

低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂增透技术及应用

李毛 范新川 符辉

引用本文:

李毛, 范新川, 符辉. 低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂增透技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 46–53.

LI Mao, FAN Xinchuan, FU Hui. A phase transition-induced fracturing permeability enhancement technology using carbon dioxide capsules for low-permeability coal seams and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(5): 46–53.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.02.0087>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

静态致裂作用下低渗厚煤层瓦斯增透数值模拟研究

Numerical simulations of enhancing permeability and gas extraction of thick coal seams through static fracturing

煤田地质与勘探. 2023, 51(11): 1–12 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.04.0161>

构造煤层顶板爆破跨界面致裂增透机制研究及应用

Mechanism and application of cross-interface fracturing for permeability enhancement through the roof blasting of tectonic coal seams

煤田地质与勘探. 2024, 52(4): 35–46 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.07.0447>

CO₂相变致裂煤的显微构造特征与成因机制

Characteristics and formation mechanisms of microstructures in coal treated with CO₂ phase transition fracturing

煤田地质与勘探. 2023, 51(2): 137–145 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.07.0570>

中硬低渗煤层定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术与应用

Technology and application of high efficiency gas extraction by directional long borehole hydraulic fracturing in coal seams of medium hardness and low permeability

煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 103–108,115 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.014>

可控电脉冲波增透技术在低透气性煤层中的应用

Application of controllable electric pulse wave permeability-enhancing technology in the low-permeability coal seams

煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 138–145 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.020>

煤矿井下高压端连续水力加砂压裂增透技术与装备研究

Study of technologies and equipment of continuous hydraulic sand fracturing for permeability enhancement at high pressure side of coal mine downhole

煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 54–61 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.03.0191>



移动阅读

李毛, 范新川, 符辉. 低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂增透技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 46–53. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0087

LI Mao, FAN Xinchuan, FU Hui. A phase transition-induced fracturing permeability enhancement technology using carbon dioxide capsules for low-permeability coal seams and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(5): 46–53. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0087

低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂增透技术及应用

李毛, 范新川, 符辉

(中国平煤神马控股集团有限公司, 河南平顶山 467000)

摘要: 【目的和方法】针对低渗透性煤层开采受限于瓦斯含量高、压力大且抽采效率低等工程难题, 研究了低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂煤层增透技术, 该技术利用二氧化碳在高压环境下转变为超临界状态的特性, 通过胶囊封装临界二氧化碳放入导管内, 然后由导管放置到煤层内部, 并通过加热爆破启动装置触发相变爆破。使液态二氧化碳迅速气化并膨胀, 产生高压冲击波, 实现对煤层产生预裂作用。致裂过程不产生火花, 易在煤层中形成裂隙, 提高煤层的透气性。【结果和结论】(1) 这项技术能够有效地增加煤层的裂隙网络, 显著提升煤层的透气性。通过测算每个 1.4 kg 胶囊液态二氧化碳量在发生相变致裂时, 其爆炸威力等同于 243 克 TNT 的爆炸当量。二次致裂后, 其影响半径逐渐增大, 显示出良好的时效性。(2) 现场应用效果证实了该技术提升瓦斯抽采纯量 2~4 倍, 甲烷体积分数增加 2~3 倍, 致裂影响半径提升了 1.5~2.0 倍。现场监测瓦斯抽采钻孔在 18、30、60、90 及 120 d 的瓦斯抽采效果, 发现抽采影响半径随着抽采时间的增加而递增。初期增速明显, 随后增幅逐渐减小; 随着时间延续, 抽采影响半径增长幅度趋于平缓, 与抽采时间的关系渐趋稳定, 致裂后实测有效抽采半径在 2.45~4.95 m, 证实该技术在煤层瓦斯抽采中具备良好的时效性与持续性。(3) 在进行致裂处理后, 研究区域内煤层透气性系数显著增加, 由之前的 $0.0096 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 提升至 $0.577 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。此外, 由于二氧化碳作为致裂介质, 可以来源于工业排放或封存的二氧化碳, 因此, 这项技术是一种绿色的增透手段, 具有重要的环境和社会效益。

关键词: 煤层增透; 胶囊二氧化碳; 相变致裂; 超临界二氧化碳; 致裂半径; 瓦斯抽采

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)05-0046-08

A phase transition-induced fracturing permeability enhancement technology using carbon dioxide capsules for low-permeability coal seams and its application

LI Mao, FAN Xinchuan, FU Hui

(China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: [Objective and Methods] To address engineering challenges like high gas content, high pressure, and low drainage efficiency in the mining of low-permeability coal seams, this study developed a phase transition-induced fracturing and permeability enhancement technology using carbon dioxide (CO_2) capsules for low-permeability coal seams. This technology leverages the feature that CO_2 transitions into the supercritical state under high pressure. A capsule encapsulating critical CO_2 is placed into a conduit, which is then placed within a coal seam. Subsequently, phase transition-induced blasting is triggered using a heating blasting start device. Consequently, liquid CO_2 vaporizes rapidly and expands, generating high-pressure shock waves, which induce pre-fracturing of the coal seam. The fracturing process, producing no sparks, is prone to form fractures in coal seams, thus enhancing coal seam permeability. [Results and Conclusions] The results indicate that the technology developed in this study can effectively increase the quantity of fracture

收稿日期: 2025-02-07; 接收日期: 2025-04-30

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51925404)

