

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-719-06

绿植协同光催化净化空调系统方案设计

杜芳莉 申慧渊 沈关炳 钟平 武景辉

(西安航空学院能源与建筑学院 西安 710077)

【摘要】 随着室外大气环境及室内装修的污染, 长时间处于室内的工作人员身体健康受到严重威胁, 空气净化显得尤为重要。通过在传统空调系统中增加绿色植物和二氧化钛 (TiO_2) 光催化装置, 既可满足空调房间的热舒适性要求, 同时又能满足新鲜度和消毒杀菌的需求, 从而持续创造健康、舒适的室内环境。其中 TiO_2 光催化材料可对来自新回风空气中的甲醛, 氮氧化物 (NO_x), 以及其他有机污染物进行降解和杀菌, 释放 CO_2 和 H_2O ; 绿色植物不仅能在光照作用下进行光合作用, 吸收混合空气中的 CO_2 和 H_2O , 释放大量氧气 (O_2), 增加空气中的含氧量和新鲜度, 而且还可吸附空气中的大颗粒灰尘及 $\text{PM}_{2.5}$, 从而进一步净化空气。通过模拟和实验证实了绿植协同光催化净化空调系统方案的可行性, 得到 NO_x 浓度最大降解率可以达到 30%。

【关键词】 绿植净化; TiO_2 光催化; 空调系统; 消毒杀菌

中图分类号 G710 文献标识码 A

Design of the Purifying Air-Conditioning System with the Green Plant and Synergetic Photocatalyst

Du Fangli Shen Huiyuan Shen Guanbing Zhong Ping Wu Jinghui

(Xi'an Aeronautical University, Department of Energy and Architecture, Xi'an, 710077)

【Abstract】 With the pollution of outdoor atmosphere and interior decoration, Staff who have been indoors for long periods of time are seriously threatened with health, Air purification is particularly important. By adding green plants and titanium dioxide (TiO_2) photocatalytic devices to traditional air-conditioning systems, It cannot only meet the requirements of thermal comfort of air-conditioned rooms, but also meet the needs of freshness and sterilization, So that it continuously creates a healthy and comfortable indoor environment. Among them, TiO_2 photocatalytic materials can degrade and sterilize formaldehyde, nitrogen oxides (NO_x) and other organic pollutants from the mixed air and release CO_2 and H_2O . Green plants not only carry out photosynthesis under light, absorb CO_2 and H_2O in mixed air, and release a large amount of oxygen (O_2) to increase the oxygen content and freshness in the air, but also adsorb large particle dust and $\text{PM}_{2.5}$ in the air to further purify the air. In this paper, the feasibility of the purifying air-conditioning system with the green plant and synergetic photocatalyst was verified based on the simulation and experiment, the maximum degradation rate of NO_x concentration could reach 30%.

【Keywords】 Green Plant Purification; TiO_2 photocatalysis; Air conditioning system; Sterilization

0 引言

建筑物是人们生活与工作的场所, 据统计, 现代人类大约有五分之四的时间是在建筑物中渡过, 因此, 室内环境品质成为人们的首要之选, 舒适、

健康成为选择室内环境的关注点。近年来, 由于室内的建筑装饰材料及家具中大量化学成份的使用, 使得甲醛、苯、甲苯、二甲苯、氨、氡和 TOVC 等污染物进入室内, 造成室内污染物含量严重超标

基金项目: 西安航空学院高等教育研究项目 (2021GJ1010); 陕西省教育科学十三五规划课题 (SGH20Y1363)

