

化学溶蚀及高温作用下砂岩力学特性的试验研究

李 哲, 陈有亮, 王苏然, 印宇澄, 彭晨鑫

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为探究化学溶蚀及高温作用对砂岩力学性能的影响, 将砂岩分别在水、HCl 和 NaOH 溶液中浸泡后, 经高温处理, 再进行单轴压缩试验和三点弯曲试验, 并借助扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪分析其损伤机理。试验结果表明: 高温使 NaOH 溶液浸泡后的砂岩单轴抗压强度得到明显提高, 而在温度低于 400 °C 时, HCl 溶液和水浸泡后的砂岩单轴抗压强度随着温度的升高呈劣化趋势; NaOH 溶液使砂岩的断裂韧度降低了 16.05%, 断裂韧度和抗拉强度随温度的升高总体呈下降趋势, 400 °C 是断裂韧度及抗拉强度发生劣化的门槛温度。高温和化学溶蚀的共同作用改变了砂岩的矿物成分、结晶度及结构完整度, 使砂岩的力学性能受到影响。

关键词: 砂岩; 化学溶蚀; 高温; 断裂韧度; 抗拉强度

中图分类号: TU 45 文献标志码: A

Experimental Research on Mechanical Properties of Sandstone After Chemical Corrosion and High Temperature Exposure

LI Zhe, CHEN Youliang, WANG Suran, YIN Yucheng, PENG Chenxin

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To clarify the effects of chemical corrosion and high temperature on mechanical properties of sandstone, the uniaxial compression and three-point bending tests were carried out on sandstone samples that were immersed respectively in water, HCl, NaOH solutions and then suffered to high temperature treatment. The damage mechanism was analyzed by the patterns from scanning electron microscope and X-ray diffraction. The experimental results show that the uniaxial compressive strength of sandstone after immersed in NaOH solution and high temperature treatments is obviously improved, but deteriorates gradually when the temperature is below 400 °C for that immersed in HCl solution and water. The fracture toughness of sandstone after immersed in NaOH solution decreases by 16.05%. As the temperature increases, the fracture toughness and tensile strength decrease generally. As a result, 400 °C is the threshold temperature of deterioration of fracture toughness and tensile strength. The internal mineral composition, crystallinity and structural integrity of sandstone are changed after chemical corrosion and high temperature treatment, which affects the mechanical properties of sandstone.

Keywords: sandstone; chemical corrosion; high temperature; fracture toughness; tensile strength

收稿日期: 2018-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872133); 上海市软科学领域重点项目(18692106100); 上海理工大学教学成果奖培育项目(2018082809)

第一作者: 李 哲(1994-), 男, 硕士研究生。研究方向: 岩石力学。E-mail: 498519831@qq.com

通信作者: 陈有亮(1966-), 男, 教授。研究方向: 岩石力学。E-mail: chenyouliang2001@163.com

在地下工程及边坡工程中,岩体所处的地质环境非常复杂,岩体工程的安全性往往会受到各种不同因素的共同影响。矿山工程、地热勘探等领域会面临高温后岩体力学性能改变的问题;地下核废料的深埋处置会使得周围岩体受到核辐射放热和化学腐蚀的作用;由于环境的日益恶化,酸雨、工业废水会使岩体受到不同化学溶液的溶蚀,从而使岩体的力学性能受到影响。因此,研究化学溶蚀及高温作用下岩石的力学特性对评估岩体工程的安全性有着十分重要的意义。

近年来,国内外许多学者开展了岩石在化学溶蚀和高温作用下的力学特性研究。Liu等^[1]针对砂岩和泥岩,从微观结构、力学性能、矿物学3个方面进行探究,结果表明试验所选取的砂岩和泥岩岩样的强度随着温度的升高呈上升趋势。Tiskatine等^[2]研究了在高温下的13种岩石,结果表明砂岩在经历高温后力学特性劣化不明显,而花岗岩、石灰岩受高温影响较大。邵保平等^[3]研究了600℃高温作用下花岗岩遇水冷却后的力学特性,发现由于高温遇水,岩体内部温度迅速变化,内部产生热破裂或热冲击现象,导致其力学特性劣化。朱合华等^[4]研究了花岗岩、熔结凝灰岩、流纹状凝灰角砾岩在不同高温后的力学特性,结果表明这3种岩石在高温后的弹性模量、峰值应力都会有不同幅度的降低,且随着温度的升高,这种降低幅度增大。张晶瑶等^[5]研究了高温对赤铁石英岩和磁铁石英岩微结构的影响,试验结果表明,矿石内部结构受热产生的结构热应力导致微裂隙的产生,使这两种矿石强度下降。左建平^[6]研究了温度对深部岩石变形和破坏规律的影响,推导出了温度、压力共同作用下深部岩石的破坏准则。Khanlari等^[7]对5种砂岩展开了干湿、冻融循环以及高低温循环的试验,结果表明冻融循环对砂岩力学特性劣化的影响最大。陈四利等^[8]以花岗岩、砂岩、灰岩为研究对象,探讨了这3种岩石的化学效应,并得出了化学腐蚀影响机理。Fang等^[9]对黄砂岩进行了化学溶蚀及冻融循环作用后的单轴压缩试验,认为大孔隙岩石更容易造成损伤;在化学溶蚀的影响下,黄砂岩中的矿物更容易发生晶间裂纹。王伟等^[10]对经不同化学溶液浸泡后的红砂岩进行三轴压缩试验,试验结果表明,溶液的pH值和离子成分都会影响红砂岩的力学特性。张牡丹等^[11]研究了不同最低冻结温度下花岗岩的力学特性,试验结果表明冻融

