

液氮冻融下砂岩力学特性及孔隙结构演化研究

张诗明^{1,2}, 伍琴琴³, 黄爱武^{1,2}, 汪雨婷^{1,2}, 焦文磊^{1,2},
伍玲玲^{1,2}, 胡 林^{1,2}, 喻 清^{1,2}

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;
2. 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 湖南 衡阳 421001;
3. 湖南高速铁路职业技术学院 铁道工程学院, 湖南 衡阳 421200)

摘要: 为进一步研究液氮冻融循环作用下砂岩力学特性及其孔隙结构演化规律, 以天然含水状态和饱水状态的砂岩为研究对象, 采用核磁共振仪和岩石力学试验系统, 测定了不同液氮冻融循环次数后砂岩的抗压强度、弹性模量、孔隙 T_2 图谱和核磁孔隙度, 分析了液氮作用下砂岩的力学特性变化、孔隙度演化及孔径分布规律, 并基于 SDR 渗透率模型, 计算了砂岩冻融循环后的渗透率变化。结果表明: 经液氮冷冻处理后, 砂岩的单轴抗压强度显著降低; 且随着冻融循环次数的增加, 强度降低幅度逐渐增大, 当循环次数由 0 次增至 5 次时, 天然含水状态砂岩的抗压强度降低幅度由 12.25% 增至 29.04%, 而饱水状态砂岩的抗压强度最大降幅高达 55.50%。核磁共振(NMR)测试结果显示, 液氮冻融循环显著增加了砂岩的孔隙度和渗透率, 经 5 次液氮冻融循环后, 饱水状态砂岩样品的孔隙度增长率为 39.09%、渗透率增长率达 160% (是天然含水状态砂岩渗透率增长率的 1.89 倍)。研究结果可为液氮压裂技术在低渗透砂岩型铀矿的高效浸出提供新思路。

关键词: 液氮冻融; 力学特性; 孔隙结构; 核磁共振; 渗透率; 砂岩型铀矿

中图分类号: TL212; P311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0001-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.05.05

铀资源是国家战略资源, 是核工业发展的基础^[1]。中国铀矿资源不丰富, 仅有 41.57% 的铀矿资源为可地浸开采的砂岩型铀矿, 而矿石渗透系数小于 0.5 m/d 的致密储层占砂岩型资源储量的 70% 以上, 迫切需加强对低渗透砂岩型铀资源高效开采技术的攻关^[2]。为改善铀矿层渗透性, 提高铀的浸出率, 对压裂技术^[3-4]、爆破增渗技术^[5-6]和钻孔洗井工艺^[7-8]等进行了大量研究。近年来, 液氮因其超低温、无污染、成本低等优点而受到广泛关注^[9], 以液氮作为压裂流体的低温无水压裂技术成为重要发展方向之一。

液氮压裂技术是利用温度极低 (-195.8°C) 的液氮与温度较高的储层接触, 引起岩石温度骤降, 并在岩石内部产生热应力; 同时使孔隙水冻结成冰, 对岩石产生冻结致裂作用, 加剧岩石的破

坏, 进而提高储层渗透率, 增强开采效果^[10]。针对液氮与岩石相互作用已开展了大量研究。黄路云等通过对自然和全饱和水状态砂岩进行液氮循环浸泡试验, 发现经液氮冻结后岩石的单轴抗压强度、抗拉强度均降低^[11]。秦雷等运用低场核磁共振技术, 对饱水烟煤进行不同次数的液氮冻融循环处理, 探究了煤样融化过程中未冻水赋存特征和孔隙演化特征^[12]。林远海对不同含水率煤体进行液氮冻融试验, 研究了液氮冻融作用下含水煤体孔隙损伤规律^[13]。王浩采用三轴实验装置研究了不同液氮溶浸时间对煤样单轴和三轴加载力学性质及破坏形式的影响规律^[14]。QIN 等研究了液氮冻融循环次数对煤岩物理性质的影响, 结果发现液氮致裂次数越多, 煤体损伤越严重^[15]。LIN 等研究了不同含水率的煤块在液氮冻融处理前后表面

收稿日期: 2025-05-19; **修回日期:** 2025-06-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52474134); 国家科技重大专项 (2025ZD1010700; 2025ZD1010708); 湖南省教育厅项目 (24C0797); 湖南省自然科学基金 (2022JJ40374; 2023JJ30516; 2024JJ9074); 湖南省大学生创新创业训练计划项目 (D202305192016014020; D202405191433366087)

通信作者: 喻清

裂缝和孔隙结构的变化规律,结果表明随着含水率的增加,煤体受到的破坏更严重^[16]。

目前,研究多聚焦于液氮对岩石力学性能或孔隙结构特征单方面的影响,综合考虑两者变化的研究相对较少;且多关注于液氮在煤矿领域中的应用,而对液氮作用下砂岩型铀矿床损伤特性的研究较少。因此,以砂岩为研究对象,探究了液氮冻融循环作用下砂岩力学特性及其孔隙结构演化规律,旨在为液氮压裂技术在低渗透砂岩型铀矿增渗方面的应用提供理论支持,这对于完善相关理论、指导工程实践具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试样制备及预处理

