

薄煤层半煤岩巷道变形破坏规律研究

Study on Deformation and Failure Law of Semi-coal Rock Roadway in Thin Coal Seam

张枝伟^{1,2}, 尚宇琦³, 王晓东^{1,2}

(1. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省矿山安全科学研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为明确薄煤层半煤岩巷道变形破坏规律,以岔河联营煤矿为工程背景,通过理论分析研究了导致半煤岩巷道变形破坏的根本原因,通过数值模拟分析了不同煤岩比例下的半煤岩巷道破坏变形规律。结果表明:半煤岩巷道变形破坏很大程度取决于巷道埋深和围岩内聚力,且巷道两帮煤层部分最先发生破坏,其破坏深度大于巷道其他部分围岩;随半煤岩巷道煤岩比例的增加,巷道围岩形成的塑性区范围也越来越大,巷道围岩形成的高应力范围越大,巷道两帮水平位移明显增加,位移峰值主要集中在巷道两帮煤层部分,巷道围岩整体位移量也逐渐增加,特别是巷道两帮煤层部分。因此,半煤岩巷道煤岩比例的增加更容易造成巷道结构失稳,研究成果可半煤岩巷道参数布置提供一定的理论指导。

关键词:薄煤层; 半煤岩巷道; 破坏机理; 数值模拟

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)03-0040-12

Abstract: In order to clarify the deformation and failure law of semi-coal rock roadway in thin coal seam, taking Chahe Coalmine as the engineering background, the fundamental cause of deformation and failure of semi-coal rock roadway is studied through theoretical analysis, and the failure and deformation law of semi-coal rock roadway under different coal-rock ratio is analyzed through numerical simulation. The results show that the deformation and failure of semi-coal roadway largely depend on the buried depth of roadway and the cohesion of surrounding rock, and the coal seam of two sides of roadway is the first to fail, and its failure depth is greater than that of other surrounding rock of roadway. With the increase of the proportion of coal to rock in semi-coal roadway, the plastic zone of surrounding rock becomes larger and larger, the range of high stress formed by surrounding rock becomes larger, and the horizontal displacement of two sides of roadway increases significantly. The peak displacement is mainly concentrated in the two sides of roadway coal seam, and the overall displacement of surrounding rock also increases gradually, especially the two sides of roadway coal seam. The increase of the proportion of coal and rock in semi-coal roadway is more likely to cause the roadway structure instability, the research results can provide some theoretical guidance for parameter layout of semi-coal roadway.

Key words: thin coal seam; semi-coal rock roadway; failure mechanism; numerical simulation

1 前言

随着社会经济的发展,国家对能源的依赖越来越大,“富煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了煤炭是我国最为主要的能源^[1-3]。贵州省地区煤炭资源丰富,煤层多以薄煤层为主,因此,煤层开采过程不可避免的出现半煤岩巷道。半煤岩巷道在掘进时,根

据矿井煤层力学特性和工作面生产情况,确定合理的掘进层位、巷道所采用的形式及断面参数,既能给巷道围岩稳定控制打下基础,又能降低巷道支护的难度。由于贵州地区煤系地层纵向呈“多而薄”分布,常出现煤泥互层现象^[4-6],这给半煤岩巷道的布置带来极大的困难。

众多学者针对半煤岩巷道的稳定性问题进行了大量研究,张勇等^[7]针对曙光矿专用行人半煤岩巷道变形破坏严重的问题,利用霍克-布朗(Hoek-Brown)强度准则计算了专用行人巷的松动圈范围,并基于松动圈支护理论提出了相应的支护措施。潘欢欢等^[8]针对坚硬顶板半煤岩巷道的破坏及稳定性问题,采用数值模拟分析了掘采扰动下巷道围岩

[作者简介] 张枝伟(1995—),男,贵州黎平人,硕士,助理工程师,现从事煤矿智能化开采等方面的研究工作。

[基金项目] 贵州省科技厅科技支撑项目(黔科合支撑[2020]2Y033号);贵州省科技厅科技支撑项目(黔科合支撑[2020]2Y032号)

[引用格式] 张枝伟,尚宇琦,王晓东.薄煤层半煤岩巷道变形破坏规律研究[J].中国矿山工程,2023,52(3):40-51.

应力及塑性区的变化,并确定了巷道超前支承压压力分布特征,提出了回采期间巷道加强支护方案。管俊才、田忠喜等^[9-10]通过现场调研、数值模拟分析了高帮大断面半煤岩巷道一次掘进成巷与分次掘进成巷及工作面回采期间围岩应力分布特征,在此基础上提出巷道分次掘进施工,并采用强力锚杆及锚索协同支护技术。高林等^[11]针对倾斜煤层沿空半煤岩巷围岩稳定性的问题,通过 UDEC 数值模拟软件探讨了基本顶不同断裂形式对巷道围岩稳定性的影响规律。邱文华^[12]等针对复杂地质条件下极近距离煤层群半煤岩巷道顶板及两帮破坏变形量大和顶板的问题,采用理论分析、数值模拟以及现场监测的手段研究了巷道围岩的变形破坏特征,基于此提出了三种不等长锚索支护,并通过现场验证了支护方案的可行性。姚琦等^[13]人针对极破碎围岩半煤岩巷变形破坏的问题,采用力学理论分析、数值模拟分析和现场试验研究相结合的数段,得出了极破碎巷道围岩变形破坏机理。金淦等^[14]人针对深部半煤岩回采巷道围岩的稳定性问题,灵活运用弹塑性力学相关方法,求解并绘制了该半煤岩体巷道围岩破坏状况,得出了围岩破坏特征。

众多学者主要通过围岩控制理论分析、数值模拟及现场实测的方法研究半煤岩巷道在不同围岩控制技术下支护参数下的支护效果进行了大量研究,从而提出合理的支护方案,并取得了许多相应的成果,为半煤岩巷道支护提供很好的借鉴。然而,半煤岩巷道在结构上存在不连续性,巷道两帮岩体与煤体强度差异较大,且层间分布有强度低、厚度小、胶结性的结构面,导致半煤岩巷道的变形破坏规律比较复杂。本研究以岔河联营煤矿 10201 运输巷为研究对象,分析半煤岩巷道变形破坏规律及其影响因素。

2 工程背景

岔河联营煤矿主采煤层为 K3、K2 煤层, K3 煤层平均厚度 0.77 m, K2 煤层平均厚度 1.08 m, 煤层倾角为 1° ~ 3°, 平均 2°, 煤层平均层间距为 69.93 m。岔河联营煤矿先在 K2 煤层布置采掘工作面,首采面为 10202 综采工作面,并准备在其东南方向布置 10201 工作面作为接替面,10201 工作面与 10202 工作面空间位置关系如图 1 所示。

3 半煤岩巷道围岩破坏规律

巷道开挖后,原有的应力平衡遭到破坏。待应

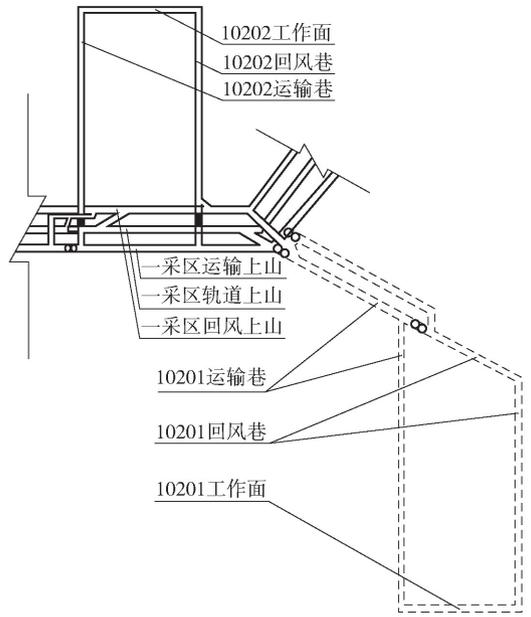


图 1 工作面空间关系图

力重新分布后,会在巷道周围形成应力集中现象,从而导致巷道发生变形破坏,巷道的变形破坏规律在很大程度上取决于巷道埋深和围岩力学强度。

当巷道形状为矩形巷道,测压系数接近 1,且巷道围岩的垂直应力、内摩擦角及内聚力三个力学参数在已知的情况下,可以通过构造复变函数对巷道围岩破坏情况进行分析。将复平面 Z 平面上方孔的无限区域转换成 ζ 平面上的中心圆单位,其表达式如式(1), Z 平面与 ζ 平面的映射关系如图 2 所示。

$$Z = \omega(\zeta) = R \left(\frac{1}{\zeta} - \frac{1}{6}\zeta^3 \right) \quad (1)$$

