

文章编号:1007-9629(2021)04-0742-07

围压对高温后玄武岩纤维混凝土渗透率及 孔隙结构的影响

薛维培^{1,2}, 高 聪², 申 磊², 刘晓媛²

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 玄武岩纤维混凝土(BFRC)渗透性能对火灾后构件耐久性评估至关重要,开展了高温后BFRC变围压作用下渗透率测试以及孔隙结构变化特征研究,采用围压敏感系数和无因次渗透率分析了变围压过程中BFRC渗透率的演化规律.结果表明:围压加载过程中,BFRC渗透率呈负指数函数衰减,高温后试件初始渗透率随温度升高呈增大趋势,与基准混凝土(RC)相比,在100、300、600℃高温后BFRC的初始渗透率降低了48.16%、33.89%、1.57%;根据围压敏感系数将围压加载过程分为敏感区、过渡区和不敏感区,敏感区内BFRC的渗透率随围压增加降低幅度最大;围压作用后BFRC的孔隙结构向小尺寸孔隙发展,孔隙数量减少,致使其渗透率降低.

关键词: 围压; 高温; 玄武岩纤维混凝土; 渗透率; 孔隙结构

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.010

Effect of Confining Pressure on Permeability and Pore Structure of Basalt Fiber Reinforced Concrete after High Temperature

XUE Weipei^{1,2}, GAO Cong², SHEN Lei², LIU Xiaoyuan²

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The permeability of basalt fiber reinforced concrete(BFRC) is critical to the durability assessment of members after fire. The permeability test and pore structure change characteristics of BFRC under variable confining pressure after high temperature were studied. The evolution of permeability was analyzed as well under the same conditions by using confining pressure sensitivity parameters and dimensionless permeability. Results show that during confining pressure loading, BFRC permeability attenuates as a negative exponential function, and the initial permeability increases with increasing temperature after high temperature. Compared with reference concrete(RC), the initial permeability of BFRC decreases by 48.16%, 33.89% and 1.57% after 100, 300 and 600℃. According to confining pressure sensitivity parameters, the loading process of confining pressure is divided into sensitive zone, transition zone and insensitive zone, and the permeability of BFRC in sensitive zone decreases most with the increases of confining pressure. After confining pressure, pore structure of BFRC develops to small-size pores and the number of

收稿日期:2020-02-15; 修订日期:2020-04-08

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE185);中国博士后科学基金面上项目(2018M642502);深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室自主课题(SKLMRDPC20ZZ05);国家级大学生创新创业训练计划(201910361023)

第一作者:薛维培(1990—),男,安徽舒城人,安徽理工大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: xueweipei@163.com

pore decreases, resulting in lower permeability.

Key words: confining pressure; high temperature; basalt fiber reinforced concrete; permeability; pore structure

玄武岩纤维强度高、耐腐蚀、耐高温,掺入混凝土中能够提高工作性能^[1],因而掌握玄武岩纤维混凝土(BFRC)的性能对结构设计和安全评估具有重要意义,特别是火灾作用后 BFRC 的性能更受学者关注.赵燕茹等^[2]针对高温后 BFRC 的静态力学性能进行了研究,发现存在温度阈值,阈值前随着温度的升高,其抗压强度有所增加、抗折强度快速降低,阈值后随着温度的升高,其抗压强度和抗折强度均明显降低.REN 等^[3-4]研究发现不同温度下 BFRC 的动态强度、临界应变、冲击韧性随着动态荷载速率的增大而增加,表现出明显的速率敏感性.朴战东^[5]研究发现随着温度的升高 BFRC 的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度先增加后减小,轴心抗压强度逐渐降低.当前研究主要围绕高温后 BFRC 的力学性能^[2-6],然而渗透性能对火灾中 BFRC 构件的爆裂剥落行为存在重要影响,现有关于 BFRC 渗透性能的研究是在常温下开展^[7-8],与高温后渗透性能存在区别;同时火灾过后构件服役过程还将受到变荷载作用,此时对构件耐久性评估则需考虑变荷载的影响,而渗透性能优劣又取决于内部孔隙结构的发育情况.

