

安全技术及工程

煤矿粉尘职业危害监测技术及其发展趋势

王 杰¹, 郑林江²

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037; 2. 重庆大学, 重庆 400030)

摘 要:为有效预防煤矿粉尘职业危害,以煤矿粉尘特别是呼吸性粉尘浓度检测技术为研究对象,探讨了呼吸性粉尘颗粒物国内外分离技术和标准、分析了目前环境总粉尘浓度连续监测技术和个体呼吸性粉尘浓度监测技术,针对国内外环境呼吸性粉尘浓度连续监测技术方面尚处空白的现状,提出了开展环境呼吸性粉尘在线连续监测及个体监测技术研究的基本思路,阐述了煤矿粉尘职业危害监测预警技术的发展趋势,以及构建煤矿粉尘职业危害监测预警平台的架构模式。研究表明:满足“BMRC”分离曲线的分离器是实现呼吸性粉尘颗粒物浓度检测的前提,激光散射法、微量振荡天平法等是主要手段,只有建立起基于网络化大数据支撑的新型职业危害预警指标体系和预警模型,才能真正实现煤矿粉尘职业危害有效预测,提高监管水平。

关键词:粉尘职业危害;呼吸性粉尘;分离效能;监测预警

中图分类号:TD714 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)11-0119-07

Development tendency and monitoring technology of dust occupational hazard in coal mine

WANG Jie¹, ZHENG Linjiang²

(1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400037, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to effectively prevent the dust occupational hazards of the coal mine, based on the respirable dust density detection technology of the mine dust specially as the study object, the paper discussed the domestic and overseas separation technology and standard of the respirable dust particles and analyzed the total dust density continuous monitoring technology at the present environment and the personal respirable dust density monitoring technology. According to a blank status of the environment respirable dust continuous monitoring technology at home and abroad, the paper provided a base idea to conduct the on-line continued monitoring of the environment respirable dust and to study the individual monitoring technology. The paper stated the development tendency of the dust occupational hazard monitoring and early warning technology and to establish the framework mode of the dust occupational hazard monitoring and the early warning platform in coal mine. The study result showed that the separator to meet the “BMRC” separation curve would be the premise to realize the detection of the respirable dust particle density. The laser scattering method, the micro quality oscillating balance method and others would be the major means. Only the early warning index system of the new occupational hazard and the early warning model of the new occupational hazards established, the effective prediction of the coal mine dust occupational hazards could be really realized and the monitoring level could be improved.

Key words: dust occupational hazard; respirable dust; separation efficiency; monitoring and early-warning

收稿日期:2017-10-25;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.11.020

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805208,2016YFC0801707)

作者简介:王 杰(1964—),男,重庆人,研究员,硕士生导师,现任中煤科工集团重庆研究院有限公司粉尘研究分院副院长。Tel:18523290134, E-mail:1275587399@qq.com

引用格式: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.

0 引言

粉尘作为工业生产的伴生物,其危害主要表现在以下2个方面:①引起尘肺病等最主要的职业病,其中煤炭行业更是每年报告职业病最多的行业;②在一定条件下可以爆炸,往往造成严重的人员伤亡和财产损失。根据国家卫生计生委于2015年12月3日发布的《2014年全国职业病报告情况》,再综合我国2010—2014年由国家卫生计生委(原卫生部)发布的全国职业病报告情况,可得出以下结论:近年来煤矿工人尘肺病新增速度迅猛,每年新增尘肺病例均在1万以上^[1],截至2014年底,我国职业病发病人数累积超过81万例,其中尘肺病的发病人数超过了72万,占整个职业病病例比例高达88.9%,而煤矿工人尘肺病超过尘肺病总数的50%以上,粉尘职业危害防控形势非常严峻。