式中, Z 为方孔复平面坐标, $Z = x + iy$; ζ 为单位圆复平面坐标, $\zeta = \rho i \theta$ 。

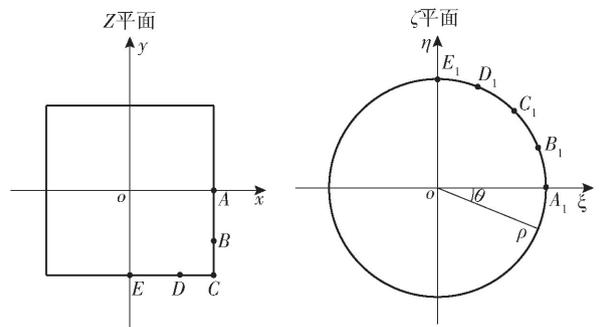


图 2 平面 Z 与平面 ζ 映射关系图

通过式(2)求出映射区域任意点的主应力,同时可以通过坐标变换求出原复平面任意点的主

应力。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\rho\theta}^2} = \\ \sigma_3 &= \frac{s_\rho + s_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{s_\rho - s_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\rho\theta}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

由于岩体发生破坏时服从摩尔-库伦准则,则有:

$$\sigma_1 - K\sigma_3 = R_c \quad (3)$$

$$K = \frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0}, R_c = 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0}} \quad (4)$$

式中: σ_1 ——最大主应力;

σ_3 ——最小主应力;

ϕ_0 ——巷道围岩内摩擦角;

C ——巷道围岩内聚力。

令 $\sigma_1 = qs_1, \sigma_3 = qs_3$, 联立上述公式得到式(5), 根据式(5)可以可知, 巷道围岩是否破坏与等式两边能否维持平衡呈相关性, 值“1”为临界值。通常处于深部的巷道围岩不会发生破坏。因此, 则可以基于摩尔-库伦准则构造巷道围岩危险函数。

$$\frac{\sigma_1 - K\sigma_3}{R_c} = \frac{s_1 - s_3 - (s_1 + s_3) \sin \phi_0}{2 \sqrt{(1 + \sin \phi_0)/(1 - \sin \phi_0)}} \cdot \frac{q}{C} = 1 \quad (5)$$

$$w(q, C) = \frac{1}{f(\rho, \theta, \phi_0)} \quad (6)$$

$f(\rho, \theta, \phi_0)$ 为巷道围岩危险系数, 主要表述巷道围岩不同内摩擦角、位置产生破坏的可能性, 其值越大, 围岩越容易发生破坏。 $w = (q, C)$ 主要表述围岩发生破坏时, 巷道埋深及围岩内聚力的极限条件。当巷道围岩危险系数小于 1 时, 巷道围岩是否破坏很大程度取决于巷道埋深和围岩内聚力。当巷道围岩刚发生破坏时, $w = (q, C)$ 的值最小。因此, 可根据巷道围岩参数, 利用上述公式, 分析巷道各部分围岩的危险系数, 并通过对比围岩危险系数大小, 了解巷道围岩的变形破坏规律。10201 运输巷, 属于半煤岩巷道, 沿煤层顶板掘进。巷道顶板为细砂岩, 巷道两帮为煤层和砂岩, 巷道底板为砂岩, 巷道顶、底板力学强度较好。但在巷道两帮, 煤的内聚力远小于砂岩。其中, 砂岩的内聚力为 10.6 MPa, 煤的内聚力为 1.62 MPa。由式(6)可知, 巷道两帮煤的危险系数远大于砂岩。综上所述, 10201 运输巷在掘进后, 巷道两帮煤层部分最先发生破坏, 其破坏深度大于巷道其他部分围岩, 随着时间的推移, 帮部煤体

承载能力会不断降低, 继而导致巷道其他位置发生变形破坏。

4 半煤岩巷道变形破坏数值模拟研究

巷道围岩的变形破坏规律主要受埋深、围岩自身力学强度的影响。对于半煤岩巷道而言, 由于煤层厚度不断变化, 导致巷道两帮围岩结构不断发生改变。因此, 通过上述理论研究, 借助 FLAC^{3D} 数值模拟软件对不同煤岩比例的半煤岩巷道破坏变形规律进行分析。在半煤岩巷道掘进过程中, 由于煤层厚度的不断变化, 导致半煤岩巷道两帮的煤岩比例也在不断发生改变。因此, 分析不同煤岩比例下半煤岩巷道变形破坏规律, 对半煤岩巷道的稳定性控制具有重要意义。

4.1 煤岩比例对半煤岩巷道破坏变形规律研究

本次模型尺寸为 50 m × 60 m × 50 m, 本构关系采用摩尔-库伦准则。巷道断面形状为矩形, 宽度为 3.8 m, 高度为 2.4 m, 采用卧底掘进。模型顶部埋深 276 m, 垂直应力为 6.9 MPa。侧压系数为 1.35, 则水平应力为 9.32 MPa。模拟主要通过改变巷道两帮的煤岩比例, 模拟方案见表 1。

表 1 煤岩比例模拟方案

项目	方案一	方案二	方案三	方案四
煤岩比例	1:5	2:5	3:5	4:5
巷道帮部煤层厚度/m	0.48	0.96	1.44	1.92
巷道帮部岩层厚度/m	1.92	1.44	0.96	0.48

1) 各方案半煤岩巷道塑性区分布

图 3 所示为各煤岩比例条件下半煤岩巷道塑性区分布。

由图 3 可知, 随着巷道煤岩比例的增加, 巷道围岩形成的塑性区范围也越来越大。巷道顶、底板围岩塑性区范围呈不对称分布, 顶板塑性区范围远大于底板, 巷道两帮围岩塑性区范围呈对称分布, 且巷道围岩的破坏范围逐渐变大, 对巷道两帮煤层部分和煤岩分界处的影响最为明显。同时, 由于巷道帮部弱结构面(煤层部分)的增加, 巷道承载能力变低, 导致巷道顶板的破坏范围也在逐渐增大。说明了煤岩比例的大小对半煤岩巷的变形破坏有重要影响, 煤岩比例越大, 巷道越容易失稳, 当半煤岩巷道煤岩比例值增加时, 应注意加强巷道两帮煤层和煤岩分界处的支护管理。

