

DOI: 10. 12138/j. issn. 1671-9638. 20256793

· 综述 ·

口罩泄漏率评估方法研究进展

史 盈, 宫国卓, 金叔宾, 陈倬为, 户文成, 汪彤

(北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 北京 100054)

[摘要] 泄漏率是衡量口罩防护效果的核心指标, 本文回顾了当前口罩泄漏率评估的试验方法和数值模拟研究现状, 发现泄漏率与多种因素有关。随后进一步对比分析口罩的内外向泄漏率, 强调制定外向泄漏率标准化测试方法的重要性。最后提出未来口罩泄漏率评估的发展方向, 旨在实现对口罩泄漏率全面、科学的评价, 为制定公共卫生政策提供指导。

[关键词] 口罩泄漏率; COVID-19; 试验方法; 数值模拟

[中图分类号] R181.3⁺2

Advances in assessment methods for mask leakage rates

SHI Ying, GONG Guozhuo, JIN Shubin, CHEN Zhuowei, HU Wencheng, WANG Tong (Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100054, China)

[Abstract] Leakage rate is a critical metric for evaluating protective efficacy of masks. This paper reviews the current status of experimental methods and numerical simulation studies for assessing the leakage rates of masks, and reveals that leakage rates are related to multiple factors. The inward and outward leakage rates of masks are further compared and analyzed, and the importance of developing a standardized test method for outward leakage rate is emphasized. Finally, future development direction of mask leakage rate assessment is proposed, aiming to realize the scientific and comprehensive assessment on mask leakage rate and provide guidance for formulating public health policies.

[Key words] mask leakage rate; COVID-19; testing method; numerical simulation

现有研究表明, 新型冠状病毒主要通过吸入唾液滴蒸发和呼吸产生的气溶胶传播^[1-2], 也可以通过接触被感染个体或物体表面传播^[3-4], 佩戴口罩是限制其在人群中传播的有效手段^[5-6]。然而, 即使在佩戴口罩情况较好的国家, 也仍然有大规模感染发生, 故科学评估口罩防护性能以指导口罩佩戴至关重要。

口罩的防护性能主要体现在两个方面: 过滤效率与泄漏率^[7], 前者表征口罩滤材对颗粒物的拦截量, 后者表征口罩滤材及边缘处的泄漏量。与过滤效率相比, 泄漏率可以更全面地评估口罩防护效果。

但准确评估口罩的泄漏率非常具有挑战性。口罩泄漏率评估包括两个方面^[8]: ①内向泄漏, 外界气溶胶通过口罩滤材及边缘部分泄漏进口罩内部; ②外向泄漏, 呼出气体通过口罩滤材和边缘处泄漏至环境中。前者是口罩对佩戴者的保护(内向保护), 后者是口罩对周围人群和环境的保护(外向保护)。在新型冠状病毒感染大流行期间, 口罩的外向保护能力相较于内向保护明显不足, 这一点在无症状感染者中尤为显著。

目前学界对于内外向泄漏的重视程度存在显著差异。内向泄漏率(total inward leakage, TIL)的

[收稿日期] 2024-07-23

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3701700); 北京市科技项目(Z231100003823017)

[作者简介] 史盈(2001-), 女(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生在读, 主要从事职业安全、个人防护研究。

[通信作者] 宫国卓 E-mail: ggzhuo@163.com

测试方法在国内外已形成标准^[9-10],而对于外向泄漏率(total outward leakage, TOL)的评估研究较少,亟需构建标准化的测试方法。基于此,本文梳理了当前主要的口罩泄漏率测试方法研究,以便于未来对口罩防护性能进行准确、科学的评估。

