

动载荷和含水率对红砂岩动态强度和变形的影响*

谭彬¹, 徐虹¹, 金解放¹, 余雄²

(1.江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州市 341000;

2.江西省交通投资集团有限公司项目建设管理公司, 江西 南昌 330052)

摘要:地下工程岩体爆破开挖过程中,动载荷和地下水对工程岩体的安全稳定具有显著影响。为揭示动载荷和含水率对岩石的影响特性,采用改进的霍普金森压杆试验装置,用4种不同的冲击速度,在6种含水率工况下对红砂岩进行冲击压缩试验,根据试验中采集到的3组应力波信号,利用三波法将其转化为岩石的动态应力-应变曲线,得到了岩石的动态峰值应力、极值应变和平均应变率等参数。试验结果表明:相同动载荷作用下,随着含水率增加,动态峰值应力逐渐减小,且二者具有良好的指数函数关系;随着含水率增加,岩石动态极值应变线性增加;随着含水率增加,岩石的平均应变率呈指数型增长。随着冲击速度的增大,动态峰值应力、动态极值应变和岩石的平均应变率均增大。研究结果有助于对深部岩石的稳定性进行监测,为工程中的突水突泥等灾害的发生机理及影响因素的研究提供一定参考。

关键词:红砂岩;含水率;动态峰值应力;动态极值应变;平均应变率

中图分类号:TD315;TU452 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2023)09-0164-08

0 引言

岩石是由多种矿物颗粒组成的天然材料,其物理力学性能除与本身的成分和结构有关,还深受地下水、温度、地应力、爆破动载荷等外在因素的影响^[1-3]。由于爆破应力波的传播衰减作用,距震源不同距离处岩石(体)的冲击动载荷也不同^[3],当岩石(体)受到动载荷影响时,岩石(体)在不同含水率的环境下其动态响应也表现不同,这对地下岩体工程的高效爆破开挖提出了挑战^[4-5]。因此,研究动载荷和含水率对红砂岩动态强度、破坏程度的影响,对于高效开挖工程岩体具有重要意义。

地下水在控制岩石强度和变形方面起着重要作

用。在单轴压缩下,随着含水率的增加,岩石的压缩强度和弹性模量均降低^[6],岩石的强度和变形对含水率的变化较为敏感^[7],岩石80%~90%强度的损失均发生在低含水率状态下^[8]。岩石对水的敏感度很大程度上依赖于岩石的有效孔隙度,岩石强度降低主要是因为岩石中的黏土矿物的水化作用,可溶性矿物的溶蚀作用以及结合水膜的润滑效应等^[9-11]。含水率的增加导致岩石的破坏模式由脆性破坏向延性破坏转变^[12]。在三轴压缩应力状态下,岩石由干状态变为湿状态时,岩石的峰值黏聚力增加了3%左右,内摩擦角减小了26%^[13]。以上研究均是在准静态条件下探讨含水率对岩石强度和变形特性的影响,结果表明,随着含水率增加,岩石的强度逐渐减低,破坏特征发生根本性变化,由脆性转化为延性。研究结论极大地加深了人们对静态应力作用下岩石受水的影响特性的认识。然而在工程实际中,岩石(体)不仅处于地下水环境中,往往还承受一定的动载荷,因此,研究含水率对岩石的动态强度和变形特性影响显得尤为重要。

随着深部工程岩体开采的需要和测试技术的发展,近年来众多学者对水环境下岩石(体)的动态压缩力学特性进行了研究^[14-17]。研究表明,在同一加载率作用下,水对岩石的动态力学特性与静应力对岩石的力学特性类似,水在岩石中起着弱化作用,砂岩在干燥状态下的最大应力和最大应变率均大于饱和水状态下的最大应力和最大应变率^[17];而在不同加载率下,水对岩石的率相关性具有显著的影响作用,当加载率增大时,强度和断裂韧性增大,且相较于干燥试样,饱水岩石表现出更高的率相关性^[5,18]。以上研究分别从加载率、含水率两个变量

* 收稿日期:2022-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51964015,52174112);江西理工大学清江青年英才支持计划项目(JXUSTQJB2017007)。

作者简介:谭彬(1997—),男,江西吉安人,硕士研究生,主要从事岩土动力学的工作,E-mail:Email_Tan163@163.com。

通信作者:金解放(1977—),男,河南杞县人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土动力学及其稳定性分析方面的教学和科研工作,E-mail:jif_chang@126.com。

