不同饱水时长下磷矿岩压缩力学特性及破碎规律研究*

李欣倡,张智宇,刘浩杉

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:为研究饱水时长对磷矿岩力学特性与破碎规律的影响,对自然状态、饱水48 h及饱水3个月的磷矿矿岩分别开展了不同应变率下的静、动态力学试验。试验结果表明:在静载(低应变率)条件下,矿岩强度随饱水时间的增加而不断降低,但强度降低速率呈先(48 h以内)快后慢的变化趋势,饱水3个月矿岩的抗压强度较饱水48 h降低21%;在动载(中高应变率,43~146 s^{-1})条件下,矿岩强度受其内部自由水弱化作用和强化作用的相互博弈、协同作用影响,表现为随着饱水时间增加,岩石强度先提高后降低,饱水3个月矿岩的动态抗压强度最小,与饱水48 h矿岩强度相比,降低了25.9%~28.5%,与自然状态下矿岩强度相比,降低了7.0%~19.7%;饱水作用可以提高矿岩动态抗压强度对应变率的敏感性。矿岩的破碎形态与其强度密切相关,动态抗压强度越大,其破碎后的块度越小;在同一应变率区间内,冲击后矿岩的平均粒径从大到小依次为饱水48 h的矿岩、自然状态下的矿岩、饱水3个月的矿岩。长期饱水(如3个月及以上)会显著降低磷矿岩强度,使破碎更加彻底,此时可适当减小炸药单耗,避免能量过剩而引发飞石等安全隐患。

关键词:磷矿岩;饱水时间;力学特性;破碎规律;动态抗压强度;应变率

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0177-09

Study on Compressive Mechanical Properties and Crushing Law of Phosphate Rock Under Different Saturation Time

LI Xinchang, ZHANG Zhiyu, LIU Haoshan

(Faculty of land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: In order to study the influence of saturation time on the mechanical properties and crushing law of phosphate rock, the static and dynamic mechanical tests under different strain rates were carried out on the natural, saturated 48 hours and saturated 3 months of phosphate rock. The test results show that under the condition of static load (low strain rate), the strength of ore rock decreases with the increase of saturation time, but the strength reduction rate shows a trend of fast first (within 48 hours) and then slow. The compressive strength of ore rock saturated for 3 months is 21% lower than that of saturated for 48 hours. Under the condition of dynamic load (medium and high strain rate, 43-146 s^{-1}), the strength of ore rock is affected by the mutual game and synergistic effect of weakening and strengthening of free water in the ore rock. With the increase of saturation time, the strength of ore rock increases firstly and then decreases. The dynamic compressive strength of ore rock saturated for 3 months is the smallest, which is reduced by 25.9%-28.5% compared with that for 48 hours, and reduced by 7.0%-19.7% compared with that under natural state. Saturation effect can improve the sensitivity of dynamic compressive strength of rock to strain rate. The crushing form of ore rock is closely related to its strength. The larger the dynamic compressive strength, the smaller the fragmentation after crushing. In the same strain rate range, the average particle size of the ore rock after the impact from large to small is the ore rock saturated for 48 hours, the ore rock in the natural state, and the ore rock saturated for 3 months. Long-term saturation (such as 3 months and above) will significantly reduce the strength of ore rock and make the crushing more thorough. At this time, the unit consumption of explosives can be appropriately reduced to avoid safety hazards such as flying stones caused by excess energy.

Key words: Phosphate rock, Saturation time, Mechanical property, Crushing law, Dynamic compressive strength, Strain rate

---

* **收稿日期**:2024-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52064025);云南省重大科技项目(202202AG050014)

作者简介:李欣倡(1998—),男,重庆梁平人,硕士研究生,主要从事工程爆破等方面的研究。E-mail:839556734@qq.com

通信作者:张智宇(1973—),男,广东韶关人,硕士,教授,主要从事工程爆破及岩石破碎等方面的研究。E-mail:924221851@qq.com

0 引言

磷矿作为一种重要的工业原料,在我国国民经济中占具重要地位。我国大量露天磷矿临近水域,部分采区矿岩长期处于饱水状态,而水不仅会影响矿岩强度,还会间接影响爆破作业时的炸药用量[1-3],因此,对饱水矿岩开展力学试验具有重要意义。

目前,关于饱水矿岩的研究主要集中在静力学方面,学者们通过改变含水率、加载速率等因素,开展了大量的试验研究。许江等[4]通过压缩试验发现,在干燥、自然及饱水状态下,凝灰岩的特征应力阈值显著下降,弹性模量和泊松比也有明显降低趋势。LU 等[5]研究发现,水分对泥岩和砂岩的力学性质具有显著影响,饱水状态下泥岩和砂岩的单轴抗压强度分别下降了 76.0%和 38.9%,弹性模量分别下降了 68.1%和 48.5%。张春会等[6]对饱水砂岩和白云岩进行单轴与三轴压缩试验,结果表明,岩体的抗压强度随着含水率的提高而降低。于永江等[7]发现在不同含水率条件下,煤岩体的抗压强度和弹性模量均与含水率呈负相关关系。此外,胡玉波等[8]采用真空抽气装置处理试件,通过水淹试样 8 h,得到了饱水状态的样本,通过力学试验发现其单轴抗压强度、弹性模量均有所降低,而泊松比则有所增大。上述研究表明,水分的存在会显著削弱岩石在静力学试验下的物理力学性能,且含水率越高,弱化效应越明显。

