

### 深部煤层近井激光热裂机理及工艺参数优化

赵海峰 杨紫怡 梁为 钟骏兵

#### 引用本文:

赵海峰, 杨紫怡, 梁为, 等. 深部煤层近井激光热裂机理及工艺参数优化[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 161–170.

ZHAO Haifeng, YANG Ziyi, LIANG Wei, et al. Mechanisms and technological parameter optimization of near-wellbore laser thermal fracturing for deep coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 161–170.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.09.0572>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 延川南地区深部煤层气U型水平井压裂参数优化设计

Optimal design of the parameters of U-shaped horizontal well for deep coalbed methane in southern Yanchuan

煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 175–181 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.027>

#### 沁水盆地柿庄北区块3号煤层裂缝预测

Prediction of fractures of seam No.3 in northern Shizhuang, Qinshui basin

煤田地质与勘探. 2017, 45(1): 56–61 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.01.011>

#### 深部煤层采动破坏电位响应特征与分布规律

Characteristics and distribution laws of electric potential response to mining failure of deep coal seam

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 241–248 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.026>

#### 沁水盆地柿庄北深部煤层水平井CO<sub>2</sub>注入参数研究

CO<sub>2</sub>-injection parameters in horizontal well of deep coalbed in north Shizhuang block of Qinshui basin

煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 188–192 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.029>

#### 前置酸压裂提高煤层气单井产量机理与适用性研究

Mechanism and applicability of increasing coalbed methane well production by pre-positioned acid fracturing

煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 153–161 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.018>

#### 激光辐照煤岩的热效应数值模拟分析

Numerical simulation of thermal effects of laser irradiation on coal and rock

煤田地质与勘探. 2018, 46(6): 217–222 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.06.033>



移动阅读

赵海峰, 杨紫怡, 梁为, 等. 深部煤层近井激光热裂机理及工艺参数优化[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 161–170. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.09.0572

ZHAO Haifeng, YANG Ziyi, LIANG Wei, et al. Mechanisms and technological parameter optimization of near-wellbore laser thermal fracturing for deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 161–170. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.09.0572

## 深部煤层近井激光热裂机理及工艺参数优化

赵海峰<sup>1</sup>, 杨紫怡<sup>1</sup>, 梁为<sup>2</sup>, 钟骏兵<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249;  
2. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095)

**摘要:** 中国深部煤层气资源丰富, 是煤层气进一步开发的重要领域, 但深部煤层气地质条件复杂, 具有低孔、超低渗特征。在钻井过程中, 钻井液进入储层易造成近井污染, 常规水力压裂技术趋于在最大水平主应力方向造缝, 全井眼的解堵困难。激光热裂技术具有短时间破裂岩石、同时通过机械设备调控能自由改变激光照射角度, 形成径向裂缝、解决近井污染等优势。使用 ABAQUS 有限元软件, 建立激光热裂煤层模型, 探讨激光热裂机理及激光工艺参数的影响。分析裂缝长度与数量的变化规律, 优选出解决现场近井污染区域的最佳激光参数。结果表明: (1) 激光照射热裂煤层是使煤层表面存在温差而产生热应力导致煤层破裂。(2) 裂缝数量与激光功率、激光照射煤层的时间呈正相关, 激光功率由 400 W 增大到 1 000 W 时, 裂缝数量由 10 条增加到 37 条; 激光功率 600 W 时, 照射时间由 1 s 增至 15 s, 裂缝数量由 24 条增至 36 条; 裂缝数量与激光频率呈负相关, 随着激光照射煤层距离增大先增大后减小, 照射距离为 10 cm 时产生裂缝数量最多。(3) 裂缝长度与激光功率、照射煤层时间以及激光频率呈正相关, 与照射煤层距离呈负相关, 其中激光照射时间影响最明显, 照射时间 1 s 时裂缝长度为 1.52 mm, 照射时间增加到 5 s 时裂缝长度激增为 57.6 mm。以陕西韩城深部取心样品为例, 激光热裂深部煤层 2 m 范围内的近井污染最佳激光功率为 20 kW, 最佳激光照射时间为 2 280 s。相较于水力压裂, 激光热裂煤层能形成更加复杂的裂缝, 但形成的裂缝长度较小, 实际应用中, 建议将水力压裂技术与激光热裂技术相结合, 以实现解堵和增渗的目的。

**关键词:** 深部煤层; 激光热裂; 近井解堵机理; 裂缝; ABAQUS 有限元

**中图分类号:** P618.11; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)02-0161-10

### Mechanisms and technological parameter optimization of near-wellbore laser thermal fracturing for deep coal seams

ZHAO Haifeng<sup>1</sup>, YANG Ziyi<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>2</sup>, ZHONG Junbing<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
2. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China)

**Abstract:** China boasts abundant deep coalbed methane (CBM) resources, which play a significant role in further CBM production. However, deep coal seams exhibit low porosities and ultra-low permeabilities due to intricate geological conditions. In the drilling process, drilling fluids enter the reservoirs, prone to cause near-wellbore contamination. Although conventional hydraulic fracturing technology tends to create fractures in the direction of the maximum horizontal principal stress, it is challenging for this technology to achieve blockage removing throughout the whole borehole. Laser thermal fracturing technology can break rocks in a short time. Furthermore, it allows for the laser irradiation angle to change freely by regulating mechanical equipment, thus forming radial fractures and reducing near-wellbore contamination. Using the ABAQUS finite element software, this study, establishing a model of laser thermal fracturing of coal

收稿日期: 2023-09-20; 接收日期: 2024-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672333)

第一作者: 赵海峰, 1980 年生, 男, 安徽舒城人, 博士, 教授, 从事石油工程岩石力学研究工作. E-mail: zhaohf@cup.edu.cn

seams, explored the fracturing mechanisms and the influence of laser technological parameters. Through analyses of the variation patterns of fracture length and number, this study determined the optimal laser parameters targeting near-wellbore contamination areas. Key findings include: (1) Laser thermal fracturing can cause thermal stress on the surfaces of coal seams through temperature differences, ultimately fracturing coal seams. (2) There was a positive correlation between the fracture number and the laser power and irradiation time. Specifically, the number increased from 10 to 37 as laser power expanded from 400 to 1 000 W. At a laser power of 600 W, the number increases from 24 to 36 as the irradiation time prolonged from 1 to 15 s. In contrast, the fracture number negatively correlated with the laser frequency. With an increase in the laser irradiation distance, the fracture number increased initially and then decreased, peaking at an irradiation distance of 10 cm. (3) The fracture length positively correlated the laser power, irradiation time, and laser frequency but negatively correlated the laser irradiation distance. Among these factors, the laser irradiation time produced the most significant influence on the fracture length, which soared from 1.52 to 57.6 mm as the irradiation time increased from 1 to 5 s. For instance, for samples collected from Hancheng, Shaanxi Province through deep coring, the optimal laser power and irradiation time of laser thermal fracturing for the near-wellbore contamination area of deep coal seams extending within 2 m were 20 kW and 2 280 s, respectively. Compared to hydraulic fracturing, laser thermal fracturing can form more complex but shorter fractures. In practical application, the approach combining hydraulic fracturing with laser thermal fracturing is recommended for blockage removing and permeability enhancement.

