

单轴载荷下不同含水率砂岩力学和红外辐射特征

周子龙¹, 熊成¹, 蔡鑫¹, 赵源¹, 李夕兵¹, 杜坤²

- (1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 中南大学 高等研究中心, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 为揭示水对砂岩受力和红外辐射特性影响, 开展不同含水率砂岩的单轴压缩试验, 并进行红外辐射监测。研究表明: 随着含水率增加, 砂岩的单轴压缩强度、弹性模量逐渐降低, 说明水对岩石的力学性质起到了一定的“软化”作用; 含水率对砂岩红外辐射特性影响较大, 砂岩含水率越高, 其从初始时刻到最高应力时刻的升温幅度越大; 含水率越高的砂岩试样表面平均红外辐射温度(AIRT)随时间变化的波动越小, 温度随应力增加而增加的趋势越明显; 含水岩石在临破裂前红外热像变化较平稳, 没有温度异常, 而对于干燥岩石, 其临破裂前表面平均红外辐射温度突然增大, 出现较明显的高温异常条带。

关键词: 岩石力学; 红外辐射; 含水率; 平均红外辐射温度(AIRT); 高温异常条带

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)05-1189-08

Mechanical and infrared radiation properties of sandstone with different water contents under uniaxial compression

ZHOU Zilong¹, XIONG Cheng¹, CAI Xin¹, ZHAO Yuan¹, LI Xibing¹, DU Kun²

- (1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Advanced Research Center, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to investigate the effect of water on mechanical and infrared radiation properties of rock, a series of uniaxial compressive tests were conducted on sandstone specimens with different water contents, and the infrared radiation characteristics were monitored. The results show that with the increase of water content, both of uniaxial compressive strength and elastic modulus of specimens decrease, which indicates that the sandstone becomes “soft” when the water content increases. Water contents have great influence on the infrared radiation characteristics of rocks. For specimen with higher water content, the amplitude of temperature rising is greater, and the variation of average infrared radiation temperature(AIRT) with time has smaller fluctuation. The temperature shows a more obvious increasing trend with the increase of external load. For wet specimens, the AIRT changes mildly with the increase of loading, and there is no temperature anomaly on the surface. However, AIRT of dry specimens increases abruptly and high-temperature anomaly strips can be monitored.

Key words: rock mechanics; infrared radiation; water content; average infrared radiation temperature(AIRT); high-temperature anomaly strip

收稿日期: 2017-05-10; 修回日期: 2017-07-12

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB060200); 国家自然科学基金资助项目(41772313) (Project(2015CB060200) supported by the National Basic Research Development Program (973 Program) of China; Project(41772313) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 周子龙, 博士, 教授, 博士生导师, 从事采矿与岩石力学研究; E-mail: zzhou@csu.edu.cn

岩石的变形破坏过程是一个能量释放的过程,伴随着自身温度的变化而变化^[1]。红外技术作为一种无损监测手段,可以无接触地对岩石表面的辐射温度变化进行实时监测,因此,是一种理想的研究岩石力学行为的途径。早在 20 世纪 80 年代末, GORNY 等^[2]在研究中亚地区地震时,发现地震前卫星热红外异常现象。近年来,越来越多的科研工作者开始对岩石加载过程中的红外辐射规律进行研究。耿乃光等^[3]对 26 种岩石进行了试验,发现岩石的红外辐射温度随岩石的应力增大而增大。邓明德等^[4-5]通过试验和总结归纳的方法,发现岩石临近破裂前会出现明显的温度突增和红外图像升温异常现象。王述红等^[6-8]对岩石加载变形和破裂前的红外热像特征进行了研究,发现岩石剪切破裂位置的红外图像出现高温异常条带,并且微破裂强度与红外辐射强度具有正相关关系。谭志宏等^[9]研究了含缺陷花岗岩破坏过程中的红外热像,发现试件产生主破裂时,局部破坏区域会产生高温条带。张艳博等^[10]研究了含孔岩石加载过程的热辐射温度场变化特征,总结出应力场与红外辐射温度场具有良好的对应关系。在自然界中,岩石含水率往往不同,而且水对岩石的各种特性有较大影响,红外特性也不例外。邓明德等^[11-12]研究了水对岩石红外辐射特征的影响,发现水的作用比较明显,干燥岩石在破裂前会出现显著增温现象,而饱和岩石不会出现此现象。目前,研究者对红外辐射研究工作大多只针对岩石的干燥、饱和这 2 种状态展开,对岩石的不同含水状态研究较少。考虑到水对岩石性能的影响是动态连续过程,而且在实际工程状态下,完全干燥和饱和岩体并不是常态,介于饱和与干燥之间的含水率状态更符合工程实际,为此,本文作者对不同含水率岩石加载过程中的红外特性进行研究,以便为更好地指导工程实践提供参考。

