

计算流体力学技术在职业性化学毒物工程防护中的应用现状

Application of computational fluid dynamics technology in engineering protection against occupational chemical poisons

李祎琨, 王翔, 陈明, 王剑明, 顾沈兵

LI Yikun, WANG Xiang, CHEN Ming, WANG Jianming, GU Shenbing

上海市化工职业病防治院, 上海 200041

摘要: 职业病危害工程防护是职业病三级预防的有效控制手段, 计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术作为一种高效的技术手段, 可将有害物质扩散规律比较精确地可视化, 在职业性化学毒物工程防护领域发挥了重要作用。从危害因素控制、职业暴露评估和个体防护装备研究 3 个方面总结了 CFD 技术的实际应用情况, 并指出未来的应用中还须进一步降低 CFD 技术模拟结果与实测值的差异, 加强客观干扰因素对流场的影响以及注重不同模型组合使用的研究, 为职业病危害工程防护提供新的思路和解决方案。

关键词: 计算流体力学技术; 职业性化学毒物; 工程防护; 扩散规律; 危害因素控制; 职业暴露评估; 个体防护装备

中图分类号: R136.3; X96

文献标志码: A

文章编号: 1007-1326(2025)02-0270-04

引用: 李祎琨, 王翔, 陈明, 等. 计算流体力学技术在职业性化学毒物工程防护中的应用现状[J]. 职业卫生与应急救援, 2025, 43(2): 270-273.

为推进“十四五”时期职业病防治工作, 保障劳动者职业健康权益, 国家卫生健康委员会于 2022 年 1 月—2025 年 12 月在全国范围内深入开展职业病危害专项治理工作, 包括防尘、防毒、防噪声和防电离辐射 4 个方面^[1]。职业病危害工程防护是职业病三级预防的有效控制手段, 但其技术支撑体系发展较慢^[2]。其中一个重要原因是职业病危害工程防护技术还存在着较多挑战, 比如: 由于颗粒物扩散机理和规律复杂, 投入使用的工程防护设施效果缺乏有效验证等原因, 这些设施的实际效能会产生与预期不符合的情况。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术作为一种高效的数值模拟技术, 正逐渐应用于职业病危害工程防护领域^[3]。相比现场测量、缩比实验等传统手段, 该技术具有成本低、效率高的特点, 能够为职业病危害工程防护提供新的思路和解决方案。本研究拟从危害因素控制、职业暴露评估和个体防护装备研究这 3 个方面, 对 CFD 技术在职业性化学毒物工程防护中的应用情况做一综述, 旨在推进 CFD 技术在职业性化学毒物工程防护中的应用, 更好地为职业病危害工程

防护领域的实践工作提供支持。

1 计算流体力学技术

计算流体力学(CFD)技术是一种利用计算机模拟和分析流体动力学和传热学问题的数值模拟技术, 其原理基于对偏微分方程进行离散化处理, 通过数值方法求解得到工程问题的近似解。CFD 技术能够对复杂的工程问题进行定量分析和预测。在职业性化学毒物防护领域, 通过 CFD 技术可以揭示作业场所空气中污染物分布规律、预测事故泄漏场景等, 其模拟结果经过可视化处理, 可为工程设计提供重要参考^[4]。CFD 技术尤其适用于不方便进行现场测量的复杂工作场所或各种复杂的气体扩散场景, 如事故场景下多点泄漏的浓度场分布模拟等。该技术对计算机硬件要求高, 模拟结果的准确性与所建立的湍流模型、参数设定(初始条件、边界条件等)以及计算精度等有关, 若设置不准确则可能导致预测结果偏差较大。随着计算机性能提升和模拟基础理论的完善, CFD 技术模拟准确性和工程实用性不断提升, 为职业病危害工程防护领域的实践工作提供了支持。随着 CFD 技术在职业病危害工程防护领域的深入研究, 其将为职业性化学毒物工程防护领域带来更多的突破和进步。