来研究水对岩石动态响应的影响,极大地加深了人们在水对岩石动态响应方面的认识,对于分析水对岩石的破坏机理积累了丰富的经验。在实际的爆破开挖工程中,由于岩石(体)的位置不同,其所处的赋存环境的含水率以及承受的动荷载大小也会不一样,因此,用动荷载大小来直接量化岩石的加载率,并且用不同的含水率来研究岩石的动态响应更贴合工程实际,这对进一步探究处于不同含水率条件下的岩石(体)的动态力学特性,揭示因水导致的工程岩体灾害发生的原因,进而科学有效地解决工程技术问题具有重大意义。

本文旨在研究动荷载和含水率对岩石强度及变形的影响,基于改进的霍布金森压杆试验系统,对不同含水率红砂岩进行不同大小的动荷载的冲击试验,分别用含水率和冲击速度模拟工程实际中地下水的饱和度和爆破动荷载大小。得到不同试验工况下的动态峰值应力、动态极值应变和平均应变率,并

建立红砂岩的动态参数、含水率和动荷载之间的经验关系式。本文所构建的经验模型可为研究不同含水率的工程岩体动态响应提供参考,为预防和治理在爆破开挖过程中因岩石含水率变化及爆破荷载大小不同导致的工程技术问题提供理论依据与技术支持。

1 试验系统与试验方案

1.1 试样制备

试验材料选自赋存于地下水环境中的粉质红砂岩。根据规范中的建议标准^[19],选用的试件规格为 $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆柱体,所有圆柱体试件都需要研磨抛光,试样的两个端面需保持平行垂直,偏差不得大于 0.02 mm ,端面法线偏差不得大于 0.25° 。利用声波测速仪挑选波速相近的试件用于试验,避免因试件的初始差异较大导致试验误差,经测试所选试件的初始声波波速见表1。

表1 岩石试件的初始声波波速和不同工况下的动态试验结果

试样编号	冲击速度/ (m/s)	初始声波波速/ (m/s)	含水率 $\omega/\%$	峰值应力 σ_p/MPa	极值应变 $\epsilon_m/(\times 10^{-3})$	应变率 $\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	是否宏观 破坏
R-52	8	3112.99	0.000	109.53	5.23	53.96	否
R-75		3115.53	0.605	107.41	5.31	55.94	否
R-38		3119.81	1.008	101.60	5.81	57.95	否
R-94		3122.12	1.925	94.95	5.78	58.55	否
R-16		3111.27	2.909	88.54	6.07	59.76	否
R-99		3120.89	3.428	88.13	6.17	65.56	否
R-71	10	3121.02	0.000	119.45	6.51	70.13	否
R-77		3118.50	0.729	118.74	6.90	72.24	否
R-137		3114.91	0.974	115.68	7.12	73.55	否
R-102		3117.82	2.110	104.48	7.95	76.93	否
R-44		3116.75	3.229	97.86	8.03	76.70	否
R-109		3116.55	3.528	101.15	8.51	77.02	否
R-58	12	3118.75	0.000	159.47	8.15	88.90	否
R-78		3114.97	0.641	134.65	9.17	94.34	否
R-126		3113.56	0.979	136.75	9.14	95.46	否
R-106		3122.11	2.067	119.20	9.64	96.14	是
R-14		3119.56	3.051	112.80	9.96	96.99	是
R-111		3117.16	3.662	110.65	10.24	98.74	是
R-65	15	3118.25	0.000	166.24	10.32	105.31	是
R-81		3112.98	0.668	156.30	11.54	116.94	是
R-135		3115.80	1.069	148.36	11.85	114.47	是
R-101		3114.27	2.250	125.77	12.30	118.63	是
R-42		3119.64	3.155	121.01	12.69	122.29	是
R-114		3110.28	3.644	118.95	13.36	128.48	是

本文旨在探究含水率对岩石的动态力学特性的影响,通过对岩石进行饱水预试验,将其含水率设置为 0% 、 0.6% 、 1.0% 、 2.0% 、 3.0% 和 3.6% 共6个等级。将试样放入恒温烘干箱中烘干 24 h ,获得含水率为 0 的干燥红砂岩试样;将烘干的一部分试样放在自然状态下,通过控制放置时间,分别获得含水率为

0.6% 、 1.0% 的试样;分别通过浸泡吸水和真空负压饱和吸水获得含水率为 2.0% 、 3.0% 和 3.6% 的红砂岩试样,含水率计算如式(1):

$$\omega = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ω 为岩石试样的含水率; m_w 为吸水后岩石试

