

# 基于湍流大涡算法的烟气扩散对人员逃生影响研究

张 志, 邓忠凯, 杨水亲, 骆秋良, 吴炜佳, 李超伟

(中国人民解放军 75714 部队, 湖南 衡阳 421900)

**摘要:**以气体流动控制方程为基础, 基于湍流大涡算法研究国防工程不同出口类型防火分区不同位置着火点发生火灾时烟气扩散规律, 分析走廊烟气特征参数分布和人员逃生时的火灾危险性。研究表明: 对于双向型出口, 走廊烟气和空气分布有明显热分层现象, 走廊能见度最好、温度最低; 单向型出口温度沿走廊呈衰减趋势, 在着火房间处走廊温度较高; CO<sub>2</sub> 浓度在各种出口类型下均能满足人员逃生要求; 全封闭型分区能见度低, 火场温度高, 火灾危险性最大。

**关键词:**湍流大涡算法; 火灾; 国防工程; 烟气扩散; 人员逃生

中图分类号: TU998.1

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.01.010

**引用格式:**张志, 邓忠凯, 杨水亲, 等. 基于湍流大涡算法的烟气扩散对人员逃生影响研究[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(1): 55-58, 73.

## Study on the influence of smoke diffusion on personnel evacuation based on turbulent large eddy algorithm

Zhang Zhi, Deng Zhongkai, Yang Shuiqin, Luo Qiuliang, Wu Weijia, Li Chaowei

(The 75714 Troops of the Chinese People's Liberation Army, Hengyang 421900, China)

**Abstract:** The smoke diffusion at different locations of fire exits in different export types in protective engineering fire is simulated based on the turbulence large eddy algorithm, which is based on air flow control equation in general, and the distribution of smoke characteristic parameters and the fire hazard during personnel escape is analyzed. The results shows that in the two-way export, there is significant thermal stratification in the flue gas and air distribution in the corridor with the best visibility and lowest temperature; For the one-way export, the temperature decays along the corridor, and the temperature is higher in the corridor near the fire room; CO<sub>2</sub> concentration can meet personnel escape requirements under various export types; In the fully enclosed fire compartment, visibility is low, fire temperature is high, and fire risk is greatest.

**Key words:** turbulent large eddy algorithm; fire; protective engineering; smoke diffusion; personnel evacuation

## 0 引言

国防工程作为我国军事工业的重要组成部分, 对其火灾安全的研究已经成为地下建筑安全研究的热点<sup>[1-4]</sup>。国防工程由于工程轴线长且密闭性好, 燃烧生成气体有毒、有爆炸危险且不易排除。因此研究国防工程火灾安全十分必要。

统计结果表明, 火灾中 85% 以上的死亡是由烟气引起的<sup>[5]</sup>。当火灾发生时, 对于不同出口类型防火分区, 在人员可用安全疏散时间 (Available Safe Egress Time, ASET) 内烟气特征参数 (温度、能见度和 CO<sub>2</sub> 浓度) 必须满足人员安全逃生的要求。本文在 Fire Dynamic Simulator 平台上, 以湍流大涡算法研究不同出口类型火灾烟气扩散对人员逃生的影

响, 为工程内部人员疏散及消防设计提供指导。

## 1 试验设计

### 1.1 数学模型

烟气的流动遵循能量质量守恒定律: 连续性方程、组分方程、动量方程、能量守恒方程和理想气体状态方程。

连续性方程:

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

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + m_i \quad (2)$$

动量方程:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u \\ & = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \end{aligned} \quad (4)$$

理想气体状态方程:

$$p_0 = \rho TR \sum \left( \frac{Y_i}{M_i} \right) = \frac{\rho RT}{W} \quad (5)$$

### 1.2 湍流大涡算法

湍流大涡算法采用了低马赫数下的三维可压缩 Navier-Stokes 方程,结合 Smgaorinsky 亚格子尺度模型对火灾热羽流驱动的烟气输运进行数值模拟<sup>[6]</sup>。Smgaorinsky 亚格子模型中,流体的导热系数和物质扩散系数可以表示为:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr_t}, (\rho D)_{i,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t} \quad (6)$$

其中:  $Sc_t$  为流体施密特数;  $Pr_t$  为湍流普朗特数;  $c_p$  为流体定压比热,单位为  $J/(kg \cdot K)$ 。

Smgaorinsky 亚格子模型对湍流粘性的考虑为:

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left( 2 \vec{S}_{ij} \vec{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