第一作者: 李毛, 1968 年生, 男, 河南遂平人, 博士, 教授级高级工程师。E-mail: 23671614@qq.com

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

networks in coal seams, thereby significantly enhancing the coal seam permeability. Calculations reveal that during phase transition-induced fracturing, each capsule containing 1.4 kg of liquid CO₂ can release explosive power equivalent to 243 g of trinitrotoluene (TNT). After secondary fracturing, the gas drainage influence radius gradually expands, indicating high timeliness. The field application effects demonstrate that this technology increased the pure gas drainage by 2 to 4 times, the volume fraction of methane by 2 to 3 times, and the gas drainage influence radius by 1.5 to 2.0 times. The field monitoring of the gas drainage effects of boreholes at 18, 30, 60, 90, and 120 d reveals that the gas drainage influence radius increased with time. Specifically, the influence radius increased rapidly in the initial stage, followed by a gradual decrease in the increasing amplitude. With time, the increasing amplitude of the gas drainage influence radius tended to level off, presenting a gradually stabilizing relationship with the drainage time. The effective drainage radius after fracturing measured from 2.45 m to 4.95 m. All these demonstrate that the fracturing technology developed in this study enjoys high timeliness and sustainability in gas drainage from coal seams. After fracturing, the permeability coefficient of the coal seam in the study area increased significantly from 0.009 6 m²/(MPa²·d) to 0.577 m²/(MPa²·d). Additionally, since CO₂, as the medium inducing fracturing, can be sourced from industrial emissions or stored CO₂, the fracturing technology proposed in this study serves as a green permeability enhancement method, enjoying significant environmental and social benefits.

Keywords: permeability enhancement for coal seams; CO₂ capsule; phase transition-induced fracturing; supercritical carbon dioxide; fracturing radius; gas drainage

随着我国煤炭资源开发的持续深入,高渗透性煤层储量逐渐减少,低渗煤层开采占比不断攀升。低渗透性煤层瓦斯含量高、压力大且吸附瓦斯的游离解析速度慢,造成瓦斯抽采困难,矿井瓦斯灾害多发^[1]。为了提高低渗煤层抽采率,传统的采动卸压增透^[2]、水力压裂^[3]、水力冲孔^[4]、水力割缝^[5-7]、液氮压裂^[8]、高压空气爆破增透^[9]、超声波致裂^[10]等技术应运而生。然而,低渗透煤层因赋存特性特殊,孔隙、裂隙系统发育与瓦斯运移机理复杂,针对低渗透煤层的应用效果并不理想^[11-12],致使相关技术的适应性及在工程应用中遇到诸多瓶颈。

超临界二氧化碳相变致裂技术作为一种新型的煤层增透技术,具有传统物理和化学致裂方法所不具备的优势。超临界二氧化碳在特定条件下具有极高的扩散性和溶解性,能够有效渗透到煤层微细裂隙中,通过相变过程产生巨大的内应力,从而在煤层中形成新的裂隙网络,爆破时,不产生火花。显著提高煤层的透气性。此外,该技术还具有环保、成本低、操作简便等优点,为煤层增透和瓦斯抽采提供了新的思路和方法。目前,国内学者针对低渗煤层增透、二氧化碳致裂等问题,展开了一系列的理论和实践研究。试验研究证实,超临界CO₂流体的低黏度和强扩散性可有效降低煤的起裂压力阈值,同时促使裂缝转向和分叉^[13-14],这为理解CO₂在岩石中的致裂机制提供了基础数据。基于ANSYS/LS-DYNA模拟实验获得液态CO₂相变破岩的裂纹扩展形态及深部煤层CO₂注入煤的力学响应特征,进一步揭示了CO₂相变致裂的力学过程^[15-17],试验证实煤层液态CO₂相变致裂增透技术是可行的^[18-19]。温度、压力、煤体孔隙率是影响超临界CO₂增透煤储层的核心因素,CO₂注入煤层后在煤体中形成气楔效应,诱发微裂隙扩展,使煤层连通孔隙率提高32%,形成更利于

气体渗流的孔隙网,这是CO₂相变致裂增透的作用机理^[20-25]。基于水力压裂和超临界CO₂压裂的对比试验得出,超临界CO₂压裂后的样品裂缝断面更加复杂,表面粗糙度更大,起裂压力更低^[26-27],现场抽采试验确定了液态CO₂相变致裂对抽采有效半径有显著影响^[28-31]。然而,超临界二氧化碳相变致裂技术在低透气性煤层中应用的适应条件及效果还需进一步深入研究。

为此,笔者从胶囊式充装设备的模块化设计原理入手,解析致裂装置运行过程、能量释放机制,量化煤体裂隙圈影响半径,动态监测甲烷体积分数、纯量及影响范围的时间演化特征。并选取平顶山矿区采深620 m附近低渗透性煤层作为研究对象,构建致裂物理模型,进行现场工业性试验,系统研究胶囊二氧化碳相变致裂技术效果。为低渗透性煤层的瓦斯治理和高效开采提供一种新的、有效的煤层增透技术方案。

1 低渗煤层临界胶囊二氧化碳相变致裂技术原理

低渗煤层胶囊临界二氧化碳相变致裂技术是一种新型的煤层增透技术,其核心原理在于利用二氧化碳在特定条件下的相变特性来实现煤层的致裂。二氧化碳在低于31 °C且压力大于7.35 MPa时以液态存在,当温度超过31 °C时,液态二氧化碳开始汽化。因此,在临界点附近,二氧化碳的相变过程对温度和压力的变化非常敏感。

使用胶囊封装二氧化碳可以有效地控制二氧化碳在煤层中的分布和释放,且使胶囊在注入煤层后,确保二氧化碳在达到临界点之前不会发生泄漏,从而确保在适当的位置和条件下进行致裂。胶囊的使用还有助于控制二氧化碳的释放速率,使得相变过程更加稳定和可控。

