渗流作用下深埋巷道围岩热交换过程的数值模拟

张二军，张树光，贾宝新

（辽宁工程技术大学土木建筑工程学院，辽宁 阜新 123000）

摘　要：为了研究深埋巷道围岩温度场的分布规律，基于传热学和渗流理论建立了深埋巷道围岩的热扩散数学模型，结合边界条件采用MATLAB对其进行了数值求解，获得了在风流和渗流耦合作用下围岩的温度场和温度矢量分布。研究结果表明：渗流改变了围岩初始温度场和温度矢量的对称分布的状态，围岩内部的温度场可划分为向内扩散区和向外扩散区。在围岩与风流的热交换作用下，巷道的壁面温度将接近风流温度，温度矢量零点的范围呈现出逐步增大的趋势。当热交换达到平衡状态时，向内扩散区的温度场呈现为环状对称分布状态；而向外扩散区等温线的形状没有明显的改变，但等温线的分布逐渐稀疏。

关键词：深埋巷道；温度场；风流；渗流；数值模拟

作者简介：张二军(1978－)，男，硕士研究生，主要从事环境岩土工程方面的研究。

0 引　　言

深部工程矿场围岩的工程热物理性质及传热问题的研究是解决深埋巷道高温害的基础之一，高温害同时还受到高地温、高应力、渗流和地质构造活动等因素的影响。国内外学者在地温及深部岩土体热物性测试方法和热物性预示推算[1-4]、地下工程岩土的耦合传热[5-6]、围岩与风流的热交换[7-9]、水热耦合迁移的理论分析和数值模拟等[10-11]方面进行了大量的研究，针对深部开采面临的高温害问题，矿场围岩的温度场分布研究是基础问题之一，本文的研究对象是渗流作用下的深部巷道，对风流与围岩的热交换过程采用METLAB-PDE工具箱进行了数值模拟。

1 模型建立

1.1 基本方程

(1) 热传导方程

采用双曲线型PDE作为传热函数[12]：

$$d\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}-\nabla(c\nabla T)+aT=f \quad , \tag{1}$$

式中，T 为域Ω上的求解变量——温度，t 为时间变量，c,a,f 为常数或者变量。

(2) 渗流方程

在整个研究区域内，忽略采动对围岩渗流性质的影响，假定构造岩体渗流服从达西定律[13]：

$$q=-\frac{k}{u_f}(p-\rho_f g) \quad , \tag{2}$$

式中，k 为围岩渗透率，u_f 为流体粘度，p 为流体压力，ρ_f 为流体密度，g 为重力常数，△表示构造岩体所在的空间。

(3) 热守恒方程

忽略气体的影响，构造岩体的热守恒方程[18]：

$$[\psi\rho c+(1-\psi)\rho_f c_f]\frac{\partial T}{\partial t}=(K_T T-\rho_f c_f qT) \quad , \tag{3}$$

式中，Ψ为围岩中岩石的体积分数，ρ，c 各为岩石的密度和比热容，c_f 为流体热容，K_T 为岩石和流体的联合热导率，$K_T=\Psi K+(1-\Psi)K_f$，K 为岩石的热导率，K_f 为流体的热导率。

1.2 边界条件

采用MATLAB指定的广义Neumann条件：

$$n(c\nabla u)+qu=g \quad , \tag{4}$$

式中，n 为垂直于边界的单位矢量，h,r,q,g 为常量或与 u 有关的变量。在该研究区域内，由于在边界上均存在不同程度的热交换，采用广义 Neumann 条件进行计算，计算参数如下：上边界，$g=33$，$q=1.40$；侧边界，$g=34$，$q=1.28$，下边界：$g=35$，$q=1.25$；内边界，$g=20$，$q=1.54$。

2 巷道围岩的温度场分布

研究区域资料来源于深埋巷道的原位监测数据，巷道断面为半圆拱形，断面宽度8.0 m，直墙和拱高均为4 m，地温35.2 ℃，巷道围岩密度 ρ 为2350 kg/m^3，比热 $c=0.84$ kJ/(kg·K)，导热系数 $K=1.43$W/(m·K)，研究区域选定为40 m×24 m范围内的巷道围岩，利用METLAB-PDE工具箱中的initmesh和refinemesh函数创建的三角形网格见图1，生成的单元网格数目为4944个。

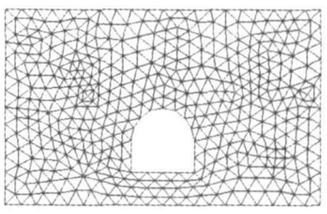


图1 巷道围岩的网格划分

2.1 巷道围岩的初始温度场

在渗流作用下的深埋巷道，经对围岩的温度监测，其初始温度为27.3℃，根据现场监测数据推算的上边界温度为25℃，渗流平均速度为150 cm/d，方向自左向右。将以上条件加入边界条件，与渗流方程耦合后模拟出的温度场分布及温度矢量结果见图2。

基金项目：辽宁省教育厅高校科学研究基金资助项目（2004F049）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

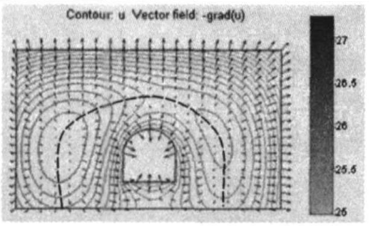
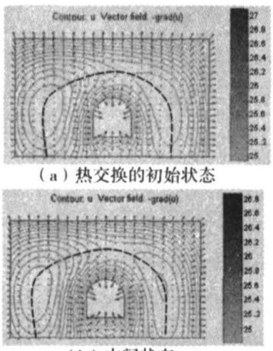