大量研究表明引起尘肺病的元凶为呼吸性粉尘^[2]。以粉尘职业危害最为严重的煤矿为例,在煤矿生产过程中,采、掘、运各个工序都可产生大量粉尘。随着我国矿山机械化水平的提高,尤其是大功率采、掘机械的迅速发展,开采强度的加大,在煤炭产量成倍增长的同时粉尘浓度也大幅提高,如无防尘措施,煤矿采掘工作面的粉尘质量浓度就可达 $2\ 000\sim 3\ 000\text{ mg/m}^3$,其中呼吸性粉尘质量浓度高达 300 mg/m^3 以上,超标100多倍。近年来,国家对煤矿粉尘防治日益重视,经过科技机构的连续攻关,煤矿粉尘防治技术也得到持续改善和发展。粉尘防治对策从单一防尘措施发展到综合防尘措施,在防降尘方面取得了一定的效果,一定程度上降低了尘肺病的发病率,然而新技术虽然将采掘工作面的粉尘浓度控制在 $20\sim 60\text{ mg/m}^3$,却仍然超出《煤矿安全规程》规定的 10 mg/m^3 ,这导致我国尘肺病特别是煤矿工人尘肺病新增病例仍居高不下。据专家测算,全国每年因尘肺病造成的直接经济损失达80多亿元,间接损失更是难以计算^[3]。

尘肺病发病率居高不下的现状引起了国家和社会的广泛关注,随着2007年新修订的标准GBZ 2.1—2007《工作场所有害因素职业接触限值第1部分:化学有害因素》和GBZ 2.2—2007《工作场所有害因素职业接触限值第1部分:物理因素》的颁布,国家对于呼吸性粉尘检测和职业病防治的重视程度在逐步提高。最新颁布的《国家职业病防治规划(2016—2020年)》及《“健康中国2030”规划纲要》

明确提出,以职业性尘肺病为重点,建立完善重点职业病危害因素监测。

目前,我国在呼吸性粉尘检测、防治技术以及管理技术上仍与世界发达国家存在不小差距,如呼吸性粉尘颗粒物分离标准仍然沿用英国20世纪50年代末的标准,而欧盟早在20世纪末改用新的标准;在检测技术方面美国等国家开始采用微量振荡天平法,而我国主要以激光散射法、 β 射线为主,无论是检测精度与分辨率都存在不小差距;没有相关的环境呼吸性粉尘连续在线监测技术,个体监测技术也远落后于西方发达国家;在粉尘职业危害监测预警体系与预警模型方面也尚属空白。因此开展环境呼吸性粉尘连续监测方法以及个体监测的相关研究对促进我国粉尘职业危害的有效防治有着十分重要的意义^[4]。笔者以粉尘特别是造成尘肺病的呼吸性粉尘的检测技术为研究背景,在深入探讨呼吸性粉尘颗粒物国内外分离技术和标准、分析目前环境总粉尘浓度连续监测技术、国外个体呼吸性粉尘监测方面主要技术的基础上,针对国内外环境呼吸性粉尘浓度连续监测技术尚处空白的现状,提出了开展环境呼吸性粉尘在线连续监测及个体监测技术研究的基本思路,阐明了煤矿粉尘职业危害监测预警技术的发展趋势,并构建煤矿粉尘职业危害监测预警平台的架构模式。

1 呼吸性粉尘颗粒物分离技术

国际上一般把按呼吸性粉尘标准测定方法所采集的可进入肺泡的、其空气动力学直径均在 $7.07\ \mu\text{m}$ 以下的、空气动力学直径 $5\ \mu\text{m}$ 的粉尘粒子的采样效率为50%的粉尘粒子称之为呼吸性粉尘。实现呼吸性粉尘检测的关键之一是将呼吸性颗粒物按一定标准从总颗粒物中分离出来,目前国际上已经明确使用“标准穿透效率曲线”来描述,并作为按照粒径大小选择性采样的规定,我国常用分离效能来描述呼吸性粉尘的分离水平^[5]。虽然叫法不一,但均是表述粒径与分离比例的关系。关于分离比例的标准定义,目前国际上有3种常用的呼吸性粉尘分离标准(图1):一是在1952年由英国医学研究会(British Medical Research Council)提出的,在1959年南非约翰内斯堡召开的国际尘肺会议上接受的BMRC曲线,该曲线先期用于欧洲;二是1968年美国提出的ACGIH曲线,该曲线用于北美洲;三是到20世纪90年代,欧洲提出的新标准曲线EN481,同

