



移动扫码阅读

姜琳婧, 赵会杰, 赵怡晴, 等. 层理煤岩浸水前后力学性质研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 97-108.

JIANG Linjing, ZHAO Huijie, ZHAO Yiqing, *et al.* Study on mechanical properties of coal before and after flooding considering bedding direction[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 97-108.

层理煤岩浸水前后力学性质研究

姜琳婧^{1,2}, 赵会杰^{1,2}, 赵怡晴^{1,2}, 方杰³, 曹志国³

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

3. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011)

摘要:层理弱面及煤岩遇水软化会导致煤岩力学性质降低, 对煤矿地下水库稳定性、煤矿突透水事故防治等具有重要影响。为了研究层理及浸水对煤岩力学性质的综合影响, 通过无损浸水试验与单轴压缩试验, 并基于数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术, 分析不同浸水条件下煤岩单轴压缩变形及破坏特性, 获得了轴向平行和轴向垂直两种层理煤岩在天然状态、自然吸水以及强制吸水三种状态下的力学性质参数和表面应变场信息等。研究表明: 煤岩的吸水特性呈现出明显的层理性差异, 力学性质受到层理和浸水共同影响作用, 具体如下: ①毛细管作用导致轴向平行层理煤岩吸水能力强于轴向垂直层理煤岩, 轴向平行层理煤岩的自然极限吸水率是轴向垂直层理煤岩的 2.2 倍; ②煤岩的单轴抗压强度和弹性模量受层理影响为主, 受浸水影响为辅, 破坏模式与层理方向有关系, 轴向垂直煤岩为剪切破坏, 轴向平行煤岩为劈裂破坏, 相同层理煤岩浸水前后破坏模式不变; ③煤岩破坏是由均匀变形向非均匀变形转化的过程, 浸水后煤岩会更早出现应变集中区, 其压密阶段延长、弹性变形阶段缩短。研究结果有助于进一步理解轴向平行和轴向垂直两种层理煤岩浸水特性、力学性质及破裂演化规律, 对地下水库预留煤柱保护、稳定性分析等相关工程实践具有一定的借鉴作用。

关键词:层理煤岩; 饱水煤岩; 单轴压缩; 3D-DIC 技术; 力学特征

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0097-12

Study on mechanical properties of coal before and after flooding considering bedding direction

JIANG Linjing^{1,2}, ZHAO Huijie^{1,2}, ZHAO Yiqing^{1,2}, FANG Jie³, CAO Zhiguo³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100011, China)

Abstract: The weak bedding plane and the water-softening coal will lead to the decrease in mechanical properties, which has an important influence on the stability of underground reservoirs and the prevention and control of water inrush accidents in coal mine. To study the comprehensive influence of bedding and soaking on the mechanical properties of coal, the uniaxial compression deformation and failure characteristics of coal under different soaking conditions were analyzed through a non-destructive soaking test and uniaxial compression test and based on the Digital image correlation method (DIC). The mechanical property parameters and surface strain field information of axial parallel and vertical bedded coal samples in the natural state, natural water absorption and forced water absorption were obtained. The results shown that the water absorption characteristics of coal shown obvious stratification differences, and the mechanical properties were affected by the combined effects of stratification and soaking. The specific results were as follows, ① Capillary action led to stronger water adsorption in axial parallel-bedded coal than in axial vertical-bedded coal, and the natural limiting water absorption rate of axial parallel-bedded coal was 2.2 times higher than that of axial vertical-bedded coal. ② The uniaxial compressive strength and elastic modulus of coal were mainly affected by bedding and supplemented by soaking. The failure mode was related to the direction of bedding. The failure mode

收稿日期: 2022-03-05 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0330

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51804018, 52174106); “煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室 2017 开放基金资助项目 (SHJT-17-42.1)

作者简介: 姜琳婧(1984—), 女, 湖南沅江人, 讲师, 博士。E-mail: jlj@ustb.edu.cn

通讯作者: 赵怡晴(1980—), 女, 四川南充人, 教授, 博士。E-mail: zyzq@ustb.edu.cn

of axial vertical coal was shear failure, while that of axial parallel coal was split failure. ③ The coal failure was a process of transformation from uniform to non-uniform deformation. After water soaking, the coal appeared strain concentration area earlier, its compaction stage was prolonged, and the elastic deformation stage was shortened. The research results were helpful to further understand the water soaking characteristics, mechanical properties, and rupture evolution of axial parallel and vertical bedded coals, and can be used as a reference for the protection and stability analysis of reserved coal pillars in underground reservoirs.

Key words: Bedding coal; water-saturated coal; uniaxial compression experiments; 3D-DIC technique; mechanical properties

0 引言

层理结构容易引起煤岩体层间滑移、强度降低等问题,对煤岩力学性质影响较大^[1-2],导致煤岩具有较强的非均质性和各向异性^[3-5]。煤岩浸水会产生矿物颗粒脱落、结构松散等问题,从而降低煤岩强度。目前,以“导储用”为特征的煤矿采空区储水理念被提出并已付诸实施^[6-8],地下空区预留煤柱成为地下水库的重要组成部分,地下水库蓄水期间煤柱同时受到层理和浸水两个方面的作用,对水库的安全稳定产生显著影响,因此有必要针对浸水层理煤岩的力学性质进行研究。

在层理煤岩力学特征及破裂特性的力学试验研究方面,李磊等^[9]测试了层理煤岩力学性质,表明煤岩断裂特征及其破坏模式均与层理角度相关;刘忠玉^[10]和刘恺德等^[11]通过层理煤岩单轴压缩试验,确定了轴向垂直和轴向平行层理煤岩的断口破坏形态分别以剪切和劈裂破坏为主,破坏形式分别为脆性断裂和塑性变形。在动静载试验方面,王伟等^[12]通过开展层理煤岩准静态加载试验,探究了层理煤岩力学性质受裂纹影响作用,发现煤岩破裂演化过程受层理和裂纹综合影响;龚爽等^[13]通过霍普金森冲击断裂试验探究了不同角度层理对煤岩裂纹扩展的影响程度,发现 0° 和 90° 煤岩影响程度明显不同。以上研究表明层理煤岩的破坏模式及力学性质与层理方向有关,并且垂直层理与平行层理煤岩破坏特征不一致,层理方向对煤岩力学性质特征具有显著影响。

在浸水对煤岩力学性质的影响研究方面,陈田等^[14]通过反复浸水试验发现煤岩全应力-应变曲线随浸水次数增多更为平滑;汤传金^[15]通过反复循环浸水试验,发现煤岩单轴抗压强度和弹性模量与循环次数呈指数函数降低;来兴平等^[16]研究发现含水率增大能降低煤岩力学性质,进而降低煤岩峰值强度和弹性模量;姚强岭等^[17]等通过对不同含水饱和度、不同岩性含煤岩系进行单轴压缩试验,发现含煤岩系浸水后峰值强度等力学性质呈规律性减小;李波波等^[18]通过研究发现,不同含水率下煤岩力学特

性基本相似,变形破坏过程可分为峰前应力阶段、峰后应力阶段和残余阶段。以上研究表明浸水对煤岩力学性质影响显著,不同浸水状态下煤岩破坏特性不同。

在层理和浸水对煤岩力学性质综合影响方面,唐书恒等^[19]探究了饱水状态不同层理煤岩单轴压缩条件下的声发射特征;李建华^[20]通过研究浸水层理煤岩单轴压缩力学性质参数,表明轴向垂直层理煤岩的单轴抗压强度是轴向平行层理煤岩的2~4倍。

