

我国煤矿矿井防灭火技术研究综述

鲜学福¹, 王宏图^{1,2}, 姜德义^{1,2}, 刘保县¹

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学利保互助职业安全研究中心, 重庆 400044)

[摘要] 总结了近年来我国在煤矿矿井火灾预测预报理论及方法、矿井煤炭自燃火源区域探测方法、矿井防灭火技术、外源火灾检测及防治和矿井防灭火决策系统等方面的研究和应用进展, 分析了我国在煤矿矿井防灭火技术研究和应用中存在的问题。

[关键词] 矿井火灾; 防灭火技术; 外因火灾; 煤的自燃发火; 研究进展

1 概述

矿井火灾是直接威胁矿井安全生产的主要灾害之一。我国煤矿自燃发火非常严重, 有56%的煤矿存在自燃发火问题, 而我国统配和重点煤矿中具有自燃发火危险的矿井约占47%, 矿井自燃发火又占总发火次数的94%, 其中采空区自燃则占内因火灾的60%。1984年前的32年, 我国煤矿矿井共发火10 296次, 1985~1990年间百万吨发火率为0.76次。我国在80年代仅统配煤矿就发生10多起重大胶带输送机火灾, 造成200多人死亡和上亿元的经济损失。进入90年代后, 矿井生产逐步向高产高效集约化发展, 其火灾发生的严重性和危害性也随之升级。1990年小恒山矿因胶带火灾死亡80人, 伤23人, 直接经济损失567万元。1995年12月, 大屯煤电公司姚桥矿-400 m水平东翼胶带输送机大巷发生特大胶带输送机火灾事故, 烧毁胶带8 500 m, 造成27人死亡, 事故波及-400 m大巷及三个采区, 并引燃煤仓及巷道顶部煤体多处, 直接经济损失达到130余万元。在矿井救灾过程中, 因密闭不及时、密闭范围过大, 控制火势时间较长, 和快速密闭无法实现延时自动密闭, 引起二次事故发生的事例也不胜枚举。造成这

些事故及损失的主要原因是我国煤矿整体防灭火技术水平和装备能力与生产发展不相适应。

为了加强煤矿防灭火安全技术, 我国从50年代起就在煤矿推广了黄泥灌浆防火技术, 60年代至70年代又研究出了阻化剂防火、均压通风、高倍数泡沫灭火等技术, 80年代至90年代则研究了矿井自燃发火预测系统、惰气防灭火、快速高效堵漏风、带式输送机火灾防治等技术, 并逐步形成适应普通采煤法和高产高效采煤法的综合防灭火技术。由于我国火灾基础理论研究起步晚, 防灭火关键设备和技术有待完善和配套, 有一批亟待解决的技术问题。因此, 矿井火灾防治工作仍然是矿井安全生产所面临的一项艰巨任务。

2 矿井火灾预测预报理论及方法^[1~9]

2.1 煤的自燃机理研究

近年来, 根据固体有机物氧化理论, 我国一些学者对煤的自燃, 特别是对其初期的氧化现象进行的研究表明: 煤炭的氧化和自燃是一种基-链反应。即煤炭在其生成过程中形成了许多含氧游离基, 如羟基(-OH)、羧基(-COOH)和羰基(>C=O)等; 在低温下, 煤从空气中吸附的氧气与这些游离基反应, 会生成更多的、稳定性不同的