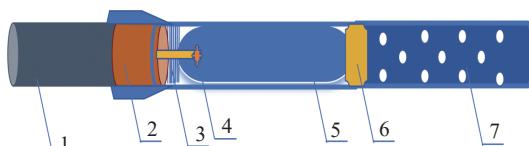
1.1 胶囊二氧化碳充装设备

胶囊二氧化碳充装的总体要求是保证二氧化碳能够以高效且安全的形式被封存于胶囊之内,为致裂作业提供所必需的介质。该工艺需准备高纯度的液态二氧化碳作为充装原料。液态二氧化碳需经过严格的净化处理,确保其纯度满足致裂作业标准。净化步骤包括去除杂质、水分及其他可能影响致裂效果的成分。设备通常包括二氧化碳储液罐、充填泵、精密电子秤、低温冷凝系统以及胶囊封装装置等关键组件。这些组件协同工作,实现液态二氧化碳的精确计量、低温冷凝以及胶囊的快速封装。

在充装过程中,液态二氧化碳先被泵入储液罐,随后通过低温冷凝系统进一步冷却,确保其在封装过程中保持稳定的液态。之后,将精确计量的液态二氧化碳注入胶囊,并通过特定的封装技术,如热封或机械压封,完成胶囊的密封。液态二氧化碳从储存容器中取出后,进入增压系统,将其压力提升至8~10 MPa,确保充装过程的稳定性和致裂效果。在此过程中,需严格监控压力和温度,防止二氧化碳提前进入超临界状态。在充装环节,增压后的液态二氧化碳被注入特制的高压储液管中。这些储液管具备高强度抗压能力,确保在致裂过程中能承受高压气体的冲击。充装过程中,需精确控制充装量和压力,确保每个致裂胶囊内的二氧化碳量符合设计标准。

1.2 致裂装置与过程

将封装液态二氧化碳的胶囊安放在预裂钻孔内,通过特定的装置激活胶囊,使液态二氧化碳迅速汽化并膨胀,产生高压冲击波。这一冲击波对煤层产生强烈的预裂作用,形成复杂的裂隙网络,从而显著提升煤层的透气性。预裂后的煤层中,瓦斯运移通道得到极大扩展,游离瓦斯比例增加,使得瓦斯抽采变得更加容易。同时,由于二氧化碳的置换作用,原本吸附在煤体中的瓦斯被二氧化碳驱替出来。前端连接头处,可以更换不同类型的筛孔释放管,优化致裂效果,可进一步提高了瓦斯的解吸速率和抽采量。胶囊CO₂相变致裂装置系统如图1所示。



1—导通管; 2—转换接头; 3—缓冲层; 4—加热爆破启动装置;
5—CO₂胶囊; 6—连接头; 7—筛孔释放管

图 1 胶囊CO₂相变致裂装置系统

Fig.1 Setup for phase transition-induced fracturing using a CO₂ capsule

导通管径50 mm,构建起低阻、稳定的能量与物质传输通道,确保整个系统在复杂工况下保持良好的连通性与可靠性。转换接头采用高强度合金材质与先进密封工艺,可承受100~200 MPa的超高压力,实现不同组件间的无缝对接和介质的高效转换,保障系统运行的流畅性。

缓冲层利用纳米复合材料与特殊结构设计,厚度仅为5~10 mm,能在瞬间冲击发生时,通过能量耗散与吸收机制,迅速衰减30%~50%的冲击能量,全方位保护内部精密结构免受损伤。加热爆破启动装置集成超高速能量释放模块,能在5~10 ms的极短时间内,将强大能量聚焦注入CO₂胶囊,瞬间将胶囊内温度提升至500~800 °C,促使CO₂快速达到超临界状态并完成气液相变。

CO₂胶囊采用高容量、轻量化设计,充装1.4 kg的液态CO₂,在相变过程中体积呈600~800倍的指数级膨胀。高压气体经具备高连接强度(80~150 MPa)的连接头,导向筛孔直径2~5 mm的筛孔释放管,以300~500 m/s的速度喷射而出,产生100~300 MPa的超高压冲击,作用于目标介质,高效实现致裂。

在二氧化碳爆破致裂的影响下,煤体会沿着径向发生位移,同时钻孔周边的煤体会经历径向的压缩以及切向的拉伸作用。当切向上的拉伸应力达到或超过煤体的极限抗拉强度,煤体就会因为承受不住而发生破坏,形成裂隙。在二氧化碳高压气体膨胀的区域内,可以通过霍克-布朗准则^[32]计算来预估初始裂隙的分布范围:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

1.3 物理致裂机制与爆炸能量计算

1.3.1 物理致裂机制

相变致裂装置内部配备有发热管、定压泄能片和排气头等组件。当需要进行致裂作业时,通过微电流激发发热管,产生的高温瞬间将胶囊内的液态二氧化碳汽化,体积急剧膨胀600多倍,形成高压冲击波。这一过程中,高压液态二氧化碳冲破定压泄能片,瞬间释放出的巨大能量作用于周围的煤层,导致煤体破裂,形成裂隙,从而实现煤层的致裂。

致裂机制的核心在于在低渗煤层中的二氧化碳的物理相变过程,整个煤层中不涉及化学反应。因此,不会产生高温、明火及有害气体,安全性较高。同时,由于二氧化碳是惰性气体,不易燃易爆,储存与运输也相对安全。通过调整爆破筒内的液态二氧化碳量和发热管的加热强度,可以精确控制致裂的能量大小,实现致裂效果的精细化调控。

1.3.2 爆炸能量计算

与传统的爆破、水力压裂相比,二氧化碳相变致裂

技术的能量释放更加可控,且不会产生有害的化学残留物。其能量释放的规模可以通过调整胶囊内二氧化碳的充注量和操作条件来控制,从而达到预期的致裂效果。

在能量的等效 TNT 当量计算方面,可以通过能量释放量与标准 TNT 爆炸能量的比较来估算。TNT 当量是衡量爆炸威力的一个标准单位,通常以 TNT 炸药爆炸时释放的能量为基准。临界二氧化碳相变致裂技术的能量释放虽然与 TNT 爆炸不同,但可以通过实验测定其能量释放量,并将其转换为相应的 TNT 当量,以便于比较和应用。