当煤岩比例为 1:5 时, 巷道围岩主要表现为剪

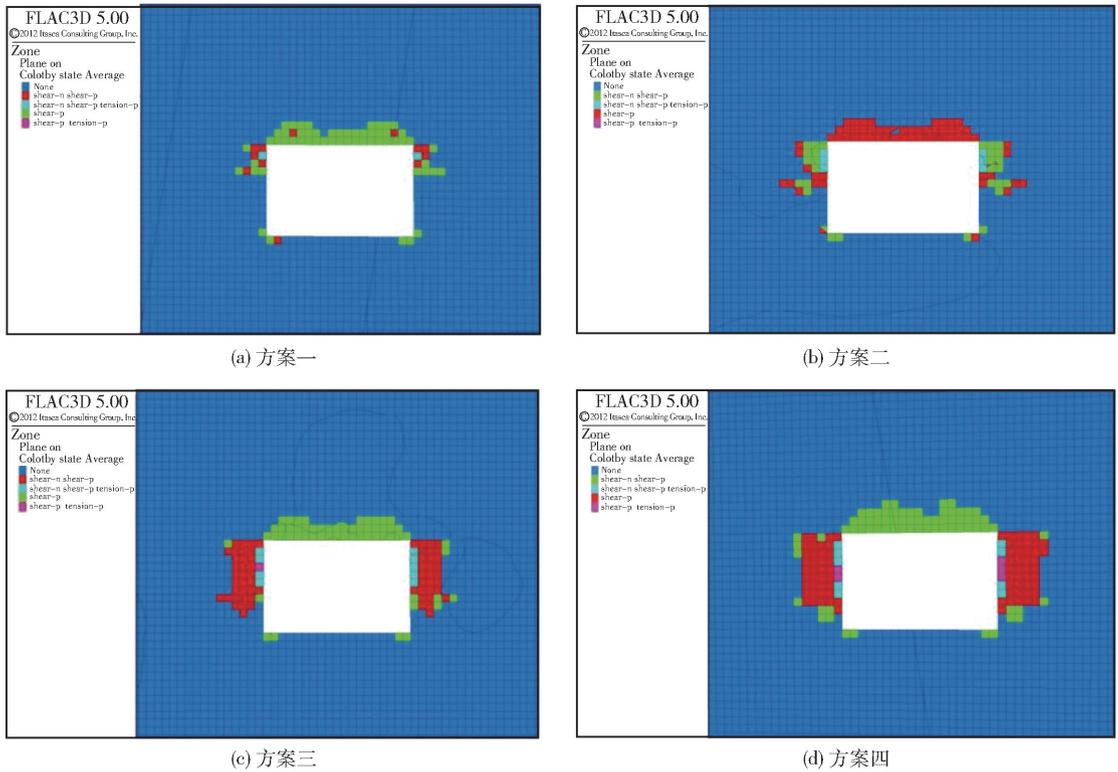


图3 不同煤岩比例巷道塑性区分布情况

切破坏,两帮煤层部分出现少量拉伸破坏。顶板最大破坏深度为0.6 m,底板在巷道两个底角处出现少量剪切破坏,最大破坏深度为0.2 m。巷道两帮变形破坏主要集中在弱结构面,巷道两帮最大破坏深度为0.8 m。当煤岩比例为2:5时,巷道围岩主要表现为剪切破坏,两帮煤层部分产生的拉伸破坏范围开始变大。顶板最大破坏深度为0.6 m,底板最大破坏深度为0.2 m,巷道两帮最大破坏深度为1.2 m,最大破坏深度集中在煤岩分界面处。当煤岩比例为3:5时,巷道围岩主要表现为剪切破坏,两帮煤层部分出现的剪切-拉伸破坏范围十分明显,巷道两帮整体破坏范围较大。顶板最大破坏深度为0.6 m。底板最大破坏深度为0.6,巷道两帮最大破坏深度为1.2 m。当煤岩比例为4:5时,巷道顶、底板表现为剪切破坏,两帮煤体表现为剪切和拉伸破坏,两帮岩体主要为剪切破坏,巷道围岩整体破坏范围最大。顶板最大破坏深度为0.8 m,底板最大破坏深度为0.2 m,两帮最大破坏深度1.2 m,且两帮煤层最大破坏深度范围比煤岩比例值较小时大。

2)各方案半煤岩巷道应力分布特征

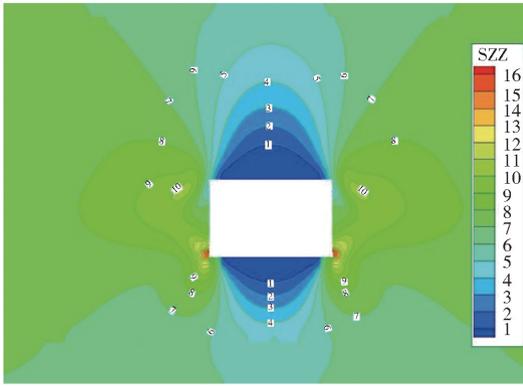
图4所示为各煤岩比例条件下半煤岩巷道应力

分布特征。

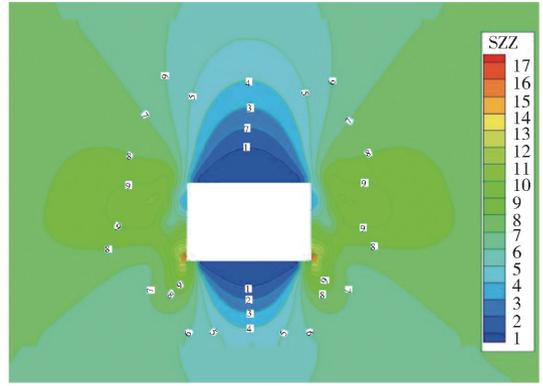
由图4可知,半煤岩巷道顶、底板处的垂直应力呈拱形分布,为应力降低区。巷道两帮垂直应力呈耳状分布且左右对称,为应力升高区,随着煤岩比例的增加,巷道两帮耳状分布范围逐渐增大,说明高应力分布范围在逐渐扩大。由图4可知,半煤岩巷道顶、底板的水平应力呈拱形分布且上下不对称,为应力降低区。由于巷道顶板强度较大,仅在巷道上部两个边角形成应力集中。煤岩比例的增加,对巷道顶、底板水平应力分布变化不大,但对巷道两帮的水平应力分布比较明显,巷道两帮水平应力呈蝶形分布且左右对称,为应力升高区,随着煤岩比例的增加,巷道两帮高应力分布范围会逐渐下移。因此,煤岩比例对巷道的应力分布有较大影响。随着煤岩比例值的增加,即巷道结构中的薄弱体所占比例较大时,巷道围岩形成的高应力范围越大,且集中在巷道两帮煤层部分,更容易造成巷道结构失稳。

3)各方案半煤岩巷道位移分布特征

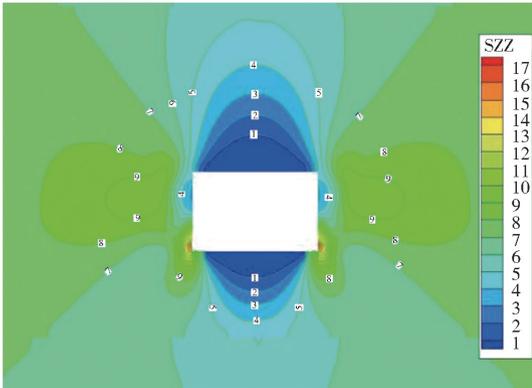
图5所示为各煤岩比例条件下半煤岩巷道位移分布特征。由图5可知,不同煤岩比例下,巷道围岩的垂直位移主要分布在巷道顶、底板位置。巷道顶、



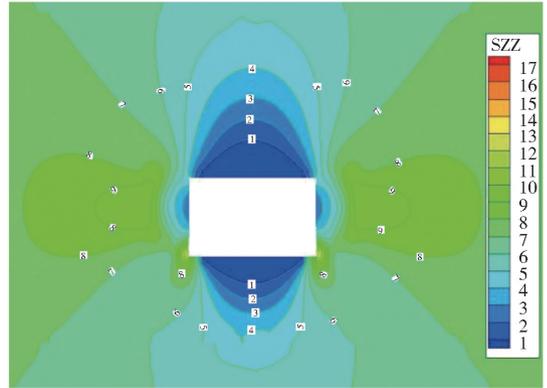
(a) 垂直应力分布情况 (方案一)



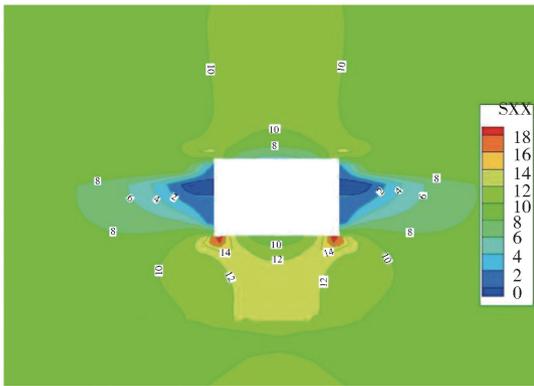
(b) 垂直应力分布情况 (方案二)



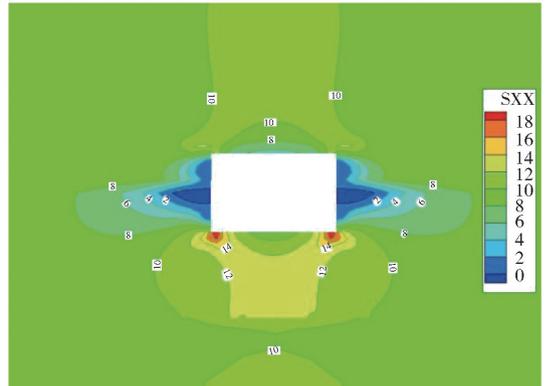
(c) 垂直应力分布情况 (方案三)



