

“煤炭行业青年人才科技成果”专栏

【编者按】目前我国煤炭工业正处于转型发展的关键时期,实施创新驱动发展战略,关键在人,培养院士级人才若干名、科技创新团队100个、创新创业优秀人才200名、科技创新领军人才300名、青年拔尖人才500名、卓越工程师1000名,是“十三五”煤炭科技发展高素质人才培养工程的新目标。当前,青年科技人才正处于创新活跃期和产出高峰期,为大力营造有利于青年科技创新人才成长的学术氛围,加大优秀青年科技成果的宣传推广力度,我刊在第6期组织策划出版“煤炭行业青年人才科技成果”专栏,邀请国家重大科研项目、重大工程项目的青年骨干,或在各重点学科领域取得过原创性、标志性成果的青年学术带头人撰稿。经过严格评审,择优刊登论文29篇,报道了煤炭资源开发、煤矿重大灾害防治、煤炭清洁利用和高效转化等领域取得的科技创新成果,以增进青年科技人才之间的学术交流和科研合作,推动煤炭行业科技进步与创新。在此,对所有积极为本刊撰稿的作者表示衷心感谢!

我国煤矿火灾防治现状及发展对策

梁运涛^{1,2},侯贤军³,罗海珠¹,田富超^{1,2},于贵生¹

(1. 煤科集团沈阳研究院有限公司 煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁 沈阳 110016; 2. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221008;
3. 国家安全生产监督管理总局 规划科技司,北京 100713)

摘要: 调研了我国煤矿火灾灾害区域分布特点及近5年来煤矿火灾事故特征,从自然倾向性鉴定、自然发火期判定、自然发火早期预测预报及监测等方面探讨了煤自燃预测预报技术的发展现状,分析了现阶段我国充填堵漏、均压、注浆、惰性气体、阻化、三相泡沫、燃油惰气及高倍泡沫等防火技术装备的应用现状及适用性。指出煤矿火灾防治应坚持以基础理论研究为先导,以关键技术装备研发为重点,以推广应用为目的,不断创新提高防火技术的有效性、适应性和经济性,以指导煤层自燃与外因火灾防治,最终实现一体化火灾防控体系的技术突破。

关键词: 煤矿火灾; 煤自燃; 火灾防治; 外因火灾

中图分类号: TD752 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)06-0001-06

Development countermeasures and current situation of coal mine fire prevention & extinguishing in China

Liang Yuntao^{1,2}, Hou Xianjun³, Luo Haizhu¹, Tian Fuchao^{1,2}, Yu Guisheng¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Shenyang Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology Engineering Group Corporation, Shenyang 110016, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
3. Department of Planning & Technology, State Administration of Work Safety, Beijing 100713, China)

Abstract: The regional distributions features and the past five years accidents characteristics were investigated about mine fire accidents in China. The current situation of coal combustion forecast and prediction technologies were discussed from three aspects of identification of spontaneous combustion tendency, determination of spontaneous combustion period and monitoring of initial coal spontaneous combustion. The application status and suitability of different mine fire prevention & extinguishing technologies were analyzed, such as filling leakage, pressure balance, grouting, inert gases, inhibitor, three-phase foam, high-expansion foam and polymer materials. Finally, the authors put forward that the realization of integrated mine fire prevention & extinguishing system should persistent in the foundation theories research as the basis,

收稿日期: 2016-03-16; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.001

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51574148); 国家国际科技合作专项基金资助项目(2015DFA61250)

作者简介: 梁运涛(1974—),男,河北晋州人,研究员,博士生导师,博士。Tel: 024-56613503, E-mail: ttc5@163.com

引用格式: 梁运涛,侯贤军,罗海珠,等. 我国煤矿火灾防治现状及发展对策[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 1-6, 13.

Liang Yuntao, Hou Xianjun, Luo Haizhu, et al. Development countermeasures and current situation of coal mine fire prevention & extinguishing in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 1-6, 13.

R&D of technologies and equipments as the key, the promoting of advanced technologies as target, aiming at improving the effectiveness, adaptation and economy of coal mine fire prevention and extinguishing technologies, which could provide the references for coal seam combustion and mine fire prevention induced by external cause.

