



文章编号: 1671-251X(2024)12-0111-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024100076

粉尘浓度监测技术研究现状与发展趋势

张咏琪^{1,2}, 王杰^{1,2}, 周渝皓^{1,2}, 杨珺璇^{1,2}, 邓彬³

- (1. 安徽理工大学 工业粉尘防控与职业安全健康教育重点实验室, 安徽 淮南 232001;
2. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001;
3. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 介绍了国内外不同粉尘浓度连续监测技术的测量原理, 包括过滤称重法、 β 射线法、光散射法、电荷感应法和微量振荡天平法, 并从准确性、灵敏度和实时性等方面分析比较了不同监测技术的优点和局限性。深入探讨了呼吸性粉尘颗粒物的国内外连续分离技术和标准, 并系统分析了目前粉尘浓度连续监测技术在仪器测量精度、可靠性、稳定性、环境适应性、智能化自动校准及功耗优化等方面面临的挑战。讨论了粉尘浓度监测技术的发展趋势: 从传统的单一总粉尘浓度监测向总粉尘和呼吸性粉尘共同监测方向发展, 从点监测向面监测和区域监测方向快速推进。提出未来应致力于将粉尘浓度监测技术与机器学习、深度学习、计算机视觉及大数据分析和预测等新兴技术相结合, 以促进智能检测技术与粉尘职业危害监测预警的深度融合与应用, 为实现未来工业场景下的智能化、自动化粉尘治理提供参考。

关键词: 粉尘连续监测; 呼吸性粉尘; 尘肺病; 颗粒物分离; 深度学习

中图分类号: TD714

文献标志码: A

Research status and development trends of dust concentration monitoring technology

ZHANG Yongqi^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, ZHOU Yuhao^{1,2}, YANG Junni^{1,2}, DENG Bin³

- (1. Key Laboratory of Industrial Dust Prevention and Control and Occupational Safety and Health Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: This paper introduces the measurement principles of various domestic and international dust concentration continuous monitoring technologies, including the filter weighing method, β -ray method, light scattering method, charge induction method, and micro-oscillating balance method. It compares and analyzes the advantages and limitations of these monitoring technologies in terms of accuracy, sensitivity, and real-time performance. The paper also delves into the continuous separation technologies and standards for respirable dust particles on a global scale and systematically examines the challenges that current dust concentration continuous monitoring technologies face in terms of instrumental measurement precision, reliability, stability, environmental adaptability, intelligent automatic calibration, and power consumption optimization. The discussion covers the development trends in dust concentration monitoring technology: the shift from traditional single total dust concentration monitoring to a combined monitoring of total and respirable dust, and rapid transition from point

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2024-12-16; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4703600)。

作者简介: 张咏琪 (2000—), 女, 安徽来安人, 博士研究生, 主要研究方向为粉尘防治技术等, E-mail: 1297676518@qq.com。通信作者: 王杰 (1964—), 男, 重庆人, 教授, 博导, 主要研究方向为粉尘防治技术、智能监测与仪器仪表等, E-mail: 2585139183@qq.com。

引用格式: 张咏琪, 王杰, 周渝皓, 等. 粉尘浓度监测技术研究现状与发展趋势[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 111-119, 165.

ZHANG Yongqi, WANG Jie, ZHOU Yuhao, et al. Research status and development trends of dust concentration monitoring technology[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(12): 111-119, 165.



扫码移动阅读

monitoring to area monitoring and regional monitoring. It is proposed that future efforts should be dedicated to integrating dust concentration monitoring technologies with emerging technologies such as machine learning, deep learning, computer vision, and big data analysis and prediction. This integration will facilitate the integration and application of intelligent detection technologies with dust-related occupational hazard monitoring and early warning systems and provide reference for intelligent and automated dust control in future industrial scenarios.

Key words: dust continuous monitoring; respirable dust; pneumoconiosis; particulate matter separation; deep learning

0 引言

煤炭行业对经济作出了重大贡献,但也对环境和公共健康问题造成了严重影响^[1]。煤炭的生命周期涉及多个阶段,每个阶段都会产生各种类型的颗粒物(PM),对井下空气质量和工人健康造成了严重影响^[2-4]。《“十四五”国民健康规划》中提出,在“十四五”规划期间,计划加强对职业病的预防和控制,特别是尘肺病。据估计,尘肺病占中国职业健康并发病的 80% 以上^[5],而引起尘肺病的元凶就是呼吸性粉尘颗粒。我国拥有 4 200 余座煤矿和 3 万余座非煤矿山^[6],在开采条件下,若无有效的防尘措施,煤矿综采工作面的粉尘质量浓度可达 4 000 mg/m³,其中呼吸性粉尘质量浓度高达 1 100 mg/m³^[7-9],远远超过《煤矿安全规程》规定的 10 mg/m³,这导致我国煤矿工人尘肺病新增病例始终居高不下^[10]。因此,以职业性煤矿工人尘肺病为重点,建立完善的职业病危害因素监测预警,研究高效、实时、覆盖范围广的粉尘浓度连续监测技术成为当前的前沿研究领域。

国内外针对粉尘浓度监测技术及设备开展了大量研究。目前,过滤称重法仍是国内外广泛采用的粉尘浓度监测方法,但操作烦琐、实时性差^[11]。基于光散射法的粉尘监测仪能够快速响应并实时监测粉尘浓度变化,广泛应用于颗粒物浓度测量,但维护成本高且易受环境光线影响^[12]。β 射线法受环境因素影响较小、稳定性高,但不适合连续监测且涉及放射性同位素的使用,需要特别的安全措施^[13]。电荷感应式粉尘监测仪是确定矿井粉尘浓度的主要方法之一,其适应性强、测量范围广且维护成本低,但在低粉尘浓度环境下检测效果不佳^[14]。基于振荡天平原理的测量仪可提供准确的粉尘质量浓度且适用于连续监测粉尘浓度变化,但设备结构相对复杂,成本较高^[15]。