**Keywords:** deep coal seam; laser thermal fracturing; near-wellbore blockage-removing mechanism; fracture; ABAQUS

中国深部煤层气资源丰富,埋深小于 2 000 m 的煤层气地质资源量为  $30.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中埋深大于 1 000 m 的深部煤层气资源量为  $18.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占比 63 %<sup>[1]</sup>,随着浅层煤层气资源的衰竭,深部煤层气将是未来勘探开发的重要领域<sup>[2-3]</sup>。然而,深部煤层气地质条件复杂,具有非均质性强、储层物性差、地应力大的特点<sup>[4-5]</sup>,且在煤层气开发过程中,钻井液引发的滤失、黏土矿物水化膨胀以及与地层离子相互作用导致的沉淀和水锁效应等问题,可能对深部煤储层造成污染<sup>[6-7]</sup>。目前常用的解堵方式有常规酸化解堵、热化学解堵、二氧化氯解堵等,但这些解堵方式主要为化学解堵,易对地层造成二次伤害。现有的超声波解堵技术虽然避免了二次伤害,但也通常存在电源功率不够大、脉冲时间长等问题<sup>[8]</sup>。而激光热裂解堵技术作为一种纯物理解堵方式,不仅实现了近井地带的全方位解堵,还可以根据现场施工情况调节激光频率与功率,做到强度和范围可调可控,具有广阔的推广应用前景。

激光热裂岩石技术是通过激光设备发射出的能量光束照射在矿石的外表面<sup>[9-11]</sup>,在此期间,被照射的物质由于各个位置上存在温度差异而产生热应力,在这种力的作用下岩石会发生破裂,如果激光持续照射,岩石的表面温度就会越来越高,随后就会发生相变破坏,常见的有熔化、气化现象。相比其他破岩技术,激光照射在岩石上的温度瞬间变高,能在短时间内对岩石造成破裂,同时能通过机械设备调控自由地改变激光照射的方向,能够很好地解决近井污染所造成的地层渗透率下降问题,实现全井眼解堵<sup>[12-14]</sup>。因此,开展深部煤层激光热裂近井解堵机理研究,分析不同激光参数对深部煤层裂纹扩展的影响规律,对深部煤层气高效开发,解决近

井污染,提高煤层气产量具有重要意义。

对于激光热裂岩石技术的研究多数是利用各种室内实验和数值模拟的手段进行的。由实验得出,激光作用在强度较小的岩石上时,主要破岩机理为温度梯度所产生的热应力<sup>[15]</sup>,而作用在强度较大的岩石上时,主要破岩机理为激光对岩石的相变作用,同时不可忽视热应力的作用<sup>[16]</sup>。激光破裂岩石时,在很短时间内,受激光照射的岩石中心发生破裂,与气化的时间相近。因岩石矿物成分的热学差异,导致激光照射后局部形成热应力,当温度升高所产生的热应力超过岩石中成分最小的极限强度时,就会使得矿物中裂缝扩展<sup>[17]</sup>。Xia Ming<sup>[18]</sup>基于离散元颗粒法提出了一种热-力耦合颗粒模型,通过仿真分析发现,岩石在加热条件下更易形成微裂纹。Li Qin 等<sup>[19]</sup>创新性地提出了一种基于离散元法的激光破岩模型,能够反映岩石在激光作用下的开裂过程。

激光破裂岩石机理的研究主要集中于基于离散元方法的热-力耦合模型的页岩、砂岩、碳酸盐岩、花岗岩等研究,而对于煤层破坏机理的研究鲜有报道。同时,上述研究过程中将外边界设定为自由边界,尚未考虑地应力的影响。实际储层中,地应力对裂缝的起裂和扩展有重要影响。因此,笔者基于扩展有限元法,将三向地应力融入到“热-力”耦合模型中,进而开展深部煤层激光热裂近井解堵机理研究,分析激光热裂深部煤层过程中激光功率、频率、照射时间和距离等工艺参数对裂缝长度、数量等热裂特性的影响规律,以优选出可形成复杂缝网的最佳激光参数,为深部煤层激光热裂近井解堵技术提供理论支撑。

## 1 激光破岩数值仿真模型

储层是一个曲面,激光放到井筒下照射储层时,因

激光半径小、储层大, 可将该曲面简化为一个二维平面, 则激光照射下其吸收热量的方式是面吸收, 现场采用的也是高斯激光, 视为照射在煤层中心, 由此建立二维高斯热源模型(图 1)。

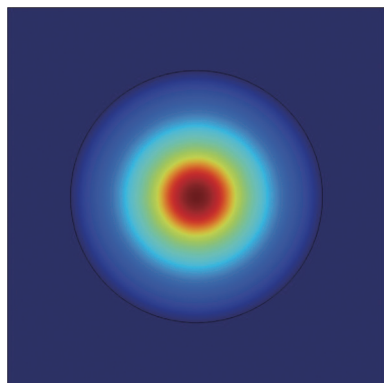


图 1 二维高斯热源

Fig.1 A 2D Gaussian heat source

## 1.1 激光热源模型

激光热源视为面热源。激光模型表达式如下:

$$q = \frac{2PA}{\pi R^2} \exp \left[ -2 \frac{(x-x_0-Vt)^2 + (y-y_0)^2}{R^2} \right] \quad (1)$$

激光照射时, 照射的中心位置形成光斑, 使煤吸收能量, 表面温度上升, 随后发生热传导导致温度快速下降, 因此煤表面的温度与时间有关。考虑到煤受热辐射的影响不大, 因此忽略这个因素。激光照射煤层发生温度变化的过程中, 将空气之间的对流作用当作边界条件, 则只需要考虑煤层中热传导。结合傅里叶定律与能量守恒定律推导热传导方程:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 u} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 v} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 w} \right) + P_0 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

