煤矿粉尘防控理论与技术新进展及展望

王和堂[1,2],徐超航[1,3],朱小龙[1,2],朱金佗[1,2],周文东[1,4],甘 建[1],魏晓宾[1,2]
(1. 中国矿业大学 煤矿灾害防控全国重点实验室,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;3. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院,湖北 武汉 430070;4. 南京信息工程大学 应急管理学院,江苏 南京 210044)

摘要: 煤炭开采活动产生的粉尘不仅危害从业人员职业安全健康,还造成环境污染,制约智慧矿山建设,因此,粉尘防控是煤炭安全绿色智能开采亟需解决的关键问题. 本文基于全生命周期理念,构建了涵盖“产尘-减尘-抑尘-降尘-除尘-阻尘”6个方面的煤矿粉尘防控理论框架与技术体系. 在总结矿尘产生机理、影响机制与扩散规律的基础上,阐述了注水减尘、泡沫抑尘、喷雾降尘、通风除尘和个体防尘理论与技术的研究进展. 注水减尘方面,重点解析了煤的物化结构、孔隙水压、固液耦合效应对煤体渗润特性的影响机制,阐释了通过煤体物性改造与注入流体改性提升注水减尘效果的技术路径,概述了应用进展;泡沫抑尘方面,综述了泡沫抑尘原理及抑尘发泡剂、泡沫制备和喷射等技术的研究进展与应用情况;喷雾降尘方面,探讨了矿尘与雾滴耦合作用捕尘理论的最新成果,梳理了喷雾降尘技术的发展与应用现状;通风除尘方面,总结了风幕控尘、湿式除尘器及干式除尘器的技术进展与实践效果;个体防尘方面,阐明了不同滤料滤尘性能和机理,明确了个体防尘呼吸器分类与选型原则,对比了国内外现行个体防尘呼吸器测评标准. 最后展望了未来发展趋势,以期为推动粉尘防控领域科技进步提供有益参考和借鉴.

关键词: 煤矿粉尘;职业健康;产尘与运移;矿尘治理;个体防护
中图分类号: TD 714.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)02-0326-24

New progress and prospect of dust control theory and technology in coal mines

WANG Hetang[1,2], XU Chaohang[1,3], ZHU Xiaolong[1,2], ZHU Jintuo[1,2], ZHOU Wendong[1,4], GAN Jian[1], WEI Xiaobin[1,2]
(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 4. School of Emergency Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract: Dust generated by coal mining activities not only seriously threatens the occupational health of workers, but also causes environmental pollution and restricts the construction of smart mines. Dust prevention and control is a key issue that needs to be urgently addressed for safe, green, and intelligent mining in coal mines. Based on the concept of the whole life cycle, this paper

收稿日期: 2025-10-14 **修回日期:** 2026-03-05 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250439
基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(52322404);国家自然科学基金面上项目(52274237,51874290)
通信作者: 王和堂(1985—),男,湖南省耒阳市人,教授,博士生导师. E-mail: wanghetang@cumt.edu.cn
引用格式: 王和堂,徐超航,朱小龙,等.煤矿粉尘防控理论与技术新进展及展望[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):326-349.
WANG Hetang, XU Chaohang, ZHU Xiaolong, et al. New progress and prospect of dust control theory and technology in coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 326-349.

constructs a theoretical framework and technical system of coal mine dust prevention and control covering six aspects: "dust generation - dust reduction - dust suppression - dust mitigation - dust removal - dust prevention". Based on a summary of the generation mechanism, influencing mechanism and diffusion law of mine dust, the research achievements of water injection for dust reduction, foam for dust suppression, spray for dust reduction, ventilation for dust removal and personal protection theory and technology are expounded. Regarding water injection for dust reduction, the study focuses on analyzing the influence mechanisms of coal's physicochemical properties, pore water pressure, and hydraulic coupling effects on coal body seepage characteristics. It outlines technical pathways to enhance water injection dust reduction efficacy through modifying coal properties and injecting modified fluids, while summarizing the application progress of this technology. Regarding foam for dust suppression, this section reviews the principles of foam dust suppression alongside research advances and application in developing dust-suppressing foaming agents, foam preparation and spraying techniques. Regarding spray for dust reduction, it explores the latest findings on dust-capture theories involving the coupled action of dust particles and mist droplets, while outlining the development trends and current application status of spray for dust reduction technology. In the field of ventilation for dust removal, the technical advancements and practical outcomes of air curtains, wet dust collectors and dry dust collectors have been summarized. Regarding personal protection, the dust filtering performance and mechanism of different filter materials are explained, the classification and selection principles for individual dust respirators are defined, and the current domestic and international evaluation standards of individual dust respirators are compared. Finally, the key research areas and future development directions are proposed, aiming to provide useful references for promoting the technological progress of coal mine dust prevention and control.

Key words: coal mine dust; occupational health; dust generation and diffusion; mine dust control; personal protection

煤炭在我国能源体系中发挥着"压舱石"和"稳定器"的重要作用，对保障国家能源安全具有战略意义[1]. 随着煤矿采掘装备机械化、自动化水平的大幅提升，煤炭开采效率显著增强，然而矿尘的产生量也随之急剧增加[2]. 高浓度矿尘不仅易导致尘肺病、具有燃爆风险，还严重影响煤矿智能化设备的运行，制约图像识别等技术应用[3-4]. 与此同时，《"健康中国 2030"规划纲要》等一系列国家战略政策的相继出台，进一步体现了我国对职业健康"顶层设计"的高度重视. 因此，矿尘高效防控不仅是保障煤矿安全生产与职业健康的必然要求，更是突破煤矿智能化发展瓶颈，推动煤炭工业安全、绿色、健康、智能发展的关键支撑.

近年来，煤矿粉尘防控技术呈现出快速发展态势. 喷雾降尘、通风除尘等传统粉尘治理技术得到显著改进和优化，纳米改性材料、生物抑尘剂、自动感知喷雾系统等新兴材料、工艺、技术也逐步投入煤矿现场应用，大幅提升了矿尘防控效率. 然而，尽管矿尘防控技术取得了长足发展，但整体协同效能尚未充分发挥，目前煤矿粉尘防控技术正处于由"多点突破"向"系统协同"转型的关键时期. 尤其在实际应用中，依然面临诸多挑战，如材料的环保经济性、设备的环境适配性、系统功能的兼容性、效果评价的精确性及相关标准的滞后性等问题. 因此，系统梳理煤矿粉尘防控技术前期成果，深入解析当前技术壁垒，探究更加高效的治理方案，对于提升煤矿安全生产水平和保障职业健康具有重要的理论意义与实践价值.

基于此，本文从"产-减-抑-降-除-阻"6 个方面系统阐述了近年来国内外煤矿粉尘防控理论与技术的研究进展. 首先，溯本求源，深入剖析矿尘产生机理、影响机制与扩散规律；然后，全流程防控，分别从注水减尘、泡沫抑尘、喷雾降尘、通风除尘等方面，对相关技术的研究进展进行梳理、总结和分析；最后，终端防御，全面归纳个体防尘技术的研究进展；在此基础上，解析了煤矿粉尘

防控技术的演进逻辑，展望了其未来发展方向．通过这一全生命周期视角的系统综述，旨在识别关键技术瓶颈，深入剖析内在作用机制，洞察技术演进规律，研判技术发展趋势，以期为煤矿职业健康与安全领域的科技创新提供系统性参考与前瞻性思路．

1 煤矿粉尘产生机理与扩散规律

1.1 煤矿粉尘产生机理

矿尘产生是煤岩体破碎过程中固有的现象．采掘机械通过滚筒或截割头驱动截齿进行高速旋转运动，截齿与煤岩体壁面发生动态冲击及摩擦，致使煤岩体在受力破碎的同时释放大量矿尘．

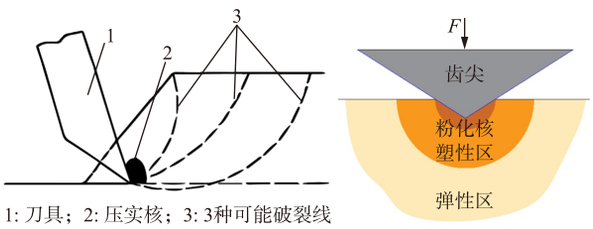
1.1.1 截割产尘理论模型

煤岩体破碎产生矿尘的前提是截齿施加的外部截割作用．1962年，文献[5]最早提出了刀形截齿在直线截割过程中形成密实核的假说，指出煤岩体与刀形截齿接触部分先被压缩破碎形成密实核，随着截齿持续推进，密实核周围煤岩体破裂，矿尘高速喷出，如图1a所示．文献[6]建立了刀形截齿水平截割与镐形截齿垂直侵入煤岩体时的截割力计算模型，如式(1)所示．尽管该截割力计算模型在工程实践中应用广泛，但仍存在一定弊端，如侵入力与煤岩体抗压强度成反比，而这一现象在实际中较为罕见；未考虑截齿侵入过程中形成的孔洞直径，忽略了截齿与煤岩体之间的摩擦力以及煤岩体脆性的影响．

$$F_{\mathrm{M}}=\frac{16\pi}{\cos^2\theta}\left(\frac{\sigma_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{c}}}\right)\sigma_{\mathrm{t}}d^2, \tag{1}$$

式中：F_{M}为峰值截割力；θ为截齿半锥角；σ_{t}为抗拉强度；σ_{c}为单轴抗压强度；d为截割厚度．

文献[7]提出了基于弹性断裂力学的峰值截割力预测模型，但该模型主要使用Griffith断裂力学理论的能量准则，未考虑应力准则，且系数k需由岩石切割试验确定，限制了该模型的应用．



1: 刀具；2: 压实核；3: 3种可能破裂线

(a) 截割力学模型 (b) 空腔扩展模型

图1 截齿截割理论模型[5,8]

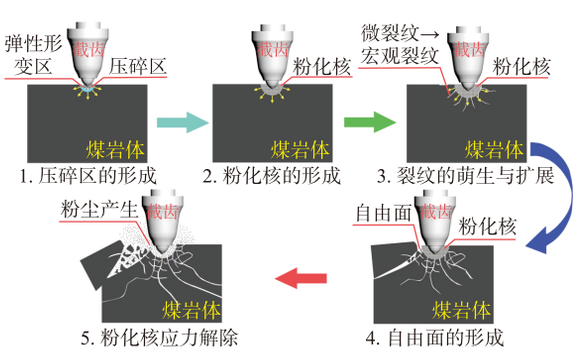
Fig. 1 Theoretical model during the pick cutting

粉化核是截割过程的首要尘源，计算出粉化核的体积可更直观地评价产尘量．空腔扩展模型能够很好地描述截齿齿尖侵入煤岩体过程中的破碎区尺寸和截齿受力变化趋势，如图1b所示(图中，F为截齿侵入力)，在此基础上可进一步推导出粉化核及塑性区的半径和截割力计算模型[8]．

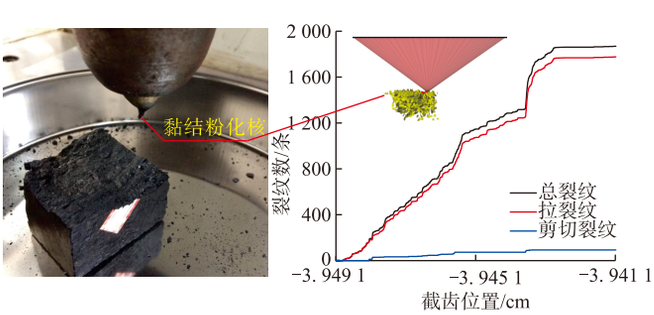
1.1.2 截割产尘过程

当煤岩体所受截齿施加的外力超过其强度极限时，会发生破碎并产生矿尘．文献[9]提出岩石首先经历线弹性变形阶段，随后裂纹萌生并逐渐稳定扩展，在达到临界能量释放点后发生失稳扩展，最终引发崩裂，初步揭示了煤岩体的破裂机制与特征，增进了对采掘截割作用下煤岩破碎行为的认识，但针对矿尘产生过程的系统研究仍相对不足．

笔者团队将煤岩体受镐型截齿侵入后的破碎产尘过程分为5个阶段：压碎区形成、粉化核形成、裂纹萌生与扩展、自由面形成、粉化核应力解除，并通过实验室试验和数值模拟证实了该过程[8]，如图2所示．粉化核密度大、积蓄能量，是截割过程的首要尘源，当宏观裂隙扩展形成新自由面时，粉化核所受应力约束迅速解除，聚集的能量释放将粉化核抛至空气中形成矿尘．



(a) 煤岩体破碎产尘过程



(b) 试验和数值模拟得到的粉化核

图2 煤岩体破碎产尘过程及粉化核[8]

Fig. 2 Dust generation process during the fragmentation of coal/rock mass and the pulverization nucleus

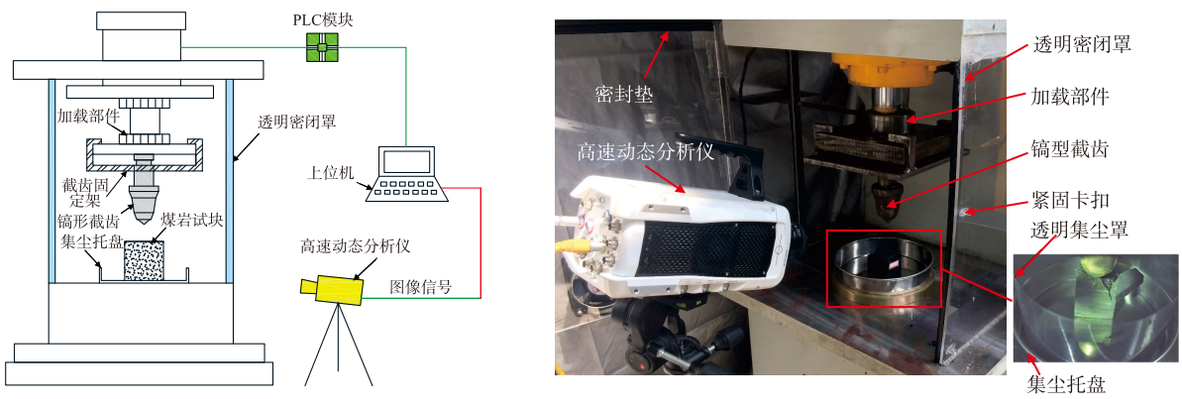
1.2　煤矿粉尘产生影响机制

截割产尘特性受内在与外在因素共同影响：内在因素主要指煤岩体自身固有的力学性能与物化性质（如变质程度、强度、脆性和可磨性等）；外在因素包括截齿几何参数、截割速度、截割深度等工况条件. 综合考虑内在和外在因素，可更全面地理解采掘机械截割煤岩体破碎产尘的机制和规律，为煤矿粉尘治理及其效能提升提供理论依据和实践指导.

