

地面煤层气高强电爆震体积致裂技术及工程试验

聂百胜^{1,2}, 包松¹, 柳先锋^{1,2}, 刘鹏¹, 张豪¹, 何珩溢¹, 李孜健³, 周皓文¹, 贾雪祺¹, 何学秋^{4,5}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室 资源与安全学院, 重庆 400044; 2. 北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081; 3. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191; 4. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 5. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522)

摘要:煤层气高效开发已成为清洁能源与瓦斯灾害防治的优选和战略发展目标, 迫切需要创新煤层改造理论和技术。为解决地面煤层气开发过程面临的储层吸附性强、渗透率低、运移通道易堵塞、水锁效应及水资源匮乏等一系列难题, 本研究深入分析了地面煤层气井内高强电爆震体积致裂增渗理论, 基于电爆震液相放电冲击波-应力波-震动波传播能量释放特征, 建立了高精度能量调配顶底板及煤储层多点电爆震诱导体积致裂模型, 提出了煤储层电爆震体积致裂强化煤层气抽采方法, 形成了地面煤层气电爆震体积致裂技术及工艺。利用自主研制存储能量高达 604.92 kJ 且可调控的电爆震体积致裂增渗装备, 开展不同电爆震能量循环致裂顶底板及煤层工程试验, 在此期间采用地表微震监测系统实时表征储层缝网影响半径, 并根据体积致裂效果和长期产气量考察初探电爆震体积致裂技术及装备的可靠性。结果表明: 电爆震循环作用诱发裂隙或微孔隙的发育、扩展, 形成了高裂缝密度的体积致裂效应; 井近区微震信号幅值较大, 随着距离增加逐渐减小, 微震事件平面分布呈环状向四周扩散; 电爆震能量和诱导次数增加导致煤储层缝网影响半径先增大后减小, 电爆震水下激发能量 361.97 kJ 循环诱导形成的缝网影响半径高达 200 m 左右; 重新排采期间平均产气量较衰竭期提高了 0.80~1.53 倍, 验证了提出的电爆震体积致裂技术能够有效改善煤储层, 促进煤层气解吸扩散和运移产出。研究成果对低渗透性松软煤储层缝网改造实现煤层气高效开发具有理论与工程指导意义。

关键词:煤层气高效开发; 储层改造; 高强电爆震; 体积致裂技术; 增渗装备

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0546-18

Volume fracturing technology with high-energy electric detonation and engineering test of ground coalbed methane

NIE Baisheng^{1,2}, BAO Song¹, LIU Xianfeng^{1,2}, LIU Peng¹, ZHANG Hao¹, HE Hengyi¹, LI Zijian³, ZHOU Haowen¹, JIA Xueqi¹, HE Xueqiu^{4,5}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Beijing Institute of Technology, State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing 100081, China; 3. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 5. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia)

收稿日期: 2024-11-18 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG24.1417

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2024YFC3013804); 国家自然科学基金资助项目 (52274173); 中央高校基本科研业务费 (2024HAIS-ZD006)

作者简介: 聂百胜 (1973—), 男, 山西平陆人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: bshnie@cqu.edu.cn

通讯作者: 柳先锋 (1990—), 男, 湖北荆州人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: cumtblxf@163.com

引用格式: 聂百胜, 包松, 柳先锋, 等. 地面煤层气高强电爆震体积致裂技术及工程试验[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 546-563.

NIE Baisheng, BAO Song, LIU Xianfeng, et al. Volume fracturing technology with high-energy electric detonation and engineering test of ground coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 546-563.



移动阅读

Abstract: The efficient development of coalbed methane has become the preferred and strategic development goal of clean energy and gas disaster prevention and control, and it is urgent to innovate the theory and technology of coal reservoir transformation. In order to solve a series of problems such as strong reservoir adsorption, low permeability, easy blockage of migration channels, water lock effect, and lack of water resources in the development process of surface coalbed methane. In this research, the theory of high-energy electric detonation (HEED) volume fracturing and permeability enhancement in surface coalbed methane wells were deeply analyzed. Based on the energy release characteristics of shock wave-stress wave-vibration wave propagation in electric detonation liquid phase discharge, A multi-point electric detonation-induced volumetric fracturing model of high-precision energy allocation roof, floor, and coal reservoir was established. The method of strengthening coalbed methane extraction by HEED volume fracturing in coal reservoirs is put forward, and the technology and process of HEED volume fracturing of surface coalbed methane are formed. Using the self-developed HEED volume fracturing and permeability increasing equipment with storage energy up to 604.92 kJ and adjustable, an engineering experimental study of roof, floor, and coal seam fracturing caused by different HEED energy cycles was carried out. During this period, the surface microseismic monitoring system was used to characterize the influence radius of the reservoir fracture network in real-time, and the reliability of HEED volume fracturing technology and equipment was investigated according to the volume fracturing effect and long-term coalbed methane production. The results show that the HEED cycle induces the development and expansion of cracks or micropores, and forms a volume fracturing effect with high crack density. The amplitude of the microseismic signal near the well was large and gradually decreased with the increase in distance. The plane distribution of microseismic events was ring-shaped and spread around. The increase of HEED energy and induction times leads to the increase and then decrease of the influence radius of the coal reservoir fracture network. The influence radius of the fracture network induced was as high as 200 m by HEED underwater excitation energy of 361.97 kJ. The average coalbed methane production during the re-extraction period was 0.80~1.53 times higher than that during the depletion period. It was verified that the proposed HEED volume fracturing technology could effectively improve the coal reservoir and promote the desorption, diffusion, and migration of coalbed methane. The research results have theoretical and engineering guiding significance for the fracture network transformation of low permeability soft coal reservoir to realize the efficient development of coalbed methane.

Key words: efficient development of coalbed methane; reservoir reconstruction; high-strength electric detonation; volume fracturing technology; infiltration enhancement equipment

0 引 言

油气资源不仅是关系社会发展的重要清洁能源,也是兜底保障国家安全稳定重要战略资源^[1],高效开发煤层气(瓦斯)、页岩气等非常规天然气资源是续补天然气资源最为现实的途径之一^[2]。我国能源结构面临“富煤、贫油、少气”的根本问题,尚无可替代能源撼动煤炭主体地位^[3-4],且煤炭资源的快速消耗导致煤炭开采加速向深部推进,然而深部煤层赋存条件复杂,普遍表现为高应力、高瓦斯、高地温、强吸附和低渗透性的环境特性,渗透率^[5-6]通常在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,导致煤层气抽采效率较低,难以实现“全域快抽、应抽尽抽”确保抽采达标^[7],严重制约着煤炭资源安全高效开采,煤层气的开发和利用仍然面临着巨大挑战^[8]。同时,深部环境的急剧变化容易诱发煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸等瓦斯动力灾害事故频发^[9-10],相关部门必须重视并加大瓦斯防治技术装备和安全

措施的大力投入,如果能够将瓦斯进行安全高效开发和清洁利用,把瓦斯治理^[11]从“管得住”过渡到“治得好、治得快”,不仅可以满足“双碳”目标和新能源架构,还可以从动力灾害源降低煤矿安全生产事故风险,对提高煤炭产量具有非常重要的现实和战略意义^[12-13]。

目前主要通过两种方式强化煤层瓦斯抽采,一是打破吸附解吸动态平衡,促进煤层吸附态瓦斯尽可能解吸释放为游离态瓦斯,二是通过外界手段形成复杂裂隙-孔隙网络结构,增加、扩大、扩宽瓦斯在煤层中的运移通道^[14-16]。通过外界手段加强煤储层裂隙贯通提高煤层渗透性,是促进瓦斯扩散运移的有效措施^[17-22],传统的煤层增渗强化瓦斯抽采方法包括水力化措施:水力压裂^[23]、水力造穴^[24]、水射流割缝^[25]等,水力化技术一定程度上加快了瓦斯预抽效率,推动了煤矿瓦斯灾害治理的进步,是现阶段大规模运用且行之有效的技术。然而水力化技术在低渗透及松软煤层应用时,存在水软化作用导致卸压孔洞垮塌堵塞瓦

斯运移通道^[26-27]、产生水锁效应^[28]抑制瓦斯解吸,导致瓦斯残余含量增多,延长了瓦斯预抽周期,且其耗水量巨大的问题对水资源匮乏区域并不友好。为突破低渗透及松软煤层瓦斯高效抽采的技术瓶颈,诸如超声波^[29-30]、电脉冲(可控冲击波)^[31-37]、微波^[38]、高压气体爆破(二氧化碳相变致裂等)^[39-41]、磨料空气射流割缝^[42]等无水化技术^[43]被研发提出,虽解决了水力化技术瓶颈,但未得到大范围工程应用或推广,短时间内难以取替水力压裂。

高强电爆震技术是基于电脉冲基础理论研发的可瞬间释放巨大能量的一项新型少水化技术^[44],具备潜在高效致裂改造非常规储层的能力,能够产生解堵效应和致裂效应,有利于形成石油、页岩气和煤层气运移的通道,在石油和煤层增渗领域均取得了较好的增产效果^[45-48]。现阶段电爆震技术逐渐发展成熟,能够突破电脉冲技术致裂范围偏小的技术瓶颈,有望大规模运用到煤储层瓦斯抽采工程实际,较大程度上提高瓦斯抽采效率,解决低渗透性松软煤层面临的瓦斯抽采难题^[37,47-50]。为更好的促进高强电爆震增渗技术的发展和运用,本文拟通过深入分析地面煤层气井煤储层电爆震体致裂增渗理论,建立高精度能量调配顶底板及煤层多点电爆震体致裂模型,形成地面煤层气电爆震体致裂技术及工艺,并利用自主研发的电爆震体致裂增渗装备开展地面煤层气低产井/老井现场工程试验,以期验证电爆震体致裂技术高效致裂改造煤储层缝网的可靠性。

1 煤储层电爆震体致裂增渗理论分析

1.1 电爆震液相放电能量释放特征

1.1.1 冲击波能量衰减特征

电爆震冲击波(实质是压力波)效应是液相放电向应用转化的重要支撑,存储的高压电能极短时间内通过高压电缆(铠装电缆)输出至放电电极,初次压力波的形成紧随放电发生,随着大量电能注入放电通道,放电间隙周围水体迅速升温形成高温高压气泡,内部高压迫使气泡-水界面迅速膨胀,压缩周围水体,进而产生压力波向四周传播(即电液冲击波 EHS)。冲击波的瞬时峰值压力可达 $0.6 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3$ MPa,冲击波压力持续作用时间一般为微秒量级。储能电容器组的容量与冲击波的能量直接相关,单次电爆震体致裂增渗装备存储能量理论值可采用式(1)^[51]计算:

$$E_A = \frac{1}{2} C U_A^2 \quad (1)$$

式中: E_A 为装备存储能量, J; C 为电容, μF ; U_A 为工作

电压, V。

电爆震放电过程中存在能量损失,通过工作电压 U_A 计算实际能量必然导致较大误差,可通过放电电压 U_B 计算装备输出能量,如式(2)所示:

$$E_B = \frac{1}{2} C U_B^2 = \frac{1}{2} C (I_B R_B)^2 \quad (2)$$

式中: E_B 为装备输出能量, J; U_B 为放电电压, V; I_B 为装备放电电流, A; R_B 为装备本身的平均电阻, Ω 。现场工程试验过程中采集的放电电压和放电电流波形如图 1 所示。

