干燥及饱水粉砂岩劈裂过程阶段性力学响应*

张汉桥[1],张遵国[2],韩国庆[1],陈毅[2,3],年国兴[1],袁新立[2]

(1.黑龙江龙煤鹤岗矿业有限责任公司峻德煤矿, 黑龙江 鹤岗市 154100;
2.辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛市 125105;
3.葫芦岛渝庆矿山科技服务有限公司, 辽宁 葫芦岛市 125105)

摘要:为研究干燥及饱水粉砂岩劈裂过程阶段性力学响应特征,开展了巴西劈裂试验,建立了基于劈裂模量的岩石劈裂过程全应力-应变曲线阶段性划分方法,系统分析了各阶段应力特征值、应变特征值的响应规律及其力学机制。结果表明,水分显著影响了粉砂岩巴西劈裂过程的应力演化路径和应变发展路径;饱水试样压密应力、屈服应力、峰值应力和卸荷应力平均值分别降至干燥试样的62.65%、50.21%、48.93%和68.11%,压密阶段应力占比平均值增大28.50%,弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段应力占比平均值分别减小19.60%、41.35%和11.99%;饱水试样压密应变、屈服应变、峰值应变和卸荷应变平均值较干燥试样分别减小4.12%、19.26%、20.70%和17.92%,压密阶段应变占比平均值增大20.38%,弹性阶段和屈服阶段应变占比平均值分别减小29.64%和36.93%,破坏阶段应变占比平均值增大347.73%,饱水处理增强了试样劈裂过程的塑性特征;饱水处理后粉砂岩弯曲能量指数减小73.77%,冲击倾向性由Ⅲ类降为Ⅱ类。研究结果可为深部矿井顶板注水软化防冲技术提供理论依据。

关键词:饱水粉砂岩;巴西劈裂;力学响应;应力特征值;应变特征值

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0185-07

Stage Mechanical Response During Splitting Process of Dry and Water-Saturated Siltstone

Zhang Hanqiao[1], *Zhang Zunguo*[2], *Han Guoqing*[1], *Chen Yi*[2,3], *Nian Guoxing*[1], *Yuan Xinli*[2]

(1.Junde Coal Mine, Heilongjiang Longmei Hegang Mining Co., Ltd., Hegang, Heilongjiang 154100, China;
2.Safety Science and Engineering College, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China;
3.Huludao Yuqing Mining Technology Service Co., Ltd., Huludao, Liaoning 125105, China)

Abstract: In order to study the stage mechanical response characteristics of dry and water-saturated siltstone during splitting process, Brazilian splitting test was carried out, and the stage division method of full stress-strain curve of rock splitting process based on splitting modulus was established. The response law and mechanical mechanism of stress characteristic value and strain characteristic value in each stage were systematically analyzed. The results show that water significantly affects the stress evolution path and strain development path of Brazilian splitting process in siltstone. The average values of compaction stress, yield stress, peak stress and unloading stress of water-saturated samples decrease to 62.65%, 50.21%, 48.93% and 68.11% of dry samples, respectively. The average value of stress ratio in compaction stage increases by 28.50%, and the average values of stress ratio in elastic stage, yield stage and failure stage decrease by 19.60%, 41.35% and 11.99%, respectively. The average values of compaction strain, yield strain, peak strain and unloading strain of water-saturated samples are 4.12%, 19.26%, 20.70% and 17.92% lower than those of dry samples, respectively. The average value of strain ratio in compaction stage increases by 20.38%. The average values of strain ratio in elastic stage and yield stage decrease by 29.64% and 36.93%, respectively, and the average value of strain ratio in failure stage increases by 347.73%. Saturated treatment enhances the plastic characteristics of splitting process. After saturated treatment, the bending energy index of siltstone decrease by 73.77%, and the impact tendency decrease from class Ⅲ to class Ⅱ. The research results can provide theoretical basis for water injection softening and anti-impact technology of deep mine roof.

