

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-061-06

超长水下公路隧道侧向 重点排烟系统合理排烟量分析

张宇

(中铁第五勘察设计院集团有限公司 北京 102600)

【摘要】 苏州某水下公路隧道全长 9km, 最大断面面积约 142m², 其距离长、断面大的特点对隧道排烟系统的合理性设计提出了更高的要求, 而排烟量的合理性是隧道排烟系统合理化设计的前提。为此, 先采用理论公式进行计算, 后采用 FDS 数值模拟的方法研究了隧道侧向重点排烟系统在火灾荷载为 50MW, 排烟量分别为 220m³/s、240m³/s、260m³/s 时的烟气蔓延范围、排烟阀处温度、流速、排烟效率的变化规律。结果表明: 超长水下公路侧向排烟系统在 50MW 火灾下, 不同排烟量时排烟阀排烟效率、烟气蔓延范围均无显著差异, 且排烟阀处温度、流速均在要求范围内; 理论计算与数值模拟均表明合理排烟量的计算值为 220m³/s, 设计值为 260m³/s。研究结果可为水下长隧道侧向重点排烟系统排烟量的理论计算提供方案参考。

【关键词】 超长水下隧道; 侧向重点排烟系统; 合理排烟量; FDS 数值模拟

中图分类号 U458.1 文献标识码 A

Analysis of Reasonable Smoke Discharge Capacity of Lateral Key Smoke Exhaust System in Ultra-long Underwater Highway Tunnel

Zhang Yu

(China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Beijing, 102600)

【Abstract】 The length of an underwater highway tunnel in Suzhou is 9km, and the maximum cross-section area of the tunnel is about 142m². The characteristics of long distance and large cross-section put forward higher requirements for the rational design of the tunnel smoke exhaust system, and the rationality of the smoke exhaust is the premise of the rational design of the tunnel smoke exhaust system. Therefore, this paper first used theoretical formula for calculation, and then used FDS numerical simulation method to study the change law of smoke spread range, the temperature of smoke exhaust valve, flow rate at the smoke exhaust and smoke exhaust efficiency of the tunnel lateral key smoke exhaust system when the fire load was 50MW and the smoke exhaust volume were 220m³/s, 240m³/s and 260m³/s, respectively. The resulted show that there was no significant difference in smoke efficiency and smoke spread range of the exhaust valve under the condition of 50MW fire of the ultra-long underwater highway side smoke exhaust system under different theoretical smoke volume, and the temperature and flow rate at the exhaust valve were within the required range. Both theoretical calculation and numerical simulation showed that The theoretical value of the reasonable exhaust volume was 220m³/s and the design value was 260m³/s. Further, it would provide a scheme reference for the theoretical calculation of the smoke output of the lateral key smoke exhaust system of the underwater long tunnel.

【Keywords】 Ultra-long underwater tunnel; Lateral key smoke exhaust system; Reasonable smoke emission; FDS numerical

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目 (2019-B20)

作者 (通讯作者) 简介: 张宇 (1995.08-), 男, 硕士, 助理工程师, E-mail: 820494723@qq.com

收稿日期: 2021-10-14

simulation

0 引言

随着我国经济实力与地下工程技术的快速发展,为了缓解交通压力,提高经济发展速度,跨湖、跨江、跨海等水下长隧道的需求日益增加。这些水下隧道具有超长、超宽的发展趋势,一旦隧道内发生火灾,其距离长、断面大、交通量大的特点对隧道排烟系统的合理性设计提出了更高的要求,而确定合理的排烟量是超长、超宽水下公路隧道进行排烟系统设计的前提。