现场工程试验采用的铠装电缆长 950 m,内导体和外导体 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻不大于 0.272 Ω/km ,由此推导经由铠装电缆损失的能量为

$$E_C = \frac{1}{2} C (I_C R_C)^2 \quad (3)$$

式中: E_C 为电缆损耗的能量, J; I_C 为电缆电流,即放电电流, A; R_C 为电缆电阻, Ω 。

则击穿时经铠装电缆衰减的装备输出能量 E_D 为

$$E_D = \frac{1}{2} C [U_B^2 - (I_C R_C)^2] \quad (4)$$

联合式(1)~式(4),可知液相放电经铠装电缆衰减后击穿水介质的能量转化效率 η 计算如下:

$$\begin{cases} \eta = \frac{E_B - E_C}{E_A} \times 100\% \\ \eta = \frac{\frac{1}{2} C [U_B^2 - (I_C R_C)^2]}{E_A} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

分析图 1 可知,最大电流值呈明显随电容增大而增大的现象,而放电电压可能受工作电压 14.20 kV 的影响,当设置的工作电压一致时,装备预放电阶段须达到工作电压,导致电压波形的尖峰基本一致,且电压波形峰值快速降低为均无太大变化的放电电压。同时,装备各路开关不同步是引发放电电压波浪变化的因素,也是促使放电电流最大值和放电电压不在同一时刻出现的原因。因此,利用采集的放电电压作为装备输出能量和能量转化效率计算的参量存在较大误差。放电电流最大值的变化趋势与电容逐渐增大相吻合,装备电路系统中存在的电阻保持不变。综上,通过放电电压和放电电流最大值求解装备平均电阻是合理的,并提出了利用放电电流最大值和装备平均电阻求取装备输出能量的方法(式(2))。

根据不同电容下的放电电流最大值和放电电压(图 1)计算可得装备平均电阻为 0.71 Ω 。绘制了不同电容下装备耗能情况、电缆耗能情况和能量转化效率之间的关系曲线如图 2 所示,工作电压一致情况下装

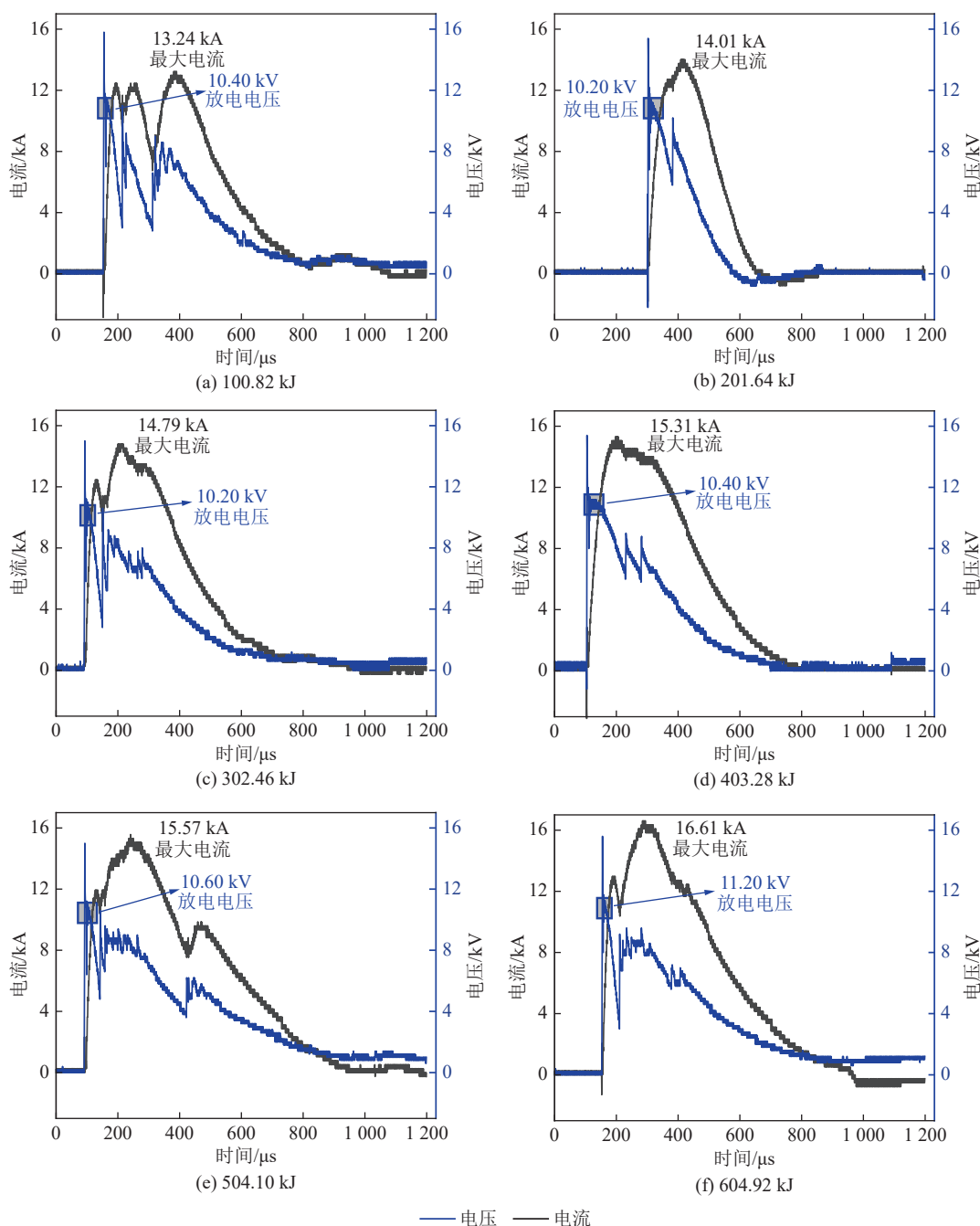


图1 电流-电压波形曲线

Fig.1 Current-voltage waveform curve

备输出能量与电容容量正相关,装备损耗能量占比与电容容量负相关,计算得出不同电容下的装备耗能/存储能量为44.04%(平均值),即装备输出能量/存储能量为55.96%(平均值),表明装备能量转化效率较低,作业过程中装备自损耗约一半能量,但存储能量越大,装备能量转化率越高,当电容大于5000 μF 时,装备能量转化效率高于60%;分析图2b可知,不同电容条件下铠装电缆损耗的能量依次为5.85、13.11、21.91、31.30、40.47、55.26 kJ,与装备存储能量呈正相关,且损耗能量/装备存储能量为7.41%(平均值)。综上,电

爆震最大存储能量604.92 kJ经铠装电缆衰减后击穿水介质的能量为361.97 kJ,不同电容下的能量转化效率平均值为48.55%,存储能量越大,击穿水介质能量转化效率越高,未来应当优化电爆震体积致裂增渗装备,减小铠装电缆能量损耗,提高装备能量输出。

冲击波能量可用冲击波峰值压力 P_m , Pa 计算得到, P_m 前的时域波形拟合如式(6)所示,其中 $P(t)$ 为冲击波峰值压力前的时域波形; t 为冲击波持续时间, s; ζ 为上升时间系数; t_r 为冲击波时域上升时间, s; α 和 β 为拟合经验常数^[52-53]:

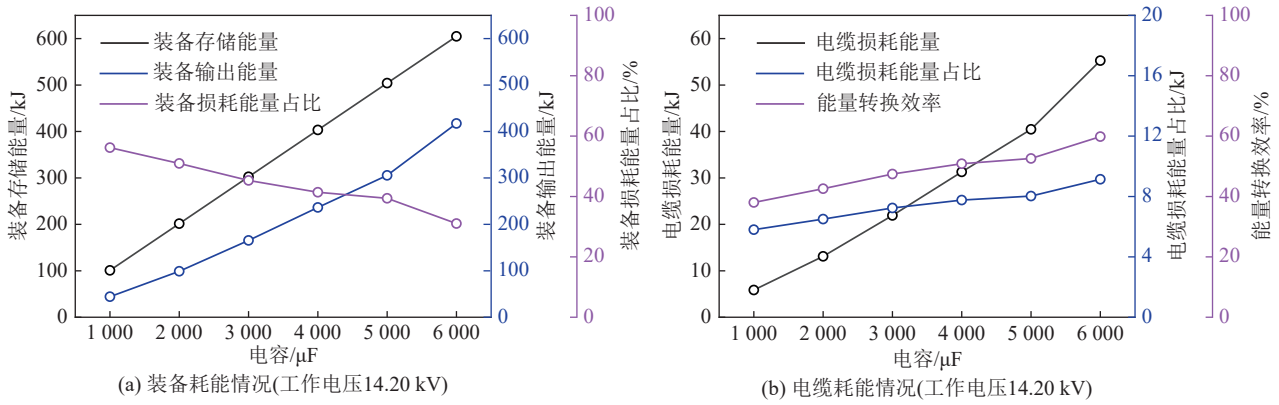


图2 装备耗能情况、电缆耗能情况和能量转化效率之间的关系

Fig.2 Relationship between equipment energy consumption, cable energy consumption and energy conversion efficiency

$$\begin{cases} P(t) = P_m \xi (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \\ \xi = \frac{1}{e^{-\alpha t_r} - e^{-\beta t_r}} \\ t_r = \frac{1}{\beta - \alpha} \ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \end{cases} \quad (6)$$

冲击波峰值压力 P_m 符合式 (7) 所示的时域曲线, t_j 是峰后时间, s; β/α 值主要与峰值 P_m 前波形的拟合有关; e 为自然常数, 取值为 2.718。

因此, 冲击波峰值压力 P_m 估算如式 (8) 所示, 其中 h 为距离衰减参考系数; θ 为能量衰减系数 (参考范围 0.35~0.54, 文中取值 0.445)。

$$\begin{cases} P(t) = P_m \frac{1}{e^{-\alpha t_r} - e^{-\beta t_r}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) & 0 \leq t \leq t_r \\ P(t) = 2.718 P_m e^{-\frac{t}{t_r}} & t_r \leq t \leq t_j \end{cases} \quad (7)$$

$$P_m = h E_D^\theta = h \left[\frac{1}{2} C [U_B^2 - (I_C R_C)^2] \right]^\theta \quad (8)$$

1.1.2 应力波能量衰减特征

当冲击波从液相介质进入固相介质时, 水-煤体、水-射孔套管、射孔套管-水泥环界面发生入射、反射和透射, 透射应力与入射应力的关系^[51]如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_{T-M} = T_M \sigma_{I-M} \\ \sigma_{T-G} = T_G \sigma_{I-G} \\ \sigma_{T-N} = T_N \sigma_{I-N} \end{cases} \quad (9)$$

冲击波传播过程中 σ_{I-M} 、 σ_{I-G} 、 σ_{I-N} 为入射应力, σ_{R-M} 、 σ_{R-G} 、 σ_{R-N} 为反射应力, σ_{T-M} 、 σ_{T-G} 、 σ_{T-N} 为透射应力。

