

文章编号:1001-4888(2022)05-0675-14

# 节理煤体低温损伤机理及影响范围研究\*

李和万, 刘戬, 王来贵, 任天娇

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 节理普遍存在于地下煤储层中, 是煤层气存储和运移的主要通道。为了研究冻融作用下煤体自身含水饱和度的不同, 对节理结构损伤和液氮作为煤体的制冷剂逆传热至-45℃作用范围的影响, 利用低温保存箱为不同含水饱和度煤样提供-45℃低温环境, 对煤样进行循环冻融交叉实验; 并建立以液氮作为制冷剂的传热模型, 进行单周期低温加载数值模拟。结果表明: (1) 煤样表面以及内部节理扩展量随着低温循环冻融周期的增加而逐渐增大, 单轴抗压强度逐渐降低; 煤样表面维度逐渐从二维向三维转化、表面及内部节理结构损伤程度加剧; (2) 煤样节理结构损伤程度随含水饱和度的增加而增大, 100%饱和度时, 煤样循环冻融41周期后破碎; (3) 单周期传热模型随着含水饱和度的升高, 影响范围变小, 且传热时间变长, 100%含水饱和度下煤体传热至-45℃的传热半径仅为2.77m, 所用时间为2531.2s, 表明含水饱和度制约着传热半径及传热时间, 含水饱和度越高, 制约越明显。

**关键词:** 节理; 含水饱和度; 循环冻融; 单周期传热; 影响范围

中图分类号: TD821

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-290

## 0 引言

节理普遍存在于地下煤储层中, 对煤体自身的吸附性、解吸性以及瓦斯在煤层中的流动性等性质有着巨大影响。在各种复杂因素作用下, 煤体内部会出现形态各异的节理结构, 最终构成节理煤体。根据煤体的发育水平和强度控制, 可将节理大致分为遍布节理、隐闭节理、断续节理<sup>[1]</sup>等。如果煤体的某一组节理受外力影响从而衍生次生节理并交汇、互通时未能够将煤体彻底割裂开来, 便会形成节理面, 所形成的节理面的范围控制着节理煤体的破坏程度<sup>[2]</sup>。因此, 众多学者通过施加载荷使煤体内部节理发生损伤, 人工形成或扩大节理面以达到使煤体破坏、释放煤体中的煤层气的目的。施加载荷的常见技术包括水力割缝、水力压裂以及高压磨料射流割缝等<sup>[3,4]</sup>, 但这些技术会影响煤基质的稳定性, 进而造成煤体垮塌等状况, 不利于煤体的二次开采。

低温损伤是指物体已经具备相对较高温度后, 在温度骤降时, 物体内部由于较大的温度变化而产生温度应力, 从而使物体发生不可恢复的损伤。部分学者为使油、气储层致裂增透而注入液氮等低温流体, 促使煤体发生损伤, 从而提高油、气产量<sup>[5-7]</sup>。液氮在进入煤储层后, 会从液态迅速变为气态, 同时吸收大量热量, 产生温度应力。煤体所具有的热胀冷缩特性, 将会在温度应力的作用下对内部节理结构产生损伤, 形成节理面, 降低煤体强度, 促使发生宏观破裂。同时在温度应力作用下, 煤体的节理结构内部所游离的自由水迅速固化, 形成冰楔嵌在节理内壁, 冰楔的膨胀应力会加速节理形成节理面<sup>[8-11]</sup>。

\* 收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51704142); 国家重点研发计划(2017YFC1503102); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2019-BS-115)

通信作者: 李和万(1983—), 男, 副教授, 硕士生导师。主要从事地下煤岩结构的研究。Email: lhw515ql@163.com

由于煤体所处低温环境的温度和自身含水饱和度的不同,所产生的膨胀应力大小不尽相同,所形成的节理面大小也会有差异。Li 等<sup>[12]</sup>进行了煤体的不同温度冻结实验,发现低温所产生的节理面范围会随着温度的升高而逐渐变小,在温度高于-45℃时变小范围显著,这也是导致实际工程中利用液氮作为制冷剂开采煤层气时开采区域设定困难的主要原因。

本文利用低温保存箱创造低温-45℃环境,对不同含水饱和度(0%、50%、100%)煤样进行低温循环冻融,以研究在低温作用下不同含水饱和度煤样节理扩展损伤的情况;并建立以液氮作为制冷剂的传热模型,进行单周期低温加载数值模拟,计算不同含水饱和度煤体传热至-45℃的传热半径及所用时长,所得结果可为实际工程中高效煤层气抽采提供参考。

## 1 实验

### 1.1 煤样制备

煤样选用辽宁省阜新市新邱煤矿长焰煤为原料,将原煤切割成100mm×100mm×100mm的正方体试件,尽可能保证实验煤样表面平整。在试件表面符合实验要求的节理位置画出直径为5mm的观测区域以便于观测煤样表面节理形貌,并标出观测方向。煤样共分3组,对每组煤样进行编号(例:1T50C45为含水饱和度50%的煤样在-45℃环境第1周期开始循环冻融),如表1所示。

表1 不同冻融周期的煤样编号

Tab. 1 Number of coal samples with different freeze-thaw cycles

饱和度	0%	50%	100%	饱和度	0%	50%	100%
周期	编号			周期	编号		
1T	1T0C45	1T50C45	1T100C45	51T	51T0C45	51T50C45	51T100C45
6T	6T0C45	6T50C45	6T100C45	56T	56T0C45	56T50C45	56T100C45
11T	11T0C45	11T50C45	11T100C45	61T	61T0C45	61T50C45	61T100C45
16T	16T0C45	16T50C45	16T100C45	66T	66T0C45	66T50C45	66T100C45
21T	21T0C45	21T50C45	21T100C45	71T	71T0C45	71T50C45	71T100C45
26T	26T0C45	26T50C45	26T100C45	76T	76T0C45	76T50C45	76T100C45
31T	31T0C45	31T50C45	31T100C45	81T	81T0C45	81T50C45	81T100C45
36T	36T0C45	36T50C45	36T100C45	86T	86T0C45	86T50C45	86T100C45
41T	41T0C45	41T50C45	41T100C45	91T	91T0C45	91T50C45	91T100C45
46T	46T0C45	46T50C45	46T100C45	96T	96T0C45	96T50C45	96T100C45

### 1.2 实验方法

在真空不锈钢罐内放入水和煤样,对罐内的水和煤样进行排真空处理,将煤样节理中的空气排出,水在压力作用下进入煤样的节理中,每30min对煤样进行一次称重,当煤样的质量不再增加,且未有气泡产生时,即可认为该煤样为100%含水饱和度煤样。此时将总体排真空时间减半,即认为可获得50%含水饱和度煤样。采用RYLC40W180低温保存箱创造-45℃低温环境,冻融4h,室温条件下放置20h

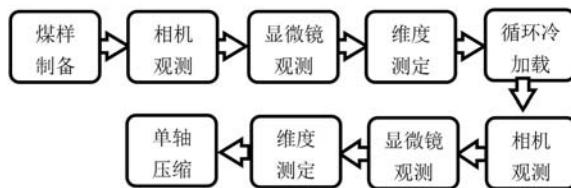


图1 实验流程

Fig. 1 Experiment process

破碎煤样进行单轴压缩,通过分析煤样的单轴抗压强度的变化规律来表征煤样整体结构的损伤程度。实验流程如图1所示。

作为一个周期T,进行循环多周期冻融,每5T冻融后加入一块煤样,直至出现煤样破裂。利用Axiovert 40 MAT倒置金相显微镜测量煤样实验前后表面节理尺寸的变化量,并利用表面分形工具对所得电镜图片进行处理,计算其表面维度,比较不同饱和度节理煤样维度变化情况。使用MH-25单轴试验机对实验后未

