

岩石力学特性

不同含水率花岗岩力学特性及 声发射特征研究

Study on Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of Granite
With Different Water Content

王峰¹, 洪大华¹, 王宇驰¹, 张忠政¹, 王会来², 郭一辛³

(1. 鞍钢集团矿业弓长岭有限公司露天分公司, 辽宁 辽阳 111008; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
3. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:含水率是影响花岗岩力学性能及破坏模式的关键因素,为探究不同含水率对花岗岩力学性能和破坏模式的影响,开展了3组不同含水率(干燥、天然、饱水)花岗岩单轴压缩和声发射试验,从试样的力学行为、破裂模式和声发射参数特征来探讨含水率对花岗岩的影响。结果表明:随着含水率的增加,花岗岩的峰值应力和弹性模量逐渐降低,相较于干燥试样,饱水试样的峰值应力降低了约51.52%、弹性模量降低了约22.77%,峰值应变则呈现先降低后升高的变化趋势。天然状态下花岗岩峰值应变最低,约为0.694%;泊松比则呈线性递增的趋势,由0.21增至0.25。含水率越高的花岗岩试样的应力-应变曲线出现应力跌落现象越明显。随着含水率的增加,花岗岩试样表面的张拉裂纹数量减少,岩石崩落的块体体积增大。岩石的破坏模式由劈裂破坏转为拉剪混合破坏,最后为X型共轭剪切破坏。随着含水率的增加,水化反应削弱颗粒间的粘聚力越强,岩石更容易发生微裂纹的扩展和相对滑动,导致饱水花岗岩试样的损伤曲线突变点出现最早,约为45.23 s。花岗岩声发射信号主要集中在低频和中频,且以低幅信号为主。随着含水率的增加,低中频之间的声发射信号向加载后期转移。无论花岗岩是否含水在加载后期均观察到高幅现象。

关键词:花岗岩; 含水率; 力学性能; 破坏模式; 声发射参数特征

中图分类号: P584 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0043-06

Abstract: Moisture content is a key factor affecting the mechanical properties and failure modes of granite. In order to explore the influence of different moisture contents on the mechanical properties and failure modes of granite, three groups of uniaxial compression and acoustic emission tests of granite with different moisture contents (dry, natural and saturated) were carried out. The influence of moisture content on granite was discussed from the mechanical behavior, fracture mode and acoustic emission parameter characteristics of samples. The results show that with the increase of water content, the peak stress and elastic modulus of granite decrease gradually. Compared with dry samples, the peak stress of saturated samples decreases by about 51.52%, and the elastic modulus decreases by about 22.77%. The peak strain decreases first and then increases. The peak strain of granite in natural state is the lowest, about 0.694%. Poisson's ratio increased linearly from 0.21 to 0.25. The higher the water content, the more obvious the stress drop phenomenon in the stress-strain curve of the granite sample. With the increase of water content, the number of tensile cracks on the surface of granite samples decreases, and the volume of rock collapse increases. The failure mode of rock changes from splitting failure to tensile-shear mixed failure, and finally to X-type conjugate shear failure. With the increase of water content, the hydration reaction weakens the cohesion between particles, and the rock is more prone to micro cracks.

Key words: granite; water content; mechanical properties; failure mode; AE parameter characteristics

1 前言

工程岩体通常位于富含地下水的地质环境中,

这对岩体的力学性质和稳定性有显著影响。地下水渗入岩体不仅会导致岩体强度下降、裂隙扩展加剧,

[作者简介] 王峰(1984—),男,山西泽州人,硕士,工程师,主要从事煤矿安全生产管理工作。

[基金项目] 弓长岭独木采区西北帮地下开采及地质环境影响研究(项目编号:2023-科 A04)

[引用格式] 王峰,洪大华,王宇驰,等.不同含水率花岗岩力学特性及声发射特征研究[J].中国矿山工程,2025,54(5):43-48.