然而,在动力学条件下,饱水岩石的研究仍相对较少,且不同学者得出了不同的结论。王斌等[9]通过对风干与饱水状态下的砂岩进行单轴冲击压缩试验,发现砂岩在饱水状态下的动态强度与风干状态相差不大。也有一些研究指出,水分的存在反而能够提升饱水矿岩的动态强度。例如,平琦等[10]将裂隙砂岩置于水槽中自然饱水 48 h,随后进行力学试验,发现饱水砂岩的动抗压强度和动弹性模量较天然状态均有所提高,展现出在动态加载下水作用的 Stefan 效应。ZHOU 等[11]研究表明,在应变速率足够高的条件下,饱和样本的抗压强度可能高于干燥样本。与此相反,解北京等[12]的试验结果则揭示了水对岩石的弱化作用,尤其是动态强度和屈服阶段的应变,减小更加明显。

上述学者对饱水矿岩进行了大量的静、动力学试验,深刻揭示了水对岩石力学性质的影响,但部分问题仍需进一步探讨:一是当前针对饱水矿岩的研究多采用短期(不超过 48 h)浸泡试样,而实际工矿中部分矿岩长期处于饱水环境中,水对矿岩力学性质影响的时效性有待进一步考量;二是有关饱水矿岩动力学特性的研究结论不一,有待通过更多试验进行论证。鉴于此,本文以云南某磷矿矿岩为研究对象,进行不同时长的饱水处理并开展静、动力学试验,探究饱水时长对磷矿矿岩力学强度与破碎变化的影响。

1 试样制备及试验设备

本次试验使用的磷矿试件均来自同一均匀完整岩块,其自然密度为 2.52 g/cm^3,孔隙率为 3.26%。试验分为静力学试验与动力学试验两个部分,静力学单轴压缩试验采用 Φ50 mm×100 mm 的圆柱形标准试件,设备采用 GCTS RTR-1500 快速三轴岩石测试系统。动力学试验采用国际岩石力学学会(ISRM)推荐的 50 mm×50 mm 的标准圆柱形试样,试验设备为单轴 SHPB 系统,如图 1 所示。该系统杆材由 40 Cr 合金钢制成,直径为 50 mm,入射杆和透射杆的长度均为 2.0 m,数据采集设备为 LK-2109 超动态应变仪,子弹采用 0.4 m 纺锤形冲头。

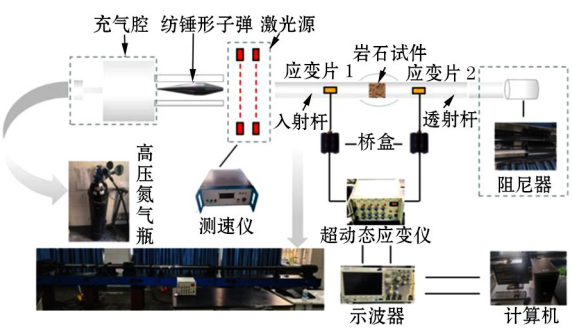


图 1 SHPB 装置示意

Fig.1 SHPB device diagram

2 静力学试验

2.1 试验方案

通过自然浸泡法制备饱水试样,将试件分为 3 批,第一批为自然状态下的磷矿矿岩,第二批自然浸泡饱水 48 h,第三批自然浸泡饱水 3 个月。对试件分别进行静力学试验,每 3 个相同试件为一组,取平均值,并舍去偏差较大的值。

自然饱水时每隔一定时间,取出试件并用干净

的布或纸巾擦去表面水分,然后称量其质量,当试件质量不再发生显著增加并达到一个稳定值时,表明其已达到饱和状态。

2.2 试验结果及分析

静力学试验结果见表1。此时测得饱水48 h试件的单轴抗压强度为86.23 MPa,较自然状态下的抗压强度下降27.1%,抗拉强度为5.24 MPa,较自然状态下降14.9%,表明试件存在明显的遇水软化现象。

表1 静力学试验结果

Table 1 Statics test results

含水状态	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
自然状态	118.32	6.16
饱水48 h	86.23	5.24
饱水3个月	68.12	4.98

对表1中饱水48 h与饱水3个月的试件的单轴抗压强度进行比较,发现饱水3个月后,试件的单轴抗压强度较饱水48 h下降21%,抗拉强度较之下降5.0%,这说明试件达到饱水状态后,水对矿岩强度的弱化效果继续存在,且随饱水时长增加,矿岩强度会持续降低,不受矿岩是否达到饱水状态的影响。

