

深部砂岩动态冲击破坏的力学特性研究

罗战友^{1a,1b,2}, 丁浩楠^{1a}, 邹宝平^{1a,1b,3}, 徐付军⁴, 陶燕丽^{1a,1b}

(1. 浙江科技学院 a. 土木与建筑工程学院, 杭州 310023; b. 隧道与地下空间技术开发研究院, 杭州 310023; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 3. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 4. 河南能源化工集团有限公司永煤公司 车集煤矿, 河南 商丘 476600)

摘要: 为了研究深部砂岩在热-水-力耦合作用下的动力学特性, 利用自主研发的热-水-力耦合三轴岩土体动态冲击力学试验系统, 分析了动态冲击下深部砂岩的力学参数并从能量的角度描述其破坏形态。研究表明: 在具有主动围压、轴压、渗透水压及温度的耦合作用下, 冲击气压增大时, 深部砂岩的应力-应变曲线的峰值应力随之增大; 深部砂岩的峰值应力与应变率变化表现出明显的正相关性, 具体表现为随着应变率的增大, 峰值应力不断增大; 随着冲击气压的增大, 破碎程度不断加大, 深部砂岩的破坏形态向压剪破坏过渡和发展, 岩石试件的破坏形态呈脆性向延性转变的趋势。试验结果可以为深部砂岩在实际爆破工程中提供参数支撑。

关键词: 深部砂岩; 动态冲击; 扰动; 热水力耦合; 破坏形态

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2020)04-0291-07

Study on mechanical properties of dynamic impact failure of deep sandstone

LUO Zhanyou^{1a,1b,2}, DING Haonan^{1a}, ZOU Baoping^{1a,1b,3}, XU Fujun⁴, TAO Yanli^{1a,1b}

(1 a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Tunnel and Underground Space Technology Development Institute, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Coastal and City Geotechnical Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Cheji Coal Mine of Yongmei Company, Henan Energy Chemical Group Co., Ltd., Shangqiu 476600, Henan, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of deep sandstone under the thermal-hydraulic-mechanical coupling action, a self-developed thermo-hydro-mechanical coupling triaxial rock-soil dynamic impact test system was employed to analyze the mechanical parameters of deep

收稿日期: 2020-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602308, 41502323, 41572299); 浙江省自然科学基金项目(LY20E080005); 浙江省教育科学规划课题(2018SCG416); 浙江科技学院研究生教学改革研究项目(2019yjsjg01)

通信作者: 邹宝平(1982—), 男, 湖南省邵阳人, 副教授, 博士, 主要从事隧道工程、地铁盾构工程研究。E-mail: zoubp@zust.edu.cn。

sandstone under dynamic impact and describe its failure form from the perspective of energy. Experimental results show that under the coupling action of active confining pressure, axial pressure, osmotic pressure and temperature, the peak stress of stress-strain curve of deep sandstone increases with the increase of impact pressure. The peak stress of deep sandstone shows obvious positive correlation with the change of strain rate, characterized by the fact that the peak stress increases continuously with the increase of strain rate. With the increase of impact pressure, the destructive pattern of deep sandstone is dramatically building up, and developed to compression shear failure coupled with the growing degree of fracture, and the destructive pattern of rock specimen is transitioning from being brittle to being ductile. The test results can provide parameter support for deep sandstone in actual blasting engineering.

Keywords: deep sandstone; dynamic impact; disturbance; thermal-hydraulic-mechanical coupling; destructive pattern