近年来,我国在粉尘浓度监测技术领域取得了一些成果,但与美国等发达国家仍存在差距。我国仍在沿用英国 20 世纪 50 年代末的呼吸性粉尘颗粒物分离标准,而欧盟等国家早在 20 世纪末就改用了新的标准^[16];我国能精确监测粉尘质量浓度特别是

呼吸性粉尘浓度的传感器较少,监测矿工个体接尘量的仪器短缺,且缺乏实时在线的连续粉尘浓度监测技术。为此,本文以当前国内外的粉尘浓度监测技术现状为研究背景,评估国内外不同监测技术的优缺点,深入探讨呼吸性粉尘颗粒物的国内外分离技术和标准,分析煤矿粉尘浓度监测预警技术目前存在的问题及未来发展趋势,为推动我国粉尘职业危害的有效防治和技术进步,实现未来工业场景下的智能化、自动化粉尘治理提供理论参考。

1 粉尘浓度连续监测技术原理

粉尘浓度监测原理主要基于粉尘颗粒物的力学、光学和电学等物理性质,目前国内外主要采用的连续粉尘浓度监测方法包括过滤称重法、β 射线法、微量振荡天平法、光散射法、电荷感应法等^[17]。

1.1 过滤称重法

过滤称重法作为国际普遍认可的标准方法,通过使用气泵抽取含尘空气并过滤于特定滤膜上,基于滤膜质量的增加量来确定粉尘质量,从而计算粉尘浓度。

$$C = \Delta m / V \quad (1)$$

式中: C 为粉尘浓度; Δm 为滤膜上的粉尘质量; V 为空气体积。

过滤称重法因其直接测量粉尘质量、可靠性高、原理简单,且不受粉尘的分散度、化学成分、形状或电气光学性能变化的影响,被认为是粉尘浓度测量的基准方法,常用作其他非采样法测量系统的标定和校准依据,适用于各种环境和工业场所^[16]。然而,过滤称重法的局限性在于其烦琐的操作过程,包括烘干、称重、采样、再次烘干和称重及计算,这些步骤限制了其实时监控能力。尽管已有自动取样装置的开发提高了取样的自动化程度和实时性,拓宽了其工业应用前景,但依然难以解决实时性差的问题。

1.2 β 射线法

β 射线法测量粉尘浓度的基本原理如图 1 所示。β 射线源自放射性同位素,如 C14,其在衰变过程中释放出高速电子流,当 β 射线穿过含尘空气时,

粉尘颗粒对射线的阻碍导致其强度减弱^[18]。β射线衰减程度由粉尘质量密度和射线穿透能力决定, 衰减后的强度为

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho L) \quad (2)$$

式中: I_0 为β射线穿过介质前的强度; μ_m 为物质对β射线的吸收系数; ρ 为物质密度; L 为β射线穿透物质的厚度。

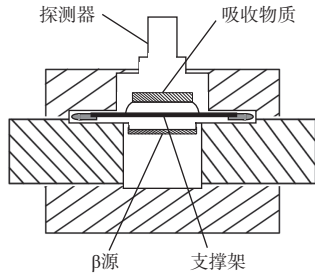


图1 β射线法测量粉尘浓度的基本原理

Fig. 1 Basic principle of measurement dust concentration using β-ray method

在实际应用中, 先测量未受污染的滤膜和附着粉尘的滤膜的β射线穿透率, 以此确定二者的单位面积质量。然后用差减法计算出滤膜上的粉尘质量, 再依据采样空气体积得出特定时间内的平均粉尘浓度。由于β射线技术直接测量粉尘质量, 几乎不受粉尘形状、大小或化学成分的影响, 所以测量结果较为准确。然而, 考虑到安全与环保问题, 需对β射线粉尘浓度检测仪器中的放射性元素放射量进行限定, 一定程度上限制了其发展^[19]。

1.3 光散射法

光散射法基于MIE散射理论测量粉尘浓度 C' , 通过光电探测器采集经过粉尘颗粒作用后一定角度的散射光, 再由探测器电路将接收的电流信号转换为电压信号, 从而间接测量出粉尘颗粒浓度、粒径及其分布等特性^[20]。

$$C' = k \sum_{i=1}^q u_i^{2\alpha} \quad (3)$$

式中: k 为散射系统常数; q 为光电转换器电压信号划分的电压区间数; u_i 为第 i 个粉尘颗粒的散射光强度; α 为粉尘颗粒对光的散射能力的指数。

光散射法因其可现场直接显示质量浓度, 实时性和稳定性好、体积小、质量轻、操作简单, 被广泛应用于实时在线监测空气中的颗粒物浓度, 特别是呼吸性粉尘在线监测。然而, 光散射法的结构复杂, 气路易阻塞, 光学器件易污染, 需要频繁维护, 因此仍存在一定局限性。

1.4 电荷感应法

电荷感应法基于粉尘颗粒与金属探测电极相互

作用时产生的电荷变化来测量粉尘浓度。当带电量为 p 的粉尘颗粒飞过金属探测电极时, 由于电荷感应效应^[21], 会在电极上产生动态感应电荷量 Q , 通过提取这些动态感应电荷产生的电信号, 可反演并计算出粉尘浓度^[22]。

大量电荷感应往往采用螺旋环状不锈钢导体作为感应电极, 其结构如图2所示。感应电极不用直接与粉尘颗粒摩擦即可产生感应电流, 所以在开放的气固两相流环境中不会对粉尘测量区域的气流流场产生干扰。同时, 其原理和结构简单、响应迅速、维护方便, 因此可用于颗粒物浓度在线测量, 对于中高浓度的粉尘环境具有较高的检测精度, 优势明显。然而, 当环境中的粉尘浓度较低时, 动态感应电荷量变小, 信号处理困难, 从而导致检测精度下降, 因此, 对于低粉尘浓度检测具有一定局限性。

