

煤层顶板多种灾害发生机理与协同防治技术

郑凯歌 张俭 孙四清 陈冬冬 王泽阳

引用本文:

郑凯歌, 张俭, 孙四清, 等. 煤层顶板多种灾害发生机理与协同防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 24–35.

ZHENG Kaige, ZHANG Jian, SUN Siqing, et al. Mechanisms and collaborative prevention and control techniques for various disasters in coal seam roofs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(5): 24–35.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.02.0120>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

坚硬顶板强矿压动力灾害演化机理与超前区域防治技术

Dynamic disaster evolution mechanism of high mine pressure at hard roof and advance area prevention and control technology
煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 62–71 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.04.0222>

复合关键层厚硬顶板诱冲机制与防治技术模式

Rock bursts induced by thick-hard roof with compound key strata: Mechanisms and technical modes for prevention
煤田地质与勘探. 2024, 52(10): 14–24 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.11.0788>

“八位一体”闭环式煤矿顶板水害管控模式的构建与应用

Construction and application of "eight in one" closed-loop management and control mode of roof water disaster in coal mines
煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 170–177 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.020>

矿井水害防控远程服务云平台构建与应用

Construction and application of remote service cloud platform for mine water hazard prevention and control
煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 208–216 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.022>

煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用

Application of microseismic monitoring system for coal mines to the prevention and control of water disasters on working face roofs
煤田地质与勘探. 2024, 52(6): 115–127 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0230>

黄陇煤田煤层顶板水害特征及其防控技术

Characteristics of roof water hazard of coal seam in Huanglong Coalfield and key technologies for prevention and control
煤田地质与勘探. 2023, 51(1): 205–213 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.10.0754>



移动阅读

郑凯歌, 张俭, 孙四清, 等. 煤层顶板多种灾害发生机理与协同防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 24–35. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0120

ZHENG Kaige, ZHANG Jian, SUN Siqing, et al. Mechanisms and collaborative prevention and control techniques for various disasters in coal seam roofs[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(5): 24–35. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0120

煤层顶板多种灾害发生机理与协同防治技术

郑凯歌^{1,2}, 张 俭¹, 孙四清¹, 陈冬冬¹, 王泽阳¹

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077;

2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 【目的】基于我国煤层多期沉积-构造演化形成的煤与瓦斯突出、突水、冲击地压等多灾害共生环境, 针对深部开采条件下高地应力-高水压-强采动耦合诱发的顶板多灾害链式演化难题, 系统开展了煤层顶板多动力灾害耦合机制与协同防治技术研究。【方法】通过区域构造特征分析与赋煤构造单元划分, 综合运用地质力学分析、灾害演化分析及技术模式构建等方法, 系统揭示了煤层顶板多动力灾害的耦合作用机制, 创新构建多灾害协同防控技术体系。【结果和结论】(1) 随着开采深度增加, 顶板灾害由单一模式向瓦斯-冲击地压-水害复合模式转变, 深部“三高一扰动”环境通过应力重分布-裂隙扩展-能量积聚的链式作用, 诱发冲击启动、水气互馈等灾害耦合效应; (2) 突破传统冲击-瓦斯二元耦合研究框架, 系统建立了包含巨厚含水层致冲、离层水-厚硬顶板联动等多灾害耦合模型, 阐明了采动裂隙网络贯通诱发气液运移-能量释放的跨灾耦合机理; (3) 创新提出“分源辨识-分类调控-协同防治”的技术路径, 研发形成包含定向长钻孔分段压裂、地面 L 型井群组改造等关键技术的“井上下联动、区域局部协同”五种防控模式。该成果为破解深部开采多灾种协同防控难题提供了理论依据和技术路径。

关键词: 顶板灾害; 耦合效应; 协同防控; 跨灾耦合; 防控模式

中图分类号: TD32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)05-0024-12

Mechanisms and collaborative prevention and control techniques for various disasters in coal seam roofs

ZHENG Kaige^{1,2}, ZHANG Jian¹, SUN Siqing¹, CHEN Dongdong¹, WANG Zeyang¹

(1. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: [Objective] The multistage sedimentary and tectonic evolution of coal seams in China has led to the formation of environments with the coexistence of multiple disasters including gas outbursts, water inrushes, and rock bursts. To address the chain evolution of these disasters induced by the coupling of high in situ stress, high water pressure, and intense mining under the condition of deep coal mining, this study systematically investigated the coupling mechanisms and collaborative prevention and control techniques of multiple dynamic disasters in coal seam roofs. [Methods] Based on the regional tectonic characteristics and the delineation of coal-bearing tectonic units, this study systematically revealed the coupling mechanisms of multiple dynamic disasters in coal seam roofs by integrating geomechanical analysis, disaster evolution analysis, and technical mode construction. Accordingly, this study innovatively developed the technology system for collaborative prevention and control of multiple disasters. [Results and Conclusions] The results indicate that with an increase in the coal mining depth, disasters in coal seam roofs have evolved from a single mode to a composite mode consisting of gas outbursts, rock bursts, and water disasters. In deep environments characterized by high

收稿日期: 2025-02-25; 接收日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807221); 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(2022XAYJS04); 陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目(2025JC-YBMS-397)

第一作者: 郑凯歌, 1988 年生, 男, 河南周口人, 博士, 副研究员。E-mail: 13655617009@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

in situ stress, high formation temperature, high water pressure, and strong mining disturbance, the chain effects of stress redistribution, fracture propagation, and energy accumulation induce the coupling effects of disasters such as rock burst initiation and water-gas interactions. By transcending the traditional binary coupling framework of rock bursts and gas outbursts, this study systematically developed a coupling model of multiple disasters including significantly thick aquifer-induced rock bursts and the linkage between water in the detachment layer and thick, hard coal seam roofs. Using this model, this study clarified the cross-disaster coupling mechanisms due to the gas and liquid migration and energy release induced by the interconnection of mining-induced fracture networks. This study innovatively proposed a technique path integrating source-based identification, classification-based control, and collaborative prevention and control. Furthermore, it developed five prevention and control modes characterized by surface-underground linkage and regional-local collaboration, involving critical technologies like multistage fracturing using directional long boreholes and the modification of L-shaped surface well groups. The results of this study will provide a theoretical basis and technical path for addressing the challenge of the collaborative prevention and control of multiple disasters in deep coal mining.

Keywords: disaster in coal seam roof; coupling effect; collaborative prevention and control; cross-disaster coupling; prevention and control mode

我国煤层在多期沉积、构造作用下,形成了煤与瓦斯突出、突水、冲击地压、冒顶等多灾害并存的赋存条件^[1-2]。在煤层前期开采时,各类灾害叠加耦合作用甚微,多表现为单一灾害模式。随着开采深度和强度的增加,多灾害耦合发生逐渐显现^[3]。尤其是在深部高地应力、高地温、高水压和强开采扰动的影响下,顶板多灾害共生、耦合作用逐步加深,各类顶板灾害出现不同程度的诱发、转化、叠加等关联现象^[4],单一灾害向两种或多种灾害联动发生转变,大幅增加了灾害严重程度。

国内外学者很早就认识到多灾害耦合发生的相互作用。冲击地压灾害监测结果显示,灾害发生过程瓦斯浓度大幅增加^[5-6]。据此,苏联佩图霍夫教授^[7]指出了瓦斯与冲击地压动力灾害应统一进行分析。潘一山^[8]针对冲击和瓦斯突出灾害,提出了复合动力灾害概念,并构建了统一失稳判别准则。李铁等^[9-10]指出高压瓦斯气体极有可能参与了冲击地压的形成,加剧了灾害危险程度。王振^[11]从能量本质角度,建立了冲击地压和瓦斯突出发生统一能量方程,构建了煤岩冲击与瓦斯灾害的分类体系。尹永明等^[12]划分了冲击型煤与瓦斯突出准备、发动、发展和终止4个灾害阶段,并对应分析了3种因素在各阶段的作用。

同时国内外学者对单一灾害的防治提出了行之有效的方法,主要有顶板定向长钻孔分段压裂区域防冲技术^[13-14],顶板爆破断顶与增透技术^[15-16],压注阻化剂瓦斯与灭火防治思路^[17],顶板水害超前疏放技术^[18-19],均得到广泛应用。同时,针对不同灾害归属多部门管理的难协调性问题^[20],提出了冲击煤层“钻-割-压-抽-注”多灾害协同防治技术思路。