1 试验

1.1 不同含水率试样的制备

红砂岩吸水效果好,颗粒粒度均匀,因此,试验所用的岩样选为红砂岩。为了使试验结果具有可比性,要求所有试样取自同块完整性和均质性都较好的砂岩。试验所用试样都加工成直径为 50 mm、长径比为 2.0 的圆柱体,并对试样进行打磨,以保证两端表面平行度在 0.05 mm 以内,表面平整度在 0.02 mm 以内。试样加工完后,测定所有试样质量及波速,从中挑选出密度和波速均相近的试样用于试验。所选出的试样

平均密度为 2.294 50 t/m³,平均纵波波速为 2.692 15 km/s。

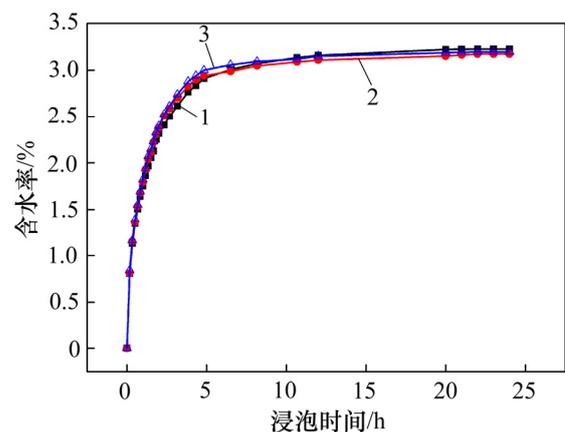
本试验的干燥试样通过将岩样放入烘烤箱中进行干燥处理而得,烘烤时长为 48 h,烘烤温度为 105 ℃。烘烤完毕后称质量,且认为此时的含水率为 0。

试验中,其他含水率试样通过干燥试样在水中浸泡制得,不同含水率试样的浸泡时间依据砂岩的含水率-时间曲线进行控制。在同一批加工试样中,随机选取 3 个试样经干燥处理后放在水箱中浸泡,每隔一段时间取出,擦干表面水分,放置于精度为 0.01 g 的电子天平上称质量,重复上述步骤,直到质量不再变化为止。试样含水率的计算公式为

$$\omega = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\%$$

式中: ω 为试样含水率,%; m_w 为试样浸泡后的质量,kg; m_d 为试样干燥时的质量,kg。

根据试验结果绘制的试样含水率随浸泡时间变化曲线如图 1 所示。由图 1 可知:砂岩试样从干燥达到饱和状态大概需要 24 h,饱和试样的含水率约为 3.5%。因此,本试验决定采用 4 种含水率水平的试样进行静态压缩试验,分别为 0, 1.0%, 2.0% 和 3.5%。对于每种含水率,制作 3 个试样用于单轴压缩试验。将制作好的试样立即用塑料保鲜膜包裹好,以便最大限度地防止含水率发生变化。



1—试样 1; 2—试样 2; 3—试样 3。

图 1 试样含水率随时间变化曲线

Fig. 1 Variation of water content with time for sandstone

1.2 试验设备与方法

利用中南大学高等测试中心的电液伺服控制材料试验机(MTS-647),对不同含水率砂岩试样进行单轴压缩试验。所有试验均采用位移控制的加载方式,要求加载速率恒定在 0.15 mm/min。

在力学试验过程中, 采用红外热像仪(SC7300M)同步记录不同含水率试样压缩过程中的红外辐射特性。红外热像仪像素分辨率为 320×256 像素, 波长范围 3.7~4.8 μm, 温度灵敏度为 0.01 °C, 采样频率设为 25 Hz。

试验进行前, 在试验机 3 个方向放置隔离纸板, 只留下 1 个方向开口用于热像监测。为了防止岩石破坏后飞溅出来的碎片损坏仪器, 将红外热像仪放置在开口监测方向的正前方 1 m 左右位置。同时, 保证红外热像仪与静载试验机同时开启, 力学结果和红外结果记录保持同步。

在本次实验中, 为了尽可能地减小环境因素对含水率带来的影响, 采取了以下措施: 调节空调将试验室温度控制在 27 °C 左右; 拆除试样的保鲜膜后立即进行试验; 在试验过程中, 关闭室内门窗, 拉上窗帘, 禁止人员走动, 尽可能减少实验现场的空气流动。同时, 在实验过程中, 试样因受压排水也可能会导致实际含水率与设定值不相符。但本实验研究的重点是砂岩的力学特征和红外辐射特征随含水率的变化趋势, 因此, 极小的含水率误差并不影响实验效果。

