

李树刚,刘泽然,李博涛,等.真三轴应力下液氮注入煤样损伤特性模拟研究[J].西安科技大学学报,2026,46(2):243-255,266.

LI Shugang, LIU Zeran, LI Botao, et al. Simulation study on damage characteristics of liquid nitrogen injected coal samples under true triaxial stress[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 243-255, 266.

## 真三轴应力下液氮注入煤样损伤特性模拟研究

李树刚<sup>1,2</sup>, 刘泽然<sup>1</sup>, 李博涛<sup>3</sup>, 王 裴<sup>1</sup>, 罗荣卫<sup>1</sup>, 陈 徐<sup>1</sup>, 林海飞<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学, 安全科学与工程学院, 陕西 西安, 710054;

2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:**为明晰真实地应力下液氮注入煤样内部损伤演化规律,利用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件建立非均质煤热-流-固-损伤耦合三维模型,分析注入过程煤样温度、渗透率、损伤变化规律,考虑最小主应力和注入压力等因素,探讨了真三轴应力下液氮注入对煤样损伤的作用机理。结果表明:液氮注入 20 min 后,低温液氮已接近煤样外表面,煤样内部形成裂隙网络,渗透率相较于未注入时增大 2 倍;随着最小主应力从 2 MPa 增至 5 MPa,煤样最终损伤呈线性增长趋势,5 MPa 应力条件下,煤样最终损伤程度为 84.1%;注入压力从 0.40 MPa 升高至 0.55 MPa 时,煤样最终损伤程度显著增至 92.3%,其中在 0.45~0.50 MPa 压力区间内损伤增长幅度最为显著,高达 24.1%;煤样在三向不等应力的影响下内部低温区域呈明显的方向选择性,煤样损伤优先沿最大主应力方向发展。研究揭示了热-流-固-损伤多场耦合作用下煤样损伤的动态演化规律,可为煤矿现场液氮致裂技术的应用提供一定理论依据。

**关键词:**液氮注入;真三轴;数值模拟;煤层增压;渗透率

中图分类号:TD 712

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0243-13

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2026.0202

### Simulation study on damage characteristics of liquid nitrogen injected coal samples under true triaxial stress

LI Shugang<sup>1,2</sup>, LIU Zeran<sup>1</sup>, LI Botao<sup>3</sup>, WANG Pei<sup>1</sup>, LUO Rongwei<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>1</sup>, LIN Haifei<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** In order to clarify the internal damage evolution law of liquid nitrogen injection into coal samples under real in-situ stress, a three-dimensional coupling model of thermal-hydraulic-mechanical-damage of heterogeneous coal was established by COMSOL Multiphysics numerical simulation software. The temperature, permeability and damage variation of coal samples during injection were analyzed. Considering such factors as minimum principal stress and injection pressure, the mechanism of liquid

收稿日期:2025-08-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52504209);河南省科技攻关项目(252102321174)

通信作者:李树刚,男,甘肃会宁人,教授,博士生导师,E-mail:lisg@xust.edu.cn

nitrogen injection on coal sample damage under true triaxial stress was discussed. The results show that: After 20 min of liquid nitrogen injection, the low temperature liquid nitrogen is close to the outer surface of the coal sample, and the fracture network is formed inside the coal sample, and the permeability is 2 times higher than that without injection. As the minimum principal stress increases from 2 MPa to 5 MPa, the final damage of coal body shows a linear growth trend. Under the condition of 5 MPa stress, the final damage degree of coal sample is 84.1%. When the injection pressure increases from 0.40 MPa to 0.55 MPa, the final damage degree of the coal sample increases significantly to 92.3%, and the damage growth rate is the most significant in the pressure range of 0.45 ~ 0.50 MPa, reaching 24.1%. Under the influence of three-dimensional unequal stress, the internal low-temperature region of the coal sample shows obvious directional selectivity, and the damage of the coal sample preferentially develops along the direction. The research results reveal the dynamic evolution law of coal sample damage under the multi-field coupling of thermal-hydraulic-mechanical-damage, which can provide a theoretical basis for the application of liquid nitrogen fracturing technology in coal mine.

**Key words:** liquid nitrogen injection; true three-axis; numerical simulation; coal seam permeability enhancement; penetration rate

## 0 引言

中国煤炭资源储量丰富,随着开采深度的增加,深部煤炭采掘过程中瓦斯灾害严重威胁煤矿安全生产<sup>[1-2]</sup>。中国大多数煤层渗透率较低,因此有必要对低渗透性煤层进行增透以提高瓦斯抽采效率,从而达到瓦斯灾害防治的目的<sup>[3]</sup>。随着煤层气抽采工作和技术研究的不断深入,临界二氧化碳压裂<sup>[4-6]</sup>、高能气体压裂<sup>[7-9]</sup>及液氮压裂<sup>[10-11]</sup>等无水化增透技术受到相关领域学者们广泛关注与深入研究。

液氮作为压裂液具有冷冲击效果强、安全性高和置换效率突出等特点,但液氮压裂煤体涉及温度、渗流及应力场等复杂耦合作用。基于此,诸多学者开始进行液氮压裂技术相关研究。COETZEE等研究证实液氮可以促进裂缝的发育和拓展<sup>[12]</sup>;翟成等认为液氮注入煤体过程中,液氮冷冲击产生的温度应力、液氮汽化产生的膨胀应力和孔裂隙结冰产生的冻胀应力三重力学超过煤体抗拉强度时,就会诱导新裂隙生成,最终形成复杂的裂隙网络<sup>[13]</sup>;丛钰洲等探究了钻孔内液氮的注入效率随注入时间的变化规律,发现低速注入速率下的液氮注入效率更高<sup>[14]</sup>;林海飞等利用液氮注入致裂煤体真三轴试验系统,发现压裂过程中煤样主裂缝沿着最大水平主应力方向扩展,并且会产生不同程度的分支裂缝<sup>[15]</sup>;黄中伟等对煤岩进行钻孔注液氮,发现在冷冲击收缩应力与孔隙压力双重作用下钻孔周围发生了破裂<sup>[16]</sup>;郑学林等

研究了液氮诱导井筒和预制裂缝分布特征,利用最大拉应力准则和应力强度因子断裂准则判定超低温诱导裂缝扩展规律<sup>[17]</sup>;秦雷发现液氮冻结煤体过程中,冻结时间对孔隙内不同流体分布空间演化过程作用不同<sup>[18]</sup>。

煤体在外界载荷、低温、流体的渗流作用下易产生内部损伤,可以通过建立合适的理论模型和数值模拟直观描述变形损伤过程。张春会等通过构建液氮冷却作用下煤体变形、破坏及渗透率演化模型发现,越靠近钻孔,温度梯度越大,煤体变形量越大,拉伸破坏区域也越大<sup>[19]</sup>;LU等基于细观力学理论,深入探讨水力压裂起裂压力和破裂压力的影响因素<sup>[20]</sup>;LIN基于损伤力学与有限元理论建立了(TMD)模型,模拟发现初始温度较高的煤样瞬时热应力更大,损伤程度更严重,机械性能也相应下降<sup>[21]</sup>;HAN等构建热-流-固耦合模型,系统的揭示孔隙压力、冻胀压力以及热应力对储层损伤的影响机制<sup>[22]</sup>。

以上研究不同程度揭示了液氮对煤体的增透机理,但深部煤岩体处于三向不等应力状态<sup>[23-26]</sup>,外部载荷改变会影响液氮在煤体内部的渗流路径,进而影响液氮的致裂效果,同时深部煤层的力学行为更为复杂,因此,研究深部煤体在真三轴应力作用下力学、渗流和损伤变形规律,对保障深部煤炭资源安全开发具有重要意义。基于此,文中考虑煤体非均质性构建热-流-固-损伤耦合模型,开展真三轴应力下液氮注入非均质煤样三维数值模拟研究,通过模拟不同注入压力、不同最小主应