其中:  $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3}$ ;  $C_s$  为 Smgaorinsky 常数;  $\mu_{LES}$  为流体动力粘性系数,单位为  $Pa \cdot s$ 。

### 1.3 物理模型

防火分区是防火设计的基本单元。以某国防工程防火分区为研究对象,如图 1 所示,该防火分区由走廊和各功能房间组成,走廊长 50 m,高 3 m,宽 2 m,沿走廊两侧分布功能不同的办公房间,各房间门开启。走廊出口类型一般为单向型(走廊一端出口 A 敞开)和双向型(走廊两端出口 A 和 B 敞开),而在隔绝通风状态下,处于全封闭状态。

火源位置对火灾的蔓延发展、烟气的迁移过程、火灾探测及救援逃生有很大的影响。针对以上三种出口类型,如图 1 所示,考虑两种最不利火源位置:(1)位于中间房间,该房间长 9.9 m,宽 4 m,高 3 m,门高 2 m,宽 1.8 m;(2)位于侧端房间,该房间长 3.3 m,宽 4 m,高 3 m,门高 2 m,宽 0.9 m。火源选用欧洲标准火庚烷火<sup>[7]</sup>,模型为快速增长  $t^2$  火模型,

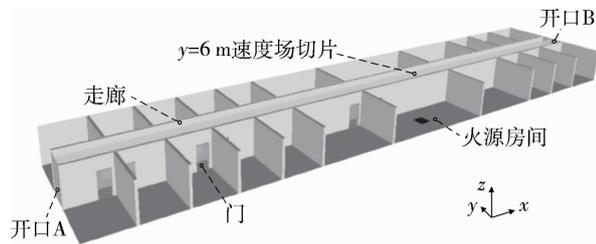


图 1 防火分区模型图

最大热释放速率为 6 MW<sup>[8]</sup>。取人眼特征高度处的烟气特征参数为研究对象,沿走廊中心( $x$  方向)每隔 5 m 布置一个测点。模拟工况设置如表 1 所示。

表 1 模拟工况表

序号	工况	出口类型	火源位置
1	A	双向型	中间
2	B		侧端
3	C	单向型	中间
4	D		侧端
5	E	全封闭	中间
6	F		侧端

### 1.4 网格独立性检验

在对火灾进行模拟过程中,对计算域进行划分的网格大小直接影响计算结果的准确性,甚至会影响最终结果的合理性。结合前人研究<sup>[9]</sup>,如果两个相邻网格尺寸之间得到的模拟结果没有显著差异,即可认为方程达到独立解,表明计算结果与网格密度无关。通过无量纲表达式  $D^*/\delta x$  给出流场解析程度度量。

其中,  $D^*$  为火源当量直径,单位为 m;  $\delta x$  是网格单元的标称大小。McGRATTAN K B 等<sup>[9]</sup>推荐  $D^*/\delta x$  的值应该在 4 ~ 16 范围内。计算结果如表 2 所示,网格划分越细越能更好地反映热流场,但相应模拟计算耗时也显著增加。

表 2 模型网格独立性检验参数表

工况	网格数量				网格数/格/m	计算耗时/h
	x	y	z	网格总数		
1	100	20	6	12 000	2	0.09
2	150	30	9	40 500	3	0.44
3	200	40	12	96 000	4	1.27
4	250	50	15	187 500	5	2.62
5	300	60	18	324 000	6	5.58

注:计算区域:50 m(x) × 10 m(y) × 3 m(z)

计算 0.12 ~ 0.49 m 之间 5 种网格尺寸在火灾时走廊中间温度分布,如图 2 所示。比较不同网格密度下测点 6 的温度变化可知,当网格尺寸划分较大时(2 格/m),走廊上层烟气层和下层冷空气层之间相互掺混较剧烈,测点 6 正处于掺混中心区,温度较低,此时模拟产生的误差较大。随着网格密度的增加,走廊中间温度分布趋于均匀,当网格密度为 4 ~ 6 时,计算结果差异较小,当网格数为 6 格/m 时,耗时显著增加。为获得更准确省时的模拟结果,选择 0.2 m 网格。

