

文章编号: 1000-5013(2013)02-0126-04

大空间火灾的数值模拟

杜建华, 张认成, 丁环, 蒋少茵

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用 $k-\epsilon$ 湍流模型和 SAMPLE 迭代求解方法进行数值仿真,通过对模型温度、压力、边界条件等参数的设置,初步研究大空间内汽油燃烧火灾的气体生成物、残余物、环境温度分布等与汽油混合分数之间的关系. 仿真结果表明:在不同的汽油混合分数下,由于空间内的氧含量有限,使得燃烧的化学反应不同,相应的,各生产量、产生的热量和温度的分布也不同.

关键词: 大空间; 数值模拟; 火灾燃烧; 湍流模型

中图分类号: TH 47 **文献标志码:** A

近年来,会展中心、影剧院、体育馆等大空间建筑物越来越多. 大空间建筑没有任何阻挡物,温度、烟气极易迅速传播蔓延,使得火灾探测工作面临重大挑战^[1]. 随着计算流体力学(CFD)的发展,通过数值模拟实现火灾过程仿真是目前国内外火灾探测领域研究的热点之一. 本文以汽油燃烧为火灾产生原因,将气流动、热场耦合在一起,建立 1 个三维大空间燃烧模型. 通过模拟计算,分析汽油燃烧过程的温度、生成物、残余物的产生量和分布规律,研究各参数对汽油燃烧性能的影响.

1 火灾模型

图 1 为火灾数值模拟模型. 模拟大空间尺寸为 50 m×20 m×20 m(长×宽×高),侧壁装有 4 个直径 2 m 的排气扇. 以汽油为火灾源,呈液体雾状喷射进入该模拟三维空间,汽油与空气发生燃烧化学反应. 燃烧利用混合分数/PDF 方法模拟,采用平衡的混合化学组分. 汽油燃烧时产生的热量通过空间内壁和排气扇向外传播.

火灾模型的计算区域使用 GAMBIT 软件进行网格划分^[2]. 划分网格时采用结构网格中的四边形网格,在排气扇处进行局部加密处理,划分为 22 515 个网格. 图 2 为网格划分后的模型图.

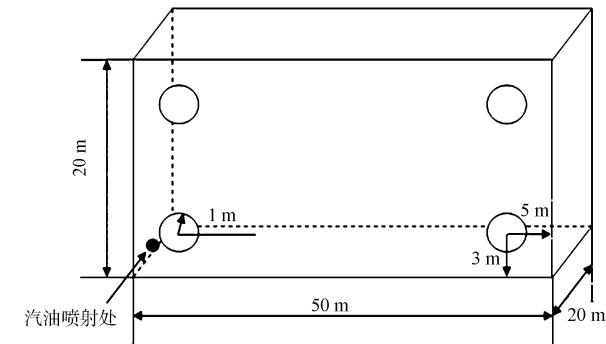


图 1 火灾数值模拟模型
Fig. 1 Numerical simulation model of fire

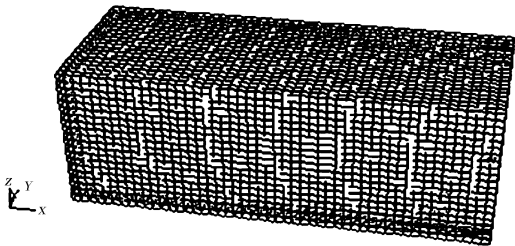


图 2 模型网格划分图
Fig. 2 Grid figure of fire model

2 边界条件与湍流模型

该燃烧室是 1 个非绝热系统,燃烧室的壁面会出现热传递,气体也会向汽油燃料传递热量,燃烧室壁面设为 WALL. 用于限制流体和固体区域,热通量值设为 1. 假设汽油喷雾由直径为 100 μm 的液滴组成,汽油燃料的质量流速度为 $0.004\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,与流动中燃料的消耗条件相一致. 流动为湍流,空气温度为 650 K,其周围环境的静压设为标准大气压 101 kPa.

湍流是空间中不规则和时间上无秩序的一种高度复杂的非线性的流体运动. 在湍流中,流体的各个物理参数随时间和空间的变化发生随机变化. 湍流模型依据湍流的理论知识、实验数据,对雷诺(Reynolds)应力做出各种假设,从而使湍流的平均 Reynolds 方程封闭^[3].