[收稿日期] 2001-02-20; 修回日期 2001-03-25

[作者简介] 鲜学福(1929-), 男, 四川阆中县人, 中国工程院院士, 重庆大学教授

游离基，这时放出的热量虽很少，但煤的活性增强；随着这一过程的不断继续，在一定条件下，具有自燃倾向性的煤就可能发展为煤炭自燃。

2.1.1 煤炭自燃必须具备的四个条件（四要素）

1) 煤具有自燃倾向性（即在常温下有较高的氧化活性）；

2) 具有自燃倾向性的煤呈破碎状态并集中堆积存放；

3) 有连续的供氧条件；

4) 热量易于积聚。

2.1.2 影响煤炭自燃倾向性的因素

1) 煤的变质程度（煤化程度）。炭化程度越高，氧游离基的含量越少。

2) 煤的成分。含丝煤越多，自燃倾向越大；含暗煤多的煤，一般不自燃。

3) 煤中的水分。煤中水分少时，有利于煤的自燃；水分足够大时，则会抑制煤的自燃；但是，煤中的水分蒸发后，其自燃危险性会增大。

4) 煤的含硫量。同牌号的煤中，含硫矿物（如黄铁矿）越多，越易自燃，因为煤中所含的黄铁矿，在低温氧化时放出的热量促进了煤炭自燃。

5) 煤炭的孔隙率和脆性。煤炭的孔隙率越大，越易于自燃。这是由于孔隙率越大， O_2 越易渗入煤的内部，煤的氧化表面积也越大。变质程度相同的煤，脆性越大，越易自燃。因为煤的脆性大小与该种煤岩是否易于破碎和形成煤粉有关。

6) 煤层厚度和倾角。煤层厚度或倾角越大，自燃危险性越大。这是因为开采厚煤层或急倾斜煤层时，煤炭回收率低，采区煤柱易遭破坏，采空区不易封闭严密和漏风较大。而且，煤是不良导热体，煤层越厚，越易积聚热量。若厚煤层分层开采，则发火概率较大。

7) 煤层埋藏深度。煤层埋藏深度增加，地压和煤体的原始温度增加，煤内自然水分少，这将使煤的自燃危险性增加，在开采深度不大时，容易形成与地表沟通的裂隙，造成采空区内有较大的漏风，也容易在采空区中形成浮煤自燃。

8) 地质构造。煤层有地质构造破坏的地方，煤岩发生自燃比较频繁。这是因为煤质松散增加了煤的氧化活性和供氧通道与氧化表面积。在岩浆侵入区，煤层受到干馏，煤的孔隙率增加、强度降低，自燃的危险性也就增大。

9) 围岩性质。顶板岩层坚硬且裂隙发达，冒

落后块度较大，采空区漏风大，供氧条件好；若底板也较坚硬，护巷煤柱所受地压大、易破碎，则有利于自燃；如果底板松软而可塑性强、顶板稳定，则煤柱不易被压碎，自燃危险性就比较小；如果顶板松软、易陷落，供氧条件差，采空区内遗煤自燃危险性将大大降低。

10) 煤的瓦斯含量。煤孔隙内存在的瓦斯（煤层气），能够占据煤的孔隙空间和内表面，降低了煤的吸氧量。瓦斯逸出后，就构成煤炭氧化较为强烈的条件。煤中剩余瓦斯含量大于 $5 \text{ m}^3/\text{t}$ 时，煤自燃难以发生。

11) 开拓开采条件。选择合理的开拓系统和开采方法，能减少煤层的切割量和遗煤量，改变供氧条件和热交换条件，大大降低煤层的自燃危险性。

12) 漏风供氧条件。漏风风速很大时，改变了热交换条件，氧化生成的热量容易被风流带走，也不能发展成自燃火灾；只有在既有风流流通，而风速又不大的情况下，煤才能自燃发火。

13) 蓄热条件。蓄热条件越好，热量易于积聚，越易引起煤的自燃。

2.2 煤自燃发火危险性判定（自燃倾向性和发火期的判定）

1) 80 年代前，煤自燃发火危险性的判定沿用原苏联的着火温度鉴定煤的自燃发火倾向；但对高硫煤，用此法判定差异较大。

2) 近年来，采用色谱动态吸氧法测定吸氧量和吸氧速度来判定自燃发火倾向。使用的仪器多为 ZRJ-1 型色谱自燃性测定仪。

3) 在研究中采用了两种途径来确定煤的自燃发火期。即用煤堆实验装置在模拟条件下测定并解算发火期和测定煤的吸氧速度、氧化反应速度，按照热传导及热平衡原理推算煤的最短自燃发火期，然后结合井下各种影响因素确定煤的发火期。

2.3 自燃发火预测预报

2.3.1 预测预报指标 最新研究表明，CO 已不是在任何情况下都可作为唯一的和最灵敏可靠的判别煤自燃发火的指标。使用 CO、 C_2H_4 及 C_2H_2 三个指标将煤自燃发火分为三个阶段。即矿井风流中出现 CO 质量分数降至 10^{-6} 级时的缓慢氧化阶段；出现 CO 和 C_2H_4 质量分数降至 10^{-6} 级时的加速氧化阶段；出现 CO、 C_2H_4 和 C_2H_2 质量分数降至 10^{-6} 级时的激烈氧化阶段（将出现明火）。应用这三个指标，不仅可预测火灾，而且还可判别其阶

