

文章编号:1671-251X(2024)S1-0092-05

顶板围岩动态活动机理及监测研究

王子明, 李彦鹏

(国能神东煤炭集团有限责任公司 机电管理部, 陕西 榆林 719315)

摘要:煤矿巷道顶板围岩动态活动机理及监测方法的研究对煤矿安全生产具有重要意义。通过对围岩动态活动机理的深入研究和监测方法探讨,可以有效预防煤矿中的动力灾害,确保矿井生产和矿工生命安全。从安全的角度出发,分析了煤炭开采过程中的地层力学行为、微震信号生成机制、磁辐射机制等原理,对围岩压力变化的动态分布进行讨论,总结了压磁监测的研究现状及未来研究重点,设计了巷道顶底板移近量监测系统,以监测和预防煤岩顶底板动态灾害发生。

关键词:围岩动态监测;微震监测;磁法监测;顶底板移近量监测

中图分类号:TD325 文献标志码:A

Research on dynamic movement mechanism and monitoring of roof surrounding rock

WANG Ziming, LI Yanpeng

(Electromechanical Management Department, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, China)

0 引言

随着国家经济的不断增长,我国对关键能源资源——煤炭的需求稳步上升^[1-4]。为了满足经济发展要求,煤炭行业正加快开采步伐,以确保资源的稳定供给。但深度资源开采难度随之增大,岩层动力灾害(如瓦斯突出、冲击地压等)事故呈增长趋势。根据国家矿山安全监察局发布的数据,2021 年全国矿山事故总数达 356 起,共造成 503 人死亡。其中,煤矿事故占 91 起,死亡达 178 人。虽然这些数字较之前有所降低,但顶板事故比例仍相当高。据统计,顶板事故在过去事故中占比高达 75%,相关死亡人数占比超过 40%。这些数据强调了加强煤矿动力灾害实时监测和预防的必要性,尤其是地应力变化导致的磁场异常,对于预防灾害和灾后救援至关重要^[5-7]。

地下煤层开采过程中,随着围岩层压力改变,岩石的磁化率和剩余磁化强度发生变化,产生多样的信号,包括微震和压磁效应影响的磁场异常。这些信号的检测与分析是未来研究的重点,尤其是弱磁场异常,它们能够反映地应力的变化情况。地震和火山监测领域的研究证实,压磁前兆可以从数月至数天前指示即将到来的地质事件,如地震和火山爆

发前的中期磁场变化。在动力灾害发生后,磁场信号的实时监测与定位对迅速有效的救援操作提供了关键信息。

本文通过分析煤炭开采过程中的地层力学行为、微震信号生成机制、磁辐射机制等原理,对围岩压力变化的动态分布进行讨论,提出监测和预测煤矿动力灾害的新方向,以提高煤矿安全生产和防灾减灾的技术水平。

1 煤岩顶底板动力灾害成因

煤岩顶底板动力灾害的成因主要涉及煤岩结构在外部载荷和内部应力作用下的失稳破坏,这会导致煤层及其邻近岩石结构的平衡被破坏,引发如矿井坍塌等安全事故^[8-9]。相关研究表明,在煤岩顶底板动力灾害发生过程中,通常会伴随多种物理现象及不同类型的能量释放,如微震波、声发射、电磁辐射和磁信号。通过对这些信号的深入分析,掌握其特性,有助于实现对煤矿灾害的早期识别和预警。

煤岩顶底板灾害的发展是一个逐渐累积过程,从微小的裂纹逐步扩展至严重断裂,这为灾害预测提供了先机^[10-12]。与传统的预警方法相比,微震、电磁辐射和磁信号检测技术具有连续监测能力,既可直接接触式采集,也适用于非接触式采集,这些方

