

井巷多断面岩层热传递方式与深井热环境动态分析

鹿浩¹, 罗周全¹, MOMAYEZ Moe²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083;

2. Department of Mining and Geological Engineering, The University of Arizona, Tucson Arizona 85721)

摘 要: 确定井巷风流热量来源及关键地点温度变化、热增量与损失量,并以之为依据有针对性地开展深井气候调节是通风工程需要解决的关键问题之一。通过改进传统的傅里叶导热模型,建立了基于通风井巷实际断面形状的三维热传导模型,针对不同井巷断面形状确定了反映流速与流量状态的动量相关的计算边界条件,并结合时间参数揭示了岩层内部导热以及井巷岩壁与气流间的热交换规律,建立了湿壁面与气流间的热湿传导方程。在此基础上,构建起国内某大型深井金属矿山井下通风系统,获得了关键地点的温度、湿度、热量等参数的走势和变化特点,为矿山开展深井气候调节与控制奠定了基础。

关 键 词: 深井;热环境;岩层热;多热源;动态分析

中图分类号: TD 727

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)03-0423-05

Heat Transfer in Strata with Different Shape of Cross-Section and Dynamic Simulation of Thermal Environment for Deep Subsurface Mine

LU Hao¹, LUO Zhou-quan¹, MOMAYEZ Moe²

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Mining and Geological Engineering, The University of Arizona, Tucson 85721, USA.

Corresponding author: LUO Zhou-quan, lzq505@hotmail.com)

Abstract: It is a critical issue to adjust and control the subsurface mine climate based on the heat sources in airway and the temperature changes, heat gain and loss of key locations. By improving the traditional Fourier heat transfer model, a three-dimensional heat transfer model based on the actual cross-sectional shape of the ventilation airway was formulated. The momentum related boundary conditions which can reflex the velocity and quantity changes for different airway profiles also was specified, which associated with the time parameter to reveal the formation of heat conduction and exchange inside the strata and between the rock and airflow, and the heat transfer equation between wet wall and airflow was given at the meantime. On this basis, a large domestic ventilation system for deep subsurface metal mine was built, in order to obtain the trend and specialty of temperature, humidity, heat and some other parameters. This study lays the foundation for the deep subsurface mine to carry out climate regulation and control.

Key words: deep subsurface mine; heat environment; strata heat; multi-heat source; dynamic analysis

传热数值模拟研究往往存在着以下几方面的不足:一是传热机理主要考虑一维温度场中,物体中各个点温度只在2个方向变化,在揭示三维热传导规律方面存在不足,必然造成热流密度、温度

矢量表达不全面,影响了温度梯度的精度;第二,使用圆柱极坐标系统解决巷道围岩传热问题时对非圆形断面的处理不够全面,使用流速或流量当量直径,而未同时考虑二者的协同作用效果;第

三,未考虑具有时变性的深井通风环境,对时间影响因素的考虑不够精确;第四,缺乏对矿井全局系统的整体考虑,多热源的整合手段欠缺,热源与湿源耦合计算方法不成熟,只建立局部模型开展模拟,计算模拟结果可依赖性不强^[1-6].

针对上述不足,考虑到岩层热的产生和传递具有空间性和时变性等特性,本文采用理论与模拟实验相结合的研究方法,提出不同断面围岩内部三维圆柱极坐标传热控制方程及井巷围岩-风流之间的热湿交换方程,并确定其各自适用的边界条件和初始条件,结合时间参数,建立起通风系统模型;借助 VentSim 强大的通风系统建模功能和复杂参数与多热源集成功能,着重对岩层热在热环境中的作用效果与影响程度,以及热湿耦合作用进行分析研究,并开展深井空气动态热模拟,分析热增量和能量损失构成,以及温度、湿度、热量等的时步走势和变化特点,为开展深井气候调节与控制研究提供依据.