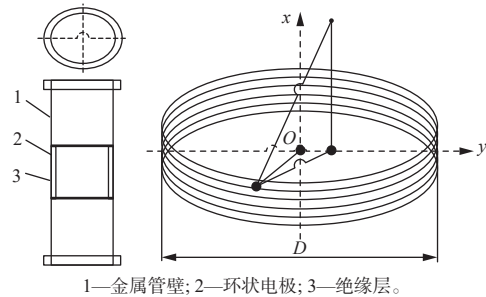


图2 感应电极

Fig. 2 Sensing electrode

1.5 微量振荡天平法

微量振荡天平法基于石英晶体的振荡原理, 通过测量晶体振荡频率的变化来确定空气中的粉尘质量^[23]。

$$f^2 = \frac{K_0}{M} \quad (4)$$

式中: f 为初始频率; K_0 为固有弹性系数; M 为振荡体质量。

振荡天平装置结构如图3所示, 其核心是一个空心锥形的石英振荡管, 包括固定端和振荡端, 其中固定端被夹紧以避免振动, 振荡端则在外部激励信号的作用下自由振荡。当含尘空气流经滤膜时, 粉尘颗粒被收集在滤膜上, 增加了振荡系统的质量, 进而改变了振荡频率。振荡天平法直接测量颗粒物质质量, 因此具有较高的测量精度和可靠性。然而, 振荡体顶部的滤膜在收集颗粒物时有容量限制, 在高浓度呼吸性粉尘浓度测量中需要更换滤膜, 一定程度上限制了其在长时效连续在线检测方面的发展。

1.6 粉尘浓度连续监测技术对比

将目前主要采用的粉尘浓度连续监测技术进行了详细介绍和归纳, 包括β射线法、微量振荡天平

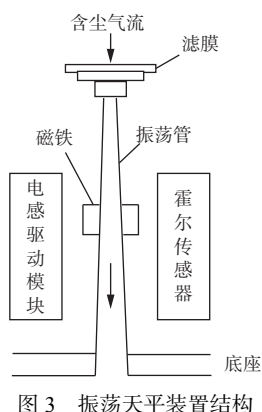


图3 振荡天平装置结构

Fig. 3 Structure of the oscillating balance device

法、光散射法、电荷感应法等。对各技术进行了对比总结,包括优缺点、实际应用效果、使用成本、维护难度及适用工况等,结果见表1。

2 呼吸性粉尘颗粒连续分离技术

为了精确评估作业场所的粉尘风险和作业人员

的粉尘暴露水平,对呼吸性粉尘浓度进行精准测量是当前研究的焦点和挑战^[24],而从总体粉尘中连续分离出呼吸性粉尘是实现其在线监测的基础和关键步骤,只有实现连续的、满足 BMRC 曲线的分离,后续检测才有意义。ISO 和英国标准协会将粉尘定义为直径小于 75 μm 的微小固体颗粒^[25-27]。国际上将呼吸性粉尘定义为空气动力学直径 $\leq 7.0 \mu\text{m}$ 且对空气动力学直径为 5 μm 的粉尘颗粒具有 50% 收集效率的粉尘粒子^[28]。当前,全球广泛认可的呼吸性粉尘分离标准有 BMRC 标准曲线、ACGIH 标准曲线及 EN481 标准曲线。在 MT/T 394—1995《呼吸性粉尘测量仪采样效能测定方法》标准中,我国对呼吸性粉尘监测仪的采样效能评估采用 BMRC 曲线作为参照,规定在所有粒径点上的分离效率误差必须控制在 5% 以内。我国煤炭行业自 1995 年一直沿用英国医学研究委员会提出的 BMRC 曲线。

表1 粉尘浓度连续监测方法对比

Table 1 Comparison of dust concentration continuous monitoring methods

测量技术	优点	缺点	使用成本	维护难度	适用工况
β 射线法	测量精度较高,量程大,一致性较好	测量周期较长,结构复杂,体积较大	较高	维护量小	城市固定污染源排放颗粒物浓度监测、城市空气质量监测
微量振荡天平法	测量精度高,检测灵敏度高	测量范围小,结构复杂	高	维护较频繁	城市空气质量(颗粒物浓度)监测
光散射法	低浓度测量精度较高,灵敏度高,实时性好,安装使用方便	光学器件易污染,气路易阻塞	较低	维护频繁	煤矿、非煤矿山、城市固定污染源排放颗粒物浓度监测、抛光打磨作业场所可燃性粉尘浓度监测
电荷感应法	高浓度测量精度较高,量程大,结构简单,安装使用方便	影响因素较多,电极防水要求高	较低	免维护	煤矿、非煤矿山、抛光打磨作业场所可燃性粉尘浓度监测

目前,国内采用的呼吸性粉尘分离方法主要有旋风分离式、平板冲击式、水平陶析式等^[29-30]。平板冲击式分离器^[31]由喷射孔和冲击板组成,当含尘空气流经喷嘴时,气流速度增加,导致不同大小的粉尘颗粒获得不同的速度。较大粒径的粉尘因其较大的惯性,在喷嘴处直接撞击到冲击板上并被捕获,而较小粒径的粉尘则跟随气流绕过冲击板继续流动。由于冲击板上存在黏性物质,冲击板需定期涂抹和更换,且粉尘浓度大时更换更为频繁,从呼吸性粉尘连续分离来看,平板冲击式分离技术并不适用。水平陶析式分离器^[32]主要依靠重力的沉降作用,其结构简单,含尘气流进入分离器后,由于粒径大的颗粒物重力作用较强,随气流运动能力弱,所以在分离器前端沉积,粒径小的颗粒随气流流动至检测单元。受放置位置和朝向的影响,长时间或高浓度环境下使用会造成分离器被粒径大的粉尘填满,导致检测结果产生明显误差。旋风分离器^[33]利用气流的旋转运动,使粉尘颗粒在离心力的作用下甩向器壁,从而分