以往主要针对冲击地压与瓦斯2种灾害耦合进行研究,且多为两者相互影响事实的阐述,缺乏灾害发生机理研究,其他各类灾害间的耦合叠加分析也鲜有涉及。同时,在单一灾害治理过程中,极易诱发其他灾害发生,如顶板爆破卸压防冲过程,诱发顶板水的涌出;地面井

体积压裂防冲时,大规模过度压裂,诱发断层活化和含水层沟通,引起煤矿开采过程中,架间淋水、溃沙等灾害,缺乏多灾害协同防治技术,这为顶板多灾害的防治带来了新的难题。基于此,笔者针对我国典型煤矿区灾害分布特征,提出多灾害耦合模式,分析顶板多种灾害发生机理,研发顶板多灾害协同防治技术,助力实现深地资源安全高效开采。

1 我国煤矿顶板灾害分布

多种成煤类型、强烈的后改造作用、极其复杂的煤层赋存等特征,导致我国煤层顶板油气、瓦斯、矿井突水、冲击地压、矿震等多种灾害并存。在强烈后期改造作用下,煤田呈现明显的分区、分带特征,形成了东北、华北、华南、西北及滇藏等五大赋煤构造区(图1)。

东北赋煤构造区受太平洋动力学作用影响,以兴蒙造山带为基底,在印支和燕山多期构造运动作用下,形成了东强西弱的改造格局。该区域顶板动力灾害具有由西向东复杂化的趋势,东部的鸡西、双鸭山等矿区为瓦斯、冲击地压及部分构造裂隙水害等多灾害共存。中部的阜新、辽源、铁法等存在瓦斯与冲击地压灾害复合灾害问题。

受区域构造活动带的整体影响,华北赋煤构造区形成了非对称的环状动力灾害分布特征,并呈现六大区带特征。其中,东部区域受到强张拉环境影响,负反转、复杂构造发育,具有瓦斯、突水、冲击地压等多顶板灾害赋存条件,新汶、鲍店、淄博等典型矿区表现突出。赋煤构造区南部在重力滑移、逆冲推覆等作用下,形成了瓦斯突出和局部冲击地压(矿震)等灾害分布特征,典型矿区有淮南、淮北、义马、平顶山等。同时,在山西东南区域受挤压作用及逆冲断裂带影响,瓦斯与水害发育,主要分布在阳泉、潞安、晋城等矿区。在鄂尔多斯盆地中西缘,受到挤压、逆冲推覆及褶皱的影响,且伴随近十年开采方向的西移,涌现出石拉乌素、纳林河、门克

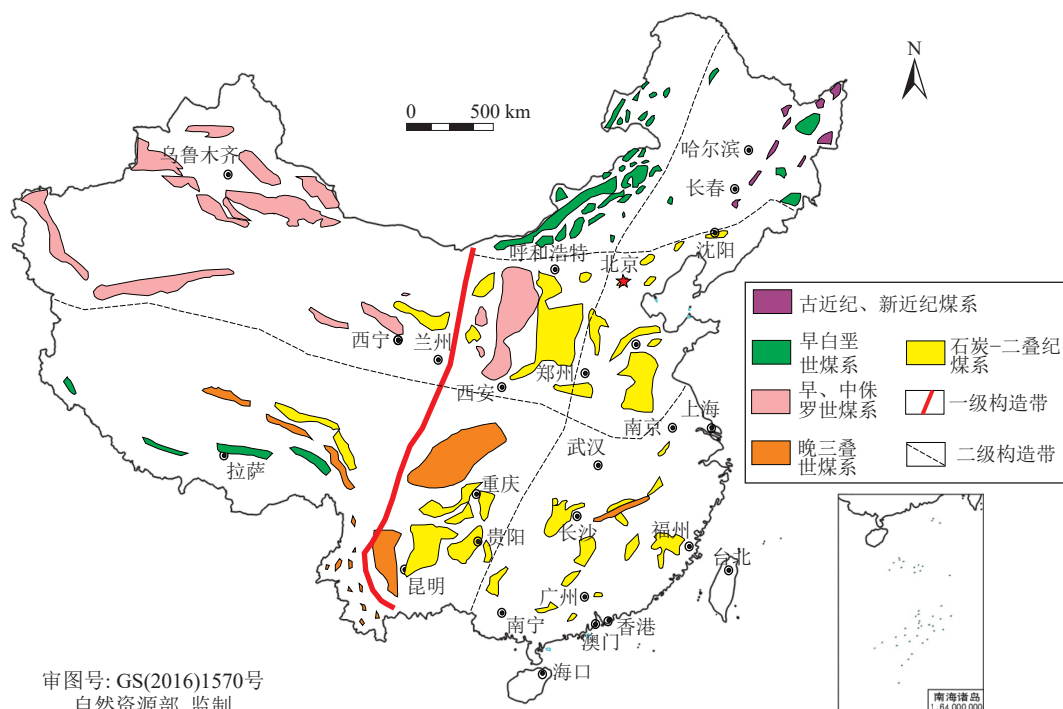


图 1 我国赋煤构造区格局

Fig.1 Distribution of coal-bearing tectonic regions in China

庆等典型冲击地压矿井,该区域主要赋存有瓦斯与冲击地压两类灾害,典型矿区有华亭、石嘴山、呼吉尔特等。在鄂尔多斯盆地东南缘构造影响程度有所减弱,受挤压、褶皱、逆断层作用,形成了瓦斯与水害并存的灾害结构,典型矿区有韩城、渭北等,并且在渭北的黄陵、铜川与甘肃庆阳一带形成了顶板油气灾害叠加的复杂条件。

中生代以来在构造-岩浆作用下,形成了典型的华南赋煤构造区,在强挤压、逆冲推覆等作用下,形成了以大巴山、广旺为代表的瓦斯与冲击地压灾害矿区。在挤压、隔挡及高陡褶皱及逆冲构造作用下,形成了南桐、松藻等瓦斯与水害赋存矿区。在复杂褶皱和挤压作用环境下,形成了煤炭坝、韶山为代表的瓦斯、水害及局部冲击地压灾害并存矿区。同时,在强挤压、逆冲构造作用下,形成了萍乡、新余为代表的瓦斯、水害及局部冲击地压灾害并存矿区。在逆冲构造作用下发育了宝鼎、资威等瓦斯灾害危险区域。

早、中侏罗世形成了低阶煤为主的西北赋煤构造区,在中等挤压环境及逆冲作用下,形成了艾维尔沟等为代表的瓦斯与局部水害及靖远、窑街的瓦斯灾害矿区。滇藏赋煤构造区煤炭资源甚少,占全国煤炭不足 0.3%,研究程度相对较低,现有煤矿多为露头坑采或小煤矿浅部开采,基本均已关闭,不做相关讨论。

按照我国赋煤构造区顶板灾害类型,我国顶板多灾害主体模式主要分为顶板巨厚含水层、冲击(矿震)耦合,顶板离层水、厚硬顶板冲击耦合,薄基岩弱胶结层整体

切落冲击、水砂涌出的耦合,复合厚硬顶板冲击与矿震耦合等(图 2)。顶板多灾害耦合,易引发采掘面大量出水、地表异常沉降及矿震、诱发采掘面冲击、瓦斯与油气突出等灾害。

2 煤矿顶板多灾害联动诱灾机理

传统的采矿理论认为,煤层开采后顶板由下至上分为“垮落带”、“裂隙带”和“弯曲下沉带”。该理论在顶板厚硬岩层发育条件下无法适用,垂向破裂高度在遇到厚硬岩层时会发生短暂的“停滞”或者是“延迟破断”现象^[21-22]。该类现象增大了顶板破断扰动强度,更易诱发顶板突水、瓦斯急剧增加或油气异常涌出等多灾害联动。根据顶板冲击、水害、瓦斯及油气等灾害内在关联性,绘制顶板多灾害总体结构(图 3)。顶板多灾害发生的基础条件是采场周边存在瓦斯、水、油气等致灾介质。当巷道系统受到动静载荷扰动时,引发覆岩运移破断产生冲击能和诱导裂隙形成导流通道。扰动作用会导致冲击能、承压水及气态介质通过不同形式进入采掘空间,进而形成异常能量场。该能量场将对工作面、采空区及巷道等关键区域产生冲击、流体冲刷等复合破坏效应。不同类别的顶板多灾害类型在发生、发展过程受到多因素综合作用影响,其主要由灾害源、耦合路径、动力源综合控制。

