

# 褐煤自然发火特性实验及数值模拟

张晓明<sup>1</sup>, 张河猛<sup>2</sup>, 王琢<sup>3</sup>, 王永军<sup>3</sup>, 佐佐木久郎<sup>4</sup>

1. 辽宁工程技术大学工程与环境研究所, 葫芦岛 125000
2. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 阜新 123000
3. 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000
4. 九州大学工学部地球资源工学部门, 福岡 8190395

**摘要** 为研究褐煤的自然发火特性, 采用恒温加热法, 对不同尺寸的立方体网状容器内的煤样进行实验, 得到煤样的升温曲线和临界自燃点温度。根据实验条件, 应用 Fluent 软件建立煤样升温过程的温度场、空气渗流场和氧气浓度场三场耦合模型。实验与模拟结果表明: 煤体体积越大, 临界自燃温度越低; 当环境温度高于临界自燃温度值, 煤体能够自燃, 反之煤体不能自燃; 煤体升温过程中的温度场、空气渗流场和氧气浓度场是随着时间变化并且相互影响的。

**关键词** 自然发火; 临界自燃温度; 数值模拟; 多场耦合

褐煤价格低、储量大, 越来越受到世界各国的重视。然而褐煤较高自燃倾向性给其开采、运输、储存带来许多危险<sup>[1]</sup>。影响煤自燃的主要因素有两点: 一是热量的自发产生, 破碎煤体与空气接触过程中不断被氧化释放热量; 二是热量的积聚<sup>[2]</sup>。煤氧化产热过程中不断向外界散失热量, 当产热大于散热, 煤的温度便会升高, 达到着火点温度后, 煤就会发生自燃。煤自燃过程是涉及多场耦合的复杂过程。长期以来, 国内外学者针对煤自燃过程做了许多研究。加拿大 Feng<sup>[3]</sup> 采用 4 种方法 (静态恒温法、可燃性法、绝热法和动态法) 分析了煤的自燃机理; Smith 等<sup>[4]</sup> 利用绝热炉研究不同添加剂情况下煤的最小自热温度和自燃特性; Kevin 等<sup>[5]</sup> 采用非恒温动态法测试了煤的自燃临界温度; Gouws 等<sup>[6]</sup> 采用计算机自动控制绝热量热法预测煤的自燃特性; Clemens 等<sup>[7]</sup> 采用恒温 DTA 和程序升温 DRIFTS 测定煤的自燃特性; 徐精彩等<sup>[8]</sup> 建立大型自燃实验台, 研究了低温状态下煤炭的自燃过程; 陆伟等<sup>[9]</sup> 利用绝热氧化法获得了不同温度段煤的绝热氧化升温速率和产热速率; 刘剑等<sup>[10]</sup> 通过实验运用活化能理论研究煤的自燃机理; 张瑞新等<sup>[11]</sup> 研究了露天煤堆的自然发火过程。

本文从实验和模拟相结合的角度研究褐煤自然发火特性。选取 3 种不同体积的立方体煤样, 应用恒温加热法测试不同体积煤样的临界自燃温度 (CSIT)<sup>[12]</sup> 和升温特性曲线。基于实验条件, 通过 Fluent 软件建立了温度场、空气渗流场和氧气浓度场三场耦合模型, 分析了煤体升温过程的传热传质、空隙空气流动和氧气运输等现象。

## 1 实验室实验

### 1.1 实验过程

实验仪器采用 DHG-9023A 型恒温箱, 实验样品为内蒙古白音华矿褐煤。将煤块破碎并筛选出粒径为 9~11 mm 的煤颗粒作为实验煤样。煤样经干燥后, 被装入 3 种不同尺寸 (边长分别为 50、100、150 mm) 的铜质立方网状盒中。将装有煤样的网状盒放置于恒温箱中, 在煤样中心垂直线上依次布置 3~5 个温度探头。通过调节恒温箱的温度, 记录不同环境温度下煤样的升温情况, 判断煤样是否自燃, 并得到不同体积煤样的 CSIT 值。根据实验结果, 当煤样中心温度超过 160℃, 且升温速率超过 1℃/min 时, 可认为煤样将会自燃; 当煤样中心温度到达最高点后又下降, 并不再升高时, 可认为煤样无法自燃。出现上述两种情况即可停止实验。图 1 为实验装置示意。

