

# 地下水渗流对矿井通风巷道环境影响研究

李绪萍<sup>1,2</sup>, 邓存宝<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新市 123000;

2. 蒙古科技大学 矿业工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**以大隆矿区矿井通风系统巷道围岩与巷道环境为研究对象,采用整场求解法,对地下水渗流对通风巷道环境进行了数值研究。研究了巷道围岩、巷道环境在 Darcy 数、Rayleigh 数变化时的规律。研究表明:巷道上方的地下水在自重作用下向下渗流对围岩温度场有明显的影响。随着  $Da$  数的增大,巷道附近围岩温度梯度明显降低,巷道内空气出成了分叉现象,对流作用减弱,换热相应地减弱;随着  $Ra$  数的增大,巷道内空气对流作用增强,换热也相应地增强。

**关键词:**地下水;渗流;通风巷道;数值模拟;自然对流

**中图分类号:**TD727 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-643X(2013)02-0181-03

## Research on influence of groundwater seepage on environment of mine ventilation roadway

LI Xuping<sup>1,2</sup>, DENG Cunbao<sup>1</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000, China;

2. College of Mining Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, 014010, China)

**Abstract:** In this paper, The airflow and rock wall in the area of Dalong mine ventilation system was chosen as the research object, the whole - field solution method was used to simulate the groundwater seepage and ventilation roadway environment. It researched the law about surrounding rock and environment of roadway with the change of Darcy number and Rayleigh number. The analysis result shows that the groundwater has a significant impact on temperature field under the action of dead weight. With the increase of  $Da$  number, temperature gradient reduces significantly near the surrounding rock of roadway, and the air in the surrounding rock of roadway becomes bifurcation phenomenon, convection is weakened, heat transfer is weakened accordingly; With the increase of  $Ra$  number, the convection of the air in the surrounding rock of roadway reinforces, heat transfer reinforces correspondingly.

**Key words:** groundwater; seepage; ventilation roadway; numerical simulation; natural convection

矿井水是在矿井开拓、采掘过程中,渗入、滴入、淋入、流入、涌入、和溃入井巷或采掘工作面的任何水源。它的来源有大气降水、地表水、含水层水、断层水、老窑积水、岩溶水、和封闭不良钻孔水等。对巷道热环境影响较大的是巷道上方在自重作用下向下渗流的水。通风巷道是矿井通风系统中风流流经的巷道<sup>[1]</sup>。矿井通风主要目的是供给井下足够的新鲜空气,满足人员对氧气的需要;冲淡井下有毒有害气体和粉尘,保证安全生产;调节井下气候,创造良好的工作环境。通风巷道把新鲜空气送入井下,排除井下生产过程中不断产生有毒有害气体,如:一氧化碳、二氧化碳、二氧化氮、二氧化硫、硫化氢、沼气等,同时也排除一部分由于地温升高带来的一部

分巷道内热量。

本文以大隆矿区矿井通风巷道<sup>[2]</sup>在上部水渗流和下部地热作用下巷道热环境为研究对象,利用数值模拟方法研究分析了巷道壁面努谢尔数在达西数和瑞利数变化下的规律、巷道内的流场、温度场、等基础物理数据。

## 1 物理问题及数值方法

研究资料来源于地下 600 m 巷道的原位监测数据<sup>[3]</sup>,巷道断面为半圆拱形,直墙高 1.5 m,拱高为 1.3 m,研究区域选定为 12 m × 10 m 垂直于巷道平面的二维平面。物理现象见图 1,地下水从上部地表向下渗透,在地温场作用下围岩底部温度略高于上部温度,

收稿日期:2012-12-12; 修回日期:2012-12-25

作者简介:李绪萍(1984-),女,内蒙古阿拉善人,博士研究生,研究方向为煤矿灾害防治理论与技术。

左、右侧选定为对称边界条件。假设围岩为各向同性、均质的多孔介质,内部充满水,巷道内为空气。上表面温度为、下表面温度为,围岩骨架与水温度相等,即采用局部热平衡假设;围岩骨架与水热物性为常量,同时引入 Boussinesq 假设来考虑空气自然对流效应<sup>[4]</sup>;采用 Brinkman 扩展达西模型描述流动,在围岩壁面上速度均采用无滑移边界条件。