排烟量的研究目前主要集中在公共建筑、民用建筑、地铁隧道等领域^[1-5],而对于水下公路隧道的研究较少。且公路隧道内排烟量的研究主要集中在长度短、截面小的隧道,如2018年王兆阳等^[6]借助FDS对上海某长7.8km,宽10m,高4m的双层盾构隧道在火灾工况下,热释放率为8MW的支管重点排烟系统进行数值模拟,分析了30、40、50、60m³/s排烟量下隧道内烟气的扩散范围、温度场及能见度的变化规律,结果表明:40m³/s为排烟量的临界指标。除此之外,排烟系统形式、排烟口的设置、热释放速率的设定等均对排烟量的合理性存在影响。如姜学鹏等^[7,8]在2012年研究了竖向集中排烟模式下不同排烟量对烟气控制效果的影响;在2018年采用FDS火灾模拟软件对东湖隧道侧向集中排烟系统下不同排烟量时烟气蔓延范围、排烟效率、温度场、人员疏散微环境排烟效果等指标进行定量分析,得到在20MW火灾时合理排烟量为300m³/s。2020年张新等^[9]通过理论分析与FDS数值模拟研究了纵向通风与侧向集中排烟耦合作用下公路隧道火灾热释放率为20MW时不同排烟量对烟气蔓延范围、2m高度处能见度、排烟口流速、排烟道流速、排烟效率、排热效率等6个关键参数的影响,最终确定该公路隧道的合理排烟量为120m³/s。本文的研究对象苏州某水下超长公路隧道因空间结构特点,采取侧向重点排烟系统,火灾荷载依据车型比例和远期交通量,设定为50MW^[10-13]。现有公路隧道排烟量的相关研究无法直接应用于本项目,因此需要开展超长、超宽结构特点及侧向重点排烟系统形式下隧道合理排烟量的研究。

本文先用理论公式进行计算,后采用FDS数值模拟的方法研究了火灾荷载为50MW的侧向重

点排烟系统在计算排烟量分别为220m³/s、240m³/s、260m³/s时的烟气蔓延范围、排烟阀处温度、流速、排烟效率的变化规律,以期为水下长隧道侧向重点排烟系统的合理排烟量计算提供方案参考。

1 工程概况

苏州某公路隧道水下段长9km,宽17m,内部根据高度不同,分为浅段、中段、深段三个断面,其中深段隧道的行车道路面到排烟道顶隔板底面的高度最高,为8.35m。隧道全线采用双向六车道高速公路标准,隧道设计速度120km/h。拟在湖中不设人工岛,仅在湖西、湖东岸设排风塔,靠侧向重点排烟系统解决超长水下隧道的排烟需求。

2 理论计算

火源烟气生成速率是决定机械排烟系统排烟量的关键因素,它由火源上方的烟羽流质量流量决定,本文根据隧道的车型比例和远期交通量,选取火灾规模为50MW^[10-13],考虑到隧道内火灾的发生点通常为隧道内或墙边,则烟羽流质量流量依据《建筑防排烟技术规程》(DBJ08-88-2006),采取相应的轴对称型烟羽流与墙型烟羽流模型进行分析。

(1) 烟羽流模型

轴对称型烟羽流模型:

$$\text{当 } Z > Z_1 \text{ 时, } M_\rho = 0.071Q_c^{1/3}Z^{5/3} + 0.0018Q_c \quad (1)$$

$$\text{当 } Z \leq Z_1 \text{ 时, } \begin{cases} M_\rho = 0.032Q_c^{3/5}Z^{2/5} \\ Z_1 = 0.166Q_c^{2/5} \end{cases} \quad (2)$$

墙型羽流模型:

$$\begin{aligned} &\text{当 } Z > Z_1 = 0.166Q_c^{2/5} \text{ 时,} \\ &M_\rho = 0.0355(2Q_c)^{1/3}Z^{5/3} + 0.0018Q_c \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{当 } Z = Z_1 = 0.166Q_c^{2/5} \text{ 时, } M_\rho = 0.035Q_c$$

(4)

$$\text{当 } Z < Z_1 = 0.166Q_c^{2/5} \text{ 时, } M_\rho = 0.016(2Q_c)^{3/5}Z$$

(5)

(1)~(5)式中: Q_c 为热释放速率的对流部

分，一般取值为 $Q_c=0.7Q_{kW}$ ； Z 为燃料面到烟层底部的高度，m（取值应大于或等于最小清晰高度与燃料面高度之差）； Z_1 为火焰极限高度，m； M_p 为烟羽流质量流量，kg/s。

隧道的排烟量基于烟羽流模型计算结果，并进一步的根据以下列式进行计算。

(2) 烟层平均温度与环境温度的差应按照下式计算：

$$\Delta T = KQ_c / M_p C_p \quad (6)$$

式中： ΔT 为烟层平均温度与环境温度的差，K； C_p 为空气的定压比热，一般取 $C_p=1.01\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； K 为烟气中对流放热量因子，取 $K=1.0$ 。