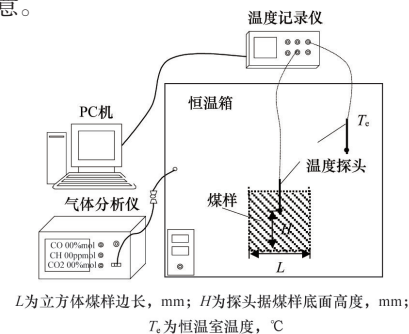


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

收稿日期: 2015-08-04; 修回日期: 2015-12-21

基金项目: 日本 JSPS 科研费项目 (25303030)

作者简介: 张晓明, 教授, 研究方向为地下空间气象环境、煤层气开发等工程项目的设计, 电子信箱: xmzhang7@126.com

引用格式: 张晓明, 张河猛, 王琢, 等. 褐煤自然发火特性实验及数值模拟[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 190-193; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.026

### 1.2 实验结果

图2为不同尺寸、不同环境温度下的煤样中心点的升温曲线。如图2(a)所示,煤样的尺寸为50 mm,当环境温度为120℃时,煤样中心点温度在实验开始109 min后到达最高点(146.1℃),最高点温度持续时间为5 min,随后温度下降,煤样没有自燃;当温度为125℃时,煤样能够自燃。所以判断50 mm尺寸煤样的CSIT值为122.5℃(±2.5℃)。100 mm和150 mm尺寸煤样的CSIT值分别为97.5℃(±2.5℃)和87.5℃(±2.5℃)。

由图2可知,煤样体积越大,CSIT值越低,这是由于相同

环境温度下体积大的煤产热量多并且蓄热条件比较好。另外,同一体积煤样在不同环境温度下的升温曲线不同,当环境温度高于CSIT值时,环境温度越高,煤样达到自燃条件所需的时间越短;当环境温度低于CSIT值时,环境温度越高,煤的氧化作用越强烈,释放热量越多,升温曲线最高点的温度值越高(如 $L=50\text{ mm}$ ,  $T_e=120\text{℃}$ 和 $T_e=110\text{℃}$ 时曲线最高点分别为146.1℃和117.3℃),然而由于此时煤样内外温差会大,热量容易散失,因而最高点温度持续的时间会越短(如 $L=100\text{ mm}$ ,  $T_e=95\text{℃}$ 和 $T_e=90\text{℃}$ 时的曲线最高点持续时间分别为41 min和62 min)。

