

文章编号: 1673-3363-(2014)03-0469-07

湿度应力场作用下煤矿穿膨胀岩 钻孔缩径规律研究

卢义玉, 侯吉峰, 尤祎, 葛兆龙, 张磊, 敖翔

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

摘要 针对煤矿穿膨胀岩钻孔遇水缩径问题, 本文基于湿度应力场理论, 借助有限元分析程序, 通过引入湿度修正系数 $\psi(w)$, 推导出了综合考虑围岩遇水软化和膨胀特性的钻孔孔壁位移修正解析解。并结合数值模拟软件 ANSYS 和相似模型实验, 研究和分析了湿度场和地应力场对钻孔缩径变形的影响。结果表明, 随着钻孔围岩含水率的增加, 钻孔孔壁位移呈非线性递增, 钻孔孔壁呈两端粗中间细的“哑铃形”, 钻孔中部为孔壁最大径向位移处; 含水率变化引起的岩性软化对钻孔缩径影响显著; 随着地应力的增大, 钻孔孔壁位移呈线性增加, 增幅较小; 湿度场和地应力场对煤矿穿膨胀岩钻孔缩径都产生不可忽视的影响, 就影响程度来看, 湿度场影响最大, 地应力场次之。

关键词 膨胀岩; 钻孔缩径; 湿度应力场; 相似模型实验

中图分类号 TD 31

文献标志码 A

Study on coalmine boreholes shrinkage rule crossing swelling rock under the humidity stress field

LU Yiyu, HOU Jifeng, YOU Yi, GE Zhaolong, ZHANG Lei, AO Xiang

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract In response to the issue of boreholes shrinkage crossing swelling rock in coal mine, in this paper, based on the humidity stress field theory, analytical solution of boreholes displacement considering humidity damage and expansion has been deduced by using finite element analysis program and introducing humidity corrected coefficient $\psi(w)$. So, the effects of the humidity field and stress field on boreholes shrinkage are systematically studied and analyzed by the software ANSYS and similar model experiment. The results show that with the water ratio of surrounding rock increasing, the wall displacement of boreholes is nonlinearly growing; the wall is “dumbbell-shaped” with two ends crude and intermediate fine; the maximum radial displacement is in the central wall of the boreholes; the effect of lithology softening resulting from the boreholes shrinkage is obvious; as ground stress increases, the wall displacement of borehole increases linearly but has a small increase; the above two fields have enormous effects on boreholes shrinkage. As far as the degree of influence is concerned, humidity field causes the larger influence, followed by stress field.

收稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05065-3); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT13043)

作者简介: 卢义玉(1972-), 男, 湖北省京山县人, 教授, 博士生导师, 从事非常规天然气高效开发及利用方面的研究。

E-mail: luyiyu@cqu.edu.cn

Tel: 023-65102273

Key words swelling rock; boreholes shrinkage; humidity stress field; similar model experiment

钻孔预抽瓦斯是防治煤矿瓦斯事故的主要措施之一^[1]。在穿层钻孔、石门揭煤钻孔时经常穿越膨胀岩^[2]夹层,膨胀岩是属于易风化和软化的软弱岩石,当岩体受到扰动后,特别是环境湿度和高地应力条件变化时,膨胀岩的性状将发生较大的改变,产生体积膨胀和收缩^[3-7]。目前煤矿普遍采用煤层注水、水力掏槽^[8]、水力冲孔、水力割缝^[9]等以水为载体的瓦斯治理措施,当钻孔施工进入膨胀岩段时,膨胀岩遇水软化^[10-13]和膨胀变形,钻孔缩径,易造成抱钻、钻具夹死等孔内事故,严重制约着水力化消突措施在煤矿的推广应用。因此,深入研究湿度应力场作用下的穿膨胀岩钻孔缩径问题具有十分重要的工程意义。