3 动态力学试验

3.1 试验方案

动力学试样饱水处理方式同静力学试验一致,在分批自然浸泡后得到不同批次的饱水试件。正式试验开始前,在样品一端表面薄涂一层凡士林,以消除样品与杆接触而可能产生的不均匀应力。试验开始时,通过控制冲击气压大小来控制子弹撞击入射杆的速度,检查每次子弹回腔距离是否相同,以确保子弹从同一位置射出。在保证试样受冲击后能发生破碎的前提下,对试件进行预试验,确定试验所需最小冲击气压为0.3 MPa。因此,本试验采用0.3 MPa、0.5 MPa和0.7 MPa三个梯度气压以获取不同应变率。冲击完成后,对试件进行拍照和采集,试验过程中严格遵守试验流程,试验方案见表2。

表2 动力学冲击试验方案

Table 2 Schemes of dynamic impact test

含水状态	冲击气压梯度设定
自然状态	0.3 MPa→0.5 MPa→0.7 MPa
饱水48 h	0.3 MPa→0.5 MPa→0.7 MPa
饱水3个月	0.3 MPa→0.5 MPa→0.7 MPa

3.2 动态应力平衡验证

为保证SHPB试验可靠,诸多学者对动态平衡验证方法进行了研究,YIN等[15]提出通过计算入射杆与反射杆的应力来判断,当二者曲线变化趋势相同时,试验达到动态应力平衡。另有部分学者则采用叠加入射波与反射波的方式,通过对比该叠加波与透射波的变化趋势,验证应力是否达到平衡。图2为同一组试件试验时的原始波形与应力平衡曲线。由图2可知,两者变化趋势基本重合,表明本文试验符合恒应变加载条件。

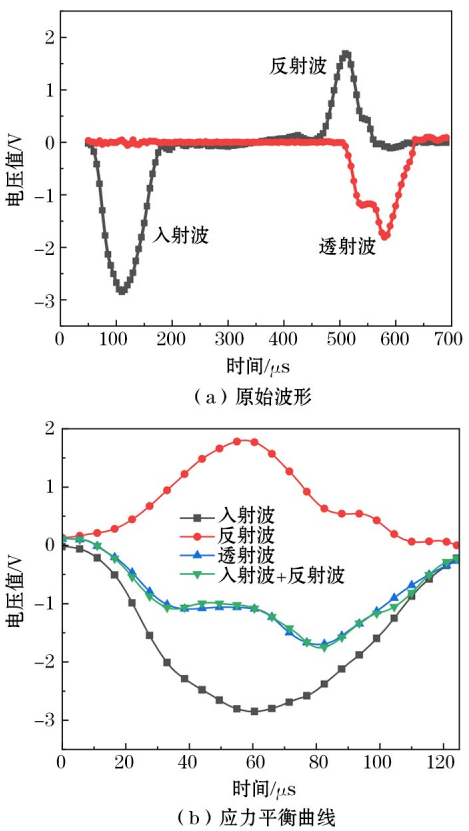
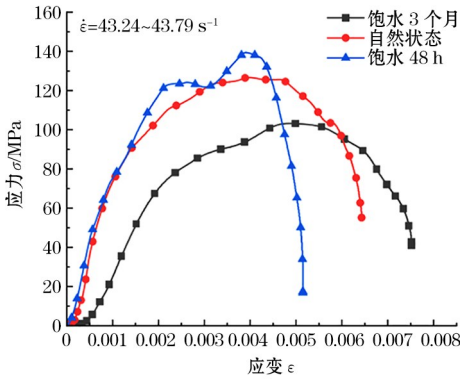


图2 典型的原始波形及应力平衡曲线

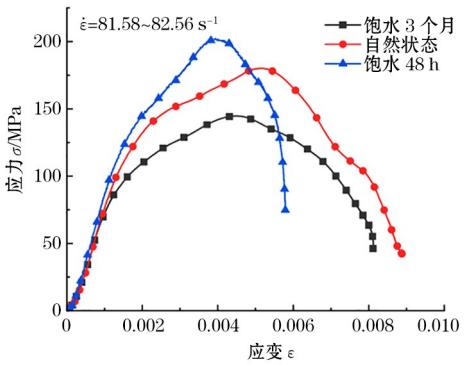
Fig.2 Typical original waveform and stress balance curves

3.3 试验结果分析

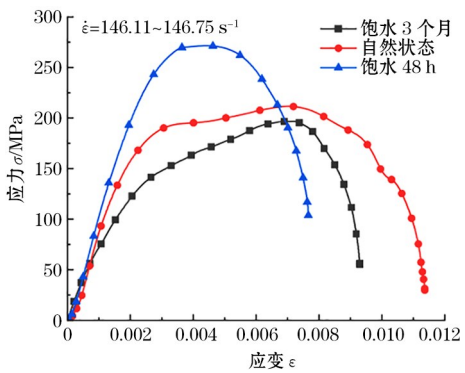
自然与饱水状态下矿岩的应力-应变曲线如图3所示,其中$\dot{\varepsilon}$代表平均应变率,由于岩石材料固有的非均质性和试验系统误差,相同加载条件下,每个试样的真实应变率并不完全相同,故只能保证将其控制在一个误差相对较小的范围内[9]。由图3可知,3种含水处理方式下,矿岩动态应力-应变曲线大致可分为弹性阶段、塑形屈服阶段及损伤破坏阶段。



