

深部高应力矿床采矿诱发岩爆预警与控制技术研究

钟国兴

中萤发展有限公司 江西赣州 341000

摘要: 随着矿产资源开采逐渐向深部发展,深部高应力矿床开采过程中诱发的岩爆问题日益突出。岩爆作为一种具有强烈破坏性的动力灾害,严重威胁着井下作业人员的安全和矿山的正常生产。本文聚焦于深部高应力矿床采矿诱发岩爆预警与控制技术展开研究。首先,对岩爆的形成机制进行了深入剖析,综合考虑深部岩体的应力状态、岩石力学性质以及开采扰动等多方面因素,明确了岩爆发生的关键影响因素。其次,详细阐述了多种岩爆预警技术,包括微震监测、地音监测、应力监测等,并对这些技术的原理、优缺点以及适用范围进行了全面分析。通过建立多参数综合预警模型,提高了岩爆预警的准确性和可靠性。在控制技术方面,探讨了包括卸压爆破、煤层注水、支护加固等多种措施,分析了不同控制技术的作用原理和应用效果。结合实际矿山案例,验证了所提出的预警与控制技术体系的有效性和实用性,为深部高应力矿床的安全高效开采提供了重要的技术支持。

关键词: 深部高应力矿床;岩爆;预警技术;控制技术

引言

矿产资源是国民经济发展的重要物质基础,浅部矿产枯竭使深部矿床开采成为必然。然而,深部开采面临诸多工程地质问题,岩爆是深部高应力矿床开采的突出灾害之一。岩爆是地下工程开挖导致岩体应力集中,超过强度极限时岩体突然破坏、释放能量,引发岩石弹射等现象。它具有突发性和强破坏性,会损坏设备、破坏巷道采场、造成人员伤亡、经济损失和安全隐患。近年来,国内外学者在岩爆理论研究、监测预警和控制技术方面取得了成果。理论研究提出了多种判据和机制模型,监测预警发展了多种手段,控制技术有多种措施应用于实际工程。不过,由于岩爆问题复杂,目前的研究存在局限性,如形成机制不明确、预警技术的准确性和可靠性有待提高、控制技术的针对性和有效性需优化。因此,深入开展深部高应力矿床采矿诱发岩爆预警与控制技术研究具有重要意义。

一、深部高应力矿床岩爆发生机理与影响因素

(一) 岩爆产生的物理力学基础

在深部矿床的开采环境中,由于上覆岩层的巨大压力以及构造应力的长期积累,岩体处于极其复杂的高地应力状态。这种高地应力环境与地表浅层岩体所承受的应力条件存在本质区别,其应力水平往往达到数十至上百兆帕。在这种高地应力状态下,岩体内部会不断积累大量的弹性应变能,这种能量的积累过程是岩爆发生的

根本物理前提。当矿山进行开挖作业时,原有的应力平衡状态被打破,在开挖边界附近会产生显著的应力集中现象。这种应力集中效应与原有的高地应力叠加,使得岩体处于更加危险的应力环境中。当开挖引起的卸荷作用或其他形式的应力扰动(如爆破震动、邻近采场影响等)达到某一临界值时,岩体内部长期积累的弹性应变能就会在瞬间以极高的速率释放出来。这种能量的突然释放会产生强大的冲击波,对周围岩体造成剧烈的动力作用,导致岩体发生脆性断裂破坏。在破坏过程中,岩块会被高速抛出,同时伴随强烈的震动波和巨大的声响,这一系列复杂的动力现象统称为岩爆。从能量角度来看,岩爆本质上是一种高地应力岩体在受到扰动后发生的动力失稳现象。

(二) 影响岩爆的关键因素分析

岩爆作为一种复杂的矿山动力灾害,其发生机制和表现形式受到多种内在和外在因素的共同影响。这些因素之间往往存在复杂的相互作用关系,共同决定了岩爆发生的可能性、强度等级以及破坏特征。从地质因素来看,岩石的物理力学性质是最基础的影响因素。岩石的单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量等参数决定了其储能能力和破坏特性。脆性岩石通常具有较高的储能能力但较低的破坏应变,更容易发生岩爆。岩体的结构特征同样至关重要,包括节理、裂隙等结构面的发育程度、空间分布、充填情况等。这些结构面会显著降低岩体的整体强度,改变应力传播路径,影响能量的积累和释放

过程。区域地应力场的特征则是另一个决定性因素，主应力的方向、大小、方向、应力梯度以及应力类型（构造应力、自重应力等）共同构成了岩爆发生的应力环境背景。高地应力环境是岩爆发生的必要条件，而应力各向异性则会影响岩爆的破坏模式^[1]。

