

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-564-06

地铁站站厅低温送风方式对 CO₂ 浓度的影响研究

楼燕进

(宁波市城建设计研究院有限公司 宁波 315000)

【摘要】 地铁站作为应用很广泛的公共空间, 乘客在换乘空间内的舒适性体验受到关注。因此, 基于低温送风系统的节能性, 利用 CFD 软件研究某地铁站站厅低温送风方式与常规送风方式对 CO₂ 浓度分布的影响。对比分析两种送风工况下, 垂直方向上 ($X=15\text{m}$) 和水平方向上 ($Z=1.5\text{m}$) 的温度场、速度场、湿度场以及 CO₂ 浓度场的分布特征。得出以下结论: (1) 低温送风方式下, 站厅人体活动区域温度更低, 有利于提高人体的热舒适性; (2) 两种送风方式下的空气流速分布较为相似, 空调工作区的送风速度基本稳定在 $0.1\text{m/s}\sim 0.3\text{m/s}$; (3) 低温送风工况下的室内空气相对湿度普遍都要低于常规送风工况, 表明低温送风方式的除湿能力更强, 在两者都满足设计要求的情况下, 低温送风方式有利于提高人体的热舒适度; (4) 两种送风工况下站厅 CO₂ 浓度场分布相似且都符合设计标准。低温送风工况下, 垂直高度 CO₂ 浓度稳定在 0.57% , 水平方向稳定在 0.67% ; 常规送风工况下, 垂直高度 CO₂ 浓度稳定在 0.6% , 水平方向稳定在 0.7% 。相较而言, 低温送风方式下站厅室内 CO₂ 浓度更低, 能够获得较高的室内空气品质, 这是因为低温送风系统的总送风量较低, 单位时间内产生的 CO₂ 浓度更低。综上所述, 低温送风系统在满足温度、空气流速和湿度的要求下, 还能够有效降低 CO₂ 浓度, 改善地铁站内空气品质, 为低温送风技术应用到地铁站的可行性提供技术参考。

【关键词】 地铁站厅; 低温送风; 温湿度场; 速度场; CO₂ 浓度场

中图分类号 TU834.1 文献标识码 A

Study on the Effect of Low Temperature Air Supply Method on CO₂ Concentration in Subway Station Hall

Lou Yanjin

(Ningbo Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd, Ningbo, 315000)

【Abstract】 As a very widely used public space in subway stations, the comfort experience of passengers in the interchange space was of concern. Therefore, based on the energy saving of low-temperature air supply system, this paper used CFD software to study the effect of low-temperature air supply method and conventional air supply method on CO₂ concentration distribution in a subway station lobby. The distribution characteristics of temperature field, velocity field, humidity field and CO₂ concentration field in vertical direction ($X=15\text{m}$) and horizontal direction ($Z=1.5\text{m}$) were compared and analyzed under the two air supply conditions. The following conclusions are drawn: (1) the temperature of the human activity area in the station hall is lower under the low-temperature air supply mode, which is conducive to improving the thermal comfort of the human body; (2) the air velocity distribution under the two supply modes is relatively similar, and the air supply velocity in the air conditioning work area is basically stable at 0.1 m/s to 0.3 m/s ; (3) The relative humidity of indoor air under low-temperature air supply condition is generally lower than that of conventional air supply condition, indicating that the dehumidification ability of low-temperature air supply

作者(通讯作者)简介: 楼燕进(1979.07-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为暖通空调系统节能技术, E-mail: 8659296@qq.com

收稿日期: 2022-01-27

mode is stronger, and if both meet the design requirements, the low-temperature air supply mode is conducive to improving the thermal comfort of human body; (4) the distribution of CO₂ concentration field in the station hall under both air supply conditions is similar and both meet the design standards. Under the low-temperature air supply condition, the CO₂ concentration is stable at 0.57% in the vertical height and 0.67% in the horizontal direction; under the conventional air supply condition, the CO₂ concentration is stable at 0.6% in the vertical height and 0.7% in the horizontal direction. In comparison, the CO₂ concentration in the station hall is lower in the low-temperature air supply method, and higher indoor air quality can be obtained because the total air supply volume of the low-temperature air supply system is lower, and the CO₂ concentration generated per unit time is lower. In summary, the low-temperature air supply system can effectively reduce the CO₂ concentration and improve the air quality in the subway station while meeting the requirements of temperature, air flow rate and humidity, which provides a technical reference for the feasibility of applying low-temperature air supply technology to the subway station.