件的质量; m_d 为干燥时的岩石质量。

1.2 试验系统

图 1 为本试验使用的试验装置,该装置由高压气室、冲头、入射杆、透射杆、吸收杆组成。选用加载

波形为半正弦波并能更好消除 P-C 振荡的纺锤型冲头,冲头尺寸如图 2 所示。入射杆、透射杆和吸收杆的杆径均为 50 mm、纵波波速为 5.4 km/s,密度为 7.81 g/cm³,弹性模量为 250 GPa。

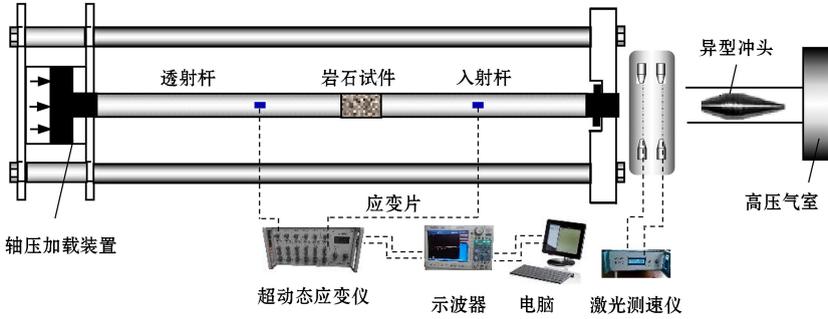


图 1 改进的 SHPB 试验系统

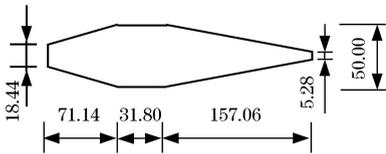


图 2 纺锤型冲头尺寸(单位:mm)

1.3 试验方法

试验含水率分别设置为 0、0.6%、1.0%、2.0%、3.0%、3.6%，分别模拟工程实际中岩体的饱水程度；动荷载分别设置为 8, 10, 12, 15 m/s 四个等级,分别模拟工程实际中岩体承受不同大小的动载荷。本试验通过控制图 2 中的气室气压值以及腔膛中冲头的位置,来实现用不同的冲击速度碰撞入射杆,冲击速度通过激光测速仪进行测定。

将岩石试件水平置于两弹性杆间,使之与两杆紧密贴合,并与钢杆轴线保持重合;为消除试样端面产生的端部摩擦效应,在试样与两杆的接触面处涂抹一层均匀的润滑脂。

1.4 试验原理

通过测试和计算,得到试验系统中应变片的应

变-电压转换系数为 0.0052 ϵ/V ,将入射杆和透射杆上的应变片所测得的电压乘以应变-电压转换系数,可得到相应的应变值。根据一维应力波理论^[20],间接地计算出红砂岩试件的动态应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 以及应变率 $\dot{\epsilon}(t)$,计算公式如下:

$$\epsilon(t) = \frac{C_0}{L_S} \int_0^t [\epsilon_I(t) - \epsilon_R(t) - \epsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{2A_S} [\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{L_S} [\dot{\epsilon}_I(t) - \dot{\epsilon}_R(t) - \dot{\epsilon}_T(t)] \quad (4)$$

式中, $\epsilon_I, \epsilon_R, \epsilon_T$ 分别为入射杆和透射杆上测得的入射、反射及透射应变波; A 为弹性杆横截面积, mm^2 ; E 为杆的弹性模量, GPa ; C_0 为杆的纵波波速, m/s ; A_S 为试件横截面面积, mm^2 ; L_S 为试件长度, mm 。

2 试验结果

由于篇幅有限,本文仅给出典型的应力波波图形,如图 3 所示。

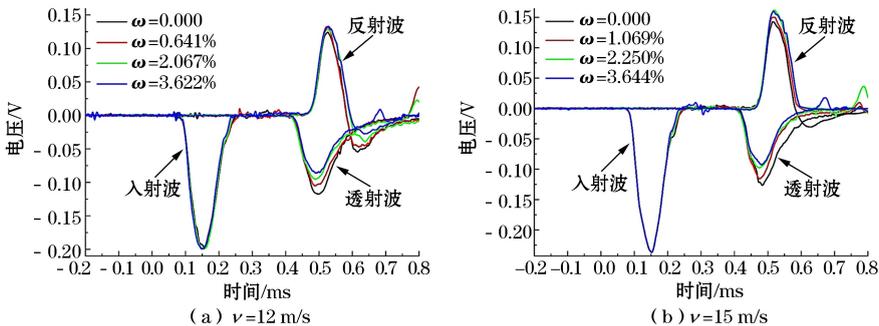


图 3 不同含水率下的入射波、反射波和透射波

由图3可知,同一冲击速度工况下,不同的含水率对红砂岩的反射波和透射波有较大影响。随着含水率的增多,波在岩石中传播过程中,其透射能力越来越弱,反射能力反之。表现为随着岩石中的水分增加,其反射波幅值变大,透射波幅值变小。