以中国西北地区的砂岩为研究对象,试验所用的砂岩均取自同一岩块,以减少非均质影响。按照国际岩石力学学会(ISRM)推荐方法,将砂岩加工为直径50 mm、高度100 mm的标准圆柱体试样(图1)。

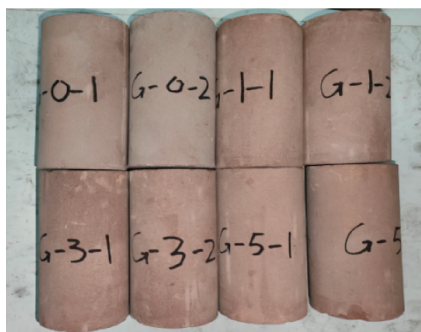


图1 砂岩试样

Fig. 1 Sandstone sample

1.2 核磁共振技术原理

核磁共振(NMR)技术能够通过检测水分子中氢原子的运动特性,精确分析多孔材料的孔隙结构和饱水量^[17-20]。NMR信号的强度与可流动水的含量成正比,且当孔隙完全被水填满时,NMR测得的孔隙度与实际孔隙度高度吻合^[21]。此外,弛豫时间(T_2)与孔隙大小直接相关,孔隙越小,水分子与孔壁碰撞越频繁,能量释放越快, T_2 值越短,其定量关系可表示为^[22]

$$\frac{1}{T_2} = \rho \left(\frac{S}{V} \right) = F_s \left(\frac{\rho}{r} \right), \quad (1)$$

式中: T_2 —横向弛豫时间,ms; ρ —横向表面弛豫

强度因子, $\mu\text{m/ms}$; S —孔隙表面积, μm^2 ; V —孔隙体积, μm^3 ; F_s —孔隙形状因子; r —孔径, μm 。

1.3 试验方案

为了研究低温对砂岩力学特性及其孔隙结构特征的影响,本试验分别对天然含水状态(即未进行人工饱水处理的原状态,编号G组)和饱水状态(将自然砂岩放置于真空饱水仪中饱水48 h,编号S组)下的砂岩进行液氮冻融循环处理,将筛选合格的砂岩试样以4个为1组,共分8组,对每组样品进行0、1、3、5次的液氮冻融循环处理。每次冻融循环包括40 min的液氮冷冻和1 h的室温回温融化。在回温过程中,将标准试样用保鲜膜密封,以防止水蒸气渗入标准试样。冻融循环处理后,使用中科院武汉分院岩土研究所RMT-150B型岩石力学试验系统(图2)对样品进行单轴抗压强度测试,设备轴力0~1 000 kN,围压0~50 MPa,加载速率0.01~100 kN/s。同时,使用核磁共振(NMR)技术对样品的孔隙结构进行表征,获取横向弛豫时间曲线、孔隙度及孔径分布等参数;并基于SDR渗透率模型,计算砂岩冻融循环前后的渗透率变化,分析液氮冻融循环对砂岩孔隙结构和渗透率的影响。



图2 RMT岩石力学实验系统

Fig. 2 RMT rock mechanics experimental system

2 试验结果与分析

2.1 循环冻融砂岩力学特性变化规律

砂岩受到低温液氮的强烈冻结作用后,其力学特性会发生改变,通过对比分析液氮冻融循环对不同状态下砂岩的抗压强度和弹性模量的影响,探究液氮冻结对岩石的损伤作用机理。

2.1.1 应力应变曲线分析

图3为天然含水状态和饱水状态砂岩试样在

经历了不同液氮冻融循环次数(0、1、3、5 次)后的应力应变曲线。可以看出,未经液氮冷冻处理的砂岩的应力应变曲线在弹性阶段斜率最大,表明其弹性模量较高,即抵抗弹性变形的能力较强。随着冻融循环次数从 1 次增加到 5 次,曲线在弹性阶段的斜率逐渐减小,表明冻融循环会使砂岩内部产生微裂纹和孔隙,导致其弹性模量降低。初始状态下,

砂岩具有最高的峰值应力;随着冻融循环次数的增加,峰值应力逐渐下降。这清晰地表明,液氮冻融循环次数越多,砂岩的抗压强度下降越明显,这与砂岩内部结构在冻融作用下不断劣化有关。液氮冻融循环对砂岩的应力应变特性具有显著影响,随着冻融循环次数的增加,砂岩的弹性模量降低、抗压强度减小,破坏特征趋向于更明显的脆性破坏。

