

矿井避难硐室的热负荷计算与分析

曹利波¹, 蔡玉飞², 付建涛¹, 周年勇²

(1. 国家安全生产重庆矿用设备检测检验中心, 重庆 400037; 2. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 通过对影响避难硐室热负荷各种因素的分析, 基于半无限大物体传热模型, 建立了避难硐室的传热计算微分方程。分别采用解析法、一维传热数值解法和三维数值解法对硐室岩体的传热进行了计算与对比, 与此同时, 研究了岩体初始温度、岩体热物性和舱体控制温度等参数对硐室热负荷的影响。结果表明: 一维传热数值解法可用于硐室岩体计算; 岩体的初始温度和岩体的热扩散系数对硐室热负荷的影响显著, 在硐室设计前必须对岩体温度和热扩散系数进行详细测量。该研究工作可对于避难硐室的结构设计和制冷量的确定提供参考。

关键词: 避难硐室; 热负荷; 半无限大物体; 井下紧急避险

中图分类号: TD67

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336 (2012) 01-0061-05

Calculation and Analysis on Thermal Load of Mine Refuge Chamber

CAO Li-bo¹, CAI Yu-fei², FU Jian-tao¹, ZHOU Nian-yong²

(1. Chongqing Mine Equipment Certification Center of National Safety Production, Chongqing 400037, China;

2. School of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the analysis on different factors affected to the thermal load of the mine refuge chamber, based on the heat conducting model of the semi-infinite large mass, a differential equation of the heat conducted calculation for the mine refuge chamber was established. Individually, the analysis method, the 1D heat conducted numerical solution and the 3D numerical solution were applied to the calculation and comparison on the heat conduction of the rock mass for the refuge chamber. Meanwhile, the rock initial temperature, rock thermal properties features, chamber in door controlled temperature and other parameters affected to the chamber thermal load were studied. The study results showed that the rock thermal conduction of the chamber was mainly a 1D thermal conduction. The rock initial temperature and the rock heat spreading coefficient would be obvious affected to the thermal load of the chamber. Before the design of the mine refuge chamber, a site measurement and detail survey should be conducted on the rock temperature and the heat spreading coefficient. The study work could provide the references to the structure design of the refuge chamber and the determination of the refrigeration volume.

Key words: mine refuge chamber; thermal load; semi-infinite large mass; underground emergency refuge

井下紧急避险设施是指在井下发生灾害事故时, 为无法及时撤离的遇险人员提供生命保障的密闭空间。对内提供氧气、食物、水, 去除有毒有害气体, 创造生存基本条件, 为应急救援创造条件、赢得时间。紧急避险设施主要包括永久避难硐室、临时避难硐室、可移动式救生舱。永久避难硐室是指设置在井底车场、水平大巷、采区(盘区)避灾路线上, 具有紧急避险功能的井下专用巷道硐室, 服务于整个矿井、水平或采区。由于可靠性

高、救援能力强、价格相对低廉等原因, 避难硐室成为国外紧急避险系统的主要形式并取得了一定的成效^[1]。如加拿大自1928年Hollinger矿火灾造成39人死亡的事故后, 就立法要求矿井建设利用压缩空气和呼吸面具提供氧气的初级避难硐室, 之后逐步扩充和完善空气净化、降温除湿等功能, 并在2006年萨斯喀彻温省的钾矿火灾时, 成功挽救了井下70名矿工的生命; 南非自1986年造成177人死亡的Kinross金矿矿难后就法律强制要求设立避

收稿日期: 2011-10-12; 责任编辑: 赵 瑞

作者简介: 曹利波(1979—), 男, 吉林农安人, 工程师, 硕士。Tel: 023-65239439, E-mail: caolib20080828@163.com

网络出版时间: 2012-01-12 15:36; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120112.1536.020.html>

引用格式: 曹利波, 蔡玉飞, 付建涛, 等. 矿井避难硐室的热负荷计算与分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1): 62-65.