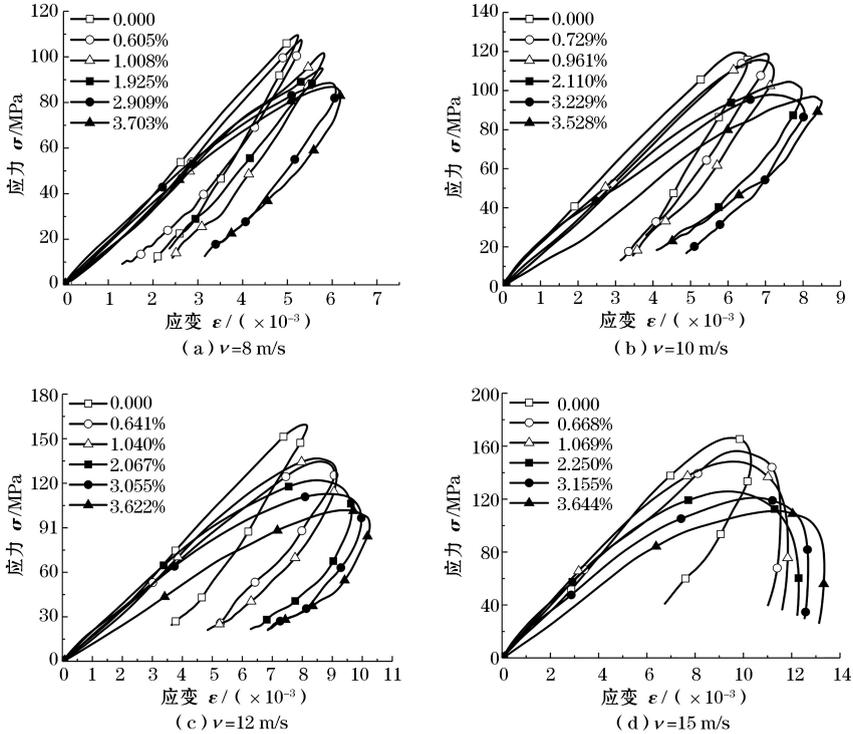


图4 不同工况下红砂岩的动态应力-应变曲线

根据试验原理,利用式(1)、式(2)、式(3),可得岩石的动态应力-应变曲线(见图4)。根据动态应力-应变曲线,可得不同工况下岩石动态力学参数(见表1);其中动态峰值应力 σ_p 、动态极值应变 ϵ_m 分别为岩石试样动态应力-应变曲线中的最大应力值、最大应变值, $\dot{\epsilon}$ 为平均应变率。

3 红砂岩动态变形特性

3.1 动态峰值应力

动态峰值应力表征岩石对动载荷的抵抗能力,其值越大表明岩石的抵抗能力越强,岩石发生宏观破坏时的动态峰值应力是岩石的动态强度值。根据表1可得不同动荷载下红砂岩动态峰值应力与含水率之间关系,如图5所示。

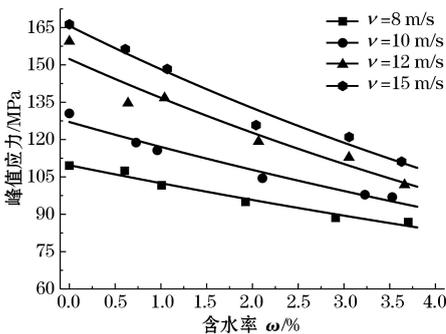


图5 动态峰值应力与含水率的关系

在相同动载荷作用下,岩石中的含水率增加,动态峰值应力逐渐降低,这表明含水率的增加对岩石动态抵抗能力有弱化作用。

由表1可以看出,本文进行的冲击试验应变率较低,例如在 $v=8\text{ m/s}$ 和 $v=10\text{ m/s}$ 时,岩石试件都没有发生宏观破坏,在此情况下,随着岩石含水率的增加,在冲击过程中,孔隙水对岩石的润滑作用增大,减小了岩石骨架的摩擦因数,增强了水对岩石的弱化或软化效应,使得岩石材料强度降低^[10,21-22]。

对红砂岩峰值应力与含水率的试验结果进行拟合,发现二者满足良好的指数关系:

$$\sigma_p = \kappa e^{\eta \omega} \quad (5)$$

根据指数函数式(5)可知,当参数 η 确定时, κ 值越大,动态峰值应力与含水率之间的曲线整体越高,意味着岩石动态峰值应力越大,因此定义 κ 为岩石动载荷抵抗系数,MPa。当参数 κ 确定, η 值为负数时,表示岩石含水率越高,峰值应力相对越小,其