作者 (通讯作者) 简介: 杜芳莉 (1975.5-), 女, 硕士研究生, 副教授, E-mail: 972339919@qq.com

收稿日期: 2021-02-21

[1]。目前大多数空调系统仅仅完成了对空气的热湿处理,而对室内的污染物只能通过稀释后排放至室外,无法满足健康舒适的室内空气品质要求;同时,由于大多数空调系统对节能的要求,导致通过空调设备送入室内的新风量不足;且少量进入室内的新风却由于汽车尾气和工业废气的大量排放遭到污染,从而造成进入室内的新风中含有大量的 NO_x , SO_x 和粉尘等^[2,3],且目前所使用的空调系统缺乏自净功能。如果采取完全密闭的建筑运行形式,各种类型的房间内二氧化碳和甲醛等的浓度会随着室内空气温、湿度等因素的变化,对儿童身体健康造成影响。Naydenov 等人通过测试,明确密闭环境下污染物会对儿童哮喘和过敏产生影响^[4]。王佳慧对中国重庆地区住宅通风与学龄前儿童哮喘及过敏性疾病的相关性进行研究,结果表明,以示踪气体计算得到的换气次数可以指明有 53.8% 的卧室和 55.8% 的客厅晚上换气次数未达到标准限值^[5]。综上所述,传统空调系统已无法满足人们对健康生活的需求。本设计方案所要解决的技术问题在于针对上述现有技术中的不足,提供一种绿植协同光催化净化空调系统设计方案,其系统结构简单,设计合理,实现方便,不仅能够满足对室内空气的热湿要求,同时,还能大幅度提高室内空气含氧量,降低室内有机污染物浓度,满足对室内空气新鲜度和消毒杀菌的需求。

1 设计思路

绿植协同光催化净化空调系统是在传统空调系统热湿处理基础上增加净化、除尘、增氧及消毒等功能,从而使空调系统不仅能够满足空气的热湿要求,同时,还能大幅度提高室内空气的含氧量,降低室内有机污染物浓度,满足室内空气新鲜度和消毒、杀菌的需求。该系统由净化系统和降温除湿系统两大部分组成。其中净化系统是由 TiO_2 光催化系统、绿植生态产氧系统、灯光照明及杀菌系统等组成;降温除湿系统由除湿系统、再生系统、降温系统组成。

本设计方案中, TiO_2 催化材料在紫外灯照射下将来自室内回风及室外新风中的有机污染物,如氮氧化物、硫氧化物、甲醛、苯、甲苯、二甲苯、氨、氫和 TOVC 等降解为 CO_2 和 H_2O ; 绿色植物在光照作用下进行光合作用,吸收经 TiO_2 光催化降解

所产生的 CO_2 和 H_2O , 释放氧气,增加空气的含氧量,同时还可吸附混合空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 。降温除湿系统对经绿植协同光催化后的空气进行热湿处理,使空气温湿度满足人们的热舒适性要求。该设计方案不仅能使空气在绿植房内实现循环自净化,还可满足对空气进行消毒、杀菌及热湿处理的要求,从而持续创造健康、舒适的室内环境。绿植协同光催化净化空调系统方案设计思路如图 1 所示。

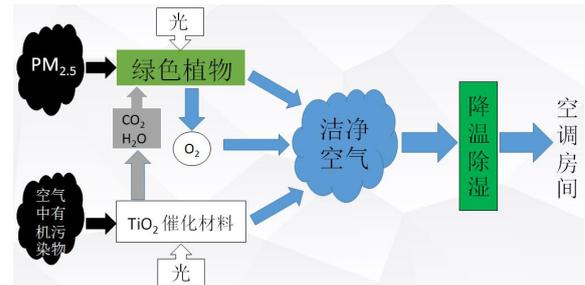


图 1 绿植协同光催化净化空调系统方案设计思路

Fig.1 Ideas of scheme design of green plant cooperative photocatalytic purifying air conditioning system

2 工作原理

绿植协同光催化净化空调系统是通过将室外新风和室内回风混合后的空气经风机送至绿植房中,绿植房内设有 TiO_2 光催化系统、绿植生态产氧系统、自给式能源供给系统和降温除湿系统;其中绿植生态产氧系统包括合理密植的吊兰或绿萝盆栽; TiO_2 光催化系统包括紫外线灯和 TiO_2 金属滤网;自给式能源供给系统包括太阳能发电装置和蓄电池;降温除湿系统包括吸附除湿单元、吸附再生单元、降温单元。绿植协同光催化净化空调系统流程图如图 2 所示。

具体工作过程为:来自绿植房外的新风与来自空调房内的回风进行混合,通过新回风管道(11)进入设置在绿植房底部的环形风道(5)内进行稳压、整流。为使各系统处理空气效率达到最优,系统在绿植房中合理地设计气流组织,然后经设置在环形风道上的条缝形风口(6)低速送至 TiO_2 金属滤网(7)处, TiO_2 在紫外线灯的照射下将混合空气中的有机污染物降解为 CO_2 和 H_2O ,并对空气进行消毒杀菌,净化消毒后的空气低速进入绿植生态产氧系统中,利用置换通风原理,形成自下而上的活塞气流,在气流上升的过程中与绿植盆栽(2)充分接触,绿植在光照作用下进行光合作用,吸收