Key words: Water-saturated siltstone, Brazilian split, Mechanical response, Stress characteristic value, Strain characteristic value

---

* **收稿日期**:2025-05-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704147),辽宁省教育厅科学研究资助项目(LJKZ0345)
作者简介:张汉桥(1969—),男,黑龙江鹤岗人,高级工程师,主要从事煤矿开采与安全技术方面的研究。E-mail:791080964@qq.com
通信作者:张遵国(1986—),男,重庆大足人,博士,副教授,主要从事矿井灾害防治方面的研究。E-mail:zhang_zung@163.com

0 引言

随着浅部资源枯竭,我国的金属矿井与非金属矿井相继步入深部开采阶段,在深部岩体“三高一扰动”的复杂力学环境影响下,冲击地压防控、围岩稳定性与岩层控制已成为矿井关注的核心安全问题[1-2]。由于岩石抗拉强度远低于抗压强度,工程岩体破坏多以拉应力破坏为主,抗拉强度已成为顶板冲击倾向性判识的关键参数[3]。基于注水软化防冲机理[4],以典型坚硬顶板岩层粉砂岩为对象,研究巴西劈裂试验下干燥及饱水粉砂岩阶段性力学响应,对深部矿井冲击地压防治具有重要的理论价值和工程意义。

国内外学者针对水分对岩石抗拉强度的弱化特征开展了大量研究,目前,水分对岩石抗拉强度及破坏形式的影响仍存在争议。黄彦华等[5]发现水分对岩石抗拉强度的影响有限,且对岩石荷载-位移曲线形态及破裂机制未产生本质改变,饱水试样仍表现为脆性破坏特征。而更多研究表明试样在含水状态下会显著弱化其抗拉强度,腾俊洋等[6]发现层状岩体中层理角度与含水率对抗拉强度具有协同弱化效应,水分虽然对巴西劈裂破坏模式影响不大,但会促进次生裂纹的形成。张恒源等[7]证实水会促进试样张拉裂纹发育。而张村等[8-9]则认为水分会改变试样的破裂机制,相较于干燥试样饱水试样的拉伸破坏表现出一定的塑性特征,且水对裂纹扩展具有诱导作用,导致劈裂面粗糙度和分形维数随含水率增加而增大。

综上所述,以往研究成果普遍聚焦于水分对岩石力学强度的弱化作用及对破坏机制的影响,缺少对巴西劈裂试验下岩石非线性力学特征的研究。岩石受载并非仅产生线弹性变形,其应力-应变曲线关系表现出强烈的非线性行为,具有包括压密阶段、弹性阶段、屈服阶段及破坏阶段的阶段性特征,呈现力学机制的阶段性响应[10]。对应力-应变曲线进行阶段性划分,为解构巴西劈裂过程岩石非线性力学响应的物理本质提供了关键科学方法,对研究岩石劈裂过程各阶段弹-塑性力学特性的转变机制、揭示岩石变形特征(应变特征值)与宏观力学参数(应力特征值)的定量关联、深化对岩石非线性力学行为的认识具有重要理论价值。鉴于此,本文借鉴前人所提劈裂模量的思路,结合全应力-应变曲线特征,建立岩石巴西劈裂过程的阶段性划分方法,并对干燥和饱水粉砂岩劈裂过程各阶段的应力特征值和应变特征值进行准确划分,分析应力和应变的阶段性响应特征及对应的力学机制,研究成果对指导顶板注水软化技术具有一定的工程意义。

1 粉砂岩劈裂过程阶段性划分方法

目前已有研究认识到岩石劈裂过程存在显著的阶段性力学特征,并基于全应力-应变曲线将其划分为压密阶段(阶段Ⅰ)、弹性阶段(阶段Ⅱ)、屈服阶段(阶段Ⅲ)及破坏阶段(阶段Ⅳ)4个典型阶段[9]。但以往研究普遍不涉及劈裂过程各阶段转变的定量判别标准,多采用定性方法阐释各阶段的力学响应特征。基于此,采用劈裂模量(全应力-应变过程应力与应变的比值,$E=\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$)衡量劈裂过程中试样的变形能力[11],通过劈裂模量和应力-应变曲线明显的分段特征,从力学强度演化角度对劈裂过程各阶段进行准确划分。劈裂过程全应力-应变曲线阶段划分如图1所示,对应的阶段划分及应力/应变特征值确定方法见表1。

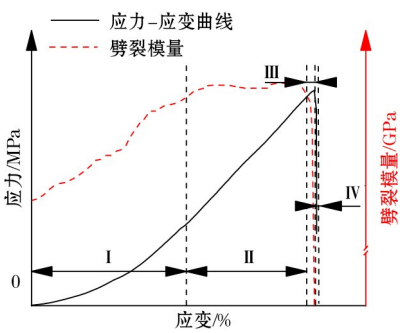


图1 全应力-应变曲线阶段划分

Fig.1 Stage division for the full stress-strain curve

表1 劈裂过程全应力-应变曲线阶段划分及应力/应变特征值确定方法

Table 1 Stage division of the full stress-strain curve and determination method of stress/strain characteristic values during the splitting process