离较大的粉尘颗粒,相较于前2种分离器,旋风分离器可使用时间较长,但是其收集腔内易累积粉尘,需定期清理以保证效率,因此仍难以满足呼吸性粉尘连续分离要求^[34-35]。

在煤炭行业,传统的呼吸性粉尘分离方法只适用于短周期分离,缺少满足 BMRC 曲线的呼吸性粉尘连续分离技术。因此,文献^[36]在传统平板冲击式分离技术基础上提出了虚拟冲击的概念,通过设计避免颗粒与实体表面的直接碰撞,从而减少颗粒的反弹和沉积,解决分离装置易积尘、过载、堵塞等问题。W. D. CONNER^[37]研制了第1台虚拟冲击分离器,解决了粒子夹带与反弹问题,之后虚拟冲击器逐渐投入实际应用中^[38]。T. OKUDA 等^[39]开发了一种切割粒径为 2.4 μm 的虚拟冲击器,验证了 PM2.5 的分离性能。国内对虚拟冲击技术的研究起步较晚,蒋靖坤等^[40]基于虚拟撞击原理对固定源 PM10/PM2.5 采样器进行了研究。惠立锋等^[41]提出一种基于虚拟冲击原理的呼吸性粉尘分离方法,满足呼吸

性粉尘浓度在线测量对粉尘连续分离的效能及时效要求。谢双^[42]借鉴传统惯性冲击分离理论,使用单分散气溶胶发生器产生 2.2, 3.9, 5, 5.9, 7.1 μm 的气溶胶粒子,测试 5 种粒径下对应的分离效能,得出分离效能均小于 5%。

多点监测、长时间连续监测和呼吸性粉尘浓度监测是粉尘浓度监测技术的未来发展趋势。目前,国外的连续分离技术依然远远领先我国,且已投入实际应用中。因此,深入研究一种满足我国分离标准并实现连续分离的技术具有非常重大的意义。

3 粉尘浓度连续监测技术存在的问题

粉尘浓度连续监测技术在工业和环境监测中扮演着至关重要的角色,尤其在煤矿、冶金、建材等高粉尘环境下。然而,尽管该技术的应用已取得一定进展,仍然存在诸多亟待解决的问题。本文从测量精度、可靠性与稳定性、环境适应性、智能化自动校准与功耗优化等方面,系统分析了粉尘浓度监测技术面临的挑战,并探讨了未来的改进方向。

3.1 仪器测量精度

当前,粉尘浓度传感器的测量误差较大,限制了其在高精度应用场景中的推广。常见的粉尘浓度传感器如激光散射式粉尘浓度传感器、感应式粉尘浓度传感器,其测量误差通常在 15% 左右,要将误差控制在 10% 甚至 5% 以内仍面临一定的技术难度。这主要是由于激光散射法受粉尘粒径、形状及浓度等因素的影响较大,导致测量精度难以进一步提高。微量振荡天平技术虽然可将测量误差控制在 5% 以内,但其滤膜的容尘量较小,只适用于颗粒物浓度较低的环境,例如地面大气环境监测。而在高粉尘浓度环境中,例如煤矿井下,微量振荡天平技术并不适用,现有技术的测量精度远未达到理想状态,尤其在复杂和恶劣的作业条件下。因此,未来的研究应着重于发展新型传感技术,结合多源传感器融合算法和深度学习技术,动态修正因粉尘粒径、形状、折射率等因素引起的误差。此外,利用光谱技术和先进的流体力学模型,可提高颗粒物浓度测量精度,特别是在复杂环境中精确检测细颗粒(如 $\text{PM}_{2.5}$)的浓度变化。

3.2 仪器的可靠性、稳定性和环境适应性

粉尘监测仪器长期运行中的稳定性、可靠性及环境适应性直接影响其在恶劣环境下的表现。煤矿井下环境相对复杂且苛刻,包括高湿度、强风速、电磁干扰等因素,这些环境条件都会对检测仪器的测量精度造成显著影响。煤层开采工艺的不同、煤种

的多样性及粉尘粒径的变化等也会对监测结果的准确性产生负面影响。例如,在潮湿空气中,光学式粉尘浓度传感器的光学检测窗口容易被污染,导致测量不准确;在潮湿环境下,滤膜吸湿也会造成 β 射线粉尘浓度传感器测量误差加大;此外,电磁干扰可能对感应式粉尘浓度传感器的检测结果产生干扰,降低仪器的可靠性。这些因素大幅度降低了设备的稳定性和使用寿命。为了提升仪器的长期稳定性,建议未来研究在光学检测窗口中采用纳米涂层材料,或引入自清洁技术。同时,开发针对煤矿环境的防电磁干扰和湿度补偿算法,以提高设备的抗干扰能力和长期可靠性。此外,还可在软件算法上做出改进,增加对环境变化的自动补偿能力,以提升设备的环境适应性。

为了确保设备的可靠性,粉尘浓度监测仪器在工程样机验证之后需要进行一系列验证测试,主要包括环境适应性验证、安全性测试、电磁兼容测试、软件测试、可靠性测试及可靠性指标验证等。通常,环境适应性验证、安全性测试、电磁兼容测试、软件测试都是基于相关产品或行业标准的条款进行验证。可靠性测试则包括可靠性强化试验和综合应力可靠性试验等,其目的在于暴露产品的缺陷或验证产品在恶劣环境中的适应能力。可靠性指标验证通常结合产品的既定可靠性指标(如平均无故障时间)进行,包括现场验证、加速试验验证和数据评估等方法,以确保产品在不同工况下的可靠性。