空气中的 CO₂ 和 H₂O, 同时释放大量的 O₂; 与此同时, 绿植盆栽 (2) 还可吸附空气中的 PM_{2.5} 颗粒状污染物, 使空气进一步净化, 净化后的空气含氧量大大提高, 有机污染物含量大幅度减少。最后进入设置在植物房顶部的除湿降温风道 (17) 和 (26) 中进行降温除湿处理, 生成低温低湿、高含氧量的净化空气进入送风管 (28) 中, 在送风机 (29) 作用下, 送入空调房内, 完成系统循环。绿植协同光催化净化空调系统结构示意图如图 3 所示。

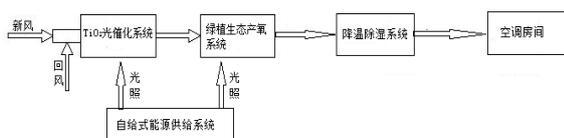
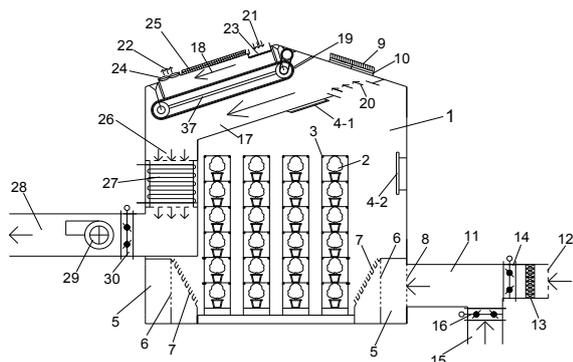


图 2 绿植协同光催化净化空调系统流程图

Fig.2 Flow chart of green plant cooperative photocatalytic purifying air conditioning system



- 1-绿植房; 2-绿植盆栽; 3-立体放置架; 4-1, 4-2: 紫外线灯;
- 5-环形风道; 6-条缝形送风口; 7-TiO₂ 金属滤网;
- 8-风道进风口; 9-太阳能发电装置; 10-蓄电池;
- 11-新回风管道; 12-新风入口; 13-新风过滤器
- 14-新风调节阀; 15-回风口; 16-回风调节阀;
- 17-除湿风道; 18-再生风道; 19-隔板; 20-空气入口;
- 21-再生空气入口; 22-排风口; 23-红外电加热器;
- 24-排风机; 25-太阳能辐射热板; 26-降温风道;
- 27-表冷器; 28-送风管; 29-送风机; 30-送风调节阀

图 3 绿植协同光催化净化空调系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of green plant cooperative photocatalytic purifying air conditioning system

2.1 TiO₂ 光催化系统

光催化技术是先进氧化技术中最具代表性的技术之一, TiO₂ 以其化学性质稳定、氧化-还原性强、抗腐蚀、无毒及成本低而成为目前最为广泛使用的半导体光催化剂^[6,7]。其处理空气污染物的机

理是根据 TiO₂ 半导体的电子结构的特殊性而实现的, TiO₂ 粒子本身很稳定, 当它吸收了紫外光的能量以后, TiO₂ 半导体会产生电子-空穴对, 大大加强氧气的氧化性, 可有效将空气中的有机污染物氧化, 最终将其分解为 CO₂ 和 H₂O, 从而达到消除有机污染物的目的。本项目所采用的 TiO₂ 降解速率实验台及 TiO₂ 降解作用下的 NO_x 浓度变化曲线如图 4、图 5 所示。



图 4 二氧化钛降解速率实验台

Fig.4 Titanium dioxide degradation rate test rig

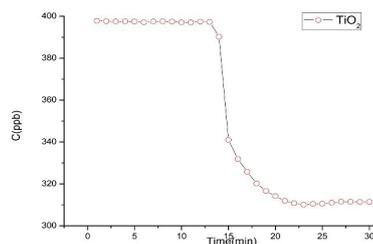


图 5 TiO₂ 降解 NO_x 浓度的变化曲线

Fig.5 Variation curve of NO_x concentration reduced by TiO₂

2.2 绿植生态产氧系统

绿植生态产氧系统是根据植物的光合作用^[8,9], 有效吸收回风及经 TiO₂ 光催化污染物后产生的 CO₂ 和 H₂O, 并释放氧气, 经过处理后的高含氧量空气再进入降温除湿系统。关于绿植的选取, 本系统根据多次实验测试, 并结合项目实际分析, 选用质优价廉、产氧量较高的吊兰与易于养殖的绿萝作为植物房主培植物^[8]。