力下液氮注入煤样温度、渗透率及损伤演化规律,明晰注入条件以及地应力状态等因素对液氮注入煤体损伤演化规律的影响,揭示真三轴下液氮注入煤样损伤机理,研究结果可为确定不同赋存与地质条件下压裂方案提供依据。

## 1 液氮注入非均质煤损伤模型

### 1.1 基本假设

将煤体划分为一系列微元,煤样在细观尺度视为各向同性线弹性材料,且满足小变形假设;煤骨架为非均质材料,采用 Weibull 分布来表征煤的非均质性;不考虑煤样与液氮之间的热辐射;液氮在煤体中的流动服从达西定律;不考虑煤体的吸附解吸作用,不考虑水分的影响。

煤是一种非均质体,是由许多大小不等、形状不同的矿物颗粒组合而成的<sup>[27]</sup>。模拟采用 Weibull 分布来表征弹性模量、泊松比和热膨胀系数等参数的非均质性。根据 Weibull 分布概率密度函数将煤体参数定义为<sup>[28]</sup>

$$f(\omega, \omega_0, m) = \frac{m}{\omega_0} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中  $\omega$  为煤体物性参数; $\omega_0$  为煤体物性参数平均值; $m$  为 Weibull 函数非均质系数。当  $m$  非均质系数越大时,参数离散性越小<sup>[29]</sup>。

煤的非均质性进一步影响煤体的应力分布、变形特征及损伤破坏状态。为更准确表征煤体非均质性,选用  $m = 6$ 。煤体各参数非均质表征如图 1 所示。

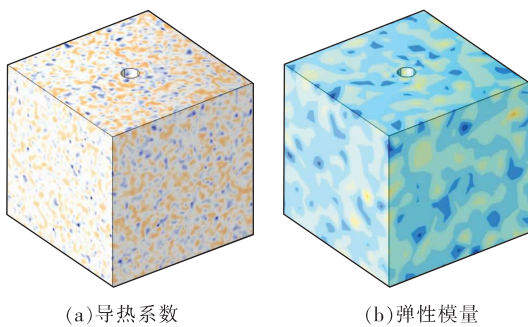


图 1 物理模型非均质分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heterogeneous distribution of physical model

### 1.2 多场控制方程及耦合关系

#### 1.2.1 变形控制方程

液氮注入煤体过程中,煤体在三轴应力状态下结构发生变形。考虑液氮引起的热应力和裂隙

压力,煤体变形本构方程可表示<sup>[30-31]</sup>为

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

式中  $G$  为煤体剪切模量,  $G = E/2(1 + \nu)$ , GPa;  $p$  为孔隙压力, MPa;  $\nu$  为煤体泊松比;  $K$  为煤体体积模量, Pa;  $u_{i,jj}, u_{j,ji}$  为位移张量;  $\alpha_T$  为煤体热膨胀系数,  $1/K$ ;  $\alpha$  为煤体 Biot 系数;  $F_i$  为体积力, MPa;  $T$  为温度, K。

#### 1.2.2 能量守恒方程

根据热力学定律,假设煤体与液氮之间始终处于热平衡状态,则煤体能量守恒方程表达式为<sup>[32-33]</sup>

$$\rho_M C_M \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_{LN} C_{LN} \nabla T \left( \frac{k}{\mu_{LN}} \nabla p \right) - TK\alpha_T \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + H_M \nabla^2 T + Q \quad (3)$$

式中  $\rho_M$  为含液氮煤体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_M$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $H_M$  为热传导系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\rho_{LN}, C_{LN}$  和  $H_{LN}$  分别为液氮密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  和热传导系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为煤体温度, K;  $k$  为煤体渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu_{LN}$  为液氮动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $p$  为裂隙压力, Pa;  $K$  为煤体体积模量, GPa;  $\varepsilon_v$  为煤体体积应变;  $Q$  为热源项,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

含液氮煤体比热容和热传导系数可基于体积平均表示为<sup>[34]</sup>

$$\rho_M C_M = \phi(\rho_{LN} C_{LN}) + (1 - \phi)(\rho_r C_r) \quad (4)$$

$$H_M = \phi H_{LN} + (1 - \phi) H_r \quad (5)$$

式中  $\rho_r$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_r$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $H_r$  为热传导系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\phi$  为固相体积分, %。

#### 1.2.3 渗流控制方程

煤体是典型的多孔介质材料,煤体中液氮渗流遵循质量守恒定律,液氮在煤体内流动方程可表示为<sup>[32]</sup>

$$\phi \frac{\partial \rho_{LN}}{\partial t} + \rho_{LN} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{k}{\mu_{LN}} \rho_{LN} \nabla p \right) + Q_w \quad (6)$$

式中  $Q_w$  为质量源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $\phi$  为孔隙率, %。

#### 1.2.4 损伤判断准则

液氮注入致裂过程中,煤体结构在三轴应力状态下将发生失稳变形。文中采用最大拉应力准则和摩尔-库仑准则来判断煤体损伤程度。最大拉应力准则和摩尔-库仑准则表示为<sup>[35-36]</sup>

$$F_A = \sigma_1 - F_{t_0} \quad (7)$$

$$F_B = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} - F_{c_0} \quad (8)$$

式中  $F_A$ 和 $F_B$ 分别为拉伸破坏和剪切破坏的阈值函数; $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 分别为最大和最小主应力,Pa; $F_{t0}$ 和 $F_{c0}$ 分别为煤微元的单轴抗拉强度和抗压强度,MPa; $\theta$ 为内摩擦角,(°)。

煤体应力状态满足阈值函数时,损伤变量 $D_0$ 可以由以下公式定义<sup>[37-38]</sup>

$$D_0 = \begin{cases} 0 & F_1 < 0, \quad F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_{min}} \right|^n & F_1 = 0, \quad dF_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{max}} \right|^n & F_2 = 0, \quad dF_2 > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\varepsilon_{max}$ 和 $\varepsilon_{min}$ 分别为最大和最小主应变; $\varepsilon_{t0}$ 和 $\varepsilon_{c0}$ 分别为最大拉伸主应变和最大压缩主应变; $n$ 为煤强度本构系数,取值2。 $F_1 = 0, dF_1 > 0$ 表示煤体基质发生拉伸破坏; $F_2 = 0, dF_2 > 0$ 为煤体基质发生剪切破坏; $dF_1 < 0$ 或 $dF_2 < 0$ 为没有新的损伤产生。

### 1.2.5 多场耦合关系

考虑损伤的热传导系数演化方程、弹性模量演化方程分别可以表示为<sup>[39-40]</sup>

$$E = (1 - |D|)E_0 \quad (10)$$

$$H_m = H_{m0} \exp(\alpha_H |D|) \quad (11)$$

式中  $E_0, E$ 分别为煤的初始、当前弹性模量, GPa; $H_{m0}, H_m$ 分别为煤的初始、当前热传导系数, W/(m·K); $\alpha_H$ 为热传导损伤系数。

由于渗透率与孔隙率之间存在立方关系,考虑损伤的渗透率变化方程可表示为<sup>[41-42]</sup>

$$\left\{ \frac{\exp[\varepsilon_{v0} - \varepsilon_v - \varepsilon_{vf} + \alpha_T (T - T_0) - (p - p_0)/K_s]}{\varphi_0} \right\}^3 [\alpha - (\alpha - \varphi_0)]^3 \exp(\alpha_k |D|) k_0 = k \quad (12)$$