1 控制方程与条件

1.1 轴向温度梯度的传热控制方程

传统的 Fourier 热导计算使用笛卡尔坐标,研究问题为一维非稳态导热问题,未考虑轴向温度梯度影响^[7-9]. 本文在处理通风井巷周边的岩石传热问题时使用圆柱极坐标系,岩层环绕在通风井巷周边, z 轴代表井巷延伸方向,岩层中任何一点的位置用坐标 z, r 和 φ 表达, r 为沿井巷中心线向外延伸的距离, φ 为与水平面的弧度角. 取模型中某一梯形微单元,该单元位于薄圆环上距离中心 r 的位置,单元长度为 dz ,径向高度为 dr ,宽度从内侧的 $r d\varphi$ 增加至外侧的 $(r + dr) d\varphi$. 圆环上微元为计算单元,该微元面积为 $rd\varphi dz$.

热流通过 z 方向的热增量为(视微单元为长方体进行计算) dq_z , φ 方向取平均边长为 $\frac{rd\varphi + (r + dr)d\varphi}{2}$, 本文在计算过程中将不忽略该方向的热量:

$$\begin{aligned} dq_{i,z} - dq_{o,z} = & -krd\varphi dr \frac{\partial \theta}{\partial z} + krd\varphi dr \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \theta + \frac{\partial \theta}{\partial z} dz \right\} = \\ & krd\varphi dr dz \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}. \end{aligned} \tag{1}$$

加入时间因素 $\partial \tau$ (以秒为单位)后,结合空间关系,得到柱状极坐标中巷道围岩热传导的基本表达式:

$$\frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \tag{2}$$

式中: k 为围岩导热系数, $W/(m \cdot K)$; C 为材料的特征热,因此 $k/\rho C$ 为取决于材料特性的量,为岩石热扩散率, m^2/s .

1.2 真实断面井巷围岩传热

巷道的真实形状比较复杂,多数研究者在分析巷道围岩热传导问题时往往近似认为是圆形,实际上不同断面形状的巷道围岩的传热效果有所不同,因此边界条件要区别对待^[10-11]. 计算时通过确定当量直径将不同断面的井巷转化为近似圆形断面是比较科学的方法,而井巷壁面与风流之间的传热与流速和流量有关,研究过程中有学者用流速当量直径或流量当量直径的方法显然不够全面,因此,需要选择一种既能表达流量又能表达流速的完整当量直径才更准确.

假定某一非圆形断面的流速为 v_1 , 流量为 m_1 , 同时与其相当的圆形断面流速为 v_2 , 流量为 m_2 , 则二者动量之间的关系应为 $1/2 m_1 v_1^2 = 1/2 m_2 v_2^2$, 按此关系分别推导出不同断面尺寸的矩形、梯形、圆形和拱形井巷的边界条件, 见图 1.

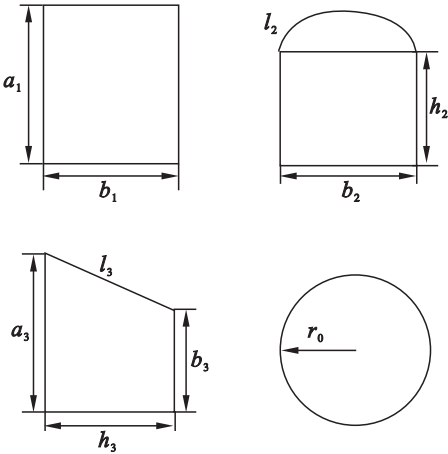


图 1 不同井巷断面尺寸
Fig. 1 Cross-section of different airways

不同井巷断面围岩传热时边界条件如下.

1) 圆形:

$$\left. \begin{aligned} r = r_0, -k \frac{\partial \theta}{\partial r} &= h\theta; \\ r = R_0, \frac{\partial \theta}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

2) 矩形:

$$\left. \begin{aligned} r = 1.442 \sqrt{\frac{a_1^5 b_1^5}{(a_1 + b_1)^3}}, -k \frac{\partial \theta}{\partial r} &= h\theta; \\ r = R_0, \frac{\partial \theta}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