2.1 顶板冲击与瓦斯突出(涌出)

在采掘面初采阶段,厚硬顶板岩层受高水平应力挤

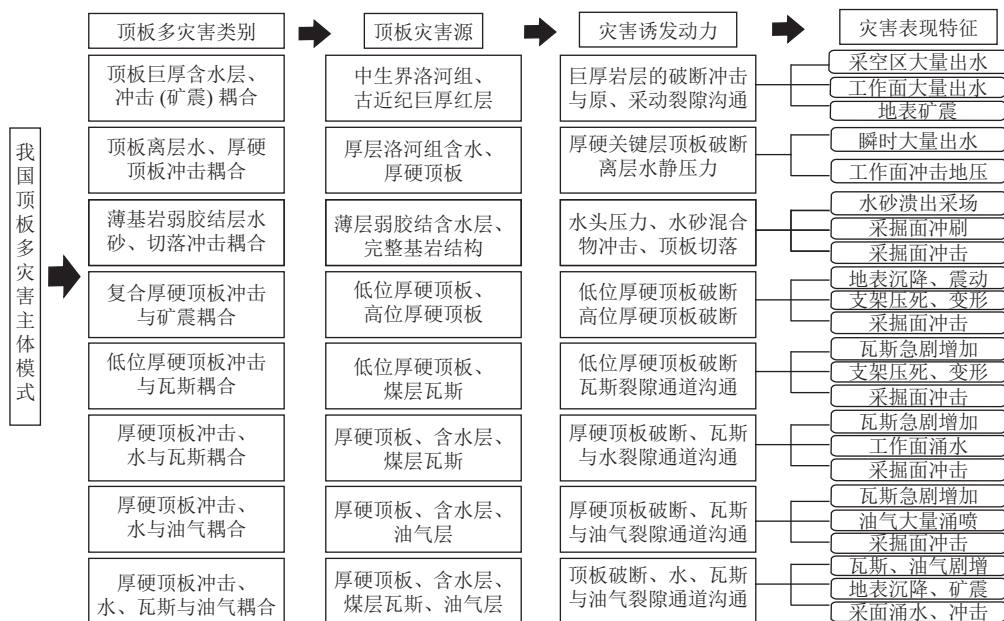


图2 我国顶板多灾害主体模式

Fig.2 Major multi-disaster modes of coal seam roofs in China

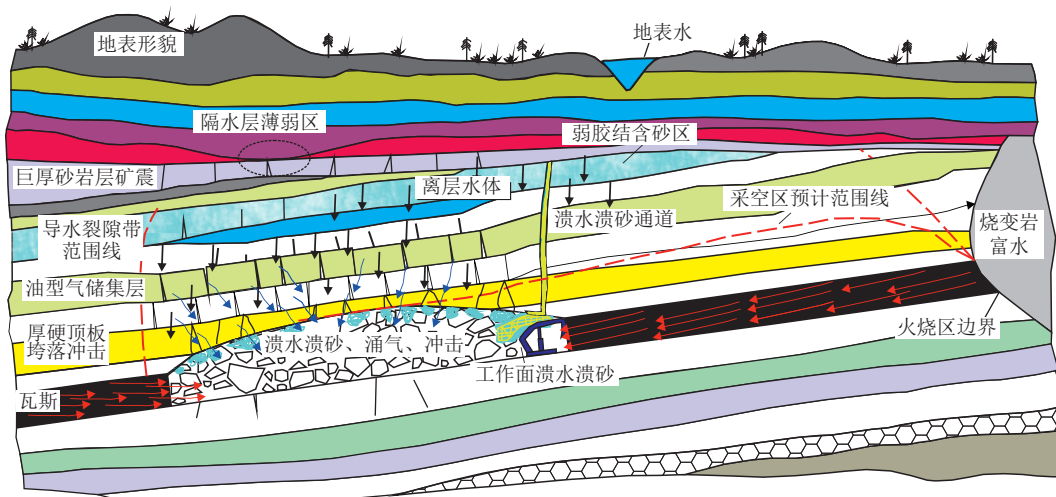


图3 不同类型煤层顶板灾害类型

Fig.3 Disaster types in different types of coal seam roofs

压,作用于巷道或初采空间,同时受到上覆岩层自重应力作用下,在水平和垂向上发生挠曲变形,积聚高能量,并受到巷道两帮浅部煤体变形产生的挤压应力,形成煤与瓦斯封闭带。当厚硬顶板达到破断条件,释放集聚弹性能量,诱发冲击地压发生,破坏煤与瓦斯封闭带,诱导高瓦斯集聚区推动发生煤与瓦斯突出。

同时在工作面回采见方、周期来压阶段,达到破断强度,形成冲击地压,并造成大规模飓风,带动采空区瓦斯形成冲击和瓦斯聚集,诱发瓦斯超限或瓦斯突出(图4)。

2.2 巨厚顶板冲击(矿震)与涌水

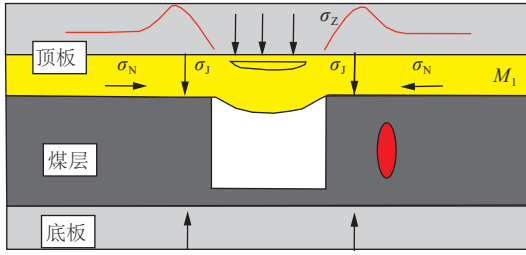
巨厚顶板同时为含水层的条件下,具有高静载能量储集、超高破断扰动动能、稳定突水水源,为冲击(矿震)、突水进程提供水源和动力源。在该条件下,易形成

超长悬顶破断,形成原生裂隙与采动裂隙的融通通道,诱发不同程度的地面矿震和井下冲击地压,并促使巨厚顶板含水层在高水头压力和裂隙通道作用下全面下泄,并快速运移至采掘工作面,引发异常涌水或突水灾害(图5)。

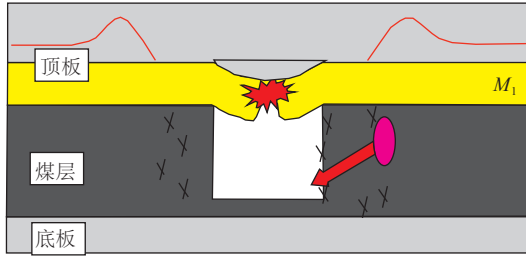
2.3 顶板冲击与离层水涌水

针对顶板离层突水系统灾害问题,曾一凡等^[19]构建了概化圆弧力学模型(图6),首先分析了静水压力作用下离层下位岩层破断原则。通过力学分析,得出单位厚度及面积下离层水体压力,并结合上位岩层抗弯强度,综合破断条件,计算得出离层下位岩层破断临界准则公式:

$$\sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + a^2\right)^3} - a^3 - \frac{3}{4}aL \geq \frac{25qL_1^2}{8h_1} \quad (1)$$



(a) 顶板冲击与瓦斯灾害孕育阶段



(b) 顶板冲击与瓦斯灾害发生阶段

注: M_1 为巷道顶板坚硬岩层; σ_N 为 M_1 两端受高应力作用变形膨胀产生水平挤压应力, MPa; σ_Z 为受岩层 M_1 及其上覆岩层自重应力, MPa; σ_j 巷道两帮浅部煤体受到变形产生的挤压应力, MPa。