## 2 实验结果

### 2.1 煤样表面节理形貌

实验后,1T0C45、1T50C45、1T100C45 煤样分别经过 96 T、61 T、41 T 的加载发生破碎,破碎的煤样节理宽度不可测量,其他不同含水饱和度煤样加载后表面节理形貌如图 2~图 4 所示(6 代表第 6 周期试样冻融前,6' 代表第 6 周期试样冻融后),放大倍数为 200 倍,表面节理扩展量见表 2~表 4。

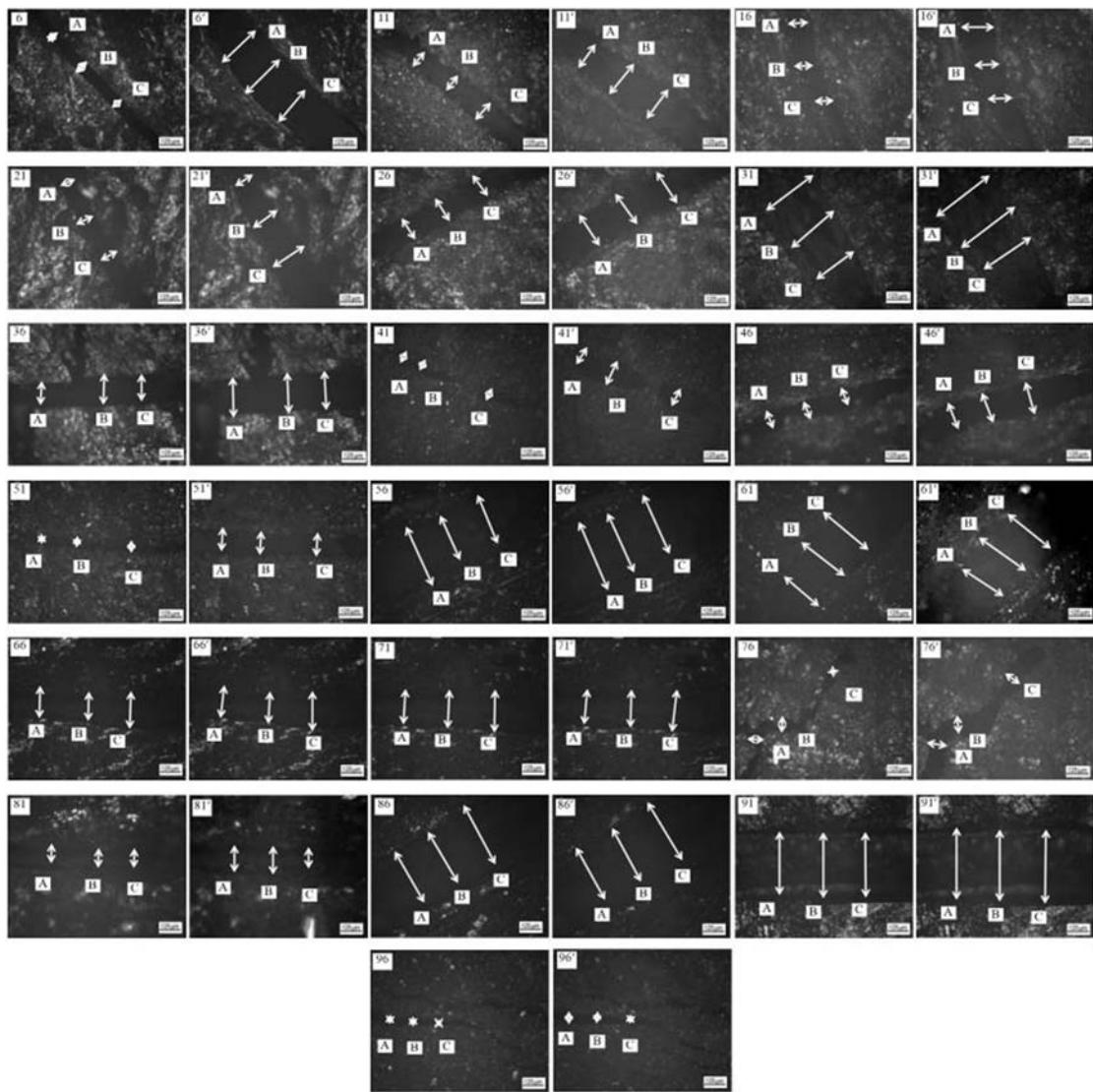


图 2  $-45^{\circ}\text{C}$  环境下循环冻融 0% 含水饱和度煤样节理形貌

Fig. 2 Joint morphology of coal samples with 0% saturation cyclic freeze-thaw at  $-45^{\circ}\text{C}$

在液氮冻融过程中,不同含水饱和度煤样节理扩展量与煤样开始循环冻融周期 T 存在一定的函数关系,将节理扩展量与煤样开始循环冻融周期进行拟合,拟合曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,循环冻融作用下,不同含水饱和度煤样的节理均有发育。其中干燥(0%)煤样经过 96 T 循环冻融后发生宏观破碎,表明在  $-45^{\circ}\text{C}$  低温环境下经长期循环冻融将会发生破碎;50% 含水饱和度煤样经过 61 T 发生破碎,100% 饱和度煤样经过 41 T 发生破碎,表明含水饱和度对煤样发生宏观破碎具有促进作用。图 5 中,0%、50%、100% 饱和度煤样节理宽度扩展量与周期的斜率分别为  $-2.78$ 、 $-3.15$  与  $-5.85$ ,侧面证明了随着含水饱和度的提高,在循环冻融周期增加的耦合作用下,节理扩展更为迅速,更容易发生宏观破碎。

表2 冻融前后0%含水饱和度煤样表面节理扩展量

Tab. 2 Surface joint expansion of 0% saturation coal sample before and after freezing and thawing

煤样 编号	冻融实验前 $d_0/\mu\text{m}$				冻融实验后 $d_n/\mu\text{m}$				扩展量 $\Delta d/\mu\text{m}$
	A	B	C	平均值	A	B	C	平均值	
1T0C45					破	碎			
6T0C45	100.36	140.66	130.57	123.86	410.48	450.90	436.56	432.65	308.79
11T0C45	200.77	273.65	279.34	251.25	491.45	559.07	573.66	541.39	290.68
16T0C45	112.33	140.38	70.42	107.71	377.68	412.04	348.39	379.37	271.66
21T0C45	267.32	124.38	98.77	163.49	517.71	380.21	351.88	416.60	253.11
26T0C45	146.39	158.76	212.54	172.56	387.38	393.64	495.88	425.63	235.07
31T0C45	311.06	301.27	299.98	304.10	526.02	518.19	520.30	521.50	217.40
36T0C45	653.45	642.17	551.32	615.65	848.09	852.49	746.60	815.73	200.08
41T0C45	301.25	319.74	343.21	321.40	496.78	520.30	533.68	516.92	195.52
46T0C45	80.91	99.79	100.24	93.65	261.42	295.11	265.88	274.14	180.49
51T0C45	212.34	200.94	216.34	209.87	393.41	366.94	367.33	375.89	166.02
56T0C45	96.21	84.34	70.61	83.72	247.93	216.56	241.83	235.44	151.72
61T0C45	730.55	702.31	715.94	726.27	868.18	842.55	850.96	853.90	137.63
66T0C45	433.85	513.85	612.31	520.00	533.85	643.57	754.98	644.13	124.13
71T0C45	840.34	844.23	857.10	847.22	950.21	955.34	967.41	957.65	110.43
76T0C45	294.31	325.24	309.41	309.65	391.95	425.48	404.45	407.29	97.64
81T0C45	182.94	169.37	209.45	187.25	268.97	259.09	292.12	273.39	86.14
86T0C45	805.61	812.91	849.37	822.63	876.07	890.39	927.81	898.09	75.46
91T0C45	808.37	821.91	811.94	814.07	873.37	889.25	876.10	879.57	65.50
96T0C45	99.76	40.38	30.77	56.97	156.53	99.69	84.94	113.72	56.75