以往研究在层理煤岩力学性质、浸水影响等方面做了大量的工作,但综合考虑层理和浸水对煤岩力学性质影响的研究仍然存在不足。因此,本文针对这一问题开展了单轴压缩试验,辅以数字图像相关(DIC)技术监测,研究两种层理岩样的吸水特性、力学性质等。研究结果可为煤矿地下水库预留煤柱及水库整体稳定性分析提供参考。

1 室内试验

1.1 试样准备

试验煤岩取自陕西榆林大柳塔煤矿2号矿井 5^{-2} 煤层,为4号地下水库所在煤层,该煤层位于地下160 m处,层理结构明显。依据《煤和岩石物理力学性质测定方法第七部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》(GB/T 23561.7—2009),将试验采集样品进行取心、切割、打磨、精加工制备成规格为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱形煤岩,包括轴向平行层理煤岩(轴线与层理面平行,以下简称“平行煤岩”)和轴向垂直层理煤岩(轴线与层理面垂直,以下简称“垂直煤岩”)2类,如图1所示。本次试验共加

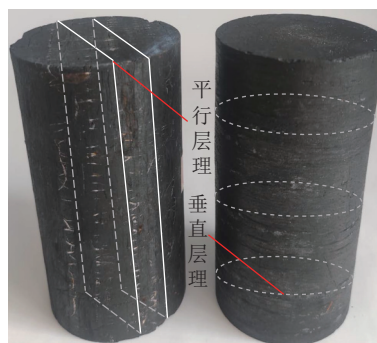


图1 煤岩层理方向示意

Fig.1 Diagram of bedding direction of coal samples

工 50 块煤岩试样,其中包括 25 块平行煤岩和 25 块垂直煤岩。将加工好的煤岩置于干燥箱内,运输至储存室备用。

采用密度、超声波纵波波速等测定方法选择差别较小的煤岩作为试验样品,以保证试验煤岩的均

一性。共选取 12 块煤岩试件,其中包括 6 块平行煤岩和 6 块垂直煤岩,基础物理性质参数见表 1。用 P 表示平行层理、T 表示垂直层理,下标 0 和 1 分别代表未浸水状态和浸水状态。对煤岩进行编号,如 T_1-3 ,表示浸水状态的第 3 块垂直煤岩。

表 1 试验煤岩基础物理性质
Table 1 Physical properties of coal samples

方向	状态	煤岩编号	质量/g	高度/mm	直径/mm	体积/cm ³	密度/(g·cm ⁻³)	纵波波速/(km·s ⁻¹)
平行层理	未浸水	P ₀ -1	258.9	100.51	49.64	194.42	1.33	2.032
		P ₀ -2	248.4	100.31	49.71	194.58	1.28	1.969
		P ₀ -3	260.5	100.46	49.68	194.64	1.34	2.033
	浸水	P ₁ -1	254.0	99.77	49.76	193.92	1.31	2.049
		P ₁ -2	249.0	100.31	49.70	194.50	1.28	2.033
		P ₁ -3	256.4	100.24	49.69	194.29	1.32	2.119
垂直层理	未浸水	T ₀ -1	256.1	100.05	49.60	193.22	1.33	1.969
		T ₀ -2	257.0	99.43	49.56	191.71	1.34	1.969
		T ₀ -3	252.8	100.16	49.61	193.51	1.31	1.966
	浸水	T ₁ -1	267.4	100.14	49.61	193.47	1.38	2.066
		T ₁ -2	253.2	99.68	49.61	192.58	1.31	1.969
		T ₁ -3	255.2	100.04	49.61	193.28	1.32	1.953

1.2 试验设备

为防止浸水导致煤岩颗粒崩解脱落从而影响煤岩力学性质,参照已有研究^[21]自制了无损浸水装置(图 2)。该装置主要由加湿器和密封箱两部分组成,加湿器的出雾口紧密连接在密封箱底部,水雾直接由密封箱底部向上喷射,可快速充满整个箱体;温湿度计可实时监测箱内湿度,以保证密封箱内湿度水平一致,确保试验条件一致性。本装置中水粒子进入密封箱内与煤岩均匀接触,由此可实现煤岩无水压、均匀浸水过程,减少煤岩浸水损失。

采用 YAW-600 型微机控制电液伺服压力试验

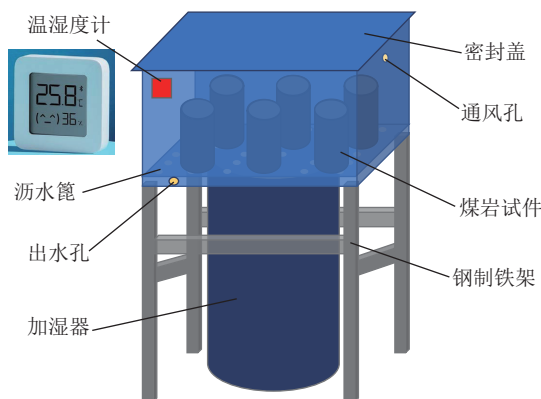


图 2 无损浸水装置示意

Fig.2 Schematic diagram of lossless flooding device

机进行单轴压缩试验,如图 3 所示,包括单轴压缩系统和液压伺服控制系统两部分。该压力机最大压力为 600 kN,试验力分辨率为 3 N,位移分辨率为 3 μm。

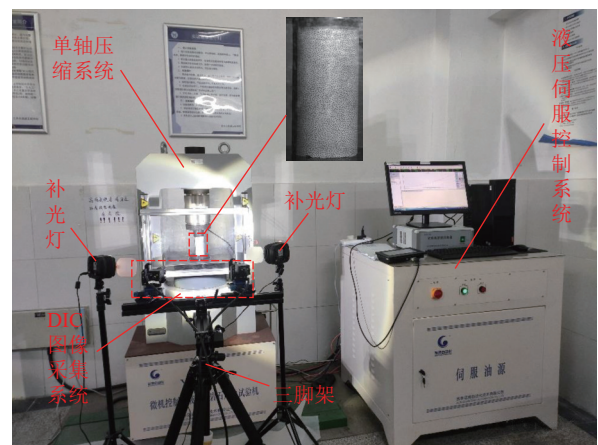


图 3 单轴压力机与 DIC 系统

Fig.3 Single shaft press with DIC system

基于 DIC 技术对压缩过程中煤岩表面应变特征进行采集,3D-DIC 数据采集系统由图像采集系统和照明系统组成。DIC 技术是一种非接触变形测量方法,能够记录物体表面全场变形信息,直观反映全场位移和应变,对于研究裂纹起裂与扩展模式是一种十分有效的测量手段。

1.3 试验过程

将待浸水试件通过无损浸水装置浸水至极限吸水状态,该过程中前12 h每小时称量一次质量,然后每3 h称量一次质量,精确至0.01 g,直至2次称量质量不再变化,即认为煤岩达到吸水极限。

利用黑白两色哑光油漆对煤岩表面喷制散斑。单轴压缩时,采用位移加载控制方式,速度设定为0.005 mm/s,获得全应力-应变曲线。卸载控制方式为煤岩试件完全失去承载力时停止加载。调整DIC高速摄像机位置,利用设备自带校正板进行相机矫正,按标准调整矫正参数小于等于0.04,帧数为2帧/s。试验时确保高速摄像机能完整并同步拍摄试验煤岩单轴压缩变形破坏全程。