T_M 、 T_G 、 T_N 为透射系数, 计算如下^[54-55]:

$$\begin{cases} T_M = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \\ T_G = \frac{2\rho_3 c_3}{\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1} \\ T_N = \frac{2\rho_4 c_4}{\rho_4 c_4 + \rho_3 c_3} \end{cases} \quad (10)$$

由此可计算入射应力经水-煤体和水-射孔套管界面衰减后的透射波荷载为:

$$\begin{cases} P_{C-M}(t) = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} P(t) \\ P_{C-G}(t) = \frac{2\rho_3 c_3}{\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1} P(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{C-M}(t)$ 为经由水介质衰减直接作用煤体的透射波荷载, Pa, 而经由水介质、射孔套管和水泥环衰减的透射波荷载还需另外推导。 $\rho_1 c_1$ 为水的波阻抗; $\rho_2 c_2$ 为煤的波阻抗; $\rho_3 c_3$ 为射孔套管的波阻抗; $\rho_4 c_4$ 为水泥环波阻抗; 波阻抗之间的关系为 $\rho_3 c_3 > \rho_4 c_4 > \rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$ 。 ρ_1 为水的密度, 1 000 kg/m³; ρ_2 为煤的密度, kg/m³; ρ_3 为射孔套管的密度, kg/m³; ρ_4 为水泥环的密度, kg/m³。 c_1 为水中声速, 取 1 500 m/s; c_2 为煤层中声速, m/s; c_3 为射孔套管中声速, m/s; c_4 为水泥环中声速, m/s。

综上同理可得, 透射波荷载经射孔套管-水泥环界面衰减后荷载为:

$$P_{C-G-N}(t) = \frac{2\rho_4 c_4}{\rho_4 c_4 + \rho_3 c_3} \frac{2\rho_3 c_3}{\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1} P(t) \quad (12)$$

最终, 间接作用煤体的透射波荷载可按式 (13) 计算:

$$P_{C-N-M}(t) = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \frac{2\rho_4 c_4}{\rho_4 c_4 + \rho_3 c_3} \frac{2\rho_3 c_3}{\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1} P(t) \quad (13)$$

如图 3 所示, 随着应力波向前传播, 应力大小逐渐衰减, 直至小于质点抗拉强度时, 裂纹在应力波影响下的断裂停止, 形成了一段由应力波造成的直接断裂区。应力波继续传播, 虽然其大小已经不能对煤岩体造成直接破断, 但其应力值大小仍能够对煤岩体造成细观损伤影响, 并持续在套管射孔延长线平面方向造成岩石损伤破坏^[56-57]。在分析电流击穿水介质形成 EHS 对煤岩体微裂纹影响时, 取煤岩体中距离放电

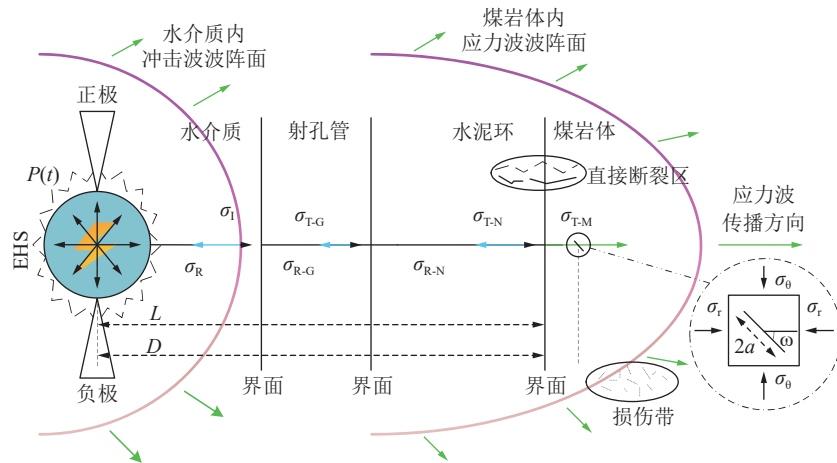


图 3 单次电爆震的衰减、入射、传播和煤岩开裂示意

Fig.3 Attenuation, incidence, propagation and coal rock cracking schematic diagram of a single electric detonation

间隙 D 处的微裂纹单位, 微裂纹初始长度为 $2a$, 微裂纹倾角为 ω 。

EHS 荷载经衰减后的透射波 $P_{C-N-M}(t)$ 以球波形式作用于水泥环-煤岩体界面, EHS 载荷作用下煤岩体断裂区域的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 与 $P_{C-N-M}(t)$ 的关系如式 (14) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_{C-N-M}(t)(D-L)^{-\chi} \\ \sigma_\theta = \lambda\sigma_r = \lambda P_{C-N-M}(t)(D-L)^{-\chi} \\ \chi = 2-\mu \\ \lambda = \mu/(1-\mu) \end{cases} \quad (14)$$

式中: μ 岩石泊松比, D 为 EHS 致裂煤岩体断裂区域到放电间隙的距离, m; L 为水泥环-煤岩体界面到放电间隙的距离, m; χ 为衰减系数; λ 为侧压力系数。

1.1.3 震动波能量衰减特征

震动波在煤岩体内传播分为几何扩散衰减和固有衰减, 其中几何扩散衰减指震动波以球形波方式在煤岩体中传播衰减^[58-59], a 点的震动能量 E_{ab} 与 b 点的震动能量 E_b 的扩散半径平方成反比:

$$E_{ab} = kE_b/R_{ab}^2 \quad (15)$$

式中: R_{ab} 为扩散半径, m; k 为系数。

而固有衰减是指受到煤岩体塑性、非线性和黏性等阻尼作用引起的能量进一步损耗和吸收, 震动波能量的固有衰减主要是由于介质的内摩擦和热传导引起的能量耗散。震动波的固有衰减随着传播距离增长呈指数衰减规律:

$$E_{ab} = E_b e^{-\eta' R_{ab}} \quad (16)$$

式中: E_{ab} 为 a 点的震动能量, J; E_b 为 b 点的震动能量, J; η' 为震动波能量衰减系数; R_{ab} 为 a 点和 b 点间的空间距离, m。

η' 的表达式如下:

$$\eta' = \frac{2\pi f}{vQ} \quad (17)$$

式中: Q 为耗散品质因子; f 为震动频率, Hz; v 为震动波传播速度, cm/s。

综合震动波能量的几何与固有衰减, b 点传播到 a 点的残余能量进一步表示为:

$$E_{ab} = E_b R_{ab}^{-1} e^{-\frac{2\pi f}{vQ} R_{ab}} \quad (18)$$

为体现震源破裂尺度内外震动效应的差异, 将震源假设为半径为 r_0 的震源球, 假设震动波能量在球体内不变, 能量从球面开始衰减, 则震源能量的衰减过程可表述为^[58]:

$$\begin{cases} E_{ab} = E_b & (R_{ab} \leq r_0) \\ E_{ab} = E_b R_{ab}^{-2} r_0^{-2} e^{-\frac{2\pi f}{vQ} (R_{ab} - r_0)} & (R_{ab} > r_0) \end{cases} \quad (19)$$

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_0}{4\pi}}, V_0 = \frac{M_0^2}{2GE_b}$$

式中: r_0 为震源视半径, m; V_0 为震源视体积, m³; M_0 为震源的地震矩, m; G 为震源区域剪切模量, Pa。视半径为震源激发时期内煤岩体塑性变形的标量估计, 与描述震源强度的地震矩和震源能量相关, 与震源激发机制、震源模型无关, 可对震源影响范围进行较好估计, 因此本文优选视半径估算电爆震震源半径。从式 (19) 中不难发现, 影响电爆震震动波能量衰减的因素主要有震源能量、能量衰减系数、煤储层物理性质及构造、半径以及受载点距震源的距离。

1.2 煤储层电爆震体积致裂增渗机制

1.2.1 电爆震体积致裂效应

煤岩体破坏均属于三维体积破坏^[60,61], 而煤层气高效开发既要使煤储层产生高密度的裂缝网络形成运移通道, 又要强化瓦斯解吸扩散使更多的吸附气转

换为游离气,即产生高强度的体积致裂效应,定义体积致裂系指三维煤岩体在高压电爆震作用下,内部孔隙裂隙及人工裂隙互相调控、充分发展和贯穿、形成新的三维裂隙网络系统的完整力学过程,是顶底板及煤层大尺度、多裂隙、高强度破坏和能量释放的过程。要实现煤储层高度体积致裂,可结合“体破裂力学原理”从2个方面转变来实现:① 荷载作用类型由外部荷载致裂转换为孔/裂隙内压致裂;② 荷载作用方式由小范围一次性致裂转换为大范围多次/疲劳致裂或者瞬态/动态致裂。上述转换方式将驱动煤储层原生孔/裂隙或水力压裂裂隙更多地发育、扩展,最终形成

高裂缝密度的体积致裂效应,促进煤储层高效致裂改造。

通过电爆震作用的煤样及岩样裂隙分布情况如图4所示,分析可知,首次电爆震作用下煤样、混凝土试样及岩样均产生了集中在上部区域的若干微小裂隙,致裂两次后微小裂隙得到扩展发育形成多条贯穿试样的主裂缝,主要为张拉裂缝;主裂缝周围出现多裂缝起裂的情况,产生的裂缝多为剪切裂缝。原煤试样的扫描电镜图表明电爆震循环作用诱发了裂隙或微孔隙的发育、扩展,对形成复杂的体积致裂缝网是有益的。

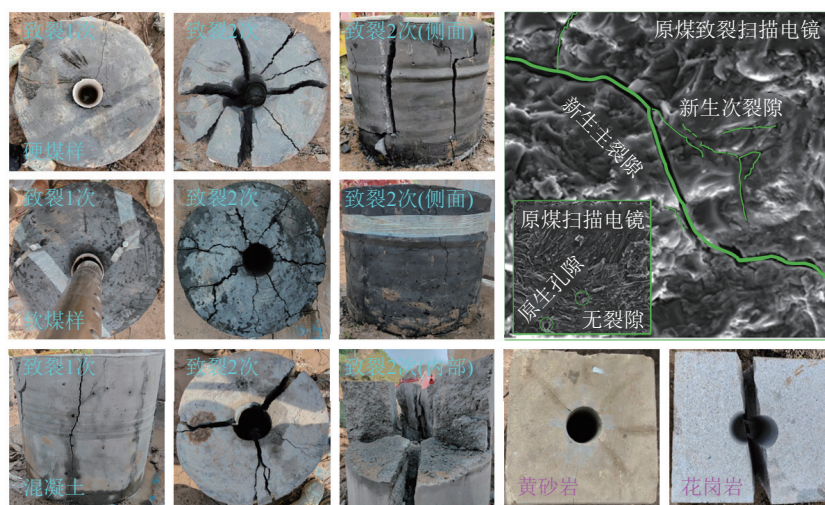


图4 循环电爆震致裂煤岩试样裂隙特征

Fig.4 Fracture characteristics of coal-rock samples cracked by cyclic electric detonation