循环次数一定时,冻结温度越低,花岗岩的力学特性劣化程度越明显。陈有亮等^[12]研究了不同化学溶液、不同循环次数下花岗岩的物理力学特性,探讨了化学腐蚀冻融循环耦合作用下花岗岩的损伤机理。

综上所述,前人主要是单一地研究温度或者化学溶蚀对岩石力学特性的影响,而对高温-化学溶蚀耦合作用下的探究较少。本文在文献^[13]的基础上进行了拓展延伸,从宏观和微观两个层面对化学溶蚀及高温后砂岩的力学特性进行更加深入的探讨,以为经受火灾、地下水污染等情况后的岩石工程的评估及建设提供理论依据。

1 试样介绍

1.1 试样制作

砂岩试样取自四川省自贡市荣县,主要成分是石英、长石等。从现场取得岩块,一部分加工成直径50 mm、高度100 mm的圆柱体,用于单轴压缩试验;一部分加工成长250 mm、宽50 mm、高50 mm、缺口长度为25 mm、宽度3 mm的长方体,尺寸和精度均符合文献^[14]的规定。

1.2 试样设备

弹性模量测试选用V-Meter III型超声脉冲速度测试仪。高温炉采用型号为SMF1900-50的箱式电阻炉。单轴压缩试验选用西安力创材料检测技术有限公司生产的微机控制刚性伺服三轴压力试验机,其最大荷载为2000 kN。三点弯曲试验采用SANS公司生产的万能压力试验机。显微镜采用型号为SteREO Discovery.V8的研究级智能立体显微镜,最大放大倍数为120倍。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)的型号为Hitachi S4800, X射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)选用德国Bruker公司的D8 Advance型,采用连续扫描方式对试样粉末进行扫描。

1.3 试验方法

将砂岩试样分组编号,分别放入pH=3的HCl溶液、pH=12的NaOH溶液和pH=7的水中,浸泡90 d后取出。然后将试样放入高温炉中,升温速率为5℃/min,到达目标温度后恒温6 h,在炉膛中冷却24 h之后取出,进行弹性模量测试。用立体显微镜观察其表面显微结构,随后进行单轴压缩试验以及三点弯曲试验。试验完毕后收集

试样的碎片，进行 SEM 和 XRD 分析。

高温试验分为 20，200，400，600，800 ℃ 5 个等级，每个等级 15 个圆柱试块，12 个长方体试块，其中水、HCl 和 NaOH 溶液中各有 5 个圆柱试块和 4 个长方体试块。

2 试验结果及分析

2.1 损伤定量分析

根据宏观唯象损伤理论，可以选取不同状态下的砂岩弹性模量来定义损伤变量，可定义为

$$D_n = 1 - \frac{E_m}{E_0} \tag{1}$$

式中； D_n 为砂岩的损伤变量； E_m 为高温后砂岩的弹性模量； E_0 为高温前砂岩的弹性模量。将不同高温作用后的弹性模量 E_m 代入式(1)，可得到不同化学溶液、不同温度作用后砂岩的损伤变量，如图 1 所示。

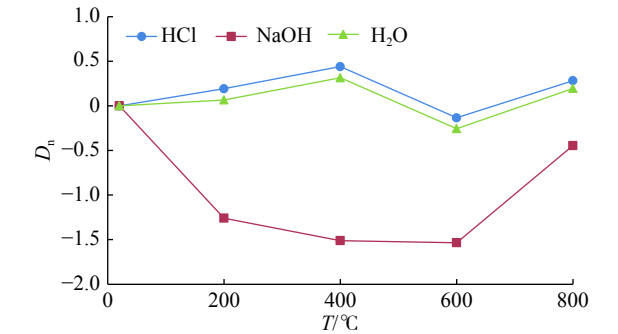


图 1 化学溶蚀和高温处理后砂岩的损伤变量

Fig.1 Damage variable of sandstone after chemical corrosion and high temperature treatment

随着温度 T 的升高，3 种溶液作用后的砂岩损伤变量变化趋势各不相同。NaOH 溶液作用后的砂岩一直都是“负损伤”，说明 NaOH 作用后的砂岩在高温作用下其内部微裂隙发生闭合，颗粒变得密实紧凑，力学性能得到了提升，且在 20~200 ℃ 之间提升较快；而水和 HCl 溶液作用后的砂岩除了在 600 ℃ 是负损伤，其他温度下的损伤变量都为正值，说明在 200，400，800 ℃ 的高温下经水和 HCl 作用后的砂岩损伤劣化。

2.2 单轴抗压强度变化率

为了更直观地表示经不同化学溶液作用后砂岩单轴抗压强度随温度的变化规律，需求得单轴抗压强度变化率，其计算式为

$$\Delta\sigma_c = \frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma_0} \times 100\%$$