1.2.1　煤岩体自身性质

1）煤阶

文献[10]利用辊式破碎机开展的试验结果表明，随着煤阶的提高，粒径小于 250 μm 的粉尘量显著增加，但全尘与呼吸性粉尘在总粉尘中的占比呈下降趋势. 然而，文献[11]使用哈氏可磨仪的测试显示，中低阶煤的产尘量和哈氏可磨指数均高于无烟煤，同时也指出现场环境复杂，不能仅凭单一的实验室研究结果断定烟煤产生的粉尘量高于无烟煤. 为了模拟矿用截齿破煤产尘过程，笔者团队自主研发了以镐型截齿作为破煤工具的产尘试验系统（图 3），深入探究了煤理化性质、截齿齿尖锥角、侵入角以及截割速度对产尘特性的影响[8].



(a) 示意图　　(b) 试验系统实物

图 3　单截齿截割产尘试验系统[8]

Fig. 3　Dust generation test system using one pick

2）水分含量

水分主要通过改变煤岩体的力学性质及其对原生矿尘的润湿作用抑制产尘行为. 笔者团队研究结果表明，煤体中水分的存在能降低粉尘尤其是呼吸性粉尘和 $PM_{2.5}$ 的产生量和累计占比[8].

3）孔隙特征

煤岩体内发育有复杂的孔裂隙结构，其生成过程中表面会附着矿尘（即原生矿尘）[12]，孔裂隙越发育，原生矿尘越多；另一方面，由于孔裂隙结构显著影响煤岩体的力学性质，而截割破碎产尘本质上是煤岩体宏观物理形态的变化，因此孔裂隙结构可通过改变煤岩体的力学性质影响产尘特性. 笔者的试验结果表明，孔隙率与细微粒径矿尘累积占比呈负相关，与全尘产尘率呈正相关，对呼吸性粉尘和 $PM_{2.5}$ 产尘率几乎无影响；孔隙结构分形维数与全尘产尘率呈负相关，与细微粒径矿尘累计占比呈很弱的正相关[13].

4）煤岩体力学特征

文献[14]利用自制的截割试验平台研究指出，煤岩体的抗压强度越高，截割产生的小尺寸碎块数量越少；然而，文献[15]针对无烟煤、烟煤和褐煤的截割试验结果表明，单轴抗压强度较高的无烟煤产尘量最多. 笔者研究发现，煤体脆性越高，全尘产生率越低，但细微颗粒矿尘占比则越大[16].

1.2.2　机械工况参数

采掘机械高强度截割作业是煤矿粉尘的首要源头，其工况参数成为影响产尘特性的关键外在因素，其中包含滚筒运动及结构参数、截齿形貌与布置参数等[17].

1）截割深度及速度

文献[18]研究结果表明截割深度越小，产尘量越大. 笔者试验发现，不同截割速度对产尘特性几乎没有变化，这是由于截齿侵入速度远小于煤岩体内部的应力波波速，因此其难以对裂纹扩展及破碎产尘过程产生动态效应影响，但同时指出，实际生产过程中，截割速度加快可能会增加煤岩体二次破碎的几率，使产尘量增加[19].

2）截齿形貌与布置参数

由于截齿与煤岩体长期处于高强度碰撞状

态，易引发磨损及齿尖脱落等问题，磨损后的截齿与完好截齿截割煤岩体产尘特性存在显著差异．笔者发现产尘量与齿尖锥角呈正相关[19]；文献[20]指出截齿螺旋升角的变化对产生碎块和粉尘的尺寸几乎无影响．

1.3 煤矿粉尘扩散规律

煤矿粉尘产生后会随风流扩散运移，污染范围大、危害广，揭示矿尘扩散规律能够为防控技术研发提供理论依据，针对性指导降尘方案制定．

文献[21]模拟了煤矿综掘工作面矿尘在横向与纵向的整体迁移分布规律．文献[22]研究发现大粒径粉尘易于沉降，呼吸性粉尘沉降效率低．文献[23]采用 Euler-Euler 法和 Euler-Lagrange 法，建立了全粒径粉尘的蒙特卡洛追踪模型，运用硬球模型模拟颗粒间碰撞，实现了气固耦合及多组分颗粒场的时空迁移计算．文献[24]的模拟研究指出，掘进机截割头方位对矿尘扩散特征具有显著影响，不同方位角下矿尘呈现非对称分布、迁移特性及浓度差异，如图 4 所示（图中 φ 为矿尘包络角度，Q_v 为矿尘包络体积）．文献[25]介绍了采煤面粉尘迁移大尺度物理模拟平台（图5），分析了风流场与重力场共同作用下粉尘的运移规律．

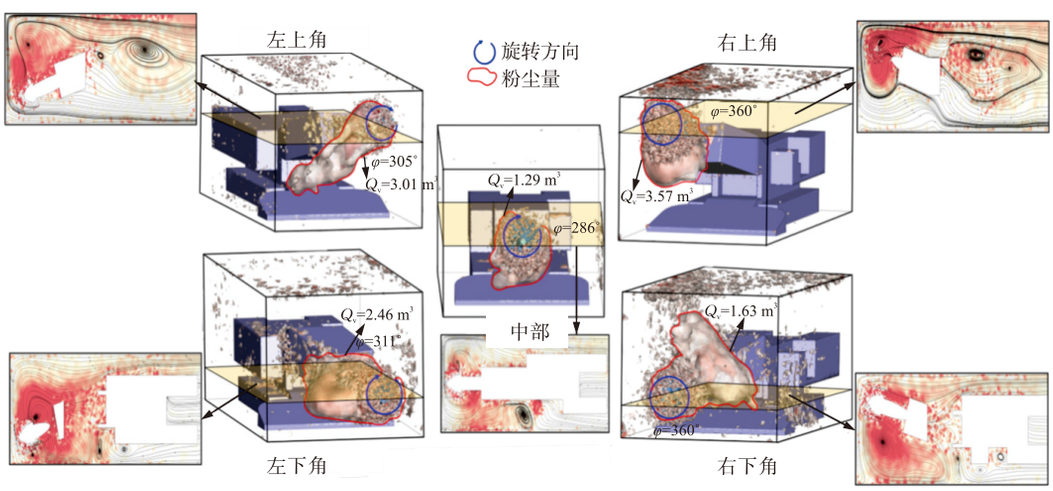
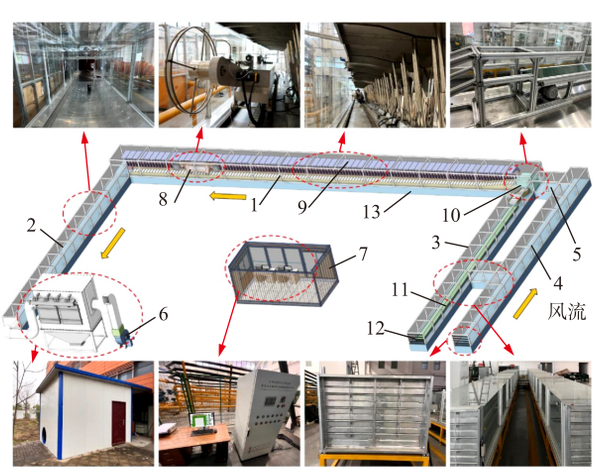


图 4 掘进机截割头不同方位的矿尘扩散特征[24]

Fig. 4 Dust diffusion characteristics of roadheader cutting heads in different orientations



1：回采工作面；2：回风巷；3：运输巷；4：辅助巷道；5：联络巷；6：通风机；7：控制柜；8：采煤机；9：液压支架；10：转载机；11：皮带输送机；12：风量调节阀；13：模型底座

图 5 采煤面粉尘运移大尺度物理模拟平台[25]

Fig. 5 Large-scale physical simulation platform for dust migration in coal mining working faces

2 煤层注水减尘理论与技术

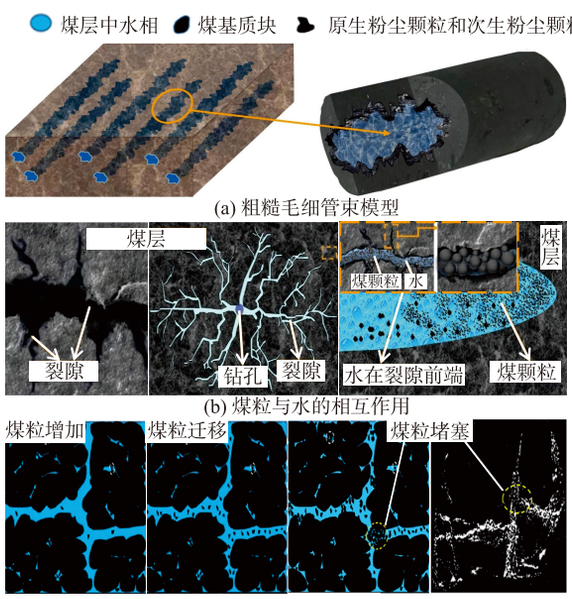
2.1 煤层注水减尘理论

煤层注水是从源头减少煤尘的根本性技术措施．通过向待开采煤层注入压力水，水分通过孔裂隙网络润湿煤，增加黏结能力，改变煤的力学性能，使煤体在截割时由脆性断裂转变为塑性变形，从而减少次生矿尘的产生，实现源头减尘．

2.1.1 煤的孔裂隙特征对渗流特性的影响

煤是一种典型的双重孔隙介质，主要由基质孔隙和裂隙系统构成，两者在空间上叠加，共同决定了流体在煤中的赋存和运移行为，对渗流过程起着核心控制作用．其中，基质孔隙由煤基质中的微孔和小孔组成，具有较大的比表面积，但连通性差．水在其中受控于分子间作用力，其运移方式以扩散为主．裂隙系统则包括内生裂隙、外生裂隙．其中，内生裂隙包括面割理和端割理，构成了煤层

原始的渗流网络，是煤体自然形成的主要通道．外生裂隙是煤受构造应力作用产生的裂隙．裂隙的孔径较大，连通性好，是压力水注入煤层时的优先流动通道．在注水减尘过程中，裂隙系统为水分提供快速传输通道，而基质孔隙则通过毛细作用缓慢吸入水分，进而促进煤层的深入润湿．此外，基于 Kozeny-Carman 方程的分形模型表明[26]，渗透率不仅受孔隙度控制，更受比表面积与迂曲分形维数制约．动态注水过程中，煤颗粒迁移并充填孔隙，局部形成孔喉堵塞的渗流屏障，导致渗流速度呈现极化分布，主通道流速较高，而孤立区域显著受限，体现了颗粒堆积与分形结构对煤层注水渗流特性的影响，如图 6 所示．



(a) 粗糙毛细管束模型

(b) 煤粒与水的相互作用

(c) 煤颗粒的产生及对孔裂隙结构的占据

图 6　煤体孔裂隙结构及渗流机制示意[27-28]

Fig. 6　Schematic diagram of coal body pore-fracture structure and seepage mechanism

2.1.2　煤的化学构成对其润湿性的影响

煤的化学构成是决定其润湿性的根本原因．水能否渗入煤体内部，取决于煤表面的化学官能团与水分子之间的相互作用．煤分子是由缩合芳香核作为核心骨架，外接烷基侧链及含氧/硫官能团，通过次甲基键、醚键等桥键形成的高分子有机化合物．在煤化作用过程中，随着煤变质程度加深，碳含量和芳香结构比例升高，挥发分含量下降．这一结构转变直接影响煤表面基团的组成与分布．低阶煤通常富含羧基、羟基等含氧基团，这些亲水性基团能够与水分子产生极性相互作用，形成稳定的氢键，从而表现出较强的润湿能力；而高阶煤中含氧基团减少，芳香烃和脂肪烃等疏水结构占比升高，导致其润湿性明显减弱．煤的这种化学构成、表面性质的变化，不仅决定了煤-水界面的相互作用特征，也显著影响着水在煤孔隙中的渗透与扩散行为[29]．

2.1.3　孔隙水压调控煤层渗润机理

孔隙水压是反映注水压力作用效果的重要参数，其变化直接影响煤体孔裂隙网络的演化及其渗润特性．孔隙水压较低时，水分优先进入中、大孔隙，渗流阻力较小，此时原生孔隙与微裂隙先被充填，结构响应以弹性变形为主，连通性提升有限，渗透率提升缓慢，通常不足 10%．随着水压升高，裂隙尖端应力集中增强，促使原有裂隙扩展贯通并诱导新生裂隙形成，孔隙连通性提升，新的渗流通道逐步形成，煤层渗透率显著提升[30]．煤层渗透率对水压的响应并非线性，其在低至中等水压阶段缓慢增加，裂隙几何形态发生非均匀扩展，而当水压超过临界阈值后，原有孔裂隙实现贯通，优势渗流通道形成，渗透率可实现数倍跃升，呈现出明显高压敏感性．可见，孔隙水压具有双重效应：一方面通过增强孔裂隙连通性，促使渗流通道形成与扩展；另一方面通过影响含水率分布，调控煤体润湿半径及均匀性．

2.1.4　固-液耦合作用下的渗流演化机制

煤层与围岩在未扰动时处于原始应力平衡状态，注水作业的启动引发渗流场与应力场的耦合作用．注入的孔隙水压通过水力劈裂扩展孔裂隙，而围岩应力施加压缩力，限制孔裂隙空间并阻碍流体流动[31]．在高地应力条件下，围压对孔裂隙结构演化的控制作用往往强于水压，尤其在循环加载-卸载条件下更为显著．随着注水持续，局部应力不断调整，煤体逐渐进入卸载破坏状态并形成卸载带，渗流边界扩展速度与注水流量随时间递减[32]．同时沿钻孔深度方向，渗透率、渗流速度与润湿程度逐渐下降，固-液耦合作用随时间衰减．固-液耦合作用下的渗流演化可分为 3 个阶段：1）无注水阶段，煤体稳定；2）注水启动期，裂纹萌生扩展，孔隙连通性增强，渗流速度上升；3）注水后期，裂纹扩展达到峰值，稳定的渗流网络形成．然而，目前关于该耦合效应如何定量影响孔裂隙有效性及渗流路径演化，仍有待进一步深入研究．

2.2　煤层注水减尘技术

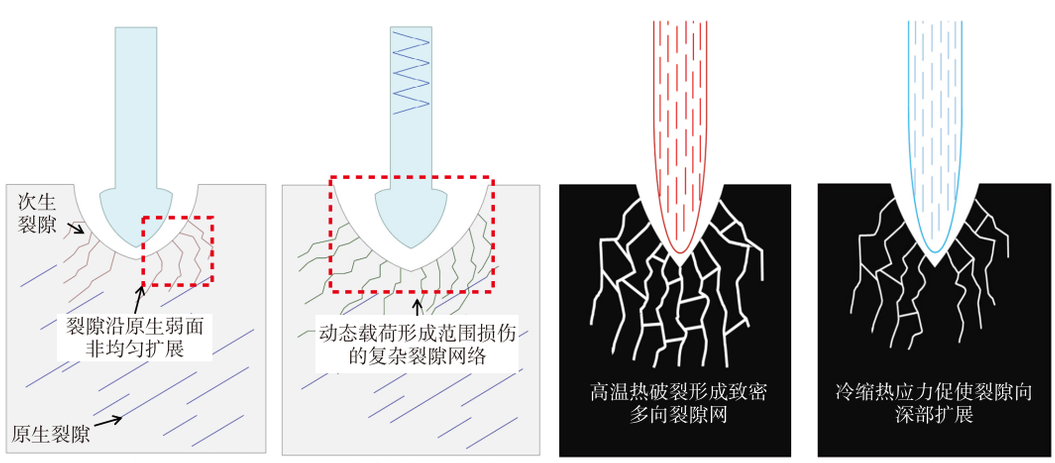
为提升煤矿生产中的注水减尘效能，国内外学者与工程人员开展了长期探索，逐渐形成以煤体物性改造和注入流体改性为核心的 2 条技术路

径. 其一通过改善煤层孔裂隙结构和渗透性能,可使渗流通道更加畅通,增强煤体润湿性,扩大注水覆盖范围和渗透深度,从而有效减少煤尘的产生与扩散. 其二通过在注水液中添加改性剂,调控流体理化性质,提升液体润湿性、铺展性及对煤尘颗粒的黏附能力,增强水-煤结合稳定性. 2种路径相辅相成,前者改善煤层储层条件,后者优化流体性质,共同提升注水减尘整体效率.