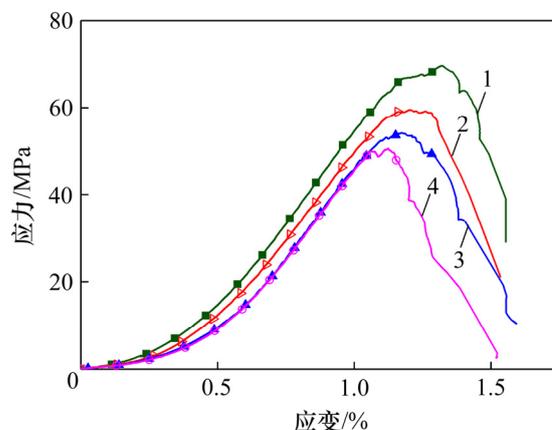
2 试验结果与讨论

2.1 不同含水率砂岩力学参数变化规律

表 1 所示为不同含水率砂岩的力学参数, 图 2 所示为 4 种含水率砂岩的应力-应变曲线。从图 2 可以看出: 不同含水率试件在受压过程中的应力-应变曲

线形状大体相似; 在达到峰值前, 经过小段压密过程后应力增大; 应力-应变曲线部分近似为线性, 即试件在此区间处于弹性变形阶段; 到达峰值强度后, 不同含水率的试件应力均迅速下降到 0 MPa, 表明在试件被破坏后, 不同含水率试件都立刻失去了承载能力。然而, 由于含水率不同, 试件也表现出差异: 随着含水率增大, 试件的峰值强度递减; 弹性阶段更短, 峰值应变逐渐减小, 说明水对岩石的力学性质起到了一定的“软化”作用。

图 3 所示为不同含水率砂岩抗压强度变化规律。从图 3 可以看出: 随着含水率增大, 砂岩的抗压强度递减。这表明水对砂岩起到了软化作用, 含水率



含水率/%: 1—0; 2—1.0; 3—2.0; 4—3.5。

图 2 不同含水率砂岩的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sandstone with different water contents

表 1 静态压缩试验试样参数

Table 1 Specimen parameters and test results in static compressive tests

试样 编号	含水率/%		密度/(kg·m ⁻³)		压缩强度/ MPa	压缩强度 平均值/MPa	切线弹性 模量/GPa	弹性模量 平均值/GPa
	设计值	试验值	干燥	含水				
SC1-1	0	0	2 337.5	2 337.5	67.33	67.16	7.88	7.85
SC1-2		0	2 343.8	2 343.8	69.62		7.93	
SC1-3		0	2 339.1	2 339.1	64.52		7.75	
SC2-1	1.0	1.07	2 351.2	2 376.4	58.54	58.07	7.63	7.39
SC2-2		1.04	2 367.1	2 391.6	59.53		7.32	
SC2-3		1.08	2 364.1	2 389.6	56.14		7.21	
SC3-1	2.0	2.05	2 331.9	2 379.8	51.12	51.16	6.90	6.70
SC3-2		2.02	2 329.1	2 376.3	48.30		6.58	
SC3-3		2.08	2 330.9	2 379.5	54.07		6.62	
SC4-1	3.5	3.55	2 338.0	2 421.0	48.86	46.81	6.23	6.23
SC4-2		3.43	2 381.4	2 463.0	44.57		6.28	
SC4-3		3.41	2 401.2	2 483.1	46.99		6.17	

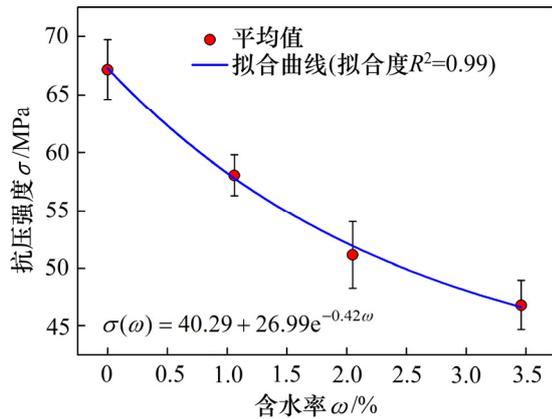


图 3 砂岩抗压强度随含水率的变化规律

Fig. 3 Variation of compressive strength with water contents

为 0 时的平均抗压强度为 67.16 MPa, 而饱和时的抗压强度为 46.81 MPa, 饱水软化后强度降低约 30%。

图 4 所示为不同含水率砂岩的弹模变化规律。从图 4 可以看出: 随着砂岩含水率增大, 其弹性模量不断减小, 达到饱和时下降幅度约 18%, 进一步显示了水对岩石的软化作用^[13-14]。

2.2 加载过程中红外热像特征

通过红外热像可以实时观测岩石试样在加载过程中表面热场的分布和变化特征。图 5 所示为 4 种不同含水率砂岩试样在不同应力状态下的典型红外热像照片。各砂岩试样端部升温速度均比中间位置的升温速度快, 其原因可能是砂岩受载时的泊桑效应, 压头和