目前国内外对采矿及岩石力学的研究聚焦在深部岩体的力学特性上^[1]。随着煤矿资源开采地层不断深入,岩石受力状态逐渐复杂,这种情况下岩石的破坏模式不仅需要用冲击荷载下处于二维和三维应力状态岩石的破坏来模拟^[2],还应该考虑渗透水压及温度的影响,这种考虑岩石在各种因素综合作用下的动态破坏特性对实际工程更具有指导意义^[3]。岩石试验采用的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置多为单轴装置,研究的多为单轴动态压缩行为。李洪涛等^[4]对不同的岩石进行了单轴动态压缩试验,探索其动力学特性和裂纹扩展规律;袁璞等^[5]通过分析应力-应变关系提出了平均应变率和峰值应变的修正公式。考虑到对岩石动力学特性的影响因素众多,李地元等^[6]研究了砂岩岩体动态拉压力学与层理倾角之间的关系,发现在冲击压缩荷载作用下,随着倾角的增大,层状砂岩动态抗压强度呈倒 U 形变化;董英健等^[7]分析了冲击气压对矿石动态抗压强度和应变率的影响,结果表明随着冲击气压的增大,动态抗压强度不断增大,应变率也呈上升的趋势。国外研究者也对岩石试样进行了高应变率特性分析,探索其应力应变响应^[8]和微裂纹扩展速率与加载速率的相关性^[9-10],发现了裂纹扩展速率随冲击气压的增大而增大。

随着开采层位不断加深,研究岩石处于二维和三维应力状态下的动态冲击破坏模式更符合实际情况。在施加围压的情况下,刘军忠等^[11]、王立新^[12]、高强等^[13]研究岩石试样在不同围压及不同轴压和不同冲击荷载下的动力学特性,与围压等级、应变速率之间的关系,发现在围压作用下岩石的破坏由拉伸破坏向压剪破坏过渡和发展,而陈璐等^[14]从能量角度研究了深部花岗岩的动力破碎耗能特性,发现随着围压的增大,破碎耗能密度与围压呈线性增长关系。岩石动态特性的深入研究表明,深部岩石所处环境不仅有高地应力,还有高地渗透水压和高地温。已有研究者探索了砂岩处于不同围压和含水状态下的动态力学性能^[15]和高温作用后砂岩动态强度与温度之间的关系^[16],均发现峰值应力会随着应变率的增大而增大。

综上所述,国内外对岩石的研究多集中于单轴动态压缩下的动力学特性,对处于三维状态下岩石的动态破坏力学特性的研究较少。基于此,本文采用岩土体动态冲击力学试验系统,研究了深部砂岩处于热-水-力耦合作用复杂环境下,在不同冲击气压下的动态抗压强度与应变、应变率之间的关系及深部砂岩的破坏形态。

1 试验系统与试验方法

1.1 试验基本原理及系统组成

岩土体动态冲击力学试验系统由浙江科技学院自主研发,主要模拟深部岩石处于高地应力、高地温及高渗透水压等耦合条件下的复杂地层环境,该系统的主体结构是直径 100 mm 的具有冲击杆、入射杆

和透射杆的力学冲击系统,采用的是分离式霍普金森压杆试验基本原理。

试验中通过测量贴在两根弹性杆上的应变片的电压,利用力波在岩石试件内部经过几个来回的反复透射反射后在试件中建立起平衡条件,试件内部应力达到处处相等的状态,计算其应力、应变、应变率便可以利用二波法计算公式:

$$\sigma(t) = \frac{A_0 E_0}{A} \epsilon_t(t); \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_r(t) dt; \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \epsilon_r(t). \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\sigma(t)$ 、 $\epsilon(t)$ 、 $\dot{\epsilon}(t)$ 分别为试样动态应力(MPa)、应变、应变率(s^{-1}); $\epsilon_r(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_r(t)$ 分别为反射波、透射波; A 和 A_0 分别为试样和压杆的横截面积(mm^2); E_0 为压杆弹性模量(GPa); C_0 和 L 分别为压杆的波速(m/s)和长度(mm)。

采用的岩土体动态冲击力学试验系统如图1所示,主要由主体结构、加载系统、测试设备、计算机系统组成。主体结构包括入射杆、透射杆、圆柱体子弹、子弹加速管、发射装置、压缩空气舱、底座及其调整支架。加载系统包括空气压缩机、围压加载装置、轴压加载装置、温度控制系统及渗透水压加载装置。测试设备包括激光测速(子弹)仪、动态应变测试系统。其中围压加载装置通过油压作用在试件外圈的橡胶圈上施加围压,能施加的最大围压为60 MPa;轴压加载装置通过油压作用推动透射杆施加轴压,施加的最大轴压为60 MPa;温度控制系统通过电阻加热提供温度,温度控制系统的温度为 $-100 \sim 100$ °C;渗透水压加载装置所能施加的最大渗透水压为45 MPa。