Key words: coal mine fire; coal combustion; mine fire prevention & extinguishing; mine fire induced by external cause

0 引 言

截至 2015 年底,我国共有煤矿 9 000 个左右,2015 年煤炭产量约 36.8 亿 t^[1]。我国煤田地质类型多样,由于煤矿地质条件的复杂性和生产条件的特殊性,火灾类重特大事故时有发生。据统计,我国 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的威胁,总体表现为北多南少^[2-4],其中 40 个大中型矿区煤层自然发火严重^[5-6]。全国 657 处重点煤矿中,有煤层自然发火倾向的矿井数量占 54.9%。最短自然发火期小于 3 个月的矿井数量占 50% 以上,自燃火灾严重影响了煤矿安全生产。我国已经查明正在燃烧的煤田火区共有 56 处,总面积 720 km²,主要位于北纬 35°~45°干旱和半干旱的北方地区,呈东西向分布,燃烧强度自东向西逐渐增强,集中分布在新疆、宁夏、内蒙古、甘肃、青海、陕西、山西等 7 省(自治区)。另外,四川叙水、福建龙岩、湖南怀化等地也出现了新的煤田火区^[7-10]。新疆地区煤田自然发火严重,目前正在燃烧的煤田火区达 39 处,火区总面积 605.6 万 m²,年燃煤损失量达 776.95 万 t,主要分布于北至阿勒泰草原、南到帕米尔高原一带,其中准噶尔含煤区淮南煤田煤层自燃较为严重。宁夏煤田火区主要分布在二道岭含煤区、石炭井含煤区、呼鲁斯太含煤区,火区面积 394.5 万 m²,每年直接烧毁煤炭量近 100 万 t,累计造成呆滞煤炭储量达 7 800 多万吨,其中汝箕沟煤田火区燃烧时间长、面积广、治理工程难度大。内蒙古煤田火区主要分布在桌子山、东胜、准噶尔、古拉本、乌达等 5 大煤田,其中乌达煤田火区较为严重。近年来,随着井下电气设备、电缆、带式输送机使用量不断加大,外因火灾致灾因素明显增多。特别是小煤矿通常回采率不足 20%,私挖滥采极易导致自燃火灾事故,并危及邻近的矿区,易形成难以治理的大范围采空区火灾^[11],给煤矿火灾防治带来巨大安全隐患。笔者概括了目前我国煤矿火灾区域分布特点、系统总结了近年来煤矿火灾事故特征,分析了煤矿火灾防治技术现状与存在的主要问题,并提出了煤矿火灾防治科技发展建议。

1 近年来煤矿火灾事故特征

1) 煤矿火灾事故死亡人数总体下降。2010—2014 年期间,全国煤矿共发生火灾事故 25 起、死亡 249 人^[12-14],分别占全国煤矿事故起数和死亡人数的 0.6% 和 3.2%。2010 年以来,煤矿火灾事故总量及所占比例总体呈下降趋势,2014 年全国煤矿共发生火灾事故 1 起,死亡 4 人,同比 2013 年分别下降 66.7% 和 75.0%。

2) 煤矿火灾重特大事故尚未得到完全遏制。2010—2014 年期间,全国煤矿共发生重特大火灾事故 8 起、死亡 201 人,分别占煤矿重特大事故起数和死亡人数的 9.1% 和 12.5%。2010 年 7 月,陕西某煤矿副斜井井底动力电缆着火发生火灾事故;2012 年 9 月,黑龙江某煤矿井下机电硐室因馈电柜、空压机着火引燃支护木棚,导致巷道冒落发生事故。

3) 乡镇煤矿火灾事故相对严重。2010—2014 年期间,我国乡镇煤矿发生火灾事故 18 起,死亡 195 人,分别占全国煤矿火灾事故起数与死亡人数的 72.0% 和 78.3%^[12-14]。近 5 年来全国煤矿发生火灾事故按煤矿所有制统计见表 1。

表 1 2010—2014 年全国煤矿火灾事故按煤矿所有制统计

Table 1 Coal mine fire accident statistics of China according to mine ownership in 2010—2014

年份	国有重点煤矿		国有地方煤矿		乡镇煤矿	
	事故起数	死亡人数	事故起数	死亡人数	事故起数	死亡人数
2010 年	3	9	1	2	8	157
2011 年	0	0	1	28	3	6
2012 年	0	0	1	2	4	25
2013 年	1	13	0	0	2	3
2014 年	0	0	0	0	1	4
合计	4	22	3	32	18	195