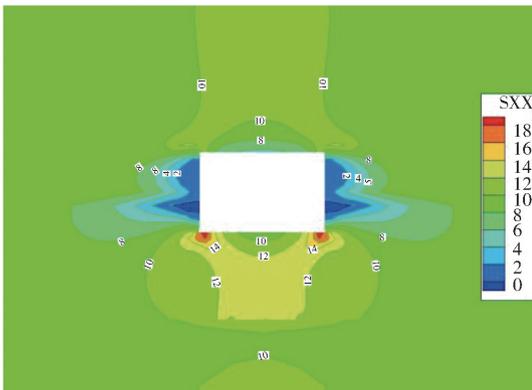
(d) 垂直应力分布情况 (方案四)



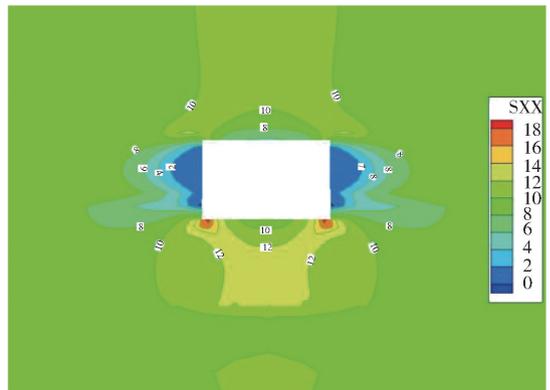
(e) 水平应力分布情况 (方案一)



(f) 水平应力分布情况 (方案二)

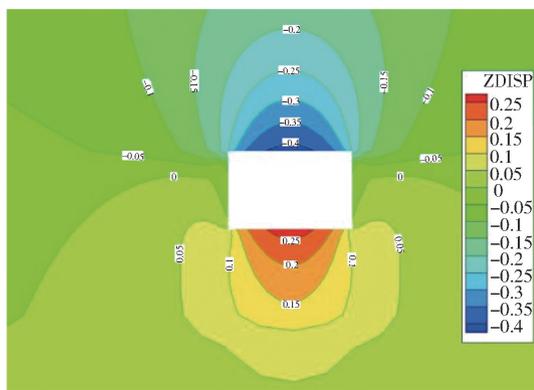


(g) 水平应力分布情况 (方案三)

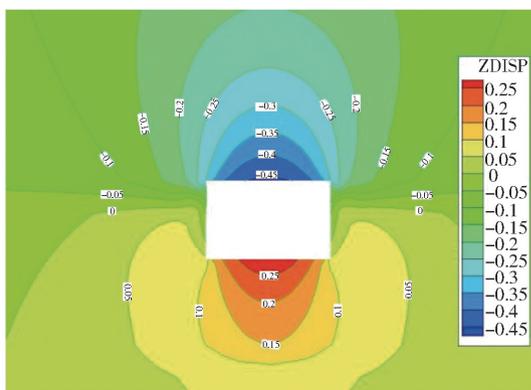


(h) 水平应力分布情况 (方案四)

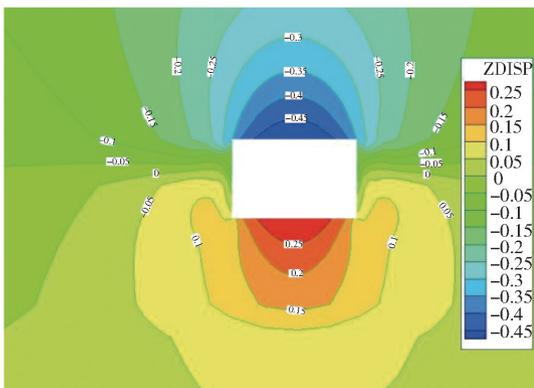
图4 不同煤岩比例巷道围岩应力分布情况



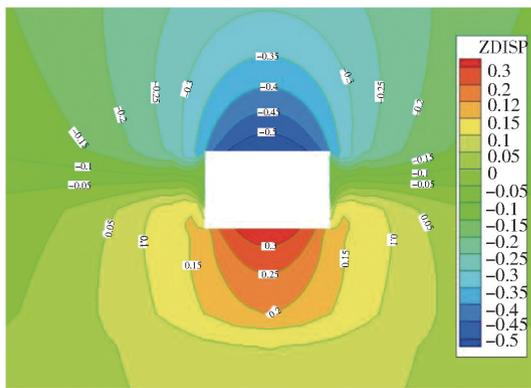
(a) 垂直位移分布情况(方案一)



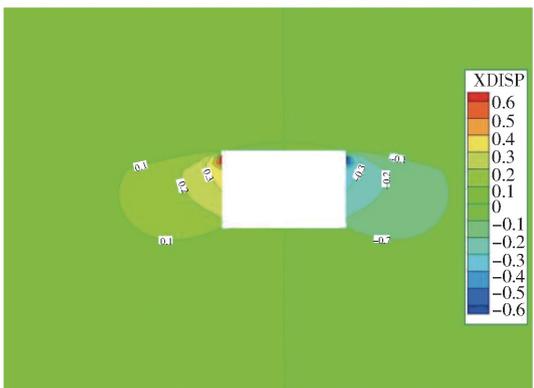
(b) 垂直位移分布情况(方案二)



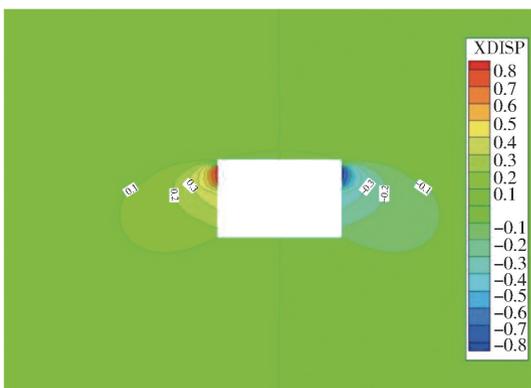
(c) 垂直位移分布情况(方案三)



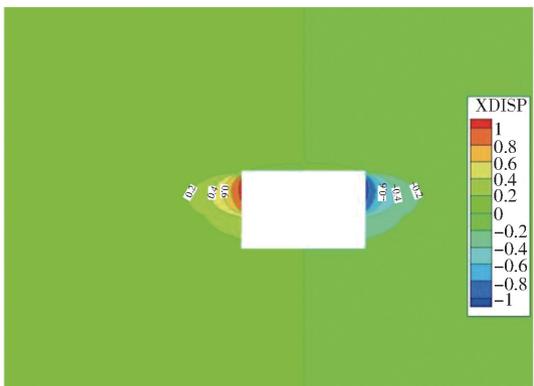
(d) 垂直位移分布情况(方案四)



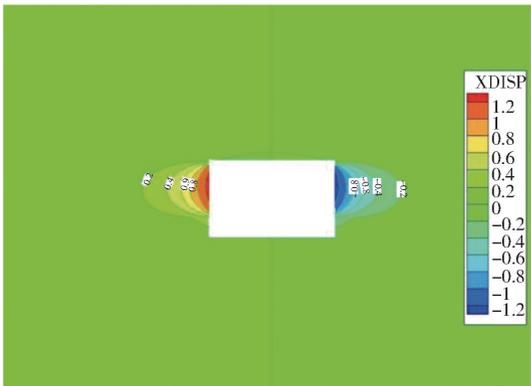
(e) 水平位移分布情况(方案一)



(f) 水平位移分布情况(方案二)



(g) 水平位移分布情况(方案三)



(h) 水平位移分布情况(方案四)

图5 不同煤岩比例巷道围岩位移情况

底板位移呈拱形分布且上下不对称,巷道顶板的垂直位移量小于底板。随着煤岩比例值的增加,巷道顶、底板垂直位移量也越来越大。半煤岩巷道水平位移主要集中在巷道两帮,呈左右对称分布,在巷道其他位置表现不明显。

由图6可知,随着煤岩比例值的增加,巷道围岩整体位移量也逐渐增加,特别时巷道两帮煤层部分。由于巷道两帮水平位移具有对称性,本次选取巷道右帮煤岩体进行分析,由图6c、图6d可知,随着煤岩比例的增加,巷道帮部煤岩体位移量逐渐增大,帮部煤体移近量会在煤岩比例值达到3:5时突然增大。当煤岩比例为1:5时,巷道底板起鼓量为2.73 mm,顶板下沉量为4.23 mm,右帮岩体移近量为2.72 mm,右帮煤体移近量为