期世界标准组织提出了 ISO-7708 曲线,二者完全一致,并在欧盟范围内沿用至今。我国自 1995 年引进英国的 BMRC 曲线,沿用至今。

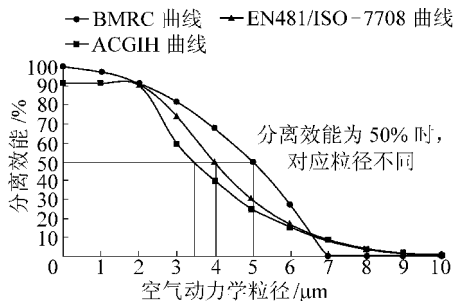


图 1 3 种分离效能曲线

Fig. 1 Three separation performance curves

呼吸性粉尘浓度的检测需要使用呼吸性粉尘预分离器,它是将呼吸性粉尘从总尘中分离出来的关键器件,直接决定了检测结果的可靠性。目前,国内外常见的预分离方法有冲击式、陶析式和旋风分离式 3 种。依据这些原理制成的预分离器也有 3 种,生产供应商主要为美国 SKC、美国 TSI 和德国 BGIA 等公司或组织,比较有代表性的产品为 Dorr-Oliver 分离器、PGP-System-FSP2 旋风分离器,但这些产品均执行 ACGIH 或 ISO-7708 标准。由于分离标准不同,导致进口预分离器无法在我国推广使用。国内对预分离器的研究起步较晚,成果相对较少,目前主要使用的还是冲击式预分离器。冲击式分离器^[6]需要定时更换硅胶油或粘着剂,如果浓度过大粘着剂会迅速被颗粒填满,分离效能无法保证;水平陶析式为重力沉降分离,受放置位置和朝向影响大,长时间或高浓度环境使用产生误差明显;旋风分离器^[7]的分离过程是一种极为复杂的三维两相流运动,虽然其可长时间使用,但是实现连续分离较为困难,需要不断地维护和清洁,分离器本身结构尺寸依存紧密,各因素对分离效能影响尚不清楚^[8]。目前,国内的中煤科工集团重庆研究院有限公司采用曲面响应法(Response Surface Methodology, RSM)成功研制出满足 BMRC 曲线分离标准的旋风分离器并应用于实际。

近些年,国内外学者开始尝试对冲击式预分离器的冲击板进行虚拟化改造,使颗粒物的长效分离成为可能。如 Wada M、Marple 及蒋静坤等将虚拟冲击原理引入大气颗粒物 PM_{2.5} 的预分离,并取得了一定的成果。虽然适用于呼吸性粉尘预分离的 BMRC 曲线标准与 PM_{2.5} 预分离标准并不相同^[9],但

仍可为基于虚拟冲击式的呼吸性粉尘预分离器研究开发提供参考。

目前,国外工业作业场所粉尘浓度监测技术已开始逐步由短时单点采样监测向长时间连续监测和多点连续监测方向发展,由总粉尘浓度监测向呼吸性粉尘浓度监测发展^[10]。我国从 20 世纪 90 年代初开始对呼吸性粉尘进行人工方式检测,制定了相关行业标准及国家标准^[11](《作业场所空气中呼吸性煤尘接触浓度管理标准》《作业场所空气中呼吸性岩尘接触浓度管理标准》等 5 个行业标准,《作业场所空气中呼吸性煤尘卫生标准》和《作业场所空气中呼吸性矽尘卫生标准》2 个国家卫生标准)。

2 环境粉尘浓度连续监测技术原理

在总粉尘监测方面,经过多年来的研究开发,目前国外开发生产的各类测尘仪器及采用的测量方法主要有:传统的取样测量法、 β 射线法、微质量振荡天平法、光散射法、电荷感应法^[12]等。

