

深部开采断层煤柱耦合型冲击失稳机理与能量调控机制研究

薛飞

140203*****431X

摘要: 深部开采中断层构造与遗留煤柱的耦合效应是诱发冲击地压的主要因素之一,其致灾机理的复杂性在于断层活化与煤柱失稳的能量非线性释放过程。本文以断层切割煤柱区域为研究对象,系统分析了断层煤柱结构的静载失稳特征与动载响应机制,揭示了断层活化与煤柱失稳的能量耦合法则。研究表明,断层煤柱区域在静载条件下趋近于失稳临界状态,开采扰动引发的动静载叠加导致冲击危险性显著升高;断层活化的应变能释放率可达17%,释放的应变能部分转化为煤岩动能,形成动载应力波并与静态应力场叠加,引发采动应力骤变;基于能量积累与耗散特征,建立了断层煤柱冲击失稳的能量判据,提出以能量疏导为核心的“卸压-改性-支护”协同调控机制。研究结果为深部断层发育区煤柱工作面的冲击地压防控提供了理论依据。

关键词: 深部开采;断层煤柱;冲击地压;能量调控;动静载叠加

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.039

引言

随着煤炭开采向深部延伸,冲击地压灾害频率与强度上升。统计显示,地质构造区冲击地压占比超60%,断层构造破坏岩层连续性,是冲击地压主要孕育场所;留设煤柱在采动影响下形成高应力集中区,也是重要力源。当断层与煤柱共存,耦合效应使冲击失稳机理更复杂,防控难度增大。断层切割煤柱区域在静载下趋近失稳,推采时动静载应力叠加,煤柱冲击危险性升高。现场监测发现,工作面初采及见方阶段,微震能量积聚、应力集中明显,断层切割煤柱有整体失稳现象,涉及多重物理过程。然而,现有研究多将断层与煤柱独立分析,缺乏对二者耦合作用下冲击失稳能量演化规律与调控机制的系统认识。本文聚焦深部开采中断层煤柱耦合型冲击失稳问题,从静载稳定性、动载响应特征、能量积聚与释放规律入手,揭示耦合法则,建立能量判据,提出能量调控技术路径,为深部断层发育区煤柱工作面冲击地压防控提供理论支撑。

1 断层煤柱结构的静载稳定性

断层煤柱结构是由断层切割形成的特殊煤岩组合体,其静载稳定性取决于断层带力学性质、煤柱几何尺寸、地应力环境及采动影响程度等多因素的综合作用。与完整煤柱不同,断层切割煤柱由于断层带的存在,结构完整性遭受破坏,应力分布呈现显著的非均匀性,失稳风险大幅提高^[1]。

断层带煤岩体具有明显的过渡型介质特征,由破碎

带向裂隙发育区再到完整煤岩,力学性质呈梯度变化。这种非均质性使得断层煤柱的承载机制极为复杂:断层带本身强度较低,难以有效传递应力,导致应力向断层两侧的完整煤岩转移;同时,断层带作为弱面,在应力作用下容易发生滑移和活化,成为冲击失稳的诱发源。研究表明,断层切割煤柱区域在静载条件下已趋近于失稳临界状态,这意味着在无采动扰动的情况下,煤柱自身可能处于高应力临界平衡态,任何微小的扰动都可能导致失稳。

断层煤柱的静载稳定性可采用力学模型进行分析。考虑断层倾角、煤柱宽度、采深等因素,建立断层煤柱的受力分析模型,可获得煤柱内部的应力分布特征。数值模拟研究表明,断层存在导致微震事件非对称分布,进风巷侧呈现高频低能分布模式,回风巷侧呈现低频高能分布模式。这种非对称分布反映了断层对煤柱应力场的改造作用:断层改变了应力传递路径,使得煤柱不同区域的能量积累水平存在显著差异。

从能量角度分析,断层煤柱在静载条件下积蓄弹性能,其能量密度与应力平方成正比^[2]。由于断层造成的应力集中,煤柱局部区域的能量密度远高于平均水平。当煤柱承受的静载应力超过其长期强度时,煤体将进入不稳定蠕变阶段,表现为随时间推移的渐进损伤和能量积累。现场案例表明,深部孤岛煤柱在无明显采动扰动条件下仍会发生冲击事故,且具有明显的“滞后性”和“自发性”。这种“滞后型”冲击的产生机理在于:高

地应力作用下煤柱长期处于不稳定蠕变状态,蠕变过程逐渐削弱煤柱的承载能力,当煤柱积累的弹性能超过其极限承载能力时,即发生冲击失稳。对于断层煤柱而言,断层带的存在进一步加剧了这一过程,使煤柱更易进入不稳定蠕变状态。

