

# 高架仓库火灾烟气流动及易燃物质赋存方式转变的数值分析

鲍敬云<sup>1</sup>,张海茹<sup>2</sup>,范红途<sup>2</sup>,刘浩<sup>3</sup>,杨宏旻<sup>3</sup>

(1. 乐金显示(南京)有限公司环境与安全 Team,江苏 南京 210046)  
(2. 南京圣诺热管有限公司设计院,江苏 南京 210009)  
(3. 南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对高架仓库中易燃物资的着火特性,建立几何模型并应用涡团耗散模型对机械排烟条件下火灾烟气的速度、温度及燃烧反应物质的分布特性进行模拟. 结果表明:冷热气体的流动使仓库中心形成低速回流区,燃料储存罐体周围烟气流速较低,冷空气入口和烟气排出口速度较高;系统温度受进口风速、烟气流动和化学反应的影响呈现高度不均匀性,低温区主要在水平地面附近,高温主要在中心和排风扇出口的区域;燃烧反应物主要分布在储存罐体的周围,系统中心处生成物浓度分布较高,不利于火情扑救.

[关键词] 高架仓库,赋存方式,数值模拟  
[中图分类号]TK223 [文献标志码]A [文章编号]1672-1292(2013)01-0030-05

## Numerical Analysis of the Movement of Smoke and Transformation of Flammable Material in High Rack Warehouse Fire

Bao Jingyun<sup>1</sup>,Zhang Hairu<sup>2</sup>,Fan Hongtu<sup>2</sup>,Liu Hao<sup>3</sup>,Yang Hongmin<sup>3</sup>

(1. Safety and Security Team/Security Part, L.G. Display (Nanjing) Co., Ltd, Nanjing 210046, China)  
(2. Design Institute, Nanjing Shengnuo Heat Pipe Co. Ltd., Nanjing 210009, China)  
(3. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Aiming at the inflaming property of flammable materials in a high rack warehouse, a geometrical model was established. ED(Eddy Dissipation Model) mode is used to make simulation on the speed and temperature of fire smoke under mechanical ventilation, and on distribution character of combustion reaction. The results show that the behaviors about the cool and hot fluid make a Low speed reflux zone in the center of the warehouse. The smoke is low in flow rate around the fuel storage tanks, and is high in flow rate in the inlets of cold air and the exhausted gas outlet of the system. The temperature distribution is influenced by cool air, behavior of the flue gas and chemical reactions. The lower value is near the floor, while the higher zones are near the center of the warehouse and the outlet of the extractor fans. Combustion reactants are mainly distributed near the storage tanks, and the higher concentrations of the products including CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in the center lead to a disadvantage over the fire fighting.

**Key words:** high warehouse fire, occurrence pattern, numerical simulation

高架仓库具有空间利用率较高、投资少、建设快的特点,被广泛用于大宗物料的保管和储存<sup>[1]</sup>. 由于外界因素诸如可燃物资存储不善、充足的供氧条件以及较多的潜在火源等均增加了火灾发生的可能性<sup>[2]</sup>,此类火灾事件燃烧物资集中、火灾载荷大、阴燃时间长、初期不易被发现,燃烧产生的高温、有毒、有害烟气更具危害性<sup>[3]</sup>.

运用 CFD 软件进行火灾的数值模拟已经成为现实,很多学者对空间火灾的研究主要集中在早期发现和后期的扑救<sup>[4]</sup>,而与火灾燃烧生成物迁移规律相关的研究报道尚少. 本文利用 FLUENT 软件对某高架

收稿日期:2012-11-07.  
基金项目:国家自然科学基金(50976049)、江苏省自然科学基金(BK2011788).  
通讯联系人:杨宏旻,博士,教授,研究方向:燃烧污染物控制理论与技术研究. E-mail: yanghongmin@njnu.edu.cn

仓库进行火灾发展情况的模拟,探讨在机械排烟条件下火灾发生时仓库中的烟气流动状况、温度和燃烧产物浓度的分布规律,以期有利于合理储存可燃物质,减少经济损失,加强扑救人员对火情的认识。