由于植物的光合作用可有效吸收空气中的 CO₂ 并产生 O₂, 这样空调系统就可大量采用回风, 从而使系统运行更节能。为提高植物的光合作用效率, 本方案在设计绿植房时, 将其放置在阳光充足的建筑物顶部, 并采用圆柱型结构设计, 这样, 一方面可满足其在屋顶受风力等自然作用时结构稳定; 另一方面, 还可满足房内绿植在白天任何时间

都能接受到均匀的阳光照射。除此之外，为保证进入绿植房中的空气均匀、低速，本项目还在绿植房底部环形送风道上均匀设置多个条缝形风口；另外，考虑到引进的新风中会含有一定的微小颗粒物，本方案通过对植物的合理密植，利用植物叶片对这些颗粒物的吸附作用来吸附降解空气中的PM_{2.5}，保证送入室内空气的洁净度^[10]。

2.3 自给式能源供给系统

自给式能源供给系统是利用设置在绿植房顶部的太阳能发电装置为绿植生态产氧系统和 TiO₂ 光催化系统提供自给能源，白天通过太阳能发电装置可将部分太阳能转化为电能，并储存于蓄电池中，夜间或光照不足时，蓄电池则释放储存能为绿植房内的紫外灯提供能源供给，保证系统全天候高效运行^[11]。它主要是由太阳能发电装置、整流器、蓄电池、逆变器、紫外灯等组成。其结构示意图如图 6 所示。



图 6 自给式能源供给系统结构图

Fig.6 Self-contained energy supply system structure

2.4 降温除湿系统

降温除湿系统是本装置的重要组成部分，通过它可对净化消毒后的高含氧量空气进行热湿处理，以满足用户的热舒适性需求。本装置是由除湿系统、再生系统、降温系统三部分组成。其工作原理为：除湿吸附区对进入除湿风道中的空气进行吸附除湿，吸湿后的吸附带由电机带动进入到吸附带再生区进行自动再生^[12-14]，经过除湿后的高温、低湿空气通过表冷器进行等湿降温，生成低温低湿的空气经送风机和送风管送至空调房间，为人们生产生活提供健康舒适的环境。降温除湿系统工作原理如图 7 所示。

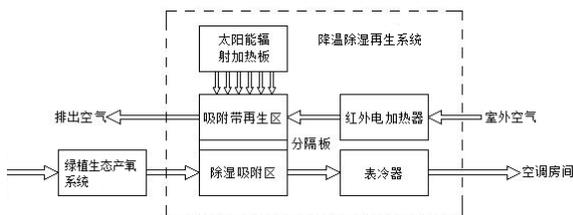
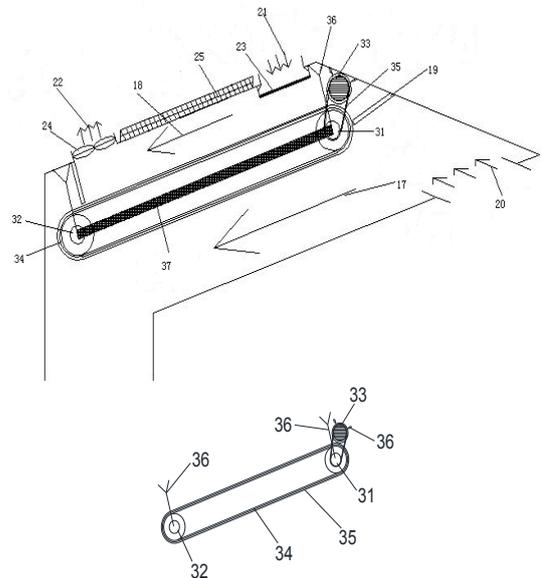


图 7 降温除湿系统工作原理图

Fig.7 Working principle of cooling dehumidification system

吸附带再生过程为：当除湿吸附带（35）在除湿风道（17）中完全吸附后自动转入再生风道（18）中进行再生，再生所需的室外空气经过太阳能辐射加热板（25）与红外电加热器（23）互补进行加热，当太阳能辐射加热板（25）提供的辐射热温度达到 60℃及以上时，关闭红外电加热器（23），直接采用太阳能辐射加热板进行再生；当太阳能辐射加热板提供温度不足 60℃时，则开启红外电加热器进行再生。加热后的空气由再生空气入口（21）进入再生风道内对吸湿后的吸附带进行再生，再生过程中产生的高热高湿空气在排风机（24）作用下经排风口（22）排至绿植房外。如此不断循环，从而保证吸附除湿带高效循环使用。除湿吸附带再生结构原理图如图 8 所示。