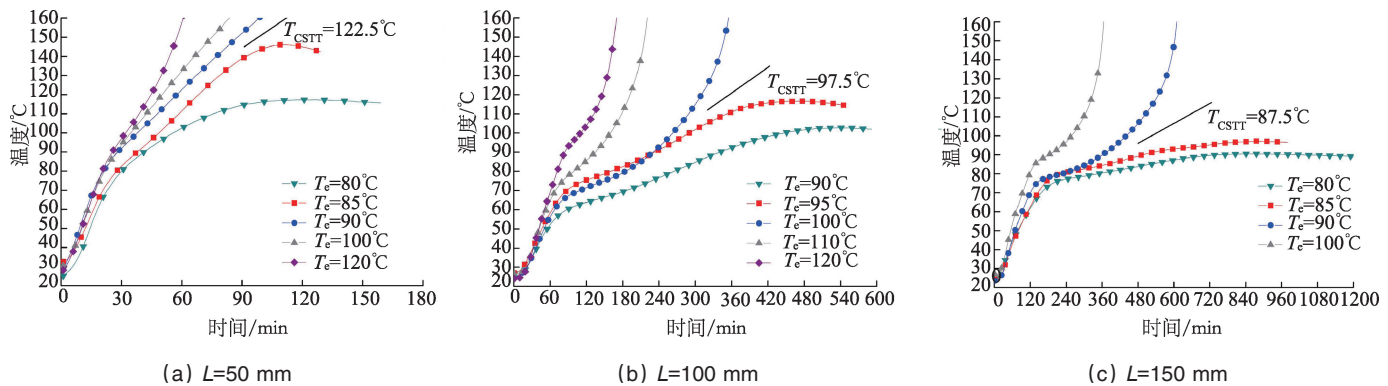


图2 3种不同尺寸煤样中心点升温曲线

Fig. 2 Temperature profiles at the centers of three different size coal samples

## 2 煤自燃过程的数学模型

主要模拟煤自燃过程的温度场、空气渗流场和氧气浓度场随时间变化的分布规律以及耦合过程,本文的多孔介质流场控制方程有4类<sup>[13,14]</sup>:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial (n\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot (\mu \text{grad } u) - n \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (n\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v u) = \nabla \cdot (\mu \text{grad } v) - n \frac{\partial p}{\partial y} + n\rho g_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial (n\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w u) = \nabla \cdot (\mu \text{grad } w) - n \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

氧气组分质量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho Y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y) = \nabla \cdot (D \text{grad } (\rho Y)) + S_o \quad (5)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} ((n\rho c_t + (1-n)\rho_s c_s)T) + \nabla \cdot (\rho c_t \mathbf{u} T) = \nabla \cdot ((n\lambda_t + (1-n)\lambda_s) \text{grad } T) + S_r \quad (6)$$

式中, $\rho$ 为流场密度,kg/m<sup>3</sup>;  $t$ 为时间,s;  $\mathbf{u}$ 为速度矢量;  $u, v, w$ 分别为速度矢量 $\mathbf{u}$ 在 $x, y$ 和 $z$ 方向的分量,m/s;  $\mu$ 为动力黏度, N·s/m<sup>2</sup>;  $n$ 为多孔介质孔隙率;  $g_y$ 为 $y$ 方向的重力体积力, Pa;  $p$ 为

流体微元上的压力, Pa;  $Y$ 为氧气的体积浓度, %;  $D$ 为氧气的扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $S_o$ 为氧气的消耗源项, kg·(m<sup>3</sup>·s)<sup>-1</sup>;  $T$ 为热力学温度, K;  $S_r$ 为煤的氧化反应产热, W/m;  $\rho_t, \rho_s$ 分别为流体和固体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_t, c_s$ 分别为流体和固体的比热容, J/(kg·K);  $\lambda_t, \lambda_s$ 分别为流体和固体的导热系数, W/(m·K)。

## 3 数值模拟结果

基于上述数学模型,应用Fluent软件针对不同的实验条件进行模拟计算。在此以 $L=100\text{ mm}$ ,  $T_e=110\text{℃}$ 条件下的数值模拟结果为例进行分析。图3为模拟和实测升温曲线对比,由图可知模拟升温与煤样内各测点温度变化趋势相吻合。说明数值模拟方法能够反映煤样内复杂的多场耦合过程。图4为煤样温度场和空气渗流场的模拟结果;图5为煤样测点氧气体积分数及消耗模拟曲线。

如图4(a)、(b)所示,实验初期阶段,煤温较低,氧化产生热量小,煤样空隙内的空气密度大于外部环境的空气密度,所以空气在重力作用下向底部流动,煤样在此流动影响下,上部温度上升较快,下部温度上升较慢。随着煤体整体温度的上升,热对流和热传导作用逐渐减弱,升温速率减缓。如图4(c)、(d)、(e),当上部煤体温度上升并超过环境温度后,随着其高温范围的扩大,上部煤体空隙内的空气密度低于环境空气密度,从而在内外压力差作用下向上流动。这种趋势