还可能引发滑坡、崩塌等地质灾害,甚至导致严重的工程事故^[1-2]。因此,研究不同含水率下花岗岩的力学特性和破坏模式,对于提高岩体稳定性、优化工程设计以及防范地质灾害具有重要的理论和实际意义。

近年来,关于含水率对岩体力学特性影响的研究取得了一定的进展。大量的实验研究表明,水分的渗透、吸附以及与岩石矿物成分的相互作用会显著改变岩体的抗压强度、弹性模量、韧性等力学性能^[3-4]。庞建勇等^[5]发现,随着含水率的增加,花岗岩试样的抗压强度、弹性模量和脆性指标降低,试样吸能能力减弱,储能速率下降,但能量耗散显著增加。曹洋兵等^[6]详细讨论了不同含水率下花岗岩试样的脆性特征,并提出一种全面反映花岗岩变形破坏全过程的脆性评价新指标。赵恕轲等^[7]探讨了冲击载荷下不同含水率砂岩的动力学特性,发现含水率越大,砂岩抗冲击能力越弱;峰值应力和弹性模量分别呈指数和对数函数衰减。

声发射技术作为一种无损检测方法,广泛应用于岩石力学研究中。声发射信号能够实时监测并捕捉岩体在微裂纹扩展、变形或破裂过程中的破裂情况,从而提供岩体破裂机理和破坏模式的重要信息^[8-9]。赵奎等^[10]采用高低两种不同频率的声发射通道,对三种不同含水率的红砂岩进行单轴压缩声发射试验,分析了不同含水率下红砂岩的力学与声发射特性。侯奎奎^[11]发现,花岗岩在分级加载过程中,随着应力的增大,高频信号先减小后增大,声发射分形维数呈现先升高后降低的趋势,岩石破裂逐渐从无序向有序发展。胡超等^[12]发现,随着裂隙倾角的增加,花岗岩抗压强度呈U型变化,并且30°、45°和60°的试样,声发射事件点出现迁移现象。

尽管花岗岩的力学性能及破裂机制已获得广泛研究,然而含水率对其力学响应、损伤破坏演化过程及其伴随的声发射信号特征参量影响的系统性研究仍存在明显不足。为填补此知识空白,本研究聚焦含水率这一关键环境变量,针对从干燥至饱和状态的不同含水梯度花岗岩试样,开展系统的单轴压缩试验,并同步采集全过程的声发射信号。研究旨在深入揭示含水率对花岗岩宏观力学特性包括强度、模量、变形行为的调控规律,阐明其微观至宏观破坏模式的转变特征,并量化分析声发射活动中事件计数率、能量释放、b值、RA-AF值等关键参数的响应机制。该成果预期为复杂水岩相互作用环境下岩体工程的稳定性精细化评估与灾害预警防控提供更

为坚实的实验依据和理论支撑。

2 试验设计

2.1 试验样品

本试验所用花岗岩采自辽宁省弓长岭铁矿露天矿区,岩体呈典型肉红色调,发育粗粒至中粒花岗岩结构,具块状构造特征。岩石主要矿物组分为石英、奥长石及微斜长石,次要矿物为云母类矿物,局部可见星散状磁铁矿作为副矿物赋存。岩样采集严格遵循《煤和岩石物理力学性质测定-采样一般规定》技术标准,在矿区选定剖面实施标准地质钻探工艺获取完整岩芯。经精密机械加工后,试样最终几何形态为直径50 mm、高度100 mm的标准圆柱体。其端面平行度公差控制在±0.02 mm范围内,轴向垂直度偏差小于0.001弧度,具体形貌特征如图1所示。

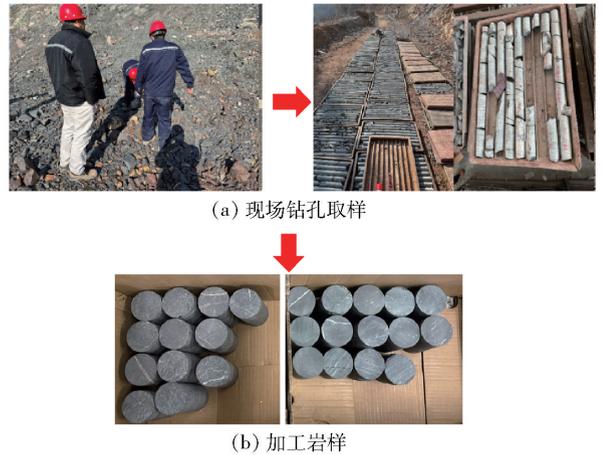


图1 现场钻孔与加工岩样

2.2 试验方案与设备

本试验共设计了3种不同含水率的花岗岩试样,分为干燥试样(含水率为0%),天然试样和饱水试样,每组试样均有3块平行试样,共9块花岗岩试样。其中由现场钻孔加工获取的岩样为天然试样。干燥试样是将天然试样烘干至恒重状态的试样。饱水试样是采用ZYB-II型真空加压饱和装置对天然岩石试样进行加压饱水,维持含水容器内真空状态48 h,使天然岩石试样达到饱水状态,试验装置如图2所示。