(a) 低应变率



(b) 中应变率



(c) 高应变率

图 3 不同饱水状态下矿岩的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of ore rock under different saturation states

应力-应变曲线基本不存在孔隙压密阶段,这是因为动载下应变率过高,岩石迅速产生形变,导致内部孔隙和微裂纹来不及闭合。在弹性阶段,曲线斜率近乎直线,且应变率越大,曲线斜率越大,试件抗变形能力越强,当应变率相近时,饱水 3 个月状态下矿岩应力-应变曲线在弹性阶段的斜率最小,这说明长期饱水降低了磷矿岩的动态弹性模量。

进入塑形屈服阶段后,岩石受冲击作用,内部裂隙萌生并逐渐扩展,应变持续增大,该阶段饱水 3 个月矿岩的应变值明显大于饱水 48 h 的,这可能是因为长期饱水作用使得矿物颗粒的胶结物质发生溶解,造成矿石颗粒结构变得松散,从而导致塑性屈服阶段的应变增大。

动态抗压强度与应变率的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知,在同一应变率区间内,饱水 48 h 矿岩的动态抗压强度最大,饱水 3 个月矿岩的动态抗压强度最小。当应变率由 43 s^{-1}增加到 146 s^{-1}时,与饱水 48 h 相比,饱水 3 个月矿岩的动态抗压强度分别降低了 25.9%、28.5%、27.5%,与自然状态矿岩强度相比,分别降低了 18.5%、19.7%、7.0%,这说明矿岩的动态抗压强度受饱水时间影响,48 h 的短期饱水可以提升矿岩动态抗压强度,而 3 个月及以上的长期饱水则会降低矿岩强度。

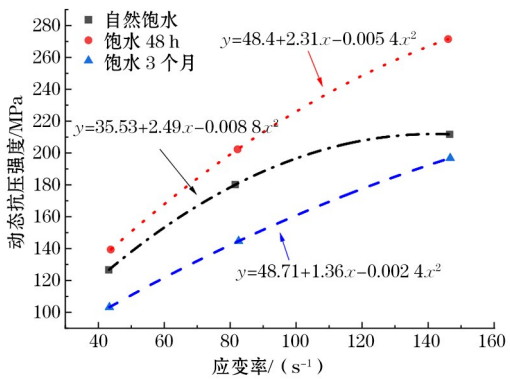


图 4 动态抗压强度与应变率关系

Fig.4 Relationship between dynamic compressive strength and strain rate

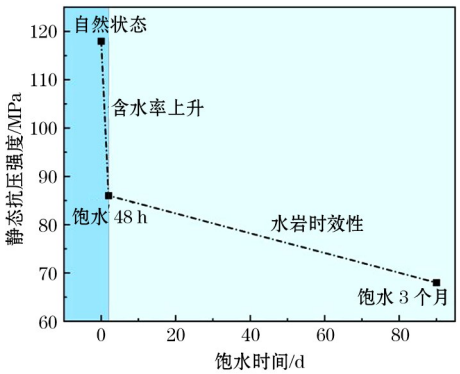
此外,矿岩的动态抗压强度还具有明显的应变率效应,随着应变率增加,矿岩的动态抗压强度随之增大,二者呈正相关关系。当应变率由 43 s^{-1}提升至 146 s^{-1}时,自然状态下矿岩动态抗压强度提升 67.1%,而饱水 48 h 与饱水 3 个月的矿岩的动态抗压强度分别提高了 94.8%与 90.7%,这说明饱水作用可显著增强矿岩对应变率效应的敏感性。

3.4 饱水时间与矿岩强度的关系

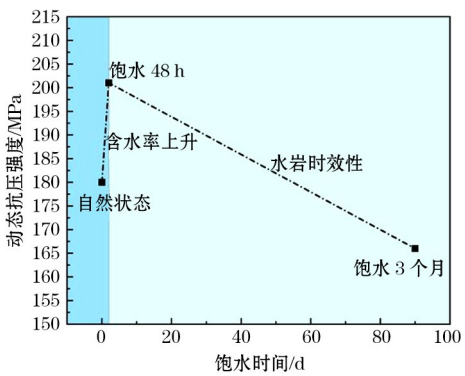
磷矿矿岩静动态抗压强度与饱水时间的关系曲线如图 5 所示。可以看出静态抗压强度与动态抗压强度随饱水时间的变化趋势明显不同。

由图 5(a)可知,静载下矿岩抗压强度随饱水时间增加而逐渐降低,以饱水 48 h 为分界点,在饱水 48 h 以内,矿岩抗压强度降低速率较快,这是由于在前 48 h,岩样尚未达到饱水状态,此时含水率逐渐上升,更多的自由水在扩容裂隙中产生虹吸效应,