3) 拱形,以拱高为 1/4 底边长的三心拱为例:

$$\left. \begin{aligned} r &= 1.941 \sqrt[7]{\frac{b_2^5(h_2 + 0.2b_2)^5}{(2h_2 + b_2 + l_2)^3}}, -k \frac{\partial \theta}{\partial r} = h\theta; \\ r &= R_0, \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

4) 梯形:

$$\left. \begin{aligned} r &= 1.183 \sqrt[7]{\frac{h_3^5(a_3 + b_3)^5}{(a_3 + b_3 + h_3 + l_3)^3}}, -k \frac{\partial \theta}{\partial r} = h\theta; \\ r &= R_0, \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假设进风流温度恒定,当围岩半径增大到 R_0 时其温度为原始岩温. 确定围岩与气流之间传热初始条件为

$$\theta(r, \tau) \big|_{\tau=0} = \theta_0. \quad (7)$$

边界条件:

$$\left. \begin{aligned} k \frac{\partial \theta}{\partial r} \bigg|_{r=r_n} &= h(\theta - \theta_a), \\ \theta(r, \tau) \big|_{r=R_0} &= \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: r_n 为巷道半径,对应式中不同类型的断面当量直径,m; R_0 为围岩远边界半径,m; θ_0 为原始岩温,℃; θ_a 为风流温度,℃; h 为风流与巷道壁面对流换热系数,W/(m²·K);过余温度 $\theta = t - t_\infty$,其中 $\theta_0 = t_0 - t_\infty$.

2 深井热环境参数与模型

某大型深井开采金属矿山发育一组由新古生代碎屑岩和碳酸盐岩组成的沉积盖层. 矿区含矿层位处于加里东褶皱基底不整合面以上的海侵旋回下部的滨、浅海相碳酸盐岩构造中. 当前开采深度为 -750 m,包含 20 余个中段,其中 -360 m 以下定义为深部采区,矿区整体的各个岩层的热特性参数见表 1.

表 1 各岩层热特性参数 Table 1 Thermal parameters of strata				
岩石名称	地热梯度 ℃/100 m	热导系数 W/(m·℃)	特征热 J/(kg·℃)	热扩散率×10 ⁶ m ² ·s ⁻¹
D ² d _a	1.7~3.3	1.25	850	0.55
铅锌矿体	2.0~5.1	5.20	800	2.40
黄铁矿	2.5~7.5	4.41	600	2.10
D ² d _b	1.7~2.50	1.5	900	0.80
D ³ t _a	1.8	1.30	840	0.60
D ³ t _b	1.5~1.8	1.45	860	0.70

总体模拟环境设定之后,将作为全系统运行的基础,涉及到的具体分支,据现场实测逐一设置. 模型中各条风路所属岩层由岩层模型进行约束. 本文选择的时间节点为该地区夏季平均干球与湿球温度,分别为 34.0,24.0℃,岩层热特性测定使用地层热物性原位测试仪^[12]. 柴油热效率在对矿山使用的各类柴油设备引擎基本参数调研之后确定为 40%~50%,计算迭代 100 次,报温间隔 50 m,温度精度精确到 0.1℃. 模型集成了改进的傅里叶算法及现场实测参数,如图 2 所示.

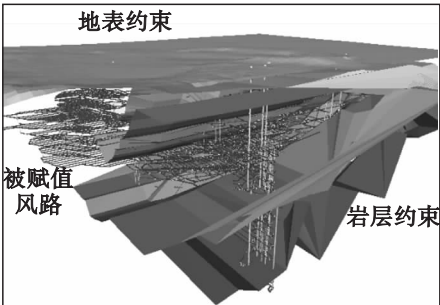


图 2 改进算法与集成多热源的通风系统模型
Fig. 2 Ventilation model with improved algorithm and multi-heat sources

3 深井热环境动态模拟分析

3.1 能量损失与热增量模拟分析

湿度增量在充分调查喷淋位置、喷水量,以及各水仓所在位置之后开展计算. 经计算总热损失为 4 832.6 kW,其中岩层热占 31%,由岩层、降尘及水源共同产生的湿增量占总湿增量的 81%. 整个系统的能量损失总量如图 3 所示. 图中所示的 Regulator Losses 为增加通风构筑物系统而造成的整流损失,占总能量损失的 65%;Orifice Losses 表示风路口径突然改变造成的能量损失;垂直于水平井壁的摩擦阻力造成的能量损失占 29%;风路转弯、变向所造成的冲击损失占 5%;出口损失约占 1%. 就此得出:系统中对风流运行影响最大的是构筑物,超过总能量损失的一半,可见该矿山