1 口罩泄漏率评估研究现状

国内外学者通过试验和模拟,评估了不同类型的口罩在实际应用中的防护效果,以期增强其在公共卫生事件中的防护作用。当前针对过滤效率的测

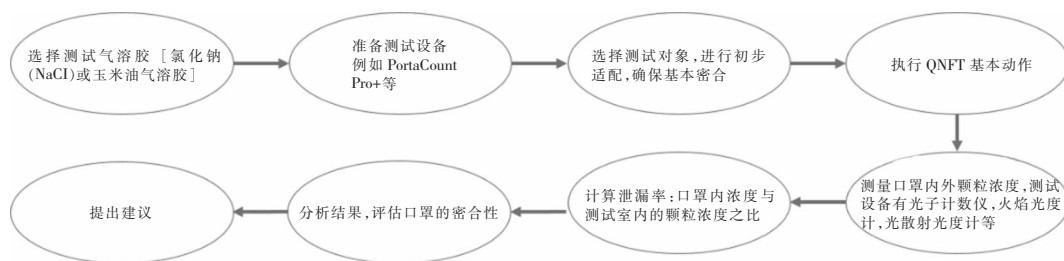


图 1 QNFT 测试步骤

Karuppasamy 等^[11]和 Onishi 等^[12]对改良口罩和正常口罩进行对比发现,密封外科口罩与改良口罩的 TIL 得到了改善,但仍高于 N95 口罩。也有学者使用不同尺寸头模与不同型号的口罩进行组合对比,发现即使呼吸器滤材的过滤效率很好,但如果呼吸器不适合佩戴者的脸部尺寸,总体防护性能也会降低^[13]。因此在设计口罩时应该将优先级从滤材的过滤效率转移到建立更好的密合性^[14]。

部分学者通过 QNFT 确定呼吸器对人体的拟合因子,当拟合因子可信时再进行 TIL 检测,这种方法较为精确。在 TIL 测试中,不同的气溶胶介质和粒径大小^[15]会对测量结果产生影响,如玉米油气溶胶测得的 TIL 明显高于 NaCl 气溶胶,这可能是因为玉米油气溶胶的计数中位径比 NaCl 大两倍,更容易被捕获。因此,在使用不同气溶胶测试时,不能将 TIL 值进行任意泛化。在恒定流量下测试口罩对不同粒径的穿透性能时,面部密封处泄漏的颗粒物数量远超通过过滤介质的数量^[16]。随着粒径大小的增加,面部密封处颗粒物的穿透量也会增加:以 N95 口罩为例,对于 0.1 μm 的颗粒物,数量增加了约 10 倍;对于 1 μm 的颗粒物,增加了约 20 倍。

在未能找到志愿者进行 TIL 测试时,通常会选择头模进行测试。这种方法的优势是可以进行呼吸频率、流量等参数的调整,但也会因为头模无法模拟

试体系已趋于成熟,未来可能需要寻求材料上的改进与创新。本文主要关注口罩整体泄漏率的评估。

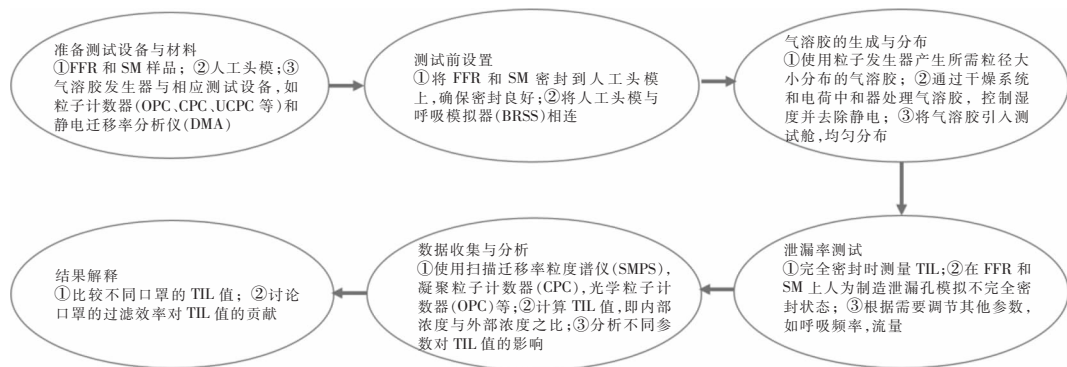
1.1 TIL 研究现状 在评估口罩防护效能方面,TIL 是关键指标,它指的是在规定的试验条件下,受试者吸气时,由口罩过滤材料及面部密封处泄漏入口罩内部的气溶胶浓度与口罩外测试环境中气溶胶浓度的比值。部分学者利用定量拟合测试(quantitative fit testing, QNFT)来确定口罩的 TIL。美国职业安全与健康管理局(OSHA)将其定义为在测试对象完成一系列头部运动后,环境中的气溶胶浓度与口罩中的浓度之比,测试步骤见图 1。