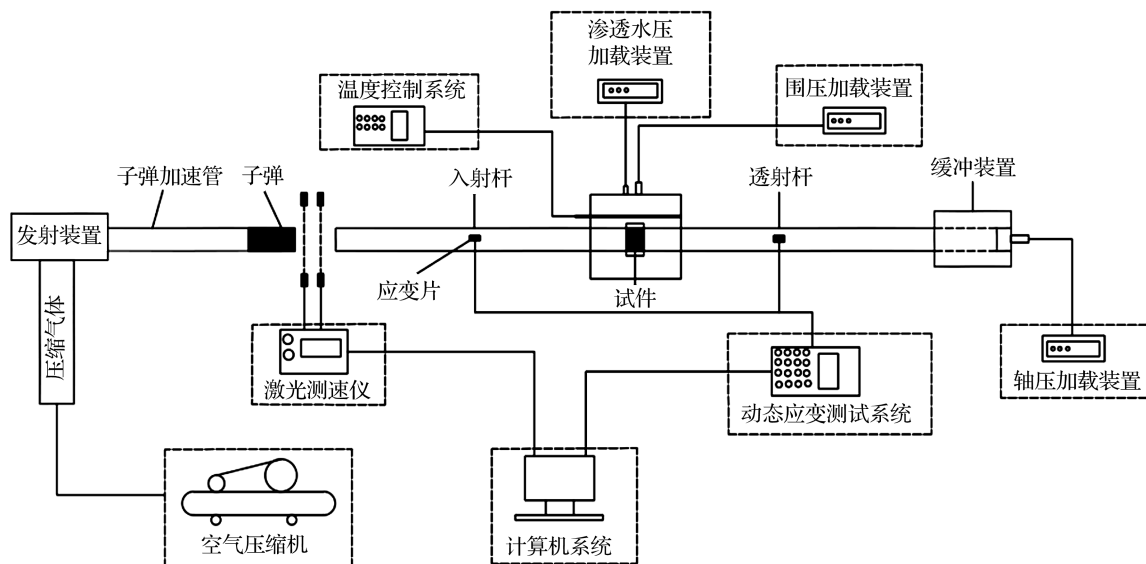


图1 岩土体动态冲击力学试验系统

Fig. 1 Dynamic impact mechanical test system of rock and soil

1.2 试样制备

为了保证岩石试样具有较好的一致性、均匀性,试样取样依托河南能源化工集团永煤公司开采的2611工作面处,平均采深 $-805.8 \sim -843.1$ m,赋存的高地温度为 30 °C,渗透水压为 10 MPa。岩石呈灰白色,具有平行层理,裂隙较发育且充填方解石脉,是典型的深部砂岩,其物理力学参数如下:密度, 2.60 g/ cm^3 ;纵波速度, $2\,066$ m/s;单轴饱和抗压强度, 118.25 MPa;弹性模量, 15.74 GPa;泊松比, 0.31 。根据岩石试样尺寸参考,试样的长径比为 $1:2$,即采用试样高度为 50 mm、直径为 100 mm的圆柱体。岩石试样精加工依次通过取芯、切割、打磨等工序,使标准岩石试样平整度控制在 ± 0.02 mm以内。

1.3 试验过程

为确保试验的安全性及可靠性,要严格按照试验系统操作准则及试验步骤。试验步骤如下:

- 1)将岩石标准试样编号备用。
- 2)检查子弹加速管、入射杆与透射杆是否处于同一水平直线并调整校正;检查校正应变仪与应变片。
- 3)试样两端涂抹黄油以减小摩擦效应带来的影响,之后将试样置于入射杆与透射杆之间并加载。
- 4)打开轴压液压机,设置轴压压力表数值后施加轴压,达到试验设定的轴压时停止加压并维持轴压稳定至试验结束。
- 5)打开围压液压机,设置围压压力表数值后施加围压,达到试验设定的围压时停止加压并维持围压稳定至试验结束。
- 6)打开渗透水压加载系统,设置渗透水压压力表数值后施加渗透水压,达到试验设定的渗透水压时停止加压并维持渗透水压稳定至试验结束。
- 7)打开操纵台上温度控制系统,设定指定温度后开始加热,达到试验设定的温度时停止加热并维持温度稳定至试验结束。
- 8)打开空气压缩机,将空气压缩到连接发射装置的压缩舱内,通过空气压力表实时监测压力值,待达到预设压力值则关闭空气压缩机,等待冲击试验的开始。
- 9)打开计算机系统内的 DataLab 软件,对试验采集的波形参数进行设置。
- 10)冲击气压推动子弹发射,动态冲击结束后进行卸载,卸载的顺序是先卸载围压,其次是渗透水压,然后卸载轴压,最后取出冲击后的试样,拍照存档。

1.4 试验方案

试验选用的子弹长度为 300 mm,子弹加速管长度为 2 500 mm。选取 3 组不同参数的试验数据:围压大小与轴压大小保持一致,均为 20 MPa;渗透水压均采用 10 MPa;温度均采用 30 ℃;多次冲击试验后发现,深部砂岩在 1.5 MPa 及以上的冲击气压作用下会出现大裂缝及破碎的情况,为了观察试样破坏形态,选择 1.5、2.0、2.5 MPa 的冲击气压进行试验。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

根据二波法计算公式,利用霍普金森压杆软件计算出动态冲击后深部砂岩的动态应力、应变、应变率和应变能,对所得的系列数据进行处理后得到的深部砂岩的试验结果见表 1。

表 1 深部砂岩的试验结果

Table 1 Test results of deep sandstone

试样编号	平均应变率/ s^{-1}	峰值应力/MPa	峰值应变/ $(\times 10^{-2})$	峰值应变能/J
A-1	190.5	438	2.99	3 766
A-2	196.6	540	2.88	3 192
A-3	315.8	545	2.48	3 178

2.2 岩石动态强度分析

深部砂岩的时间-动态抗压强度关系曲线如图 2 所示。从关系曲线中可以看出,冲击气压为 1.5 MPa 时,深部砂岩峰值强度为 438 MPa;冲击气压为 2.0 MPa 时,深部砂岩峰值强度为 540 MPa;冲击气压为 2.5 MPa 时,其峰值强度为 545 MPa。冲击气压增大到 2.0 MPa 以后,深部砂岩的动态抗压强度峰值提升并不明显,表明深部砂岩的动态抗压强度峰值极限在 550 MPa 左右。

在动态冲击荷载下深部砂岩的应力-应变关系曲线如图 3 所示(应力即动态抗压强度)。在 2.0 MPa 及 2.5 MPa 冲击气压下,其动态抗压强度平均值取的是应力-应变曲线上趋于平缓阶段 I 区间的应力平均值,1.5 MPa 冲击气压下的动态抗压强度平均值为趋于平缓阶段 II 区间的应力平均值。在 1.5 MPa 的冲击气压下,其动态抗压强度的平均值为 375 MPa;当冲击气压达到 2.0 MPa 及以上时,动态抗压强

度平均值为 525 MPa。深部砂岩的动态抗压强度随着冲击气压的增大而不断增大。由图 3 可以看出曲线的切线斜率逐渐减小直至负斜率(卸载过程),这一过程就是切线模量逐渐减小的过程。深部砂岩的应力达到屈服点并持续增至峰值应力点的过程表现出应变硬化的特性。从图 3 中还可以看出深部砂岩变形破坏过程有屈服阶段、应变强化阶段和软化破坏阶段。

