, $z = x + iy$ 保角变换公式为

$$z = \omega(\zeta) = R \left(\frac{1}{\zeta} + \sum_{k=0}^n c_k \zeta^k \right). \quad (1)$$

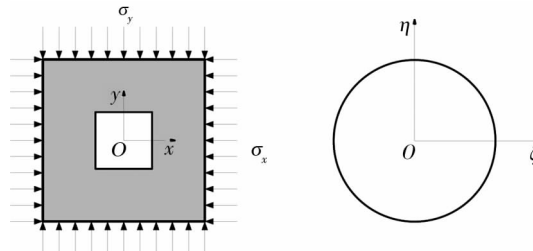


图1 z 平面与 ζ 平面

再进行一系列代换得到矩形巷道围岩曲线坐标中应力分量的复变函数表达式:

$$\begin{cases} \sigma_\theta + \sigma_\rho = 2[\Phi(\zeta) + \overline{\Phi(\zeta)}] = 4\text{Re}\Phi(\zeta) \\ \sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\theta} = \frac{2\zeta^2}{\rho^2 \omega'(\zeta)} [\overline{\omega(\zeta)} \Phi'(\zeta) + \omega'(\zeta) \Psi(\zeta)] \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\omega(\zeta)$, $\Phi(\zeta)$ 和 $\Psi(\zeta)$ 是关于复变量 ζ 的解析函数,关于解析函数的求解,弹性力学和复变理论给出了具体形式.当孔口不受面力时,令:

$$\begin{cases} M(\rho, \theta) = \sigma_\theta + \sigma_\rho \\ N(\rho, \theta) = \text{Re}(\sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\theta}). \\ T(\rho, \theta) = \text{Im}(\sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\theta}) \end{cases} \quad (3)$$

可求得矩形巷道应力表达式为^[18]

$$\sigma_\theta = \frac{4(AC + BD)}{C^2 + D^2} P_x + \frac{4(A'C' + B'D')}{C'^2 + D'^2} P_z = \lambda K_x P_x + K_z P_z. \quad (4)$$

式中, λ :侧压系数; K_x 和 K_z :水平和垂直应力集中, $A \sim D$ 和 $A' \sim D'$ 仅和巷道坐标有关.

其中: $A = 14 - 24\cos 2\theta - 7\cos 4\theta$; $A' = 14 + 24\cos 2\theta - 7\cos 4\theta$;

$B = -24\cos 2\theta - 7\sin 4\theta$; $B' = 24\cos 2\theta - 7\sin 4\theta$;

$C = C' = 56 + 28\cos 4\theta$; $D = D' = 28\sin 4\theta$ 。

从矩形巷道应力表达式可以得出,矩形巷道周围的切向应力大小和巷道的高宽比及埋深、侧压力有紧密联系,因此,理清它们之间的关系对巷道围岩稳定性控制研究具有重要的工程意义。

2 矩形巷道塑性区分布的数值模拟

2.1 深部与浅部矩形巷道塑性区扩展

为揭示深部矩形巷道围岩塑性区扩展规律,并比较其与浅部塑性区扩展的差别,运用三维有限差分软件 FLAC^{3D}对巷道开挖进行模拟,为简便计算,模型建为均质围岩,模型大小为 50 m×50 m×1 m,边界条件为四周和底部固定位移约束,上表面自由,并在上表面施加不同应力来模拟巷道所处的不同深度,模拟采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,巷道尺寸为 4.0 m×4.0 m,选取围岩体积模量和剪切模量分别为 0.5, 0.4 GPa,内摩擦角 30°,内聚力 2.5 MPa,抗拉强度 1.2 MPa,密度为 2 500 kg/m³。计算过程中,分别选取了不同时期的塑性区状态,对其进行观察分析。

如图 2a 所示,深部矩形巷道开挖完成后,巷道表面围岩在高应力作用下形成塑性区,由于水平应力与垂直应力不对称,塑性区开始局部畸变,形成“小蝶型”塑性区,此时为塑性区畸变,其特点是巷道边角敏感区域的塑性区面积较大,不规则塑性区形成。运行到第 200 时步时,主要是以围岩塑性区敏感部位因畸变而导致的塑性区向巷道围岩深部非均匀快速扩展为主,故此阶段可称为围岩塑性区非均匀扩展阶段,塑性区处于此阶段两帮的扩展速度最快,并继续向围岩深处扩展。待两帮塑性区扩展速度减慢时,巷道四角敏感区域塑性区向外扩展加快,开始形成“蝶形”塑性区雏形,巷道围岩塑性区进入恶化阶段。“蝶形”塑性区四角继续向外扩展,当四角塑性区扩展距离数倍于巷道宽度时,塑性区开始进入恶性扩展。