控制方程和边界条件、初始条件一起, 组成对传热过程的完整数学描述, 从而使控制方程有相应的定解<sup>[20]</sup>。初始条件为激光照射前煤层的温度, 设定为室温 25℃。第一类边界条件是煤层边界上的温度, 这是瞬时非稳态传热问题; 第二类边界条件是激光的热流密度; 第三类边界条件为煤层附近空气之间的表面对流传热系数和附近环境的温度。

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = T_1 \\ t > 0, T_w = f(t) \\ t > 0, k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = q(t) \\ -k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h(T_w - T_f) \end{cases} \quad (3)$$

## 1.2 热固耦合模型

激光热裂煤层是煤层形变和热量交换、发生破坏的温度场-应力场耦合过程。

### 1.2.1 热固耦合控制方程

考虑位移、温度变化时的静力平衡方程<sup>[21-22]</sup>为:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu} u_{j,ji} - K' \alpha_T T_i + F_i = 0 \quad (4)$$

$$K' = 2G(1+\nu)/3(1-2\nu) \quad (5)$$

考虑热对流和力学能量的温度场控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + (T_0 + T) K' \alpha_T \frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (6)$$

式(4)~式(6)构成了激光热裂岩石的热弹性力学非线性方程组。

### 1.2.2 破坏准则

深部煤层裂缝扩展存在两种主导形式。一种是常规的压裂裂缝, 沿着最大主应力方向延伸, 形成张开型裂缝(I型), 属于最大拉应力准则。激光热裂煤层产生的裂缝表现出不同的行为, 并不严格遵循最大主应力方向延伸, 而是在各个方向都有可能扩展。这导致裂缝面同时受到拉伸应力和剪切应力的作用, 使得激光热裂岩石的裂缝可以被视为一种张开型裂缝和剪切型裂缝(II型)的复合型裂纹。因此, 对于激光热裂岩石的裂缝延伸, 选择最大主应力准则尤为重要。

当岩石应力状态满足最大主应力准则, 即岩石所受周向拉应力的最大值达到临界值时, 岩石开始发生破裂。主应力表达式为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \sigma_{xy}^2} \\ \sigma_{\min} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \sigma_{xy}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

最大主应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left( -\sin \frac{\theta}{2} + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

当 $\sigma_{\max}$ 大于允许应力时, 裂缝在垂直于最大拉应力方向开始扩展, 即:

$$(\partial \sigma_{\max} / \partial \theta)_{r=\text{const}} = 0 \quad (9)$$

则裂缝开裂角 $\theta_c$ 为:

$$\theta_c = \cos^{-1} \left[ \left( 3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2 / (K_{II}^2 + 9K_{II}^2)} \right) / (K_{II}^2 + 9K_{II}^2) \right] \quad (10)$$

## 2 基于扩展有限元法的激光照射煤层数值模拟

为研究不同激光照射参数对煤层裂缝长度、数量的影响规律, 借助 ABAQUS 有限元软件建立“热-力”



耦合模型,并利用 ABAQUS 软件中自带的子程序,采用 FORTRAN 语言完成高斯激光热源模型建立,改变激光相关参数,如激光功率、频率、照射时间、照射距离,从而实现激光照射岩石的温度场仿真分析。

由于没有公开发表的深层煤热裂实验数据,本节引用了花岗岩致裂实验数据<sup>[23]</sup>,将实验结果与模型模拟结果进行对比,以验证模型能够准确预测岩石在激光照射下的温度变化和热裂特性。

## 2.1 物理模型及花岗岩参数

基于传热学基本理论,使用 ABAQUS 有限元软件对煤层进行建模,从而模拟激光照射下煤层温度场。由于激光热裂煤层过程涉及的影响因素较多,因此,需要对激光与花岗岩、深部煤层的模型以及之间的作用进行简化,作出以下假设:

- (1) 岩石是均匀各向同性的;
- (2) 岩石内部无其他应力,不考虑激光照射过程的相变;
- (3) 激光热源为高斯热源,不考虑外界的热辐射;
- (4) 不考虑热裂解伴随的气化过程。

## 2.2 模型建立及参数设定

煤层模型尺寸设置为 50 mm×50 mm,激光工艺参数见表 1。在激光照射中心处进行网格细化,提高模型的准确度,采用用户自定义程序在煤层模型上加载不同功率、频率的激光热源,并在不同的照射时间、照射距离对煤层表面进行照射。

表 1 激光照射参数  
Table 1 Laser irradiation parameters

模拟参数	激光功率/W	照射时间/s	照射距离/cm	激光频率/Hz
数值	400	1	6	10
	600	5	8	100
	800	10	10	1 000
	1 000	15	12	10 000

## 2.3 模型验证

为了验证方法的可行性,采取模拟 600 W 的激光功率照射 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的花岗岩圆柱体,模型简化为二维模型,花岗岩物理参数见表 2。

### 2.3.1 形貌对比

600 W 激光功率照射花岗岩的形貌,花岗岩在激光照射下产生宽度较为明显的裂纹,形成的 4 条主裂缝由照射中心向外延伸,贯穿岩心,激光热融化与热气化形成的 6.52 mm 孔洞对次生裂缝的缝长和数量都有促进作用,数模中形成 3 条类似贯穿裂缝(图 2)。

### 2.3.2 缝长

图 3 为激光功率 600 W 照射时花岗岩数值模型中缝长随时间变化趋势,其缝长在照射时间 15 s 时为

表 2 花岗岩物理参数  
Table 2 Physical parameters of the granite

花岗岩物理参数	数值
弹性模量/GPa	27.5
泊松比	0.3
抗压强度/MPa <sup>[24]</sup>	155.12
抗拉强度/MPa <sup>[25]</sup>	4.46
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 714
热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	714
热传导系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	3.096
热膨胀系数/K <sup>-1</sup> <sup>[26]</sup>	0.000 025
绝对参考温度/℃	25

