

高渗压下砂砾层巷道变形稳定性分析

袁越^{1,2*}, 付金磊³, 秦坚³, 陈国豪³, 刘诚³

- (1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 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;
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了获得高渗压对西部矿区中生代砂砾层巷道变形、稳定性的影响规律, 通过理论分析与数值模拟的方法探讨了渗流作用下围岩变形特征及巷道失稳致灾的原因, 得到了渗压影响下的巷道围岩变形解及塑性区半径解。分析结果表明: 外部渗透压力与砂砾层巷道围岩的变形近似呈线性关系, 高压渗流对巷道顶板及帮部的变形、稳定性影响较显著; 围岩产生较大变形后难以形成自平衡拱, 同时, 顶部水头压力较高, 进一步增加了顶板下沉量, 从而导致顶板松散岩体滑移、垮落, 产生冒顶灾害。

关键词: 西部矿区; 砂砾层; 渗流; 高渗透压; 巷道失稳

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2018)04-0022-09

Analysis of Deformation and Stability of the Roadway in Sandy-gravel Stratum Under High Seepage Pressure

Yuan Yue^{1,2}, Fu Jinlei³, Qin Jian³, Chen Guohao³, Liu Cheng³

- (1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201, China;
3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to obtain the influence law of high osmotic pressure on the deformation and stability of the Mesozoic sand-gravel stratum in the western mining area, through the theoretical analysis and numerical simulation method, the deformation results of the surrounding rock under the seepage and the cause of the instability of the roadway are discussed. The deformation of the surrounding rock and the radius solution of the plastic zone under the influence of seepage pressure are obtained. The external seepage pressure is approximately linear with the deformation of the shallow surrounding rock in the sandy-gravel stratum, and the high seepage pressure has significant effects on the deformation and stability of the roof and sidewalls. After the large deformation of the surrounding rock occurs, it is difficult to form a balanced arch. At the same time, the high water head pressure at the top and the large flow further increase the roof subsidence, which leads to the slip and collapse of loose rock mass in the roof, or the disaster of roof falling.

Keywords: the western mining area; sandy-gravel stratum; seepage; high seepage pressure; instability of roadway

我国西部煤炭资源丰富, 总量约占全国的 55%, 因而煤炭开采利用在西部大开发战略中具有重要地位^[1]。中生代是西部矿区成煤史上重要的聚煤时期之一, 这些地区中生代煤系地层常含有一层厚度不一的

河道相或三角洲相沉积砂砾层^[2-4].随着西部大型煤炭基地的建设,砂砾层巷道的数量也在逐步增多.由于西部地区白垩系、侏罗系煤系地层如砂砾层成岩作用差、多为软弱岩层,部分含水层属孔隙、裂隙承压含水层,富水性较强,但隔水层又不明显^[5-7],在高水压渗流的作用下导致巷道局部变形严重、围岩难以控制,时有顶板垮冒、片帮、支架扭曲失效甚至突水灾害等发生.因此,渗涌水条件下特别是高压渗流中生界砂砾巷道的围岩稳定性控制问题有待急需解决.

从气候、地理、环境上来说我国西部矿区的水资源严重短缺,必须坚持煤炭资源可持续、绿色开采.但是在干旱少水的西部矿区,井巷建设及维护仍然受地下水的严重影响^[7],开展水压作用下该区域具有特殊工程力学特性围岩巷道的变形破坏机制及稳定性分析是一项基础性工作.在地下水环境影响下巷(隧)道围岩变形、稳定性理论分析及数值求解方面,荣传新^[8]提出了渗流巷道稳定平衡态的孔隙水压临界值,得到了损伤区半径与孔隙水压间的关系;李宗利等^[9]通过解析法获得了渗流对巷道切向应力及塑性半径的影响;高召宁等^[10]证明了应变软化、侧压系数、孔隙水压等对隧道破裂区的影响比塑性区更明显;而师文豪,杨天鸿等^[11]则针对破碎岩体突水非线性特征,建立了非达西流模型并应用 FEPG 进行了数值求解.在地下硐室、巷道渗流变形破坏、稳定性分析工程实践方面;李术才等^[12]基于离散介质流固耦合理论分析了石油库在水幕压力下的应力、位移、松动区分布特征;张农等^[13]基于巷道裂隙发育及“三向”渗流特征提出了泥质巷道渗流灾害控制技术;张科学^[14]认为在高水压渗流下泥质围岩体积可增大 50%~60%,极易造成围岩软化、泥化和巷道失稳.可见目前对高压渗流影响下砂砾层巷道围岩变形稳定性研究较少,本文采用理论分析结合数值计算的方法探讨了砂砾巷道围岩变形、塑性区范围与外部渗透压力的关系、围岩应力-渗流变形特征及巷道失稳致灾的原因.