收稿日期:2024-01-25;责任编辑:李明。

作者简介:王子明(1984—),男,陕西神木人,助理工程师,现主要从事煤矿机电及智能化相关研究工作,Email: wanglove@126.com。

法不会干预煤矿的日常生产。长期以来,非接触式检测技术,如电磁辐射和微震监测,一直在发展中。现有研究表明,这些信号的产生与煤岩的裂解过程紧密相关。通过对信号波形的分析和参数提取,能够获取预测煤矿灾害所需的关键信息。

微震信号是一种能在固态介质中有效传播的声波信号,可利用相应设备进行远程实时监测^[13-15]。电磁辐射信号在非固态空间中传播性能优良,分析该介质中信号的强度和脉冲计数可以间接指示煤岩破裂状况,并估计煤矿事故的可能性。然而,由于电场影响,电磁波在固态介质中迅速衰减,不宜用于远程信号采集。磁辐射信号是电磁信号中的一种,依据麦克斯韦定律,它只显示磁场特性,并能在固态介质中良好传播,利于使用相关设备实施远程实时监测。

由于煤岩裂解的随机性和突发性,单一监测技术可能无法全面捕获矿道周边的动态信号,还可能与矿场设备相互干扰^[16]。微震信号和磁辐射信号是 2 种能表征顶底板断裂能量耗散过程的重要信号。这 2 种信号具有同源性且显示不同的特征参数。本研究通过实时远程同步监测这 2 种信号,并结合它们的数据,以期为煤岩顶底板动力灾害的预测提供更准确的分析结果。

2 受载煤岩体的形态演变阶段

煤岩体在承受载荷时的形态转变过程^[17-19]分为以下 4 个阶段。

1) 初受力的压实阶段。刚开始承受载荷时,煤岩体内部的微小空隙会在上覆岩层的影响下渐渐被压紧,导致煤岩体变得更加密实和结实。

2) 持续受力的弹性阶段。在承载初期至中期,煤岩体受力和产生的应变之间呈线性增长关系,在此期间,煤岩体表现出主要的弹性变形行为,同时也伴有少量的塑性变形。这一时期被称作弹性阶段。在这一阶段,非磁性矿物质晶体在外力作用下形成弹性变形;磁性矿物的磁畴在外力和地磁场长期作用下发生相应变化,从而影响当地的局部地磁场模式。

3) 加速变形阶段。随着煤层开采过程的持续,不断的挖掘作业使煤岩体面临着增大的载荷,进入加速变形阶段。在该阶段,煤岩体的形变与裂解活动迅速增加,产生众多新的裂缝和缝隙。这些新形成的缝隙逐步贯穿整个煤岩体,显现出明显的塑性特征。此时,微震活动开始频繁出现;受弹性力作用的某些矿物晶格会倾向于恢复到原有状态,此过程中释放出不同频率的电磁波辐射和磁波能量;磁性

矿物中的磁畴会尝试回到初始状态,在这一过程中可能产生显著的磁性波动,以及对地磁场的滤镜效应发生显著变化。

4) 破损直至破坏阶段。随着塑性不断增强,煤岩体内部的裂缝和缝隙数量持续上升,煤岩体的稳定性被逐步破坏,其承载能力随之下降,直到最终发生破裂,造成剧烈的冲击地压现象。

3 煤岩破裂微震信号产生机制

煤岩层是由多个小颗粒和纵横交错的裂缝构成的非均匀体。这些小颗粒一般只有毫米大小,它们自身也包含微小的孔洞。在持续的自然压力作用下,由于煤岩体的非均匀性,这些颗粒间形成了细微缝隙。正是这些内在的孔洞和缝隙构建了煤岩体内部的复杂结构,并在煤岩体断裂释放微震信号时发挥了重要作用。颗粒本身的孔洞比颗粒间的缝隙更加坚固,煤岩体的开裂往往从颗粒间微弱的缝隙处开始。在外部力量逐步增强的过程中,这些缝隙会逐渐扩散和细分,导致煤岩体在宏观上呈现碎裂状态。剪切破坏和拉伸破坏是承载煤岩体开裂的 2 个主要模式。