式中  $k_0$ 为煤样初始渗透率,  $m^2$ ;  $\varepsilon_{v0}$ 为煤体初始体积应变; $\varphi_0$ 为煤样初始孔隙率, %;  $T_0$ 为煤样初始温度; $p_0$ 为初始裂隙压力, Pa; $\alpha_k$ 为渗透率损伤系数。

各物理场之间的耦合关系如图2所示。煤样在应力场、渗流场及温度场多场耦合作用下发生损伤变形,煤样在损伤破坏的过程中力学、渗流、传热参数也随之发生变化。外部载荷、热应力和孔隙压力对煤样应力场产生影响,渗流场主要考虑煤样应力变形和温度传递对渗透率影响,温度场中热传导系数变化与煤样变形产热和液氮流动传热相关,损伤场则通过损伤引起煤力学、渗透、热传导系数等参数变化从而影响其余各场,起着连接其余所有场的作用。

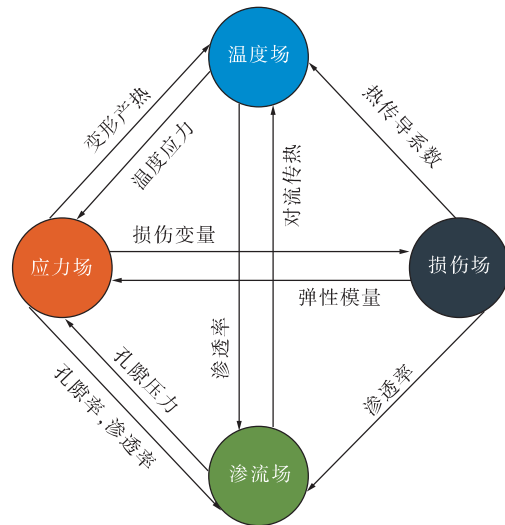


图2 液氮注入煤样热-流-固-损伤耦合关系  
Fig.2 Coupling relationship between thermal-hydraulic-mechanical-damage in coal samples with LN<sub>2</sub> injection

### 1.3 模型验证

#### 1.3.1 几何模型与边界条件

为更接近于现场工程实践的尺度效应,参照《煤和岩石物理力学性质测定方法》GB/T 23561.7—2009<sup>[43]</sup>要求,确定数值模拟几何尺寸为长、宽、高150 mm的立方体。根据现场相似试验,在几何模型中心挖取直径14 mm、深度75 mm的钻孔(注入段50 mm、压裂段25 mm),模拟中采用正方体煤样与“注入段”“压裂段”圆柱体求差形成联合体构建几何模型。

边界条件设定如下:传热场,钻孔边界采用对流热边界,设置液氮注入温度为-195.8℃。固体变形场,根据真三轴应力条件分别于X、Y、Z方向设置水平最小主应力 $\sigma_h$ 、最大主应力 $\sigma_H$ ,垂直主应力 $\sigma_v$ ,根据试验对侧边界采用辊支撑。渗流场,考虑达西定律,钻孔设为压力边界。模型钻孔和边界采用极细化四面体网格、其余部分采用细化四面体网格。并采用缺省直接求解器(MUMPS)进行求解。试验测得参数见表1。

#### 1.3.2 试验方案及结果

煤样取自河南省某高瓦斯矿井,制成尺寸为150 mm×150 mm×150 mm立方体煤样,钻取直径14 mm、深度75 mm的钻孔。试验采用自主研发液氮注入致裂煤体真三轴试验系统<sup>[15]</sup>,该系统主要分为3个部分:低温液氮增压系统、真三轴液氮注入系统、数据监测系统,KYS-2150 J型真三轴液

液氮注入系统最大加载应力 1 500 kN; BCL-X 多路数据监测范围 -200 ~ +200 °C, 基本误差为 ±0.5% +0.6 °C, 如图 3 所示。该系统可实现真三轴加载下液氮注入煤体损伤试验。

表 1 煤样数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters of coal samples

参数	密度 $\rho_r$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E_0/\text{GPa}$	抗压强度 $F_{c0}/\text{MPa}$	抗拉强度 $F_{t0}/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\theta/(\text{°})$	比热容 $C_r$ / ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ )	热膨胀系数 $\alpha_T/(1\cdot\text{K}^{-1})$	初始渗透 率 $k_0/\text{m}^2$	初始孔隙 率 $\varphi_0/\%$
数值	1 450	1.425	24.69	1.04	0.275	30	1 200	$6.561 \times 10^{-6}$	$5.26 \times 10^{-16}$	12.5

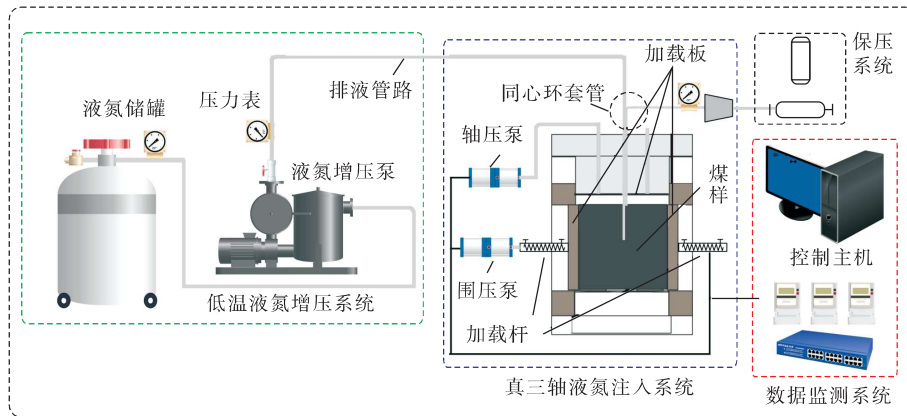


图 3 液氮注入致裂煤体真三轴试验系统

Fig. 3 Experimental system for fracturing coal by LN<sub>2</sub> injection under true triaxial loading

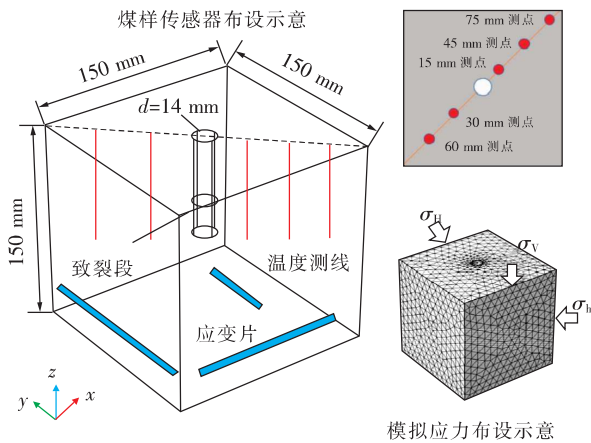


图 4 传感器布设示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sensor layout

根据煤矿地应力分布规律<sup>[44-45]</sup>, 受载最小水平主应力  $\sigma_h$  设置为 3 MPa、最大主应力  $\sigma_H$  设置为 8 MPa, 垂直主应力  $\sigma_V$  设置为 6 MPa, 试验环境温度 25 °C, 参考前人氮气压裂煤体时的压力数据<sup>[46]</sup>, 设置液氮压力 0.5 MPa。试验前对煤样进行干燥, 按 5 个温度测孔位置在煤样上布设开普森 PT 100 型铂热电偶线, 并涂抹耐低温环氧树脂固定, 后于煤样表面粘贴应变片, 待煤样与顶端加载板之间完全粘合固定后将煤样放入三轴加载腔