人类皮肤而引起误差。测试步骤见图 2。

研究^[17-19]发现,口罩防护性能受到气溶胶颗粒大小和呼吸流量(MIF)的显著影响,呼吸频率对于 TIL 的作用并不大,但这些影响并不是在所有粒径范围内均成立。对于 N95 口罩和医用外科口罩,当微粒 $>50\text{ nm}$ 时,TIL 不再受颗粒大小影响,但是 MIF 的影响依然显著。Rengasamy 等^[20]的研究同样表明,50 nm 是最易穿透的颗粒大小值,同时,随着 MIF 的增加,TIL 值也会增加。

上述研究均是在完美密封下进行的,不符合现实情境。为了模拟更真实的佩戴情况,需要在研究中引入不同尺寸的泄漏点或插入不同直径的采样针。试验^[21]发现,TIL 值与泄漏点尺寸呈正相关,随着吸入速率的增加,鼻附近的泄漏区防护因子(TIL 的倒数)远高于下颌和脸颊处,这说明提高鼻附近的贴合度可以大幅提高口罩的防护效能^[22]。也有学者通过对口罩表面进行面积划分来测量压力分布,进而计算得到泄漏流量,结果表明,密封性较好的口罩会使压力积聚,迫使 40%~80% 的流量通过滤材,降低 TIL 值^[23]。这种方法在使用压力探针测量时得到的是静态压力,无法完全捕捉到呼吸过程中的动态压力变化,因此应用较少。

除了引入泄漏点的方法外,还可以通过一些试验技术如红外成像(infrared imaging)、示踪颗粒等



注:FFR 表示 N95 口罩,SM 表示医用外科口罩,OPC 表示光学粒子计数器,CPC 表示凝聚粒子计数器,UCPC 表示超细凝结核子计数器,DMA 表示静电迁移率分析仪,BRSS 表示呼吸模拟器,SMPS 表示扫描迁移率粒度谱仪。

图 2 实验室头模 TIL 测试步骤

将口罩周围的气流进行可视化处理,得到不完美密封下的泄漏位置信息。红外成像是通过红外相机捕捉和分析由气流(如呼出的空气)引起的皮肤表面温度的变化来检测泄漏,在测试口罩 TIL 上具有显著优势^[24]。但由于分辨率有限,仅限于识别大量泄漏^[25]。研究^[24]发现,泄漏最常发生在鼻和脸颊骨区域,但某些液滴也可以绕过口罩从边缘泄漏,带有呼气阀的口罩更是有大量液滴经阀门泄漏^[26],大大降低了口罩的防护性能。该技术可以与粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)^[27-28]、示踪粒子(CO₂^[28]、水与甘油的混合物^[26, 29]、彩色水雾^[30-31])等测试手段相结合,以得到定量结果。Marco 等^[31]使用红外相机记录呼出的彩色水雾,并通过计算发现不同类型口罩间存在泄漏程度的差异,TIL 为 3.9%~25.4%,其中紧密拟合的口罩在降低 TIL 方面表现更好,从定量角度强调了口罩密合性的重要。

随着数值模拟能力的不断提高,计算机可以使用有限元模型模拟面部和口罩之间的间隙,并结合流体流动情况量化泄漏流量,低成本研究多参数(活动模式、粒径范围、泄漏点等)对口罩泄漏率的影响。通常使用计算机断层扫描(computed tomography, CT)或自主建模得到不同面部的头模佩戴口罩的情况,并获取面部与口罩之间的缝隙轮廓,随后将该剖面输入模型,从而研究不同参数对气溶胶扩散的影响。