【Keywords】 subway station Hall; low-temperature air supply; temperature and humidity field; velocity field; CO₂ concentration field

0 引言

地铁站作为一个较大的地下公共空间，室内环境质量会影响工作人员与乘客的身体健康和舒适性，良好的空气品质能够给乘客带来良好的体验感。地下轨道交通的迅猛发展，国内外一些学者对地下空间，诸如地铁站之类的大型公共空间空气品质做了大量的研究。为了节约能耗，地铁站通常采用低温送风^[1]。

孙成才等利用 Fluent 软件研究工作区的温湿度场及污染物浓度分布特点，发现采用低温送风空调系统能够满足室内热舒适要求^[2]。其他学者也得出低温送风系统用于空调系统可行的结论^[3,4]。李东东等通过数值模拟研究，发现低温送风系统具有较强的除湿能力，人员的热舒适性也更好^[5,6]。乘客呼吸是导致地铁站内部空气中 CO₂ 浓度变化的主要原因，并且于客流量呈现正相关^[7,8]，站厅和站台单送单回的气流组织形式有利于稀释 CO₂^[9]。地铁站厅需要供给足够的新鲜空气来满足乘客的需求，因此，地铁站通风条件越好，越有利于降低空气中的污染物浓度^[10-12]。通过分析相关的研究成果可以看出，低温送风系统能够有效改善室内空气品质和舒适性，地铁站地下空间密闭，人员密度大，CO₂ 是影响地铁站内部空气品质的重要因素。

众多学者对低温送风系统进行了大量研究，主要偏向于探究低温送风系统对乘客热舒适性的影响，然而，通过研究低温送风方式对 CO₂ 浓度的影响，进而影响乘客热舒适性的相关研究还不够完善。因此，本文以某地铁站空间为例，建立数值分析模型，对比分析低温送风系统和常规送风系统下地铁站内垂直方向上（X=15m）和水平方向上

（Z=1.5m）的温度场、速度场、湿度场以及 CO₂ 浓度场的分布特征。探究常规送风系统和低温送风系统对地铁站内 CO₂ 浓度分布的影响，为进一步改善地铁站地下空间的空气品质和乘客舒适性的相关研究提供借鉴意义。

1 模型介绍

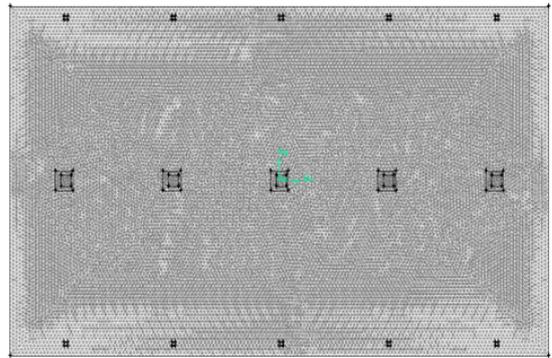


图 1 站厅物理模型网格效果图

Fig.1 Station hall physical model grid effect drawing

本文以某地铁车站站厅为研究对象，根据站厅实际尺寸，建立三维计算模型。同时考虑到计算机的运算能力有限，为保证模拟结果的准确性，取站厅的五分之一作为模型模拟的研究对象。模型尺寸为：长×宽×高=30m×18m×4.8m。气流组织方式：采用上送上回形式。风口布置：送/回风口沿站厅顶部长度方向均匀布置，送风口布置在两侧，回风口居中布置。送风口 10 个（送风温度为 9℃ 的风口尺寸为 200mm×200mm，送风温度为 19℃ 的风口尺寸为 300mm×300mm），回风口 5 个（送风温度为 9℃ 的风口尺寸为 570mm×570mm，送风温度为 19℃ 的风口尺寸为 770mm×770mm）。送/回风

