

“煤矿火灾防治理论与技术”专题

【编者按】煤矿火灾可能引起瓦斯和煤尘爆炸等重大事故,严重威胁着煤矿安全生产。据统计,“十二五”期间,我国煤矿共发生火灾事故15起、死亡104人,与“十一五”期间发生44起、死亡408人相比,事故起数下降65.91%、死亡人数下降74.51%。煤矿火灾防治科技进步有力促进和支撑了煤矿火灾防治水平的提升,煤矿火灾防治形势稳步好转。但是应该清醒地认识到,我国煤矿火灾防治形势依然严峻。2013年发生1起由采空区自燃引发的死亡53人的特别重大瓦斯爆炸事故;2015年,又发生了1起死亡22人的重大煤矿外因火灾事故。“十三五”时期,由采空区自燃引发的瓦斯爆炸等耦合灾害防治以及我国自燃危险性较大的西部煤田火灾防治等技术,将是煤矿火灾防治领域的研究重点。为进一步推动煤矿火灾治理研究工作的进步,促进我国煤矿安全生产形势稳步好转,本刊策划组织了“煤矿火灾防治理论与技术”专题,专题汇集了西安科技大学、中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、辽宁工程技术大学、华北理工大学、煤科集团沈阳研究院有限公司、神华神东煤炭集团有限责任公司等单位的防灭火技术论文,系统地凝练了一批煤矿火灾防治领域具有代表性、前瞻性和创新性的科研成果,报道了煤自燃机理及早期预测预报、自燃危险区域判定、煤矿火灾气体的产生及运移特征和煤矿火灾防治技术等方面的研究进展。非常感谢各位专家在百忙之中的撰稿,特别感谢周心权教授、邓军教授、余明高教授在专题策划组织中的特别贡献!

我国煤火灾害防治技术研究现状及展望

邓军^{1,2} 李贝² 王凯^{1,2} 王彩萍^{1,2}

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了给我国煤火灾害防治技术发展提供决策参考,介绍了我国“十二五”期间煤火灾害防治科技发展的基本现状、新特点和主要研究进展,结合当前煤火灾害现状和煤炭工业发展形势,提出了未来煤火灾害防治科技发展的重点研究领域;阐述了研究煤自燃机理、科学评价煤火环境影响、准确探测火源位置、提高治理效率等仍是煤火研究中的关键科学问题;系统论述了煤自燃机理、监测探测与预警技术、防灭火材料技术与装备、鉴定与评价方法、煤田火灾防治等研究领域的重点发展方向。煤火灾害防治技术的健康可持续发展对于保障煤炭安全生产、推动煤炭工业可持续发展及促进生态环境保护具有重要意义。

关键词: 自燃; 煤田火灾; 监测与预警; 防灭火技术

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)10-0001-07

Research status and outlook on prevention and control technology of coal fire disaster in China

Deng Jun^{1,2}, Li Bei^{1,2}, Wang Kai^{1,2}, Wang Caiping^{1,2}

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to provide the division making references to the development of coal fire disaster prevention and control technology in

收稿日期: 2016-05-17; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.10.001

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51134019); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51204135, 51504186)

作者简介: 邓军(1970—),男,四川大竹人,博士生导师,教授,博士。Tel: 18792879494 E-mail: 693167478@qq.com

引用格式: 邓军,李贝,王凯,等.我国煤火灾害防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2016,44(10):1-7,101.

Deng Jun, Li Bei, Wang Kai, et al. Research status and outlook on prevention and control technology of coal fire disaster in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 1-7, 101.

China, the paper introduced the basic status, new features and main research progress of the coal fire disaster prevention and control technology during the period of the national "12th Five Year Plan". In combination with the present coal fire disaster status and the coal industrial development situation, the paper provided the key research areas of coal fire disaster prevention and control technology development in the future. The paper stated that the study on coal spontaneous combustion mechanism, the science evaluation on the coal fire environment influences, accurate detection of the fire source location and to improve the control efficiency and others would still be the key scientific problems of coal fire study. The paper systematically discussed the key development orientations of the coal spontaneous combustion mechanism, the monitoring, detection and early warning technology, the fire prevention and extinguishing material technology and equipment, the verification and evaluation method, the coal field fire disaster prevention and control and the others. A health and sustainable development of the coal fire disaster prevention and control technology would have important significances to protect the coal safety production, to push the coal industrial sustainable development and to promote the ecological environment protection.

