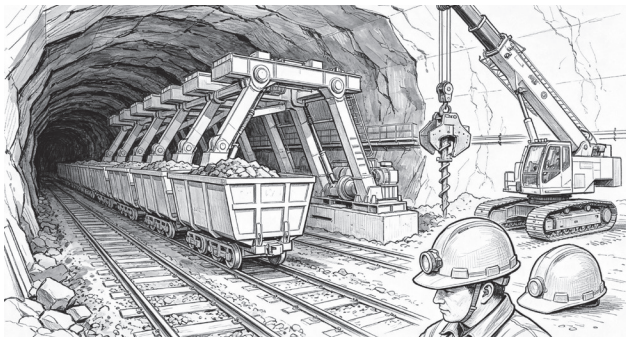


深部开采条件下煤矿冲击地压致灾机理及演化特征分析

文 | 刘澜涛 郭朋 桑广合

随着煤矿开采深度的持续增大，部分矿井已突破 1300m，深部高地应力环境下冲击地压灾害频发，2016 年至 2020 年间相关事故造成 190 余人死亡，致灾机理与演化规律亟待系统揭示。



(配图由 AI 生成)

深部开采的地质力学环境与冲击地压孕灾条件

深部开采的地应力分布与围岩力学响应

在深部开采环境中，原岩应力会随埋深增大呈现显著非线性增长，每增加 100m 埋深，垂直应力大约会增加 2.5MPa，当开采深度超过 800m 时，地应力水平已远超过浅部矿井围岩承载极限。在这种高应力背景下，巷道开挖后围岩应力会重新分布，峰值应力向煤岩体深部转移，形成高度集中应力壳层结构。围岩在持续高应力作用下会表现明显流变特性，巷道变形量和变形速率都会大幅提升，顶板下沉和两帮收缩现象比浅部更突出。深部围岩力学响应还具有显著时间依赖性，即在采掘扰动之后短期内应力不会立即达到峰值，而是随时间缓慢累积到临界状态，这一特性让冲击地压发生常滞后于采掘活动，增加灾害预判方面难度。掌握深部地应力分布规律以及围岩力学响应机制，是划定冲击危险区域基本前提条件。

深部煤岩体的脆延转化与储能规律

浅部低应力环境中煤岩体承受载荷后呈现延性破坏特征，且破坏过程相对较为平缓。进入深部高应力状态时，围压升高使煤岩体脆延转化临界点改变，部分原本有延性特征的岩体在特定围压下转变为脆性破坏，且此破坏常具突发性与能量释放集中特点。深部煤岩体在高应力长期作用下储存大量弹性变形能，其单位体积储能密度随埋深增加而显著提升，像山东某埋深 1300m 工作面，煤岩体弹性储能积累量比埋深 500m 矿井高出 3 倍以上。储能密度越高，冲击地压发生时能量释放越强烈，且破坏范围越大。煤岩体储能能力由岩石弹性模量单轴抗压强度和围压水平共同决定，坚硬顶板与高强度煤层组合条件下储能效率达最优，这成为冲击地

压形成的核心物质基础。

采动作用下围岩应力场的重分布规律

随着工作面持续向前移动，采空区上方岩层由于失去支撑，造成原有应力平衡遭到破坏，应力逐渐朝工作面前方以及两侧煤体转移，进而形成超前支承压力带。该压力峰值一般出现在工作面前方 10m 到 30m 位置，其最大应力值能够达到原始应力的 2 倍到 4 倍，这使得此区域煤岩体处于高度应力集中状态，成为冲击地压高发区域。随着工作面持续进行开采，应力集中区域也会跟着移动，而覆岩周期性破断会让应力场出现突发性重新分布，每次关键层断裂都会对前方煤体产生额外动态载荷作用。在多个工作面同时进行开采或者存在遗留煤柱影响下，应力叠加效应会变得更加明显，导致应力集中程度急剧增加。对于深部矿井，采动所引起的应力场重新分布范围更广、影响深度更大，所以巷道布局与开采顺序科学规划对控制超前支承压力峰值、减小冲击地压风险起到决定性作用。

深部冲击地压的致灾机理分析

静载荷集中型冲击地压的形成过程

静载荷集中型冲击地压发生是因开采活动使应力不断向特定煤岩区域聚集积累，最终超出承载能力而突然失稳。深部矿井环境中，残留煤柱、孤岛工作面以及多个采区相互作用区域是应力高度集中的典型场所，当煤柱两侧支撑压力叠加时，局部应力集中程度能达到原始地应力的 4 倍至 6 倍。像山东某埋深 1300m 矿井监测数据显示，孤岛工作面开采时巷道围岩超前支撑压力峰值比常规工作面高出约 2.3 倍，煤体内弹性应变能密度接近冲击发生临界值。此类冲击地压应

力积累过程时间长且逐步发展，但破坏发生时间极为短暂，还伴随能量集中释放。为有效防治这种冲击地压，工程实践常采用大直径钻孔配合深孔爆破综合卸压技术，在高应力区预先制造卸压槽，将应力峰值向煤体深部转移，从而显著降低冲击事件发生可能性。