内, 盖上轴压盖板, 在真三轴加载系统上设置好加载数值后调节液氮增压泵压力, 打开液氮储罐开关、加载程序, 开始试验, 液氮注入全程监测温度、应变。

沿煤样对角线并列于注入孔布设 5 个温度测点, 分别距离注入孔 15, 30, 45, 60, 75 mm, 如图 4 所示。45 mm 测点处煤样试验与模拟应变对比如图 5 所示。随注入时间增加试验和模拟煤样品应变均呈下降趋势, 300 s 时出现最大相对误差, 为 6.8%。在液氮急剧冷却下, 热应力会优先在煤的微裂隙、软弱面和节理处集中, 从而 400 s 前试验比模拟产生了更早、更显著的应变, 400 s 后二者曲线基本重合。

数值模拟温度与 45 mm 测点处温度变化如图 6 所示。试验与模拟温度在该处呈相同的变化趋势: 随液氮的不断注入, 该处温度逐步降低, 最终接近于液氮的温度。试验与模拟在 1 000 s 前温度下降幅度较小, 随后温度急剧下降, 这与煤样内部裂隙连通有关。二者在 540 s 时出现最大相对误差, 为 7.26%、在 1 080 s 时出现最大绝对误差, 为 3.47 °C。对比试验和数值模拟结果, 二者吻合性较好, 验证了耦合模型的准确性。

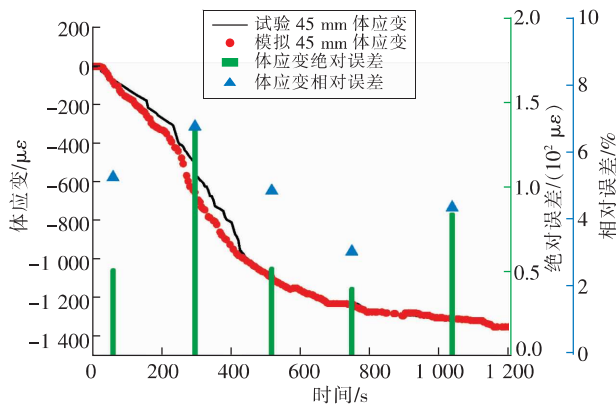


图5 试验与模拟应变对比

Fig.5 Comparison between experimental and simulated strains

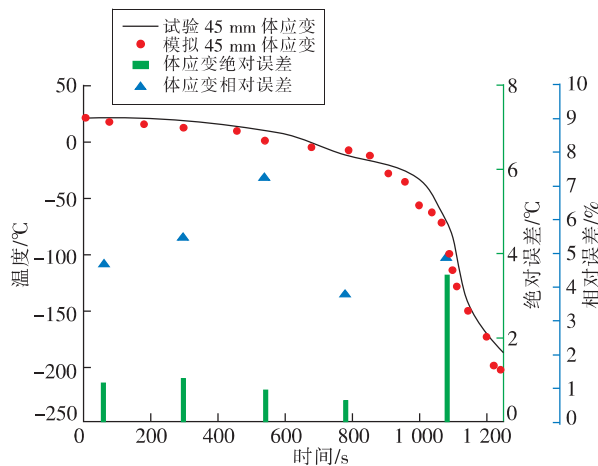


图6 试验与模拟温度对比

Fig.6 Comparison between experimental and simulated temperatures

## 2 模拟方案与结果

### 2.1 数值方案

#### 2.1.1 数值模拟条件

为研究应力对液氮注入煤体损伤的影响,模拟改变真三轴最小主应力和注入压力,根据试验煤样埋深以及赋存特点将最小水平主应力 $\sigma_h$ 分别设置为2,3,4,5 MPa,最大主应力设置为8 MPa,垂直主应力设置为6 MPa。模拟不考虑煤样含水率,即默认煤样是干燥煤样,在恒温25℃条件下进行。注入时间设置为20 min,注入压力分别设置为0.40,0.45,0.50,0.55 MPa。方案见表2。

#### 2.1.2 数值模拟结果

煤样温度、渗透率和损伤随液氮注入时间的演化云图如图7所示。在液氮注入过程中,煤样的温度场、渗透率及损伤演化呈现出明显的时空性。液氮注入初期(1 min),钻孔中心周边区域温度急

剧下降,形成显著的温度梯度,最大渗透率达到 $1.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,此时煤体损伤程度较低,损伤主要出现在钻孔附近。随着注入时间延长至6 min,钻孔中心温度趋近液氮沸点( $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ),煤样内部渗透率显著增加,达到 $2.21 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,煤样损伤沿 $x,y$ 方向均有不同程度的增强,煤样整体损伤为7%,说明煤样内部热应力累积达到强度极限,在钻孔周围诱发微裂隙萌生,最终形成渗流通道。相较于6 min,12 min时煤样整体损伤增加20%,损伤延长至钻孔附近, $x,y$ 方向损伤几乎达到煤样尺寸的一半,损伤面积相较于6 min时显著提升,几乎为煤体积的1/8,由于主渗流通道的形成和孔隙压力升高,液氮沿破裂区优先渗流,促使低温影响范围显著向外扩展,渗透率随之增大。20 min,低温液氮已接近煤样外表面,煤样整体损伤76%。损伤区域几乎覆盖整个煤样,沿 $x$ 方向煤样损伤达到煤尺寸的90%,而 $y$ 方向损伤达到100%,由于煤样内部新生裂纹、裂隙受到三向不等应力作用,影响液氮渗透,所以损伤效果存在差异。

表2 液氮注入煤样模拟方案

Table 2 Simulation scheme of LN<sub>2</sub> injection into coal samples

模拟编号	三轴应力/MPa	注入压力/MPa
A1	8/2/6	
A2	8/3/6	
A3	8/4/6	0.40
A4	8/5/6	
B1		0.40
B2	8/3/6	0.45
B3		0.50
B4		0.55

液氮注入20 min时煤样各测点沿 $Z$ 方向的温度与损伤分布特征如图8所示。温度分布曲线呈现先下降后上升的趋势,而损伤演化则表现为先升高后降低的规律。其中,15 mm测点温度变化最为显著,最低温度接近液氮温度,同时该位置损伤程度达到峰值,表明该区域已形成明显的低温渗透与裂隙发育区。相比之下,75 mm测点温度与损伤发生的变化较小,反映出该区域尚未受到液氮作用的显著影响。温度最低与损伤最大值均出现在 $Z=85 \text{ mm}$ 位置,30 mm测点在此处的温差高达 $-185 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这一现象源于该区域处于液氮的“致裂段”,其低温应力集中与相变膨胀效应最为强烈。

