



邵琳,姜昱辰,杨金溢,等. 顶部构筑物对狭长空间烟气蔓延阻滞机理研究[J]. 轻工学报,2021,36(1):95-101.

SHAO L.,JIANG Y C.,YANG J Y.,et al. The retarding mechanism research on smoke movement of top structures in long-narrow space[J]. Journal of Light Industry,2021,36(1):95-101. DOI:10.12187/2021.01.012

中图分类号:X932 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)01-0095-07

# 顶部构筑物对狭长空间烟气蔓延阻滞机理研究

## The retarding mechanism research on smoke movement of top structures in long-narrow space

邵琳,姜昱辰,杨金溢,李志涌,蔡永壮,吴则琪

SHAO Lin,JIANG Yuchen,YANG Jinyi,LI Zhiyong,CAI Yongzhuang,WU Zeqi

郑州轻工业大学 建筑环境工程学院,河南 郑州 450001

College of Building Environment Engineering,Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450001,China

### 关键词:

挡烟垂壁;烟气运移;  
数值模拟;空气卷吸

### Key words:

smoke barrier;  
smoke movement;  
numerical simulation;  
air entrainment

**摘要:**为研究火灾产生的烟气越过多个挡烟垂壁等顶部构筑物后的流动规律,采用FSD数值模拟方法,对比狭长空间模型中无挡烟垂壁、单挡烟垂壁和多挡烟垂壁情况下的烟气蔓延情况,并对烟气运移的速度场分布、不同区段流量的变化进行研究.结果表明:在无挡烟垂壁和分别设置1个、2个、4个挡烟垂壁的情况下,烟气到达狭长空间末端的时间分别为15.9 s、17.1 s、18.8 s和25.5 s;挡烟垂壁阻滞烟气蔓延的原因是,挡烟垂壁等构筑物可以减小烟气层与下部空气层的相对流动速度,减少烟气对空气的卷吸,降低烟气生成量;多挡烟垂壁对烟气的阻滞效果优于单挡烟垂壁,烟气蔓延速度更慢.

收稿日期:2019-12-10;修回日期:2020-09-03

基金项目:河南省科技攻关计划资助项目(192102310252);郑州轻工业大学博士科研基金资助项目(13501050010)

作者简介:邵琳(1988—),女,贵州省盘县人,郑州轻工业大学助理实验师,硕士,主要研究方向为安全评价、建筑防排烟等.

通信作者:吴则琪(1988—),男,河北省磁县人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为建筑防排烟.

**Abstract:** In order to study the flow law of smoke generated by fire after passing through several top structures such as smoke barriers, FSD numerical simulation method was used to compare the smoke spreading situation of the long-narrow space model in the case of no smoke barrier, single smoke barrier and multi smoke barrier. The velocity field distribution of smoke migration and the flow rate change in different sections were studied. The results showed that the time for smoke to reach the end of the long-narrow space were 15.9 s, 17.1 s, 18.8 s and 25.5 s, respectively, in the case of no smoke barrier and 1, 2 and 4 smoke barriers. The reason why smoke barriers retarded the smoke spreading was that the top structures such as smoke barriers could reduce the relative flow velocity of smoke layer and lower air layer, which reduced the entrainment of air and the amount of flue gas generated; the retarding effect of multi smoke barrier was better than that of single barrier, and the smoke spreading speed was slower.

## 0 引言

随着我国城市建设步伐的加快,在城市建筑中长度远大于高度和宽度的狭长空间大量出现,如地铁隧道、地下商业街、公路隧道等。这种狭长空间内部一旦发生火灾,烟气极易扩散,难以控制<sup>[1]</sup>。现代建筑中的狭长空间往往设置有横梁、挡烟垂壁等顶部构筑物,这些顶部构筑物可以作为防排烟系统中防烟分区的分隔,将烟气限制在一定范围内。《建筑防火规范》<sup>[2]</sup>规定,长度 > 20 m 的内走道需要设置排烟设施,并在该区域划分防烟分区,防烟分区间的分隔物往往采用挡烟垂壁。行业标准 GA533—2012<sup>[3]</sup>中对挡烟垂壁的定义为:用不燃材料制成,垂直安装在建筑顶棚、横梁或吊顶下,能在火灾发生时形成一定蓄烟空间的挡烟分隔设施。挡烟垂壁在建筑物中的作用一般是阻断烟气运移,将烟气限制在一定区域内。然而,当火势太猛或烟气生成速度较快时,烟气可能越过挡烟垂壁继续向其他区域蔓延,这时,挡烟垂壁就失去了限制烟气范围的作用<sup>[4]</sup>。J. Huang等<sup>[5]</sup>研究了挡烟垂壁高度与越过挡烟垂壁后烟气层气体流量、厚度、温度等参数的关系,结果表明,随着挡烟垂壁高度的增加,空气的卷吸量和烟气层的厚度减少,烟气的温度升高。王欢等<sup>[6]</sup>研究发现,挡烟垂壁可以减少空气卷吸量、降低烟气流速。这些研究结果表明,烟气越过挡