1 渗流作用下圆巷变形理论分析

1.1 基本假设及巷道模型

基于经典弹塑性理论进行巷道围岩理论计算时,做如下基本假设:

- 1) 巷道处于深埋状态,断面形状为圆形;简化为一平面应变问题;
- 2) 设砂砾层巷道围岩为连续均匀各向同性材料,并具有孔隙性,即等效为均匀多孔介质;
- 3) 假定所处的力学环境为均匀应力场,即垂向与水平方向的地应力相等;
- 4) 地下水位较高,巷道赋存的地层为承压含水层,不考虑巷道的支护作用.

建立深埋圆形巷道渗流作用下的力学模型如图 1 所示.设巷道所处的地应力场为 P_0 , 巷道设计断面半径为 r_0 , 远场半径为 r_f , 其中 $r_f \geq r_0$. 围岩内任一点 C 的极坐标为 (r, θ) , 在巷道开挖面及远场位置的孔隙水压力分别为 u_0, u_f . 极坐标系下 C 点的应力分量及应变分量分为 $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \gamma_{r\theta}$, 径向位移为 u_r .

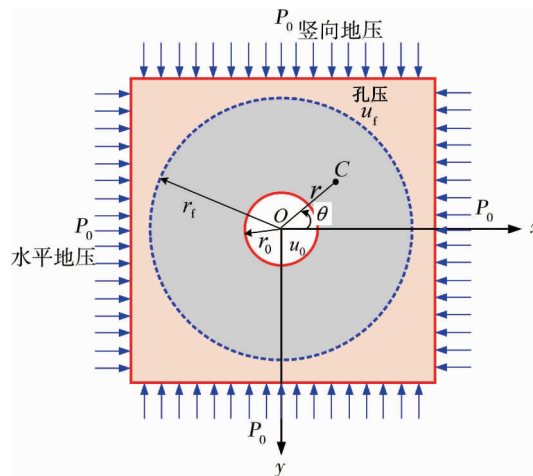


图1 圆巷计算模型

1.2 基本方程及围岩变形

对于地下富水圆形巷道,不仅受到地应力的作用,而且水压力对围岩变形及稳定性也具有重要的影响.由 Terzaghi 的有效应力原理^[15,16]可知,岩土体的总应力为有效应力与孔隙水压力之和.据文献[17],水

对围岩变形及应力的影响可采用静水压力下巷道围岩的压缩性质进行刻画.以上问题为平面轴对称应变问题,需满足以下基本方程:

$$\text{平衡方程: } \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (1)$$

$$\text{几何方程: } \varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \gamma_{r\theta} = 0. \quad (2)$$

$$\text{物理方程}^{[18,19]}: \begin{cases} \varepsilon_r + (1 + \mu)K\Delta u = \frac{1 - \mu^2}{E}(\sigma_r - \frac{\mu}{1 - \mu}\sigma_\theta); \\ \varepsilon_\theta + (1 + \mu\gamma_{r\theta} = 0)K\Delta u = \frac{1 - \mu^2}{E}(\sigma_\theta - \frac{\mu}{1 - \mu}\sigma_r); \\ \gamma_{r\theta} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: K 为巷道围岩在静水压力 P_1 作用下,当 P_1 增加一个单位时岩土单位体积产生的压缩量 ($K = \frac{K_V}{3}(1 - \frac{K_S}{K_V})$); $K_V = \frac{3(1 - 2\mu)}{E}$, K_V 为体积模量的倒数; K_S 为岩土体的单位体积压缩系数^[15]); E, μ 为巷道围岩的弹模及泊松比; Δu 为任一点 C 的孔压 u_C 相对于巷道壁的孔压增量,即 $\Delta u = u_C - u_0$, 此处假设孔压仅为关于变量 r 的函数.

$$\text{边界条件为 } \sigma_r|_{r=r_f} = P_0, \sigma_r|_{r=r_0} = 0. \quad (4)$$

依据弹性理论中的孔边应力集中问题,可得到应力:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_0(1 - \frac{r_0^2}{r^2}) + K_w \frac{1}{r^2} \int_{r_0}^r (u_C - u_0) r dr; \\ \sigma_\theta = P_0(1 + \frac{r_0^2}{r^2}) - K_w [\frac{1}{r^2} \int_{r_0}^r (u_C - u_0) r dr - (u_C - u_0)]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_w 为与体积变形有关的系数, $K_w = \frac{KE}{1 - \mu}$.