模拟采用 k - ϵ 湍流模型,主要通过 k 方程和 ϵ 方程(k 方程表示湍流脉动动能方程, ϵ 方程表示湍流耗散方程)确定湍流粘性系数,继而求解湍流应力. k 方程、 ϵ 方程和粘性系数方程^[4]分别为

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon, \\ \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \\ \eta_t &= c'_\mu \rho k^{1/2} l = (c'_\mu c_D) \rho k^2 \frac{1}{c_D k^{3/2} / l} c_\mu \rho k^2 / \epsilon, \\ c_\mu &= c'_\mu c_D c_\mu = c'_\mu c_D. \end{aligned}$$

其中: $c_1=1.44$; $c_2=1.92$; $c_\mu=0.09$;湍动能 k 与耗散率 ϵ 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$.

3 火灾仿真与结果分析

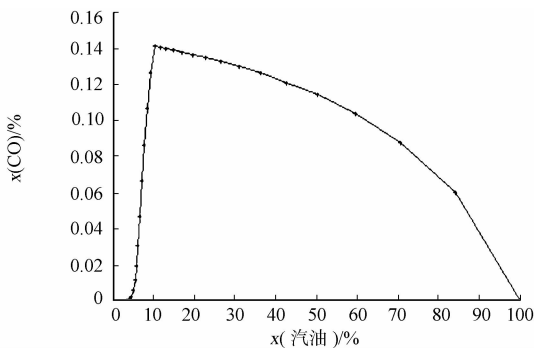
3.1 火灾流场计算

流场计算是在空间上用有限体积法将计算区域离散成许多小的体积单元,在每个体积单元上对离散后的控制方程进行求解. 一般情况下,离散方程不能直接用来求解,必须先进行调整,对未知量(压力、速度、温度等)的求解顺序及方式进行特殊的处理. 常用的数值计算方法是流场迭代求解法^[5-6].

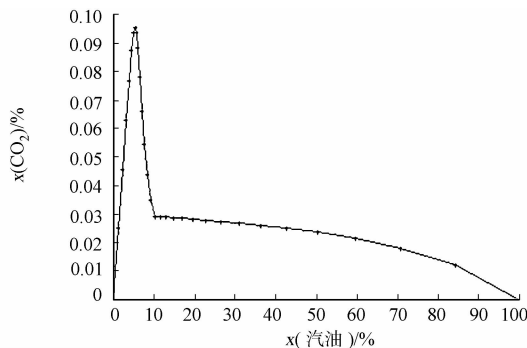
采用迭代求解方法中 SIMPLE 算法对速度场和压力场进行修正. 其基本思路是对给定的压力场,求解离散形式的动量方程,得出速度场. 因为压力场是假定或不精确的,得到的速度场一般不满足连续性方程,因此,必须对给定的压力场加以修正,从而得到压力修正值. 最后,根据修正后的压力场,求得新的速度场. 如此反复,直至得到速度场收敛.

3.2 仿真结果分析

火灾气体产物扩散广、传播快,能迅速被气体探头捕捉,是大空间火灾探测的主要参量. 图 3(a)~3(d)分别为 CO 、 CO_2 、 O_2 、庚烷(C_7H_{16})的摩尔分数与汽油平均混合分数关系曲线,图 3(e)~3(f)分别为火灾模拟系统的平均温度(t_{av})、平均密度(ρ_{av})与汽油平均混合分数关系曲线. 由图 3 可知:当汽油的平均混合分数小于 6% 时,燃烧室内的气体平均密度较小, O_2 量充足,燃烧后大量生成 CO_2 ,产生大量热量,温度升高,化学反应比较完全,汽油各成分的残余量较小;当汽油的平均混合分数为 6% 时,生成的