1.2.2 电爆震体积致裂增渗机理

反复电爆震冲击波作用后煤岩体的孔/裂隙结构发生了显著变化^[46-51,62],煤体内部形成了新的宏细微观裂隙,原有孔/裂隙也进一步的发育、扩展,增强了孔隙和裂缝之间的连通性,同时电爆震本身的解堵机制能够将煤层气运移通道内的堵塞物(煤粉或支撑剂)震碎并转移至裂缝深处,形成新的支撑平衡,电爆震体积致裂煤体增渗过程如图5所示。由煤岩体物理力学性质可知,抗压强度远大于抗拉强度,容易形成拉伸断裂,电爆震形成的冲击波和应力波压力大于煤岩体强度时,煤岩体表面产生裂隙/裂纹。当冲击波穿过煤岩体表面向内部传播时,冲击波拉应力和压应力逐渐衰减,在煤岩体内部仍可产生周期性的拉伸和压缩破坏,形成径向裂纹。而冲击波横波会使岩体质点在周向方向振动,在交替剪切应力作用下引起剪切破坏,形成周向剪切裂纹。因此煤岩体会受到连续不断的拉应力和压应力的作用,使得煤岩体产生累积疲劳损伤,即孔隙和裂隙结构遭到破坏,导致煤体中的孔隙直径、裂隙宽度和长度扩大。此外,电爆震应力

波通过致裂作用形成的孔/裂隙传播进入煤岩体后,往往会在原始孔/裂隙末端产生应力集中现象,导致原始孔/裂隙在宽度和长度上得到扩展,并形成新的孔/裂隙。

如图5所示,水分子、固体分子、吸附气分子和游离气分子之间在电爆震瞬态疲劳致裂作用下形成了

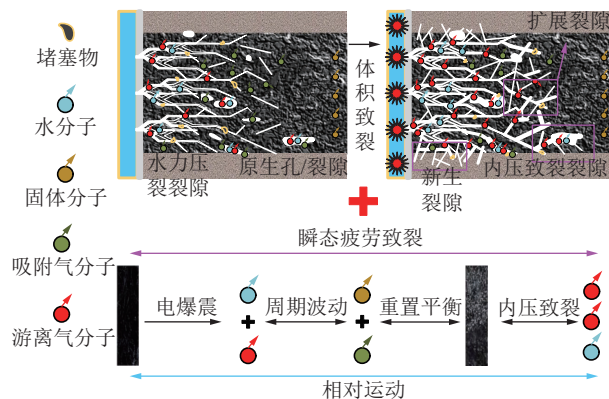


图5 电爆震体积致裂煤岩体增渗过程

Fig.5 Seepage increasing process of electric detonation volume fracturing coal

相对运动, 储层环境原有的水分子和游离气分子在电爆震周期波动作用下产生水压致裂效应和气压致裂效应, 导致储层环境特性发生改变, 储层环境重置平衡后大量吸附气分子转变为游离气分子; 同时, 外部水压和气压的骤变与原生封闭孔/裂隙内部的水压和气压形成压力差, 当电爆震形成的外部水压和气压足够大时, 将导致原生孔/裂隙发生破裂和扩展, 释放封闭孔/裂隙内部的水分子和气体分子, 即孔/裂隙内压致裂。

同理, 在周期性电爆震压应力、拉应力和剪切应力共同作用下, 煤体骨架基质及煤体裂隙中的瓦斯和水会产生周期性的波动作用, 导致煤基质、瓦斯和水三者之间产生不同加速度形成气-固-液界面相对运动, 荷载作用类型由外部载荷致裂转换成为孔/裂隙内压致裂, 煤基质表面瓦斯吸附黏着力下降, 打破煤储层中原有瓦斯吸附解吸动态平衡和解除水锁效应, 诱发瓦斯由吸附态解吸成游离态并重置平衡状态。

综上所述, 通过电爆震体积致裂效应形成的复杂孔/裂隙结构网络极大改善了煤储层渗透率, 能够有效促进解吸出的瓦斯向外扩散和运移。

2 地面煤层气电爆震体积致裂技术

2.1 多点电爆震诱导体积致裂模型

现阶段煤层气资源开发均采用水力压裂技术, 面临耗水量巨大、压裂程度有限、形式单一、水锁效应等难题, 且二次储层改造成本高, 煤层气采出率低。国内煤层气勘探开发区域大部分处于重点缺水的山区, 正在开发的山西、新疆、内蒙古等地区不易构建大型水场、煤层松软低透, 极大的限制实施水力压裂技术, 同时水资源大量压入对生态环境保护造成了严峻

挑战, 形成的水锁效应也会阻碍煤储层瓦斯运移。针对煤层气高效开发过程面临的储层吸附性强、渗透率低、运移通道易堵塞、水锁效应及水资源匮乏等一系列难题, 在电爆震体积致裂增渗理论的基础上, 提出了地面煤层气电爆震体积致裂技术, 其原理是通过 220 V/380 V 电能介质以电容和系统多级串/并联的方式提高电爆震体积致裂冲击波能量, 在地面煤层气井不同的产层多点循环诱导致裂, 使煤储层内部孔/裂隙不断扩大、发育, 从而扩宽瓦斯运移的通道和范围, 同时周期性波动作用产生孔/裂隙内压致裂打破瓦斯吸附解吸动态平衡和水锁效应, 促进瓦斯由吸附态转换为游离态。

地面煤层气电爆震体积致裂技术的关键在于建立高精度能量调配顶底板及煤层多点电爆震诱导体积致裂模型 (如图 6 所示), 形成高裂缝密度的体积致裂效应, 促进煤储层的高效致裂改造。故需提出多点电爆震诱导体积致裂顶底板及煤层强化瓦斯抽采方法, 针对低产井、老井的煤储层进行二次改造, 步骤如下: ① 获取地面煤层气井产层分布情况及套管射孔区域, 设计顶底板及煤层间隔 0.5 m 由下向上多点体积致裂; ② 控制输出能量对顶底板及煤层循环电爆震诱导致裂, 形成高裂缝密度的复杂缝网; ③ 对电爆震诱导体积致裂改造后的煤层气井进行排水采气, 考察产气量变化情况。图 6 中采用电爆震体积致裂增渗装备的最大存储能量 604.92 kJ 优先对顶底板及煤储层循环诱导体积致裂, 形成井场近区大范围致裂缝网, 导通瓦斯运移通道, 然后采用较小装备存储能量 403.28 kJ 快速作业, 产生孔/裂隙内压致裂, 使煤储层内部孔/裂隙不断扩大、发育, 形成更复杂的体积致裂缝网并解吸出更多瓦斯。

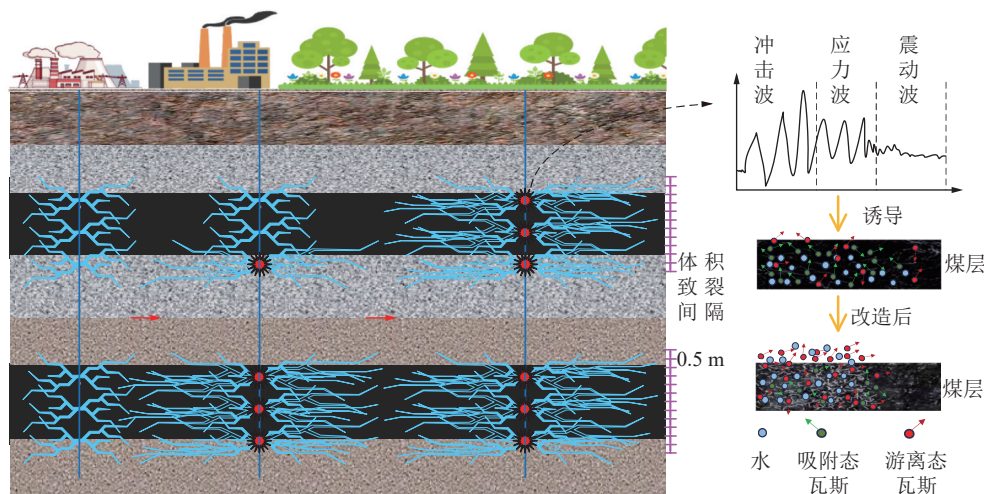


图 6 多点电爆震诱导体积致裂模型

Fig.6 Multi-point electric detonation induced volume fracturing model

2.2 电爆震体积致裂增渗装备研制

研究团队自主研制了电爆震体积致裂增渗装备如图 7 所示,该装备主要由高压充电电源、储能电容器组、输出控制柜、触发控制装置、放电开关、放电电极、安全保护装置以及高压电缆等部分构成,其中放电开关(手动)、安全保护装置和触发控制装置与输出控制柜集成在一起。

电爆震体积致裂增渗装备的关键在于开发充电电源,其基本技术指标为:① 输入电压:三相四线制,380 Vac \pm 10%, 50 Hz;② 电容组容量:12 个电容,6 000 μ F;③ 充电电压:15 kV;④ 功率:15 kW。



图 7 电爆震体积致裂增渗装备

Fig.7 Electric detonation volume fracturing and permeability increasing equipment

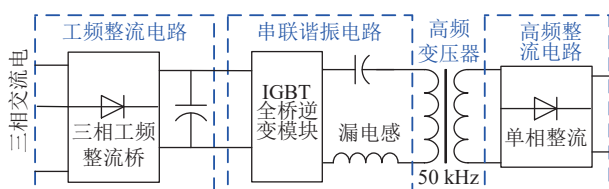


图 8 充电电源主电路

Fig.8 Main circuit of charging power supply

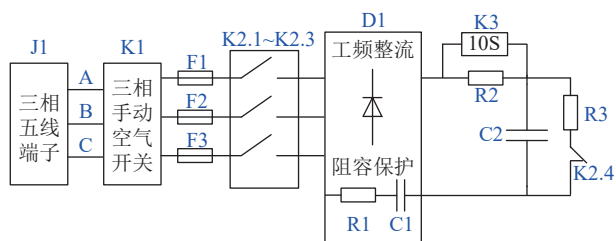


图 9 工频整流部分电路

Fig.9 Power frequency rectifier circuit

计算得到充电电源的功率为 15 kW,假设逆变电路和高频整流电路总的效率为 0.9,则整流输出功率为 $W = \bar{P}/\eta = 15\,000/0.9 = 16.67\text{ kW}$,整流电路的功率因数为 0.6,每个整流桥臂的电流为 33 A,则整流桥输入端整流桥承受的实际电流并非标准正弦波,而是尖峰脉冲式的电流,所以实际电流的裕量要多留一些。充电机箱接收到使能信号后,控制逆变桥工作,逆变

设计充电电源的主电路如图 8 所示,主要由工频整流电路、串联谐振电路、高频变压器、高频整流电路组成。图 9 为工频整流部分的电路图,图中:J1 为三相五线端子;A、B、C 为三相电;S1 为三相手动空气开关;F1、F2、F3 为熔断器;S2.1~S2.4 均为开关;S3 为延迟开关;D1 为工频整流桥;R1、R2、R3 均为电阻器;C1、C2 均为电容器。用户合上充电机箱的三相开关后,按动开机按钮,工频整流桥即开始工作,给滤波电容预充电,若干秒后启动直接充电。工频整流部分设置两处保护措施:整流输出部分对电解电容的若干秒延迟软启动和电源断电后的自动放电。