从流体力学角度,可将吸入气流建模为一个瞬时的下沉气流,测试流量通常选择标准^[32]对应的 85 L/min。Baumann 等^[33]通过对 3 种佩戴方式下 4 种活动的双尺度数值模拟,发现在口罩贴合不完美的情况下,大部分流量会流向泄漏区域,但仍然可以减少进入口罩的颗粒物数量。以咳嗽为例,在内向保护的情况下,佩戴口罩可以使进入口罩的颗粒

减少一半^[34]。口罩在抑制液滴传播方面虽然有效,但研究^[35]发现,一旦缝隙区域超过总面积的 0.1%,N95 口罩就无法提供 $\geq 95\%$ 的过滤效率。Xi 等^[36]为了进一步研究缝隙对口罩泄漏的影响,将口罩边缘划分为不同区域以模拟不同位置的泄漏后发现,即使是 0.5 cm² 的小缝隙也会导致 9% 的泄漏,最常见的泄漏位置在鼻附近。Xu 等^[37]引入有限元方法(finite element method, FEM)模型分析发现,即使缝隙面积略有增加,过滤效率与拟合因子也会显著降低,这种泄漏会导致感染风险增加 3~7 倍。

1.2 TOL 研究现状 TOL 通常用来表征在规定的检测条件下,受试者呼气时,由口罩过滤材料及面部密封处泄漏至口罩外的气溶胶浓度与口罩内气溶胶浓度的比值。最常用的方法是在一个特定的检测舱室内放置两个头模,一个模拟“发射源”(exhaling),一个模拟“接收体”(inhaling),通过测量两者在不同佩戴方式进行不同活动时的气溶胶浓度来确定外向保护效能^[38-39]。

在咳嗽、打喷嚏等活动时,“发射源”附近会形成向前移动的射流,佩戴口罩会改变气溶胶的传播方向,减少向外排放的颗粒数^[39]。通过比较“发射源”与“接收体”在咳嗽和呼吸时相对位置的关系,发现口罩用于外向保护时的效果优于内向保护^[38]。但这两种活动存在一些区别,当“发射源”与“接收体”以 0.9 m 的距离“面-面”放置进行呼吸试验时,在“发射源”处佩戴口罩只能使气溶胶浓度降低 16%,在 1.8 m 的距离下只能降低 49%,远低于口罩外向保护性能的预期;而在进行咳嗽试验时,在 0.9 m 时降低 81%,在 1.8 m 时降低 78%,符合预期。这表明口罩的外向防护性能在咳嗽时表现比呼吸时更好。

Chiera 等^[40]通过差压计等传感器测量“存在泄

漏”与“完美贴合”两种佩戴情况下,头模口部与外部环境的压力差和气流体积来确定从口罩中呼出气流的流量,发现不同类型的口罩面部密封处的泄漏比率为 10%~95%。Myers 等^[41]通过台式测试系统比较有无呼吸阀的两种 N95 口罩和医用外科口罩的 TOL,发现呼气阀可提高 TOL,而减少面部密封泄漏能够显著降低 TOL,且这种效应在 TOL 上表现得比 TIL 更明显。另外,TOL 与口罩滤材的透气性之间也存在强相关性。研究^[42]指出,采用高透气性的滤材可以最大限度地提高使用者的脸部贴合度,降低气流向外泄漏的比例。

对于 TOL,通常使用纹影成像(schlieren imaging)技术进行泄漏点的定位,其折射率来源一般是由呼吸等活动产生的空气温度差异^[43]。该技术被广泛用于比较各种类型的口罩和不同活动所产生的气流模式^[44-45],例如,没有呼气阀的 N95 口罩在阻挡雾滴穿透方面非常有效,而医用外科口罩和带有呼气阀的 N95 口罩会导致气流从口罩的侧面、底部和顶部泄漏,呼出气流的形状、速度和个体之间的相互作用对感染风险有重要影响。它同样可以与示踪颗粒等方法结合以提供定量结果,如 Viola 等^[46]利用钨-99 m 标记的 NaCl 溶液作为示踪颗粒,发现用纳米纤维代替传统滤材可以取得更好的过滤效果。