4) 外因火灾引发事故比例有所上升。2001—2014 年全国煤矿百万吨发火率由 0.725 降至 0.04 左右,自燃火灾得到了有效遏制。随着开采机械化程度的提高与矿井开采水平不断延深(每年开采深度增加 10~30 m),以电气设备、电缆、带式输送机

为代表的外因火灾事故比例不断增加。2011—2014年间,电缆、输送带、电气火灾发生致人死亡事故5起,死亡63人,占火灾事故死亡人数的82%。

5) 煤矿火灾引发的次生事故危害严重。2012年共发生重大以上瓦斯爆炸事故5起,其中2起由井下火区(煤炭自燃)引发;2013年共发生重大以上瓦斯爆炸事故7起,其中2起由井下煤炭自燃引发;2014年共发生重大以上瓦斯爆炸事故6起,其中2起由井下煤炭自燃引发。如2013年3月29日,吉林某矿-4164东水采工作面上区段采空区漏风,煤炭自然发火引起瓦斯爆炸,此次事故造成53人死亡,20人受伤。

2 煤矿火灾防治技术与装备发展现状

煤矿火灾防治包括预防与治理2个方面,经过60余年的发展,在煤自燃预测预报、火区探测、矿井综合防灭火、外因火灾防治及标准体系建设等方面取得了显著进展。

2.1 煤自燃基础理论及应用技术

1) 在煤自燃倾向性鉴定方面,国内主要采用以色谱动态吸氧法为主的煤自燃倾向性鉴定方法,同时提出了基于氧化动力学测定的煤自燃倾向性判定方法。

2) 在煤自然发火期判定方面,主要采用统计比较法和类比法,并对煤最短自然发火期的试验测试分析技术进行了研究。

3) 在煤自然发火早期预测预报方面,形成了以CO及其派生指标、 C_2H_4 、 C_2H_2 为主指标,以链烷比和烯烷比以及温度等为辅指标的煤自然发火预测预报综合指标体系,提出了我国典型褐煤、长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤、无烟煤等煤种自然发火标志气体指标优选原则。

4) 在煤自然发火监测方面,基于气相色谱分析的火灾束管监测系统抽气距离最长可达10 km以上,开发了井下原位光谱束管监测系统,克服了大范围井田长距离抽气时效性差、系统维护复杂、自动化程度低的难题,实现了井下气样就地检测、数据实时上传、早期预警。此外光纤测温技术在采空区温度监测方面也得到了应用。

2.2 矿井综合防灭火技术与装备

现阶段我国开采容易自燃煤层或采用放顶煤方法开采自燃煤层的矿井,普遍建立了以注浆防灭火方法为主的综合防灭火系统,发展了充填堵漏防灭

火、均压防灭火、注浆防灭火、惰性气体防灭火、阻化防灭火、高分子材料防灭火、三相泡沫防灭火、燃油惰气及高倍数泡沫灭火等技术装备^[15-23],各类防灭火技术与装备在煤矿火灾防治领域的应用效果如下所述。

1) 充填堵漏防灭火技术可有效应用于填堵漏风通道防治自燃火灾,发展了无机凝胶、胶体泥浆、复合浆体等防灭火材料及专用装备。具有技术易行、价格便宜的特点,但不能完全控制漏风,适用性有限。

2) 均压防灭火技术实现了开区均压、闭区均压和联合均压的成功应用,通过改变通风系统内的压力分布,降低了漏风通道两端的压差,减少了漏风,从而抑制和熄灭火区。具有实施费用低、实施方法灵活的特点,可减少有害气体涌入工作面、改善工作环境,但工艺复杂,影响正常生产,工程量较大。

3) 注浆防灭火技术形成了以地面固定式制浆系统为主体,以井下固定式和井下移动式注浆系统为辅的体系。地面固定式注浆系统流量可达 $120\text{ m}^3/\text{h}$ 以上,井下移动式大流量注浆装置流量可达 $60\text{ m}^3/\text{h}$ 以上,并在注浆材料方面实现了粉煤灰、页岩、矸石等多种材料的拓展。具有材料易选且价格便宜、浆液制备简单、防灭火效果显著等特点,但浆液制备设备体积大、运输管路长、运输管路易堵塞且处理困难、易跑浆并恶化工作面环境。