3.3 智能化自动校准

现有粉尘浓度监测设备的智能化水平普遍较低,大部分设备仍依赖于人工进行定期维护和校准。特别是在煤矿井下的复杂环境中,传感器的工作负荷大,且难以频繁进行人工维护。自动化故障诊断、校准和标定功能缺乏,导致设备在长期运行中容易出现故障或精度偏移,增加了维护成本和人员负担。通过提升粉尘浓度传感器的智能化程度,使仪器实现自校准、自标定,且在出现故障时能够自动识别并上报故障类型,以便及时处理,可有效延长仪器的维护周期,减少对人力的依赖,降低维护工作量。例如,可通过集成深度学习算法实时分析传感器数据,自动识别故障并上报问题。此外,基于机器学习的故障预测模型可有效提高设备的运行可靠性和维护效率。通过智能化系统的引入,设备将能够在无人工干预的情况下,自动执行校准和维护任务,大幅延长其工作周期,降低运营成本。

3.4 功耗优化

粉尘监测仪器的功耗问题也是一个重要的挑

战,特别是在煤矿井下等需要持续监测的场景中。目前,大多煤矿井下监测仪器都是由监控分站供电,如果监测仪器的功耗较高,不仅会增加分站的供电负担,还会限制外接监测设备的数量,从而影响监测的覆盖范围和灵活性。激光、光电探测器及采样泵是粉尘浓度监测中功耗较大的部分,特别是激光源和采样装置长时间运行时功耗较高。传输实时数据时,无线通信模块(如 WiFi, LoRa 等)也是功耗的主要来源。如果能够降低监测仪器的功耗,就可在不增加供电负担的情况下接入更多监测设备,并可将设备部署在距离监控分站较远的区域,从而增强监测的灵活性和适应性。

因此,开发低功耗粉尘浓度监测设备成为提高系统适应性的关键一步。未来可通过引入低功耗微处理器、优化数据采集与传输协议来降低设备的能耗需求。采用智能电源管理系统,根据实际监测需求动态调节仪器的功耗,确保设备在低负荷情况下也能保持较低的功耗,从而进一步提高能效,适应井下环境需求。同时,研究低功耗无线通信技术(如 LoRa, NB-IoT)和能量自供电技术(如光伏供电、振动能量采集)将有助于提高设备的续航能力,尤其在能源供应受限的环境中。

4 粉尘浓度监测技术发展趋势

近年来,粉尘浓度监测技术经历了显著的变革,逐步从传统的单一总粉尘浓度监测向更加综合的方向发展,其中一个重要趋势是实现总粉尘和呼吸性粉尘的共同监测。传统的总粉尘浓度监测虽然能够提供总体粉尘暴露量,但忽略了对健康影响更大的呼吸性粉尘的评估。呼吸性粉尘颗粒粒径较小,能够深入到肺泡,长期暴露会对人体健康造成严重威胁。为了更全面评估粉尘对人体的影响,呼吸性粉尘浓度监测逐渐成为焦点。现代监测技术利用高精度传感器和智能算法将总粉尘和呼吸性粉尘同时纳入监测系统,不仅能提供整体粉尘暴露情况,还能进一步细化到呼吸性粉尘的监测。通过集成化传感器网络,能够精准地获取这 2 种粉尘的实时浓度变化,从而为工业现场提供更为细致的健康风险评估。

同时,粉尘浓度监测技术正从点监测向面监测和区域监测方向快速推进。传统的点监测方式虽然具备较高灵敏度,但监测范围有限,难以满足大范围、高动态粉尘环境的需求。随着工业生产规模的扩大和生产环境的复杂化,区域性粉尘浓度监测需求日益增加。为应对这些挑战,激光雷达、计算机视觉、深度学习、大数据分析及多点传感器网络等技

术逐步应用到粉尘浓度监测领域,推动粉尘浓度监测从传统的单一手段向智能化、自动化方向迈进。

1) 机器学习在粉尘浓度监测中的应用。机器学习具有强大的数据处理和模式识别能力,被广泛应用于粉尘浓度监测中。其主要应用包括粉尘浓度的趋势预测、异常检测和数据融合。通过监督学习和无监督学习算法,机器学习能够根据大量历史数据分析粉尘浓度变化趋势,提前预测粉尘浓度波动,从而可提前制定粉尘治理措施,防止浓度超标。Li Lin 等^[43]融合注意力机制与长短期记忆网络,建立了露天矿粉尘浓度预测模型,该模型具有稳定且精度较高的特点。赵耀忠等^[44]通过 5 种机器学习算法,建立了多因素环境影响下的粉尘浓度监测模型。金磊等^[45]使用随机森林对粉尘浓度进行预测,提出了 4 种启发式智能优化随机森林超参数的方法,可准确预测粉尘浓度并确定粉尘影响因素,对矿山粉尘管控具有重要参考价值。此外,异常检测算法(如支持向量机)可自动识别粉尘浓度异常波动,并快速触发预警。在多源传感器数据融合中,机器学习还可通过权重调整和数据校正来提升整体监测的可靠性和精确度。

2) 深度学习在粉尘浓度监测中的应用。深度学习具备强大的表征学习能力,能够自动从大量数据中提取有用特征。随着深度学习的发展,卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)被应用到粉尘浓度监测中。王艳等^[46]将改进 ResNet 残差网络应用到扬尘数据集识别中,通过扩大特征图来提取更精细的粒度特征,识别“是否存在扬尘”的准确率达 91%。CNN 还可用于处理来自激光雷达、摄像头等的图像或空间数据,激光雷达通过扫描大范围区域,实时获取三维空间内的粉尘浓度分布数据,其高精度和远距离监测能力使得大面积粉尘浓度监测成为可能。此外,深度学习中的循环神经网络和长短期记忆网络在处理时间序列数据时表现优异,能够准确捕捉粉尘浓度随时间的动态变化,为预测和趋势分析提供更高精度的支持。K. K. Ko 等^[47]结合长短期记忆网络与 CNN vgg-19 模型,对卫星图像中的扬尘污染特征进行卷积和下采样处理,提高了粉尘浓度预测性能。

3) 计算机视觉在粉尘浓度监测中的应用。计算机视觉技术与深度学习相结合,通过对图像和视频数据的深入分析,在粉尘浓度监测领域得到了广泛应用。Wang Mingpu 等^[48]针对建筑工地活动区域产生大量粉尘的问题,提出一种基于 YOLOv7 的建筑工地可见粉尘目标检测模型,同时引入可变形卷积