# 1 研究对象

## 1.1 物理模型

某单位的高架仓库高度为 8 m,长度和宽度分别为 7 m 和 6 m,选取高层货架中部的物资作为研究的燃料,假定该着火物质的挥发分是  $C_{12}H_{29}$ ,存放位置如图 1 所示。忽略研究对象中其他不易燃物资及钢结构金属架,系统左侧为空气入口,燃烧产生的烟气由顶部开孔排出。

## 1.2 计算模型

火灾是一种复杂的三维非稳态湍流运动,易燃物质燃烧释出大量热量,同时伴随着化学反应进行。 $C_{12}H_{29}$  和空气分别作为燃料和氧化剂,以气相形式进入计算区域,其中,空气流速较低,可视为不可压缩流体;燃料燃烧采用非预混燃烧模型,选择  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟气相流动;辐射传热采用 P1 模型;组分的比热容与温度呈多项式关系。

## 1.3 化学反应模型

在湍流燃烧中,湍流流动过程和化学反应过程相互影响,常用的描述湍流燃烧中流动与化学反应之间关系的模型主要包括简单概率密度函数 PDF (Probability Density Function)、涡团耗散模型 ED (Eddy Dissipation Model) 和涡耗散概念模型 EDC (Eddy Dissipation Concept)<sup>[5]</sup>。

混合分数的概率密度函数 (PDF) 是通过平衡化学反应模型给出组分的质量分数、密度与温度都可以建立与混合分数唯一确定的关系<sup>[6]</sup>。混合分数在湍流中有强烈的脉动,可视为一个随机量。

ED 模型基于快速化学反应假设,可同时用于预混与非预混燃烧<sup>[7]</sup>。计算非预混燃烧时,燃烧速率取决于氧化剂涡与燃料涡在分子尺度上的混合速率,即涡的耗散率。计算预混燃烧时,燃烧速率由当地的火焰传播速度决定。燃烧速率最终由氧化剂涡、燃料涡及产物涡中耗散率最小的一个决定。涡耗散模型只能用于单步或是双步总包反应,避开了代价高昂的 Arrhenius 化学动力学计算<sup>[8]</sup>。

EDC 模型依赖于湍流结构假设,反应物的消耗由分子的混合程度决定。EDC 模型需要详细的化学反应动力学机理,其对模拟计算设备有比较高的要求。模型需要的化学反应动力学机理中基元反应动力学参数的匮乏,使得这方面的研究具有极大的难度。同时,使用的化学反应机理应该得到实验验证,并应用于类似工况下火灾烟气蔓延的研究<sup>[9]</sup>,以上要求加大了合适机理的构造难度。

PDF 模型避免了详尽的化学反应机理,但却会对物质分布预测存在较大误差,不利于分析  $CO_2$  浓度分布规律<sup>[10]</sup>。EDC 模型计算过程中,机理带来的刚性和时均值乘积计算反应速率产生的高阶误差使计算难以收敛,耗费大量的机时。ED 模型基于快速化学反应,在高温情况下,除了污染物与烟灰等的形成过程受控于有限反应速率外,一般碳氢燃料的反应速率都比混合速率快得多,这时快速反应假设便成立,同时认为系统达到了化学平衡状态<sup>[11]</sup>。综合考虑以上因素,本文采用涡耗散模型 (ED 模型) 模拟气相湍流与化学反应之间的相互作用,选择三维双精度求解器进行求解。初始化求解时,设置  $CO_2$  质量分数为 0.01 启动反应。

## 1.4 边界条件

模拟工况的边界条件为:

(1) 空气采用质量入口边界条件,质量流量为 4.2 kg/s;温度为 300 K;湍流强度为 10%;水力直径为 1.6 m;气体由质量分数为 0.23  $O_2$  和 0.77  $N_2$  组成。

(2) 为保持高架仓库通风通畅,在上部安装有机机械通风设备。出口采用排气扇面边界条件,回流气体为空气,温度为 300 K;湍流强度为 10%;水力直径为 1.6 m;排气扇的压力跳跃采用多项式形式。