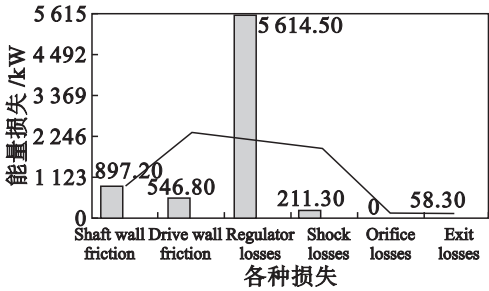


图 3 全系统能量损失(7 328.1 kW)
Fig. 3 Total energy losses(7 328.1 kW)

构筑物设置并不理想,对系统造成过多的能量损失.

全系统除爆破产热和岩石氧化热以外的热增量如图 4 所示,柴油设备热增量占 45%,风机增热量占 24%,岩层热增量占 11%,电器设备等产生显热占到 10%,深井空气自压缩产热约占 14%.可见柴油设备运行所产生的热,在系统增热量中所占比例最大.

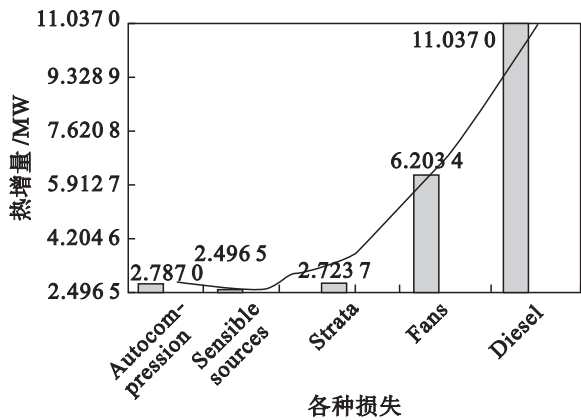


图 4 全系统热增量 (热增量 25.2476 MW)
Fig. 4 Total heat gains (heat gains 25.2476 MW)

3.2 关键分支时步模拟

动态监控的地点选取几个关键位置,监控指标包括:热量 (heat), 负值表示热量损失,可能来源于系统中多种类型的热源;湿空气焓值 (sigma heat);干球温度和湿球温度.

图 5,图 6 分别为选取的 4 个关键分支的热量增减状况和湿空气焓值变化状况.不同深度的分支热增量状态均为逐渐减少,由图可看出热增量大小随深度增加而增加. -320 m 主斜坡道联络巷承担主斜坡道新鲜风流进入 -320 m 中段的的任务,该位置附近没有移动设备运行,主要热源为岩层热,模拟前期热增量为正值,后期改为向外散失;湿空气的焓值在系统运行全过程中随时间递增,在 650 s 时增速加快,与喷淋系统增湿效果逐渐显现有关,该位置调节的关键是控制喷淋增湿量. -360 m 老副井主进风巷内设置有轨道运输机车和喷淋降尘装置,运输机车电机产热与该位置所配置的局部风机联合作用为主要热量来源,该位置在热模拟过程中分为 2 个阶段,即前期热量减少,后期趋于平稳. -550 m 主井马头门处的热量在模拟全过程中均处于下降状态,热量补充在逐渐减少,并逐渐趋于平稳,空气焓值不断增加,原因是该位置电机车产热及局部风机运行产热. -600 m 新副井马头门的进风来自新副井的新鲜风流,该位置风量达到 15.0 m³/s,风速达到 3 m/s,这一速度促使该位置模拟过程中在时间轴

300 s 时发生状态突变,热量快速扩散并立即趋于稳定,焓值趋于稳定并有略微下降趋势.