段,并可据此采取不同的防灭火技术措施。

2.3.2 预测预报手段

1) 70年代前用井下人工采气样、地面仪器分析、结合温度检测和人的感知来判断发火危险性。

2) 80年代以后,煤矿普遍采用气相色谱分析方法,并研究应用束管监测系统抽吸井下气体、地面集中分析、微机自动数据处理和预报自燃发火。

3) 最新研制的井下采区分站式束管系统,如KHY-3井下束管监测系统。这种系统将井下各测点的气样在井下采区直接分析,并转换成电信号,通过环境监测系统主传输电缆把气体分析信号传输至地面中心站。

4) 最近还研究出了在TF-200型环境监测系统分站联接CO、CH₄、O₂、温度、风速传感器,根据气体成分和温度变化趋势,解算从发火指标变化到发火危险值的时间。

3 矿井煤炭自燃火源区域探测方法^[3, 10~12]

矿井煤炭自燃火源区域探测采用的方法有:

1) 磁探测法。其原理是,烘烤后的上覆岩石的磁性随自燃温度升高而增强。

2) 电阻率探测法。其原理是,煤炭自燃发火后,煤层的结构状态和含水性发生较大变化。

3) 气体探测法。分井下气体探测法和地面气体探测法两种。其原理是,煤自燃在不同的温度下产生的气体种类和浓度不同,并可据此依次判断煤的自燃温度,并由气体浓度梯度大致确定高温区域的范围。

4) 氦气探测法。其原理是,煤层自燃后,随煤温升高,氦气浓度上升,依此判断火区位置。

5) 煤炭自燃温度探测法。分为测温仪表与测温传感器联合测温法(分地面和井下探测法)和红外探测法(有红外测温仪和红外热成像仪)两种。

以上各种方法都有自己的优、缺点和使用范围。磁探测法、电阻率探测法、氦探测法主要适用于封闭火区且火源温度较高,其准确性较好;而对于井下的高温区域($\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)则无能为力。气体探测法能预测高温区域温度,但不能准确确定高温区域位置和发展变化速度,并受井下通风压力、风量的影响。探测煤的自燃温度来确定自燃位置是一种可靠的方法,关键是用哪种方法能探测出隐蔽的

高温区域及其自燃温度。测温仪表与测温传感器联合测温法是一种实用方法,但它受测温传感器布置数量和测温钻孔施工的影响,还受煤导热性能的影响。红外测温是针对点温,无法综合准确地判断煤的自燃区域,但它可找出整个巷道温度异常的大致范围;红外热像仪是通过扫描成像测取温度,能在一个面上判断煤自燃高温区域,测温简单、迅速、精确,但它受到探测深度和煤炭自燃温度的限制。

4 矿井防灭火技术^[6, 13~18]

目前,我国煤矿煤层开采时期采用的火灾防治技术措施从总体上来看,有惰化、阻燃、堵漏、降温等及它们的综合措施。

4.1 惰化防灭火技术

惰化技术主要是指将惰性气体送入拟处理区,抑制煤自燃的技术。该技术主要用在当发生外因火灾或因自燃火灾而导致的封闭区。

我国从80年代起,开展了氮气惰化防灭火技术的研究与试验。近年来,在我国煤矿防灭火工程中使用的氮装备有深冷空分制氮装置、变压吸附制氮装置和膜分离制氮装置三种。

根据安装与运移方式不同,后两种又设计成井上固定、井上移动和井下移动三种。在扑灭巷道火灾中,建临建密闭后,向封闭区注氮气,使火区气体氧浓度降至10%以下可灭明火,降到1%~2%可快速灭火;燃烧深度大的火源,注氮量要达到火区体积的2~3倍。我国煤矿采空区防火时的注氮量为200~400 m³/h;封闭火区灭火时注氮量为600~800 m³/h;开放火区灭火的氮气需求量更大。就目前来看,氮气防灭火系统的配套仍落后于综采、综放开采技术的发展,特别是注浆等防灭火方法很难适应综放工作面采空区三维空间大和漏风大的特点,致使我国煤矿每年有多起因火灾而封闭工作面的事故发生。为此,应进一步提高制氮装备的稳定性和可靠性,研制采空区氮气浓度自动监控与制氮装置联动系统,并完成信号自动分析与传输,优化注氮工艺,使氮气防灭火系统更加完善。