难硐室，一般采用硐室加大直径钻孔方式；此外，澳大利亚、新西兰、美国、智利等国也均在不同程度上使用井下避难硐室；2010 年 8 月 5 日发生的智利圣何塞铜矿矿难中，33 名被困矿工在避难硐室内生存 69 d 后全部生还，成为国际井下救援的典范。

根据《国务院关于进一步强化企业安全生产工作的通知》和《煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定》，要求所有煤矿在 2013 年 6 月底前必须配置避难硐室或救生舱。由于我国紧急避险系统建设起步较晚，相关的设计建设标准和管理规定尚处于起步阶段，尤其是在避难硐室方面的研究更是落后于其他国家。热负荷作为避难硐室降温除湿系统设计最重要的原始输入参数，与矿井岩体温度、岩石密度、岩石比热容和硐室结构等参数密切相关，是避难硐室设计计算的关键，该方面的研究目前尚未见文献报道。目前，涉及地下不稳定传热的领域有地下管道工程、地下商业建筑、地下隧道和地下冷库的维护结构传热问题。文献 [2-4] 对这些设施的地下传热问题提出了解析解法。D W Jordan 和 LIU Chun 等^[8]对地下设施传热的数值方法进行了研究。F Ampofo 对地铁的热负荷进行了计算^[9]。文献 [10-14] 采用数值计算方法、网络模拟法、反应系数法等对地下水电站和地下建筑的热负荷进行计算。笔者采用传热学理论，通过解析法和数值法对避难硐室的热负荷开展研究，分析了岩层温度、岩层热扩散系数等参数对热负荷的影响。该研究工作对于避难硐室的设计具有参考意义。

1 避难硐室热负荷计算模型

计算假定的避难硐室结构尺寸为 30.0 m × 2.5 m × 2.5 m，容纳避难人数为 50 人，防护门的厚度为 100 mm，其中内外侧钢板厚度各为 10 mm，中间绝热层厚度 80 mm。避难硐室各部分热负荷如图 1 所示，其中 Q_1 为硐室防护门的热负荷， Q_2 为硐室岩体的传热负荷， Q_3 为人员、净化装置及电源等产生的内部热负荷，则总负荷 Q 的表达式为

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{1}$$

由于 Q_3 较稳定，可以作为常数来处理，一般可按 120 W/人计算，总计 6 000 W。

由于避难硐室岩层温度较为恒定，因此在计算

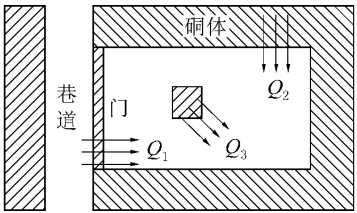


图 1 避难硐室热负荷计算模型

中可忽略地面温度波动和辐射的影响，硐室岩体传热可看成纯导热。此时，硐室岩体的外边界为恒定温度边界条件，硐室岩体的传热可采用半无限大物体导热模型来处理。硐室门的两侧分别是主巷道和避难硐室，发生瓦斯煤尘爆炸、火灾等矿难后主巷道温度一般可达 55 ℃，局部区域瞬时可达 1 200 ℃，热量会通过防护门传递到硐室内。防护门的传热可以简化为一维稳态导热，两侧均为已知空气温度和对流换热系数的第 3 类边界条件。硐室的设计额定防护时间为 110 h。硐室岩体和防护门的热物性见表 1。

表 1 避难硐室岩体及防护门材料热物性

材料	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)	比热/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
岩体	1.75	2 400	506
防护门钢板	56.00	7 850	900
防护门绝热材料	0.03	50	580

避难硐室热负荷设计温度参数如下：岩体初始温度 $t_0 = 25$ ℃；硐室内空气温度 $t_c = 30$ ℃；硐室外空气温度 $t_e = 55$ ℃。

2 计算方法及结果

2.1 解析法

硐室防护门的热负荷 Q_1 为

$$Q_1 = A_d \frac{t_e - t_c}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta_{out}}{\lambda_{out}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{in}}{\lambda_{in}} + \frac{1}{h_c}} \tag{2}$$