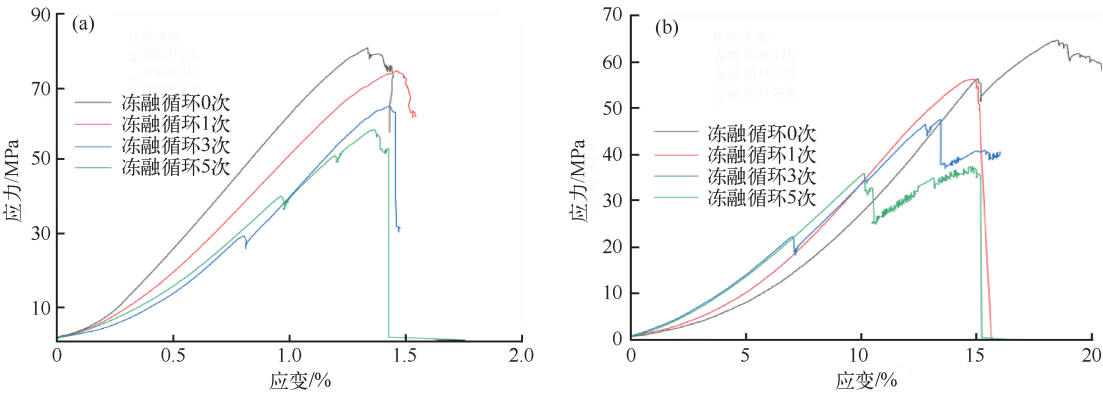


图 3 砂岩抗压强度应力应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of compressive strength of sandstone

通过对比图 3(a)和 3(b)可看出,饱水状态砂岩的应力应变曲线变化更为显著。在冻融循环作用下,与天然含水状态砂岩相比,饱水砂岩的力学性能劣化程度更为严重,其应力应变曲线在峰值应力后下降更陡峭,其脆性破坏特征更突出。这是由于在饱水状态下,水在冻融过程中的体积变化对砂岩内部结构造成更大的破坏,水的存在加剧了液氮冻融循环对砂岩内部结构的损伤,加速了砂岩抗压强度的降低。

2.1.2 抗压强度变化

表 1 和图 4 是经液氮冻融循环后砂岩的单轴抗压强度测试结果。可以看出,随着循环次数的增加,砂岩的抗压强度呈降低趋势,经过 5 次液氮冻融循环作用后,天然含水状态砂岩的抗压强度降低了 12.25%~29.04%;而饱水砂岩经过 5 次液氮冻融循环作用后,其抗压强度最大降幅达 55.50%。相比天然含水状态砂岩,饱水状态砂岩的抗压强度受冻融循环影响更为剧烈。

表 1 抗压强度测试数据
Table 1 Compressive strength test data

冻融循环次数	样品编号	抗压强度/MPa	均值抗压强度/MPa	降幅/%	冻融循环次数	样品编号	抗压强度/MPa	均值抗压强度/MPa	降幅/%
0	G-0-1	80.68	80.21	12.25	0	S-0-1	64.66	66.05	19.45
	G-0-2	75.71				S-0-2	73.14		
	G-0-3	84.25				S-0-3	60.36		
1	G-1-1	74.32	70.39	18.61	1	S-1-1	53.36	53.21	30.03
	G-1-2	66.33				S-1-2	56.28		
	G-1-3	70.52				S-1-3	49.98		
3	G-3-1	70.80	65.28	29.04	3	S-3-1	47.59	46.22	55.50
	G-3-2	64.56				S-3-2	50.95		
	G-3-3	60.49				S-3-3	40.12		
5	G-5-1	62.97	56.92		5	S-5-1	37.42	29.40	
	G-5-2	58.01				S-5-2	21.08		
	G-5-3	49.78				S-5-3	29.69		

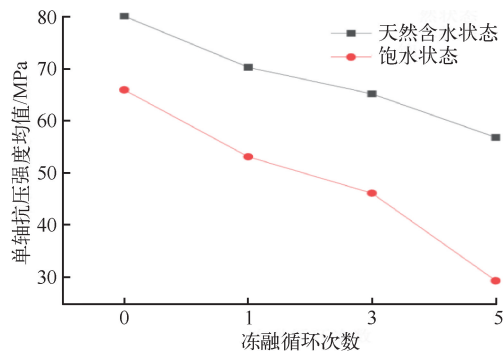


图 4 单轴抗压强度均值

Fig. 4 Uniaxial compressive strength mean

2.1.3 弹性模量变化

表 2 和图 5 是砂岩弹性模量测试结果。岩石的弹性模量是衡量岩石抵抗弹性变形能力的指标,弹性模量越大,岩石的刚度越大,抗弯和抗变形能力越强,更不容易发生变形。由测试结果可以得出,砂岩的弹性模量均随着冻融次数的增加有不同程度的降低,G组砂岩初始均值弹性模量