在使用流体力学模型进行分析时,可以发现外向保护与内向保护一样,外围缝隙的泄漏也是影响其防护性能的关键因素,例如,对于咳嗽而言,佩戴口罩虽然可以显著减少咳嗽后残留的飞沫总质量和平均直径^[47],但仍有许多飞沫在周围扩散。在周边缝隙仅 0.65 mm 时^[5],也可能有 80%的气流通过口罩外围泄漏,大大降低口罩的防护性能,且在呼吸强度较弱和较强两种条件下,相应的泄漏率随粒径增加分别呈现出快速和缓慢下降的趋势^[48]。在评估外向防护性能时,佩戴口罩对于传播距离的影响也需重点关注。研究^[49]发现由于口罩的过滤作用,室内环境中飞沫在空气中的传播被有效限制;但在室外环境下^[50],口罩可能不足以限制飞沫的传播,这提示与感染者保持一定社交距离的重要性。

目前利用流体力学进行分析时,往往会因为忽略皮肤或口罩表面粗糙度、简化不规则的泄漏形状等原因导致模型失真,由此计算出的泄漏率可能会更高,因此未来需着重关注以下三个方面^[51]:①正确构建外围缝隙的大小和位置。缝隙大小和形状通常取决于面部尺寸大小、形状以及口罩类型,如何准确对间隙进行建模是流体力学需长期关注的问题。

②模拟通过缝隙和口罩多孔介质的流动。对流体流动—口罩—缝隙相互作用的高保真建模是保证精确度的关键。③开发多尺度液滴过滤模型。液滴过滤模型是量化口罩内外防护效果的重要部分。当前的液滴过滤模型对液滴动力学与气流和口罩之间的相互作用^[5, 52]的研究不够深入,未来要考虑叠加液滴的破碎、飞溅、蒸发^[33, 53]等机制以引入更精确的过滤模型。

2 结论与展望

2.1 TIL 与 TOL 对比

TIL 与 TOL 均受口罩过滤效率、面部密封性、呼吸流量、气溶胶颗粒大小等因素的影响,如面部密封性差会导致 TIL 和 TOL 较高。TIL 的研究多集中在口罩与面部之间的密封性及不同气溶胶介质和粒径对防护性能的影响,这是因为 TIL 反映的是内向保护性能,即口罩对佩戴者的保护作用。TOL 在此基础上还评估了口罩对特定活动(如咳嗽、打喷嚏,呼吸)的防护效果,因为 TOL 反映的是外向保护性能,即口罩对环境及人群的保护作用,而这些活动可能导致气溶胶以不同的方式和流量向周围传播。

2.2 发展方向

未来对口罩泄漏率的评估需更关注口罩 TOL 测试方法,对口罩泄漏率实现全面评价,提高测试的准确性、可重复性和实用性。首先,构建口罩 TOL 测试系统,建立 TOL 与口罩类型、佩戴方式、气流强度、呼吸频率等的关系。结合口罩 TIL 测试系统,定量测试不同类型口罩的过滤效率、呼吸阻力和外向及内向防护效果,以量化口罩的综合防护性能。其次,开发一套强大、准确的计算流体力学模型与试验工具,构建人体呼出气溶胶颗粒物的“气流—颗粒”场景仿真模型,定量解析不同送风方式和速度下室内的空气分布,以及人体在不同位置、呼出不同粒径颗粒的气溶胶运动规律。模拟和试验的综合分析结果将有助于对口罩泄漏率进行全面评估,并为推进口罩 TOL 测试标准化和制定有效的公共卫生政策提供指导。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

[参考文献]