其中： A_d 为硐室防护门面积； h_c 、 h_e 分别为硐室内、外对流换热系数； δ_{in} 、 δ_{out} 、 δ_s 为门内外钢板和绝热层厚度； λ_{in} 、 λ_{out} 、 λ_s 为门内外钢板和绝热层导热系数。由式 (2) 可得通过门传递进入硐室的热负荷为 86 W。岩体的传热采用半无限大物体导热模型，微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \\ \tau = 0, t(x, 0) = t_0 \\ x = 0, h(t(0, \tau) - t_c) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \\ x \rightarrow \infty, t(x, \tau) = t_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为岩体温度; τ 为时间; x 为岩体厚度方向的长度; λ 为岩体材料的导热系数; a 为岩体材料的热扩散系数。

根据文献 [15], 式 (3) 的解析解如下:

$$t(x, \tau) = (t_0 - t_c) \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \exp\left(\frac{a\tau h_c^2}{\lambda^2} + \frac{h_c x}{\lambda}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{h_c}{\lambda} \sqrt{a\tau}\right) \right] \right\} + t_c \quad (4)$$

其中, $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数。由此可计算出岩体向硐室内传递的热负荷 Q_2 为

$$Q_2 = A_c h_c [t(0, \tau) - t_c] \quad (5)$$

式中, A_c 为硐室内壁面面积。

由式 (3) 可得 110 h 后岩体温度分布随厚度的变化关系如图 2 所示, 由图 2 可知, 厚度 3.0 和 4.5 m 处的温度分别为 25.025 和 25.000 °C, 在 110 h 的防护时间内硐室内温度对岩体的影响范围小于 5 m。

图 3 给出了由式 (1)、式 (5) 得到的 110 h 内硐室热负荷和壁面传热量的变化曲线。由图 3 可知, 在防护初期, 由于壁面和硐室的温差较大, 岩体吸收的热量大于人员和其他产热量, 因此初期总热负荷 Q 为负值。随着壁面温度吸收热量后逐步升高, 总负荷 Q 也逐步由负到正, 并且逐步增加, 由计算可知 110 h 内硐室总的热量为 8.89×10^5 kJ, 平均热负荷为 2 244 W。

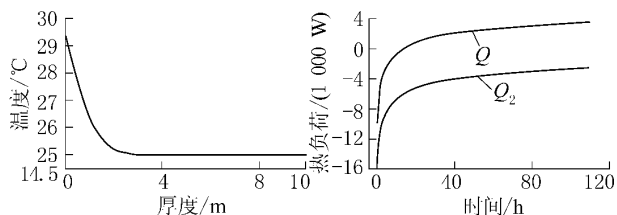


图 2 温度随岩体厚度的变化

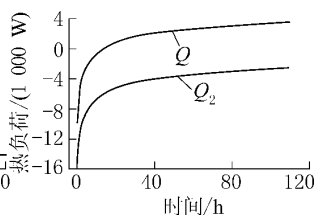


图 3 传热量与热负荷变化

2.2 一维数值解法

解析法可以直接求解硐室岩体的传热, 不需要迭代, 计算速度快。但由于硐室内部温度受初始条件和其他因素的影响不是定值, 使得偏微分方程求

解十分困难, 因此在计算中常取定值求解, 无法真实反映传热过程的本质, 给计算带来较大的误差。同时解析解法没有考虑到硐室岩体在传热过程中等温面的面积会逐步扩大, 采用等面积平板导热计算也会带来一定的误差。为了减少上述因素带来的误差, 更好地反映避难硐室的传热机制, 可以采用基于微分方程的数值计算方法。

由图 2 可以看出, 在设计计算时间内, 岩体厚度方向超过 5 m 处不受硐室内温度影响, 因此在计算中以岩体厚度 $L=5$ m 处为边界条件, 岩体传热的数值解法的微分方程见式 (6)。