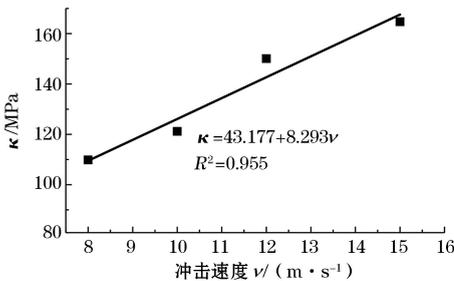
值越小,二者间的变化趋势越陡,因此,定义 η 为岩石峰值应力随含水率的变化速率。

不同冲击速度工况下岩石动态峰值应力与含水率之间的拟合结果见表 2,拟合曲线如图 5 所示。

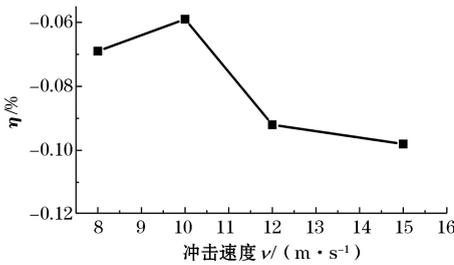
表 2 岩石动态峰值应力与含水率之间的拟合结果

冲击速度 v / (m/s)	参数 κ / MPa	参数 η / %	相关系数 R^2
8	109.85	-0.069	0.9760
10	121.20	-0.059	0.9313
12	150.09	-0.092	0.9015
15	164.74	-0.098	0.9707

根据表 2 的拟合结果,可得到不同的动荷载作用下参数 κ 和参数 η 变化趋势,如图 6 所示。基于图 6 可得出,随着动荷载的逐渐增加, κ 值也逐渐增大,二者满足良好的线性关系; η 值随动荷载增加先增加后减小。由图 5 也可得到,相同含水率工况下,随着动荷载的增加,岩石动态峰值应力也逐渐增加,岩石抵抗破坏的能力增大,这表明含水岩石对动荷载的抵抗能力与动荷载大小息息相关。由表 1 可得,当冲击速度为 8 m/s、10 m/s 时,试件均未出现破坏,而当冲击速度为 12 m/s 且含水率在 2.0% 以上,以及冲击速度为 15 m/s 时,岩石试件均已发生破坏,这就导致了随着冲击速度的增加, η 值先增加后减小。



(a) 参数 κ 与冲击速度的关系



(b) 参数 η 与冲击速度的关系

图 6 参数 κ 、 η 与冲击速度的关系

对式(5)进行求导,可得到峰值应力随含水率的变化率,如图 7 所示。由图 7 可以看出,相同冲击速度工况下,随着含水率的增加,峰值应力变化率的绝

对值逐渐减小,这表明含水率的大小对峰值应力变化率有较大的影响。相同含水率工况下,冲击速度越大,峰值应力随含水率的变化率也越大,同时也表明冲击动载荷的大小对峰值应力与含水率的演化关系有较大的影响。

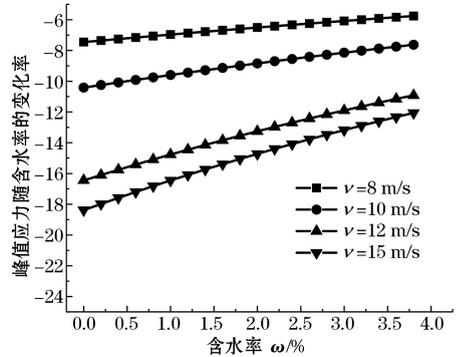


图 7 峰值应力随含水率的变化率

3.2 动态极值应变

动态极值应变可以有效地表征岩石的动态变形特性,表示在动荷载作用下岩石发生的最大应变值;在冲击荷载确定情况下,极值应变越大表明岩石越容易变形。根据表 1,可得红砂岩动态极值应变随含水率的变化关系,如图 8 所示。由图 8 可以看出,相同冲击速度下,岩石中的含水量逐渐增多导致其动态极值应变逐渐增大,体现出含水率对红砂岩的动态极值应变有明显的影 响。相同含水率工况下,冲击速度越大,红砂岩的动态极值应变越大;随着冲击速度的增加,动态极值应变随含水率增加的趋势越来越大。这表明动荷载的大小对动态极值应变随含水率变化关系有较大影响,随着冲击速度的增大,总变形增加,水的弱化效应越明显。