可使用二氧化碳储罐物理爆炸能量的计算公式^[33]来评估胶囊二氧化碳爆破能量。

$$E_g = \frac{p_1 V}{K-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (2)$$

胶囊破裂端材料的厚度为 5.2 mm,爆破所需的小压力需超过 276 MPa,胶囊中液态二氧化碳的质量为 1.4 kg,由此可推算出胶囊二氧化碳爆破释放的能量为

$$W = \frac{E_g}{Q} = \frac{\frac{p_1 V}{K-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}{Q} = \frac{1\,031.37}{4\,250} = 243 \quad (3)$$

基于以上参数计算,储存于该型号储液管中的 1.4 kg 液态二氧化碳在发生相变致裂时,其爆炸威力等同于 243 g 的 TNT 的爆炸当量。

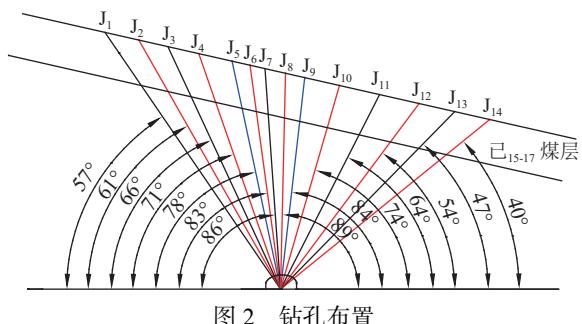
2 现场效果评价

2.1 现场试验效果与评价

现场试验设置在平煤十三矿己₁₅₋₁₇-11111 机巷底抽巷进行,研究区煤层瓦斯含量为 2.89~16.97 m³/t,瓦斯压力 0.2~3.6 MPa。煤层厚度在 4.35~6.20 m,平均 5.8 m,煤层倾角 10°~19°,埋深 620 m,煤层透气性系数为 0.009 6 m²/(MPa²·d)。根据现场测量,钻孔流量衰减系数为 0.063 7 d⁻¹,属于瓦斯难抽采的煤层。

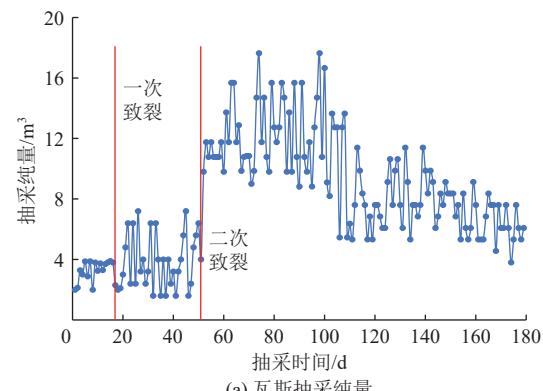
为避免干扰保证试验的准确性,考察巷道总长度 10 m,布置 14 个扇形钻孔为一组,编号分别为 J₁—J₁₄。J₅ 和 J₉ 为胶囊二氧化碳致裂孔,其余为抽采观测孔。钻孔布置,如图 2 所示。

施工方案:(1)首先进行抽采观测钻孔的施工,顺序为 J₂、J₄、J₆、J₈、J₁₀、J₁₂、J₁₄、J₁、J₃、J₇、J₁₁、J₁₃。每完成一个观测钻孔的施工,立即进行封孔并开始抽采瓦斯。(2)当这组钻孔施工全部结束并且抽采瓦斯达到 7 d 后,在施工完 J₅ 致裂孔后,立即进行胶囊二氧化碳致裂爆破作业;爆破后,立即封孔并开始抽采瓦斯。(3)一旦 J₅ 致裂孔周边的钻孔甲烷体积分数或瓦斯流量下降达

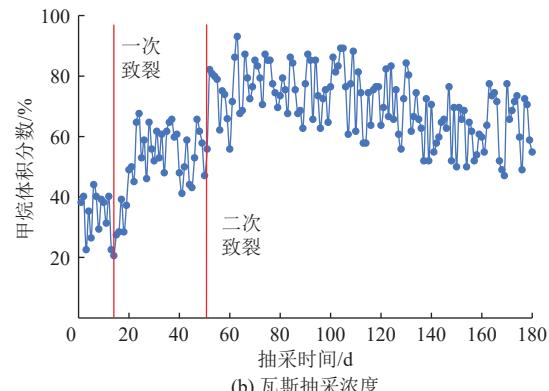


到 50%,则进行 J₉ 致裂孔的施工。

在 J₁—J₁₄ 中选取 2 个距离较远的 J₂、J₇ 孔作为观测钻孔,进行了分析对比。研究 2 个钻孔在 J₅ 和 J₉ 致裂前后的瓦斯抽采纯量以及瓦斯抽采浓度的改变,结果如图 3—图 4 所示。施工完成后,对每个钻孔进行封孔,并将 14 个联接的支流管接入主干管。支流管配备 14 个端口,确保各组钻孔均通过独立支管路、主干管路同时进行瓦斯抽采浓度和流量参数监测。