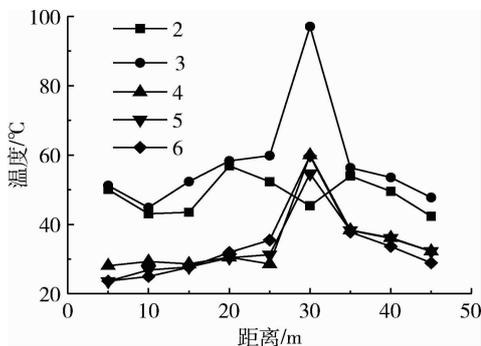


图2 走廊温度分布

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 不同出口类型能见度分布

图 3 为 ASET 时间走廊能见度分布。由图 3 可知,对于 E、F 两种工况(全封闭型走廊),由于火灾烟气在走廊聚集,烟气层下降,能见度降低,以能见度  $V=4$  m 为阈值,走廊能见度不能满足人员安全疏散要求。对于 C 工况,仅在着火房间左侧的能见度不能满足要求。对双向型出口,走廊能见度最好,靠近出口位置能见度为 30 m,但对于 A 工况靠近着火房间能见度较低。

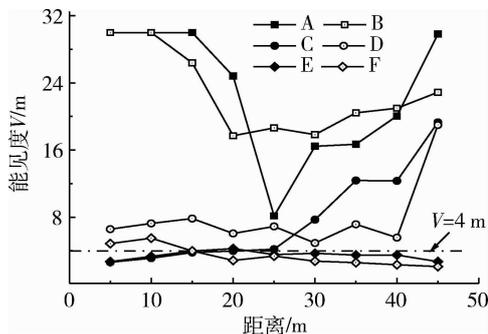


图3 ASET 时间走廊能见度分布

### 2.2 不同出口类型走廊温度分布

图 4 为 ASET 时间走廊温度分布云图,图中黑

线为  $T=60$  °C 温度阈值线。当火源位于中间时,由图 4(a)和(e)可知,着火房间两侧温度分布沿走廊均匀对称,越靠近着火房间温度越高。主要由于出口类型对称,烟气向两端径向对称蔓延,因此热量也对称分布。当出口不对称时,热量会在走廊一端聚集,就会出现温度一端高一端低的情况(如图 4(c)所示)。当火源位于侧端时,由图 4(b)、(d)和(f)可知,全封闭型走廊温度最高,主要由于烟气无法对外扩散,导致热量在走廊聚集,温度上升。60 °C 温度阈值线在双向型走廊高度最高,主要由于其热量通过两端出口向其他分区扩散,降低了该分区走廊温度。

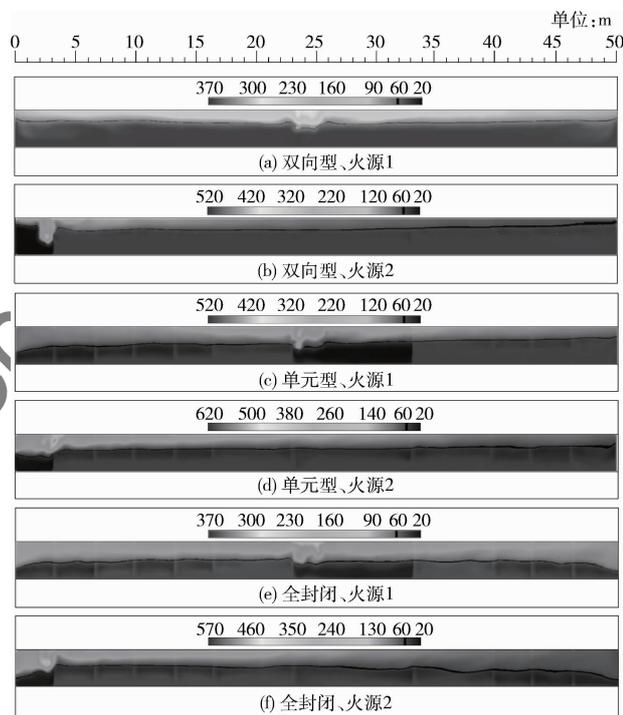


图4 ASET 时间走廊温度分布云图

图 5 为 ASET 时间走廊温度分布。由图可知,对于 E、F 两种工况,走廊各处温度均不能满足人员安全疏散要求;对于 C 工况,在着火房间左侧走廊温度不能满足要求。对于双向型出口,走廊温度最低,对于单向型出口,温度沿走廊呈衰减趋势,但在着火房间处走廊温度较高。当火源位于中间时,烟气温度在走廊中部有极值;当火源位于侧端时,对于 B 和 F 工况,温度沿走廊总体呈上升趋势,对于 D 工况,温度沿走廊分布呈下降趋势,靠近火源位置温度最高。