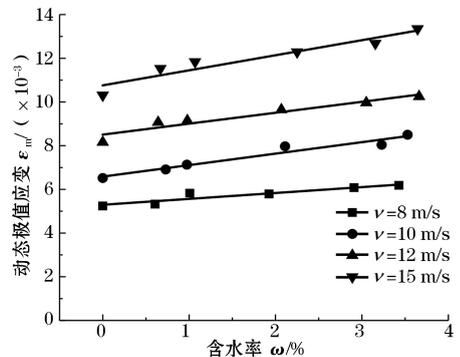


图 8 动态极值应变随含水率的变化

由图 8 可知,动态极值应变由弹性应变和塑性应变组成。由于水对岩石具有弱化作用,随着含水率的增加,岩石的结构传递载荷的能力变小,导致红

砂岩峰值应力快速降低,红砂岩抵抗变形的能力减弱,岩石的动态极值应变增加^[23]。随着动荷载的逐渐增加,塑性应变累积变快,岩石的微裂纹更早汇聚成核,红砂岩的动态极值应变快速增加^[24]。

对图 8 中的动态极值应变与含水率的试验数据进行线性拟合,拟合相关系数见表 3。由图 8 和表 3 可发现,动态极值应变与含水率具有比较好的线性函数关系,即:

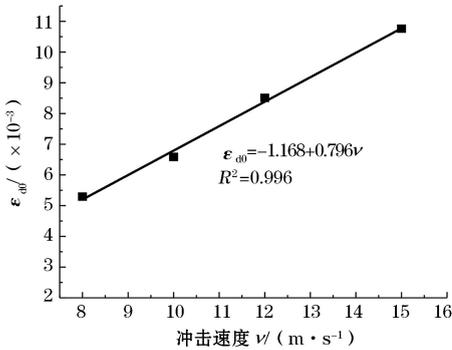
$$\epsilon_m = \epsilon_{d0} + \alpha\omega \quad (6)$$

根据式(6)可知,当含水率 ω 为 0 时, ϵ_{d0} 表示岩石在干燥状态下的动态极值应变, s^{-1} ; 当参数 ϵ_{d0} 固定时, α 越大, ϵ_m 变化越快,因此,定义 α 为岩石动态极值应变随含水率的变化率。

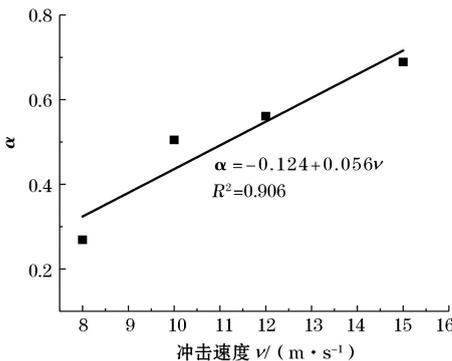
表 3 动态极值应变与含水率间的拟合结果

$v/(m/s)$	$\epsilon_{d0}/(\times 10^{-3})$	α	R^2
8	5.295	0.269	0.901
10	6.586	0.505	0.950
12	8.507	0.561	0.919
15	10.761	0.689	0.911

为了研究冲击速度对红砂岩动态极值应变与含水率的演化关系,对 4 个冲击速度下的参数 ϵ_{d0} 和 α 进行拟合,拟合结果如图 9 所示。基于表 3 和图 9 可以发现,参数 ϵ_{d0} 、 α 随冲击速度增大呈线性形式增加。



(a) 参数 ϵ_{d0} 与冲击速度的关系



(b) 参数 α 与冲击速度的关系

图 9 参数 ϵ_{d0} 、 α 与冲击速度的关系

3.3 平均应变率

应变率是表征岩石应力和变形的变化速率,平均应变率则反映岩石整体变形速率^[25]。因此,研究冲击荷载作用下不同含水率岩石的平均应变率变化,对岩石的变形破坏机理分析意义非凡。根据表 1 可得不同冲击速度下,红砂岩平均应变率与含水率之间的关系,如图 10 所示。由图 10 可以发现,同一冲击速度下,含水率增加,平均应变率逐渐增大,但增加的幅度逐渐减小。据此认为,相同大小的动荷载作用时,岩石含水率对平均应变率具有显著影响。当红砂岩接近饱水时,岩石的平均应变率受含水率影响变小,这主要是因为,随着含水率的增加,水的弱化作用增强,红砂岩的抗变形能力减小,使得岩石的率相关性减弱。岩石的动态峰值应力和动态极值应变发生改变是因为其含水率发生变化,但本质上是含水率的改变导致岩石的应变率发生变化,进而导致岩石的应力和变形发生改变。