网络和 Wise-IoU, 提高了模型对可见粉尘等非刚性目标的检测精度。陈锋^[49]通过粉尘浓度测量仪测量标准粉尘浓度, 分析得出图像平均灰度值与粉尘浓度的关系。刘伟华^[50]基于机器视觉技术提出一种新的远程在线微米级颗粒检测方法, 实现了煤矿井下粉尘远程监测。计算机视觉技术还能够利用图像处理算法(如暗原色原理)自动识别图像中的粉尘区域, 并通过颜色和亮度变化计算粉尘浓度分布。这种方法可用于大范围空间的粉尘浓度监测, 实时捕捉粉尘动态变化, 并为后续粉尘治理提供数据支持。此外, 结合高灵敏度的近红外探测技术和量子雷达技术, 可实现大范围空间的粉尘浓度监测。

4) 数据分析与预测在粉尘浓度监测中的应用。数据分析与预测在粉尘浓度监测中的应用重点在于对大规模多源数据的整合与利用。通过数据分析平台, 粉尘浓度监测系统能够对历史监测数据、实时数据和环境变量进行整合分析, 提取出影响粉尘浓度变化的关键因素。结合机器学习和深度学习算法进行数据分析, 不仅能准确预测粉尘浓度变化趋势, 还能优化监测点的布置和监测策略。例如, 利用回归分析和时间序列模型, 能够根据历史数据动态调整排风系统或除尘设备的运行参数, 确保粉尘浓度始终维持在安全范围内。同时, 基于大数据技术的实时分析系统能够处理来自多个传感器的海量数据, 为生产安全管理提供数据支持。

5 结论

1) 系统梳理了国内外粉尘浓度连续监测技术的发展现状, 重点分析了光散射法、 β 射线法、电荷感应法及振荡天平法等主流技术的测量原理、优势及局限性, 并深入探讨了呼吸性粉尘分离技术及标准的应用情况, 指出现有分离技术在连续性、精度和稳定性方面仍存在明显挑战。

2) 针对当前粉尘浓度监测技术在复杂环境适应性、测量精度、可靠性及智能化自动校准方面的不足, 提出了未来技术发展的重点方向: 可通过多传感器融合、智能算法与低功耗设计, 提升设备在极端工况下的长期稳定性与精确度; 粉尘浓度监测技术正逐步从单一总粉尘浓度监测向总粉尘与呼吸性粉尘联合监测发展, 并从点监测向面监测和区域监测方向快速推进, 利用激光雷达、计算机视觉、机器学习及大数据技术, 可实现粉尘分布的动态可视化监测与预测。

3) 未来, 粉尘浓度监测技术将进一步朝着高精度、智能化、自动化和大范围实时监测的方向发展,

推动粉尘防控技术与智能预警系统的深度融合, 可为保障工业环境安全、降低职业病发病率提供理论依据与技术支持。

参考文献(References):

- [1] 郑丽娜, 范钰雪, 刘豆, 等. 粉尘粒径分布检测技术现状与应用进展[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(10): 3876-3888.
ZHENG Lina, FAN Yuxue, LIU Dou, et al. Current status and progress in dust particle size distribution detection technology[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(10): 3876-3888.
- [2] LIU Ting, LIU Shimin. The impacts of coal dust on miners' health: a review[J]. Environmental Research, 2020, 190. DOI: [10.1016/j.envres.2020.109849](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109849).
- [3] PALUCHAMY B, MISHRA D P, PANIGRAHI D C. Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mine-generation, health impacts and control measures for cleaner production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.126524](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126524).
- [4] ZHOU Ying, ZI Teng, LANG Jianlei, et al. Impact of rural residential coal combustion on air pollution in Shandong, China[J]. Chemosphere, 2020, 260. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.127517](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127517).
- [5] WANG Bing, WU Chao, KANG Liangguo, et al. What are the new challenges, goals, and tasks of occupational health in China's Thirteenth Five-Year Plan (13th FYP) period?[J]. Journal of Occupational Health, 2018, 60(3): 208-228.
- [6] 周福宝, 袁亮, 程卫民, 等. 矿井粉尘职业健康防护技术 2013—2023 年研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(12): 5-15.
ZHOU Fubao, YUAN Liang, CHENG Weimin, et al. Research progress on occupational health protection technology of mine dust from 2013 to 2023[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(12): 5-15.
- [7] 程卫民, 周刚, 陈连军, 等. 我国煤矿粉尘防治理论与技术 20 年研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 1-20.
CHENG Weimin, ZHOU Gang, CHEN Lianjun, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 1-20.
- [8] AMOAH N A, XU Guang, WANG Yang, et al. Application of low-cost particulate matter sensors for air quality monitoring and exposure assessment in underground mines: a review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(8): 1475-1490.
- [9] 顾大钊, 李全生. 基于井下生态保护的煤矿职业健