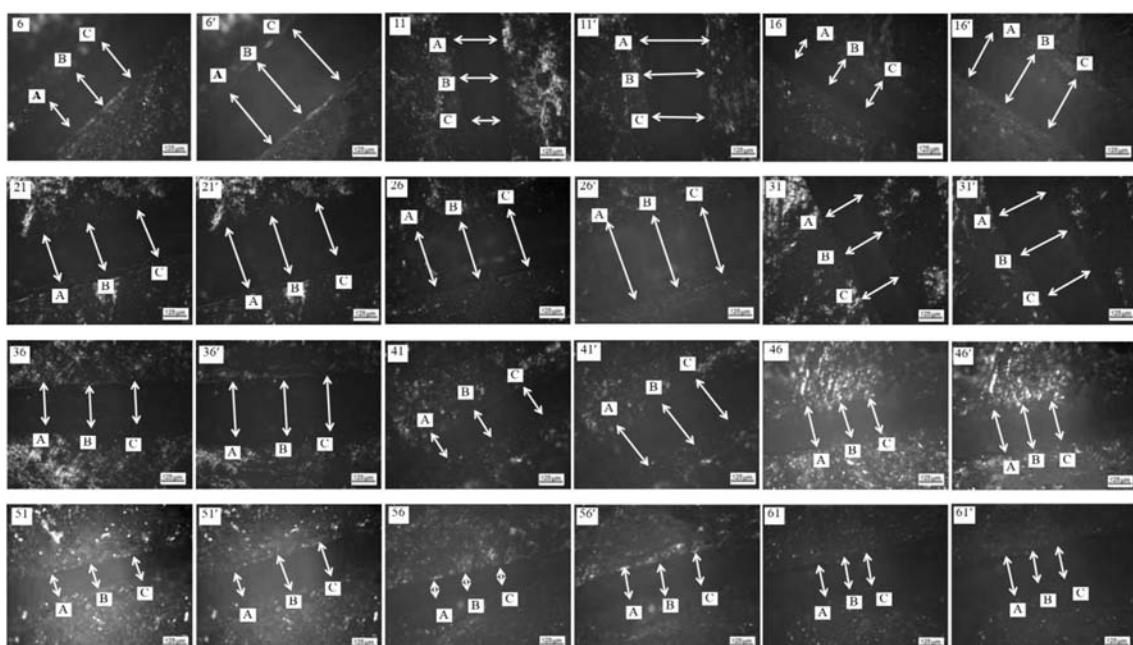
图3  $-45^{\circ}\text{C}$ 环境下循环冻融50%含水饱和度煤样节理形貌Fig. 3 Joint morphology of coal samples with 50% saturation cyclic freeze-thaw at  $-45^{\circ}\text{C}$

表3 冻融前后50%含水饱和度煤样表面节理扩展量

Tab. 3 Surface joint expansion of 50% saturation coal sample before and after freezing and thawing

煤样 编号	冻融实验前 $d_0/\mu\text{m}$				冻融实验后 $d_n/\mu\text{m}$				扩展量 $\Delta d/\mu\text{m}$
	A	B	C	平均值	A	B	C	平均值	
1T50C45	破 碎								
6T50C45	505.61	518.37	599.91	514.30	795.73	804.31	891.96	830.67	289.37
11T50C45	521.36	327.64	210.57	353.19	786.73	662.64	413.90	621.09	267.90
16T50C45	376.46	384.91	418.94	393.44	623.75	638.55	659.82	640.71	247.27
21T50C45	501.68	509.73	522.34	511.25	729.17	740.51	745.97	738.55	227.30
26T50C45	627.91	555.39	665.77	616.36	833.46	767.76	872.07	824.43	208.07
31T50C45	409.36	405.72	370.81	395.30	599.97	590.91	564.23	585.04	189.74
36T50C45	509.76	535.64	572.13	539.18	681.17	710.55	740.04	710.59	171.41
41T50C45	343.99	352.74	370.91	355.88	497.98	503.34	528.29	509.87	153.99
46T50C45	419.94	397.61	383.67	400.41	557.10	542.98	512.78	537.62	137.21
51T50C45	282.95	263.76	283.91	276.87	403.17	389.70	401.41	398.09	121.22
56T50C45	272.39	250.61	259.67	260.89	378.33	418.60	303.71	366.88	105.99
61T50C45	443.34	401.95	420.97	422.09	534.57	498.73	506.65	513.32	91.23

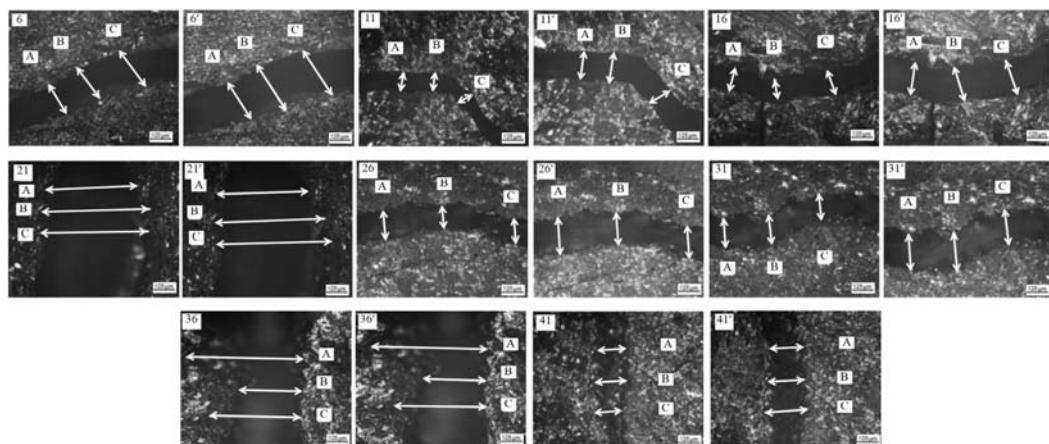
图4  $-45^{\circ}\text{C}$ 环境下循环冻融100%含水饱和度煤样节理形貌Fig. 4 Joint morphology of coal samples with 100% saturation cyclic freeze-thaw at  $-45^{\circ}\text{C}$ 

表4 冻融前后100%含水饱和度煤样表面节理扩展量

Tab. 4 Surface joint expansion of 100% saturation coal sample before and after freezing and thawing

煤样 编号	冻融实验前 $d_0/\mu\text{m}$				冻融实验后 $d_n/\mu\text{m}$				扩展量 $\Delta d/\mu\text{m}$
	A	B	C	平均值	A	B	C	平均值	
1T100C45	破 碎								
6T100C45	234.18	210.44	248.42	231.01	498.42	481.01	561.71	513.71	282.70
11T100C45	213.61	207.28	158.23	193.04	362.34	357.59	492.09	404.01	210.97
16T100C45	341.77	397.15	441.46	393.46	515.82	587.03	629.75	577.53	184.07
21T100C45	318.04	302.22	287.97	302.74	471.52	444.62	441.46	452.53	149.79
26T100C45	297.47	234.18	268.99	266.88	406.65	367.09	393.99	389.24	122.36
31T100C45	626.58	761.08	757.91	715.19	740.51	863.92	859.18	821.20	106.01
36T100C45	243.67	281.65	227.85	251.05	340.19	362.34	327.53	343.35	92.30
41T100C45	672.47	520.57	621.84	604.96	712.03	572.78	688.29	657.70	52.74