因此,本文针对高温后 BFRC 开展变围压作用下的渗透性能研究,通过改变试验过程中的围压来模拟工程中变荷载作用,测试各级围压作用下 BFRC 的渗透率,明确渗透率随围压变化规律,并对围压作用前后试件内部孔隙结构的变化特征进行研究,采用围压敏感系数和无因次渗透率分析了变围压过程中 BFRC 渗透率的演化规律.研究结果对火灾后 BFRC 构件的耐久性评估与修复具有参考价值.

1 试验

1.1 原材料与试件制备

采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,细度模数为 2.6 的河砂,粒径范围为 5~16 mm 的玄武岩,NF-F 复合型外加剂^[9],BC3-12 型玄武岩纤维^[10].为便于比较,同时制备了基准组混凝土(RC),混凝土的配合比见表 1.

成型 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试块,标准养护 28 d,再对立方体试块取芯,获得 $\phi 50 \times 100$ mm 圆柱体,采用声波测试仪筛选波速相近的试件进行变围压作用下渗透率测试试验.为避免水

表 1 混凝土的配合比
Table 1 Mix proportions of concretes

Type	Cement	Water	Basalt gravel	River sand	Water reducer	Fiber
RC	380.0	176.0	1 152.0	662.0	50.0	0
BFRC	380.0	176.0	1 152.0	662.0	50.0	1.9

在试件内部渗流过程中与胶凝材料进一步水化对测试结果造成的干扰,将筛选出的试件置于静水养护池内养护 180 d^[11].达到养护龄期后,将试件从静水养护池内取出自然晾干 5 d,随后放入 SX5-12 型箱式电阻炉内加热,设置温度 $t=100、300、600$ °C.

1.2 试验方案

为研究高温对试件孔隙结构的影响,将高温后的试件进行饱水处理,用 MesoMR23-060V-1 型核磁共振仪对其开展第 1 次核磁共振试验.随后采用 TAW-2000 型三轴试验机对饱水试件进行变围压作用下的渗透率测试,设置围压 $C=3、4、5、6、7、8$ MPa,渗透水压恒定为 1.6 MPa,轴压恒定为 1 kN^[12].试验开始后,进行围压分级稳压加载,在每级围压作用下孔隙水流量与时间曲线呈线性增长且斜率保持不变时,认为其处于稳态渗流状态,保持该状态 1 h 以上,再调整围压进入下 1 级.当第 1 级围压达到预定值后,在试件上端施加渗透水压、下端与大气压相连,渗透率测试试验完成后再次进行第 2 次核磁共振试验.

高温后试件在各级围压作用下的渗透率 K 由达西定律计算:

$$K = \frac{\mu QL}{AP} \quad (1)$$

式中: μ 为渗流水黏度系数; Q 为水渗入试件内的流量, m^3 ; L 为试件高度, m ; A 为水通过试件的横截面积, m^2 ; P 为渗透水压, Pa .

2 结果与分析

2.1 围压对渗透率的影响

图 1 为不同围压下 RC 和 BFRC 试件的渗透率.由图 1 可见:

(1)RC 和 BFRC 试件的渗透率均随围压增加呈下降趋势,符合负指数函数衰减规律,试验曲线与拟合曲线吻合度高.围压加载初期(3~5 MPa),渗透率下降速度最快;围压继续增加(5~7 MPa),渗透率下降速度变缓;最终当围压为 7~8 MPa 时,渗