4) 惰性气体防灭火技术以氮气为主,二氧化碳为辅,制氮装置以变压吸附和膜分离为主,相应开发了地面固定式和井下移动式制氮装置;发展了液氮、液态二氧化碳直注式与可控温式灌注防灭火技术并成功应用。具有工艺简单,操作方便,有较好的稀释抑爆作用,有利于矿井恢复生产,但灭火周期长,不能有效消除高温点,易窒息。

5) 阻化剂防灭火技术采用喷洒、压注以及气雾阻化等多种方式,在传统常规阻化材料的基础上,先后研发了多种高分子阻化剂。具有工艺简单、阻化效果好的特点,适用于火灾预防,但阻化材料价格昂贵且用量较大、阻化寿命有限,使用地点选择性强。

6) 高分子材料防灭火技术主要分为高分子泡沫与高分子胶体,先后应用了包括各类型凝胶、胶体泥浆、聚氨酯类(罗克休、马利散等)等多种高分子材料,并实现了巷道漏风喷涂、裂隙压注及空洞充填的工程应用。具有封堵效果好、用途广泛等优点,但存在价格昂贵、施工复杂等缺点。

7) 三相泡沫防灭火技术集固、液、气三相材料的防灭火性能于一体,克服了传统注浆材料向上运移堆积难、包裹覆盖性能差、惰气滞留时间短的难题。具有吸热降温,包裹煤体,隔绝氧气,封堵漏风通道与煤体裂缝等特点,但成本较高。

8) 燃油惰气灭火技术与高倍数泡沫灭火技术解决了煤矿井下火灾快速熄灭、快速惰化的技术难题。两者均可用于熄灭煤矿井下火灾,既能阻爆灭火,又可快速惰化火区,起到隔绝、窒息火灾的作用。

2.3 矿井外因火灾防治技术与装备

1) 矿井外因火灾自动监控技术与装备实现了带式输送机输送带、电缆和硐室火灾的高温监测、烟雾报警等功能。分布式光纤测温系统在煤矿井下带式输送机与电缆火灾监控方面得到了应用,但无法直接测量高温点,受环境影响大,效果差。新型阻燃抗静电输送带的广泛应用降低了输送带火灾发生概率。

2) 矿井外因火灾自动喷水(粉)灭火系统实现了带式输送机自动灭火、硐室与输送带自动洒水灭火的功能,其应用广泛,但控制范围小,智能化程度低。

2.4 煤矿火区探测技术与装备

1) 在钻探法探测方面开发了孔内不同高度测温与成孔时孔内气样分析相结合的探测技术。具有可靠度较高,受外部影响较小的特点,但存在工程量较大,费时、费力、成本昂贵等缺陷,性价比低。

2) 在物探技术方面开展了磁法、电法在煤矿探测领域的探索性研究。采用同位素测氦法大致圈定深度为300~500 m的地下隐蔽火源的水平范围,操作简便,但易受岩石裂隙漏风等因素影响,现场探测工作量较大,探测精度低。物探法在火区探测方面尚属于探索性研究,其中:磁法探测速度快,尤其是航空磁测在短期内能进行大面积测量,但应用条件要求高;高密度电法测点密度大、分辨率高,但受地形影响较大,不能实现对煤矿隐蔽火源的精确定位,难以适应矿井安全生产对隐蔽火源的防控需要。

3) 在遥感技术方面,采用红外热成像法提取煤火燃烧痕迹,综合地质、采矿等特征信息,初步实现了煤火大范围勘查,可满足煤田火区大比例尺填图,初步实现了煤田火区勘查与煤火的早期预报,但存在成本高、操作复杂等缺点。

3 煤矿火灾防治存在的主要问题

3.1 预防煤自燃基础研究方面

目前,我国煤自燃火灾反应机理及致灾机制研究不足,突出表现在煤自燃氧化动力学反应过程机制、瓦斯与煤自燃风险共生环境下的灾害耦合致灾及演化规律,灾变期间受限空间热动力灾害的传播特性、瓦斯爆炸后致灾性气体的生成动力学机制等深层次理论研究方面的欠缺,对指导防灭火现场实践与应急救援指挥决策的技术支撑能力不足。

此外,随着煤矿开拓水平的延伸和开采深度的增加,采矿工程扰动更加明显,地温梯度显著增加,对出现的热风压变化影响下深部煤体自然发火耦合效应新特点研究不足;同时,出现了煤层群开采浅部小煤矿和上组煤采空区自燃等多种威胁因素,对环境气体本底含量异常等特殊生产技术条件下的预测预报指标,煤的二次氧化自燃特性等研究方面提出了更高的要求。而与此相关的基础理论研究欠缺,难以采取有效控制措施,是目前亟待研究的重点。