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{A(x)} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda A(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right] \\ \tau = 0, t(x, 0) = t_0 \\ x = 0, h(t(0, \tau) - t_c) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \\ x = L, t(x, \tau) = t_0 \end{cases} \quad (6)$$

此外, 在避难硐室工作的初始阶段, 硐室内的空气和岩体温度相同, 随着人员的进入, 硐室内空气温度逐渐升高至设计温度, 在此过程中, 硐室内的空气、设备和岩体会吸收人员和净化系统的热负荷。这一过程的微分方程见式 (7)。

$$\rho_c c_c V \frac{dt}{d\tau} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

式中: V 为硐室体积; ρ_c 为硐室空气密度; c_c 为硐室空气比热。

式 (5) 采用有限体积法进行离散, 离散方程由 TDMA 法进行求解, 式 (6)、式 (7) 得到的硐室内空气温度、硐室壁温及硐室热载荷的变化曲线分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知, 在防护初期, 由于硐室温度和岩体壁温度相差较小, 通过壁面吸收的热量很少, 热容较小的硐室内空气温度上升很快, 而无穷热容的岩体壁温上升较为缓慢, 壁面的吸热量迅速增加; 当硐室内空气温度上升至 27 °C 左右, 由于空气和壁面传热温差的增大, 使得对壁面的传热增加, 室温上升速度减缓, 此时壁面的吸热量基本保持 6 000 W; 在没有采取制冷措施的情况下, 硐室内空气温度在 22.3 h 后达到 30 °C, 之后硐室的热负荷由 0 开始逐步上升, 110 h 后的热负荷约为 3 000 W。对图 5 的硐室热负荷进行积分可得 110 h 内硐室总的热量为 7.66×10^5 kJ, 平均热负荷为 1 934 W。

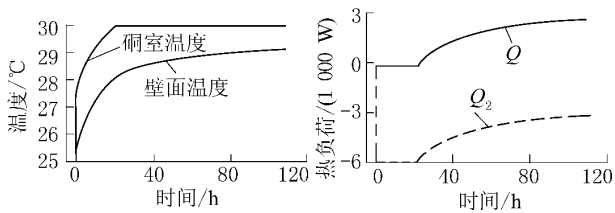


图 4 硐室和壁面温度变化

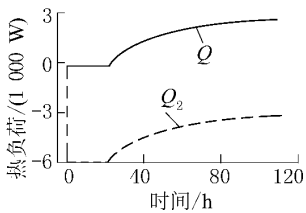


图 5 传热量与热负荷变化

2.3 三维数值解法

硐室岩体的传热主要是一维传热，但是矿难发生后巷道内温度一般比较高，靠近巷道的岩体会受到巷道温度的影响，传热过程存在一定的三维特性，需要采用三维计算方法对一维算法进行验证。笔者建立的避难硐室热负荷计三维模型如图 6 所示，巷道温度为 55 ℃，利用 Fluent 计算求得的 110 h 后硐室的温度分布云图如图 7 所示。

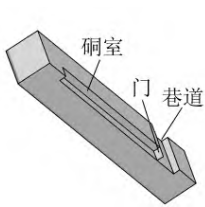


图 6 热负荷计算三维模型结构 图 7 硐室温度分布云图

由图 7 可知，靠近巷道侧的岩层，受巷道气体的加热作用，温度高于其他区域，110 h 后沿硐室长度方向的热流密度变化如图 8 所示。由图 8 可以看出，巷道温度对硐室传热的影响范围约为 3 m，在 3 m 范围内岩体对硐室的传热为正值，会施加额外的热负荷给硐室，超过长度 3 m 的区域则为负值，且传热量基本保持不变。相应的 110 h 内硐室热负荷和壁面传热量如图 9 所示。对图 9 中硐室热负荷进行积分可得，硐室 110 h 的总热量为 7.81×10^5 kJ，平均热负荷为 1 971 W。