### 2.3 不同出口类型 CO<sub>2</sub> 浓度分布

图 6 为 ASET 时间 CO<sub>2</sub> 浓度沿走廊分布。由图

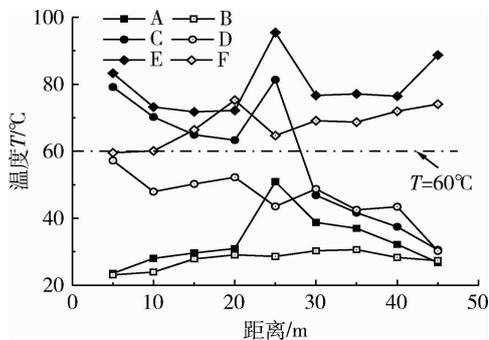


图5 ASET时间走廊温度分布

可知,对于双向型出口,走廊 CO<sub>2</sub> 浓度低于 0.5%,对于 A 工况,靠近着火房间 CO<sub>2</sub> 浓度出现跃升。对于单向型出口,C 工况下 CO<sub>2</sub> 沿走廊呈下降趋势,在着火房间左侧走廊浓度较高。D 工况下 CO<sub>2</sub> 沿走廊分布较为均匀,靠近出口位置浓度较低。对于全封闭型出口,CO<sub>2</sub> 平均浓度最高。在 ASET 时间内 CO<sub>2</sub> 浓度在各出口类型下均满足人员逃生要求,主要有两个方面原因:一是因为防火分区面积较大;二是 CO<sub>2</sub> 扩散时间为各工况下 ASET 时间,扩散时间较短。

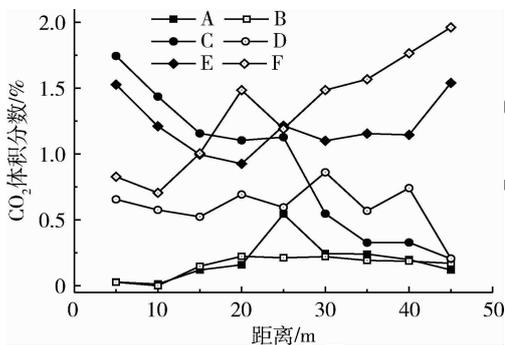


图6 ASET时间走廊 CO<sub>2</sub> 浓度分布

### 2.4 不同出口类型火灾危险性分析

表 3 给出了不同工况下出口烟气特征参数值。由表可知,对于 A、B、C、D 四种工况,靠近出口处烟气特征参数在 ASET 时间内均小于人员逃生阈值,而对于 E 和 F 两种工况,除 CO<sub>2</sub> 浓度低于阈值,温度和能见度不能满足人员安全逃生要求,因此,全封闭型分区火灾危险性最高。

### 3 结论

基于湍流大涡算法对国防工程不同防火分区出口类型火灾危险性进行数值模拟研究,同时考虑不同着火位置对烟气扩散影响,分析了 ASET 时间走廊烟气特征参数分布并讨论其危险性,研究表明:

表 3 不同开口类型火灾危险性

工况	ASET/s	温度 /°C	能见度 /m	CO <sub>2</sub> 体积分数/%	安全逃生
A	220	26.8	29.8	0.12	是
B	220	27.3	22.9	0.17	是
C	255	30.6	19.3	0.20	是
D	255	30.2	19.0	0.21	是
E	255	88.7	2.7	1.54	否
F	255	74.1	2.1	1.96	否