水侵蚀到的岩石颗粒逐渐增多,减弱了岩石颗粒间的黏结,起到了润滑裂隙接触面的效果。饱水超过48 h后,岩样早已达到饱水状态,这时继续增加饱水时间,矿岩强度仍在降低,说明水对岩石力学性质的影响具有时效性。且岩石强度降低速率明显低于饱水48 h,这是因为增加饱水时间无法让更多的自由水侵入裂隙,从而无法继续润滑接触面。



(a) 岩石静态抗压强度与饱水时间的关系



(b) 岩石动态抗压强度与饱水时间的关系

图 5 饱水时间与岩石抗压强度的关系曲线

Fig.5 Relationship curves between saturation time and compressive strength of rock

黄耀莹等[16]研究了饱水后岩石饱水时间与峰值应力的关系,发现动态下的岩石强度与饱水时间紧密相关。结合本文研究结果可以看出(见图5(b)),从自然状态到饱水3个月,岩石动态抗压强度随饱水时间先增加后减小,这与静载下的岩石强度规律明显不同。饱水时间在48 h以内时,岩石动态抗压强度随饱水时间的增加而增大,这是因为动载下加载速率过高,岩石中的裂纹扩散速率极快,水无法在瞬间扩散至扩容裂隙中,导致含水率随饱水时间增加而上升,更多的自由水侵入试件,在试件表面形成张力作用,进而产生阻碍裂纹扩展的黏聚力F_1,试件在较高强度下发生破碎[17],此时饱水岩石的动态抗压强度较自然状态偏高,其计算公式见式(1)。

$$F_1=\frac{V\gamma}{2R^2\cos\varphi} \tag{1}$$

式中:V为液体体积;γ为表面能;φ为湿润角;R为水弯月面的半径。

此外,ZHENG等[18]认为饱水矿岩动态强度的提高是由于岩石裂纹中自由水产生的Stefan效应,如图7所示。在高应变率加载条件下,两裂纹面分离的相对速度v较快,导致Stefan效应产生阻碍两裂纹面相对分离的阻力F_2较大,其计算公式见式(2)。

$$F_2=\frac{3\eta r^4}{2\pi h^3}\cdot\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中:η为液体黏度;r为裂纹面的半径;h为两裂纹面的距离;v为两裂纹面分离的相对速度;$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$为裂纹面分离相对速度的瞬时变化率。

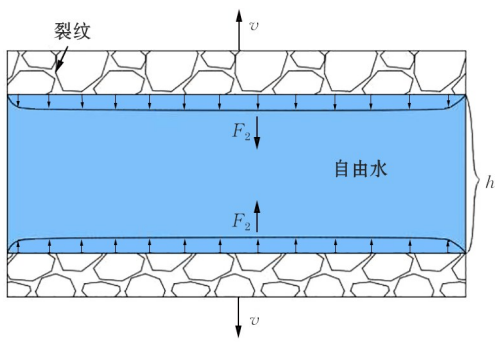


图 6 Stefan 效应示意

Fig.6 The sign of Stefan effect

周子龙等[19]发现饱和岩石的力学性质是其内部自由水弱化作用和强化作用相互博弈、共同影响的结果,结合本文可知,自由水弱化和强化的博弈效果受饱水时间影响。试件饱水48 h前强化效果占据主导地位,而随着饱水时间继续增加,自由水的弱化作用开始显现。试件饱水48 h以后,动载下试件表面水导致的黏聚力F_1以及裂纹面中自由水导致的Stefan效应所产生的相对分离阻力F_2仍然存在,两种强化作用下导致岩石动态抗压强度较高,但随着饱水时间增加,自由水弱化作用越加明显,岩石表面或内部介质与水发生反应,导致岩石强度不断下降,因此,3个月后饱水试件的动态抗压强度低于自然状态。

3.5 动态压缩下矿岩破碎块度分析

试件冲击破坏后的形态如图7所示。通过对比

不同气压及含水状态矿岩的冲击破坏形态可以看出,在同一含水状态下,随着冲击气压或应变率的提升,矿岩逐渐由劈裂破坏向粉碎性破碎过渡,破碎块度逐渐减小。当气压或应变率一定时,饱水 3 个月矿岩的破碎块度最小,饱水 48 h 矿岩的破碎块度最大,这与上述岩石强度关系相吻合,即动态抗压强度越大,冲击后的矿岩破碎块度越小,反之亦然。

