

不同加载速率饱水砂岩试件动态劈裂力学性能研究 与能耗分析

唐庆林

安徽理工大学土木建筑学院 安徽淮南 232001

【摘 要】深部工程岩石常处于饱水状态,爆破开采时往往承受各种复杂的冲击力作用。为保障施工安全高效进行,研究 不同冲击荷载下饱水砂岩的动态力学性能有着理论指导意义。本试验测量了饱水处理后砂岩试件的物理参数,并采用分离 式霍普金森压杆装置(SHPB)对砂岩试件开展6种不同冲击荷载下的动态劈裂试验。结果表明:饱水砂岩试件动抗拉强度 随着加载速率增大而增大,呈二次多项式关系,正相关性显著;随着应变率提高,动抗拉强度增长,两者近似指数函数关 系;动峰值应变受应变率作用明显,表现为二次增长的多项式关系;随着冲击气压增加,试件破裂面逐渐增多,吸收的能 量也越多,破碎程度加剧,碎块尺寸减小。

【关键词】岩石动力学; 饱水砂岩; 冲击气压; 冲击压缩; SHPB

引言

岩石坝体、地下洞室及深部采矿等施工过程中,岩石等 矿产资源经常处于饱水状态。且在施工作业中往往受冲击 力、爆破开挖等动荷载影响^[1],受力情况复杂。随着深部岩 体的开采,考虑到岩石饱水状态和动荷载是这类岩体破坏 的重要因素,因此研究不同冲击荷载下饱水岩石的动力学 性能具有一定的工程意义。

众多学者已经对饱水状态下岩石的力学性能进行了深入 研究,并取得了显著成果。贾蓬等[2]针对具有不同孔隙率的 绿砂岩、红砂岩和花岗岩,开展了饱水裂隙岩石的冻融循 环试验,揭示了饱水裂隙岩石的冻融应变与温度变化之间 的关系呈现出无法闭合的滞回环。冯帆等[3]对饱水状态下 的红砂岩试样进行了真三轴卸载 - 动力扰动试验,研究表 明饱水状态下砂岩的破坏模式转变为以张拉型为主。王浩 宇等间通过对饱水状态下的红砂岩试样进行动态单轴冲击试 验,发现红砂岩试样的动态抗压强度随着含水率的增加而 降低,但随着应变率的增加而增大。王斌等55对饱水岩石在 单轴荷载下的静态和动态抗压强度进行了细观力学分析, 研究出在相同断裂韧度条件下,饱水岩石的静态抗压强度 低于风干岩石的静态抗压强度,而饱水岩石的动态抗压强 度却达到最大值。Zi-long ZHOU等^[6]对干砂岩和饱和砂岩试 件进行了抗压试验。研究发现,无论是干砂岩还是饱水砂 岩,其动态抗压强度都随着应变速率的增加而增强。郑广 辉等印对四种不同饱水度的红砂岩试样进行了静态压缩试验 和六种应变率的动态冲击试验。研究表明,各饱水度的红 砂岩均呈现出明显的应变率效应,即峰值应力、峰值应变 及峰值模量均随着应变率的增大而增大。

本文采用直径为Φ50mm的分离式霍普金森压杆试验装置 (Split Hopkinson Pressure Bar,简称SHPB),对饱水砂 岩试件进行了6种不同冲击气压(0.3MPa、0.325MPa、0.35M Pa、0.375MPa、0.4MPa、0.425MPa)下的动态劈裂试验。为 工程实践提供更加准确和可靠的理论支持。

1 砂岩试件加工及物理参数

1.1 试件加工与制备

试验所用岩样取自安徽淮南潘二煤矿巷道砂岩。选择完整性和均匀性较好的岩块,利用岩石加工设备进行取芯、切割和打磨,加工成直径D=50mm,高度B=25mm的标准试件。

将加工成型的砂岩件放入水浴槽中自然饱水48h,使 试件处于完全饱水状态。随后取出试件用毛巾擦拭表面水 分,测试试件尺寸和质量等基本物理参数。饱水砂岩试件 的质量增长率和体积膨胀率分别为0.21%和0.09%,密度增 大0.12%。

1.2 SHPB试验装置

本文试验采用深部煤矿采用响应与灾害防控国家重点试验室SHPB试验装置,对饱水砂岩试件进行不同加载速率冲击压缩试验。SHPB试验时,选择0.3MPa、0.325MPa、0.35MPa、0.375MPa、0.4MPa和0.425MPa冲击气压驱动撞击杆(子弹)进行加载,根据SHPB试验技术基本原理^[8-9],得到饱水砂岩试件的应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 ε (t)等动力学性能参数。

- 2 动力学性能分析
- 2.1 动应力-应变曲线



SHPB试验中,采用6种冲击加载速率得到饱水砂岩试件 典型动应力-应变曲线,如图1所示。



图1饱水砂岩试件动应力-应变曲线



从图1可以看出,不同冲击加载速率的饱水砂岩试件动 应力-应变曲线变化规律相似,表现为先较快上升,达到峰 值后缓慢下降。随冲击加载速率增大,动应力-应变曲线向 左上方偏移,动抗压强度峰值增大,动应变峰值减小。

2.2 动抗拉强度

饱水砂岩试件动抗拉强度随加载气压变化情况,如图2 所示。



图2 试件动抗压强度随加载气压变化情况

Fig.2 Variation of dynamic compressive strength of specimen with loading air pressure