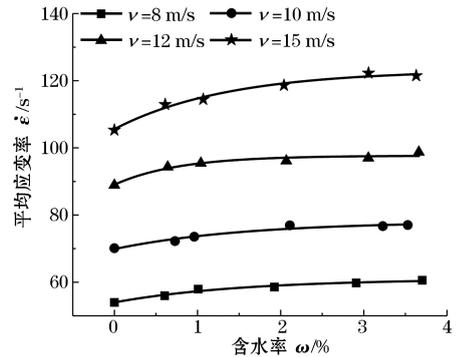


图 10 岩石平均应变率随含水率的变化

从图 10 还可以发现,冲击速度越大,平均应变率随含水率的变化率也越大,这主要是由于随着冲击速度增大,水对红砂岩的抗变形性能的弱化作用得到进一步增强,因此,冲击速度越大,红砂岩的变形速率越快。对图 10 中的岩石的平均应变率与含水率的关系用指数函数进行拟合,拟合关系式如式(7)所示,拟合曲线如图 10 所示,拟合相关系数见表 4。

$$\dot{\epsilon} = A + Be^{-\omega} \quad (7)$$

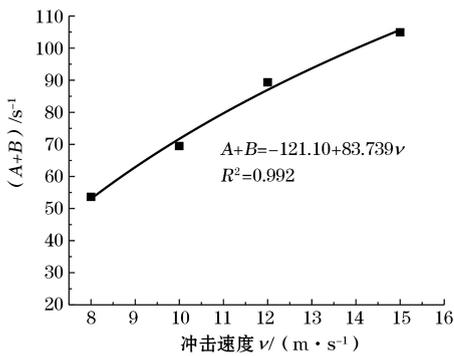
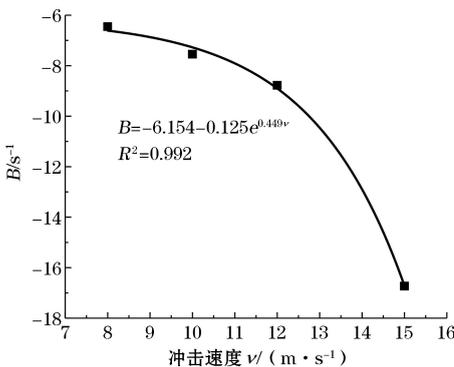
当岩石的含水率为零时,式(7)演变为 $A + B$,因此 $(A + B)$ 表示岩石干燥时的应变率。当参数 A 固定不变时,参数 B 的绝对值越大,平均应变率 $\dot{\epsilon}$ 变化越快,因此,参数 B 定义为岩石平均应变率随含水率的增长率,单位为 s^{-1} 。

表4 岩石平均应变率与含水率间的拟合结果

$v/(m/s)$	A/s^{-1}	B/s^{-1}	$(A+B)/s^{-1}$	R^2
8	60.193	-6.551	54.642	0.950
10	77.107	-7.647	69.560	0.922
12	98.138	-8.878	89.405	0.938
15	121.701	-16.699	104.897	0.969

由图10和表4可以发现,平均应变率和含水率之间指数函数的拟合程度较高,表明岩石平均应变率与含水率呈现良好的指数函数关系,这充分体现出水率对岩石动态力学性能的弱化作用。

从表4可以看出,随着冲击速度的增加,参数 $(A+B)$ 的值逐渐增大,二者呈现出良好的对数关系,如图11(a)所示,这表明干燥状态下岩石的应变率与动载荷的大小息息相关。随着冲击速度的增加,参数 B 的绝对值逐渐增加,呈现出良好的指数关系,如图11(b)所示,这表明随着冲击载荷的增加,岩石平均应变率随含水率的变化率越来越大。

(a) 参数 $(A+B)$ 与冲击速度的关系(b) 参数 B 与冲击速度的关系图11 参数 $(A+B)$ 和参数 B 与冲击速度的关系

4 结论

(1) 动荷载不变,含水率增加,岩石动态峰值应力逐渐减小;岩石动态峰值应力随含水率的增大呈指数函数形式减小。动荷载越大,岩石的峰值应力越大,动态峰值应力的变化率也越大。

(2) 动荷载不变,含水率增加,岩石的动态极值应变逐渐增大;动态极值应变与含水率呈线性关系。动荷载越大,岩石的动态极值应变越大,动态极值应变的变化率也越大。

(3) 动荷载不变,含水率增加,岩石的平均应变率增大,平均应变率与含水率具有较好的指数函数关系。动荷载越大,岩石的平均应变率越大。

参考文献(References):