(3) 每个防烟分区排烟量计算：

$$V = M_p T / \rho_0 T_0 \quad (7)$$

$$T = T_0 + \Delta T \quad (8)$$

式中： V 为排烟量， m^3/s ； ρ_0 为环境温度下的气体密度， kg/m^3 ，通常 $T_0=293.15\text{K}$ ， $\rho_0=1.2$ (kg/m^3)； T_0 为环境的绝对温度，K； T 为烟层平均绝对温度，K。

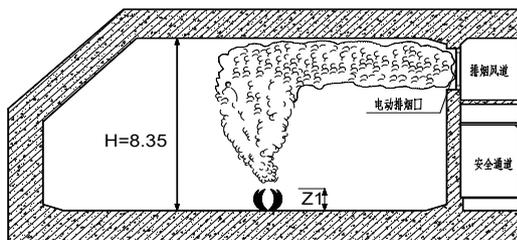


图 1 深段隧道横断面图

Fig.1 Cross section of deep tunnel

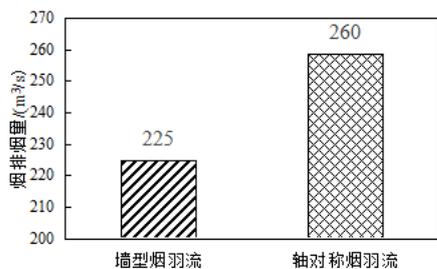


图 2 不同烟羽流模型下的设计排烟量

Fig.2 Design smoke emission under different plume models

如图 1 所示，考虑火灾最不利场景，选取深段隧道进行分析，当所产生的烟气全部被排出时，烟

气层底部即为隧道拱顶下表面，此时 Z 即为行车道路面到隧道顶部的高度，取 $Z=8.35\text{m}$ 。代入公式

(1) ~ (8)，则理论计算排烟量最大为 $220\text{m}^3/\text{s}$ 。进一步考虑管道漏风等不利因素，为提高隧道安全系数，保证火灾时烟气及时排出隧道，根据《建筑防排烟系统技术标准》(GB 51251-2017) [11] 排烟量按 20% 的富余量进行设计，计算结果如图 2 所示，在轴对称烟羽流模型下，排烟量最大，此时排烟量的设计值约为 $260\text{m}^3/\text{s}$ 。

3 数值模拟

3.1 模型设置

为了进一步的验证理论计算结果的合理性，本文选取了中间一段长度为 1km 的深段隧道，利用火灾烟气模拟软件 FDS 对火灾发生时烟气蔓延范围、排烟阀处的温度、流速、排烟效率的变化规律进行了分析。如图 3 所示，物理模型中隧道的行车道断面尺寸为 1000m (长) $\times 17.5\text{m}$ (宽) $\times 8.35\text{m}$ (高)，排烟道断面尺寸为 1000m (长) $\times 5\text{m}$ (宽) $\times 3\text{m}$ (高)，排烟阀尺寸为 $2\text{m} \times 4\text{m}$ ，间隔 60m 对称分布。火源均设置在隧道中心处，在隧道顶棚下方 0.5m 处设置热电偶，并沿隧道纵向方向间隔 10m 进行布置，火源面积设定为 10m^2 ，火源功率设定为 50MW ，单位面积热释放速率为 $5000\text{kW}/\text{m}^2$ ，火灾增长方式为 1s 达到稳定。为测量排烟阀处温度及流速，在每组排烟阀处布置一组热电偶及流速测点。通过在 FDS 输入文件中，引入参数 $\text{MASS FLUX X SPEC_ID}=' \text{CARBON DIOXIDE}'$ 提取各个排烟口不同时刻排除 CO_2 的质量流量，用于计算排烟效率。模型的环境温度设置为 20°C ，压强设置为 101kPa ，模拟时长为 600s 。

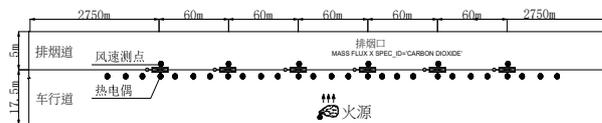


图 3 隧道模型图

Fig.3 Tunnel model

3.2 网格划分

网格尺寸是影响模拟结果的精度与效率的关键参数。本文采用被广泛应用的 $D^*/\delta x$ 标准，用以估计网格的精度 [14]。其中 D^* 为特征长度， δx 为网格尺寸，NIST 进行的一系列比较试验发现，当网

格大小在 $D^*/16$ 和 $D^*/4$ 之间时, 模拟结果与试验结果吻合良好。计算 D^* 的具体公式如下:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a c_p T_a \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (9)$$