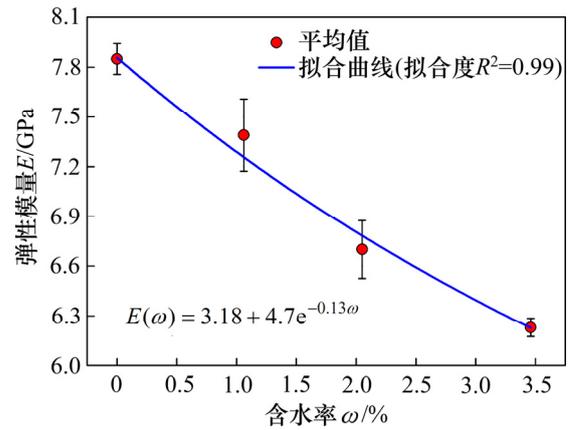
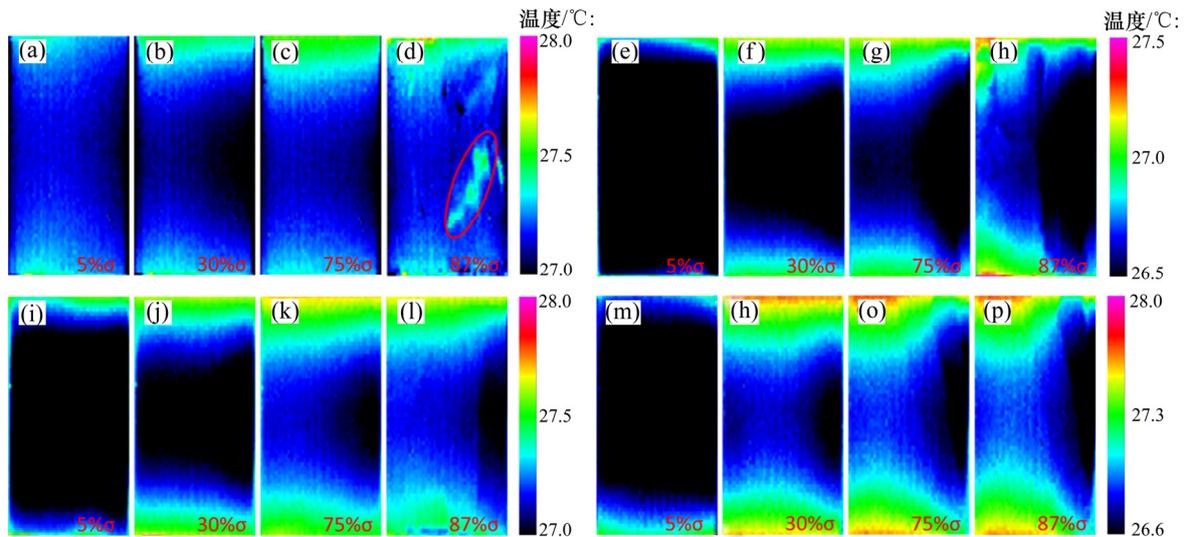


图 4 砂岩弹模随含水率的变化规律

Fig. 4 Variation of elastic modulus with water contents

底座与试样接触面之间产生摩擦而产生热量。从图 5 可以看出: 在压缩过程中, 砂岩试样表面的红外辐射温度场呈现非均匀变化, 但整体趋势都为升温; 随着含水率增大, 砂岩红外辐射温度的变化趋势更加明显, 而含水率较低的砂岩温度场变化呈现相对无序状态。在图 5(a)到图 5(b)所示红外热像可见: 试样的中间部分整体表现为降温, 而在由图 5(c)到图 5(d)所示红外热像可见试样表现为升温。该规律在平均红外辐射温度(AIRT)曲线的分析中更容易看出。在破坏瞬间, 含水率为 1%, 2%和 3.5%的砂岩温度场变化都相对平稳, 而干燥的砂岩则出现 1 条由应力集中或摩擦效应引起



含水率/%: (a) 0, 试样(a-1); (b) 1.0, 试样(a-2); (c) 2.0, 试样(a-3); (d) 3.5, 试样(a-4);
 (e) 0, 试样(b-1); (f) 1.0, 试样(b-2); (g) 2.0, 试样(b-3); (h) 3.5, 试样(b-4);
 (i) 0, 试样(c-1); (j) 1.0, 试样(c-2); (k) 2.0, 试样(c-3); (l) 3.5, 试样(c-4);
 (m) 0, 试样(d-1); (n) 1.0, 试样(d-2); (o) 2.0, 试样(d-3); (p) 3.5, 试样(d-4)

图 5 不同含水率砂岩在加载过程中典型红外热像对比

Fig. 5 Typical infrared thermographics of sandstone with different water contents in compression processes