煤岩体断裂过程可分为以下 4 个阶段^[20-22]:
① 压力释放。此时微震信号的产生是因为颗粒间的桥接键及颗粒本身的化学键断裂,释放出大量能量。
② 新裂纹的生成与扩展。产生微震信号主要是因为新裂纹的形成、扩张及原有裂纹的进一步延伸。
③ 新旧裂纹的交汇和连接。微震信号的产生主要是由于裂纹间的互相摩擦和压迫造成的微观变形。
④ 当上层岩石的压力传递至煤岩层顶底板,引发整体上宏观的断裂。此时产生的微震信号主要源自宏观上的断裂活动。

可见,在煤岩体破裂过程中始终伴随微震信号的产出,其频率、强度和波的特性均有独特表现。此外,外加应力的大小、作用方法及煤岩体的结构特性也会影响微震信号的形成。通过监测微震信号的变化,可以追踪和理解煤岩体拉伸和断裂的全过程。

4 受载煤岩产生磁辐射机制

在煤矿开采过程中,受载煤岩体受到外部力量的挤压和剪切,会在内部产生一系列复杂的物理及化学反应^[23-25]。这些反应既包括岩石结构的形变与破坏,也涉及到煤岩内部电磁特性的改变,从而产生磁性波辐射。探究这些磁性波辐射的机制,可以参照麦克斯韦方程组的理论基础。

麦克斯韦方程组描述了电场、磁场和电磁波的相互关系。理论上,电磁波是由互相垂直的电场和

磁场振动组成,且这 2 个场在相互垂直的方向上传播。然而,在讨论受载煤岩体产生的磁辐射时,有一种特殊情况——磁场可以单独存在,即所谓的“准静态近似”。在这种状态下,变化的磁场产生的电场幅度非常小,可忽略不计。一般情况下,地层中的电磁波辐射传播距离受限。这是因为地层中的感应电流会造成能量损耗,先是电场成分被土壤的电导率所吸收,而后整个电磁波能量随之耗散。因此,在地下环境中观察到的顶底板岩层中的磁性波主要体现的是磁场成分。

涉及到煤岩体在受载状态下产生磁辐射的关键因素包括:① 晶体的体积变化。由于外部压力作用,岩石中晶体结构可能经历形变、断裂或重组。这些变化能引起磁畴的调整,进而产生磁性波辐射。② 磁畴的体积变化。在外力的影响下,磁畴边界可能会移动,或者磁畴结构发生旋转。这些变化导致磁畴体积改变,产生磁场波动,从而辐射出磁性波。③ 磁域的恢复性变化。压力作用下的磁畴变化不一定是永久性的,一旦外部力量撤销或减弱,磁畴有可能恢复至原先的状态,这种恢复性变化也会产生磁性波辐射。④ 磁畴截面积的变化。在受载过程中,不仅磁畴的体积会发生改变,磁畴的截面积也可能变化。这种变化可以影响岩石对地磁场的滤镜效应,造成地磁总场的波动。

上述因素提到的晶体和磁畴体积的变化,以及磁域面积的恢复性变化,都是煤岩体在承受外力作用时产生磁辐射的潜在机制。这些磁性波辐射在地下可以传播较远的距离,原因是它们不会引发地层中强烈的感应电流,能量耗散较少。监控这些磁性波的活动能够帮助更好地了解煤岩体的应力状态,对煤矿安全生产具有重要意义。

5 压磁监测研究现状

压磁监测也称岩石磁电效应监测,是指利用岩石在受到外力作用时产生的磁场变化进行监测的一种技术。这种效应在地质探测、地震预报、矿山安全与灾害防治等领域有重要应用。随着科技的发展和地球物理场综合研究的不断深入,压磁监测技术已经取得了一定进展,尤其体现在基础理论研究、监测技术、设备研制和应用实践等方面。