3.2 矿井综合防灭火技术与装备方面

1) 在监测预警方面,目前我国煤矿缺乏内外因火灾一体化预警系统,无法有效实现矿井动态安全信息的连续采集、在线辨识、智能分析,亟需建立集煤矿火灾早期监测、火灾预警与专家决策分析系统为一体的煤矿火灾一体化预警与高效预防技术体系。

2) 在火灾治理方面,现有防灭火材料,存在针对性不强,成本偏高,难以彻底控制高温区域,易复燃等缺点,专用装备能力不足,智能化程度相对较低。

3) 在火灾应急救援方面,由于火灾继发性灾害突发性强,影响范围广,开放及半封闭区域爆炸危险性探测与抑控技术、火区封闭后封监测施工专用装备缺乏。

3.3 外因火灾防治方面

目前,以井下带式输送机以及电缆为代表的外因火灾监控依然是一项技术难题,现有技术装备无法实现对长达数十千米的井下带式输送机以及井下电缆进行全范围的火灾危险性有效监测与自动控制灭火,同时煤矿井下自动控风与火灾消防装备系统的成熟度和应用还不完善,难以对井下火灾实现智能感知与系统控制。

3.4 隐蔽火源探测方面

煤矿隐蔽火源探测一直是一项困扰煤炭行业的

世界性难题,我国现有火区探测技术总体上依然不能实现对煤矿隐蔽火源的精确定位,钻探法工程量大,费时费力、成本高,性价比低;同位素测氦法探测精度易受采动影响以及围岩裂隙漏风干扰,适用性低,探测精度差;物探法探测矿井隐蔽火区易受大地杂散电流、磁场强度变化等因素影响,准确性需进一步提升;遥感法受地表辐射背景、上覆岩层岩性、地质构造等因素影响较大,且成本高、操作复杂。我国国有重点煤矿至今残存火区近800处,封闭和冻结的煤量2亿多吨,亟需攻克高温火区精确探测关键技术。

4 煤矿火灾防治发展对策

4.1 加强基础理论研究

在基础研究方面,应加强对煤自燃反应机理、深部煤自燃火灾耦合机制、煤层自燃前兆信息演化特征与预警方法、瓦斯与煤自燃耦合致灾规律、煤自燃防治材料的物化本征特性等关键科学问题进行研究,为火灾防治新技术和装备的研发奠定基础。

1) 开展煤自燃反应机理研究,掌握煤低温氧化自燃链式反应种类、自由基和活性官能团与温升的关系,分析阻化剂与煤中自由基反应的过程机制,确定多因素耦合条件下煤自燃不同阶段的宏观热物理场效特性与微观结构变化特征,建立自燃过程的氧化动力学反应模型,揭示煤自燃火灾动力学反应与突变机理。

2) 开展深部开采条件下煤自燃火灾耦合机制研究,探讨深部围岩蓄热条件变化影响下煤体的氧化放热性,分析深部开采过程中瓦斯与煤自燃风险共生环境下的灾害耦合致灾及演化规律,揭示热风压变化影响下深部煤体自然发火的耦合效应,确定深部高强度开采过程中采空区遗煤二次氧化机理。

3) 开展煤层自燃前兆信息演化特征与预警理论研究,提出煤自燃活化性能测试方法与评价技术,确定煤自然发火期快速测试分析方法,建立环境气体本底含量异常等特殊生产技术条件下的预测预报指标。

4) 开展瓦斯与煤自燃风险共生环境下耦合致灾及演化规律研究,分析不同火源产生的条件与致灾机理,揭示瓦斯爆炸后致灾性气体的生成动力学机制与受限空间传播特性,提出火区封闭、启封、治理等不同阶段的爆炸危险性评价方法与指标,确定矿井火灾诱发爆炸的转化条件及影响规律。

5) 开展煤自燃防治材料的物化特性与效应性

研究,确定煤岩多孔介质结构体在火灾演化过程中的物理化学参数的变化规律,揭示各种防灭火材料阻化特性,得出不同火灾危险环境条件下的防灭火材料的适用性。

6) 开展有利于煤自燃防治的采矿工程技术方案研究,分析煤层层位关系、工作面布置方向、工作面参数对生产系统的影响规律,研究采动影响下多元气体运移与灾害演化的时空特征,从预防煤矿火灾的角度,提出最优采掘部署方案的设计原则、防控条件与控制参数。