式中： σ_c 为单轴抗压强度； $\Delta\sigma_c$ 为单轴抗压强度变化率； σ_0 ， σ_n 分别为高温前、后的单轴抗压强度。

图 2 为不同化学溶液和高温作用后砂岩的单轴抗压强度变化率。可以看出，经 NaOH 溶液浸泡后的砂岩单轴抗压强度变化率受温度影响较大，其值一直为正，且在各温度下都大于 HCl 溶液和水浸泡后的，这说明高温加强了 NaOH 溶液浸泡后的砂岩单轴抗压强度。HCl 溶液浸泡后的试样单轴抗压强度在低于 400 ℃ 时呈劣化趋势，之后随着温度的升高而增强。而水浸泡后的试块单轴抗压强度除了在 600 ℃ 时得到了一定程度的强化，其他温度下的变化率均不明显。

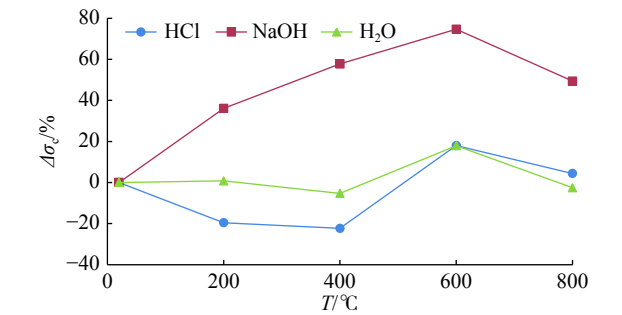


图 2 化学溶蚀和高温处理后砂岩的单轴抗压强度变化率

Fig.2 Change rate of uniaxial compressive strength of sandstone after chemical corrosion and high temperature treatment

2.3 表面显微结构

高温作用后，砂岩的内部结构发生了变化，导致其物理力学性能也发生了一些改变。采用研究级智能立体显微镜，选取放大倍数为 30 倍，观察不同化学溶液和高温作用后砂岩的表面显微结构，如图 3 所示。可以看出，温度在 20~400 ℃ 之间时，HCl 溶液和水浸泡后的砂岩试样的细小裂纹随温度的提高逐渐变大，而 NaOH 溶液浸泡后的砂岩试样裂纹逐渐闭合，致密程度逐渐改善；600 ℃ 时，3 种溶液作用后的砂岩试样的很多微小裂纹逐渐愈合，颗粒变小，且变得密集起来，这与 600 ℃ 时单轴抗压强度有所提高的现象相符；800 ℃ 时，微裂纹再一次产生，部分颗粒破裂，导致物理力学性质有所下降。

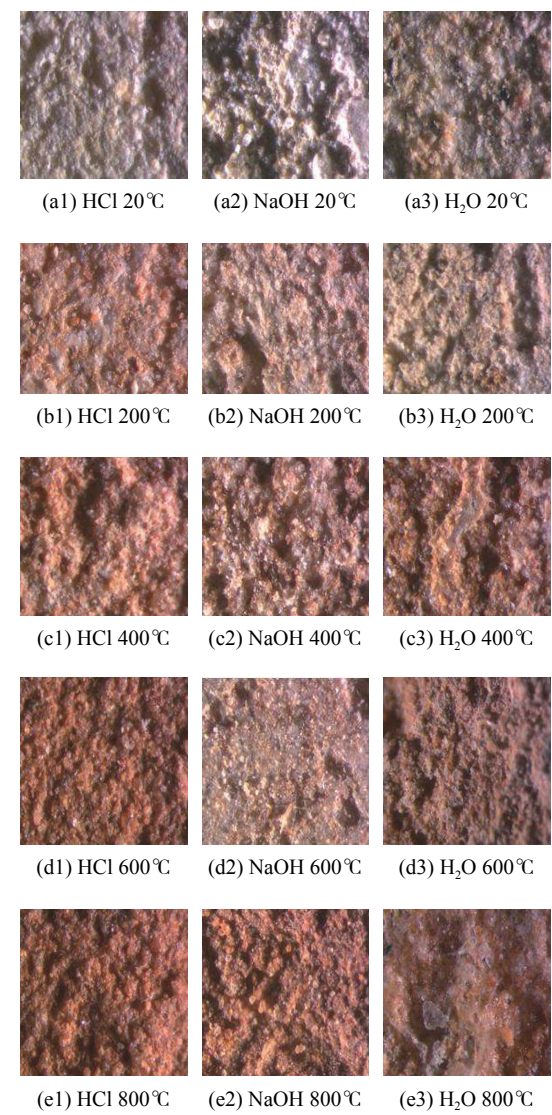


图 3 化学溶蚀和高温处理后砂岩的表面显微结构

Fig.3 Surface microstructure of sandstone after chemical corrosion and high temperature treatment

2.4 I 型断裂韧度

把砂岩试样的预制裂口看作初始裂纹，如图 4 所示，可按 I 型断裂破坏形态考虑。通过边界配置法能够得出三点弯曲试验中平面问题的单边裂纹问题。根据 Williams 应力函数和应力公式，三点弯曲试验中的断裂韧度的计算式为

$$4 \frac{K_{IC} t h^{\frac{3}{2}}}{PS} = -\sqrt{2\pi} \left(\frac{4h}{S} \right) D_1 \tag{2}$$