烟垂壁后,挡烟垂壁能够持续影响烟气的流动,主要表现为对烟气运移的阻滞作用,但对其作用机理的研究还不够深入。

烟气主要是由燃烧生成物、未燃物质和卷吸空气组成的混合物。一般认为,烟气的生成量与燃烧物及燃烧状态有关<sup>[7]</sup>。挡烟垂壁的存在难以对火灾的燃烧状态造成影响,但却能阻滞烟气的流动速度<sup>[6]</sup>。烟气流动速度的减缓可能会降低空气卷吸量,从而降低烟气生成量,进而促使烟气流量下降。因此,如果挡烟垂壁可以降低烟气生成量,则很有可能是其影响了空气卷吸量。

目前大多学者认同烟气在狭长空间的运移一般分为4个阶段<sup>[8-12]</sup>:羽流上升阶段;径向蔓延阶段(烟气接触顶棚后开始向四周蔓延);由径向蔓延转为轴向蔓延的过渡阶段(两侧的烟气接触墙壁后发生反射,径向流动逐渐被限制);稳定一维流动阶段。在这4个阶段中,烟气对冷空气均会发生不同程度的卷吸<sup>[11-14]</sup>。纪杰等<sup>[15]</sup>通过实验证明,第二阶段和第三阶段的空气卷吸量不容忽视,大约为第一阶段空气卷吸量的15%。此外,还有研究表明<sup>[16]</sup>,烟气蔓延的第三阶段存在类似水跃现象的密度跳跃现象,且该现象受下风侧顶棚状态的影响。密度跳跃阶段分为卷吸区和翻滚区,其中卷吸区是发生空气卷吸的主要区域,而挡烟垂壁会缩短卷吸区的长度<sup>[6]</sup>。

目前研究多集中于单个挡烟垂壁或顶部构

筑物,较少涉及利用挡烟垂壁等顶部构筑物的阻滞作用减缓烟气蔓延的探索.鉴于此,本文拟通过对设置多个挡烟垂壁的走廊中烟气流动规律进行研究,初步揭示多个挡烟垂壁对烟气的阻滞机理,以期为限制狭长空间烟气蔓延提供理论依据.

## 1 数值模拟方案

本文应用火灾动力学模拟软件(Fires Dynamics Simulator, FDS)对狭长空间烟气运移情况进行数值模拟. FDS 软件是一种以火灾中流体运动为主要模拟对象的计算流体动力学的软件.建立的狭长通道 FDS 模型如图 1 所示,其中狭长通道长 30 m,宽 2 m,高 3 m.通道两端设置为 open 边界状态,未设置机械或自然通风,起火前空气静止.火源位于距左端出口 2 m 处,为 1 m × 1 m 的正方形,功率为 1.6 MW<sup>[17]</sup>.挡烟垂壁高度为 0.5 m,分别设置无挡烟垂壁、1 个(20 m 处)、2 个(10 m、20 m 处)和 4 个(5 m、10 m、15 m、20 m 处)挡烟垂壁进行 4 组模拟.网格尺寸为 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m,网格范围略大于狭长通道模型.

模型在轴向长度上每隔 1 m 设置 1 个流量监测面,用于监测不同区段空气卷吸量的变化;在 15 m 和 25 m 处分别设置一串垂向速度监测点,监测垂直方向风速的变化,监测点间距 0.1 m.此外,模型沿狭长通道中轴线设置切片,用于观测烟气流动的状态.