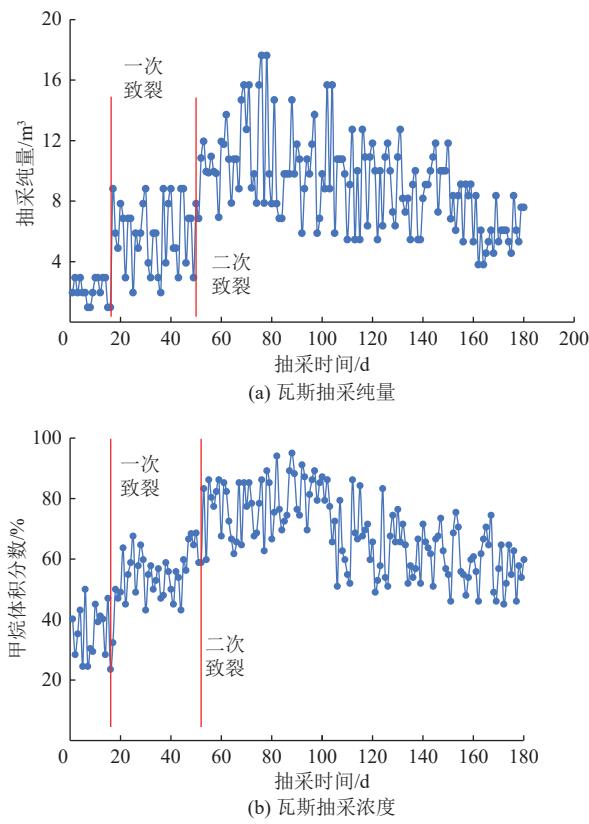
(a) 瓦斯抽采纯量



(b) 瓦斯抽采浓度

图 3 J₅ 钻孔瓦斯抽采参数随时间变化趋势
Fig.3 Time variation trends of the gas drainage parameters of borehole J₅

J₅ 孔首次进行液态二氧化碳相变致裂后,钻孔的瓦斯抽采量开始增加。由于前后两次致裂的时间间隔较短,完成第一次致裂钻孔的瓦斯抽采纯量、甲烷体积分数逐渐上升,己₁₅₋₁₇ 煤层的透气性也开始提升,这使得瓦斯抽采效果得到改善。在 J₉ 孔进行第二次致裂后,

图 4 J₉ 钻孔瓦斯抽采参数随时间变化趋势Fig.4 Time variation trends of the gas drainage parameters of borehole J₉

30 d 范围内, 钻孔瓦斯抽采纯量、甲烷体积分数保持在较高水平。随着时间的推移, 100 d 后瓦斯流量才开始逐渐降低, 这说明相变致裂使得抽采影响半径随着时间的推移而扩大, 但达到一定范围后便稳定下来, 之后出现正常的衰减趋势。

2.2 致裂影响半径

依据煤层瓦斯流动理论, 随着时间的推移, 钻孔内的瓦斯流量表现出逐渐减少的倾向, 其变化规律大致符合负指数函数。

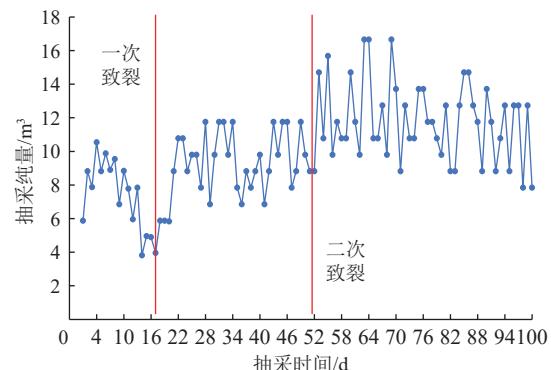
$$q(t) = q_0 \exp(-at) \quad (4)$$

在抽采 t 时间后, 钻孔瓦斯抽采的总量

$$Q_c = \int_0^t q(t) dt \quad (5)$$

J₁—J₁₄ 钻孔在致裂前后平均瓦斯抽采纯量呈衰减趋势。如图 5 所示, 在实施液态二氧化碳相变致裂煤层增透技术之前, J₁ 至 J₁₄ 钻孔的日常平均瓦斯抽采纯量显示出自然下降的趋势。然而, 在第 18 天进行首次相变致裂后, 瓦斯的抽采纯量得到了提升, 并且能够维持在较高的水平, 衰减速率也有所减缓, 平均瓦斯抽采纯量大约是致裂前的 1.5 倍。在第 52 天第二次致裂之后, 瓦斯抽采纯量进一步增加, 达到致裂前的 2.7 倍左右。瓦斯抽采平均纯量先是上升, 然后逐渐下降。因此, 其

变化趋势大致与式(4)表示的瓦斯流动理论方程相符, 其变化规律大致符合负指数函数。

图 5 J₁—J₁₄ 钻孔致裂前后平均瓦斯抽采纯量变化Fig.5 Variations in average pure gas drainage from boreholes J₁—J₁₄ before and after the fracturing

根据以上负指数函数规律, 未相变致裂前 18 d, J₁—J₁₄ 钻孔共抽采瓦斯纯量 165.185 m³, 拟合初始的瓦斯流量 10.9 m³, 流量衰减系数为 0.0197 d⁻¹, 得到拟合参数模型为

$$q(t) = 10.9 \exp(-0.0197 t) \quad (6)$$

根据相变致裂 180 d 后, J₁—J₁₄ 钻孔抽采纯量为 2 397.05 m³, 拟合初始的瓦斯流量 27.8 m³, 得到拟合参数模型为

$$q(t) = 27.8 \exp(-0.0095 t) \quad (7)$$

J₁—J₁₄ 钻孔在致裂后的流量衰减系数为 0.0095 d⁻¹, 致裂后初始时的瓦斯流量为 27.8 m³/d。

根据《防治煤与瓦斯突出细则》, 将煤层瓦斯含量 8 m³/t 作为区域预测所依据的临界值。因此, 对研究区域的瓦斯总抽采量进行如下模型测算。

$$Q_g = \rho \pi R^2 h (Q_w - 8) \quad (8)$$

$$Q_g = \rho \pi R^2 h (Q_w - 8) = 10 214.10 \text{ m}^3 \quad (9)$$

在致裂前, 通过拟合函数计算得出, 单个钻孔在 18 d 内的总瓦斯抽采量为

$$Q_c = \int_0^t q(t) dt = \int_0^{18} 10.9 \exp(-0.0197 t) dt = 165.185 \quad (10)$$