6.97 mm。当煤岩比例为2:5时,巷道底板起鼓量为2.85 mm,顶板下沉量为4.65 mm,右帮岩体移近量为2.79 mm,右帮煤体移近量为7.11 mm。当煤岩比例为3:5时,巷道底板起鼓量为3.04 mm,顶板下沉量为5.04 mm,右帮岩体移近量为2.89 mm,右帮煤体移近量为10.69 mm。当煤岩比例为4:5时,巷道底板起鼓量为3.38 mm,顶板下沉量为5.49 mm,右帮岩体移近量为3.2 mm,右帮煤体移近量为13.17 mm。从以上数据可以看出。半煤岩巷道煤岩比例值的增加对半煤岩巷道的变形破坏有较大影响,随着巷道中煤层所占比例的不断增大,巷道更容易失稳破坏。因此,在半煤岩巷道的掘进过程中,出现煤层厚度变大的情况,应注意加强巷道支护。

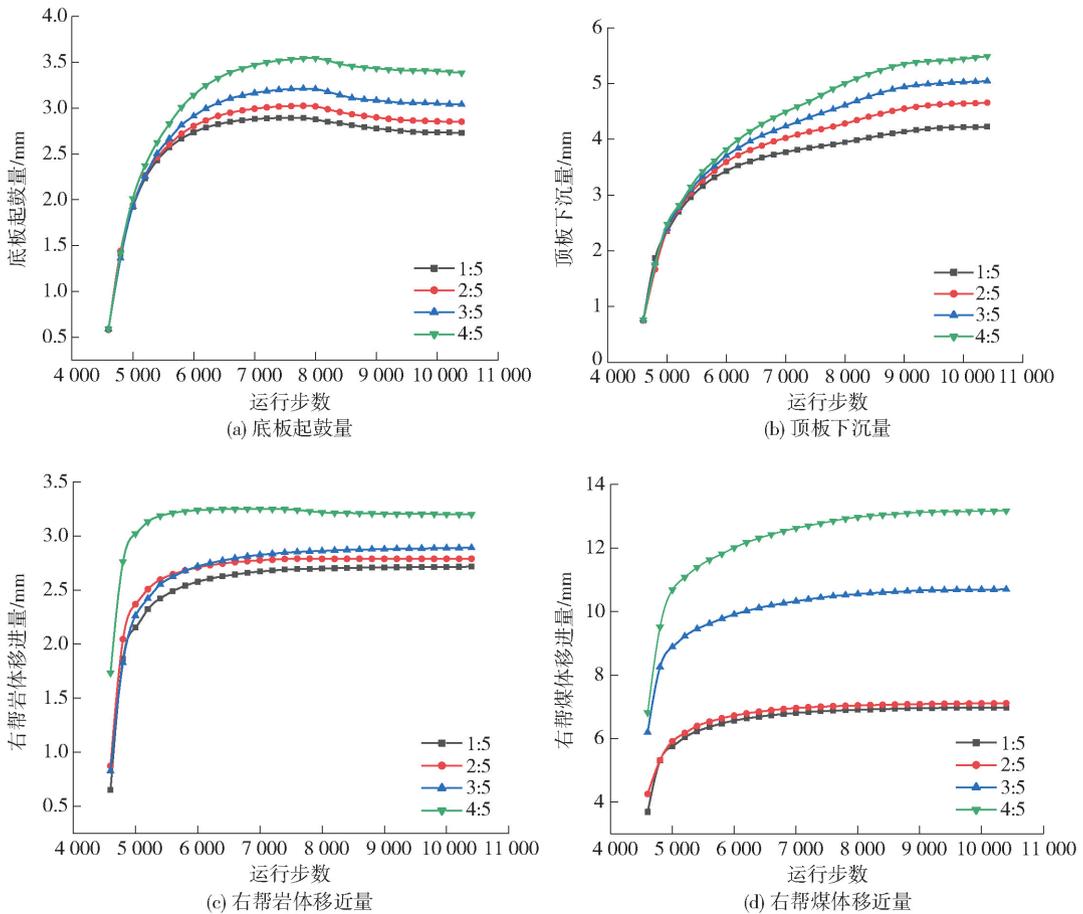


图6 不同煤岩比例巷道围岩位移情况

4.2 埋深对半煤岩巷道破坏变形规律的影响

根据上述理论分析,埋深对半煤岩巷道的变形破坏有很大影响。当埋深较浅时,巷道围岩所受应力较小,巷道围岩破坏的程度也较小,反之,巷道围

岩的破坏程度较大。为进一步探究埋深对半煤岩巷道变形破坏规律的影响,以10201运输巷为研究对象,并运用FLAC^{3D}数值软件分别对巷道处于不同埋深时的情况进行模拟。最后通过对模拟结果进行对

比分析,得出埋深对 10201 运输巷围岩变形破坏规律。本次模拟的埋深分别为 150 m、250 m、350 m,主要通过改变模型垂直应力和水平应力来模拟巷道处

于不同埋深的情况。

1) 不同埋深半煤岩巷道围岩塑性区分析
不同埋深时,巷道围岩塑性区分布如图 7 所示。

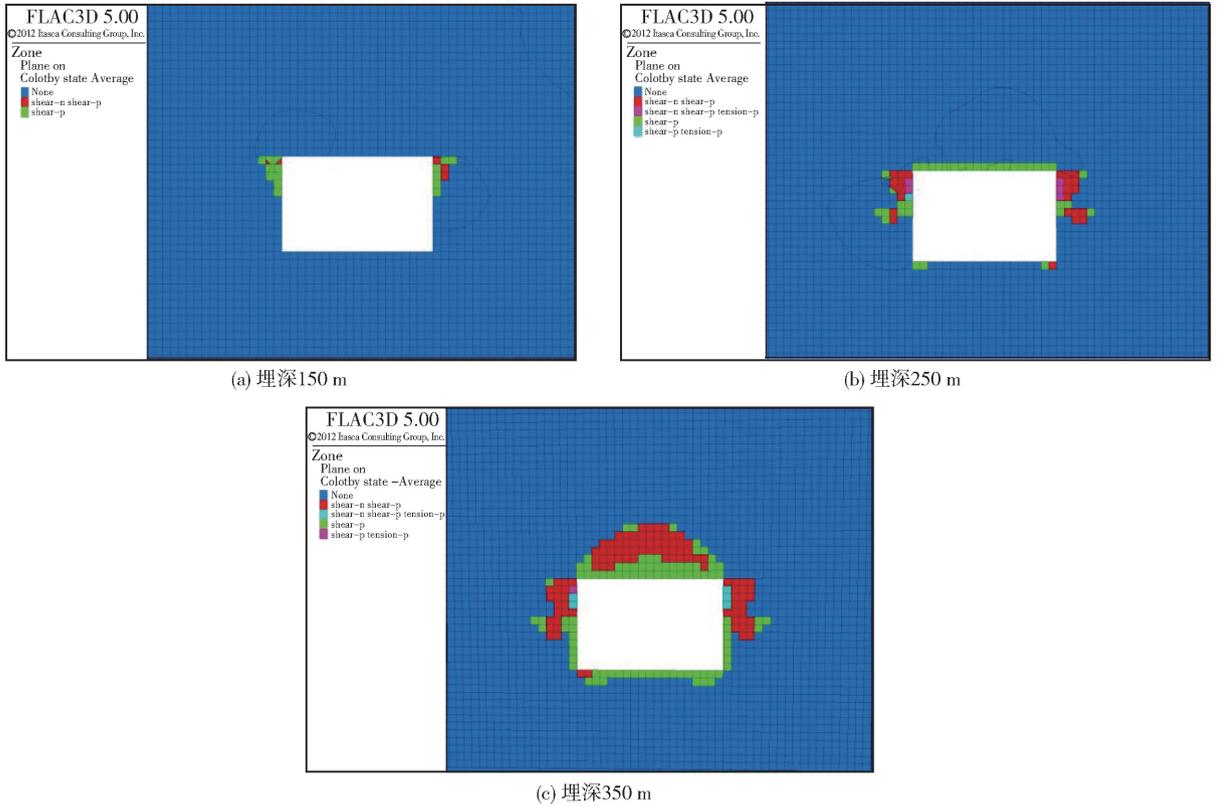


图 7 不同埋深时巷道围岩塑性区分布情况

由图 7 可知,不同埋深时巷道顶板塑性区上下不对称,巷道顶板塑性区分布范围远大于底板,巷道两帮塑性区呈左右对称分布。当巷道埋深为 150 m 时,巷道围岩塑性区分布仅分布于两帮煤层部分,主要为剪切破坏,由于巷道顶、底板岩层力学强度较大,巷道顶、底板无塑性区分布。巷道两帮最大破坏深度为 0.6 m。当巷道埋深为 250 m 时,巷道围岩主要表现剪切破坏,两帮煤层出现剪切-拉伸组合破坏。顶、底板塑性区范围较小,巷道两帮塑性区范围最大,最大破坏深度位于煤岩分界处,最大破坏深度为 1 m,顶板最大破坏深度为 0.2 m,巷道两帮最大破坏深度为 2 m。当巷道埋深为 350 m,巷道围岩主要表现剪切破坏,两帮煤层出现剪切-拉伸组合破坏。顶板塑性区范围最大,最大破坏深度为 1.4 m。巷道两帮煤层部分塑性区分布范围较埋深小时更大,其最大破坏深度为 1.2 m。