2 试验结果及分析

2.1 煤岩浸水特性研究

煤岩的吸水率分为自然吸水率和强制吸水率2种^[22],鉴于地下水库蓄水期间保留煤柱一直处于浸水状态,为符合实际情况,本次试验仅测试煤岩自然吸水率 W_z ,即

$$W_z = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100\%$$

式中: M 为试件浸水状态时的质量; M_0 为试件未浸水状态时的质量。

煤岩在浸水45 h后达到极限状态。图4为不同层理煤岩自然吸水率随时间变化曲线,可以看出所有煤岩随着浸水时间的延长,自然吸水率 W_z 增大。垂直煤岩吸水率曲线相比平行煤岩整体上更为平缓,说明两种层理煤岩的吸水能力存在一定差异。前4 h吸水时间内,两种煤岩吸水率曲线斜率基本一致,吸水速度相当。吸水4 h后,平行煤岩曲线斜率变大,吸水速度陡增,而垂直煤岩其增长速度基本不变,说

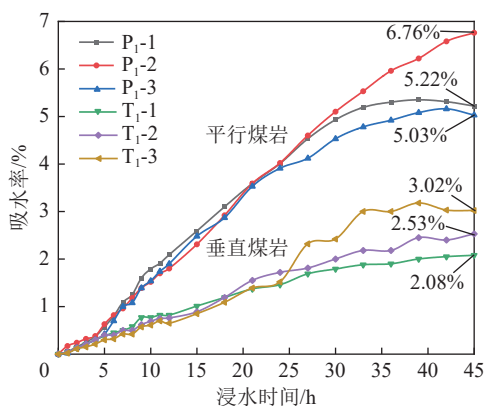


图4 自然吸水率-时间变化曲线

Fig.4 Natural water absorption-time curve

明层理对煤岩吸水的影响发生在浸水4 h以后。

试件来自同一大块煤岩,天然含水率是一致的,而试验结果表明,平行煤岩的自然极限吸水率均值为5.70%,垂直煤岩的均值为2.59%,平行煤岩自然极限吸水率是垂直煤岩的2.2倍。根据已有研究推测可能的原因是:①平行煤岩内部裂隙体积大于垂直煤岩;②毛细管作用增强了平行煤岩的自然吸水能力。

为探究极限吸水率差异的原因,进行了2个试验。首先,选取2块不同层理煤岩加压饱水后进行核磁试验,得到平行煤岩的孔隙率为15.67%,饱和吸水率为8.7%;垂直煤岩孔隙率为17.74%,饱和吸水率为8.3%。平行煤岩孔隙率低于垂直煤岩2%,而饱和吸水率均达到8%,表明两种层理煤岩自然极限吸水率的差异并非由煤岩内部裂隙体积差异造成,因此原因①不成立。

煤岩中的微小孔隙裂隙通常沿着层理结构面发育^[23],平行煤岩含有更多竖直方向的微小孔隙裂隙。核磁试验结果表明煤岩孔隙裂隙直径范围在 $0.4 \times 10^{-3} \sim 20 \mu\text{m}$,远小于毛细管作用临界管径 1 cm ^[24]。选取6块垂直煤岩,分2组将其按横放和竖放2种放置方式进行自然吸水试验,如图5所示。垂直煤岩横放时,原本处于水平方向的微小孔隙裂隙变成了竖直方向,与平行煤岩一样,在重力作用下能产生毛细管吸水现象。横放煤岩的自然极限吸水率均值为5.82%,竖放煤岩的自然极限吸水率均值为2.53%,横放煤岩自然极限吸水率是竖放煤岩的2.3倍,与平行煤岩的自然极限吸水率是垂直煤岩的2.2倍的结论基本一致,表明两种层理煤岩自然极限吸水率的差异是由毛细管作用造成,因此原因②成立。

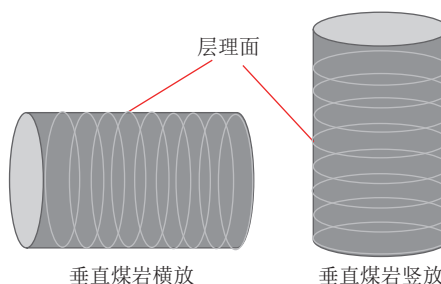


图5 煤岩放置方式示意

Fig.5 Schematic diagram of coal sample placement

综上,受毛细管作用,平行煤岩吸水能力强于垂直煤岩。

2.2 煤岩力学性质研究

2.2.1 层理对煤岩力学性质影响

对煤岩进行单轴压缩,获得煤岩力学参数见表2。

未浸水状态下,垂直煤岩的峰值强度均值为 33.18 MPa,平行煤岩的峰值强度均值为 19.96 MPa,降低了 39.8%;垂直煤岩弹性模量均值为 2 858.49 MPa,平行煤岩弹性模量均值为 2 243.56 MPa,降低了 21.5%。浸水状态下,垂直煤岩的峰值强度均值为 30.62 MPa,平行煤岩的峰值强度均值为 20.10 MPa,降低了 34.4%;垂直煤岩弹性模量均值为 2 769.10 MPa,平行煤岩弹性模量均值为 2 270.34 MPa,降低了 18.0%。无论浸水与否,平行煤岩峰值强度及弹性模量均明显小于垂直煤岩。

表 2 煤岩单轴压缩力学性质

Table 2 Mechanical properties of coal and rock under uniaxial compression

方向	状态	煤岩编号	峰值强度/MPa	强度均值/MPa	弹性模量/MPa	模量均值/MPa
平行层理	未浸水	P ₀ -1	18.17	19.96	2 327.89	2 243.56
		P ₀ -2	26.62	19.96	2 358.19	
		P ₀ -3	15.09	19.96	2 044.59	
	浸水	P ₁ -1	15.56	20.10	2 215.08	2 270.34
		P ₁ -2	21.90	20.10	2 232.66	
		P ₁ -3	22.83	20.10	2 363.27	
垂直层理	未浸水	T ₀ -1	30.84	33.18	2 851.81	2 858.49
		T ₀ -2	38.93	33.18	2 999.12	
		T ₀ -3	29.78	33.18	2 724.54	
	浸水	T ₁ -1	39.65	30.62	2 910.08	2 769.10
		T ₁ -2	24.92	30.62	2 689.22	
		T ₁ -3	27.29	30.62	2 708.01	

单轴压缩时,垂直煤岩受压后煤岩内的微小裂隙被压缩,由于层理面垂直于单轴压缩方向,其受单轴压缩破坏影响较小。平行煤岩单轴压缩时,煤岩中微小裂隙的发育方向及层理面与受压方向一致,受压后孔隙裂隙两端形成应力集中,随着压力的增大,微小裂隙逐渐扩张直至连通,同时衍生水平拉应力对平行层理产生张拉作用,最终形成宏观破裂。因此平行煤岩比垂直煤岩抗压能力低,破坏早,破坏时应变更小。

综上,受层理方向影响,平行煤岩单轴抗压能力小于垂直煤岩。

2.2.2 浸水对煤岩力学性质影响

水对煤岩有溶蚀作用,煤岩是有机物和无机物组成的混合物,可溶物被水溶解从而使煤岩结构松散;煤岩浸水后由于原始孔隙裂隙的存在,水容易进

入煤岩内部,进而降低煤岩脆性、促进煤岩孔隙裂隙发育,引起岩石抗压强度降低,即水的软化作用。

为探究浸水对煤岩力学性质的影响,分别对比两种层理煤岩浸水前后的力学性质,见表 2。垂直煤岩浸水前后,峰值强度均值由 33.18 MPa 降至 30.62 MPa,下降了 7.7%;弹性模量均值由 2 858.49 MPa 降至 2 769.1 MPa,下降了 3.1%,垂直煤岩强度软化系数为 0.92。浸水对垂直煤岩的力学参数具有削弱作用,但影响较小。平行煤岩浸水前峰值强度均值为 19.96 MPa,浸水后峰值强度均值为 20.10 MPa,强度软化系数约等于 1。平行煤岩浸水前后力学性质变化不明显,浸水软化作用可忽略不计。