岩体膨胀特性的研究现已取得了许多成果。如缪协兴等人研究了湿度应力场问题,建立了湿度应力场理论以及湿度场耦合方程,并据此分析了巷道围岩的变形问题^[14-16];李康全等^[17]运用湿度应力场理论对膨胀土的增湿变形进行了分析;但目前对于湿度应力场理论的数值计算仅限于二维平面问题,而且对于湿度应力场作用下煤矿穿膨胀岩钻孔缩径问题的研究也很少。

本文基于湿度应力场理论,综合考虑钻孔围岩遇水软化和膨胀特性,通过引入湿度修正系数 $\psi(w)$,借助有限元分析程序 ANSYS 对解析解进行修正,并利用数值分析软件 ANSYS 对不同湿度场、地应力场耦合作用下钻孔缩径变形进行三维数值分析,最后通过相似模型实验进一步验证修正后的解析解及数值模拟的准确性和可靠性,为解决煤矿穿膨胀岩钻孔缩径、卡钻问题提供一定理论依据。

1 穿膨胀岩钻孔缩径变形理论分析

煤矿井下穿膨胀岩钻孔具有如下特点:1) 膨胀岩夹层层面与其他岩层封闭接触,膨胀岩夹层的厚度在 0.2~2 m 之间,由于钻孔长度一般在 20~70 m,膨胀岩钻孔只是中间的一小段,因此可以认为膨胀岩钻孔是两端开放的;2) 埋深一般在 200~800 m 之间,钻孔受高地应力作用;3) 一般采用水力钻孔,水持续从孔内流出,使得孔壁处于不断变化的湿度场之中。

对于煤矿井下圆形钻孔问题,宜采用极坐标 (r, θ) 建立湿度应力场的控制微分方程。设湿度变化函数为 $W=W(r, \theta)$;膨胀岩的湿度线膨胀系数为 α ,

为了讨论问题方便,这里假设在一定含水率范围内泥岩的力学性质是不变的,即 E, μ 不随含水率改变,在求解析解时这样处理是十分必要的,但在数值计算时则要考虑其非线性效应。不考虑体力作用,可归结为平面对称弹性体问题。

在平面应力情况下,极坐标中湿度应变分量为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) + \alpha W \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r) + \alpha W \\ \gamma_{r\theta} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{r\theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_r 为径向应变分量; ε_θ 为环向应变分量; $\gamma_{r\theta}$ 为剪切应变分量; σ_r 为径向应力分量; σ_θ 为环向应力分量; $\tau_{r\theta}$ 为剪切应力分量。

其平衡微分方程表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{E\alpha}{1-\mu} \frac{\partial W}{\partial r} = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} - \frac{E\alpha}{1-\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

若煤矿井下有一个半径为 a 的穿层钻孔,该钻孔受轴对称湿度应力场 q 和均匀地应力场 p 共同作用,则穿膨胀岩钻孔受力分析平面图如图 1 所示。

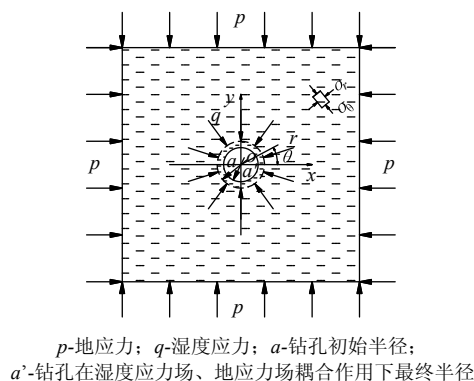


图 1 穿膨胀岩钻孔受力分析平面图

Fig.1 The force analysis of borehole crossing swelling rock

此时边界条件可表述为

$$(\sigma_r)_{r=a} = 0, (\sigma_r)_{r \rightarrow \infty} = -p \quad (3)$$

方程式(1)~(3)构成圆形钻孔遇水和地应力耦合作用的定解问题。对于平面应变问题,仅需对上述公式中的各个材料常数作相应的转换,即: E 换为 $\frac{E}{1-\mu^2}$, μ 换为 $\frac{\mu}{1-\mu}$, α 换为 $(1+\mu)\alpha$,由于钻孔穿过膨胀岩夹层,夹层与其他岩层封闭接触,则钻