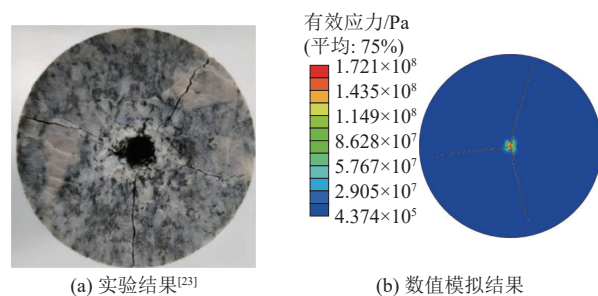


图 2 激光功率 600 W 的花岗岩实验与模型形貌

Fig.2 Experimental and model morphology of granite under laser power of 600 W

22.27 mm,图 2a 中花岗岩热裂实验所得裂缝为 21.75 mm,二者缝长大致相符。

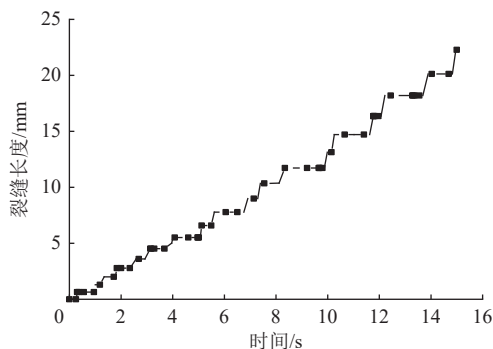


图 3 激光功率 600 W 时缝长随激光照射时间变化趋势

Fig.3 Fracture length varying with laser irradiation time under laser power of 600 W

## 3 影响因素与结果分析

为定量分析激光照射参数对煤层温度场的影响,利用本文第二节建立的模型,基于韩城矿区深层煤样岩石力学参数,采用有限元 ABAQUS 建立“热-力”耦合模型,探究激光功率、照射煤层距离、照射时间、频率等各因素下煤层温度场的时空演化规律。

### 3.1 激光功率

不同激光功率下煤层发生裂纹扩展的应力变化分

析显示: 激光照射中心始终是应力最大处, 并且应力关于激光照射中心呈对称分布; 随着激光照射时间增加, 中心处逐渐产生裂纹并向外延伸, 且裂纹数随着激光功率的增大而增多(图 4)。这是因为激光岩体表面散热较

快, 形成较大的温差, 使岩体内产生压应力, 在其表面产生拉应力, 当温差产生的拉应力超过煤层的最终抗拉强度时, 煤层开裂。随着激光功率的升高, 煤层各点的温度梯度也增大, 裂缝数也随之增多。

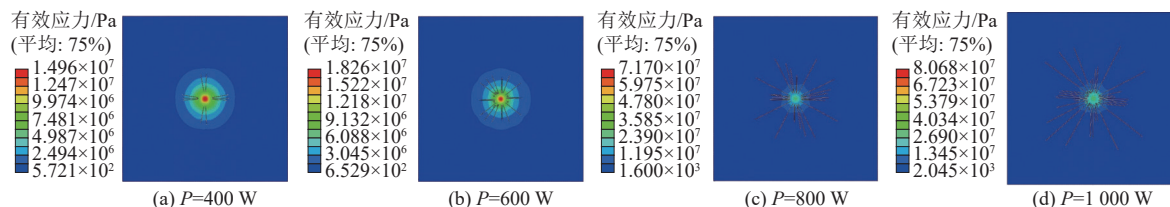


图 4 不同激光功率煤层发生裂纹扩展的应力云图

Fig.4 Contour maps showing stress during fracture propagation in coal seams under different laser power

不同激光功率照射煤层所形成的裂缝数量分布显示: 初始激光功率为 400 W 时, 裂缝条数为 10 条, 将激光功率增加到 1 000 W 后, 裂缝条数增加至 37 条(图 5)。其原因可归结为煤自身吸热增能和跨温度梯度致裂。(1) 在激光破裂煤层的过程中, 激光功率增大意味着有更多的能量用于熔化煤体, 直接致裂煤层且裂缝长度增加。(2) 由于激光照射区域吸收激光能量的速度大于向四周传递能量的速度, 因此激光照射区域与非照射区域形成极大的温度梯度, 热应力增大, 破坏煤体结构, 使得激光热裂产生的裂缝条数增多。

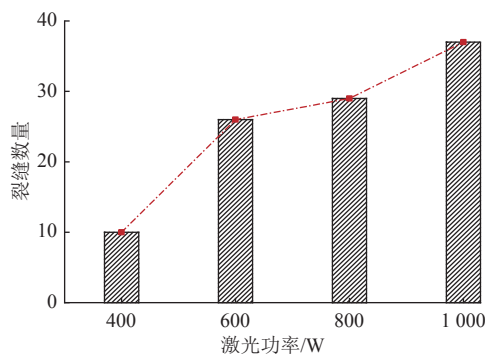


图 5 不同激光功率下煤层裂缝数量分布

Fig.5 Fracture number distribution of coal seams under different laser power

可见, 当激光照射面积保持不变时, 随着激光功率的增加, 激光强度也会增加<sup>[27]</sup>。因此, 煤层单位时间吸收的激光能量越大, 就越有利于裂缝的扩展和随后的煤层的破碎。所以, 实际激光致裂增透过程中, 可适当增加激光照射功率。

不同激光功率下裂纹扩展长度变化趋势显示激光功率由 400 W 增大到 1 000 W 时, 裂纹开始扩展时间由 0.9 s 缩短到 0.3 s(图 6)。这是因为激光致裂的原理为热应力导致煤层破碎, 其他条件不变时, 激光功率增大使得煤体从激光中吸收的能量增多, 被照射区域的温度升高, 激光能量沿径向传导, 一部分能量用于直接熔

化煤体, 一部分使得煤体表面的能量密度增大, 从而产生的热应力增大, 越先达到破裂条件, 裂纹扩展的长度也就越大<sup>[15]</sup>。

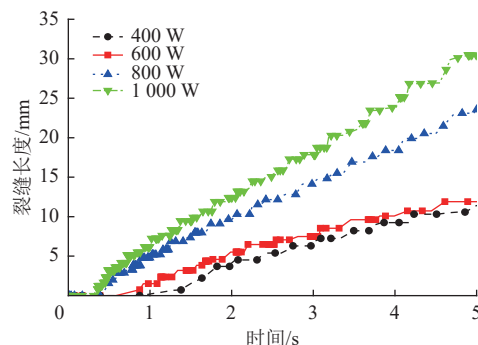


图 6 不同激光功率下裂纹扩展长度变化趋势

Fig.6 Variations of fracture lengths under different laser power

### 3.2 激光照射时间

600 W 时不同激光照射时间下煤层裂缝数量变化为由照射时间 1 s 时的 24 条增加到 15 s 时的 36 条(图 7), 说明随着照射时间的增加还会产生新的次生裂缝, 这是因为激光不断照射在煤层上, 煤层表面吸收的激光能量也增大, 表面温度急剧升高, 极大的温度梯度产生的热应力使其破裂。不仅如此, 被照射区域也会向周围传递热量, 使煤层表面升温区域增大, 促使新裂缝的产生。