2 采动扰动下的动载响应与能量耦合法则

当工作面推进至断层煤柱区域时,采动扰动打破原有的静力平衡状态,断层煤柱系统呈现复杂的动载响应特征。这一过程的核心在于动静载叠加效应:采动产生的支承压力与断层煤柱原有的高静载应力相互叠加,形成远超单因素作用的高应力环境;同时,顶板破断、断层活化等动载源释放的能量以应力波形式传播,与静载应力场相互作用,引发采动应力的骤变。

断层煤柱区域的动静载叠加具有显著的时空演化特征。在空间上,断层影响下的超前采动影响范围较正常区域显著扩大。实测数据显示,非断层影响区超前采动影响范围约30m,断层影响下增加至50m,断层与煤柱叠加影响下进一步增加至70m。这一现象说明,断层与煤柱的耦合效应不仅提高了应力集中程度,还扩大了采动影响的空间范围。在时间上,采动过程中的应力演化呈现阶段性特征:工作面初采阶段、见方阶段等关键时期,微震能量积聚显著,应力集中区域明显。厚硬岩层-煤柱结构的数值模拟发现,区段煤柱承载应力随厚硬岩层的破断运动发生阶段性突增现象,其中厚硬岩层“W”型两次破断运动传递的载荷是工作面附近区段煤柱失稳冲击的主要应力来源,二次破断释放的能量远高于初次破断。

断层活化是采动扰动下能量释放的重要形式。断层带在采动应力作用下发生滑移或张开,积累的应变能瞬间释放,形成动载源。研究表明,断层活化和围岩破坏引起的应变能释放,其向煤岩动能转化的转换率达到17%。释放的能量一部分以应力波形式向外传播,另一部分转化为断层带附近煤岩的动能,直接诱发冲击显现。动载应力波的产生原理可概括为:断层活化引起岩体突然错动,激发应力波向周围岩体传播;应力波遇到煤柱等结构时发生反射、透射和叠加,形成复杂的动载响应^[3]。

断层活化与煤柱失稳的能量耦合法则体现在以下方面:首先,断层活化释放的能量作为外部动载输入煤柱系统,与煤柱自身积累的弹性能叠加,使总能量超过

煤柱的极限储能能力;其次,动载应力波的扰动作用破坏煤柱的受力平衡状态,使处于临界稳定状态的煤柱失去稳定;再次,煤柱失稳释放的能量可能反作用于断层,引发断层的再次活化,形成能量释放的正反馈过程。这种能量耦合效应是断层煤柱冲击失稳区别于普通煤柱冲击的本质特征。

动静载叠加作用下,煤岩的力学行为呈现多样化特征。根据煤岩在加载前后的状态差异,可归纳为三种典型行为模式:若加载前后煤岩始终处于破碎状态,则呈现压实硬化力学行为,发生应力激增现象;若煤岩由完整状态过渡至破碎状态,则呈现脆性松脱力学行为,发生应力跌落现象;若煤岩始终处于完整状态,则呈现弹性回弹力学行为,发生动载冲击现象。这三种行为模式反映了煤岩在不同损伤状态下的动态响应特征,为理解断层煤柱冲击失稳的多样性提供了理论基础。

3 冲击失稳的能量判据与释放特征

断层煤柱冲击失稳的本质是能量积累与释放的非平衡过程。从能量角度建立冲击失稳的判据,有助于定量评估冲击危险性和指导防控设计。能量判据的基本思想是:当煤岩系统积累的弹性能超过其失稳破坏所需的能耗时,多余的能量将以动能形式释放,形成冲击显现。

对于断层煤柱系统,总能量包括煤柱自身积累的弹性能、断层带储存的应变能以及上覆岩层传递的势能。煤柱的弹性能积累可用下式表达:

$$U = \frac{1}{2E} \int_V \sigma^2 dV$$

其中,U为弹性能, σ 为应力,E为弹性模量,V为体积。由于断层造成的应力集中,煤柱局部区域的应力水平远高于平均值,导致能量密度分布极不均匀。断层带储存的应变能则取决于断层面上的剪应力分布和错动位移。

煤柱失稳的能量判据可表示为:

$$U \geq U_c + W_f$$

式中, U_c 为煤体破坏所需能耗, W_f 为断层活化耗能。当系统积累的能量超过煤体破坏和断层活化所需能耗之和时,多余的能量转化为动能,驱动煤岩抛出的冲击过程。需要指出的是,由于煤岩破坏和断层活化过程的耗能机制复杂, U_c 和 W_f 的准确确定仍面临挑战,但该判据为冲击危险性评估提供了理论框架。