- [1] Leung NHL, Chu DKW, Shiu EYC, et al. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks[J]. Nat

- Med, 2020, 26(5): 676–680.
- [2] 付艳丽, 张梦凡, 庞博, 等. 新型冠状病毒在环境中的传播与检测[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(5): 333–340.
Fu YL, Zhang MF, Pang B, et al. Transmission and detection of SARS-CoV-2 in the environment[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(5): 333–340.
- [3] Cai J, Sun WJ, Huang JP, et al. Indirect virus transmission in cluster of COVID-19 cases, Wenzhou, China, 2020 [J]. Emerg Infect Dis, 2020, 26(6): 1343–1345.
- [4] Xie CJ, Zhao HJ, Li KB, et al. The evidence of indirect transmission of SARS-CoV-2 reported in Guangzhou, China[J]. BMC Public Health, 2020, 20(1): 1202.
- [5] Ni CX, Solano T, Shoele K, et al. Face masks provide high outward protection despite peripheral leakage: insights from a reduced-order model of face mask aerodynamics[J]. Phys Fluids, 2023, 35(6): 061911.
- [6] Cheng YF, Ma N, Witt C, et al. Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission [J]. Science, 2021, 372(6549): 1439–1443.
- [7] 王梅, 周静, 蒋绍锋, 等. 防护口罩防护性能影响因素研究进展[J]. 中国工业医学杂志, 2022, 35(2): 143–146.
Wang M, Zhou J, Jiang SF, et al. Research progress on influencing factors of protective performance of respirators masks [J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2022, 35(2): 143–146.
- [8] van der Sande M, Teunis P, Sabel R. Professional and home-made face masks reduce exposure to respiratory infections among the general population[J]. PLoS One, 2008, 3(7): e2618.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 呼吸防护自吸过滤式防颗粒物呼吸器: GB 2626—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Respiratory protection—non-powered air-purifying particle respirator; GB 2626–2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [10] American Society for Testing Materials. Standard specification for performance of materials used in medical face masks: ASTM F2100–20[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020.
- [11] Karuppasamy K, Obuchowski N. Comparison of fit for sealed and loose-fitting surgical masks and N95 filtering facepiece respirators[J]. Ann Work Expo Health, 2021, 65(4): 463–474.
- [12] Onishi K, Nojima M. Comparison of the inward leakage rate between N95 filtering facepiece respirators and modified surgical masks during the COVID-19 pandemic[J]. Environ Health Prev Med, 2024, 29: 8.
- [13] Santandrea A, Chazelet S. Respiratory protective device: one size to fit them all?[J]. J Occup Environ Hyg, 2023, 20(5–6): 226–239.
- [14] 何军, 路正辉, 靳繁晃, 等. 密合状态对平面口罩防护效果测试的影响 * [J]. 产业用纺织品, 2022, 40(8): 31–36, 53.
He J, Lu ZH, Yan FH, et al. The influence of fitting states on protective effect test of plane masks[J]. Technical Textiles, 2022, 40(8): 31–36, 53.
- [15] Rengasamy S, Zhuang ZQ, Niezgoda G, et al. A comparison of total inward leakage measured using sodium chloride (NaCl) and corn oil aerosol methods for air-purifying respirators[J]. J Occup Environ Hyg, 2018, 15(8): 616–627.
- [16] Grinshpun SA, Haruta H, Eninger RM, et al. Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration[J]. J Occup Environ Hyg, 2009, 6(10): 593–603.
- [17] Mahdavi A, Bahloul A, Haghghat F, et al. Contribution of breathing frequency and inhalation flow rate on performance of N95 filtering facepiece respirators[J]. Ann Occup Hyg, 2014, 58(2): 195–205.
- [18] He XJ, Grinshpun SA, Reponen T, et al. Effects of breathing frequency and flow rate on the total inward leakage of an elastomeric half-mask donned on an advanced manikin headform [J]. Ann Occup Hyg, 2014, 58(2): 182–194.
- [19] 琚钦涵, 孙启龙, 杨森, 等. 头部特征和呼吸状态对平面口罩密合性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2024, 52(4): 72–74, 91.
Ju QH, Sun QL, Yang S, et al. et al effect of head characteristics and respiratory status on the sealing performance of flat face masks [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2024, 52(4): 72–74, 91.
- [20] Rengasamy S, Eimer BC, Szalajda J. A quantitative assessment of the total inward leakage of NaCl aerosol representing submicron-size bioaerosol through N95 filtering facepiece respirators and surgical masks[J]. J Occup Environ Hyg, 2014, 11(6): 388–396.
- [21] Rengasamy S, Eimer BC. Total inward leakage of nanoparticles through filtering facepiece respirators [J]. Ann Occup Hyg, 2011, 55(3): 253–263.
- [22] 张弦. 医用防护口罩密合性设计的影响因素研究[J]. 中国医疗器械信息, 2021, 27(1): 13–14, 59.
Zhang X. Study on design factors affecting medical protective mask fit[J]. China Medical Device Information, 2021, 27(1): 13–14, 59.
- [23] Larsen PS, Heebøll J, Meyer KE. Measured air flow leakage in facemask usage[J]. Int J Environ Res Public Health, 2023, 20(3): 2363.
- [24] Roberge RJ, Monaghan WD, Palmiero AJ, et al. Infrared imaging for leak detection of N95 filtering facepiece respirators: a pilot study[J]. Am J Ind Med, 2011, 54(8): 628–636.
- [25] Harber P, Su J, Badilla AD, et al. Potential role of infrared imaging for detecting facial seal leaks in filtering facepiece respirator users[J]. J Occup Environ Hyg, 2015, 12(6): 369–375.
- [26] Verma S, Dhanak M, Frankenfield J. Visualizing droplet dispersal for face shields and masks with exhalation valves[J].