含水率的计算公式如下:

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

式中: ω 为含水率,%; m_d 为试样的烘干质量,g; m_s 为试样吸水后的质量,g。

根据式(1)计算的天然和饱水花岗岩试样的含

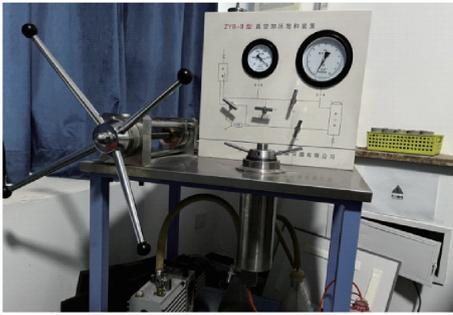


图2 ZYB-II型真空加压饱和装置

表1 不同工况花岗岩试样的含水率

工况	含水率/%	平均质量/g
干燥	0	427.7
天然	0.507	429.87
饱水	1.05	432.2

用位移加载的方式,加载速率为 0.003 mm/s,加载前试样上下加载端进行打磨,以减少边界的影响。采用 PCI-2 声发射采集系统实时监测试样的破裂演化过程,阈值设置为 40 dB,采样频率为 1 M/s,4 个声发射探头分别位于试样两端居中排列,距试样上下端 25 mm。相关测试装置如图 3 所示。

水率见表 1。

本试验的测试装置由加载系统、AE 系统。加载系统采用的是 WEP-600 液压式屏显万能试验机,采

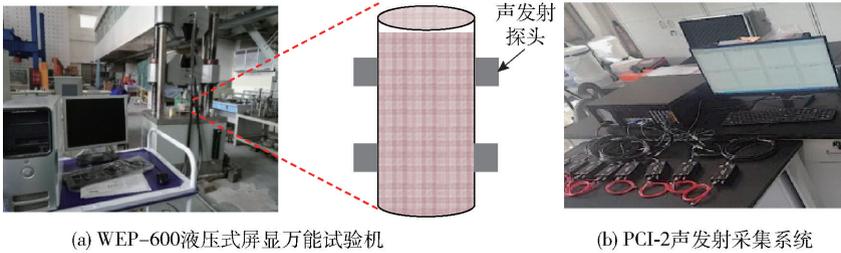


图3 试验测试装置

3 结果与分析

3.1 力学特性

图 4 所示为不同含水率花岗岩试样的应力-应变曲线特征。从图中可以看出,各组试样的应力-应变曲线具有相似的特征,均经历了裂纹闭合阶段、线弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和峰后破坏阶段。由于含水率的不同,使其应力-应变曲线存在一定的差异。主要表现为随着含水率的增加,试样的应力-应变曲线出现明显的应力跌落,此现象在饱水试样中更为明显,这是由于水分的渗入降低了花岗岩内部的矿物颗粒之间的摩擦力和黏结力,导致其

局部应力重分布,进而影响了应力-应变行为。值得注意的是,干燥试样和饱水试样的应力跌落点存在差异,干燥试样在峰后出现,而饱水试样则是在峰前出现,这说明水的渗入会促进裂纹扩展和聚结,加快试样的损伤进程。

图 5 所示为不同含水率花岗岩试样的力学参数均值和标准差特征。从图 5(a)中可以看出,干燥试样的峰值强度最高,约为 146.44 MPa,随着含水率的增加,花岗岩试样的峰值强度逐渐降低,饱水试样的峰值强度约为 70.99 MPa,与干燥试样相比降低了 51.52%。就弹性模量而言,随着含水率的增加,呈现近似线性降低的趋势,相较于干燥试样降低了 22.77%。从图 5(c)可以看出,随着含水率的增加,花岗岩试样的峰值应变先降低后升高,天然试样的峰值应变最低,约为 0.694 3%。泊松比能够反映花岗岩试样在受力时的变形特征。图 5(d)显示,随着含水率的增加,花岗岩试样的泊松比线性递增,由 0.21 增至 0.25,其原因是当水分进入花岗岩时,部分矿物(如长石、云母等)吸水膨胀,改变了岩石的内部结构,使得岩石在受力时表现出更高的横向应变,导致泊松比增大。

