

真三轴动静组合加载饱水煤样能量耗散特征

宋常胜^{1,2}, 王 文^{1,2}, 刘 凯³, 袁瑞甫^{1,2}, 张世威⁴, 李东印^{1,2}, 李化敏^{1,2}, 康迎春⁵

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2.煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3.牛津大学 工程科学系, 牛津郡 牛津市 OX1 3PJ; 4.深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 5.安标国家矿用产品安全标志中心有限公司, 北京 100013)

摘 要:煤矿冲击地压发生与煤岩的物理力学性质、所受静载荷与动载荷的结构失稳等因素有关。煤岩体失稳过程伴随着能量的吸收、储存、转换和释放, 现场煤岩体破坏是受多种环境影响下的复杂过程, 较难完成定量描述煤岩体释放吸收能量的大小, 真三轴动静组合加载条件煤岩变形破坏的机理和能量耗散特征值得深入研究。采用真三轴动静载霍普金森冲击加载系统对自然与饱水 2 种状态煤样进行不同动静组合加载试验, 通过试验分析 2 种状态煤样真三轴动静组合加载变形破坏过程中各能量变化规律及占比特征。试验结果表明: 通过饱水处理能够降低煤样对弹性能量的储存能力, 饱水煤样的能量反射率比自然煤样高 17.25%~37.04%, 在相同 Y 轴静载作用下自然煤样的能量吸收率比饱水煤样高 17.13%~55.95%; 揭示了自由水在煤样裂隙中抑制能量的透射率, 使入射能以反射能的方式进行无用耗散, 减小煤样的能量吸收率; 自然煤样的能耗密度大于饱水煤样, 在冲击加载 X 方向煤样能耗密度与峰值动态应力呈正相关, 在 Y, Z 轴方向呈负相关。证实了水在三维动静组合加载作用下对煤样吸能破坏的诱导作用, 冲击能量在煤样中被煤样和水吸收, 煤样吸收能量用于诱导形成新的裂隙, 形成煤样宏观破坏, 水吸收能量用于新旧裂隙的相互贯通, 形成煤样内部微观结构破坏。

关键词: 能量耗散; 饱水煤样; 真三轴 SHPB; 煤矿冲击地压; 破坏特征

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2022)05-2011-16

Energy dissipation characteristics of water saturated coal samples under true triaxial dynamic and static combined loading

SONG Changsheng^{1,2}, WANG Wen^{1,2}, LIU Kai³, YUAN Ruifu^{1,2}, ZHANG Shiwei⁴,
LI Dongyin^{1,2}, LI Huamin^{1,2}, KANG Yingchun⁵

(1.School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2.Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China; 3.Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford OX13PJ, UK; 4.College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 5.China Mining Products Safety Approval and Certification Center, Beijing 100013, China)

Abstract: The occurrence of rockburst in coal mines is related to the physical and mechanical properties of coal and rock, the structural instability of static load and dynamic load, and so on. The instability process of coal and rock mass

收稿日期: 2022-01-12 修回日期: 2022-04-14 责任编辑: 郭晓伟 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0056

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604093); 河南省高校科技创新团队资助项目(212102310603); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目(2019GGJS053)

作者简介: 宋常胜(1977—), 男, 江苏睢宁人, 副教授, 博士。Tel: 0391-3986291, E-mail: songcole@hpu.edu.cn

通讯作者: 王 文(1983—), 男, 河南永城人, 副教授, 博士生导师, 博士。Tel: 0391-3987937, E-mail: wangwen2006@hpu.edu.cn

引用格式: 宋常胜, 王文, 刘凯, 等. 真三轴动静组合加载饱水煤样能量耗散特征[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 2011-2026.

SONG Changsheng, WANG Wen, LIU Kai, et al. Energy dissipation of saturated coal specimen by using a true triaxial Hopkinson bar system[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 2011-2026.



移动阅读

is accompanied by energy absorption, storage, conversion and release. The on-site coal and rock mass failure is a complex process under the influence of various environments. It is difficult to quantitatively describe the amount of energy released and absorbed by coal and rock mass. The mechanism and energy dissipation characteristics of coal and rock deformation and failure under true triaxial dynamic and static combined loading are worthy of in-depth study. The real triaxial dynamic and static loading Hopkinson impact loading system is used to carry out the dynamic and static combined loading test of natural and saturated coal samples. Through the test, the variation law and proportion characteristics of energy in the deformation and failure process of real triaxial dynamic and static combined loading of coal samples in two states are analyzed. The test results show that the elastic energy storage capacity of coal samples can be reduced after water saturated treatment. The energy reflectivity of water saturated coal samples is 17.25% - 37.04% higher than that of natural coal samples. Under the same Y -axis static load, the energy absorption rate of natural coal samples is 17.13%-55.95% higher than that of water saturated coal samples. It is revealed that free water inhibits the energy transmittance in the coal sample cracks, makes the incident energy dissipate uselessly in the form of reflected energy, and reduces the energy absorption rate of the coal sample. The energy consumption density of natural coal samples is higher than that of water saturated coal samples. In the X direction of impact loading, the energy consumption density of the coal sample shows a positive correlation with the peak dynamic stress, and a negative correlation in the Y, Z axis direction. It is confirmed that water induces the energy absorption failure of coal samples under three-dimensional dynamic and static combined loading. The impact energy is absorbed by the coal sample and water in the coal sample. The energy absorbed by the coal sample is used to induce the formation of new cracks and form the macro damage of the coal sample, while the energy absorbed by water is used to connect the old and new cracks and form the microstructure damage inside the coal sample.

Key words: energy dissipation; saturation coal specimen; true triaxial SHPB; rockburst of coal mines; failure modes

随着煤矿开采深度和开采强度的增大,冲击地压动力灾害越来越频繁,越来越严重。研究表明,冲击地压发生与煤岩物理力学性质、煤岩所受静载荷与动载荷等因素有关^[1-2]。煤层注水是防治冲击地压的一种主要措施,国内学者较早研究饱水对煤系地层岩石物理力学性质和破坏能量的影响,认为注水软化显著改善了能量释放的均匀性和稳定性,饱水后煤岩储蓄能量的能力有较大减弱,塑性明显增强^[3-6],煤岩动静组合加载失稳诱发冲击地压的应力和能量条件已成为研究的热点。

李夕兵提出动静组合加载岩石力学的学术概念,并开展了不同岩石一维、三维动力特性试验研究^[7-8]。国内外学者采用改造 Inston 实验系统、霍普金森压杆(以下简称 SHPB)实验系统等实现岩石动静组合加载,李夕兵等^[9]研发了新型动静组合加载 SHPB 测试系统,该系统进行了较多煤岩的动力学强度及能量耗散试验研究。

采用自制冲击系统、分离式 SHPB 和改进三维 SHPB 进行煤岩动静组合加载试验,从冲击应变率、长径比、静载、轴压和含水状态等角度进行能量耗散特征研究^[10-17]。何满潮等^[10]研究砂岩冲击岩破碎屑分形特征,认为改变静载要消耗较多能量且碎屑更为破碎,改变静载后碎屑和裂纹分形维数值要高于

改变动载波幅。于水生等^[11]进行花岗岩动态压缩试验,认为应变率随着能量耗散率的增加而增大,表现为非线性关系,试样破坏程度随着单位体积耗散能的增大而增大。吴拥政等^[12]分析不同长径比煤样能量耗散规律,认为煤样长径比越大破碎耗能密度越小,长径比增加反射能在入射能中的平均占比逐渐增加,透射能平均占比逐渐减小。刘少虹等^[13]研究煤岩结构的应力波传播机制与能量耗散,认为动载能量耗散随静载的增大呈先增大后减小的趋势,静载为 0.50~0.75 时,动载耗散能量迅速降低。殷志强等^[14]基于岩石能量储存和释放特征,提出动静组合加载条件岩爆倾向性指标,认为在较高轴向静载作用下,随冲击能量的增大试样破碎能耗特性由释放能量转变为吸收能量。马少森等^[15]进行三维动静组合加载下花岗岩能量耗散试验,认为轴压增大时单位体积吸收能逐渐降低,围压或应变率增大时单位体积吸收能逐渐升高。李地元等^[16]进行预制裂隙花岗岩的动静组合加载试验,认为试样的能量吸收率随轴压增大呈先上升后下降,常规静载轴压比 0.6~0.7 时转而释放能量,轴压越大释放能量所需的冲击气压越小。王文等^[17]研究不同饱水状态煤样能量耗散特征,试样破坏能耗密度随着饱水时间增长逐渐减小,能耗密度与分形维数增幅均呈正相关。

目前,多数动静组合加载岩石力学试验主要关注岩爆或者冲击发生的力学特征及判据,却无法定量描述释放出能量的大小^[8]。赵坚和徐松林等设计并研制世界首台真三轴动静组合 SHPB 加载试验系统^[18-19],可以真实模拟矿山工程中煤岩三向动静组合加载的受力环境,真三轴动静组合加载条件饱水煤样变形破坏的机理和能量耗散特征还有待深入研究。

鉴于此,利用真三轴动静组合加载试验系统进行自然和饱水 2 种状态煤样的压缩试验,分析 2 种状态煤样变形破坏过程中能量变化规律及占比特征,研究成果可为解释动载扰动作用下煤层破坏失稳和防治冲击地压灾害提供参考。

1 试 验

1.1 煤样制备

试验煤样取自跃进煤矿二₁煤层,地点为 13250 工作面煤壁,煤层埋深 594 m。按照要求在井下取出试验所需的煤块,尺寸约为 200 mm×200 mm×200 mm。依据煤样的尺寸至少为煤样中晶粒的 10 倍,室内加工成 52 mm×52 mm×52 mm 的立方体,煤样的垂直度和平行度达到规程要求。筛选出完整性、均质性较好的煤样,满足真三轴动静加载试验的要求。煤块和煤样实物如图 1 所示。