(3) 燃料入口质量流量为 0.1 kg/s;温度为 300 K;湍流强度为 10%;水力直径为 2 m; $C_{12}H_{29}$  质量分

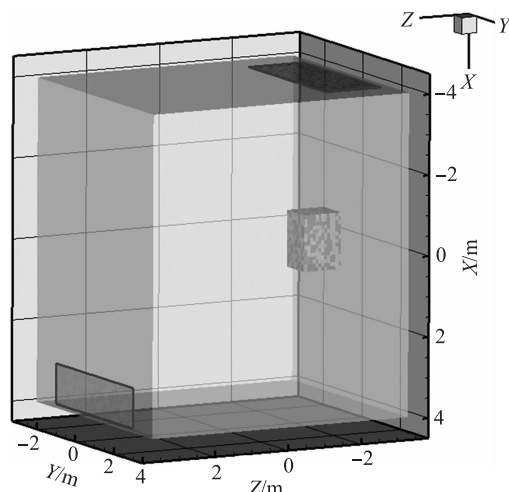


图 1 几何模型

Fig.1 Geometry model

数为 1;固体壁面设置为绝热且无速度滑移.

## 2 计算结果与分析

### 2.1 系统速度场分布特性研究

图 2 是系统截面的速度分布情况,(a)为  $X=0\text{ m}$ 、 $Y=0\text{ m}$ 、 $Z=0\text{ m}$  3 个截面上的速度分布图,系统速度的大小为  $0.2\sim 2.8\text{ m/s}$ . 空气入口和烟气排出口气流速度较高,速度最大值在出口区域,而低速度区域主要在仓库的中心和燃料储存罐体周围,烟气速度从系统边界到中心呈逐渐减少的趋势.(b)为  $Y=0\text{ m}$  截面上系统的流线图,空气以垂直于墙体的方向从仓库左侧进入系统,大部分空气流动方向与水平地面平行且保持流速较高,带动入口上方的空气逐渐向下移动. 空气流至右侧墙壁时,因侧面围护结构的阻碍改变流向向上方流动,并在燃料储存罐下方发生分流,一部分气流从左侧绕行且速度降低,部分与向下的气流混合向左下方运动,在中部形成低速回流区;另外一部分气流因贴附作用在燃料储存罐后侧绕行因排风扇的导除作用流向出口.

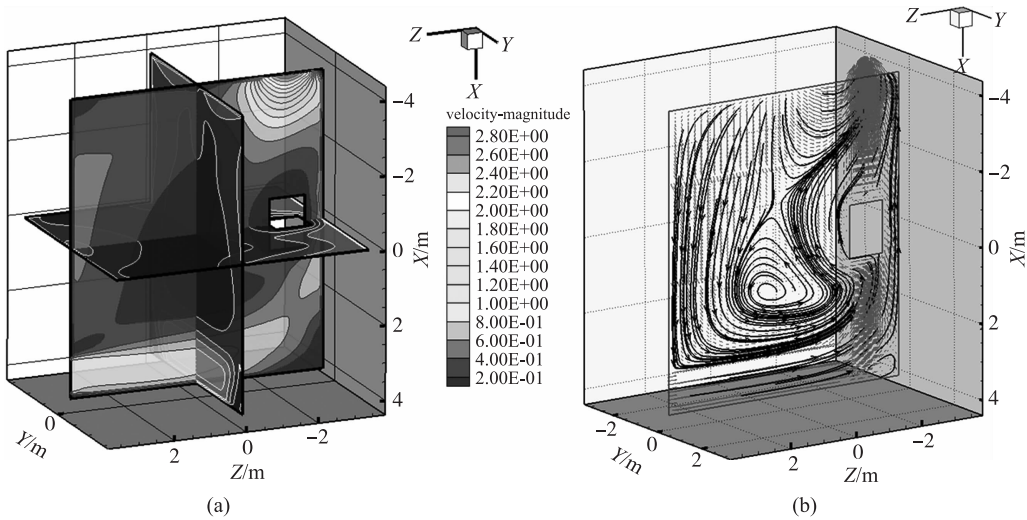


图 2 系统截面的速度示意图  
Fig. 2 Velocity distribution of sections of the system

当系统内易燃物质发生燃烧时,在室外冷空气和机械排风扇的双重作用下,室内气流运动情况不断发生变化. 同时,燃烧产生的大量化学反应热量使气流温度急速上升且逐渐向系统上部运动. 由  $Y=0\text{ m}$  截面所示的流场可知,在近进口处气流则以逆时针方向运动.

