煤矿机电系统电气火灾监测与防范技术研究

孟　毅

陕西华电榆横煤电有限责任公司　陕西　榆林　719000

摘　要：煤矿井下条件恶劣，存在高瓦斯、煤尘、潮湿、狭小等诸多不利因素，造成机电设备发生电气火灾时容易引起瓦斯、煤尘爆炸等严重事故，后果不堪设想。因此，加强研究并制定出一套合理有效的电气火灾监测及预防措施对保障煤矿安全生产具有重要意义。本文通过对煤矿机电系统电气火灾发生原因及其特点进行分析后，总结归纳目前常用的几种电气火灾监测手段，如剩余电流、温度、故障电弧以及多种参数结合的方式，并对其工作机理、优缺点进行论述。此外，还就设备选择、系统设计、管理维护等方面提出了一套包含本质安全、隔爆保护、智能化报警及规章制度在内的整体预防方案。结果表明，只有把先进的监测技术和严格的规定有机结合起来，做到“技防”和“人防”的统一才是从根本上提高煤矿机电系统电气火灾防控能力的有效途径，也是保护矿工的生命财产安全以及国家重要能源供应所必需的。

关键词：煤矿；机电系统；电气火灾；监测技术；防范措施；本质安全

引言

随着煤矿开采深度逐年加大以及机械化、自动化程度不断提高，井下机电设备越来越多且功率越来越大，供电系统越来越复杂。这虽然大大提高了工作效率，但是同时也大幅提升了发生电气火灾的可能性。煤矿井下是一个典型的受限空间，通风不良并且常年有大量可燃性煤尘存在，在一定浓度时遇火就会发生强烈爆炸。而且在一些高瓦斯矿井内，大量的甲烷又会形成一个大火灾隐患。在这种情况下，由于电缆老化、设备超负荷运转、连接处接触不良、电弧放电等原因导致电气火灾的危害性就被成倍地放大，不但可以将价值连城的机电设备烧毁，还可以停止生产，甚至有可能成为引爆瓦斯或者煤尘的一个“导火索”，从而导致人员伤亡惨重。长期以来，传统的煤矿安全管理方式主要以事后补救及被动防护为主，对于电气火灾无法起到很好的防范作用。而现代安全管理理念则是注重事前预防和及时消除各种隐患。所以针对煤矿机电系统的电气火灾的监视与防控的研究既是必要的也是重要的，它既是对技术的要求也是贯彻落实“安全第一、预防为主、综合治理”的必然要求。

1 煤矿机电系统电气火灾成因与特点分析

1.1 电气火灾的主要成因

一是绝缘损坏是主要原因。井下潮湿、有腐蚀性气体（如硫化氢）以及设备工作时发热都会使电缆及电气设备绝缘材料老化、开裂乃至碳化，使其绝缘电阻显著降低。一旦绝缘损坏就会造成相间短路或者接地短路，瞬间产生很大的短路电流和高温电火花，从而引起附近的可燃物着火。二是连接部位接触不良也是一个常见问题。不论是电缆接头、开关触点或者是设备端子板等处如果因为安装不当、紧固件松动或氧化等原因造成接触电阻较大，在额定电流下也会产生较多焦耳热，形成局部过热点。此过热点是逐渐发展的，在初期不易被人发现，但是却日益严重，直至烧穿绝缘层或靠近它堆积的煤粉。三是设备过载以及保护失灵也是重要原因。采掘工作面负载变化很大，如果供电系统布置不合理或者保护设定值不合适，就容易使得设备长时间处于过载状态，造成温度过高。而且如果过流、短路等保护设备自身出现问题或者失效就不能在事故刚刚开始时就断开电源，使事故能量继续释放，引发火灾[1]。四是电弧故障是另外一种类型的电气故障，它的危害非常严重。在插头插座的插入拔出、开关的分合闸操作或是线路中有很小缝隙的情况下都会产生电弧。这个电弧温度很高，可以达到上千度，而且是随机和间歇性的，一般的保护装置不能够很好地检测和切除它，所以它是引起电气火灾的一个“隐形杀手”。

1.2 电气火灾的特殊性与危害

煤矿井下电气火灾相比于地面火灾具有明显的特殊性和极大的危险性。最主要的一点是容易引起连锁爆炸。井下的空气中含有大量的悬浮煤尘以及可能聚集的瓦斯两种爆炸物质。电气火灾产生的明火、高温或者电火花很容易达到煤尘云或是瓦斯—空气混合物