2.2.1 煤体物性改造技术

煤层注水改造是提升煤层渗透性、降低矿尘危害的源头性方法. 常规注水方法是目前应用广泛的基础手段,具体分类如下:1)注水压力. 低压注水(压力<3 MPa)适用于浅部煤层或短孔注水;中压(压力为3~10 MPa)适用于深孔;高压(压力>10 MPa)则能显著促进深部渗透. 2)钻孔布置. 短孔注水主要用于赋存不稳定或薄煤层,所需压力较低;深孔注水通常延伸至工作面斜长约2/3,需要较高水压以实现深部润湿;长孔注水多应用于厚度大于3.5 m的厚煤层,钻孔可采用上向、下向或双向布置方式. 3)注水方式. 静压注水依靠水的静压力将水注入煤层,适用于透水性较好的煤层,但流量小、周期长;动压注水则通过注水泵提供的动压力强化渗流,适用于低渗透煤层,但水压过高可能导致沿巷道或邻近钻孔泄漏,从而影响注水效果.

在常规方法基础上,煤层注水改造技术正逐步向多元化方向发展,如图7所示. 具体为:1)高压流体压裂. 通过持续高压注水改变煤体应力分布并诱导破裂,使裂隙沿最大主应力方向扩展并形成垂直于最小主应力的裂隙网络,其效果主要受原始裂隙结构与应力条件控制. 2)脉冲水力压裂. 通过周期性脉冲压力水使煤体裂隙反复压缩-膨胀,产生疲劳损伤并逐步扩展,其中脉冲频率是关键参数. 低频可降低起裂压力,高频利于快速提升孔隙压力诱导破裂,当频率与煤体固有频率一致时,破裂效果最优. 变频脉冲更有利于形成网络化裂隙,但精确控制频率难度大,适用性受限. 3)高温/低温压裂. 利用高热流体或者液氮(温度为−196 ℃)的膨胀效应和温度应力促进裂隙扩展,可显著提升裂纹宽度、密度和连通性,并产生二次致裂作用[33]. 如笔者近年来创造性提出了液态CO_2-水智能循环加注致裂增润技术[34],有效扩展了煤体孔裂隙,优化了渗流条件,润湿软化减弱了煤体脆性,大幅降低了煤破碎过程的产尘率.



(a) 高压流体压裂技术 (b) 脉冲水力压裂技术 (c) 高温流体压裂技术 (d) 低温流体压裂技术

图7 煤层注水改造技术的裂隙扩展机理示意[35]

Fig. 7 Schematic diagram of fracture propagation mechanism in coal seam water injection modification technologies

2.2.2 注入流体改性技术

注入流体改性是提升煤体渗润性能的关键手段. 其通过调控煤-水界面化学环境和增强分子间相互作用,促进水在煤体孔裂隙中的铺展与渗透. 随着研究的深入,逐渐形成以下改性方法:1)表面活性剂通过在煤表面形成定向吸附层,以增强煤-水界面相互作用,提高润湿效率. 不同类型表面活性剂在煤层注水中的功能差异显著[36-37]:阳离子型与带负电的煤表面结合力强,适合表面电性显著的煤种;阴离子型在渗透过程中优势明显;非离子型依靠极性作用增强煤-水亲和力;两性离子型兼具多阶段润湿特征,适用范围广. 2)合成型润湿剂通过分子结构设计引入亲水基团,利用接枝共聚、静电胶束等作用,实现对煤表面的稳定吸附与持续渗透[38]. 其在高温、高剪切等苛刻条件下仍能保持良好性能,对井下复杂的温度与应力场

具有较强适应性.3)离子液体作为由有机阳离子与无机阴离子组成的新型液态盐,具有低挥发性、高热稳定性和良好溶解性[39]. 其通过低表面张力、可调极性削弱煤体疏水性,促进水在微孔裂隙中铺展与渗吸,并通过静电、氢键作用吸附于煤表面,重构煤-水-气界面结构,形成稳定水膜以抑制尘粒产生.4)纳米流体因其高比表面积与显著界面效应,在煤层注水减尘领域展现出良好应用潜力. 其中,二氧化硅基纳米流体研究最为广泛,该类纳米颗粒吸附于煤体表面后可大幅降低接触角、增厚水分子吸附层,从而显著改善煤体润湿性. 然而其表面不饱和键较多,易发生团聚,导致分散性下降并削弱润湿效果[40]. 为此,常通过表面修饰或与表面活性剂复配加以改善. 此外,纳米流体较强的吸水能力可降低煤体硬度与弹性模量,促使其由脆性破坏向塑性变形转变,从而减少细微粉尘的生成,表现出良好的减尘效果.

近年来,煤层注水减尘技术在煤矿得到越来越广泛的应用. 在软煤层条件下,注水系统的应用进一步凸显了参数调控的重要性. 河南某矿采用动-静间歇加压注水技术,通过近 60 h 的注水,产尘量较未注水煤体下降 43.06%,综采工作面总粉尘和呼吸性粉尘浓度分别降低 56.69% 和 55.53%,同时粉尘粒径分布向粗颗粒转移,表明注水不仅降低了矿尘总量,还有效抑制了危害性更强的微细矿尘生成[41]. 该应用基于气体抽采钻孔部署注水系统,通过周期性的动、静态压力组合控制,优化了渗流扩展与润湿过程. 在硬煤层中,单纯依赖常规注水难以实现有效渗流与润湿,工程上逐渐引入压裂与注水协同的强化手段. 例如,金川煤矿通过 CO_2 活性水压裂注水技术,在压裂增渗与功能化流体润湿的协同作用下,截割矿尘浓度下降 45% 以上,同时实现煤体软化、顶煤破碎性改善及回采率提升,体现了注水减尘技术由单一防尘向多目标协同调控的发展趋势[42].

3　泡沫抑尘原理与技术

“抑尘”是指在矿尘产生的源头进行早期抑制,避免其扩散至周围大范围空间中. 气液两相泡沫具有连续性好、体积大、黏附性好的特点,可覆盖、包裹尘源,把矿尘封堵在源头小范围空间内,进而黏附、润湿、沉降,从而避免其扩散.

3.1　泡沫抑尘原理

泡沫流体与含尘气流相互作用,普遍认为矿尘颗粒是通过截留、惯性碰撞、布朗扩散等方式与气泡液膜发生接触. 其本质上是气泡液膜与矿尘颗粒以不同的角度和力度进行碰撞. 文献[43]基于高速摄像试验结果,指出矿尘颗粒形状与冲击力决定了尘-泡作用时泡沫是否破裂. 此外,微米尺度尘-泡作用试验结果显示,泡沫液膜两侧的静电斥力与毛细力的耦合作用控制了泡沫液膜黏附颗粒后的形变、排液和颗粒运移过程[44]. 对于气泡未破裂的情况,矿尘颗粒会发生 2 种行为:一是被黏附在气泡液膜表面,二是反弹回气流中. 因液膜破裂逸散的矿尘及反弹的矿尘,存在多次与泡沫接触并被黏附的机会.

黏附的矿尘颗粒随后被液膜润湿进入内部,失去逸散能力,从而被泡沫捕获,如图 8 所示. 在泡沫与矿尘黏附方面,可通过泡沫的堆积或挂壁状态,定性判断泡沫的黏附性. 笔者基于泡沫黏性定量研究结果[45],将泡沫液黏性模量作为衡量泡沫黏附矿尘能力的指标. 在气泡液膜润湿矿尘方面,众多学者探究了表面活性剂/助剂类型、结构、浓度以及矿尘物理、化学特征等参数与润湿效果之间的关系,已形成一些共识.

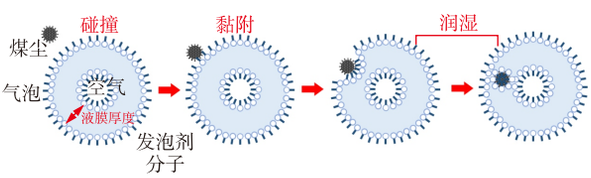


图 8　气泡液膜与矿尘颗粒的作用原理

Fig. 8　Interaction mechanism between bubble liquid film and mine dust particle

3.2　泡沫抑尘技术

泡沫抑尘技术是通过发泡剂添加装置将抑尘发泡剂以一定浓度与水混合形成发泡剂溶液,然后把空气和发泡剂溶液引入泡沫发生器中产生泡沫,进而使用喷射装置将泡沫喷向尘源,实现对矿尘的抑制. 近二十年来,抑尘发泡剂、泡沫制备与喷射技术均取得了显著进展.

3.2.1　抑尘发泡剂

抑尘发泡剂作为泡沫抑尘技术中的核心材料,是决定抑尘泡沫成本和性能的关键因素. 在实际应用中,通常要求抑尘发泡剂具有以下特性:1)优异的起泡性;2)适宜的稳定性;3)良好的黏附润湿性;4)优良的环保性.

抑尘发泡剂通常由多种表面活性剂和少量助剂按一定比例配制而成,不同类型、结构表面活性剂和助剂的复合以及不同的配比都会对泡沫性能

产生巨大影响. 在表面活性剂筛选与复配体系泡沫性能方面,众多学者聚焦碳氢表面活性剂的研究. 例如,文献[46-47]对比了多种表面活性剂的发泡倍数与泡沫排液、黏附性能,发现丁基二甘醇效果最优. 文献[48]研究了阴离子与非离子复配体系的泡沫性能,优选出了最佳配比. 虽然碳氢表面活性剂复配体系具有良好的泡沫性能,但其环保性仍需提高. 生物型或天然型表面活性剂开始进入研究者的视野. 为此,笔者团队首次提出利用生物代谢法取代化学合成法制备抑尘发泡剂的新思路,采用微生物发酵法合成了非离子型生物抑尘剂,其泡沫排液因子低于碳氢表面活性剂脂肪醇聚氧乙烯醚[49].

在表面活性剂与助剂复配体系方面,水溶性聚合物对表面活性剂泡沫性能的影响得到了广泛研究. 笔者对比了多种聚合物对表面活性剂 α-烯基磺酸钠和辛基酚聚氧乙烯醚泡沫性能的影响,发现聚合物浓度较低时可以提高泡沫的表面黏度和稳定性,从而减缓排液速率[50]. 为探究水溶聚合物改善表面活性剂泡沫性能的深层机制,文献[51]发现,在 2 000 ps 的模拟时间内,PAM(聚丙烯酰胺)能够增强表面活性剂与水分子间的相互作用、增大水化层厚度,抑制水分子的扩散,从而提高泡沫稳定性(图 9). 笔者研究表明,PVA(聚乙烯醇)可提高表面活性剂亲水端在气液界面的覆盖面积,在表面活性剂、水溶性聚合物和水分子之间形成广泛连接的三维氢键网络,从而增强了气泡液膜的强度和抗冲击能力[52].

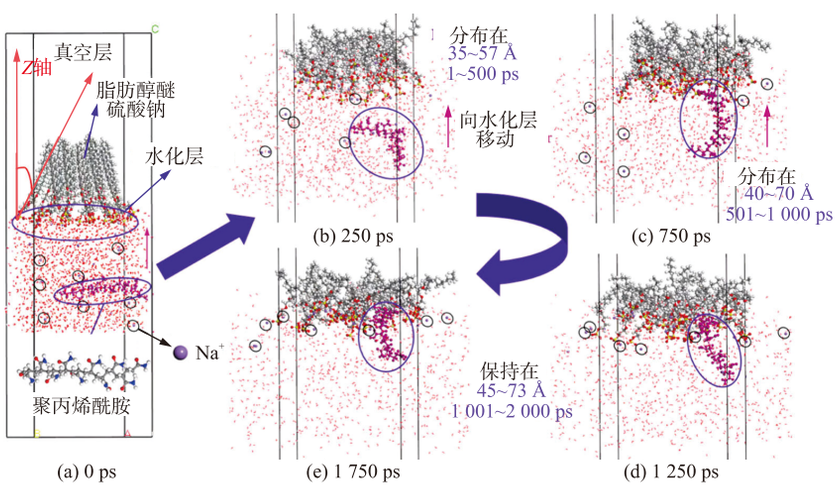


图 9 聚丙烯酰胺在泡沫液膜中的位置变化[51]

Fig. 9 Polyacrylamide position change in the foam liquid film

3.2.2 泡沫制备技术

根据动力源不同,泡沫制备技术可分为压风式和自吸空气式. 压风式泡沫制备技术以井下压缩空气和高压水为动力,自吸空气式泡沫制备技术则仅以高压水为动力.

1) 压风式泡沫制备技术

压风式泡沫制备技术包含发泡剂添加、泡沫发生等技术环节. 为保证设备在井下本质安全,流体动力式发泡剂添加装置得到了长足发展,射流泵式和文丘里式添加装置以其体积小、阻力小的优势在煤矿井下具有较强适应性. 传统流体动力式添加装置的吸液量仅在低压力比(出口全压/入口全压)时稳定,高压力比时波动明显,从而干扰了产泡稳定性. 为此,文献[53]率先提出了利用射流空化效应添加发泡剂的方法,杜绝了压力波动对吸液流量的影响,但能量损失高达 60%. 在此基础上,笔者团队设计了无喉管式空化射流泵,在保证添加精准的同时大幅降低了能量损失,临界压力比提高到 0.8[54]. 近年来,3D 打印技术的普及推动了非对称式[55]和扰流式[56]空化添加装置的研发,进一步降低了空化吸液装置的能量损耗. 其中,扰流式空化添加装置在入口水压 60 kPa 时(图 10),即可进入空化状态,实现精准稳定发泡剂添加.