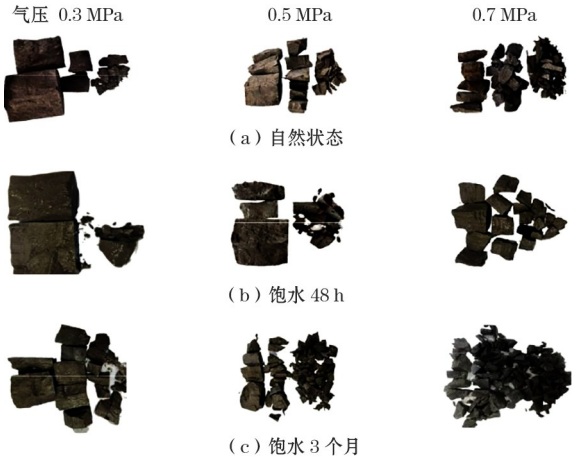


图 7 矿岩的冲击破坏形态

Fig.7 Impact damage patterns of ore rock

为更好地研究岩石的破坏特征,分析应变率及饱水状态对矿石破碎块度的影响,对 3 种饱水处理的矿岩在动力学破碎试验后进行块度统计。采用破碎分形模型进行定量表述,通过国际通用标准分级筛对矿石破碎粒径按直径进行有效分级。将碎块分为−0.15 mm、+0.15～−0.5 mm、+0.5～−5 mm、+5～−10 mm、+10～−15 mm、+15～−20 mm、+20～−25 mm 及+25 mm 等 8 种粒径等级,采用精密电子秤对筛分后的岩样进行称重,最小精度为 0.1 g。

对分级后的试验数据进行分析,统计各直径下的碎块,计算其百分含量,结果见表 3。同一含水状态下,随着应变率增加,矿岩受冲击后大直径粒径占比逐渐减小,岩石破碎更加彻底。当应变率处于 43 s^{-1}左右的较低水平时,冲击后矿岩产生劈裂破坏,大块居多,25 mm 及以上粒径占比超过 50%,随着应变率升高,粒径较大的矿岩逐渐分裂,不断向以 15～20 mm 为主的中等粒径过渡,当应变率提高至 146 s^{-1}左右时,矿岩冲击后发生粉碎性破坏,粒径基本处于 15 mm 以下,其中粒径低于 0.15 mm 的矿岩质量占比明显增加。

表 3 不同应变率下的质量百分比

Table 3 Mass percentages under different strain rates

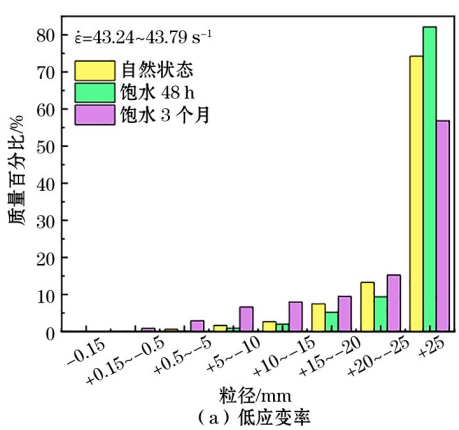
含水状态	应变率/(s^{-1})	不同筛孔尺寸下破碎质量百分比/%								平均粒径/mm
		−0.15 mm	+0.15～−0.5 mm	+0.5～−5 mm	+5～−10 mm	+10～−15 mm	+15～−20 mm	+20～−25 mm	+25 mm	
自然状态	43.24	0.00	0.10	0.61	1.67	2.64	7.52	13.25	74.21	27.38
	81.58	0.14	0.72	1.25	10.05	13.10	34.32	40.42	0.00	17.54
	146.57	3.25	6.53	13.85	33.74	42.63	0.00	0.00	0.00	9.53
饱水 48 h	43.79	0.00	0.00	0.20	0.97	2.02	5.24	9.40	82.17	30.87
	82.26	0.00	0.15	1.08	3.70	7.22	41.05	46.80	0.00	19.22
	146.11	1.44	2.78	10.75	32.3	31.17	21.56	0.00	0.00	12.26
饱水 3 个月	43.37	0.00	0.86	2.92	6.64	8.01	9.47	15.23	56.87	25.14
	82.56	1.13	3.49	6.02	18.52	19.84	18.97	32.03	0.00	14.45
	146.75	10.62	19.06	28.94	26.23	15.15	0.00	0.00	0.00	4.42

同一应变率区间不同饱水状态下的岩石破碎粒径也存在差异,图 8 为不同饱水状态下粒径质量占比分布。由图 8 可知,饱水时间会显著影响冲击试验后试件破碎的大块率,饱水 48 h 的大块粒径占比相对最大,而饱水 3 月的大块粒径占比相对最小。

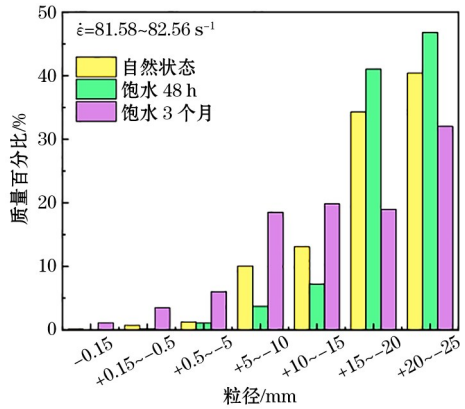
为了更直观地研究试件在不同冲击压力下破碎块度的分布情况,拟采用平均粒径作为特征值来描述 3 种饱水状态试件在不同应变率下的破碎程度。平均粒径 d 的计算公式见式(3)。