(1)对于双向型出口,走廊烟气和空气分布有明显热分层现象,走廊能见度最好、温度最低;单向型出口温度沿走廊呈衰减趋势,在着火房间处走廊温度较高。

(2)CO<sub>2</sub> 浓度在各种出口类型下均能满足人员逃生要求。

(3)全封闭型分区能见度低,火场温度高,火灾危险性最大。

### 参考文献

- [1] 茅靳丰, 邓忠凯, 周进, 等. 水帘柜对地下工程火灾的排烟降温性能分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2017(2):184-189.
- [2] 邓忠凯, 茅靳丰, 周进. 基于湍流大涡算法的防护工程火灾烟气扩散仿真研究[J]. 微型机与应用, 2017, 36(17):12-14.
- [3] DENG Z, MAO J, XING Z, et al. Experimental study on the early stage of upward flame spread with cross air flow [J]. Thermal Science, 2017, 22:200-200.
- [4] ZHELI X, JINFENG M, YULIANG H, et al. Scaled experimental study on maximum smoke temperature along corridors subject to room fires[J]. Sustainability, 2015, 7(8):11190-11212.
- [5] 张颜青. 淮海地下商城火灾烟气控制技术[D]. 淮南:安徽理工大学, 2015.
- [6] 方廷勇, 章涛林, 夏良, 等. 建筑火灾烟气迁移特性研究及排烟设计[J]. 消防科学与技术, 2008(11):16-20.
- [7] 许彬, 张永明, 方俊, 等. 正庚烷热释放速率测量与研究[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(3):304-307.
- [8] 公安部上海消防研究所, 上海市消防局. 建筑防排烟技术规程:DGJ 08-88-2006 J10035-2006[S]. 上海:上海市新闻出版局, 2006: 12-15.
- [9] MCGRATTAN K B, HOSTIKKA S, FLOYD J E. Fire dynamics simulator (version 5) user's guide[Z]. National Institute of Standards and Technology, 2010.

(收稿日期:2019-10-28)

(下转第 73 页)

GCAE 模型和本文模型分别在测试集和 Hard 数据集上对基于方面的情感极性预测的准确率如表 1 所示。

表 1 GCAE 模型和本文模型分别在测试集和 Hard 数据集上准确率对比 (%)

模型	餐厅数据集	
	测试集	Hard 数据集
GCAE	78	53
本文模型	77	55

#### 4 结论

本文提出了一种融合位置信息的卷积门控网络模型实现基于方面的情感分析,模型通过两个卷积层融合位置信息将方面特征和情感特征更加准确和快速地输出并预测情感的极性。近几年基于评论的推荐系统应运而生,由于评论<sup>[9]</sup>包含了用户对于产品的描述和情感倾向,能直接反映用户特征和产品特征,可以帮助人们更好地建模用户和商品,从而实现更准确的推荐。研究发现评分的高低与评论者真实的情感不一,因此如何将评论文本情感趋向与推荐系统有效地结合<sup>[10]</sup>以提供更精准的推荐将是未来的研究方向。

#### 参考文献

- [1] 刘全,梁斌,徐进,等.一种用于基于方面情感分析的深度分层网络模型[J].计算机学报,2017,41(12):2637-2652.
- [2] DONG L, WEI F R, TAN C Q, et al. Adaptive recursive neural network for target-dependent twitter sentiment classification[C]. Proceedings of the 52nd Annual Meeting of Association for Computational Linguistics, 2014:49-54.
- [3] TANG D Y, QIN B, LIU T. Document modeling with gated recurrent neural network for sentiment classification[C]. Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods

in Natural Language Processing, 2015:1422-1432.

- [4] TAI K S, SOCHER R, MANNING C D. Improved semantic representations from tree-structured long-term memory network[C]. Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7rd International Joint Conference on Natural Language Processing, Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics, 2015:1556-1566.
- [5] WANG Y Q, HUANG M L, ZHAO L. Attention-based LSTM for aspect-level sentiment classification[C]. Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2016:606-615.
- [6] 武婷,曹春萍.融合位置权重的基于注意力交叉注意力的长短期记忆方面情感分析模型[J].计算机应用,2019,39(8):2198-2203.
- [7] XUE W, LI T. Aspect based sentiment analysis with gated convolutional networks[C]. Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2018.
- [8] 袁丁,章剑林,吴广建.基于方面级的餐厅用户评论细粒度情感分析[J].软件,2019,40(8):181-189.
- [9] CHEN C, ZHANG M, LIU Y, et al. Neural attentional rating regression with review-level expression[C]. Proceedings of the 2018 WorldWide Web Conference on World Wide Web, 2018:1583-1592.
- [10] HE X N, CHEN T, KAN M Y, et al. Trirank: review-aware explainable recommendation by modeling aspects [C]. Proceedings of the 24th ACM International Conference on Information and Knowledge Mangement, 2015:1661-1670.

(收稿日期:2019-11-07)

#### 作者简介:

时昭丽(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:自然语言处理。

范红(1976-),通信作者,女,博士,副教授,主要研究方向:多媒体通信与图像处理。E-mail:dhufanhong@dhu.edu。

(上接第 58 页)

#### 作者简介:

张志(1983-),男,学士,助理工程师,主要研究方向:国防工程与防护。

邓忠凯(1991-),通信作者,男,硕士,助理工程师,主要研究方向:烟气扩散,人员疏散仿真。E-mail:dzhongkai@163.com。

杨水亲(1986-),男,学士,助理工程师,主要研究方向:通信工程。

# 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所