在致裂后, 通过拟合函数计算得出, 单个钻孔在 30 d 内的总瓦斯抽采量为

$$Q_c = \int_0^t q(t) dt = \int_0^{30} 27.8 \exp(-0.0095 t) dt = 725.685 \quad (11)$$

研究区域所需设置的抽采钻孔数目 N 为

$$N = \frac{Q_g}{Q_c} = 14 \quad (12)$$

当研究区域实现预期的抽采效果时, 钻孔的有效抽采半径为

$$r = \frac{R}{\sqrt{N}} = 2.67 \text{ m} \quad (13)$$

因此,通过计算胶囊CO₂致裂后钻孔瓦斯流量衰减规律,当预抽期达到18 d时,进行第一次压裂,钻孔的有效抽采半径大约是2.13 m。采用相同的方法,可以推算出预抽期为30、60、90和120 d时的累计瓦斯抽采量分别为725.68、1 271.41、1 681.80和1 990.42 m³。相应地,这些预抽期的有效抽采半径计算结果为2.67、3.54、3.90和4.41 m。随着时间的推移,抽采影响半径逐渐增加,根据拟合曲线,得出影响半径随时间变化的曲线,如图6所示。但增长速度会随着抽采时间的延长而减缓。当时间持续增加时,抽采影响半径与抽采时间之间的关系将趋于稳定。数据见表1。

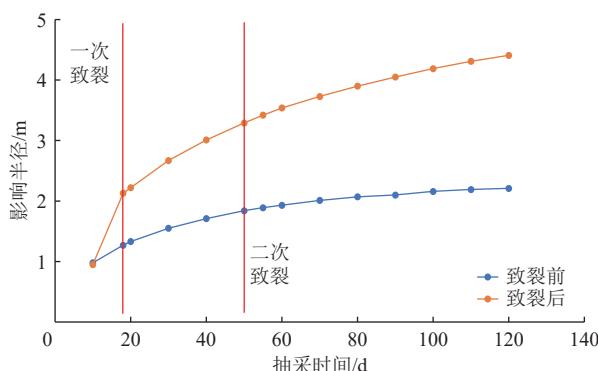


图6 影响半径随时间变化的曲线

Fig.6 Curves showing the time variations of the gas drainage influence radii of boreholes

表1 胶囊二氧化碳致裂前后钻孔影响半径

Table 1 Gas drainage influence radii of boreholes before and after fracturing using CO₂ capsules

抽采时间/d	致裂前钻孔影响半径/m	致裂后钻孔影响半径/m
18	1.27	2.13
30	1.55	2.67
60	1.90	3.54
90	2.10	3.90
120	2.21	4.41

表1的数据表明,在未使用胶囊CO₂相变致裂增透技术前,第90和第120天的煤层瓦斯有效抽采半径分别为2.10 m和2.21 m,数值明显低于使用该技术之后。采用胶囊CO₂相变致裂技术后,瓦斯的有效抽采半径显著提升,基本上是之前的1.5~2.0倍。根据规律关系式,180 d后,相变致裂抽采钻孔的极限抽采半径确定为4.9 m以内。根据现场实测,致裂后有效抽采半径在2.45~4.95 m,与现场监测数据推测的最大钻孔影响半径较为接近。

3 结论

(1) 研发了低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂技术,

通过分析胶囊内二氧化碳的绝对压力、质量、绝热指数、最小爆破压力和临界温度等数据,推算出1.4 kg胶囊中二氧化碳爆破释放的能量与243 g TNT炸药产生的能量相当,为技术的量化分析和合理应用提供了理论基础。

(2) 胶囊二氧化碳相变致裂试验表明,在一定时期内,抽采影响半径随着抽采时间的增加而扩大,但扩大的速度逐渐减缓。随着时间的持续增长,抽采影响半径与抽采时间的关系趋于稳定。致裂处理后,研究区域煤层透气性系数由之前的0.009 6 m²/(MPa²·d)提升至0.577 0 m²/(MPa²·d),透气性系数显著增长。

(3) 与传统水力压裂技术相比,胶囊二氧化碳相变致裂增透技术避免了大量注水导致煤体强度降低、泥化等影响煤层稳定性的问题;与传统爆破卸压相比,无明火产生,显著降低瓦斯爆炸等安全风险,且装配、运输与操作过程简单,极大提升施工安全性与便捷性。

(4) 胶囊二氧化碳相变致裂增透技术仍存在两大核心问题:一是致裂过程精细化控制不足,难以精准匹配煤体复杂地质条件;二是煤体应力分布不均导致致裂效果参差不齐,部分区域裂隙发育未达预期,直接影响瓦斯抽采效率。针对上述问题,一方面,深度融合地质勘探数据与数值模拟技术,通过构建煤体应力分布与薄弱区域预测模型,为致裂方案设计提供科学依据;另一方面,研发智能化致裂控制系统,动态调整致裂能量释放参数与作用范围,确保致裂能量在煤层中均匀传递,最终实现煤体裂隙发育的均质化目标,以提升瓦斯抽采效果。

(5) 下一步将优化胶囊致裂器的设计和工艺参数,结合现代信息技术,实现致裂过程的智能化控制和远程监测。胶囊式致裂技术还可以通过改变胶囊的布置方式(如间距、排列方式等)和致裂顺序,以及多个胶囊的串联或并联起爆。胶囊具有更好的适应性,可根据煤层的不同特性(如煤层厚度、硬度等)调整胶囊的大小、形状和内部二氧化碳的充装量,实现精准致裂,避免对煤层造成过度破坏,提高作业安全性和效率。