在泡沫发生环节,通过泡沫发生器将发泡剂溶液和空气均匀混合,产生致密的两相泡沫并以一定的动能向下游输送. 文献[57]开发了兼具扰流器与多层挡板结构的泡沫发生装置,实现了气-液连续混合,但稳定发泡所需添加的发泡剂浓度较高(2%~3%). 为提升发泡效率并降低发泡剂浓度,文献[58]介绍了具有螺旋网孔混合结构的卧式泡沫发生器,稳定发泡所需发泡剂浓度降

至1%，且发泡器体积大幅减小．为进一步降低发泡剂添加量，文献[59]设计了一种环形供气立式泡沫发生器，解决了供气不均匀导致的泡沫分布不均、发泡液利用率低的问题，稳定发泡所需发泡剂浓度降至0.5%．

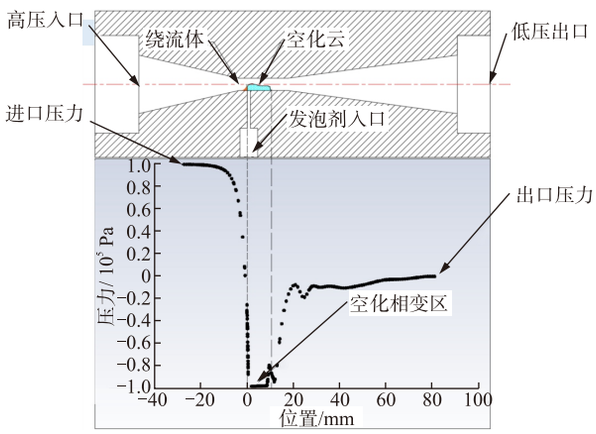


图10　扰流式空化结构及吸液原理[56]

Fig. 10　Turbulence-induced cavitation structure and liquid entrainment mechanism

2）自吸式泡沫制备技术

针对采煤工作面等地点压缩气体难以供给的问题，笔者首创了自吸空气-发泡剂旋流产泡方法与装置（图11），仅以压力水为动力，利用射流卷吸效应及所形成的负压吸入发泡剂与空气，进而通过旋流低阻方法产生泡沫，结构紧凑、无需压风气源、工况适应性强、出口动能足[60]．在此基础上，文献[61]提出了基于亥姆霍兹喷嘴的气-液自吸泡沫发生装置，显著降低了自吸式泡沫发生技术的能量损耗并保证了发泡剂添加稳定性．

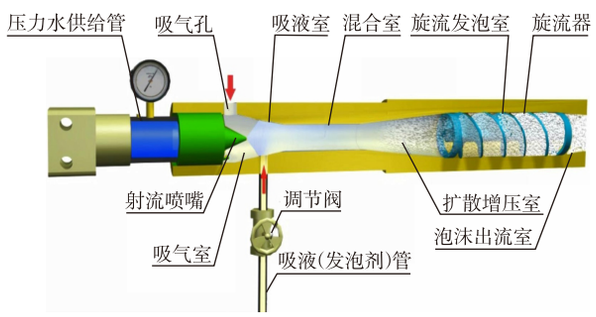


图11　自吸空气泡沫发生器

Fig. 11　Self-aspirating air-entraining foam generator

3.2.3　泡沫喷射技术

泡沫喷射过程中，泡沫射流的射程、流型和冲击力决定了泡沫流体对尘源的覆盖包裹严密程度，是影响泡沫抑尘效果的关键“最后一公里”，前人针对不同类型尘源研发了多种泡沫喷嘴及支架．文献[62]针对采煤机和综掘机截割尘源，研发了具有内凸圆弧槽状狭长喷口的V型槽泡沫喷嘴，如图12a所示，可将泡沫射流塑形成平扇状，利用多组喷嘴可对截割区形成矩形覆盖面．然而，此种喷嘴内部截面突变，泡沫射流连续性不足且微气泡破碎比例较高．针对上述问题，文献[63]经过理论分析指出弧扇型泡沫流型对纵轴式截割区域的包裹覆盖效果最优，故开发了外导流弧扇喷嘴，如图12b所示，杜绝了流道横截面突变，显著提升了泡沫射流连续性．此种喷嘴配备球形接头与环形可调式泡沫支架联合使用时（图13），可适配不同型号的综掘机．为解决外导流喷嘴抗堵、抗砸、射流厚度不足、泡沫破损率高的问题，笔者团队采用3D打印技术，设计了内导流双层平扇型泡沫喷嘴，如图12c所示，对比试验结果显示，双层平扇型泡沫喷嘴在泡沫射流的连续性、稳定性、均匀度和泡沫损失率等方面性能显著提升[64]．



(a) V型槽喷嘴　(b) 弧扇喷嘴　(c) 双层平扇喷嘴

图12　泡沫喷嘴对比[64]

Fig. 12　Comparison of different foam nozzles

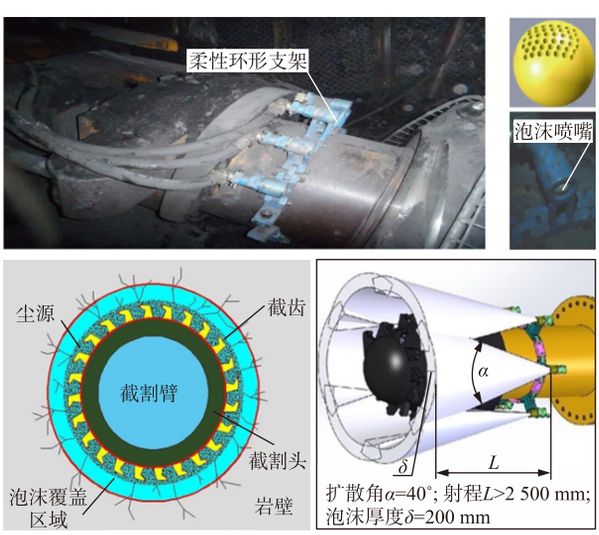


图13　泡沫喷射支架

Fig. 13　Foam spray bracket

国内外在煤矿泡沫抑尘技术的应用方面开展了大量工作．在漳村煤矿西下山回风巷的应用中，泡沫对全尘和呼吸性粉尘的抑尘效率是喷雾降尘

技术的1.63倍和1.36倍[65]. 在安徽朱仙庄煤矿综采工作面的采煤司机处,泡沫对全尘和呼吸性粉尘的抑尘率分别为88.3%和85.9%,约为喷雾降尘的3倍和4倍[66]. 此外,泡沫抑尘技术还在贵州山脚树矿综采工作面、河南新桥煤矿综掘工作面、山西霍尔辛赫矿综掘工作面等进行了工程应用. 多年的现场实践证实,泡沫具有比喷雾抑尘率高、耗水量低的优势,且对呼吸性粉尘抑制效果更佳.

4 喷雾降尘理论与技术

喷雾降尘技术具有成本低、工艺简单等优势,是井下应用最广泛的降尘措施. 煤矿井下的重点产尘区域(如采/掘截割区、液压支架产尘点、运输转载点等)普遍具有分布范围广、尘源难封闭、降尘装置安装空间受限以及防爆要求高等特点,这些苛刻条件在很大程度上限制了部分除尘装备的应用,主要采用喷雾进行降尘. 由于水雾与悬浮矿尘均以离散形态存在,提高尘-雾接触概率并增强接触后矿尘的增重效果始终是其高效降尘的关键. 大量研究普遍认为降低雾滴的粒径和表面张力、增大雾滴速度均有利于提升喷雾降尘效果,在此观点的指引下,雾化方法创新、水雾理化特性优化等方面均取得了显著进展.

4.1 喷雾捕尘机理

传统喷雾降尘理论认为尘-雾作用时会发生“完整聚并”和“反弹”2种行为,定性地指出增大尘-雾相对速度[67]、降低雾滴表面张力[68]有利于避免反弹现象发生. 近年来,一些学者在液滴与静止颗粒碰撞试验中发现了“颗粒穿透雾滴”、“液滴包裹颗粒后撕裂”、“液滴膜状飞溅”等新行为(图14)[69],并逐渐认识到雾滴速度过大或表面张力过小会导致雾滴脱离矿尘并降低降尘效果. 为定量预测不同尘-雾碰撞行为,笔者团队在假设矿尘静止的条件下构建并逐渐完善了雾滴与固定颗粒的碰撞行为判定模型,提出了固-液动量传递半经验方程和矿尘表面液体残留量预测方程. 然而,静止颗粒与悬浮颗粒的碰撞行为存在明显差异,如图15所示[70].

针对更加复杂的悬浮状态尘-雾碰撞过程,文献[71]分别从力传导、动量传递、能量转化三方面探索了固、液两相的运动学参数演变规律,得出了不同碰撞行为的韦伯数临界值,发现颗粒疏水程度、碰撞偏心系数、颗粒-液滴粒径比均会显著影响碰撞过程中颗粒的速度演变过程. 笔者通过数值模拟方法探究了悬浮状态下微米尺度雾滴与矿尘作用后的反弹动力学机制,构建了反弹临界条件理论模型,并指出雾滴黏性及接触角迟滞效应会影响雾滴对矿尘的捕捉效果[72]. 随着近年来尘-雾作用机理的研究不断深入到微米尺度,新发现的碰撞行为促使不同学者提出了新的尘-雾作用理论模型. 然而,由于试验观测难度大、数据少,现有模型的可靠性及适用范围难以被充分验证,不同模型之间的矛盾尚未彻底消除,这是喷雾降尘率瓶颈突破困难的关键原因.

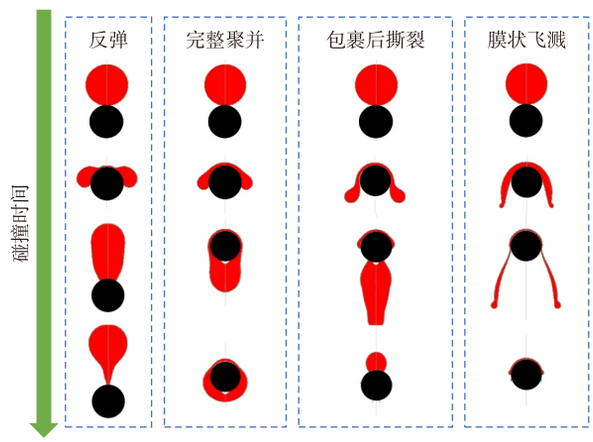


图14 颗粒静止时固-液颗粒作用时的不同行为[69]

Fig. 14 Different behaviors of solid - liquid interactions when particles are stationary

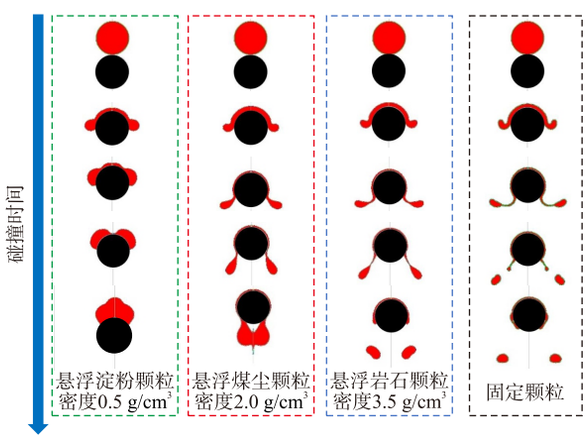


图15 悬浮状态下尘-雾碰撞行为[70]

Fig. 15 Collision behavior between dust and mist under suspension

4.2 喷雾降尘技术

在喷雾技术方面,近年来学术界主要以降低雾滴粒径、增大雾滴速度为目标开展了攻关,先后开发了高压喷雾[73]、两相喷雾[74]、水力超声雾化[75]、超音速雾化[76]等技术,使得雾滴粒径不断降低、雾密度和雾滴速度逐渐增大(表1),配合含尘

风流控制措施，前人在增大尘-雾接触概率方面取得了显著进展．然而，现场降尘率虽有上升，但仍未达到令人满意的效果．

表 1　不同雾化方法产生的雾场特性典型参数

Table 1　Typical parameters of spray field characteristics produced by different atomization methods

雾化方法	水压/MPa	气压/MPa	索太尔雾滴粒径/μm	射程/m	速度/(m·s^{-1})
单相高压雾化[73]	6～10	无	30～80	＜3	12～30
两相雾化[74]	＜0.5	＜0.6	＜30	＜1	＜10
水力超声雾化[75]	＜0.5	＜0.5	＜30	1.5～2.0	4～11
超音速气流雾化[76]	＜0.5	＜0.5	5～20	4.9～7.0	30～600

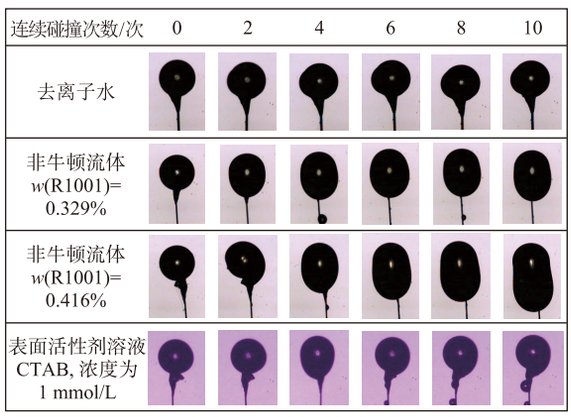
除尘-雾接触概率外，改善雾滴表面特性是进一步提升尘-雾黏附效果的普遍方法．文献[68, 77]开发的活性磁化水喷雾降尘技术，可显著降低溶液表面张力，进而改善其湿润和降尘性能(表 2)．笔者基于微生物发酵法创制的绿色高效生物抑尘材料，为绿色、无害抑尘剂的研发开辟了一条新路径[78-79]．文献[80]研究了荷电喷雾技术，高压静电作用可使雾滴表面张力降至 20 mN/m 以下，但是此技术仅适用于无防爆要求的场景．上述技术创新旨在提高水雾表面活性，一定程度上提升了喷雾降尘效果．但是，文献[81]的降尘试验结果显示，喷雾降尘率随雾滴表面张力降低呈先增大后降低的趋势．文献[82]指出，单纯通过液体表面张力难以判定尘-雾动态作用过程中雾滴对矿尘的湿润效果．目前雾滴表面特性对尘-雾动态作用过程的影响尚不明晰，最有利于矿尘增重的雾滴表面张力取值范围仍存在争议．

表 2　物理、化学方法处理后的雾滴表面张力

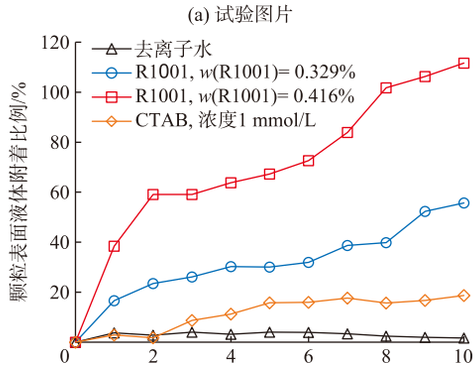
Table 2　Surface tension of spray droplets after physical and chemical treatment

物理、化学处理方法	磁化水雾[76]	多组分水[77-78]	多组分磁化水雾[76]	荷电水雾[79]
表面张力/(mN·m^{-1})	69～72	29～40	26～32	12～20

笔者团队指出，改善雾滴流变特性是提升喷雾降尘效果的新途径[70]．试验结果显示，通过添加剂改变水雾流变特性可显著提升尘-雾碰撞后颗粒表面的液体附着量，如图 16 所示．



(a) 试验图片



(b) 液体附着量变化曲线

图 16　分别改善液滴表面特性和流变特性时固、液黏附效果的变化[70]

Fig. 16　Changes in solid-liquid adhesion when improving droplet surface properties and rheological properties, respectively

喷雾降尘技术在不同类型的矿尘污染区域采用了不同的施加方式．对于采、掘机械的截割部尘源，主要通过内、外喷雾进行源头湿润．内喷雾通过截齿尖端喷出，从截割区内部湿润新生矿尘．外喷雾由截割臂向截割区喷射，持续捕获在截割过程中向空气中扩散的矿尘．对于转载点、破碎机等相对固定的尘源，工程实践中常在密封罩内设置水喷雾，进而达到优良的降尘效果．对于采煤面液压支架架间缝隙和放煤口，利用负压二次降尘装置可实现对局部含尘气流的循环净化与二次沉降．对于已经扩散的含尘气流，掘进面及回风巷则通过全断面水幕帘构建防尘屏障，采煤工作面依托支架跟踪喷雾实现对含尘风流的净化、阻隔和流向控制．

5　通风除尘技术

当前，井下掘进面等地点常采用多种通风设备协同控制除尘的方式进行矿尘治理，主要包括有组织控制矿尘扩散的风幕控尘技术以及对含尘

气流进行针对性处理的除尘器，以实现矿尘高效治理.