式中: \dot{Q} 为模拟火源热释放速率, kW; ρ_a 为环境空气密度, kg/m^3 ; c_p 为环境空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T_a 为环境温度, K; g 为重力加速度, m/s^2 , 取 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

当火源热释放速率为 50MW 时, 此时计算出的建议网格尺寸范围为 0.28~1.14m。为验证网格精度, 从 0.28~1.14m 的范围内选择了三个网格尺寸 (0.4m, 0.5m, 1.0m) 进行网格独立性分析, 距火源 40m 位置时不同网格尺寸的垂直温度曲线, 如图 4 所示, 当网格尺寸位于 0.4m 至 0.5m 间时, 温度分布曲线之间差异很小; 为节省计算时间的同时获得良好的模拟效果, 试验选择尺寸为 0.5m 的网

格进行模拟。

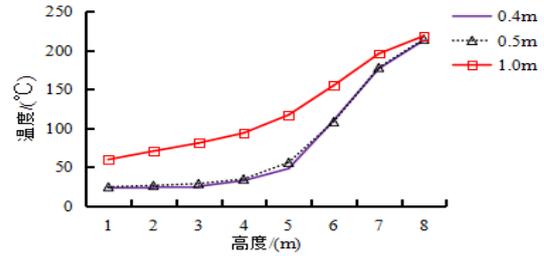


图 4 不同网格尺寸模拟结果

Fig.4 Simulation results of different grid sizes

3.3 工况设计

模拟工况下不考虑管道漏风等因素, 故不同工况下排烟量均指计算排烟量。为了便于分析, 提高排烟系统的安全性, 在理论计算排烟量 $220\text{m}^3/\text{s}$ 基础上, 依次选取了侧向集中排烟量分别为 $220\text{m}^3/\text{s}$ 、 $240\text{m}^3/\text{s}$ 、 $260\text{m}^3/\text{s}$ 时的火灾蔓延范围、排烟阀温度、排烟阀处流速、排烟阀排烟效率进行对比分析; 如表 1 所示, 火灾时开启上下游三个相邻排烟阀。

表 1 火灾荷载 50MW 下排烟量数值模拟工况

Table 1 Numerical simulation conditions of smoke emission under fire load of 50MW

编号	火灾荷载 (MW)	排烟量 (m^3/s)	排烟阀间距 (m)	火源位置	排烟阀面积 (m^2)	开启组数
A01	50	220	60	中间车道	2×4	上 3 下 3
A02	50	240	60	中间车道	2×4	上 3 下 3
A03	50	260	60	中间车道	2×4	上 3 下 3

4 结果与讨论

4.1 烟气蔓延范围

烟气的蔓延距离是以顶板下 0.5m 处的温度达到 60°C 为依据, 则不同排烟量下隧道内烟气稳定后向火源两侧的蔓延距离, 如表 2 所示。结果表明, 火源功率为 50MW 时, 相同排烟口设置下, 随着排烟量的增大, 烟气整体蔓延范围减小, 排烟量每

增加 $20\text{m}^3/\text{s}$, 烟气整体的蔓延范围减少 40m。但由于侧向排烟模式下隧道内没有设置纵向通风, 故火源下游烟气蔓延范围与上游基本相同。整体而言, 排烟量从 $220\text{m}^3/\text{s}$ 到 $260\text{m}^3/\text{s}$ 的过程, 烟气的整体蔓延范围无显著性差异, 考虑排烟量增加带来投资的加大, 排烟量宜取值 $220\text{m}^3/\text{s}$ 。

表 2 不同工况烟气蔓延数值

Table 2 Smoke spread values under different working conditions

编号	火灾荷载 (MW)	排烟量 (m^3/s)	排烟道尺寸 (m^2)	负方向蔓延长度 (m)	正方向蔓延长度 (m)	合计
A01	50	220	4.5×2.9	240	240	480m
A02	50	240	4.5×2.9	210	230	440m
A03	50	260	4.5×2.9	200	200	400m