的局部辐射温度显著增加的条带^[9], 见图 5(d)红圈所标注部分。

2.3 加载过程中辐射温度变化规律

岩石试样表面的平均红外辐射温度(AIRT)反映整个岩石试样的红外辐射能量, 是表征岩石加载过程中

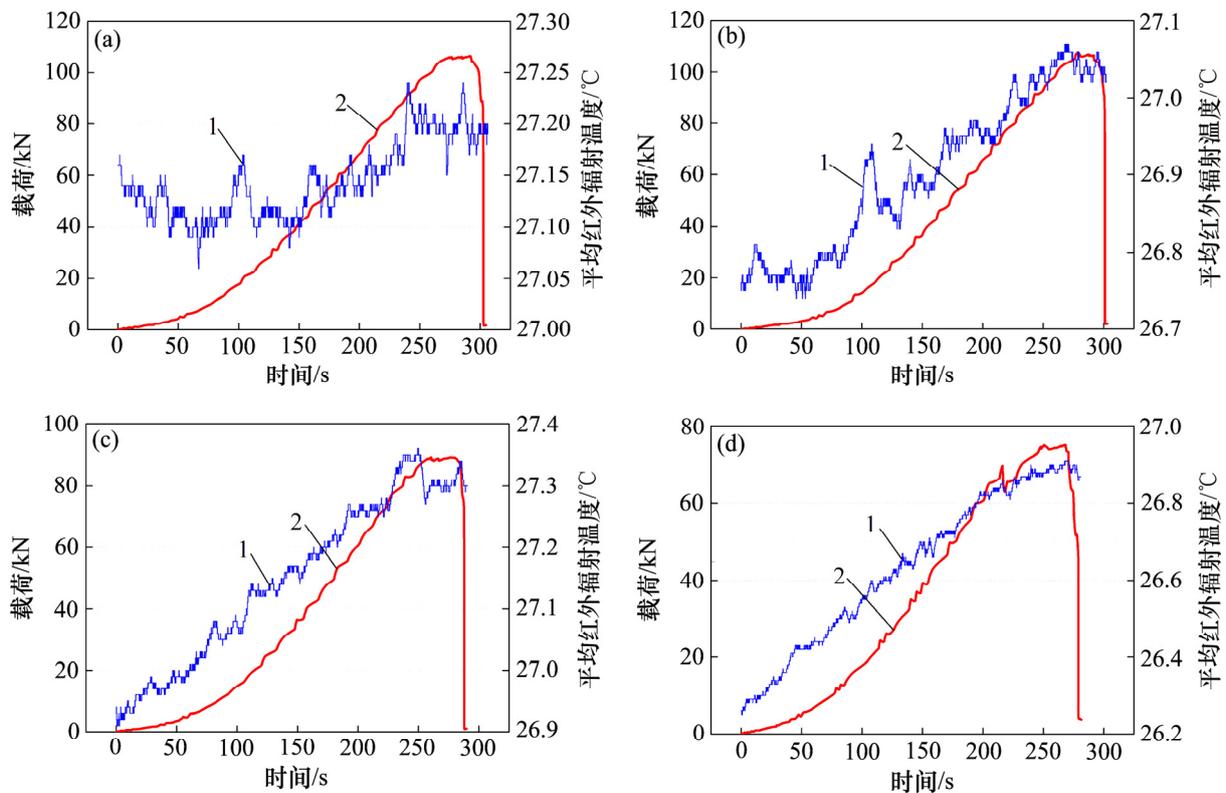
红外辐射变化特征的 1 个重要指标。各含水率峰值载荷前 AIRT 增幅(Δt)和单位应力 AIRT 增幅($\Delta t/\sigma$)统计结果见表 2。

图 6 所示为 4 种不同含水率砂岩试样的 AIRT 及外荷载随时间的变化曲线。从图 6 可见: 低含水率砂

表 2 红外辐射试验试样参数

Table 2 Specimen parameters and test results in infrared radiation

试样编号	含水率/%		Δt / °C	Δt 平均值/ °C	$\Delta t/\sigma$ / (°C·MPa ⁻¹)	$\Delta t/\sigma$ 平均值/ (°C·MPa ⁻¹)
	设计值	试验值				
SC1-1		0	0.04		0.00 067	
SC1-2	0	0	0.28	0.21	0.00 402	0.00 316
SC1-3		0	0.31		0.00 480	
SC2-1		1.07	0.46		0.00 786	
SC2-2	1.0	1.04	0.47	0.41	0.00 790	0.00 727
SC2-3		1.08	0.31		0.00 606	
SC3-1		2.05	0.67		0.01 311	
SC3-2	2.0	2.02	0.67	0.60	0.01 387	0.01 183
SC3-3		2.08	0.46		0.00 851	
SC4-1		3.55	0.92		0.01 883	
SC4-2	3.5	3.43	0.66	0.76	0.01 305	0.01 567
SC4-3		3.41	0.71		0.01 511	