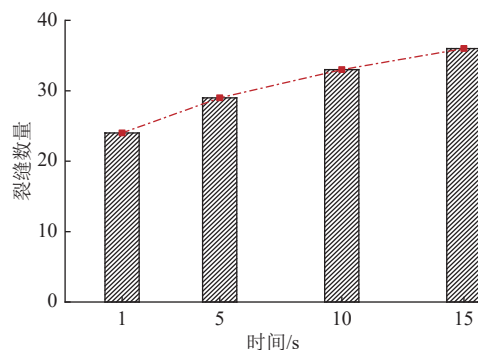


图 7 不同激光照射时间下煤层裂缝数量分布

Fig.7 Fracture number distribution of coal seams under different laser irradiation times

相同功率不同激光照射时间下裂纹都在 0.4 s 时发生扩展,说明 600 W 功率激光照射 0.4 s 后,温差产生的拉应力才超过煤层的极限抗拉强度。裂缝在 1~5 s 时间内由 1.52 mm 扩展到 10.38 mm,在 10~15 s 内裂纹长度从 30.46 mm 扩展至 57.6 mm(图 8)。出现以上情况的原因是激光照射煤层是一个急剧升温的过程,激光照射的时间延长,在一定程度上增加了激光能量的输出,而煤层会不断吸收激光光束能量,所以时间越长,激光照射中心点的温度越高,初始的激光照射时间为 1 s 时中心点温度为 928℃,时间增加到 15 s 后温度高达 3 543℃,而在煤层表面各处热学性质基本相同,热量传导并未有很大区别,温度梯度由于热传导的进行而减小,裂缝扩展速度减慢,并且能够明显看出,激光照射时间的增大更多的是在原有裂缝的基础上扩展,并不会大幅度增加裂缝数量。

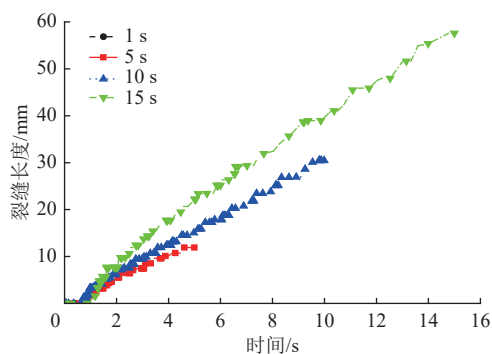


图 8 不同激光照射时间下裂纹扩展长度变化趋势

Fig.8 Variation trends of fracture length under different laser irradiation times

### 3.3 激光照射距离

激光照射距离指发出激光的头部到岩石照射面的距离。当照射距离为 6、8 cm 时裂缝只是延伸,并未形成新的裂缝,而当照射距离为 10 cm 时,裂缝增至 29 条,照射距离为 12 cm 时又减少至 14 条(图 9)。这是因为照射距离影响煤层照射面的光斑直径,进而影响照射能

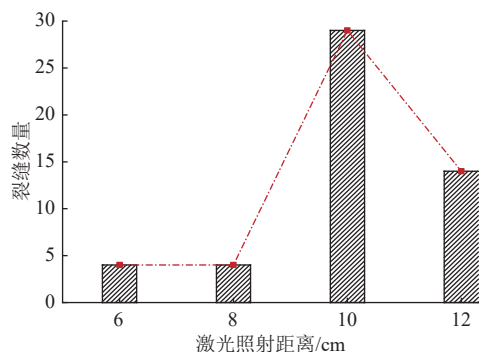


图 9 不同激光照射距离下煤层裂缝数量分布

Fig.9 Fracture number distribution of coal seams under different laser irradiation distances

量和裂缝数量。当照射距离过远,煤层表面的激光能量密度较小,使得煤层吸收的能量太少,煤层热破碎反应的强度降低<sup>[28]</sup>,裂缝数减少,因此,在激光热裂煤层的过程中应适当调控照射距离。

随着照射距离增大,激光破岩时间越来越长,照射距离由 6 cm 增加至 8 cm 时,煤层开始破裂时间由 0.30 s 增加至 0.52 s(图 10)。其原因是:(1) 激光照射距离越长,煤层所吸收的能量越少,煤层上形成的温度梯度越小,从而导致热应力也越低,在不考虑煤层融化与气化的条件下,热应力是影响煤层破裂的最主要因素<sup>[15]</sup>。(2) 激光照射距离越大,岩石破裂所需时间越长,缝长越短,但照射距离增大导致照射光斑面积增大,能量与之前相比不够集中,因此形成的裂缝数量多但缝长短。这进一步表明,采用激光破裂煤层开发煤层气的过程中,需要合理控制激光照射煤层的距离。

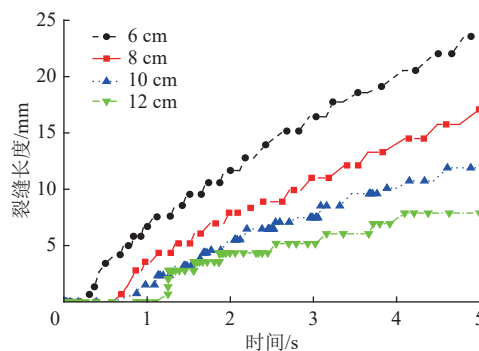


图 10 不同激光照射距离下裂纹扩展长度变化趋势

Fig.10 Variation trends of fracture length under different laser irradiation distances

### 3.4 激光频率

根据不同激光频率下煤层裂缝数量情况分析显示:随着激光频率增加,裂缝数量由 42 条降低为 10 条(图 11)。

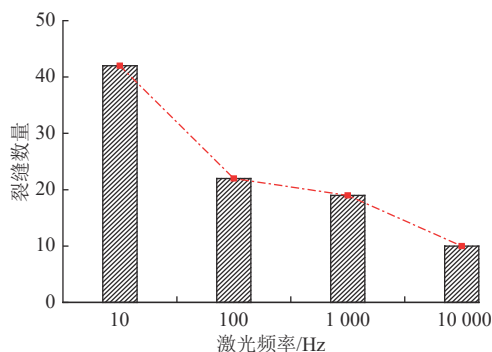


图 11 不同激光频率下煤层裂缝数量分布

Fig.11 Fracture number distribution of coal seams under different laser frequencies