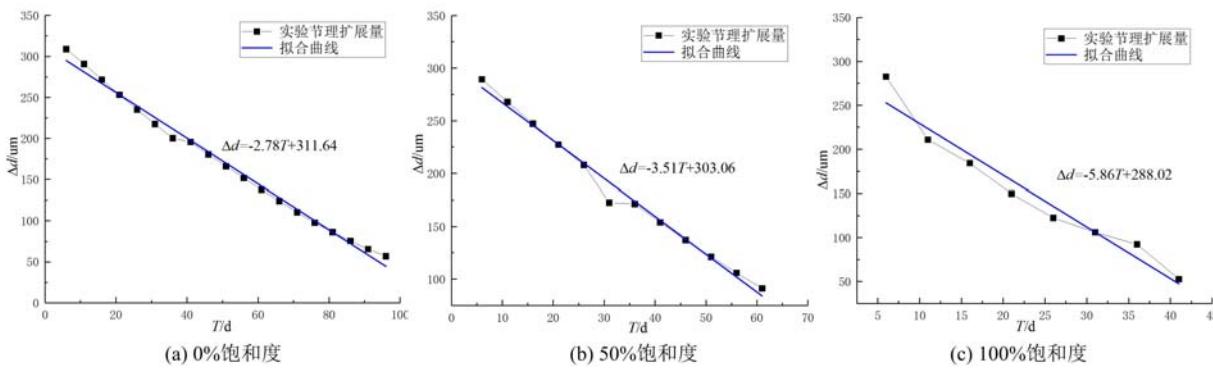


图 5  $-45^{\circ}\text{C}$  环境下循环冻融不同饱和度煤样节理扩展量( $\Delta d$ )与开始冻融周期( $T$ )关系曲线

Fig. 5 Curve of relationship between joint expansion( $\Delta d$ ) and period of coal samples ( $T$ ) with different saturation under cyclic freezing and thawing at  $-45^{\circ}\text{C}$

## 2.2 液氮冻融前后煤样表面维度的测定

由于煤样发生损伤时并无规律可言,节理在损伤过程中是随机分布的,所以在煤样受损时,可以假设此时煤样满足分形结构,节理的扩展具有分形特征。分形维数  $D$  表征了平面的粗糙程度,所分析的表面维度越接近三维,表面越粗糙,即煤样损伤程度越大;维度越接近二维,表面越光滑,即煤样损伤程度越小<sup>[13]</sup>。将 Axiovert 40 MAT 倒置金相显微镜扫描所得实验前后不同含水饱和度节理煤样表面形貌利用 Photoshop 软件进行图像格式转换,再利用表面分形分析工具处理图像以获得灰度矩阵,将所得灰度矩阵转化为高度矩阵<sup>[14]</sup>。对所获得的高度矩阵可以利用盒维数公式来进行维数计算:

$$N = a\delta^{-D} \quad (1)$$

式中:  $D$  为分形维数;  $\delta$  为所用码尺的精度;  $N$  为覆盖一个分形集合所用的盒子数目;  $a$  为常数。

对于需要分形、分维的物体,只要物体的形状具有自相似性,则式(1)就成立<sup>[15,16]</sup>,因此可利用分形分析工具 FracLab 划分 20 个区域来计算出不同含水饱和度节理煤样表面的分形维数,计算结果见表 5。绘制不同含水饱和度下节理煤样经过不同周期循环冻融后的维度差值曲线,如图 6 所示。

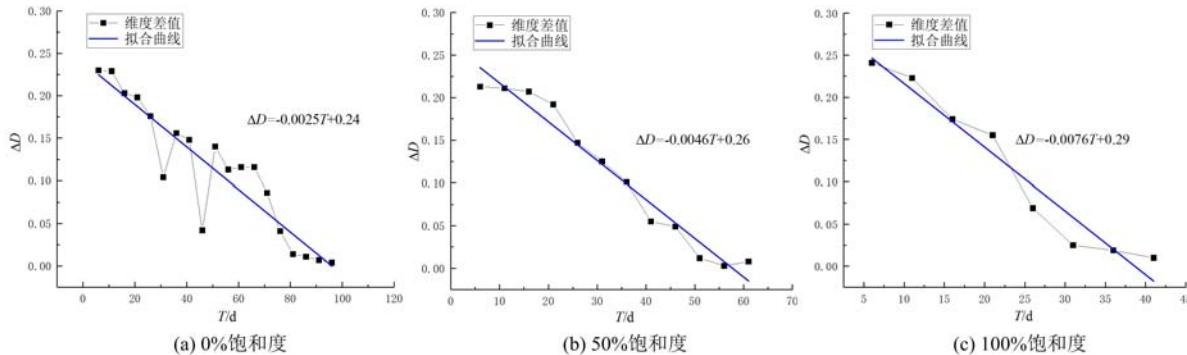


图 6 冻融前后不同饱和度节理煤样维度差值( $\Delta D$ )与周期( $T$ )的关系曲线

Fig. 6 The relationship between the dimension difference( $\Delta D$ ) and the period of the jointed coal samples( $T$ ) with different saturation before and after freezing and thawing

根据表 5 及图 6 可知,不同节理煤样在液氮循环冻融后维度均有所上升,表明不同节理煤样均发生损伤,并且随着冻融周期的增加,维度差值整体变大。其中在第 6 周期放入冻融设备的煤样维度差值最大,表明随着低温循环冻融周期的增大,煤样损伤程度也逐渐增大;在相同周期作用时,100% 含水饱和度煤样维度差值最大,表明含水饱和度会促进节理发育,含水饱和度越高,节理发育越明显。

## 2.3 液氮冻融后煤样的单轴抗压强度

煤体抗压强度可以用来表征煤体的物理特性,对循环冻融作用后未破碎的节理煤样进行单轴压缩实验,压缩速率设定为  $0.1\text{mm}/\text{min}$ ,绘制不同节理煤样的应力-应变( $\sigma-\varepsilon$ )曲线,如图 7~图 9 所示。计算抗压强度,并以此表征不同节理煤样损伤程度。

表5 不同含水饱和度节理煤样实验前后分形维数

Tab. 5 Fractal dimension of jointed coal samples with different water saturation before and after experiment

煤样 0% 饱和度				煤样 50% 饱和度				煤样 100% 饱和度			
编号	实验前	实验后	差值	编号	实验前	实验后	差值	编号	实验前	实验后	差值
6T0C45	2.173	2.403	0.230	6T50C45	2.141	2.354	0.213	6T100C45	2.169	2.41	0.241
11T0C45	2.165	2.394	0.229	11T50C45	2.137	2.348	0.211	11T100C45	2.188	2.411	0.223
16T0C45	2.112	2.315	0.203	16T50C45	2.133	2.34	0.207	16T100C45	2.157	2.331	0.174
21T0C45	2.201	2.399	0.198	21T50C45	2.174	2.366	0.192	21T100C45	2.154	2.309	0.155
26T0C45	2.335	2.531	0.176	26T50C45	2.129	2.276	0.147	26T100C45	2.169	2.238	0.069
31T0C45	2.122	2.266	0.104	31T50C45	2.178	2.303	0.125	31T100C45	2.178	2.203	0.025
36T0C45	2.185	2.341	0.156	36T50C45	2.155	2.256	0.101	36T100C45	2.166	2.185	0.019
41T0C45	2.121	2.259	0.148	41T50C45	2.112	2.167	0.055	41T100C45	2.205	2.215	0.010
46T0C45	2.152	2.194	0.042	46T50C45	2.155	2.204	0.049	—	—	—	—
51T0C45	2.163	2.303	0.140	51T50C45	2.099	2.111	0.012	—	—	—	—
56T0C45	2.139	2.252	0.113	56T50C45	2.168	2.171	0.003	—	—	—	—
61T0C45	2.137	2.253	0.116	61T50C45	2.301	2.309	0.008	—	—	—	—
66T0C45	2.133	2.249	0.116	—	—	—	—	—	—	—	—
71T0C45	2.139	2.225	0.086	—	—	—	—	—	—	—	—
76T0C45	2.206	2.247	0.041	—	—	—	—	—	—	—	—
81T0C45	2.165	2.179	0.014	—	—	—	—	—	—	—	—
86T0C45	2.121	2.132	0.011	—	—	—	—	—	—	—	—
91T0C45	2.166	2.173	0.007	—	—	—	—	—	—	—	—
96T0C45	2.197	2.201	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—