- 康防护理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 950-958.
- GU Dazhao, LI Quansheng. Theoretical framework and key technologies of underground ecological protection based on coal mine occupational health prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 950-958.
- [10] 王杰, 郑林江. 煤矿粉尘职业危害监测技术及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 119-125.
- WANG Jie, ZHENG Linjiang. Development tendency and monitoring technology of dust occupational hazard in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 119-125.
- [11] 陈建阁, 李德文, 许江, 等. 基于光散射法无动力粉尘质量浓度检测技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增刊 1): 149-158.
- CHEN Jiange, LI Dewen, XU Jiang, et al. Non dynamic dust mass concentration detection technology based on light scattering method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 149-158.
- [12] 赵政, 李德文, 吴付祥, 等. 基于光散射法和电荷感应法融合的粉尘浓度检测技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 139-146, 152.
- ZHAO Zheng, LI Dewen, WU Fuxiang, et al. Dust concentration detection technology based on fusion of light scattering method and charge induction method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(1): 139-146, 152.
- [13] 巫亮. 基于 β 射线法的大气颗粒物分级监测系统研究[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 170-173.
- WU Liang. Research of atmospheric particulates classification monitoring system based on β -ray method[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(7): 170-173.
- [14] 陈建阁, 李德文, 王杰, 等. 基于静电感应法的粉尘质量浓度检测装置优化[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2668-2677.
- CHEN Jiange, LI Dewen, WANG Jie, et al. Optimization of dust concentration detection device based on electrostatic induction method[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2668-2677.
- [15] 屠烟波. 振荡天平法粉尘测量研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2020.
- TU Yanbo. Research on dust measurement by oscillatory balance method[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2020.
- [16] 王杰, 叶长青, 赵海波. 粉尘浓度测量方法综述[J]. 科技资讯, 2015, 13(35): 241-242.
- WANG Jie, YE Changqing, ZHAO Haibo. Overview of dust concentration measurement methods[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(35): 241-242.
- [17] 杨俊哲. 神东矿区综合防尘技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 54-59.
- YANG Junzhe. Comprehensive dust prevention technology and application in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 54-59.
- [18] 魏海天, 王杰, 陈述斌. 基于数据融合的光散射法与 β 射线粉尘监测技术研究[J/OL]. 矿业安全与环保: 1-7[2024-09-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.td.20240415.1651.002.html>.
- WEI Haitian, WANG Jie, CHEN Shubin. Research on light scattering method and β -ray dust monitoring technology based on data fusion[J/OL]. Mining Safety & Environmental Protection: 1-7[2024-09-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.td.20240415.1651.002.html>.
- [19] 李德文, 卓勤源, 吴付祥, 等. 基于 β 射线法的粉尘质量浓度检测算法研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 8-13.
- LI Dewen, ZHUO Qinyuan, WU Fuxiang, et al. Research on algorithm of dust concentration detection based on β -ray method[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 8-13.
- [20] 尹江江. 基于计算机视觉的粉尘污染在线监测与评价方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- YIN Jiangjiang. Research on online monitoring and evaluation method of dust pollution based on computer vision[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [21] 刘东旭, 李朋宾. 基于电荷感应法的粉尘浓度传感器研究[J]. 山东工业技术, 2015(3): 63-64.
- LIU Dongxu, LI Pengbin. Research on dust concentration sensor based on charge induction method[J]. Shandong Industrial Technology, 2015(3): 63-64.
- [22] 李德文, 隋金君, 刘国庆, 等. 中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 1-7, 13.
- LI Dewen, SUI Jinjun, LIU Guoqing, et al. Technical status and development direction of coal mine dust hazard prevention and control technology in China[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 1-7, 13.
- [23] 周福宝, 郑丽娜, 冯子康, 等. 基于振荡天平原理的矿工个体粉尘连续监测仪的研制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 876-884.
- ZHOU Fubao, ZHENG Lina, FENG Zikang, et al. Development of a miner personal dust continuous monitor based on the principle of oscillating balance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 876-884.
- [24] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
- YUAN Liang. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 1-7.
- [25] FIGUEROA-LARA J J, MURCIA-GONZÁLEZ J M, GARCÍA-MARTÍNEZ R, et al. Effect of platform

- subway depth on the presence of airborne PM_{2.5}, metals, and toxic organic species[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 377: 427-436.
- [26] LOY-BENITEZ J, HEO S, YOO C. Imputing missing indoor air quality data via variational convolutional autoencoders: implications for ventilation management of subway metro systems[J]. *Building and Environment*, 2020, 182. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107135.
- [27] WIDIATMOJO A, SASAKI K, SUGAI Y, et al. Assessment of air dispersion characteristic in underground mine ventilation: field measurement and numerical evaluation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 93: 173-181.
- [28] 李彦筑, 王杰, 谢双. 呼吸性粉尘虚拟冲击分离器数值模拟及实验验证[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(3): 20-25.
- LI Yanzhu, WANG Jie, XIE Shuang. Numerical simulation and experimental verification of respirable dust virtual impact separator[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(3): 20-25.
- [29] LI Yanna, FU Muqing, PANG Wei, et al. A combined virtual impactor and field-effect transistor microsystem for particulate matter separation and detection[J]. 2021, 4(1). DOI: 10.1063/1.50003447.
- [30] BIANCHINI A, PELLEGRINI M, ROSSI J, et al. Theoretical model and preliminary design of an innovative wet scrubber for the separation of fine particulate matter produced by biomass combustion in small size boilers[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 116: 60-71.
- [31] 原永涛, 魏玉珍, 张滨渭, 等. 多级冲击采样器用于发电厂烟道飞灰采样的探讨[J]. *热力发电*, 2010, 39(5): 77-81.
- YUAN Yongtao, WEI Yuzhen, ZHANG Binwei, et al. An approach to multi-stage impact sampler used for fly ash sampling in flue duct of power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(5): 77-81.
- [32] 于海明, 程煜, 程卫民, 等. 虚拟冲击分离效能的多因素影响机制研究[J/OL]. *材料导报*: 1-16 [2024-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240415.1001.002.html>.
- YU Haiming, CHENG Yu, CHENG Weimin, et al. Research on the multi factor influence mechanism of virtual impact separation efficiency[J/OL]. *Materials Reports*: 1-16 [2024-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240415.1001.002.html>.
- [33] 秦鹏, 孔雷, 杨子祥. 综掘面煤尘防治综合技术研究[J]. *煤矿现代化*, 2017, 26(4): 18-20.
- QIN Peng, KONG Lei, YANG Zixiang. The comprehensive technology research on coal dust control in fully-mechanized coal mining face[J]. *Coal Mine Modernization*, 2017, 26(4): 18-20.
- [34] 苏伟, 武晶晶, 于建奇, 等. 旋风分离器的气相流场的性能分析及数值模拟[J]. *机械制造与自动化*, 2017, 46(3): 161-163.
- SU Wei, WU Jingjing, YU Jianqi, et al. Performance analysis and numerical simulation of gas flow field in cyclone[J]. *Machine Building & Automation*, 2017, 46(3): 161-163.
- [35] 黄鹏升. 基于响应曲面法的旋风分离器排气管优化研究[J]. *现代矿业*, 2021, 37(8): 169-173.
- HUANG Pengsheng. Optimization of exhaust pipe of cyclone separator based on response surface method[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(8): 169-173.
- [36] HOUNAM R F, SHERWOOD R J. The cascade centripeter: a device for determining the concentration and size distribution of aerosols[J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1965, 26(2): 122-131.
- [37] CONNER W D. An inertial-type particle separator for collecting large samples[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1966, 16(1): 35-38.
- [38] 马弢, 杨屹, 商洁, 等. 某型虚拟冲击器的设计及数值模拟[J]. *辐射防护*, 2021, 41(4): 359-364.
- MA Tao, YANG Yi, SHANG Jie, et al. Design and numerical simulation of a virtual impactor[J]. *Radiation Protection*, 2021, 41(4): 359-364.
- [39] OKUDA T, SHISHIDO D, TERUI Y, et al. Development of a high-volume simultaneous sampler for fine and coarse particles using virtual impactor and cyclone techniques[J]. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2018, 12(1): 78-86.
- [40] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2003-2007.
- JIANG Jingkun, DENG Jianguo, LI Zhen, et al. Application of a two-stage virtual impactor in measuring of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from stationary sources[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2003-2007.
- [41] 惠立锋, 李德文, 郭永彩. 基于虚拟冲击原理的呼吸性粉尘连续分离技术[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(8): 3062-3070.
- HUI Lifeng, LI Dewen, GUO Yongcai. Continuous separation of respirable dust based on virtual impactor principle[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(8): 3062-3070.
- [42] 谢双. 基于虚拟冲击原理的呼吸性粉尘分离技术和分离器研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2019.
- XIE Shuang. Research on respirable dust separation technology and separator based on virtual impact principle[D]. Chongqing: Chongqing University of Science & Technology, 2019.