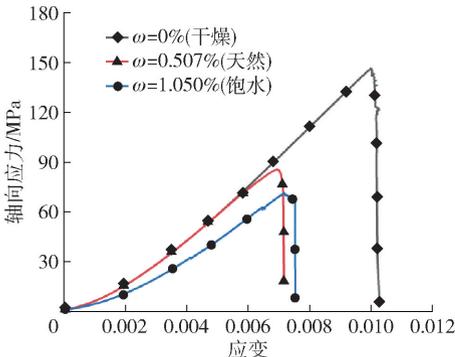


图4 不同含水率花岗岩试样的应力-应变曲线

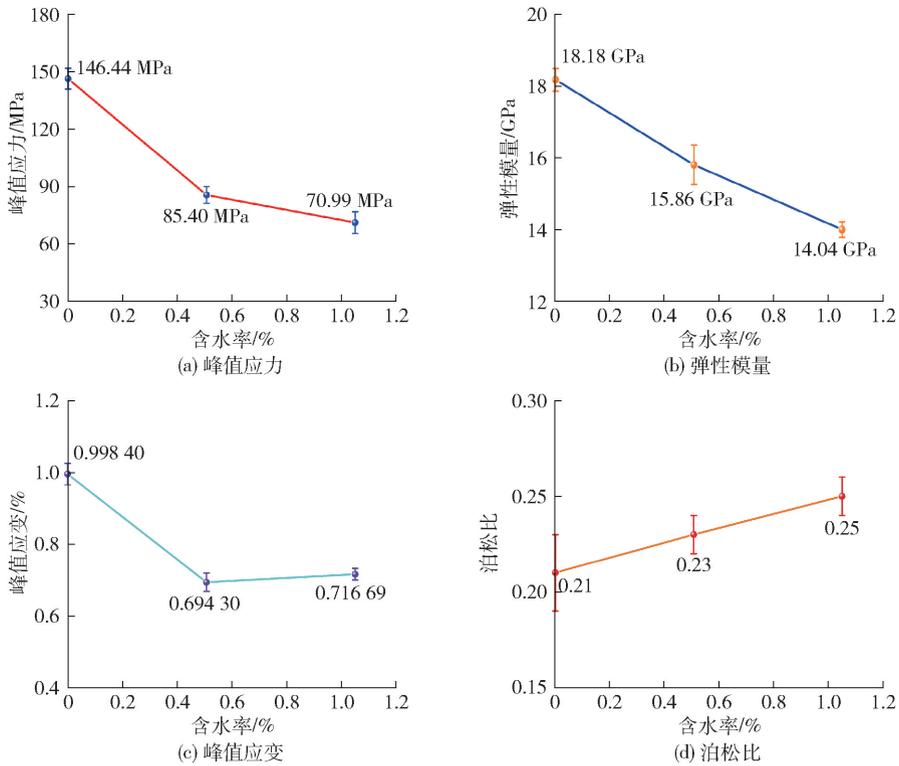


图5 不同含水率花岗岩试样的力学参数

3.2 破坏特征

图6所示为不同含水率花岗岩试样的最终破坏模式。从图中可以看出,含水率的不同使得花岗岩试样的最终破坏模式存在差异。干燥花岗岩试样表面多以张拉裂纹为主,裂纹形状近似平行与轴压方向,裂纹数量较多且分布较为分散;随着含水率的增加,试样表面的裂纹数量减少,形成一条剪切裂纹和张拉裂纹,并且出现表面剥落现象。当花岗岩达到饱和状态时,试样表面形成“X”型剪切裂纹,并且与天然试样相比,饱水试样的上端部出现较大的岩石剥落。综上所述,随着含水率的增加,花岗岩试样的破坏模式由劈裂破坏转为拉剪混合破坏,最后为X型共剪剪切破坏。这种破坏模式的转变主要是由于结合水与岩石内部的亲水颗粒发生水化反应、胶结