从图2可以看出,随冲击气压 *p* 增大,饱水砂岩试件动 抗压强度 σ(*p*) 呈现增大趋势,呈二次函数关系,如式(1) 所示,拟合曲线如图6所示。

试验所得数据处理并进行绘图分析,得到饱水砂岩试件 动抗压强度和应变率变化关系如图3所示。



图3动抗拉强度与应变率的关系



从图3可以看出,饱水砂岩试件动抗拉强度随应变率增加近似呈指数增大,表现出较强的率相关性。拟合公式如 (2)所示。

 $\sigma(\mathscr{B}) = 4.7113 \times 10^{-10} \, e^{(\mathscr{B}2.0235)} - 2.0235 \qquad (R^2 = 0.9951) \quad (2)$

2.4 饱水砂岩动峰值应变一应变率曲线分析

在动态加载条件下,饱水砂岩试样峰值应变与应变率的 关系曲线如图4所示。



图4 动峰值应变与应变率变化关系图

Fig.4 Relationship diagram between dynamic peak strain and strain rate change

从图4中可以看出,试样峰值应变随着应变率的增大而 增大,呈现二次函数关系,有较强的相关性。拟合公式如 公式(3)所示。

 $\varepsilon_0(\mathcal{B}) = 2.0235 - 3.0876 \times 10^{-5} \mathcal{B} + 3.0876 \times 10^{-5} \mathcal{B} \quad (R^2 = 0.9845) \quad (3)$

式中: ε, 为饱水砂岩试样的动峰值应变。

3 能量分析

试验试件在受到冲击荷载作用时,一般都伴随能量变化。利用SHPB试验装置对岩石试件进行冲击试验过程中,试件入射能WI(t),反射能WR(t),透射能WT(t)和试件吸收能WS(t)可由下式(4)计算^[10];

$$W_{I}(t) = E_{0}C_{0}A_{0}\int_{0}^{t} \varepsilon_{I}^{2}(t)dt$$

$$W_{R}(t) = E_{0}C_{0}A_{0}\int_{0}^{t} \varepsilon_{R}^{2}(t)dt$$

$$W_{T}(t) = E_{0}C_{0}A_{0}\int_{0}^{t} \varepsilon_{T}^{2}(t)dt$$

$$W_{S}(t) = W_{I}(t) - W_{R}(t) - W_{T}(t)$$
(4)

式中: WI(t), WR(t), WT(t), WS(t)分别为入射能,反 射能,透射能以及吸收能;

入射能大小可以间接反映出试件受到冲击气压高低。随 着冲击气压的升高,入射能逐渐增大,表现出正相关性。



图5 吸收能与冲击气压变化关系图

Fig.5 Relationship between absorption energy and impact air pressure change

从图5可以看出,随着冲击气压的不断增加,饱水砂 岩试件破坏时所吸收的能量就越多,两者变化关系呈正 相关。

4 结论

试验将饱水处理后的砂岩试件进行6种不同冲击气压的 冲击压缩试验,研究不同冲击荷载下饱水砂岩试件的物理 及动力学性能变化。结论如下:

(1)经过饱水处理后砂岩试件较之自然状态下试件质量、体积、密度均增大。质量平均增长率大于体积平均增长率,密度呈正增长。

(2) 饱水砂岩试件动抗拉强度与冲击气压呈二次多项 式函数关系,正相关性显著。 (3)饱水砂岩试件动抗拉强度随着应变率增加而增加,应变率效应明显。应变率增加,峰值应变增大,呈二次多项式函数关系。

(4)从能量耗散角度分析,随着加载速率增大,入射 能增大,吸收能占比增大,试件破坏时碎块面积越均匀, 能量效应越高。

参考文献:

[1] 王斌,李夕兵,尹土兵等.饱水砂岩动态强度的 SHPB试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(05):1003-1009.

[2] 贾蓬, 王晓帅, 王德超. 饱水裂隙岩石冻融变形特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44 (02): 345-354.

[3] 冯帆,陈绍杰,王琦等. 真三轴卸载 - 动力扰动下自 然与饱水砂岩破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学 报, 2022, 41 (11): 2240-2253.

[4] 王浩宇, 许金余, 刘石.水-动力耦合作用下红砂岩 动态强度及破坏机理[J]. 空军工程大学学报(自然科学 版), 2021, 22(04): 99-103.

[5] 王斌,李夕兵.单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗 压强度的细观力学分析[J].爆炸与冲击,2012,32(04):423-431.

[6]Zi-long ZHOU, Xin CAI, Yuan ZHAO, Lu CHEN, Cheng XIONG, Xi-bing LI. Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7).

[7] 郑广辉, 许金余, 王鹏等. 不同饱水度红砂 岩静态本构关系及动态力学性能研究[J]. 振动与冲 击, 2018, 37 (16): 31-37.

[8] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版 社, 2010: 39-64.

[9] 平琦. 砂岩动静态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 地下空间工程学报, 2013, 9(12): 246-252.

[10] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学 [M]. 长沙: 中南工 业大学出版社, 1994: 2-93.

作者简介:

唐庆林(1996-10),男,汉族,湖南涟源人,硕士研究 生,研究方向:岩土工程。

- 200 -