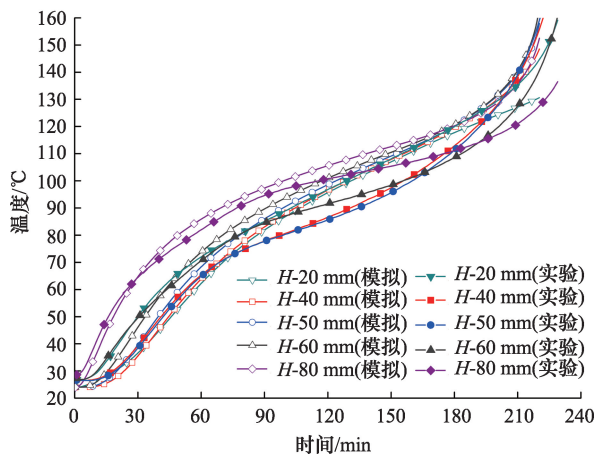


图3  $L=100\text{ mm}$ ,  $T_e=110^\circ\text{C}$ 条件下模拟与实测温度曲线对比  
Fig. 3 Comparison of temperature profiles of simulation and experiment under the condition of  $L=100\text{ mm}$  and  $T_e=110^\circ\text{C}$

会随着煤样整体温度的上升逐渐扩大到煤样全范围, 风流方向相对于初始阶段发生逆转。温度场和空气渗流场共同影响着氧气浓度的变化。如图5所示, 空隙内空气流动方向逆转前, 随着煤温逐渐升高, 耗氧量增大, 由于空气渗流速度逐渐减小, 对流作用供给煤体的氧气量减少, 所以煤体内各测点的氧气浓度减小速率逐渐增大; 渗流方向逆转的过程中, 由于煤样内外压差很小, 空气渗流速度很小, 导致氧气供给量很少, 从而造成内部氧气浓度快速减小。风流方向逆转之后,  $H=20\text{ mm}$  测点率先受到对流作用增强的影响, 氧气开始回升, 随后其余测点的氧气浓度由下及上依次升高。随着煤体温度的上升, 氧气消耗量迅速增加, 造成各测点氧气浓度急剧下降, 最终发生自燃。由上可知, 煤体产热耗氧和漏风速率及方向影响着氧气浓度场的分布变化; 煤体温差及氧气浓度差的梯度驱动作用影响着空气渗流场的分布变化; 煤体漏风速率及方向和氧气浓度影响着温度场的分布变化。