4.2 排烟阀流速分布规律

基于 4.1 节分析结果, 本文选取火源上、下游

各 200m 的范围进行分析。如图 5 所示, 在不同排烟量下, 排烟口流速的分布曲线近似成 W 型的上

下对称分布，特别是上、下游的第三个排烟阀处的流速会出现突增的现象，其原因在于侧向排烟情况模式下，排烟口对称开启时排烟口处的烟气流速基本成对称分布，且排烟风机设置在上、下游的端头，故距离排烟风机越近的排烟口，其烟气流速越大。随着排烟量的增加，排烟口处的最大流速略大于标准值 10m/s，但由于测点布置为排烟口中心处，综合考虑所有因素，220m³/s~260m³/s 的排烟量下的排烟口内气体流速均值小于 10m/s，不会发生吸穿现象，符合规范要求。

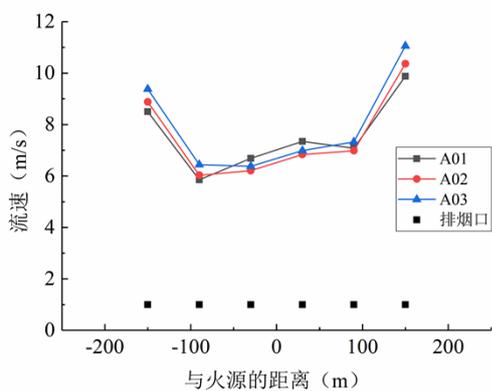


图 5 排烟阀流速分布

Fig.5 Flow velocity distribution of exhaust valve

4.3 排烟阀温度分布

不同排烟量时排烟阀处的温度分布，如图 6 所示。不同排烟量下，排烟阀处温度均呈现由火源处向上、下游降低的倒 V 字形趋势，其中上、下游的对称排烟阀处温度基本相同。原因在于侧向重点排烟系统下，火源附近排烟阀处的烟气温度较高，受烟羽流影响较大，烟羽流在隧道顶部和墙面被冷却后，密度增加，重力大于浮升力，而出现下沉，向四周扩散，故上、下游排烟阀处温度会逐渐降低。

同时从图 6 中可以看出，排烟阀处温度均在 180℃ 以下，不会损坏排烟口，故不会影响排烟阀的连续正常工作。

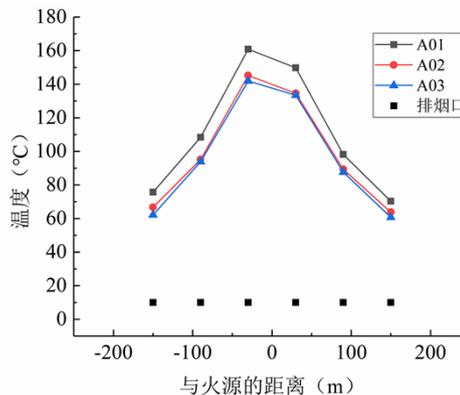


图 6 排烟阀温度分布

Fig.6 Temperature distribution of exhaust valve

4.4 排烟效率分析

在机械排烟的过程中，排烟口会发生对新鲜空气的卷吸现象，导致吸入排烟口的气体中不止有烟气，还含有新鲜空气，但烟气中成分众多，故烟气的生成量与排出量难以准确测量。为了准确测量排烟口的排烟量，本文选取燃烧的主要产物 CO₂ 作为参考依据，将排烟效率定义为排烟口所排出气体中所含的 CO₂ 量与燃烧产物所产生的 CO₂ 量之比^[9]。不同排烟量下，排烟阀处排烟效率如表 3 所示。从中可以看出，不同排烟量下，单个排烟阀的排烟效率整体呈现两边高、中间低的趋势，且最高排烟阀效率约 17%，最低约 10%。通过分析可知，侧向重点排烟模式下，随着排烟量的增加，排烟阀的整体排烟效率也随之增加，同时不同排烟量下的排烟效果均高于 70%，但无显著差异，综合考虑成本，排烟量宜取值 220m³/s。

表 Error! No text of specified style in document. 排烟效率分析

Table 3 Smoke extraction efficiency analysis

编号	火源功率 (MW)	排烟阀面积 (m ²)	排烟量 (m ³ /s)	各开启排烟阀排烟百分数 (%)						合计
				S1	S2	S3	X1	X2	X3	
A01	50	2×4	220	16.71%	9.53%	10.00%	9.53%	9.45%	16.73%	71.95%
A02	50	2×4	240	15.98%	9.80%	10.52%	10.13%	9.68%	15.92%	72.03%
A03	50	2×4	260	16.42%	10.42%	10.51%	10.57%	10.39%	16.50%	74.81%