- 18-再生风道；19-隔风板；20-空气入口；21-再生空气入口；
- 22-排风口；23-红外电加热器；24-排风机；
- 25-太阳能辐射热板；26-降温风道；27-表冷器；28-送风管；
- 29-送风机；30-送风调节阀；31-主动轮；32-从动轮；
- 33-电机；34-传动皮带；35-除湿吸附带；36-支架；37-隔热板

图 8 除湿吸附带再生结构原理图

Fig.8 Schematic diagram of regeneration of dehumidification adsorption band

3 空调系统模型设计

本设计方案充分利用 TiO₂ 光催化作用对空调系统新回风中的有机污染物进行降解，并在植物房内合理密植绿色植物对催化产物 CO₂ 及 H₂O 进行光合作用，产生大量 O₂，从而提高空调送风中的

含氧量, 保证空调房间的送风品质。为使 TiO_2 光催化剂及绿色植物能够在充足的光照下进行作用, 本设计方案将绿植房置于建筑物屋顶, 同时考虑到屋顶易受风力等客观因素影响^[15], 将绿植房设计为圆柱型建筑, 其整体结构透光性良好, 且能够保证阳光 360° 全方位照射; 另外为保证该系统全天候运行, 本系统还巧妙设计了自给式能源供给系统, 通过在绿植房屋顶设置太阳能发电装置, 使设置在绿植房内的紫外灯不断获得能源供给, 从而为 TiO_2 光催化作用和绿色植物进行光合作用提供持续充足的光照资源。

该设计方案通过多次动态模拟及实物模型实验测试, 均得出该空调系统确实能够有效改善空调房间的空气品质, 并能为空调房间持续创造健康、清新、舒适的室内环境。绿植协同光催化净化空调系统三维模拟图如图 9 所示, 实物模型图如图 10 所示。绿植协同光催化净化室内的 NO_2 , 其出口处的污染物去除率可以达到 30%, 优于纯降解的去除效率 (去除率为 20%), 其空调系统的 NO_2 浓度分布图如图 11 所示。

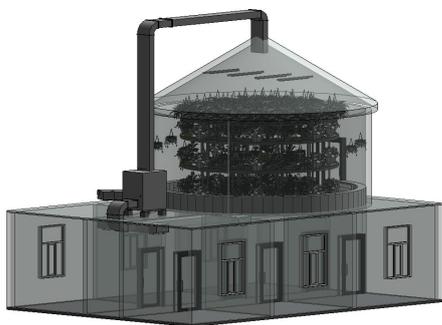


图 9 绿植协同光催化净化空调系统三维模拟图
Fig.9 3D simulation of green plant cooperative photocatalytic purifying air conditioning system



图 10 绿植协同光催化净化空调系统实物模型图
Fig.10 Physical model of green plant cooperative photocatalytic purifying air conditioning system

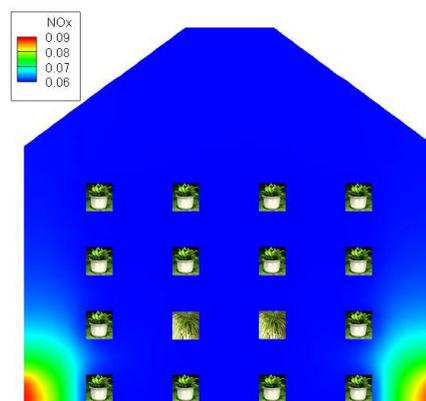


图 11 绿植协同光催化净化空调系统 NO_2 浓度分布图

Fig.11 Distribution of NO_2 concentration in the photocatalytic purifying air conditioning system green with plant

4 结论

综上所述, 绿植协同光催化净化空调系统通过将 TiO_2 光催化有机污染物技术与绿植的光合作用巧妙结合, 使进入空调房间的空气在有效净化、杀毒的同时获得大量的氧气, 从而大幅提高空调室内空气含氧量, 并有效降低污染物浓度, 为人们工作及生活营造一个清新、舒适的环境。本设计的创新点如下所示:

(1) 本系统利用太阳热发电装置为绿植生态产氧系统和 TiO_2 光催化系统提供自给能源, 保证系统全天候高效运行;

