

矿井火灾原因综合分析及防治技术

安敬鱼¹, 牛会永¹, 邓军^{1,2}, 邓湘陵¹, 乔晨露³

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;
3. 河南金维科知识产权代理有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为避免矿井火灾产生的高温气体、风流紊乱及导致的次生灾害造成的人员伤亡和经济损失, 笔者通过对近年来我国煤矿火灾及由火灾诱发的爆炸事故进行的统计分析, 结合煤自燃机理及燃烧三角形分析了矿井内外因火灾的致灾机理, 并针对矿井火灾的特点以及现有的火灾治理措施, 提出了在火灾救灾措施的实施过程中避免二次灾害发生的预防措施, 以及消除环境因素对火情预报影响的方法, 对传统救灾措施的安全性进行有效分析, 提高了救灾人员对火区分析的正确性与合理性, 对救灾措施的有效实施提供了可靠保障。

关键词: 矿井火灾; 统计分析; 致灾机理; 火灾防治

中图分类号: TD752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2015)03-0040-05

Comprehensive causes and treatment technology of mine's fire

AN Jingyu¹, NIU Huiyong¹, DENG Jun^{1,2}, DENG Xiangling¹, QIAO Chenlu³

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Henan Veken Intellectual Property Agency Services Inc. Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to avoid heavy casualties and economic losses caused by high temperature and harmful gas produced in the mine fire as well as the second disasters. This paper counts the coal mine fire and the explosion evoked by the fire over the past five years, elaborating the coal mine disaster-causing mechanism combined with coal spontaneous combustion and combustion triangle. According to the characteristics of mine fires and the preventions, it proposes the precautions to avoid secondary disasters in fire rescue and the methods to eliminate the influence of the environment in the fire forecast. It also analyzes the security of traditional fire preventions to improve the correctness and rationality of relief workers, and provide reliable protections for the rescue measures.

Key words: mine fire; statistical analysis; disaster-causing mechanism; fire disaster prevention

1 煤矿火灾事故的统计分析

煤炭是我国最主要的能源供给, 占我国能源消费及生产结构的 2/3 以上. 根据数据显示, 全国煤炭生产量自 2003 年的 1.8×10^{10} t 增长至 2013 年的 3.7×10^{10} t, 10 年期间, 我国的煤炭生产量已经翻了 1 倍. 然而, 我国煤矿火灾现象严重, 发火率是世界上最多的国家之一, 且多诱发瓦斯、煤尘爆炸事故, 造成重大人员伤亡和经济损失. 如: 神华宁煤集团, 每年有 1×10^6 t 煤损失于火灾及爆炸事故中, 而烧毁的设备损失更是无法估量. 通过国家安全生产总局对 2010~2014 年全国煤矿所发生的事故进行不完全统计, 得出近 5 年的煤矿事故统计表(表 1), 及煤矿火灾事故等级统计表(表 2).

收稿日期: 2015-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174009; 51474106)

通信作者: 牛会永(1975-), 男, 河北石家庄人, 副教授, 研究方向: 矿井火灾防治. E-mail: niuhuiyong@163.com

表1 2010~2014年煤矿事故统计

年份	火灾起数	由火灾引发的爆炸起数	事故总数	火灾事故在总事故中所占比例/%
2010	33	28	105	31.4
2011	20	19	85	23.5
2012	16	13	63	25.4
2013	16	15	55	29.1
2014	12	11	46	26.1

表2 2010~2014年煤矿火灾及由火灾引发的爆炸事故等级统计

年份	特别重大事故死亡人数	重大事故死亡人数	较大事故死亡人数	一般事故死亡人数
	30人以上/例	10~30人/例	3~10人/例	3人以下/例
2010年	1	7	19	6
2011年	0	4	13	3
2012年	1	3	10	3
2013年	1	7	8	0
2014年	0	3	7	2

由表1统计结果分析可知,矿井火灾事故得到了控制,但是,在矿井发生的所有事故中,火灾事故所占的比例依旧居高不下,且多诱发爆炸事故.从表2中可以看出,煤矿火灾以及由火灾诱发的爆炸事故,大多属于较大事故或重大事故,并且每年几乎都会发生一起特别重大事故,人员伤亡严重.