图 4 煤层顶板冲击与瓦斯突出发生过程

Fig.4 Occurrence of a rock burst and gas outburst of a coal seam roof

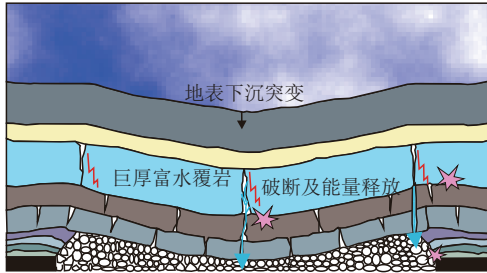


图 5 巨厚顶板覆岩运移

Fig.5 Migration of the significantly thick overburden of a coal seam roof

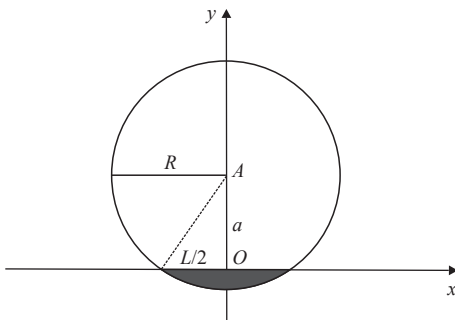
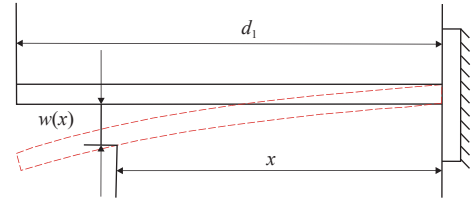


图 6 离层下位岩层概化圆弧力学模型

Fig.6 Generalized arc mechanical model for rock layers below a detachment layer

通常在未经过任何采掘活动条件下,顶板离层水多处于静态平衡状态,离层上位厚硬顶板破断时,可简化厚硬顶板为两段式悬臂梁,构建离层上位厚硬顶板破断诱灾力学模型(图 7)。根据挠曲线方程可知,厚硬顶板蓄积静载能量 $U_f^{[23-24]}$ 为:



注: m_r 为第 r 段悬臂梁自重, kg; v_r 为第 r 段悬臂梁铰支端转速, m/s; w_r 为第 r 段悬臂梁角速度, m/s; d_r 为第 r 段悬臂梁长度, m; Δh 为第 r 段悬臂梁垂向位移, m; n 为离层上位岩层之上岩层层数。

图 7 离层上位岩层破断悬臂梁概化模型

Fig.7 Generalized model for the cantilever beam of fractured rock layers above a detachment layer

$$U_f = \int_0^{d_1} \left[\frac{x^2}{24EI} (x^2 - 4d_1x + 6d_1^2) \right] q dx = \frac{q^2 d_1^5}{20EI} \quad (2)$$

厚硬岩层破断垮落产生的冲击势能 U_z 为:

$$U_z = \sum_{r=1}^2 \left(\frac{q^2 d_r^5}{20EI} + \frac{1}{2} m_r v_r^2 + \frac{1}{2} m_r v_r^2 d_r^2 - m_r g \Delta h \right) \quad (3)$$

则冲击动载 P_r 为:

$$P_r = \frac{1}{w(x)} \sum_{r=1}^2 \left(\frac{q^2 d_r^5}{20EI} + \frac{1}{2} m_r v_r^2 + \frac{1}{2} m_r v_r^2 d_r^2 - m_r g \Delta h \right) \quad (4)$$

$$m_r g \Delta h - \frac{2\phi m h^2}{w(x)} \sqrt{\frac{R_T}{3q}}$$

$$\begin{cases} L \geq 2h \sqrt{R_T/3q} & \text{①} \\ \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + a^2 \right)^3} - a^3 - \frac{3}{4} a L \geq \frac{25qL_1^2}{8h_1} & \text{②} \\ P_r + p \geq 4.17 \times 10^4 q L_1^2 / h_1 & \text{③} \end{cases} \quad (5)$$

当式(5)中条件①和③成立,条件②反面成立时,顶板大规模破断,易诱发冲击地压,并伴随离层突水灾害。其主要在离层富水体静载水压条件下促使下位岩层逐步发生损伤,但单纯富水载荷未触及下位岩层的极限垮落条件。当厚硬顶板达到极限破断距突然垮落后,产生大量冲击能量的同时,对离层富水体产生动载冲击扰动并经离层水体传递至下位岩层,使其劣化失稳破坏沟通导水裂隙,形成了冲击、飓风及突水多灾害(图 8)。

2.4 薄基岩整体切垮落冲击与水-砂溃涌

随着煤炭开采向西部转移,西部浅埋薄基岩煤层开采强度不断增加,水-砂混合物溃涌与基岩整体切落引发的大面积强矿压显现或冲击地压成为主要灾害形式^[25-26]。其成灾机制受三要素协同控制:基岩整体破断的力学条件、水源补给系统及砂源物质基础。其中,基岩关键层的破断行为起主导控制作用——采掘扰动作用下,当关键层发生整体切落失稳时产生显著的结构突变效应,形成强烈的冲击扰动波,这是诱发复合灾害的核心动力源。另外,基岩原生裂隙等结构条件与采掘扰动裂隙耦合-融通形成导水裂隙网络,地表砂和基岩富

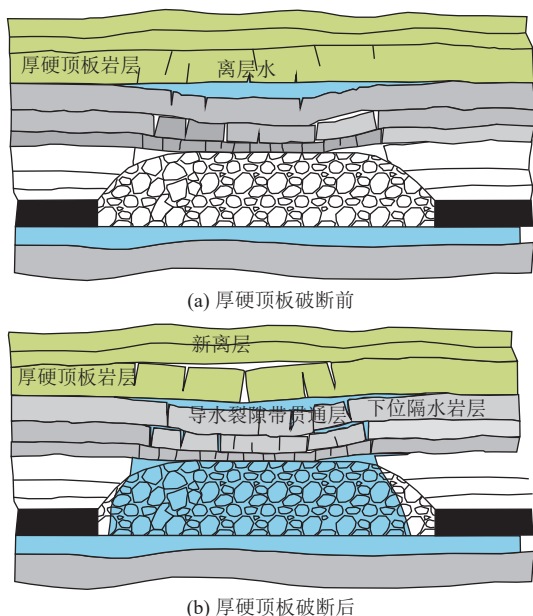


图8 动静载复合扰动冲击与突水

Fig.8 A rock burst and water inrush under the combined disturbances of dynamic and static loads

水体在水压作用下沿裂隙通道快速运移,并促使弱胶岩层崩解运移。在以上因素叠加影响下,导流通道持续延伸扩展,破断能量加剧,水、砂溃涌体量迅增,诱发水、砂耦合溃涌和冲击灾害(图9)。

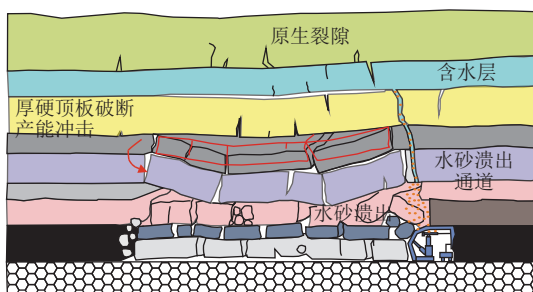


图9 薄基岩水-砂耦合溃涌与冲击

Fig.9 Water-sand coupling inrushes and rock bursts in thin bedrock

2.5 厚硬顶板冲击、水、瓦斯与油气耦合致灾

鄂尔多斯盆地整体从晚三叠世之后,经过了漫长的“形成-发展-消亡”的演化过程,形成了完整的“湖泊-三角洲相”沉积演化旋回,为厚硬顶板的赋存提供了良好的地质条件。尤其是鄂尔多斯盆地南缘黄陵矿区,发育了多个厚硬顶板油气储盖组合,形成了冲击、水、煤油气共存的客观条件^[27-30]。依托顶板多灾害一体化理论,将具有瓦斯、油气、冲击与水灾害的煤岩体视作固、液、气共同体,并将冲击、瓦斯、水及油气异常涌出多灾害整体考虑,研究顶板多灾害机理。

厚硬顶板在原始条件下处于能量平衡状态,原生裂隙及构造作用形成的软弱结构体处于亚平衡状态,在采掘扰动作用下,采掘空间发生变形和裂隙扰动,产生额

外动能作用,亚平衡状态最先被打破,并瞬时释放大量能量,诱发顶板灾害发生。依托厚硬顶板应力及变形特征分析,建立了围岩蓄积能量计算方程。

$$W_s = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (6)$$

含油气储层多为砂岩,油气主要以游离态为主,储存于厚硬砂岩中形成油气压力。在采掘扰动条件下,油气储集层产生变形和裂隙,发生卸压,油气储集层能量释放。该过程释放膨胀能同时对下伏岩层做功,促进油型气扩散并涌出裂隙空间的进一步能量释放,诱发油气异常涌出灾害。根据油气储集能量瞬时释放特点(能量释放时间 40 s),将涌出过程近似看作绝热状态,利用热力学定理,推导出围岩气膨胀能^[31]的计算公式为:

$$W = \frac{m}{U} c_v T_2 \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (7)$$