孔轴向应变为零,即 $\varepsilon_z=0$ 。

假定湿度场的分布规律为

$$W(r) = W_0 \frac{a^2}{r^2} \quad (4)$$

式中 W_0 为最大湿度变化值^[18]。

几何方程为

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (5)$$

联立方程(1)~(5),与求解温度应力场类似,宜采用位移解法,可求得钻孔围岩径向位移为

$$u_r = \frac{p}{E} \left[(2\mu^2 + \mu - 1)r + 2(\mu + 1)a - \frac{(\mu + 1)a^2}{r} \right] + \frac{\alpha W_0 (\mu + 1)a}{1 - \mu} \left(1 + a \ln \frac{r}{a} \right) \quad (6)$$

钻孔孔壁处径向位移为

$$u_{r(r=a)} = \frac{p}{E} [2\mu(\mu + 1)a] + \frac{\alpha W_0 (\mu + 1)a}{1 - \mu} \quad (7)$$

由式(7)可知,钻孔孔壁径向位移与地应力 p ,孔径 a ,围岩力学性质和最大湿度变化值 W_0 等参数有关。在现场应用时,一般取钻孔孔壁浸水处的泥岩计算遇水前后的含水率变化,作为最大湿度变化值。

由于式(7)是基于 E 和 μ 是常量而推导出的,忽略了含水率变化对膨胀岩力学性质的影响,即 E 与 μ 是含水率的函数,随含水率的变化而改变,也就是发生所谓的软化现象。因此上述解析式(7)存在一定的局限性,需要对式(7)位移解析式进行修正。借助有限元分析程序 ANSYS,利用数值解对不考虑岩性软化的解析式进行修正,引入湿度修正系数 $\psi(w)$,并提出了适合工程应用的钻孔孔壁位移修正解析解:

$$u'_{r(r=a)} = u_{r(r=a)} \psi(w) \quad (8)$$

湿度修正系数 $\psi(w)$ 是含水率 w 的函数,其表征膨胀岩遇水软化变形的能力,具体反映到物性参数上就是 E , μ 随含水率增加而改变的能力。

2 穿膨胀岩钻孔缩径变形数值模拟

2.1 湿度应力场的数值模拟方法

考虑湿度应力场与温度应力场具有相似性,采用 ANSYS 软件中的温度应力场模块来模拟湿度应力场。湿度应力场与温度应力场的相关参数服从如下关系:

$$\beta = \frac{\alpha \Delta W}{\Delta T} \quad (9)$$

式中: β 为温度线膨胀系数; α 为湿度线膨胀系数;

ΔW 为湿度变化量; ΔT 为温度变化量。

这样 β , ΔT 就可转化为湿度场参数对应的温度场参数。

2.2 数值计算模型的建立及边界条件设定

根据重庆松藻煤电公司所属渝阳煤矿穿膨胀岩钻孔孔径小、易膨胀、埋深大、膨胀岩夹层层面与其他岩层封闭接触等特点,取长度为0.6 m、外直径为0.4 m、内直径为94 mm的膨胀岩空心圆柱体模型,沿圆柱体轴向施加轴向位移约束,外圆柱面施加不同地应力作为压力边界条件。为便于观察孔壁变形,将三维几何模型沿 z 轴对称简化,图2给出了有限元网格划分图。

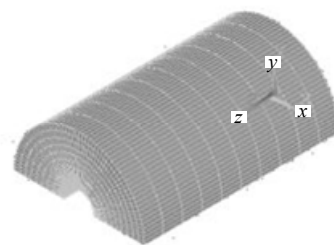


图2 穿膨胀岩钻孔有限元网格划分

Fig.2 FEM mesh of borehole crossing swelling rock

2.3 模型参数确定

根据室内单轴压缩实验,测试了不同含水率泥岩岩样的变形参数,饱和含水率约为25.3%,湿度线膨胀系数 $\alpha=0.276$ 。具体测试结果如表1所示。为了研究湿度和地应力对钻孔缩径变形的影响,计算中分别取孔壁处的含水率为 $w=0, 5.1\%, 10.1\%, 15.2\%, 20.3\%, 25.3\%$ 共6种情况,无穷远处为0,围岩内部含水状态由有限元程序计算得到。地应力分别取 $p=5, 10, 15, 20$ MPa。