对比深部矩形巷道塑性区的扩展过程,如图 2b 所示,浅部矩形巷道也会出现“蝶形”塑性区,亦经历了塑性区畸变→塑性区非均匀扩展→塑性区恶化的过程,但并没有发生塑性区失控,相较于深部矩形巷道,浅部矩形巷道稳定性要更好。

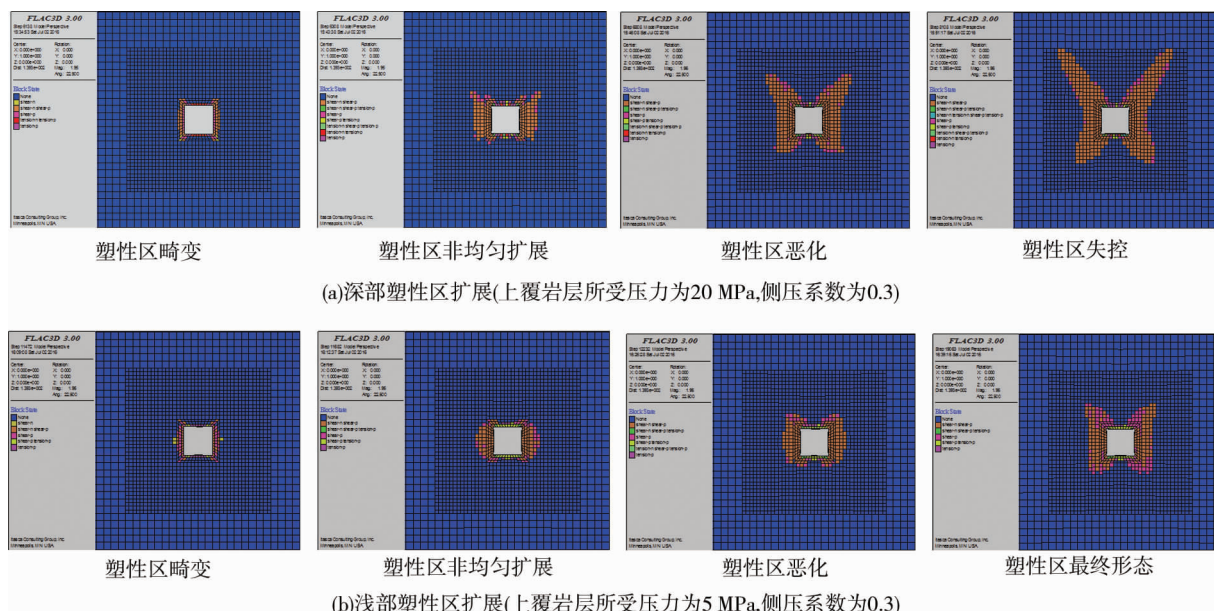


图 2 深部与浅部矩形巷道塑性区扩展

2.2 巷道高宽比对围岩塑性区的影响

为了研究高宽比对矩形巷道周边围岩塑形区的影响,分别在高宽比为 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 的情况下做数值模拟,利用 fish 语句对其塑性区畸变,非均匀扩展及恶性扩展阶段的塑性区面积做计算,并监测不同高宽比下巷道顶板变形量,整理如图 3 和图 4 所示。

对于不同高宽比的矩形巷道而言,矩形巷道围岩失稳破坏是围岩塑性区畸变而向巷道围岩深部非均匀扩展以及恶性扩展导致的结果.当高宽比不大时,塑性区向巷道围岩深部非均匀扩展的范围随高宽比的增大而增大;在高宽比在 1.0 到 1.4 时,塑性区非均匀扩展导致的塑性区范围增大的影响最大;在围岩处于塑性区畸变时,高宽比的增大对塑性区范围的影响不大;当围岩塑性区处于恶性扩展阶段时,塑性区范围随着高宽比的增大而增大,但当高宽比大于 1.4 时,塑性区范围增大不明显或不再增大.就变形量而言,随着高宽比的增加变形量也逐渐增加,但到高宽比为 1.4 时变形量几乎不再增加.