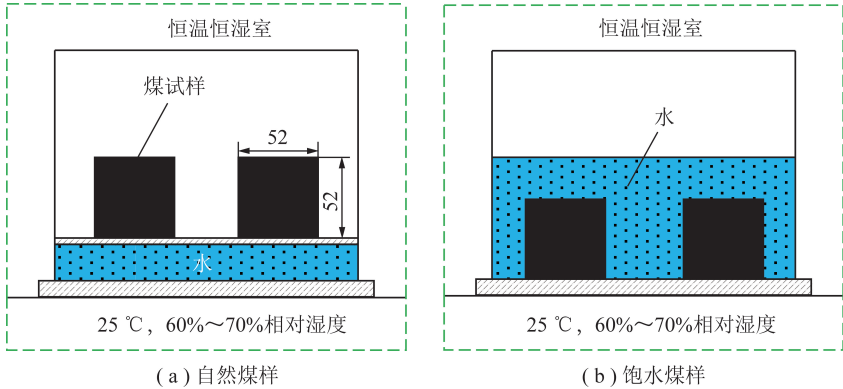


图 2 煤样处理方式示意

Fig.2 Schematic diagram of coal sample processing method

饱水煤样是指采用自然吸水法,如图 2(b)所示,煤样在进行饱水处理前分别进行称重,然后将煤样放入容器中,向容器中倒入蒸馏水至煤样 1/4 高度,每隔 2 h 加水一次,直至液面高出煤样 2~3 cm。每浸泡 24 h 后取出煤样进行一次称重,直至前后 2 次质量变化不超过 0.01 g 为止,经计算煤样自然吸水率在 3.2%~6.1%。

1.3 试验设备

真三轴动静组合加载试验采用莫纳什大学的真三轴动静组合 SHPB 系统,试验系统如图 3 所示^[20]。



图 1 试验煤样实物

Fig.1 Coal samples in the experiment

1.2 煤样饱水处理

将筛选煤样随机分成 2 组,自然煤样的标号为 A1-1~A1-5,饱水煤样的标号为 A2-1~A2-5。在饱水处理过程中模拟煤矿井下的环境,相对湿度 60%~70%,温度保持为 25 °C。

自然状态是指将煤样放在容器中搁置,如图 2(a)所示,将煤样放置在容器中带有孔的隔离板上,隔离板下放置有水,以保持容器中空气的相对湿度,最大程度还原井下煤层吸收潮湿空气中的水分,自然静置 7 d。

该系统能够实现对岩石、混凝土和煤炭的单轴、两轴和三轴的静动组合加载试验。

该系统总尺寸:水平 X 方向长 8 m,水平 Y 方向宽 5 m,垂直 Z 方向高 5 m。包括 1 个动态加载系统、1 个气枪和 1 个圆柱形撞杆,3 个垂直方向上有 3 对独立横截面为 50 mm×50 mm 方形钢杆,3 个液压缸(压力达到 100 MPa)、1 个坚固的平台、6 个高强度钢反作用框架和 1 个多通道高速数据采集系统。方形杆在 X、Y 和 Z 方向上正交对齐。沿 X 轴方向,有冲击杆(1.5 m)、入射杆(2.5 m)、传输杆(2.0 m)、吸

收杆(0.5 m)。在 Y 和 Z 轴方向,使用 4 根输出杆(2.0 m)通过液压缸施加围压,并监测输出波。在试验过程中,通过 2 个水平液压缸和 1 个垂直液压缸,在 1 个立方体煤样上施加 3 个相互独立的正交方向的预静载,并通过在气枪中发射撞杆来施加动载荷。在 X 轴方向末端有冲能缓冲装置,用于吸收传递到透射杆的大部分能量,避免透射能量形成反射,影响试验结果和对试验设备造成损伤。在真三轴动

静组合 SHPB 试验系统中,入射杆垫片与煤样的接触面处,能量一部分以反射的形式沿入射杆反向传递,另一部分在接触面沿煤样传递。在煤样中传递的能量又可分为两部分,一部分为煤样破坏所吸收的能量,另一部分在煤样与透射杆和出射杆的接触面上发生透射和反射,应力波在整个试验系统中与煤样中的三维传播特征如图 4 所示^[20],其中, σ_d 为动载应力; σ_x, σ_y 分别为 X 轴和 Y 轴方向施加的预静载应力;



图 3 真三轴动静加载霍普金森冲击试验装置

Fig.3 True three-axis static load Hopkinson impact loading experimental device

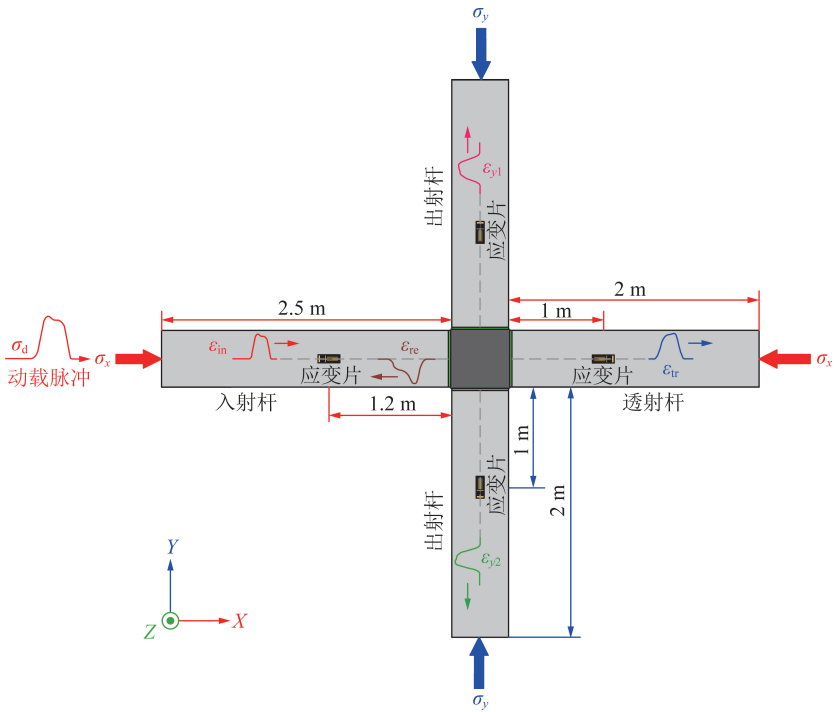


图 4 真三轴动静载 SHPB 杆应力波传播示意(不按比例,垂直 Z 轴方向俯视)

Fig.4 Schematic diagram of stress wave propagation of SHPB rod under true triaxial dynamic and static load (not in proportion, top view perpendicular to Z axis)

$\varepsilon_{in}, \varepsilon_{re}, \varepsilon_{tr}, \varepsilon_{y1}, \varepsilon_{y2}$ 分别为入射应变、反射应变、透射应变、Y1 方向上的应变和 Y2 方向上的应变。

试验过程中通过多通道高速数据采集系统采集 6 根杆件上的应变信号计算应力和能量大小。

1.4 试验方案

为了设置煤样在三轴方向静载,首先分别对自然及饱水煤样进行常规单轴压缩试验。图 5^[21] 给出了 2 种状态下单轴压缩煤样应力-应变曲线。自然状态煤样的单轴抗压强度分别为 42.09, 42.91 和 43.13 MPa,平均值为 42.73 MPa;饱水煤样的单轴压缩抗压强度分别为 20.41, 20.82 和 25.32 MPa,平均值为 22.18 MPa,平均软化系数为 51.43%。

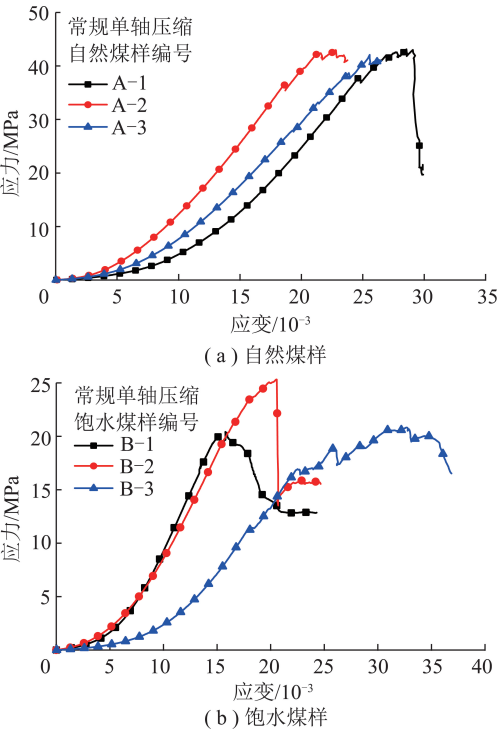


图 5 自然及饱水煤样单轴压缩应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of natural and saturated coal samples under uniaxial compression

依据常规单轴试验结果,设计自然及饱水煤样三轴动静组合加载试验方案,见表 1。在试验方案中,X 和 Z 轴分别为 8 和 6 MPa 恒定静载,在 Y 轴依次施加 2,4,6,8 和 10 MPa 恒定静载。动静组合实验中最大预静载值为相应状态煤样单轴抗压强度峰值的 22.40%和 45.09%,可见预加静载应力处于煤样的弹性范围内,不会对煤样造成损伤。在 X 轴设置 0.8 MPa 的气压推动子弹发射施加动载。

在真三轴动静组合加载试验中,首先将煤样放置在加载台上,加载台处于 6 根金属杆正中央,将 6 根金属杆缓慢与煤样接触贴紧,三轴末端的液压缸通过传力杆向煤样施加静载设定值(表 1),三轴方向静载

表 1 试验方案
Table 1 Experimental scheme

煤样编号	冲击气压/MPa	冲击速度/(m·s ⁻¹)	静载/MPa		
			σ_x	σ_y	σ_z
A1-1	0.8	16.80	2		
A1-2		17.14	4		
A1-3		16.79	8	6	6
A1-4		16.79	8		
A1-5		16.70	10		
A2-1	0.8	17.21	2		
A2-2		17.72	4		
A2-3		17.16	8	6	6
A2-4		17.07	8		
A2-5		17.09	10		