Key words: spontaneous combustion; coal field fire disaster; monitoring and early warning; fire prevention and extinguishing technology

0 引言

“十二五”是我国煤炭工业从波澜壮阔高速发展到断崖式下跌的转折点,煤火灾害领域科技发展与煤炭工业兴衰休戚与共。根据国家统计局发布的《2015年国民经济和社会发展统计公报》显示,2015年全国煤炭产量达到37.5亿t。以2011年生产煤炭35.2亿t计算,2012—2015年煤炭产量年均增长0.46亿t。在煤炭产量持续增长的情况下,煤矿百万吨发火率持续下降,煤矿重特大火灾事故明显减少,自燃火灾得到了极大遏制。煤火防治科技发展不仅对保障煤炭安全生产、预防事故发生有直接贡献,而且对节能减排、促进安全生产形势好转具有重要的意义。在总结“十二五”期间我国煤火灾害防治科技发展特点、成绩和进展的基础上,结合当前煤火灾害现状和煤炭工业发展形势,提出煤火灾害防治科技发展的重点研究方向,以期为煤火灾害防治及科技发展布局提供决策参考。

煤火灾害不同于其他类型的固体火灾,具有自燃、阴燃和复燃的特点,火源隐蔽、贫氧氧化、易复燃,防控难度极大^[1]。根据煤火成因和形成条件,其类型可划分为2类:一类是煤自燃火灾,主要有矿井煤自燃火灾、地面储煤堆自燃火灾和煤矸石山自燃火灾;另一类是煤田火灾,属于典型的非控燃烧,其波及面积广、深度大^[2]。煤火灾害研究涉及煤火成因及煤自燃机理、自燃倾向性鉴定、煤田火灾燃烧蔓延机制、煤火探测、煤自燃预测预报和煤火治理技术工艺等。

1 煤火灾害现状

1.1 矿井煤自燃火灾

矿井煤自燃是煤矿五大灾害之一,我国90%以上的煤层为自燃或易自燃,煤炭自燃引起的火灾占

矿井火灾总数的85%~90%,其中采空区自燃火灾占煤矿内因火灾的60%以上^[3],全国25个主要产煤省区的130余个大中型矿区均不同程度地受到煤层自然发火威胁,如宁夏宁东矿区^[4]、陕北神东矿区^[5]等每年都出现由于煤自燃引起的CO异常现象^[6],煤炭自然发火严重。据统计^[7],死亡10人以上的重特大事故中,由火灾直接引起的约占6.7%。煤炭自燃诱发煤矿瓦斯及粉尘爆炸等次生灾害,容易造成事故和损失扩大。随着煤矿开采强度不断增大,矿井开采水平不断延深,煤层瓦斯压力、瓦斯含量、地应力和瓦斯涌出量不断增大,煤自燃火灾对矿井安全生产构成了严重威胁。如2014年辽宁阜新矿业集团恒大煤业有限责任公司井下火灾引起煤尘爆燃,造成28人死亡,50人受伤,事故直接经济损失6668.16万元^[8]。

1.2 煤田火灾

神华集团承担的“十二五”科技支撑计划项目子课题“煤火自燃本底调查及遥感监测技术研究”对全国14个大型煤炭基地的102个矿区进行了煤火本底调查,已初步掌握全国主要煤田火区的基本情况。目前我国正在燃烧的煤田火区主要分布于新疆、内蒙古、陕西、山西、甘肃等7个产煤大省(自治区),另外在四川攀枝花、云南楚雄、黑龙江鹤岗等地也已产生新的火区。煤田火区以新疆最为严重,其次为宁夏汝箕沟煤田和内蒙古乌达矿区。因煤火每年烧损煤炭资源上万吨,直接经济损失达20亿元以上,因煤火燃烧产生的CO₂约占全球化石燃料碳排放的0.10%~0.22%^[9],造成严重的资源损失和生态环境恶化^[10]。经过“十二五”科技攻关及实施煤田灭火治理工程,一定程度上遏制了部分煤田火灾的扩大。但在加快煤田老火区治理的同时,新火区不断产生,并有扩大蔓延之势。我国北方煤田火

灾仍将是威胁矿井安全生产、破坏生态环境的重要因素。

2 煤火灾害特点

自 2011 年以来,随着我国煤炭开采重心西移和高产高效开采技术的推广,矿井煤自燃火灾和煤田火灾呈现出新的特点。

2.1 井下煤自然发火新特点

1) 大采高大倾角工作面采空区自然发火严重。伴随煤矿开采技术的发展,国家提倡安全高产高效矿井建设,其核心是提升和突破 6 m 以上特厚煤层群开采,以宁东矿区为代表的大型煤炭基地^[11],其主采煤层厚度为 6.0 m 以上的煤炭储量约占 40%。大采高采空区垮落范围增大,自然发火严重,如宁夏红柳煤矿^[12]、淮南谢桥煤矿^[13]等。大倾角煤层开采地质条件差,易自燃厚煤层工作面自燃危险区域范围大、采空区漏风复杂、火源点隐蔽性强,如山东华丰矿^[14]、江苏张双楼煤矿^[15]等。

2) 工作面双巷掘进联络巷自然发火。随着煤炭开采机械化水平提升,掘进、回采工艺推陈出新,井下工作面长度增加,采用双巷掘进的工作面两巷道间存在大量联络巷,联络巷密闭难度大且密闭墙效果差^[16],联络巷在矿山压力作用下易出现漏风通道,持续供氧的情况下导致采空区连通,诱发自燃,如山西云冈煤矿、内蒙古昊达煤矿^[17]等。