结合式(3)可得巷道围岩径向位移为

$$u_r = r\varepsilon_r = r \frac{1 - \mu^2}{E}(\sigma_r - \frac{\mu}{1 - \mu}\sigma_\theta) - r(1 + \mu)K\Delta u = \frac{1 + \mu}{E} [P_0 \frac{r_0^2}{r} + (1 - 2\mu)P_0 r - K_w \frac{1}{r} \int_{r_0}^r (u_C - u_0) r dr]. \quad (6)$$

根据文献[20],巷道围岩孔隙水压力沿径向方向的分布规律为

$$u_C = u_0 + (u_f - u_0) \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_f/r_0)}. \quad (7)$$

因此,式(7)化为 $u_r = \frac{1 + \mu}{E} [P_0 \frac{r_0^2}{r} + (1 - 2\mu)P_0 r - K_w \frac{1}{r} \int_{r_0}^r (u_f - u_0) \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_f/r_0)} r dr]$. (8)

$\int_{r_0}^r (u_f - u_0) \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_f/r_0)} r dr$ 分部积分的结果为 $(u_f - u_0) \frac{1}{\ln(r_f/r_0)} [\frac{1}{2} \ln(r/r_0) r^2 - \frac{1}{4} (r^2 - r_0^2)]$, 则

$$u_r = \frac{1 + \mu}{E} \left\{ P_0 r \left[\frac{r_0^2}{r^2} + (1 - 2\mu) \right] - K_w r (u_f - u_0) \frac{1}{\ln(r_f/r_0)} \left[\frac{1}{2} \ln(r/r_0) - \frac{1}{4} (1 - \frac{r_0^2}{r^2}) \right] \right\}. \quad (9)$$

图2为一定围岩性质条件下($E=1.157$ GPa, $\mu=0.3$)半径2 m圆形巷道的围岩变形曲线,设定的条件为均匀原岩应力15 MPa,影响半径即远场位置8 m, $K=0.2619$,开挖面孔压为0 MPa.从图2中可以看出,在半径3 m范围内深埋巷道围岩的变形量与外部孔隙水压近似呈线性关系.在初始渗压为0时,由于地应力较高,此时仍然存在一定的变形量,随着围岩远场孔压的不断增大即渗透水压力持续升高,围岩变形亦逐步增大.尽管围岩变形速率较缓,但渗流作用对巷道围岩变形及稳定性的影响仍较明显,若是矿井采掘活动中存在爆破、冲击等动载荷引起围岩渗压瞬增,那么围岩变形将可能急剧增加,进而导致巷道快速失

稳破坏.

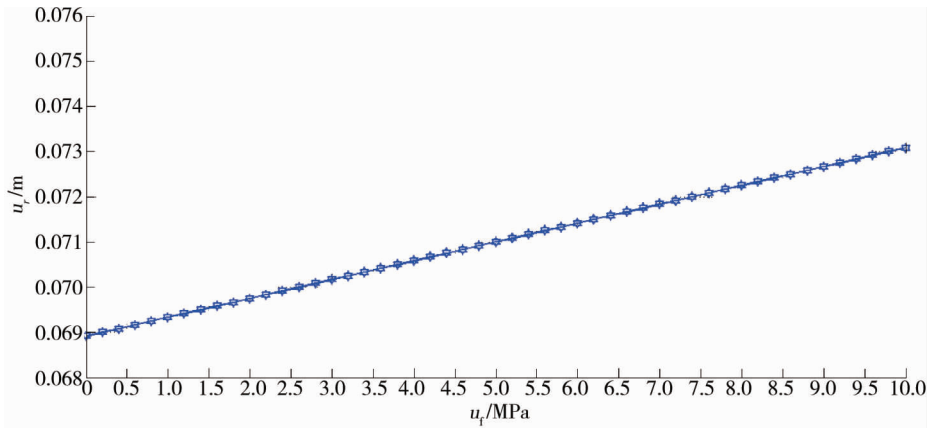


图2 围岩变形曲线

1.3 塑性区范围

含水围岩在开挖后部分范围岩体达到屈服进入塑性状态,巷道周边形成塑性区、弹性区,塑性区半径为 r_p ,弹性区半径为 r_t ,相应位置的孔压分为 u_p, u_t .围岩弹、塑性区的应力分以有效应力表示,即 $\sigma'_{re}, \sigma'_{\theta e}, \sigma'_{rp}$ 与 $\sigma'_{\theta p}$;围岩黏聚力 c ,内摩擦角 φ .由文献[17]有

$$\sigma'_{re} = P_0 - (P_0 - u_p - \sigma'_{rc}) \left(\frac{r_p}{r}\right)^2 + \frac{K_w}{2}(u_t - u_p) \left[B - 1 + \left(\frac{r_p}{r}\right)^2\right] - u_c. \quad (10)$$

式中: σ'_{rc} 为塑性区边界处的塑性有效径向应力; $B = \frac{1}{\ln(r_t/r_p)} \left\{ \ln \frac{r}{r_p} - 0.5 \left[1 - \left(\frac{r_p}{r}\right)^2 \right] \right\}$.

$$\sigma'_{\theta e} = P_0 + (P_0 - u_p - \sigma'_{rc}) \left(\frac{r_p}{r}\right)^2 - \frac{K_w}{2}(u_t - u_p) \left[B - 1 + \left(\frac{r_p}{r}\right)^2\right] + K_w(u - u_t) - u_c; \quad (11)$$

$$\sigma'_{rp} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\eta-1} \left(\frac{\xi}{\eta-1} - P_d\right) - \frac{\xi}{\eta-1} + P_d. \quad (12)$$

式中: $\eta = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$; $\xi = \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$; $P_d = \frac{\zeta}{\eta-1} \frac{u_p - u_0}{\ln(r_p/r_0)}$, ζ 为有效孔压系数.