基础理论研究方面,近年来科研人员对压磁效应的微观机理和宏观表征进行了深入研究。从研究压磁效应的原理出发,认为这一效应主要是岩石中矿物颗粒的铁磁或亚铁磁性质在外力作用下引起的磁畴结构重新排列和相应磁化强度变化所产生的。理论方面,通过建立精确的物理模型,研究者得以模

拟和预测在不同地质条件和不同力学状态下岩石的磁电响应,为压磁监测技术的应用提供理论支持。

监测技术与设备方面,现代电子与信息技术的发展推动了压磁监测设备的进步。高灵敏度的磁传感技术、远程无线通信技术及高效的数据采集处理系统的集成,使得压磁监测技术在实地应用中愈加准确与高效。例如,集成化的压磁传感器能够在恶劣环境下持续工作,捕获并记录微弱的压磁信号,并通过无线网络实时传输给监控中心进行分析。

实验研究方面,科研人员通过模拟地下岩石在不同应力状态下的实验条件,揭示了岩石在不同受力环境下压磁信号的规律性变化。系统的实验研究不仅可以模拟真实的地下作业环境,还能为实地应用提供指导和数据支持。实验室实验表明,压磁信号不仅与岩石所受的应力大小有关,还与磁性矿物含量、岩石类型及应力作用的时间等因素有关。

在应用实践方面,压磁监测技术已逐步应用于地下矿山安全监测、地震预测、地质勘查及构造地质研究等领域,并取得了良好的效果。在矿山安全监测领域,通过对矿山岩体的压磁监测,可以实时掌握岩体应力的变化规律,从而预警岩爆、瓦斯爆炸等灾害的发生。在地震预测领域,压磁监测技术能够有效监测到地震前兆期间的地磁场异常,为地震预测提供了新的手段。在地质勘查与构造地质研究领域,压磁信号作为识别地下结构特征的辅助手段之一,对于深入理解地壳运动机制和地质构造演化具有重要意义。

尽管取得了诸多进展,压磁监测技术仍面临一系列的挑战。在监测信号的识别上,需要进一步区分地质体中的自然磁场变化与人为或其他影响因素产生的磁场变化;在环境干扰的削弱上,需发展更为高效的信号处理技术,以减少噪声的影响;在监测设备的优化上,未来研究应侧重于提高设备的稳定性、便携性和耐候性。

压磁监测技术作为一种重要的地质物理探测方法,在理论和实际应用上已经取得了显著的成就。未来发展将围绕实现更高精度的监测、更广泛的应用范围及更深入的理论研究。

6 巷道顶底板移近量监测系统

巷道顶底板移近量监测是矿山安全领域的一项重要技术,是采矿活动过程中保障掘进巷道稳定性的关键手段^[26-27]。随着采煤作业的进行,掘进巷道的顶底板会受到采动影响,从而产生位移,这种位移被称为顶板或底板的移近量。巷道顶底板移近量监测系统的开发和应用可为矿山安全提供强有力的技

术支撑。其中顶板移近量传感器安装位置如图 1 所示。

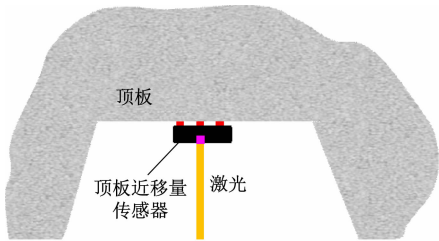


图 1 顶板移近量传感器安装位置

该系统功能如下。

1) 实时监测数据传输。系统能够持续监测巷道顶板和底板的移近量,并将采集到的数据实时传输至地面控制中心。通过高精度传感器的精确采集,保障数据的实时性和准确性,为及时发现和处理矿山安全问题提供科学依据。