通过分析可知,该油气膨胀能主要受到初始油气压力和扰动后的油气压力的比值 p_0/p_1 控制。

当厚硬顶板运移破断后,顶板蓄积能量和油气涌出能量作用于煤层或采空区空间瓦斯,诱发瓦斯异常涌出,瓦斯涌出能量表达式:

$$W = 1000 \frac{p_0 V_0}{n-1} \left[\left(\frac{p_{rs}}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (8)$$

整体上,冲击地压、瓦斯、水、油气共同赋存时,具有气、固、液灾变特征,多种灾害在发生和发展过程中相互诱导、互为补强。在静载应力、开采扰动应力、瓦斯(油气)及水压力耦合作用下,采掘工作面煤岩体变形,诱导微裂隙持续发育。当煤岩体应力大于峰值强度,将形成煤岩体塑性区,顶板蓄能区形成,在变形破坏作用下,增大煤岩体渗透性,形成裂纹裂隙区,气、水运移富集,形成高压气、液聚集区。当该煤岩系统达到临界状态,在采掘扰动影响下,系统失稳,煤岩蓄能释放,诱发冲击地压。同时煤岩体塑性变形区加大,内部裂隙结构立体式发育,瓦斯、油气及水不断涌入裂隙体系,当充满裂隙空间,储集平衡失稳,发生气、水突出,引发顶板复合灾害(图10)。

顶板冲击地压、水、瓦斯及油气协同失稳的共同本质在于采掘扰动的多物理场耦合能量积聚与突然释放。核心为采掘活动造成于不同应力、渗流、损伤等多场相互作用的系统失稳。失稳过程中伴随应力-渗流-损伤的动态耦合,关系如下:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k(D)}{\mu \phi} \nabla^2 p + \alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (9)$$

顶板固体灾害主要是受到关键岩层的大规模运移

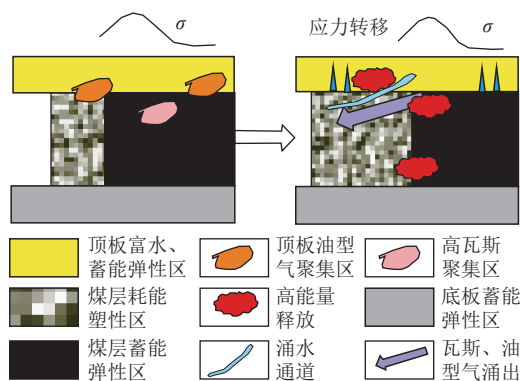


图 10 多灾害协同演化过程

Fig.10 Coevolutionary process of multiple disasters

破断造成的应力及能量场变化控制,水害受到水压、岩体损伤因素影响,瓦斯、油气灾害受到瓦斯(油气)压力和岩体损伤造成的裂隙场变化影响。由此分析,顶板多灾害联动诱发的边界条件可归纳为:

$$\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma_c} + \frac{p_w}{p_c} + \frac{D}{D_c} \geq 1 \quad (10)$$

该统一边界条件的本质是多物理场动态耦合约束,核心是采掘活动诱发的应力、渗流、损伤的内外联动机制,因此,对于顶板多灾害防治的关键是控制顶板破断运移规模,抑制采场应力、能量的变化,防治岩体损伤引发的气、液条件的灾变。

3 分源分类协同防治技术模式

针对煤层顶板多灾害耦合发生特点,提出了构建“分源辨识-分类调控-协同防治”技术体系的思路,主要包括固-液-气灾害层位探查、复合灾害类别划分、灾害源分类、分类防治技术和多灾害协同治理模式等。顶板多灾害模式主要分为厚硬顶板诱发的冲击及矿震固体复合灾害,厚硬顶板与水形成的冲击与水固液复合灾害,厚硬顶板与瓦斯(油气)形成的冲击、矿震与瓦斯(油气)固气复合灾害和厚硬顶板、水与瓦斯(油气)形成的固液气灾害(图 11)。

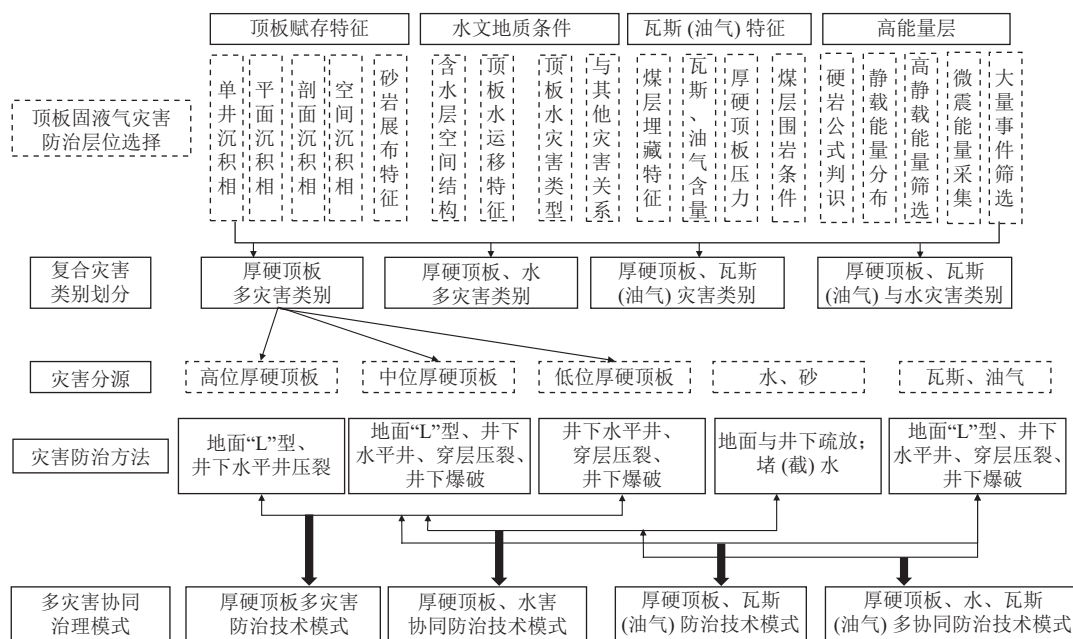


图 11 顶板多灾害协同防治技术体系

Fig.11 Technology system for collaborative prevention and control of multiple disasters in coal seam roofs

3.1 厚硬顶板多灾害协同治理模式

厚硬顶板发育条件下,易形成大面积悬顶,发生突然破断现象,释放大量瞬时能量,诱发矿震与冲击地压等矿压动力灾害,该类灾害以控制顶板破断步距和扰动强度为途径^[32-33]。依据顶板多灾害协同治理目标层位选择结果,分析灾害发生条件,并将厚硬顶板矿压动力灾害按照灾害源分为单一厚硬顶板和复合厚硬顶板灾害。单一厚硬顶板灾害可细分为高、中、低位灾害源层,复合厚硬顶板灾害细分为灾害源层的两两组合及三种灾害源层的相互叠加耦合。

针对低位灾害源层采用常规钻孔压裂、井下爆破或定向长钻孔压裂进行防治;对中位灾害源层采用井下爆破、常规钻孔压裂、定向长钻孔分段压裂或地面“L”型井分段压裂进行防治;对高位灾害源层采用井下定向长钻孔压裂或地面“L”型井上位关键岩层压裂进行防治,建立厚硬顶板灾害分源治理模式(图 12)。