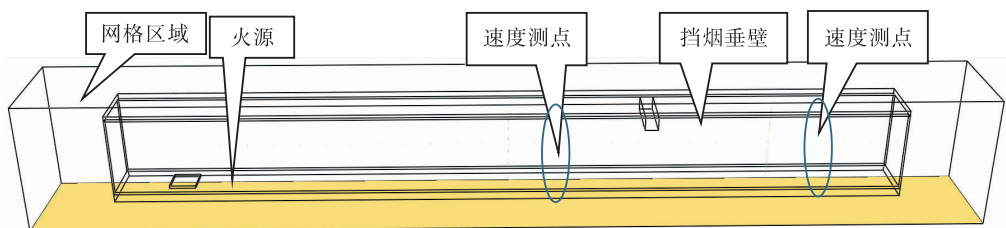


图 1 狭长通道 FDS 模型

Fig. 1 FDS model of long-narrow space

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 烟气蔓延时间对比

为了研究挡烟垂壁在狭长通道烟气运移过程中的阻滞作用,测试无挡烟垂壁和分别设置 1 个、2 个、4 个挡烟垂壁情况下烟气到达 30 m 处(即右端出口)的时间,并对 4 种情况下烟气前锋到达右端出口时狭长通道的烟气状态进行对比,结果如图 2 所示.

4 种情况下烟气从右端出口溢出的时间测试结果分别为 15.9 s、17.1 s、18.8 s 和 25.5 s.由图 2 可以看出,在设置挡烟垂壁的情况下,烟气须先填满挡烟垂壁左侧区域才能越过挡烟垂壁继续向右蔓延,因此安装挡烟垂壁会延长烟气前锋到达右端出口的时间,这与上述溢出时间的测试结果相符;安装挡烟垂壁的情况下,烟气填满的区域是相同的,但烟气前锋到达右端出口的时间不同,说明烟气越过挡烟垂壁后,挡烟垂壁对烟气流动仍有阻滞作用,且多挡烟垂壁对烟气运移的阻滞作用更明显,可为人员逃生赢得宝贵时间.

### 2.2 垂向速度分布分析

为了分析挡烟垂壁对其前后烟气运移速度的影响规律,对无挡烟垂壁和分别设置 1 个、2 个挡烟垂壁的情况进行分析研究.由于只对有无挡烟垂壁的情况进行比较,所以暂未考虑 4 个挡烟垂壁的情况.分别对 20 m 处的挡烟垂壁前后 5 m 处的烟气速度垂向分布进行分析,



图2 烟气前锋到达右端出口时狭长通道的烟气状态对比

Fig. 2 Comparison of flue gas state in narrow channel when the front of flue gas reaches the right exit

结果如图3所示. 由图3可以看出, 1个挡烟垂壁的情况下, 烟气在挡烟垂壁左侧和右侧的轴向速度有所不同, 挡烟垂壁左侧的烟气运移速度明显小于右侧; 对比无挡烟垂壁和1个挡烟垂壁的情况, 挡烟垂壁左侧烟气的运移速度小于无挡烟垂壁的情况, 挡烟垂壁右侧的烟气运移速度与无挡烟垂壁时相当, 说明挡烟垂壁主要对上风侧烟气流动产生作用, 这与王欢等<sup>[6]</sup>的研究结果一致; 对比1个和2个挡烟垂壁的情况, 两处监测点的速度变化不大, 可见距左端出口10 m处的挡烟垂壁对下游烟气流动速度也没有明显影响.

烟气流动速度云图(距左端出口2~7 m)如图4所示. 由图4可以看出, 烟气蔓延第三阶段中垂直速度变化有差异, 在无挡烟垂壁的情况下, 烟气层与下部冷空气流速差异较大, 云图中界限明显; 随着挡烟垂壁数量的增多, 烟气层与下部冷空气流速差异逐渐减小, 说明烟气层和冷空气的流速差异随挡烟垂壁的增多而减小.

### 2.3 不同截面烟气流量对比

实际上, 烟气的运移速度与卷吸量相关. 烟气的卷吸是气体的黏滞力导致的气体动量传递现象<sup>[18]</sup>, 根据牛顿内摩擦定律, 烟气层与下部冷空气交界面处的速度梯度(速度差)与卷吸速率成正比. 因此, 挡烟垂壁左侧烟气流速的降低将会影响空气的卷吸量, 进而造成烟气流量的降低. 观察各截面烟气流量的对比图(见图5)可以发现, 在2.5~5.0 m范围内的烟气流量随挡烟垂壁的增多而减少, 烟气的最终流量也随挡烟垂壁的增多而减少. 可见在火源附近的烟气与下部冷空气流速差异随挡烟垂壁数量的增加而减小, 造成了空气卷吸量减少, 这是挡烟垂壁对烟气运移产生阻滞作用的一个重要原因.