基金项目: 国家卫生健康委员会职业健康司专项-工作场所化学毒物工程防护先进技术筛选及应用指南

作者简介: 李祎琨(1999—), 女, 硕士, 助理工程师

通信作者: 顾沈兵, E-mail: zfy1600@163.com

2 CFD 技术在化学危害因素控制方面的应用

现有化学危害因素工程控制手段主要分为源头控制、传播路径控制、净化处理 3 类,囊括了危害因素从产生到消亡的全过程。CFD 技术在这三大领域皆获得广泛应用。

2.1 源头控制领域

只有了解化学颗粒物的扩散机理和规律才能为制定适宜的控制方法提供有效依据。颗粒物的流动特性不仅与种类有关,还会受环境温湿度以及污染源在空间中的位置等影响。CFD 技术通过数值模拟,可以模拟颗粒物在不同环境条件下的扩散、传播和沉降过程,帮助我们更好地了解颗粒物的流动规律和分布特征,从而指导设计更科学合理的防护措施。Li 等^[5]通过模拟研究发现,高温亚微米颗粒与一般细颗粒在运动特性上存在差异,随机的布朗运动会影响粒径 $< 0.3 \mu\text{m}$ 颗粒的捕集和清除。因此,在设计这类尘毒的捕集系统时需要考虑更大的捕集范围。Zhuang 等^[6]应用 CFD 技术研究了焊接过程中颗粒扩散的最大水平距离,并建立了预测模型,利用开发的模型可以快速识别颗粒是否完全沉降在工作区域内,这有助于优化通风系统设计。张建飞等^[7]以某大型焊接车间为例,通过 CFD 技术分析了焊接颗粒物在大空间的扩散机理,发现在车间上方 $6 \sim 8 \text{ m}$ 高度处存在颗粒物滞留区,诱导射流风机可以打破车间竖直方向上的颗粒物滞留区。除了研究污染源本身性质,利用 CFD 技术还可研究污染源位置对防护设施捕集效率的影响。Wang 等^[8]分析了涡旋通风系统中不同污染源位置的流动轨迹和污染物分布,发现污染源位置对涡旋通风的影响明显高于对传统通风方式的影响,提示在设计涡旋通风系统时,应保证污染源位于通风效率较高的区域。需要注意的是,颗粒物扩散过程中有时存在化学反应,导致物性发生变化,干扰 CFD 模拟结果,但目前在这方面的研究却相对较少。

2.2 传播途径控制领域

化学毒物的传播途径控制主要包括全室通风和局部通风。利用 CFD 技术可模拟特定工作环境下污染物扩散对通风系统的影响,检验通风系统设计、排风设施设置是否合理,找出工程设计最优参数,降低试错成本。

对于全室通风,气流组织优化是 CFD 技术应用的主要研究方向。戴飞飞等^[9]通过 CFD 方法模拟发现焊接烟气的扩散受送风高度的影响最大,建议设置与焊点高度相当的送风高度。酆胜等^[10]利用 Fluent 软件研究了丝网印刷作业环境中不同通风口位置、

入风口风速和面积对环己酮弥散扩散的影响,结果显示入风口速度为 0.8 m/s 时化学危害物浓度明显降低,其在墙壁周围和化学危害源附近较易集聚,同时入风口位置和面积的差异也会影响污染物发生集聚的区域。吴成等^[11]模拟了不同通风量下封闭圆形煤场内污染物分布情况,发现污染物容易积聚在通风天窗附近及煤堆底部,因此建议在相应地点设置污染物检测仪表以保证人员安全。谢东等^[12]对采用置换通风的厂房在不同送风口形式下的气流组织特性进行数值模拟,结果显示矩形送风口除污效率高,圆形送风口除污均匀且不存在污染物积累。Zhang 等^[13]提出了一种基于水平活塞流的新型无风管通风系统,采用缩尺实验和 CFD 技术研究了该通风系统应用于地下污水处理厂操作层大空间的污染物排除能力,结果显示无风管系统的出口污染物浓度与呼吸平面平均污染物浓度之比约为 1.3,通风效率优于风管式系统。

对于局部通风,排风罩设计优化是 CFD 技术应用的研究重点。林大建等^[14]利用 Fluent 软件对旋风气幕式排风罩设计参数进行正交模拟,得出捕集效率达到 98% 的旋幕式排风罩设计参数。谢春波等^[15]采用 CFD 技术对比研究了 3 种常见侧吸排风罩的烟气分布特征及烟气捕集效率,结果显示采用移动式侧吸排风罩和旋转开闭侧吸排风罩可有效提高烟气捕集效率,且增设平行流送风装置可提高送风气流均匀性。刘寅超等^[16]研究设计出一款非标钳形排风罩以近距离控制尘毒危害,对某研究所内熔融态下三硝基甲苯有害气体控制情况进行模拟后显示,有害气体能被钳形罩的侧吸气流有效控制且毒物体积分数降低率达到 88%。Chen^[17]利用 CFD 技术研究发现了均匀流吹吸式通风系统中排风罩和送风罩之间距离与流量比的变化规律,同时提出吹吸式通风系统并不适用排风罩和送风罩之间的距离 ≥ 6 倍罩口边长时的情况。