和动载加载方式如图 4 所示。以表 1 中 A1-1 煤样动静应力状态(8,2,6 MPa)为例,先以 0.1 MPa/s 加载速率对三轴方向同时施加静载 2 MPa,再在 X,Z 轴方向继续加载静载至 6 MPa,然后在 X 轴方向继续加载静载至 8 MPa,在保持三轴方向静载值恒定条件下,通过对入射杆前端撞针施加 0.8 MPa 气压实施冲击动载,冲击能量通过入射杆作用于煤样直至发生失稳破坏。

2 能量分析

2.1 能量计算原理

在动静组合加载试验中,煤样受到三轴方向的静载作用,预静载的大小在煤样的弹性范围内,静载做功的能量存储在煤样的内部。煤样施加轴向载荷时的能量密度 w_s 可根据式(1)^[17] 进行计算:

$$w_s = \int \sigma_i d\varepsilon_i = \int_0^{\varepsilon} \sigma_i(t) d\varepsilon_i(t), i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中, σ_i 为煤样在三轴方向中某一点所受轴向应力; $d\varepsilon_i$ 为煤样在三轴方向中某一点在轴向静载荷作用下发生的应变。轴向静载荷作用下煤样的能量 E_s 可认为是煤样在施加静载过程中的应力-应变曲线与横轴(应变)形成的封闭区域的面积与煤样体积 V_s 之积,即

$$E_s = w_s V_s \quad (2)$$

根据真三轴静载加载特性,煤样在轴向施加静载使得煤样在同一轴方向两面受力均匀,因此将煤样的微小单元简化为三轴方向的平面问题,在同一轴方向对立面认为受到的切向应力大小相等,方向相反。冲击动载试验中仅考虑对煤样在轴向受到冲击后的能量吸收、转换与释放。图 6 为煤样在试验过程中三维加载原理^[21]。

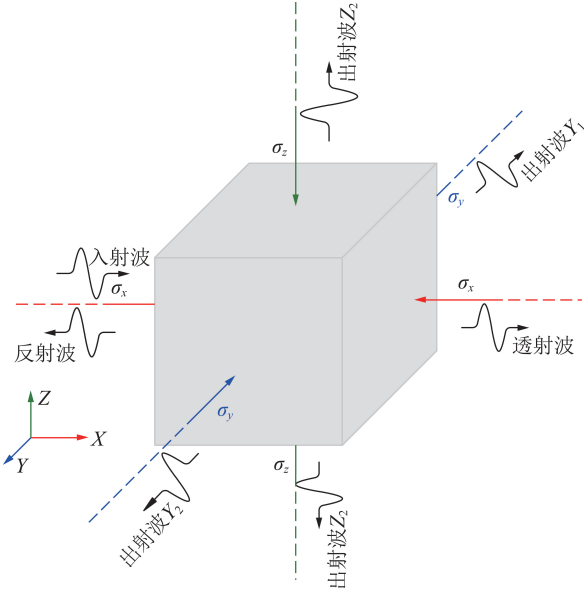


图 6 真三轴动静加载系统试验原理

Fig.6 Experimental principle of the true triaxial static and dynamic combination loading system

根据能量守恒定律,在冲击加载过程中各部分能量可根据下式进行计算:

$$E_I = \frac{A_b}{\rho_b C_b} \int_0^T \sigma_I^2(t) dt \quad (3)$$

$$E_R = \frac{A_b}{\rho_b C_b} \int_0^T \sigma_R^2(t) dt \quad (4)$$

$$E_{T_i} = \frac{A_b}{\rho_b C_b} \int_0^T \sigma_{T_i}^2(t) dt, \quad i = x, y, z \quad (5)$$

其中, A_b 为压杆截面面积; C_b 为压杆的纵波波速; ρ_b 为煤样密度; $\sigma_I(t)$, $\sigma_R(t)$ 和 $\sigma_{T_i}(t)$ 分别为入射、反射和透射的应力; E_I , E_R 和 E_{T_i} 分别为试验过程中的入射能、反射能和透射能。入射能和无用耗散能量的总量 $E_{I,t}$, $E_{o,t}$ 分别为

$$E_{I,t} = V_s w_s + E_I \quad (6)$$

$$E_{o,t} = E_R + E_{T_i}, \quad i = x, y, z \quad (7)$$

则煤样在真三轴动静组合加载下发生破坏时的总吸收能 E_a 为

$$E_a = E_{I,t} - E_{o,t} = (V_s w_s + E_I) - (E_R + E_{T_i}) = V_s \int_0^\varepsilon \sigma_1 d\varepsilon_1 + \frac{A_b}{\rho_b C_b} \int_0^T \sigma_I^2(t) dt - \frac{A_b}{\rho_b C_b} \int_0^T \sigma_R^2(t) dt - \frac{A_b}{\rho_b C_b} \int_0^T \sigma_{T_i}^2(t) dt, \quad i = x, y, z \quad (8)$$

则,煤样的能耗密度 U 可以表示为

$$U = E_a / V_s \quad (9)$$

为反映煤样在冲击破坏过程中的能量特征,采用各组分能量占总量的权重分析煤样的能量变化特征,即能量吸收率、反射率, X 轴方向的透射率和 Y, Z 轴方向的出射率。

$$\eta_a = E_a / E_{I,t} \quad (10)$$

$$\eta_{re} = E_R / E_{I,t} \quad (11)$$

$$\eta_{tr} = E_{T_i} / E_{I,t} \quad (12)$$

式中, η_a , η_{re} , η_{tr} 分别为能量的吸收率、反射率和透射率。

2.2 能量特征分析

自然及饱水煤样在三维动静组合加载下的应力-应变曲线,反映了三维应力状态下 Y 轴静载变化对煤样的动态强度及变形的影响^[21],如图 7,8 所示。根据自然及饱水煤样三轴预加静载压缩应力-应变曲线,利用静载能量计算式(1),(2),计算出 2 种状态下煤样在三轴不同静载作用下的静载能量,见表 2。

根据真三轴动静组合 SHPB 试验系统中各杆件应变片上得到的信号数据,利用真三轴动静组合加载作用下各组能量的计算原理,通过式(3)~(9)和式(10)~(12)计算,得出 2 种状态下煤样在动静加

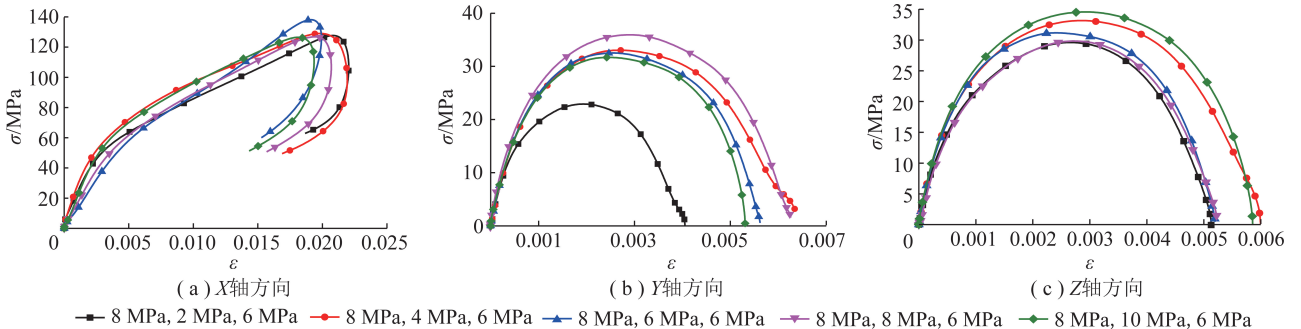


图 7 自然煤样的动态应力-应变曲线

Fig.7 Dynamic stress-strain curves of natural coal samples

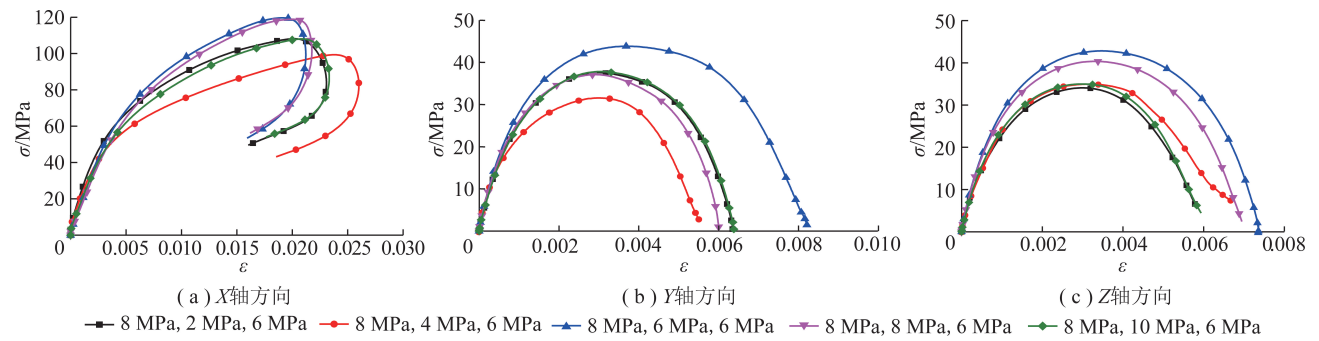


图 8 饱水煤样的动态应力-应变曲线

Fig.8 Dynamic stress-strain curves of saturated coal samples

表 2 预静载能量				
Table 2 Pre static load energy				
Y 轴预静载/MPa	自然煤样		饱水煤样	
	煤样编号	能量/J	煤样编号	能量/J
2	A1-1	0.51	A2-1	0.18
4	A1-2	1.75	A2-2	0.70
6	A1-3	3.65	A2-3	1.49
8	A1-4	6.22	A2-4	2.53
10	A1-5	9.53	A2-5	3.91

载试验过程中各组分能量及占比,见表 3,其中, U 为试样失稳破坏的能耗密度。

从表 3 可以看出,在不同 Y 轴静载加载条件下,煤样能量损耗和吸能变化特征具有较大差异性;在相同 Y 轴静载加载下,煤样含水状态对煤样能量损耗及吸收特征存在较大影响。因此,需探讨 Y 轴静载和含水状态 2 个变量对煤样能量耗散规律的影响。