含水率/%: (a) 0; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.5

1—外荷载曲线; 2—AIRT 曲线。

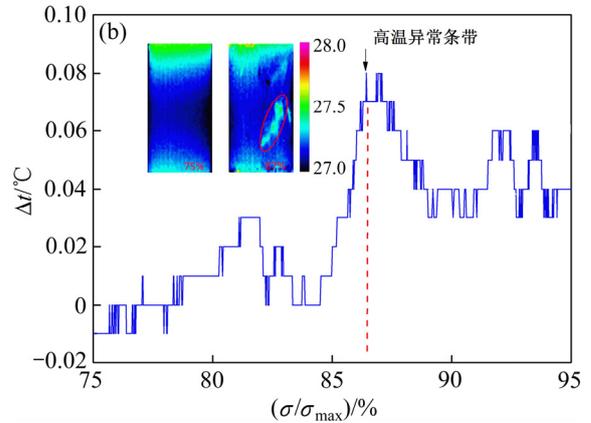
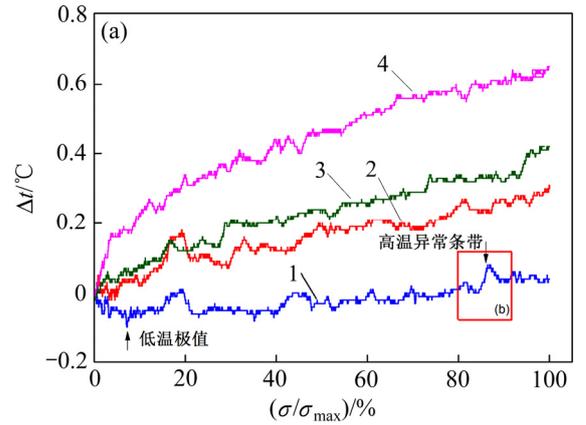
图 6 不同含水率砂岩平均红外辐射温度(AIRT)及外荷载随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of AIRT and external load of specimen with different water contents

岩的 AIRT 曲线在变化过程中的相对波动很大, 而含水率越高的砂岩, AIRT 曲线的变化越平稳, 相对波动越小; 同时, 随着含水率增加, AIRT 曲线和外载荷曲线变化的一致程度逐渐增加; 对含水率较低的试样, 随着载荷增大, 其温度变化并不明显; 而对含水率较高的试样, 随着载荷增大, 其温度不断升高, 两者具有较好的同步性, 这与刘善军等^[12]的研究结果是一致的。从图 6(a)可见: 含水率为 0 的试样 SC1-1 在加载初期, AIRT 变化趋势表现为震荡降低, 在加载后 65 s 左右约 8%峰值载荷时出现 1 个低温极值, 降温幅度约为 0.1 °C; 随后, 曲线开始震荡回升, 在 140 s 再次出现低温极值, 而后回升, 整体上振荡较大。

图 7(a)所示为压缩过程中不同含水率砂岩的辐射温度变化曲线。从图 7(a)可以看出: 不同含水率砂岩由加载到最终破坏均表现为温度增加, 但当含水率为 0 时, 在低应力和中等应力阶段, 干燥砂岩的温度变化为负增值; 加载开始时, 温度便波动下降, 当应力到达 8%峰值应力时出现低温极值; 之后, 随着应力继续增加, 温度稍有回升, 在 19%峰值应力时, 温度回升至与初始温度基本持平; 在 19%到 23%峰值应力阶段, 温度再次迅速降低, 随着应力增大, 辐射温度保持动态平稳至 40%峰值应力, 约 27 MPa; 到 30 MPa 时, 温度再次迅速回升到初始温度水平, 直到应力增至 50 MPa 时, 温度一直在负增值水平上震荡; 在高应力阶段, 当应力达到 50 MPa 即约 75%峰值应力后, 温度变化转为正增值, 但增速不大。然而, 在 58~60 MPa 即约 87%峰值应力时, 温度突然增大, 对应时刻的红外热像出现高温条带, 如图 7(b)所示。当最终应力达到 67 MPa 左右时, 试样发生破裂。在中低应力阶段, 干燥砂岩出现多次由初始温度水平到降温到回升至初始温度水平循环, 而含水率为 1.0%的砂岩除了在 0~5%峰值应力阶段温度出现震荡外, 其他阶段均与含水率为 2.0%和 3.5%的潮湿砂岩一样, 随着应力增大, 温度变化始终为正增值, 并且温度增大的趋势随着砂岩含水率的增大也表现得越来越明显。