3.2 厚硬顶板与水灾害协同治理模式

我国西部蒙陕地区煤炭开采强度逐年增加,普遍受到厚硬顶板和顶板水的双重威胁。目前对于水害和厚硬顶板矿压动力灾害多为单一灾害类型考虑进行防治,

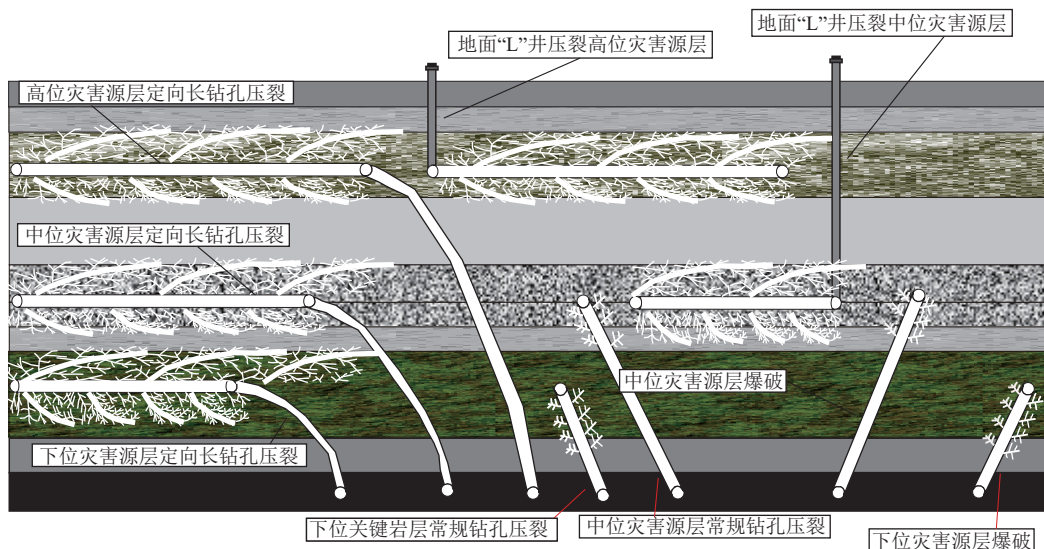


图12 厚硬顶板多灾害协同防治体系

Fig.12 Collaborative prevention and control mode of multiple disasters in thick, hard coal seam roofs

如水害防治以超前预疏放为主,冲击地压以井下大直径卸压、井下爆破为主。针对顶板水与厚硬顶板矿压动力灾害复合灾害,以控制覆岩运移与裂隙场对含水层(区域)的导通为途径,提出构建顶板冲击(矿震)与水害协同治理模式。针对水害防治主要分为疏排降水和注浆改造两种方法,后者多为加固和增加隔水层的隔水能力,难以形成厚硬顶板冲击(矿震)动力灾害防治的协同控制。卸压与疏排降水是协同有效解决两种灾害的重要途径,该模式分为含水层与顶板矿压动力灾害为同一灾害源层和相邻灾害源两种情况。同一灾害源层利用井下中型规模($1\sim 3\text{ m}^3/\text{min}$)定向长钻孔分段压裂进行区域改造,通过人造缝网加速水源疏放,同时降低厚硬顶板完整性和悬顶长度,抑制大能量释放,实现水害和顶板矿压动力灾害的协同控制。相邻灾害源层条件下,采用井下大规模($3\sim 5\text{ m}^3/\text{min}$)多孔定向长钻孔分段压裂区域改造或地面大规模($10\sim 20\text{ m}^3/\text{min}$)“L”型水平井压裂,通过压裂改造,实现冲击(矿震)灾害区域卸压减冲(降震),同时对顶板含水层与离层水层形成沟通立体缝网,加速水的疏放(图13)。

3.3 厚硬顶板与瓦斯(油气)灾害协同治理模式

鄂尔多斯盆地经历了多期的湖泊—三角洲相沉积演化旋回,形成了煤层、油气、瓦斯等多种资源赋存的基本格局,同时发育了多层厚硬顶板。煤矿开采过程中面临本煤层瓦斯、围岩油气及顶板矿压动力灾害等顶板多源灾害气体威胁。

以为控制顶板扰动强度和增大瓦斯(油气)运移通道为途径,提出地面和井下超长水平井(水平段 $>800\text{ m}$)分段压裂区域卸压增透技术模式,建立煤层—顶底板人造裂缝体系,达到厚硬顶板的弱化改造和油气、瓦斯快

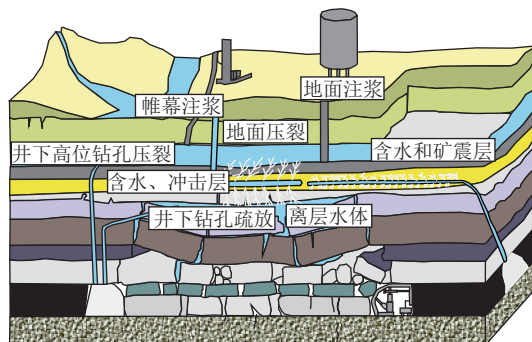


图13 厚硬顶板与水灾害协同防治体系

Fig.13 Collaborative prevention and control mode of thick, hard roofs and water disasters

速运移目的,实现顶板矿压动力灾害、油气与煤层瓦斯超前、区域、协同防治。地面“L”型和井下反“L”型梳状长钻孔进行顶板油气和采空区遗留瓦斯协同抽采,并对厚硬顶板进行弱化改造,实现区域“消冲减震”。同时,在本煤层布设定向长钻孔,并辅以分段压裂增透改造,实现煤层厚硬顶板动力灾害、瓦斯及油气的协同控制(图14)。

3.4 薄基岩冲击与水—砂溃涌协同治理模式

我国西部矿区浅埋薄基岩工作面普遍发育,尤其是侏罗系煤田神府矿区。煤田内部厚煤层发育广泛,埋深小,基岩比小,采掘扰动强度大,极易诱发煤层顶板岩层整体切落,诱发冲击(矿震)灾害,同时引发顶板水涌入采空区,并伴随溃砂灾害。采用“分源、协同”治理原则,通过地面或者井下长钻孔区域注浆对隔水层改造,形成涌水溃砂阻隔带,并利用地面或井下长钻孔对含水层进行超前疏放,减少物源供给,降低涌水溃砂风险。同时,通过井下长钻孔裸眼分段压裂技术,对厚硬顶板进行区域弱化改造,有效减弱覆岩运移,降低周期来压

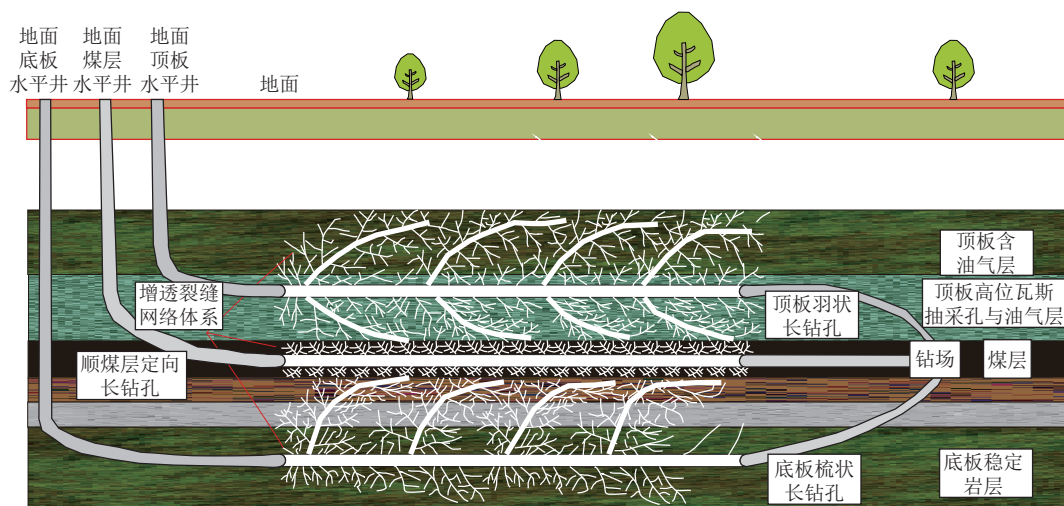


图 14 厚硬顶板与瓦斯(油气)灾害协同防治体系

Fig.14 Collaborative prevention and control mode of thick, hard roofs and gas (oil and gas) disasters

步距,减小采动能量,防治厚硬顶板诱发的冲击(矿震)动力灾害,形成“井上、井下”长钻孔区域卸压、隔水层改造、超前疏放的薄基岩冲击与水-砂溃涌协同防治模式(图 15)。