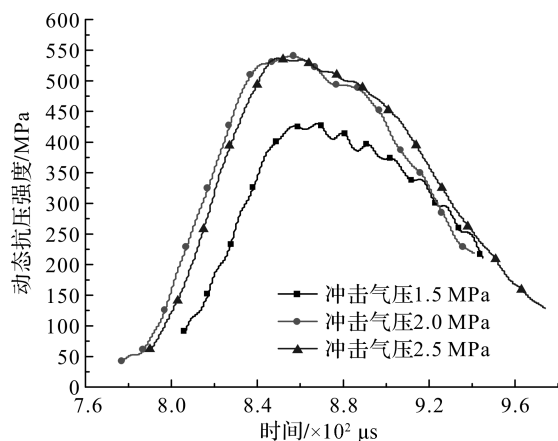


图 2 深部砂岩的时间-动态抗压强度关系曲线

Fig. 2 Relation curve of time-dynamic compressive strength of deep sandstone

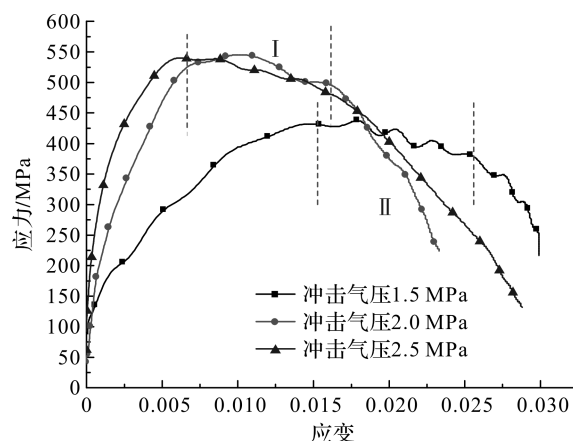


图 3 深部砂岩的应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of deep sandstone

深部砂岩的应变率-时间关系曲线如图 4 所示,在应变率-时间关系曲线上,以 2.5 MPa 冲击气压情况下的应变率-时间关系曲线为例,平均应变率指的是 A 与 B 两个关键拐点的平均值。通过计算得到,当冲击气压为 1.5 MPa 时,平均应变率为 190.5 s^{-1} ;当冲击气压为 2.0 MPa 时,平均应变率为 206.6 s^{-1} ;冲击气压为 2.5 MPa 时,平均应变率为 215.8 s^{-1} 。

深部砂岩的动态抗压强度-应变率关系曲线如图 5 所示,从关系曲线中可以看出平均应变率的变化范围为 $190.5 \sim 215.8 \text{ s}^{-1}$,在动态冲击荷载作用下,深部砂岩的动态抗压强度随着应变率的增大而不断增大,岩石出现硬化现象。深部砂岩的峰值动态抗压强度随着平均应变率的增大而增大,表现出明显的正相关性。

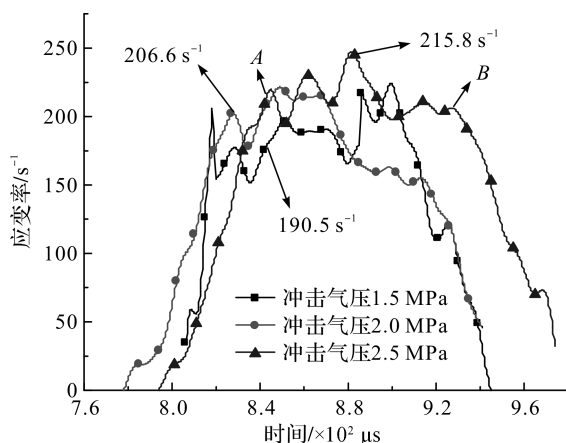


图 4 深部砂岩的应变率-时间关系曲线

Fig. 4 Strain rate-time curve of deep sandstone

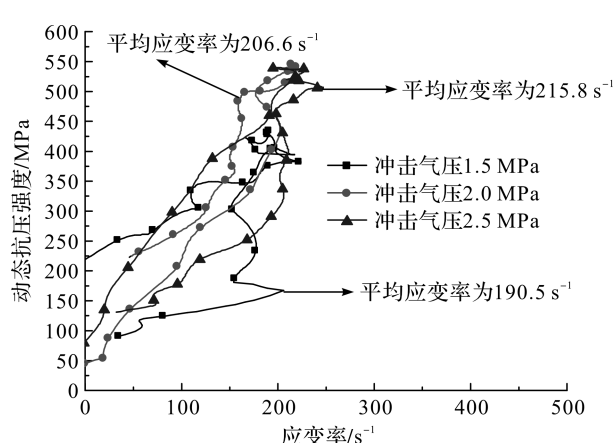


图 5 深部砂岩的动态抗压强度-应变率关系曲线

Fig. 5 Relation curve of dynamic compressive strength-strain rate of deep sandstone