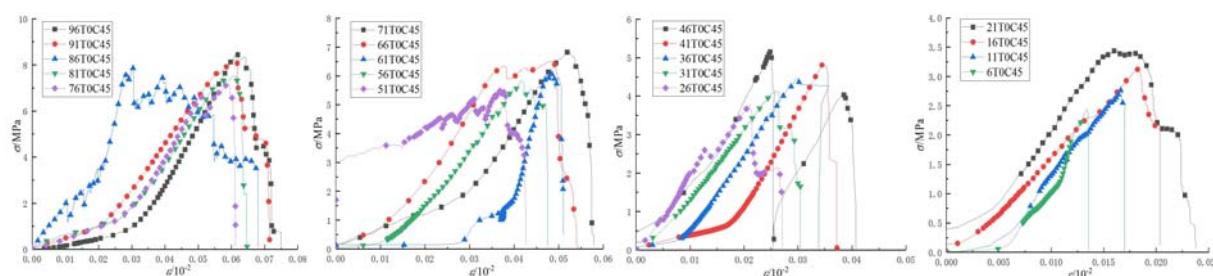


图7 冻融后 0% 含水饱和度节理煤样的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of 0% water saturation jointed coal samples after freezing and thawing

根据图 7~图 9 中曲线峰值的抗压强度,绘制煤样开始循环冻融周期  $T$  与不同含水饱和度节理煤样的抗压强度曲线,如图 10 所示。由图可见,随着煤样冻融周期的减小,温度对煤样破坏的影响呈线性增大趋势。先放入循环冻融设备的煤样较后放入循环冻融设备的煤样抗压强度更低,表明不同含水饱和度单轴抗压强度随着循环冻融周期的增大而降低。随着含水饱和度提高,煤样抗压应力逐渐降低,降低周期变小,煤样更易发生损伤,另外,在 0% 含水饱和度至 50% 含水饱和度时拟合曲线的斜率降低较小,斜率差值仅为 0.02;由 50% 含水饱和度增加为 100% 含水饱和度时拟合曲线的斜率降低明显,斜率差值为 0.09,说明不同节理煤样含水饱和度在 50% 至 100% 时冻融损伤效果更好。

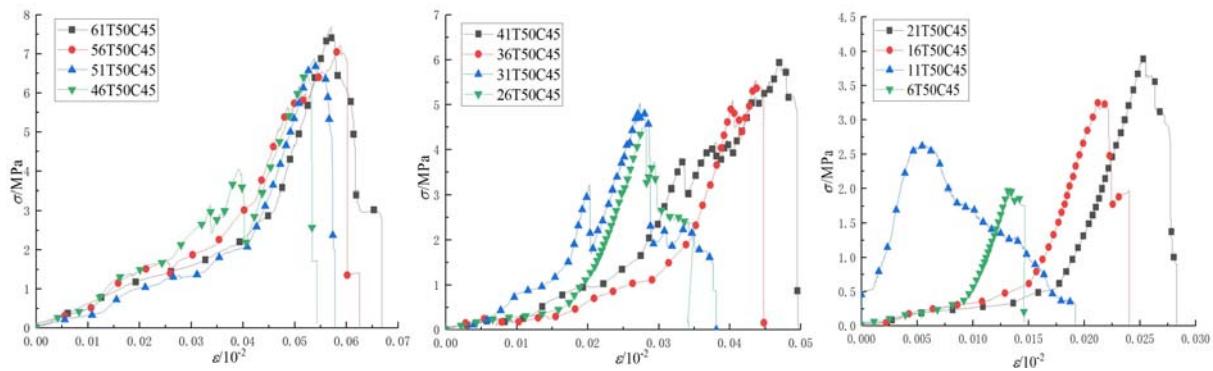


图8 冻融后50%含水饱和度节理煤样的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of 50% water saturation jointed coal samples after freezing and thawing

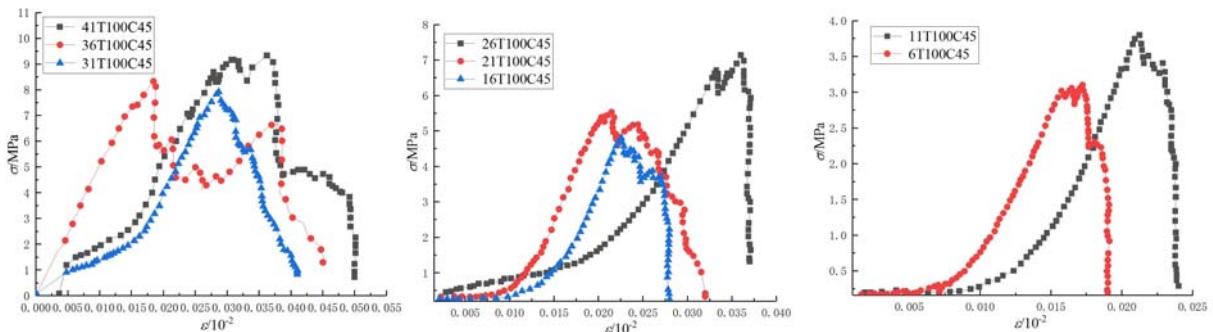


图9 冻融后100%含水饱和度节理煤样的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of 100% water saturation jointed coal samples after freezing and thawing

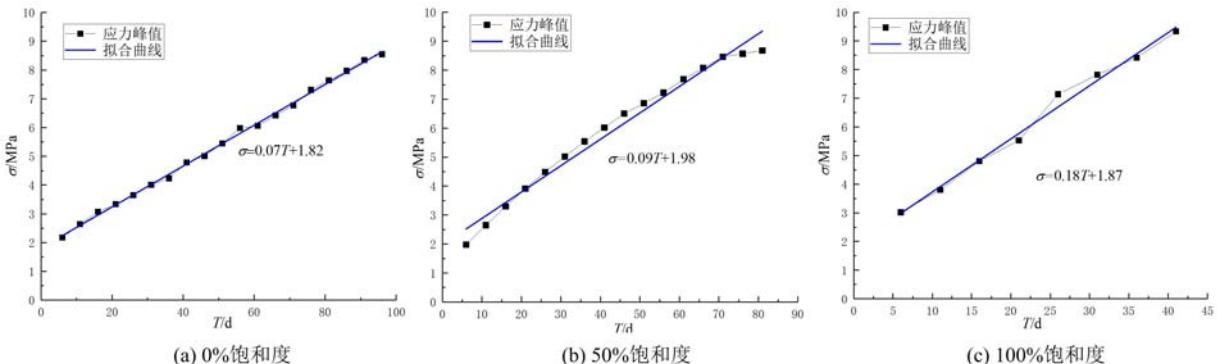


图10 冻融后不同含水饱和度节理煤样抗压强度曲线

Fig. 10 Compressive strength curves of jointed coal samples with different water saturation after freezing and thawing

### 3 机理分析

煤体受低温循环冻融过程中,在含水饱和度及煤体所处环境温度这些因素单独或者耦合作用下,煤体中所存在的微小节理结构会逐渐形成不可逆损伤,形成节理面,从而发生宏观破碎。这种单独或者耦合作用可以从均一的平面应力状态角度进行分析,即在 $x, y$ 平面上,应力状态为

$$\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0 \quad (2)$$

式中: $\sigma_z$ 为作用于 $z$ 平面上的正应力, MPa; $\tau_{zx}$ 与 $\tau_{zy}$ 为作用于 $x, z$ 平面和 $y, z$ 平面上的剪应力, MPa。