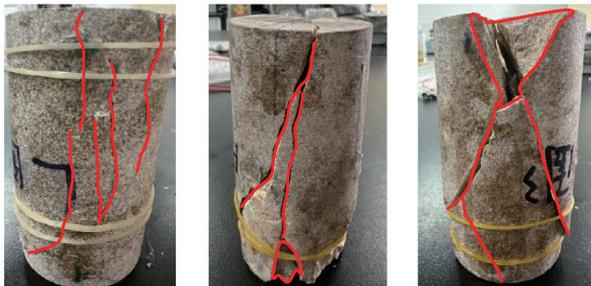


图6 不同含水率花岗岩试样的最终破坏模式

颗粒的溶解,加之孔隙中的自由水受压的叠加损伤作用,使得岩石的破坏模式发生转变。

3.3 AE 参数特征

1) AE 振铃计数特征

图7所示为不同含水率花岗岩试样的声发射振铃计数和累积振铃计数特征。从图中可以看出,加载初期,各种工况的花岗岩试样的声发射振铃计数较少,累积振铃计数走势平缓,随着加载的进行,干燥试样与天然试样的声发射振铃计数出现增长,但是其增长幅度不高,说明此时岩体内部的微裂纹发生闭合,并没有产生新的裂纹。而饱水试样的声发射振铃计数出现零星增长,且增长幅度高于其余两组,表明含水率越高,水化反应削弱颗粒间的粘聚力越强,从而岩石更容易发生微裂纹的扩展和相对滑动,使得饱水试样在受力过程的损伤过程更加活跃、复杂。当接近峰值应力时,可以观察到干燥试样的声发射振铃计数激增且分布最为密集,而饱水试样相对分散,同时可以观察到累积声发射振铃计数呈现垂直上升,干燥试样、天然试样和饱水试样的最大累积声发射振铃计数分别为 3.74×10^6 、 1.42×10^6 和 2.98×10^6 ,这说明此时试样产生了大量的微裂纹,并且微裂纹不断扩展聚结形成宏观裂纹,花岗岩试样逐渐破坏。

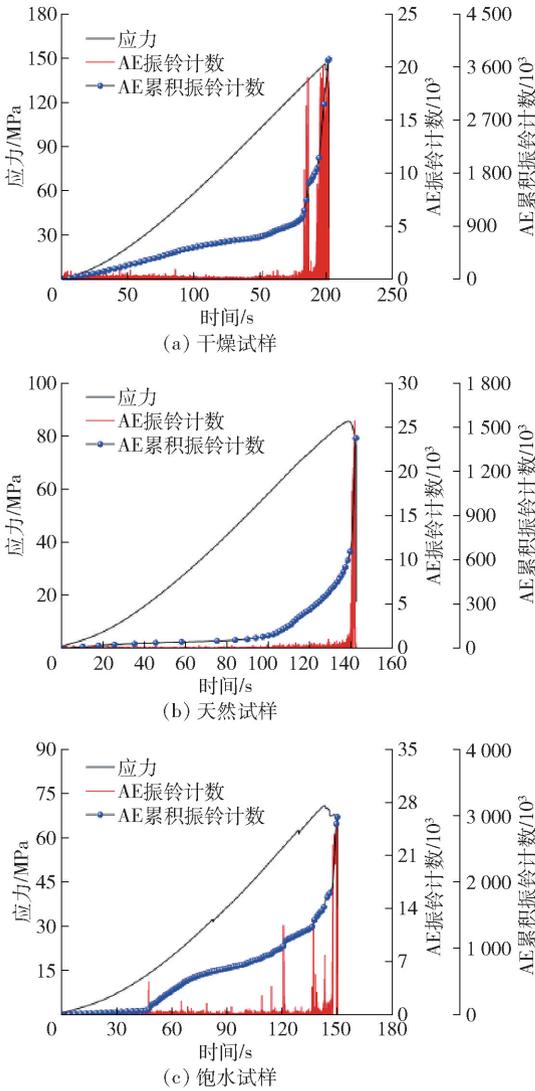


图7 不同含水率花岗岩试样的声发射振铃计数和累积振铃计数

为了更清晰对比不同含水率对花岗岩试样的损伤演化过程,本文采用声发射累积振铃计数来计算试样的损伤值。其中损伤值 D 的公式如下^[13]:

$$D = \frac{\sum C_t}{C_n} \quad (2)$$

式中: $\sum C_t$ 为花岗岩试样开始加载到 t 时刻的累积声发射计数; C_n 为花岗岩试样最终破坏时的累积计数。

图8所示为不同含水率花岗岩试样的损伤演化曲线。从图中可以看出,不同含水率花岗岩试样的突变点存在差异。饱水试样最早出现突变点,时间约为47.08 s,天然试样在100.63 s左右出现突变点,而干燥试样的突变点最晚出现,约为180.34 s。这说明水分能够促进裂纹的扩展,加快试样的损伤

进程。

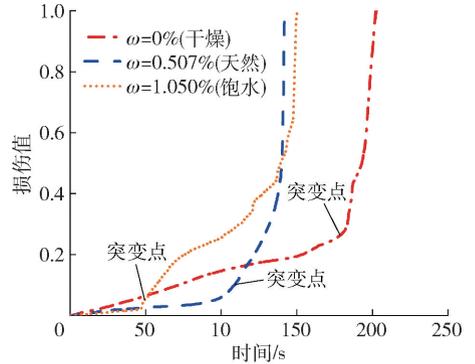


图8 不同含水率花岗岩试样的损伤演化曲线

2) AE 幅频特征

图9所示为不同含水率花岗岩试样的声发射幅频特征。花岗岩的振幅和峰值频率各分为3个阶段,即低频(40~60 dB)、中频(60~80 dB)、高频

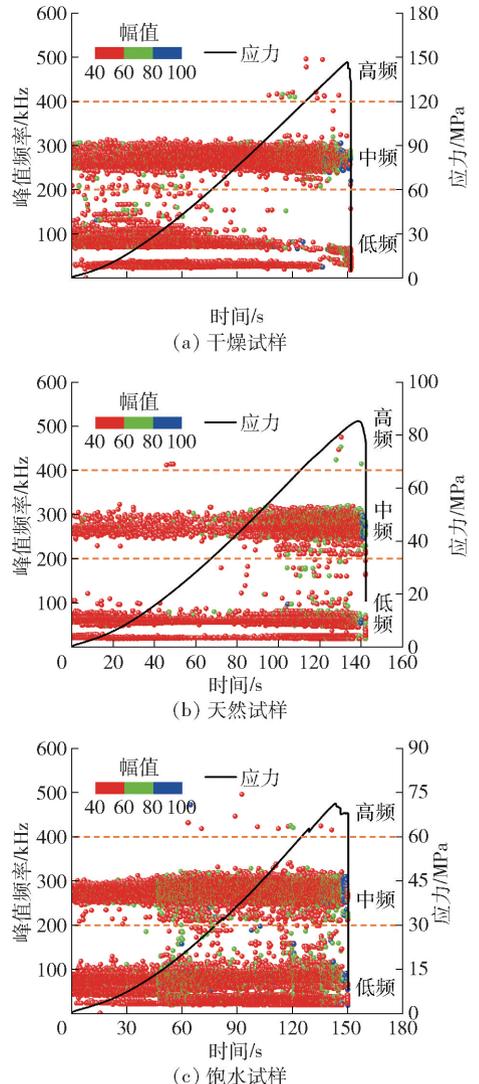


图9 不同含水率花岗岩试样的声发射幅频

(80 ~ 100 dB)和低频(0 ~ 200 kHz)、中频(200 ~ 400 kHz)与高频(400 ~ 600 kHz)。从图9可以看出,整个加载过程中,声发射信号主要集中在低频和中频,且以低幅信号为主,而声发射高频信号主要分布在加载后期,且数量极少。含水率的不同使得声发射信号分布存在差异。主要表现为干燥试样在低频和中频之间的声发射信号主要分布在加载前期,而含水花岗岩试样,分布在加载后期,并且含水率越高,声发射信号数量分布越密集。相关研究表明,大尺度裂纹往往伴随着高幅信号的产生^[14]。花岗岩试样无论是否含水在加载后期均观察到高幅现象,这表明此时微裂纹不断聚集形成大尺度的微破裂。