由于火灾诱发的爆炸是一种突发性的灾害,在短时间内释放大量能量,造成强烈的冲击波及高温高压,甚至可能造成地震等严重后果.一旦发生爆炸,井下工作人员几乎无生还可能,其危害性较火灾要大得多.近年来,由矿井火灾引发的爆炸事故屡见不鲜,如2013年,吉林省八宝煤业公司在3月29及4月1号连续发生两起重大的瓦斯爆炸事故,起因是416采区-250石门CO浓度超限,遇火源发生燃烧并引发第一次的瓦斯爆炸.4月1日8时,该公司擅自违规派人员到八宝煤矿井下采取挂风障以阻挡风流、控制风量的措施再次处理火区,诱发第二次瓦斯爆炸,事故共造成29人死亡.而2014年3月12日,皖北煤电集团公司任楼煤矿Ⅱ8222外段机巷附近原Ⅱ7322机巷封闭墙内因采空区漏风煤层自燃,发生瓦斯爆炸,冲倒7322机巷封闭墙,造成在Ⅱ8222外段机巷掘进作业的3名工人死亡,1人受伤.由此可见,无论是内因火灾还是外因火灾,都极有可能诱发瓦斯爆炸,造成更大的伤亡及损失.因此,矿井火灾的防治不能只是考虑如何扑灭火区,更应该防止诱发爆炸等次生灾害^[1].

2 矿井火灾特点及原因分析

2.1 矿井火灾特点

从本质上讲,矿井火灾是一种非控制燃烧现象,具备燃烧的特征:放热、发光、生成新物质.由于其发生地点(地下空间)和蔓延的特殊性,使其具有以下特性:破坏性、灾难性及继发性.井下火灾发生地点不同,供氧情况也不同.根据供氧情况,可分为富氧燃烧和富燃料燃烧.

矿井火灾前期耗氧量较少,火势强度及火源范围较小,蔓延速度低,氧气的供给量大于或接近燃烧所需要的氧气量,此时井下进行的燃烧为富氧燃烧.由于氧气供应充足,致使相当富足的氧气剩余,火源下风侧氧气浓度一般大于15%.燃烧产生高温,并分解出大量可燃气体及水蒸气,此时,火灾蔓延迅速,影响范围扩大,氧气的消耗量大于供给量,火灾发展为富燃料燃烧.这些挥发性组分在燃烧的同时,与风流汇合,形成高温烟流,加热火源下风侧较大范围的可燃物,致使下风侧的氧气浓度一般低于3%.此外,井下火灾会使气流发生紊乱,主要有风流逆转、烟流倒退及烟流滚退等.火灾生成大量有毒有害气体,随着逆转的风流蔓延至更大区域,甚至污染进风区域,给撤退及救灾人员带来危险,也增加了爆炸的可能性;烟流倒退及烟流滚退对火源上风侧影响较大,倒退的烟流与新鲜风流混合,在一定条件下可能诱发瓦斯爆炸或引起风流逆转;另外,火源下侧的高温挥发性气体遇旁侧新鲜风流后,容易形成新的火源点,发生回燃,也称“跳蛙”现象^[2].

2.2 矿井火灾原因分析

依据引发火灾的原因不同,矿井火灾一般可分为内因(自燃)火灾和外因火灾.

2.2.1 矿井内因火灾

内因火灾的起因,是具有自燃倾向性的煤层,在适量的通风条件下发生物理化学变化,集聚热量,达到自然点引发的煤燃烧火灾,即煤自燃造成的矿井火灾.图 1 为煤自燃机理示意图.

对于煤自燃机理的探究始于 17 世纪,经过 100 多年的探究,人们提出了若干种煤炭自燃机理,主要有黄铁矿作用学说、细菌作用学说与酚基作用学说、谢苗诺夫自燃学说及被多数人认可的煤氧化学说等.煤氧复合作用学说认为,具有自燃倾向的煤体自暴露在空气中后,与氧气结合,发生氧化反应并产生热量,由于井下空间受限,热量极易集聚导致温度升高,引起煤体燃烧.按温度和物理化学变化特征,煤自燃过程可以分为潜伏(准备)期、自热期、自燃期和熄灭期.近年来,国内外学者对煤自燃机理的研究又取得了新的进展,主要体现在:a.从煤分子结构模型及其活化能入手研究,b.利用热分析技术研究从,c.从煤岩相学角度进行研究^[3,4].矿井内因火灾多发生在采空区或煤柱内,火源点较隐蔽,过程缓慢,不易察觉.