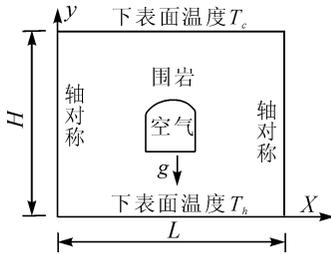


图1 物理模型

对充满饱和水的围岩二维不可压缩层流的非稳态自然对流换热,其控制方程的无量纲形式如下:

连续方程为:

$$\Delta \cdot v = 0 \tag{1}$$

动量方程为:

$$\frac{1}{\phi^2}(v \cdot \Delta U) = -\frac{\partial p}{\partial X} + Pr\Delta^2 U - \frac{Pr}{Da}U + RaPr\theta \tag{2}$$

$$\frac{1}{\phi^2}(v \cdot \Delta V) = -\frac{\partial p}{\partial Y} + Pr\Delta^2 V - \frac{Pr}{Da}V + RaPr\theta \tag{3}$$

能量方程为:

$$\sigma \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v \cdot \Delta \theta = \Delta^2 \theta \tag{4}$$

式中:  $U = uHa_m^{-1}, V = vHa_m^{-1}, P = pH^2\rho_0^{-1}a^{-2}, X = x/H, Y = y/H, Pr = va_m^{-1}, Da = KH^{-2},$

$$Ra = vg\beta(T_h - T_c)2^{-1}H^3v^{-1}a_m^{-1}$$

$$\theta = (T - T_0)/(T_h - T_c), \sigma = (\rho_c)_m(\rho_{cp})_f^{-1}$$

其中:  $a_m$  为多孔介质的有效热扩散系数,  $a_m = k_m(\rho_{cp})_f^{-1}, k_m$  有效导热系数  $k_m = (1 - \phi)k_s + \phi k_f,$  其中  $\phi$  为孔隙率,  $k_s$  和  $k_f$  分别是多孔介质内固体相和流体相的导热系数。

无量纲边界条件为:

$$Y = 0, U = V = 0, \theta = 1,$$

$$Y = 1, U = V = 0, \theta = 0, X = 0, X = 1.2 \text{ 为}$$

对称边界条件。

局部努谢尔数及平均努谢尔数定义为:

$$Nu = \frac{\partial \theta}{\partial n} |_{wall}$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H} \int_0^H Nu dy = -\frac{1}{H} \int_0^H \left( \frac{\partial T}{\partial X} \right)_{x=0} dy$$

平均努谢尔数  $\overline{Nu}$  过局部努谢尔数沿壁面积分

获得,  $H$  沿壁面总长度。

## 2 网格划分、数值求解

采用三角形网格<sup>[5]</sup>, 网格的单元网格数目为 11986 个, 节点 6201 个。网格足够细密, 再进一步减少网格 10%、20% 对数值计算结果基本上没有影响, 网格已具有独立性<sup>[6]</sup>。利用 SIMPLER 算法进行求解<sup>[7]</sup>, 对流项采用 QUICK 格式<sup>[8]</sup> 进行离散, 使计算具有较高的精度。在计算之前首先进行计算方法和程序的考核。对文献[9]的自然对流进行了数值验证, 从表 1 的对比结果可以看出, 本文计算方法和程序的计算结果是可靠的。

表1 本文  $\overline{Nu}$  数与文献相对误差  $e$

$Ra$	本文	文献[9]( $e/\%$ )	文献[10]( $e/\%$ )
$10^3$	1.1157	1.118(0.21)	1.114(0.20)
$10^4$	2.1836	2.243(2.64)	2.245(2.73)
$10^5$	4.5111	4.519(0.17)	4.510(0.02)
$10^6$	8.8642	8.800(0.73)	8.806(0.66)