的点燃温度而发生猛烈的二次爆炸，这是煤矿火灾与其他地方火灾的最大不同之处。另外，扑救困难。井下的巷道纵横交错，空间狭小，大中型的消防车辆无法进入。而且由于通风不良，浓烟以及有毒有害气体（例如一氧化碳）会很快蔓延开来，危害到参与救援人员的生命安全并且影响到灭火工作。再有就是扩散快。井下电线一般成捆铺设在巷道内，一旦某个地方起火，火焰就会顺着电线很快传播，形成全方位燃烧，在很短的时间内就可以烧毁一大片地区。最后一点就是影响大。煤矿火灾往往会带来重大的人员伤亡和经济损失，不但会给死难者的家属造成极大的痛苦，还会对当地的甚至是整个国家的煤炭供给以及安全稳定带来不利的影响。正是由于以上的原因，所以对于煤矿电气火灾的预防就必须做到极致要求。

2 电气火灾监测技术体系

2.1 基于剩余电流的监测技术

剩余电流监测也称漏电监测，是煤矿电气安全“三大保护”（过流、漏电、接地）的核心部分。工作原理是用零序电流互感器在线监测供电线路每相导体电流矢量和，在正常状态下，这个矢量和为零，当出现绝缘破损造成漏电时，这个矢量和就不会再是零，形成剩余电流。设置合理的报警和跳闸定值后，就可以在漏电发展成短路或电弧前及时报警或者断电。在煤矿使用中，对它的抗干扰性和稳定性要求较高[2]。因为井下变频器、整流器等非线性负荷会发出谐波，可能会造成误动，所以现在的漏电保护器都采用相敏保护方式，不仅可以检测剩余电流大小，还可以判断它相位，从而能够准确地区分真正的地电流和谐波干扰，极大地提高了保护的选择性。

2.2 基于温度的监测技术

温度是表征电气设备运行状况最直接参数。基于温度检测方法主要有接触式测温以及非接触式红外测温。接触式测温一般在重要部位（比如变压器绕组、开关触头、电缆接头等）安装热电偶或者热电阻进行定点实时监测。但是由于煤矿井下众多设备都处在密闭柜体内或者高处，布线不便并且有安全隐患，所以非接触式红外热成像技术因为其方便快捷、非接触、远距离、可视等特点受到青睐。利用便携式或者固定式红外热像仪，工作人员可以在短时间内完成对整个变电所巡视，得到一张清晰温度场分布图像，很容易发现用肉眼看不到异常高温问题。近年来，基于物联网无线无源测温技术也开始得到使用，它的传感器不需要供电，而是通过射频获取供电，解决了井下更换电池问题，可对关键点进行长时间、免维护在线监测。

2.3 故障电弧探测技术

由于故障电弧本身的特性决定其不在传统的防护范围内，而故障电弧检测正是通过对电弧所特有的信号进行检测从而判断是否发生故障电弧。主要有以下几种方式：电磁信号分析法，就是获取电弧所产生的宽频带（一般为几十 kHz 到 MHz 之间）的电磁干扰并用数字信号处理技术对其进行分析得到其特有的频谱；光学检测法，使用对紫外线或者某一波长范围内的可见光有响应的传感器来检测电弧发出的强烈光线；还有声学检测法，就是检测电弧爆炸发出的声音。而在实际使用过程中，单独一种方法都可能产生误报或者漏报的情况，所以多种参数联合检测的方法逐渐被采用，也就是同时监测电流、电压波形畸变、电磁干扰、光辐射等信息，在此基础上设计出较为复杂的方法（比如基于人工神经网络的方法），以期达到较高的故障电弧识别率及鲁棒性。

2.4 多参数融合智能监测系统

一种监测方法有其优势，但也有不足之处。为了更准确、更全面地判断电气火灾的风险，就需要一种多种指标结合的一体化监测方案。而这个方案是以一台主控机为中心，在现场总线或者工业以太网上连接不同类型的前端设备如剩余电流探测器、无线温度传感器、故障电弧探测器、烟雾探测器等组成的监测系统。这个系统不仅可以获取各个信号，还可以通过对大量数据进行处理以及利用机器学习的方法来分析这些数据之间的关系和发展趋势[3]。比如某一路的剩余电流逐渐变大，同时这条线路的电缆接头部位温度也不断上升，那么就可以认为这个位置出现了严重的接触不良问题并且发出严重警报。这也就是从单纯的“一点报警”到整体把握，大大提高了对火灾预防的能力以及做出决策的支持力度。