### 2.2 系统温度场分布特性研究

图 3 是  $X=0\text{ m}$ 、 $Y=0\text{ m}$ 、 $Z=0\text{ m}$  3 个截面的温度分布图. 由图可知  $X=0\text{ m}$  水平截面与  $Z=0\text{ m}$  垂直截面的温度分布具有对称性,低温区域主要在水平地面附近,在系统的中心区域和排风扇出口区域温度相对较高,温度的最大值在燃料储存罐周围. 由  $Y=0\text{ m}$  截面流线图可知气流在燃料储存罐前方形成低速回流区,该部分气流受到化学反应热量的影响温度迅速上升达  $1\,900\text{ K}$ . 同时,高温区域逐渐向入口方向扩大,

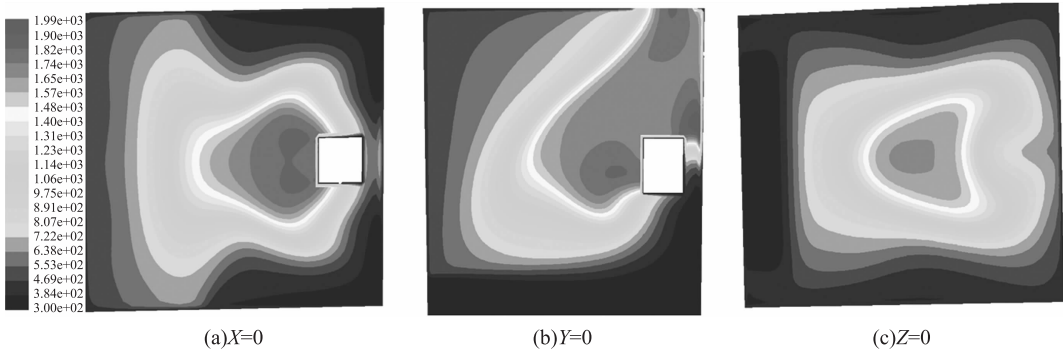


图 3 系统温度分布图  
Fig. 3 Temperature distribution of sections of the system2

机械排风设备将部分高温有毒气体导除至室外. 高架仓库围护结构、空气进气口、排风口的结构及燃料的存放位置相对  $X=0\text{ m}$ 、 $Z=0\text{ m}$  截面而言具有对称的空间几何结构. 易燃物质燃烧产生大量的热量使燃料储存罐周围气体温度升高,因此系统温度受进入室内的冷空气、烟气流动及化学反应的影响.

2.3 系统中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  浓度分布特性研究

系统中的  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  与空气中的氧气发生化学反应,生成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ ,图 4、图 5 是系统中  $X=0\text{ m}$ 、 $Y=0\text{ m}$ 、 $Z=0\text{ m}$  3 个截面的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  质量分数分布图. 图中显示仓库围护结构附近  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  浓度比较低,仓库中心的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  浓度较高.