## 3 计算结果和讨论

为取得稳态解, 假定变量迭代求解满足

$$\frac{\sum | \varphi_{i,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^n |}{\sum \varphi_{i,j}^{n+1}} \leq 10^{-3} \text{ 为收敛 } (\varphi \text{ 为变量, } n \text{ 为迭}$$

代次数)。在计算中取多孔介质孔隙率为 0.6, 比热比为 1,  $Pr = 1$ 。分别针对  $Da$  数为  $10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 0, Ra$  数为  $10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8, 10^9$  工况<sup>[1]</sup> 进行计算, 计算结果见图 2 ~ 5。图 2 所示为  $Ra = 10^4$  时,  $Da$  不同时巷道内部的流函数图。巷道上方的地下水在自重作用下向下渗流对围岩温度场有明显的影响。当  $Da = 0$  时, 围岩主要靠导热传热, 温度梯度较大, 巷道内无量纲温度  $\theta$  变化范围在 0.3 ~ 0.75 间;  $Da = 10^{-1}$ , 渗流起主要作用, 围岩骨架热传导起辅助作用,  $\theta$  变化范围在 0.5 ~ 0.55 间。说明地下水向下渗透使得围岩上部温度降低, 同时围岩温度梯度降低, 巷道内空气温度变化范围较小, 温度趋于均匀。

图 3 为  $Ra = 10^4$  时,  $Da$  不同时巷道内部的流函数图。当  $Da = 0$  时, 流函数主要由一个逆时针流动的大窝, 两个顺时针流动的小窝组成; 地下水渗流的作用后, 左下侧小窝增大, 右上侧小窝消失, 大窝减小并变成垂直形式, 分叉明显; 随着渗流作用增强, 左下侧小窝进一步增大, 大窝继续减小, 两个窝接近。