从采矿工程因素来看，开采方式和工艺参数对岩爆的诱发具有直接影响。不同的开挖方法（如钻爆法、TBM法）会产生不同程度的应力扰动和卸荷效应。开挖顺序和采场布置会影响围岩的应力演化路径，不合理的开采顺序可能导致应力集中加剧。支护形式和参数的选择会影响围岩的自承能力，适时的支护可以改善应力状态，延缓或防止岩爆发生。爆破作业作为常见的应力扰动源，其参数设计（如单响药量、起爆时差、爆破网络等）直接影响诱发岩爆的可能性。此外，开采深度、采场尺寸、开采速度等参数都会通过改变围岩的应力状态而影响岩爆的发生概率。

需要特别强调的是，岩爆的发生往往是多因素协同作用的结果。地质条件提供了岩爆发生的物质基础和能量条件，而采矿活动则可能成为触发因素。例如，在高应力脆性岩体中，一个微小的爆破扰动就可能引发大规模岩爆。这种多因素耦合作用的特点使得岩爆预测和防治工作极具挑战性，需要综合考虑地质条件、开采方法、监测预警等多方面因素。同时，由于地下工程的隐蔽性和地质条件的复杂性，岩爆机理研究仍然存在许多未解之谜，这也是当前岩石力学领域的研究重点和难点之一^[2]。

二、岩爆预警技术思路与关键环节

（一）岩爆预警的重要性与挑战

对岩爆进行早期且准确的预警，是预防其造成人员伤亡和设备损毁等重大损失的关键措施，构成了保障深部矿山安全生产的第一道防线。然而，实现有效的岩爆预警面临着诸多挑战。深部开采环境本身具有极高的复杂性，围岩条件多变，地应力状态不均一。同时，可供使用的监测手段存在局限性，难以全面、精确地捕捉岩体内部的动态变化。更为困难的是，岩爆发生前的前兆信息通常非常微弱，不易被察觉，并且这些微弱信号很容易受到地下环境噪声、施工活动振动等多种因素的干扰，从而增加了准确识别和判断的难度。

（二）主流预警技术原理概述

目前，主流的岩爆预警技术主要基于对岩体内部或表面物理量变化的监测。其中，地应力监测通过测量岩体中应力的方向和大小，评估应力是否达到岩爆发

生的临界条件。声发射或微震监测技术则通过捕捉岩体在应力作用下发生微破裂时产生的弹性波信号，分析其频次、能量、定位等特征，来判断岩体内部能量积聚和释放的状态。位移、应力、应变监测则是通过布置传感器，直接测量岩体表面或内部的位移变化、应力变化或应变积累情况，以此来反映围岩的稳定性和应力状态。此外，利用岩石力学试验获取岩石的本构关系和强度参数，结合数值模拟方法，可以对矿区的潜在危险区域进行识别，并对发生岩爆的风险进行评估，这些方法可以作为上述实时监测预警的辅助手段，提供理论支撑和风险背景^[3]。

（三）预警系统构建的关键环节

构建一个能够有效运行的岩爆预警系统，需要系统地考虑多个关键环节。首先，监测方案的设计至关重要，包括在关键部位合理布置测点，以及根据监测对象和精度要求选择合适的传感器类型。其次，需要建立可靠的数据采集系统，并确保数据能够稳定、高效地传输到数据处理中心。然后，信息处理与分析环节需要运用合适的算法，对原始数据进行滤波、特征提取、模式识别等处理，以提取出有价值的前兆信息。预警阈值的设定也是一个核心环节，需要根据历史数据、岩石力学特性、工程经验等综合确定合理的阈值，并建立不同风险等级下的分级响应机制。最后，强调多源信息融合与综合判断的重要性，即将来自地应力、声发射、位移等多方面的监测信息进行整合分析，相互印证，可以显著提高对岩爆发生可能性及强度的判断准确率，避免单一信息可能带来的误判或漏判。

三、岩爆控制技术原理与实施路径

（一）岩爆控制的基本思路

岩爆控制技术的核心目标在于，通过人为干预来改变岩体所处的应力环境或者直接改变岩体自身的物理力学特性。具体而言，就是采取措施降低岩体体积聚弹性应变能的潜力，或者削弱其能够快速释放这种能量的能力，从而减少岩爆发生的频率和强度。此外，即使岩爆难以完全避免，控制措施也致力于在爆发生时，尽可能地减轻其对巷道或采场结构的破坏程度，保障人员安全。需要明确的是，并非单一的控制技术能够适用于所有情况，实际应用中，控制技术通常需要根据所面临的岩爆类型（如弹射、剥落、浅层、深层等）、岩爆的强度等级以及具体的工程地质条件和采矿工艺进行细致的选择，并常常需要将多种技术进行组合应用，以达到最佳的控制效果^[4]。