1) 传统的取样测量法,又称过滤称重法。粉尘取样后,传统的做法是对所取呼吸性尘样进行过滤后再称重,并用现有的各类粒度分析仪器对所过滤(或分离)的尘样进行粒度分析,以获得尘粒的粒径大小与分布,但是由于现场环境的温度、气流、基础振动等影响,不能将天平装在现场采样器上,否则误差将超出允许范围。虽然目前开发了自动取样装置,用以提高取样的自动化程度,提高了取样法测量的实时性,拓宽了它在工业上应用的前景。但是还是难以克服测量称重实时性差等不足^[13]。

2) β 射线法通过发射 β 射线穿过尘粒介质时,由于介质的阻碍会使 β 射线衰减,因此通过测量 β 射线的衰减程度即可测量粉尘质量浓度。但基于 β 射线测量粉尘浓度的仪器中使用了放射性同位素,测量受人员素质和心理作用的影响^[14]。由于这种方法中需要用到 C14 放射源,考虑到安全与环保,对放射源的放射量有限定。

3) 微质量振荡天平技术来源于 Rupprecht 与 Patashnick 创立的 R. P 公司。现在应用于煤矿的产品是 PDM3600 系列的个人呼吸性粉尘监测装置,能够达到 25% 的精度^[15],其传感单元原理是空心锥形石英振荡管和滤膜以固有频率振动,空气通过滤膜从振荡管中流过,空气中的粒子积累在滤膜上,改变了振荡系统的质量,从而使整个振荡系统的固有频率发生变化。通过对振荡管振荡频率的测量,获得

对呼吸性粉尘质量的测量,结合流量测量实现呼吸性粉尘检测,但是,微量振荡天平测量高浓度呼吸性粉尘需要更换滤膜,因此无法实现对呼吸性粉尘进行长时效连续的在线检测^[16]。

4) 光散射法是建立在微粒的 Mie 散射理论基础上的方法,通过测量粉尘颗粒受光照射后所发出的散射光信号大小来测量被测粉尘的质量浓度^[17],可以实时在线监测空气中颗粒物的浓度,根据颗粒物性质预先设定标定参数,可以现场直接显示质量浓度,具有实时性好、体积小、质量轻、操作简便、噪声低、稳定性好等特点,是呼吸性粉尘在线检测的理想方法之一,同时,在低浓度和小粒径的颗粒测量中,光散射法可以同时给出粉尘的浓度和粒径^[18]。近几十年来,随着激光和计算机技术的发展,光散射法作为一类非常重要的非扰动测量方法,以测量速度快、精度高及重复性好等优点受到青睐,并广泛应用于颗粒特性参数测量。

5) 电荷感应法是通过检测探头探测粉尘颗粒物所带电荷量来检测粉尘浓度的,而粉尘颗粒物电荷是由粉尘颗粒在生产过程中因撞击、摩擦和静电感应所产生的。主要有交流静电感应技术和直流静电感应技术^[19]。

6) 交流静电感应技术是测量电荷信号围绕着电荷平均值的扰动量。在交流静电技术中检测交流感应电荷,并以摩擦、撞击产生的直流电荷及感应电荷的均值做修正。检测到的交流电荷的均方根值能够准确显示信号的标准偏移。所以交流静电技术以监测电荷信号的标准偏移来确定交流信号的扰动量,并以即时扰动量的大小来确定粉尘排放量。

7) 直流静电感应技术完全滤除以上所有的交流信号,只靠粉尘颗粒对探头的撞击和摩擦以直流电导方式传进探头,这产生一个正负电荷平均值,经过系统的放大,分析和处理来显示粉尘的排放量。因此电荷数值更低,易被环境信号所湮灭,对检测电路的精度及抗干扰能力要求极高。

β 射线法、微质量振荡天平法、光散射法、电荷感应法 4 种粉尘浓度测量方法优缺点见表 1。

2013 年,中煤科工集团重庆研究院研制成功了 GCD1000 感应式粉尘浓度传感器,测量精度由原来的光学式粉尘浓度传感器的 15% 提高到 10%,目前已广泛应用于煤矿井下,开始逐渐取代以前的 GCG1000 光学式粉尘浓度传感器。