3) 近距离煤层群开采相邻老采空区发火。近距离煤层开采综放工作面一般是厚或特厚煤层,下部煤柱易被压碎产生裂隙,形成漏风通道,综放顶煤工作面开切眼、终采线和采空区煤柱等部位极易发生自燃火灾,火源位置难确定^[18]。近距离煤层群开采自燃预测模型、自然发火危险区域判定、气体聚集运移规律^[19]、自燃与瓦斯协同预控^[20]及综合防火技术^[21]是近距离煤层群开采煤自燃防治研究的热点和难点,如神东矿区上湾煤矿、淮南潘二煤矿等。

4) 整合煤矿采空区自然发火。为避免小煤窑私挖滥采诱发事故,近年来整合的矿井采空区自然发火情况严重。这些小煤矿易形成大范围采空区的自燃火灾,给煤矿火灾防治带来重大隐患。如神东矿区仅大柳塔矿活鸡兔井田就存在 6 个小煤矿,由其自然发火形成的冒烟处就有 19 处之多,明火共有 5 处。另外,平朔井工二矿^[22]、安家岭露天矿^[23]等都存在小煤矿火区。

5) 外因引起的煤层火灾事故增多。矿井开采深度以每年 10~30 m 的速度增加,矿用电气设备、电缆用量加大,火灾负荷增大,部分巷道充填材料发热量过高,以电缆火灾、带式输送机火灾、充填材料自燃为代表的典型外因火灾数量逐年上升。例如 2014 年 6 月川煤集团花山煤矿由于充填大量高分子材料反应放热,高温点燃木垛,引燃煤层,引发矿井火灾。

6) 火与瓦斯热动力灾害突出。火灾与瓦斯爆炸伴随有热量的释放和转移,是煤矿主要的热动力灾害现象^[24]。随着东部矿井向深部延深和西部巨厚煤层的大规模开采,矿井火与瓦斯耦合致灾机理和灾害能量转移利用机制作用不清,火与瓦斯爆炸等热动力灾害尤为突出^[25]。

2.2 煤田火灾发展新特点

1) 受矿井开采影响,煤田火灾向深部发展。受矿井开采影响,原始的地壳平衡被打破,煤层开采扰动地层稳定,造成裂隙发育,在气体渗流作用下露头煤体经热-流-固-化耦合作用,自燃发展为充分燃烧的火源,燃烧火源在持续供氧条件下,继续往深部扩展^[26]。

2) 煤田火灾发展更加隐蔽。煤田火区 90% 以上处于地下阴燃状态,具有范围大、着火点分散、距离远和火源隐蔽等特点,实时动态监控和火区治理十分困难。常规的单点测温、人工巡检等监测技术覆盖范围小、准确率低、工程量大。由于火源位置隐蔽,导致治理针对性不强^[27]。

3) 残存煤田火灾治理难度增加。我国煤田火区一般地处干旱或半干旱区,水资源缺乏,黄土覆盖不能及时将火区内部热量散除^[28],残存煤田火区由于长时间持续燃烧,深部煤层烧空后造成地表覆盖层悬空或塌陷,形成坑涧裂隙,火区易复燃,新火区不断产生。残存煤田火区火源中心精确定位和火区热能移除也是导致当前治理困难的主要问题^[29]。

4) 煤田火区存在复燃现象。煤田火区蓄热量大、贫氧氧化,传统治理方法如剥离、平整、注浆、黄土覆盖等,不能将火区内部蓄热及时置换散除,地面覆盖工程随着时间推移,在塌陷裂隙、地层沉降、雨水冲刷等环境作用下易产生新的供氧通道,容易再次复燃^[30]。

5) 煤炭行业低迷,火区治理速度缓慢。当前煤炭市场需求疲软、产能过剩,煤炭价格持续低位,众多煤炭企业出现亏损,煤田火灾治理经费筹集困难,

煤炭行业的低迷现状严重影响和制约煤田火区的治理速度。

3 煤火灾防治研究进展

近五年,我国在煤火灾防治领域开展了大量研究,取得了一系列成果,现从5个方向进行阐述。

3.1 煤自燃机理

“十二五”期间,不少学者在煤氧复合综合作用学说基础上,采用更多先进的试验技术手段和方法对煤自燃机理进行了深入研究。大型煤自然发火^[31]、绝热氧化、程序升温及热分析^[32]等试验方法在测试煤自燃过程的特征温度、耗氧与放热等宏观特征参数及指标气体方面得到广泛应用;基于特征参数确定煤自燃过程的活化能变化,实现了煤自燃热动力学特性的定量表征。在微观反应机理研究方面,原位红外光谱与热分析联用试验技术开始广泛用于测试煤氧化升温过程中的微观结构变化^[33],揭示煤自燃过程中的活性基团及其反应性,同时部分学者借助量子化学理论和计算方法模拟构建典型煤分子结构模型,计算不同官能团与氧的物理吸附、化学吸附^[34]和化学反应过程中的电子转移、反应路径、活化能及焓变等^[35]。随着近距离煤层群、高瓦斯煤层及涌水量大等煤层开采条件的复杂化,采空区多次氧化、水浸煤等自燃特性得到了深入研究。同时,国家自然科学基金重点资助了高瓦斯煤层与西部侏罗纪等典型煤层自燃特性、火与瓦斯协同防治机理、煤自燃微观反应历程、煤氧化热动力学及热效应等方向的研究。