3 能量与破坏形态分析

3.1 能量分析

图 6 给出了深部砂岩在动态冲击荷载下的应变能与时间的关系曲线,应变能即试样吸收的能量。从

图 6 中可以看出,输出到岩石试样内部的能量值与冲击气压的大小呈现一定的相关性,在 $800\ \mu\text{s}$ 前,冲击气压的大小对岩石试样吸收能量能力的影响微乎其微,在 $800\ \mu\text{s}$ 后,吸收的能量值变化显著,且在整体趋势上表现出随着冲击气压的增大,岩石试样吸收的峰值应变能也增大。

3.2 破坏形态分析

岩石内部的微裂纹在相互作用下造成了岩石的破坏形态,岩石的受力状态可以通过其破坏形态分析所得,因此对岩石破坏形态进行研究并分析具有重要的意义。图 7 为本文试验中在不同冲击气压下深部砂岩的破坏形态。

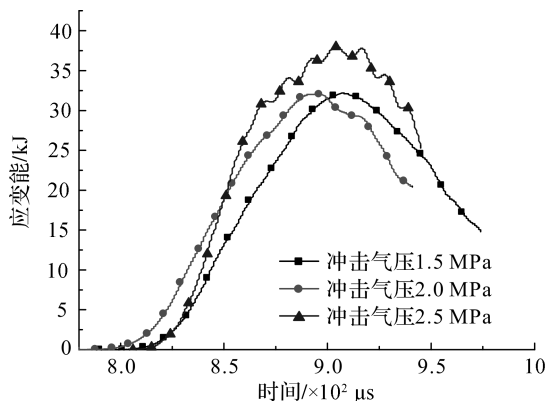


图 6 应变能随时间变化关系曲线

Fig. 6 Curve of strain energy changing with time

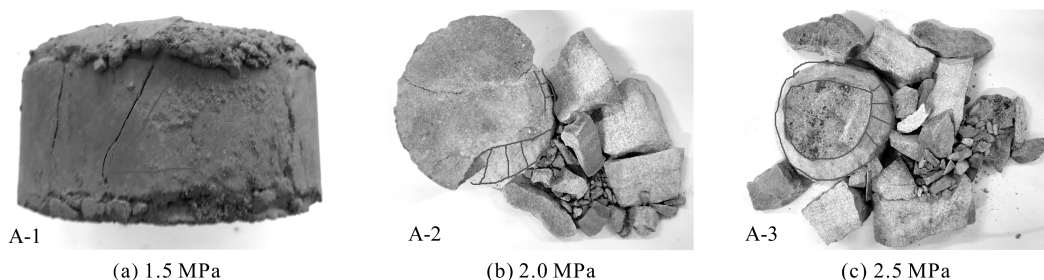


图 7 不同冲击气压下深部砂岩的破坏形态

Fig. 7 Destructive patterns of deep sandstone under different impact pressures

从图 7 可以看出,不同冲击气压情况下,从岩石的破坏形态能够看出岩石破坏程度不同:当冲击气压为 $1.5\ \text{MPa}$ 时,岩石试样破损形态保持整体性,并未出现脱落的碎块,但是沿着试样高度方向出现了多处贯穿的大裂缝且裂缝的方向与冲击面呈 45° 夹角;当冲击气压为 $2.0\ \text{MPa}$ 时,岩石试样已经破碎,出现了多块尺寸较大的碎块及细小颗粒的碎屑、未发展完全的裂缝,破坏面与冲击面呈 45° 夹角;当冲击气压为 $2.5\ \text{MPa}$ 时,岩石试样破碎程度进一步加大,碎块数量增加且碎块尺寸减小,细小颗粒碎屑数量增加,破坏后的试样呈锥状,破坏面与冲击面呈 45° 夹角。从岩石试样冲击破坏的程度可以看出,试样的破坏程度随着冲击气压的增大而不断增大,碎块数量增加且碎块尺寸不断减小。在高主动围压、轴压、渗透水压及温度耦合作用下,深部砂岩的破坏形态向压剪破坏过渡和发展,宏观剪切角与最大主应力的方向基本上呈 45° 夹角,岩石试样的破坏形态有脆性向延性转变的趋势。

4 结 论

基于岩土体动态力学冲击试验系统,通过研究岩石试样在具有主动围压、轴压、渗透水压及温度耦合作用下的动态力学特性,得出主要结论如下:

1) 深部砂岩的应力-应变曲线的峰值应力随着冲击气压的增大而增大,这一特征与单轴加载及非耦合条件下的冲击试验结果相同,而变形破坏过程有屈服阶段、应变强化阶段和卸载破坏阶段。

2) 冲击试验中,深部砂岩的峰值应力与应变率具有明显的正相关性,具体表现为随应变率的增大峰值应力不断增大。

3) 深部砂岩吸收能量的能力在 $800\ \mu\text{s}$ 后显著增加,且随着冲击气压的不断增大,岩石吸收的最大能量也不断增大。

4) 随着冲击气压的增大,破碎程度不断加大,深部砂岩的破坏形态向压剪破坏过渡和发展,宏观剪切角与最大主应力的方向基本上呈 45° 夹角,岩石试件的破坏形态有脆性向延性转变的趋势。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803.