### 2.4 多挡烟垂壁情形下烟气流动状态分析

为进一步分析多个挡烟垂壁可以降低烟气蔓延速度的原因, 对多挡烟垂壁情况下烟气运移的速度进行分析, 结果如图6所示. 由图6可以发现, 烟气在越过每个挡烟垂壁时, 都会造成

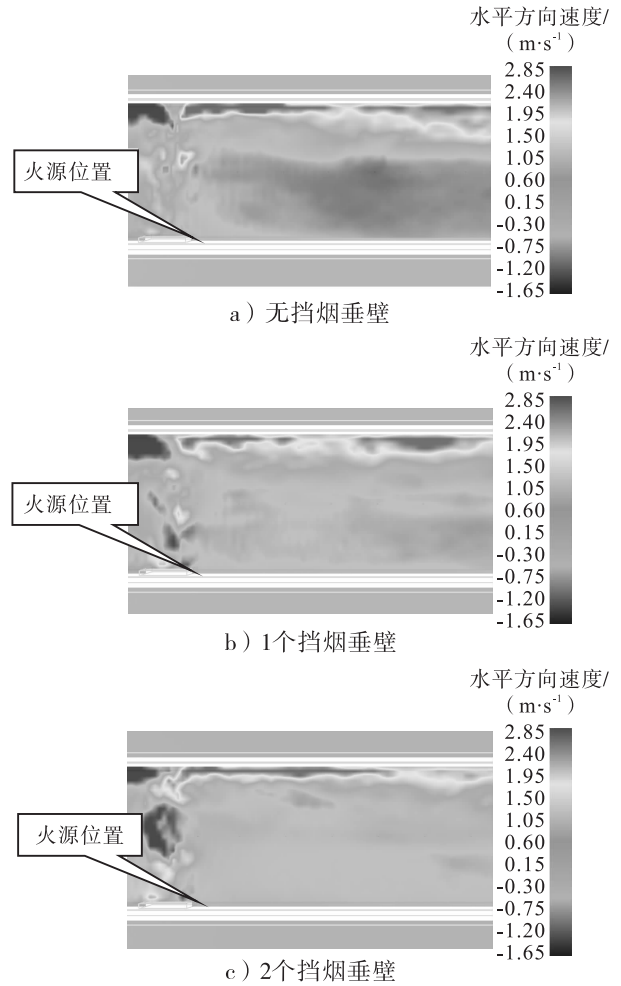
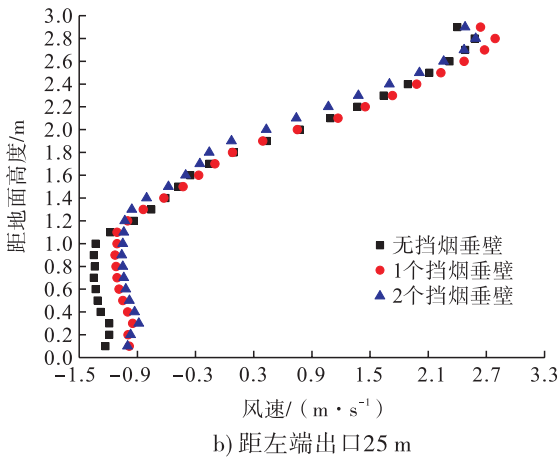
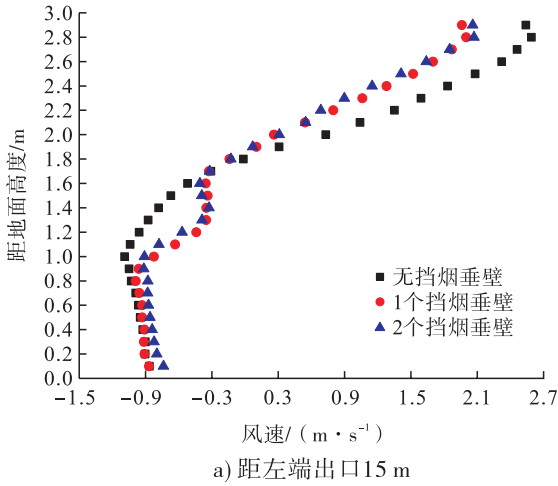