4.2 阻燃物质防灭火技术

该技术是指将一些阻燃物质送入拟处理区,以达到防灭火目的。

使用的阻燃物质主要有黄泥浆、粉煤灰浆、页岩泥浆、选煤厂尾矿浆、阻化剂和阻化泥浆。阻化剂主要有无机盐吸水液、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。

4.3 堵漏风防火技术

采场工作面推过后，及时封闭和采空区相连通的巷道，进行无煤柱工作面顺槽巷旁充填隔离带，以及隔离煤柱裂隙注浆堵漏风等，均属于堵漏风防火技术。我国近年来研究了双料型高水速凝充填料和液压快速注浆设备。如重庆煤科分院最新研制成功的“GKM-1 型耐高温快速密闭”采用聚酰亚胺双面复合玻纤维布作面料，组合“撑伞”或组合“折叠”式支架结构，定时器定时及自动关闭技术，具有安全性好，耐高温（250℃）、架设快捷（5 min）、漏风率小（<10%）、移动运输方便等优点。

4.4 综合防灭火技术

对于矿井防灭火出现的复杂性，采取单一方法通常不能取得理想的防火效果。而采取综合防火措施，即将几种防火技术有机地结合，可达到最佳的防火效果。

4.5 灾变时期风流稳定性和控制模拟

我国研究火灾时期风流稳定性和风流控制还处于建立物理数学模式进行通风网络解算和灾变风流模拟的阶段，未达到实用化阶段。如国家“九五”攻关子项“巷道火灾时期非稳定流的试验研究”，在火风压相关参数关系的理论研究和在烟流流动机理的巷道火灾试验研究方面取得了重要进展，对分析火灾流动动态变化规律和矿井防火实践具有重要的指导意义。

5 外源火灾检测及防治^[8~12, 19]

我国煤矿外源火灾多发生于胶带输送机和机电硐室。国内对巷道火灾监测系统和自动灭火装置的研究起步较晚，经过近 10 多年的努力已取得了一批研究成果。如研究成功的 KHJ-1 型矿井火灾监控系统及自动灭火装置等。但现有的矿井火灾监测技术存在一些局限性，导致早期报警准确率低、火源位置难以确定以及成本高，只能对局部火灾监测，达不到对运输巷全长和全矿井进行监测。

光纤传感技术的发展为矿井大范围内火灾监测寻求到了新的技术途径。光纤传感器采用光学检测原理与光导纤维介质，具有本质安全防爆、高灵敏度、抗干扰，具有远距离信息传输等一系列电测传感器所缺乏的独特优点。

分布式光纤温度传感器系统最早是在 1981 年

由英国的南安普敦大学提出，1987 年英国 York 公司推出了世界上第一个商品化的分布式光纤温度传感器；90 年代初，该公司和日本腾仓公司相继推出新一代分布式光纤温度传感器系统。目前，国外已将分布式光纤温度传感器系统用于井下胶带运输巷全长早期火灾监测。

我国在 80 年代后期，重庆大学开始研究分布式光纤温度传感器，90 年代初北京理工大学、浙江大学等单位也开展了相应的研究。1996 年起，重庆煤科分院与中国计量科学院光电子技术研究所合作，开展分布式光纤连续测温技术研究，并取得了一些成果。目前，已研制出了 KFGC-J4 矿用分布式光纤温度监测系统。该系统主要依据光纤光时域反射（OTDR）原理和光纤喇曼（Raman）温度效应原理，利用光纤 OTDR 技术，可以确定光纤局域处的损耗、光纤故障点、断点的位置，对测量点进行定位。

6 矿井防灭火决策系统^[20~22]

近年来，开展了防灭火专家系统的研究，试图将众多防火专家的技术经验，经计算机软件形成人工智能，组成救灾专家决策系统，以便在火灾发生时，快速选择救灾方案，避免人为因素的盲目性和被动性。由于该研究的工作量大、难度大，目前还没有正规产品问世。

目前，在这方面开展的工作有：a. 自燃危险性与自燃倾向性、自燃发火期的区别；b. 自燃危险等级及相应对策；c. 用模糊聚类方法预先分析采煤工作面自燃危险性；d. 经济防火决策；e. 专家救灾经验知识库和辅助救灾决策模型库；f. 火灾动态发展趋势模拟；g. 最佳避灾路线选择。