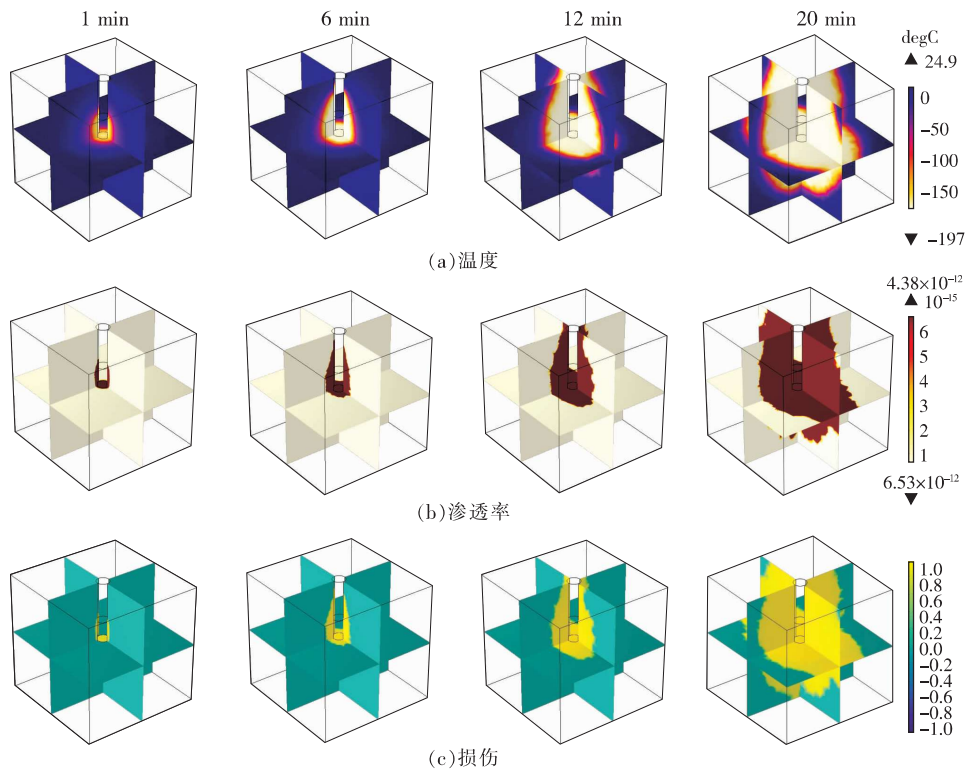


图 7 液氮注入过程中煤样物性参数演化规律

Fig. 7 Evolution law of physical parameters of coal samples during liquid nitrogen injection process

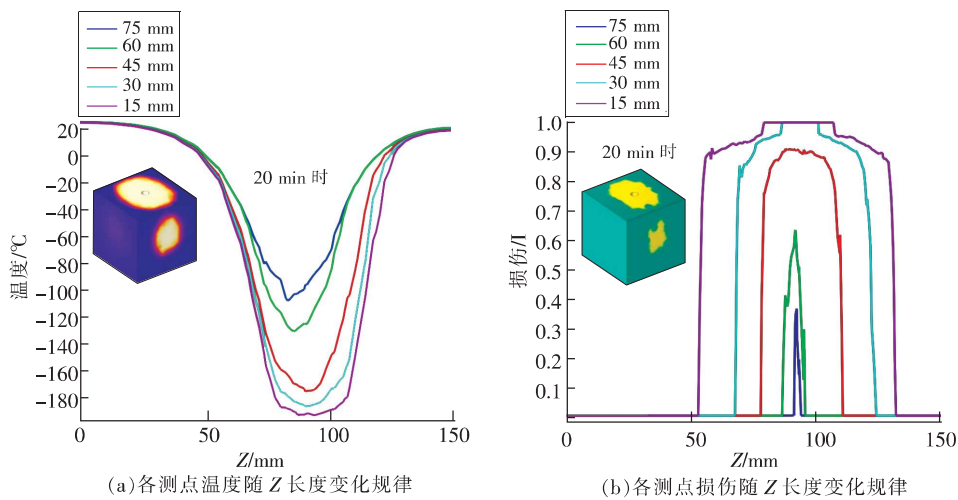


图 8 各测点温度、损伤变化规律

Fig. 8 Variation law of temperature and damage at each measuring point

## 2.2 模拟结果分析

### 2.2.1 最小水平主应力对煤样损伤的影响

不同最小主应力(2~5 MPa)条件下液氮注入煤样在XY、YZ和XZ这3个正交切面的应力分布特征如图9所示。随着最小主应力的增大,3个切面的应力场演化呈现出明显的扩张效应:XY切面的应力从11.8 MPa升至20.3 MPa(涨幅41.8%),

而XZ切面的应力涨幅相对较小,5 MPa较2 MPa时升高22.1%,出现该现象与Y方向本来受到的高应力相关。2 MPa相较于5 MPa拥有范围更大的应力传播圈,该现象说明低应力下煤颗粒之间存在较大的渗流通道,更有利液氮流通。分析表明,2 MPa最小主应力下YZ面相较于其他2个平面应力传播圈更大,这种应力响

应差异主要源于最小主应力增加对煤体结构的双重作用机制。一方面,围压显著增强了矿物颗粒间的胶结作用,使得XY切面的应力圈

缩减最为明显;另一方面,颗粒间接触力的增加也导致煤体内部孔隙率降低,从而抑制液氮的渗透扩散。

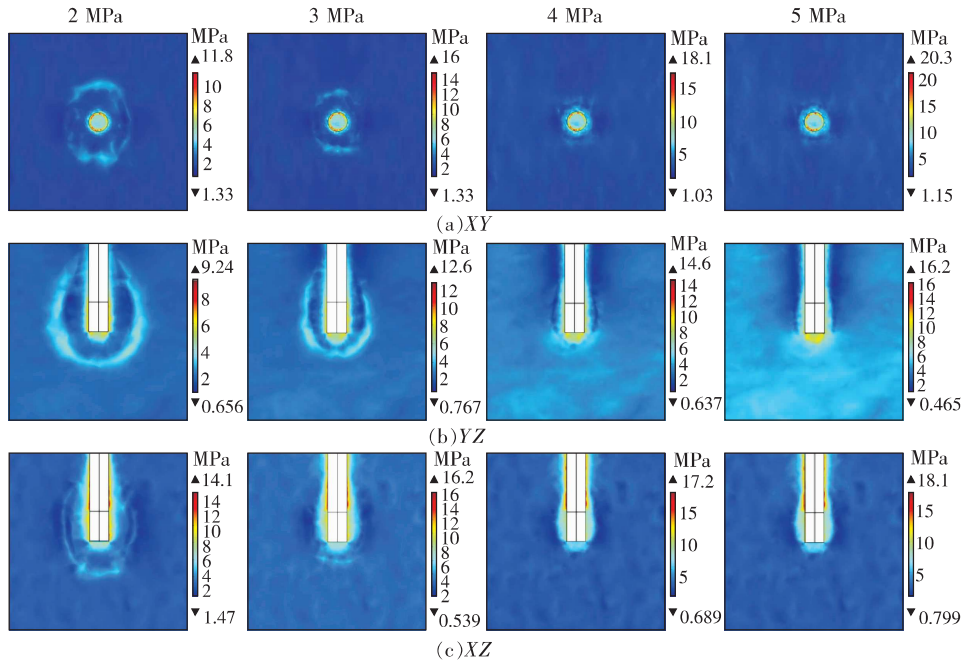


图9 不同最小主应力下煤样各正交切面应力

Fig. 9 Stress of each orthogonal section of coal samples under different minimum principal stresses

图10展示了不同主应力条件下液氮注入煤样损伤随时间的演化规律。根据损伤发展特征,可将液氮注入过程划分为2个典型阶段。初始损伤阶段表现为损伤缓慢平稳增长,随后进入加速损伤阶段,此时损伤速率显著提升并导致整体损伤深度加剧。注入前15 min内,煤样损伤程度随最小主应力的增大而递减,例如在13 min时,2,3,4 MPa和5 MPa主应力下的损伤程度分别为43.2%、32.4%、22.3%和12.3%,这是因为主应力

增大导致煤颗粒间距紧缩,从而抑制液氮在裂隙中的渗流通道形成,损伤程度减弱。

图11进一步揭示出最小主应力与最终损伤量的正相关关系。随着最小主应力的增加,煤样最终损伤也在增加。且最小主应力从3 MPa提升至4 MPa时,煤样最终损伤涨幅最大,达到24.9%。该现象说明应力增强使得矿物颗粒间的黏聚力增大,促使更多基质节点单元达到损伤极限状态。拟合曲线满足一次函数关系, $R^2$ 达到0.9226。