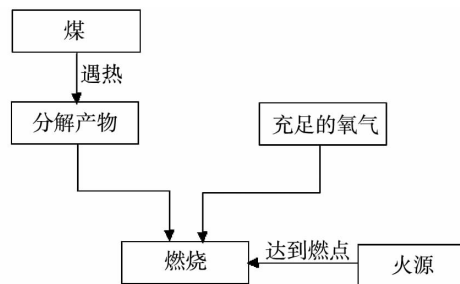


图 1 煤自燃过程

2.2.2 矿井外因火灾

煤矿外因火灾是在外界火源(明火或高温)的作用下,引起燃烧而导致的火灾.图 2 为发生矿井外因火灾示意图.

井下常见的外因火源主要有:电气火灾、摩擦产生高温或火花引发的火灾、明炮及炸药引发的火灾、爆炸引发的火灾、液压联轴器喷油着火引发的火灾、明火(电焊切割作业、吸烟等)引发的火灾.

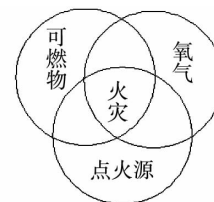


图 2 矿井外因火灾过程

随着机械化程度的提高,煤矿外因火灾比例逐年增大.矿井外因火灾多数是由于管理的松懈而造成的,很多井下工作人员都未经专业的教育及逃生技能的培训就上岗,更有部分特种作业工作者,如电焊人员无证上岗,井下杂物堆放,设备不按照规定进行保养和更换等,这些都为矿井火灾的发生埋下了重大的隐患.据统计,外因火灾的比重在 4% ~ 10%,而国内有记载的重大恶性矿井火灾中,外因火灾却占到了 90% 以上.由于外因火灾发生突然,来势迅猛,施救工作难以施展,往往酿成重大事故^[3].

矿井内因火灾是众多因素综合作用的结果,过程不易发觉.矿井外因火灾的火源一般在燃烧物的表面,来源多为人为因素或机械故障,如果能及时的发现,并启动相应的应急救援预案进行扑救,可以避免火势的蔓延,因此,外因火灾应以预防为主.笔者认为,针对内外因火灾的致灾原因及特点,可以采取不同的预防和治理措施.

3 矿井火灾防治措施

3.1 煤层自燃发火的预测

矿井内因火灾的预防,可以依照经验或采取实验的方式对煤层自燃发火的可能性进行估算,并作出科学的预测,进而采取措施延长煤层的自燃发火期.

3.1.1 自燃倾向性预测法

自燃倾向性预测法主要是根据煤自燃倾向性不同,划分煤层自燃等级,以此区分煤层的自燃危险程度,从而采取相应的防灭火措施.目前,我国主要采用煤吸氧量进行判定,依据《煤矿安全规程》,对于煤的自燃倾向性分类方案如表 3.

表 3 煤层自燃倾向性分类

自燃等级	自燃倾向性	30 °C 常压条件下煤吸氧量/(cm ³ /g)(干燥)		
		褐煤、烟煤类	高硫煤、无烟煤类	全硫(sf,%) > 2.00
I	容易自燃	≥0.8	≥1.00	全硫(sf,%) > 2.00
II	自燃	0.41 ~ 0.79	≤1.00	全硫(sf,%) > 2.00
III	不易自燃	≤0.40	≥0.80	全硫(sf,%) > 2.00