随着激光频率的增大,煤层发生破裂的时间逐渐减小,当激光频率为 10、100、1 000、10 000 Hz 时,煤层破裂时间为 1.30、0.58、0.30、0.28 s(图 12)。其原因是



激光频率增大, 激光在一定时间内照射在煤层上的次数增多, 煤层单位面积吸收的能量增大, 煤层温差增大使其产生的拉应力大于煤层的最大抗拉强度, 煤层发生裂缝扩展。裂纹长度也随着激光频率的增大而逐渐增大, 由 10 Hz 时 8.57 mm 增加为 10 000 Hz 时的 24.4 mm。

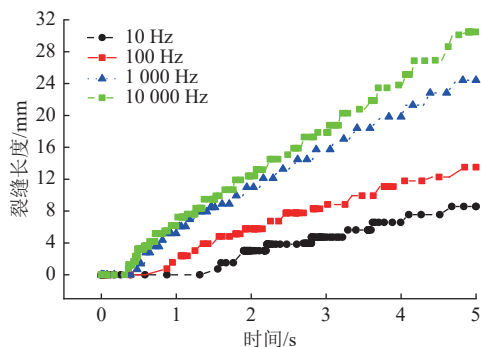


图 12 不同激光频率下裂纹扩展长度变化趋势

Fig.12 Variation trends of fracture length under different laser frequencies

### 3.5 激光参数相关性分析

对激光功率、照射时间、照射距离、频率与产生的裂缝数量、裂缝长度的相关性分析。结果显示, 在影响裂缝数量的因素中, 激光功率和照射时间的关联性尤为突出, 分别为 0.957 和 0.992, 明显高于照射距离和激光频率的影响(图 13)。而在影响裂缝长度的因素中, 激光功率、照射时间和照射距离均展现出较高的相关性。因此, 激光功率与照射时间对激光热裂产生裂缝的影响最为显著。在工程应用中, 应优先考虑调整这 2 个参数以优化裂缝的形成。

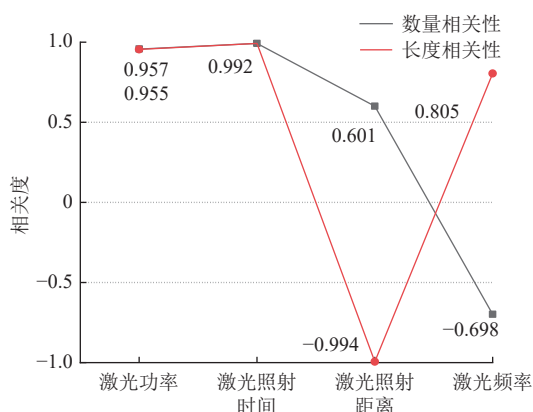


图 13 激光参数与裂缝长度、裂缝数量的相关性

Fig.13 Correlations of laser parameters with fracture length and number

## 4 大功率激光热裂参数优化

### 4.1 深层煤岩石力学参数测试

常用的岩石力学参数测试方法有两种: 一是取心后在室内实验测试, 这种方法测得的数据准确度高, 但是

缺点是岩心获取困难且成本高。二是通过国内外学者给出的经验公式, 代入测井数据计算获得整个井段的力学参数。本文采用第一种方式。实验采用陕西韩城采气管理区河西区块的深层煤样, 煤层深度 2 200 m, 以焦煤、瘦煤、贫煤、无烟煤为主, 显微组分以镜质组为主。岩样平均渗透率  $0.324 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 微裂隙发育, 应力敏感性强, 近井表皮污染更敏感。

首先通过取心设备取半径 25 mm 的圆柱形试样, 再通过岩心切磨机将试样的 2 个面切磨至完整一致, 得到的岩样的长度与直径的比值大于 1.5, 最后同时放入烘箱中烘干(图 14)。



图 14 部分试验小岩心

Fig.14 Some small cores used in experiments

煤的岩石力学参数测试采用 ZTR-1000 岩石力学三轴应力测试系统(图 15)。该装置可以改变围压以及轴压大小从而获取多组参数, 参数可以由所得系统所收集的数据曲线计算可得。



图 15 ZTR-1000 岩石力学参数测试设备

Fig.15 ZTR-1000 rock mechanical parameter experimental system

共做了 12 组岩心的三轴测试实验, 取其平均值, 所得的物理参数见表 3。

### 4.2 激光参数优化

前文模拟得出激光功率和照射时间对热裂效果影响最大, 但模拟方案最大激光功率为 1 000 W, 远低于现场的高功率激光热裂。因此, 本节模拟高功率激光热裂, 优选出激光热裂近井污染煤层范围的最佳功率与照



表 3 煤样物理参数  
Table 3 Physical parameters of coal samples

物理参数	数值
弹性模量/GPa	4.9
泊松比	0.35
抗压强度/MPa	20
抗拉强度/MPa	1.92
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 450
热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) <sup>[29]</sup>	1 350
热传导系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) <sup>[30]</sup>	0.2
热膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$ <sup>[31]</sup>	0.000 024
绝对参考温度/ $^{\circ}\text{C}$	25

射时间。由于钻井液造成的近井污染区域在 2 m 内, 因此, 建立的煤层模型尺寸为 5 m×5 m, 激光功率设置为 10、15、20、25 kW。

激光功率为 10 kW 与 15 kW 时裂缝数量并未发生很大改变, 原因是此时并未达到临界功率, 激光能量被煤层吸收大部分用于裂缝的扩展, 剩余激光能量难以对次生裂缝的萌生产生影响, 而在功率增大到 20 kW 以及 25 kW 时, 裂缝数量由 8 条急剧增至 36 条(图 16)。在工程应用中, 应控制激光功率高于临界功率, 以获取更优的开采效果。