动载荷扰动型冲击地压的触发条件

动载荷扰动型冲击地压形成是因为外部震动能量对临近临界应力状态煤岩体有瞬时冲击效应。在深部矿井环境中，坚硬顶板周期性破断属于主要动载荷诱因，当厚层砂岩或砾岩顶板发生断裂时，释放震动能量可达 10^5 至 10^6 焦耳级别，这些震动波在煤岩介质里传播且与原有静应力场相互叠加，使得局部应力在极短时间内超过材料自身的承载能力。另外爆破作业所产生的冲击波也是重要动载荷扰动形式，尤其在深部高应力条件巷道掘进工程中，爆破扰动引发冲击地压事故发生率明显高于浅部开采区域。这类冲击地压事件有明显时间分布特征，通常集中发生在顶板初次断裂及周期性断裂阶段，并且顶板断裂步距越小，断裂频率越高，动载荷累积效应越显著。从工程防控角度出发，用水力压裂技术对坚硬顶板预裂弱化，通过减小其暴露长度能有效控制顶板断裂能量释放规模，进而从根本上削弱动载荷扰动的影响程度。

动静载叠加型冲击地压的耦合致灾机制

动静载荷共同诱发的冲击地压是深部开采里最常见且破坏性最强的灾害形式，其核心机理是静态应力环境和瞬时动态扰动在时空上协同作用引发煤岩系统失稳。在深部工作面静态应力持续作用煤壁使其长期处于高应力状态，一旦发生顶板破断或爆破等动态事件，震动波携带能量会与煤体储存弹性势能叠加。当总能量突破临界值就会触发突然的破坏性失稳，和单一类型冲击灾害相比，动静耦合型冲击所需静态应力基础更低且动态扰动能量更小。这种组合效应显著降低了灾害发生门槛，导致深部矿井危险区域显著扩大，从工程防护角度看，针对这种耦合致灾机制，通常采取全局卸压与局部防冲相结合的综合策略。通过开采保护层或实施水力压裂等手段在采区内降低初始静态应力水平，同时在重点危险区域布设大直径钻孔，吸收和耗散动态扰动能量，构建系统性双重安全保障体系。

深部冲击地压的孕育演化过程与前兆信息分析

冲击地压能量积聚——释放的阶段化演化

深部冲击地压形成过程涵盖四个渐进阶段，分别是能量缓慢累积、局部损伤发展、临界失稳加剧以及能量突然释放。在能量累积阶段，煤岩体仅仅发生弹性形变，表面看不到明显的破损情况；损伤发展阶段，内部微裂纹不断产生，能量存储的速率明显提升；临界失稳阶段，裂纹扩展速度迅

速加快，支撑体系已经濒临解体状态；最终储存的弹性能量集中迸发，引发煤岩体动力性破坏并伴随剧烈震动和岩石碎块抛射。深部矿井初始能量储存密度更大，各阶段推进速度比浅部矿井更快，从失稳临界点到能量爆发的时间间隔，深部矿井显著短于浅部矿井，这对监测预警系统反应时效提出更为严苛标准。

各演化阶段多参量前兆信号的产生规律

在冲击地压的不同发展阶段中，声发射、电磁辐射及微震信号呈现明确演变特征。能量积累阶段，这三类信号都维持在基线状态，表现为稀疏且微弱的信号活动；损伤扩展阶段，声发射事件的频次明显增加，电磁辐射脉冲率随裂隙摩擦滑动增强而提升，微震事件的空间分布逐渐往高应力区域集中；临界失稳阶段，声发射的频次与幅值均急剧上升，电磁辐射呈现出突发性峰值，微震能量等级持续攀升，通常在冲击地压爆发前 3 天至 7 天进入信号异常活跃期。深入理解各阶段信号变化特征，是构建分阶段精准预警体系的关键基础。

多元监测信号对演化阶段的表征

对多种监测信号进行有效分析，基础是科学的空间规划与多参数融合。监测体系按巷道、工作面及采区三级尺度来构建，巷道层级通过应力实时监测与钻屑法评估局部应力状态，工作面层级利用地音和声发射装置捕捉损伤演化特征，采区层级借助微震网络掌握震源位置与能量释放规律。多源数据经过标准化处理后输入耦合预警系统进行联合分析，以此规避单一参数带来的误判风险。在山东某深度达 1300m 矿井的实践表明，该体系让冲击地压预警精度比单一参数监测提高 40%，实现了灾害演化全过程的动态化追踪。

结束语

深部冲击地压形成过程和高地应力环境中煤岩体能量储存以及采动应力场变化紧密相关。其发生机制主要有静载荷集中、动载荷扰动和动静载叠加这三种类型，其中动静载叠加在深部矿井中最为常见。从能量积蓄到失稳释放过程中声发射、电磁辐射、微震等信号在不同阶段都会出现前兆，这给监测和预警提供了物理基础。所以深入研究致灾机制并完善各阶段信号表征体系，是实现深部矿井安全开采的重要科研任务。

作者简介：刘澜涛 郭朋 桑广合 山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

责任编辑：王子祺 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com