为 6.88 GPa,随着冻融循环次数从 0 次增加到 5 次,初始均值弹性模量降至 4.29 GPa,最大降幅为 37.6%。S 组砂岩初始均值弹性模量为 6.40 GPa,冻融循环 5 次后仅为 2.38 GPa,均值弹性模量最大降幅达 62.74%,是天然含水状态砂岩弹性模量最大降幅的 1.67 倍,表明饱水状态下的砂岩在冻融循环作用后,其抵抗弹性变形的能力严重下降。

液氮冻融循环过程中,水分的冻胀融缩是导致砂岩力学性能变化的关键因素。在天然含水状态(G 组)下,砂岩内部水分较少,冻胀力相对较小,对内部结构的破坏程度有限,因此抗压强度和弹性模量下降幅度相对较小。而在饱水状态(S 组)下,砂岩内部存在大量水分,冻结时产生较大的冻胀力;这种冻胀力反复作用,使得砂岩内部的孔隙和微裂隙不断扩展、连通,导致内部结构快速劣化,进而使得抗压强度和弹性模量显著降低。

表 2 弹性模量测试数据

Table 2 Elastic modulus test data

冻融循环次数	样品编号	弹性模量/GPa	均值弹性模量/GPa	降幅/%	冻融循环次数	样品编号	弹性模量/GPa	均值弹性模量/GPa	降幅/%
0	G-0-1	7.40	6.88		0	S-0-1	5.30	6.40	
	G-0-2	6.32				S-0-2	7.63		
	G-0-3	6.92				S-0-3	6.26		
1	G-1-1	6.53	6.10	11.29	1	S-1-1	4.24	5.09	20.48
	G-1-2	5.66				S-1-2	5.26		
	G-1-3	6.12				S-1-3	5.76		
3	G-3-1	6.46	5.80	15.75	3	S-3-1	3.90	4.02	37.10
	G-3-2	5.72				S-3-2	4.49		
	G-3-3	5.21				S-3-3	3.68		
5	G-5-1	4.11	4.29	37.60	5	S-5-1	2.28	2.38	62.74
	G-5-2	4.99				S-5-2	1.74		
	G-5-3	3.78				S-5-3	3.13		

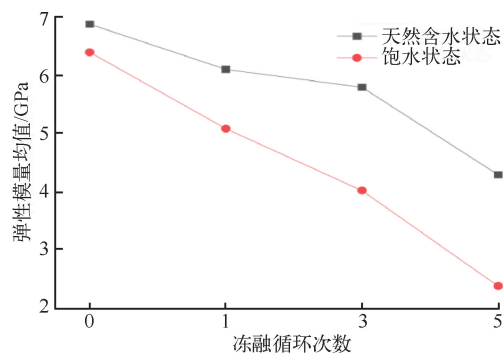


图 5 弹性模量均值

Fig. 5 Elastic modulus mean

2.2 砂岩孔隙结构和渗透率变化规律

2.2.1 冻融循环砂岩孔隙结构变化规律

图 6 为液氮冻融循环作用后天然含水状态和饱水状态砂岩横向弛豫时间曲线。 T_2 值与孔隙半径成正比关系,即 T_2 值越小,砂岩孔径越小; T_2 值越大,砂岩孔径越大。幅值大小表示对应孔隙半径的分布数量,幅值较低表示该孔隙半径的分布较少,幅值较高表示该孔隙半径的分布较多。

T_2 弛豫时间的分布曲线按照其波峰数量可以划分为三峰曲线、双峰曲线和单峰曲线,其中以

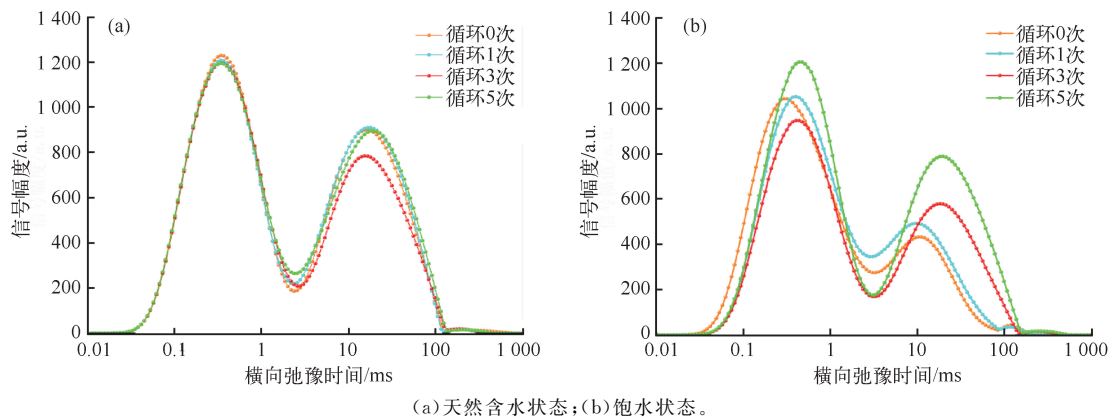
三峰曲线最为常见。从图 6 可知,天然含水状态和饱水状态砂岩样品的 T_2 图谱均具有 3 个峰,分别依次对应于砂岩中的微孔、小孔、中孔;且第一峰(微孔)面积最大,第三峰(中孔)面积最小。结合孔径分布,表明试验砂岩中微、小孔数量占比最大,中孔次之,大孔占比最少。