阶段划分	确定方法	应力/应变特征值	确定方法
压密阶段	劈裂模量随应力加载逐渐增大	压密应力/应变	试样进入弹性阶段起始点的应力/应变
弹性阶段	劈裂模量随应力加载趋于稳定,波动小于最大劈裂模量的10%	屈服应力/应变	试样进入屈服阶段起始点的应力/应变
屈服阶段	劈裂模量随应力加载显著减小,减小幅度大于最大劈裂模量的10%	峰值应力/应变	试样峰值破坏处的应力/应变
破坏阶段	劈裂模量为负值,应力大幅跌落	卸荷应力/应变	试样失稳破坏后的应力/应变

压密阶段(阶段Ⅰ):应力加载初期,试样内部的孔隙、裂隙随应力增加逐渐闭合[12],外力做功主要用于克服颗粒间摩擦力并改变孔隙、裂隙结构,通过产生不可逆的塑性变形将能量耗散。此时试样颗粒间摩擦与咬合作用增强,密实度提高,劈裂模量随应力增加而增大,全应力-应变曲线表现为上凹型,非线性特征明显。

弹性阶段(阶段Ⅱ):当孔隙、裂隙被压密后,受应力持续作用试样进入弹性阶段,之后试样应力-应变曲线呈线性增长,将试样进入弹性阶段起始点的应力称为压密应力,对应的应变为压密应变。劈裂模量达到最大值并基本稳定,即试样的劈裂弹性模量。外力做功转化为弹性能储存于岩石内部。以物理力学试验常用的10%误差限为基准[13],当劈裂模量波动小于最大劈裂模量的10%时,认为劈裂模量基本稳定。

屈服阶段(阶段Ⅲ):当应力超过弹性极限后,岩石内部缺陷处(孔隙、裂隙及胶结薄弱区)应力集中导致裂隙萌生,部分弹性应变能转化为裂隙表面能及塑性变形能,试样内部开始产生微裂隙,裂纹成核并逐渐扩展[9,14]。裂隙密度增加使试样有效受力面积减少,宏观表现为劈裂模量逐渐降低,当劈裂模量降幅大于最大劈裂模量的10%时,认为试样进入屈服阶段。试样变形由弹性主导转向弹塑性共存,局部区域出现塑性屈服。将试样进入屈服阶段起始点的应力称为屈服应力,对应的应变为屈服应变。对应的应力-应变曲线表现为下凹型,应力仍随着应变增加而增大,但增加速率逐渐减缓。

破坏阶段(阶段Ⅳ):当应力超过试样的承载极限后,加载过程储存的弹性能快速释放,使裂隙加速扩展并相互贯通,试样发生劈裂破坏,应力随应变增加大幅跌落,应力-应变曲线斜率为负(劈裂模量为负值)。此时的应力称为峰值应力,对应的应变为峰值应变。需要注意的是,由于岩样取自强冲击倾向性岩层,岩样瞬间失稳破坏导致的应力急速降低启动了电子万能材料试验机的保护机制,因此无法采集到岩样的残余应力和残余应变。为更好地进行区分,将试样失稳破坏后的应力称为卸荷应力,应变称为卸荷应变,该参数也能一定程度反映岩样失稳破坏后的力学性能。

2 试验方案

2.1 试样采集

粉砂岩取自黑龙江龙煤鹤岗矿业有限责任公司峻德煤矿93172工作面直接顶,根据《冲击地压测定、监测与防治方法 第1部分:顶板岩层冲击倾向性分类及指数的测定方法》(GB/T 25217.1—2010),采用式(1)计算得到试样弯曲能量指数为149.54 kJ(>120 kJ),属于Ⅲ类强冲击倾向性岩层,具体测定结果见表2。

$$U_{WQ}=102.6\frac{(R_t)^{\frac{5}{2}}h^2}{q^{\frac{1}{2}}E_0} \tag{1}$$

式中:U_{WQ}为顶板弯曲能量指数,kJ;R_t为试样的抗拉强度,MPa;h为单一顶板厚度,m;q为单位宽度上覆岩层载荷,MPa;E_0为岩石试件的弹性模量,MPa。

表2 粉砂岩冲击倾向性测定结果

Table 2 Measurement results of bursting liability of siltstone

抗拉强度/MPa	顶板厚度/m	弹性模量/GPa	单位宽度上覆岩层载荷/MPa	弯曲能量指数/kJ	测定结果
4.62	14.10	10.53	0.35	149.54	Ⅲ类强冲击倾向性