根据弹性区与塑性区的接触条件,即在交界面上径向应力保持连续,且应满足 M-C 屈服准则:

$$\sigma'_{\theta e} - \eta\sigma'_{re} - \xi = 0. \quad (13)$$

$$\text{又 } \sigma'_{re} + \sigma'_{\theta e} = 2P_0 + K_w(u_p - u_t) - 2u_p. \quad (14)$$

从式(13)和式(14)解得 σ'_{re} ,式(12)中令 $r = r_p$,得到 σ'_{rp} ,可得

$$\sigma'_{re} = \sigma'_{rp}. \quad (15)$$

求解方程得塑性区范围:

$$r_p = r_0 \left(c \cot\varphi - P_d \right)^{\frac{1}{1-\eta}} \left\{ \left[P_0 - u_p - \frac{K_w(u_t - u_p)}{2} + c \cot\varphi \right] (1 - \sin\varphi) - P_d \right\}^{\frac{1}{\eta-1}}. \quad (16)$$

2 高渗压下砂砾层巷道稳定性数值计算

2.1 工程概况

新疆某大型煤矿位于我国准西北煤田,井田内出露地层主要为中生界侏罗系三工河组、西山窑组、头屯河组和新生界第三系乌伦古河组、西河组及第四系.矿井采用两斜一立井多水平综合开拓方式,首采煤层为 B10 煤层,平均厚度 6.2 m.一水平井底车场赋存于中生界侏罗系砂砾层中,巷道埋深约 460 m,不受采动影响.巷道净宽×净高为 4.8 m×4.0 m,采用 U29 棚式支护.砂砾层厚 13 m,强度低、胶结性差,上覆强富水中砂岩(40~60 m)、下伏煤层及 4 m 泥岩.掘进面涌水量大(25 m³/h),严重影响巷道的稳定性^[3].

2.2 计算模型、参数及边界

以一水平井底车场为研究对象,建立有限差分计算模型(图3),模型长×宽×高为 20 m×30 m×30 m.巷

道全断面一次开挖.为掌握巷道围岩应力、位移场及渗流场的演变规律,布置了 3 条监测线,见图 4.

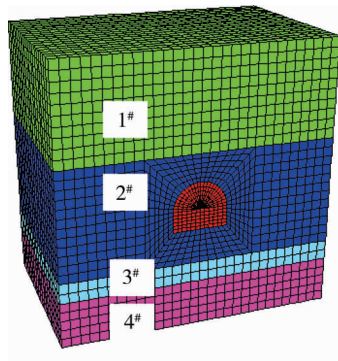


图 3 数值模型

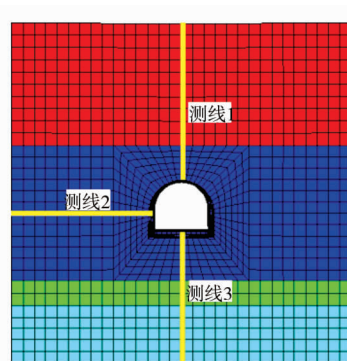


图 4 测线布置

根据矿井地质勘探数据及室内试验确定围岩物理力学参数(见表 1)^[3],采用 Mohr-Coulumb 准则作为材料破坏准则,计算中涉及的水力学参数见表 2.

表 1 模型计算参数

编号	地层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1#	中砂岩	2.9	0.34	1.47	1.90	29
2#	砂砾层	2.3	0.30	0.02	0.11	27
3#	煤	3.2	1.22	2.00	2.20	30
4#	泥岩	4.1	2.61	1.97	2.68	31

表 2 水力参数

地层	中砂岩	砂砾层	煤	泥岩
孔隙率	0.10	0.20	0.05	0.04
渗透系数(m ² /(Pa·sec))	1.6×10 ⁻¹⁰	1.8×10 ⁻⁹	2.4×10 ⁻¹²	4.3×10 ⁻¹²

模型侧面限制法向位移,底部固定,上表面覆岩自重荷载为 6.2 MPa.模拟巷道一次性全断面开挖,砂砾层上覆厚富水砂岩,认为顶部为定水头透水边界,开挖面为渗流面.围岩饱和,孔压在垂向以 10⁴ Pa 等梯度递减.

2.3 结果分析

1) 围岩卸荷响应的空间演化特征

巷道掘出前围岩处于静水压力状态,掘出后围岩渗流场发生了变化.从图 5~图 7 可以看出,随着距巷道壁距离的增大,孔压显著增高,其中顶板内最大孔压为 0.11 MPa,底板内最大孔压约为 0.32 MPa,左帮围岩最大孔压约为 0.17 MPa.当接近距巷道表面 4 m 的区域时围岩孔压变化较大,而超出 4 m 范围后巷道围岩体孔压上升的速率有所减小,这可能是因为巷道围岩局部区域应力集中后产生的影响.