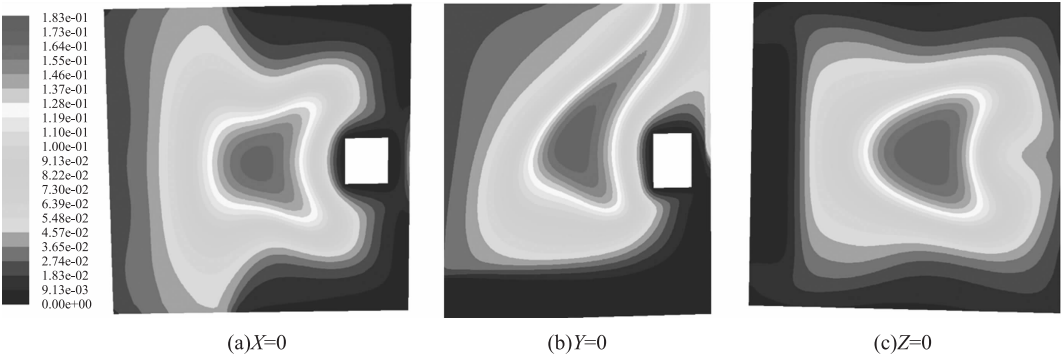


图 4  $\text{CO}_2$  质量分数分布图

Fig. 4 Mass fraction distribution of  $\text{CO}_2$  at different sections

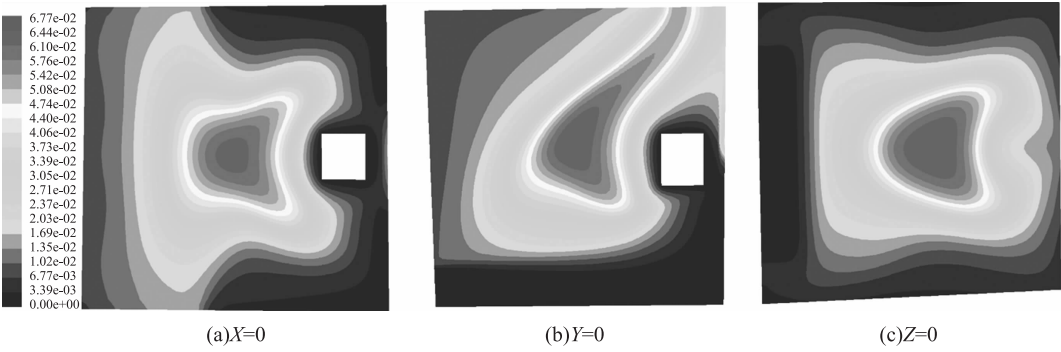


图 5  $\text{H}_2\text{O}$  质量分数分布图 Fig. 5 Mass fraction distribution of  $\text{H}_2\text{O}$  at different sections

对比系统速度示意图和温度分布图可知系统中心为低速、高温、高  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  浓度区域,这是因为系统中反应产物  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的浓度受冷热气流运动的影响,反应产物浓度分布图则与烟气的速度矢量图相似. 另一方面, $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  比热容均与系统温度成多项式关系,两种产物的浓度分布与温度分布具有相似的特点. 烟气中  $\text{CO}_2$  浓度较高的区域气流运动缓慢、温度较高、 $\text{CO}_2$  不易于扩散,即此区域的烟气特性不利于扑救人员的长期滞留,也不利于火情的扑救.

图 6 是  $X=0\text{ m}$ 、 $Y=0\text{ m}$  两个截面的  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  摩尔分数分布图. 由图可知,高架仓库内发生燃烧的易燃物质  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  摩尔分数浓度范围是  $0.5 \sim 0.85$ ,高浓度的  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  主要聚集在存储罐周围. 在  $X=0\text{ m}$  的水平截面上, $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  的摩尔分数浓度主要包括  $0.05$  的低浓度区和  $0.68$  的高浓度区,存在明显的浓度变化现象. 在  $Y=0\text{ m}$  的垂直截面上, $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  的摩尔分数自易燃物质的储存罐表面至周围的气体空间逐渐降低. 在储存罐附近,浓度分布曲线密集,而在较远的区域,浓度分布曲线较疏松.

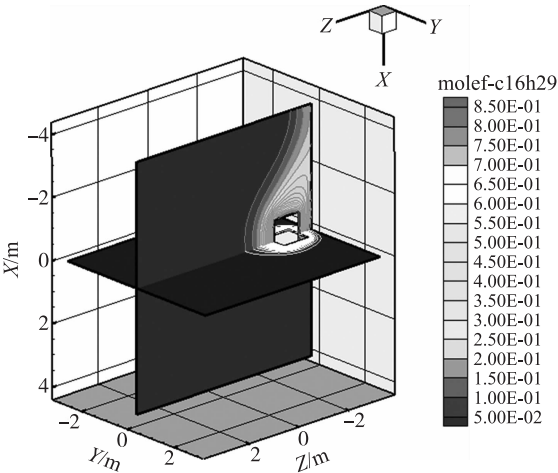


图 6  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  摩尔分数分布图

Fig. 6 Mole fraction distribution of  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  at different sections

反应物  $\text{C}_{12}\text{H}_{29}$  的浓度与其在空气中的扩散速率

有关,靠近反应物的区域,其浓度比较高.同时,在该区域发生了剧烈的氧化反应,生成大量反应热,周围气体温度急剧升高.系统中的  $C_{12}H_{29}$  在风压、热压的作用下从排风扇出口排出系统.