图3 挡烟垂壁前后5 m处的烟气速度垂向分布图  
Fig.3 Vertical distribution diagram of flue gas velocity 5 m before and after smoke barriers

图4 烟气流动速度云图(距左端出口2~7 m)  
Fig.4 Cloud chart of flue gas flow velocity (2~7 m away from left end outlet)

在挡烟垂壁处的烟气层明显下降,可见烟气越过挡烟垂壁所经过的路线要比直接通过长.此外,由于烟气绕过挡烟垂壁进入减速增压区后,会出现附面层脱离现象,形成涡旋,而烟气气流的涡旋又会消耗烟气的能量.基于这两个原因,挡烟垂壁上游的烟气流动速度会下降,进而使空气卷吸量和烟气流量下降,烟气到达右端所用时间增长.

### 3 结语

本文对无挡烟垂壁和分别设置1个、2个、4个挡烟垂壁情况下狭长空间烟气运移情况进

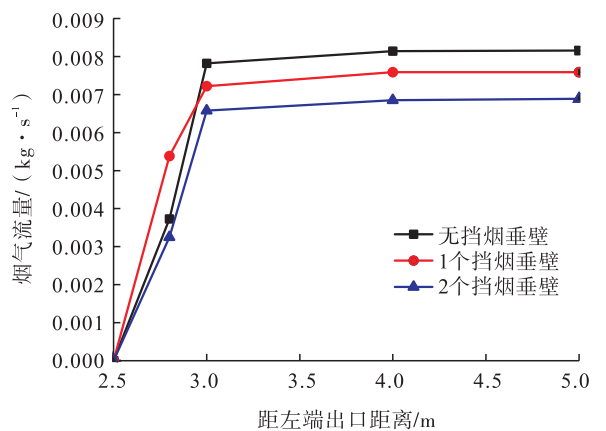


图5 各截面烟气流量对比图  
Fig.5 Comparison diagram of flue gas flow in each section

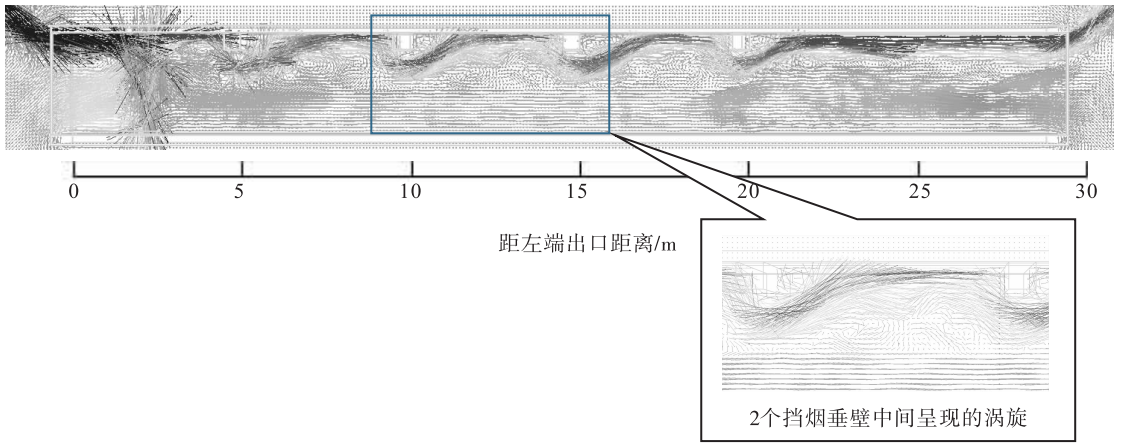


图6 多挡烟垂壁狭长空间烟气运移速度矢量图

Fig. 6 Vector diagram of smoke movement velocity in long-narrow space with several smoke barriers

行了 FSD 数值模拟,4 种情况下烟气前锋到达狭长通道模型右端出口的时间分别为 15.9 s、17.1 s、18.8 s 和 25.5 s。对挡烟垂壁前后垂向速度分布、烟气分层流动云图的分析表明,在狭长空间中,挡烟垂壁不仅有蓄烟作用,还能对烟气越过挡烟垂壁后的运移继续产生阻滞作用。进一步对狭长空间顶棚多挡烟垂壁情况下的速度矢量图进行分析可知,设置多个挡烟垂壁可以明显减缓烟气前锋的运移速度,对烟气的阻滞效果优于单挡烟垂壁。在实际应用中,可以考虑在同一防烟分区内的走廊顶棚设置障碍物,以减缓烟气蔓延速度,赢得逃生时间。挡烟垂壁等顶部构筑物对烟气蔓延速度影响的量化研究和最优布置形式的确定将是下一步的工作重点。