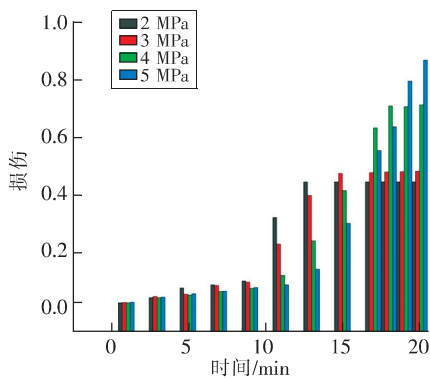


图10 不同最小主应力下煤样损伤随时间变化规律  
Fig. 10 Variation law of coal sample damages with time under different minimum principal stresses

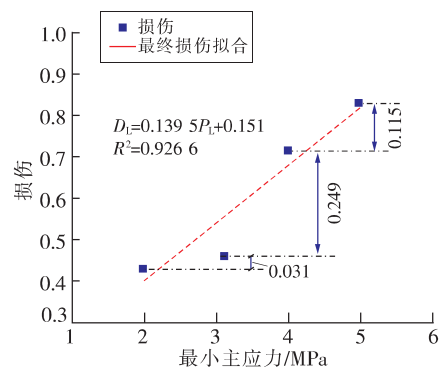


图11 不同最小主应力下煤样最终损伤  
Fig. 11 Final damage of coal samples under different minimum principal stresses

2.2.2 注入压力对煤样损伤的影响

图 12 为不同液氮注入压力(0.40 ~0.55 MPa)条件下煤样在 XY、XZ 和 YZ 这 3 个正交切面的应力分布特征。随着注入压力的提升,3 个切面的应力场演化呈现出明显的各向异性特征:XY 切面表现出较强的压力敏感性,其最大应力从 16 MPa 增至 21.3 MPa(增幅 33.1%),这主要源于煤体在 XY 平面形成优势渗透通道,促进液氮的快速渗流和热交换;YZ 切面出现显著的应力水平提高,应力增幅达到 32.5%,这说明最小主应力方向煤基质渗流孔隙较大,较多的液氮沿此方向传递;XZ 切面

的应力响应相对较弱,其较低的增幅(14.2%)与较高流动阻力相关。随着注入压力的增加,相应的应力呈现一定的非线性特征,表明液氮注入煤样过程存在明显的能量积累-释放:初始阶段以热应力主导的微裂纹萌生为主,中期转变为裂纹扩展与汇合,而高压条件下则发展为宏观裂隙网络的耦合破坏模式。这种阶段转变不仅与三向不等应力相关,而且与煤体内部孔隙结构非均匀性和各向异性相关,最终导致煤样呈现差异化的应力响应规律。

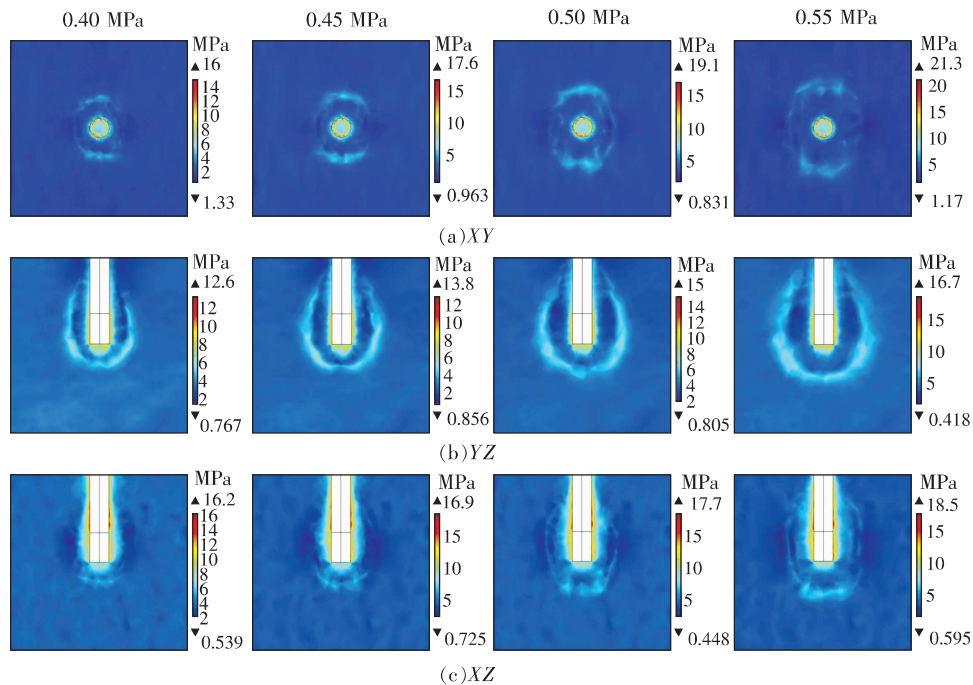


图 12 不同注入压力下煤样各正交切面应力

Fig. 12 Stress of each orthogonal section of coal samples under different injection pressures

不同液氮注入压力下煤样损伤随着时间的变化规律如图 13 所示。煤样损伤随注入时间呈增长趋势。在初始阶段(0 ~3 min),损伤增长较为缓慢;随着时间延长,煤体内微裂隙大量萌生并扩展,导致损伤速率急剧上升,并在裂隙贯通煤样时达到峰值,这一现象与液氮注入初期的高热应力密切相关;后期由于温差减小,热应力降低,损伤增速逐渐减缓。对比不同压力发现,相同时间条件下损伤程度存在显著差异,例如在 15 min 时,0.4, 0.45, 0.5 MPa 和 0.55 MPa 注入压力下的损伤量分别为 58.3%、63.7%、66.4% 和 72.1%,表明提高注入压力可有效增强液氮的致裂效果。

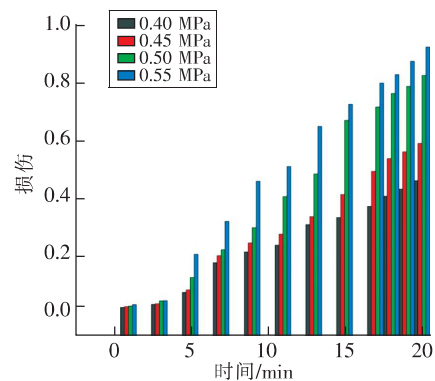


图 13 不同注入压力下煤样损伤随时间变化规律  
 Fig. 13 Variation law of coal samples damage with time under different injection pressures

图 14 揭示了最终损伤量与注入压力之间的线性关系。煤样整体损伤随注入压力增加也表现出增长趋势。注入压力在 0.45 ~ 0.5 MPa 时,煤样最终损伤涨幅达到 24.1%。对比煤样最后损伤发现,液氮注入压力的提高对于液氮致裂效果有明显的促进作用。

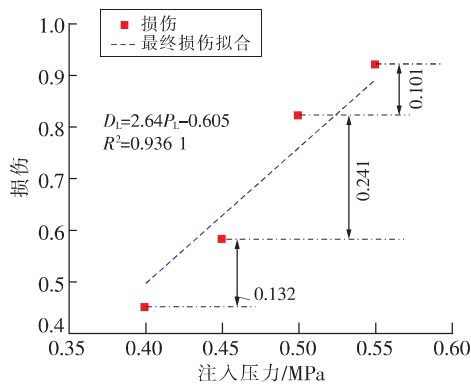


图 14 不同注入压力下煤样最终损伤  
Fig. 14 Final damage of coal samples under different injection pressures