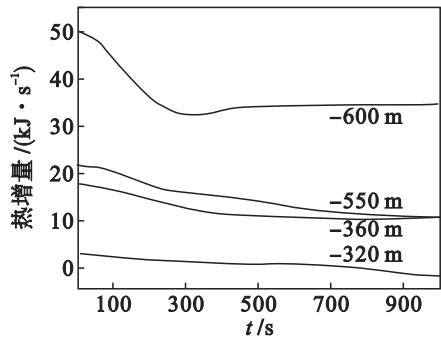


图 5 空气热增量图
Fig. 5 Chart of heat gain

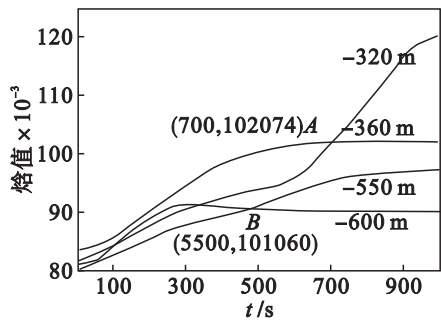


图 6 湿空气焓值图
Fig. 6 Chart of sigma heat for wet air

图 7 为 4 个关键分支的温度与湿度变化情况,用干球、湿球温度表达. -320 m (图 7a) 有喷淋降尘系统持续增湿,开始阶段该位置以岩层放热为主,热源向周边环境释放热量,中期干球温度趋于稳定,风流将水气稀释,湿度降低,湿球温度逐渐升高,并呈接近干球温度的趋势. -360 m 老副井主进风巷 (图 7b) 喷淋降尘系统造成的湿度增量效果明显,系统相对湿度达到 56.7% 至 59.3%. 在该通风作用下热与湿均达到增损平衡,效果良好. -550 m 主井马头门 (图 7c) 干球温度增速渐缓趋向平稳,与热量增损状态一致,湿球温度持续增加原因为喷淋降尘系统的持续增湿效果. 总体来看,该位置的热量增损、焓值和湿球温度并未趋于平稳,说明该位置未达到热湿平衡,通风调节需进一步加强. -600 m 新副井马头门 (图 7d) 干球与湿球温度以近乎同步的变化趋势升高到峰值后缓慢下降,湿度有略微增加.

通过动态模拟可见,焓值变化趋势与湿球温度变化基本同步,随深度增加,岩层热产生量增加,由于深井空气自压缩的作用,深部焓值增量明显 (-320 m, < 10 kJ/s, -600 m, 30 ~ 50 kJ/s). 模拟可见,选取的 4 个关键位置的温度均偏高,通风仍需加强,空调降温有一定必要性.