4 结论

本文对不同含水率花岗岩试样进行单轴压缩试验,分析了试样的力学参数特征,并采用声发射实时监测试样加载过程中的破裂演化过程,主要结论如下:

(1)花岗岩试样的力学行为表现出显著的含水率依赖性。随着含水率升高,其应力-应变曲线中应力跌落现象的显著。随着含水率增长,峰值应力与弹性模量均逐渐降低。干燥状态试样的峰值应力与弹性模量最优,分别约146.44 MPa和18.18 GPa。饱水试样的峰值应力降至70.99 MPa,弹性模量降至14.04 GPa;分别降低了51.52%,22.77%。峰值应变则呈现先降低后升高的变化趋势;泊松比则呈线性递增的趋势。

(2)含水率的不同使得花岗岩试样的最终破坏模式存在差异。干燥花岗岩试样表面多以张拉裂纹为主,裂纹方向近似平行与轴压方向。随着含水率的增加,花岗岩试样表面的张拉裂纹数量减少,岩石崩落的块体体积增大。岩石的破坏模式由劈裂破坏转为拉剪混合破坏,最后为X型共轭剪切破坏。

(3)干燥试样的累积振铃计数最高,约为 3.74×10^6 ;天然试样的累积振铃计数最低,约为 1.42×10^6 。含水率越高,水化反应削弱颗粒间的粘聚力越强,岩石更容易发生微裂纹的扩展和相对滑动,导致饱水花岗岩试样的损伤曲线突变点出现最早,时间约为47.08 s。花岗岩声发射信号分布在低频和中频,主要集中在300 kHz以下,且以低幅信号为主。随着含水率的增加,低中频之间的声发射信号向加载

后期转移。无论花岗岩是否含水在加载后期均观察到高幅现象。

[参考文献]

- [1] 苗浩东,任富强.冻融循环作用下不同含水率砂岩抗拉特性研究[J].工矿自动化,2023,49(5):133-138+152.
- [2] 唐宇,阳军生,郑响凑,等.高温富水隧道弱风化片麻岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(1):128-139.
- [3] 张正全.不同含水率的砂化白云岩力学特性研究[J].科技与创新,2022(4):79-82.
- [4] 高涛,陈云娟,敬艺,等.不同含水率断层宏微观破裂与强度折减损伤[J].科学技术与工程,2024,24(9):3773-3780.
- [5] 庞建勇,王宇,巩义鑫,等.不同含水率花岗岩单轴压缩力学特性及破坏特征研究[J].金属矿山,2025(1):81-88.
- [6] 曹洋兵,陈玉华,黄真萍,等.不同含水率条件下花岗岩脆性特征评价指标研究[J].工程地质学报,2020,28(1):29-38.
- [7] 赵恕轲,赵明诚,杨伟玮.冲击载荷下不同含水率砂岩动力学特性试验研究[J].水力发电,2021,47(10):110-115+122.
- [8] 南翰墨,冯子军,赵鹏,等.花岗岩裂隙注水诱发滑移的声发射频谱特性研究[J/OL].煤炭科学技术,1-13[2025-03-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20241226.1359.001.html>.
- [9] 薛瑞雄,孔颖慧,冯金翔.基于声发射不同岩石破裂特征及失稳前兆信息研究[J].煤炭技术,2024,43(12):13-19.
- [10] 赵奎,腾天野,曾鹏,等.单轴压缩下不同含水率红砂岩声发射特性试验研究[J].江西理工大学学报,2019,40(5):1-7.
- [11] 侯奎奎.花岗岩分级加载过程中声发射及其分形特征分析[J].矿冶工程,2024,44(6):32-35.
- [12] 胡超,杜世霖,林勇华,等.裂隙花岗岩单轴压缩力学特性及声发射特征研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S2):229-235.
- [13] 孙博,任富强,刘冬桥.基于声发射多重分形特征的层状板岩失稳前兆研究[J].岩土力学,2022,43(3):749-760.
- [14] 宋硕,任富强,常来山.含预应力锚杆煤岩组合体破坏及声发射特征试验研究[J].岩土力学,2023,44(S1):449-460.