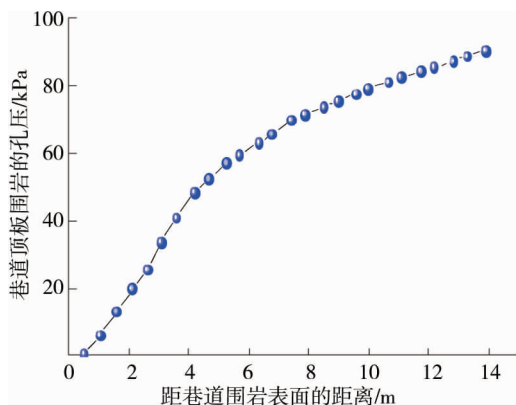


图 5 监测线 1 上孔压分布

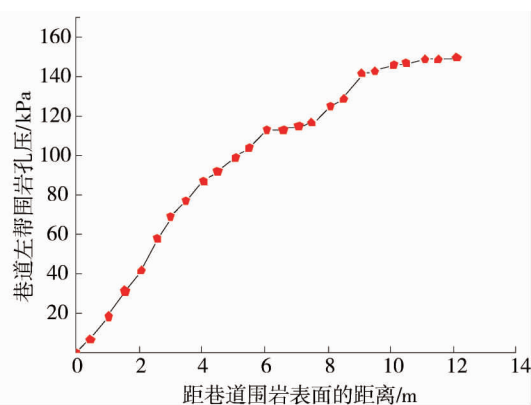


图 6 监测线 2 上孔压分布

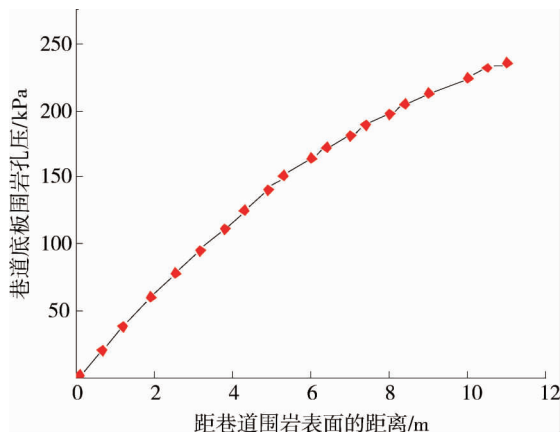


图 7 监测线 3 上孔压分布

考虑高渗透水压作用下巷道围岩变形量较一般条件下明显偏大,但围岩变形总的趋势大体上一致.从图 8~图 10 中可以看出,车场巷道顶、底板最大位移分别为 106.0,8.5 mm,而左边墙最大变形约为 78 mm.自巷道表面向围岩内部变形逐步减小.在深度 0.0~2.5 m 范围内,左边墙及巷道顶板的变形以较大的速率减小,而超过 2.5 m 深度之后围岩变形的变化不大,最终趋于 0;而对于车场巷道底板而言,在 0~1 m,2~3 m 的深度范围内围岩体位移的变化明显,其他部位的位移变化相对较小.比较可知,在高渗压作用下顶板及帮部的变形更为严重.此外,该区砂砾地层围岩胶结性差、整体强度较低,围岩产生较大变形后难以形成自平衡拱,顶板破碎体易滑移、垮落,发生冒顶灾害.