除此之外,还有超声波、激光雷达等新技术,但还处于试验研究阶段。

表 1 各类粉尘浓度测量方法优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of various dust concentration measurement methods

测量方法	优点	缺点
光散射法	技术成熟,应用广,操作简便,实时性好	气路易阻塞,光学器件易污染,结构复杂,需频繁维护
β 射线法	体积小且精度高,可以用于直读式监测仪	使用时需要更换滤膜,操作步骤较复杂,不适合连续监测
微质量振荡天平法	测量准确,精确度高	检测操作复杂,受环境影响较大,不适合连续监测
电荷感应法	精度高,免维护,安装方便	环境影响因素较大,防水性不好

3 个体呼吸性粉尘浓度监测技术原理

与地面大气 PM_{2.5} 的监测相同的是,煤矿个体呼吸性粉尘监测也是对细微颗粒物的测量,不同之处在于地面大气 PM_{2.5} 的监测对象为粒径小于 2.5 μm ,可沉积在肺部的细微颗粒物;煤矿个体呼吸性粉尘监测对象是粒径小于 7.07 μm ,可进入喉部及气管的影响人体健康的细微颗粒物。呼吸性粉尘的分离有成熟的方法:陶析法、冲击法、旋风分离法等,如何在煤矿环境中进行长时间的分离是呼吸性粉尘在线检测最核心的工作和前提,只有实现连续的、满足“BMRC”分离曲线的分离,后续检测工作才有意义。对细微颗粒的检测有 3 种主要的方式:光散射法、微质量振荡天平法、粒子计数法等。光散射法的难点在于低浓度下激光散射信号的分辨率,如何提高检测灵敏度和减少干扰是关键;微质量振荡天平法采用振荡天平原理,在采集滤膜质量变化时振荡频率发生变化,通过检测频率实现在线称重,但如何设计加工高灵敏度的振荡元件是关键;粒子计数法依然采用激光粒子计数方式,但由于涉及粒度分布对于浓度的影响,在寻求计数结果与浓度间的对应关系时十分困难。

美国联邦矿业安全与健康监察局 MSHA 从 2016 年 2 月授权使用可穿戴设备连续个人粉尘监控器(CPDM)^[20]。矿工穿着连续个人粉尘监控器在井下作业,当监控器感知粉尘浓度达到危险水平

时立刻报警,矿工们可以马上移动到没有灰尘的地方或采取降尘措施。据美国官方数据,CPDM 确实对矿工活动区域起到很好的引导作用,通过 CPDM 监测数据,可及时提示矿工采取轮班、移动到粉尘浓度低的地方或降尘等防护措施,实施 CPDM 后,粉尘样本数据证实粉尘浓度超标风险大幅下降。样品超过 MSHA 粉尘暴露极限的比例从 3.1% 下降到 0.3%,减少 90%。与传统监测手段相比,CPDM 可将粉尘暴露警告在第一时间传递给矿工。

PDM3700 个人粉尘监控器代表了美国相关领域近 10 年的研究成果,MSHA 认可其有效性和强制遵守采样,授权其从 2016 年 2 月 1 日起开始使用。由此彻底改变了美国自 1969 年联邦煤矿健康与安全法案通过以来,只能在实验室采用电子秤通过对采样滤膜称重才能得到粉尘浓度的现状。

4 煤矿粉尘职业危害监管的发展趋势

综上所述,目前作业场所环境呼吸性粉尘浓度连续监测技术的研究在国内外尚属空白,但国外在个体监测方面,无论技术或产品都已达到比较先进的水平。美国、德国等发达国家通过建立严格的监管机制、对作业场所呼吸性粉尘浓度定期抽样检测、建立相应的毒害物质数据库(MAGA)、法定工伤保险有害物质监测与评估系统(MGU)、有害物质监测系统的质量控制标准体系以及职工个人健康档案,通过及时合理调配作业人工种等手段有效预防了尘肺病的发生。