(2) 本系统采用 TiO_2 光催化技术, 有效分解空气中的甲醛、苯、硫化物、氮氧化物等污染物, 系统运行绿色环保;

(3) 本系统利用大叶植物的光合作用及吸附特性, 在提高空气含氧量同时还能有效吸附空气中 $\text{PM}_{2.5}$, 从而达到改善送风品质的目的;

(4) 本系统巧妙设计了自动高效再生式吸附带进行除湿, 并选用以玻璃纤维为基质并复合氧化锂的吸附材料, 解决了普通空调技术除湿难题, 具有舒适性高的优点;

(5) 本系统吸附带再生技术利用太阳能辐射加热与红外辐射加热进行互补, 有效利用了新能源的同时减少了常规能源的使用, 达到了节能减排的目的。

参考文献:

- [1] 邵琪璐.浅谈植物与室内空气净化[J].绿色科技,2014,(4):245-247.
- [2] 崔巍.哈尔滨住宅建筑室内气体污染物测试分析[J].山西建筑,2020,46(2):136-138.
- [3] 马天赐,解晓健,杭建,等.理想街谷内单侧自然通风建筑污染物跨户传播模拟研究[J].建筑科学,2020,279(10):108-116.
- [4] Naydenov KG. On the association between home exposure and asthma and allergies among children in Bulgaria, the ALLHOME study[J]. Denmark: Technical University of Denmark, 2007.
- [5] 王佳慧.重庆地区住宅通风与学龄前儿童哮喘及过敏性疾病的相关性研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [6] 刘山虎,许庆峰,邢瑞敏,等.二氧化钛光催化技术应用于室内甲醛降解的研究进展[J].化学研究,2016,27(4):502-513.
- [7] Alireza HM, Fariborz H, Chang-Seo L. Effect of titanium dioxide properties and support material on photocatalytic oxidation of indoor air pollutants[J]. Building and Environment, 2021,189:107518.
- [8] 王素华,王鲁梅.十六种植物光合产氧量的研究[J].生物学教学,2013,38(10):43.
- [9] Park SA, Kim MG, Yoo MH, et al. Comparison of Indoor CO₂ Removal Capability of Five Foliage Plants by Photosynthesis[J]. Korean Journal of Horticultural Science & Technology, 2010,28(5):864-870.
- [10] 孟国忠.几种室内植物对苯和甲醛复合污染响应的研究[D].北京:北京林业大学,2013:31-35.
- [11] 钟玲玲,吴密,黄小平.植物滤芯空气净化器的设计[J].太原学院学报,2018,9(3):51-54.
- [12] 刘浩,杨学宾,吕照宇,等.某过滤净化装置内部流场优化[J].制冷与空调,2020,20(1):45-48.
- [13] 杜芳莉,宋祥龙,俱鹏阳,等.健身房用蒸发冷却无动力空调系统的研究[J].制冷与空调,2019,(5):478-480.
- [14] 吴兆辉.西北地区室内公共环境中植物景观设计新探—以西安地区为例[D].西安:西安建筑科技大学,2010:23-65.
- [15] 孙铁柱,黄翔,贺红霞,等.一种公交站用太阳能降温湿帘的设计方案[J].制冷与空调,2018,(5):63-67.
-
- (上接第 678 页)
- [6] 齐江浩,赵蕾,王君,等.地铁隧道活塞风实测及特征分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4):740-747.
- [7] 崔景东,李炎,刘炎举,等.隧道内列车活塞风效应数值模拟分析[J].制冷与空调,2019,33(2):188-192,202.
- [8] 黄鹏.地铁隧道及车站内流动特性的数值模拟研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [9] 杨晖.地铁列车活塞风对站台空气环境影响的数值模拟[J].北京建筑工程学院学报,2007,(2):8-13.
- [10] 罗忠,韩贵鑫,赵凯,等.隧道活塞风速计算方法及其影响因素分析[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(5):694-699.
- [11] B Mikuž, A Shams. Assessment of RANS models for flow in a loosely spaced bare rod bundle with heat transfer in low Prandtl number fluid[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019,124(2):441-459.
- [12] Federal Railroad Administration of USA. Aerodynamic effects of high-speed trains on people and property at stations in the northeast corridor[R]. Washington: Federal Railroad Administration of American, 1999: 65-68.
- [13] TB 10623-2014,城际铁路设计规范(附条文说明)(附 2019 年局部修订)[S].北京:中国铁道出版社,2014.