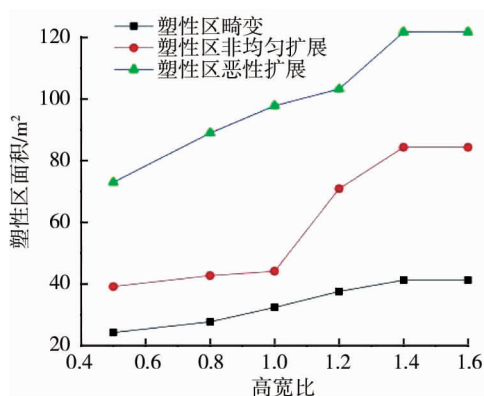


图3 不同时期塑性区面积

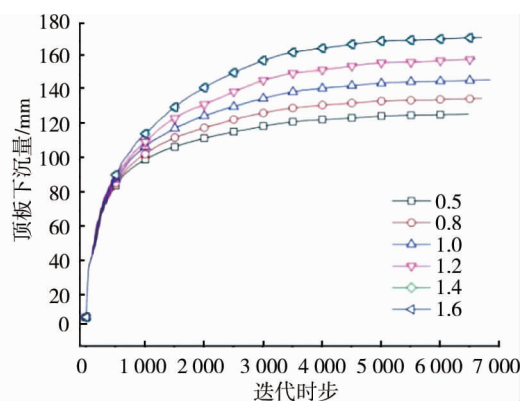


图4 不同高宽比巷道顶板变形量

2.3 侧压系数 λ 对塑性区形态的影响

经过以上分析可知围岩塑性区形态对巷道围岩变形及控制有重要的影响,为研究侧压系数 λ 对塑性区最终形态的影响,建立了 8 种不同侧压系数下的巷道模型.如图 5 所示当双向载荷相等 ($\lambda = 1.0$) 时,巷道围岩塑性区近似为圆形,随着的侧压系数减小,矩形巷道周边产生不规则形状的塑性区.具体而言,当侧压系数小于 0.5 时,巷道围岩塑性区表现为“蝶形”;当侧压系数介于 0.5 和 1.0 之间时,巷道围岩塑性区的形状为横向椭圆形,并且随着侧压系数的增大,塑性区尖端明显减小;当侧压系数大于 1.0 时,如 $\lambda = 1.3 \sim 1.7$ 时,塑性区呈竖向椭圆形,至 $\lambda = 2.0 \sim 2.3$,塑性区呈竖向的类矩形, λ 继续增加,矩形巷道四角塑性区开始加速扩展,最后形成侧向的“蝶形”塑性区.数值模拟的结果表明,垂直载荷一定情况下,水平载荷过小或者过大,围岩塑性区越容易形成不规则的塑性区,侧压系数的改变直接改变了塑性区的几何形态.

结合 2.1 分析,出现蝶型塑性区的巷道从塑性区畸变开始容易经非均匀扩展进入恶性扩展,对于侧压系数过小或过大的矩形巷道要注意在塑性区畸变时及时支护防止其非均匀扩展以及塑性区恶性扩展.