桥采用大功率模块,并利用变压器的初次级漏感、外加电感形成谐振防止输出端短路和强化电容存储激发能量。实现电路如图 10 所示,图中:X1、X2、X3、X4 均为双极结晶体管连接端。

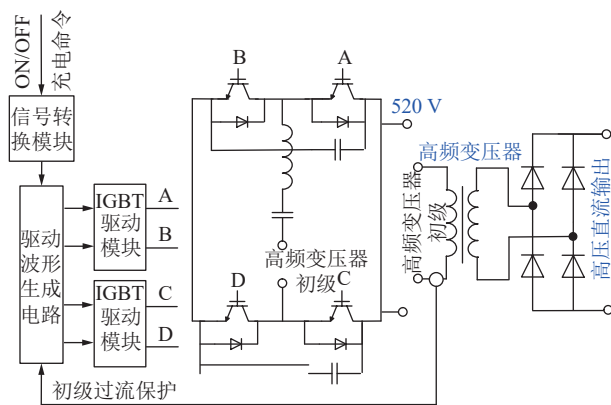


图 10 串联谐振和高频整流

Fig.10 Series resonance and high frequency rectification

电爆震体积致裂增渗装备的电路拓扑结构见图 11 所示,图中:T1 为变压器;K1 为控制充电开关;K2 为控制放电开关。装备运行致裂煤岩体的全过程可表述如下:

1) 常规 220 V 或 380 V 的工频交流电通过交流接收器后,经整流桥整流后变成 520 V 的直流电;

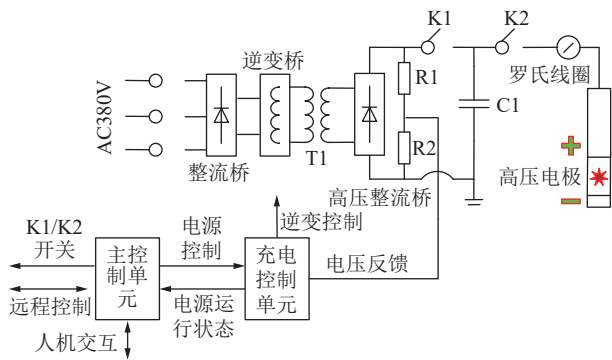


图 11 电爆震体积致裂增渗装备的电路拓扑结构

Fig.11 Circuit topology of electro-detonation volume fracturing and permeability increasing equipment

2) 整流后的直流电经逆变桥逆变成 520 V、50 kHz 的高频交流电, 然后通过 LC 谐振和变压器进行升压, 再经高压整流桥整流后转变成高压的直流电;

3) 充电控制器接收主控单元设定的充电电压后, 启动逆变桥并闭合 K1 开关对储能电容器组 C1 进行直流高压充电, 并通过反馈电阻监测其电压值;

4) 当储能电容器组 C1 充电电压达到工作阈值后,

打开 K1 开关, 闭合 K2 开关, 导通放电控制开关, 将储能电容器组 C1 存储的电能量传输到高压电极两端;

5) 当高压电极两极间的场强达到水介质击穿场强后, 便导通了高压电极的正负极, 并在两极间形成放电通道, 此时储能电容器组存储的电能量便释放在放电通道内转换为机械能产生冲击波效应, 最终对周围煤岩体进行破坏作用。

2.3 电爆震诱导体积致裂技术工艺

针对中厚煤层 (1.30~3.50 m)、厚煤层 (3.50~8.00 m) 及巨厚煤层 (大于 8.00 m) 的电爆震诱导体积致裂技术基本一致, 实施该技术需要预先确定地面煤层气井煤储层埋深及射孔段, 并尽可能的在距煤储层厚 1.00 m 的顶底板进行射孔, 若顶底板未进行射孔弹射孔, 则直接利用电爆震对射孔套管进行作业, 形成的冲击波通过套管传入水泥环及岩体后形成破坏作用, 有利于改造套管近区的岩体形成缝网结构。根据地面煤层气井基本参数设计循环电爆震体积致裂方案, 以产气面临衰竭正在排采的旧煤层气井为例, 技术工艺实施流程如图 12 所示, 具体技术工艺如下:

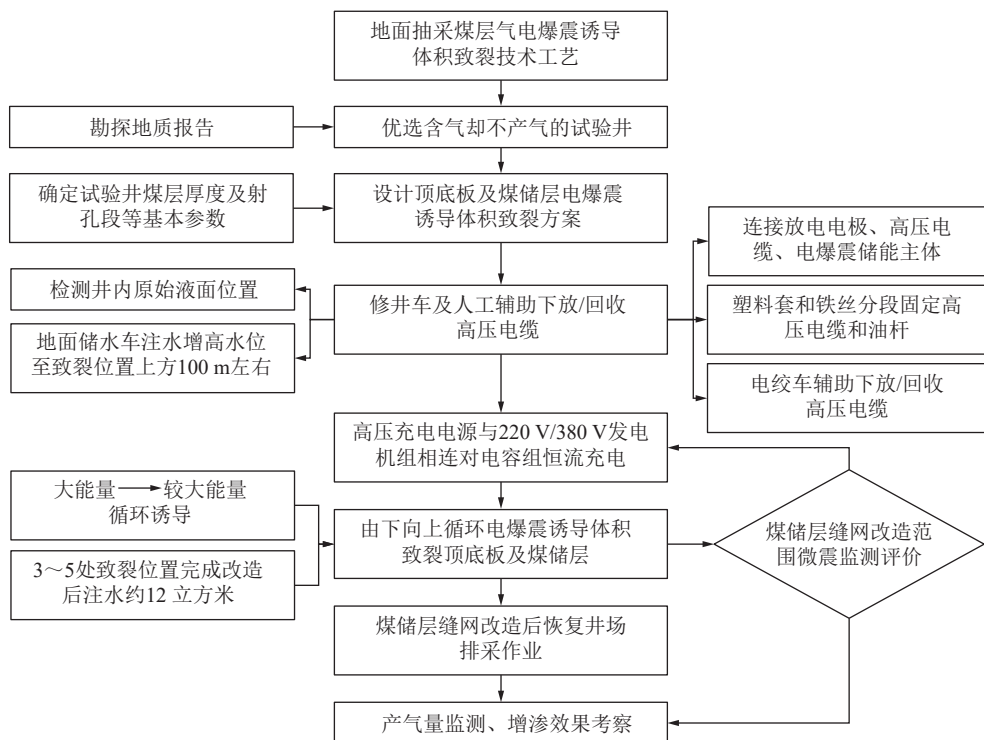


图 12 技术工艺实施流程

Fig.12 Technical process implementation process

1) 优选煤层气排采锐减的煤层气井, 通过最下方煤储层底板逐渐向上体积致裂形成缝网设计实施方案, 间隔 0.5 m 设置电爆震致裂点;

2) 通过修井车将井内排采设备取出备用, 将高压电缆连接放电电极, 油杆端部距放电电极约 1.5 m 开

始利用塑料套和铁丝固定高压电缆在油杆上, 并通过修井车和电绞车辅助将捆绑的油杆和电缆缓慢下放, 待放电电极间隙抵达第一个致裂点时停止下放油杆;

3) 在油杆下放期间通过高压电缆检测井内原始液面位置, 并利用地面储水罐向井内注入静压水, 使

井内首个致裂点距液面不低于 100 m;

4) 连接电爆震体积致裂增渗装备与下井的高压电缆,发电机组提供 220 V/380 V 稳定电压对储能电容组进行恒流充电至设定电压值,通过电压判断存储能量值,作业时装备存储能量先 604.92 kJ(通过式 (1) 计算)后 403.28 kJ(通过式 (1) 计算)循环诱导体积致裂;

5) 电爆震作业过程中采用微震监测系统实时综合评价电爆震体积致裂改造缝网影响范围,当单个致裂点电爆震对缝网的影响范围不再增大时,停止放电作业;

6) 单个致裂点完成改造后提升油杆 0.5 m,检测放电电极是否处于水介质中,3~5 个致裂点完成改造后注入 12 m³ 水,并开始下一轮电爆震致裂作业;

7) 重复上述 4)~6) 步骤,煤层气井电爆震体积致裂改造后进行排采作业,并对产气量、产水量、瓦斯浓度等指标进行监测,考察电爆震体积致裂增渗效果。

3 地面煤层气应用效果考察

3.1 试验井概况

本次电爆震体积致裂技术工程应用试验井选择山西省晋中市寿阳县平舒矿地面抽采煤层气井 PS05 井,井内结构、煤层位置及试验井周边环境如图 13 所示,该区域影响煤层气抽采的主要含水层由下至上依次为奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层、石炭系太原组灰岩裂隙含水层和山西组的砂岩裂隙含水层,区内水文地质结构简单。本次试验主要针对厚煤层 15 煤进行电爆震作业,共进行了 124 次大能量与较小能量 (100.82 kJ~604.92 kJ) 电爆震循环诱导致裂作业,其他中厚煤层共 18 次较大能量 (403.28 kJ 与 504.10 kJ) 电爆震循环诱导致裂作业。

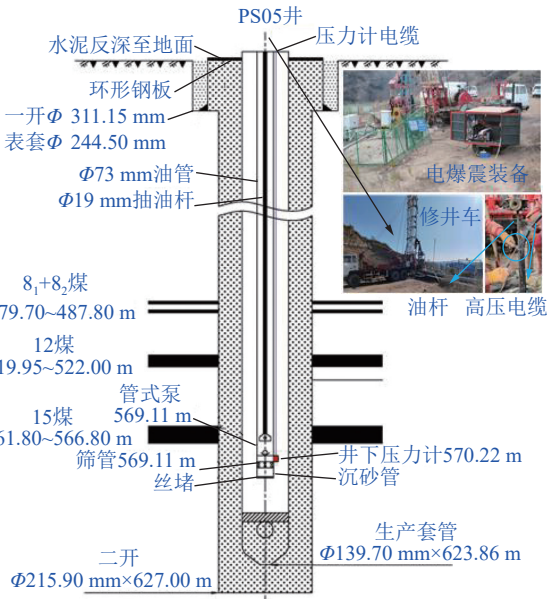


图 13 井内结构、煤层位置及试验井周边环境

Fig.13 In-well structure, coal seam location and surrounding environment of the test well

该井煤层气含量测试及射孔数据见表 1,空气干燥基条件下,8₁+8₂ 煤层气含量 6.80~16.20 m³/t,12 煤层气含量为 11.09~14.62 m³/t,15 煤层气含量为 5.94~14.18 m³/t,8₁+8₂ 煤层合层渗透率为 0.04×10⁻¹⁵~0.13×10⁻¹⁵ m²,12 煤层渗透率在 0.11×10⁻¹⁵~5.72×10⁻¹⁵ m²,15 煤层渗透率在 0.03×10⁻¹⁵~1.40×10⁻¹⁵ m²。

压裂施工射孔采用 102 型射孔枪,装填 127 型射孔弹,以孔密度 16 孔/m,初始相位角 90°螺旋布孔对目标层段进行射孔,射孔数据如表 1 所示。各井均采用光套管注入+填砂封隔方式进行施工,实现对多层目标煤层的分层压裂。PS05 井总液量及填砂情况见表 2。