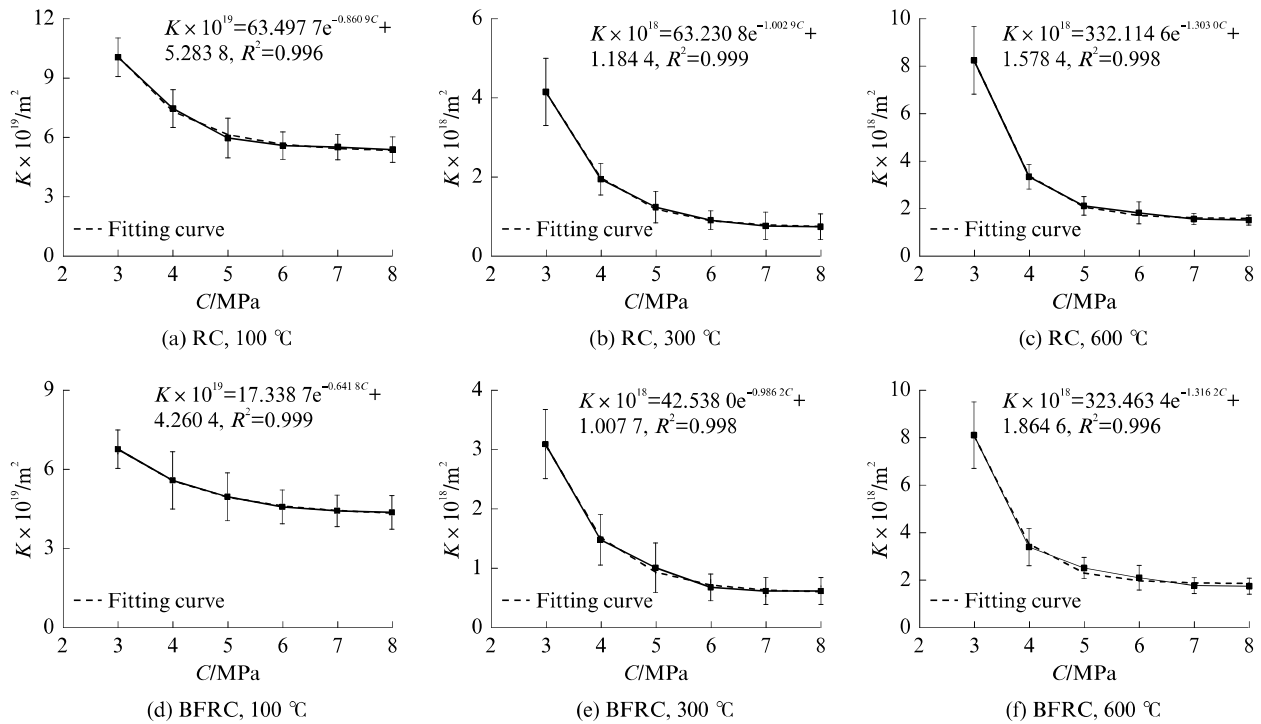


图 1 不同围压下 RC 和 BFRC 试件的渗透率

Fig. 1 Permeability of RC and BFRC specimens under different confining pressures

透率趋于平稳. 这主要是围压增大使得试件的渗流通道被压密, 致使其渗透率降低. 围压加载初期, 试件内部存在大量孔隙^[13], 而这些孔隙是组成渗流通道的重要部分, 初始孔隙多、隙宽大, 更容易受围压影响, 故在加载初期渗透率下降速度最快; 随着围压的增加, 较小的孔隙被压密, 剩余孔隙数量减小且隙宽变窄, 渗透率下降速度逐渐变缓; 当围压加载至特定水平时, 试件内部可被压密孔隙达到最大数量且隙宽最窄, 渗透率便不再受围压变化影响, 趋于平稳发展.

(2) 同组试件经不同高温处理后, 初始渗透率随温度升高而增大. 以 RC 试件为例, 100、300、600 °C 高温后初始渗透率分别为 10.052×10^{-19} 、 4.311×10^{-18} 、 $8.247 \times 10^{-18} \text{ m}^2$. 这是因为 300 °C 时试件内水化硅酸钙(C-S-H)凝胶由于受热脱去一部分化合水或结晶水, 水蒸发逸出时产生的微小孔洞, 使浆体结构较为松散; 600 °C 时试件内 C-S-H 凝胶中大量化合水或结晶水丧失, 颗粒间结合力松弛, 浆体结构松散^[14], 因此渗透率增大.

(3) 相同温度下, BFRC 试件初始渗透率低于 RC 试件, 当温度由 100 °C 上升至 600 °C 时, 2 组试件初始渗透率依次相差 48.16%、33.89%、1.57%. 600 °C 高温后, 随着围压增加 BFRC 试件渗透率逐渐大于 RC 试件, 差距范围在 1.85%~

16.18%. 这是因为玄武岩纤维能抑制混凝土内部原有缺陷扩展并有效延缓新孔隙出现, 进而提高基体密实性, 致使渗流通道减少, 故 BFRC 试件渗流能力较弱. 而当温度达到 600 °C 时, 此时非常接近玄武岩纤维使用温度极限(650 °C), 玄武岩纤维增强基体密实性效果逐步减弱甚至丧失, 故 2 组试件渗透率非常接近.