5.1 风幕控尘技术

风幕是一种以连续空气流为隔离介质的区域控尘方式，空气从喷口射出形成屏障，把粉尘限制在一定区域内，以改善工作区的空气质量. 风幕控尘依靠空气射流的边界效应，不断卷吸风幕两侧的空气，稀释和引导含尘空气，粉尘被风幕控制在较小范围. 文献[83]介绍了德国采用附壁风筒在巷道内形成往掘进面前移的均匀旋转风幕，实现矿尘的高效隔离. 近年来，文献[84-85]进一步研究了综掘面气幕隔尘技术与除尘器联用的风幕控除尘系统，利用除尘器将风幕阻隔的含尘气流进行净化，并对风幕除尘系统的应用参数进行了优化，提升了矿尘控制效率，同时搭配抽出式除尘风机或除尘器将阻隔的含尘气流抽出净化后排出，现场总除尘效率达到 90% 以上. 此外，文献[86-87]也对风幕控尘技术进行了深入研究，其以压缩空气为主要气源，基于条缝射流理论，通过射流装置在特定方向形成一道空气风幕，有效将粉尘控制在一定空间内，并结合抽出式风筒或除尘器对封闭的粉尘进行净化. 典型风幕控尘系统如图 17 所示.

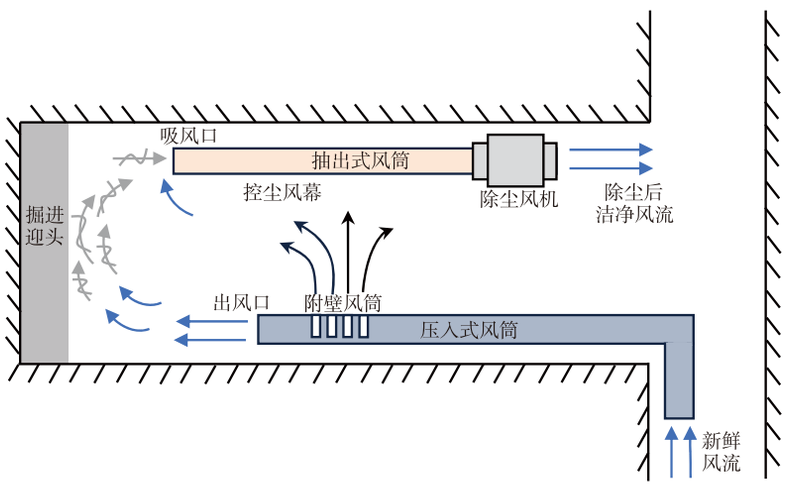


图 17 典型风幕控尘方式及通风除尘系统

Fig. 17 Typical air curtain dust control methods and ventilation dust removal systems

风幕控尘能够有效防止矿尘向不期望的方向逸散，但其自身无法捕集矿尘，且高速气流裹挟矿尘向巷道后方流动进而污染整个作业空间. 同时，高速风流易产生二次扬尘，造成二次污染. 因此，在工程应用中通常将风幕与其他除尘技术协同使用.

5.2 湿式除尘技术

除尘器按照工作原理可以分为湿式除尘器与干式除尘器 2 类. 其中，湿式除尘器的基本技术原理是利用水雾的湿润凝聚作用润湿粉尘或者过滤层，增加水与粉尘的接触和碰撞概率，将粉尘从空气中分离，从而达到净化的目的. 1950 年至 1980 年，国外相继研发了多种类型的湿式除尘器，如文丘里洗涤器、多管湿式旋流除尘器和湿润层除尘器等[88-89]. 但根据 1972 年美国矿业局的评价，除文丘里除尘器对呼吸性粉尘的捕集效率超过 90% 外，其余湿式设备效率均低于 90%，难以达到相关标准.

为提升湿式除尘技术的性能，英国采矿研究院率先在传统湿式除尘器中加入过滤层结构，除尘效率显著提升，但该设计存在运行阻力大、设备体积庞大等应用限制[90]. 德国 CFT 公司在此基础上开发了 HCN 型湿式纤维层除尘器，该纤维层采用铁网与纤维丝网复合结构，进一步提高了除尘效率，然而高昂的制造成本和庞大的体积仍制约了其推广应用[91]. 在我国，20 世纪 70 年代马鞍山矿山研究院研发了一款湿式旋流除尘风机，除尘效率超过 90%，但设备体积问题仍未得到有效解决[92]. 随后煤科总院重庆分院开发的 JTC-1 型掘进通风除尘器同样取得了较好的除尘效果，但运行阻力较大[93]. 近年来，多种湿式除尘方式联用的复合湿式除尘器成为主流. 文献[94]基于惯性除尘机理，设计了一种采用分流板的湿式离心除尘器，并分析了不同结构下除尘器内部气固两相流动特性. 文献[95]研制了一种适用于掘进面的自激式水浴水膜除尘器，并建立了该除尘器的性能评价公式. 文献[96]通过集成喷雾、振弦栅与旋流技术，开发出旋流帷幕除尘器和移动式湿式振弦旋流除尘器，然而，在高浓度粉尘环境下仍存在喷嘴易堵塞、维护成本高等问题. 文献[97]研发了一

种矿用湿式涡旋一体式除尘器，具备高能吸风、旋流捕尘、双级脱水的功能，除尘、脱水效率可达95%，具有结构紧凑的特点，其核心组件的结构与功能如图18所示。

目前湿式除尘技术已演进为涵盖喷雾、振弦、水幕及旋流等多种机制耦合的复合化体系．然而，从现有的装备技术来看，湿式除尘仍面临着处理能力与捕集效率的制约．因此如何平衡湿式除尘器高效捕集、低阻运行与高可靠维护三者关系仍是亟待攻克的难关．

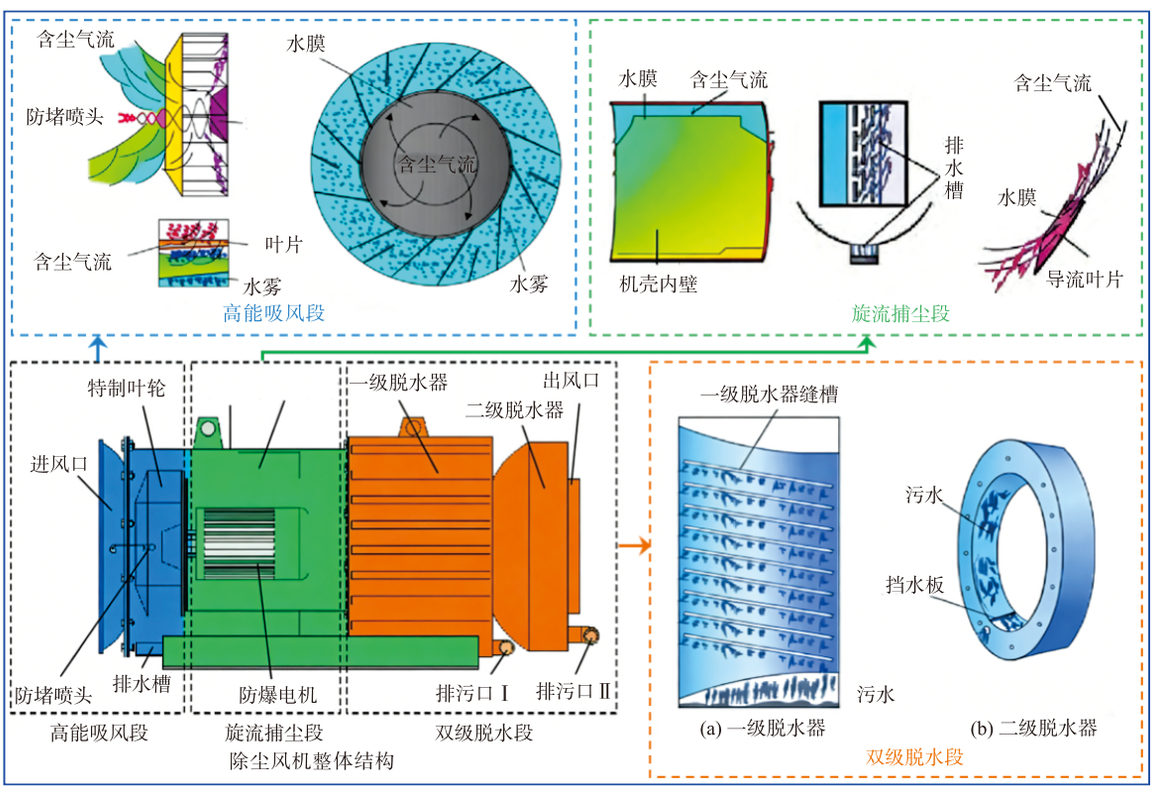


图18　湿式涡旋一体式除尘器[97]

Fig. 18　Wet vortex integrated dust collector

5.3　干式除尘技术

干式除尘器相比湿式除尘器，具有无水耗、高过滤效率及强处理能力等优势，但除尘器功耗、体积和运维质量是限制其推广的主要原因．如图19所示，现有适用于矿山的干式除尘技术包括惯性除尘、旋风除尘、过滤除尘等．其中，惯性除尘利用挡板诱导气流突变，通过尘粒惯性实现分离．由于该技术存在设备占地大、挡板易磨损及细颗粒捕集效果差等局限．目前多被用于多级除尘系统的初步分离．

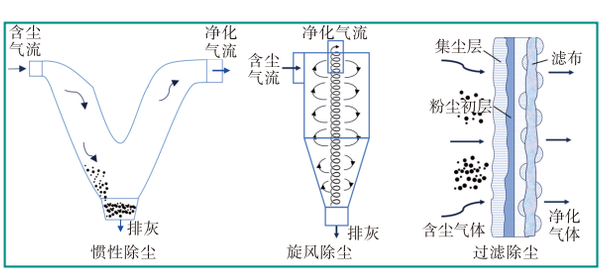


图19　干式除尘原理

Fig. 19　Principle of dry dust removal

旋风除尘利用旋转气流所产生的离心力，将固体颗粒或液滴从气流中分离出来，对于较大颗粒粉尘除尘效率较高．自19世纪80年代摩尔斯研制出首台圆锥形旋风除尘器以来[98]，该领域的研究重点已转向结构优化（如入口及起旋器尺寸等）以平衡分离效率与压力损失[99-100]．其中起旋器的尺寸已被广泛认为是影响气体颗粒旋风分离器性能和流动特性的关键，直接决定了内部旋流强度、压力梯度及速度分布[101]．尽管对旋风除尘器结构设计进行了大量优化，但其压降与过滤效率的平衡仍是一个难题，并且对于小粒径颗粒的分离性能仍存在瓶颈．

过滤除尘多利用纤维层作为过滤介质，将含尘气体中的固体粉尘分离，并通过滤袋或滤筒结构平衡设备体积与有效过滤面积．当含尘气流通过纤维层时，粉尘的尺寸较过滤层的空隙要小得多，因此通过筛滤效应清除粉尘的作用较小，其技术原理主要在于粉尘与滤料纤维之间的惯性碰撞、截留、扩散等作用．干式除尘技术最早出现在

19世纪德国,20世纪后文献[102]首先提出了采用空气反吹法清灰的布袋除尘器,但过滤效率仍然不高.随后脉喷型袋式除尘器由文献[103]首次提出,通过连续清灰与无运动部件设计,显著提升了系统的便捷性与可靠性.文献[104]从构件与材料入手,对过滤/清灰元件结构及滤料进行改进,进一步提升了过滤除尘效率与清灰性能.也有学者通过数值模拟与试验探讨气流分布、颗粒运动和能耗间的关系,确立了能耗评价方法并优化了进风方式[105].需要注意的是,过滤材料是过滤除尘技术的核心,对过滤性能起着至关重要的作用[106].随着干式除尘技术的广泛应用,研究者开始对各类新型过滤材料进行探索,过滤材料逐渐从低强度化学纤维向多材料复合介质跨越,诸如细菌纤维素材料结合气凝胶构筑方法形成的新型过滤介质等开始受到关注[107].这一转变不仅提升了过滤效率,还进一步优化了材料的综合性能,为干式除尘技术的发展提供了有力支持.

6 个体防尘技术

个体防尘是保护呼吸健康与生命安全的最后一道防线.下面将系统梳理个体防尘过滤材料的研发进展与滤尘机理,分类阐述矿用个体防尘呼吸器的技术特点及选取原则,深入剖析我国现行呼吸器测评标准,为提升煤矿个体防尘水平提供参考.

6.1 个体防尘用滤材开发现状及纤维滤尘机制

现有常用的呼吸器滤料纤维开发已形成多材料、多工艺协同发展的格局.滤料多以聚丙烯(PP)和聚酯(PET)为主要基底材料,主流纺丝工艺包括熔喷纺丝和静电纺丝,熔喷工艺制备的纤维直径多分布在1~5 μm,而静电纺丝可实现亚微米级(0.1~1 μm)纤维制备,显著增加比表面积[108].为提升滤尘效率,此类滤料普遍采用驻极处理技术赋予纤维持久静电性能.部分高端滤料通过添加纳米银、氧化锌等抗菌助剂提升抑菌率,同时通过引入氟碳化合物涂层提升耐湿性.