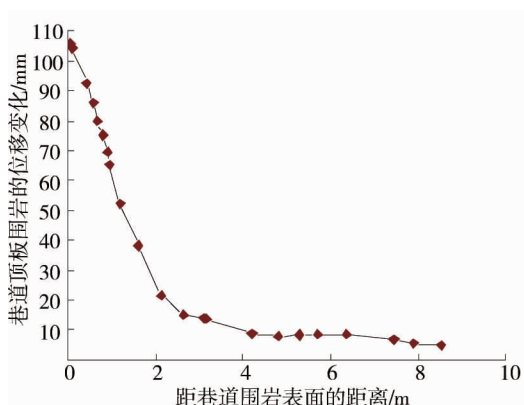


图 8 监测线 1 上围岩位移分布

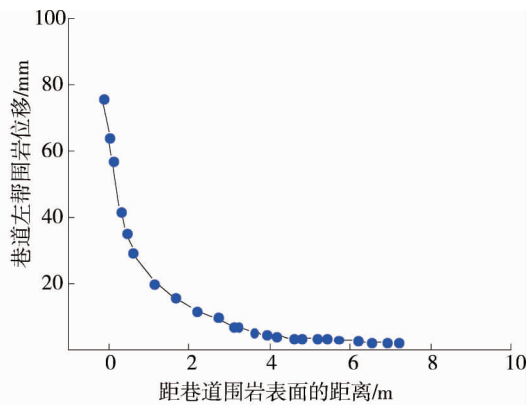


图 9 监测线 2 上围岩位移分布

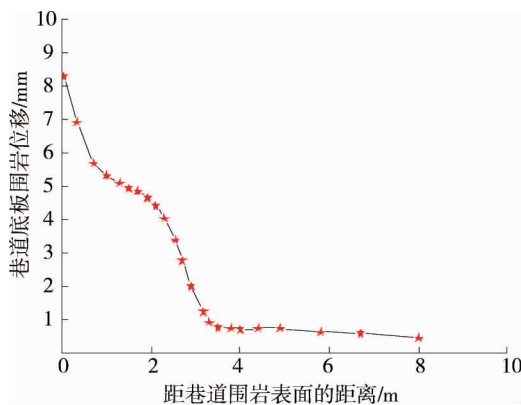


图 10 监测线 3 上围岩位移分布

图 11~图 13 为围岩应力沿深度在水平及垂向上的变化曲线,由图可见,随着距巷道壁深度的增加,围

岩应力总体上逐步增大,而在0~2 m的深度范围内,围岩顶板及两帮的应力变化较为显著,该区域的围岩变形变化同样较明显.由于巷道开挖卸荷、围岩应力重分布,随着变形的释放、稳定渗流的作用,该范围围岩形成若干应力降低区,时常伴随着围岩松动、滑移、脱落等现象的发生,此时,应进行及时支护甚至有必要超前支护,否则成岩作用差、整体强度低的砂砾层巷道极可能产生冒顶、溃帮等非线性大变破坏.图中显示,帮部垂向最大应力约为9.5 MPa,而底板及顶板的垂向最大应力值仅约为2.5,3.7 MPa,最大的水平应力分别为3.7 MPa与5.0 MPa.这可以说明车场巷道掘开后在围岩渗流作用下,顶板及底板部位围岩体的应力明显减小,这很大程度上是由于竖向变形导致垂向应力得到了较大幅度的释放,进而顶底板围岩的松动破裂范围增大也较为明显.

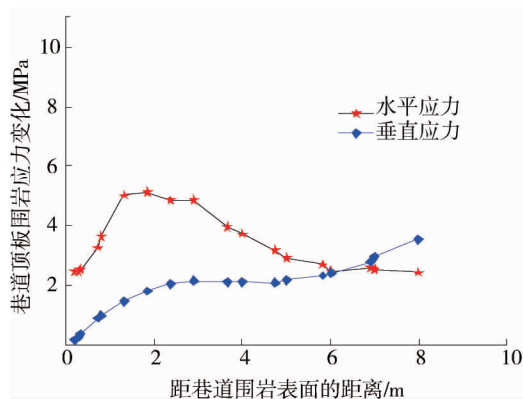


图 11 监测线 1 上围岩应力分布

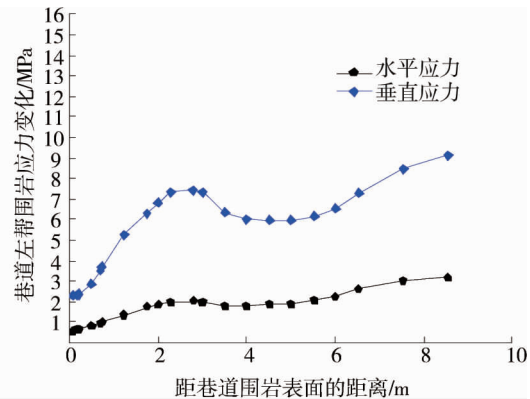


图 12 监测线 2 上围岩应力分布

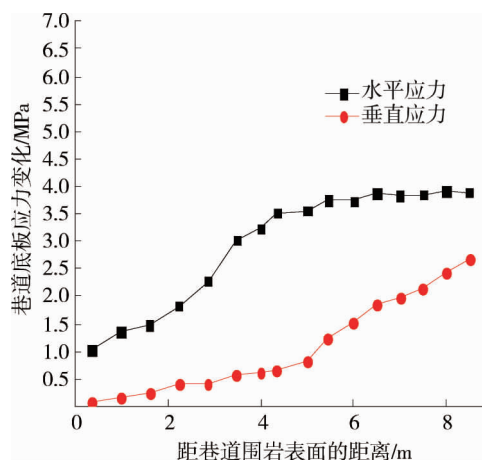


图 13 监测线 3 上围岩应力分布

2) 围岩变形破坏的时步演化特征

为了清楚地了解高渗压作用下车场巷道围岩变形随计算时步的变化规律,绘制了不同计算时步下围岩的水平位移场、竖向位移场图,如图 14 及图 15 所示.从图中可以看出,车场巷道围岩的竖向位移及水平位移均随着计算时步增加而逐步增加.最终巷道顶、底板的收敛变形量约为 123 mm,左右两帮的收缩变形量约为 173 mm,相对于右帮而言,左帮围岩体的挤出变形量更大.