CFD 技术在优化空间气流组织、辅助设计排风罩等方面的应用,为传播途径上控制污染物的扩散提供了高效、低成本的研究手段。但目前大部分应用 CFD 技术的研究较少考虑背景气流的影响,后续须加强对环境存在扰动气流时有害因素扩散的研究,持续修正湍流模型等参数,使模拟分析结果更贴近现场情况。

2.3 净化处理领域

目前化学毒物净化处理方法主要包括吸收法、吸附法等,CFD 技术主要用于优化设备设计和工艺参数设定等,以提高净化方法效率及验证其可行

性。李亚冬等^[18]对变温吸附净化挥发性有机物的过程进行了数值模拟,结果表明存在最优的再生温度 550 K,同时使用塔径尺寸大的吸附塔有利于降低氮气消耗和能耗。陈招妹等^[19]采用 Fluent 软件,在不同喷射点布置烟道内活性炭颗粒时,对活性炭颗粒分布情况、覆盖率等的气固两相流进行模拟计算,研究表明使用三点喷射最适宜。袁世震等^[20]利用 Fluent 软件模拟设计烟道系统增设活性炭喷射净化技术方案,结果表明质量流量为 10 kg/h 的单喷口喷射具有最高的经济效益,质量流量为 15 kg/h 的多喷口喷射时,活性炭吸附效果较好但成本更高。

相比于职业卫生,环境保护部门在气体净化处理领域研究更加广泛深入,但两者研究方向存在差异。环境保护领域集中于室外排放的气体净化,而职业卫生领域则专注于室内气体的循环净化,因此,应用 CFD 技术模拟室内气体循环净化时,还须更多考虑室内有限空间对净化处理设备出入口气流组织的影响。

3 CFD 技术在化学性有害因素职业暴露评估上的应用

CFD 技术不仅可以模拟不同操作条件下的化学毒物的跑、冒、滴、漏及其扩散规律,还可以研究毒物在人体内的沉积情况。黄德寅等^[21]对原油炼制工艺进行了职业病危害因素暴露模拟,利用数值模拟实现了在巡检、采样、跑、冒、滴、漏等复杂条件下的职业性有害物质暴露评估及定量分析,结果提示采样时应尽量站在采样口的上风向,以减少苯暴露。王鉴^[22]利用 Fluent 软件进行仿真模拟甲醛气体在发生扩散泄漏时的流动传播规律,实现了操作人员职业暴露评估的可视化,发现超过 4 min 后甲醛在有限空间的浓度剧增。邢志祥等^[23]采用 Fluent 软件对氯乙烯气体泄漏及其外流场进行数值模拟,结果表明环境风会扩大氯乙烯气体云团范围,云团整体呈现椭圆形并逐渐往下风向移动。蔡幸福等^[24]利用 CFD 技术给出了氟气瞬态泄漏行为和特定场景空间的扩散规律,结果显示高压氟气泄漏过程主要集中在初期的 2 s 内,在通风口及其下方区域形成了相对安全区域。Yang 等^[25]利用 CFD 技术模拟了实际工程现场颗粒物浓度的时空分布,发现在基础阶段从事坑底作业,在主体结构阶段从事钢筋加工,在安装装修阶段从事抹灰、砌筑、批腻子作业的工人是施工现场职业健康风险最高的人群。吴旭^[26]应用 Mimics 软件重建了基于真实人体的呼吸系统三维模型,结合 Fluent 软件对不同浓度、不同粒径电焊

烟尘在呼吸系统内的沉积浓度进行了模拟,进而实现了电焊烟尘进入肺泡的沉积量的内暴露评估。

此外,利用 CFD 技术还可以模拟事故场景下有害物质分布规律,为预防设施设计、应急响应提供了定性定量的评估及可视化参考,解决了因实践正当性或伦理问题等限制而无法正常开展的窘境,可有效降低现场试验、试错的成本。