- [14] WANG Mingming, LUO Jianjun, YUAN Jianping, et al. Coordinated trajectory planning of dual-arm space robot using constrained particle swarm optimization[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 146: 259-272.
- [15] EKREM Ö, AKSOY B. Trajectory planning for a 6-axis robotic arm with particle swarm optimization algorithm[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106099.
- [16] LIANG Bingqin, LIN Xinzhang, LIU Ganghui, et al. Trajectory analysis and optimization of sea buckthorn fruit vibration separation manipulator based on I-PSO algorithm[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1). DOI: 10.1038/s41598-023-47001-2.
- [17] LI T H S, KUO Pinghuan, HO Y F, et al. Intelligent control strategy for robotic arm by using adaptive inertia weight and acceleration coefficients particle swarm optimization[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 126929-126940.
- [18] 何磊. 六自由度喷浆机械臂的轨迹规划与跟踪控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- HE Lei. Research on trajectory planning and tracking control of six-degree-of-freedom slurry spraying robotic arm[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [19] GB 50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
- GB 50086—2015 Technical code for engineering of ground anchoring and shotcrete support[S].
- [20] 陈伟华, 张铁. 六自由度喷涂机器人插补算法的研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(8): 251-252, 263.
- CHEN Weihua, ZHANG Tie. The study of 6-DOF painting robot's interpolation algorithm[J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(8): 251-252, 263.
- [21] 林威, 江五讲. 工业机器人笛卡尔空间轨迹规划[J]. *机械工程与自动化*, 2014(5): 141-143.
- LIN Wei, JIANG Wujiang. Trajectory planning of industrial robot in Cartesian space[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2014(5): 141-143.
- [22] NICKABADI A, EBADZADEH M M, SAFABAKHSH R. A novel particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(4): 3658-3670.
- [23] LI T H S, LIN C J, KUO Pinghuan, et al. Grasping posture control design for a home service robot using an ABC-based adaptive PSO algorithm[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(3). DOI: 10.5772/64044.

(上接第 119 页)

- [43] LI Lin, ZHANG Ruixin, SUN Jiandong, et al. Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm[J]. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2021, 19(1): 401-414.
- [44] 赵耀忠, 严俊龙, 任吉凯, 等. 基于机器学习的露天煤矿粉尘浓度预测[J]. 煤炭工程, 2022, 54(增刊 1): 157-161.
- ZHAO Yaozhong, YAN Junlong, REN Jikai, et al. Prediction of dust concentration in open pit coal mines based on machine learning[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(S1): 157-161.
- [45] 金磊, 杨晓伟, 张浩, 等. 基于 HA-RF-SHAP 的露天煤矿粉尘浓度预测模型[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(1): 74-83.
- JIN Lei, YANG Xiaowei, ZHANG Hao, et al. Prediction model for dust concentration in open-pit coal mines based on HA-RF-SHAP[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2024, 44(1): 74-83.
- [46] 王艳, 张游杰. 基于改进残差网络的扬尘图像识别方法[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(5): 202-207.
- WANG Yan, ZHANG Youjie. Dust image recognition method based on improved residual network[J]. *Computer Systems & Applications*, 2021, 30(5): 202-207.
- [47] KO K K, JUNG E S. Improving air pollution prediction system through multimodal deep learning model optimization[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20). DOI: 10.3390/app122010405.
- [48] WANG Mingpu, YAO Gang, YANG Yang, et al. Deep learning-based object detection for visible dust and prevention measures on construction sites[J]. *Developments in the Built Environment*, 2023, 16. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100245.
- [49] 陈锋. 基于图像法的粉尘浓度检测设计与研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
- CHEN Feng. Design and research on dust concentration detection based on image method[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2019.
- [50] 刘伟华. 基于机器视觉的煤尘在线检测系统关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- LIU Weihua. Research on key technologies of coal dust online detection system based on machine vision[D]. Jinan: Shandong University, 2011.