(a) CO



(b) CO₂

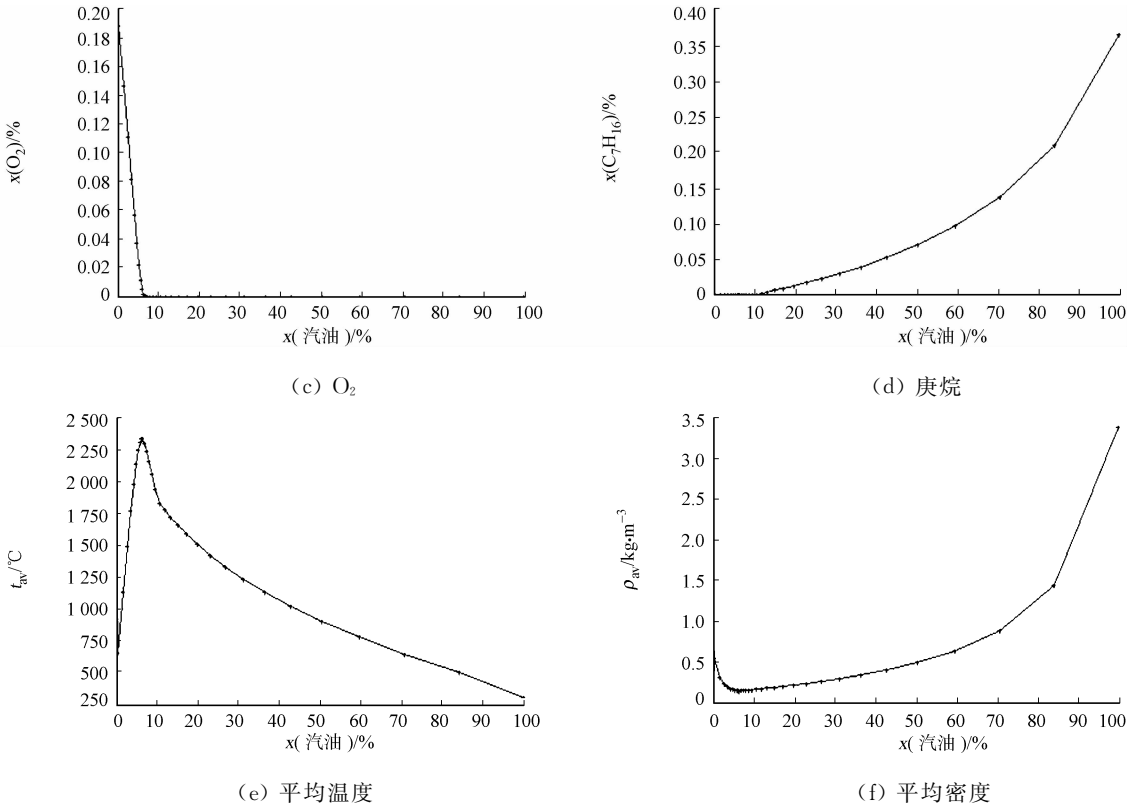


图 3 各因素与汽油平均混合分数关系曲线

Fig. 3 Curve of various factors and mean mixed fraction

CO_2 量最高, O_2 完全消耗至 0; 随着汽油的平均混合分数的增加, 当汽油的平均混合分数大于 6% 时, O_2 相对减少, 不完全燃烧反应不断增强, CO 生成量迅速增加, CO_2 生成量迅速减少, 即当平均混合分数较大时, 主要生成 CO , 化学反应不完全, 平均温度也随之开始下降; 当平均混合分数增加到 10% 时, 其表现形式以不完全燃烧反应为主, 汽油各成分的残余量庚烷逐渐增加, CO 生成量达到最大, CO_2 也形成一个相对最小生成量; 当平均混合分数继续提高时, 混合物中 O_2 的量逐渐减少, 生成的 CO , CO_2 的量也呈现缓慢减小的趋势, 燃烧反应后 O_2 均被完全消耗至 0。

3.3 后处理结果分析

通过后处理仿真, 进一步对燃烧系统的温度分布及各燃烧产物在大空间中的分布规律进行研究。图 4~6 分别为汽油模拟系统的静态温度分布图、庚烷的浓度分布图、燃烧各产物平均混合分数分布图。从图 4 可以看出: 化学反应完成后, 壁面的散热特性使壁面处温度最高, 射流喷射出化学反应最剧烈, 温度最高; 靠近排气扇处, 排气扇的动能使大量热量通过此处, 使该范围内温度较高。从图 5~6 可以看出: 在足够大的空间内, 没有其他障碍物时, 汽油燃烧后的各种残余物和生成物均匀分布在大空间内。