综上,浸水软化作用对垂直煤岩单轴压缩力学性质的影响比平行煤岩明显。

2.3 3D-DIC 试验分析

2.3.1 煤岩各阶段应力及应力占比研究

3D-DIC 径向应变分析方法能够直观量化试样的破裂过程,获取的应变云图可有效识别张拉剪切破裂类型,揭示起裂、扩展演化机制。基于 3D-DIC 系统影像采集单元及分析系统,得到了煤岩在损伤演化过程中的径向应变云图演化规律,以及应变云图的三维空间分布。为了探究煤岩裂隙扩展演化随加载过程的变化,以浸水煤岩对比未浸水煤岩,结合应力-应变曲线,对垂直煤岩和平行煤岩不同变形阶段的应变分布和破裂区的扩展情况进行分析。云图中的色度条取值以拉伸为正值,压缩为负值。

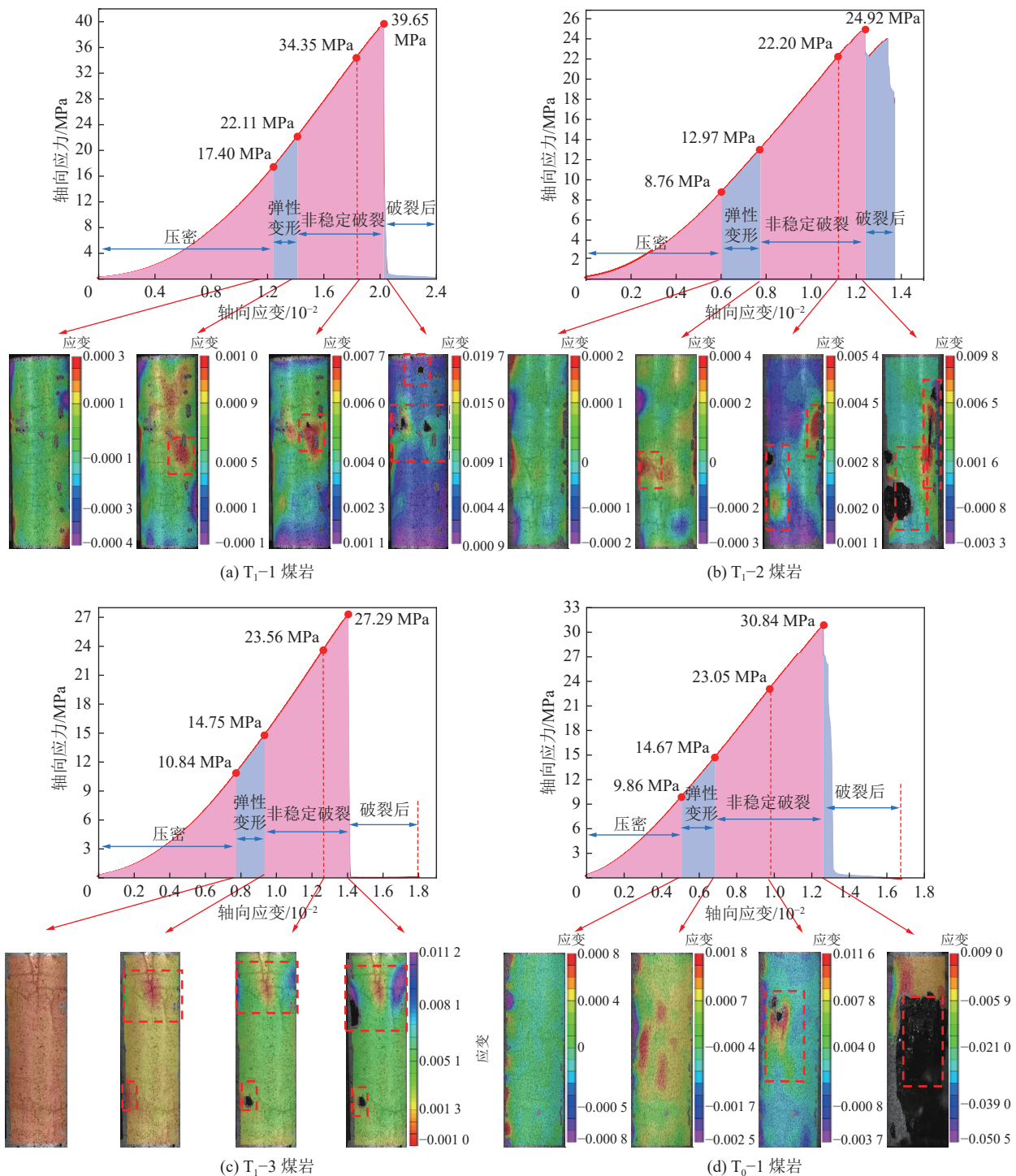
煤岩试件的变形可分为 4 个阶段:孔隙裂隙压密阶段、弹性变形阶段、非稳定破裂阶段和破裂后阶段。定义压密应力为压密阶段与弹性变形阶段交界点的应力,起裂应力为弹性变形阶段与非稳定破裂阶段交界点的应力,表观破裂应力为 DIC 高速摄像机捕捉的第一张出现表面损伤的图片对应的应力。

图 6 给出了垂直煤岩浸水前后破坏各阶段应变云图,图 6a、图 6b、图 6c 为浸水状态煤岩,图 6d、图 6e、图 6f 为未浸水状态煤岩。由图 6a 可知,T₁-1 煤岩压密应力为 17.40 MPa,对应变云图整体呈现为绿色,说明整体变形均匀。起裂应力为 22.11 MPa,应变云图中部出现红色应变集中区,应变为 0.001;该区域进入非稳定破裂阶段后应变增加至 0.77%,发生小块崩坏,对应表观破裂应力为 34.35 MPa。峰值强度应变云图的破坏区域得到了进一步发展,破坏区增大且周围分布黄绿色应变集中区,应变为 1.5% 左右,煤岩破坏将在此处发生,图 6a 中 T₁-1 煤岩在上述应变集中区完全破坏证实了这一点。T₁-1 煤岩

压缩初期变形较为均匀,随后逐渐形成应变集中区,并开始发生破坏,最终破坏区域与应变集中区吻合,说明煤岩破坏过程是由均匀变形向非均匀变形转化的过程。图6b和图6c的T₁-2、T₁-3煤岩破坏过程同T₁-1煤岩一致,压密阶段变形较为均匀,弹性变形阶段出现应变集中区,对应非稳定破裂阶段的首次破坏区,应变集中区随压缩进行而发展,峰值强度后煤岩彻底破裂。浸水垂直煤岩的应变集中区最早在弹性变形阶段开始显现,T₁-1和T₁-3煤岩临近破坏

前,应变集中区对称于煤岩轴中心线,两侧呈拉伸变形,图7a中两块煤岩的破坏形态为“X型”,即破坏模式为剪切破坏。

由图6d、图6e、图6f可知,未浸水状态垂直煤岩的起裂也发生在非稳定破裂阶段,不同的是弹性变形阶段未形成与破坏区域对应的应变集中区。图6d中T₀-1煤岩压密应变云图为绿色分布较为均匀,弹性应变云图中的红色区域与首次破坏区域不对应,应变0.0018比表观破裂云图的最大应变