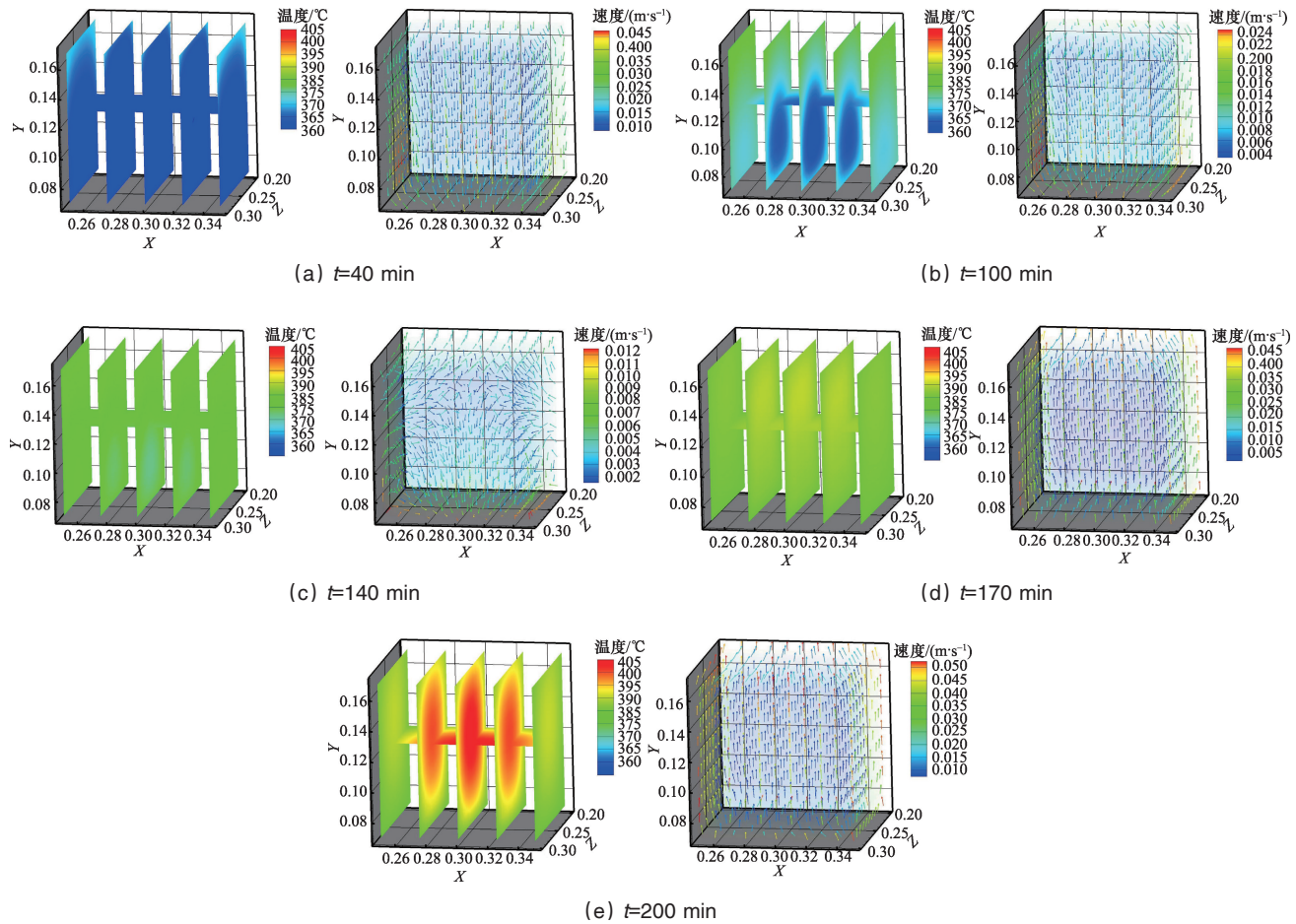


图4  $L=100\text{ mm}$ ,  $T_e=110^\circ\text{C}$ 条件下温度场与空气渗流场  
Fig. 4 Temperature field and air seepage field under the condition of  $L=100\text{ mm}$  and  $T_e=110^\circ\text{C}$

综合实验和模拟结果, 由于煤的不断氧化放热, 煤样温度会逐渐超过环境温度, 同时自然对流也随着温度的升高而增强, 使煤样向外部环境散热量逐渐增加。这时如果蓄热能

力大于散热能力, 煤样内部温度会持续升高直到自燃; 反之, 由于产热能力随着时间不断减弱, 煤样温度在达到最高点并持续一段时间后, 会慢慢降至环境温度。

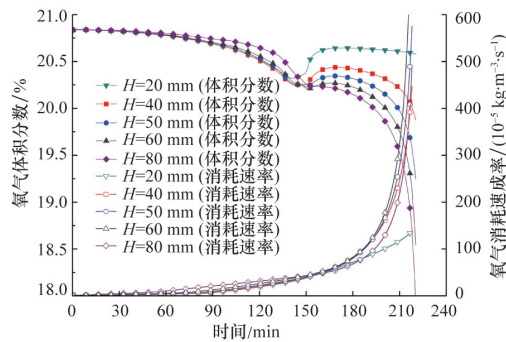


图5  $L=100$  mm,  $T_0=110^\circ\text{C}$ 条件下氧气体积分数及消耗模拟曲线

Fig. 5  $\text{O}_2$  concentration and consumption profiles of simulation under the condition of  $L=100$  mm and  $T_0=110^\circ\text{C}$

#### 4 结论

1) 煤体的自然发火是其氧化产热和散热综合作用的结果,运用静态加热法可以测得不同体积褐煤的CSIT值。50、100、150 mm的煤体的CSIT值分别约为122.5、97.5和87.5 $^\circ\text{C}$ 。当温度高于CSIT值时,煤体会自燃;反之,煤体在达到最高点温度后会逐渐降到周围环境温度。煤体体积越大,CSIT值越小。

2) 借助Fluent软件建立了煤体升温过程中的温度场、空气渗流场和氧气浓度场的三场耦合模型。模拟结果揭示了实验条件下温度场、空气渗流场和氧气浓度场随时间变化的过程及相互影响,为认识和分析煤体升温过程中的多场耦合提供了可以参考和借鉴的方案。