7 结语

近年来，我国煤矿的防灭火技术与手段已有了较大的发展和提高。但还应看到，目前自燃发火形势依然严峻，仍需要继续不断地完善和提高防治技术水平，加强基础研究，研究和开发创新的技术手段，特别是把非线性科学的理论和方法引入矿山安全保障系统的研究与应用中，以便能够改变自燃火灾的不利形势。与之同时，还要加大矿井灭火资金的投入和严格的措施管理。这样才能使矿井防灭火技术和管理再上一个新台阶。

参考文献

- [1] 石必明. 易自燃煤低温氧化和阻化的微结构分析[J]. 煤炭学报, 2000, 25(3): 294~298
- [2] 杨胜强. 煤炭自燃及常用防灭火措施的阻燃机理分析[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 620~624
- [3] 张建民, 何彬, 王梅. 煤层自燃电导成像动态监测技术的应用研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 236~240
- [4] 罗海珠. 我国煤矿火灾预测预报技术的发展与应用. 矿井通风安全理论与技术[M]. 徐州: 徐州矿业大学出版社, 1999
- [5] 余明高. 煤层自燃发火期预测的研究. 矿井通风安全理论与技术[M]. 徐州: 徐州矿业大学出版社, 1999
- [6] 陈全, 王省身. 综放采场自燃发火规律及注氮防灭火技术研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 618~623
- [7] 李宗翔, 秦书玉. 综采工作面采空区自燃发火的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 494~497
- [8] 李舒伶. 矿井火灾时间风流控制系统的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1999, (2): 11~16
- [9] 吴中立. 矿井通风与安全[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988
- [10] 程卫民, 陈平. 矿井煤炭自燃高温火源点区域的探测实践[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(11): 4~7
- [11] 朱红青, 刘宪申. 矿井火灾初期自动风流控制系统的研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(2): 26~28
- [12] 余明高. 我国煤矿防灭火技术的最新发展及应用[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(1): 21~23
- [13] 刘英学, 唐海清, 邹声华. 防止采空区自燃减漏风措施的研究与应用[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 630~634
- [14] 徐德平, 李强. 矿井防灭火选用变压吸附制氮机[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(4): 7~9
- [15] 徐精彩, 郭兴明, 邓军. 煤层火灾耐温高水胶体直接灭火技术[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(3): 4~6
- [16] 高广伟. 中国煤矿氮气防灭火的现状与未来[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 48~52
- [17] 李舒冷, 王树刚, 刘剑. 采场均压防灭火模型试验研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 151~154
- [18] 杨运良, 于水军, 张如意. 防止煤炭自燃的新型阻化剂研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 163~166
- [19] 张从力, 刘元敏. 一种新型火灾检测定位技术的试验研究[J]. 煤炭工程师, 1997, 24(5): 4~6
- [20] 田水承, 李红霞. 煤层开采自燃危险性预先分析与经济防灭火决策[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 486~490
- [21] 王德明, 王省身. 矿井火灾救火决策支持系统研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 624~629
- [22] 刘剑, 徐瑞龙. 大面积火区调压的仿真模型[J]. 煤炭学报, 1996, 21(5): 521~525

The Summarization of the Investigation on Coal Mine Fire Prevention & Fire Extinguishing Techniques in China

Xian Xuefu¹, Wang Hongtu^{1,2}, Jiang Deyi^{1,2}, Liu Baoxian¹

(1. Key Lab for the Exploitation of Resources & the Environmental Disaster Control engineering at Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400044, China;

2. Liberty Mutual Saft Center at Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] The Evolvement of the Investigation and application on coal mine fire prevention and fire-fighting techniques in China is summarized. Mine fire prediction & forecast theories and methods, detection ways of coal spontaneous combustion area, mine fire prevention and fire-fighting techniques, detection and control of exogenous fire beginnings, decision-making support system of mine fire prevention and fire extinguishing and so on are presented in detail. Existent problems are analyzed in the investigation and application on coal mine fire prevention and fire-fighting techniques in China.

[Key words] coal mine fire; fire prevention & fire extinguishing techniques; exogenous fire; coal spontaneous combustion; evolvement of investigation