表 3 自然及饱水煤样动静加载各组分能量及其占比结果												
Table 3 Results of energy and proportion of each component of natural and saturated coal samples												
煤样 编号	E_1 /J	E_R /J	E_{T_i} /J					E_a /J	η_{re}	η_{tr}	η_a	$U/$ (J · cm ⁻³)
			X	Y_1	Y_2	Z_1	Z_2					
A1-1	512.23	179.22	78.13	2.21	3.02	4.2	5.03	250.80	0.349 9	0.180 8	0.489 6	2.01
A1-2	444.46	166.16	83.25	4.06	4.96	4.81	5.90	186.94	0.373 8	0.231 7	0.420 6	1.50
A1-3	509.77	148.23	86.86	4.79	6.44	6.41	6.00	264.56	0.290 8	0.216 8	0.519 0	2.12
A1-4	420.28	155.97	75.63J	3.10	3.60	1.28	2.03	194.76	0.371 1	0.203 8	0.463 4	1.56
A1-5	460.17	138.80	78.68	1.92	2.09	3.60	5.25	249.23	0.301 6	0.198 9	0.541 6	1.99
A2-1	393.15	176.69	60.20	4.49	4.90	1.01	1.83	148.21	0.449 4	0.184 3	0.377 0	1.19
A2-2	463.30	230.24	55.38	3.19	3.97	3.84	5.01	166.36	0.497 0	0.154 2	0.359 1	1.33
A2-3	364.76	145.35	74.72	5.10	5.71	7.81	10.19	121.39	0.398 5	0.283 8	0.332 8	0.97
A2-4	398.36	173.33	74.41	6.76	10.24	7.76	9.74	134.67	0.435 1	0.273 4	0.307 9	0.98
A2-5	473.77	186.63	60.20	4.85	5.42	3.92	4.69	215.99	0.393 9	0.166 9	0.455 9	1.73

3 能量耗散规律

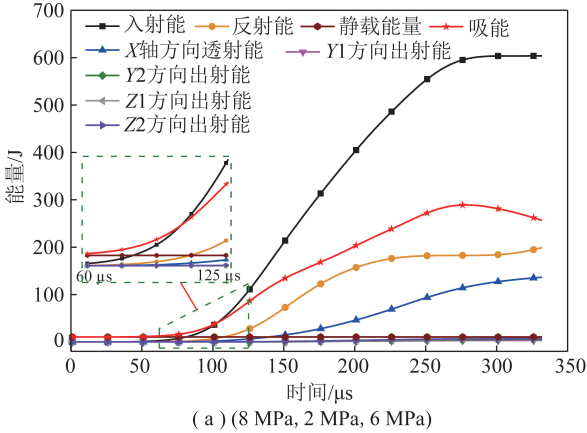
图 9,10 为自然和饱水煤样在动态冲击加载过程中各组分能量随着时间的变化曲线。在计算时整个系统的总能量包括冲击入射能和预加静载能量,其中预加静载在煤样弹性范围内,以弹性能的形式存储在煤样中,在整个试验过程中处于恒定加载状态,可以认为预静载能量基本保持不变,而动静加载过程中煤样内部发生损伤到完全失稳破坏是静载和动载共同作用的结果。这里需要说明的

是:图 9,10 中动态冲击加载过程各能量是以静载能量为起点。

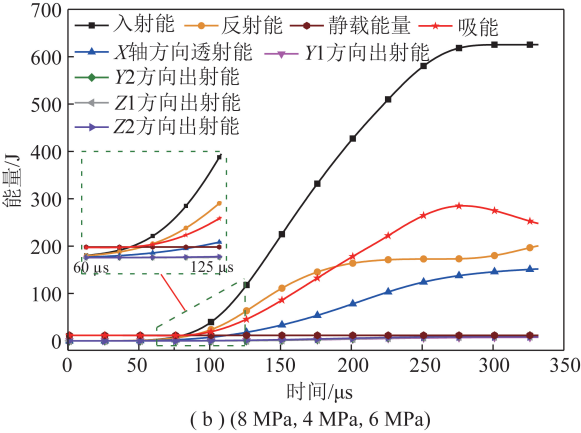
3.1 试验过程中能量的变化特征

3.1.1 自然煤样的能量变化规律

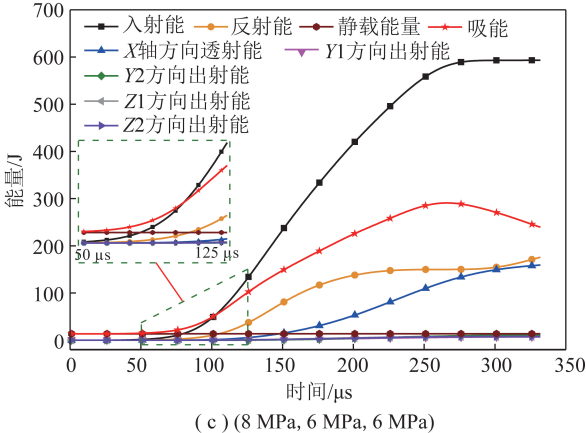
为了能够进一步探讨 Y 轴静载 σ_y 对煤样动力学特性的影响,计算出煤样在不同 Y 轴静载加载条件下整个试验过程中能量随时间变化规律,绘制如图 9 所示各组分能量随着动载应力波作用的全程应力-应变曲线。



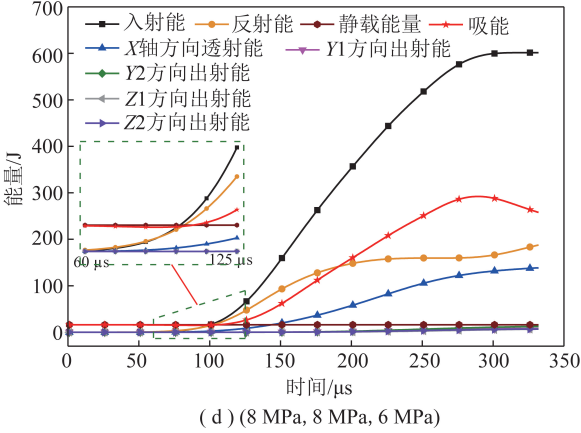
(a) (8 MPa, 2 MPa, 6 MPa)



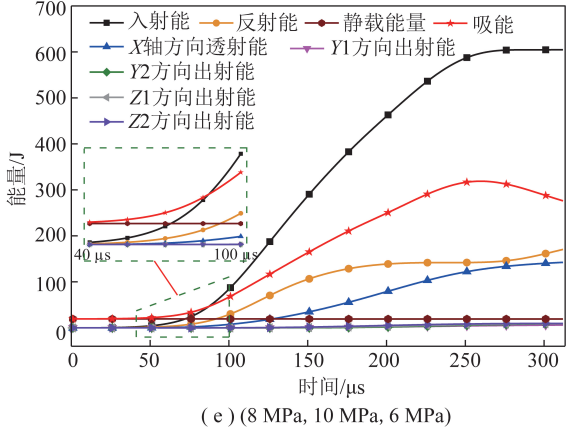
(b) (8 MPa, 4 MPa, 6 MPa)



(c) (8 MPa, 6 MPa, 6 MPa)



(d) (8 MPa, 8 MPa, 6 MPa)



(e) (8 MPa, 10 MPa, 6 MPa)

图9 相同动载(0.8 MPa)不同预静载加载(X,Y,Z)下自然煤样的能量与时间曲线

Fig.9 Energy and time curves of natural coal samples under the same dynamic load(0.8 MPa) and different pre static load(X,Y,Z)

根据图9中绘制的能量随时间变化曲线,从Y轴静载2 MPa增加到10 MPa,能量大小随着时间的变化表现出的差异主要体现在冲击前期,在后期曲线变化特征比较相似。通过对图9中曲线变化规律差异性较大局部进行放大对比发现,差异性主要表现在不同Y轴静载条件下入射能、吸能和反射能大小关系,且各组能量曲线相对于基线的起点不同。

从图9(a),(c)和(e)可以看出,当Y轴静载为2,6,10 MPa时,在动载冲击前期,煤样吸能大于反射

能和透射能,图中吸能基线为静载能量,当吸能随着时间不断增大,表明煤样在不断吸收能量,不断积聚动载带来的能量,使煤样在其弹塑范围内不断发生变形与损伤产生微观裂隙,一旦动静应力达到煤样极限承载时,煤样内部微观裂隙扩展为宏观裂隙,煤样承载能力急剧降低,吸能均不断减少。而从图9(b),(d)可以看出,当Y轴静载为4和8 MPa时,在动载冲击前期,除去煤样在预静载条件下储存的能量,煤样吸能为负值,相对于其他3种Y轴静载的加载状态下,反射能略高于吸能,在X轴方向透射能增

长趋势相比较较大,表明在这 2 种加载状态下,动载扰动使煤样内部储存静载能量失去原有平衡状态,使煤样开始释放部分静载能量,而释放的大部分能量以反射能的方式进行反射,只有少部分沿动载冲击方向发生透射。

在入射能达到峰值后,所有加载状态下各组分能量大小关系均表现出相似规律。就能量变化趋势而言,随着 Y 轴静载增大,反射能和动载冲击方向的透射能差值逐渐减小,虽然在 Y 轴静载为 8 MPa 时差

值又稍有增大,但是当 Y 轴静载为 10 MPa 时差值又表现出减小,相对情况下,反射能减小,冲击方向透射能增大。因此,在试验结果中,Y 轴加载条件为 4 和 8 MPa 时的能量变化规律曲线与其他加载条件下有所不同,不排除由煤样自身差异导致。