2.2.3 真三轴应力下液氮注入煤样损伤机理

液氮注入过程中,煤样损伤主要受温度热应力、膨胀力和注入压力三重增透效应的耦合作用控制(试验采用干燥煤样,故不考虑水冰相变及冻胀力影响)。如图 15 所示,液氮注入煤样损伤机理表现为:液氮与煤样接触瞬间产生的超低温效应(约 -196 °C)导致煤基质发生急剧收缩,在颗粒间产生显著的拉应力集中,当该应力超过局部强度

阈值时即引发初始微裂纹的萌生;液氮汽化形成的高压氮气在孔隙系统中产生各向异性的膨胀应力场,该应力场与既有裂纹相互作用,当复合应力状态达到破坏准则时,既存裂纹发生扩展并伴随次生裂纹的形成;随着注入压力持续增大并超过煤的宏观抗压强度,微裂纹通过应力集中区的相互连接,最终会形成贯通网络。煤基质骨架与孔隙内气体之间因热物理性质差异导致的固-气温度不匹配效应,进一步加剧了孔隙结构损伤。在急剧降温过程中,煤骨架的收缩速率和幅度远大于孔隙内气体,这种不协调变形在孔隙壁面产生显著的剪切应力,促使原生微孔隙发生扩展和贯通,对整体渗透率的增强效果产生协同放大作用。

真三轴下液氮注入煤样损伤机理包括。

1) 液氮注入致裂煤样形成的裂纹系统具有典型的多尺度特征,这种类似树根状的裂纹拓扑结构由宏观裂纹和微观裂纹共同构成,其形成机制与煤样应力状态密切相关。在三向不等应力作用下,低温区域呈现明显的方向选择性,通过对比图 7 煤样各物性参数演化特征,发现煤样损伤优先于最大主应力方向达到最值,注入 20 min 时几乎贯穿整个煤样,这说明煤在真三轴载荷作用下,裂纹扩展会表现出显著的各向异性特征:裂纹系统主要沿最大主应力方向延伸扩展,形成优势破裂面。在此过程中,固-气温度不匹配诱导的细观损伤与宏观应力场相互耦合,显著提升了沿最大主应力方向的渗透率增强效果。

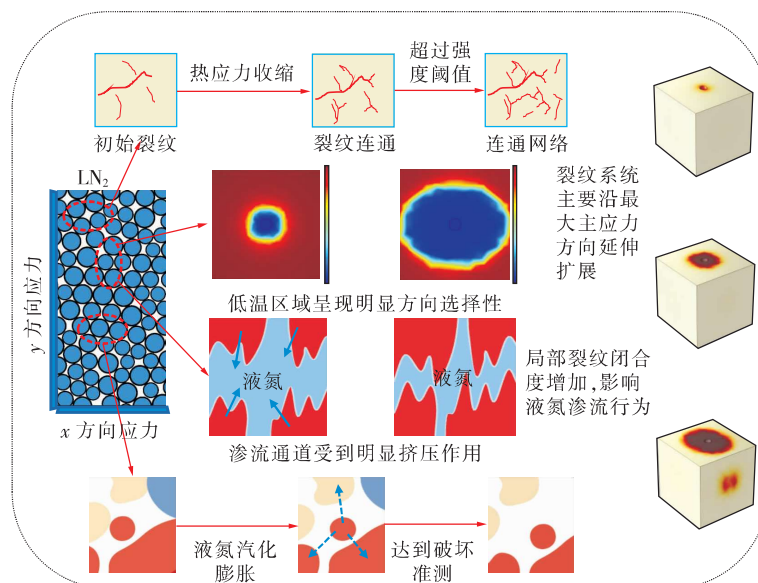


图 15 真三轴应力下液氮注入煤样损伤破坏机理

Fig. 15 Damage failure mechanism of liquid nitrogen injected into coal samples under true triaxial stress

2)煤作为一种天然非均质脆性材料,其力学性质受矿物颗粒排列、原生孔隙分布及胶结物特征等细观结构因素控制。结合图9可知,随着最小主应力的增大,应力传播圈呈现收缩趋势,表明垂直于最大主应力方向的裂纹尖端会受到明显挤压作用,导致局部裂纹闭合度增加,且增加的主应力也强化了煤基质间的胶结作用,这种现象会显著影响液氮及低温氮气在煤体中的渗流行为。然而,固-气温度不匹配在孔隙尺度产生的损伤效应能够部分抵消这种应力约束作用,通过促进微裂隙的萌生和扩展,维持渗透通道的稳定性,从而在较高围压条件下仍能实现显著的增透效果。

从动态演化过程来看,在真三轴应力条件下,随着注入时间的延长,裂纹系统经历从离散分布到网络连接的转变,最终形成以最大主应力方向为主导的裂隙化网络结构。具有方向选择性的多尺度裂纹网络的形成为瓦斯流动创造了新的渗流通道,沿主应力方向持续扩展的裂纹有效维持了渗透率的长期稳定性。经液氮处理后煤样沿最大主应力方向的渗透率可提升2~3倍。

### 3 结论

1)液氮注入煤样过程中,煤样的温度场、渗透率及损伤演化呈现出明显的时空性。注入初期,损伤主要出现在钻孔附近,随着注入时间延长,煤样损伤沿 $x$ 、 $y$ 方向均有不同程度的增强,煤样内部损伤持续积累。注入后期,低温液氮已接近煤样外表面,损伤区域几乎覆盖整个煤样。

2)不同注入压力和不同最小主应力下 $XY$ 切面都表现出较强的压力敏感性,相较于2 MPa最小主应力,5 MPa下 $XY$ 切面应力涨幅达到41.8%。注入前15 min,煤样损伤随最小主应力的增大而递减,但煤样最终损伤呈现增加趋势;注入压力的提高对液氮致裂效果有明显的促进作用。

3)最小主应力增加引起煤颗粒间距紧缩,增大了矿物颗粒间的黏聚力,导致液氮在煤样内部的渗透流通受阻。随着液氮的不断注入,煤样内部会逐渐形成“树根状”裂纹网络,极大提高了煤体的增透效果。研究建立的模型存在一定的局限性,实际现场需考虑地层结构、井下工程条件等多种因素。

### 参考文献(References):

[1] 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.

[2] KANG J Q, FU X H, LI X, et al. Nitrogen injection to enhance methane and water production: An experimental study using the LF-NMR relaxation method[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 211: 103-228.

[3] 李树刚,张静非,林海飞,等.双碳战略中煤气共采技术发展路径的思考[J].煤炭科学技术,2024,52(1):138-153.

LI Shugang, ZHANG Jingfei, LIN Haifei, et al. Thoughts on the development path of coal and gas co-mining technology in dual carbon strategy[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 138-153.

[4] 徐吉钊.液态 $CO_2$ 循环冲击致裂煤体孔隙结构及损伤力学特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.

XU Jizhao. Study of pore evolution and damage mechanical characteristics of coals under the effect of liquid  $CO_2$  cyclic shock fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[5] 敖翔,赖粮丰,陆朝晖,等.深层页岩超临界 $CO_2$ 前置压裂裂缝扩展机制[J].煤炭学报,2025,50(9):4235-4246.

AO Xiang, LAI Liangfeng, LU Zhaohui, et al. Mechanism of fracture expansion in deep shale by supercritical  $CO_2$  fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(9): 4235-4246.

[6] 蔡鑫.非常规储层超临界 $CO_2$ 压裂复杂裂缝扩展模型[J].断块油气田,2022,29(1):107-110,123.

CAI Xin. Complex fracture propagation model of supercritical  $CO_2$  fracturing in unconventional reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(1): 107-110, 123.

[7] 马铁华,崔春生,肖文聪.煤层气井高能气体压裂器性能测试系统的研究[J].煤炭学报,2014,39(9):1857-1861.