- [1] ZHOU Z L, CAI X, ZHOU Y, et al. Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1919-1925.
- [2] 闫长斌,徐国元,杨飞.爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J].岩土工程学报, 2007(1): 88-93.
- [3] 金解放,吴越,张睿,等.冲击速度和轴向静载对红砂岩破碎及能耗的影响[J].爆炸与冲击, 2020, 40(10): 42-55.
- [4] 金解放,杨益,廖占象,等.动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1990-2002.
- [5] 周子龙,蔡鑫,周静,等.不同加载率下水饱和和砂岩的力学特性研究[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊2): 4069-4075.
- [6] 金解放,余雄,钟依禄.不同含水率红砂岩冲击过程中的能量耗散特性[J].有色金属科学与工程, 2021, 12(5): 69-80.
- [7] 张慧梅,杨更社.岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J].中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 140-145+151.
- [8] BURSHTEIN L S. Effect of moisture on the strength and deformability of sandstone[J]. Soviet Mining, 1969, 5(5): 573-576.
- [9] ERGULE Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 355-370.
- [10] 郭宏云,赵健,柳培玉.深部软岩与水作用后的强度软化特性及化学分析[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊1): 3374-3381.
- [11] 贾海梁,王婷,项伟,等.含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1618-1628.
- [12] BAUD P, ZHU W L, WONG T F. Failure mode and weakening effect of water on sandstone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105(B7): 16371-16389.
- [13] LI D Y, WONG L N Y, LIU G, et al. Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression[J]. Engineering Geology, 2012, 126: 46-66.
- [14] CAI X, ZHOU Z L, DU X M. Water-induced variations in dynamic behavior and failure characteristics of sandstone subjected to simulated geo-stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 130: 104339.
- [15] 陈绪新,付厚利,秦哲,等.水化学作用及干湿循环对蚀变岩力学性质影响研究[J].矿业研究与开发, 2017, 37(1): 98-102.

- [16] ZHOU Z L, CAI X, CAO W Z, et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 10-24.
- [17] KIM E H, DE OLIVEIRA D B M. The effects of watersaturation on dynamic mechanical properties in red and buffsandstones having different porosities studied with split Hopkinson pressure bar (SHPB), *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 752-753: 784-789.
- [18] WENG L, WU Z J, LIU Q S. Dynamic mechanical properties of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures [J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 53: 4348-4401.
- [19] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials [M]. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007—2014*. Springer, Cham, 2011: 35-44.
- [20] DAI F, HUANG S, XIA K W, et al. Some Fundamental Issues in Dynamic Compression and Tension Tests of Rocks Using Split Hopkinson Pressure Bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 657-666.
- [21] LAIRD D A. Influence of layer charge on swelling of smectites [J]. *Applied Clay Science*, 2006, 34(1): 74-87.
- [22] 赵立财. 饱水砂岩力学性质软化试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(1): 154-162.
- [23] LU A H, HU S C, LI M, et al. Impact of Moisture Content on the Dynamic Failure Energy Dissipation Characteristics of Sandstone [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 1-10.
- [24] HUANG B X, LIU J W. The effect of loading rate on the behavior of samples composed of coal and rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 61: 23-30.
- [25] 叶洲元. 动力扰动下高应力岩石力学特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.

Effect of Dynamic Load and Water Content on Dynamic Strength and Deformation of Red Sandstone

TAN Bin¹, XU Hong¹, JIN Jiefang¹, YU Xiong²

(1.School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2.Project Construction Management Company, Jiangxi Provincial Communication Investment Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330052, China)

Abstract: In the process of blasting excavation of underground engineering rock mass, dynamic load and groundwater have a significant impact on the safety and stability of engineering rock mass. In order to reveal the influence characteristics of dynamic load and water content on rock, the improved Hopkinson pressure bar test device was used to carry out the impact compression test of red sandstone under six water content conditions with four different impact velocities. According to the three sets of stress wave signals collected in the test, the three-wave method was used to convert them into the dynamic stress-strain curve of the rock, and the dynamic peak stress, extreme strain and average strain rate of the rock were obtained. The results show that under the same dynamic load, the dynamic peak stress decreases gradually with the increase of water content, and the two have a good exponential function relationship. With the increase of water content, the dynamic extreme strain of rock increases linearly, and the average strain rate increases exponentially. With the increase of impact velocity, the dynamic peak stress, dynamic extreme strain and average strain rate of rock increase. The research results are helpful to monitor the stability of deep rock, and provide some reference for the study of the mechanism and influencing factors of disasters such as water and mud inrush in engineering.

Key words: Red sandstone, Water content, Dynamic peak stress, Dynamic extreme strain, Average strain rate