口间距均为 6m。根据站厅实际情况,把室内负荷均匀的等效到地板上,站厅四周壁面以及站厅顶部处理成绝热壁面。建立站厅三维物理模型,划分网格时,除了对整体三维模型进行网格划分以外,为了增加模拟结果的可信度,还对送/回风口物理模型进行了局部加密处理,图 1 为站厅物理模型划分网格后的效果图。

当送风温度为 9℃ 时,系统总送风量为 32266.56m³/h;送风温度为 19℃,系统总送风量为 59215.68m³/h。模型中四周墙面及顶板采用 wall 边界条件且绝热壁面,站厅地板的等效热流密度为 76.815W/m²。研究站厅空气品质时,以站厅 CO₂ 浓度作为研究对象,把 CO₂ 作为站厅室内空气的污染源。因此,在站厅物理模型中沿着长度中轴线方向设置了五个距离地面 1.5m,间隔为 6m,面积为 1m×1m 的面作为室内 CO₂ 的发生源。取 CO₂ 发生量为 0.014m³/(人·h)。站厅室内湿负荷主要来自乘客的散湿,研究站厅在不同送风温度下的湿度分布特征时,产湿量取 212g/(h·人)。对散湿量的等效处理方式与 CO₂ 的等效处理方式相同。模拟的边界条件设置如下:

(1) 站厅设计温度为 29℃;

(2) 送风温度为 9℃ 时,入口边界 (inlet) 设为速度进口 (velocity-inlet),风速为 4.5m/s。送风温度为 19℃ 时,入口边界 (inlet) 设为速度进口 (velocity-inlet),风速为 3.655m/s;

(3) 出口边界 (outlet) 为自由出流 (outflow);

(4) 墙体和顶板设为绝热壁面,热通量为 0;

(5) 地板设为均匀分布的散热热源,热传递方式设置为热辐射,热通量为 76.815W/m²;

(6) CO₂ 发生源设置为质量入口,质量流量为 0.0001092kg/s;

(7) 散湿量发生源设置为质量入口,质量流量为 0.0008268kg/s。

2 模拟结果及原因分析

地铁站厅属于地下过渡空间且相对密闭,目前空调系统基本采用常规送风方式。因此,考虑将低温送风技术应用到地铁站厅。为了探索其与常规送风方式的差别,对送风温度为 9℃ (下文称之为低温送风) 和 19℃ (下文称之为常规送风) 两种

送风工况进行了数值模拟。对比分析两种送风工况下,竖直方向上 ($X=15\text{m}$) 和水平方向上 ($Z=1.5\text{m}$) 的温度场、速度场、CO₂ 浓度场以及湿度场的分布特征。为低温送风技术应用到地铁站的可行性提供技术参考。

2.1 温度场分布对比

取 $X=15\text{m}$ 和 $Z=1.5\text{m}$ 两位置进行分析。 $X=15\text{m}$ 可以描述站厅空调工作区竖直方向上的温度分布, $Z=1.5\text{m}$ 可以描述站厅空调工作区水平方向上的温度分布。