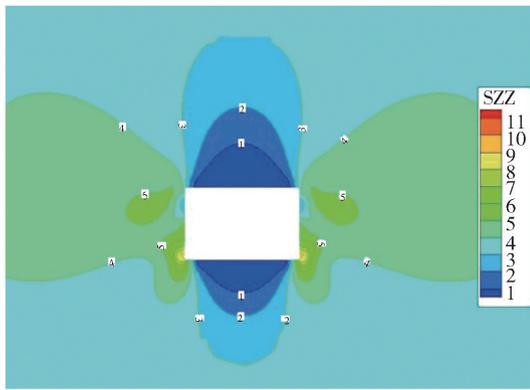
综上所述,埋深大小对巷道变形破坏有着重要影响,当埋深较小时,巷道仅有两帮煤层部分出现塑

性破坏,随着巷道埋深增加,巷道围岩的塑性区范围逐渐由煤层部分向巷道围岩其他位置扩散,该现象也从另一方面说明半煤岩巷道围岩变形破坏最先由巷道两帮弱结构面(煤层部分)开始,继而引起巷道围岩其他部位发生变形破坏。

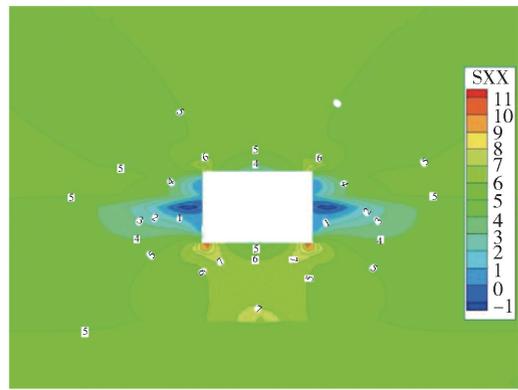
2) 不同埋深半煤岩巷道围岩应力分析

不同埋深时,巷道围岩应力分布情况如图 8 所示。

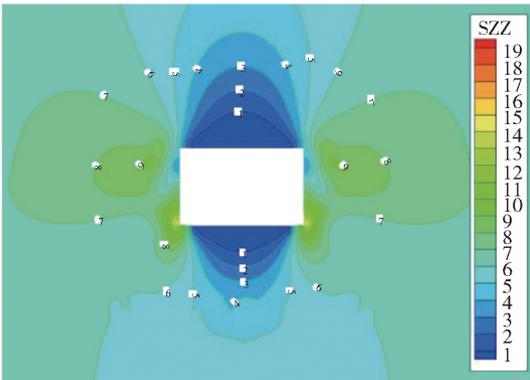
由图 8a、8b、8c 可知,巷道顶、底板处垂直应力呈拱形分布,为应力降低区,巷道两帮垂直应力呈耳状分布,为应力升高区。随着巷道埋深增加,巷道两帮耳状应力值逐渐增大,巷道两帮煤层部分高应力分布范围也越来越大。说明巷道埋深的增加,会逐渐使巷道围岩垂直应力值增大,对两帮弱结构(煤层)的影响尤为明显,致使其发生变形的可能性更大。由图 8d、8e、8f 可知,巷道两帮水平应力呈蝶形分布且左右对称,为应力降低区,随着巷道埋深增加,巷道围岩整体水平应力值逐渐变大。巷道顶、底板水平应力呈拱形分布且上下不对称,为应力升高



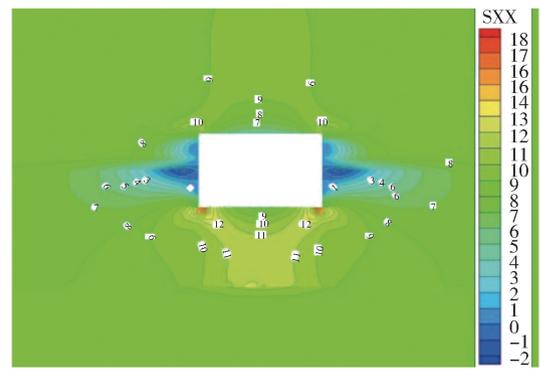
(a) 垂直应力分布情况(埋深150 m)



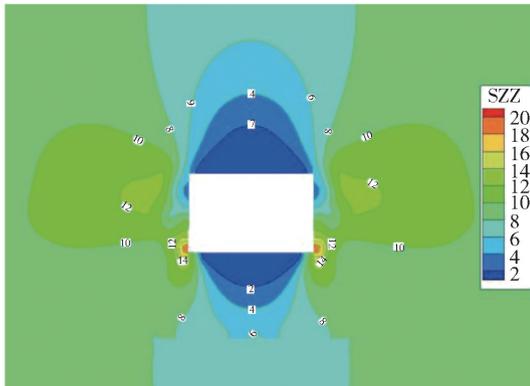
(d) 水平应力分布情况(埋深150 m)



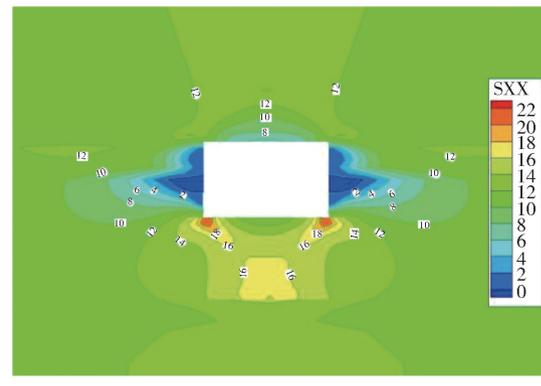
(b) 垂直应力分布情况(埋深250 m)



(e) 水平应力分布情况(埋深250 m)



(c) 垂直应力分布情况(埋深350 m)



(f) 水平应力分布情况(埋深350 m)

图 8 不同埋深时巷道围岩应力分布情况

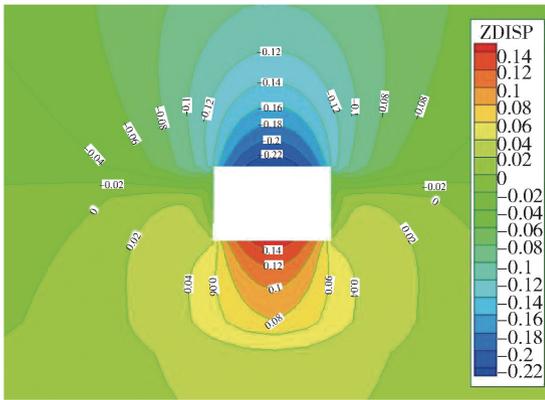
区。巷道顶板应力峰值最先于巷道上部两个边角出现,随着巷道埋深增加,该应力峰值也逐渐变大。巷道底板高应力分布范围比顶板广,且随着巷道埋深的增加,并不断向底板深处转移。由此可见,埋深对巷道围岩的应力分布有较大影响,当巷道埋深较大时,除了会使巷道应力峰值变大,还会造成巷道围岩高应力分布范围变大,特别是对巷道两帮弱结构(煤层)的影响更为显著。