若不考虑煤样受液氮低温加载时温度耗散的问题,并且假定煤样所受到的温度应力一定,便可将 $x, y$ 平面上的主应力表示为

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{array} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  为  $x, y$  平面上的主应力, MPa;  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  为作用于  $x, y$  平面上的正应力, MPa;  $\tau_{xy}$  为作用于  $x, y$  平面上的剪应力, MPa。

结合摩尔-库伦强度准则<sup>[17]</sup>, 煤样在经过液氮循环冻融作用后, 煤样开始沿着节理方向发育, 造成煤样的节理结构损伤, 煤样层理与节理角度  $\theta$  满足:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4)$$

依据式(3)与式(4)可得煤样所受到的剪应力:

$$\tau = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad (5)$$

当  $\theta$  等于  $45^\circ$  时, 式(5)可变为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (6)$$

式中  $\tau_{\max}$  为煤样所受最大剪应力, MPa。

当剪应力满足式(6)时, 煤样将沿节理方向进行扩展, 发生剪切破坏, 形成节理面, 从而导致模拟实验中煤样的损伤特性。

根据损伤力学中的疲劳扩展理论<sup>[18]</sup>, 疲劳是以循环加载的方式累积使得损伤加剧的, 煤样最终的宏观损伤结果是煤样微观损伤的整体体现。从损伤的定义角度来说, 由于外部环境的改变, 煤样微观结构中的裂隙会发生扩张, 力学性能不断降低, 最终导致煤样发生整体结构劣化。在低温循环冻融的作用下, 煤样节理结构会随着作用周期的累加而逐渐产生疲劳损伤, 当疲劳损伤到达一定程度时, 煤样到达自身疲劳极限, 从而导致破坏。这种疲劳所产生的损伤可以采用塑性体应变的累积值来定义, 即随着循环冻融周期的增加, 煤样所产生的形变无法完全恢复, 同时这种形变的积累程度, 会反映出煤样损伤程度的大小。

研究表明<sup>[19]</sup>, 煤样破坏应变分为纵向应变和横向应变。在低温循环冻融的过程中, 由于膨胀应力的作用, 煤样会发生变形, 变形过程中的破坏应变是横向应变和纵向应变的叠加。结合塑性体应变所定义的损伤, 煤样受到的塑性剪切应变  $\gamma_p$  为

$$\gamma_p = \epsilon_z^p - \epsilon_{xy}^p \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_z^p$  为塑性轴向应变;  $\epsilon_{xy}^p$  为塑性横向应变。

煤样受低温循环冻融过程中, 会在竖直方向上产生相对拉应力、拉应变,  $\epsilon_z^p$  值显著增大, 从而导致塑性剪切应变  $\gamma_p$  变大; 当  $\gamma_p$  达到极限值时, 煤样将沿着节理发生损伤, 节理面范围扩大, 产生剪切破坏; 当膨胀力消失后, 煤样不能恢复原始状态, 随着低温循环冻融周期的增加, 煤样损伤不断累积, 节理面范围不断扩大, 煤样逐渐发生宏观破碎。

煤体在地下贮藏过程中, 由于地质条件的不同, 节理中所蕴含的自由水含量也不同。在低温循环冻融作用下, 这些自由水会形成冰楔, 嵌在煤样的节理结构中, 对节理壁及节理尖端造成压应力, 即膨胀应力。不同饱和度所产生的膨胀应力与节理结构增长率  $\nu$  的关系为

$$\nu = \nu_x \cdot e^{(-1-\frac{T-T_a}{T_x})^2} \cdot \frac{2\zeta(\sigma_l + \sigma_0)}{\ln \left[ \frac{T_a - T}{T_x} \right]^2} \quad (8)$$

式中:  $\nu_x$  为煤样的最大节理结构增长率,  $s^{-1}$ ;  $T$  为煤样的平均温度,  $^\circ C$ ;  $T_a$  为水在液氮低温下所释放的温度,  $^\circ C$ ;  $T_x$  为节理结构增长率  $\nu = \nu_x$  时的温度;  $\sigma_0$  为液氮所产生的膨胀应力, MPa;  $\sigma_l$  为冰楔所产生的膨胀应力, MPa;  $\zeta$  为水饱和系数所修正的应力参数, MPa。

煤样在低温冻融作用下, 节理结构中所含自由水迅速变为固相, 其体积发生约为 9% 的膨胀, 在煤样节理结构中形成膨胀应力  $\sigma_l$ 。由式(8)可知, 所产生的膨胀应力  $\sigma_l$  会对煤样的节理结构四周产生挤压作用, 促使煤样节理结构在尖端处发生损伤。随着饱和度的增加,  $T_a$  与  $\sigma_l$  逐渐增大, 节理结构增长率  $\nu$  也相应变大, 所以煤样的节理结构损伤也相应加剧。当冰楔引起的膨胀应力大于煤样的抗压强度极限(0.52MPa)时, 100% 水饱和煤样率先发生破碎, 其次为 50% 水饱和煤样, 而干燥煤样由于  $T_a = \sigma_l$

=0,其节理结构增长率ν较其他含水煤样更为缓慢,循环冻融破碎周期也最长。

## 4 传热半径的模拟与分析

由于实际工程中煤体温度及含水饱和度的不同,导致利用液氮作为制冷剂开采煤层气时开采区域设定困难,因此利用ABAQUS有限元仿真模拟软件建立不同含水饱和度煤体模型,在模型中心位置处设置冷冻井,并进行单周期注液氮冻结模拟,来研究温度从-198.5℃传热至-45℃的影响范围及所用时长,以便为开采半径的设定提供参考。

### 4.1 热传导基础

热传导(thermal conduction)是位置内无宏观运动时的传热现象,物质在受热不均时,微观上大量分子的热运动致使分子与分子之间产生撞击,从而导致从温度高的部分传热至温度低的部分。热传导的产生必须存在温差,热传导的速率也取决于温差的大小<sup>[21]</sup>。根据傅里叶定律,在发生热传导现象的过程中,单位时间内通过定截面的热量,与垂直于该截面方向上的温度变化率和截面面积成正比。而热量传递的方向与温度降低的方向相同,结合流体力学三个基础方程,可以得到地下煤岩体传热的导热微分方程<sup>[22]</sup>为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + S(x, y, z, t) \quad (9)$$

式中:C为煤体比热容,J/(kg·℃);ρ为密度,g/cm<sup>3</sup>;λ为导热系数,W/(m·K)。

### 4.2 潜热的处理

潜热是指当温度达到煤体中的水发生相变所需要的环境时,水的相态开始发生变化,在变化的过程中,水的温度并没有发生改变,但是却会吸收或放出热量。由于煤体含水饱和度的不同,所吸收或释放的热量也不尽相同,从而影响煤体传热所用时长与速度。

国内外现有处理潜热的方法包括热焓法、温度回升法和等价比热容法<sup>[23]</sup>。其中热焓法和温度回升法虽然适用范围较广,但是在代入潜热能量公式的计算上相对复杂。而等价比热容法是通过修正不同温度下煤体比热容的方式来避免潜热现象的发生,计算过程相对简单,所以本文采用等价比热容法来处理潜热现象,不同温度下煤体修正后的比热容为

$$C_x = \begin{cases} C_2, & T < 0^\circ\text{C} \\ C_p, & 0^\circ\text{C} \leqslant T \leqslant 2^\circ\text{C} \\ C_1, & T \geqslant 2^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

式中:C<sub>x</sub>为修正后的比热容,J/(kg·℃);C<sub>p</sub>为水的比热容,J/(kg·℃);C<sub>2</sub>为冰的比热容,J/(kg·℃)。

$$C_p = C_2 + \frac{L}{I_1 - I_2} \quad (11)$$

式中:I<sub>1</sub>为液态的温度,℃;I<sub>2</sub>为固态的温度,℃;L为潜热所引起的比热容增加量,J/(kg·℃)。

### 4.3 模拟过程及结果

由于导热过程较为复杂,所以为方便建立模型,在模拟时做出如下假设:

- (1) 冷冻过程中传热只有径向方向,忽略其他方向。
- (2) 不考虑环境温度所带来的影响,即所有模拟设定为恒温。
- (3) 地层中初始温度恒定。
- (4) 不考虑地下水水流速,即对流所带来的影响,仅考虑固体内部的热传导。
- (5) 忽略深度对温度的影响<sup>[24-26]</sup>。

根据上述假定,可将模型简化为二维,导热系数λ与内热源均简化为常量,利用式(9)来作为煤储层的导热微分方程。

设定煤体初始温度为20℃,即

$$T|_{t=0} = 20 \quad (12)$$

并且根据假设将距离求解无穷远处设定为与初始温度相同,即

$$T|_{t=\infty} = T_\infty \quad (13)$$

模拟中只设定一个自由度即含水饱和度,采用自由划分网格方式,确保计算精度的条件下细密划分,在求解区域范围内将网格设置为0.03mm,并且划分20002个单元。

模型的弹性模量与泊松比均为实测平均值,分别为 $1.23 \times 10^5$  MPa与0.3;由于导热系数会随着含水饱和度的增大而增大,因此,模拟中采用煤体的平均导热系数进行计算,即

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

式中: $q$ 为热流密度, $J/(m^2 \cdot s)$ ;  $Q$ 为总热量, $J$ ;  $A$ 为热量通过的面积, $m^2$ ;  $\lambda$ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

根据式(14),煤样含水饱和度为0%、50%、100%时导热系数分别为 $2.671 W/(m \cdot K)$ 、 $8.524 W/(m \cdot K)$ 、 $19.225 W/(m \cdot K)$ ;结合式(10),不同含水饱和度煤样比热容分别为 $1.31 \times 10^3 J/(kg \cdot ^\circ C)$ 、 $2.15 \times 10^3 J/(kg \cdot ^\circ C)$ 、 $2.91 \times 10^3 J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;不同含水饱和度下,煤样密度也不尽相同,一般为 $1.4 \sim 1.9 g/cm^3$ ,其中饱水密度为 $1.6 \sim 1.9 g/cm^3$ ,按照理论值与实验所测定实验材料密度对比的结果,可以选出不同含水饱和度下的合理密度值;另外由于水在液态变成固态时,体积约膨胀9%,所以根据含水饱和度所占百分比,设定模拟中膨胀系数。为防止模型边界对传热结果的影响,将模型边界设定为无穷远,中心冷冻井直径设定为1m<sup>[21]</sup>,传热结果示意图如图11所示。

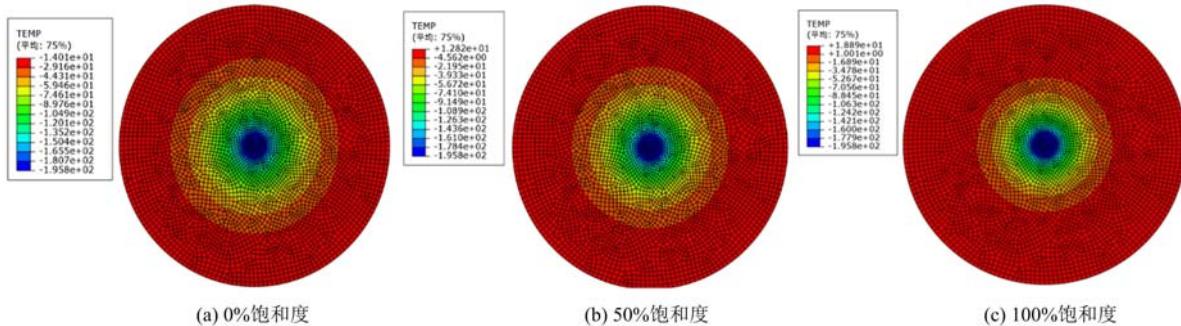


图11 液氮作用下不同含水饱和度煤体的传热示意图

Fig. 11 Schematic diagram of heat transfer of coal with different water saturation under the action of liquid nitrogen

不同含水饱和度煤体由液氮低温逆传导至 $-45^\circ C$ 的传热半径及所用时长见表6。

表6 不同含水饱和度煤体传热至 $-45^\circ C$ 时的传热半径及所用时长

Tab. 6 Heat transfer radius and duration of heat transfer from coal with different water saturation to  $-45^\circ C$

	0%饱和度	50%饱和度	100%饱和度
传热半径/m	4.12	3.69	2.77
传热时长/s	1474.7	1769.4	2531.2

由图11及表6可知,若利用液氮作为制冷剂增透煤体,不同含水饱和度煤体传热至 $-45^\circ C$ 的传热半径及所用时长有较大差距,含水饱和度越高,传热半径越小,所用时长越长。在50%至100%含水饱和度时扩展最为缓慢,100%含水饱和度煤体传热半径仅为0.92m,较50%含水饱和度煤样的传热时长长出约761.8s。可见,高含水饱和度下制约传热现象更严重。因此,虽然在循环冻融作用下,含水饱和度越高,煤样内部节理损伤越剧烈,煤样越容易发生宏观破碎,但是含水饱和度同时也制约着传热速率、半径及所用时长,造成开采区域变小。

数值模拟所建立的传热模型是理想化模型,在液氮冻融逆传递温度过程中,忽略了其他因素的影响。而实际工程中,由于地热作为补充热源,会对煤体温度进行补偿,冻融影响半径将缩小,但递减趋势相同。实际工程中开采区域需根据地下煤层的含水饱和度来设定。

## 5 结论

(1) 煤样表面以及内部节理扩展量随着低温循环冻融周期的增加而逐渐增大,单轴抗压强度逐渐降低;煤样表面维度从二维逐渐向三维转化,表面及内部节理结构损伤程度加剧。

(2) 煤样的节理结构损伤程度随含水饱和度的增加而增大,100%饱和度时,煤样循环冻融破碎周期为41T,煤样更容易发生损伤甚至破坏。

(3) 随着含水饱和度的提高,煤体传热至-45℃的传热半径逐渐降低,传热时间逐渐延长,含水饱和度为100%时传热半径与所用时间分别为2.77m、2531.2s。含水饱和度制约着传热半径及传热时间,含水饱和度越高,制约越明显。