注：S 代表上游排烟阀，X 代表下游排烟阀。

5 结论

本文先采用理论公式进行计算，后采用 FDS 数值模拟的方法研究了苏州某超长水下隧道侧向

重点排烟系统在火灾荷载为 50MW，排烟量分别为 220m³/s、240m³/s、260m³/s 时的火灾蔓延范围、排烟阀温度、排烟阀处流速、排烟阀排烟效率的变化

规律,得到如下结论:

(1) 超长水下隧道的合理排烟量宜采用轴对称烟羽流计算模型;

(2) FDS 模拟指出, $220\text{m}^3/\text{s}$ 、 $240\text{m}^3/\text{s}$ 、 $260\text{m}^3/\text{s}$ 排烟量下,随着排烟量的增加,降低了火灾时烟气蔓延的范围,增大了排烟阀的整体排烟效率,但均无显著差异,且排烟阀处温度、流速均满足规范要求;

(3) 理论计算与 FDS 火灾模拟均指出苏州某超长隧道在火灾规模 50MW 下的合理排烟量的计算值为 $220\text{m}^3/\text{s}$,设计值为 $260\text{m}^3/\text{s}$ 。

参考文献:

- [1] 陈颖,李思成,李胜利,等.基于烟气沉降的地下车库火灾排烟量计算[J].消防科学与技术,2011,30(6):488-491.
- [2] 李俊梅,李炎锋,孙育英,等.关于中庭建筑防排烟系统设计中排烟量的探讨[J].建筑科学,2009,25(2):68-71.
- [3] 张熙.某地下商场机械排烟量优化模拟研究[C].2016 消防科技与工程学术会议论文集,2016:215-220.
- [4] 秦宁然,戴忠,戴淑娟,等.某铁路隧道紧急救援站排烟量的确定[J].消防科学与技术,2017,36(9):1222-1224.
- [5] 袁中原,谢元一,赵鹏,等.地铁隧道火灾双点排烟的临界排烟量研究[J].消防科学与技术,2019,38(4):479-482.
- [6] 王兆阳,朱合华,闫治国,等.双层盾构隧道支管排烟量数值模拟[J].消防科学与技术,2018,37(2):177-180.
- [7] 姜学鹏,张阳树,徐志胜,等.不同集中排烟量对隧道火灾烟气控制效果的影响[J].科技导报,2012,30(15):42-46.
- [8] 姜学鹏,吴锦东,王宝伟,等.侧部集中排烟隧道排烟量优化研究[J].工业安全与环保,2018,44(11):6-9,100.
- [9] 张新,李建.公路隧道火灾合理排烟量计算分析[J].劳动保护,2020,(9):90-94.
- [10] JTG/T D70/2-02-2014,公路隧道通风设计细则[S].北京:人民交通出版社,2014:80-85.
- [11] GB 51251-2017,建筑防烟排烟系统技术标准[S].北京:中国计划出版社,2017:27-28.
- [12] DG/TJ 08-2033-2017,道路隧道设计标准[S].上海:同济大学出版社,2017:106-108.
- [13] 梁园.超长水下隧道重点排烟量计算研究[J].铁道建筑技术,2019,(4):51-55.
- [14] Hostikka S. Fire Dynamics Simulation (Version 5) User's Guide[S]. 2010.
- [15] Lindemann J, Keck T, Wiesmiller K, et al. Nasal air temperature and airflow during respiration in numerical simulation based on multislice computed tomography scan[J]. American Journal of Rhinology, 2006,20(2): 219-223.
- [16] 于申,刘迎曦,孙秀珍,等.鼻腔气道结构对鼻腔加湿加湿功能影响的数值模拟[J].医用生物力学,2010,(6):5.
- [17] Daviskas E, Gonda I, Anderson S D. Mathematical modeling of heat and water transport in human respiratory tract[J]. Journal of Applied Physiology, 1990,69(1):362-372.
- [18] 王曼曼,葛淼,尹万青.中国成年人潮气量正常参考值与地理因素的关系[J].西安文理学院学报:自然科学版,2009,12(1):5-9.
- [19] 葛淼,沙吉达木·阿依甫江.中国健康成年人呼吸频率正常参考值与地理因素的关系[C].2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第四卷),2019:163-173.
- [20] GB/T 18883-2002,室内空气质量标准[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [21] 胡松涛,辛岳芝,刘国丹,等.高原低气压环境对人体热舒适性影响的研究初探[J].暖通空调,2009,39(7):5.

(上接第 53 页)