3 电气火灾综合防范策略

3.1 强化设备本质安全与防爆设计

预防的关键是设备自身，在煤矿中所有的下井电气设备都必须符合严格的要求才能保证安全。本质安全型（Ex i）设备通过对电路中能量进行限制防止出现电火花或者热量过高从而不能引燃周围可燃性气体是最直接也是最有效的方法，主要应用在信号、通讯等小功率领域；而大功率的动力设备一般都使用隔爆型（Ex d），其坚固外壳可以承受内部发生爆炸时所产生的压力同时还能阻止火焰以及高温气体向外传播。另外还需要大力推广增安型（Ex e）、充油型（Ex o）、充砂型（Ex q）等

防爆方式。在设备选择过程中要认真检查其是否具有防爆合格证及安全标志（MA）禁止不符合条件设备下井。另一方面也要尽可能使用有自我检测、自我防护能力的智能设备提高设备整体安全性。

3.2 优化供电系统设计与保护配置

一个合理的、可靠的供电系统是预防火灾的前提条件，在设计中要考虑到将来的发展，有足够的裕度，不能使设备处于超负荷状态运行。电缆的选择不仅要考虑它的载流量还要考虑它的阻燃性和抗腐蚀能力。在保护方面必须要按照《煤矿安全规程》的要求做到有过流、短路、漏电等各种保护并且灵敏可靠。保护整定值的计算必须正确合理而且要定期检查[4]。尤其是要重视选择性的保护，当出现故障时只让离故障最近的一个保护动作将影响降至最低限度保证其余部分能够正常工作。同时良好的保护接地也是必不可少的它可以减少人员遭受电击伤害以及给漏电保护提供一个可靠的参考点。

3.3 构建智能化预警与应急响应机制

基于上述多参数融合智能化监控平台，建立一套完善的预警以及应急预案体系成为可能，而其重点在于分级预警：不同的风险程度对应不同级别的响应措施，对较低的风险隐患（例如温度略有上升）只需进行记录并提醒巡视员注意即可；而对于较高风险隐患（例如剩余电流超出正常范围），则需要向调度室发出声音和灯光告警同时发送相关信息；而对最高风险隐患（例如检测出故障电弧）不仅要发出最高等级警告还要控制相应位置的断路器快速跳闸从而切断故障电路，防止事故扩大。此外，该系统还应该能够与其他煤矿中的定位系统、广播系统、通风设施等相结合，一旦发生火灾可以及时制定最优逃生路径指引人们撤离并且改变通风方向抑制火势蔓延争取更多营救时间。

3.4 健全安全管理制度与人员培训

再先进的技术，最终都需要人去实施和管理。所以，完善的安全管理体系以及高素质的人才是保证整个防范体系的最后一道防线。煤矿企业应建立一套从电气设备购入到处置的完整管理规定，如设备采购、安装验收、日常巡查、定期维护保养、报废等均需有明确规定。还要落实各级管理人员以及操作人员的工作职责，做到人人有责。另外，还应对全体员工进行必要的安全教育和技能培训，让他们不仅会使用这些设备，而且还要懂得电气火灾的危害性、起因及处理措施。经常性的开展事故案例教育和应急演练活动，提高全体人员的安全意识和自护自救水平，把“安全第一”的原则真正落实到实处。

4 结语

煤矿机电系统电气火灾防控是艰巨任务，需要从技术上、管理上以及人等方面综合考虑。通过分析火灾成因及特点明确监测与预防工作重点与难点。研究结果表明，依靠一种方法或者一种手段无法解决井下复杂问题。未来发展方向一定是建立一个“监测—预警—预防—应急”的智能化安全保障体系，在这个体系中，以剩余电流、温度、故障电弧等为基础形成全方位监测体系就像人体神经一样及时发现危险；以本质安全和智能保护为基础供电系统犹如钢筋混凝土一样坚不可摧；而以分层预警和联动作业为特征智能平台则是大脑指挥着一切有序进行；而这都要有良好机制以及高水平人才支持才能做到。这样才有可能在黑暗矿井中点亮一盏永不熄灭光明灯，促进我国煤炭工业健康发展。

参考文献

[1] 周源. 煤矿机电系统电气火灾监测与防范技术研究 [J]. 消防界 (电子版),2025,11(23):70-72.

[2] 李聪, 刘定. 煤矿机电系统电气火灾监测与防范技术研究 [J]. 消防界 (电子版),2024,10(04):49-51.

[3] 孙健, 赵开功, 王宇. 煤矿井下电气火灾防控优化与智能灭火方法 [J]. 中国矿业,2025,34(S2):212-217.

[4] 何勇军, 易欣, 王伟峰, 等. 煤矿井下电气火灾智能监控与灭火技术综述 [J]. 煤矿安全,2022,53(09):55-64.