在完成钻井阶段、压裂阶段工作后,及时安排施

表 1 PS05 井煤层气含量数据表

Table 1 CBM content data table of PS05 well

井号	煤层	埋深/m	渗透率/mD	气含量/(m ³ ·t ⁻¹)	射孔井段/m	射孔厚度/m	孔数/个
PS05	8 ₁ +8 ₂	479.40	0.05	6.96	478.30~480.30 485.35~487.50	2.002.15	3234
	12	520.05	0.13	14.62	520.05~522.10	2.05	32
	15	561.85	0.05	14.18	561.85~566.80	4.95	79

表 2 PS05 井总液量及填砂情况

Table 2 Total liquid volume and sand filling of PS05 well

井号	煤层	总液量/m ³	总砂量/m ³	20/40目石英砂/m ³	16/20目石英砂/m ³	排量/m ³ ·min ⁻¹
PS05	8 ₁ +8 ₂	420.20	27	23	4	8
	12	263.59	17	15	2	8
	15	749.06	56	43	13	8

工技术力量, 根据试验井钻完井及压裂施工数据, 研究编制排采设计, 开始各井排采设备的安装和井场建设工作。于 2021-6 完成 PS05 井的排采设备安装和井场建设工作, 开始排采施工, 2021-08-08 开始产气; 地面设备主要包括 CYJ4-1.5-9HF 型抽油机、排采用井口 ($\phi 139.7\text{ mm}$)、智能排采控制系统、LFX-25 型流量计 (量程 $2\sim 60\text{ m}^3/\text{h}$), 另包含地面管线、动力系统和围护。

截止 2023-11-12(图 14), 该井磕头机冲次 1.80 r/min , 套压 0.076 MPa , 液面距离 8 号煤层 -90.32 m , 距离 12 号煤层 -50.26 m , 距离 15 号煤层 -7.44 m , 日产气 180 m^3 左右, 产气阶段日均产气 362.14 m^3 , 最高日产气量 1398 m^3 , 累计产气 $299\,493\text{ m}^3$, 最高日产水 7.15 m^3 , 累计产水 $2\,889.24\text{ m}^3$ 。该井产气后期面临衰竭, 衰竭期磕头机冲次 1.07 r/min 共计 80 d 的平均日产气量为 138.24 m^3 。

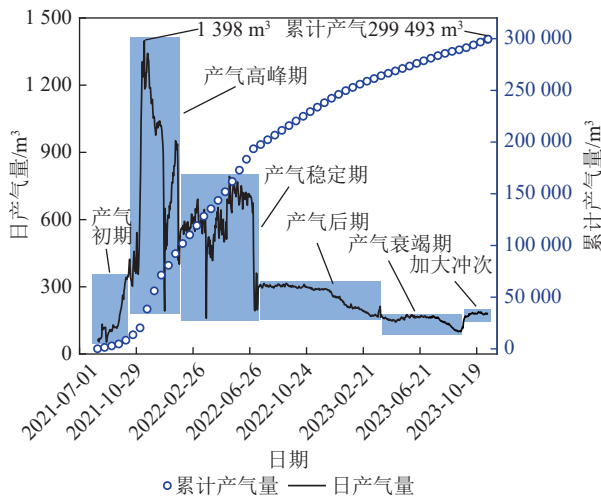


图 14 PS05 井产气量变化曲线

Fig.14 Change curve of gas production in well PS05

3.2 煤储层体积极致裂微震监测方案

微震监测系统主要包括检波器、采集站、计算机和其它传输设备, 现场工程试验环境地势复杂, 合理布设检波器是实现微震监测的必要环节, 考虑煤储层埋深 $566.80\sim 479.70\text{ m}$, 触发检波器的能量较小, 为了监测到更多的微震信号, 本次试验将检波器布设在井口附近 200 m 范围内, 检波器数量共计 10 个, 原点为 PS05 井井口, 检波器布设平面分布如图 15 所示, 计算机与微震监测系统主站位于煤层气井附近。在安装检波器时, 应避免松散土体、潮湿地段和井口附近频繁作业扰动, 垂直埋深 40 cm , 通过石膏和地表土紧密固定。试验过程中实时记录电爆震体积极致裂增渗装备放电时刻, 放电后及时获取数据分析微震信号响应特征-反演震源位置, 为后续电爆震体积极致裂技术改

造缝网影响范围综合评价提供数据支撑。

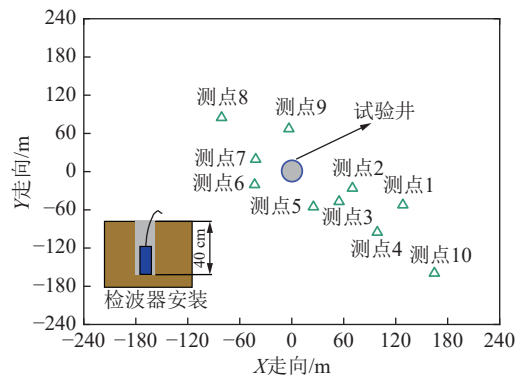


图 15 微震监测系统检波器平面分布

Fig.15 Detector plane distribution of MMS

3.3 煤储层缝网改造影响范围分析

针对 PS05 井四个煤层共进行了 142 次电爆震诱导体积极致裂试验 (表 3), 记录某次 403.28 kJ 电爆震体积极致裂获取的微震信号频域分布特征如图 16 所示, 微震信号频率主要集中在 $0\sim 100\text{ Hz}$ 区间, 以低频段为主, 幅值越大表示检波器接收到的微震信号强度越大, 裂隙得到更好的发育。测点距离致裂点 600 m 左右, 其中测点 1 与测点 5 距致裂点较远, 测点 6 与测点 9 距致裂点较近, 对比四个测点的频率信号可以发现, 近区微震信号幅值较大, 裂隙发育更显著, 随着距离的增加微震信号幅值逐渐减小, 电爆震冲击波和应

表 3 电爆震体积极致裂能量及作业次数

Table 3 Electric detonation volume fracturing energy and number of operations

井号	煤层	埋深/m	能量/kJ	次数/次
PS05	8 ₁ +8 ₂	479.00、485.65(各1次)		
		487.15~486.15(2次)	403.28	10
	12	485.05(2次)		
		521.85~520.35(0.5 m/2次)	403.28	6
		521.85	504.10	2
	15	566.35~562.35(0.5 m/次)	504.10	8
		562.35	403.28	5
		562.85	302.46	6
		563.35	201.64	5
		563.85	201.64	10
		564.35	201.64	10
		564.85	201.64	11
		563.35	604.92	9
		565.35	403.28	20
		565.85	201.64	20
		566.35	100.82	20

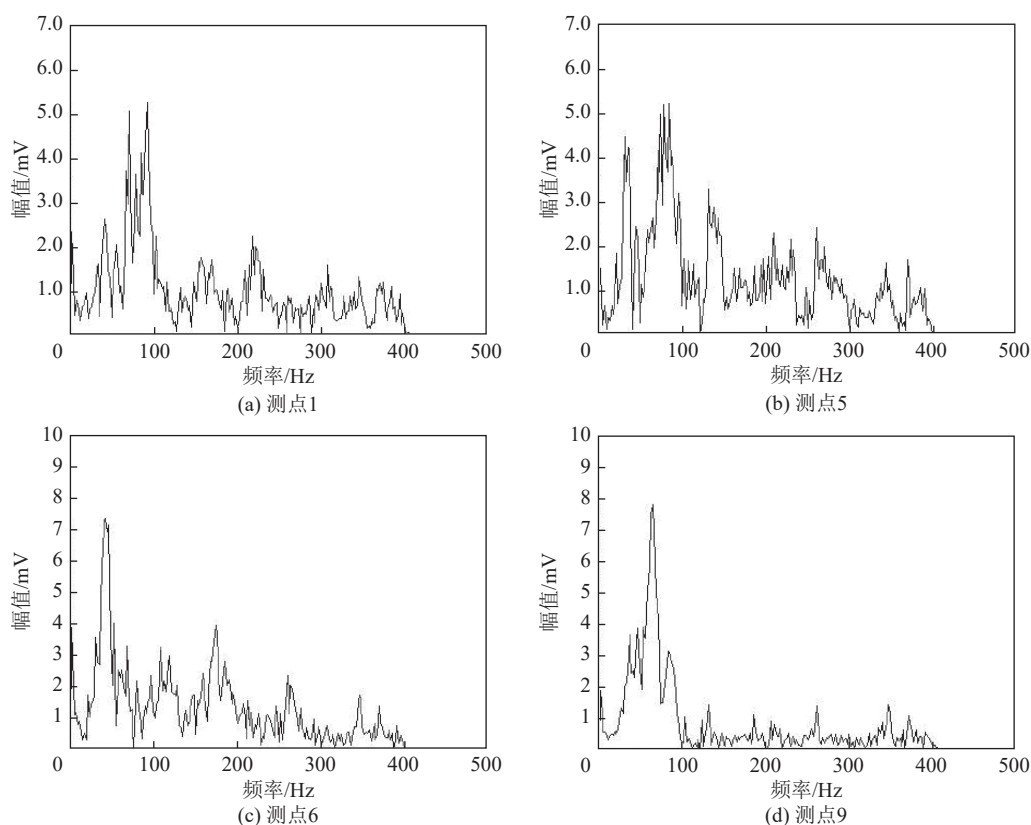


图 16 微震信号频域分布特征

Fig.16 Frequency domain distribution characteristics of microseismic signals

力波作用转变为质点震动作用,产生微弱的储层破裂信号,即在储层远区形成了细微的裂隙发育。

微震事件空间分布特征是表征电爆震体积致裂煤储层缝网改造影响范围的一种形式,同时也说明了由于电爆震诱导在该区域形成了微裂隙。绘制了电爆震作用下 PS05 井的微震事件平面分布见图 17 所示,微震事件呈环状向四周扩散,集中在电爆震致裂点附近,符合电爆震致裂煤样及混凝土试样的实验研究结果。

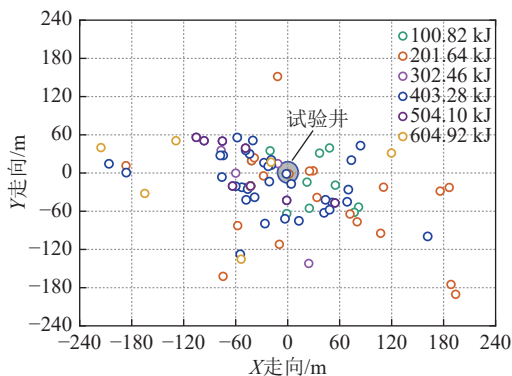


图 17 微震事件平面分布特征

Fig.17 Plane distribution characteristics of microseismic events

不同电爆震作业能量对煤储层缝网改造范围的

影响如图 18 所示,其中 201.64 kJ 能量等级下获取的微震信号计算的缝网影响半径达 257.31 m 和 271.87 m,该微震信号表现异常,且 504.10 kJ 试验的次数较少,不足以表征该能量等级的缝网影响半径。当电爆震能量逐渐增大时,对应的最大煤储层缝网影响半径分别为 98.76、187.93、144.15、206.68、119.36、219.07 m,表明了缝网影响半径整体随电爆震能量增加而增大的趋势。当电爆震冲击波能量透过射孔套管和水泥环在煤岩体中传播时,将沿着煤储层原始裂隙和初始水力压裂形成的裂缝向四周扩展、发育,且循环电爆震作用下形成了更为复杂的缝网构造。通过图 18 可知电爆震能量与缝网影响半径之间关系并非线性的,分析其原因是受到多种因素影响,如煤储层物理性质及构造、原生裂隙分布、水介质等环境特性都会影响电爆震能量传播方向,使得缝网影响半径表现为不规则现象。