参考文献:

[1] WAN H X, GAO Z H, JI J, et al. Predicting heat fluxes received by horizontal targets from two buoyant turbulent diffusion flames of propane burning in still air[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 190:260.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范:GB 50016—2014[S]. 北京:中国

计划出版社,2018.

[3] 中华人民共和国公安部. 挡烟垂壁:GA 533—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

[4] SEIKE M, KAWABATA N, HASEGAWA M, et al. The retarding effect of fixed barriers on smoke propagation in tunnel fires[J]. *Tunneling & Underground Space Technology*, 2019, 85:100.

[5] HUANG J, ZHU G, YU M, et al. Effect of smoke barrier in narrow space on smoke flow utilizing CFD[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 135:142.

[6] 王欢, 齐庆杰, 姜海洋, 等. 挡烟垂壁作用下狭长通道内烟气输运特征研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(6):150.

[7] 李思成, 陈颖. 高层建筑疏散走道火灾烟气多驱动力作用下运动特性[M]. 北京:知识产权出版社,2019.

[8] OKA Y, OKA H. Velocity and temperature attenuation of a ceiling-jet along a horizontal tunnel with a flat ceiling and natural ventilation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 56(6):79.

[9] ZHAO W F, ZONG R W, WEI T, et al. The physical model and validation study of ceiling-jet flow in near-field of corridor fires[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,

2015,88(9):91.

- [10] YANG Y X, LIU C, LONG Z, et al. Full-scale experimental study on fire under vehicle operations in a sloped tunnel[J]. *International Journal of Thermal Sciences*,2020,158:106524.
- [11] KUNSCH J P. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel [J]. *Atmospheric Environment*,1998,33:13.
- [12] KUNSCH J P. Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel [J]. *Fire Safety Journal*,2002,37:67.
- [13] 高子鹤. 隧道内受限火羽流行为特征及竖井自然排烟机理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [14] 潘李伟. 烟气控制条件下狭长空间烟气分层蔓延特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
- [15] 纪杰,霍然,张英,等. 长通道内烟气层水平蔓延阶段的质量卷吸速率实验研究[J]. *中国科学技术大学学报*,2009,39(7):738.
- [16] REVEG A, HASSID S, POREH M. Calculation of entrainment in density jumps [J]. *Environmental Fluid Mechanics*,2006,6(5):407.
- [17] CHOTZOGLOUK E, ASIMAKOPOULOUA E K, ZHANG J P, et al. An experimental investigation of burning behaviour of liquid pool fire in corridor-like enclosures [J]. *Fire Safety Journal*, 2019,108:102826.
- [18] 王浩波,纪杰,钟委,等. 长通道内烟气一维水平蔓延阶段质量卷吸系数的实验研究[J]. *工程力学*,2009,26(11):247.

(上接第72页)

- [12] TILLER K G, GERTH J, BRÜMMER G. The relative affinities of Cd, Ni and Zn for different soil clay fractions and goethite[J]. *Geoderma*,1984,34(1):17.
- [13] 牟海燕,蒋茜茜,吴晨伟,等. 五种土壤胶体对重金属镉的吸附特征研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*,2019,56(6):1125.
- [14] 刘金燕,刘立华,薛建荣,等. 重金属废水吸附处理的研究进展[J]. *环境化学*,2018,37(9):2016.
- [15] 师杰,赵志伟,崔福义,等. 化学改性强化活性炭纤维吸附重金属离子[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2016,48(8):102.
- [16] ZARE-DORANEI R, FERDOWSI S M, BARZIN A, et al. Highly efficient simultaneous ultrasonic-assisted adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) ions from aqueous solutions by graphene oxide modified with 2,2'-dipyridylamine: Central composite design optimization [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*,2016,32:265.
- [17] LOTA K, ACHZNIK I, SIERCZYNSKA A, et al. The capacitance properties of activated carbon obtained from chitosan as the electrode material for electrochemical capacitors[J]. *Materials Letters*,2016,173:72.