我国产生的工业作业场所数量众多,职业危害监管难度大,目前主要采用自查和抽查的方式。自查的真实性差,抽查监测时效性差、覆盖面窄、人为因素影响大,导致无法实现对作业人员职业危害的提前预警,无法及时采取应对措施。随着互联网和大数据技术的发展,尘肺病患机理研究的突破,通过建立煤矿粉尘职业危害预警信息数据库,构建基于云计算和大数据的职业危害第三方支撑平台,实现提前预警已是大势所趋。这需要从以下 2 个方面开展研究。

4.1 呼吸性粉尘连续监测与个体监测技术研发

在环境呼吸性粉尘连续监测方面,可通过研究分离装置结构尺寸、采样流量、流速等因素对气固分离的影响规律,揭示呼吸性粉尘连续分离机理;基于前面阐述的不同机理的测量特点,将激光散射法和电荷感应法相结合,实现呼吸性粉尘连续监测技术

的突破,研发出 2 种原理相结合的高精度、宽量程呼吸性粉尘浓度传感器;通过研究分析环境参数、粉尘特性对连续分离和检测性能的影响规律,研发出基于微质量振荡天平法、光散射法的个体呼吸性粉尘浓度监测仪^[21]。实现矿山呼吸性粉尘浓度实时在线监测技术突破,形成矿山呼吸性粉尘在线连续监测系统,为粉尘职业危害监测预警提供技术支撑。

4.2 煤矿粉尘职业危害监测预警平台构建

运用数值模拟和数据挖掘分析方法,研究矿山作业人员呼吸性粉尘累积接尘量计算模型,建立作业场所作业人员尘肺预警指标体系;通过实时感知多源异构职业危害数据,运用 Hadoop 大数据技术和 Spark 计算技术,构建职业危害大数据中心;运用数据挖掘技术与云计算模式,建设粉尘职业危害监测监管第三方支撑平台。实现由传统“提供检测装备”向“提供数据服务”模式的革新,提升粉尘职业危害监管服务水平。监测预警平台应从以下 4 个方面构建:

1) 探索基于云计算的职业危害第三方在线监测预警服务模式。针对现有职业危害检验检测因人为抽检导致的数据不实、检验检测周期长、覆盖面窄等问题,引入职业危害网络化检验检测技术和云计算,探索基于云计算^[20]的职业危害在线检验检测服务模式。推进职业危害检验检测市场化运营,提升职业危害检验检测专业化服务水平,促进职业危害监管水平提升(垂直监管向扁平化监管转变),培育职业危害在线检验检测服务产业。

通过建设职业危害在线检验检测服务平台,将传统的职业危害检验检测数据服务外包给专业服务平台,形成煤矿粉尘检验检测产业链多方(煤矿企业、监管部门、检验检测机构、作业场所职工、专业服务公司)共赢的商业模式。煤矿粉尘职业危害监测预警平台的数据由 2 种数据模式构成,一种是离线数据模式,如反应粉尘职业危害的游离 SiO_2 ,只能定期在实验室测得后定期人工输入;另一种是在线数据模式,绝大多数数据是在线测得的,如粉尘浓度、人员定位信息、工作时间和累积接尘量等。图 2 为服务模式总体框架。

2) 职业危害监测大数据中心建设。针对多源、异构、海量、实时的职业危害检测数据,研究职业危害检测数据实时可靠采集与传输技术,通过多源异构职业危害数据的整合,形成各类主题的分类职业危害数据资源库;通过设计的数据交换接口,实现职

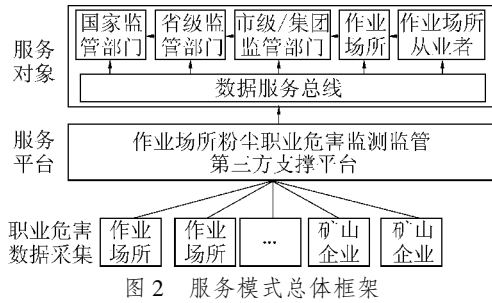


图2 服务模式总体框架

Fig. 2 The overall framework of the service model

业危害数据的交换与共享^[21]。

3) 职业危害监测预警云服务平台。建立用于职业危害检验检测数据分析与服务的标准产品、参与主体、检测数据等数据库,以在线分析、个性化推送、客户定制等形式,面向行业监管部门、煤矿企业、检验检测机构和个人等提供服务。