3.1.2 饱水煤样的能量变化规律

图 10 为不同 Y 轴静载 σ_y 加载条件下,饱水煤样在试验过程中各组分能量随着时间的变化特征。

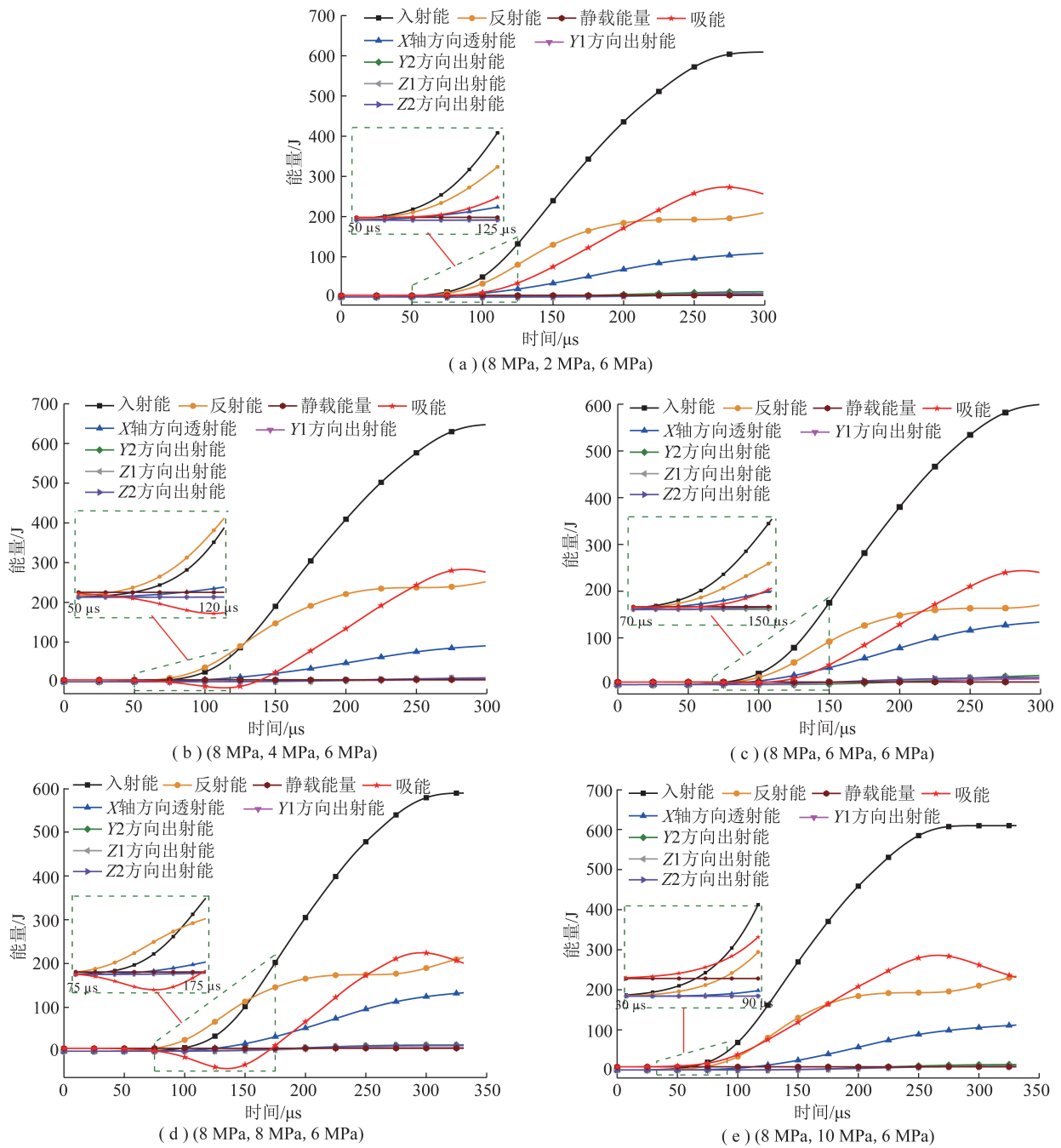


图 10 相同动载(0.8 MPa)不同预静载加载(X,Y,Z)下饱水煤样的能量与时间曲线

Fig.10 Energy and time curves of water saturated coal samples under the same dynamic load (0.8 MPa) and different pre static load (X,Y,Z)

从图 10 可以看出,在不同 Y 轴静载条件下各能量曲线表现出来的规律大致相同,主要差异性表现在冲击前期,这与自然煤样的特性相似。采用相同方法对图 10 曲线中差异性较大局部进行放大,进行饱水煤样动静载加载过程中的入射能、吸能和反射能的分析。在不同预静载加载状态下,曲线的相似性表现在动载冲击前期,相同时间内反射能大于吸能,在 Y 轴静载为 10 MPa 时,煤样吸能变化经历了从大于反射能到小于反射能,但在整体呈现大致相当的现象。

由能量随着时间的变化规律可以推断出,煤样在经过饱水处理后,其弹塑特性发生了变化,使在预静载加载下煤样更容易存储静载能量。在动载应力波作用下,首先破坏煤样预静载的平衡状态,在高动载应力波作用下煤样失稳破坏释放存储的预静载能量,沿入射杆和透射杆传播,呈现动载应力波作用煤样前期的反射能大于煤样吸能的现象。随着动载应力波作用在煤样上,煤样反射能逐渐趋于平稳,吸能逐渐大于反射能,呈现增大的现象。在煤样预静载加载状态分别为(8 MPa,4 MPa,6 MPa)和(8 MPa,8 MPa,6 MPa)时,与其他预静载状态下能量曲线变化规律差异性较大的是部分时间段反射能大于入射能,且煤样吸能呈现较大负值。

根据在不同预静载加载状态下各组分能量曲线

变化特征,煤样吸能为负值表明能量的释放,推断造成部分时间段反射能大于入射能的主要原因是煤样内部积聚能量大量释放。在煤样高预静载加载状态为(8 MPa,10 MPa,6 MPa)时,煤样吸能随着入射能的增加而增加,且大于反射能,与其他预静载加载状态形成较大不同,在动载作用煤样的中期,反射能大于吸能,随后小于吸能,能量变化规律与其他预静载加载条件下表现出相似特征。

因此,煤样在预静载状态分别为(8 MPa,2 MPa,6 MPa),(8 MPa,4 MPa,6 MPa),(8 MPa,6 MPa,6 MPa)和(8 MPa,8 MPa,6 MPa)时,预静载的加载使煤样变形处于煤样内部裂隙未完全压缩前的弹性变形,而煤样高预静载加载状态为(8 MPa,10 MPa,6 MPa)时,预静载的加载使煤样变形处于煤样内部裂隙进一步压缩后的弹性变形。

3.2 各组分能量的变化特征

2 种含水状态煤样及不同预静载加载状态下,各组分能量在煤样内的传递效率存在较大差异。从能量变化角度直观反映了煤样状态对能量的损耗特点;从整体强度角度间接反映了煤样从加载到失稳破坏过程中的受力特征。各组分能量的传递效率能够从细观角度反映煤样在不同状态下的整体特征。图 11 为 2 种含水状态煤样能量反射率、透射率和吸收率的占比与 Y 轴方向静载的关系。

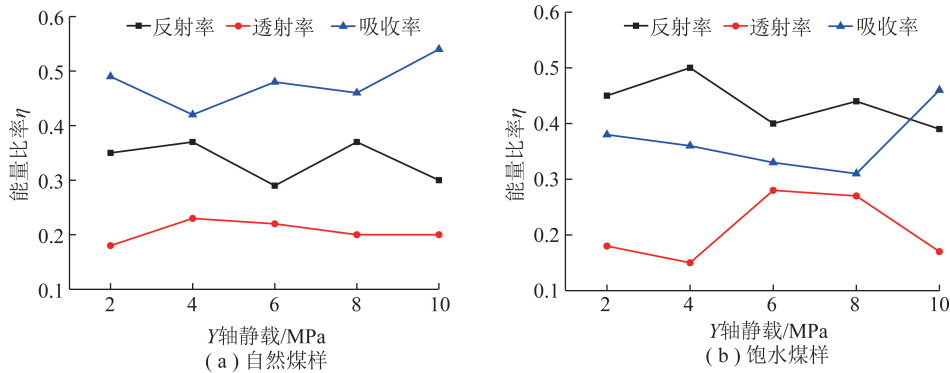


图 11 自然及饱水煤样在不同预静载条件下对各组分能量传递效率的影响特征

Fig.11 Influence characteristics of natural and water saturated coal samples on energy transfer efficiency of each component under different preload conditions

从图 11 可以看出,2 种含水状态煤样的各组分能量占比具有较大差异,自然煤样能量吸收率在 3 者中占比最大,反射率次之,透射率最小;饱水煤样能量反射率在 3 者中占比最大,吸收率次之,透射率最小。两幅图的相同点是能量透射率占比最小,最大不同点是自然煤样能量吸收率大于反射率,饱水煤样能量反射率大于吸收率,但在 Y 轴静载为 10 MPa 时与自然煤样表现出相似的特征。

为了分析 Y 轴静载和含水状态对煤样的能量变化的影响,图 12 给出了 2 种含水状态煤样相同静载动态冲击载荷作用下煤样反射率、透射率和吸收率的关系;图 13 给出了 2 种含水状态煤样不同 Y 轴静载加载状态下煤样反射率、透射率和吸收率的关系。

3.2.1 静载加载条件的影响

当仅考虑含水状态对煤样能量传递效率的影响,从图 12(a)看出,在相同 Y 轴静载作用下饱水煤样的

能量反射率明显高于自然煤样,高出幅度 17.25% ~ 37.04%。从图 12(b)可以看出,含水状态对动静冲击载荷下煤样能量透射率的影响较为复杂,在 Y 轴静载为 2 MPa 时,自然和饱水煤样能量透射率大致相当;在 Y 轴静载为 4 和 10 MPa 时,自然煤样能量透

射率大于饱水煤样,分别为 50.30% 和 19.18%;在 Y 轴静载为 6 和 8 MPa 时,饱水煤样能量透射率大于自然煤样,分别为 30.94% 和 34.17%,表明当三轴静载应力相近时对动静冲击作用下煤样能量透射率影响明显。