图 2 温度场和温度矢量的初始分布

初始温度场的数值模拟结果表明，渗流场的存在使得围岩的温度场成非对称分布，如果将温度矢量为零的点（模拟结果显示，这些温度矢量为零的点的温度并不相等）连线，在围岩内部形成了温度矢量改变方向的“分水岭”，由此围岩内部的温度场划分为向内扩散区和向外扩散区。向内扩散区内，巷道的左侧（逆渗流方向）等温线密集，而在右侧（顺渗流方向）等温线分布相对疏松；向外扩散区内，情况则恰恰相反。以上表明渗流场改变温度场分布的本质是渗流过程随热迁移现象。

2.2 围岩-风流热交换过程的数值模拟

为进一步分析巷道围岩内部温度场随着通风作用时间的变化，针对风速 V=1.5 m/s、风流温度为 22℃的情况，采用 METLAB-PDE 工具箱计算了巷道围岩的温度场，获得围岩热交换达到平衡时的温度场分布及温度矢量，再针对热交换过程的各阶段，选取得的典型温度场和温度矢量的变化过程见图 3。



（a）热交换的初始状态

（b）中间状态

图 3 围岩-风流热交换过程

为了验证模型和计算参数的可靠性，采用围岩壁面温度的检测结果与数值模拟的结果进行对比(表 1)。从对比结果来看，该模拟方法所获得的结果与实际情况相吻合。

表 1 检测与模拟结果对比

参数	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
检测值	25.1	24.9	24.6	24.1	23.3	22.6
模拟值	24.9	24.82	24.1	23.7	22.9	22.4

随通风时间的增加，围岩与风流的热交换作用对围岩内部温度场分布的影响逐渐增加，在宏观上表现为围岩的壁面温度逐渐降低，直至接近风流温度，温度矢量零点的范围也呈现出逐步增大的趋势，表明风流对围岩内部温度分布的影响范围也逐渐增大。在温度场的向内扩散区，巷道周围的等温线逐步形成以隧道轮廓为基准的环状分布。在初始状态下，围岩内部的温度场呈现出非对称分布的特征，且这种非对称分布与渗流场的存在是紧密相关的；在达到热交换平衡状态时，该区内围岩温度场的分布除接近矢量零点的附近以外，呈现为环状对称分布，且温度矢量指向巷道的中心。在温度场的向外扩散区，平衡状态与初始状态相比，等温线的形状没有明显的改变，但等温线的分布逐渐稀疏。

3 结　论

(1) 采用 METLAB 对渗流与风流耦合状态下深部巷道的温度场数值模拟计算是可行的，模拟结果与检测结果相吻合。温度场和温度矢量呈对称分布，风流速度对温度分布有明显的影响，但不改变其对称分布的状态。

(2) 渗流所伴随的热迁移现象改变了围岩初始温度场和温度矢量的对称分布的状态，围岩内部的温度场可划分为向内扩散区和向外扩散区。

(3) 在围岩与风流的热交换作用下，巷道的壁面温度逐渐降低，直至接近风流温度，温度矢量零点的范围呈现出逐步增大的趋势。

(4) 达到平衡状态时，向内扩散区的温度场呈现为环状对称分布状态；而向外扩散区等温线的形状没有明显的改变，但等温线的分布逐渐稀疏。

参考文献：

[1] SHONDER J A, BECK J V. Field test of a new method fordetermining soil formation thermal conductivity and borehole resistance[J]. Ashrae Transactions, 2000, **106**(1): 843 - 850.

[2] 陈则韶.据热扩散率最小离散度确定导热系数的新热探针法[J].中国科学技术大学学报,2000,**30**(3): 310 - 317.

[3] 于明志,彭晓峰,方肇洪. 用于现场测量深层岩土导热系数的简化方法[J]. 热能动力工程,2003,**18**(5):512 - 517.

[4] 彭担任,赵全富,胡兰文,等. 煤与岩石的导热系数研究[J].矿业安全与环保,2000,**27**(6):16 - 19.

[5] FOWLER C M, STEAD R D, PANDIT B I, JANSER B W, et al. A database of physical properties of rocks from the Trans-Hudson Orogen, Canada[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2005, **42**(4):555 - 573.

[6] 王　琴,程宝义,缪小平. 基于PHOENICS的地下工程岩土耦合传热动态模拟[J]. 建筑热能通风空调,2005,**24**(4): 19 - 24.

[7] 张树光,孙树魁,张向东,薛　强. 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.

[8] 周西华,王继仁,卢国斌,等. 回采工作面温度场分布规律的数值模拟[J]. 煤炭学报,2002,**27**(1):59 - 64.

[9] ZHANG Shu-guang, SUN Shu-kui. Temperature field distribution of laneway in heat harmful mine[J]. Proceedings of XII internationall congress of international society for mine surveying, 2004, **9**: 187 - 190.

[10] 赵镇南, 郝　睿,王　利.固液两相流中微对流强化的机理分析与数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2005, **26**(4): 656 - 658.

[11] 徐曾和,章子霞.定量开采条件下径向渗流的液固耦合问题[J].应用力学学报.2004,**21**(2): 16 - 19.

[12] 苏金明,张莲花,刘　波. MATLAB 工具箱应用[M].北京:电子工业出版社, 2004.

[13] 谭凯旋,谢焱石,赵志忠,等. 构造流体成矿体系的反应输运-力学耦合模型和动力学模拟[J]. 地学前缘,2001,**8**(4): 312 - 323.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net