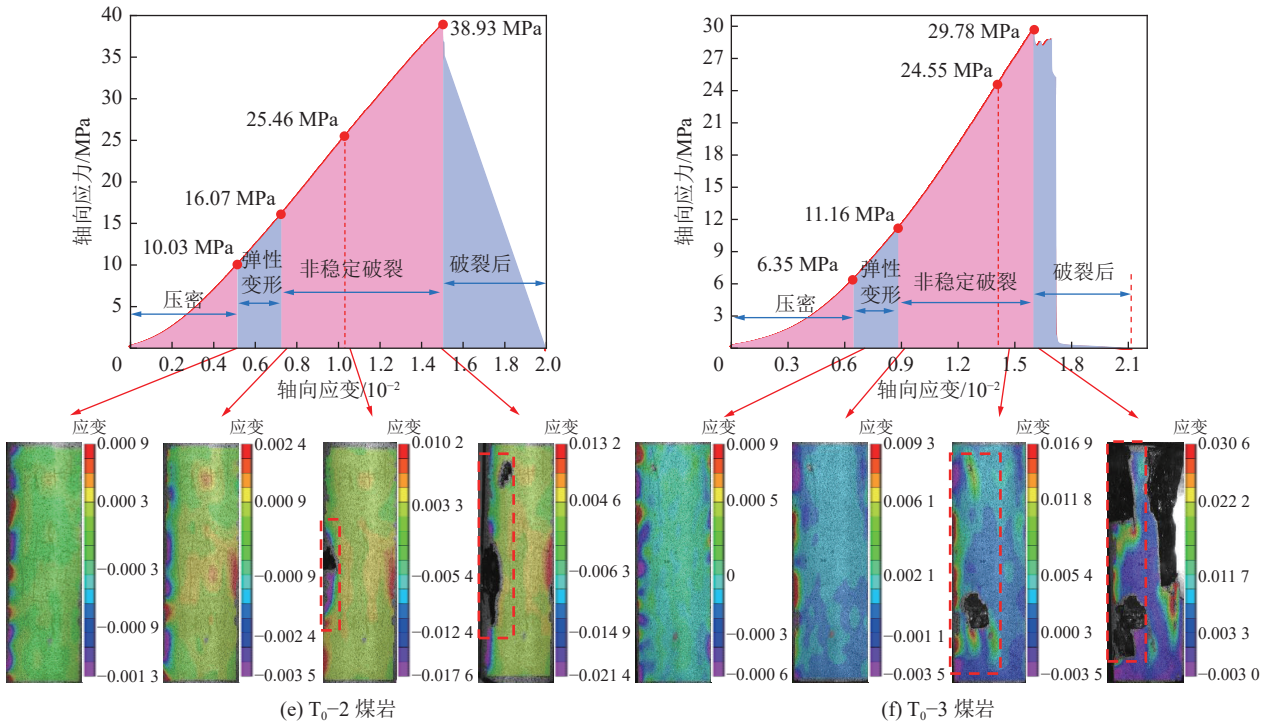
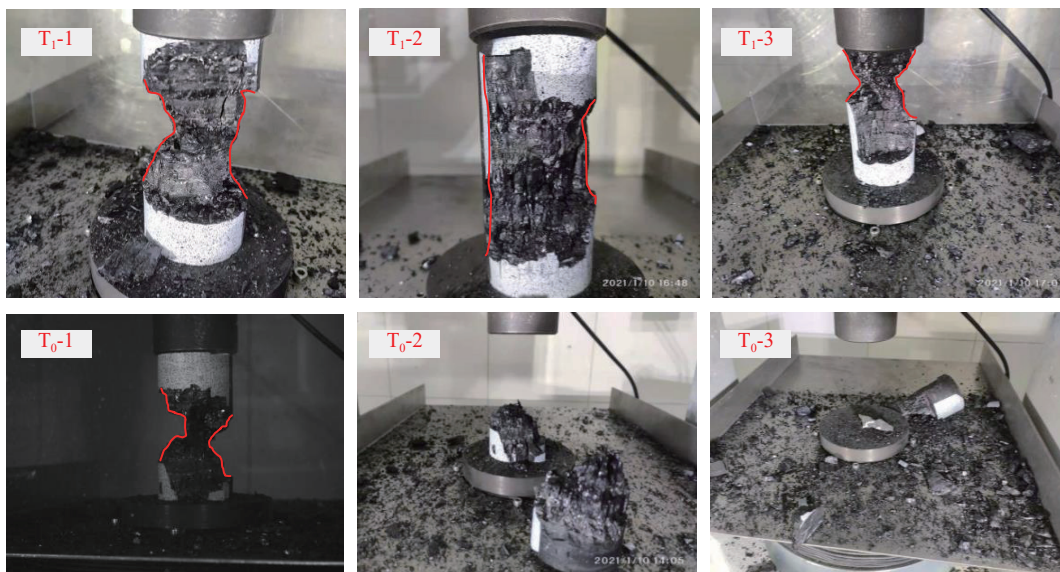


图 6 垂直煤岩破坏各阶段径向应变云图

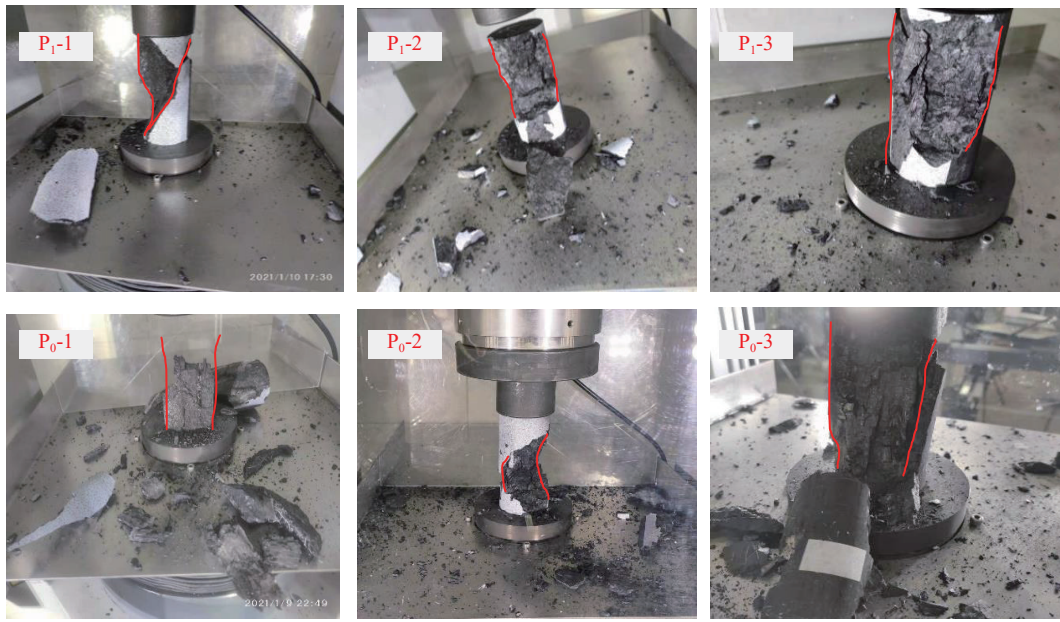
Fig.6 Radial strain cloud map of axial vertical stratified coal at each stage of deformation and failure