随着液氮冻融循环次数的增加,可以看出 T_2 曲线整体向右偏移;说明在液氮循环作用下,砂岩内部小孔隙正在向大孔隙发育。 T_2 分布也随液氮冻融循环次数的增加而显著拓宽;这表明冻融作用显著增加了孔隙尺寸的多样性,既有微孔隙的保留,又生成了大孔隙。

图 7 为液氮冻融循环前后砂岩的孔径分布曲线,表 3 为冻融循环前后砂岩孔隙体积占比。由表 3 可知,在天然含水状态下,冻融循环过程中微孔、小孔孔隙体积占比为 59.46%~63.01%,变

化较平稳;中孔孔隙体积占比为 31.52%~35.09%,变化幅度较小;大孔孔隙体积占比为 5.46%~6.47%,5 次冻融后,体积占比总体呈上升趋势。

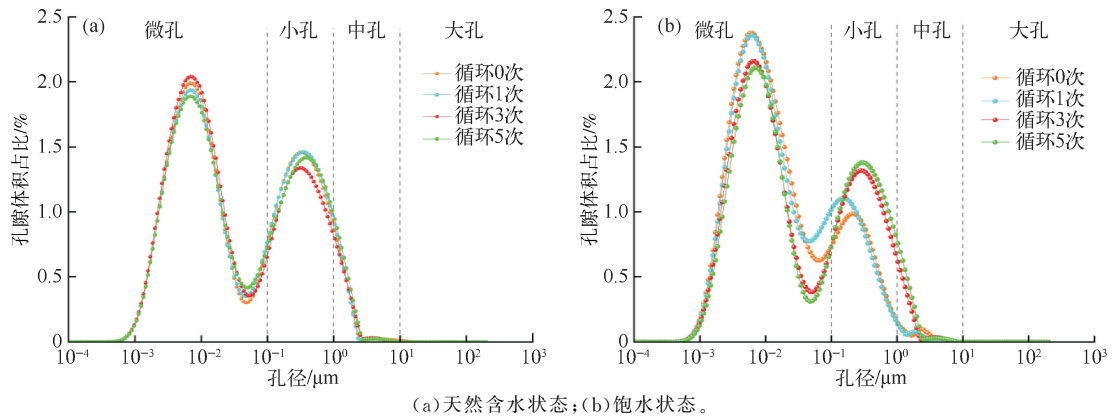
在饱水状态下,随着液氮冻融循环次数从 0 次增至 5 次,砂岩微孔、小孔孔隙体积占比由 78.87%降至 62.60%,呈显著下降趋势;中孔孔隙体积占比从 19.89%升至 32.59%,大孔孔隙体积占比从 1.24%升至 4.81%,二者均总体呈上升趋势。这表明此状态下冻融循环促使孔隙从小向大转化,液氮冻融循环对砂岩孔隙结构有显著影响,液氮循环冻融作用下,砂岩孔隙结构得到明显改善,微小孔隙数量增加,部分相互贯通扩展,逐渐转化为中大孔隙;随着冻融循环次数的增加,微小孔隙占比减小,中大孔隙占比显著增大。



(a) 天然含水状态; (b) 饱水状态。

图 6 砂岩横向弛豫时间曲线

Fig. 6 Transverse relaxation time curve of sandstone



(a) 天然含水状态; (b) 饱水状态。

图 7 砂岩孔径分布曲线

Fig. 7 Pore size distribution curve of sandstone

表 3 孔隙体积占比
Table 3 Pore volume ratio

冻融循环次数	天然含水状态孔隙体积占比/%			饱水状态孔隙体积占比/%		
	微孔、小孔	中孔	大孔	微孔、小孔	中孔	大孔
0	63.01	31.52	5.47	78.87	19.89	1.24
1	59.89	34.65	5.46	78.06	21.00	0.94
3	59.46	35.09	5.44	65.84	30.52	3.63
5	59.74	33.80	6.47	62.60	32.59	4.81

砂岩孔隙度通过核磁共振试验测得。冻融循环后孔隙度增量,在一定程度上能表征在液氮冻融作用下砂岩内部结构的损伤程度。

$$\phi = \frac{\Delta\phi}{\phi_0} \times 100\% = \frac{\phi_1 - \phi_0}{\phi_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: ϕ —孔隙度变化率,%; $\Delta\phi$ —孔隙度增量,