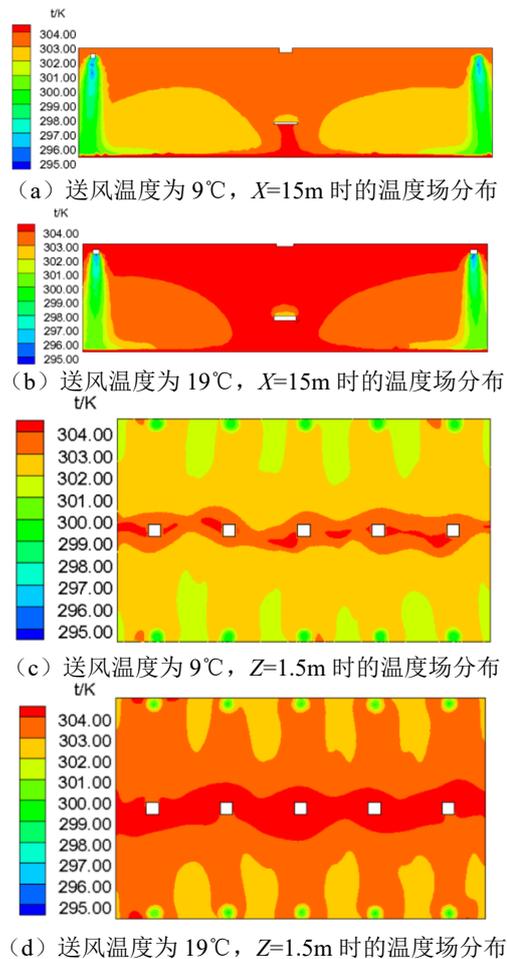


图 2 两种送风工况的温度场分布

Fig.2 Temperature distribution of two supply air conditions

$X=15\text{m}$ 截面温度分布可以反映出站厅空调区域在竖直方向上的分布特征。从图 2 (a)、(b) 中可知,在两种送风工况下,站厅内的温度随着高度的增加而增大。站厅空调区域温度场在竖直方向上的分布均匀性较好。人体活动区域温度集中在 29℃~30℃,均满足设计要求。与常规送风方式相比,

低温送风的站厅室内温度更低。

Z=1.5m 截面温度分布可以反映出站厅空调区域在水平方向上的分布特征且基本上是人体头部所在的高度。因此可以较好的反映出人体所在空调区域的热舒适感。从图 2 (c)、(d) 中可知，站厅中间区域存在局部高温区，这是由于采用两侧送风，中间回风的侧送上回方式，加之站厅属于大跨度空间。因此只有少量低温风能到达站厅的中间位置。进而导致站厅中间位置出现局部温度略高于空调的设计温度的情况。在水平方向上站厅温度场分布相对均匀，低温送风工况下，人体活动区域温度集中在 29℃~30℃。常规送风工况下，人体活动区域温度集中在 29.5℃~30.5℃。考虑到站厅作为过渡空间，空调的设计精度可以略低，因此两种送风工况均满足设计要求。低温送风方式下，站厅人体活动区域温度更低，有利于提高人体的热舒适性。