2.2 试样制备

将采集的岩块密封后运往实验室,参照《煤和岩石物理力学性质测定方法 第10部分:煤和岩石抗拉强度测定方法》(GB/T 23561.10—2010)对岩样加工处理并开展试验,岩样加工处理流程如下。

(1) 加工过程:首先采用取芯机从岩块中钻取直径50 mm的岩芯,然后通过切割机切割为高26 mm左右的巴西圆盘,最后启动双端面磨平机将试件打磨为直径50 mm、高25 mm的标准试件。

(2) 筛选过程:首先对试件进行初筛,剔除质地不均或含裂隙岩样,然后采用NM-4A超声波无损探伤仪对试件进行波速测试,筛选出波速在3.9~4.1 km/s范围内的试件,减小试样的离散性。

(3) 处理过程:参照《煤和岩石物理力学性质测定方法 第3部分:煤和岩石块体密度测定方法》(GB/T 23561.3—2009)制备干燥及饱水试样。

干燥试样:将岩样置于干燥箱中,在108 ℃温度下烘干24 h后,每隔1 h采用电子天平称重,当前后两次质量差值小于0.01 g时,判定试件干燥,取出放在干燥皿中冷却至室温。

饱水试样:将岩样置于真空饱和缸内,各岩样间距不小于2 cm;然后开启真空泵,抽气20~30 min后缓慢将水注入真空饱和缸,直到高出试件1~2 cm后继续抽真空12 h以上(直到试件表面无气泡产生),真空度低于0.001 MPa;最后取出真空罐里的试件,全

部浸入盛水的容器中静置 24 h 制得饱水试样。

2.3 巴西劈裂试验

为研究水对粉砂岩的力学软化作用及对劈裂过程阶段性力学响应的影响,设计因子试验,对干燥和饱水粉砂岩开展巴西劈裂试验,分析其应力和应变的阶段性响应特征和对应的力学机制。巴西劈裂试验采用专用夹具进行,通过 UTM5105X 电子万能材料试验机施加载荷,该装置载荷上限为 100 kN,精度等级为 0.5 级,位移控制速率范围为 0.001～500 mm/min,变形测量精度为±0.5%,利用监测系统实时采集试验过程中的载荷和变形数据。根据《煤和岩石物理力学性质测定方法 第 10 部分:煤和岩石抗拉强度测定方法》(GB/T 23561.10—2010),粉砂岩试样巴西劈裂试验步骤如下。

(1) 在岩样端面中心处粘贴 BE120-5AA 电阻式应变计,测定加载过程岩样的应变数据,同时在岩样端面直径的两端各画一条平行于轴线的直线作为加载基线。

(2) 将岩样置于夹具内,夹具上、下刀刃对准加载基线,通过两侧限位杆固定岩样,然后将夹具放置于万能材料试验机承压平台的中心,使夹具刀刃、岩样加载基线和材料试验机中心线位于一条中垂线上。

(3) 启动万能材料试验机,在室温环境开展巴西劈裂试验(温度 10 ℃,湿度 49%)。施加 0.5 kN 的初始压力,确保岩样夹稳后,松开夹具两侧限位杆,然后以 0.03 MPa/s 的恒定速率分别对干燥和饱水试件进行加载,直至试件发生破坏。

通过式(2)将试验过程的载荷转换为拉应力,结合采集的实时应变数据得到试样的应力-应变曲线,当试样在纵向力的作用下出现拉伸破坏时,对应的拉应力为试样的单轴抗拉强度。