4 CFD 技术在化学性有害因素个体防护装备研究中的应用

防护口罩是防止化学毒物进入人体的重要个体防护装备,口罩的密合性可直接影响口罩的防护效果。冯梦奇等^[27]应用 CFD 技术对 KN95 口罩边缘泄漏率进行数值模拟,研究了在不同呼吸强度下,不同粒径颗粒物经口罩边缘泄漏时流体入口速度对口罩泄漏率的影响,发现不同粒径的颗粒物,其泄漏率随着呼吸强度的增强呈现不同趋势的变化。Wei 等^[28]设计了一种基于内部空腔和出口孔板的均匀送风通风头盔,并利用 CFD 技术探讨了不同结构和尺寸头盔出风口的优化,研究显示在无扰动情况下,风量在 6 ~ 8 L/s 范围内降低污染暴露的有效性可接近 99%。陈建武等^[29]利用 Fluent 软件对电焊颗粒物防护口罩 3 种不同过滤模式下的速度场、压力差和电焊颗粒物浓度分布等进行了模拟,发现不同孔径滤料组合方案对于吸气阻力和过滤效率的影响存在较大矛盾。黄威^[30]利用 CFX 软件对不同罩体结构的防毒面具内气流的分布情况进行模拟,研究表明在阻水罩上增加导流翼和凹槽,同时底部增加加强筋的设计方案能有效降低罩体变形量并改善罩内气流流动通道。

综上,先应用 CFD 技术模拟并优化不同参数对个体防护装备效能的影响,再开展实践设计及后期测试,已成为当今个体防护装备设计的发展趋势。利用计算机设置初始条件的可随意变化性,契合设计者丰富的设想和创新。通过模拟计算并输出结果以供参考,CFD(计算流体动力学)技术不仅降低了时间成本和物质成本,还提高了设计效率和准确性,逐渐成为研究人员设计优化的得力工具。

5 小结

目前,国家对职业病危害工程防护技术的研发和推广越来越重视,这为 CFD 技术应用提供了良好的发展环境。不过,尽管 CFD 技术在职业性化学毒物工程防护的应用中已经取得了一些成果,但在以后的应用中还需要注意以下几方面:

(1) 进一步降低 CFD 技术模拟结果与实测值的差异。原则上,数值模拟的结果须进行现场实测论证。随着大数据和人工智能等技术的发展,未来可以利用真实的监测数据和实测数据来优化 CFD 模拟的参数和模型,提高模拟结果的可信度和真实性。