2.1.1 围压敏感系数

为了定量描述各级围压作用下试件渗透率变化情况, 引入围压敏感系数 ξ :

$$\xi = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial C} \quad (2)$$

式中: K_0 为初始渗透率, m^2 .

图 2 为围压敏感系数拟合曲线. 由图 2 可见: (1) 围压敏感系数 ξ 随围压增大呈减小趋势, 且服从负指数函数变化规律. (2) 根据 ξ 值的大小, 将整个过程分为敏感区 ($3 \text{ MPa} \leq C \leq 5 \text{ MPa}$)、过渡区 ($5 \text{ MPa} < C \leq 7 \text{ MPa}$) 和不敏感区 ($7 \text{ MPa} < C \leq 8 \text{ MPa}$), 围压敏感系数衰减速率相应地由快速向较缓、最慢逐级变化; 围压加载初期敏感性高, 渗透率变化大; 后期敏感性弱, 渗透率变化小. (3) 100、300、600 °C 下, RC 的围压敏感系数整体降幅分别为 233.33%、270.81%、367.49%, BFRC 的降幅分别为 182.31%、266.17%、372.41%, 2 组试件的围压

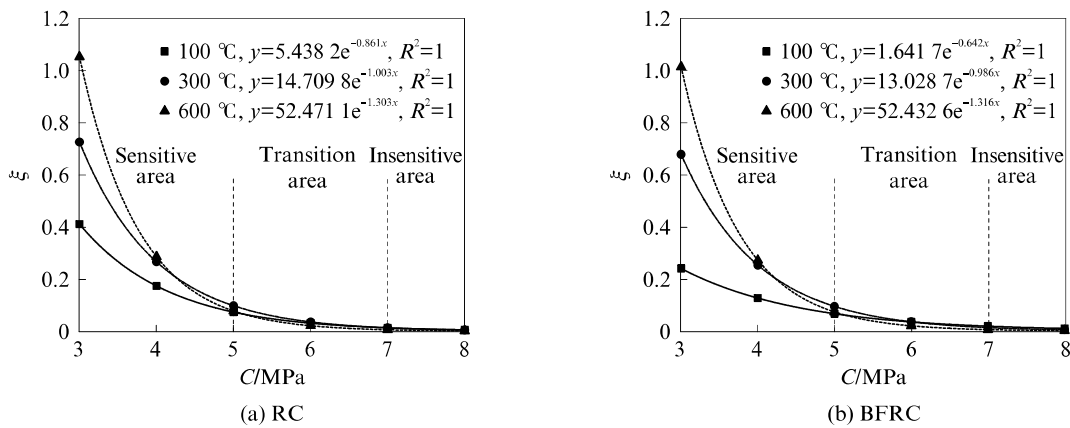


图2 围压敏感系数拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of confining pressure sensitive coefficient

敏感系数整体降幅在 100 °C 时有所差异,随着温度的升高逐步接近。(4)2 组试件初始围压($C=3$ MPa 时)敏感系数随着温度的升高呈增大趋势,相同温度作用下 RC 试件的初始围压敏感系数略大于 BFRC 试件。

2.1.2 无因次渗透率

为减少因试件自身差异造成的影响,对所得渗透率进行归一化处理,定义无因次渗透率 λ 为:

$$\lambda = \frac{K_i}{K_0} \quad (3)$$

式中: K_i 为各级围压作用下渗透率, m^2 。

图 3 为无因次渗透率拟合曲线。由图 3 可见:随着围压的增加,RC 和 BFRC 的无因次渗透率均先快速下降、再缓慢降低、最终趋于平稳;当围压从 3 MPa 加载至 5 MPa 时,100、300、600 °C 下,RC