$$\sigma_t=\frac{2P}{\pi DH} \tag{2}$$

式中:σ_t 为拉应力,试样达到破坏载荷时对应的计算结果为抗拉强度,MPa;P 为载荷,N;D 为试样直径,mm;H 为试样高度,mm。

3 试验结果分析

根据劈裂过程阶段性划分方法,对劈裂加载下干燥及饱水粉砂岩的全应力-应变曲线进行阶段性划分,划分结果如图 2 所示。

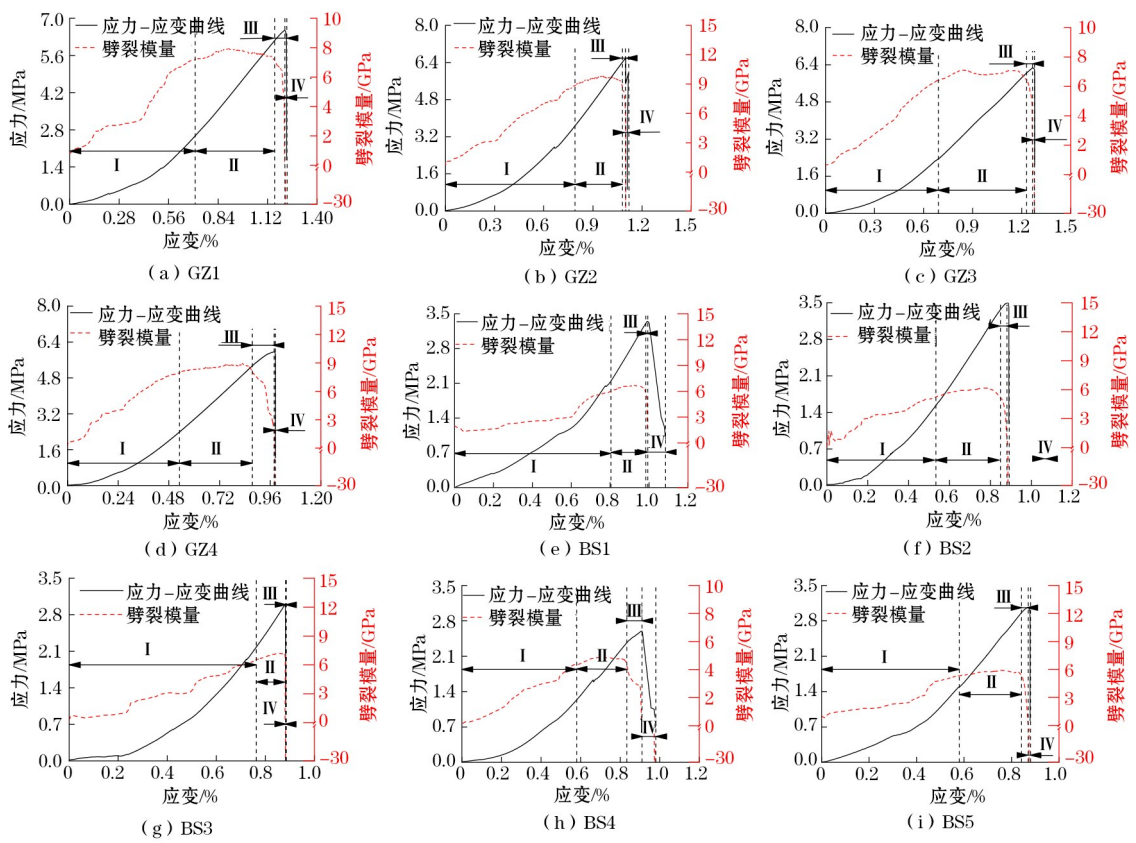


图 2 干燥及饱水试件全应力-应变过程阶段性划分曲线

Fig.2 The stage division curves in the full stress-strain process of dry and water-saturated samples

3.1 劈裂过程应力阶段性特征

根据阶段划分结果,对各阶段应力区间的终点值与初始值求差后除以峰值应力,得出各阶段的应力占比,计算结果见表3。

表3 各阶段应力占比计算结果

Table 3 Calculation results of stress proportion at each stage

试件编号	含水状态	含水率/%	压密应力/MPa	阶段Ⅰ占比/%	屈服应力/MPa	阶段Ⅱ占比/%	峰值应力/MPa	阶段Ⅲ占比/%	卸荷应力/MPa	阶段Ⅳ占比/%
GZ1	干燥	0.00	2.58	39.45	6.13	54.28	6.54	6.27	1.66	74.62
GZ2			3.68	56.01	6.40	41.40	6.57	2.59	0.94	85.69
GZ3			2.36	37.70	6.06	59.11	6.26	3.19	2.09	66.61
GZ4			2.40	40.20	5.31	48.74	5.97	11.06	1.23	79.40
BS1	饱水	1.82	2.15	64.18	3.30	34.33	3.35	1.49	1.02	69.55
BS2		1.71	1.54	44.00	3.37	52.29	3.50	3.71	1.19	66.00
BS3		1.79	2.19	73.00	3.00	27.00	3.00	0.00	1.11	63.00
BS4		1.58	1.25	48.26	2.37	43.24	2.59	8.50	0.90	65.25
BS5		1.83	1.50	49.02	2.96	47.71	3.06	3.27	0.82	73.20