2.2 速度场分布对比

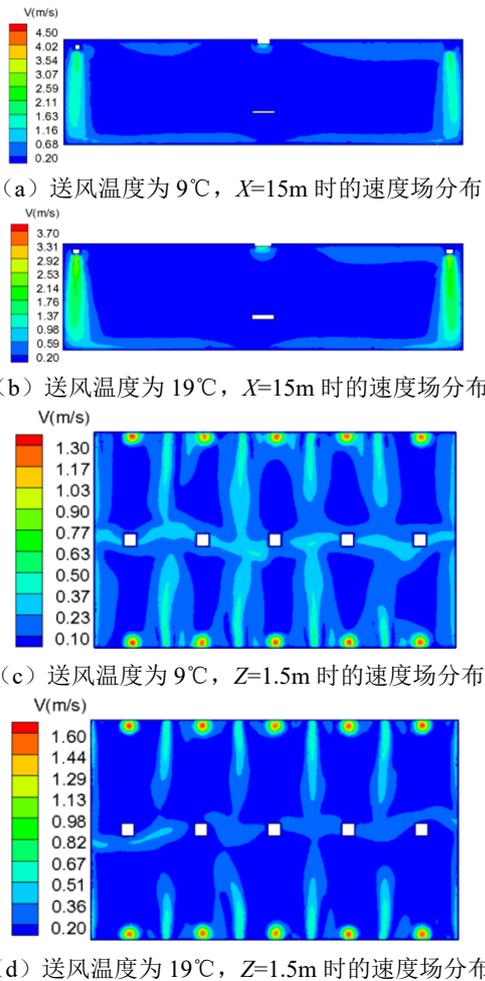


图 3 两种送风工况的速度场分布

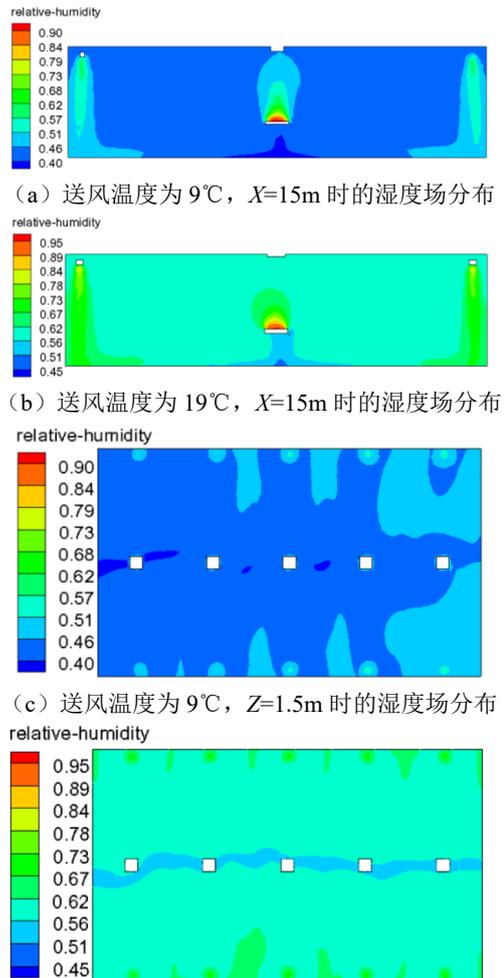
conditions

从图 3 (a)、(b) 可知，在竖直方向上，两种送风工况的温度场分布较为均匀。人体活动区的送风速度稳定在 0.2m/s，最大风速都出现在站厅两侧。其中，低温送风的最大送风速度为 2.11m/s，常规送风最大送风速度为 2.47m/s。最大风速出现的位置都靠近送风口。

从图 3 (c)、(d) 可以看出，在水平方向上，两种送风工况的速度场分布相对均匀，风速较大的区域出现在站厅中间位置。最大风速出现在两侧送风口下方的位置。低温送风最大风速为 1.3m/s，常规送风最大风速为 1.6m/s。

整体而言，两种送风方式下的空气流速分布较为相似，空调工作区的送风速度基本稳定在 0.1m/s ~ 0.3m/s。根据《室内空气质量规范》(GB/T18883-2002) 评价标准分析可以得出，两者基本符合设计要求。

2.3 湿度场分布对比



(d) 送风温度为 19℃, Z=1.5m 时的湿度场分布

Fig.3 The velocity distribution of two kinds of air supply

图 4 两种送风工况的湿度场分布

Fig.4 The distribution of humidity field in two air supply conditions

从图 4 (a)、(b) 可知, 低温送风工况下, 站厅室内空气的平均相对湿度为 45.2%; 常规送风工况下, 站厅室内空气的平均相对湿度为 60.6%。在竖直方向上, 两种送风工况的平均相对湿度有着约 15% 的差距。

从图 4 (c)、(d) 可知, 低温送风工况下, 站厅室内空气的平均相对湿度为 44.6%; 常规送风工况下, 站厅室内空气的平均相对湿度为 59.8%。在水平方向上, 两种送风工况的平均相对湿度有着约 15% 的差距。

通过对站厅在竖直方向和水平方向上的室内湿度场的对比研究可以发现, 低温送风工况下的室内空气相对湿度普遍都要低于常规送风工况。这就意味着低温送风方式的除湿能力更强, 在两者都满足设计要求的情况下, 低温送风方式有利于提高人体的热舒适度。