3.4 煤层气排采效果分析

排水降压是地面煤层气井产气的主要方式,排采过程中外来水补给会经裂隙通道汇集到井筒并产出,导致煤层气井一般表现为平均产水量高的特征。PS05 井自建井以来日产水量一直居高不下,最大日产水量达到 7.15 m^3 时日产气量为 $125 \sim 132 \text{ m}^3$,最大日

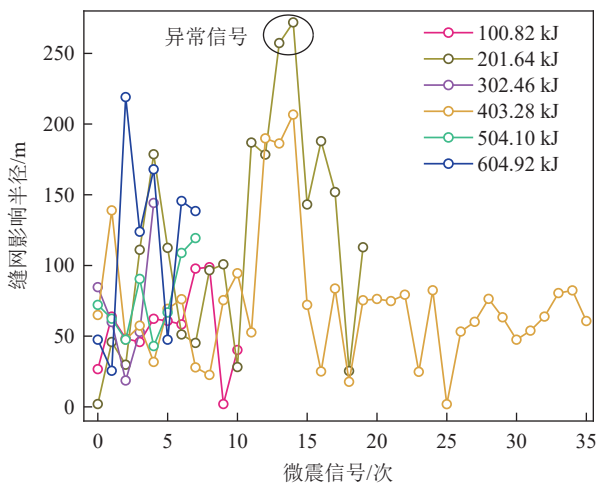


图 18 不同电爆震能量下煤储层缝网影响半径

Fig.18 Influence radius of coal reservoir fracture network under different electric detonation energy

产气量 $1\,398\text{ m}^3$ 时日产水量为 2.30 m^3 , 且日产气量高于千方时日产水量范围为 $2.30\sim 4.13\text{ m}^3$, 表明平舒 5 井是一口高产水井, 其产气量受产水量影响较大。分析电爆震体积极致裂煤储层试验后的产水量变化情况 (图 19a) 可知: 电爆震体积极致裂煤储层试验前衰竭期产水量为 3.00 m^3 左右, 加大冲次后日产水量和日产气量均得到提高, 试验后为了加快产气, 磕头机冲次

经历了“增大-减小-增大-减小-增大-稳定”的变化趋势, 与产水量变化趋势一致, 且产水量较试验前降低了 37% 左右, 磕头机冲次最终稳定为 1.03 r/min , 日产水量约 1.9 m^3 , 电爆震体积极致裂煤储层后产水量出现明显降低, 而高产水煤层气井难有高产气, 表明地面抽采煤层气电爆震诱导体积极致裂技术可能有利于提高煤层气产出。

试验后对 PS05 井进行排水采气, 绘制了试验前衰竭期 80 天和试验后的产气量变化情况见图 19b, 其中试验期间未统计产气量数据, 且存在统计大约半天的产气量数据为 124 m^3 , 尚不能作为核算电爆震体积极致裂煤储层试验后产气量提高的数据。通过图 19b 可以发现试验后产气量快速上升, 由加大磕头机冲次后的 180 m^3 上升到 300 m^3 左右, 随着动液面深度逐渐接近 15 煤层, 日产气量逐渐上升, 最大值达到 350 m^3 , 最终稳定为 320 m^3 左右。试验后共排采 126 d 平均日产气量 293.00 m^3 , 较衰竭期平均日产气量 138.24 m^3 提高了 1.12 倍, 表明本文提出的中厚煤层、厚煤层及巨厚煤层电爆震诱导体积极致裂技术是可靠的, 有利于形成缝网增渗煤储层、强化瓦斯抽采, 可为范围小、周期短、低渗透煤储层增渗增产提供新的技术需求。

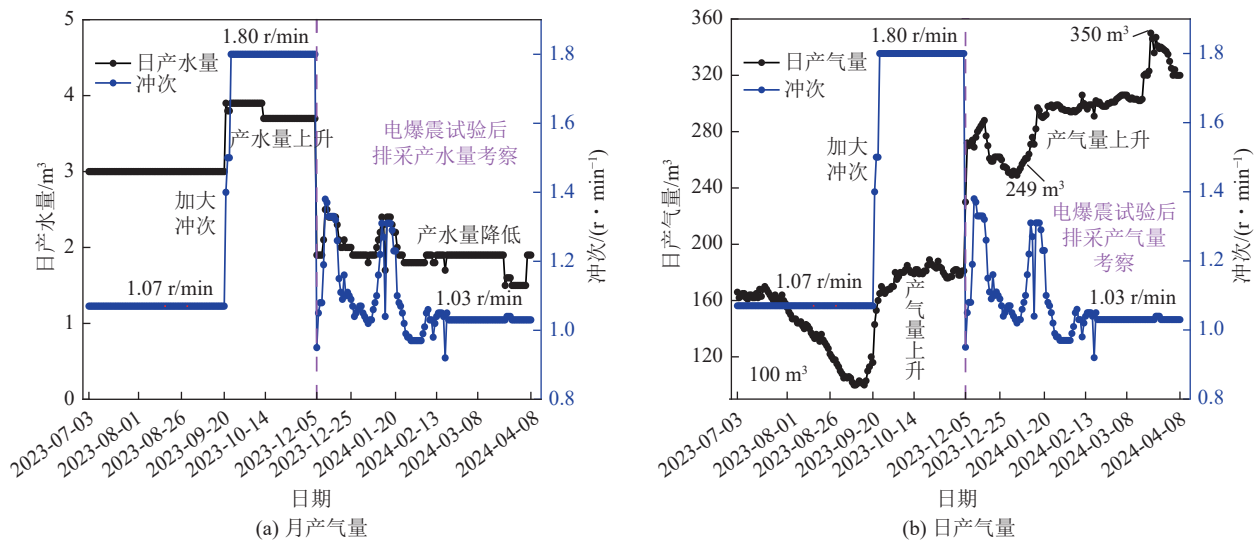


图 19 试验后产水量、产气量变化曲线

Fig.19 Change curves of water production and gas production after test

4 结 论

1) 电爆震体积极致裂增渗理论分析表明, 电爆震液相放电冲击波能量衰减历程为水介质-射孔套管-水泥环-煤岩体, 有利于驱动煤储层原生孔/裂隙或水力压裂裂隙更多地发育、扩展, 形成高裂缝密度的体积极致裂效应, 促进煤储层缝网高效致裂改造; 电爆震周

期性波动作用形成的孔/裂隙内压致裂能够打破原有瓦斯吸附解吸动态平衡和解除水锁效应, 诱发瓦斯由吸附态解吸成游离态。

2) 建立了高精度能量调配顶底板及煤储层多点电爆震诱导体积极致裂模型, 形成了地面煤层气高强电爆震体积极致裂技术, 并研制了存储能量高达 604.92 kJ 且可调控的电爆震体积极致裂增渗装备, 不仅解决了水

力化技术面临的难题,还突破了低渗透储层大范围高效致裂复杂缝网改造的技术瓶颈。

3) 工程实例表明电爆震体积致裂技术对地面煤层气低产井/老井应用效果较好,煤储层缝网影响半径高达 200 m 左右,随着电爆震存储能量增加而扩大;电爆震体积致裂煤储层后产水量显著降低,产气量较衰竭期提高了 0.80~1.53 倍,平均提高了 1.12 倍,验证了技术和装备高效开发煤层气的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 王作乾,范喆,陈希,等. 2023 年度全球油气开发现状、形势及启示[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1331–1346.
WANG Zuoqian, FAN Zhe, CHEN Xi, et al. Global oil and gas development situation, trends and enlightenment in 2023[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(6): 1331–1346.
- [2] 赵馨悦,韦波,袁亮,等. 煤储层水文地质特征及其煤层气开发意义研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 105–117.
ZHAO Xinyue, WEI Bo, YUAN Liang, et al. Hydrological characters of coal reservoir and their significances on coalbed methane development: A review[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 105–117.
- [3] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [4] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1–6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1–6.
- [5] 程远平,雷杨,杨斯杰. 煤与瓦斯突出相似模拟试验的能量原理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4078–4096.
CHENG Yuanping, LEI Yang, YANG Sijie. Energy principle of simulation experiments on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4078–4096.
- [6] 孟召平,任华鑫,禹艺娜,等. 沁水盆地南部煤储层赋存环境条件及其对渗透率的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 545–554.
MENG Zhaoping, REN Huaxin, YU Yina, et al. Geological conditions of coal reservoir occurrence in the Southern Qinshui Basin and its impact on permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 545–554.
- [7] 李泉新,许超,刘建林,等. 煤矿井下全域化瓦斯抽采定向钻进关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3108–3116.
LI Quanxin, XU Chao, LIU Jianlin, et al. Key technology and practice of directional drilling for gas drainage in all the mining time and space in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3108–3116.
- [8] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等. 中国煤层气产业现状与发展战略[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 669–682.
XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 669–682.
- [9] 王恩元,张国锐,张超林,等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297–322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297–322.
- [10] 秦波涛,马东. 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究进展及挑战[J/OL]. 煤炭学报, 1–18. (2024–04–08). <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1624>.
QIN Botao, MA Dong. Research progress and challenges in prevention and control of combined disasters of coal spontaneous combustion and methane in coal mine goaf [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–18. (2024–04–08). <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1624>.
- [11] 刘勇,张汶定,陈长江,等. 松软煤层无水化增透理论及技术发展趋势[J/OL]. 煤炭学报, 1–30[2025–01–03]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0480>.
LIU Yong, ZHANG Wending, CHEN Changjiang, et al. Prospects for the development of the theory and technology of non-hydration penetration enhancement in soft coal seams [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–30[2025–01–03]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0480>.
- [12] 赵鹏翔,常泽晨,李树刚,等. 厚煤层采空区定向孔分域抽采研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 70–79.
ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Research and application of directional drilling sub area extraction in thick coal seam goaf[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 70–79.
- [13] 王晨阳,李树刚,张永涛,等. 煤矿井下硬煤层顺层长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 72–81.
WANG Chenyang, LI Shugang, ZHANG Yongtao, et al. Enhanced gas drainage technology by staged fracturing in long bedding borehole in hard coal bed of underground coal mine and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 72–81.
- [14] 屈利伟. 高瓦斯煤层群开采卸压瓦斯抽采技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
QU Liwei. Pressure relief gas extraction technology research in high gas group of coal mining[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [15] 王伟,程远平,袁亮,等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 138–148.
WANG Wei, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Floor fracture evolution and relief gas drainage timeliness in deeper underground short-distance upper protective coal seam extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 138–148.
- [16] 许江,曹偲,李波波,等. 煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 225–230.
XU Jiang, CAO Ji, LI Bobo, et al. Experimental research on response law of permeability of coal to pore pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 225–230.