### 参考文献:

- [1] Cai C, Li G, Huang Z, et al. Rock pore structure damage due to freeze during liquid nitrogen fracturing[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(12):9249—9257.
- [2] 张嘉凡,徐荣平,刘洋,等.冻融循环作用下注浆裂隙岩体力学特性试验研究[J].实验力学,2021,36(3):378—388 (ZHANG Jiafan, XU Rongping, LIU Yang, et al. Experimental study on mechanical properties of grouted fractured rock mass under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36 (3):378—388 (in Chinese))
- [3] 郭彪.煤矿井下顶板水力压裂技术应用研究[J].能源与节能,2022(2):162—163 (GUO Biao. Application research on hydraulic fracturing technology of underground roof in coal mines [J]. Energy and Energy Conservation, 2022 (2):162—163(in Chinese))
- [4] 王来贵,甘超超,李和万,等.液氮作用下煤样结构损伤规律研究[J].实验力学,2020,35(1):109—117 (WANG Laigui, GAN Chaochao, LI Hewan, et al. Study on the law of coal-sample structural damage under liquid nitrogen[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35 (1):109—117 (in Chinese))
- [5] 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]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35 (6):904—910 (in Chinese))
- [6] 康永尚,孙良忠,张兵,等.中国煤储层渗透率主控因素和煤层气开发对策[J].地质论评,2017,63(5):1401—1418 (KANG Yongshang, SUN Liangzhong, ZHANG Bing, et al. The controlling factors of coalbed reservoir permeability and CBM development strategy in China[J]. Geological Review, 2017, 63 (5):1401—1418 (in Chinese))
- [7] 徐冲.圆柱形类节理试样制备及单轴抗压强度[J].土木工程与管理学报,2019,36(2):114—119 (XU Chong. Preparation technology and uniaxial compression strength of cylindrical rock-like specimens with non-persistent joints[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(2):114—119 (in Chinese))
- [8] 张文力,冯梅梅,吴疆宇.循环载荷作用下级配碎石力学特性试验研究[J].实验力学,2020,35(4):629—638 (ZHANG Wenli, FENG Meimei, WU Jiangyu. Experimental study on mechanical properties of graded aggregate under cyclic loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4):629—638 (in Chinese))
- [9] 王来贵,高晗,郭子钰,等.受冻融循环作用的砂岩宏观变形特征研究[J].实验力学,2020,35(6):1113—1120 (WANG Laigui, GAO Han, GUO Ziyu, et al. Study on the macroscopic deformation characteristics of sandstone subjected to freeze-thaw cycle[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35 (6):1113—1120 (in Chinese))
- [10] 李和万,王来贵,张春会,等.冷加载作用下不同围压煤样结构损伤规律研究[J].应用力学学报,2017,34(4):788—794, 823 (LI Hewan, WANG Laigui, ZHANG Chunhui, et al. Structural damage mechanism for cold loaded coal samples under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(4): 788—794, 823 (in Chinese))
- [11] 李和万,王来贵,张豪,等.循环冻融条件下受载煤样结构损伤规律[J].煤炭学报,2017,42(9):2345—2352 (LI Hewan, WANG Laigui, ZHANG Hao, et al. Investigation on damage laws of loading coal samples under cyclic cooling treatment[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9):2345—2352 (in Chinese))
- [12] Li Z, Li Z M, Guo J. Heat transfer and flow characteristics of liquid nitrogen laminar fulling films in cryogenic

- heat transfer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 15(4):148—149.
- [13] 郭闪闪, 崔德永, 王建华, 等. 破碎岩体注浆加固的二维分形平面模型构建与模拟分析[J]. 金属矿山, 2022(2): 54—61 (GUO Shanshan, CUI Deyong, WANG Jianhua, et al. The modeling and simulation analysis of two-dimensional fractal plane model for grouting reinforcement of broken rock mass[J]. Metal Mine, 2022(2):54—61 (in Chinese))
- [14] 韩金博. 近距离煤层开采区段煤柱破裂分形维数研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11):69—76 (HAN Jinbo. Study on fractal dimension of coal pillar fracture in mining section of short-distance coal seams[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(11):69—76 (in Chinese))
- [15] 沈俊男. 基于 CT 技术和分形理论的煤体孔裂隙结构表征[D]. 青岛: 山东科技大学(青岛), 2019 (SHEN Junnan. Characterization of pore and fracture structure of coal body based on CT technology and fractal theory [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology(Qingdao), 2019 (in Chinese))
- [16] 汪文瑞, 刘兆霞, 王刚, 等. 考虑分形维数的注水模型及注水时间研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 817—825 (WANG Wenrui, LIU Zhaoxia, WANG Gang, et al. Study on water injection model considering fractal dimension and water injection time[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(4):817—825 (in Chinese))
- [17] 刘钊, 李子春, 刘国楠, 等. 花岗岩残积土的修正摩尔库伦模型参数取值研究[J]. 铁道建筑, 2017(3):89—92 (LIU Zhao, LI Zichun, LIU Guonan, et al. Study on parameter determination of modified Mohr-Coulomb model for granite residual soil in deep foundation pit simulation analysis[J]. Railway Engineering, 2017(3):89—92 (in Chinese))
- [18] 杜春志. 煤层水压致裂理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学(徐州), 2008 (DU Chunzhi. Study on theoretics of hydraulic fracturing in coal bed and its applicatons[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology (Xuzhou), 2008 (in Chinese))
- [19] 李和万, 左建平, 王来贵. 液氮冷加载对围压煤体结构损伤的影响规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37 (4):804—811 (LI Hewan, ZUO Jianping, WANG Laigui. Effect of cold loading by liquid nitrogen on structural damage of coal[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(4):804—811 (in Chinese))
- [20] 南卓铜, 李述训, 程国栋, 等. 地面冻结数模型及其在青藏高原的应用[J]. 冰川冻土, 2012(1):89—95 (NAN Zhuotong, LI Shuxun, CHENG Guodong, et al. Surface frost number model and its application to the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012(1):89—95 (in Chinese))
- [21] Bai B, Xu T, Nie Q K, et al. Temperature-driven migration of heavy metal  $Pb^{2+}$  along with moisture movement in unsaturated soils[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 153:119573.
- [22] Yu L L, Semin M A, Parshakov O S. Mathematical prediction of frozen wall thickness in shaft sinking[J]. Journal of Mining Science, 2017, 53(5):938—944.
- [23] 赵桐德, 高全臣, 王纪伟, 等. 裂隙倾角对岩石破坏形态影响的数值模拟[J]. 煤炭技术, 2020, 39(8):1—3 (ZHAO Tongde, GAO Quanchen, WANG Jiwei, et al. Numerical simulation on influence of fracture dip angle on rock failure mode[J]. Coal Technology, 2020, 39(8):1—3 (in Chinese))
- [24] Sansha C, Hein W J, John R B, et al. The transient swelling behavior of large ( $-20+16\text{mm}$ ) South African coal particles during low-temperature devolatilisation[J]. Fuel, 2014, 136:79—88.
- [25] Shivakumara I S, Ravisha M, Ng C O, et al. A thermal non-equilibrium model with Cattaneo effect for convection in a Brinkman porous layer[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2015, 71(6):39—47.
- [26] 刘忠鑫. 煤多孔介质内低温氮的传热传质研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019 (LIU Zhongxin. Heat and mass transfer characteristics of cryogenic nitrogen in coal porous media[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019 (in Chinese))

## Research on low temperature damage mechanism and influence scope of intermittent joint coal body

LI Hewan, LIU Jian, WANG Laogui, REN Tianjiao

(Department of Mechanics and Science Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** Joints commonly exist in underground coal reservoirs and are the main space for CBM storage and migration. In order to study the damage mechanism of the different water saturation of the coal body on the joint structure under the action of freezing and thawing and the influence range of the reverse heat transfer of liquid nitrogen as the refrigerant of the coal body to  $-45^{\circ}\text{C}$ , a low-temperature storage box was used for coal with different water saturation. The samples were provided with a low temperature environment of  $-45^{\circ}\text{C}$ , and the cyclic freeze-thaw cross experiment was carried out on the coal samples; a heat transfer model with liquid nitrogen as the refrigerant was established, and a single-cycle low-temperature loading numerical simulation was carried out. The results show that: (1) With the increase of the freeze-thaw cycle of the low temperature cycle, the expansion amount of the coal sample surface and internal joints gradually increases, and the uniaxial compressive strength gradually decreases; The damage degree is aggravated. (2) The damage degree of the coal sample structure increases with the increase of the water saturation. When the saturation is 100%, the coal sample freeze-thaw cycle is 41 T, and the coal sample is more likely to be damaged or even destroyed. (3) As the water saturation increases in single cycle, the heat transfer radius becomes smaller and the heat transfer time becomes longer. Under 100% water saturation, the heat transfer radius of the coal body to  $-45^{\circ}\text{C}$  is only 2.77m. The time is 2531.2s, indicating that the water saturation restricts the heat transfer radius and heat transfer time. The higher the water saturation, the more obvious the restriction. The experimental and simulation results can provide a theoretical basis for predicting and efficiently exploiting coalbed methane in practical engineering.

**Keywords:** joint; water saturation; cyclic cold loading; single-cycle heat transfer; influence scope