- [2] 左宇军,李夕兵,唐春安,等.二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,12(6):1809.
- [3] 黄理兴.岩石动力学研究成就与趋势[J].岩土力学,2011,32(10):2889.
- [4] 李洪涛,王志强,姚强,等.石英云母片岩动力学特性实验及爆破裂纹扩展研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2125.
- [5] 袁璞,马瑞秋.不同含水状态下煤矿砂岩 SHPB 试验与分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2888.
- [6] 李地元,邱加冬,李夕兵.冲击载荷作用下层状砂岩动态拉压力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2091.
- [7] 董英健,郭连军,贾建军.冲击加载作用下矿石试件的动态力学特性及块度分布特征[J].金属矿山,2019,12(8):38.
- [8] MISHRA S, CHAKRABORTY T. Determination of high-strain-rate stress-strain response of granite for blast analysis of tunnels[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2019, 145(8):23.
- [9] OH S W, MIN G J, PARK S W, et al. Anisotropic influence of fracture toughness on loading rate dependency for granitic rocks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 221:13.
- [10] AI D H, ZHAO Y C, XIE B J, et al. Experimental study of fracture characterizations of rocks under dynamic tension test with Image processing[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019:14.
- [11] 刘军忠,许金余,吕晓聪,等.主动围压下岩石的冲击力学性能试验研究[J].振动与冲击,2011,12(6):120.
- [12] 王立新.不同围压和轴压下花岗类岩石的动力特性分析[J].新疆有色金属,2018,6(6):46.
- [13] 高强,汪海波,吕闹,等.不同冲击速度下硬煤的力学特性试验研究[J].中国安全生产科学技术,2019,12(1):69.
- [14] 陈璐,郭利杰.高应力条件下深部花岗岩冲击破碎耗能试验研究[J].中国矿业,2019,12(增刊2):354.
- [15] 高富强,张军,何朋立.不同围压荷载和含水状态下砂岩 SHPB 试验研究[J].矿业研究与开发,2018,12(6):65.
- [16] 尹士兵,李夕兵,殷志强,等.高温后砂岩静、动态力学特性研究与比较[J].岩石力学与工程学报,2012,12(2):273.
- [17] 平琦,马芹永,袁璞. SHPB 试验岩石试件应力平衡时间预估分析[J].振动与冲击,2013,32(12):55.