表1 钻孔围岩遇水软化特性

Table 1 Soften characteristics of borehole surrounding rock

w/%	0	2.5	5.1	7.6	10.1	12.6
E/GPa	3.76	3.07	2.51	2.05	1.67	1.37
μ	0.25	0.26	0.28	0.29	0.31	0.32
w/%	15.2	17.7	20.3	22.8	25.3	
E/GPa	1.12	0.92	0.75	0.61	0.50	
μ	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	

2.4 数值模拟结果及分析

由式(8)孔壁位移解析式可知,当钻孔初始孔径尺寸恒定时,湿度和地应力是影响孔壁径向变形的参数。该数值模拟采用单因素实验法,每次保持其他参数不变,仅考虑一个参数对孔壁最大径向位移的影响。

2.4.1 含水率对钻孔孔壁最大径向位移的影响

对于煤矿穿膨胀岩钻孔变形参数主要考虑钻孔径向位移量。图 3 给出了地应力为 15 MPa, 不同含水率条件下考虑围岩遇水软化和膨胀特性的钻

孔孔壁最大径向位移云图。图 4, 5 分别给出了钻孔孔壁最大径向位移和湿度修正系数随含水率 w 的变化曲线。

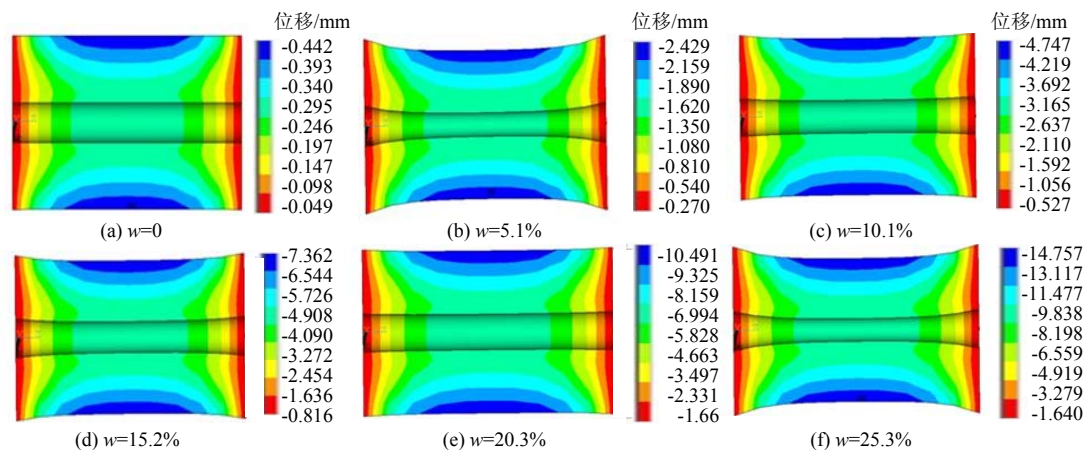


图 3 不同含水率条件下钻孔孔壁最大径向位移

Fig.3 Radial deformation of the borehole under different water ratio

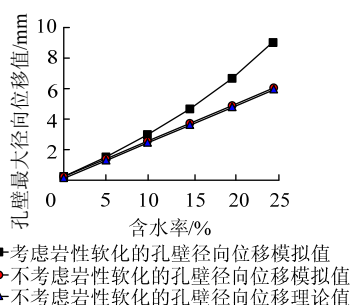


图 4 钻孔孔壁最大径向位移随含水率 w 的变化曲线

Fig.4 The relation between the borehole deformation and w

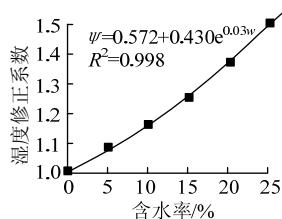


图 5 湿度修正系数随含水率 w 的变化曲线

Fig.5 The relation between the humidity corrected coefficient and w

从图 3, 4 可以看出:

1) 恒定地应力作用下, 随着钻孔围岩含水率的增加, 钻孔孔壁最大径向位移有明显的增加, 呈非线性增长关系, 孔径缩小, 钻孔孔壁呈两端粗中间细的“哑铃形”, 钻孔中部为孔壁最大径向位移处。最大位移值由无水时的 0.28 mm 增加到饱水时的 9.34 mm, 增幅明显。

2) 不考虑岩性软化的孔壁最大径向位移数值

解和考虑岩性软化的解析解的变化规律基本一致, 都随含水率呈线性增长关系, 两者相对误差不超过 8%, 证明了有限元程序的正确性和可靠性。

将考虑岩性软化的数值解与不考虑岩性软化的解析解对比分析得到湿度修正系数, 如图 5 所示, 并利用数据处理软件 Origin9.0 对其拟合得到方程 $\psi(w) = 0.572 + 0.430e^{0.03w}$ 。从图 5 可以发现, 随着含水率的增大, 湿度修正系数逐渐增大, 其原因是遇水作用后钻孔围岩岩性软化、强度降低。饱水时考虑岩性软化的孔壁最大径向位移是不考虑岩性软化的 1.5 倍, 可见钻孔围岩的岩性软化对孔壁最大径向位移有显著的影响, 且更符合实际。

2.4.2 地应力对钻孔孔壁最大径向位移的影响

图 6 为钻孔孔壁在饱水状态、不同地应力条件下, 钻孔孔壁最大径向位移模拟值与理论值对比图。

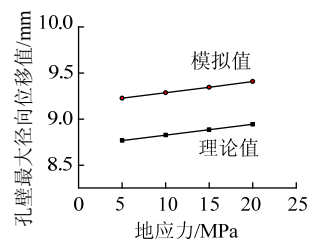


图 6 钻孔孔壁最大径向位移随地应力 p 的变化曲线

Fig.6 The relation between the borehole deformation and p

由图 6 可知, 钻孔孔壁最大径向位移值与理论值之间的相对误差为 5.23%。恒定湿度条件下, 穿膨胀岩钻孔孔壁最大径向位移值与地应力呈线性

增长关系，孔壁最大径向位移值由 5 MPa 时的 9.22 mm 增加到 20 MPa 时的 9.41 mm，增幅较小。

可见，湿度场和地应力场对煤矿穿膨胀岩钻孔缩径都产生不可忽视的影响。但就影响程度来看，湿度场影响最大，地应力场次之。

3 相似模型实验

3.1 实验设备及试件

实验在重庆大学自主研发的高温三轴实验机上进行，如图 7 所示。该实验机主要由 4 部分组成：1) 轴压、围压伺服系统；2) 三轴室加温、保温系统；3) 溶解水供应系统；4) 数据采集系统。



图 7 高温三轴实验机
Fig.7 The high temperature triaxial testing machine

试件取自重庆松藻煤电公司所属渝阳煤矿 8[#] 煤层上部泥岩，灰色、致密、无裂纹、遇水膨胀不崩解，密度 2.5 g/cm³，弹性模量和泊松比分别为 3.76 GPa 和 0.25，湿度线膨胀系数为 0.276。先用立式圆柱加工机加工成圆柱形，再用车床精车而成，加工成高径比为 1：1 的 $\Phi 50\text{ mm}\times L50\text{ mm}$ 的试件，其加工尺寸和精度符合岩石实验标准。钻孔制备采用干钻套取岩芯，制备钻孔后经检测岩体没有受到任何损伤，见图 8。



图 8 实验用的泥岩试件(钻孔 $\Phi 10\text{ mm}$)
Fig.8 The samples(borehole $\Phi 10\text{ mm}$)