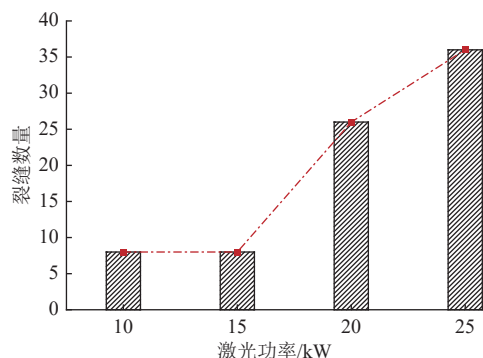


图 16 不同激光功率下煤层裂缝数量分布

Fig.16 Fracture number distribution of coal seams under different laser power

在 10 kW 激光功率下煤层裂缝开始扩展的时间为 454 s, 而 15、20、25 kW 时其时间分别为 250、200、198 s, 与之对应的裂缝长度分别为 1.04、1.54、2.18、3.58 m, 符合小功率煤层裂缝扩展规律。由于近井污染区域在 2 m 范围内, 因此最佳激光功率为 20 kW。当激光功率为 20 kW 时, 照射时间 2 280 s 后裂缝长度无显著增加, 因此, 激光照射的最佳时间为 2 280 s(图 17)。

## 5 结论

a. 激光照射热裂煤层是使煤层表面存在温差而产生热应力导致煤层破裂。相比其他破岩技术, 激光照射

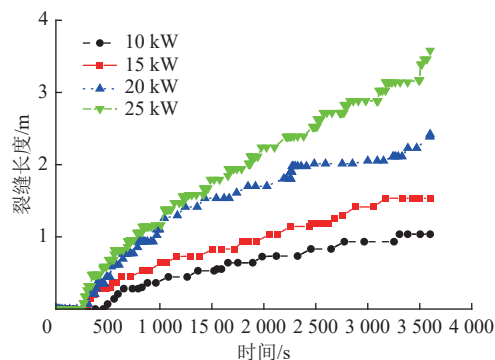


图 17 不同激光功率下裂缝扩展长度变化趋势

Fig.17 Variation trends of fracture length under different laser power

在岩石上的温度瞬间增加, 能在短时间内对岩石造成破裂, 同时能通过机械设备调控自由地改变激光照射的方向, 形成复杂缝网。

b. 数值模拟结果表明, 裂缝数量与激光功率、激光照射煤层的时间呈正相关, 与激光频率呈负相关, 随激光照射煤层距离的增大呈先增大后减小。裂缝长度与激光功率、照射煤层时间以及激光频率呈正相关, 与照射煤层距离呈负相关。激光功率和照射时间对裂缝数量和裂缝长度的影响高于其他参数, 因此在工程应用中应优先调整激光功率和照射时间以优化裂缝的形成。

c. 根据大功率数值模拟结果, 激光热裂近井污染煤层范围的最佳激光功率为 20 kW, 最佳激光照射时间为 2 280 s。相较于水力压裂, 激光热裂煤层能形成更加复杂的裂缝, 但形成的裂缝长度更小。在实际应用中, 需要考虑到激光从井口到井下的长距离传输问题。实现激光的大功率、长距离传输是现场应用的难点所在。为了实现工程应用的推广, 需要进一步开展大功率激光长距离传输技术以及激光热裂与压裂配套技术的研究。

## 符号注释

$A$  为材料的热吸收系数;  $c$  为岩石的比热容系数,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $F_i$  为体力在  $i$  方向上的分量;  $f(t)$  为边界随时间变化的温度值,  $\text{K}$ ;  $G$  为剪切模量,  $\text{Pa}$ ;  $h$  为两者之间的热对流系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $k$  为煤的热传导系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $K'$  为体积模量;  $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为 I 型裂纹、II 型裂纹的应力强度因子;  $-K' \alpha_T T_i$  为激光照射煤层所形成的热应力项;  $n$  为边界一点的外法线;  $P$ 、 $P_0$  分别为激光功率和激光热源,  $\text{W}$ ;  $q$  为热源密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $q(t)$  为边界随时间变化的热流密度值,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $R$  为激光半径,  $\text{m}$ ;  $r$  为裂纹尖端到裂纹中心的距离,  $\text{m}$ ,  $r=\text{const}$  为裂缝缝高固定;  $t$  为激光热源扫描时间,  $\text{s}$ ;  $T$ 、 $T_0$ 、 $T_i$  分别为初始温度和煤的表面温度和室温,  $\text{K}$ ;  $T_f$  为流体温度,  $\text{K}$ ;  $T_i$  为温度在  $i$  方向的分量,  $\text{K}$ ;  $T_w$  为壁面温度,  $\text{K}$ ;  $u_i (i=x, y)$  为位移在  $i$  方向

上的分量;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为温度沿 3 个方向分布的距离,  $m$ ;  $V$  为激光热源扫描速度,  $m/s$ ; 下标  $w$  为壁面条件下;  $x$  为任一点与激光照射中心的横轴距离,  $m$ ;  $y$  为任一点与激光照射中心的纵轴距离,  $m$ ;  $x_0$ 、 $y_0$  为激光中心坐标;  $\alpha_T$  为煤层的热膨胀系数,  $^{\circ}C$ ;  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子,  $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial v^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial w^2}$ ;  $\varepsilon_T$  为由温度所产生的热应力造成的应变;  $\theta$  为井壁上发生拉伸破裂的位置角,  $(^{\circ})$ ;  $\theta_c$  为裂缝开裂角,  $(^{\circ})$ ;  $\nu$  为泊松比;  $\rho$  为煤密度,  $kg/m^3$ ;  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为最大、最小主应力,  $Pa$ ;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的正应力,  $Pa$ ;  $\sigma_{xy}$  为剪切应力,  $Pa$ 。