由表3可知,干燥及饱水试样全应力-应变曲线各阶段应力特征值存在显著差异。饱水试样压密应力、屈服应力、峰值应力和卸荷应力平均值分别降至干燥试样的62.65%、50.21%、48.93%和68.11%。同时,水分对试样的应力演化路径产生了明显影响,饱水状态下,试样压密阶段应力占比平均值由干燥状态的43.34%增大到55.69%,增大幅度为28.50%;弹性阶段应力占比平均值由50.88%减小到40.91%,减小幅度为19.60%;屈服阶段应力占比平均值由5.78%减小到3.39%,减小幅度为41.35%,破坏阶段应力占比平均值由76.58%减小到67.40%,减小幅度为11.99%。

显然,水分的存在弱化了岩样力学强度,使饱水岩样各阶段应力特征值显著降低;岩样的塑性特征增强,表现为饱水试样压密阶段应力占比增大,弹性变形阶段应力占比减小。此外,饱水改变了岩样的破坏形式,使饱水岩样弹性阶段与塑性阶段的界限变得模糊,屈服阶段应力占比减小,且试样达到峰值强度后仍保留一定的承载能力,表现出明显的峰后破坏特征,破坏形式由瞬时脆性断裂转变为延性渐进破坏。

3.2 劈裂过程应变阶段性特征

根据阶段划分结果,对各阶段应变区间的终点值与初始值求差后除以总应变,得出各阶段在全应力-应变过程中的应变占比,计算结果见表4。

表4 各阶段应变占比计算结果

Table 4 Calculation results of strain proportion at each stage

试件编号	含水状态	含水率/%	压密应变/MPa	阶段Ⅰ占比/%	屈服应变/MPa	阶段Ⅱ占比/%	峰值应变/MPa	阶段Ⅲ占比/%	卸荷应变/MPa	阶段Ⅳ占比/%
GZ1	干燥	0.00	0.71	58.20	1.16	36.89	1.22	4.91	1.23	0.81
GZ2			0.79	71.82	1.08	26.36	1.10	1.82	1.11	0.90
GZ3			0.69	54.33	1.23	42.52	1.27	3.15	1.28	0.78
GZ4			0.53	54.08	0.87	34.69	0.98	11.23	0.99	1.01
BS1	饱水	1.82	0.81	81.82	0.98	17.17	0.99	1.01	1.09	9.17
BS2		1.71	0.53	60.23	0.85	36.36	0.88	3.41	0.89	1.12
BS3		1.79	0.76	86.36	0.88	12.64	0.88	0.00	0.89	1.12
BS4		1.58	0.58	63.74	0.83	27.47	0.91	8.79	0.98	7.14
BS5		1.83	0.58	66.67	0.84	29.89	0.87	3.45	0.88	1.14

由表4可知,干燥及饱水试样全应力-应变过程各阶段应变特征值存在显著差异。饱水试样压密应变、屈服应变、峰值应变和卸荷应变平均值较干燥试样分别减小了4.12%、19.26%、20.70%和17.92%。同时,水分同样对试样的应变发展路径产生了影响,饱水状态下,试样压密阶段应变占比平均值由干燥状态的59.61%增大到71.76%,增加幅度为20.38%。对应的弹性阶段应变占比平均值由35.12%减小到24.71%,减小幅度为29.64%。屈服阶段应变占比平均值由5.28%减小到3.33%,减小

幅度为 36.93%。破坏阶段应变占比平均值由 0.88%增大到 3.94%,增大幅度为 347.73%。

显然,水分的存在加深了孔隙闭合程度,使饱水岩样在更低的压密应力下产生更大的压密应变;弱化了岩石结构刚度,使饱水岩样弹性变形阶段缩短,更早进入屈服阶段;加速了损伤累积进程,使饱水岩样更易达到峰值应变;延缓了脆性破坏进程,使饱水岩样峰后破坏阶段的应变占比显著提高。