0.0116 要小，所以红色区域未构成有效的应变集中区。图 6e 中 T_0-2 煤岩压密和弹性阶段应变云图颜色分布基本一致，应变由 0.0003 增大到 0.0009，变化较小说明煤岩变形较为均匀；表观起裂应力为 24.46 MPa，对应应变云图最大应变为 -0.0176，负值表明此处破坏为压缩破坏，峰值强度时破坏进一步加强，最大应变达到 -0.0214。图 6f 中 T_0-3 煤岩在首次破裂发生后形成较为明显的青黄色条带状应变集中区，应变为 0.0118，对应峰值强度云图左侧破坏区，

云图上的红绿应变集中区继续发展，最大应变达到了 0.0306，最终破坏形态如图 7a 中 T_0-3 煤岩所示，煤岩破坏程度较高，颗粒度较小。结合图 7a，垂直煤岩多破裂为细碎颗粒，颗粒度较小且均匀，有中间断裂成两段的倾向，呈剪切破坏模式。未浸水状态煤岩 T_0-2 和 T_0-3 直接断裂为两段，破坏部分爆裂为煤渣，浸水状态煤岩破坏形态相对完整，碎裂程度低于未浸水煤岩，这是由于浸水后煤岩脆性降低，破坏剧烈程度减弱。



(a) 垂直煤岩



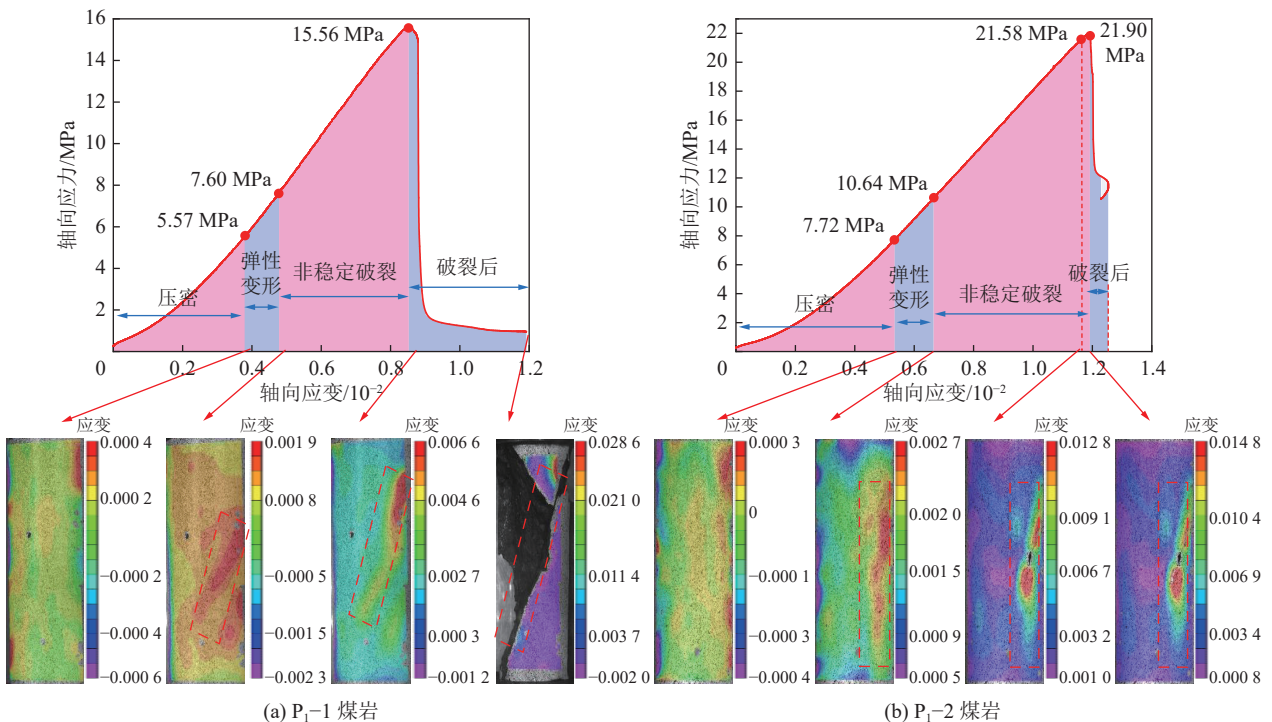
(b) 平行煤岩

图7 煤岩最终破裂形态

Fig.7 Final fracture morphology of coal

图8给出了平行煤岩浸水前后破坏各阶段应变云图,图8a、图8b、图8c为浸水状态煤岩,图8d、图8e、图8f为未浸水状态煤岩。图8a中P₁-1的压密应力为5.57 MPa,压密阶段应变云图整体呈青黄色,应变为0.0002左右,说明其压密阶段变形小且均匀。起裂应力为7.60 MPa,对应云图右侧出现红色应变集中区,应变为0.0019;峰值强度时红色应变集中区发展延长为黄红色条带,应变在0.0046~

0.0066,此时煤岩表面没有出现明显的破裂,说明P₁-1煤岩非稳定破裂阶段破坏未发展到煤岩表面,应力-应变曲线在峰值强度后直线下降,即煤岩达到最大应力时突然破坏,破坏程度剧烈。由图8a破坏各阶段应变云图可知,P₁-1煤岩的破坏路径是沿着应变集中区发展的。图8b中P₁-2煤岩压密应力为7.72 MPa,压密应变云图颜色分布均匀,整体变形小。起裂应力为10.64 MPa,应变云图右侧最大应变为0.0027;