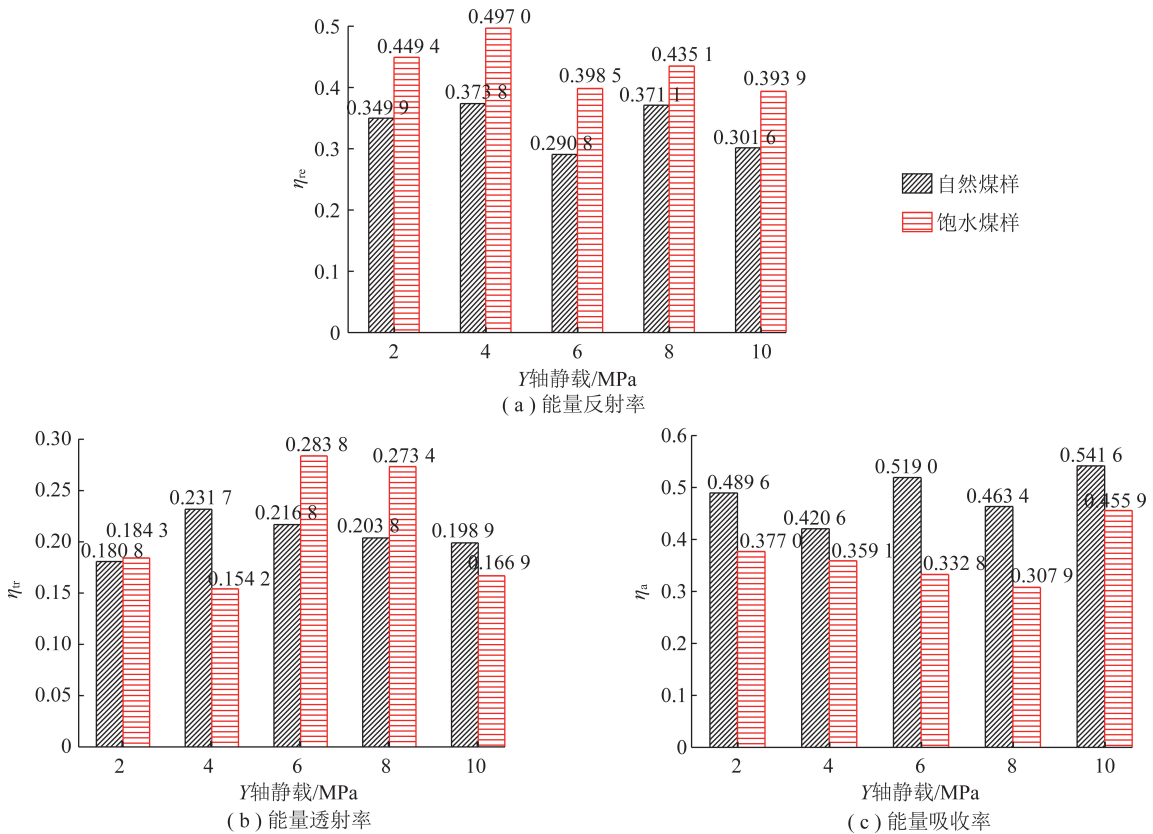


图 12 自然及饱水煤样在不同 Y 轴静载条件下各组分能量的传递效率

Fig.12 Energy transfer efficiency of each component of natural and water saturated coal samples under different Y-axis static load conditions

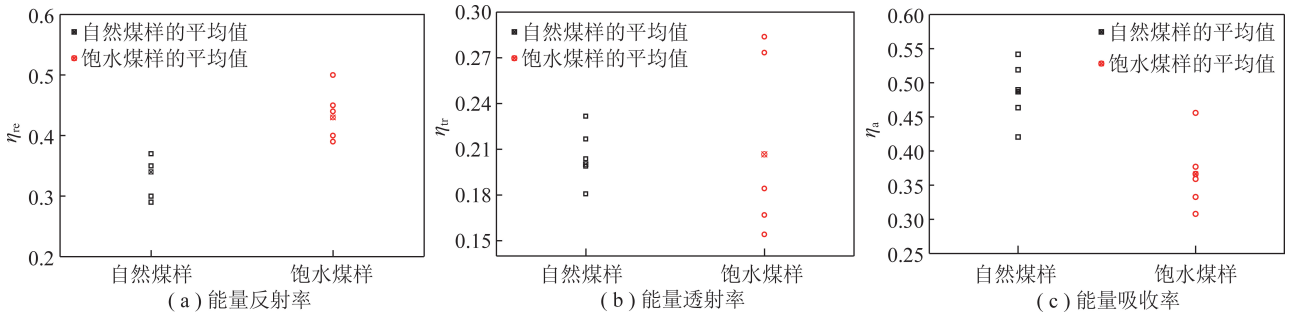


图 13 煤样状态对各组分能量传递效率的影响特征

Fig.13 Influence characteristics of coal sample state on energy transfer efficiency of each component

从图 12(c)可以看出,相同 Y 轴静载作用下自然状态煤样能量吸收率明显高于饱水煤样,高出幅度在 17.13%~55.95%,其中自然煤样能量吸收率呈现波浪式起伏变化,饱水煤样能量吸收率呈现先降低后变大的趋势,最低点位于 Y 轴静载 8 MPa,最高点位于 10 MPa。

3.2.2 含水状态的影响

从图 13(a)可以看出,在动静冲击作用下的饱水煤样能量反射率大于自然煤样,表示饱水处理对煤样在冲击加载过程中能量反射有着较大影响。图 13(b)显示饱水煤样能量透射率的离散性明显大于自然煤样,表明煤样含水状态与 Y 轴不同静载大小

耦合作用对能量透射率具有较大影响。图 13(c) 显示自然煤样能量吸收率大于饱水煤样, 自然煤样的动态强度大于饱水煤样, 表明动静冲击作用下能量吸收率与煤样的动态强度变化特征相似。

三轴方向预加静载作用, 使煤样处于不完全封闭的加载状态, 预静载在内部原始孔隙形成挤压的同时, 对自由水在挤压水楔作用诱导形成新裂隙, 原始裂隙中的自由水浸入新生裂隙, 使得煤样中的充水更加充分, 当 Y 轴静载达到某一临界值时, 能量反射率不再增加, 反而呈现降低现象; 能量透射率随着三轴预加静载的改变而改变, 从 Y 轴静载最小到三轴静载相近到 Y 轴静载最大, 呈现出先增大后减小的现

象。其中自然煤样的 Y 轴峰值顶点为 4 MPa, 饱水煤样的 Y 轴峰值顶点为 6 MPa。

4 讨 论

4.1 能耗密度与动态强度的联系

煤样对能量的吸收量体现煤样发生内部损伤时所需要外部做功的大小, 是煤样内部裂隙演化的决定性因素。从微观能量的吸收与宏观表现的动态强度特征为出发点, 分析煤样峰值动态强度与能耗密度的关系, 以及饱水对煤样峰值动态强度的影响, 图 14 给出了三轴方向峰值动态应力与能耗密度的关系。

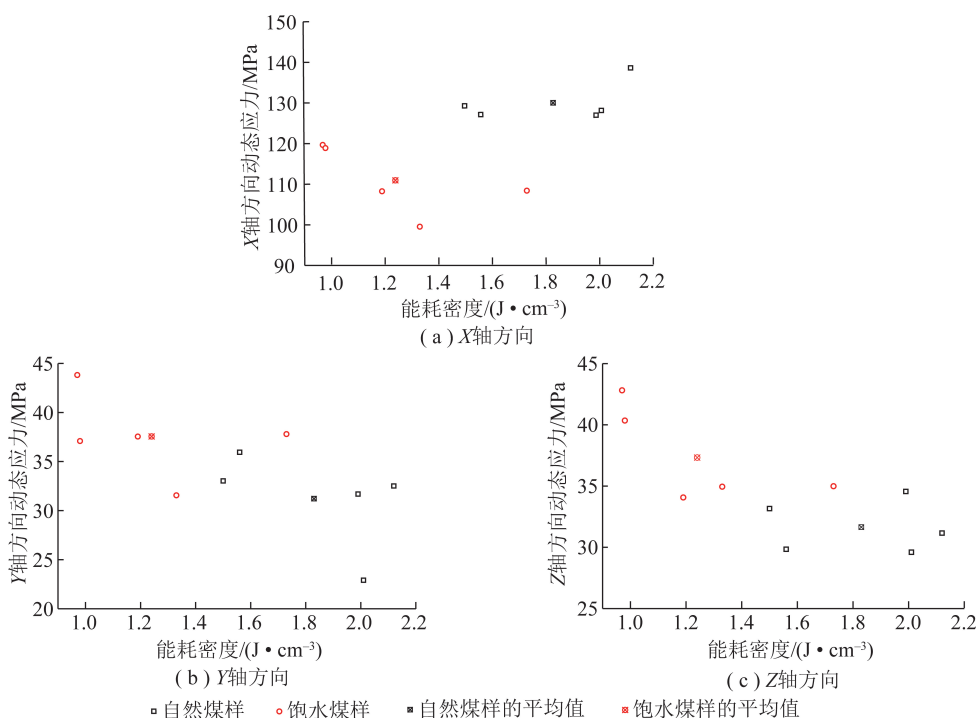


图 14 自然及饱水煤样的动态应力与能耗密度的关系

Fig.14 Relationship between dynamic strength and energy consumption density of natural and water saturated coal samples

由图 14 可知, 自然状态下煤样的能耗密度为 $1.50 \sim 2.12 J/cm^3$, 平均值为 $1.83 J/cm^3$, 离散率为 15.55%; 饱水煤样的能耗密度为 $0.97 \sim 1.73 J/cm^3$, 平均值为 $1.24 J/cm^3$, 离散率为 25.22%。在 X 轴方向, 自然煤样的峰值动态应力为 126.51 ~ 138.10 MPa, 饱水煤样的峰值动态应力为 99.35 ~ 119.65 MPa; 在 Y 轴方向, 自然煤样的峰值动态应力为 22.91 ~ 35.95 MPa, 饱水煤样的峰值动态应力为 31.56 ~ 37.80 MPa; Z 轴方向自然煤样的峰值动态应力为 29.60 ~ 34.56 MPa, 饱水煤样的峰值动态应力为 34.07 ~ 42.82 MPa。自然煤样的能耗密度大于饱水煤样的能耗密度, 自然煤样的峰值动态应力在 X 轴方向大于饱水煤样, 在 Y 和 Z 轴方向小于饱水煤样的