4) 基于大数据的职业危害预警。目前,我国主要执行的职业场所限值规范或标准有:GBZ 2.1—2007《工作场所有害因素职业接触限值第一部分:化学有害因素》、GBZ 2.2—2007《工作场所有害因素职业接触限值第二部分:物理有害因素》、GBZ 159—2004《工作场所空气中有毒物质检测的采样规范》、GBZ/T160—2004《工作场所空气有毒物质测定》《煤矿安全规程》、AQ 4202—2008《作业场所空气中呼吸性煤尘接触浓度管理标准》和 AQ 4203—2008《作业场所空气中呼吸性岩尘接触浓度管理标准》。以上规范或标准对职业危害控制限值的规定并不统一,导致在执行过程中的可操作性不强,职业危害程度与不同企业的生产条件、防治水平结合程度较低,更有国家标准脱离我国国情实际,甚至高于欧美等发达国家的标准。不合理的职业危害限值指标将会挫伤企业治理职业危害的积极性,标准也不可能发挥其应有的作用。因此,非常有必要根据目前我国实际管理需要,结合我国实际作业场所职业危害检验检测大数据,研究并制定基于网络化大数据支撑的新型职业危害预警指标体系。并在新型职业危害预警指标体系的基础上,探索具有实际应用价值的职业危害预警模型,从而对职业病的危害趋势进行有效预测。

参考文献 (References):

[1] 孙广京,朱斯陶,姜福兴,等.深井特厚煤层工作面强烈动压区安全开采技术[J].煤炭学报,2015,40(S1):12-18.
SUN Guangjing, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Safe mining technology at strong dynamic pressure area in deep extra-thick coal

seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 12-18.

[2] 马胜利,晋继伟,王 晔.综采工作面呼吸性粉尘分布规律研究[J].煤炭技术,2017,10(4):149-152.
MA Shengli, JIN Jiwei, WANG Ye. Study on distribution law of respiratory dust in fully-mechanized working face [J]. Coal Technology, 2017, 10(4): 149-152.

[3] 张丹丹,刘贝贝.我国矿山职业病的统计与展望分析[J].能源与环保,2017,39(9):173-178.
ZHANG Dandan, LIU Beibei. Statistics and prospect of occupational diseases of mine in China [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(9): 173-178.

[4] 秦跃平,张苗苗,崔丽洁,等.综掘工作面粉尘运移的数值模拟及压风分流降尘方式研究[J].北京科技大学学报,2011,33(7):790-794.
QIN Yueping, ZHANG Miaomiao, CUI Lijie, et al. Numerical simulation of dust migration and study on dust removal modes with the forced ventilation shunt in a fully mechanized workplace [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7): 790-794.

[5] 庞杰文,谢建林,卢国菊,等.长抽短压通风下综掘工作面粉尘分布特征研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):76-81.
PANG Jiwen, XIE Jianlin, LU Guojun, et al. Technology of mine safety and information automatic [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 76-81.

[6] 原永涛,魏玉珍,张滨涓,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,2012,39(5):77-81.
YUAN Yongtao, WEI Yuzhen, ZHANG Binwei, et al. Discussion on multi-stage impact sampler for flue [J]. Thermal Power Generation, 2012, 39(5): 77-81.

[7] 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(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(4): 18-20.

[8] 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].信息技术,2017,10(3):161-163.
SU Wei, WU Jingjing, YU Jianqi, et al. Performance analysis and numerical simulation of gas flow field in cyclone [J]. Information Technology, 2017, 10(3): 161-163.

[9] 惠立锋.基于RSM的呼吸性粉尘旋风分离器分离效能数值模拟研究[J].煤炭学报,2015,40(7):1692-1697.
HUI Lifeng. Numerical analysis on the respirable dust separation efficiency of cyclone separator using response surface methodology [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1692-1697.