4 讨论

水分对试样劈裂过程阶段性力学特征的影响是水-岩作用下试样内部结构演化与力学效应耦合的结果,其核心表现为对粉砂岩的应力演化路径和应变发展路径的影响。通过对比干燥与饱水试样巴西劈裂全应力-应变过程应力特征值、应变特征值以及应力-应变的分阶段特征,能够揭示水分介入对岩石非线性力学的调控规律。研究表明,水分主要以结合水和自由水两种形式存在于岩石中。其中结合水通过吸附于基质表面引发胶体和可溶盐之间的水解反应,进而削弱岩石颗粒间的连接作用力并减小摩擦力[15],软化试件的力学强度。具体表现为显著降低试样的抗压密能力,促使孔隙更易闭合,导致饱水试样在更低的压密应力下产生更大的压密应变;增强试样塑性变形能力,促使更多变形能量耗散于试样内部结构调整;削弱了弹性储能能力,使材料更早进入屈服阶段。在应力不断增加的条件下,自由水产生孔隙水压力,使试样孔隙、裂隙端部处于拉应力集中状态,促使孔隙、裂隙扩展,加速损伤累积进程,更多应力用于驱动岩样发生塑性屈服变形。结合水和自由水共同作用加剧了试件的破坏损伤[16],使饱水试样更容易达到峰值应变,裂隙加速扩展并相互贯通,最终发生劈裂破坏。此外,饱水试样较干燥煤样表现出明显的峰后破坏特征。综上所述,饱水使试样劈裂破坏由瞬时脆性断裂向延性渐进破坏转变,且使试样劈裂过程变形机制由弹性主导向弹-塑性主导转变。这种转变在应变参数上表现为初始压密强化、弹性储能弱化、破坏过程加速的三阶段特征。

顶板注水软化技术通过水岩相互作用显著改善粉砂岩力学行为,成为防治冲击地压灾害的重要手段。如前所述,水分的存在一方面通过减小试样颗粒间摩擦力、弱化岩石结构刚度,增加试样压密阶段应力和应变占比,通过软化试样力学强度抑制其弹性储能能力;另一方面通过增强塑性耗能和延长破坏阶段,将能量释放模式从瞬时脆性断裂转变为渐进延性破坏,通过双重作用实现“弱化储能-塑性耗能-可控破坏”的冲击地压防控链条。由式(1)计算得出饱水试样弯曲能量指数为 39.23 kJ,较原弯曲能量指数降低了 73.77%,岩层冲击倾向性由Ⅲ类强冲击倾向性岩层转变为Ⅱ类弱冲击倾向性岩层。显然,注水能有效降低粉砂岩冲击倾向性。目前,黑龙江龙煤鹤岗矿业有限责任公司峻德煤矿 93172 工作面采用煤层预注水、煤层大直径钻孔、顶板预裂爆破进行冲击地压治理,其中,顶板仅单一采用预裂爆破措施,今后可增加采用顶板注水措施,进一步提高防冲效果。

5 结论

(1) 结合劈裂模量和全应力-应变曲线明显的分段特征,建立了劈裂过程全应力-应变曲线的阶段性划分方法。

(2) 饱水处理显著弱化了试样劈裂过程的力学特征。饱水试样压密应力、屈服应力、峰值应力和卸荷应力平均值分别降至干燥试样的 62.65%、50.21%、48.93%和 68.11%,压密阶段应力占比平均值增大 28.50%,弹性阶段应力占比平均值减小 19.60%,屈服阶段应力占比平均值减小 41.35%,破坏阶段应力占比平均值减小 11.99%。

(3) 饱水处理增强了试样劈裂过程的塑性特征。饱水试样压密应变、屈服应变、峰值应变和卸荷应变平均值较干燥试样分别减小了 4.12%、19.26%、20.70%和 17.92%,压密阶段应变占比平均值增大 20.38%,弹性阶段应变占比平均值减小 29.64%,屈服阶段应变占比平均值减小 36.93%,破坏阶段应变占比增大 347.73%。

(4) 饱水处理后粉砂岩的弯曲能量指数由 149.54 kJ 降至 39.23 kJ,降低 73.77%,冲击倾向性由Ⅲ类强冲击倾向性降为Ⅱ类弱冲击倾向性,验证了顶板注水软化技术在降低冲击地压风险方面的有效性。

参考文献(References):

[1] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.
He Manchao, Wu Yiyi, Gao Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(1):75-99.

[2] 王勇，吴爱祥，杨军，等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报，2023，45(8)：1281-1292.
Wang Yong，Wu Aixiang，Yang Jun，et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering，2023，45(8)：1281-1292.

[3] 范清涵.岩石直接拉伸试验对中装置研制与拉伸细观破裂机理研究[D].济南：山东大学，2023.
Fan Qinghan. Development of rock direct tensile centring device and study on the micro fracture mechanism of rock stretching[D]. Jinan：Shandong University，2023.