3.1.2 指标气体监测法

煤是一种大分子物质,结构及其复杂,煤氧化时,分子断裂,生产大量的自由基,这些自由基与氧气反应,生成 CO 、 CO_2 、 CH_4 等碳氢化合物及烃类化合物,并放出大量热.煤自燃的不同阶段会产生不同的气体,其生产量、生成速率及比值等与温度有关,在一定程度上能够反应煤自燃趋势,在火灾早期,可以用仪器检测和分析,进行预报.指标气体的选取要根据煤层特质来确定,而环境条件对煤自燃起决定性的作用,指标气体浓度易受复杂环境影响.为了及时准确的预测预报煤炭自然情况,必须综合考虑井下环境因素,如:空气流速、地温、煤体粒径及氧浓度等,这些因素对单一指标气体的生成较复合指标气体的影响更大,为了能够提高指标气体的可靠性,消除环境因素的影响,可以采用复合指标气体,如在空气流速大的井下可以采用 CO_2/CO 、 CH_4/CO ;煤粒径大的矿井,可采用 CH_4/H_2 、 CO/CO_2 、 CH_4/CO ;氧气浓度高的矿井,可以采用 H_2/CH_4 、 CH_4/CO 等^[5,6].

3.1.3 温度监测法

燃烧的特征是发光发热,煤层燃烧会使井下热量集聚,温度迅速升高,温度直接反应了煤的氧化程度.温度监测就是以此为基础,是发现煤炭自燃和探寻高温点及火源的最直接、最可靠的方法.目前,常用的温度监测仪器有红外线测温仪和温度传感器两种.

除此之外,对于煤层自燃的预测还有综合评判预测法、数学模型预测法以及统计经验法预测等.

3.2 火灾治理措施分析

火灾的治理措施可以归纳为3种:(1)控制火源出现;(2)冷却防灭火;(3)煤氧隔离.

3.2.1 控制火源出现

井下火源一般可分为2类:人为制造的以及设备运转或故障时产生的高温和电火花.由人为因素造成的火源主要有:违规携带易燃易爆物品下井、明火设备使用不当、违规焊接、违规吸烟等行为;而设备故障引发的火源除采煤机、运输机、通风设备以及电气设备等,由于磨损、腐蚀、断裂或者老化等原因,在运行时发生故障产生高温或电火花,尤其是磨损以及老化的电缆设备,如果不及时更换维修,在通电的情况下很容易产生电火花引起煤炭燃烧,造成火灾.因此,消除井下火源,要对井下工作人员进行适当的安全教育、培训以及检查,对于进行焊接等特种作业的工作人员必须要求严格,持证上岗,规范操作;而对于设备以及电缆,要定期进行检查、维修和更换,降低电火花产生的可能性,从根源上消除井下火灾.控制火源的出现不仅是治理外因火灾的重要手段,也能够预防煤氧化到一定程度被引燃而造成火灾.

3.2.2 冷却防灭火

冷却防灭火就是采用比热容较大的液态物质,如清水、黄泥浆、压送泡沫等直接喷洒或灌注于火区,快速急剧降低火区温度而终止燃烧.清水降温是一种最有效、最经济、最广泛且使用简便的灭火材料,适合于火灾初期,火势小、范围不大时,在使用时,要充分考虑水流的方向及线路和设备布置,以免出现风水反向流动的问题.同时,水在高温环境下可气化为水蒸气,又可以起到煤氧隔离的作用;灌注黄泥浆和高倍泡沫一方面利用灭火材料气化的吸热作用达到降温的目的,另一方面,气化的水蒸气和本身的混合材料,将煤体包裹,起到煤氧隔离并稀释氧气浓度的作用.

3.2.3 煤氧隔离

采用惰化物质、阻化剂或填充物质是将一些阻燃物质或者是惰性物质送入处理区,隔绝煤与氧气的接触从而抑制煤的自燃,以达到防灭火目的.目前,最常用的惰性物质主要有常用的黄泥浆外,粉煤灰、阻化剂和阻化泥浆、液氮及胶体等,阻化剂主要有无机盐吸水性、氢氧化钙阻化液、硅凝胶、表面活性剂、高聚物乳液粉末状防热剂等.其优点是,成本低且环保在隔断煤氧接触的同时,由于蒸发吸热,对于火区的降温又有很大的作用;缺点是:阻化剂在喷洒过程中,易堆积,包裹不到高处煤堆,且井下多种设备易被这些材料腐蚀而损坏,分解出的某些有毒有害气体,污染井下空气,给工作人员的身心带来伤害.胶体防灭火技术以是近年来发展起来的新型防灭火技术.胶体材料发生凝胶作用,将水分子固定,降低水煤气燃爆的危害,对煤体进行包裹,在隔氧的同时也能惰化煤体表面的活化因子,有效的延长了煤的自然发火期^[7-9].