(a) P₁-1 煤岩

(b) P₁-2 煤岩

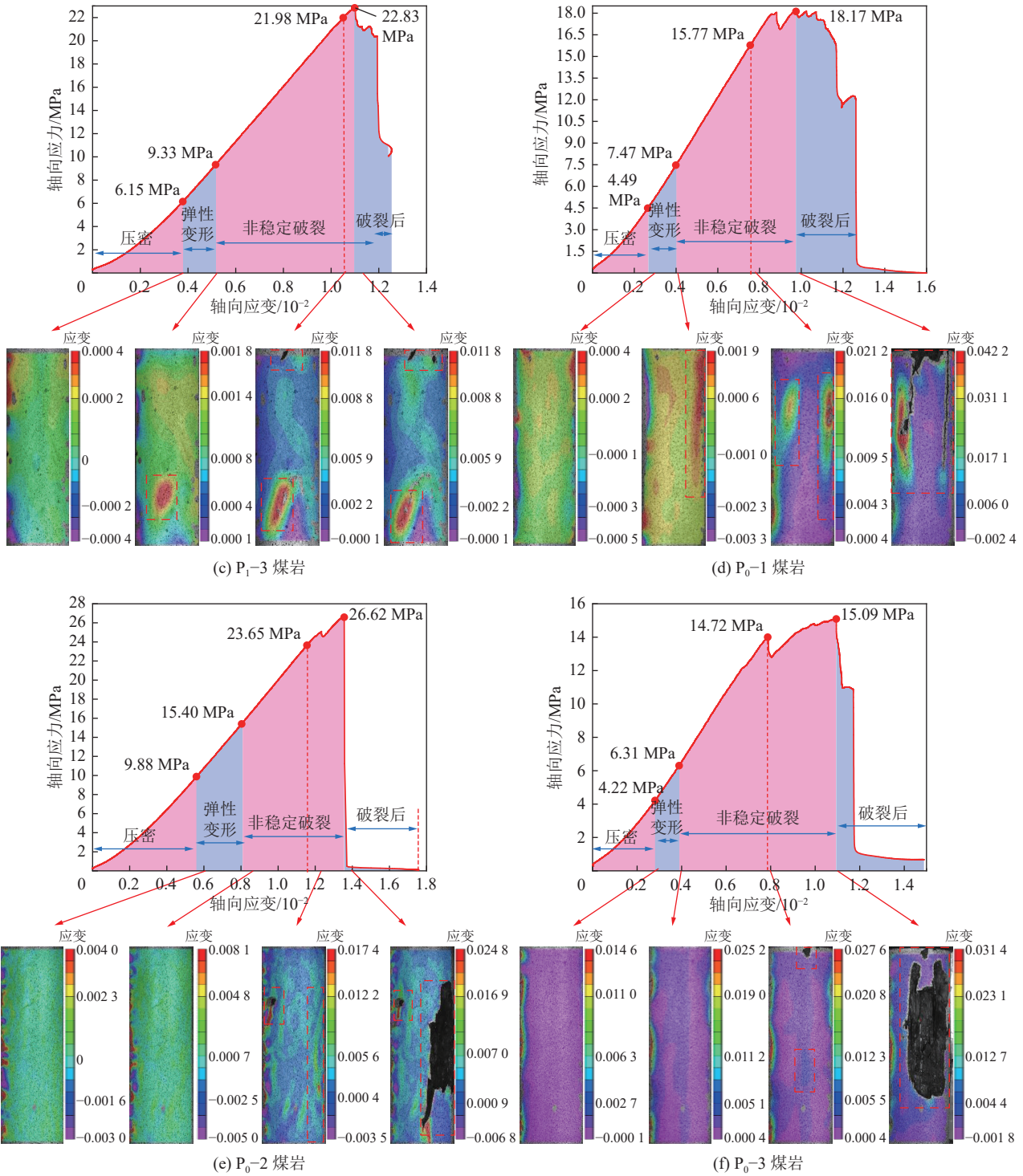


图 8 平行煤岩破坏各阶段径向应变云图

Fig.8 Radial strain cloud map of axial parallel bedding coal at each stage of deformation and failure

表观起裂应力为 21.58 MPa, 十分贴近峰值强度 21.90 MPa, 两组应变云图整体呈紫色, 分布相似, 最大应变由 0.012 8 增大到 0.014 8, 说明出现表观破裂后很快就会出现煤岩峰值破坏, 结合图 7b 所示, 其破坏模式为劈裂破坏。图 8c 中 P₁₋₃ 煤岩同 P₁₋₂ 煤岩一样, 由压密阶段的均匀变形逐渐形成弹性变形阶段的应变集中区, 在非稳定破裂阶段继续发展, 最

终煤岩沿层理面劈裂破坏。

未浸水状态平行煤岩裂隙发展过程, 图 8d 中的 P₀₋₁ 煤岩在弹性变形阶段出现应变集中区, 图 8e、8f 中的 P₀₋₂ 和 P₀₋₃ 煤岩在出现表观破裂后才隐约显现应变集中区。图 7b 中 P₀₋₁ 和 P₀₋₃ 煤岩沿层理片状脱落, 胀裂为多块片状体; P₀₋₂ 煤岩多碎裂为煤渣, 没有大块片状体, 但煤渣粒度小、破碎程度高。而浸水

煤岩的大块片状体和散碎煤渣都较少,破裂程度低于未浸水煤岩,这是由于煤岩浸水软化,脆性降低。但浸水前后平行煤岩破坏形式没有变化,主要表现为劈裂破坏。

综上,煤岩破坏是由均匀变形向非均匀变形转化的过程,浸水后煤岩应变集中区出现更早,破坏模式不受浸水影响,但与层理有关,垂直煤岩的破坏模式以剪切破坏为主,平行煤岩的破坏模式以劈裂破坏为主。

2.3.2 煤岩裂隙演变过程

将煤岩破坏各阶段应力与峰值强度相比,可获得各阶段在单轴压缩过程中所占比重。表3为煤岩各阶段应力占比,可以看出浸水前后平行煤岩的压密阶段应力占比上升,由29.93%上升到32.66%,增加了2.73%;垂直煤岩由26.35%上升到39.59%,增加了13.24%。由于煤岩自身含有较多孔隙裂隙,浸水后孔隙裂隙由充满空气到充满水,孔隙水压力增

强了煤岩抵抗单轴压缩的能力^[25],所以两种层理煤岩浸水后压密阶段均延长,压密应力均增大。浸水后,平行煤岩弹性变形阶段应力占比由17.00%降低至13.44%,下降了3.56%;垂直煤岩弹性变形阶段应力占比由15.75%降至14.37%,下降了1.38%。由于水的软化作用导致煤岩内部可溶物质溶解^[26],结构松散,抵抗弹性变形能力减弱,从而弹性阶段缩短。

各阶段应力特征值与峰值强度的比值为各阶段应力水平。平行煤岩的表观破裂应力水平在浸水前后分别为91.06%和98.27%,均在90%以上,垂直煤岩的表观破裂应力在浸水前后分别为74.19%和87.35%,均小于平行煤岩。这说明在单轴压缩过程中,垂直煤岩出现表观形变较早,平行煤岩在接近峰值强度时才出现表观破裂。所以,在地下水库工程中,当煤岩沿层理面受压时,一旦观测到裂纹沿层理面出现应当立即采取防护措施。

表3 煤岩各阶段应力占比

Table 3 Table of stress proportion in each stage of coal samples

方向	状态	煤岩编号	压密阶段				弹性阶段				非稳定阶段			
			压密应力/MPa	压密阶段占比/%	占比均值/%	应力水平/%	起裂应力/MPa	弹性阶段占比/%	占比均值/%	应力水平/%	表观破裂应力/MPa	非稳定阶段占比/%	占比均值/%	应力水平/%
平行层理	未浸水	P ₀ -1	4.49	24.71			7.47	16.40			15.77	58.89		
		P ₀ -2	9.88	37.11	29.93	29.93	15.4	20.74	17.00	46.93	23.65	42.15	53.07	91.06
		P ₀ -3	4.22	27.97			6.31	13.85			14.72	58.18		
	浸水	P ₁ -1	5.57	35.80			7.60	13.05			15.56	51.16		
		P ₁ -2	7.72	35.25	32.66	32.66	10.64	13.33	13.44	46.10	21.58	51.42	53.90	98.27
		P ₁ -3	6.15	26.94			9.33	13.93			21.98	59.13		
垂直层理	未浸水	T ₀ -1	9.86	31.97			14.67	15.60			23.05	52.43		
		T ₀ -2	10.03	25.76	26.35	26.35	16.07	15.52	15.75	42.11	25.46	58.72	57.89	74.19
		T ₀ -3	6.35	21.32			11.16	16.15			24.55	62.53		
	浸水	T ₁ -1	17.40	43.88			22.11	11.88			34.35	44.24		
		T ₁ -2	8.76	35.15	39.59	39.59	12.97	16.89	14.37	53.95	22.20	47.95	46.05	87.35
		T ₁ -3	10.84	39.72			14.75	14.33			23.56	45.95		

3 结 论

1) 毛细管作用导致平行煤岩吸水能力强于垂直煤岩。平行煤岩浸水4 h时吸水速度增大,最终自然极限吸水率是垂直煤岩的2.2倍。

2) 煤岩的力学性质和破坏模式受层理影响为主,受浸水影响相对较小。平行煤岩相比于垂直煤岩,峰值强度浸水前下降39.8%,浸水后下降34.4%,弹性模量浸水前下降21.5%,浸水后下降18%;相同层理方向煤岩浸水前后进行比较,垂直煤岩浸水后峰