式中： K_{IC} 为断裂韧度； t ， h ， S 分别为砂岩试样的厚度、高度、跨距； P 为作用于试样中央的外力； D_1 为根据边界条件计算得出的无量纲量。由于 $S/h=4$ ，故 D_1 只和 a/h 有关，其中 a 为预制裂缝的深度。因此式(2)就可以写为

$$\frac{K_{IC} t \sqrt{h}}{P} = F\left(\frac{a}{h}\right)$$

根据美国 SEM-E399 规范

$$F\left(\frac{a}{h}\right) = 11.6\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{2}} - 18.4\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{3}{2}} + 87.2\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{5}{2}} - 150.4\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{7}{2}} + 154.8\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{9}{2}}$$

综上，可以得到

$$K_{IC} = \frac{P_{\max}}{t \sqrt{h}} F\left(\frac{a}{h}\right)$$

式中， $P_{\max}$ 是根据试验所得到的最大外力。

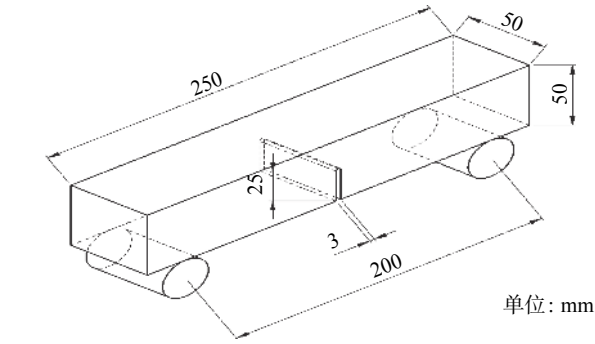


图 4 三点弯曲试验试块示意图

Fig.4 Schematic of samples for three-point bending test

图 5 为自然状态下和不同化学溶液浸泡后砂岩的断裂韧度变化。与自然状态下相比，水浸泡过的砂岩试样的断裂韧度基本不变；NaOH 溶液浸泡过的砂岩试样断裂韧度减小了 16.05%，说明 NaOH 溶液会使砂岩的断裂韧度劣化；而 HCl 溶液浸泡后的砂岩试样断裂韧度增加了 9.2%，说明 HCl 不仅可以加强本试验所选用的砂岩试样的单轴抗压强度^[13]，也可以增强其断裂韧度，这同样也是由于 HCl 与砂岩的矿物成分发生了反应，引起 SiO₂ 沉淀，修补了砂岩内部的微裂纹和孔隙，使得断裂韧度增强。

图 6 为不同化学溶液、不同温度作用后砂岩的断裂韧度变化曲线。对比 3 种溶液浸泡后的砂岩试样，温度高于 400 °C 时，其断裂韧度随温度的升高而减小，在 400~600 °C 之间下降得最快，在 600~800 °C 之间下降速度减缓，可以得出 400 °C 是砂岩断裂韧度劣化的门槛温度。800 °C 时，经水、HCl 和 NaOH 溶液浸泡后的砂岩试样断裂韧度都比较接近，相比于自然状态分别下降了 56.25%，42.67%，47.05%。另一方面，经水和 NaOH 溶液浸泡过的砂岩的断裂韧度随温度的变化趋势相似，都是先随温度的升高而增加，随后减

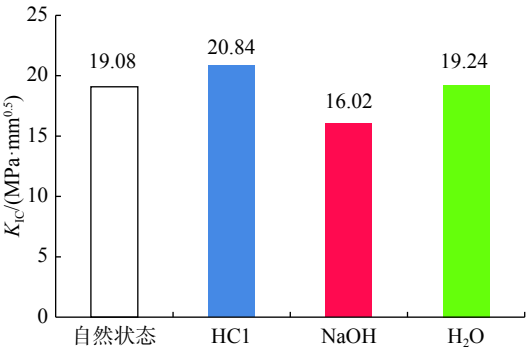


图5 自然状态和化学溶蚀后砂岩的断裂韧度

Fig.5 Fracture toughness of sandstone in natural state and after chemical corrosion

小。不同的是，水浸泡过的砂岩试样的断裂韧度在 200 ℃ 时达到顶峰，而 NaOH 溶液浸泡过的则在 400 ℃ 达到顶峰。各溶液浸泡后的砂岩断裂韧度与温度之间的规律，可以拟合为：

HCl $K_{IC} = -0.000\ 000\ 037T^3 + 0.000\ 0087T^2 - 0.002\ 6T + 20.537 (R^2 = 0.93; 5)$

NaOH $K_{IC} = 0.000\ 000\ 077T^3 - 0.000\ 1T^2 + 0.061\ 4T + 14.479 (R^2 = 0.936\ 1)$

H₂O $K_{IC} = 0.000\ 000\ 1T^3 - 0.000\ 2T^2 + 0.051\ 5T + 18.098 (R^2 = 0.984\ 7)$

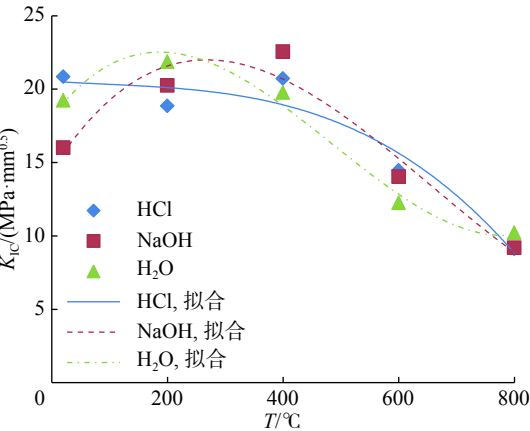


图6 化学溶蚀和高温处理后砂岩的断裂韧度

Fig.6 Fracture toughness of sandstone after chemical corrosion and high temperature treatment