大规模运动,大幅降低裂隙发育程度,避免离层水和裂隙水涌入采掘空间。同时,实现顶板油气和冲击(矿震)控制源层静态管控,大幅减弱或消除油气突出、冲击地压(矿震)灾害(图 16)。

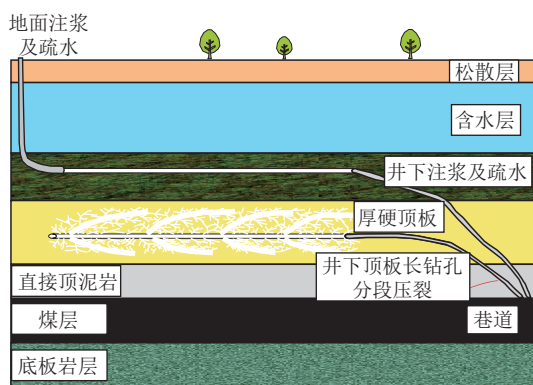
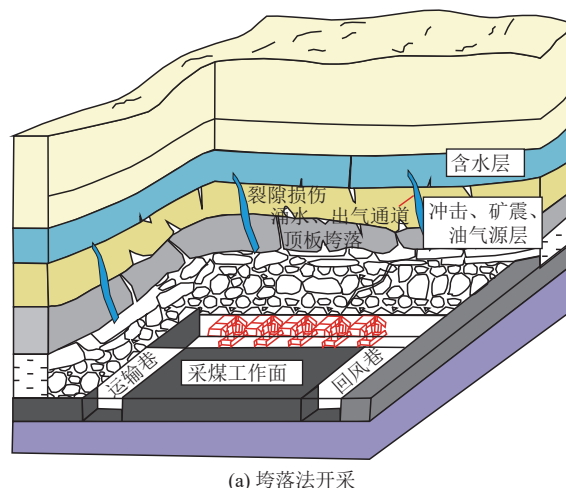


图 15 薄基岩冲击与水-砂溃涌协同防治体系

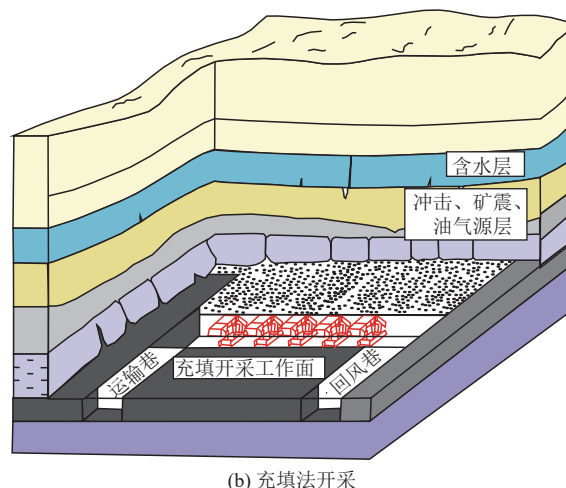
Fig.15 Collaborative prevention and control mode of rock bursts of thin bedrock and water-sand coupling inrushes

3.5 厚硬顶板、水、瓦斯、油气灾害协同治理模式

随着矿井开采强度和深度的加大,顶板呈现多灾害赋存特征。在陕西黄陵矿区煤层顶板普遍发育厚硬顶板,且分布有冲击地压矿井。煤层开采过程中常受洛河组水威胁,同时煤层瓦斯含量较高,多为高瓦斯矿井,煤层顶板赋存有大量油气,多次出现油气异常涌出现象。整体面临厚硬顶板、水、瓦斯(油气)灾害的多重威胁。针对多灾害威胁情况,可采用以上区域压裂与爆破等防治方法进行分源分类治理,在此不再赘述。顶板灾害的产生,源于采掘扰动的整体影响,控制采场运移是进行灾害协同的关键。近年来,充填开采技术已广泛应用到“建筑物下、铁路下和水体下”采煤领域,通过地面固体充填或者井下原位矸石充填可实现采掘空间的有效填充,有效抑制上覆岩层的变形与运移,消除厚硬顶板



(a) 垮落法开采



(b) 充填法开采

图 16 垮落法与充填法覆岩裂隙演化特征

Fig.16 Evolutionary characteristics of fractures in the overburden induced by coal mining using the caving and filling methods

4 结论

(1) 我国煤层顶板灾害分布广泛、发生频次高、类型繁多、致灾性强,具有明显的分区、分带特征。在东北、华北、西北等五大赋煤构造区内形成顶板油气、瓦斯、矿井突水、冲击地压、矿震等不同组合类别的顶板多灾害条件。其发生机理是瓦斯、水、油气等灾害因素在动静载扰动下覆岩运移破断或诱导裂隙产生的冲击能、水、气的同涌或突等不同形式进入采场,产生异常顶板灾害的不同破坏形式。

(2) 针对不同顶板灾害类型,划分了顶板多灾害组合类别,分析了不同组合下灾害源,提出了“分源辨识-分类调控-协同防治”的技术方法,构建了厚硬顶板冲击与矿震,厚硬顶板与水灾害,薄基岩冲击与水-砂溃涌,厚硬顶板和瓦斯(油气),厚硬顶板、水、瓦斯、油气等5种多灾害协同防治模式。

(3) 顶板灾害防控需突破传统单一灾种治理模式,向“精准分源辨识-多灾协同防控”方向转型。依据顶板多灾害协同防治技术模式,建立多场多源数据融合灾害源辨识体系和灾害链推演技术及透明化表征方法,在灾害孕育阶段实施“灾害链阻断+防控链耦合”的立体防控策略。

符号注释:

a 为离层下位岩层圆弧的整圆圆心到其顶界距离, m; c_v 为定容分子热容量; d_1 为悬臂梁任意点处至固支端的距离, m; D 为岩体损伤, $\frac{\partial D}{\partial t} = f(\sigma_{\text{eff}}, p, s)$; D_c 为单一场条件损伤临界值; d_r 为第 r 段悬臂梁长度, m; E 为岩层弹性模量, GPa; h_1 为下位岩层厚度, m; Δh 为第 r 段悬臂梁垂向位移, m; I 为截面惯性矩, m^4 ; $k(D)$ 为损伤相关的渗透率函数, $k(D) = k_0 \exp(\beta D)$; L 为极限破断距, m; L_1 为下位岩层在离层空间范围内的长度, m; m 为油气的质量, g; m_r 为第 r 段悬臂梁自重, kg; n 为甲烷绝热系数,取值 1.31; U 为油气的分子量; p 为离层空间水体对下位岩层产生的总压力, MPa; $p_{0,g}$ 为巷道大气压, 0.1 MPa; p_g 为瓦斯压力, MPa; p_0 、 p_1 分别为油气初始压力及扰动后压力, MPa; p_c 为单一场条件水压临界值, MPa; q 为离层上位岩层上覆均布载荷, MPa/m; R_f 为岩层抗拉强度, MPa; p_s 为实际油气压力, MPa; p_w 为单一场条件水压, MPa; T_2 为采掘面油气的绝对温度, K; V_0 为参与突出的瓦斯含量, cm^3/g ; v 为岩层泊松比; v_r 为第 r 段悬臂梁铰支端转速, m/s; W 为单位岩石油型气膨胀能, J/m^3 ; w_r 为第 r 段悬臂梁角速度, m/s; α 为 Biot 系数; β 为损伤-渗透率敏感系数; ζ_v 为岩体体积应变; σ_1 为最大主应力; σ_2 为中间主应力; σ_3 为最小主应力;