3) 不同埋深半煤岩巷道围岩位移分析

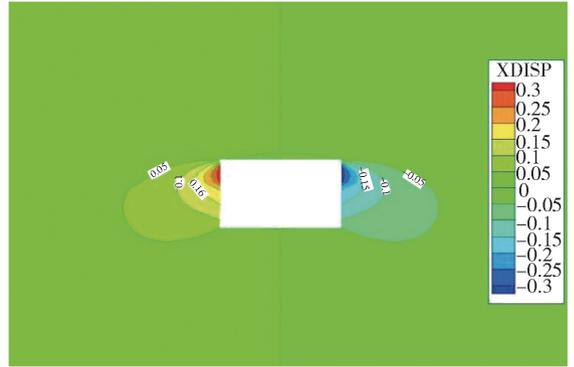
不同埋深时,巷道围岩位移分布情况如图 9

所示。

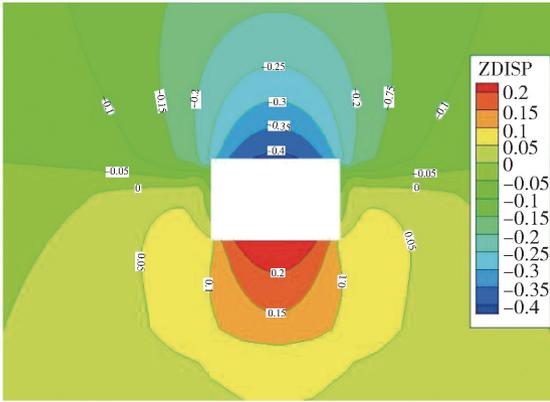
由图 9a、9b、9c 可知,巷道垂直位移主要分布在巷道顶、底板位置,在巷道围岩其他位置不明显。顶、底板垂直位移呈不规则拱形分布且上下不对称,巷道顶板垂直位移大于底板。顶、底板的垂直位移量随着巷道埋深的增大而增大。由图 9d、9e、9f 可知,巷道水平位移只要集中在巷道两帮位置,在巷道围岩其他位置也不明显,巷道两帮水平位移呈左右对称分布。两帮最大水平位移量集中分布在煤层部分,随着巷道埋深的增加,巷道两帮水平位移量也越



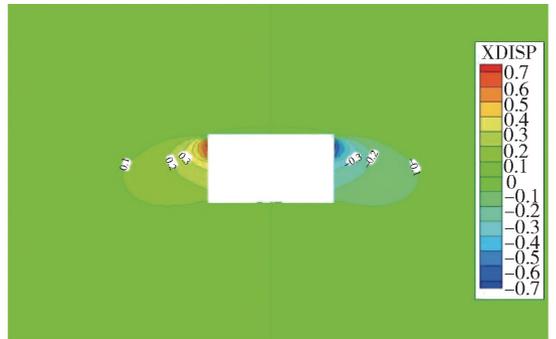
(a) 垂直位移分布情况(埋深150 m)



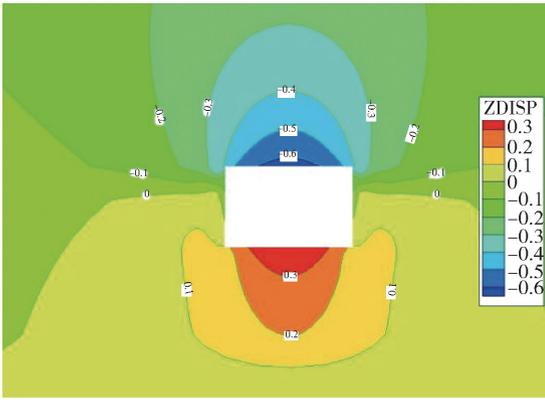
(d) 水平位移分布情况(埋深150 m)



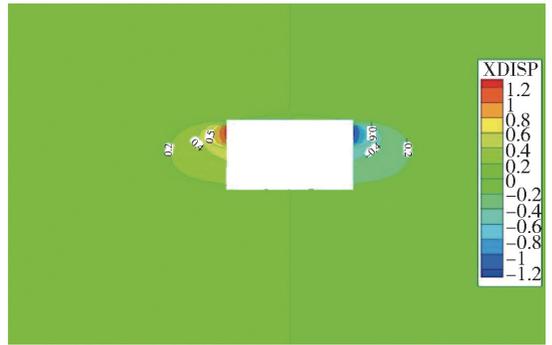
(b) 垂直位移分布情况(埋深250 m)



(e) 水平位移分布情况(埋深250 m)



(c) 垂直位移分布情况(埋深350 m)



(f) 水平位移分布情况(埋深350 m)

图9 不同埋深时巷道围岩位移分布情况

来越大,其中,巷道两帮煤层部分位移量变化最为明显。

由图10可知,随着巷道埋深增大,巷道围岩移近量也越来越大,且变化比较明显。其中,巷道帮部煤体移近量最大。当巷道埋深为150 m时,巷道底板起鼓量为1.51 mm,顶板下沉量为2.37 mm,右帮岩体移近量为1.38 m,右帮煤体移进量为2.67 mm。当巷道埋深为250 m时,巷道底板起鼓量为2.58 mm,顶板下沉量为4.16 mm,右帮岩体移近量

为2.35 m,右帮煤体移进量为5.71 mm。当巷道埋深为350 m时,巷道底板起鼓量为3.76 mm,顶板下沉量为6.37 mm,右帮岩体移近量为3.41 m,右帮煤体移进量为10.24 mm。从以上数据可知,巷道埋深对半煤岩巷道的变形破坏有很大影响,对巷道两帮煤层部分的影响效果较为显著。当巷道埋深较大时,巷道两帮煤层位置更容易发生变形破坏。同时,由于埋深较大,巷道其他部分围岩所受应力同样变大,巷道整体发生失稳的可能性提高。