3.2 煤自燃监测、探测与预警技术

主要开展了采空区煤自燃火源监测、探测、指标气体检测等方面的研究^[36-37]。①煤自燃监测方面,在煤自燃气体分析新技术基础上,研发光纤检测与分析、无线通信等,系统实现了对采空区温度参数的实时、连续与全程测量,被国家安全生产监督管理局列为煤矿安全生产先进适用技术,并进行推广应用。②煤自燃火源探测技术方面,通过综合应用测氦法、电磁法、钻孔测温、红外热成像等技术,结合数值模拟等方法的反演与印证,进一步定位了井下隐蔽火源^[38]。③在煤自燃预警方面,主要根据煤自燃特性试验确定自燃程度量化指标^[39],结合现场数据,采用多源信息融合与模式识别方法建立煤自燃预警模型,研究了煤自燃多元化特征信息监测方法和多源信息融合预警方法,形成了煤自燃多源信息

融合预警系统。

3.3 防灭火材料、技术与装备

矿井防灭火材料、技术和装备研究一直是国家重点资助方向,也是成果转化与推广的主要组成部分。在原有注氮^[40]、灌浆、阻化剂^[41]及凝胶^[42]的基础上,液氮、液态CO₂^[43]、矿用泡沫等多种新型材料及配套技术装备实现了从防控机理到现场应用的转化,其中“注浆(胶)防灭火技术”和“煤层自燃火灾新型胶体防灭火材料及设备”已被国家安全生产监督管理局列为煤矿安全生产先进适用技术进行推广应用,开发、集成高效液氮灭火和构建煤火防治技术与装备平台两大内容得到了2013年国家科技支撑计划重大项目“煤矿突水、火灾等重大事故防治关键技术与装备研发”资助。

3.4 煤自燃鉴定与评价方法

该方向主要涵盖了煤自然发火期预测方法、煤自燃倾向性鉴定^[44]及采空区煤自燃危险性评价等。

①煤自然发火期预测方面,在摒弃了最早的经验判定和现场粗略估计法后,基于自然发火和绝热氧化试验的模拟预测方法被广泛应用于煤矿防灭火工作,结合数值模拟方法,综合预测煤自然发火期。

②煤自燃倾向性鉴定方面,在原有物理吸氧量方法基础上,提出了不同的自燃性鉴定方法^[45],如耗氧量、活化能等。采空区煤自燃危险性评价方面,主要研究了瓦斯与煤自燃共生灾害危险性评价、采空区多因素耦合作用下自燃危险区域判定模型等内容^[46]。

3.5 煤田火灾防治

该方向主要包括煤田火灾形成演化机理、监测与遥感技术以及防治理论与方法等内容。①煤田火区形成演化机理方面,主要采用大型煤自然发火和程序升温等试验手段,模拟煤氧化升温、绝氧降温 and 供风复燃过程,研究煤(岩)体热动力学、热破坏以及裂隙发育特性^[47],建立了煤田火区形成演化多场耦合模型,揭示了煤体内高温点空间位置转移规律^[48]。②监测与遥感技术方面,主要利用红外遥感、放射性元素探测、无线自组网温度气体监测和漏风检测等手段,采集煤田火区特征信息,监测煤田火区发展变化过程,优化组合煤田火区监测与探测方法。③煤田火灾防治理论与方法方面,提出以降氧降温为主的煤田火灾灭控理论^[49],研发了高效、低成本的煤田火区灭控新技术^[50]。

4 煤火灾防治发展方向展望

深入研究煤自燃机理、科学评价煤火环境影响、准确探测煤火火源位置和提高煤火治理效率等是未来煤火灾防治研究的关键科学问题,这些问题涉及空间和时间发展过程中的众多影响因素,涉及多学科、多专业,内容相互交叉。煤火灾防治科技发展思路仍从煤自燃机理等6个方向进行阐述。