- Phys Fluids (1994), 2020, 32(9): 091701.
- [27] Morris S, McAtee W, Capece J, et al. Influence of expiratory flow pulsatility on the effectiveness of a surgical mask[J]. J Expo Sci Environ Epidemiol, 2022, 32(5): 697–705.
- [28] Bourriane P, Xue N, Nunes J, et al. Quantifying the effect of a mask on expiratory flows[J]. Phys Rev Fluids, 2021, 6(11): 110511.
- [29] Verma S, Dhanak M, Frankenfield J. Visualizing the effectiveness of face masks in obstructing respiratory jets[J]. Phys Fluids (1994), 2020, 32(6): 061708.
- [30] Arumuru V, Pasa J, Samantaray SS, et al. Breathing, virus transmission, and social distancing – an experimental visualization study[J]. AIP Adv, 2021, 11(4): 045205.
- [31] Marco AO, Marzieh G, Philomena MB. Testing of outward leakage of different types of masks with a breathing manikin head, ultraviolet light and coloured water mist[J]. Intell Build Int, 2022, 14(5): 623–641.
- [32] Anon. Respiratory protective devices. Filtering half masks to protect against particles. Requirements, testing, marking; BS EN 149:2001+A1; 2009[S]. London: BSI, 2009.
- [33] Baumann A, Hoch D, Niessner J. Fates of emitted particles depending on mask wearing using an approach validated across spatial scales[J]. Glob Chall, 2023, 7(6): 2300008.
- [34] Onishi K, Iida A, Yamakawa M, et al. Numerical analysis of the efficiency of face masks for preventing droplet airborne infections[J]. Phys Fluids, 2022, 34(3): 033309.
- [35] Mukhametzanov IT, Grinshpun SA, Zaripov SK, et al. Assessing the protection provided by facepiece filtering respirator; new model involving spherical porous layer with annular peripheral opening[J]. Aerosol Air Qual Res, 2016, 16(10): 2428–2437.
- [36] Xi JX, Barari K, Si XH, et al. Inspiratory leakage flow fraction for surgical masks with varying gaps and filter materials [J]. Phys Fluids, 2022, 34(4): 041908.
- [37] Xu MX, Lee P, Collins D. The critical importance of mask seals on respirator performance: an analytical and simulation approach[J]. PLoS One, 2021, 16(2): e0246720.
- [38] Lindsley WG, Beezhold DH, Coyle J, et al. Efficacy of universal masking for source control and personal protection from simulated cough and exhaled aerosols in a room[J]. J Occup Environ Hyg, 2021, 18(8): 409–422.
- [39] Grinshpun SA, Yermakov M. Technical note: impact of face covering on aerosol transport patterns during coughing and sneezing[J]. J Aerosol Sci, 2021, 158: 105847.
- [40] Chiera S, Cristoforetti A, Benedetti L, et al. A simple method to quantify outward leakage of medical face masks and barrier face coverings: implication for the overall filtration efficiency [J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(6): 3548.