3.2 实验方案

本实验通过向泥岩试件中心钻孔通水，同时对试件施加一定的轴压和围压，真实模拟煤矿穿膨胀岩钻孔在湿度场和地应力场耦合作用下的缩径变形情况，进一步验证修正后的解析解及数值模拟的准确性和可靠性。由于实验条件的限制，实验中没

有考虑地应力变化，只研究了湿度变化对钻孔缩径变形的影响。

由于煤矿井下穿层钻孔埋深一般在 200~800 m 之间，同时考虑到高温三轴实验机所能满足的加载条件，模拟地应力取为 15 MPa。实验采用保压加载方式，不考虑应力差的影响，轴压与围压相等。首先在轴向上向泥岩试样施加 0.01 MPa 的压力使泥岩岩样在轴向上应变为 0 保持不变，并从周围对泥岩试样施加一定围压来模拟井下地应力，加载至设定的压力。然后将蒸馏水从通水孔流过进行膨胀岩钻孔缩径变形实验，通水时间分别取 1，2，3，5，8 h。在实验过程中，可调控泥岩试样的受力状态、泥岩的温度、蒸馏水的压力、流速和温度等参数，使泥岩试样处于三轴应力状态，达到真实模拟煤矿穿膨胀岩钻孔缩径变形的目的(见图 9)。

由于实验过程中无法直接测定通水孔孔径的变化情况，而水分逐渐由中心孔向周边扩散，则可认为当试件外直径径向应变达到或趋于稳定后，实验结束，测取泥岩含水率，并通过向孔内灌注石膏浆测取膨胀后的中心通水孔直径 $D'=2a'$ 。

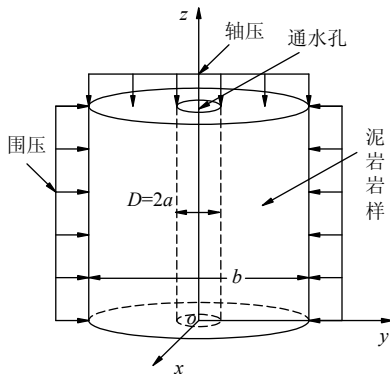


图 9 钻孔缩径变形实验原理示意图
Fig.9 Schematic diagram of tests of borehole shrinkage

3.3 实验结果与分析

3.3.1 实验结果

实验结束后，各试件中心通水孔孔壁膨胀变形，测得泥岩岩样膨胀后通水小孔直径为 $D'=2a'$ 。实验结果如表 2 所示。

表 2 实验前后各试件通水孔孔径变形结果
Table 2 Aperture of the sample before and after test

试件编号	SC1 [#]	SC2 [#]	SC3 [#]	SC3 [#]	SC4 [#]
含水率 w/%	6.2	13.0	19.2	23.1	25.1
$D=2a/\text{mm}$	10.0	10.04	10.06	10.02	10.02
$D'=2a'/\text{mm}$	9.62	8.88	8.30	7.78	7.38
最大径向位移/mm	0.21	0.58	0.88	1.12	1.32

3.3.2 实验结果与理论计算结果对比分析

由表 2 中数据可看出: 1) 一定地应力条件下, 随着试样含水率的增加, 中心孔孔壁径向变形有明显的增大, 缩径量明显, 钻孔直径沿两端到中部由大变小, 孔壁最终形成两端粗中间细的“哑铃形”, 与数值模拟的规律基本一致。2) 随着通水时间的增加, 含水率逐步增加, 泥岩试件孔壁泥化现象严重, 岩性软化、强度降低明显。已有研究表明, 泥岩中含有大量水敏性很强的黏土矿物, 如蒙脱石、伊利石等, 当泥岩层浸水后, 会发生吸水膨胀、软化。

图 10 是中心孔孔壁最大径向位移理论值与实验值的对比曲线。由图 10 可见, 考虑岩性软化的修正的理论值与实验值较为接近, 而不考虑岩性软化的理论值与实验值出入较大, 证明了理论分析和数值模拟的准确性和可靠性。而在计算过程中考虑岩性软化特性的方法则更符合工程实际, 并且该方法能充分反映湿度场变化对煤矿穿膨胀岩钻孔缩径变形的影响。