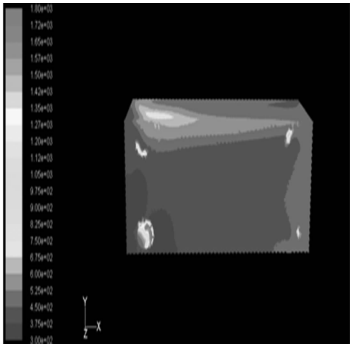


图 4 燃烧系统的温度分布图
Fig. 4 Temperature map of combustion system

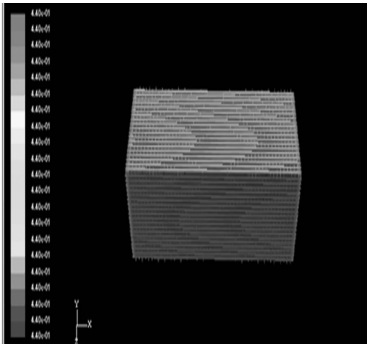


图 5 庚烷浓度分布图
Fig. 5 Concentration map of C_7H_{16}

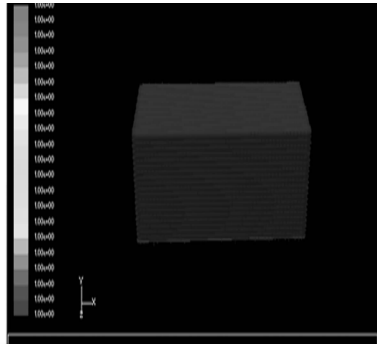


图 6 燃烧产物平均混合分布图
Fig. 6 Mean mixed distribution map of fire productions

4 结 论

- 1) 汽油的平均混合分数在 0%~6% 的范围内, O₂ 充足, 汽油燃烧生成大量的 CO₂, 化学反应完全, 产生大量的热量, 温度较高; 汽油的平均混合分数在 6%~10% 的范围内, 主要生成 CO, 相对 CO₂ 的生成量快速减少; 汽油的平均混合分数大于 10% 时, O₂ 不足, 燃烧反应不完全, 汽油的残余量增加, 平均温度开始下降, CO, CO₂ 的生成量开始减少.
- 2) 汽油燃烧反应完成后, 温度场的分布有一定的规律. 燃烧室壁面的散热特性使得壁面处温度最高; 空间内射流浓度越大处, 化学反应剧烈, 散热越多, 温度较高; 靠近排气扇处, 排气扇的动能卷走大量热量, 使得该处温度较高.
- 3) 在大空间内模拟汽油燃烧, 只要空间模型足够大, 且无障碍物, 燃烧反应后, 各组分扩散, 使得组分均匀分布在该空间内.
- 4) 汽油燃烧的数值模拟清楚地显示出汽油燃烧各生成物、残余物与汽油量的关系、温度和温度分布的关系、各组分浓度分布规律等. 这有利于大空间火灾的防火设计, 也有利于更加有效地防灾减灾.

参考文献:

[1] 杜建华, 张认成. LVQ 神经网络的红外光谱火灾早期预警算法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 607-610.

[2] 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: 22-26.

[3] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 2-11.

[4] 熊莉芳, 林源, 李世武. 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 工业加热, 2007, 36(4): 13-15.

[5] 朱建安, 高振周. 水力冲孔喷嘴流场的数值模拟分析[J]. 煤炭技术, 2010, 29(2): 165-169.

[6] 周章根, 马德毅. 基于 FLUENT 的高压喷嘴射流的数值模拟[J]. 机械制造与研究, 2010, 39(1): 61-63.

Numerical Simulation of Fires in Large Space

DU Jian-hua, ZHANG Ren-cheng, DING Huan, JIANG Shao-yin

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this paper, $k-\epsilon$ turbulence model and the SIMPLE iterative solution method is used for numerical simulation. By setting the parameters of model temperature, pressure and boundary conditions, the relationship between gas product, residue, environmental temperature distribution of the burning gasoline fire in large space and gasoline mixture fraction has been preliminarily studied. Simulation results show that in different gasoline mixing fraction, due to the oxygen content limitation within the space, the combustion chemical reaction is different. Accordingly, the production, heat generation and temperature distribution are also different.

Keywords: large space; numerical simulation; fire combustion; turbulence model

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 杨建红)