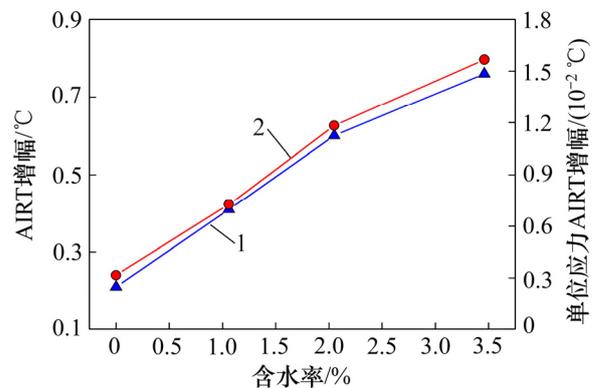
图 8 所示为破坏前增温幅度(峰值应力时温度与初始温度之差)和单位应力增温幅度随着含水率的变化曲线。从图 8 可见: 随着含水率升高, AIRT 的增加幅度逐渐增大, 单位应力的 AIRT 增加幅度也逐渐增大: 含水率为 0 的试样 AIRT 平均增幅为 0.21 °C, 即当试样达到饱和时, 试样的 AIRT 平均增幅达 0.76 °C, 约为干燥试样的 3.6 倍。干燥试样的单位应力 AIRT 平均增加幅度约为 0.00 316 °C/MPa, 饱水试样的单位应力 AIRT 平均增加幅度约为 0.01 567 °C/MPa, 约为干燥试样的 5 倍。



(a) 不同含水率砂岩的辐射温度变化曲线; (b) 含水率为 0 时的砂岩温度曲线突变与红外图像异常对应时间
含水率/%: 1—0; 2—1.0; 3—2.0; 4—3.5。

图 7 不同含水率砂岩温度随应力水平变化曲线

Fig. 7 Relationship between temperature of specimen with different water contents and stress level



1—AIRT 增幅; 2—单位应力 AIRT 增幅。

图 8 破坏前 AIRT 增幅和破坏前单位应力 AIRT 增幅与含水率关系

Fig. 8 Relationship between increment of AIRT and AIRT per unit stress and water content before failure

不同含水率砂岩在加载初期升温趋势方面出现差异的原因可能是: 砂岩在加载初期要经过短暂压密阶段。由于原生裂隙和孔隙的存在, 砂岩在压密过程中会因排出孔隙中的空气而带走一部分热量^[15]。随着含水率增大, 原生裂隙或孔隙渐渐被水颗粒所填充, 所以, 在加载初期排出空气这一现象会随之减弱。而与空气相比, 水的流动性要弱得多。因此, 由于水存在黏滞性, 在加载初期阶段, 水因受挤压而排出的现象要远远比空气中的弱。同时, 由于加载后水颗粒与砂岩颗粒摩擦会产生热量, 因此, 随着含水率增大, 砂岩的 AIRT 曲线在初始阶段的上升趋势更加明显。

水对岩石红外辐射温度升温幅度的影响可以从热弹效应和微破裂效应 2 个角度进行解释: 1) 热弹效应认为, 岩石受压时温度上升, 且压缩量越大, 温度上升越多。根据试验结果, 在相同载荷条件下, 随着含水率增大, 岩石对应的应变越大, 故岩石的平均红外辐射温度增加越大; 2) 岩石微破裂理论认为, 岩石内部拉伸微裂隙的产生会吸收热量, 进而可能导致岩石温度下降。张超等^[16-17]通过声发射的方法研究单轴压缩过程中干燥和饱和砂岩的微裂隙的发育情况, 结果表明饱水试件声发射事件率比干燥试件的低, 说明在单轴压缩过程中, 含水岩石产生的微裂隙更少, 故吸收热量越少。因此, 随着含水率增大, 单轴压缩过程中岩石的平均红外辐射温度增加越大。

利用含水率越高的砂岩峰值载荷前的升温幅度越高这一现象, 可以逆向对砂岩岩体的含水率进行评估。辐射温度变化规律反映岩石受力作用下的微破裂行为, 干燥砂岩破坏瞬间会出现红外图像异常。这表明在工程实践中, 可以用辐射方法对岩体工程灾害进行监测, 实现预测预警的作用。

3 结论

1) 随着含水率增大, 砂岩试样的单轴抗压强度和弹性模量都随之降低, 应力-应变曲线的弹性阶段越短, 水对岩石的力学性质起到了一定的“软化”作用。

2) 随着含水率增大, 砂岩的温度曲线和外载荷曲线随时间变化的同步性越好, 温度曲线的相对震荡也越小, 温度随应力增加而增加的规律越明显。对含水率越高的砂岩, 其峰值应力前的升温幅度越大。