4.2 关键技术与装备研发

“十三五”期间重点在煤矿火灾早期监测预警与控制、煤矿输送带及电缆等外因火灾监控、矿井火灾治理和火区处理、火灾应急救援、基于大数据的矿井内外因火灾危险综合评价方法及配套管理平台等技术装备方向取得突破。

1) 在监测预警方面,研制基于光谱技术的煤矿自燃火灾监测预警系统,研发基于物联网的MEMS煤矿带式输送系统、电缆、机电硐室高温异常点信息感知成套装备,建立基于全矿井大数据分析的内外因火灾危险综合评价方法及配套管理平台,实现长距离在线实时监测预警。

2) 在火灾治理方面,研制基于红外遥感、磁法、电法的隐蔽火区多元信息探测技术与装备;研制开发新型气溶胶、无机泡沫阻化剂、微生物等防灭火材料及其专用装备;研制松散煤岩体大孔径灭火钻进装备;开发浅埋藏近距离复合煤层堵漏控风与惰化降温关键技术及装备、煤田火区高温大热容煤岩体的快速降温灭火技术及装备。

3) 在应急救援方面,开发便携式煤矿漏风分析仪、煤矿有害气体分析仪、便携式爆炸三角形分析仪等小型仪表,实现井下原位检测、就地分析功能;研制瓦斯抑爆材料与装备,实现火灾灾变环境爆炸危险性准确侦检与快速防护。

5 结 语

针对目前煤矿火灾防治技术现状及存在问题,煤矿火灾防治应坚持以基础理论研究为先导,以关键技术研究及装备研发为重点,以推广应用为目的,以法规标准升级为保障,从优化采掘布局、开采技术、通风系统等基础影响因素入手,完善各项装备,不断创新提高防灭火技术的有效性、适应性和经济性,指导煤层自燃与外因火灾防治,实现隐蔽火源的

精确定位,最终实现一体化火灾预警技术的突破。“十三五”期间,坚持以科技创新为核心,在现有煤矿火灾防治技术基础上,努力突破火灾发生发展基础理论、矿井隐蔽火区精确定位等理论与技术难题,研究形成煤矿火灾防治技术与装备的创新性成果,持续推动煤矿火灾防治能力的提高。

参考文献(References):