1) 煤自燃机理。①建立全国主要开采煤层煤自燃基础参数数据库。由于成煤环境、时期及地质作用等众多因素的影响,全国不同地区煤层的物理与化学基础特性存在异同,且与煤层本身的自燃性相关,通过建立全国主要开采煤层基础参数数据库,可以较为全面地掌握各地区主采煤层的自燃特点,为煤自燃机理研究与防治技术提供依据。②煤自燃过程中力学(热、流、固)特性。研究在热、流、固等多场耦合作用下的煤自燃特性。③微观反应机理及动力学。研究煤自燃形成的前期导因及其影响规律,深入揭示煤自燃形成及演化的内在与外在多因素耦合作用导因机制;研究煤自燃发展过程中低温氧化环节的热动力学特征,分析发展演化过程的阶段性特征及其表征参数;采用先进技术手段和方法,研究煤自燃发展过程中的微观结构变化,从活性结构、自由基等多角度揭示煤自燃的微观反应环节,揭示煤自燃的微观机理与宏观动力学特征;④复杂环境下煤自燃的形成与发展机制。研究在大采高、高瓦斯等复杂环境下煤自燃的形成过程,建立氧化自燃的动力学发展机制。

2) 监测、探测与预警技术方向。①建立煤自燃预测预报的多参数指标体系,研发更为精确的监测系统;②研究提高煤自燃火源中心位置及范围准确性的探测方法和技术;③研究建立煤矿火灾早期监测、火灾预警与专家决策分析系统为一体的煤矿火灾综合预警系统。

3) 防灭火材料、技术与装备研究。①在已建立的多种防灭火系统基础上,结合不同矿区或煤层条件,从效果、经济等方面优选适用的综合防灭火技术手段;②结合煤火灾形成演化过程的关键参数研究,研发绿色、高效、经济的新型防灭火材料。

4) 鉴定与评价方法。①结合煤自燃机理研究进展,深入研究基于多参数的煤自燃倾向性鉴定理论,提出煤自燃倾向性鉴定的科学方法(判定指标、标准);②复杂条件下采空区煤自燃危险区域判定

理论与方法;③煤矿火区危险性预判与应急决策。

5) 煤田火灾防治方向。①煤田火灾的形成演化机理;②探测方法与识别理论。研究煤田火区识别方法,综合优选煤田火区特征信息参数,提出煤田火区范围和程度的反演计算方法;③远程监测及防控新技术。在现有煤火灾监测方法基础上,综合互联网+、移动通信技术、无线自组网技术等监测方法,实现煤田火灾监测的自动化和网络化,研发高效、低成本的煤田火区灭控新技术;④煤田火区污染评价及环境效应。建立煤田火灾污染评价机制,定量表征煤田火灾对大气与土壤等环境影响程度;⑤煤田火区的热能利用。

5 结 语

煤火灾防治关键科学问题是未来我国煤炭工业亟需解决的重要课题之一。梳理了“十二五”期间我国煤火灾害的基本情况,介绍了我国目前存在的矿井煤自燃火灾和煤田火灾现状。同时,结合国家能源结构及战略布局的发展变化,总结了矿井煤自燃火灾和煤田火灾呈现出的新特点及防治研究进展。煤火灾害复杂性受到煤自然发火时空演化过程众多因素的影响,其攻关也必将涉及多学科、多专业的深入融合交叉。从煤自燃机理等6个方向阐述了煤火灾防治领域的重点研究方向,期待能为未来煤火灾害科技发展提供一定的参考。同时,笔者也希望引起更多学者对煤火灾害科技发展的关注,涌现出更多新颖观点和科学方法,促进我国煤火灾害科技和煤炭工业安全可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 邓 军,文 虎,张辛亥,等.煤田火灾防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2014.
- [2] 邓 军,肖 旻,张辛亥,等.煤火灾防治技术的研究与应用[J].煤矿安全,2012,43(S1):58-62.
Deng Jun, Xiao Yang, Zhang Xinhai, et al. Research status of predicating coal spontaneous combustion[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(S1): 58-62.
- [3] 朱令起.矿井火灾预测预警及密闭启封安全性研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [4] 姜进军.白茆沟煤矿渣台隐蔽火区探测技术[J].煤矿安全,2014,45(7):53-55.
Jiang Jinjun. Detection technology on slag station hidden fire area in Baijigou coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(7): 53-55.
- [5] 张 宏.神东矿区煤炭自燃特性及防灭火技术研究[D].葫芦