[10] 陈建阁,吴付祥,王 杰.电荷感应法粉尘浓度检测技术[J].煤炭学报,2015,40(3):713-718.
CHEN Jiange, WU Fuxiang, WANG Jie. Dust concentration detection technology of charge induction method [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 713-718.

[11] 蒋仲安,陈举师,王晶晶,等.胶带输送巷道粉尘运动规律的数值模拟[J].煤炭学报,2012,37(4):659-663.

- JIANG Zhongan, CHEN Jushi, WANG Jingjing, *et al.* Numerical simulation of dust movement in tape conveying roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 659-663.
- [12] 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.
- [13] DEGAN G A, PINZARI D L M. Monitoring airborne dust in an Italian basalt quarry: comparison between sampling methods [C]// *Air Pollution XXI*. Siena, Italy: WIT Press, 2013: 75-84.
- [14] 刘小虎. 粉尘浓度测量技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2013: 2-7.
- [15] 马 威, 刘 勇, 陈 芳. 难湿润煤层快速综掘工作面粉尘防治技术[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(1): 70-73.
- MA Wei, LIU Yong, CHEN Fang. Fine dust prevention and control technology of rapid fully-mechanized working face in wetting difficultly seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 70-73.
- [16] 赵 政. 基于光散射法的粉尘浓度检测技术研究[J]. *电子设计工程*, 2015(24): 116-118.
- ZHAO Zheng. Study on dust concentration detection technology based on light scattering method [J]. *Electronic Design Engineering*, 2015(24): 116-118.
- [17] 张所容, 陈建阁. 金属粉尘浓度检测技术研究[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(3): 57-60.
- ZHANG Suorong, CHEN Jiange. Study on detection technology of metal dust concentration [J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(3): 57-60.
- [18] CHENG Jianwei, ZHANG Xixi, APURNA Ghosh. Explosion risk assessment model for underground mine atmosphere [J]. *Journal of Fire Sciences*, 2017, 35(1): 21-35.
- [19] LEE D, GUTOWSKI IA, BAILEY AE, *et al.* Investigating the microstructure of a yield-stress fluid by light scattering [J]. *Physical Review E*, 2011, 83(3): 514-518.
- [20] Ratchambigai S, Subba Rao S, Bhaskar Raju G. Beneficiation of an Indian non-coking coal by column flotation [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016, 3(2): 206-214.
- [21] 何 琳, 常颖聪. 国内外科学数据出版研究进展[J]. *图书情报工作*, 2013, 58(5): 104-110.
- HE Lin, CHANG Yingcong. Research progress of scientific data publishing at home and abroad [J]. *Library and Information Work*, 2013, 58(5): 104-110.
- (上接第 137 页)
- [17] FRODSHAM K, GAYER R A. The impact of tectonic deformation upon coal seams in the South Wales coalfield, UK [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 38(3): 297-332.
- [18] 岳基伟, 岳高伟, 曹汉生. 基于吸附层厚度理论的软、硬煤吸附机理解析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 653-661.
- YUE Jiwei, YUE Gaowei, CAO Hansheng. Mechanism analysis on adsorption properties of soft and hard coal based on adsorption layer thickness theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 653-661.
- [19] 张玉贵, 张子敏, 曹运兴. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(3): 281-284.
- ZHANG Yugui, ZHANG Zimin, CAO Yunxing. Deformed-coal structure and control to coal-gas outburst [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(3): 281-284.
- [20] 聂百胜, 柳先锋, 郭建华, 等. 水分对煤体瓦斯解吸扩散的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(5): 781-787.
- NIE Baisheng, LIU Xianfeng, GUO Jianhua, *et al.* Effect of moisture on gas desorption and diffusion in coal mass [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(5): 781-787.
- [21] 宋晓夏, 唐跃刚, 李 伟, 等. 中梁山南矿不同尺度煤体变形特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2013, 41(5): 24-28.
- SONG Xiaoxia, TANG Yuegang, LI Wei, *et al.* Deformation characteristics of different scale of coal in Zhongliangshan southern mine [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2013, 41(5): 24-28.