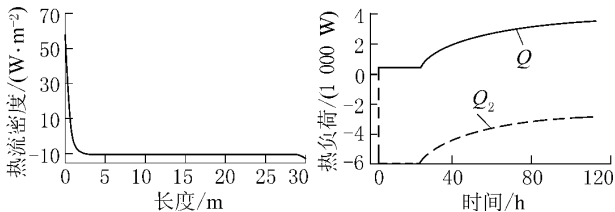


图 8 硐室长度方向热流密度

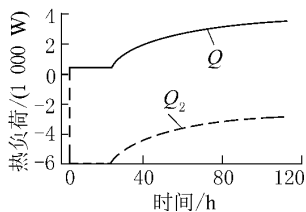


图 9 传热量与热负荷变化

表 2 为 3 种计算方法的对比，以三维数值传热的结果作为标准结果进行比较。由表 2 可以看出一维数值解法与三维解法相比误差不大，基本可以满足工程设计需求。

表 2 计算结果对比

项目	平均热负荷/W	绝对误差/W	相对误差/%
解析法	2 244	273	13.9
一维数值解法	1 934	37	1.9
三维数值解法	1 971	0	0

3 影响因素分析

由三维数值计算可以看出巷道温度对硐室的热负荷影响较小，在结构尺寸、避险人员等条件相同的情况下，影响避难硐室热负荷主要因素为岩体的初始温度与岩体热物性。

3.1 岩体初始温度

岩体的初始温度直接影响了硐室岩体与硐室内空气的换热，是影响硐室热负荷的主要因素。硐室热负荷随岩体初始温度的变化曲线如图 10 所示。

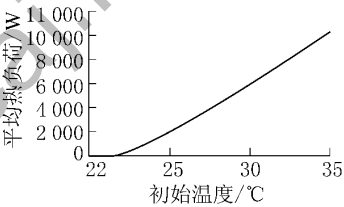


图 10 热负荷随初始温度变化

由图 10 可知，当初始温度低于 21 ℃时，硐室的平均热负荷为 0，此时硐室内不需要配置制冷系统，随着初始温度的增加，热负荷逐步增加，在 22.5 ℃前增加较为缓慢，当温度高于 22.5 ℃时，初始温度和平均热负荷的变化基本呈线性增长；当初始温度超过 30 ℃，由于岩体对避难硐室的传热为正值，此时可以在硐室壁面加入绝热层，以减小硐室的总热负荷。

图 11 为岩体初始温度为 20 ℃时硐室与壁面温度变化。由图 11 可知，当防护时间为 110 h 时硐室内温度仍未达到 30 ℃，不需要开启制冷装置。

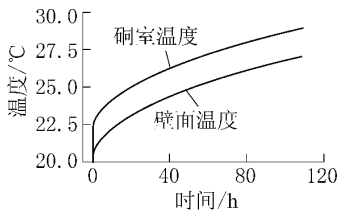


图 11 岩体温度 20 ℃时硐室与壁面温度变化

3.2 岩体的热扩散系数

热扩散系数是材料传播温度变化能力大小的指

标, 是动态传热的重要参数, 反映了硐室内热量在硐室岩体里的传播速度。硐室热负荷与硐室岩体热扩散系数关系如图 12 所示。由图 12 可见热扩散系数对岩体的热负荷影响很大, 随着热扩散系数的减小平均热负荷呈近似指数关系增长。

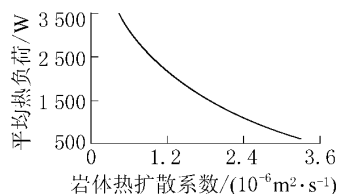


图 12 热负荷与岩体热扩散系数关系

4 结 语

在分析矿用避难硐室的热负荷组成的基础上, 建立了岩体的传热数学模型, 分别采用解析法、一维数值解法和三维数值解法对硐室的传热特性进行计算求解, 并分析了影响避难硐室热负荷的各种因素。计算结果表明: ①巷道温度对硐室热负荷的影响较小, 整个硐室岩体的传热以一维传热为主。一维数值解法基本可以指导硐室的工程设计。②岩体的初始温度对热负荷影响较大, 岩体初始温度低于一定的值可以不使用制冷系统, 当岩体初始温度高于要求温度时可以在壁面布置绝热层以减小硐室的热负荷。③硐室岩体的热扩散系数是硐室岩体传热的重要参数, 在进行热负荷计算前必须详细测定硐室岩体的热物性, 以保证计算的正确性。