## 参考文献(References)

- [1] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1-14.  
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 1-14.
- [2] RANJITH P G, ZHAO Jian, JU Minghe, et al. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review[J]. Engineering, 2017, 3(4): 546-551.
- [3] 蒋曙鸿, 师素珍, 赵康, 等. 深部煤及煤层气勘探前景及发展方向[J]. 科技导报, 2023, 41(7): 106-113.  
JIANG Shuhong, SHI Suzhen, ZHAO Kang, et al. Prospect and development direction of deep coal and coalbed methane exploration[J]. Science and Technology Review, 2023, 41(7): 106-113.
- [4] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 深部煤层气储层地质研究进展[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 10-16.  
LI Song, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Progress in geological researches on the deep coalbed methane reservoirs[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 10-16.
- [5] 姚红生, 肖翠, 陈贞龙, 等. 延川南深部煤层气高效开发调整对策研究[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 545-555.  
YAO Hongsheng, XIAO Cui, CHEN Zhenlong, et al. Adjustment countermeasures for efficient development of deep coalbed methane in southern Yanchuan CBM Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 545-555.
- [6] 袁明辉, 屈沅治, 高世峰, 等. 抗温抗盐基钻井液降滤失剂研究进展[J]. 新疆石油天然气, 2023, 19(2): 62-68.  
YUAN Yuehui, QU Yuanzhi, GAO Shifeng, et al. Advances in study on temperature-resistant and salt-tolerant fluid loss reducers for water-based drilling fluids[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(2): 62-68.
- [7] 周静. 高产能气井试井中的表皮系数评价[J]. 天然气勘探与开发, 2002, 25(2): 54-62.  
ZHOU Jing. Evaluation of skin factor in well testing of high productivity gas wells[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2002, 25(2): 54-62.
- [8] 陈华兴. 大功率超声波油层解堵技术及应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2019, 21(6): 41-45.  
CHEN Huaxing. High power ultrasonic reservoir plugging removal technology and its application[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 21(6): 41-45.
- [9] XU Zhihong, REED C B, PARKER R A, et al. Laser rock drilling by a super-pulsed CO<sub>2</sub> laser beam: Proceedings of the International Congress on Application of Lasers and Electro-Optics[C]. Scottsdale, 2002.
- [10] 官兵, 李士斌, 张立刚, 等. 激光破岩技术的研究现状及进展[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 229-248.  
GUAN Bing, LI Shibin, ZHANG Ligang, et al. Research progress on rock removal by laser technology[J]. Chinese Optics, 2020, 13(2): 229-248.
- [11] 杨赞, 谭平, 韦孝忠, 等. 激光钻井技术现状与关键技术[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 35-39.  
YANG Yun, TAN Ping, WEI Xiaozhong, et al. Development status and key technologies of laser drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1): 35-39.
- [12] BAKHTBIDAR M, HAFIZI R, BAKHTBIDAR M, et al. Effectiveness assessment of a new advanced laser perforation technique for improving well productivity[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129(2): 106301.
- [13] BHARATISH A, KISHORE KUMAR B, RAJATH R, et al. Investigation of effect of CO<sub>2</sub> laser parameters on drilling characteristics of rocks encountered during mining[J]. Journal of King Saud University(Engineering Sciences), 2019, 31(4): 395-401.
- [14] JAMALI S, WITTIG V, BORNER J, et al. Application of high powered Laser Technology to alter hard rock properties towards lower strength materials for more efficient drilling, mining, and Geothermal Energy production[J]. Geomechanics for Energy & the Environment, 2019, 20: 100112.
- [15] 刘浩, 易万福, 朱双亚. 激光破岩耦合场仿真分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011405.  
LIU Hao, YI Wanfu, ZHU Shuangya. Coupled-fields numerical simulation of laser to rock[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011405.
- [16] 柯珂. 激光破岩温度应力数学模型的建立与实验研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(29): 7532-7537.  
KE Ke. The thermal-stress mathematical model and experimental study of rock-breaking by laser[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(29): 7532-7537.
- [17] NDEDA R A, SEBUSANG S E, MARUMO R, et al. Numerical model of laser spallation drilling of inhomogeneous rock[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(2): 43-46.
- [18] XIA Ming. Thermo-mechanical coupled particle model for rock[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2367-2379.
- [19] LI Qin, ZHAI Yuli, HUANG Zhiqiang, et al. Research on crack cracking mechanism and damage evaluation method of granite under laser action[J]. Optics Communications, 2021, 506: 127556.
- [20] 杨明军, 王玉丹, 文国军, 等. 激光辐照煤岩的热效应数值模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 217-222.  
YANG Mingjun, WANG Yudan, WEN Guojun, et al. Numerical simulation of thermal effects of laser irradiation on coal and rock[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 217-222.

- [21] 魏晨慧. 热流固耦合条件下煤岩体损伤模型及其应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.  
WEI Chenhui. Damage model for coal and rock under coupled thermal-hydraulic-mechanical conditions and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [22] 朱万成, 魏晨慧, 田军, 等. 岩石损伤过程中的热-流-力耦合模型及其应用初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3851-3857.  
ZHU Wancheng, WEI Chenhui, TIAN Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model during rock damage and its preliminary application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3851-3857.
- [23] 史雅丽. 激光照射岩石温度及热裂特性变化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
SHI Yali. Study on the variation of temperature field and thermal cracking characteristics for rock irradiated by fiber laser[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [24] 王春萍, 廖益林, 刘建锋, 等. 应力及含水状态对裂隙花岗岩蠕变特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 1-11.  
WANG Chunping, LIAO Yilin, LIU Jianfeng, et al. Study on the influence of stress and water content on creep characteristics of fractured granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 1-11.
- [25] 谭现锋, 张强, 战启帅, 等. 干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 110-117.  
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 110-117.
- [26] 阴伟涛, 冯子军. 高温高压下不同结构形式裂缝充填花岗岩热力学特性[J/OL]. 煤炭学报, 2023: 1-17  
4-02-19]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0696>. YIN Weitao, FENG Zijun. Study on thermal and mechanical properties of fracture-filled granite with different structural forms under high temperature and high pressure[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2023: 1-17 [2024-02-19]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0696>.
- [27] PAN Haizeng, HU Yi, KANG Yong, et al. Effect of the number of irradiation holes on rock breaking under constant laser energy[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(6): 2969-2980.
- [28] GUO Chenguang, SUN Yu, LI Qiang, et al. Experimental research on laser thermal rock breaking and optimization of the process parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 160: 105251.
- [29] 范超军, 李胜, 罗明坤, 等. 基于流-固-热耦合的深部煤层气抽采数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3076-3085.  
FAN Chaojun, LI Sheng, LUO Mingkun, et al. Deep CBM extraction numerical simulation based on hydraulic-mechanical-thermal coupled model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3076-3085.
- [30] 任帅京, 张熾妮, 邓军, 等. 烟煤升温过程中热物理特性[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(4): 697-704.  
REN Shuaijing, ZHANG Yanni, DENG Jun, et al. Thermophysical properties of bituminous coal in heating[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(4): 697-704.
- [31] 王霞, 冯子军. 热力耦合作用下长焰煤的热变形规律试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(6): 135-139.  
WANG Xia, FENG Zijun. Thermal deformation of long flame coal under thermo-mechanical coupling[J]. Coal Engineering, 2021, 53(6): 135-139.

(责任编辑 范章群)