(2) 加强客观干扰因素对流场的影响研究。目前的模拟计算主要考虑理想情况,干扰因素的加入会增加数值模拟的计算量,也可能会带来计算模型内部逻辑的变革。

(3) 注重不同模型组合使用的研究。目前室内气流组织的模拟计算大多使用的湍流模型是雷诺平均纳维-斯托克斯模型 (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)^[31],RANS 为简化问题引入部分假设,降低了初始条件设置门槛,虽提高了计算效率,但模拟空气流动和湍流的准确性偏低,使计算结果偏差较大。未来可探索大涡模型 (large eddy simulation, LES) 与 RANS 的组合使用,融合 RANS 高效率和 LES 的高精度特性,模拟复杂条件下毒物扩散,提高模拟的准确性和效率。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] 国家卫生健康委员会,中共中央宣传部,国家发展改革委,等. 关于印发国家职业病防治规划(2021—2025 年)的通知:国卫职健发〔2021〕39 号[A]. 2021-12-07.
- [2] 王翔,何雪松. 我国职业病危害工程防护工作现状与对策[J]. 职业卫生与应急救援,2022,40(4):498-500.
- [3] 邹磊. 计算流体力学技术在卫生工程中的应用现状及展望[J]. 中国卫生工程学,2016,15(3):301-302.
- [4] 段宇建,马跃峰,吴庆东,等. 计算流体力学技术在职业危害治理中的应用现状[J]. 中华劳动卫生职业病杂志,2022,40(11):872-875.
- [5] LI C, WANG H, YU C W, et al. Diffusion characteristics of the industrial submicron particle under Brownian motion and turbulent diffusion[J]. Indoor Built Environ,2022,31(1):17-30.
- [6] ZHUANG J W, LIU J L, CHEN G Y, et al. A numerical study for predicting the maximum horizontal distance of particles' dispersion during transient welding processes [J]. J Build Eng, 2023, 71: 106449.
- [7] 张建飞,崔巍峰,赵超杰,等. 大型焊接车间通风方式模拟对比与实测试验[J]. 暖通空调,2020,50(11):116-119.
- [8] WANG Y, ZHAI C, ZHAO T T, et al. Numerical study on pollutant removal performance of vortex ventilation with different pollution source locations [J]. Build Simul, 2020, 13(6): 1373-1383.
- [9] 戴飞飞,吕建,李宪莉. 基于数值模拟的焊接车间污染物控制方法研究[J]. 天津城建大学学报,2017,23(2):124-128.
- [10] 郇胜,张小会. FLUENT 仿真计算在丝网印刷作业环己酮弥散分析中的应用[J]. 职业卫生与应急救援,2019,37(1):5-10.
- [11] 吴成,刘杨,王春峰. 封闭圆形煤场内通风及污染物扩散模拟研究[J]. 暖通空调,2022,52(增刊 1):163-166.
- [12] 谢东,田伶,王汉青. 工业厂房置换通风两种送风口形式的比较[J]. 建筑热能通风空调,2019,38(3):79-84.
- [13] ZHANG X, DONG L, XIAO Y, et al. Performance evaluation of ductless ventilation system in basement space of an underground sewage treatment plant: a scaled model case study [J]. Build Environ, 2019, 160: 106211.
- [14] 林大建,黎良飞,周红. 旋幕式排风罩收集电焊烟尘的数值模拟[J]. 安全与环境学报,2019,19(1):226-231.
- [15] 谢春波,权梦凡,曹智翔,等. 平行流送风对侧吸排风罩烟气捕集效率的提升[J]. 环境工程,2021,39(10):101-109.
- [16] 刘寅超,刘仓,邢亚飞,等. 钳形排风罩应用于熔融态三硝基甲苯近距离的控制效果 [J]. 中国卫生工程学,2022,21(2):185-189.
- [17] CHEN J W. Changing patterns of the flow ratio with the distance of exhaust and supply hood in a parallel square push-pull ventilation[J]. Int J Environ Res Public Health,2022,19(5):2957.
- [18] 李亚冬,江南,沈圆辉,等. 变温吸附净化 VOCs 的数值模拟及分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工),2021,46(S1):101-107.
- [19] 陈招妹,刘含笑,徐旭东,等. 燃煤电厂烟道活性炭喷射均匀性数值模拟[J]. 广东电力,2019,32(7):23-28.
- [20] 袁世震,郭倩倩,卢如飞,等. 活性炭喷射吸附在烟气净化中应用的数值模拟分析[J]. 能源环境保护,2023,37(6):89-100.
- [21] 黄德寅,刘茂,李敏嫣,等. 基于 CFD 技术的工作场所苯职业暴露模拟分析[J]. 中国工业医学杂志,2012,25(4):243-246.
- [22] 王鉴. 某工作场所甲醛意外泄漏职业危害仿真研究 [D]. 北京:首都经济贸易大学,2013.
- [23] 邢志祥,李金洁,吴洁. 基于 FLUENT 的氯乙烯泄漏扩散特性数值模拟研究[J]. 华北科技学院学报,2019,16(5):45-50.
- [24] 蔡幸福,李昌均,薛冬林,等. 高压氟气泄漏事故模拟与应急通风优化方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(12):1803-1810.
- [25] YANG X D, YU Q, ZHANG Y L, et al. Occupational health risk assessment of construction workers caused by particulate matter exposure on construction sites [J]. Heliyon, 2023, 9(10): e20433.
- [26] 吴旭. 电焊烟尘在车间扩散及呼吸系统内沉积的数值模拟研究[D]. 重庆:重庆科技学院,2024.
- [27] 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.
- [28] WEI X B, XU Y K, YU Y, et al. Effectiveness of head-mounted air supply in reducing pollutant exposure: a static case [J]. Build Environ, 2023, 234: 110219.
- [29] 陈建武,杨斌,陈振芳,等. 电焊烟尘防护口罩过滤模式研究[J]. 安全与环境学报,2020,20(3):969-974.
- [30] 黄威. 防毒面具面罩内部气流场分布模拟仿真研究[D]. 西安:西安工业大学,2017.
- [31] 张慎,程明,王义凡,等. 基于 RANS 和 LES 的高大空间建筑气流组织仿真和热舒适度评价方法[J]. 系统仿真学报,2023,35(10):2212-2222.

收稿日期:2024-10-31