封闭火区注惰是一种常见的矿井灭火方法,其作用主要有:(1)形成正压减少漏风量;(2)替代氧气深入煤体及煤矸石中,甚至吸附在煤体表面,进而惰化火区,消灭潜在的火点,对火区氧浓度进行稀释,将可燃预混爆炸性气体浓度降低到失爆点以下;(3)液态惰气还具有冷却炽热烟流及火区的作用.注惰灭火中

使用的惰性气体并非传统意义的惰气,而是指不参与燃烧反应的气体,因而注惰具有不自燃、不助燃、性质稳定的优点.在封闭火区注惰过程中,封闭惰气射流在对环境气体进行混合稀释的同时,另一方面发生活塞作用推动封闭火区中的混合气体向前运移,并逐渐接近火源位置,由于火源附近温度较高,一旦进入高于650℃的高温火区,就有可能发生爆炸.因此,封闭注惰防灭火并非万无一失,如陈家山11·28特别重大瓦斯爆炸事故,就是由于封闭火区注惰灭火而引发多次瓦斯爆炸.对于封闭火区注惰灭火的研究,由于实验难度大,多数学者采用数值模拟进行研究,目前,已取得一些成就,除了验证封闭火区注惰形成的活塞作用可能引发爆炸的结论,及注惰的降温、稀释氧气的作用外,还得出火区气体的运移规律,推算出最小注惰计算公式,并得出注惰速度在紊流状态下较为安全的结论^[10-12].

4 结论

1)我国煤矿火灾事故虽较少,但多诱发爆炸事故,事故等级多为重大及较大事故,个别为特重大事故的结论,因此,矿井火灾的防治要避免诱发爆炸事故.

2)富燃料燃烧一般发生在火灾后期,危险性较大,并结合煤自燃机理及燃烧三角分别对矿井内因火灾和外因火灾进行分析.

3)对于煤自燃的预报预测,应综合考虑煤质特征及环境因素,尤其是采用指标气体进行预测时,尽量采用复合指标气体;火灾治理措施大多不止一种作用,且并非绝对安全,可能诱发二次灾害,尤其是采用注惰防灭火技术时,要防止惰气射流形成的活塞作用引发爆炸.

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理局. 事故快报[EB/OL]. [2014-4-20]. <http://media.chinasafety.gov.cn:8090/iSystem/shigumain.jsp>.
- [2] 史文芳. 矿井火灾烟气流动及温度分布规律数值模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2013.
- [3] 王省身,张国枢. 矿井火灾防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1990.
- [4] 王楠. 煤自燃指标气体与综合防灭火研究[D]. 太原:太原理工大学,2011.
- [5] 张玉龙,王俊峰. 环境条件对煤自燃复合指标气体分析的影响[J]. 中国煤炭,2013,39(9):82-86.
- [6] 邓军,王凯,翟晓伟. 高地温环境对煤自燃特性影响的试验研究[J]. 煤矿安全,2014,45(3):13-15.
- [7] 乌日剑明. 煤自燃火灾防治新技术及矿用新型密闭堵漏材料的研究与应用[D]. 太原:太原理工大学,2008.
- [8] 梁翠玲. 几起煤矿重特大火灾事故原因分析及预防措施[J]. 中国西部科技,2010,9(13):18-22.
- [9] 刘谦,林柏泉. 采空区自燃火灾防治技术[J]. 煤矿安全,2012(9):68-71.
- [10] 张九零. 注惰对封闭火区气体运移规律的影响研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2009.
- [11] 朱迎春,周心权,王海燕. 封闭火区注惰引发瓦斯爆炸的数值模拟[J]. 矿业安全与保,2009,36(3):1-6.
- [12] 苏福鹏. 环境因素对火区气体运移的作用规律及致灾机理研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2011.
- [13] 贺清. 煤矿自燃火灾综合治理技术与实践[J]. 陕西煤炭,2014(1):67-70.
- [14] 张培友,刘祥来. 凝胶在防灭火中的应用[J]. 煤矿安全,2012(12):16-17.
- [15] 孟德印. 关于目前煤矿火灾防治技术的综述[J]. 内蒙古煤炭经济,2013(6):130-133.