现有个体防尘用滤料纤维的滤尘机理是重力沉降、惯性碰撞、拦截作用、扩散效应、静电吸附等多种机制协同的结果,纤维的三维无序空间网状结构为捕尘机制提供了物理载体,如表3所示,粉尘颗粒物密度、粒径、气流流速以及纤维直径、实体纤维率、纤维荷电量等都直接影响各滤尘机制的贡献比例.

表3 纤维滤尘机制及其影响因素

Table 3 Fiber dust filter mechanism and its influencing factors

滤尘机制	计算公式[109]	影响因素及适用粒径范围
重力作用	$E_G=G^2(1+R)$, $R=\frac{d_p}{d_f}$, $G=\frac{\rho_p d_p^2 C_c g}{18\eta U_0}$	颗粒物密度ρ_p、粒径d_p越大,气流流速U_0越小,重力沉降效率E_G越高.只有当颗粒物粒径较大(>0.5 μm)且滤料气流流速<10 cm/s时,重力沉降才会发挥作用
惯性碰撞	$E_I=\frac{J(Stk)}{2Ku^2}$, $Stk=\frac{\rho_p d_p^2 C_c U_0}{18\eta d_f}$	颗粒物密度ρ_p、粒径d_p、气流流速U_0越大,则惯性越大,惯性碰撞效率E_I越高.该机理适用于粒径大于1 μm的颗粒,无法有效过滤纳米级颗粒
拦截作用	$E_R=\frac{1}{2Ku}\left[2(1+R)\ln(1+R)-(1+R)+\left(\frac{1}{1+R}\right)\right]$, $Ku=-\frac{\ln\alpha}{2}-\frac{3}{4}+\alpha-\frac{\alpha^2}{4}$	纤维直径d_f越小或颗粒物粒径d_p、实体纤维率α越大,则拦截过滤效率E_R越高,且与气流流速U_0无关.该机理对100 nm~1 μm范围内的亚微米颗粒十分重要
扩散效应	$E_D=2Pe^{-2/3}$, $Pe=\frac{d_f U_0}{D}$	纤维直径d_f、气流流速U_0越小,扩散捕尘效率E_D越高.该机理适用于粒径小于1 μm的颗粒物,且是捕获小于100 nm颗粒物最有效的机制
静电吸附	$E_q=\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1}\right)^{1/2}\left[\frac{q^2}{3\pi\eta d_p d_f^2 U_0(2-\ln Re_f)}\right]$	纤维电荷量q越多,静电吸附效率E_q越好.该机理对微细颗粒物(0.3~0.5 μm)可以起到很好的过滤效果
总过滤效率	$E_{总}=E_G+E_I+E_R+E_D+E_q$	颗粒物密度ρ_p、纤维电荷量q、颗粒物粒径d_p、实体纤维率α越大或纤维直径d_f越小,总过滤效率$E_{总}$越好;扩散效应过滤机理提升有利于纳米颗粒的过滤净化,其余4种过滤机理主要针对微米级颗粒的净化

式中:ρ_p为颗粒物密度,g/cm^3;d_p为颗粒粒径,μm;U_0为气流流速,cm/s;d_f为纤维直径,μm;α为实体纤维率,%;q为纤维电荷量,C;g为重力加速度,m/s^2;C_c为Cunningham滑移修正因子;η为流体黏度,N·s/m^2;R为d_p与d_f的比值;Ku为桑原水力动态因子;Stk为斯托克斯数;Pe为Peclet数;D为颗粒扩散系数,m^2/s;ε为电导率;Re_f为雷诺数.

煤矿高尘高湿环境与强负荷作业的耦合作用会对滤料性能形成严峻挑战：1）高湿环境会导致驻极电荷快速消散，静电吸附效应减弱，对亚微米级粉尘的捕集能力下降[110-115]；2）高浓度粉尘在短时间内大量沉积于纤维孔隙，使孔隙通道变窄导致气流阻力攀升[111,114]；3）强负荷作业时峰值吸气流量可达 170～280 L/min[116]，高速气流使惯性碰撞占比增加，但高流量也同步导致呼吸阻力加大[110,114]. 此外，呼气以及汗液蒸发进入滤料，会破坏纤维表面电荷并引发纤维溶胀，造成“滤尘效率下降-空气阻力上升”的恶劣影响[110-112].

6.2　矿用个体防尘呼吸器发展现状及防护机理

根据动力来源与结构特点，当前矿用个体防尘呼吸器可分为自吸过滤式、动力送风过滤式及新型滤尘送风式3类，如表4所示.

表 4　矿用个体防尘呼吸器分类

Table 4　Classification of individual dust respirators for mining use

呼吸器分类	传统呼吸防护用品						新型呼吸防护装备	
	自吸过滤式			动力送风过滤式			呼吸追随式	头戴风幕式
	简易式	复合式		松配式	紧配式			
	半面罩	半面罩	全面罩	全面罩	半面罩	全面罩		
								
指定防护因数	10	10	50	25～1 000	1 000		暂无	
优点	简易轻便	佩戴方便，面罩可重复使用，滤盒可更换		呼吸舒适度高，防护因数大，无需面部密合性测试			呼吸舒适度高，可使用时间长	呼吸顺畅，无视野干扰
缺点	强负荷作业吸气阻力大，高尘环境滤棉或滤盒易堵塞			恒定高流量送风导致电池续航时间短，高尘环境滤盒粉尘加载过快、短工时内即发生堵塞			缺乏统一认证标准，暂无指定防护因数，应用推广受限	

自吸过滤式防颗粒物呼吸器依靠佩戴者自主吸气产生的气流驱动粉尘过滤[117]，是矿山应用最广泛的呼吸防护用品[111]. 其中，简易随弃式防颗粒物呼吸器采用头戴或耳挂式固定，结构轻便且成本低，滤料多为单层或多层熔喷聚丙烯驻极材料[113-114]. 因其不可重复使用、密封性较差，通常适配短时、低强度作业. 复式黏弹性硅胶面罩呼吸器则采用可更换滤盒设计（滤盒可根据粉尘类型适配），面罩主体由亲肤硅胶制成，通过面部轮廓贴合实现有效密封. 按防护范围可分为半面式与全面式：半面式面罩仅覆盖口鼻区域，重量轻；全面式面罩兼顾防护眼部与面部，多用于伴随细微颗粒飞溅的作业场景.

动力送风过滤式呼吸器主要由电池、风机、滤盒、送风管路与面罩组成，风机迫使含尘气流经过滤盒净化，再通过送风管路输送洁净气流至面罩内，从而有效降低呼吸阻力，是高浓度粉尘环境的核心防护装备. 根据面罩贴合度的不同，动力送风过滤式呼吸器可分为松配合式与紧配合式[118]. 松配合式为全面罩设计，与颈肩部保留间隙，依靠持续正压气流防止外部粉尘侵入，佩戴舒适性显著优于自吸式[115]. 紧配合式则通过硅胶密封圈与面部紧密贴合，结合正压送风形成双重防护，按防护范围又可细分为半面式与全面式[118].

近年来，针对煤矿强负荷作业的防护痛点，新型动力送风滤尘式呼吸器实现了突破性发展，代表性技术包括呼吸追随式呼吸器[119-120]与头戴风幕式无面罩呼吸器[121]. 呼吸追随式呼吸器集成呼吸传感器与智能调控模块，可实时监测呼吸频率与深度，在吸气阶段根据需求自动提升送风量，呼气阶段降低风量或不送风，既保证防护效能又降低能耗，电池续航覆盖全工班作业时长，解决了传统动力送风设备续航不足与滤盒短工时内易堵塞的问题[114,120]. 头戴风幕式无面罩呼吸器则颠覆传统面罩设计，通过头戴式风机与滤盒将过滤后的洁净空气经导流通道送至面部，形成覆盖口鼻区域的射流风幕，在呼吸半球内构建局部正压洁净区，彻底消除面罩闷热与视野遮挡问题，尤其适用于高温、高湿、高尘环境下的强负荷作业[121].

6.3　中外个体防尘呼吸器测评标准对比分析

我国自吸过滤式防颗粒物呼吸器和动力送风过滤

式呼吸器测评标准分别为GB2626－2019《呼吸防护 自吸过滤防颗粒物呼吸器》[117]和GB30864－2014《呼吸防护 动力送风过滤式呼吸器》[118]，表5为中国、美国与欧盟关于防颗粒物呼吸器的测评标准.

表5 中国、美国与欧盟关于防颗粒物呼吸器的测评标准

Table 5 Evaluation standards for particulate respirators in China, the United States, and the European Union

标准	中国		美国			欧盟	
	GB2626－2019《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》[117]		NIOSH 42 CFR Part 84—2019[122]			EN 149—2001＋A1：2009[123]	
测试介质	NaCl	DOP	NaCl	DOP		NaCl	DOP
介质粒径/μm	计数中位径：0.075±0.020	计数中位径：0.185±0.020	计数中位径：0.075±0.020	计数中位径：0.185±0.020		质量中位径：0.6	斯托克斯中位径：0.4
介质浓度/(mg·m^{-3})	＜200		＜200			＜50	＜20
过滤效率/%	KN90≥90.00 KN95≥95.00 KN100≥99.97	KP90≥90.00 KP95≥95.00 KP100≥99.97	N95≥95.00 N99≥99.00 N100≥99.97	R95≥95.00 R99≥99.00 R100≥99.97	P95≥95.00 P99≥99.00 P100≥99.97	FFP1≥80.00 FFP2≥94.00 FFP3≥99.00	
	测试流量(85±4) L/min		测试流量(85±4) L/min			测试流量95 L/min	
呼吸阻力	面罩类型	吸气阻力	呼气阻力	吸气阻力≤35.0 mmH_2O 呼气阻力≤25.0 mmH_2O 测试流量(85±2) L/min		FFP1：吸气阻力≤0.6 mbar (30 L/min)；吸气阻力≤2.1 mbar (95 L/min)；呼气阻力≤3.0 mbar(160 L/min) FFP2：吸气阻力≤0.7 mbar (30 L/min)；吸气阻力≤2.4 mbar (95 L/min)；呼气阻力≤3.0 mbar (160 L/min) FFP3：吸气阻力≤1.0 mbar (30 L/min)；吸气阻力≤3.0 mbar (95 L/min)；呼气阻力≤3.0 mbar (160 L/min)	
	无呼气阀	KN90，KP90≤170 Pa KN95，KP95≤210 Pa KN100，KP100≤250 Pa					
	有呼气阀	KN90，KP90≤210 Pa KN95，KP95≤250 Pa KN100，KP100≤300 Pa	≤150 Pa				

注：1.0 mmH_2O=9.81 Pa=0.098 mbar；DOP为邻苯二甲酸二辛酯；KN90/KN95/KN100/KP90/KP95/KP100为国家标准GB2626－2019规定的6类呼吸器；N95/N99/N100/R95/R99/R100/P95/P99/P100为美国标准NIOSH 42 CFR Part 84—2019规定的9类呼吸器；FFP1/FFP2/FFP3为欧盟标准EN 149—2001＋A1：2009规定的3类呼吸器.

由表5中对比可知，我国防颗粒物呼吸器与代表国际先进水平的美国[122]、欧盟[123]现行标准齐平. 然而，随着呼吸追随式、头戴风幕式等新型动力送风滤尘呼吸器的涌现，现行标准体系已显滞后：1)传统标准未涵盖动态风量调节性能评估，无法衡量呼吸追随式呼吸器的风量响应精度；2)头戴风幕式无面罩设计突破了“面罩-面部密合”传统框架，现有密合性测试方法完全失效，需建立“风幕防护区完整性”等新指标. 若缺乏针对性标准，可能导致新型产品防护效能参差不齐，难以保障矿工实际作业安全，因此亟需结合其技术特点制定专项测评规范，填补标准空白.

7 未来发展趋势

1)矿尘产生与扩散方面，未来需在以下关键方向实现突破：①融合截齿几何、工况参数、煤岩性质、赋存环境等多因素，构建可靠准确的产尘特征理论模型；进一步探究深部开采中高地应力、高地温、高瓦斯等条件下的产尘特异性，以完善理论模型的边界条件，为揭示产尘机理与优化截割参数提供坚实基础. ②开发可自转、纵/横向摆动的截割模拟装置，以反映采掘机械真实运动条件下的截割产尘过程，创新产尘过程动态联合监测技术，实现对煤体内部损伤、表面破碎、矿尘崩出全过程的同步观测与关联解析，从根本上揭示产尘关键机制. ③发展融合粉尘微观聚集与宏观扩散的气固多场耦合数值模型，加强对非均匀湍流与长期粉尘演化过程的精细化模拟能力.

2)注水减尘方面，未来研究应围绕“结构认知-机理解析-精准调控”3方面协同推进：①结构层面，融合LF-NMR与纳米CT等多尺度表征手段，重点揭示注水过程中孔裂隙连通性及渗流演化规律，为注水参数、润湿范围的预测提供依据. ②机理层面，以渗流-应力耦合作用为核心，阐明孔裂隙扩容、贯通与润湿效率之间的内在联系，结合分子尺度研究揭示水分子吸附路径与润湿驱动机制.