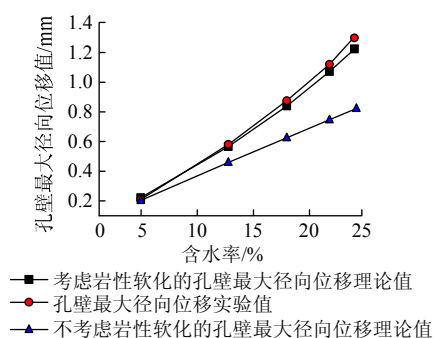


图 10 孔壁最大径向位移理论值与实验值对比

Fig.10 The comparison between theoretical calculation and experiment results

4 结 论

1) 基于湿度应力场理论, 通过引入湿度修正系数, 借助有限元分析程序 ANSYS 推导出考虑岩性软化和膨胀的钻孔孔壁位移修正解析解。

2) 湿度场和地应力场对煤矿穿膨胀岩钻孔缩径都产生不可忽视的影响。随着钻孔围岩含水率的增大, 钻孔孔壁位移随含水率呈非线性增长关系, 钻孔孔壁呈两端粗中间细的“哑铃形”, 钻孔中部为孔壁最大径向位移处; 含水率变化引起的岩性软化对钻孔缩径影响显著; 随着地应力的增大, 钻孔孔壁位移呈线性增大, 增幅较小。但就影响程度来看, 湿度场影响最大, 地应力场次之。

3) 通过相似模型实验进一步验证了理论分析

和数值模拟分析的结果, 确定了含水率、地应力等参数与孔壁位移之间的定量关系, 可为解决煤矿穿膨胀岩钻孔缩径问题提供一定的理论依据。

因此, 对于深井穿膨胀岩钻孔, 除了要考虑岩体初始应力场的影响外, 还需要根据实际工况, 特别注重浸水对膨胀岩软化和膨胀的影响。

参考文献:

- [1] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 26-95.
- [2] LU Yiyu, LIU Yong, et al. A new method of drilling long borehole in low permeability coal by improving its permeability[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(2): 94-102.
- [3] 李杭州, 廖红建, 孔令伟, 等. 膨胀岩应力应变关系的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 107-110. LI Hangzhou, LIAO Hongjian, KONG Lingwei, et al. Experimental study on stress-strain relationship of expansive mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 107-110.
- [4] 李杭州, 廖红建. 膨胀岩的非线性强度变形特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 19-22. LI Hangzhou, LIAO Hongjian. Experimental study on nonlinear strength deformation characteristic of expansive mudstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 19-22.
- [5] 李国富, 戴铁丁, 吕芳礼, 等. 膨胀岩变形机理与注浆强化技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 444-448. LI Guofu, DAI Tieding, LV Fangli, et al. Deformation mechanism of swelling rock and its grouting reinforcement techniques[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 444-448.
- [6] FATEME YAZDANDOUST, S SHAHABODDIN YAS-ROBI. Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expensive clays[J]. Applied Clay Science, 2010, 50(4): 461-468.
- [7] 齐干, 李占金, 唐强达, 等. 深部大断面软岩巷道变形力学机制及耦合支护设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 455-459. QI Gan, LI Zhanjin, TANG Qiangda, et al. Deformation mechanical mechanism and coupling support design for deep large-section-soft-rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 455-459.
- [8] 李学臣, 魏国营. 突出煤层水力掏槽防突技术措施的应用[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(4): 270-274. LI Xuechen, WEI Guoying. Application of outburst prevention technique measure by using hydraulic cutting in outburst coal bed[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2006, 25(4): 270-274.
- [9] 卢义玉, 葛昭龙. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55-58.