参考文献:

- [1] 张恩强, 王 丽, 刘名阳, 等. 探讨井下避难硐室在矿井中的应用 [J]. 煤矿安全, 2009, 40 (7): 90-92.
- [2] 黄福其, 张家猷, 谢守穆, 等. 地下工程热工计算方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [3] Moncef Krarti, Jan F Kreider. Analytical Model for Heat Transfer in an Underground Air Tunnel [J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37 (10): 1561-1574.
- [4] YUAN Yan-ping, JI Hong-hu, DU Yan-xia, et al. Semi-Analytical Solution for Steady-Periodic Heat Transfer of Attached Underground Engineering Envelope [J]. Building and Environment, 2008, 43 (6): 1147-1152.
- [5] Jordan D W. The Numerical Solution of Underground Heat Transfer Problems—I Method Relating to Dry Roadways Original Research Article [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965 (3): 247-270.
- [6] Jordan D W. The Numerical Solution of Underground Heat

Transfer Problems—II Details of Numerical Calculations Relating to a Static Roadway and to an Advancing Roadway in a Dipping Seam [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1965, 2 (4): 341-363.

- [7] Jordan D W. The Numerical Solution of Underground Heat Transfer Problems—III The Calculation of Temperature Distribution in Dry and Wet Force - Ventilated Headings [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1965, 2 (4): 365-387.
- [8] LIU Chun, SHI Bin, TANG Chao-sheng, et al. A Numerical and Field Investigation of Underground Temperatures Under Urban Heat Island [J]. Building and Environment, 2011, 46 (5): 1205-1210.
- [9] Ampofo F, Maidment G, Missenden J. Underground Railway Environment in the UK: Methods of Delivering Cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24 (5): 647-659.
- [10] 宋珊芳, 赵敬源, 赵秉文. 地下建筑壁面动态传热的数值分析研究 [J]. 西北建筑工程学院学报: 自然科学版, 2001, 18 (2): 32-35.
- [11] 肖益民. 水电站地下洞石群自然通风网络模拟及应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [12] 张华玲, 刘 朝, 刘 方, 等. 地下洞室多孔墙体热湿传递的数值模拟 [J]. 暖通空调, 2006, 36 (12): 9-13.
- [13] 彭梦珑, 黄敬远, 丁力行, 等. 深埋地下建筑岩壁耦合传热过程的动态计算 [J]. 建筑科学, 2007, 23 (6): 37-40.
- [14] 苏 华. 水电站地下隧洞换热计算模型比较 [J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35 (5): 287-290.
- [15] 顾勤昌. 半无限大物体非稳态导热解析解 [J]. 西安矿业学院学报, 1996, 12 (1): 80-84.

(上接第 60 页)

- [18] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [19] Creedy D P, Clarke R D C. Minimizing Firedamp Riskson High Production Coalfaces: A Computational Modelling Approach [C]. Proceedings of an International Symposium: Safety, Hygiene and Health in Mining, Harrogate Doncaster: The Institution of Mining Engineers, 1992: 192-203.
- [20] Ren T X, Edwards J S. Three-dimensional Computational Fluid Dynamics Modeling of Methane Flow Through Permeable Strata Around a Longwall Face [J]. Mining Technology: IMM Transaction Section A, 2000, 109 (1): 41-48.
- [21] Yuan L M, Smith A C. Numerical Study on Effects of Coal Properties on Spontaneous Heating in Longwall Gob Areas [J]. Fuel, 2008, 87 (15/16): 3409-3419.
- [22] ZHOU F B, REN W X, WANG D M, et al. Application of Three-phase Foam to Fight an Extraordinarily Serious Coal Mine Fire [J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 67: 95-100.