- [17] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45–49.
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 45–49.
- [18] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189–3211.
LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, et al. Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189–3211.
- [19] 张永将, 黄振飞, 李成成. 高压水射流环切割缝自卸压机制与应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3016–3022.
ZHANG Yongjiang, HUANG Zhenfei, LI Chengcheng. Investigation and application of high pressure water jet annularity slotting self pressure release mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3016–3022.
- [20] 林海飞, 仇悦, 王瑞哲, 等. 多级脉冲超声波激励含水煤体瓦斯解吸特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1403–1413.
LIN Haifei, QIU Yue, WANG Ruizhe, et al. Experimental study on gas desorption characteristics of hydrous coal by multistage pulsed ultrasonic excitation[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1403–1413.
- [21] 肖晓春, 潘一山, 吕祥锋, 等. 超声激励低渗煤层甲烷增透机理[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1726–1733.
XIAO Xiaochun, PAN Yishan, LYU Xiangfeng, et al. Mechanism of methane permeability enhance through ultrasonic irradiating on low permeable coal seam[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1726–1733.
- [22] 韦善阳, 孙威, 苗青, 等. 液态 CO₂ 相变致裂技术在金佳煤矿的应用[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 94–100.
WEI Shanyang, SUN Wei, MIAO Qing, et al. Liquid carbon dioxide phase transition fracturing technology applied to Jinjia Mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 94–100.
- [23] 冯彦军, 康红普. 水力压裂起裂与扩展分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3169–3179.
FENG Yanjun, KANG Hongpu. Hydraulic fracturing initiation and propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3169–3179.
- [24] 王凯, 李波, 魏建平, 等. 水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 778–784.
WANG Kai, LI Bo, WEI Jianping, et al. Change regulation of coal seam permeability around hydraulic flushing borehole[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 778–784.
- [25] 唐永志, 李平, 朱贵旺, 等. 超高压水力割缝技术在中等硬度低透气性煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 43–49.
TANG Yongzhi, LI Ping, ZHU Guiwang, et al. Application of ultra-high pressure hydraulic slotting technology in medium hardness and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 43–49.
- [26] 刘勇, 何岸, 魏建平, 等. 水射流卸压增透堵孔诱因及解堵新方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1963–1967.
LIU Yong, HE An, WEI Jianping, et al. Plugging factor and new plugging method to hydraulic relieving stress[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1963–1967.
- [27] 李定启, 邓广涛, 李海贵, 等. 钻杆内下套管防治软煤层钻孔塌孔技术[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 95–98.
LI Dingqi, DENG Guangtao, LI Haigui, et al. Technology of preventing drilling hole collapse in soft coal seam by inserting casing in drill pipe[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(2): 95–98.
- [28] 黄林岗, 林凌, 罗文嘉. 煤层气中甲烷扩散及水锁效应的分子动力学研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4124–4134.
HUANG Lingang, LIN Ling, LUO Wenjia. A molecular dynamics study on coalbed methane diffusion and water-blocking effects[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4124–4134.
- [29] LIU P, FAN L, FAN J Y, et al. Effect of water content on the induced alteration of pore morphology and gas sorption/diffusion kinetics in coal with ultrasound treatment[J]. *Fuel*, 2021, 306: 121752.
- [30] LIU P, LIU A, ZHONG F X, et al. Pore/fracture structure and gas permeability alterations induced by ultrasound treatment in coal and its application to enhanced coalbed methane recovery[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205: 108862.
- [31] 李元, 孙滢, 刘毅, 等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 753–765.
LI Yuan, SUN Ying, LIU Yi, et al. Electrohydraulic effect and sparker source: Current situation and prospects[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 753–765.
- [32] 林柏泉, 钟璐斌, 张祥良, 等. 高压电脉冲对烟煤微观孔隙结构的影响作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 380–386.
LIN Baiquan, ZHONG Lubin, ZHANG Xiangliang, et al. Effect of high voltage pulse on micro-pore structure of bituminous coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 380–386.
- [33] ZHANG Z H, NIE B S, LI C X. Investigation on the evolution of shock wave energy in the fracturing process via high voltage Electric Pulse[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(10): 8741–8757.
- [34] ZHANG Z H, NIE B S, HOU Y N. Investigation on energy characteristics of shock wave in rock-breaking tests of high voltage electric pulse based on Hilbert-Huang transform[J]. *Energy*, 2023, 282: 128871.
- [35] LI C X, NIE B S, ZHANG Z H, et al. Experimental study of the structural damage to coal treated by a high-voltage electric pulse discharge in water[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(12): 6280–6291.
- [36] 秦勇, 李恒乐, 张永民, 等. 基于地质-工程条件约束的可控冲击波煤层致裂行为数值分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 108–118, 129.
QIN Yong, LI Hengle, ZHANG Yongmin, et al. Numerical analysis on CSW fracturing behavior of coal seam under constraint of geological and engineering conditions[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 108–118, 129.
- [37] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79–85.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, QIN Yong. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse

- controllable shock waves[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(9): 79–85.
- [38] 高明忠, 谢晶, 杨本高, 等. 场微波作用下岩石体破裂特征及其机制探索[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1122–1137.
- GAO Mingzhong, XIE Jing, YANG Bengao, et al. Characteristics and mechanism of rock 3D volume fracturing in microwave field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1122–1137.
- [39] 罗朝义, 江泽标, 郑昌盛, 等. CO₂ 相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(11): 138–143.
- LUO Chaoyi, JIANG Zebiao, ZHENG Changsheng, et al. Application on permeability improvement technology with CO₂ phase change to borehole drilling along coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(11): 138–143.
- [40] 曹运兴, 张军胜, 田林, 等. 低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2631–2641.
- CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, TIAN Lin, et al. Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2631–2641.
- [41] 曹运兴, 石玢, 周丹, 等. 煤层气低产井高压氮气闷井增产改造技术与应用[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2556–2565.
- CAO Yunxing, SHI Yan, ZHOU Dan, et al. Study and application of stimulation technology for low production CBM well through high pressure N₂ Injection-soak[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2556–2565.
- [42] 刘勇, 李志飞, 魏建平, 等. 磨料空气射流破煤冲蚀模型研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1733–1742.
- LIU Yong, LI Zhifei, WEI Jianping, et al. Erosion model of abrasive air jet used in coal breaking[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1733–1742.
- [43] 魏建平, 蔡玉波, 刘勇, 等. 非刀具破岩理论与技术研究进展与趋势[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(2): 801–832.
- WEI Jianping, CAI Yubo, LIU Yong, et al. Progress and trends in non-tool rock breaking theory and technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 801–832.
- [44] 聂百胜, 马正韬, 柳先锋, 等. 基于液电效应的高强电爆震致裂页岩试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(4): 623–633.
- NIE Baisheng, MA Zhengtao, LIU Xianfeng, et al. Hydro-electric effect based experimental study on shale cracking caused by high-strength electric detonation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(4): 623–633.
- [45] 杨万有, 郑春峰, 李昂, 等. 可控冲击波致裂海上油层可行性分析[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(1): 38–41, 9.
- YANG Wanyou, ZHENG Chunfeng, LI Ang, et al. Feasibility analysis of controllable shock wave induced cracking in offshore oil reservoir[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(1): 38–41, 9.
- [46] 李恒乐, 秦勇, 周晓亭, 等. 循环高压电脉冲作用下煤体微裂隙发育特征及其煤岩学控制[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 105–113.
- LI Hengle, QIN Yong, ZHOU Xiaoting, et al. Development characteristics of coal microfracture and coal petrology control under cyclic high voltage electrical pulse[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 105–113.
- [47] 安世岗, 陈殿赋, 张永民, 等. 可控电脉冲波增透技术在低透气性煤层中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 138–145.
- AN Shigang, CHEN Dianfu, ZHANG Yongmin, et al. Application of controllable electric pulse wave permeability-enhancing technology in the low-permeability coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 138–145.
- [48] 康忠健, 王聪, 聂云良, 等. 非常规储层电脉冲共振增产技术研究与应用[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(6): 82–87.
- KANG Zhongjian, WANG Cong, NIE Yunliang, et al. Research and application of electric pulse resonance stimulation technology for unconventional reservoir[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(6): 82–87.
- [49] 鲜保安, 高德利, 徐凤银, 等. 中国煤层气水平井钻完井技术研究进展[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1974–1992.
- XIAN Baoan, GAO Deli, XU Fengyin, et al. Research progress of coalbed methane horizontal well drilling and completion technology in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1974–1992.
- [50] 武杰, 田永东. 高聚能电脉冲技术在沁水盆地煤层气井的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(5): 206–211, 218.
- WU Jie, TIAN Yongdong. Application of high energy electric pulse technology in coalbed methane wells in Qinshui basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(5): 206–211, 218.
- [51] XIONG L L, LIU Y, YUAN W, et al. Experimental and numerical study on the cracking characteristics of repetitive electrohydraulic discharge shock waves[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(49): 495502.
- [52] CHO S H, KANEKO K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 771–784.
- [53] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 966–975.
- [54] YUAN W, WANG W, SU X B, et al. Experimental and numerical study on the effect of water-decoupling charge structure on the attenuation of blasting stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104133.
- [55] 冷振东, 贾永胜, 卢文波, 等. 高孔隙软岩爆破能量传输规律与爆破大块形成机制[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(5): 1420–1433.
- LENG Zhendong, JIA Yongsheng, LU Wenbo, et al. Blasting energy transmission and oversize boulders formation mechanism in soft rock blasting with high porosity[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(5): 1420–1433.
- [56] NIE B S, ZHANG H, LIU X F, et al. Experimental study on the mechanical stability and mesoscopic damage characteristics of coal under different mining disturbance rates[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(5): 3841–3861.
- [57] 刘承伟. 缝槽水压爆破高效定向破岩机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- LIU Chengwei. Mechanism study on efficient and directional rock fracturing by slotting hydraulic blasting[D]. Chongqing: Chongqing

- University, 2019.
- [58] 刘耀琪, 曹安业, 王崧玮, 等. 基于微震群震动波能量衰减特性的冲击地压危险预测方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1523–1533.
LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Songwei, et al. Prediction method of coal burst based on attenuation characteristics of seismic cluster energy[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1523–1533.
- [59] 丛利, 曹安业, 周远宏, 等. 基于动静载冲击地压危险叠加的综合预警方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 767–776.
CONG Li, CAO Anye, ZHOU Yuanhong, et al. The comprehensive pre-warning method of rock burst hazard based on theory of dynamic and static combined loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 767–776.
- [60] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩储层压裂改造的非常规理论与技术构想[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012, 44(6): 1–6.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Unconventional theories and strategies for fracturing treatments of shale gas strata[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(6): 1–6.
- [61] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩气储层改造的体破裂理论与技术构想[J]. 科学通报, 2016, 61(1): 36–46.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea of the theory and application of 3D volume fracturing for stimulation of shale gas reservoirs[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(1): 36–46.
- [62] ZHANG H, YU Q, LI J, et al. Damage analysis of cement sheath and rock subjected to electrohydraulic shock waves under the perforation completion[J]. Energy Science & Engineering, 2024, 12(8): 3289–3307.