③技术层面，针对注水空间分布差异大、润湿不均匀等问题，强化流体改性与注水方式协同调控，依托智能动态监测、实时数据反馈与自动调节控制等技术，构建随采自适应注水策略体系．同时，积极推进CO_2低温致裂增渗、AI辅助注水路径优化等新兴技术在注水减尘领域的应用，推动煤层注水减尘技术由“传统粗放”向“精准智能”模式转型．

3)泡沫抑尘方面，未来应聚焦泡沫抑尘原理、生物型抑尘发泡剂、智能化泡沫制备技术3方面的研究：①从微观尺度揭示矿尘与泡沫液膜相互作用过程中的受力、形变、运移机制，建立微观机理与宏观抑尘效果的定量关系，为优化泡沫理化特性提供理论依据．②针对生物型抑尘发泡剂高产量、低成本的制备难题，从分子生物学角度阐明菌群代谢过程中表面活性成分生产机制，利用先进生物技术提升生物型抑尘发泡剂的制备效率．③开发可对移动尘源实现泡沫自动启闭、喷射定位及运行工况参数实时调节的智能化泡沫制备系统，以提高泡沫抑尘的适应性、精准性和自动化水平．

4)喷雾降尘未来需针对尘-雾作用动力学机制、新型水雾降尘添加剂、喷雾系统智能调控等方面开展深入研究：①进一步完善微米尺度碰撞模型，系统探究表面张力、剪切/拉伸黏度、疏水性等因素对尘-雾碰撞行为的影响，揭示驱动“液膜飞溅”“颗粒穿透”等碰撞行为的发生机制．②在尘-雾碰撞机制的指引下，协同推进绿色高效抑尘材料的开发与雾化参数可控、低耗高效的雾化技术体系构建．③借助传感器网络与机器学习算法，实现粉尘浓度与喷雾参数的实时监测与智能调控．通过多学科交叉创新，推动喷雾降尘技术向高效化、精准化、智能化方向发展，为煤矿井下矿尘治理提供理论与工程实践双重支撑．

5)通风除尘技术未来的发展应聚焦于装备轻量与小型化、系统智能化、高效低耗过滤介质等方向：①研发适用于井下狭窄巷道等受限空间的新型通风除尘装备．通过创新结构设计，在保障甚至提升除尘效率的前提下，显著减小设备体积与重量，增强其移动灵活性，降低安装与迁移难度．②引入机器学习、物联网等先进技术，构建智能化通风除尘系统，实现粉尘特性、设备状态的实时监测，并通过智能算法动态调控通风除尘系统，实现精准通风与高效除尘．③研发基于可降解环保材料的绿色过滤介质．此类介质需兼具高效低阻、强环境适应性以及长寿命．

6)个体防尘方面，应从粉尘过滤材料、智能化防护装备、职业卫生测评标准体系3方面进行攻关：①针对过滤材料，应聚焦耐湿热长效驻极技术，开发梯度孔径结构与复合功能滤料，实现高湿高尘环境下过滤效率与阻力稳定性的双重提升．②在呼吸防护装备方面，应推进智能化按需送风、头戴式风幕防护等新型装备的研发与应用，实现矿工呼吸防护的智能化、高效化与舒适性升级．③对于测评标准体系，应加快制定新型呼吸器专项标准，增设动态风量响应精度、风幕防护区完整性等指标，构建覆盖全品类的标准化测评体系，为技术创新提供规范引导．

参考文献：

[1] 刘　峰，郭林峰．我国煤炭工业“十四五”科技创新进展及“十五五”发展思考[J]．煤炭学报，2026，51(1)：1-20．
LIU Feng，GUO Linfeng．Advances of scientific and technological innovation of China’s coal industry during the 14th Five-Year Plan and considerations for the 15th Five-Year Plan development [J]．Journal of China Coal Society，2026，51(1)：1-20．

[2] 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．

[3] 金龙哲．我国作业场所粉尘职业危害现状与对策分析[J]．安全，2020，41(1)：1-6．
JIN Longzhe．The occupational hazards and strategy analysis of dust exposure in workplaces in China [J]．Safety & Security，2020，41(1)：1-6．

[4] 袁　亮．我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]．中国科学院院刊，2023，38(1)：11-22．
YUAN Liang．Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]．Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2023，38(1)：11-22．

[5] 别　隆，卡赞斯基，列依包夫，等．煤炭切削原理[M]．北京：中国工业出版社，1965．
BERON A D，KAZANSKY A S，LEIBOV R M，et al．Principles of coal cutting [M]．Beijing：China Industry Press，1965．

[6] EVANS I．A theory of the cutting force for point-attack picks[J]．International Journal of Mining Engineering，1984，2(1)：63-71．

[7] GAO K D，DU C L，JIANG H X，et al．A theoretical model for predicting the peak cutting force of conical picks[J]．Frattura ed Integrità Strutturale，2014，8(27)：43-52．

[8] 周文东.掘进机截齿割煤产尘机制及减尘应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
ZHOU Wendong. Mechanisms of dust generation cut by pick used in roadheader and application of reducing dust[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[9] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: Part I-theory of the fracture process[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1967, 4(4): 395-406.

[10] PHILLIPS H, BELLE B K. Quantification of inherent respirable dust generation potential (IRDGP) of South African coals[R]. Johannesburg: University of Witwatersrand, 2003.

[11] MOORE M P, BISE C J. The relationship between the hardgrove grindability index and the potential for respirable dust generation[R]. Morgantown: West Virginia University, 1984.

[12] 王德明.矿尘学[M].北京:科学出版社,2015.
WANG Deming. Mine dusts[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[13] ZHOU W D, WANG H T, WANG D M, et al. The influence of pore structure of coal on characteristics of dust generation during the process of conical pick cutting[J]. Powder Technology, 2020, 363: 559-568.

[14] 刘送永,杜长龙,李建平.煤截割粒度分布规律的分形特征[J].煤炭学报,2009,34(7):977-982.
LIU Songyong, DU Changlong, LI Jianping. Fractal character of the distribution law of the cutting coal size[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 977-982.

[15] 徐向宇.综掘机截齿截割破煤机理及产尘规律研究[D].焦作:河南理工大学,2021.
XU Xiangyu. Study on coal breaking mechanism and dust generation law of roadheader pick[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.

[16] ZHOU W D, WANG H T, WANG D M, et al. An experimental investigation on the influence of coal brittleness on dust generation[J]. Powder Technology, 2020, 364: 457-466.

[17] 李晓豁.采煤机截割产尘的数学模型[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2002,21(6):776-779.
LI Xiaohuo. Mathematical model of cutting dust for a shearer[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(6): 776-779.

[18] STREBIG K C, ZELLER H W. Effect of depth of cut and bit type on the generation of respirable dust[R]. Twin Cities: Bureau of Mines, 1975.

[19] ZHOU W D, WANG H T, WANG D M, et al. The effect of geometries and cutting parameters of conical pick on the characteristics of dust generation: Experimental investigation and theoretical exploration[J]. Fuel Processing Technology, 2020, 198: 106243.

[20] LIU X H, LIU S Y, TANG P. Coal fragment size model in cutting process[J]. Powder Technology, 2015, 272: 282-289.

[21] 胡方坤,陆新晓,王德明,等.基于CFD数值模拟分析综掘工作面粉尘迁移规律[J].中国煤炭,2012,38(6):94-98.
HU Fangkun, LU Xinxiao, WANG Deming, et al. Based on CFD numerical simulation analysis of dust migration law in fully mechanized excavation face[J]. China Coal, 2012, 38(6): 94-98.

[22] CHENG W M, YU H M, ZHOU G, et al. The diffusion and pollution mechanisms of airborne dusts in fully-mechanized excavation face at mesoscopic scale based on CFD-DEM[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 104: 240-253.

[23] GENG F, GUI C G, TENG H X, et al. Dispersion characteristics of dust pollutant in a typical coal roadway under an auxiliary ventilation system[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,275:122889.

[24] LU X X, SHEN C, XING Y, et al. The spatial diffusion rule and pollution region of disorganized dust in the excavation roadway at different roadheader cutting positions[J]. Powder Technology, 2022, 396: 167-180.

[25] ZHANG W, XUE S, TU Q Y, et al. Development and experimental study of a scaled model for dust dispersion in fully-mechanized mining face[J]. Journal of Cleaner Production, 2023,429:139576.

[26] LIU Z, LI R R, YANG H, et al. A new fractal model of coal permeability based on the increasing fractal construction method of the menger sponge[J]. Fractals, 2021, 29(7): 2150187.

[27] LIU Z, WANG W Y, CHENG W M, et al. Study on the seepage characteristics of coal based on the Kozeny-Carman equation and nuclear magnetic resonance experiment[J]. Fuel, 2020, 266: 117088.

[28] YANG H, LIU Z, YU Z H, et al. Study on the fractal characteristics and seepage properties of channels filled by coal particles[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(53): 113917-113931.

[29] 王 刚,张晏铭,佟林全,等.不同变质程度煤体注水蚀变演化及降尘机制研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1085-1098.
WANG Gang, ZHANG Yanming, TONG Linquan, et al. Study on alteration evolution and dust reduction mechanism of coal with different metamorphic degrees by water injection[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1085-1098.

[30] ZHOU G, QIU L, ZHANG W Z, et al. Numerical simulation analysis of water injection seepage law in micro porous structure of coal[J]. Technical Gazette, 2020, 27(2): 458-466.

[31] LIU Z, YANG H, WANG W Y, et al. Experimental study on the pore structure fractals and seepage characteristics of a coal sample around a borehole in coal seam water infusion[J]. Transport in Porous Media, 2018, 125(2): 289-309.

[32] YU Y B, MU R Y, CHENG W M, et al. Evolution rules of coal mesopore structure under the action of hydraulic coupling[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2024, 83(5): 180.

[33] 王和堂,杨景皓,谭江龙,等.难注水煤层液态CO_2加注多场耦合演化规律研究[J].煤炭科学技术,2024,52(增2):121-130.
WANG Hetang, YANG Jinghao, TAN Jianglong, et al. Research on multi-field coupling evolution law of liquid CO_2 filling in difficult water injection seams[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(Sup 2): 121-130.

[34] 王和堂,王　辉,谭江龙,等.液态CO_2-水循环作用下煤体的物理改性规律及增润减尘效应[J].煤炭学报,2024,49(3):1463-1474.
WANG Hetang, WANG Hui, TAN Jianglong, et al. Physical modification law and dust reduction effect of liquid CO_2-water circulation on coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1463-1474.

[35] WANG H, WANG H T, TAN J L, et al. Recent progress of coal seam water injection technology for dust prevention: A comprehensive review[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2025, 16(3): 181-198.

[36] WEI J P, JIANG W, SI L L, et al. Experimental research of the surfactant effect on seepage law in coal seam water injection[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 103: 104612.

[37] 刘顺通,艾纯明,高　飞,等.碱性降尘剂润湿煤尘及吸收硫化氢试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(2):307-317.
LIU Shuntong, AI Chunming, GAO Fei, et al. Experimental study on the wetting of coal dust and absorption of hydrogen sulfide by alkaline dustfall agent[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 307-317.

[38] SUN J, ZHOU G, WANG C M, et al. Experimental synthesis and performance comparison analysis of high-efficiency wetting enhancers for coal seam water injection[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 147: 320-333.

[39] WANG H, XIE J N, XIE J, et al. Effect of critical micelle concentration of imidazole ionic liquids in aqueous solutions on the wettability of anthracite[J]. Energy, 2022, 239: 122088.

[40] WANG G, LI Y Q, WANG E M, et al. Experimental study on preparation of nanoparticle-surfactant nanofluids and their effects on coal surface wettability[J]. International Journal of Mining and Technology, 2022, 32(2): 387-397.

[41] YANG Y B, XING P C, LU K, et al. Dynamic-static intermittent pressurized-water injection in gas-drainage boreholes for dust reduction[J]. Powder Technology, 2024, 431: 119076.

[42] 黄辉龙,冯俊文,邓广哲,等.基于CO_2水基压裂液的煤体软化及降尘技术应用[J].煤炭技术,2024,43(1):129-132.
HUANG Huilong, FENG Junwen, DENG Guangzhe, et al. Application of coal softening and dust reduction technology based on CO_2 water-based fracturing fluid[J]. Coal Technology, 2024, 43(1): 129-132.

[43] HAN F W, ZHANG J Y, ZHAO Y, et al. Experimental investigation on the interaction process between coal particles and foam[J]. AIP Advances, 2019, 9: 015023.

[44] ZHU X L, WANG D M, CRAIG V S J. Interaction of particles with surfactant thin films implications for dust suppression[J]. Langmuir, 2019, 35: 7641-7649.

[45] 王和堂,章　琦,王德明,等.矿山抑尘泡沫基础特性及性能定量评估方法[J].煤炭学报,2023,48(4): 1584-1595.
WANG Hetang, ZHANG Qi, WANG Deming, et al. Basic characteristics of mine dust suppression foam and the quantitative evaluation method of its performance[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1584-1595.

[46] REED W R, ZHENG Y, KLIMA S, et al. Experimental study on foam coverage on simulated longwall roof[J]. Transactions, 2017, 342(1): 72-82.

[47] REED W R, BECK T W, ZHENG Y, et al. Foam property tests to evaluate the potential for longwall shield dust control[J]. Mining Engineering, 2018, 70(1): 35-41.

[48] ZHANG J S, LIU P C, FANG L, et al. Study on the synergistic enhancement of foam wetting coal dust by surfactant compounding[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13: 116187.

[49] 章　琦.微生物发酵合成生物抑尘剂方法与性能表征研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
ZHANG Qi. Study on methods for synthesizing biological dust suppressant by microbial fermentation and performance characterization[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[50] WANG H T, WEI X B, DU Y H, et al. Effect of water-soluble polymers on the performance of dust-

suppression foams: Wettability, surface viscosity and stability[J]. Colloids and Surfaces A, 2019, 568: 92-98.

[51] LU X X, XING Y, FU X H, et al. High-efficient dust trapping performance of AES-polyacrylamide strengthen foam based on the structure stability and dust wettability[J]. Langmuir, 2022, 38: 10442-10453.

[52] XU C H, WANG H T, WANG D M, et al. Improvement of foaming ability of surfactant solutions by water-soluble polymers: Experimental and molecular dynamics simulation[J]. Polymers, 2020, 12: 571.

[53] LU X X, WANG D M, ZHU C B, et al. A new adding method of foaming agent used for foam dust suppression in underground coal mines[J]. Journal of Central South University, 2015, 22: 3116-3122.

[54] ZHU X L, WANG D M, XU C H, et al. Structure influence on jet pump operating limits[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 192: 143-160.

[55] GAN J, JIANG B Y, ZHU X L, et al. Structure influence on the operating limit range and mixing performance of non-axisymmetric jet pump[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2022, 88: 102254.

[56] 杨虎胜.泡沫抑尘用扰流式空化添加装置研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
YANG Husheng. Study on spoiler cavitation addition device of foam dust suppression[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[57] 任万兴.煤矿井下泡沫除尘理论与技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.
REN Wanxing. Study on foam dust removal theory and technology in underground coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.

[58] LU X X, ZHU H Q, WANG D M. Investigation on the new design of foaming device used for dust suppression in underground coal mines[J]. Powder Technology, 2017, 315: 270-275.

[59] LI Y H, WANG Q G, TUO L N, et al. Experimental investigations of a novel pressure microfoam preparation device for dust removal[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2022, 29: 1-8.

[60] 王和堂.自吸空气-发泡剂旋流产泡机理及抑尘技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
WANG Hetang. Foam generation mechanism of rotational flow with air and foaming agent self-suction and its dust suppression technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[61] ZHANG K, WANG D M, ZHU X L, et al. Efficient and precise proportional mixing method in jet flows: Liquid suction with Helmholtz nozzle[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(8): 083401.

[62] 任万兴, 郭 庆,王德明,等.煤矿降尘泡沫喷头的设计与优化[J].煤炭学报,2014,39(6):1102-1106.
REN Wanxing, GUO Qing, WANG Deming, et al. The design and optimization of foam nozzle for dust control underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1102-1106.

[63] 韩方伟.弧扇泡沫射流高效除尘技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
HAN Fangwei. Research on efficient dust control technology with arc foam jet[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[64] 朱小龙.泡沫与矿尘作用机理及高效降尘技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
ZHU Xiaolong. Study on the mechanism of foam and dust interaction and high-efficiency dust suppression technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[65] 刘宝毅.综掘面泡沫除尘发泡剂的复配及试验研究[D].焦作:河南理工大学, 2014.
LIU Baoyi. Research on dedusting foaming agent orthogonal and corresponding experiment in fully mechanized excavation face[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.

[66] WANG H T, WANG D M, WANG Q G, et al. Novel approach for suppressing cutting dust using foam on a fully mechanized face with hard parting[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2014,11(3):154-164.