值强度和弹性模量分别降低了7.7%和3.1%,平行煤岩浸水后峰值强度和弹性模量基本没有变化;破坏模式只与层理方向有关系,垂直煤岩为剪切破坏,平行煤岩为劈裂破坏,浸水不改变同种层理方向煤岩的破坏模式。

3) 煤岩破坏是由均匀变形向非均匀变形转换的过程,浸水煤岩较早出现应变集中区;浸水后压密阶段会延长,弹性变形阶段会缩短,沿层理面受压的煤岩一旦产生层理同方向的裂纹时,应当立即保护。

本文只针对轴向垂直层理和轴向平行层理煤岩两种情况的力学性质进行了研究,并未进行煤岩其他角度的力学性质研究,受篇幅影响,也仅讨论了煤岩浸水前后的力学性质变化规律,后期工作将进一步考虑多个层理角度煤岩反复浸水情况,更全面系统地探究浸水及层理对煤岩力学性质的影响。

参考文献(References):

- [1] CHENG Yuanping, PAN Zhejun. Reservoir properties of chinese tectonic coal: a review[J]. *Fuel*, 2020, 260: 116350.
- [2] 赵科. 煤体结构面剪切力学特性的数值模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(12): 89-95.
ZHAO Ke. Numerical simulation of shear mechanical properties of coal structural plane[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(12): 89-95.
- [3] 郝宪杰, 魏英楠, 杨科, 等. 煤储集层起裂强度和损伤强度的各向异性特征[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 211-221.
HAO Xianjie, WEI Yingnan, YANG Ke, *et al.* Anisotropy of crack initiation strength and damage strength of coal reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 211-221.
- [4] 卢志国, 鞠文君, 王浩, 等. 硬煤冲击倾向各向异性特征及破坏模式试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 757-768.
LU Zhiguo, JU Wenjun, WANG Hao, *et al.* Experimental study on anisotropic characteristics of impact tendency and failure model of hard coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 757-768.
- [5] SUN Changlun, LI Guichen, ZHANG Suhui, *et al.* Mechanical and heterogeneous properties of coal and rock quantified and mapped at the microscale[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(1): 342.
- [6] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(1): 1-7.
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 1-7.
- [7] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 11-18.
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, *et al.* Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 11-18.
- [8] 姜琳婧, 方杰, 杨宗, 等. 基于GIS与CAD的煤矿地下水库库容计算平台开发研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(11): 166-171.
JIANG Linjing, FANG Jie, YANG Zong, *et al.* Study on precision computing platform development of coal mine underground reservoir capacity based on GIS and CAD[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11): 166-171.
- [9] 李磊, 李宏艳, 李凤明, 等. 层理角度对硬煤冲击倾向性影响的实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(5): 987-994.
LI Lei, LI Hongyan, LI Fengming, *et al.* Experimental study of the effect of bedding angle on hard coal bursting liability[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(5): 987-994.
- [10] 刘忠玉, 董旭, 张旭阳. 分级循环荷载下层理煤岩力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S1): 2593-2602.
LIU Zhongyu, DONG Xu, ZHANG Xuyang. Experimental study on mechanical properties of bedding coal and rock under graded cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S1): 2593-2602.
- [11] 刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 308-316.
LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, *et al.* Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under brazilian splitting and uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 308-316.
- [12] 王伟, 赵毅鑫, 高艺瑞, 等. 层理和预制裂纹方向对煤断裂力学性质影响规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(3): 433-445.
WANG Wei, ZHAO Yixin, GAO Yirui, *et al.* Experimental research of influences of bedding and pre-crack directions on fracture characteristics of coal[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(3): 433-445.
- [13] 龚爽, 赵毅鑫, 王震, 等. 层理对煤岩动态裂纹扩展分形特征的影响[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2574-2582.
GONG Shuang, ZHAO Yixin, WANG Zhen, *et al.* Effect of bedding on the fractal characteristics of dynamic crack propagation in coal rocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2574-2582.
- [14] 陈田, 姚强岭, 杜茂, 等. 浸水次数对煤样裂隙发育损伤的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3756-3762.
CHEN Tian, YAO Qiangling, DU Mao, *et al.* Experimental research of effect of water intrusion times on crack propagation in coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3756-3762.
- [15] 汤传金. 干湿循环及酸性水环境影响下煤样损伤特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
TANG Chuanjin. Study on damage characteristics of coal under the influence of dryness-saturation cycles and acid water environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [16] 来兴平, 张帅, 代晶晶, 等. 水力耦合作用下煤岩多尺度损伤演化特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S2): 3217-3228.
LAI Xingping, ZHANG Shuai, DAI Jingjing, *et al.* Multi-scale damage evolution characteristics of coal and rock under hydraulic coupling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2): 3217-3228.
- [17] 姚强岭, 王伟男, 李学华, 等. 水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 558-569.
YAO Qiangling, WANG Weinan, LI Xuehua, *et al.* Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(3): 558-569.
- [18] 李波波, 王忠晖, 任崇鸿, 等. 水-力耦合下煤岩力学特性及损伤

- 本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 315-323.
- LI Bobo, WANG Zhonghui, Ren Chonghong, *et al.* Mechanical properties and damage constitutive model of coal under the coupled hydro-mechanical effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 315-323.
- [19] 唐书恒, 颜志丰, 朱宝存, 等. 饱和含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 37-41.
- TANG Shuheng, YAN Zhifeng, ZHU Baocun, *et al.* Acoustic emission characteristics of water-saturated coals in uniaxial compression experiment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 37-41.
- [20] 李建华. 煤矿地下水库储水浸泡对煤柱坝体强度影响的试验研究[J]. 煤矿开采, 2018, 23(3): 15-17.
- LI Jianhua. Experimental study of water storage soaking of coal mine underground reservoir to coal pillar dam body strength[J]. *Coal Mining Technology*, 2018, 23(3): 15-17.
- [21] 姚强岭, 郝琪, 陈翔宇, 等. 煤矿地下水库煤柱坝体宽度设计[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 891-899.
- YAO Qiangling, HAO Qi, CHEN Xiangyu, *et al.* Design on the width of coal pillar dam in coal mine groundwater reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 891-899.
- [22] 赵宇, 张玉贵, 于弘奕. 煤岩吸水率对声波速度各向异性影响的实验研究[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 999-1004.
- ZHAO Yu, ZHANG Yugui, YU Hongyi. Experimental study on the influence of water absorption rate of coal on the anisotropy of acoustic velocity[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(5): 999-1004.
- [23] 宋红华, 赵毅鑫, 姜耀东, 等. 单轴受压条件下煤岩非均质性对其破坏特征的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3125-3132.
- SONG Honghua, ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, *et al.* Influence of heterogeneity on the failure characteristics of coal under uniaxial compression condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3125-3132.
- [24] (美)森哲尔, (美)辛巴拉. 流体力学基础及其工程应用原书[M]. 第4版. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [25] ZHONG Chunlin, ZHANG Zhenyu, RANJITH P G, *et al.* The role of pore water plays in coal under uniaxial cyclic loading[J]. *Engineering Geology*, 2019, 257: 105125.
- [26] TANG Chuanjin, YAO Qiangling, LI Zhenyu, *et al.* Experimental study of shear failure and crack propagation in water-bearing coal samples[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(5): 2193-2204.