MPa; σ_c 为单一场条件应力临界值, MPa; σ_{eff} 为有效应力($\sigma - p$), MPa; φ 为岩层孔隙率, %。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 曹代勇, 占文锋, 李焕同, 等. 中国煤矿动力地质灾害的构造背景与风险区带划分[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2376–2388.
CAO Daiyong, ZHAN Wenfeng, LI Huantong, et al. Tectonic setting and risk zoning of dynamic geological disasters in coal mines in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2376–2388.
- [2] 曹代勇, 宁树正, 郭爱军, 等. 中国煤田构造格局与构造控煤作用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [3] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825–1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [4] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716–725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716–725.
- [5] OGIEGLO K, LUBRYKA M, KUTKOWSKI J, 等. 矿山震动对工作面瓦斯涌出量的影响[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(2): 109–111.
- [6] (苏)艾鲁尼(Айруни, Арсен Тигранович). 煤矿瓦斯动力现象的预测和预防[M]. 唐修义, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [7] 佩图霍夫. 预防冲击地压的理论与实践[C]//第22届国际采矿安全会议论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1987.
- [8] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105–112.
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 105–112.
- [9] 李铁, 蔡美峰, 王金安, 等. 深部开采冲击地压与瓦斯的相关性探讨[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 562–567.
LI Tie, CAI Meifeng, WANG Jin'an, et al. Discussion on relativity between rockburst and gas in deep exploitation[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5): 562–567.
- [10] 李铁, 梅婷婷, 李国旗, 等. “三软”煤层冲击地压诱导煤与瓦斯突出力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1283–1288.
LI Tie, MEI Tingting, LI Guoqi, et al. Mechanism study of coal and gas outburst induced by rockburst in “three-soft” coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1283–1288.
- [11] 王振. 煤岩瓦斯动力灾害新的分类及诱发转化条件研究[D]. 重

- 庆: 重庆大学, 2010.
- WANG Zhen. Study on new classification and induction and transforming conditions of dynamic sisasters in coal mine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [12] 尹永明, 张兴凯, 姜福兴, 等. 冲击型煤与瓦斯突出力学机制及危险性评价技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 801–809.
- YIN Yongming, ZHANG Xingkai, JIANG Fuxing, et al. Study on mechanical mechanism and danger evaluation technology of coal and gas outburst induced by rockburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 801–809.
- [13] 郑凯歌, 杨俊哲, 李彬刚, 等. 基于垮落充填的坚硬顶板分段压裂弱化解危技术[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 77–87.
- ZHENG Kaige, YANG Junzhe, LI Bingang, et al. Collapse filling-based technology of weakening and danger-solving by staged fracturing in hard roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 77–87.
- [14] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 322–333.
- ZHENG Kaige, YUAN Liang, YANG Sen, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 322–333.
- [15] 张健玉. 深部开采煤层底板岩层深孔控制爆破损伤特征及裂纹演化规律[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- ZHANG Jianyu. Damage characteristics and crack evolution law of deep hole controlled blasting of coal floor in deep mining[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024.
- [16] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 切缝药包超前预裂爆破厚硬顶板矿压与瓦斯综合防治试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 334–345.
- QIAO Guodong, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study on the control of mine pressure and gas governance in thick and hard roof by pre-blasting of slotted cartridge[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 334–345.
- [17] 李方琳, 张雷林, 韦健. 防火凝胶泡沫的制备与阻化特性研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 34–38.
- LI Fanglin, ZHANG Leilin, WEI Jian. Study on preparation and characteristics of gel foam for preventing fire[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 34–38.
- [18] 虎维岳, 姬亚东, 黄欢. 煤层顶板承压含水层涌水模式与疏放水钻孔优化设计[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 139–146.
- HU Weiye, JI Yadong, HUANG Huan. Mine water inflow modes and scientific design of drainage boreholes in roof confined aquifer of coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 139–146.
- [19] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层顶板水害致灾机理与防控路径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1539–1555.
- ZENG Yifan, ZHU Huicong, WU Qiang, et al. Disaster-causing mechanism and prevention and control path of different types of coal seam roof water disasters in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1539–1555.
- [20] 李艳增, 周睿. 冲击地压煤层复合多灾协同防治技术及应用[J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 90–96.
- LI Yanzeng, ZHOU Rui. Collaborative control and prevention technology of multi-disaster control of rock burst coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 90–96.
- [21] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 基于关键层控制的部分充填采煤技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1): 013504.
- XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Partial back-filling coal mining technology based on key strata control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013504.
- [22] 李建辉, 郑凯歌, 李军, 等. 大采高坚硬顶板工作面关键层破断结构及强矿压防治技术研究[J]. 中国煤炭, 2025, 51(3): 59–69.
- LI Jianhui, ZHENG Kaige, LI Jun, et al. Research on the fracture structure of the key layer of the working face of the hard roof of the large mining and the prevention and control technology of strong mine pressure[J]. China Coal, 2025, 51(3): 59–69.
- [23] 吴钊钦. 动载扰动下小煤柱沿空巷道围岩控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- WU Mentai. Research on surrounding rock control of gob-side roadway with small coal pillars under dynamic load disturbance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [24] 赵娜, 王来贵. 坚硬顶板初次垮落中的能量转化及释放研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 38–43.
- ZHAO Na, WANG Laigui. Study on energy conversion and releasing during initial collapse of hard roof[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(2): 38–43.
- [25] 汪北方, 蒋嘉祺, 刘学生, 等. 浅埋厚松散层薄基岩综采工作面开采覆岩切落体结构分析及应用[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 3011–3021.
- WANG Beifang, JIANG Jiaqi, LIU Xuesheng, et al. Analysis and application of sheared and fallen roof structure during shallowly buried fully mechanized mining under thick loose bed and thin base rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 3011–3021.
- [26] 杨登峰, 陈忠辉, 朱帝杰, 等. 基于顶板切落的浅埋煤层开采支架工作阻力研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 286–292.
- YANG Dengfeng, CHEN Zhonghui, ZHU Dijie, et al. Support capacity at roof cutting in mining of shallow coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup.2): 286–292.
- [27] 郑凯歌, 孙四清, 赵继展, 等. 黄陵矿区围岩气体成因及致灾机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 139–146.
- ZHENG Kaige, SUN Siqing, ZHAO Jizhan, et al. Study on genetic and destructive mechanism of gas from surrounding rock in Huangling mining area[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 139–146.
- [28] 孙四清. 煤油气共存矿井掘进工作面底板油型气涌出机理探讨[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(4): 90–94.
- SUN Siqing. Discussion on oil-type gas emission mechanism from heading face floor in coal-oil-gas coexisting mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(4): 90–94.
- [29] 赵继展, 张群, 郑凯歌, 等. 黄陵矿区煤矿井下围岩喷涌气体致灾机理及防治措施[J]. 天然气工业, 2018, 38(11): 114–121.
- ZHAO Jizhan, ZHANG Qun, ZHENG Kaige, et al. Disaster-causing mechanism of surrounding rock gas flowing underground in

- the Huangling coal mine and prevention measures[J]. [Natural Gas Industry](#), 2018, 38(11): 114–121.
- [30] 孙东玲, 曹偲, 杨慧明, 等. 陕西侏罗纪煤层瓦斯灾害特点及突出发生条件的探讨[J]. [矿业安全与环保](#), 2024, 51(3): 1–7.
- SUN Dongling, CAO Jie, YANG Huiming, et al. Discussion on characteristics and outburst conditions of Jurassic coal seam gas disaster in Shaanxi Province[J]. [Mining Safety & Environmental Protection](#), 2024, 51(3): 1–7.
- [31] 刘高峰, 李宝林, 张震, 等. 不同变质煤的瓦斯膨胀能演化特征及其突出预测启示[J]. [煤田地质与勘探](#), 2023, 51(10): 1–8.
- LIU Gaofeng, LI Baolin, ZHANG Zhen, et al. Gas expansion energy of coals with different metamorphic degrees: Evolutionary characteristics and their implications for the outburst prediction[J]. [Coal Geology & Exploration](#), 2023, 51(10): 1–8.
- [32] 解嘉豪, 崔峰, 韩刚, 等. 深埋煤层临空面开采覆岩结构失稳机理与防治技术[J]. [西安科技大学学报](#), 2024, 44(6): 1050–1059.
- XIE Jiahao, CUI Feng, HAN Gang, et al. Instability mechanism and prevention technology of overlying rock structure in the mining of deep-buried coal seam free face[J]. [Journal of Xi'an University of Science and Technology](#), 2024, 44(6): 1050–1059.
- [33] 郑凯歌, 王林涛, 李彬刚, 等. 坚硬顶板强矿压动力灾害演化机理与超前区域防治技术[J]. [煤田地质与勘探](#), 2022, 50(8): 62–71.
- ZHENG Kaige, WANG Lintao, LI Bingang, et al. Dynamic disaster evolution mechanism of high mine pressure at hard roof and advance area prevention and control technology[J]. [Coal Geology & Exploration](#), 2022, 50(8): 62–71.

(责任编辑 范章群)