峰值动态应力, 表明在冲击加载方向, 能耗密度与煤样峰值动态应力呈正相关的关系, 在 Y 和 Z 轴方向呈负相关的关系。

分析表明能耗密度的变化规律能够反映煤样在真三轴动静组合加载试验中的动态强度变化特征。从能量角度能够在微观结构上分析煤样发生破坏的内在因素。

4.2 破坏特征与静载的联系

能量随时间变化特征是从细观角度对失稳破坏进行描述, 表面裂隙的发育和扩展是应力波在微观下作用到煤样表现的宏观破坏。因此煤样破坏特征表现出了试验过程中能量的耗散特征, 限于篇幅, 图 15, 16 给出部分静动组合作用下自然及饱水煤样的破坏特征。

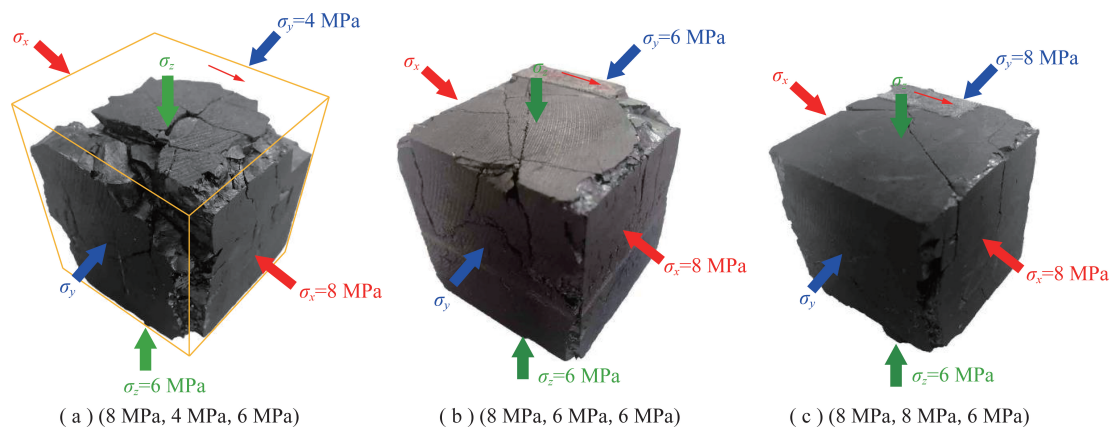


图 15 自然煤样在试验后破坏形态

Fig.15 Failure mode of natural coal sample after test

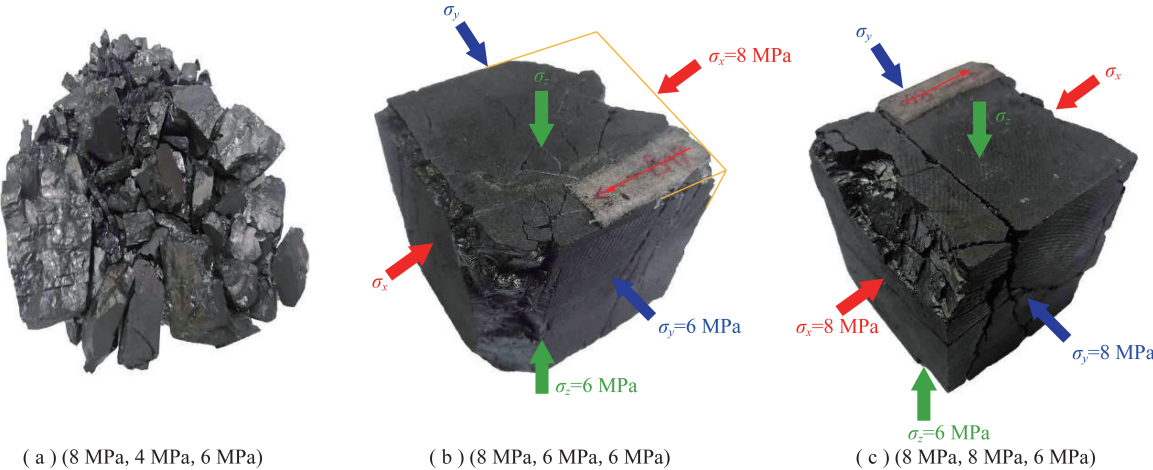


图 16 饱水煤样在试验后的破坏形态

Fig.16 Failure mode of water saturated coal sample after test

煤样内部微观结构变化分为 2 个部分:一部分是预静载施加时对内部裂隙的挤压作用;另一部分是试验系统施加动载的冲击作用,宏观裂隙则是预静载与动态冲击共同作用的结果。冲击破坏后煤样表面裂隙发育和破坏形态能够反应出三轴预静载状态下的动态破坏特征。由图 15 可以看出,在不同 Y 轴静载作用下煤样破坏形态和部分侧面裂隙的分布特征有所不同。随着 Y 轴静载应力增大,破坏后煤样的整体性逐渐完好,整体破坏均是各作用面的裂隙连接形成宏观裂隙带。

动载应力波作用于试样后,一部分以反射波形式沿入射杆返回,另一部分能量将作用于试样,动载应力波会首先作用于试样内部存在的原生裂隙压密,促进形成新的微观裂隙,应力波不断在煤样中传播,微观裂隙不断发育、扩展形成宏观裂隙滑移,煤样失稳破坏,多余大部分能量透过试样沿透射杆传播,只有极少部分能量沿 Y,Z 轴方向透射杆传播。由于 Y,Z 轴方

向静载与 X 轴动载相比明显偏低,煤样受载后出现泊松效应表现出侧向膨胀,导致裂隙张开与滑移向 Y,Z 轴方向发展,煤样破坏形态与静载应力状态有关。

由图 15(a)可知,当 Y 轴静载应力为 4 MPa 的最小主应力时,三轴预静载应力差较大,煤样出现垂直于 Y 轴静载应力 σ_y 的张拉破裂面,煤样的边缘结构遭到严重破坏,整体性比较差;煤样表面裂隙呈现中心发散状,多平行于三轴方向。煤样的部分结构呈现粉碎性,具有明显层裂现象,但仍具有整体性特征;从破裂面看出煤样内部裂隙发育且相互贯穿,这也是煤样整体性缺失的原因。

由图 15(b)可知,当 Y 轴静载应力为 6 MPa 时,煤样依然保持整体性结构,仅缺失边角部分。从 Z 轴方向俯视观察到表面裂隙与冲击方向剪切破裂面的最大角度为 56° ,近似平行发育,相互之间形成贯穿,且相邻作用面的裂隙相互连接导致煤样结构性失稳。

由图 15(c)可知,当 Y 轴静载应力为 8 MPa 时,三轴预静载应力差较小时,从 Z 轴方向俯视观察到表面裂隙与冲击方向剪切破裂面的最大角度为 32° ,宏观贯穿性裂隙在 Y 轴静载的作用面发育形成,且煤样与入射杆接触面发生严重的整体性破坏,表面有明显微裂隙结构发育,煤样整体性比较完整,少有微小裂隙,多为贯穿整个作用面的裂隙。当 Y 轴静载为 10 MPa 时,从 Z 轴方向俯视观察到表面裂隙与冲击方向的最大角度为 100° ,与冲击方向平行的裂隙存在于边缘区域,属于后期形成;在入射杆与煤样的作用面的中部具有平行于 Y 轴的损伤裂隙带,且与相邻作用面的形成连接。

可见煤样破坏程度与预静载状态有关,当三轴静载应力差较大时,例如 Y 轴静载在 2 和 4 MPa,动静载荷作用下煤样内部裂隙贯穿发育,分布纵横交错,结构损伤较大,发生更加严重的破坏,不能保证原有煤样的完整性,更多出现张拉破坏。

当三轴静载应力差较小时,例如 Y 轴静载在 6~8 MPa 时,煤样能够保证原有的完整性结构,动静载荷作用下煤样的结构破坏以剪切断裂为主,剪切破裂面与冲击方向形成角度变化;在 Y 轴静载 6~8 MPa 时,角度呈减小趋势;在 Y 轴静载 8~10 MPa 时,角度呈增大趋势;从表面裂隙整体来看,呈现“V”型的断裂模式。剪切破裂面与冲击方向形成的角度变化趋势与三轴预静载加载状态和动载冲击有着较大的关系。

由图 16 可知,饱水煤样在三轴不同静载动态冲击作用下的破坏形态呈现较大差异。从整体上看,原有形态煤样裂隙多向 X 轴和 Y 轴发育,相邻面裂隙相互贯通,可以推断由于 Y 轴预静载较小, Z 轴预静载接近 X 轴预静载大小,导致煤样在 X 轴方向受到动载冲击后,煤样会以 X 轴和 Z 轴形成的平面,沿 Y 轴两端进行开裂。

当 $\sigma_x > \sigma_y < \sigma_z \neq 0$ 和 $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_z \neq 0$ 时,三轴预静载应力差较大,例如:预静载应力 (8 MPa, 4 MPa, 6 MPa) 和 (8 MPa, 10 MPa, 6 MPa),分布于煤样内部的裂隙比较发育,且与煤样在表面裂隙相互贯穿,表明三轴预静载应力差异较大时,煤样在受到动载冲击后,扰动预静载应力平衡导致内部裂隙迅速进入大发育阶段,煤样碎裂成块,无法保持原有的状态,如图 16(a)所示煤样在动静冲击加载后表现出碎裂成块特征,无法保持原有完整性,且碎块大小不一。当 $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z \neq 0$ 和 $\sigma_x = \sigma_y > \sigma_z \neq 0$ 三轴预静载应力差较小时,例如:预静载应力 (8 MPa, 6 MPa, 6 MPa) 和 (8 MPa, 8 MPa, 6 MPa),图 16(b)显示饱水煤样在