2) 数据变化评估。对于采集到的数据,系统能够进行实时分析评价,通过对顶底板移近量变化趋势的追踪及时发现潜在的危险,为采矿安全措施提供决策支持。

3) 网络功能设计。监测系统采用无线网络通信技术,具备自组网能力,保证数据在复杂井下环境中的多路径传输,并且在低功耗要求下实现高效的数据通信。同时,网络软件设计包含自我诊断和自愈功能,确保系统即使在某些节点或设备出现问题时也能正常运行。

4) 数据处理与展示。地面计算中心的计算机系统不仅能够接收井下传来的数据,还能将数据实时呈现为直观的曲线和表格,方便操作人员分析和理解。数据同时支持 Excel 格式转换和数据库录入,以便进行长期的数据记录和历史回顾。

5) 个性化报警设置。系统允许用户根据井下的实际情况自定义报警阈值,各监测点的报警标准可以独立设置,灵活应对不同区域的安全要求,及时发出报警信号,引起作业人员的注意。

6) 数据打印功能。系统支持监测数据打印功能,用户可以选择打印实时数据表格、监测曲线图、统计曲线图等,便于记录和分析。同时,打印内容包含工作面名称、分站名称、监测点/通道名称、时间及与曲线对应的详细数值,提高了数据的透明性和易读性。

巷道顶底板移近量监测系统为矿山巷道稳定性提供了强大的监测和预警能力。其实时数据处理、智能化监测评价、高效网络传输和用户友好的操作界面等先进特性,保障了井下作业的安全,显著提高了矿山安全管理的水平。

7 结语

从煤岩顶底板动力灾害成因、受载煤岩体的形态演变、煤岩破裂微震信号产生机制、受载煤岩产生磁辐射的机制等方面进行原理分析,提出了未来研究方向。设计了巷道顶底板移近量监测系统,保障煤矿生产安全。

参考文献:

[1] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.

[2] 谢和平,王金华,王国法,等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1187-1197.

[3] 杨方亮. 我国电力行业煤炭产品需求前景浅析[J]. 中国煤炭,2020,46(8):22-31.

[4] 王国法,杜毅博,任怀伟,等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践[J]. 煤炭学报,2020,45(6):1909-1924.

[5] 杨静,蔡峰,封居强,等. 煤矿安全事故分析与预测研究[J]. 矿业安全与环保,2023,50(5):144-148,155.

[6] 李贤功,万猛,周晶,等. 我国煤矿事故死亡人数组合预测及行业比较[J]. 矿业安全与环保,2015,42(4):109-112.

[7] 孙继平,钱晓红. 煤矿事故与应急救援技术装备[J]. 工矿自动化,2016,42(10):1-5.

[8] 文光才,孙海涛,曹偲,等. 深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统[J]. 煤炭学报,2020,45(1):223-231.

[9] 康红普,伊丙鼎,高富强,等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报,2019,44(1):23-33.

[10] 杨科,刘文杰,窦礼同,等. 煤岩组合体界面效应与渐进失稳特征试验[J]. 煤炭学报,2020,45(5):1691-1700.

[11] 张泽天,刘建锋,王璐,等. 组合方式对煤岩组合体力学特性和破坏特征影响的试验研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1677-1681.

[12] 陈绍杰,尹大伟,张保良,等. 顶板-煤柱结构体力学特性及其渐进破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(7):1588-1598.

[13] 曹安业,窦林名,秦玉红,等. 高应力区微震监测信号特征分析[J]. 采矿与安全工程学报,2007(2):146-149,154.

[14] 尚雪义,李夕兵,彭康,等. 基于 EMDSVD 的矿山微震与爆破信号特征提取及分类方法[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1849-1858.

[15] 陈栋,王恩元,李楠. 千秋煤矿微震震源参数特征以及震源机制分析[J]. 煤炭学报,2019,44(7):2011-2019.