值得注意的是,变形最为明显的是顶板区域,这主要是因为巷道围岩渗流不均匀引起.在原岩应力场作用下巷道开挖形成后产生一定变形,而上覆厚承压含水层在顶部作用较高水头形成强渗流,顶板区域围岩的渗流(淋水)量偏大,从而大大增加了顶板的下沉变形,例如,在巷道顶板 2 m 深度以外的区域产生了锥形沉降带,此外,巷道两顶角区域亦产生了约 100 mm 的变形量.由此可见,由于该矿区中生界砂砾地层具有整体强度低、胶结性差、强透水性等特征,在施工过程中巷道顶板是重点支护及控制的部位.为了防止巷道掘进过程中频繁发生漏顶或大面积冒顶灾害、保证工程施工安全,应该采取合理的超前支护措施.

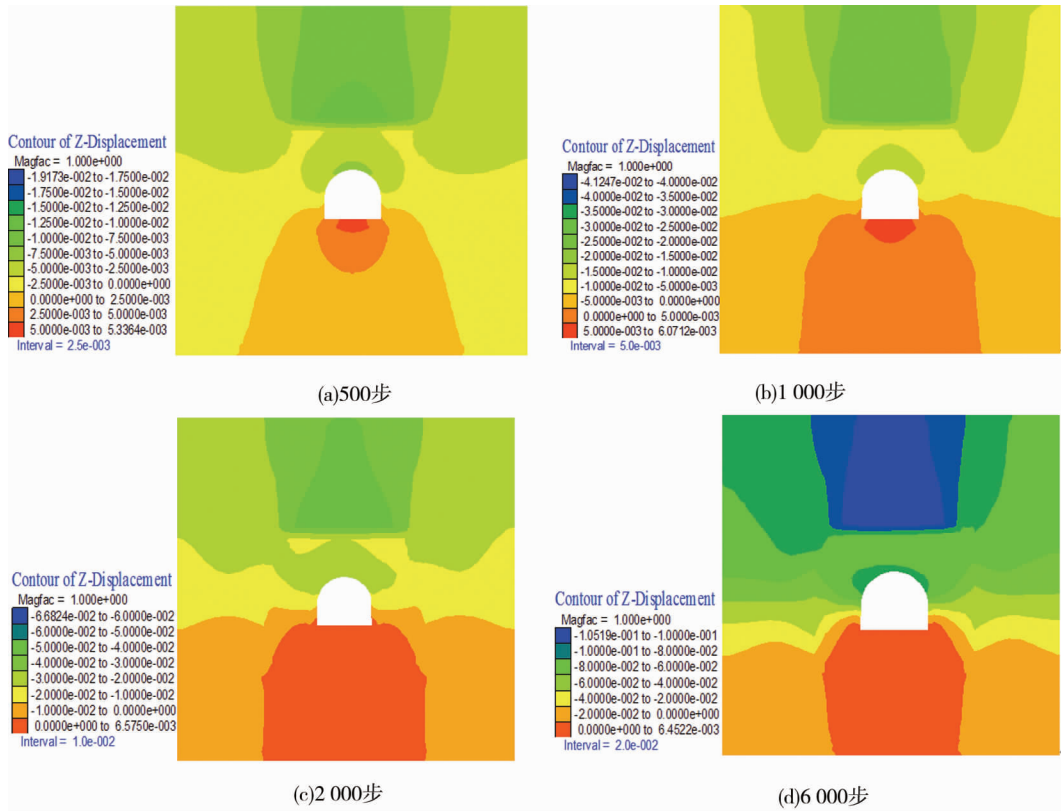


图 14 不同步竖向位移

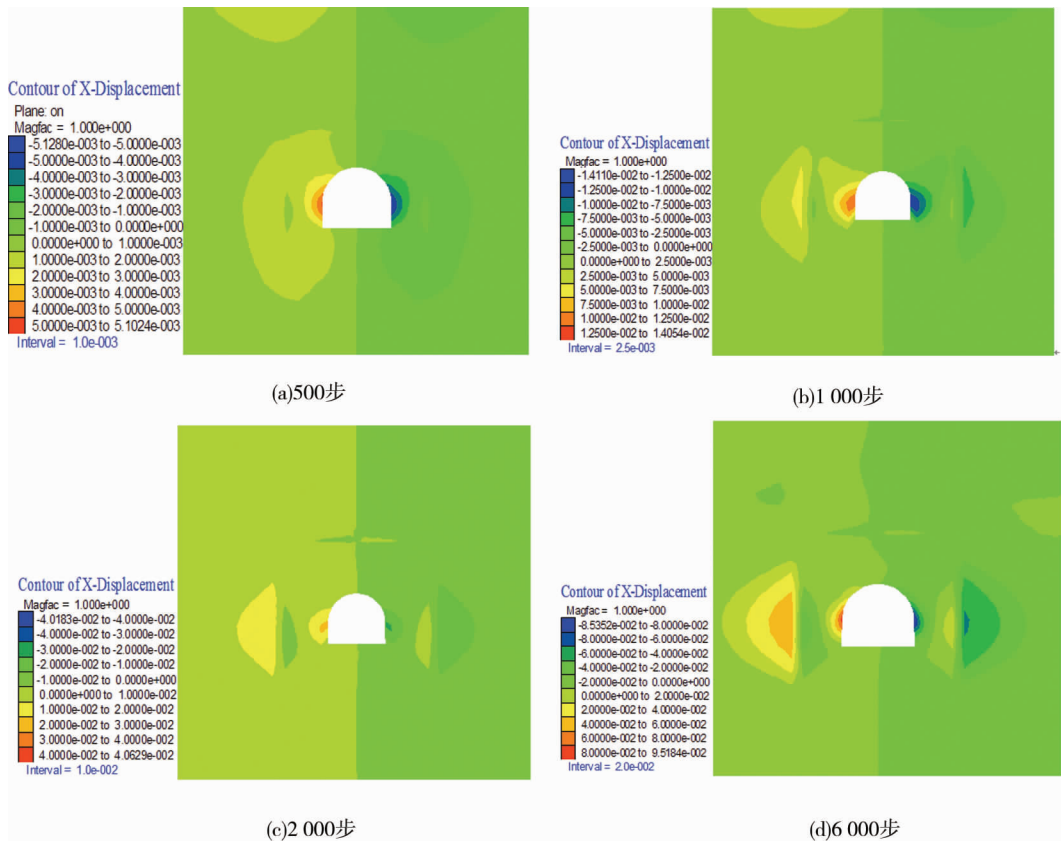


图 15 不同步水平位移

3 结论

1) 在浅部围岩范围内深埋巷道围岩的变形与外部渗透压力近似呈线性关系,渗流作用对巷道围岩变

形及稳定性的影响较为明显.

2) 高渗压作用砂砾层巷道顶板及帮部的变形较显著;围岩产生较大变形后难以形成自平衡拱,顶板破碎体易滑移、垮落,发生冒顶灾害.

3) 上覆厚含水层作用在砂砾层顶部的水头压力较高,渗流量大,进一步增加了顶板的下沉变形;在巷道施工过程中顶板是重点支护及控制的部位,并应采取合理的超前支护措施.

参考文献:

- [1] 程爱国,彭苏萍.西部地区煤炭资源潜力综合评价与规划研究[J].西安科技学院学报,2000,20(s1):7-13.
- [2] 陈宪,李宇昌,廖有炜.准噶尔盆地及其周边地区中生代成煤及大地构造梗概[J].新疆大学学报(自然科学版),2004,21(3):312-316.
- [3] 袁越.沙吉海矿区中生代砂砾层特性及其支护对策[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [4] 孙礼文.东北地区南部中生代含煤地层及其特征[J].东北煤炭技术,1995(3):19-25.
- [5] 邓维国,申建红,乔光磊.西部地区煤矿建井存在的一些问题思考[J].建井技术,2010,31(4):29-33.
- [6] 苗河根.第三系富水高压砂砾层人造围岩法凿井工艺的研究与实践[J].建井技术,2009,29(4):24-26.