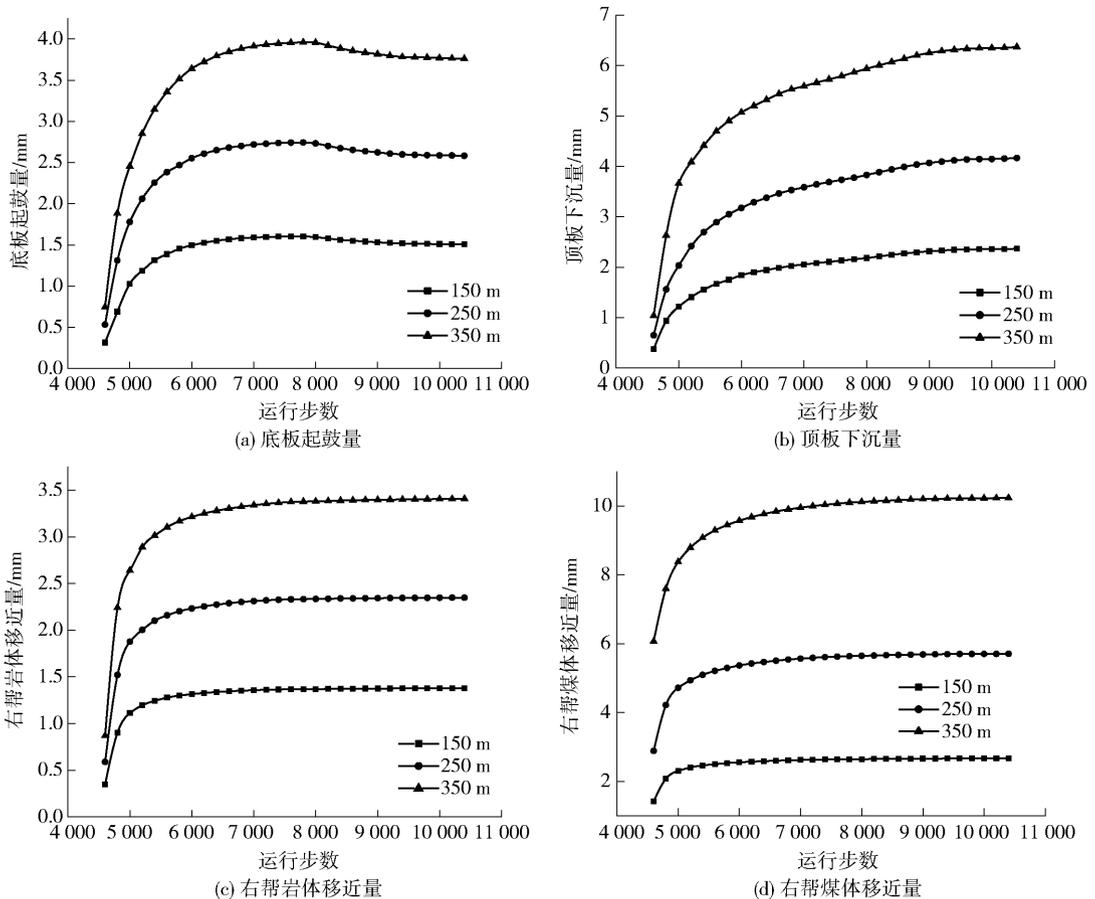


图 10 不同埋深时巷道围岩移进量

由图 11 可知,不同埋深下巷道帮部煤体移近量远大于岩体,煤岩体的相对位移量随着巷道埋深增大而增大。当巷道埋深为 150 m 时,右帮岩体移近量为 1.38 m,右帮煤体移进量为 2.67 mm,相对位移量为 1.29 mm。当巷道埋深为 250 m 时,右帮岩体移近量为 2.35 m,右帮煤体移进量为 5.71 mm,相对位移量为 3.36 mm。当巷道埋深为 350 m 时,右帮岩体移近量为 3.41 m,右帮煤体移进量为 10.24 mm,相对位移量为 6.83 mm。从以上数据可知,巷道埋深对半煤岩巷道两帮的变形破坏有很大影响。巷道埋深越大,半煤岩巷道两帮产生的不对称变形越明显。

5 结论

(1) 通过理论分析得出 10201 运输巷在掘进后,巷道两帮煤层部分最先发生破坏,其破坏深度大于巷道其他部分围岩,随着时间的推移,帮部煤体承载能力会不断降低,继而导致巷道其他位置发生变形破坏。

(2) 煤岩比例的大小对半煤岩巷的变形破坏有

重要影响,煤岩比例越大,巷道围岩形成的塑性区范围也越来越大,巷道越容易失稳,当半煤岩巷道煤岩比例值增加时,应注意加强巷道两帮煤层和煤岩交界处的支护管理。随着煤岩比例值的增加,巷道围岩形成的高应力范围越大,且集中在巷道两帮煤层部分,更容易造成巷道结构失稳。随着半煤岩巷道煤岩比例值增大,巷道两帮水平位移明显增加,位移峰值主要集中在巷道两帮煤层部分,巷道围岩整体位移量也逐渐增加,特别是巷道两帮煤层部分。

(3) 通过模拟不同埋深时半煤岩巷道的变形破坏规律得出,随着巷道埋深增加,巷道围岩的破坏范围逐渐由煤层部分向巷道围岩其他位置扩散,揭示了半煤岩巷道最先由巷道弱结构面(煤层部分)向巷道其他位置扩展的变形破坏规律,且巷道两帮的不对称变形也随埋深增加而变大。

[参考文献]

- [1] 张玉韩,曾建鹰,崔荣国. 中国煤炭产能时空格局演变及碳中和支撑政策研究[J]. 地域研究与开发,2022,41(6):1-6+13.

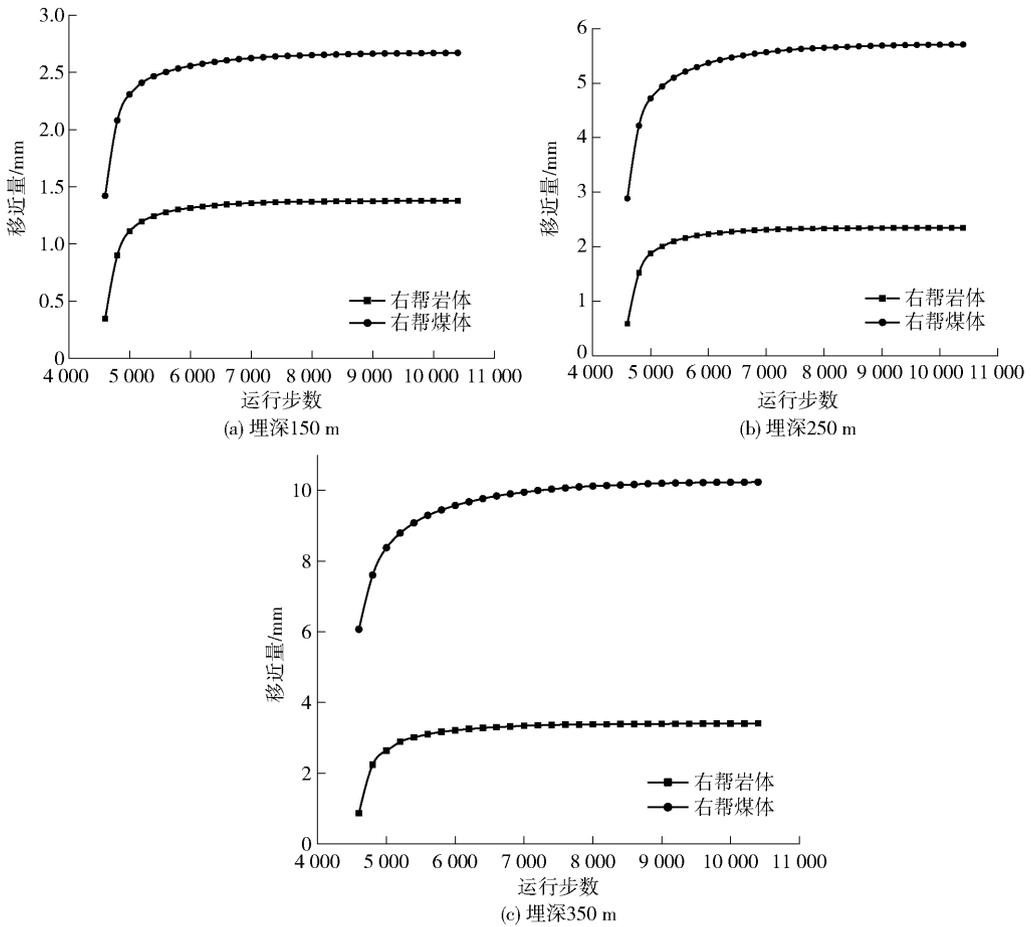


图 11 不同埋深下巷道帮部煤岩体相对位移量

[2] 张宏,郑旭鹤. 双碳愿景下煤炭行业低碳可持续发展模式研究[J]. 煤炭经济研究,2022,42(9):66-73.

[3] 康红普,谢和平,任世华,等. 全球产业链与能源供应链重构背景下我国煤炭行业发展策略研究[J]. 中国工程科学,2022,24(6):26-37.

[4] 赵象卓,王春刚,周坤友,等. 大倾角特厚煤层半煤岩巷道失稳地质动力条件及支护优化[J]. 煤炭科学技术,2022,50(11):20-29.

[5] 张磊,李伟东,汪义龙,等. 薄煤层半煤岩巷道切顶成巷矿压规律研究及应用[J]. 煤炭工程,2022,54(10):104-108.

[6] 闫大鹤,程志恒,刘毅,等. 沙曲矿半煤岩巷道锚杆支护技术研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(S1):12-17.

[7] 张勇,张江利,张西斌,等. 半煤岩巷道围岩变形破坏分析及支护技术研究[J]. 中国煤炭,2012,38(5):54-57.

[8] 潘欢欢,查文华. 掘采扰动下坚硬顶板半煤岩巷道围

岩破坏特征分析及支护实践[J]. 矿业研究与开发,2020,40(8):97-102.

[9] 管俊才. 高帮大断面半煤岩巷道控制技术研究[J]. 煤矿开采,2017,22(6):69-73.

[10] 田忠喜. 薄煤层大断面半煤岩巷道快速掘进及支护稳定性分析[J]. 煤炭技术,2015,34(10):73-76.

[11] 高林,刘鹏泽,张盼栋,等. 基本顶断裂形式对倾斜煤层沿空半煤岩巷围岩稳定性影响研究及工程应用[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(6):73-80.

[12] 邱文华,孔令海,欧阳振华,等. 复杂条件半煤岩巷道顶板控制技术研究[J]. 煤炭工程,2017,49(11):45-49.

[13] 姚琦,冯涛,王卫军,等. 极破碎围岩半煤岩巷变形破坏机理及支护控制研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(5):32-39.

[14] 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.