(二) 主要控制技术原理阐述

卸压技术，例如钻孔卸压或切缝卸压，其基本原理是采用钻孔、切缝等工程手段，在开挖形成的巷道或采场轮廓附近的人为地制造出一些应力释放的空间或通道。这样做可以直接削减这些区域原本因开挖而高度集中的地应力，使得围岩内部的应力分布更加均匀，降低达到岩爆临界条件的可能性。

加固技术，如采用锚杆进行支护或者对围岩进行注浆加固，其原理在于通过工程措施提高围岩自身的强度和整体性。锚杆能够将松散的岩块锚固在一起，形成承载结构；注浆则可以填充岩体中的裂隙，提高岩体的完整性和力学参数。通过这些方式，增强围岩抵抗变形和抵抗破坏的能力，即使在高应力作用下，围岩也能保持相对稳定，不易发生脆性破裂。

诱发控制技术，例如采用控制性爆破的方法，其原理是主动、小规模、可控地诱发岩体发生微小的破裂或松动。通过这种预先的、受控的能量释放，可以部分地消耗掉岩体中积聚的弹性应变能，从而降低后续发生大规模、高能量岩爆的概率和强度。

(三) 控制技术的实施考量

在实际工程中实施岩爆控制技术，必须强调其选择和执行过程需要与矿山的整体采矿工艺流程紧密结合。这意味着控制措施的设计和施工不能脱离采矿计划，而应成为其中有机的一部分。同时，经济成本是一个必须考虑的重要因素，控制措施的实施需要投入资金、材料和人力，必须进行成本效益分析。施工的可行性也至关重要，所选技术是否能在现场条件下顺利实施，是否有足够的设备和熟练的技术人员，都需要提前评估。此外，控制措施的实施还可能对后续的采矿作业，如出矿、支护、设备通行等产生一定影响，这些影响也需要在方案设计阶段就予以考虑并制定应对预案。

建立基于实时监测反馈的动态调整机制，是优化控制措施、提高控制效果的关键环节。这意味着控制方案不应是一成不变的，而应随着施工的推进和监测数据的变化进行适时调整。通过持续监测围岩的应力、变形、声发射等状态信息，可以评估当前控制措施的有效性，及时发现新的风险点，并据此调整卸压孔的布置、锚杆的参数、注浆的范围或控制爆破的参数等，使控制措施始终能够针对性地应对最新的岩爆风险，从而最大限度

地提高控制效果^[5]。

结语

深部高应力矿床采矿诱发岩爆预警与控制技术的研究，对于保障矿山安全生产和高效开采意义重大。尽管目前在岩爆发生机理、预警技术和控制技术等方面取得了一定成果，但岩爆问题的复杂性决定了研究仍面临诸多挑战。未来，应进一步加强多学科交叉研究，综合运用地质学、岩石力学、采矿工程、信息科学等多学科知识，深入揭示岩爆的形成机制和演化规律。在预警技术方面，需研发更加先进、灵敏、可靠的监测设备和方法，提高对岩爆前兆信息的捕捉和识别能力，同时加强多源信息融合和智能算法的应用，提升预警的准确性和及时性。在控制技术上，要不断优化现有控制技术，开发新型高效的控制措施，提高控制技术的针对性和有效性，并加强控制技术与采矿工艺的深度融合，实现岩爆控制的智能化和自动化。此外，还应加强不同矿山之间的经验交流与合作，建立岩爆案例数据库，为岩爆预警与控制技术的研究和应用提供更丰富的实践依据。通过持续的研究和实践，逐步完善深部高应力矿床岩爆预警与控制技术体系，为我国深部矿产资源的安全高效开发提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 靖洪文, 吴疆宇, 尹乾, 等. 动载扰动下深部煤巷冲击冒顶的颗粒流数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S02): 13.
- [2] 朱广安, 蒋启鹏, 伍永平, 等. 基于“应力场—震动波场”的深部工作面合理终采线位置确定[J]. 煤炭学报, 2020(S2): 571-580.
- [3] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 千米深井大巷孤立煤体整体失稳冲击机理及防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019(5): 9. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2019.05.014.
- [4] 丁鑫品, 李凤明, 付天光, 等. 端帮采场覆岩移动破坏规律及边坡稳定控制方法[J]. 煤炭学报, 2021. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0884.
- [5] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 千米深井大巷孤立煤体整体失稳冲击机理及防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019. DOI: CNKI: SUN: KSYL.0.2019-05-015.