### 3 结论

在分析大空间高架仓库储存特性的基础上,用 FLUENT 软件对高架仓库中发生的火灾进行了模拟,分析了仓库内的温度、速度分布以及燃烧反应物、生成物的浓度分布,得出以下结论:

(1) 仓库中心存在低速回流区,燃料储存罐体周围烟气流速较低,冷空气入口和烟气排出口速度较高.

(2) 系统低温区主要在水平地面附近,在靠近中心和排风扇出口区域温度相对较高.系统温度受进口风速、烟气流动和化学反应的影响.

(3) 燃烧反应物主要集中于储存罐体周围,机械排风提高了易燃物质的排出,燃烧生成物在系统中心浓度较高,危及扑救人员的生命.

### [参考文献](References)

- [1] 司戈,理查德-格雷.高架仓库灭火技术展望[J].消防技术与产品信息,2012,25(1):75-78.  
Si Gee, Richard Gray. Extinguishing technology prospect of high rack warehouse fire[J]. Fire Technology and Products, 2012, 25(1):75-78. (in Chinese)
- [2] 赵伟刚,李玉峰.高架仓库的火灾危险性及预防对策[J].河南消防,1999,20(7):19.  
Zhao Weigang, Li Yufeng. Hazards and prevention countermeasures of high rack warehouse fire[J]. Henan Fire, 1999, 20(7):19. (in Chinese)
- [3] 蒋永清,刘芳,马德仲.高架仓库火灾烟气运动和控制数值模拟研究[J].中国安全科学学报,2010,20(2):35-40.  
Jiang Yongqing, Liu Fang, Ma Dezhong. Numerical simulation on the movement and control of smoke in large high rack warehouse fire[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(2):35-40. (in Chinese)
- [4] Chow W K. On smoke control for tunnels by longitudinal ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3):271-275.
- [5] 于勇,张俊明,姜连田. FLUENT 入门与进阶教程[M].北京:北京理工大学出版社,2008.  
Yu Yong, Zhang Junming, Jiang Liantian. Introductory and advanced course of FLUENT[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [6] Sivathanu Y R, Faeth G M. Generalized state relationships for scalar properties in non premixed hydrocarbon/air flames[J]. Combustion and Flame, 1990(82):211-230.
- [7] 温正,石良辰,任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M].北京:清华大学出版社,2009.  
Wen Zheng, Shi Liangchen, Ren Yiru. Course in Application of the Calculation for Fluids Using FLUENT[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [8] Magnussen B F, Hjertager B H. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion[C]//16th Symp. (Int'l) On Combustion. Pittsburg, Pennsylvania: The Combustion Institute, 1976.
- [9] 张海茹,王萌,吴昊,等.410 t/h 燃煤锅炉汞释放及赋存方式转变数值模拟[J].中国电机工程学报,2012,32(14):65-70.  
Zhang Hairu, Wang Meng, Wu Hao, et al. Numerical simulation on mercury emission and transformation of occurrence state in a 410 t/h coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14):65-70. (in Chinese)
- [10] 何悟,郑洪涛,蔡林,等.湍流燃烧模型在燃烧室数值计算中的对比分析[J].热科学与技术,2011(10):360-365.  
He Wu, Zheng Hongtao, Cai Lin, et al. Analysis of turbulent combustion models on numerical simulation of combustion chamber[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2011(10):360-365. (in Chinese)
- [11] 张海茹,王萌,吴昊,等.煤粉燃烧过程中汞反应子模型的比较研究[C]//燃烧学学术会议论文集.杭州:中国工程热物理学会,2011.  
Zhang Hairu, Wang Meng, Wu Hao, et al. Comparative study of mercury reaction model in the coal combustion process[C]//Combustion Science Symposium. Hangzhou: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2011. (in Chinese)

[责任编辑:刘健]