$$d = \sum (r_i d_i) / \sum d_i \tag{3}$$

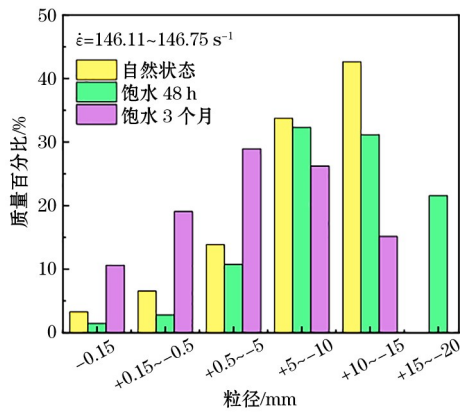
式中:d_i 为不同筛孔直径下碎块的平均粒径;r_i 为对应的碎块质量百分比。



(a) 低应变率



(b) 中应变率



(c) 高应变率

图 8 不同饱水状态下粒径质量百分比

Fig.8 Mass percentage of particle size under different saturation states

依据公式(3)的计算结果,绘制矿岩破碎平均粒径与应变率的关系曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,岩样的平均破碎粒径随应变率的增大而减小,在 82 s^{-1}及以下中低应变率下,随着应变率增加,矿岩平均粒径的降低速率相对更快。

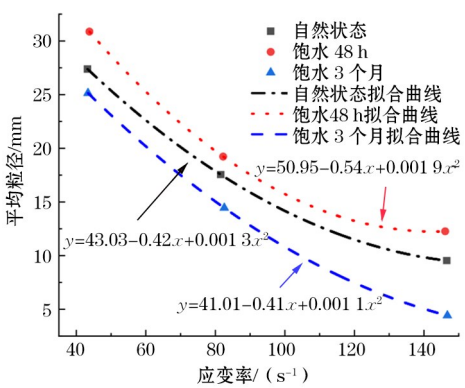


图 9 矿岩破碎平均粒径与应变率的关系曲线

Fig.9 Relationship curves between the average particle size of ore rock crushing and strain rate

饱水时间对矿岩破碎后的平均粒径具有显著影响,在同一应变率区间内,饱水 48 h 矿岩的平均破碎粒径最大,饱水 3 个月的平均粒径最小,这与岩石强度特性紧密相关,即矿岩的动态抗压强度越大,其冲击破碎后的块度也越大。以上研究说明,短期饱水有利于提升矿岩动态抗压强度、增大矿岩破碎难度。此时,在相同炸药单耗下,矿岩的破碎块度可能更大,可以通过适当增加炸药单耗或减小孔排距等方式,降低大块矿岩和根底的产生。长期饱水则会使矿岩强度大幅下降,矿岩破碎更加彻底,此时可适当减小炸药单耗,避免能量过剩而引发飞石问题。

4 结论

本文基于静力学与动力学试验,对比了自然状态、饱水 48 h 及饱水 3 个月的磷矿矿岩的静动力学强度,重点研究了动力学试验结果。分析了试样在应变率为 43~146 s^{-1}下的动应力-应变曲线、动态抗压强度,并讨论了静载和动载下矿岩强度随饱水时间的变化规律,最后对矿岩破碎后的块度进行粒径筛分并计算,得到的主要结论如下。

(1) 静载作用下,矿岩强度随饱水时间的增加而下降。饱水 48 h 内,矿岩强度下降较快,主要是因为水分进入岩石后,增加了裂隙中的虹吸效应,削弱了矿岩颗粒间的黏结力。超过 48 h 后,矿岩已接近饱水状态,继续增加饱水时间,矿岩强度逐渐减弱。

(2) 动载作用下,饱水矿岩的力学性质是其内部自由水弱化和强化作用相互博弈、共同影响的结果,且博弈效果受饱水时间调控。短期饱水下强化效果占主导地位,矿岩强度较自然状态偏高。长期饱水下自由水的弱化作用开始凸显,饱水 3 个月后矿岩强度低于自然状态。

(3) 矿岩强度与应变率呈正相关关系。应变率增加时,矿岩强度显著提高,这是因为在高应变率条件下,水分无法迅速扩散到裂隙中,导致岩石更加坚固。短期饱水(48 h 以内)会提升矿岩在高应变率下的强度,而长期饱水(3 个月及以上)则会导致矿岩强度下降。

(4) 矿岩的破碎形态与其强度密切相关,矿岩的动态抗压强度越大,破碎后的块度越小。随着应变率增加,矿岩破碎形态由劈裂破坏转向粉碎破坏,破碎程度随之加剧,块度同步变小。饱水 48 h 的矿岩破碎块度较大,而饱水 3 个月的矿岩破碎块度

最小。

(5) 长期饱水(饱水 3 个月及以上)会显著降低磷矿岩的强度,使破碎更加彻底。在这种情况下,可适当减小炸药单耗,避免能量过剩而引发飞石等安全隐患。

参考文献(References):

[1] 郭永春,周其健,屈智辉,等.水岩相互作用下钙芒硝盐岩强度衰减机理[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1045-1051.
GUO Yongchun, ZHOU Qijian, QU Zhihui, et al. Strength attenuation mechanism of the interaction between water and glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(4):1045-1051.