- 岛: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [6] 翟小伟. 煤氧化过程 CO 产生机理及安全指标研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [7] 李 波, 巨广刚, 王 珂, 等. 2005—2014 年我国煤矿灾害事故特征及规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(3): 111—114.
- Li Bo, Ju Guanggang, Wang Ke, *et al.* Study on characteristics and regularity of disaster accidents in China's coal mines from 2005 to 2014 [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2016, 43(3): 111—114.
- [8] 国家安全生产监督管理总局: 阜新矿业集团恒大煤业公司“11·26”等 2 起事故暴露企业诸多问题[N/OL]. (2014-11-28) 新华网, http://news.xinhuanet.com/politics/2014-11/28/c_1113453119.htm
- [9] Song Zeyang, Kuenzer Claudia. Coal fires in China over the last decade: A comprehensive review [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 133: 72—99.
- [10] 张学庆, 张 渝, 于明达, 等. 新疆煤田火区的危害与治理挑战[J]. 中国矿业, 2014, 23(S2): 93—96.
- Zhang Xueqing, Zhang Yu, Yu Mingda, *et al.* Damages and challenges for governing coalfield fires in Xinjiang. [J]. China Mining, 2014, 23(S2): 93—96.
- [11] 李化敏, 蒋东杰, 李东印. 特厚煤层大采高综放工作面矿压及顶板破断特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1956—1960.
- Li Huamin, Jiang Dongjie, Li Dongyin. Analysis of ground pressure and roof movement in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra-thick seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1956—1960.
- [12] 陈晓坤, 杨世满, 翟小伟, 等. 大采高综采面采空区自燃三带划分及危险性分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 94—97.
- Chen Xiaokun, Yang Shixiao, Zhai Xiaowei, *et al.* Risk analysis and three zones partition for goaf spontaneous combustion of fully-mechanized coal face with large mining height [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 94—97.
- [13] 余 陶, 卢 平, 姚尚文, 等. 易自燃大采高工作面采空区注二氧化碳自燃区域分布规律研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 29—33.
- Yu Tao, Lu Ping, Yao Shangwen, *et al.* Distribution regularity of the spontaneous combustion and carbon dioxide injection into the gob of the grand mining height panels [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 29—33.
- [14] 马 砾, 李珍宝, 赵 雷, 等. 大倾角厚煤层斜切分层无煤柱综放开采煤自燃防治技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(9): 141—143.
- Ma Li, Li Zhenbao, Zhao Lei, *et al.* Coal spontaneous combustion prevention technology for great-inclined thick coal seam oblique-cut slice none coal pillar mechanized caving mining [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(9): 141—143.
- [15] 李剑锋, 任万兴, 郭 庆, 等. 超高水材料在大倾角综放工作面防灭火中的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(10): 143—145.
- Li Jianfeng, Ren Wanxin, Guo Qing, *et al.* Application of super high-water material in fire preventing and extinguishing of large dip angle fully-mechanized working face [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(10): 143—145.
- [16] 何 毅. 矿井粉煤灰浆液固化充填技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [17] 谢 伟. 工作面联络巷密闭墙漏风对采空区自燃影响及预防[J]. 煤矿安全, 2011, 42(12): 122—125.
- Xie Wei. Research on influence and prevention of air leakage to the gob through closed wall in the workface crossheadings [J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(12): 122—125.
- [18] 王 刚, 陈 洋, 吕英华, 等. 近距离易自燃厚煤层群综放工作面防灭火技术[J]. 煤矿安全, 2015, 46(6): 60—63.
- Wang Gang, Chen Yang, Lyu Yinghua, *et al.* Fire prevention and control technology of fully mechanized caving face of close distance and inflammable thick coal seam group [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(6): 60—63.
- [19] 张 锋. 近距离煤层群开采工作面 CO 来源及聚集规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [20] 肖峻峰, 樊世星, 卢 平, 等. 高瓦斯易自燃工作面高抽巷瓦斯抽采与采空区遗煤自燃相互影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(2): 20—27.
- Xiao Junfeng, Fan Shixing, Lu Ping, *et al.* Research on interaction between gas extraction from high extraction roadway and spontaneous combustion of residual coal in the goaf for high gas and spontaneous combustion working face [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(2): 20—27.
- [21] 郭海相, 王 伟, 毛 龙. 浅埋深近距离易自燃煤层群开采工作面防灭火技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(2): 148—150.
- Guo Haixiang, Wang Wei, Mao Long. Fire prevention and control technology of coal mining face in shallow depth and close distance easy spontaneous combustion coal seam group [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(2): 148—150.
- [22] 李正东, 吴玉国, 刘 硕. 活性炭测氡法在平朔井工二矿小窑采空区自燃火源探测中的应用[J]. 山西煤炭, 2014, 34(11): 68—71.
- Li Zhengdong, Wu Yuguang, Liu Shuo. Application of radon measurement by activated carbon in spontaneous combustion detection in mined-out areas in No. 2 Jinggong mine [J]. Shanxi Coal, 2014, 34(11): 68—71.
- [23] 汤笑飞. 安家岭露天矿小窑火区快速治理技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [24] 文 虎, 郭 军, 金永飞, 等. 我国矿井热动力灾害评价研究进展及趋势[J]. 煤矿安全, 2016, 47(3): 172—176.
- Wen Hu, Guo Jun, Jin Yongfei, *et al.* Progress and trend of evaluation study on coal mine thermodynamic disasters in China [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(3): 172—176.
- [25] 曾 强. 新疆地区煤火燃烧系统热动力特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [26] 肖 晔. 煤田火区煤岩体裂隙渗流的热流固多场耦合力学特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.