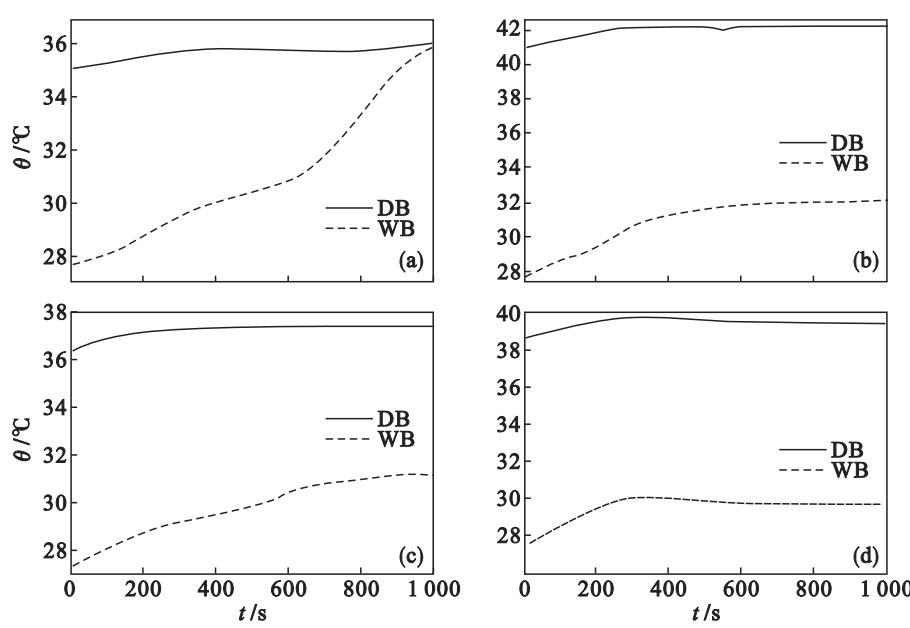


图 7 空气干球与湿球温度走势图
Fig. 7 Dry bulb (DB) and wet bulb (WB) temperature
(a)——320 m 主斜联络巷；(b)——360 m 老副井主进风巷；(c)——550 m 主井马头门；(d)——600 m 新副井马头门。

4 结 论

- 1) 岩层热的产生和传递具有空间性和时变性等特点,通过改进传统的傅里叶导热模型,建立了基于通风井巷实际断面形状的三维热传导模型,针对不同井巷断面形状确定了反映流速与流量状态的动量相关的计算边界条件,并结合时间参数揭示了岩层内部导热以及井巷岩壁与气流间的热交换规律,建立了湿壁面与气流间的热湿传导方程。
- 2) 提出热源与湿源耦合计算方法,针对某深井矿山工程实际,对井下柴油机械、电气机械、岩层热、爆破热等多种热源开展集成热环境分析,得到了岩层热对深井热环境的影响效果,同时得出系统能量损失量和损失原因,以及系统增热总量和热增量来源,为矿山开展深井气候调节提供依据。
- 3) 构建起国内某大型深井金属矿山井下通风系统,综合考虑多种热源与湿源的影响,开展井下通风动态热模拟和热湿耦合计算,获得了关键地点的温度、湿度、热量等参数的走势和变化特点。

参考文献：

[1] Hartman L, Mutmanky J M, Ramani R V, et al. Mine ventilation and air conditioning [M]. New Jersey: Wiley-Interscience, 1997: 10 – 150.
[2] 余恒昌. 矿山地热与热害处理 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 1991: 90 – 125.
(Yu Heng-chang. Thermal environment in mine and its control [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,

1991: 90 – 125.)
[3] Bluhm S J. Chamber of mines of South Africa [R]. Davis: University of California, 1987: 70 – 85.
[4] Wang C L, Wu C, Wang W J. Sensitivity analysis of relevant parameters in complicated mine ventilation network by numerical test [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2005, 12 (2) : 205 – 208.
[5] Huai X L, Wang W W, Li Z G. Analysis of effective thermal conductivity of fractal porous media [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007 (27) : 2815 – 2821.
[6] 王义江. 深部热环境围岩及风流传热传质研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2010: 21 – 43.
(Wang Yi-jiang. Heat and mass transfer of surrounding rock and airflow for deep thermal environment [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2010: 21 – 43.)
[7] 高建良, 魏平儒. 掘进巷道风流热环境的数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2006, 31 (2) : 201 – 205.
(Gao Jian-liang, Wei Ping-ru. Numerical simulation of the thermal environment at working face of diving airway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31 (2) : 201 – 205.)
[8] Xie Z P. Distribution law of high temperature mine's thermal environment parameters and study of heat damage's causes [J]. *Procedia Engineering*, 2012 (43) : 588 – 593.
[9] 高建良, 杨明. 巷道围岩温度分布及调热圈半径的影响因素分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2005, 15 (2) : 73 – 76.
(Gao Jian-liang, Yang Ming. Analysis of the factors influencing temperature distribution of surrounding rock and cooled zone radius [J]. *China Safety Science Journal*, 2005, 15 (2) : 73 – 76.)
[10] Sun P D. Study on visualization simulation of temperature distributions in surrounding rock of tunnels in a deep mine [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2006, 12 (2) : 57 – 61.
[11] Dosunmu I T, Shah S N. Evaluation of friction factor correlations and equivalent diameter definitions for pipe and annular flow of non-newtonian fluids [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 109 (9) : 80 – 86.
[12] Lim K, Lee S, Lee C. An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31 (8) : 985 – 990.