试件的无因次渗透率依次降低了 40.62%、61.71%、74.34%,BFRC 试件的无因次渗透率依次降低了 26.65%、57.14%、68.91%,可见在围压敏感区范围内随着温度的升高,无因次渗透率呈增加趋势,2 组试件无因次渗透率降幅的差距越来越小。这是因为 100 °C 下围压作用对试件内部孔隙结构的影响相对最小,且该级温度要远小于玄武岩纤维的使用温度极限,故此时玄武岩纤维能够很好地发挥出抑制孔隙结构劣化的作用,宏观表现为初始渗透率低且渗透率下降速度慢;随着温度的升高,尤其在 600 °C 时非常接近玄武岩纤维使用温度极限,从而使得玄武岩纤维逐渐失去抑制孔隙结构劣化的作用,故其内部孔隙结构发育程度,与 RC 较为接近。

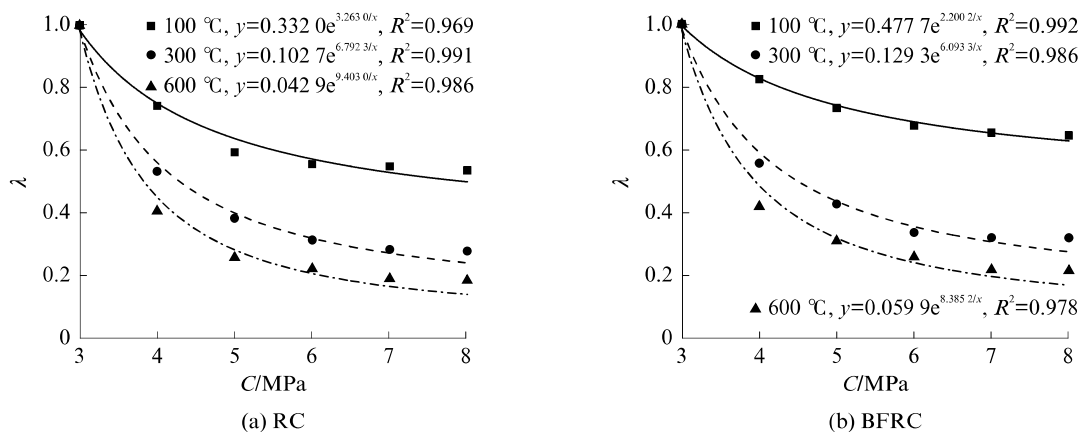


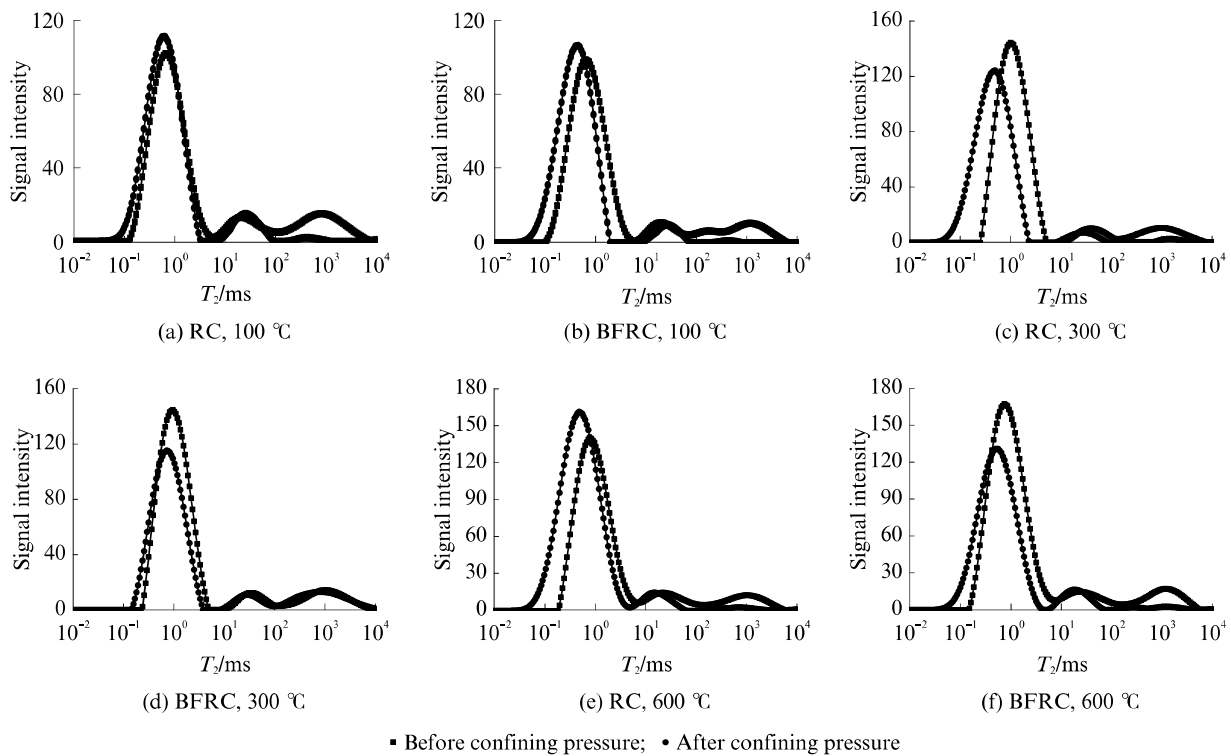
图3 无因次渗透率拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of dimensionless permeability