- [27] 王伟峰,邓 军,王彩萍等.煤田火灾无线远程监测预警系统设计[J].工矿自动化,2012(6):1-3.
Wang Weifeng, Deng Jun, Wang Caiping, *et al.* Design of wireless remote monitoring and early-warning system of coalfield fire [J]. Industry and Mine Automation, 2012(6):1-3.
- [28] Deng Jun, Xiao Yang, Lu Junhui, *et al.* Application of composite fly ash gel to extinguish outcrop coal fires in China [J]. Nat Hazards, 2015, 79: 881-898.
- [29] Cao K, Zhong XX, Wang DM, *et al.* Prevention and control of coal field fire technology: A case study in the Antaibao open pit mine goaf burning area, China [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22: 657-663.
- [30] 牛 恒.博孜敦4号煤层露头火灾的综合治理技术研究[D].西安:西安科技大学,2009.
- [31] Deng Jun, Xiao Yao, Li Qingwei, *et al.* Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal [J]. Fuel, 2015, 157: 261-269.
- [32] 曹 凯,王德明.贫氧条件煤自燃产热特性试验研究[J].中国安全科学学报,2015,25(10):127-132.
Cao Kai, Wang Deming. Experimental study on heat release characteristics of coal spontaneous combustion under oxygen depletion condition [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(10): 127-132.
- [33] 朱红青,沈 静,张亚光.不同升温速率和氧浓度对煤表面活化能的影响[J].煤炭科学技术,2015,43(11):49-53,106.
Zhu Hongqing, Shen Jing, Zhang Yaguang. Temperature rising rates and oxygen concentrations influenced to apparent activation energy of coal [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 49-53, 106.
- [34] 马 砾,李珍宝,邓 军等.常压下煤对 $N_2/CO_2/CH_4$ 单组分气体吸附特性研究[J].安全与环境学报,2015,15(1):64-67.
Ma Li, Li Zhenbao, Deng Jun, *et al.* On the characteristic features of the adsorption capacity of the coal for the singular component gases of CH_4 , CO_2 , N_2 under regular pressures [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 64-67.
- [35] 张玉涛,李亚清,邓 军等.煤炭自燃灾变过程突变特性研究[J].中国安全科学学报,2015,25(1):78-84.
Zhang Yutao, Li Yaqing, Deng Jun, *et al.* Study on catastrophe characteristics of coal spontaneous combustion [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(1): 78-84.
- [36] 邓 军,李 贝,李珍宝等.预报煤自燃的气体指标优选试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(1):55-59.
Deng Jun, Li Bei, Li Zhenbao, *et al.* Experiment study on gas indexes optimization for coal spontaneous combustion prediction [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 55-59.
- [37] 文 虎,吴 慷,马 砾等.分布式光纤测温系统在采空区煤自燃监测中的应用[J].煤矿安全,2014,45(5):100-104.
Wen Hu, Wu Kang, Ma Li, *et al.* Application of distributed optical fiber temperature measurement system in monitoring goaf coal spontaneous combustion [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(5): 100-104.
- [38] 薛 毅,邬剑明,王俊峰.矿井自燃火灾束管监测系统应用研究[J].工矿自动化,2014(1):102-104.
Xue Yi, Wu Jianming, Wang Junfeng. Application research of mine spontaneous combustion fire monitoring system with beam tube [J]. Industry and Mine Automation, 2014(1): 102-104.
- [39] 王 磊,武术静,李长青.灰色马尔科夫模型对煤自然发火预测的研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2015,34(1):35-39.
Wang Lei, Wu Shujing, Li Changqing. Study on prediction of coal spontaneous combustion based on grey Markov model [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2015, 34(1): 35-39.
- [40] 周光华,钱 钧,刘洪刚等.氮气与液氮防灭火技术及成本分析[J].煤炭技术,2015,34(1):212-214.
Zhou Guanghua, Qian Jun, Liu Honggang, *et al.* Extinguishing technology and cost analysis of gaseous nitrogen and liquid nitrogen [J]. Coal Technology, 2015, 34(1): 212-214.
- [41] 马 砾,任立峰,艾邵武等.氯盐阻化剂对煤自燃极限参数影响的试验研究[J].安全与环境学报,2015(4):83-88.
Ma Li, Ren Lifeng, Ai Shaowu, *et al.* Experimental study on the impact of the chloride inhibitor upon the limited parameters of the coal spontaneous combustion [J]. Journal of Safety and Environment, 2015(4): 83-88.
- [42] 任万兴,郭 庆,左兵召等.泡沫凝胶防治煤炭自燃的特性与机理[J].煤炭学报,2015,40(S2):401-406.
Ren Wanxing, Guo Qin, Zuo Binzhao, *et al.* Characteristics and mechanism of prevention and control of coal spontaneous combustion with foam-gel [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 401-406.
- [43] 马 砾,王伟峰,邓 军等. CO_2 对煤升温氧化燃烧特性的影响[J].煤炭学报,2014,39(S2):397-404.
Ma Li, Wang Weifeng, Deng Jun, *et al.* Effect of CO_2 on characteristics of oxidation combustion for coal [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 397-404.
- [44] 王德明,亓冠圣,戚绪尧等.煤试验最短自然发火期的快速测试[J].煤炭学报,2014,39(11):2239-2243.
Wang Deming, Qi Guansheng, Qi Xuyao, *et al.* Quick test method for the experimental period minimum of coal to spontaneous combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2239-2243.
- [45] 李海港.煤自燃倾向性氧化动力学测试系统及自动控制[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [46] 鹿广利,熊鹏程.煤田火灾风险评估指标分析[J].矿业安全与环保,2015,42(6):105-107.
Lu Guangli, Xiong Pengcheng. Analysis on coalfield fire risk assessment index [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(6): 105-107.
- [47] 王祥虎.热力耦合下的煤田火区裂隙演化模拟研究[D].徐