[2] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等.软岩在饱水过程中水溶液化学成分变化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2004(22):3813-3817.
ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Testing study on variation regularities of solution components in saturation of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004(22):3813-3817.

[3] 傅晏,刘新荣,张永兴,等.水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J].水文地质工程地质,2009,36(6):54-58.
FU Yan, LIU Xinrong, ZHANG Yongxing, et al. Study on the influence of water-rock interaction to the strength of sandstone[J]. Hydrogeological Engineering Geology,2009,36(6):54-58.

[4] 许江,王晓震,张倩文,等.不同含水状态凝灰岩损伤演化试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(6):1189-1197+1209.
XU Jiang, WANG Xiaozhen, ZHANG Qianwen, et al. Experimental study on damage evolution of tuff under different moisture states[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2021,38(6):1189-1197+1209.

[5] LU Y L, WANG L G, SUN X K, et al. Experimental study of the influence of water and temperature on the mechanical behavior of mudstone and sandstone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 76(2): 645-660.

[6] 张春会,赵全胜.饱水度对砂岩模量及强度影响的三轴试验[J].岩土力学,2014,35(4):951-958.
ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng. Triaxial tests of effects of varied saturations on strength and modulus for sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 951-958.

[7] 于永江,刘佳铭,杨云涛,等.基于能量原理不同含水率下煤岩体变形破坏能量损伤演化机制[J].煤炭科学技术,2024,52(6):67-80.
YU Yongjiang, LIU Jiaming, YANG Yuntao, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of coal with different water content based on energy principle[J]. Coal Science and Technology,2024,52(6):67-80.

[8] 胡玉波,房敬年,徐荣超,等.饱水作用对白砂岩损伤破裂及声发射特性的影响[J].长江科学院院报,2024,41(11):163-171.
HU Yubo, FANG Jingnian, XU Rongchao, et al. Effect of water saturation on the damage failure and acoustic emission characteristics of white sandstone[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(11):163-171.

[9] 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(5):1003-1009.
WANG Bin, LI Xibing, YIN Tubing, et al. Split hopkinson pressure bar(SHPB) experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):1003-1009.

[10] 平琦,孙施佳,高祺,等.饱水裂隙砂岩动态力学特性与裂纹扩展规律研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊 1):3131-3139.
PING Qi, SUN Shijia, GAO Qi, et al. Study on dynamic mechanical properties and crack extension law of water-saturated fractured sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(Suppl.1):3131-3139.

[11] ZHOU Z L, CAL X, ZHAO 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.

[12] 解北京,石嘉煜,梁天宇,等.不同应力波形下饱水红砂岩动力学特性[J].地下空间与工程学报,2024,20(增刊 1):94-101.
XIE Beijing, SHI Jiayu, LIANG Tianyu, et al. Dynamic characteristics of saturated red sandstone under different stress waveforms[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2024,20(Suppl.1):94-101.

[13] 赵泽虎,李祥龙,乔登攀,等.深埋安山岩动态力学特性及破碎特征[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(4):171-182.
ZHAO Zehu, LI Xianglong, QIAO Dengpan, et al. Dynamic mechanical properties and crushing characteristics of deep buried andesite[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2024,6(4):171-182.

[14] 胡时胜,王礼立,宋力,等.Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J].爆炸与冲击,2014,34(6):641-657.
HU Shisheng, WANG Lili, SONG Li, et al. Development of Hopkinson pressure bar technique in China[J]. Explosion and Shock Waves,2014,34(6):641-657.

[15] YIN T B, WANG P, YANG J, et al. Mechanical behaviors and damage constitutive model of thermally treated sandstone under impact loading[J]. IEEE Access,2018,6:72047-72062.

[16] 黄耀莹,翟越,王铭,等.水岩作用下花岗岩动态冲击压缩特性及损伤时效性研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊 2):3759-3770.

HUANG Yaoying, ZHAI Yue, WANG Ming, et al. Study on the influence of water-rock interaction time on dynamic impact compression characteristics and damage of granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(Suppl.2):3759-3770.

[17] 王光勇,余锐,马东方,等.饱水细砂岩动态抗拉与抗压强度试验对比研究[J].高压物理学报,2020,34(4):49-58.
WANG Guangyong, YU Rui, MA Dongfang, et al. Comparative study on dynamic tensile and compressive strength of the saturated fine sandstone[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2020,34(4):49-58.

[18] ZHENG D, LI Q B. An explanation of rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity[J]. Engineering Fracture Mechanics,2004,71(16/17):2319-2327.

[19] 周子龙,蔡鑫,周静,等.不同加载率下水饱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.
ZHOU Zilong, CAI Xin, ZHOU Jing, et al. Mechanical properties of saturated sandstone under different loading rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(Suppl.2):4069-4075.