2.5 抗拉强度

本文选用三点弯曲法来测试砂岩的抗拉强度。假设拉压应力、拉应力沿着中心线对称分布，如图 7 所示，得出 $\sigma_t = -\sigma_c$ ，则可得到

$$\frac{P_{\max}}{2} \frac{S}{2} = \frac{\sigma_t}{2} \frac{h-a}{2} \frac{2(h-a)}{3} t$$

整理后，得到

$$\sigma_t = \frac{3P_{\max}S}{2t(h-a)^2} \tag{3}$$

将各参数带入式(3)，并取平均值，得出不同化学溶液和不同温度下砂岩试样的抗拉强度 σ_t 。

图 8 为自然状态和不同化学溶液浸泡后砂岩的抗拉强度。可以看出：与自然状态下相比，在水中浸泡过的砂岩试样抗拉强度基本不变；NaOH 溶液浸泡过的砂岩抗拉强度减小了 16.02%；在 HCl 溶液中浸泡的砂岩试块抗拉强度增加了 9.2%。经不同化学溶液浸泡后的砂岩抗拉强度的变化和断裂韧度的变化规律基本一致。

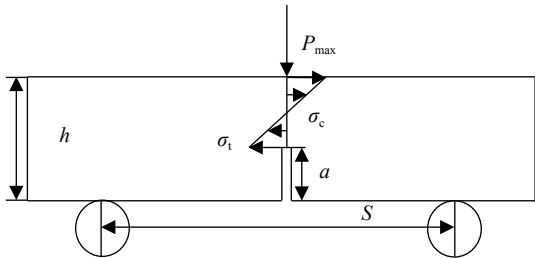


图7 应力分布示意图

Fig.7 Schematic of stress distribution

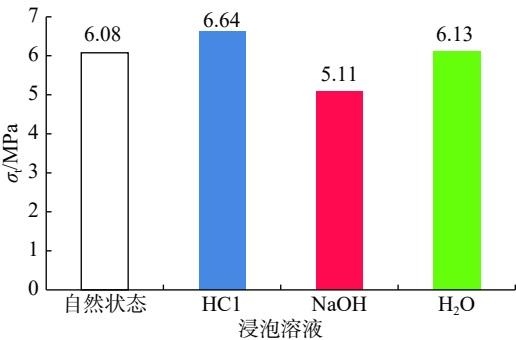


图8 自然状态和化学溶蚀后砂岩的抗拉强度

Fig.8 Tensile strength of sandstone in natural state and after chemical corrosion

图 9 为不同化学溶液和高温作用后砂岩的抗拉强度变化曲线。可以看出，不同溶液浸泡后的砂岩抗拉强度都在 400 ℃ 以后随温度骤然减小，可见 400 ℃ 是砂岩抗拉强度劣化的门槛温度。800 ℃ 时，经水、HCl 和 NaOH 溶液浸泡后的砂岩抗拉强度都有明显的下降，分别下降了 56.33%，42.86%，46.98%。各溶液浸泡后的砂岩抗拉强度与温度之间的规律，可以拟合为：

HCl $\sigma_t = -0.000\ 000\ 0097T^3 + 0.000\ 000\ 3T^2 - 0.000\ 8T + 6.539\ 2 (R^2 = 0.936\ 5)$

$$\text{NaOH} \quad \sigma_t = 0.000\,000\,02T^3 - 0.000\,05T^2 + 0.019\,6T + 4.610\,3 \quad (R^2 = 0.936\,1)$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad \sigma_t = 0.000\,000\,04T^3 - 0.000\,05T^2 + 0.016\,4T + 5.762\,4 \quad (R^2 = 0.984\,7)$$

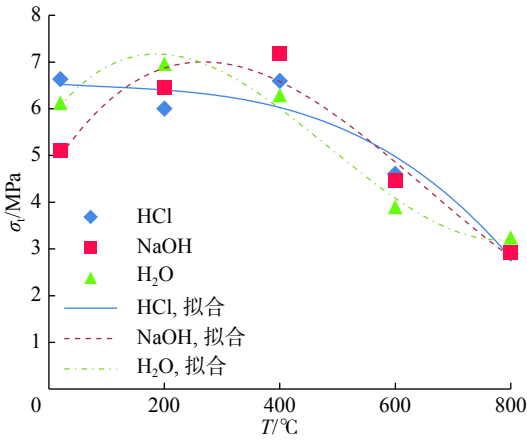


图9 化学溶蚀和高温处理后砂岩的抗拉强度
Fig.9 Tensile strength of sandstone after chemical corrosion high temperature treatment