%; ϕ_0 、 ϕ_1 —液氮冻融前、后砂岩孔隙度,%。

液氮循环冻融后砂岩孔隙度均有所增加(表 4),并且随着冻融循环次数的增加,孔隙度的增量也随之增加,液氮冻融可以有效促进砂岩孔隙发育。

表 4 液氮冻融循环前后砂岩孔隙度

Table 4 Sandstone porosity before and after liquid nitrogen freezing and thawing cycles

冻融循环次数	天然含水状态				饱水状态			
	ϕ_0 /%	ϕ_1 /%	$\Delta\phi$ /%	ϕ /%	ϕ_0 /%	ϕ_1 /%	$\Delta\phi$ /%	ϕ /%
1	11.93	12.53	0.60	5.03	8.16	8.6	0.44	5.39
3	11.93	12.74	0.81	6.79	8.16	10.75	2.59	31.74
5	11.93	12.78	0.85	7.12	8.16	11.35	3.19	39.09

2.2.2 冻融循环砂岩渗透率变化规律

SDR 渗透率模型是一种多孔介质渗透率计算模型,基于核磁共振横向弛豫时间的几何平均值与渗透率的关系建立^[23]。其表达式为^[24]

$$K = a T_{2gm}^2 D_E^4, \quad (3)$$

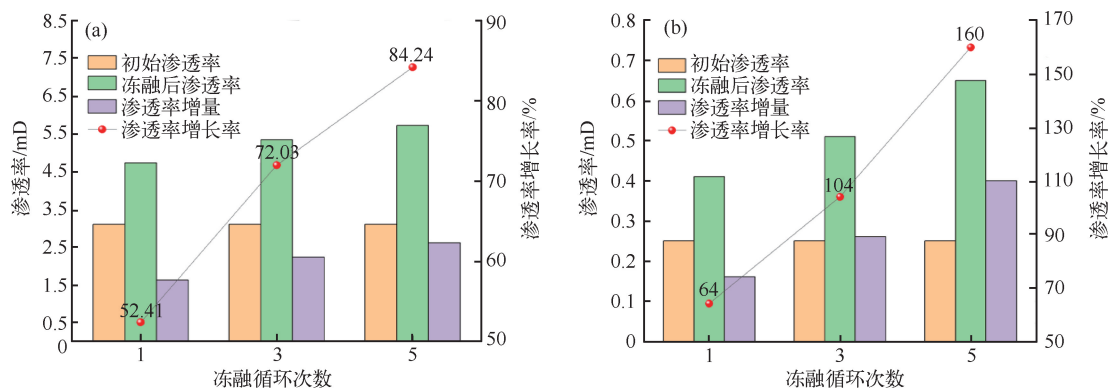
式中: K —渗透率,mD; a —与多孔介质有关的系数,取 0.022 4; T_{2gm} — T_2 曲线的几何平均值; D_E —有效孔隙度。

为进一步研究液氮冻融循环后砂岩的渗透率变化规律,定义渗透率增长率。

$$W = \frac{\Delta K}{K_0} \times 100\% = \frac{K_1 - K_0}{K_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: W —渗透率增长率,%; ΔK —渗透率增量,mD; K_0 —初始渗透率,mD; K_1 —冻融后渗透率,mD。

采用 SDR 渗透率模型研究液氮冻融循环对砂岩渗透率的影响,计算结果见图 8。



(a)天然含水状态;(b)饱水状态。

图 8 砂岩渗透率变化

Fig. 8 Variation of sandstone permeability

由图8可看出,冻融循环次数与砂岩渗透率增长呈正相关。天然含水状态砂岩经5次液氮冻融循环作用后,渗透率增加了2.62 mD,渗透率增长率为84.24%;饱水状态砂岩经5次液氮冻融循环作用后,渗透率增长率达160%,该增长率是天然含水状态砂岩渗透率增长率的1.89倍。这表明水分的存在加剧了冻融破坏效应,水分冻结膨胀是主导破坏机制,导致更多微裂纹生成和连通。天然含水状态砂岩因缺乏水分,冻融破坏主要依赖温度应力,破坏效应较低。

3 结论

1)液氮冻融循环显著劣化了砂岩的力学性能。随着冻融循环次数的增加,砂岩的单轴抗压强度和弹性模量均呈下降趋势。天然含水状态下砂岩经5次冻融后,抗压强度最大降幅为29.04%,弹性模量降低37.60%;而饱水状态下砂岩的劣化更为显著,抗压强度最大降幅达55.50%,弹性模量降低62.74%。这表明水分的存在加剧了冻融过程中孔隙水的冻胀作用,导致砂岩内部微裂隙扩展和连通,力学性能下降。