- LU Yiyu, GE Zhaolong. Investigation of a self-excited pulsed water jet for rock cross-cutting to uncover coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 55-58.
- [10] 朱珍德, 张爱军, 邢福东. 红山窑膨胀岩的膨胀和软化特性及模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 389-393.
- ZHU Zhende, ZHANG Aijun, XING Fudong. Research on swelling and strain softening model of swelling rock in Hongshanyao[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 389-393.
- [11] 周瑞光, 曲永新, 成彬芳, 等. 山东龙口北皂煤矿软岩力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 55-60.
- ZHOU Ruiguang, QU Yongxin, CHENG Binfang, et al. The mechanical properties of soft and weak rock in Longkou coal mine, Shandong[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(4): 55-60.
- [12] 唐文泉. 泥页岩水化作用对孔壁稳定性影响的研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011.
- [13] BUZZI O. On the use of dimensional analysis to predict swelling strain[J]. Engineering Geology, 2010, 116(2): 149-156.
- [14] 缪协兴, 杨成永. 膨胀岩体中的湿度应力场理论[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 49-55.
- MIAO Xiexing, YANG Chengyong. Humidity stress field theory in swelling rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(4): 49-55.
- [15] 缪协兴, 茅献彪, 卢爱红. 湿度应力场理论在软岩巷道围岩稳定性控制中的应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(3): 1-5.
- MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, LU Aihong. Application of the humidity stress field theory to the soft surrounding rock stability control around coal mining roadway[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(3): 1-5.
- [16] 缪协兴. 用湿度应力场理论分析膨胀岩巷道围岩变形[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(1): 58-63.
- MIAO Xiexing. Large deformation analysis of surrounding rock of a tunnel in swelling rock mass based on the humidity stress field theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(1): 58-63.
- [17] 李康全, 周志刚. 基于湿度应力场理论的膨胀土增湿变形分析[J]. 长沙理工大学学报, 2005, 2(4): 1-6.
- LI Kangquan, ZHOU Zhigang. Deformation analysis of expansive soils induced by increased humidity based on the theory of humidity stress field[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2005, 2(4): 1-6.
- [18] 卢爱红, 茅献彪. 湿度应力场的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 1): 2470-2473.
- LU Aihong, MAO Xianbiao. Numerical simulation of humidity stress field theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Sup 1): 2470-2473.

(上接第 468 页)

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1411-1416.
- [8] 朱万成, 魏晨慧, 张福壮, 等. 流固耦合模型用于陷落柱突水的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 928-933.
- ZHU Wancheng, WEI Chenhui, ZHANG Fuzhuang, et al. Investigation of water inrush from Karst subsidence column by using a coupled hydro mechanical model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 928-933.
- [9] 李连崇, 唐春安, 左宇军, 等. 煤层底板下隐伏陷落柱的滞后突水机理[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1212-1216.
- LI Lianchong, TANG Chun'an, ZUO Yujun, et al. Mechanism of hysteretic groundwater inrush from coal seam floor with Karstic collapse columns[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1212-1216.
- [10] 王家臣, 李见波, 徐高明. 导水陷落柱突水模拟试验台研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 305-309.
- WANG Jiachen, LI Jianbo, XU Gaoming. Development and application of simulation test system for water inrush from the water-conducting collapse column[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 305-309.
- [11] 姚邦华. 破碎岩体变质量流固耦合动力学理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [12] YAO Banghua, MAO Xianbiao, ZHANG Kai, et al. A non-linear fluid-solid coupling mechanical model study for Paleokarst collapse breccia pipes under erosion effect[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17(C): 277-290.
- [13] YAO Banghua, CHEN Zhanqing, CAI Wei, et al. Stress distribution characteristics of Paleokarst collapse breccia pipe and water inrush prediction study[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17(F): 769-784.
- [14] 王路珍, 陈占清, 孔海陵, 等. 加载历程对配径碎煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1325-1330.
- WANG Luzhen, CHEN Zhanqing, KONG Hailing, et al. Experimental study of impact of loading history on permeability characteristics of broken coal with different grain size gradations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1325-1330.
- [15] 马丹. 破碎泥岩变质量非 Darcy 流渗透特性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.