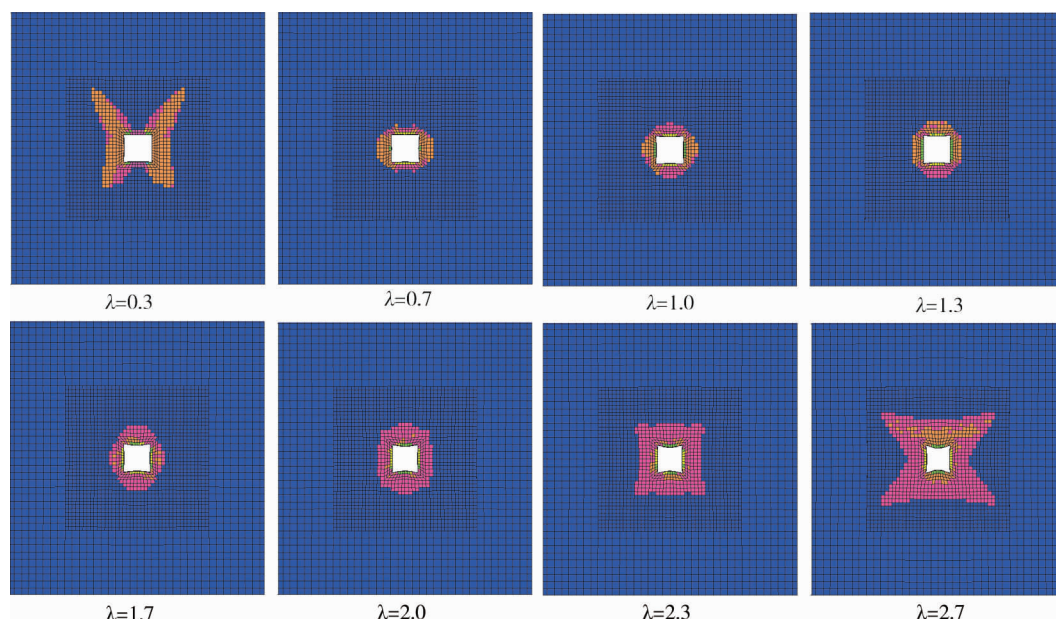


图5 不同侧压系数下塑性区形态

3 结论

1) 在侧压系数为 0.3 时,就处于深部高应力条件下的矩形巷道塑性区形态,分别将塑性区形态变化阶段分为塑性区畸变、塑性区非均匀扩展、塑性区恶性扩展及塑性区失控,而浅部矩形巷道虽然出现了“蝶形”塑性区,但塑性区扩展未出现失控。

2) 当矩形巷道高宽比不大且容易出现“蝶形”塑性区时,围岩塑性区向巷道围岩深部非均匀扩展的范围随高宽比的增大而增大,就变形量而言,随着高宽比的增加变形量也逐渐增加;在围岩处于塑性区畸变时,高宽比的增大对塑性区范围的扩大影响不大;在围岩进行塑性区恶性扩展时,塑性区范围随着高宽比的增大而增大,当高宽比大于 1.4 时,塑性区范围增大不明显或不再增大。在对矩形巷道设计时,尽量不要将高宽比设计大于 1.0,以维持巷道围岩的稳定。

3) 侧压系数对于矩形巷道围岩塑性区的几何尺寸和分布形态影响明显,当侧压系数小于 0.5 时,容易出现“蝶型”塑性区,当侧压系数介于 0.5 和 1.0 之间时,巷道围岩塑性区的形状为横向椭圆形和类矩形,当侧压系数大于 1.0 时,随着侧压系数增加,塑性区呈竖向椭圆形到竖向的类矩形,最后形成侧向的“蝶形”塑性区。

参考文献:

- [1] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005(1):91-99.
- [2] 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(16):2803-2813.
- [3] 王卫军,李树清,欧阳广斌.深井煤层巷道围岩控制技术及其试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006(10):2102-2107.
- [4] 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(1):1-10.
- [5] 王卫军,郭昱业,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(12):2747-2754.
- [6] 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(10):2287-2295.
- [7] 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.
- [8] 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(6):1384-1392.
- [9] 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(8):1871-1877.
- [10] 李廷春,卢振,刘建章,等.泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J].岩土力学,2014(4):1077-1083.
- [11] 何峰,唐治,朱小景,等.矩形巷道围岩应力分布特征[J].数学的实践与认识,2015(20):128-134.
- [12] 曾钱帮,马平,刘彤.圆形硐室广义 Hoek-Brown 围岩弹塑性交界面上径向应力的近似解[J].土木工程学报,2011(12):85-92.
- [13] 朱以文,黄克戩,李伟.地应力对地下洞室开挖的塑性区影响研究[J].岩石力学与工程学报,2004(8):1344-1348.
- [14] 李明,茅献彪.基于复变函数的矩形巷道围岩应力与变形粘弹性分析[J].力学季刊,2011(2):195-202.
- [15] 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(01):21-25.
- [16] Pan Y W, Chen Y M. Plastic Zones and Characteristics-line Families for Openings in Elasto-plastic Rock Mass[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1990, 23(4):275-292.
- [17] Zhang Q, Jiang B S, Wu X S, et al. Elasto-plastic Coupling Analysis of Circular Openings in Elasto-brittle-plastic Rock Mass[J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2012, 60(1):60-67.
- [18] 侯化强,王连国,陆银龙,等.矩形巷道围岩应力分布及其破坏机理研究[J].地下空间与工程学报,2011(s2):1625-1629.