2.6 | Ⅰ型断裂韧度与抗拉强度相关性分析

对不同化学溶液、不同温度作用后砂岩的断裂韧度及抗拉强度进行统计分析,可以看到二者有着一定的规律,如图10所示。

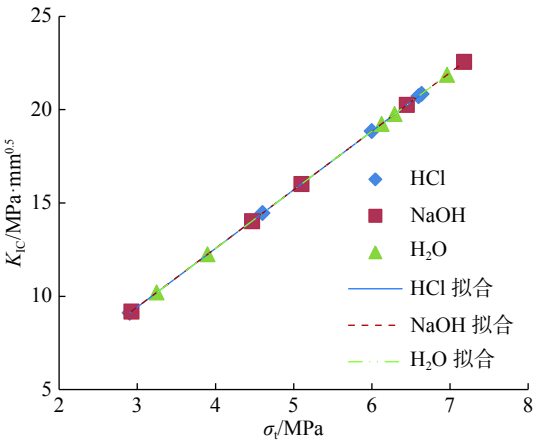


图10 断裂韧度与抗拉强度之间的关系
Fig.10 Relationship between fracture toughness and tensile strength

将砂岩的抗拉强度 σ_t 与断裂韧度 K_{IC} 之间的关系曲线进行拟合,可以得到

$$\text{HCl} \quad K_{IC} = 3.1406\sigma_t - 7 \times 10^{-14} \quad (R^2 = 1) \quad (4)$$

$$\text{NaOH} \quad K_{IC} = 3.1406\sigma_t + 3 \times 10^{-14} \quad (R^2 = 1) \quad (5)$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad K_{IC} = 3.1406\sigma_t \quad (R^2 = 1) \quad (6)$$

由式(4)~(6)可以看出,抗拉强度 σ_t 与断裂韧度 K_{IC} 呈良好的线性关系。根据此规律,实际的岩体工程中若已知这两个参数中的任意一个,均可以计算得到另一个参数。

3 化学溶蚀及高温损伤机理

化学溶蚀造成的岩石力学特性的损伤原因有4个方面:化学反应作用、离子迁移作用、吸附作用以及颗粒结构的变化作用,其中化学反应作用是造成岩石力学特性损伤的最主要因素。

表1 自然状态下和化学溶蚀后砂岩的单轴抗压强度
Tab.1 Uniaxial compressive strength of sandstone in natural state and after chemical corrosion

浸泡溶液	σ_c/MPa
自然状态	38.37
HCl	68.04
NaOH	39.92
H ₂ O	51.76

表1是不同化学溶液浸泡后和自然状态下的单轴抗压强度。可以看出,经HCl溶液浸泡后的砂岩单轴抗压强度明显增加。在文献[13]中推测是由于酸性环境促进了SiO₂的沉淀,形成了硅质胶结,加强了各矿物成分之间的联系,填补了岩石内部的缺陷。

对自然状态下、经HCl溶液溶蚀、NaOH溶液溶蚀,和NaOH溶液及600℃高温共同作用后的砂岩试样分别进行XRD和SEM试验,结果如图11、图12所示。

根据衍射强度与矿物结晶度成正比的原理^[15],利用主峰强度进行分析,对比自然状态可以看出,经HCl浸泡后的砂岩主峰强度有了明显的提高,如图11(a),(b)所示,说明此时SiO₂的含量有了明显的提升,且结晶度提高。由图12(a),(b)可以看出,自然状态的砂岩表面凹凸不平,且微裂纹较多,而经HCl浸泡后的砂岩结构面较为光滑,微裂纹较少,这与单轴抗压强度增加的现象相符,在一定程度上证明了文献[13]中所推测的结论。

以往的研究给出,酸会使强度下降是由于大多数砂岩所含CaCO₃以及各种氧化物的比例很大,CaCO₃及氧化物在酸性环境下发生以下反

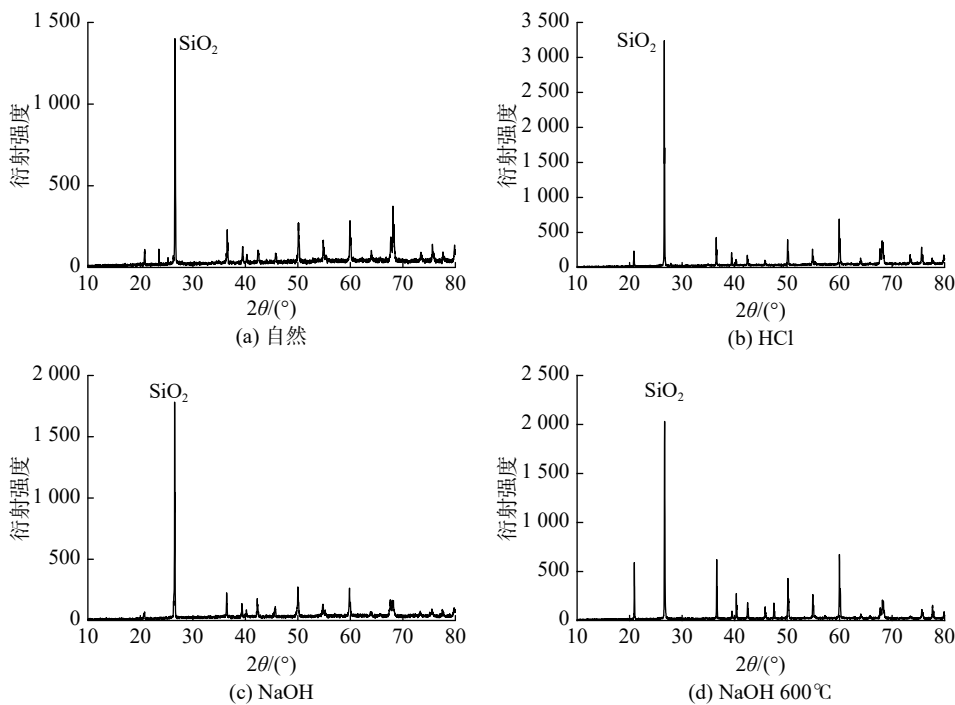
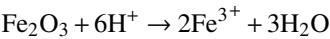
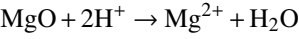
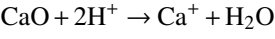
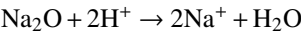
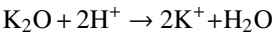
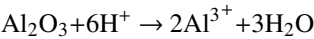
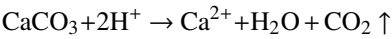