- [1] 国家发展和改革委员会. 2015年煤炭生产供应简况 [EB/OL]. (2016-01-29) [2016-02-10]. http://yxj.ndrc.gov.cn/gjyx/201601/t20160129_777732.html.
- [2] 罗海珠,梁运涛. 煤自然发火预测预报技术的现状与展望 [J]. 中国安全科学学报,2003,13(3):76-78.
Luo Haizhu, Liang Yuntao. Current status and perspective of forecast and prediction techniques for spontaneous combustion of coal [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(3): 76-78.
- [3] 梁运涛,罗海珠. 中国煤矿火灾防治技术现状与趋势 [J]. 煤炭学报,2008,33(2):127-133.
Liang Yuntao, Luo Haizhu. Current situation and development trend for coal mine fire prevention & extinguishing techniques in China [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 127-133.
- [4] 鲜学福,王宏图,姜德义,等. 我国煤矿矿井防灭火技术研究综述 [J]. 中国工程科学,2001,3(12):28-30.
Xian Xuefu, Wang Hongtu, Jiang Deyi, et al. The summarization of investigation on coal mine fire prevention & fire extinguishing techniques in China [J]. Engineering Science, 2001, 3(12): 28-30.
- [5] 戚颖敏. 我国煤矿火灾防治技术的现代发展与应用 [J]. 煤, 1999, 8(2):1-4.
Qi Yingmin. Current Development and application of coal mine fire prevention & extinguishing techniques in China [J]. Coal, 1999, 8(2): 1-4.
- [6] 王省身,张国枢. 中国煤矿火灾防治技术的现状与发展 [J]. 火灾科学,1994,3(2):1-6.
Wang Xingshen, Zhang Guoshu. Current situation and development of coal mine fire prevention and treatment techniques in China [J]. Fire Safety Science, 1994, 3(2): 1-6.
- [7] Liang Yuntao, Tian Fuchao, Luo Haizhu, et al. Characteristics of coal re-oxidation based on microstructural and spectral observation [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(5): 749-754.
- [8] Liang Yuntao, Tang Xiaojun, Zhang Xuliang, et al. Portable gas analyzer based on fourier transform infrared spectrometer for patrolling and examining gas exhaust [J/OI]. (2015-12-14) [2016-01-30]. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/136516>.
- [9] 梁运涛,孙勇,罗海珠,等. 基于小样本的煤层自然发火烷烃气体的光谱分析 [J]. 煤炭学报,2015,40(2):371-376.
Liang Yuntao, Sun Yong, Luo Haizhu, et al. Spectral analysis of alkane gases of coal spontaneous combustion with a small quantity sample [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 371-376.
- [10] 王德明,辛海会,戚绪尧,等. 煤自燃中的各种基元反应及相互关系:煤氧化动力学理论及应用 [J]. 煤炭学报,2014,39(8):1667-1670.
Wang Deming, Xin Haihui, Qi Xuyao, et al. Mechanism and relationships of elementary reactions in spontaneous combustion of coal: the coal oxidation kinetics theory and application [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1667-1670.
- [11] 张灵涛,赵晨德. 小煤矿火灾引发的次生火灾综合治理技术 [J]. 煤炭科学技术,2013,41(7):61-63.
Zhang Lingtao, Zhao Chende. Comprehensive treatment technology of secondary fire caused by small coal mine fire [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 61-63.
- [12] 国家安全生产监督管理总局统计司. 2011年全国生产安全事故统计分析报告 [R]. 北京:国家安全生产监督管理总局,2012:54-70.
- [13] 国家安全生产监督管理总局统计司. 2013年全国生产安全事故统计分析报告 [R]. 北京:国家安全生产监督管理总局,2014:55-64.
- [14] 国家安全生产监督管理总局统计司. 2014年全国生产安全事故统计分析报告 [R]. 北京:国家安全生产监督管理总局,2015:55-68.
- [15] 梁运涛,宋双林,罗海珠,等. 煤自然发火期计算模型及其解析解 [J]. 煤炭学报,2015,40(9):2110-2116.
Liang Yuntao, Song Shuanglin, Luo Haizhu, et al. An analytic solution of coal spontaneous combustion period calculation model [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2110-2116.
- [16] 梁运涛. 煤炭自然发火预测预报的气体指标法 [J]. 煤炭科学技术,2008,36(6):5-8.
Liang Yuntao. Gas index method to predict coal spontaneous combustion [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6): 5-8.
- [17] 高广伟. 中国煤矿氮气防火的现状与未来 [J]. 煤炭学报, 1999, 24(1):48-52.
Gao Guangwei. The present state and prospects for nitrogen fire prevention and fire elimination technology in coal mines of China [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 48-52.
- [18] 梁运涛,汤晓君,罗海珠,等. 煤层自然发火特征气体的光谱定量分析 [J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(9):2481-2487.
Liang Yuntao, Tang Xiaojun, Luo Haizhu, et al. Quantitative spectrum analysis of characteristic gases of spontaneous combustion coal [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(9): 2481-2487.
- [19] 胡广扬,张淑兰. 中国煤矿火灾的防治 [J]. 中国安全科学学报,1992,2(1):11-19.
Hu Guangyang, Zhang Shulan. Coal mine fire control in China [J]. China Safety Science Journal, 1992, 2(1): 11-19.
- [20] 王刚. 新型高分子凝胶防火材料在煤矿火灾防治中的应用 [J]. 煤矿安全,2014,45(2):228-229.
Wang gang. Application of new type polymer gel fire prevention material in mine fire prevention [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(2): 228-229.

(下转第13页)