2.2 围压对孔隙结构的影响

围压作用前后 T_2 谱分布曲线如图 4 所示。 T_2

谱分布曲线中:横坐标弛豫时间 T_2 越长,孔隙半径越大;纵坐标信号幅度值越高,相应孔隙半径下的

图4 围压作用前后 T_2 谱分布曲线Fig. 4 T_2 spectrum distribution curve before and after confining pressure

孔隙数量越多^[15]; T_2 谱面积为核磁共振孔隙度, 等于或略小于有效孔隙度, 可用来表征孔隙结构变化。

2.2.1 T_2 谱变化情况

由图4可见: 围压作用前经过不同高温损伤后试件的 T_2 谱分布曲线均出现3个波峰, 从左往右依次命名为峰1、峰2、峰3, 分别表示小尺寸孔隙、中尺寸孔隙、大尺寸孔隙^[16]; 随着温度的升高, 试件内孔隙数量呈增加趋势, 峰1对应孔隙半径下的孔隙数量增幅最大; 同时, T_2 谱分布曲线整体向右偏移, 说明孔隙半径增大; 100 °C 作用下, RC 试件的信号幅度值依次为 102.04、13.05、15.14, BFRC 试件的信号幅度值依次为 98.91、10.97、10.65, 两者分别相差 3.07%、15.94%、29.66%, 这说明掺入玄武岩纤维能够有效阻止混凝土内部中、大尺寸孔隙发展; 300 °C 后, BFRC 试件的信号幅度值略大于 RC 试件, 说明此时玄武岩纤维抑制混凝土内部孔隙发展的效果逐渐减弱。

由图4还可见: 围压作用后 T_2 谱分布曲线同样出现3个波峰, 但是峰3的波峰峰值明显降低, 说明大尺寸孔隙在围压加载过程中压密程度最大, 且卸载后恢复率低; 围压作用后 T_2 谱分布曲线较围压作用前整体向左偏移, 说明试件内孔隙结构向中、小

尺寸孔隙发展, 水在试件内的渗流通道变窄, 故围压作用后渗透率呈下降趋势; 经历 100、300、600 °C 高温后, RC 试件在围压作用前后 T_2 谱面积依次变化了 92.16%、83.09%、78.79%, BFRC 试件的 T_2 谱面积依次变化了 97.42%、5.45%、82.93%, 可见围压对试件内部孔隙结构改变有着重要影响。

2.2.2 孔隙半径变化情况

图5为围压作用前后孔隙半径分布曲线。为了对围压作用前后孔隙半径变化进行细分, 参照 Lutz 提出的孔隙分类标准^[17], 对图5开展了不同温度损伤后的 RC 和 BFRC 试件孔隙特征分段统计, 得到围压作用前后孔隙半径分布, 结果见表2。

由表2可见: RC 和 BFRC 试件在围压作用前主要由微孔和介孔2类孔隙组成, 且以较小的微孔分布为主, 围压作用后也表现出同样的特征, 但是微孔所占比例得到进一步提高, 平均占比由围压前 81.07% 增加至围压后 92.24%。结合图5中孔隙半径分布曲线比较可知, 围压后孔隙半径分布曲线整体向左偏移, 说明围压作用使得介孔孔隙被压密并向微孔孔隙过渡, 同时试件内原有微孔孔隙也被压密缩小, 使得围压后介孔孔隙数量减少、微孔孔隙数量增多, 渗透率呈减少趋势。