#### 参考文献(References)

- [1] 李青松. 褐煤化工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
Li Qingsong. Lignite chemical processes[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [2] Sasaki K, Sugai Y. Equivalent oxidation exposure-time for low temperature spontaneous combustion of coal[A]//Ahsan A. Heat

- Analysis and Thermodynamic Effects. Croatia. InTech, 2011: 235-255.
- [3] Feng K K. Spontaneous combustion of Canadian coals[J]. CIM Bulletin, 1985, 78(877): 71-75.
- [4] Smith A C, Miron Y, Lazzara C P. Inhibition of spontaneous combustion of coal[R]. Washington: US Bureau of Mines, 1988.
- [5] Kevin B, Nicolao S, David G. Temperatures of some Turkish coals due to spontaneous combustion[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 1988, 36(9): 434-436.
- [6] Gouws M J, Gibbon G J, Wade L, et al. Adiabatic apparatus to establish the spontaneous combustion propensity of coal[J]. Mining Science & Technology, 1991, 13(3): 417-422.
- [7] Clemens A H, Matheson T W, Rogers D E. DTA studies of the low temperature oxidation of low rank coals[J]. Fuel, 1990, 69 (90): 255-256.
- [8] 葛岭梅, 徐精彩. 煤炭低温自燃实验[J]. 陕西煤炭技术, 1989(4): 17-20.  
Ge Lingmei, Xu Jingcai. Experiment of spontaneous combustion of coal at low temperature[J]. Shaanxi Coal Technology, 1989(4): 17-20.
- [9] 陆伟, 王德明, 周福宝, 等. 绝热氧化法研究煤的自然特性[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 213-217.  
Lu Wei, Wang Deming, Zhou Fubao, et al. Study on spontaneous combustion of coal by adiabatic oxidation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(2): 213-217.
- [10] 刘剑, 王继仁, 孙宝铮. 煤的活化能理论研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24 (3): 317-320.  
Liu Jian, Wang Jiren, Sun Baozheng. A study on the theory of activation energy of coal[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (3): 317-320.
- [11] 张瑞新, 谢和平, 谢之康. 露天煤体自然发火的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3): 235-238.  
Zhang Ruixin, Xie Heping, Xie Zhikang. Experimental study on spontaneous combustion of ground coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 235-238
- [12] Wang Yongjun, Sasaki K, Sugai Y. Measurement of critical self-ignition temperatures of low rank coal piles[C]//Proceedings of the 2014 Coal Operators' Conference. New South Wales, Australia: The University of Wollongong Printery, 2014: 339-343.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Wang Fujun. Analysis of hydrokinetics: Theory and application of software[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [14] 俞昌铭. 多孔材料传热传质及数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
Yu Changming. Numerical analysis of heat and mass transfer for porous materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.

## Experiment and numerical simulation of lignite for spontaneous combustion

ZHANG Xiaoming<sup>1</sup>, ZHANG Hemeng<sup>2</sup>, WANG Zhuo<sup>3</sup>, WANG Yongjun<sup>3</sup>, SASAKI Kyuro<sup>4</sup>

1. Institute of Engineering and Environment, Liaoning Technical University, Huludao 125000, China
2. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China
3. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China
4. Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 8190395, Japan

**Abstract** This paper investigates the characteristics of lignite spontaneous combustion, with coal samples piled in cube mesh-boxes of three different sizes, placed in a constant temperature chamber and tested by the isothermal heating method. The temperature-time traces and the critical self-ignition temperature in different size coal piles are obtained. The critical self-ignition temperature is lower for larger stockpile volumes. The heating curves of coal will reach the ignition point when the set ambient air temperature is higher than the critical self-ignition temperature. On the other hand, the coal sample will not be self-ignited. Based on the conditions of the experiment, the temperature field, the air seepage field and the oxygen concentration field are simulated by the Fluent software. The three fields change with time and interact with each other in the entire experiment process.

**Keywords** spontaneous combustion; critical self-ignition temperature; numerical simulation; multi-field coupling (责任编辑 吴晓丽)