- [41] Myers WR, Yang WH, Ryan KJ, et al. Total outward leakage of half-mask respirators and surgical masks used for source control[J]. J Occup Environ Hyg, 2023, 20(12): 610–620.
- [42] Chiera S, Cristoforetti A, Benedetti L, et al. The role of filter breathability in reducing the fraction of exhaled air leaking from surgical and community face masks[C]//2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1–6.
- [43] Tang JW, Liebner TJ, Craven BA, et al. A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control[J]. J R Soc Interface, 2009, 6(S6): S727–S736.
- [44] Staymates M. Flow visualization of an N95 respirator with and without an exhalation valve using schlieren imaging and light scattering[J]. Phys Fluids, 2020, 32(11): 111703.
- [45] Xu CW, Nielsen PV, Liu L, et al. Human exhalation characterization with the aid of schlieren imaging technique[J]. Build Environ, 2017, 112: 190–199.
- [46] Viola IM, Peterson B, Pisetta G, et al. Face coverings, aerosol dispersion and mitigation of virus transmission risk [J]. IEEE Open J Eng Med Biol, 2021, 2: 26–35.
- [47] Liu JX, Hao M, Chen SL, et al. Numerical evaluation of face masks for prevention of COVID-19 airborne transmission[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2022, 29(29): 44939–44953.
- [48] 冯梦奇, 刘倍托, 王小东, 等. 基于 CFD 的 KN95 口罩边缘泄漏率研究[J]. 宁夏工程技术, 2023, 22(2): 117–121, 127. Feng MQ, Liu BT, Wang XD, et al. Study on leakage of KN95 masks based on CFD[J]. Ningxia Engineering Technology, 2023, 22(2): 117–121, 127.
- [49] Bhat SP, Kumar BVR, Kalamkar SR, et al. Modeling and simulation of the potential indoor airborne transmission of SARS-CoV-2 virus through respiratory droplets[J]. Phys Fluids, 2022, 34(3): 031909.
- [50] Kumar V, Nallamothu S, Shrivastava S, et al. On the utility of cloth facemasks for controlling ejecta during respiratory events[EB/OL]. (2020–05–05)[2024–06–20]. <https://arxiv.org/abs/2005.03444>.
- [51] Mittal R, Breuer K, Seo JH. The flow physics of face masks [J]. Annu Rev Fluid Mech, 2023, 55: 193–211.
- [52] Schmitt J, Wang J. Quantitative modeling of the impact of facemasks and associated leakage on the airborne transmission of SARS-CoV-2[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 19403.
- [53] Dbouk T, Drikakis D. On respiratory droplets and face masks [J]. Phys Fluids (1994), 2020, 32(6): 063303.

(本文编辑:翟若南)

本文引用格式:史盈, 宫国卓, 金叔宾, 等. 口罩泄漏率评估方法研究进展[J]. 中国感染控制杂志, 2025, 24(4): 571–576. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20256793.

Cite this article as: SHI Ying, GONG Guozhuo, JIN Shubin, et al. Advances in assessment methods for mask leakage rates[J]. Chin J Infect Control, 2025, 24(4): 571–576. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20256793.