符号注释:

a 为钻孔瓦斯抽采量降低系数, d⁻¹; *E_g* 为胶囊二氧化碳爆破能量, kJ; *h* 为研究区域内的煤层厚度, 设为5.8 m; *K* 为二氧化碳气体绝热指数, 设定为1.295; *m* 为煤体受到爆破作用时, 其产生的抗压强度系数, 设定为10; *N* 为研究区域所需设置的抽采钻孔数目; *p₁* 为胶囊内绝对压力, MPa; *p₂* 为胶囊内的标准大气压, 设定为0.101 MPa; *q(t)* 为在抽采时间*t*时, 钻孔瓦斯抽采流量, m³/min; *q₀* 为测定钻孔初始瓦斯流量, m³/min; *Q* 为1 kg TNT释放的能量, 设为4 250 kJ/kg; *Q_c* 单个钻孔瓦斯抽

采的总量, m^3 ; Q_g 为研究区域的瓦斯总抽采总量, m^3 ; Q_w 为研究区域的煤层瓦斯含量, $11.92 m^3/t$; r 钻孔的有效抽采半径, m ; R 为研究区域的影响半径, 设为 $10 m$; s 为关于材料的霍克-布朗常数, 与材料的特性密切相关; t 为抽采时间, d ; V 为胶囊内部容积, L ; W 为液态二氧化碳相变致裂设备的近似 TNT 等效量, g ; ρ 为研究区域的煤体密度, 设为 $1.43 t/m^3$; σ_1 为二氧化碳爆破后煤体最大主应力, MPa ; σ_3 为二氧化碳爆破后煤体最小主应力, MPa ; σ_c 为煤体单轴抗压强度, MPa 。

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] 俞启香, 程远平. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- [2] 王凯, 郑吉玉, 夏威, 等. 工作面采动煤体卸压增透效应研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 65–70.
WANG Kai, ZHENG Jiyu, XIA Wei, et al. Application and study on permeability improvement effect by pressure relief in mining-induced coal body[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 65–70.
- [3] 景东阳, 李治平, 韩瑞刚. 致密储层水力压裂裂缝几何形态地质影响因素及控制方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9129–9136.
JING Dongyang, LI Zhiping, HAN Ruigang. Geological influencing factors and control methods of hydraulic fracturing fracture geometry in tight reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9129–9136.
- [4] 栗海滔, 黄震, 董肖振. 穿层钻孔水力冲孔增透与有效抽采半径综合测试方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(2): 59–66.
LI Haitao, HUANG Zhen, DONG Xiaozhen. Study on permeability enhancement by hydraulic punching in crossing boreholes and comprehensive testing method for effective radius of gas extraction[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(2): 59–66.
- [5] 邹军. 低透气性突出煤层群首采层水力割缝卸压抽采技术研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(6): 52–58.
ZOU Jun. Research on gas drainage technology with hydraulic cutting pressure relief in first mining seam of outburst coal seam group with low permeability[J]. China Coal, 2024, 50(6): 52–58.
- [6] 胡永全, 谢朝阳, 赵金洲, 等. 海拉尔盆地人工隔层控缝高压裂技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 70–72.
HU Yongquan, XIE Chaoyang, ZHAO Jinzhou, et al. Fracture height control by artificial barrier in Hailaer Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(1): 70–72.
- [7] 王想刚, 张世范, 许继宗, 等. 高应力特厚突出煤层水力割缝卸压防突技术研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(10): 48–56.
- [8] 王相刚, 张世范, 徐吉宗, 等. 研究高压裂技术在高应力和超厚突出煤层中的应用[J]. 中国煤炭, 2024, 50(10): 48–56.
WANG Xianggang, ZHANG Shifan, XU Jizong, et al. Research on hydraulic slotting technology for pressure relief and outburst prevention in high-stress and extra-thick outburst coal seam[J]. China Coal, 2024, 50(10): 48–56.
- [9] 陈爱坤, 翟成, 丛钰洲, 等. 液氮循环冷冲击作用下煤体受拉破坏特征[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 342–353.
CHEN Aikun, ZHAI Cheng, CONG Yuzhou, et al. Tensile failure characteristics of coal after the cyclic cold shock of liquid nitrogen[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 342–353.
- [10] 高洁, 王海峰, 秦伟, 等. 高压空气爆破对煤岩体的研究[J]. 土木工程学报, 2019, 2019(1): 9613563.
GAO Jie, WANG Haifeng, QIN Wei, et al. Experimental study on high-pressure air blasting fracture for coal and rock mass[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 9613563.
- [11] 宋超, 王苏健, 黄克军, 等. 超声激励瓦斯抽采增效技术研究[J]. 陕西煤炭, 2020(2): 100–104.
SONG Chao, WANG Sujian, HUANG Kejun, et al. Study on gas extraction synergy technology by ultrasonic excitation[J]. Shaanxi Coal, 2020(2): 100–104.
- [12] 王耀锋, 何学秋, 王恩元, 等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1945–1955.
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945–1955.
- [13] 赵宝友, 王海东. 我国低透气性本煤层增透技术现状及气爆增透防突新技术[J]. 爆破, 2014, 31(3): 32–41.
ZHAO Baoyou, WANG Haidong. Different technologies of permeability enhancement of single coal seam in China and new technique of high pressure gas shock[J]. Blasting, 2014, 31(3): 32–41.
- [14] 卢义玉, 廖引, 汤积仁, 等. 页岩超临界 CO_2 压裂起裂压力与裂缝形态试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 175–180.
LU Yiyu, LIAO Yin, TANG Jiren, et al. Experimental study on fracture initiation pressure and morphology in shale using supercritical CO_2 fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 175–180.
- [15] 白鑫, 张东明, 王艳, 等. 液态 CO_2 相变射流压力变化及其煤岩致裂规律[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 661–670.
BAI Xin, ZHANG Dongming, WANG Yan, et al. Pressure variation and coal fracturing law of liquid CO_2 phase transition jet[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(4): 661–670.
- [16] 陈少波, 卢玉斌, 袁海梁, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的液态 CO_2 相变破岩裂纹扩展特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(6): 74–82.
CHEN Shaobo, LU Yubin, YUAN Hailiang, et al. Study on crack propagation characteristics of liquid CO_2 phase transition rock breaking based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(6): 74–82.
- [17] 桑树勋, 牛庆合, 曹丽文, 等. 深部煤层 CO_2 注入煤岩力学响应特征及机理研究进展[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1849–1864.
SANG Shuxun, NIU Qinghe, CAO Liwen, et al. Mechanical response characteristics and mechanism of coal-rock with CO_2 injection in deep coal seam: A review[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1849–1864.