2.4 CO₂ 浓度场分布对比

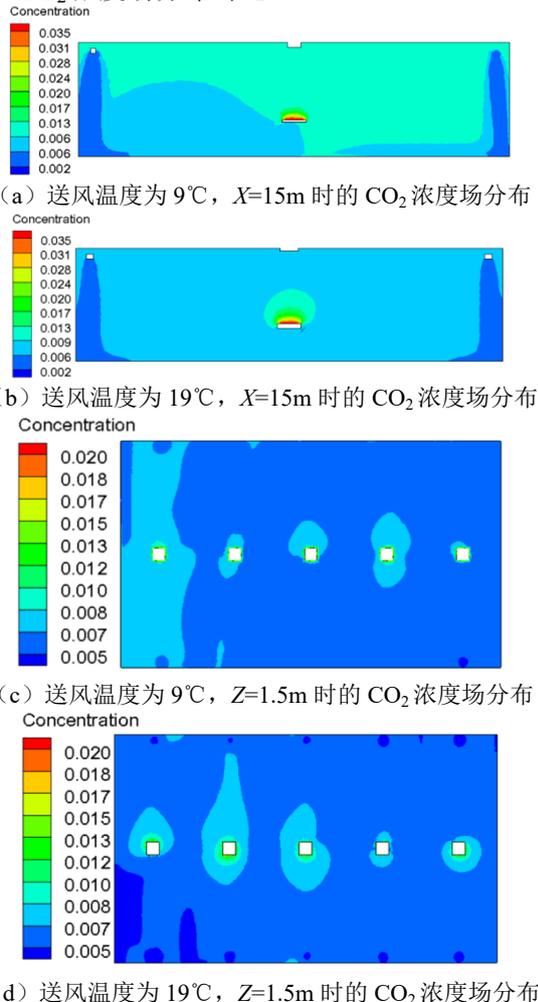


图 5 两种送风工况的 CO₂ 浓度场分布

Fig.5 Distribution of CO₂ concentration field in two air supply conditions

从图 5 (a)、(b) 可以看出常规送风工况下, 站厅 CO₂ 浓度稳定在 0.6%, 整个站厅在竖直高度上的 CO₂ 浓度场分布均匀; 低温送风工况下, 站厅 CO₂ 浓度稳定在 0.57%, 均满足地下车站公共区 CO₂ 日平均浓度 < 1.5% 的设计要求。从图 5 (c)、(d) 可以看出, 在水平方向上, 站厅内整体的 CO₂ 浓度较低。其中, 低温送风 CO₂ 浓度稳定在 0.67%; 常规送风 CO₂ 浓度稳定在 0.7%。最大浓度出现在 CO₂ 源面上, 约为 2%。两种送风工况下的 CO₂ 浓度对比图如图 6 所示。

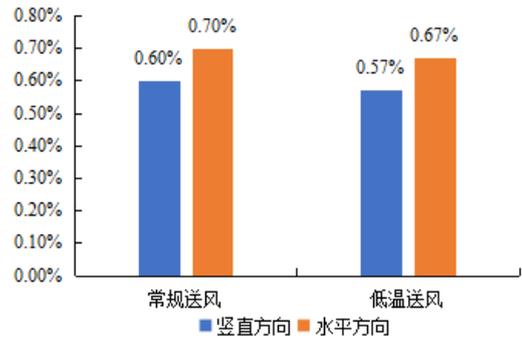


图 6 两种送风工况下 CO₂ 浓度对比图

Fig.6 Comparison of CO₂ concentration under two air supply conditions

由地铁车站空气品质标准可知, 要求地下车站公共区 CO₂ 日平均浓度 < 1.5%。站厅空调工作区属于地铁站的公共区。整体而言, 两种送风工况下站厅 CO₂ 浓度场分布相似且都符合设计标准。分析图 6 可以得出, 相较而言, 低温送风方式下站厅室内 CO₂ 浓度较低, 这是因为相较于常规送风方式而言, 低温送风工况下系统总送风量较小, 则单位时间内排出的 CO₂ 浓度也较低。