MA Tiehua, CUI Chunsheng, XIAO Wencong. Experimental study on the performance test system of high energy gas fracturing apparatus in coal-bed methane extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1857-1861.

[8] 明晓添,刘东尧.井下高能气体压裂设计数值模拟研究[J].兵器装备工程学报,2021,42(5):158-162.

MING Xiaotian, LIU Dongyao. Numerical simulation re-

- search on downhole high energy gas fracturing design [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 158-162.
- [9] 张小军, 廖文德, 邹云辉, 等. 低透气性松软煤层增透技术研究现状及高能气体压裂新技术[J]. 能源与环保, 2018, 40(11): 94-98.  
ZHANG Xiaojun, LIAO Wende, ZOU Yunhui, et al. Present situation of research on permeability enhancement technology of low permeability soft coal seam and new technology of high-energy gas fracturing[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(11): 94-98.
- [10] 翟成, 徐吉钊. 液氮循环致裂技术强化煤层气抽采的研究与应用展望[J]. 工矿自动化, 2020, 46(10): 1-8.  
ZHAI Cheng, XU Jizhao. Research on cyclic liquid nitrogen fracturing technology for enhancing coalbed methane drainage and its application prospect [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(10): 1-8.
- [11] 林海飞, 罗荣卫, 李博涛, 等. 液氮冻融含水煤体孔隙损伤规律实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(1): 55-64.  
LIN Haifei, LUO Rongwei, LI Botao, et al. Experimental research on pore damage law of water-contained coal caused by liquid nitrogen freeze-thaw [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(1): 55-64.
- [12] COETZEE S, NEOMAGUS H W, BUNT J R, et al. The transient swelling behaviour of large (-20 + 16 mm) South African coal particles during low-temperature devolatilisation[J]. Fuel, 2014, 136: 79-88.
- [13] 翟成, 孙勇, 武建国. 低渗透煤层液氮冷冲击致裂研究新进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 904-910.  
ZHAI Cheng, SUN Yong, WU Jianguo. New progress of liquid nitrogen fracture technique in low-permeability coal seams [J]. China Science Foundation, 2021, 35(6): 904-910.
- [14] 丛钰洲, 翟成, 丁熊, 等. 煤层钻孔内注入液氮过程中的传热传质规律及煤损伤分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3128-3137.  
CONG Yuzhou, ZHAI Cheng, DING Xiong, et al. Analysis on heat and mass transfer law and coal damage during liquid nitrogen injection into coal seam borehole [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3128-3137.
- [15] 林海飞, 李博涛, 李树刚, 等. 液氮注入煤体致裂全过程真三轴试验系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(2): 276-291.  
LIN Haifei, LI Botao, LI Shugang, et al. Development and application of true triaxial experimental system for the whole process of coal fracturing induced by liquid nitrogen injection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(2): 276-291.
- [16] 黄中伟, 位江巍, 李根生, 等. 液氮冻结对岩石抗拉及抗压强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 694-700.  
HUANG Zhongwei, WEI Jianghui, LI Gensheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 694-700.
- [17] 郑学林, 张广清, 郑士杰. 液氮超低温诱导岩石类材料裂缝形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 889-903.  
ZHENG Xuelin, ZHANG Guangqing, ZHENG Shijie. Study on formation mechanisms of fractures in rock-like materials induced by liquid nitrogen ultra-low temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 889-903.
- [18] 秦雷, 张弦, 林海飞, 等. 液氮冻融过程无烟煤未冻水分布及温度-应力场演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 76-86.  
QIN Lei, ZHANG Xian, LIN Haifei, et al. Distribution of unfrozen water and evolution of temperature-stress field during freeze-thaw of liquid nitrogen in heterogeneous coal [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 76-86.
- [19] 张春会, 徐刚, 于永江, 等. 钻孔注水-注液氮冷裂增透煤的数学模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 139-144.  
ZHANG Chunhui, XU Gang, YU Yongjiang, et al. Study on permeability-enhancing mathematical model of coal fracturing with borehole water injection and liquid nitrogen injection [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 139-144.
- [20] LU Y L, ELSWORTH D, WANG L G. Microcrack-based coupled damage and flow modeling of fracturing evolution in permeable brittle rocks [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 226-244.
- [21] LIN H, LI B, LI S, et al. Numerical investigation of temperature distribution and thermal damage of heterogeneous coal under liquid nitrogen freezing [J]. Energy, 2023, 267: 126592.
- [22] HAN S, CHENG Y, GAO Q, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model with ice-water phase change for liquid nitrogen injection simulation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 203: 108676.

- [23] MOGI K. Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rocks[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 1972, 5: 318–324.
- [24] HAIMSON B C. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1978, 15(4): 167–178.
- [25] KANG H P, ZHANG X, SI L, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China[J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(3–4): 333–345.
- [26] CHEN S D, TANG D Z, TAO S, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics of coal reservoirs in major coalfields in China: Implication for coalbed methane (CBM) development[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 182: 66–84.
- [27] 张文勇, 司磊, 郭启文, 等. 煤层气井液氮伴注压裂增透机制及应用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(11): 97–102.
- ZHANG Wenyong, SI Lei, GUO Qiwen, et al. Study on mechanism and application of liquid nitrogen injection combined with fracturing to enhance permeability in CBM wells[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(11): 97–102.
- [28] 邱宇超, 梁卫国, 李静, 等. 非均质弹塑性煤体水压致裂裂纹形态研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3668–3679.
- QIU Yuchao, LIANG Weiguo, LI Jing, et al. Study on fracture morphology of hydraulic fracturing in heterogeneous elastoplastic coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3668–3679.
- [29] 杜梦琳. 煤体液氮致裂损伤演化规律及增透机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- DU Menglin. Damage evolution law and permeability enhancement mechanism of coal induced by liquid nitrogen[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [30] 杨新乐, 任常在, 张永利, 等. 低渗透煤层气注热开采热-流-固耦合数学模型及数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(6): 1044–1049.
- YANG Xinle, REN Changzai, ZHANG Yongli, et al. Numerical simulation of the coupled thermal-fluid-solid mathematical models during extracting methane in low-permeability coal bed by heat injection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(6): 1044–1049.
- [31] ZHU W C, LIU J, SHENG J C, et al. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(7): 971–980.
- [32] YUAN R, CHEN C, WEI X, et al. Heat-fluid-solid coupling model for gas-bearing coal seam and numerical modeling on gas drainage promotion by heat injection[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2019, 6: 564–576.
- [33] GHASSEMI A, ZHANG Q. A transient fictitious stress boundary element method for poro-thermoelastic media[J]. *Engineering analysis with boundary elements*, 2004, 28(11): 1363–1373.
- [34] HASSANZADEGAN A, BLÖCHER G, MILSCH H, et al. The effects of temperature and pressure on the porosity evolution of Flechtinger sandstone[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2014, 47(2): 421–434.
- [35] 颜丙乾, 任奋华, 蔡美峰, 等. THMC 多场耦合作用下岩石物理力学性能与本构模型研究综述[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(11): 1389–1399.
- YAN Bingqian, REN Fenhua, CAI Meifeng, et al. A review of the research on physical and mechanical properties and constitutive model of rock under THMC multi-field coupling[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(11): 1389–1399.
- [36] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析用 RFPA<sup>2D</sup> 系统的细观单元本构关系及验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 24–29.
- ZHU Wancheng, TANG Chunan, YANG Tianhong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic element used in RFPA<sup>2D</sup> and its validations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 24–29.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] ZHANG X, WANG J, GAO F, et al. Numerical study of fracture network evolution during nitrogen fracturing processes in shale reservoirs[J]. *Energies*, 2018, 11(10): 2503.