2)核磁共振测试表明,液氮冻融循环显著改变了砂岩的孔隙结构。天然含水状态下,大孔体积占比由5.47%增至6.47%;饱水状态下,微孔、小孔体积占比由78.87%降至62.60%,中孔和大孔占比分别增至32.59%和4.81%。孔隙度增量与冻融次数呈正相关,饱水砂岩经5次冻融后孔隙度增长率达39.09%,表明冻融作用促进了孔隙的扩展与贯通。

3)基于SDR渗透率模型的计算结果显示,冻融循环显著提高了砂岩的渗透率。天然含水状态和饱水状态下砂岩经5次冻融后,渗透率增长率分别为84.24%和160%。饱水砂岩渗透率增幅更高,验证了水分冻结膨胀是导致砂岩损伤破坏的主导机制,其产生的热应力和冰晶生长进一步增强了孔隙连通性。

综上所述,液氮致裂技术可有效扩大和连通砂岩中的孔隙网络,尤其在饱水储层中,液氮冻融可高效破坏致密孔隙结构,显著提升渗透性。

参考文献:

[1] 李开文.论中国铀资源发展潜力及天然铀工艺技术

发展水平[J].金属矿山,2009(S1):13-23.

LI Kaiwen. On development potential of uranium resources and the technology level of of natural uranium[J]. Metal Mine, 2009(S1):13-23.

[2] 苏学斌,杜志明.我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J].中国矿业,2012,21(9):79-83.

SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9):79-83.

[3] 卫海洋,郑永香,张傲.低渗砂岩铀矿水力压裂增渗裂纹扩展规律研究[J].有色金属(矿山部分),2025,77(2):186-194.

WEI Haiyang, ZHENG Yongxiang, ZHANG Ao. Extension law of hydraulic fracture in low-permeability sandstone uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2025, 77(2):186-194.

[4] 张友澎,赵利信,王亚奴,等.高能气体致裂技术在低渗砂岩型铀矿地浸开采中的应用[J].铀矿冶,2024,43(3):1-8.

ZHANG Youpeng, ZHAO Lixin, WANG Yanu, et al. Application of high energy gas fracturing in in-situ leaching of low-permeable sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):1-8.

[5] 王伟,李小春,袁维,等.低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗模型试验及增渗机制研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1609-1617.

WANG Wei, LI Xiaochun, YUAN Wei, et al. Model test and mechanism study of the blasting-enhanced permeability of sandstone-type uranium deposits of low-permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8):1609-1617.

[6] 李嘉伟,郑永香,王伟,等.非均质砂岩铀矿层爆破增渗裂纹扩展数值模拟[J].铀矿冶,2025,44(1):18-29.

LI Jiawei, ZHENG Yongxiang, WANG Wei, et al. Numerical simulation of crack propagation in heterogeneous sandstone uranium deposit by blasting[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(1):18-29.

[7] 苏学斌.提高低渗透性矿床地浸钻孔涌水量的方法[J].铀矿冶,2005,24(4):174-179.

SU Xuebin. Methods for improving flow rate of well of insitu leaching in low permeable uranium deposits[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(4):174-179.

[8] 刘晓奎,张渤,闫纪帆,等.负压洗井工艺在地浸采铀矿山的应用[J].铀矿冶,2023,42(3):46-49.