[67] 金龙哲, 刘建国, 林清侠, 等.矿山喷雾降尘技术研究与应用现状综述[J].金属矿山, 2023(7): 2-17.
JIN Longzhe, LIU Jianguo, LIN Qingxia, et al. Review on the research and application of water spray dust-reduction technology in mines[J]. Metal Mine, 2023(7): 2-17.

[68] 秦波涛, 周 刚, 周 群, 等.煤矿综采工作面活性磁化水喷雾降尘技术体系与应用[J].煤炭学报, 2021,46(12): 3891-3901.
QIN Botao, ZHOU Gang, ZHOU Qun, et al. Dust removal system and application of the surfactant-magnetized water spray in the fully mechanized mining face of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(12): 3891-3901.

[69] MITRA S, EVANS G M, DOROODCHI E, et al. Interactions in droplet and particle system of near unity size ratio[J]. Chemical Engineering Science, 2017(170):154-175.

[70] ZHU X L, JIANG B Y, HU J, et al. The head-on collision between droplet and stationary particle under mesoscopic scale: Effect of sample size, velocity, viscosity, and wettability[J]. Physics of Fluids, 2023,35(12): 123337.

[71] MITRA S, SATHE M J, DORRODCHI E, et al.

In-flight collision behaviour of droplets on a spherical particle falling under gravity[C]//Proceedings of 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Lisbon, Portugal, 2013.

[72] ZHU X L, XIA P Z, PAN C Y, et al. Dynamics of rebound in head-on collisions between suspended micrometer-sized droplets and particles[J]. Physics of Fluids, 2025,37(4): 043339.

[73] 田　畅.X型旋流压力喷嘴雾化参数及降尘效率预测模型[D].湘潭：湖南科技大学，2019.
TIAN Chang. Atomization parameters and dust reduction efficiency prediction model of X-type swirl pressure nozzles[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019.

[74] 蒋仲安，王亚朋，许　峰.金属矿山气-水喷头雾化特性及降尘能力实验研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2020,51(1)：184-192.
JIANG Zhong'an, WANG Yapeng, XU Feng. Experimental study on atomization characteristics and dust reduction capacity of gas-water nozzles in metal mines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(1): 184-192.

[75] 李　刚，吴将有，金龙哲，等.我国金属矿山粉尘防治技术研究现状及展望[J].金属矿山，2021(1)：154-167.
LI Gang, WU Jiangyou, JIN Longzhe, et al. Study status and prospect of dust control technology for metal mines in China[J]. Metal Mine, 2021(1): 154-167.

[76] 赵伟智，葛少成，张小伟，等.超音速虹吸式空气雾化喷嘴雾化特性研究[J].矿业安全与环保，2023，50(4)：19-24.
ZHAO Weizhi, GE Shaocheng, ZHANG Xiaowei, et al. Study on atomization characteristics of supersonic siphon type air atomizing nozzle[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(4): 19-24.

[77] 周　群.煤矿井下活性磁化水降尘机制及技术研究[D].徐州：中国矿业大学，2019.
ZHOU Qun. Study on the dust control mechanism and technology of surfactant-magnetized water in the underground coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[78] 王和堂，章　琦，王宇轩，等.基体均质化发酵合成矿山生物抑尘剂方法[J].清华大学学报(自然科学版)，2025,65(3):589-600.
WANG Hetang, ZHANG Qi, WANG Yuxuan, et al. A method of fermentation synthesis of mine biological dust suppressant with matrix homogenization [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(3): 589-600.

[79] 王和堂，贺　胜，章　琦，等.微生物发酵法合成生物抑尘剂的试验研究[J].煤炭学报，2021,46(2)：477-488.
WANG Hetang, HE Sheng, ZHANG Qi, et al. Experimental study on synthesis of biological dust suppressant by microbial fermentation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 477-488.

[80] 熊光婷，葛少成，孙丽英，等.磁化荷电液滴除尘机理及碰撞浸润煤尘数值仿真[J].煤炭学报，2023，48(9)：3441-3450.
XIONG Guangting, GE Shaocheng, SUN Liying, et al. Numerical simulation on dust removal mechanism of magnetoelectric droplets and collision wetting coal dust[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(9): 3441-3450.

[81] WANG P F, HAN H, TIAN C, et al. Experimental study on dust reduction via spraying using surfactant solution[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020,11(6): 32-42.

[82] 韩方伟，彭莹莹，张金宜，等.抑尘液滴对煤表面动态润湿特征模拟评估方法研究[J].煤炭学报，2024,49(4)：1931-1940.
HAN Fangwei, PENG Yingying, ZHANG Jinyi, et al. Simulation and evaluation methods of dynamic wetting characteristics of dust suppression droplets on coal surface[J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(4): 1931-1940.

[83] 金龙哲，黄元平.德国煤矿防尘技术及其发展前景[J].矿业世界，1996(2)：1-5.
JIN Longzhe, HUANG Yuanping. Dust prevention technology in German coal mines and its development prospects[J]. Mining World, 1996(2): 1-5.

[84] 程卫民，杨俊磊，周　刚.基于高压气幕技术的综掘面封闭式除尘系统参数优化设计[J].煤矿安全，2013，44(7)：14-17.
CHENG Weimin, YANG Junlei, ZHOU Gang. Parameter optimization design for closed-end dedusting system in fully mechanized driving face based on high pressured air curtain[J]. Coal Mine Safety, 2013, 44(7): 14-17.

[85] 聂　文，魏文乐，刘阳昊，等.岩石掘进面多径向旋流风控除尘方法的研究与应用[J].中南大学学报(自然科学版)，2016，47(10)：3612-3619.
NIE Wen, WEI Wenle, LIU Yanghao, et al. Research on dust control and removal method ofmulti-direction rotational air curtain atrock mechanized excavation face and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(10): 3612-3619.

[86] NIE W, ZHANG Y L, GUO L D, et al. Research on airborne air curtain dust control technology and air volume optimization[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 172: 113-123.

[87] 桂长庚.综掘工作面气载粉尘扩散规律及控尘优化方法研究[D].徐州：中国矿业大学，2021.
GUI Changgeng. Study on dust dispersion character-

istics of fully mechanized and optimization methods on dust control[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[88] KRAWCZYK J. Change in dust collection efficiency of liquid collectors in conditions of dedusting liquid recirculation[J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2017, 19(4): 1-7.

[89] TRAKUMAS S, WILLEKE K, REPONEN T, et al. Comparison of filter bag, cyclonic, and wet dust collection methods in vacuum cleaners[J]. AIHAJ-American Industrial Hygiene Association, 2001, 62(5): 573-583.

[90] AITKEN J. Methods for the optimisation of filtration systems for pollution control in deep mine environments[D]. Nottingham: The University of Nottingham, 1994.

[91] 李博强, 康松松. HCN400/1a型湿式除尘器在掘进机施工岩巷中的适应性分析[J]. 山东煤炭科技, 2018(12): 165-166.
LI Boqiang, KANG Songsong. Adaptability analysis of HCN400/1a wet deduster in roadway construction of roadway of roadheader adaptive analysis[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2018(12): 165-166.

[92] 刘振刚, 康淑慧. 4千瓦湿式旋流除尘风机的研制[J]. 冶金安全, 1979(4): 20-21.
LIU Zhengang, KANG Shuhui. Development of a 4 kW wet cyclone dust collector fan[J]. Metallurgical Safety, 1979(4): 20-21.

[93] 重庆研究所第一研究室掘进通风除尘设备课题组. JTC-1型掘进通风除尘器的研究[J]. 煤矿安全技术, 1984(3): 22-31.
Chongqing Research Institute First Research Room Tunneling Ventilation and Dust Removal Equipment Research Group. Research on the JTC-1 type tunneling ventilation and dust removal device[J]. Coal Mine Safety Technology, 1984(3): 22-31.

[94] 刘 建, 姚海飞, 魏传光, 等. 掘进工作面湿式离心除尘器的结构优化及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 424-428.
LIU Jian, YAO Haifei, WEI Chuanguang, et al. The structural optimization and numerical simulation of wet centrifugal precipitator at working face of diving airway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 424-428.

[95] 蒋仲安, 陈立武, 单占会, 等. 新型湿式除尘器的研制及其应用[J]. 煤炭科学技术, 1999(2): 8-10.
JIANG Zhong'an, CHEN Liwu, SHAN Zhanhui, et al. Research and development of a new wet dust collector and its application[J]. Coal Science and Technology, 1999(2): 8-10.

[96] 李 刚, 王运敏, 金龙哲. 移动式矿用湿式振弦旋流除尘器的机理分析及实验研究[J]. 金属矿山, 2019(9): 167-171.
LI Gang, WANG Yunmin, JIN Longzhe. Mechanical analysis and experimental research of mobile wet vibrating string cyclone dust collector for mine[J]. Metal Mine, 2019(9): 167-171.

[97] 胡胜勇, 孙 健, 郭舒云, 等. 矿用湿式涡旋一体式除尘器净化特性[J]. 金属矿山, 2023(7): 99-105.
HU Shengyong, SUN Jian, GUO Shuyun, et al. Purification characteristics of mine wet vortex integrated dust collector[J]. Metal Mine, 2023(7): 99-105.

[98] 张殿印. 除尘器手册第2版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
ZHANG Dianyin. Dust collector manual, 2nd edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.

[99] YANG X L, YANG J T, WANG S, et al. Effects of operational and geometrical parameters on velocity distribution and micron mineral powders classification in cyclone separators[J]. Powder Technology, 2022, 407: 117609.

[100] SHASTRI R, BRAR S. Numerical investigations of the flow-field inside cyclone separators with different cylinder-to-cone ratios using large-eddy simulation[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 249: 117149.

[101] ZHANG Z W, LI Q, ZHANG Y H, et al. Simulation and experimental study of effect of vortex finder structural parameters on cyclone separator performance[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 286:120394.

[102] 张卫东, 苏海佳, 高 坚. 袋式除尘器及其滤料的发展[J]. 化工进展, 2003, 22(4): 380-384.
ZHANG Weidong, SU Haijia, GAO Jian. Development of bag filter and its filter media[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(4): 380-384.

[103] 姚燕生, 袁根福, 陈雪辉, 等. 布袋除尘技术与装备发展状况综述[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2010, 18(6): 67-69.
YAO Yansheng, YUAN Genfu, CHEN Xuehui, et al. Development of technology and equipment of bag duty filter[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2010, 18(6): 67-69

[104] 周福宝, 李建龙, 李世航, 等. 综掘工作面干式过滤除尘技术实验研究及实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 639-645.
ZHOU Fubao, LI Jianlong, LI Shihang, et al. Experimental investigation and application of dry-type filtering dust collection technology in fully mechanized excavation face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 639-645.

[105] CHEN Y Z, QIAO W Q, LI J L, et al. Grouped opposing pulsed-jet cleaning (G-OPJC) for filter cartridges in dust collector[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 361: 131271.

[106] QIU J, WU D S, CHEN D R, et al. Reverse

pulsed-flow cleaning of pleated filter cartridges having an inner pleated filter cone[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 481-489.

[107] HAN H, WANG H T, WANG R J, et al. Construction and particulate filtration performance of bacterial cellulose-derived aerogels optimized by plant polysaccharides[J]. Small, 2025, 21(10): 2410639.

[108] 朱金佗，梁琛裕，朱桂英，等. 超低阻呼吸防护用聚乳酸纳米纤维膜制备及长效过滤性能[J]. 煤炭学报，2024，49(4)：1952-1963.
ZHU Jintuo, LIANG Chenyu, ZHU Guiying, et al. Preparation and long-term filtration performance of PLA-based nanofibrous membrane filters for ultra low-resistance respiratory protection[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1952-1963.

[109] 付海明，沈恒根. 纤维过滤器过滤理论的研究进展[J]. 中国粉体技术，2003，9(1)：41-46.
FU Haiming, SHEN Henggen. Development of theory about filtration of fibrous filters[J]. China Powder Science and Technology, 2003, 9(1): 41-46.

[110] ZHU J T, JIANG Q J, YE Y X, et al. Water-blocking asphyxia of N95 medical respirator during hot environment work tasks with whole-body enclosed anti-bioaerosol suit[J]. Safety and Health at Work, 2023, 14(4): 457-466.

[111] 张如雪. 深部高温-高湿-高尘环境强负荷作业状态下呼吸器捕尘实验研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2022.
ZHANG Ruxue. Dust capturing experimental study on of respirators in deep high temperature-high humidity- high dust environment under high workload [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[112] ZHU J T, HE X J, WANG L, et al. Performance of N95 elastomeric respirators in high humidity and high coal dust concentration environment[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(1): 215-224.

[113] 朱金佗，蒋奇君，何新建，等. 自吸过滤式口罩的消毒净化及重复使用试验研究[J]. 中国安全科学学报，2023，33(3)：212-219.
ZHU Jintuo, JIANG Qijun, HE Xinjian, et al. Experimental study on disinfection and reuse of disposable masks [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 212-219.

[114] ZHU J T, JIANG Q J, HE X J, et al. Filtration efficiency of N95 filtering facepiece respirators during multi-cycles of "8-hour simulated donning+ disinfection" [J]. Journal of Hospital Infection, 2022, 127: 91-100.

[115] ZHU J T, HU Q, HE X J, et al. 8-hour performance of loose-fitting powered air-purifying respirators in simulated hospital and coal mine environments[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2023, 20(12): 598-609.

[116] 杨　进. 基于RF算法与LSTM神经网络对矿工呼吸流量的长短期预测[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
YANG Jin. Long and short term prediction of miners' breathing flow based on random forest and LSTM neural network[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[117] 应急管理部. 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.
Ministry of Emergency Management. Respiratory Protection, Self-Contained Filtering Particulate Respirators: GB 2626—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[118] 应急管理部. 呼吸防护　动力送风过滤式呼吸器：GB 30864-2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
Ministry of Emergency Management. Respiratory protection, Powered air-purifying respirators: GB 30864—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[119] 滕广平. 高浓度粉尘环境呼吸器送风与滤尘特性研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
TENG Guangping. Study on the air supply and dust filtration properties of respirators in high concentration dust environments[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[120] 吕成明. 深井矿用新型智能送风呼吸器研发[D]. 徐州：中国矿业大学，2022.
LYU Chengming. Research and development of innovative intelligent powered air-purifying respirators used in deep coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[121] 荆鹏俐. 开放式动力送风呼吸器多孔风束优化及防尘机制研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
JING Pengli. Multi-jets air flow optimization and dust control mechanisms research of open-circuit powered air purifying respirator [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[122] Notional Institute for Dccupational Safety and Health. Electronic code of federal regulations (e-CFR) title 42: Public Health PART 84-Approval of respiratory protective devices: 42 CFR Part 84—2019[S]. Government Publishing Office, 2019.

[123] Europen Committee for Standardization. Respiratory protective devices-filtering half masks to protect against particles-requirements testing marking: EN 149—2001+A1: 2009[S]. European Committee for Standardization, 2001.

（责任编辑　宋　爽）