3 结论

本文主要研究了低温送风与常规送风两种送风工况对站厅室内 CO₂ 浓度分布的影响, 得出以下主要结论:

(1) 在两种送风工况都满足设计要求的情况下, 低温送风方式下, 站厅人体活动区域温度更低, 有利于提高人体的热舒适性。

(2) 两种送风方式下的空气流速分布较为相似, 空调工作区的送风速度基本稳定在 0.1m/s~

0.3m/s。两者均满足《室内空气质量规范》(GB/T18883-2002)评价标准。

(3) 通过对比站厅在垂直方向和水平方向上的室内湿度场可以发现, 低温送风工况下的室内空气相对湿度普遍低于常规送风工况。说明低温送风方式的除湿能力更强, 更有利于提高人体的热舒适度。

(4) 两种送风工况下站厅 CO₂ 浓度场分布相似且都符合设计标准。低温送风方式下站厅室内 CO₂ 浓度更低。

综上, 低温送风工况能够保证站厅内对温度、空气流速和湿度的要求, 又能够降低 CO₂ 浓度, 可以获得较高的室内空气质量。

参考文献:

- [1] 石俊龙. 低温送风空调系统风口特性及舒适性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
- [2] 孙成才, 周勃, 詹岭. 低温送风空调系统的数值模拟分析[J]. 建筑节能, 2019, 47(7): 36-39.
- [3] 李镛. 低温送风系统在地铁空调中的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2010.
- [4] 殷平. 冰蓄冷低温送风系统设计方法(1): 室内计算参数、舒适度、室内空气质量[J]. 暖通空调, 2004(5): 59-65.
- [5] 李冬冬, 邵飞, 卢宏健, 等. 低温送风温湿度控制数值仿真研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(3): 72-77.
- [6] 冯劲梅, 唐斐骁, 朱倩翎. 基于 CFD 的低温送风冷辐射吊顶空调系统设计研究[J]. 流体机械, 2020, 48(8): 71-77.
- [7] 于霄, 郝晋靓, 陈璐, 等. 地铁车站空气污染物影响因素探讨[J]. 环境工程, 2019, 37(5): 129-133.
- [8] 陈永江. 地铁车站公共区 CO₂ 浓度测试及新风量分析研究[J]. 制冷与空调, 2017, 31(2): 122-129.
- [9] 任伟. 地铁站空调不同送回风方式下污染物分布特征的模拟研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [10] 罗燕萍, 韩瑶, 李晓锋, 等. 闭式地铁系统内部 CO₂ 浓度模拟研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(6): 37-43.
- [11] 朱波. 基于客流量的地铁污染物浓度计算及变化特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [12] 樊越胜, 胡泽源, 刘亮, 等. 西安地铁环境中 PM₁₀、PM_{2.5}、CO₂ 污染水平分析[J]. 环境工程, 2014, 32(5): 120-124.
- [14] Qu X, Revankar S T, Tian M. Numerical simulation of bubble formation and condensation of steam air mixture injected in subcooled pool[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017.
- [15] Samkhaniani N, Ansari M R. Numerical simulation of superheated vapor bubble rising in stagnant liquid[J]. Heat and mass transfer, 2017, 53(9): 2885-2899.
- [16] Samkhaniani N, Ansari M R. The evaluation of the diffuse interface method for phase change simulations using OpenFOAM[J]. Heat Transfer-asian Research, 2017.
- [17] Weller H G, Tabor G, Jasak H, et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques[J]. Computers in Physics, 1998, 12(6): 620-631.
- [18] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [19] Weller H G. A New Approach to VOF-based Interface Capturing Methods for Incompressible and Compressible Flow[R]. 2008.
- [20] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.

(上接第 538 页)