动静冲击加载中能够近似保持较为完整形态,且其表面裂隙发育多呈现对角方向,煤样表面裂隙与 X 轴方向呈约 42° 夹角,表面裂隙发育与内部裂隙互相贯通,且相邻面裂隙也相互贯通。图 16(c)动载冲击后的煤样虽然能够呈现较为完整形态,但根据煤样表面裂隙发育特征,煤样内部裂隙进入大发育阶段,表面呈现较大贯穿裂隙,且煤样表面裂隙多沿 Y 轴和 Z 轴方向发育,煤样已经丧失原有稳定结构。

对较大碎块裂隙进行观察,煤样内部具有较多裂隙,裂隙之间相互连接,贯穿整个煤样并切割成较小块体结构,且内部裂隙往往能够在煤样表面形成连接。虽然破坏后煤样存在部分结构保持原有形态,但裂隙发育、贯穿和连接已经使这部分结构失去了整体性。

在真三轴动静组合加载试验中,不同预静载对饱水煤样破坏程度影响大不相同,对裂隙发育特征具有较大影响。对比相同静、动应力条件煤样破坏形态,饱水煤样破坏程度往往大于自然煤样,表现为饱水对煤样的弱化现象。相同预静载状态煤样中,均是预静载状态为 (8 MPa, 4 MPa, 6 MPa) 和 (8 MPa, 10 MPa, 6 MPa) 时的破坏程度相对最大,在预静载状态为 (8 MPa, 6 MPa, 6 MPa) 和 (8 MPa, 8 MPa, 6 MPa) 时均表现出破坏性较小。

煤样动态特性对三轴预静载加载条件比较敏感,在相同冲击条件下,冲击方向峰值动态应力呈现先增加后减小特点,表明煤样动态强度受到三轴约束限制,对煤样进行三轴预静载加载抑制了煤样内部裂隙发育,对煤样施加合适三轴预静载加载有助于提高煤样的动态强度。

煤矿冲击地压的本质是由于采矿活动煤岩体系统在变形破坏过程中能量稳定态积聚、非稳定态释放的非线性动力学过程^[22],对已具有冲击危险区域进行解危,煤层注水可以避免高应力集中,改善煤岩体介质性质以减弱积聚弹性能的能力。因此,在煤层开采过程中,当煤层承载的三向应力中某一方向应力较低或三向方向的应力相仿时,可通过煤层注水方式改善煤层力学特性,减缓冲击地压对煤层及周围岩体损伤。但当煤层承载应力较大且三向应力差较大时,需要采取相应措施改善围岩应力环境,使其接近于三向等应力,从而减缓动载冲击作用下煤层破坏。

5 结 论

(1) 饱水煤样在静载作用下,相对于自然煤样可以存储较多的静载弹性能,在冲击初始阶段试样吸能为负值表现出部分弹性能的释放。静载作用下的能

量,一部分能量转化为对裂隙内自由水的挤压应力,另一部分转化为诱导新裂隙形成的动能。

(2)在2种状态及不同加载状态下,煤样内各组分能量的传递效率存在较大差异。相同动静加载条件下,饱水煤样反射能大于透射能,饱水煤样的能量反射率比自然煤样高17.25%~37.04%,自然煤样的能量吸收率比饱水煤样高17.13%~55.95%,饱水处理对煤样在冲击加载过程中能量的反射有着较大影响。

(3)自然煤样的能耗密度大于饱水煤样的能耗密度,在冲击加载的 X 轴方向上,煤样能耗密度与峰值动态应力呈正相关的关系,在 Y 和 Z 轴方向呈负相关的关系。自然煤样的峰值动态应力在 X 轴方向大于饱水煤样,在 Y 和 Z 轴方向小于饱水煤样的峰值动态应力。

(4)不同预应力条件饱水煤样的破坏程度往往大于自然煤样,当煤层承载应力较大且三轴应力呈现阶梯性变化时,需要改善围岩应力环境使其接近于三向等应力大小,从而减缓动载扰动作用下煤层破坏。当煤层承载应力中某一方向应力较低或三向应力相仿时,可以通过注水改善煤层力学性能和应力状态,有效减缓冲击地压等级及影响范围。

致谢 感谢澳大利亚莫纳什大学 ZHAO Jian 教授、ZHANG Qianbing 博士在试验期间给予的指导与帮助!

参考文献(References):

- [1] 窦林名,何江,曹安业,等. 煤矿冲击矿压动静叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1469-1476.
- [2] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报,2018,43(8):2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8):2091-2098.
- [3] 吴耀焜,王淑坤,张万斌. 煤层注水预防冲击地压的机理探讨[J]. 煤炭学报,1989,14(2):69-90.
WU Yaokun, WANG Shukun, ZHANG Wanbin. Discussion on mechanism of rock burst prevention by water infusion[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(2):69-90.
- [4] 熊德国,赵忠明,苏承东,等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(5):999-1003.
XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5):999-1003.
- [5] 王文,李化敏,袁瑞甫,等. 动静组合加载含水煤样的力学特征及细观力学分析[J]. 煤炭学报,2016,41(3):611-617.
WANG Wen, LI Huamin, YUAN Ruifu, et al. Micromechanics analysis and mechanical characteristics of water-saturated coal samples under coupled static-dynamic loads[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3):611-617.
- [6] 苏承东,孙玉宁,张振华,等. 饱水对煤层顶板砂岩单轴压缩破坏能量影响的分析[J]. 实验力学,2017,32(2):223-231.
SU Chengdong, SUN Yuning, ZHANG Zhenhua, et al. On the effect of water-saturated state on failure energy of sandstone from coal seam roof subjected to uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(2):223-231.
- [7] 宫凤强,李夕兵, ZHAO Jian, 等. 三轴 SHPB 岩石材料动力学特性试验研究的现状和发展趋势[J]. 科技导报,2009,27(18):106-111.
GONG Fengqiang, LI Xibing, ZHAO Jian, et al. Experimental research progress of dynamic characteristics for rock materials on tri-axial SHPB apparatus[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(18):106-111.
- [8] 李夕兵,宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报,2021,46(3):846-866.
LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3):846-866.
- [9] 李夕兵,周子龙,邓义芳,等. 动静组合加载岩石力学实验方法与装置[P]. 中国专利:200510032031.2006-02-08.
LI Xibing, ZHOU Zilong, DENG Yifang, et al. Testing technique and apparatus of rock subjected to coupled static and dynamic loads[P]. China Patent:200510032031.2006-02-08.
- [10] 何满潮,王扬,苏劲松,等. 动静组合荷载下砂岩冲击岩爆碎屑分形特征[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(4):699-705.
HE Manchao, WANG Yang, SU Jingsong, et al. Analysis of fractal characteristics of fragment of sandstone impact rock burst under static and dynamic coupled loads[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4):699-705.
- [11] 于水生,卢玉斌,朱万成,等. SHPB 试验中花岗岩破坏程度与能量耗散关系分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(12):1733-1737.
YU Shuisheng, LU Yubin, ZHU Wancheng, et al. Analysis on relationship between degree of damage and energy dissipation of granite in SHPB tests[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2015, 36(12):1733-1737.
- [12] 吴拥政,孙卓越,付玉凯. 三维动静加载下不同长径比煤样力学特性及能量耗散规律[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(5):877-888.
WU Yongzheng, SUN Zhuoyue, FU Yukai. Mechanical properties and energy dissipation law of coal samples with different length-to-diameter ratios under 3D coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2022, 41(5):877-888.
- [13] 刘少虹,毛德兵,齐庆新,等. 动静加载下组合煤岩的应力波传播机制与能量耗散[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1):15-22.
LIU Shaohong, MAO Debing, QI Qingxin, et al. Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal-rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1):15-22.
- [14] 殷志强,李夕兵,董陇军,等. 动静组合加载条件岩爆特性及倾向性指标[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9):3249-3256.
YIN Zhiqiang, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Rockburst characteristics and proneness index under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9):3249-3256.
- [15] 马少森,陈卫忠,赵武胜. 三维动静组合加载下花岗岩能量耗散试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(3):95-102.
MA Shaosen, CHEN Weizhong, ZHAO Wusheng. Experimental study on energy dissipation of granite subjected to three-dimensional coupled static and dynamic loading[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(3):95-102.
- [16] 李地元,胡楚维,朱泉企. 预制裂隙花岗岩动静组合加载力学特性和破坏规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6):1081-1093.
LI Diyuan, HU Chuwei, ZHU Quanqi. Experimental study on mechanical properties and failure laws of granite with an artificial flaw under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6):1081-1093.
- [17] 王文,李化敏,顾合龙,等. 动静组合加载含水煤样能量耗散特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2):3965-3971.
WANG Wen, LI Huamin, GU Helong, et al. Feature analysis of energy dissipation of water-saturated coal samples under coupled static-dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):3965-3971.
- [18] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behavior of rock materials[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2014, 47(4):1411-1478.
- [19] 徐松林,赵坚,宋晓勇,等. 一种基于真三轴静载的岩石霍普金森冲击加载装置[P]. 中国专利: 201620574575.9. 2016-06-15.
XU Songlin, ZHAO Jian, SONG Xiaoyong, et al. Rock Hopkinson impact loading device based on true triaxial static load[P]. China Patent: 201620574575.9. 2016-06-15.
- [20] LIU K, ZHANG Q B, WU G, et al. Dynamic mechanical and fracture behaviour of sandstone under multiaxial loads using a triaxial Hopkinson bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(7):2175-2195.
- [21] 王文,张世威,LIU Kai,等. 真三轴动静组合加载饱水煤样动态强度特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10):2010-2020.
WANG Wen, ZHANG Shiwei, LIU Kai, et al. Experimental study on dynamic strength characteristics of water-saturated coal under true triaxial static-dynamic combination loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10):2010-2020.
- [22] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):205-213.