微震监测是研究断层煤柱能量释放特征的有效手

段。现场监测表明,断层煤柱区域的微震事件呈现明显的时空聚集特征:在空间上,事件主要分布在断层附近和煤柱高应力区;在时间上,事件多发生在工作面推进的关键阶段,如过断层期间、见方期间等。微震能量分析显示,断层煤柱区域的能量释放具有突发性和高能性特点,单个事件的能量可达 10^5J 以上。值得注意的是,断层导致微震事件呈现非对称分布模式,这一现象对监测预警具有重要指导意义:若仅在工作面一侧布设监测系统,可能无法全面捕捉断层煤柱区域的能量释放信息。

断层煤柱失稳的能量释放过程可分为三个阶段:能量积累阶段、能量触发阶段和能量释放阶段。在能量积累阶段,采掘活动持续向煤柱系统输入能量,系统总能量不断增加,但尚未达到失稳阈值;能量触发阶段,某一扰动事件(如断层活化、顶板破断)打破系统平衡,使总能量超过失稳阈值;能量释放阶段,煤柱发生破坏,积累的弹性能瞬间释放,形成冲击显现。这三个阶段的持续时间差异悬殊:积累阶段可能持续数周至数月,触发阶段仅为瞬间,释放阶段则在数秒内完成。这种时间尺度上的巨大差异,增加了冲击地压预警的难度^[4]。

基于能量释放特征,可对断层煤柱的冲击危险性进行分级评估。评估指标可包括:能量积累速率、能量释放峰值、能量释放频次、能量释放空间集中度等。通过微震系统实时监测这些指标的变化,结合地质条件和开采进度,可实现对冲击危险的动态预警。

4 能量调控机制与防冲实践

基于断层煤柱冲击失稳的能量耦合法则,防冲工作核心是能量调控,即通过技术控制能量积累、削弱释放强度、改变释放方式,主动降低冲击风险。能量调控思路包括减少能量输入、疏导能量积累、耗散已聚能量和隔离能量释放。

减少能量输入通过优化采掘布局实现,断层煤柱区域应避免形成孤岛煤柱,合理确定工作面宽度和推进速度,调整开采顺序,同时考虑断层与煤柱叠加影响下采动范围-3扩大的因素。

疏导能量积累关键是破坏煤岩体蓄能结构,顶板改性对断层煤柱系统有双重意义,现场实践表明覆岩结构改性可改善能量释放特征,降低单次冲击风险。

耗散已聚能量是直接手段,大直径钻孔卸压、卸压爆破等技术可提前释放弹性能,断层煤柱区域可分两步卸压,“钻-爆-压”三级协同卸压技术有良好“释能减

冲”效果^[5]。

隔离能量释放通过加强支护实现,断层煤柱区域采取高强度支护可提高围岩承载和抵抗能力,厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲控制体系体现能量调控系统思维。

5 结论

a.断层煤柱区域在静载条件下趋近于失稳临界状态,断层带作为弱面改变了煤柱的应力分布,使煤柱局部区域能量密度远高于平均水平,断层与煤柱的叠加效应导致超前采动影响范围由30m扩大至70m。

b.采动扰动下断层活化与煤柱失稳存在能量耦合法则,断层活化应变能释放率可达17%,释放的能量转化为动载应力波,与静态应力场叠加引发采动应力骤变;厚硬岩层二次破断释放的能量远高于初次破断,构成煤柱冲击的主要动载来源。

c.断层煤柱冲击失稳的能量判据可表述为系统积累能量超过煤体破坏与断层活化所需能耗之和,多余能量转化为动能驱动冲击过程;微震事件呈现非对称分布特征,对监测预警具有重要指导意义。

d.提出了以能量疏导为核心的“卸压-改性-支护”协同调控机制:通过大直径钻孔和卸压爆破实现能量提前释放,通过覆岩结构改性破坏蓄能条件,通过加强支护增强抗冲能力。现场实践表明,该机制可有效降低微震能量峰值、减少高能事件频次,实现断层煤柱区域的安全回采。

参考文献

- [1]刘振江,刘永先,卢雪松,等.不规则断层煤柱区孤岛工作面应力演化特征和矿震活动规律[J].陕西煤炭,2026,45(02):1-6.
- [2]李家卓,邱航,窦林名,等.深部开采强动载波形分类特征及震源参量响应规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(02):77-93.
- [3]袁健博,万晓,刘志刚,等.深部工作面上盘开采的断层煤柱应力演化特征分析[J].矿业安全与环保,2024,51(06):106-111.
- [4]程刚,沈建波,詹召伟.深部采场整体失稳风险分析[J].煤矿现代化,2020,(06):71-73.
- [5]张乐有,包鑫阳.深部开采矿井冲击地压发生的地质与开采技术因素分析[J].内蒙古煤炭经济,2020,(05):24-25.