- [7] 徐智敏,高尚,孙亚军,等.西部典型侏罗系富煤区含水介质条件与水动力学特征[J].煤炭学报,2017,42(2):444-451.
- [8] 荣传新,程桦.地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):741-744.
- [9] 李宗利,任青文,王亚红.考虑渗流场影响深埋圆形隧洞的弹塑性解[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1291-1295.
- [10] 高召宁,孟祥瑞,付志亮.二向不等地压条件下高水压区隧道稳定性分析[J].铁道工程学报,2013(11):62-68.
- [11] 师文豪,杨天鸿,刘洪磊,等.矿山岩体破坏突水非达西流模型及数值求解[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):446-455.
- [12] 李术才,平洋,王者超,等.基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2161-2170.
- [13] 张农,许兴亮,李桂臣.巷道围岩裂隙演化规律及渗流灾害控制[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):330-335.
- [14] 张科学,黄曾华,张金虎,等.高压渗流水作用下泥岩巷道破坏特征及失稳机理[J].煤炭科学技术,2015,43(11):1-5.
- [15] 陈仲颐,周景星.土力学[M].北京:清华大学出版社,1990.
- [16] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [17] 王秀英.岩溶隧道堵水限排衬砌外水压力及结构设计研究[D].北京:北京交通大学,2005.
- [18] 徐芝纶.弹性力学(第五版上下册)[M].北京:高等教育出版社,2016.
- [19] 谢贻权,林钟祥,丁皓江.弹性力学[M].杭州:浙江大学出版社,1988.
- [20] 李敬元,李子丰.渗流作用下井筒周围岩石内弹塑性应力分布规律及井壁稳定条件[J].工程力学,1997,14(1):131-137.