线等重点区域进行实时高可靠性在线监控。应用分析表明,煤矿井下外因火灾智能防控系统具备低功耗、高响应速率、高可靠等特点,同时具有较好的兼容性,适用于远距离传输,可通过监测预警平台实现煤矿井下胶带机头、胶带沿线等重点区域的火情全面监测,实现矿井外因火灾的提前预警、分级报警与应急联动,为打造煤矿火灾智能防控体系提供途径。

参考文献:

[1] 仲晓星,王建涛,周昆. 矿井煤自燃监测预警技术研究现状及智能化发展趋势[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9):7-17.

[2] 付星. 煤矿采矿安全管理与事故防范分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(6):107-109.

[3] 纪思奇. 煤矿井下防灭火技术发展现状[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020(22):144-145.

[4] 张富忠. 基于无线传感网络的火灾自动报警系统研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.

[5] 郭美丽,江晓. 通用场景火灾发展趋势实时预测技术研究[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2023, 39(2): 172-178.

[6] 段志昆. 矿井区域自动灭火系统研究与应用[J]. 煤矿机械, 2022, 43(8):227-228.

[7] 李京泽. 带式输送机火灾预警及自动灭火系统的设计及应用[J]. 煤炭与化工, 2023, 46(5):91-93,118.

[8] 张磊,崔贵荣,赵华玮. 数字化智能矿山安全监控系统的应用[J]. 陕西煤炭, 2016, 35 (增刊 1): 131-

133,124.

[9] 魏峰. 一种数字式煤矿安全监控系统设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(2):19-23.

[10] 黄增波. 便携式煤矿井下 CAN 总线分析仪的设计与实现[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1):134-138.

[11] 张子良. 基于 AHP 多特征融合的矿用烟雾传感器设计[J]. 煤矿机械, 2023, 44(6):6-10.

[12] 黄友龙. 自燃煤层智能工作面采空区光纤温度感知关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.

[13] 许扬,李健,张明江. 拉曼分布式光纤温度传感仪的研究进展[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5):713-732.

[14] 李健. 高性能拉曼分布式光纤传感仪关键技术研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.

[15] 邱子杰. 基于分布式传感技术的光纤空间定位方法[D]. 成都:电子科技大学, 2022.

[16] 刘翔. 分布式光纤测温系统在核电厂的应用实践[J]. 电子技术应用, 2022(增刊 1):38-43.

[17] 王海洋. 煤矿电缆火灾自动监控系统设计与实现[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 64-69.

[18] 张仿彦. 煤矿安全监控系统在矿井胶带火灾防治中的应用[J]. 煤矿开采, 2002(3):64-66.

[19] 李明建. 煤矿多灾种融合预警技术与装备[J]. 智能矿山, 2022, 3(7):156-157.

[20] 潘捍宇. 电力机车车载电子设备电磁兼容性研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2022.

[21] 张子良. 矿用气体传感器现场电磁干扰分析与抗干扰优化[J]. 煤矿安全, 2022, 53(5):106-110.

(上接第 95 页)

[16] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5):1283-1305.

[17] 杨磊,高富强,王晓卿,等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44 (12): 3894-3902.

[18] 左建平,陈岩,崔凡. 不同煤岩组合体力学特性差异及冲击倾向性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47 (1):81-87.

[19] 宋振骐. 实用矿山压力控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1988

[20] 刘杰,王恩元,宋大钊,等. 岩石强度对于组合试样力学行为及声发射特性的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4):685-691.

[21] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(9):1729-1740.

[22] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社, 2002:52-54.

[23] 赵毅鑫,姜耀东,祝捷,等. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(2): 339-346.

[24] 尹光志,李星,鲁俊,等. 深部开采动静载荷作用下复合动力灾害致灾机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42 (9):2316-2326.

[25] 袁亮,姜耀东,何学秋,等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2):306-318.

[26] 尹希文. 综采工作面支架与围岩双周期动态作用机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12):3072-3080.

[27] 尹希文,朱拴成,安泽,等. 浅埋深综放工作面矿压规律及支架工作阻力确定[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (5):50-54.