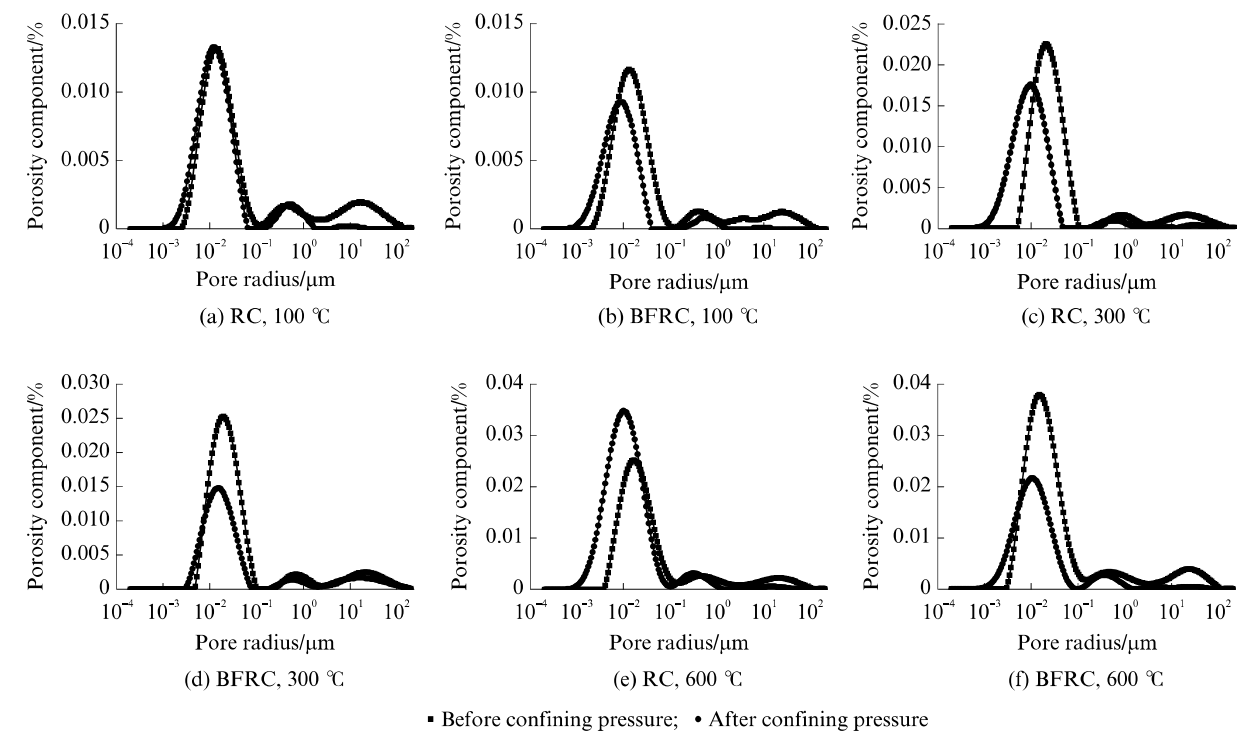


图 5 围压作用前后孔隙半径分布曲线
Fig. 5 Pore radius distribution curve before and after confining pressure

表 2 围压作用前后孔隙半径分布
Table 2 Pore radius distribution characteristics before and after confining pressure %

Temperature/°C	RC				BFRC			
	Before confining pressure		After confining pressure		Before confining pressure		After confining pressure	
	Micro-pore	Meso-pore	Micro-pore	Meso-pore	Micro-pore	Meso-pore	Micro-pore	Meso-pore
100	75.03	24.97	90.10	9.90	80.26	19.74	94.00	6.00
300	85.66	14.34	94.52	5.48	83.04	16.96	84.35	15.65
600	80.45	19.55	92.67	7.33	81.99	18.01	97.82	2.18

3 结论

(1) 围压加载过程中,玄武岩纤维混凝土(BFRC)渗透率呈负指数函数衰减,高温后试件初始渗透率随温度升高呈增大趋势.与基准混凝土(RC)相比,在 100、300、600 °C 高温后 BFRC 的初始渗透率降低了 48.16%、33.89%、1.57%,即随着温度的升高,BFRC 和 RC 的渗透率差距逐步缩小.