[4] 王其虎，李炎，姚团，等.晒旗河磷矿岩爆防治注水参数优化[J].矿业研究与开发，2025，45(1)：9-16.
Wang Qihu，Li Yan，Yao Nan，et al. Optimization of water injection parameters for prevention and control of rock burstin Shaiqihe Phosphate Mine[J]. Mining Research and Development，2025，45(1)：9-16.

[5] 黄彦华，杨圣奇.饱水灰岩巴西试验准静态加载应变率效应研究[J].岩土工程学报，2015，37(5)：802-811.
Huang Yanhua，Yang Shengqi. Quasi-static loading strain rate effects on saturated limestone based on Brazilian splitting test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2015，37(5)：802-811.

[6] 腾俊洋，唐建新，张闯.层状含水页岩的抗拉强度特性试验研究[J].岩土力学，2018，39(4)：1317-1326.
Teng Junyang，Tang Jianxin，Zhang Chuang. Experimental study on tensile strength of layered water-bearing shale[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(4)：1317-1326.

[7] 张恒源，郭佳奇，孙飞跃，等.不同试验条件和含水状态下花岗岩的声发射与破裂演化特征[J].高压物理学报，2022，36(6)：77-91.
Zhang Hengyuan，Guo Jiaqi，Sun Feiyue，et al. Acoustic emission and fracture evolution characteristics of granite under different testing and moisture conditions[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2022，36(6)：77-91.

[8] 张村，王潇杰，师旭涛，等.含水饱和度影响下砂岩劈裂特性与水岩作用机制[J].岩石力学与工程学报，2024，43(增刊2)：3722-3737.
Zhang Cun，Wang Xiaojie，Shi Xutao，et al. Splitting characteristics of sandstone under the influence of water saturation and its mechanism of water rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(Suppl.2)：3722-3737.

[9] 张村，王磊，王潇杰，等.含水率影响下煤体巴西劈裂特性与弱化机制[J].采矿与安全工程学报，2024，41(2)：362-371.
Zhang Cun，Wang Lei，Wang Xiaojie，et al. Brazilian splitting characteristics and weakening mechanism of coal under the influence of water content[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2024，41(2)：362-371.

[10] 卿少帅，陈新，马伯涛.节理尺寸对岩体非线性力学行为的影响研究[J].金属矿山，2023(6)：1-12.
Qing Shaoshuai，Chen Xin，Ma Botao. Study on influence of joint size on nonlinear mechanical behavior of rock masses with discontinuous joints[J]. Metal Mine，2023(6)：1-12.

[11] 张燕，于大伟，叶剑红.岩石类材料拉伸弹性模量测量方法的对比研究[J].岩土力学，2018，39(6)：2295-2303.
Zhang Yan，Yu Dawei，Ye Jianhong. Study on measurement methodology of tensile elastic modulus of rock materials[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(6)：2295-2303.

[12] 陈岩，王嘉豪，邓良涛，等.不同加载速率对煤岩组合体巴西劈裂特性的影响[J].河南理工大学学报(自然科学版)，2025，44(1)：29-36.
Chen Yan，Wang Jiahao，Deng Liangtao，et al. Effects of varying loading rates on the Brazilian splitting characteristics of coal-rock composites[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)，2025，44(1)：29-36.

[13] 艾池，张军，李玉伟，等.不同劈裂角度下煤岩抗拉强度理论计算与试验研究[J].煤矿安全，2015，46(7)：20-23.
Ai Chi，Zhang Jun，Li Yuwei，et al. Theoretical calculation and experimental research on tensile strength of coal rock under different splitting angles[J]. Safety in Coal Mines，2015，46(7)：20-23.

[14] 邓龙传，李晓昭，吴云，等.基于巴西劈裂试验的砂岩热损伤及声发射特征研究[J].工程地质学报，2023，31(1)：1-11.
Deng Longchuan，Li Xiaozhao，Wu Yun，et al. Thermal damage of sandstone and acoustic emission based on Brazilian splitting test[J]. Journal of Engineering Geology，2023，31(1)：1-11.

[15] Zhang Cun，Bai Qingsheng，Han Penghua，et al. Strength weakening and its micromechanism in water-rock interaction，a short review in laboratory tests[J]. International Journal of Coal Science and Technology，2023，10(1)：10.

[16] Li Hongru，Shen Rongxi，Wang Enyuan，et al. Effect of water on the time-frequency characteristics of electromagnetic radiation during sandstone deformation and fracturing[J]. Engineering Geology，2020，265：105451.