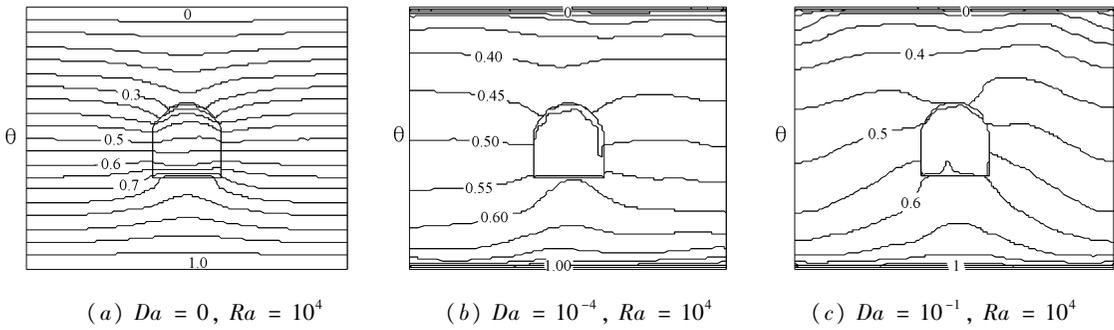


图 2  $\theta$  随  $Da$  变化关系

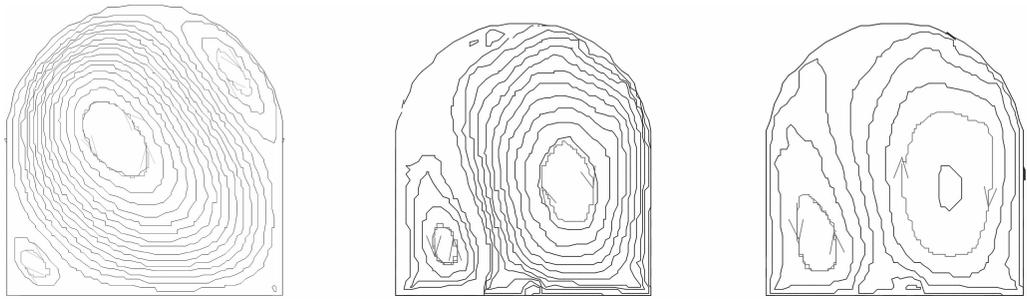


图 3  $\theta$  流函数随  $Da$  变化关系

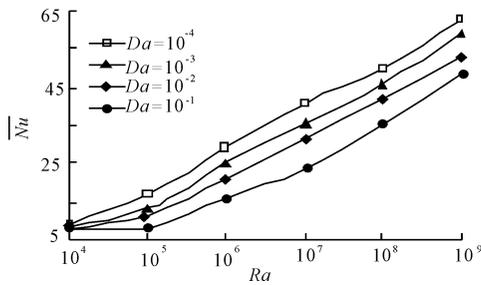


图 4 巷道上壁面  $\overline{Nu}$  与  $Da, Ra$  变化关系

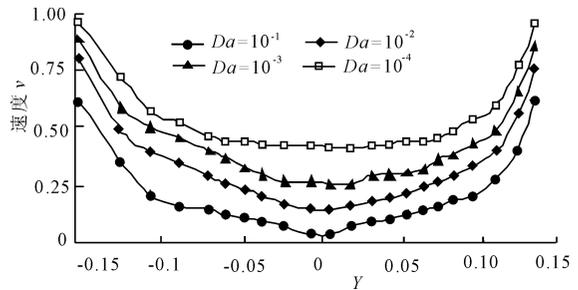


图 5 巷道中截面空气垂直速度变化曲线

由图 4 可见巷道上壁面  $\overline{Nu}$  随  $Da, Ra$  的增大而增大。从  $Ra$  数定义中可以知道  $Ra$  数越大,浮力驱动效应越强,自然对流速度越大,所形成的环流越强。在  $Ra$  数比较大时主要靠热对流进行传热。由于环流的增强,由对流产生的热量传递明显增大,  $\overline{Nu}$  数增大。 $Da$  增大,围岩温度梯度降低,  $\overline{Nu}$  数减小。

由图 5 可见巷道内中截面空气垂直速度在中心位置较小,以中心位置对称增大,接近壁面位置达最大值;随着  $Da$  数的增大,整个截面速度明显降低。

### 4 结 语

通过对地下水渗流对通风巷道环境影响研究,可得到以下结论:

(1) 随着  $Da$  数的增大,巷道内空气出成了分叉现象,形成两个涡流,大窝按顺时针方向流动,小窝

按逆时针方向流动。

(2)  $Da$  数和  $Ra$  数对通风巷道环境影响影响较大。随着  $Da$  数的增大,围岩温度梯度降低,巷道内空气对流作用减弱,换热也相应地减弱;随着  $Ra$  数的增大,巷道内空气对流作用增强,换热也相应地增强。

(3) 巷道上方的地下水在自重作用下向下渗流对围岩温度场有明显的影。随着  $Da$  数的增大,巷道附近围岩温度梯度明显降低。

### 参考文献:

[1] 张树光,孙树魁,张向东,等. 热害矿井巷道温度场分布规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003,14(3): 9-11.  
 [2] 张树光. 深埋巷道围岩温度场的数值模拟分析[J]. 科学技术与工程,2006,14(6): 2194-2196.

(下转第 187 页)

变量,接下来选择优化方法,指定优化循环模式。变分优化方法是生成优化文件后进入 DesignXplorer VT,在 setup 中设置变量,与传统优化方法不同的是它既可以设置连续变量,也可以设置离散变量。在 Solution 中选择优化方法,既可以让电脑自己选择,也可以人为的选择 padé 逼近或者泰勒逼近。优化目标可以是材料的属性、实常数等。优化完成后可以在 SolutionViewer 中查看优化结果,根据优化结果做出绘制出设计曲线、设计手册、直方图、响应面、设计扫描、误差分析、云图等。