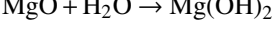
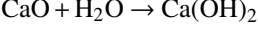
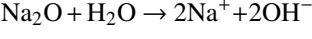
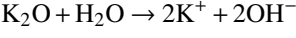
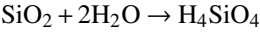
图 11 砂岩 XRD 图谱

Fig.11 XRD patterns of sandstone

应^[12]，生成物种类多且多以离子形式存在，对砂岩造成了损伤。

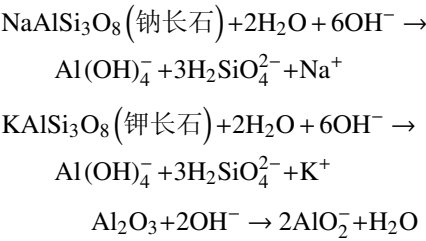
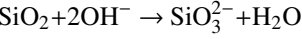


在纯水中，砂岩主要有以下几种反应^[12]：



由上述反应可以看出，砂岩在水中反应的生成物中， H_4SiO_4 、 Mg(OH)_2 难溶于水， Ca(OH)_2 微溶于水，这些物质都可以填充在砂岩的微裂纹和孔隙中，一定程度上修补了这些微裂纹和孔隙，导致强度增加。

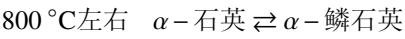
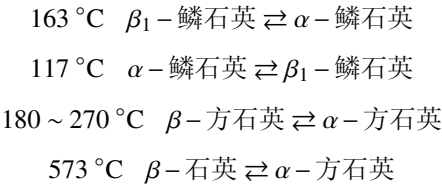
砂岩在 NaOH 溶液中主要发生以下反应^[12]：



从上述反应可以看出：砂岩和 NaOH 溶液反应生成的 Na^+ 、 K^+ 溶出，会对砂岩造成损伤；另一方面，化学反应的生成物会填充在砂岩内部的裂纹和孔隙中，具有一定的修补作用。从单轴抗压强度的变化上看，这种修补作用稍大于离子溶出造成的损伤作用，使得经 NaOH 溶液浸泡过的砂岩单轴抗压强度比自然状态下的稍大。

本次高温试验中，20~400℃范围内经 HCl 溶液和水浸泡后的试样单轴抗压强度有所降低，这是由于砂岩内部主要矿物成分中的结合水发生了脱水反应，热膨胀产生的微裂纹也随之出现，导致砂岩内部孔径大小发生改变，同时孔隙率增加。而 NaOH 溶液浸泡后的砂岩试样在整个高温作用的过程中所表现出的力学特性与其他两种溶液差异很大，其原因是可能产生了一些络合物，修补了内部的微裂纹，因而单轴抗压强度得到了提高。400~600℃时，通过显微镜的观察可以发现，砂岩的颗粒变小，逐渐密集，同时局部塑性

发展增加了矿物间的摩擦作用,从而加强了砂岩的单轴抗压强度。而 600~800 ℃ 时,随着温度的升高,砂岩内部矿物变得不稳定,矿物颗粒的边界更加明显,且裂纹增多,这些因素导致了砂岩单轴抗压强度的降低。高温作用下,砂岩中的石英会随温度的变化而发生如下一系列反应^[16]:



由图 11(c), (d)可以看出,经高温作用后砂岩内部的矿物成分仍以 SiO₂ 为主,经 NaOH 溶液及高温共同作用后的试样主峰强度比仅受 NaOH 溶液作用后的略高,说明 600 ℃ 的高温提高了矿物结晶度。借助 SEM,对仅受 NaOH 溶液作用和 NaOH 溶液及 600 ℃ 高温共同作用后的砂岩试样进行微观观察,如图 12(c), (d)所示,可以发现,图 12(d)的微裂纹和孔隙相较于图 12(c)的更少,结构更加致密完整,表面更加光滑,这与高温作用下宏观力学性能提升的现象相符。