- LIU Xiaokui, ZHANG Bo, YAN Jifan, et al. Application of negative pressure well washing technology at in-situ leaching uranium mines[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2023, 42(3):46-49.
- [9] 张磊,田苗苗,薛俊华,等.液氮循环处理对不同含水率煤样渗流特性的影响[J].*煤炭学报*, 2021, 46(S1):291-301.
- ZHANG Lei, TIAN Miaomiao, XUE Junhua, et al. Effect of liquid nitrogen cycle treatment on seepage characteristics of coal samples with different water contents[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1):291-301.
- [10] 杨良泽,陈璨,王一乐,等.液氮压裂技术及其前景分析[J].*科技创新与生产力*, 2019(2):66-68.
- YANG Liangze, CHEN Can, WANG Yile, et al. Analysis of liquid nitrogen fracturing technology and its prospect[J]. *Sci-tech Innovation and Productivity*, 2019(2):66-68.
- [11] 黄路云,李占省,冒海军,等.液氮循环冷冻对岩石力学性能强度影响试验研究[J].*土工基础*, 2021, 35(5):628-634.
- HUANG Luyun, LI Zhansheng, MAO Haijun, et al. Experimental study on the effect of liquid nitrogen cycling freezing on the mechanical properties of rock mass[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2021, 35(5):628-634.
- [12] 秦雷,王辉,李树刚,等.冻结煤未冻水与孔隙特征变化核磁共振研究[J].*清华大学学报(自然科学版)*, 2025, 65(3):601-613.
- QIN Lei, WANG Hui, LI Shugang, et al. Nuclear magnetic resonance study of changes in unfrozen water and pore characteristics in frozen coal[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2025, 65(3):601-613.
- [13] 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.
- [14] 王浩,赵耀江,孙晓元.液氮溶浸时间对原煤力学及破坏形式的影响[J].*煤矿安全*, 2024, 55(8):25-30.
- WANG Hao, ZHAO Yaojiang, SUN Xiaoyuan. The influence of liquid nitrogen leaching time on raw coal mechanics and failure mode[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(8):25-30.
- [15] QIN L, ZHAI C, LIU S M, et al. Mechanical behavior and fracture spatial propagation of coal injected with liquid nitrogen under triaxial stress applied for coalbed methane recovery[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233:1-10.
- [16] LIN H F, LI J L, YAN M, et al. Damage caused by freeze-thaw treatment with liquid nitrogen on pore and fracture structures in a water-bearing coal mass[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(5):1667-1680.
- [17] 翟成,孙勇,范宜仁,等.低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J].*煤炭学报*, 2022, 47(2):828-848.
- ZHAI Cheng, SUN Yong, FAN Yiren, et al. Application and prospect of low-field nuclear magnetic resonance technology in accurate characterization of coal pore structure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2):828-848.
- [18] YAO Y B, LIU D M, CHE Y, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR) [J]. *Fuel*, 2010, 89(7):1371-1380.
- [19] KIM H S, NISHIYAMA Y, IDETA K, et al. Analysis of water in Loy Yang brown coal using solid-state ^1H NMR[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, 19(5):1673-1679.
- [20] CHEN Y, ZHOU Z, WANG J, et al. Quantification and division of unfrozen water content during the freezing process and the influence of soil properties by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602:126719.
- [21] 王琨,周航宇,赖杰,等.核磁共振技术在岩石物理与孔隙结构表征中的应用[J].*仪器仪表学报*, 2020, 41(2):101-114.
- WANG Kun, ZHOU Hangyu, LAI Jie, et al. Application of NMR technology in characterization of petrophysics and pore structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2):101-114.
- [22] 张娜,赵方方,王水兵,等.岩石孔隙结构与渗流特征核磁共振研究综述[J].*水利水电技术*, 2018, 49(7):28-36.
- ZHANG Na, ZHAO Fangfang, WANG Shuibing, et al. Review of nuclear magnetic resonance technique based study on pore structure and seepage characteristics of rock [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(7):28-36.

- [23] LIU Z S, LIU D M, CAI Y D, et al. Application of nuclear magnetic resonance (NMR) in coal bed methane and shale reservoirs: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 218: 103261.
- [24] WESTPHAL H, SURHOLT I, KIESL C, et al. NMR measurements in carbonate rocks: Problems and an approach to a solution[J]. Pure and Applied Geophysics, 2005, 162(3): 549-570.

Mechanical Properties and Pore Structure Evolution of Sandstone under Liquid Nitrogen Freezing and Thawing

ZHANG Shiming^{1,2}, WU Qinqin³, HUANG Aiwu^{1,2}, WANG Yuting^{1,2},
JIAO Wenlei^{1,2}, WU Lingling^{1,2}, HU Lin^{1,2}, YU Qing^{1,2}

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. National Defense Key Laboratory of Uranium Mining and Metallurgy Biotechnology, Hengyang 421001, China;

3. College of Railway Engineering, Hunan Vocational and Technical College of High-speed Railway, Hengyang 421200, China)

Abstract: In order to further study the mechanical properties and pore structure evolution of sandstone under the action of liquid nitrogen freezing and thawing cycles, the sandstone in natural water-bearing state and saturated state were taken as the research object. The compressive strength, elastic modulus, pore T_2 map and nuclear magnetic porosity of sandstone after different liquid nitrogen freezing and thawing cycles were measured by nuclear magnetic resonance instrument and rock mechanics test system. The mechanical properties, porosity evolution and pore size distribution of sandstone under the action of liquid nitrogen were analyzed. Based on the SDR permeability model, the permeability change of sandstone after freezing and thawing cycles was calculated. The results show that the uniaxial compressive strength of sandstone decreases significantly after liquid nitrogen freezing treatment, and the decrease of strength increases with the increase of freezing and thawing cycles. When the number of cycles increases from 0 to 5, the decrease of compressive strength in natural state increases from 12.25% to 29.04%, while the maximum decrease of compressive strength of sandstone in saturated state is 55.50%. The results of nuclear magnetic resonance (NMR) test show that the freezing and thawing cycle of liquid nitrogen significantly increases the porosity and permeability of sandstone, especially for sandstone samples in saturated state. After five freezing and thawing cycles of liquid nitrogen, the porosity growth rate is 39.09%; and the permeability growth rate reaches 160%, which is 1.89 times that of natural water-bearing sandstone. The research results can provide a new idea for the efficient leaching of low permeability sandstone-type uranium deposits by liquid nitrogen fracturing technology.

Key words: liquid nitrogen freezing and thawing; mechanical properties; pore structure; nuclear magnetic resonance; permeability; sandstone-type uranium deposit