- [17] 沈玉旭, 张文阳, 崔凯, 等. 煤层液态 CO₂ 相变致裂增透技术试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 133–138.
SHEN Yuxu, ZHANG Wenyang, CUI Kai, et al. Experimental study on permeability enhancement technology by liquid CO₂ phase change fracturing in coal seam[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 133–138.
- [18] REN Ting, WANG Gongda, CHENG Yuanping, et al. Model development and simulation study of the feasibility of enhancing gas drainage efficiency through nitrogen injection[J]. Fuel, 2017, 194: 406–422.
- [19] 薛栋. 液态二氧化碳在煤层内流动过程数值模拟及增透作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
XUE Dong. Study on numerical simulation of liquid carbon dioxide flow in coal seam and its effect on permeability[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [20] 文虎, 樊世星, 马砺, 等. 低渗透性煤层井下低压液态 CO₂ 促抽瓦斯工程实践[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(4): 530–537.
WEN Hu, FAN Shixing, MA Li, et al. A case study of methane drainage promotion by injecting liquid carbon dioxide into low permeability coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(4): 530–537.
- [21] 王岩. 地应力作用下煤层液态 CO₂ 相变致裂效果研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(12): 108–114.
WANG Yan. Effect of phase change fracturing of liquid CO₂ in coal seams under geostress action[J]. Coal Engineering, 2024, 56(12): 108–114.
- [22] 潘红宇, 秦斌峰, 张天军, 等. 静荷载下 CO₂ 气爆对型煤裂纹扩展影响分析[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(2): 251–259.
PAN Hongyu, QIN Binfeng, ZHANG Tianjun, et al. Influence of CO₂ gas explosion on moulded-coal crack propagation under static load[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(2): 251–259.
- [23] 王宗明, 衡献伟, 钱国辉, 等. 低渗透性煤层 CO₂ 相变致裂增透规律及应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 48–51.
WANG Zongming, HENG Xianwei, QIAN Guohui, et al. Law and application of permeability improvement in low permeability coal seam due to CO₂ phase transition cracking[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(3): 48–51.
- [24] 蔚默然, 王开, 张小强, 等. 超临界 CO₂ 作用下不同高度比煤岩组合体力学特性及能量演化规律[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 134–141.
YU Moran, WANG Kai, ZHANG Xiaoqiang, et al. Mechanical properties and energy evolution of coal-rock assemblages with different height ratios under supercritical CO₂ action[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(1): 134–141.
- [25] 郝志勇, 岳立新, 孙可明, 等. 超临界 CO₂ 温变对低渗透煤层孔隙变化的实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 64–71.
HAO Zhiyong, YUE Lixin, SUN Keming, et al. Experiment study on the porosity and permeability of low permeability coal by supercritical CO₂ temperature variation[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 64–71.
- [26] JIA Yunzhong, LU Yiyu, ELSWORTH D, et al. Surface characteristics and permeability enhancement of shale fractures due to water and supercritical carbon dioxide fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 284–297.
- [27] LIU Xueying, YU Jin, WU Di, et al. Permeability characteristics of coal after supercritical CO₂ adsorption at different temperatures[J]. Geofluids, 2020, 2020(1): 8836349.
- [28] 衡献伟, 付金磊, 李青松, 等. 液态 CO₂ 相变致裂对抽采有效半径影响的试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(10): 126–130.
HENG Xianwei, FU Jinlei, LI Qingsong, et al. Experimental study on influence of liquid CO₂ phase change fracturing on effective extraction radius[J]. Coal Engineering, 2021, 53(10): 126–130.
- [29] 贾进章, 李斌, 王东明. 煤层液态 CO₂ 相变致裂半径范围的影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 57–63.
JIA Jinzhang, LI Bin, WANG Dongming. Study on influencing factors of cracking radius range caused by liquid CO₂ phase transition in coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 57–63.
- [30] 何勇. 本煤层瓦斯抽放技术[J]. 煤矿安全, 1997, 28(6): 19–21.
- [31] 孙四清, 李文博. 井下碎软煤层顶板加砂分段压裂瓦斯高效抽采技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 101–107.
SUN Siqing, LI Wenbo. High-efficiency gas extraction technology of staged fracturing roof with sand of underground broken and soft coal seam[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 101–107.
- [32] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(9): 1013–1035.
- [33] 郭晴宜, 李贺, 施式亮, 等. 高压气液两相射流冲击破煤特性[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1): 11–17.
GUO Qingyi, LI He, SHI Shiliang, et al. On the characteristics of coal breaking by high pressure gas-liquid two-phase jet impact[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1): 11–17.

(责任编辑 范章群)