(3) 优化结果:传统的一阶优化方法用时 67.146 s,变分优化用时 4.006 s。优化计算后,一阶优化结果的断面面积减少了 25%,而变分优化结果的断面面积减少了 27%,经验算一阶优化的计算出的抗滑稳定系数为 1.2059,而变分优化的为 1.1782。

## 4 结 语

本文以大型通用有限元软件 ANSYS 为平台,将变分技术 ANSYS DesignXplorer VT 模块和网格随移工具 ParaMesh 相结合并运用于结构优化设计上,通过对其验证及应用的情况的总结,主要得到以下结论:变分技术 DesignXplorer VT 通过一次计算,得出输入变量与响应量之间的高阶微分,只花了 4.006 s 就得出了重力坝优化的最优解,且经过验算,坝踵点不出现拉应力,抗滑稳定系数  $K$  为 1.1782,满足了应力和抗滑稳定要求。变分优化用时不到普通一阶优化的十分之一,大大降低了计算成本,节省的计算时间。且当设计变量越多时,变分技术的计算速度可提高数十倍至数千倍,在结构优化,尤其是水工结构优化上有很广阔的发展前景。

## 参考文献:

- [1] 左东启,王世夏,林益才.水工建筑物[M].南京:河海大学出版社,1995.1
- [2] 潘家铮.水工建筑物设计丛书重力坝[M].北京:水利电力出版社,1983.
- [3] 麦家焯.水工建筑物[M].北京:清华大学出版社,2005.6.
- [4] 潘家铮.重力坝设计[M].北京:水利电力出版社,1987.12.
- [5] 中国水利发电工程编委会.中国水利发电工程[M].北京:中国电力出版社,2000.8.
- [6] 沈长松.现代坝工技术及其发展趋势(一)[J].水利水电科技进展,1999,19(10):16-20.
- [7] 沈长松.现代坝工技术及其发展趋势(二)[J].水利水电科技进展,1999,19(12):8-11.
- [8] 张迪.重力坝实用剖面的优化设计及体型分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [9] 王德信,张旭明,蔡新.工程结构优化设计[M].南京:河海大学出版社,1997.
- [10] 王光远,董明耀.结构优化设计[M].北京:高等教育出版社,1987.
- [11] 江爱川.结构优化设计[M].北京:清华大学出版社,1986.
- [12] 朱伯芳,黎展眉,张璧城.结构优化设计原理与应用[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [13] 周伟,常晓林.基于有限元方法的碾压混凝土重力坝坝体体型优化研究[J].水力发电学报,2002,21(1):39-44.
- [14] 程心恕,陈少宝,程旭日.基于可靠性概念的重力坝优化设计[J].福州大学学报(自然科学版),1998,26(4):77-82.
- [15] 麦家焯.重力坝基本断面的快速优化设计[J].水利学报,2000,31(8):21-26.

(上接第 183 页)

- [3] 杨伟,杨琳琳,孙跃.辽宁大隆矿区矿井巷道空气温度的数值模拟与分析[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(2):84-88.
- [4] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [5] 杨伟,杨秋实,杜宝,等.裂隙岩体渗流耦合传热分析[J].中国地质灾害与防治学报,2002,27(1):59-64.
- [6] 杨伟,孙跃,杨秋实,等.封闭厂房内自然对流数传热数值研究[J].工业建筑,2002,27(增):26-29.
- [7] 张政.传热与流体流动的数值计算[M].北京:科学出版社,1984.
- [8] 霍曼 K,伊齐拉利 A,霍曼 F.流体饱和多孔介质中热发展强迫对流的熵产分析[J].应用数学和力学,2008,29(2):902-910.
- [9] DE Vahl Davis G, Jones I P. Natural convection of air in a square cavity[J]. Int J Numerical in Fluids,1983,(3):249-264.
- [10] Barkos G, Mitsoulis E. Natural convection flow in a square cavity revised: laminar and turbulent models with wall function[J]. Int J Numerical in Fluids, 1994, 18(7): 695-719.