- (5): 109 – 114.
- [42] Day S, Fry R, Sakurovs R, *et al.* Swelling of coals by supercritical gases and its relationship to sorption [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(4): 2777 – 2783.
- [43] 倪小明, 张崇崇, 王延斌, 等. 气水两相流阶段煤基质收缩量预测方法 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S1): 174 – 178.
Ni Xiaoming, Zhang Chongchong, Wang Yanbin, *et al.* Prediction of coal matrix shrinkage in gas – water two – phase flow stage [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S1): 174 – 178.
- [44] Day S, Fry R, Sakurovs R. Swelling of australian coals in supercritical CO₂ [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(1): 41 – 52.
- [45] Pini R, Ottiger S, Burlini L, *et al.* CO₂ storage through ECBM recovery: An experimental and modeling study [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1719 – 1726.
- [46] 张先敏, 同登科. 考虑基质收缩影响的煤层气流动模型及应用 [J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(5): 790 – 796.
Zhang Xianmin, Tong Dengke. Coalbed methane transfusion model and its application with matrix shrinkage [J]. *Science in China (Series E): Technological Sciences*, 2008, 38(5): 790 – 796.
- [47] Alireza Ashrafi Moghadam, Rick Chalaturnyk. Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 123: 2 – 9.
- [48] 肖晓春, 潘一山. 低渗煤储层气体滑脱效应试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(S2): 3509 – 3515.
Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Experimental study on gas slippage effects in hypotonic coal reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S2): 3509 – 3515.
- [49] 覃建华, 肖晓春, 潘一山, 等. 滑脱效应影响的低渗储层煤层气运移解析分析 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 619 – 622.
Qin Jianhua, Xiao Xiaochun, Pan Yishan, *et al.* Analytical solution of coalbed methane migration with slippage effects in hypotonic reservoir [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4): 619 – 622.
- [50] 章星, 杨胜来, 章玲, 等. 低渗透气藏克氏渗透率影响因素室内试验研究 [J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(3): 81 – 83.
Zhang Xing, Yang Shenglai, Zhang Ling, *et al.* Experimental study on factors of Klinkenberg permeability in low permeable gas reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(3): 81 – 83.
- [51] 肖晓春, 潘一山, 于丽艳. 水饱和度作用下低渗透气藏滑脱效应试验研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(5): 15 – 19.
Xiao Xiaochun, Pan Yishan, Yu Liyan. Experiment of slippage effect under water saturation in hypotonic coalbed [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(5): 15 – 19.
- [52] 罗瑞兰, 程林松, 朱华银, 等. 研究低渗气藏气体滑脱效应需注意的问题 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(4): 92 – 94.
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Zhu Huayin, *et al.* Problems on the study of slippage effect in low – permeability gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(4): 92 – 94.
- [53] 邹明俊. 三孔两渗煤层气产出建模及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 5 – 8.
- [54] 马飞英, 王永清, 王林, 等. 考虑水分含量的煤岩渗透率动态变化特征 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(9): 1477 – 1482.
Ma Feiying, Wang Yongqing, Wang Lin, *et al.* The permeability dynamic variation features of coals with the consideration of moisture content [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(9): 1477 – 1482.
- [55] Shi J Q, Durucan S A. Model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2005, 8(4): 291 – 299.
- [56] Cui X, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2005, 89(9): 1181 – 1202.

(上接第 6 页)

- [21] 杨广文, 艾兴, 姜进军, 等. 大流量惰气与惰泡灭火工艺 [J]. *煤矿安全*, 2011, 42(7): 52 – 53.
Yang Guangwen, Ai Xing, Jiang Jinjun. Mine fire extinguishing technology for large flow of inert gas and inert foam [J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(7): 52 – 53.
- [22] 徐精彩, 文虎, 张辛亥, 等. 综放面采空区遗煤自燃危险区域判定方法的研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2002, 32(6): 672 – 677.
Xu Jingcai, Wen Hu, Zhang Xinhai, *et al.* Study on the method for determining dangerous zones of coal self – ignition in gobs in a fully mechanized top – coal caving face [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2002, 32(6): 672 – 677.
- [23] 宋文忠. 无机固化粉煤灰应用技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2004, 32(9): 64 – 67.
Song Wenzhong. Study on applied technology of inorganic solidified fly ash [J]. *Coal Science and Technology*, 2004, 32(9): 64 – 67.
- [24] 段西凯. 基于正逆双向模拟的采空区隐蔽火源探测技术 [J]. *煤矿安全*, 2014, 45(10): 51 – 54.
Duan Xikai. Fire detection technology of gob hidden source based on forward and inverse two – way simulation [J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(10): 51 – 54.
- [25] 许延辉, 金永飞, 李海涛, 等. 浅埋深煤层近距离采空区隐蔽火源探测及控制技术 [J]. *煤矿安全*, 2014, 45(9): 144 – 147.
Xu Yanhui, Jin Yongfei, Li Haitao, *et al.* Hidden fire detection and control technology in shallow distance seam group gob [J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(9): 144 – 147.