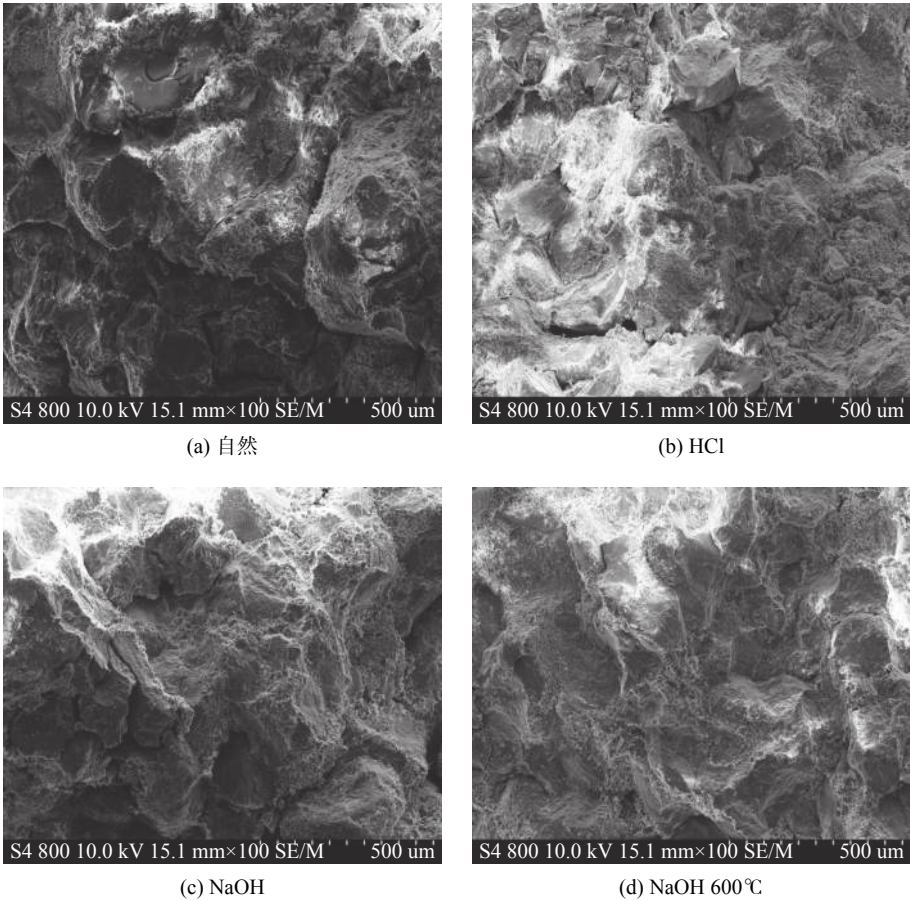


图 12 砂岩 SEM 图谱
Fig.12 SEM patterns of sandstone

4 结 论

- a. 高温使 NaOH 溶液浸泡过的砂岩呈现“负损伤”,且单轴抗压强度得到明显提高,而水和 HCl 溶液浸泡后的砂岩在低于 400 ℃ 时呈现一定程度的劣化趋势。
- b. 600 ℃ 时,3 种溶液下的砂岩试样的晶体变

- 小,颗粒之间更为密集,性质上产生了相应变化;800 ℃ 时,矿物颗粒的边界更加明显,微裂纹增多,部分颗粒破裂,岩屑增多。
- c. NaOH 溶液会使砂岩的断裂韧度和抗拉强度发生劣化,经 3 种溶液浸泡后的砂岩试样断裂韧度和抗拉强度在高于 400 ℃ 时随温度的升高而减小,在 400~600 ℃ 之间下降得最快,在 600~800 ℃

之间下降速度减缓。断裂韧度与抗拉强度呈良好的线性关系。

d. 通过 XRD 和 SEM 分析可知, 化学溶液和高温共同影响着砂岩的矿物成分、结晶度和结构完整度。

参考文献:

- [1] LIU X F, YUAN S Y, SIEFFERT Y, et al. Changes in mineralogy, microstructure, compressive strength and intrinsic permeability of two sedimentary rocks subjected to high-temperature heating[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 2985–2998.
- [2] TISKATINE R, EDDEMANI A, GOURDO L, et al. Experimental evaluation of thermo-mechanical performances of candidate rocks for use in high temperature thermal storage[J]. *Applied Energy*, 2016, 171: 243–255.
- [3] 邵保平, 赵阳升. 600 ℃ 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 892–898.
- [4] 朱合华, 闫治国, 邓涛, 等. 3 种岩石高温后力学性质的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 1945–1950.
- [5] 张晶瑶, 马万昌, 张凤鹏, 等. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 1996, 17(1): 5–9.
- [6] 左建平, 谢和平, 周宏伟. 温度压力耦合作用下的岩石屈服破坏研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2917–2921.
- [7] KHANLARI G, ABDILOR Y. Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(4): 1287–1300.
- [8] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 547–551.
- [9] FANG X Y, XU J Y, WANG P X. Compressive failure characteristics of yellow sandstone subjected to the coupling effects of chemical corrosion and repeated freezing and thawing[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 160–171.
- [10] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S2): 3607–3617.
- [11] 张牡丹, 王苏然, 曾健霜, 等. 花岗岩超低温冻融循环后力学特性研究[J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(5): 484–489.
- [12] 陈有亮, 王朋, 张学伟, 等. 花岗岩在化学溶蚀和冻融循环后的力学性能试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(12): 2226–2235.
- [13] 李哲, 陈有亮, 王苏然, 等. 经化学溶蚀并高低温作用后砂岩的力学特性试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(8): 103–110.
- [14] DL/T 5368-2007, 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [15] 何明跃, 王濮. 石英的结晶度指数及其标型意义[J]. *矿物岩石*, 1994, 14(3): 22–28.
- [16] 殷其明. 试析几种矿物的热效应对制砖的影响[J]. *砖瓦*, 2003(5): 26–28.

(编辑: 董 伟)