- liner breaking mechanism and prevention technologies in deep and thick overburden [J]. Coal Science and Technology 2011 39(4): 6-10.
- [6] 许延春 李江华 张 旗 等. 济三煤矿注水法预防井筒破坏工程参数 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2014 33(9): 1153-1158.
- Xu Yanchun, Li Jianghua, Zhang Qi, et al. Engineering parameters of water injection to control mine shaft damage at Jisan coal mine [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2014 33(9): 1153-1158.
- [7] 孟庆彬 韩立军 石荣剑 等. 煤矿斜井井筒过流砂层施工技术的研究及应用 [J]. 岩土工程学报, 2015 37(5): 900-910.
- Meng Qingbin, Han Lijun, Shi Rongjian, et al. Study and application of construction technology for inclined shafts penetrating drift sand strata in coal mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2015 37(5): 900-910.
- [8] 杨更社 奚家米 李慧军 等. 煤矿立井井筒冻结壁软岩力学特性试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2012 8(4): 690-697.
- Yang Gengshe, Xi Jiami, Li Huijun, et al. Experimental study on the mechanical properties of soft rock of coal mine shaft sidewalls under the frozen conditions [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2012 8(4): 690-697.
- [9] 刘志强. 机械井筒钻进技术发展及展望 [J]. 煤炭学报, 2013 38(7): 1116-1122.
- Liu Zhiqiang. Development and prospect of mechanical shaft boring technology [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(7): 1116-1122.
- [10] 孙亚娟 经来旺. 黄淮地区井筒破裂致因分析及防治措施 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2010 30(1): 25-29.
- Sun Yajuan, Jing Laiwang. Analysis of shaft lining rupture in Huanghuai region and its control [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science 2010 30(1): 25-29.
- [11] 王树常 葛洪章. 兖州矿区立井井壁破裂的原因分析及防治 [J]. 中国矿业大学学报, 1999 28(5): 494-498.
- Wang Shuchang, Ge Hongzhang. Causes and preventions of shaft wall fracturing in yanzhou mining area [J]. Journal of China University of Mining and Technology 1999 28(5): 494-498.
- [12] 唐艳梅 王 坚 彭祥国 等. 煤矿井筒变形混沌特征及预报模型研究 [J]. 金属矿山, 2011 40(3): 149-152.
- Tang Yanmei, Wang Jian, Peng Xiangguo, et al. Study on coal mine shaft chaos characteristics and deformation prediction model [J]. Metal Mine 2011 40(3): 149-152.
- [13] 宫凤强 李夕兵. 矿区立井井筒非采动破裂的距离判别分析预测法 [J]. 煤炭学报, 2007 32(7): 700-704.
- Gong Fengqiang, Li Xibing. A distance discriminant analysis method of forecast for shaft lining non-mining fracture of mine [J]. Journal of China Coal Society 2007 32(7): 700-704.
- [14] 刘超林 李 扬 许延春. 煤矿立井井筒稳定性评价及破裂预测 [J]. 煤炭与化工, 2013 36(7): 12-15.
- Liu Chaolin, Li Yang, Xu Yanchun. Stability appraisal and fracture forecast of coal mine shaft [J]. Coal and Chemical Industry 2013 36(7): 12-15.
- [15] 李春林 陈旭红. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 83-106.
- Deng Jun, Li Bei, Ma Li. Influence of heat pipes on temperature distribution in coal storage pile [J]. China Safety Science Journal, 2015 25(6): 62-68.
- [50] 马 砺 李 贝 邓 军. 地面储煤堆(矸石山)自然发火蓄热高温区域的热棒深部移热技术 [J]. 科技导报, 2014 32(17): 76-80.
- Ma Li, Li Bei, Deng Jun. Deepheat transfer technology using thermal probe in high temperature region of coal storage pile (Gangue Hill) spontaneous combustion [J]. Science & Technology Review, 2014 32(17): 76-80.

(上接第 7 页)

州: 中国矿业大学, 2015.

- [48] 仲晓星 杨正杰 虞国兰 等. 地下煤火热交换系统相似准则研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2015 44(6): 965-970.
- Zhong Xiaoxing, Yang Zhengjie, Dou Guolan, et al. Study on similarity criteria for heat exchange system of underground coal fires [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015 44(6): 965-970.
- [49] 邓 军 李 贝 马 砺. 用热棒技术强化煤堆降温幅度试验 [J]. 中国安全科学学报, 2015 25(6): 62-68.