3) 在压缩过程中, 干燥砂岩在临破裂前出现图像异常即出现高温条带, 而潮湿砂岩不具备该图像特征。干燥砂岩的温度-应力曲线存在低温极值和临破裂前温度突增现象, 而潮湿砂岩不具有这些特征。

参考文献:

- [1] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [2] GORNY V I, SALMAN A G, TRONIN A A, et al. Out-going infrared radiation of the earth as an indicator of seismic activity[J]. Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, 1988, 301(1): 67-69.
- [3] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J]. 地震学报, 1992, 11(S1): 645-652.
GEN Naiguang, CUI Chengyu, DENG Mingde. Remote sensing observation of rock failure experiment and the beginning of the remote sensing rock mechanics[J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 11(S1): 645-652.
- [4] 邓明德, 耿乃光. 岩石红外辐射温度随岩石应力变化的规律和特征以及与声发射率的关系[J]. 西北地震学报, 1995, 17(4): 79-86.
DENG Mingde, GEN Naiguang. The regulation and characteristic of infrared radiation temperature changes with rock stress and the relation between infrared radiation temperature and AE[J]. Northwestern Seismological Journal, 1995, 17(4): 79-86.
- [5] 刘善军, 吴立新, 王川婴, 等. 遥感-岩石力学(VIII): 论岩石破裂的热红外前兆[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1621-1627.
LIU Shanjun, WU Lixin, WANG Chuanying, et al. Remote sensing-rock mechanics(VIII): TIR omens of rock fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1621-1627.
- [6] 王述红, 谭志宏, 唐春安, 等. 岩石破裂过程红外热像试验[C]// 中国岩石力学与工程学会第八次学术大会. 北京: 科学出版社, 2004: 966-969.
WANG Shuhong, TAN Zhihong, TANG Chun'an, et al. The experimentation exploration of infrared thermal image in the process of rock fracture[C]// The Eighth National Rock Mechanics and Engineering Academic Conference Proceedings. Beijing: Science Press, 2004: 966-969.
- [7] 刘善军, 吴立新, 张艳博. 岩石破裂前红外热像的时空演化特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7): 1034-1038.
LIU Shanjun, WU Lixin, ZHANG Yanbo. Temporal-spatial evolution features of infrared thermal images before rock failure[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(7): 1034-1038.
- [8] 董玉芬, 王来贵, 刘向峰, 等. 岩石变形过程中红外辐射的实

- 验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 134-137.
- DONG Yufen, WANG Laigui, LIU Xiangfeng, et al. The experimental research of the infrared radiation in the process of rock deformation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(2): 134-137.
- [9] 谭志宏, 唐春安, 朱万成, 等. 含缺陷花岗岩破坏过程中的红外热像试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2977-2981.
- TAN Zhihong, TANG Chun'an, ZHU Wancheng, et al. Experimental study on infrared thermal image for failure process of granite with fracture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2977-2981.
- [10] 张艳博, 刘善军. 含孔岩石加载过程的热辐射温度场变化特征[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1013-1017.
- ZHANG Yanbo, LIU Shanjun. Thermal radiation temperature field variation of hole rock in loading process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1013-1017.
- [11] 邓明德, 刘晓红. 水在岩石红外辐射中的作用研究[J]. 中国地震, 1997, 13(3): 288-296.
- DENG Mingde, LIU Xiaohong. The research of water's effect on rock infrared radiation[J]. *Earthquake Research in China*, 1997, 13(3): 288-296.
- [12] 刘善军, 吴立新, 张艳博, 等. 潮湿岩石受力过程红外辐射的变化特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 265-268.
- LIU Shanjun, WU Lixin, ZHANG Yanbo, et al. Change feature of infrared radiation from loaded damp rock[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31(2): 265-268.
- [13] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 1992, 25(2): 115-130.
- [14] VÁSÁRHELYI B, VÁN P. Influence of water content on the strength of rock[J]. *Engineering Geology*, 2006, 84(84): 70-74.
- [15] 吴立新, 刘善军, 吴育华, 等. 遥感-岩石力学(IV): 岩石压剪破裂的热红外辐射规律及其地震前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 539-544.
- WU Lixin, LIU Shanjun, WU Yuhua, et al. Remote sensing-rock mechanics(IV): laws of thermal infrared radiation from compressively-sheared fracturing of rock and its meanings for earthquake omens[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 539-544.
- [16] 张超, 张安斌, 张艳博, 等. 干燥与饱水泥质粉砂岩破裂声发射及损伤演化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(7): 705-711.
- ZHANG Chao, ZHANG Anbin, ZHANG Yanbo, et al. Acoustic emission and damage evolution of dry and water-saturated argillaceous siltstone fracture[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2016, 35(7): 705-711.
- [17] ZANG A, WAGNER C F, DRESEN G. Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B8): 17507-17522.

(编辑 陈灿华)