(2) 根据围压敏感系数将整个加载过程分为敏感区、过渡区和不敏感区,敏感区内渗透率随围压变化降低幅度最大.

(3) 围压作用使得 BFRC 内部原有孔隙结构发生改变,即随着围压增大 BFRC 孔隙尺寸变小、孔隙数量降低,由于孔隙是水在试件内部渗流的主要通

道,故围压增大,渗透率降低.

参考文献:

[1] 赵燕茹,宋博,王磊,等.冻融循环作用后玄武岩纤维混凝土的断裂性能[J].建筑材料学报,2019,22(4):575-583.
ZHAO Yanru, SONG Bo, WANG Lei, et al. Fracture properties of basalt fiber reinforced concrete after freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 575-583. (in Chinese)

[2] 赵燕茹,刘道宽,王磊,等.玄武岩纤维混凝土高温后力学性能试验研究[J].混凝土,2019(10):72-75.
ZHAO Yanru, LIU Daokuan, WANG Lei, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber concrete after high temperature[J]. Concrete, 2019(10): 72-75. (in Chinese)

[3] REN W B, XU J Y, SU H Y. Dynamic compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated

- temperatures[J]. Fire and Materials, 2016, 40(5): 738-755.
- [4] 任韦波, 许金余, 张宗刚, 等. 高温后玄武岩纤维增强混凝土的冲击变形特性[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 768-773.
- REN Weibo, XU Jinyu, ZHANG Zonggang, et al. Impact deformation properties of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 768-773. (in Chinese)
- [5] 朴战东. 高温后玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- PIAO Zhandong. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete after high temperature[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)
- [6] HASSAN M, BENMOKRANE B, ELSAFTY A, et al. Bond durability of basalt-fiber-reinforced-polymer(BFRP) bars embedded in concrete in aggressive environments[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 106: 262-272.
- [7] 朱华军. 玄武岩纤维混凝土耐久性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- ZHU Huajun. Study on durability of basalt fiber reinforced concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 刘华挺, 张俊芝, 傅招旗, 等. 短切玄武岩纤维混凝土构件抗氯盐侵蚀试验[J]. 混凝土, 2011(1): 14-15.
- LIU Huating, ZHANG Junzhi, FU Zhaoqi, et al. Experiment on concrete elements for chloride erosion of chopped basalt fiber[J]. Concrete, 2011(1): 14-15. (in Chinese)
- [9] XUE W P, YAO Z S, JING W, et al. Experimental study on permeability evolution during deformation and failure of shaft lining concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 564-573.
- [10] 薛维培, 刘晓媛, 姚直书, 等. 不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(9): 2285-2293.
- XUE Weipei, LIU Xiaoyuan, YAO Zhishu, et al. Effects of different damage sources on pore structure change characteristics of basalt fiber reinforced concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(9): 2285-2293. (in Chinese)
- [11] GURKAN Y, MUSTAFA S, MUZEYYEN B, et al. Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2015, 85(15): 217-226.
- [12] JOSIPA B, JOSKO O, ROLF H. Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53: 104-111.
- [13] 赖于树, 熊燕, 程龙飞. 混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 380-386.
- LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Study of characteristics of acoustic emission during entire loading tests of concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 380-386. (in Chinese)
- [14] 高润东, 许清风, 李向民, 等. 高温后混凝土抗氯离子渗透性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 690-694.
- GAO Rundong, XU Qingfeng, LI Xiangmin, et al. Experimental research on resistance of concrete to chloride penetration after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4): 690-694. (in Chinese)
- [15] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1208-1214.
- LI Jieli, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1208-1214. (in Chinese)
- [16] 薛慧君, 申向东, 邹春霞, 等. 基于NMR的风积沙混凝土冻融孔隙演变研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 199-205.
- XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 199-205. (in Chinese)
- [17] 张二峰, 杨更社, 刘慧. 冻融循环作用下砂岩细观损伤演化规律试验研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 50-55.
- ZHANG Erfeng, YANG Gengshe, LIU Hui. Experimental study on meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Coal Engineering, 2018, 50(10): 50-55. (in Chinese)