

# 高温后玄武岩纤维混凝土抗压强度与孔隙结构变化规律研究

Study on the Variation Law of Compressive Strength and Pore Structure of Basalt Fiber Reinforced Concrete after High Temperature

许昊, 王晓磊, 刘历波

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为了研究高温损伤后不同掺量玄武岩纤维混凝土的孔隙结构和力学性能的变化规律, 以及高温后孔隙结构对宏观力学性能的影响。对不同体积掺量 (0.5%、1%、1.5%) 的玄武岩纤维混凝土进行 200~800 °C 高温处理, 运用饱和水法测量其在不同高温后的孔隙率, 并对不同高温后的玄武岩纤维混凝土试块进行抗压强度试验。结果表明: 随着温度的升高, 玄武岩纤维混凝土的孔隙率不断增大, 200 °C 高温作用后孔隙率增长缓慢, 超过 400 °C 高温作用后孔隙率则迅速增大; 抗压强度先增大后降低, 经过 200 °C 高温作用后抗压强度达到峰值, 经过 800 °C 高温作用后抗压强度急剧下降。

**关键词:** 混凝土; 玄武岩纤维; 高温损伤; 孔隙结构

**中图分类号:** TU541 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0077-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.014

XU Hao, WANG Xiaolei, LIU Libo

(College of Civil Engineering Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** So as to check the pore structure and mechanical properties of volcanic rock fiber concrete when extreme temperature injury, and therefore the influence of pore structure on large mechanical properties when extreme temperature. during this paper, volcanic rock fiber concrete with totally different volume content ( 0%, 0.5 %, 1 %, 1.5% ) was treated at 200-800 °C. At the same time , saturated water methodology was accustomed live the porosity when totally different high temperatures, and therefore the compressive strength of volcanic rock fiber concrete blocks when totally different high temperatures was tested. The results show that the porosity of volcanic rock fiber concrete will increase with the rise of temperature. The porosity will increase slowly when 200 °C extreme temperature, and will increase quickly when 400 °C extreme temperature. The compressive strength initial enhanced then diminished. When 200 °C extreme temperature, the compressive strength reached the height, and when 800 °C extreme temperature, the compressive strength diminished sharply.

**Keywords:** concrete; basalt fiber; high temperature damage; pore structure

## 0 引言

混凝土作为建筑材料被广泛应用于工程领域, 同时建筑防火问题也日益突出, 而在火灾等高温环境下, 混凝土的孔隙结构发生变化, 内部劣化严重, 进而导致混凝土的强度下降, 对混凝土结构造成不可逆的损伤, 使结构的使用寿命下降, 其中孔隙结构是混凝土

**作者简介:** 许昊 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 结构工程。

**通信作者:** 王晓磊 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 新型建筑材料。

**收稿日期:** 2023-1-10

## 材料科学

重要的特征之一,混凝土的孔隙结构对其宏观力学性能有较大影响。大量的研究表明,将一些纤维加入到混凝土中,使混凝土变成纤维复合材料,可以提高其工作性能,尤其是抗拉强度显著提升<sup>[1-3]</sup>。而玄武岩纤维是天然玄武岩拉制而成的纤维,是一种环保绿色材料,具有强度高、耐高温、耐腐蚀,与混凝土的相容性较好等特点,掺入混凝土中可以提高其工作性能<sup>[4-8]</sup>。因此,研究玄武岩纤维混凝土高温后的孔隙结构与力学性能具有重要意义。

近年来,国内外学者对高温后混凝土的力学性能和孔隙结构的研究已有一些成果。薛维培等<sup>[9]</sup>研究表明在混凝土中掺入玄武岩纤维,可以降低高温后混凝土的渗透性,提高混凝土的耐高温性能;元成方、曹郭俊等<sup>[10-11]</sup>研究表明经历高温后混凝土的孔隙结构发生了改变,温度越高孔径越大,贯通性越强,但加入聚丙烯纤维可以降低因水分迁移导致的孔隙破坏,降低了混凝土的高温损伤;申嘉荣等<sup>[12]</sup>研究表明混凝土在高温条件下,混凝土中的水分会散失,当化学结合水散失时,孔隙率大幅增大,混凝土的孔隙结构会发生较大破坏,抗压强度开始降低。陈晓婷、戎虎仁等<sup>[13-14]</sup>研究表明混凝土在高温的作用下,会使孔隙率和渗透性增大,内部裂纹的不断延伸导致孔隙的贯通,导致混凝土内部结构严重破坏,使抗压强度降低。

目前,针对高温后玄武岩纤维混凝土的孔隙结构研究的相对较少,本文将从前人的研究基础上,对玄武岩纤维混凝土加热至不同目标温度(200℃、400℃、600℃、800℃),并采用饱和水法测量其不同温度后的玄武岩纤维混凝土的孔隙率,然后从玄武岩纤维混凝土高温后的孔隙结构变化规律角度,结合高温后的抗压强度的试验结果,以及通过扫描电镜的试验结果,建立高温后玄武岩纤维混凝土的孔隙率与抗压强度的关系,并进一步分析高温后玄武岩纤维混凝土力学性能的损伤机理。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,细骨料为优质河沙,细度模数为2.4;粗骨料粒径为5~20 mm连续级配的碎石,拌合水为自来水。基准混凝土配合比见表1。玄武岩纤维其物理、力学主要性能指

标见表2,表观特征如图1所示。

表1 基准混凝土配合比

材料	水泥	水	砂子	石子
用量	357	175	796	1072

表2 玄武岩纤维主要性能参数

拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	长度/mm	直径/μm
3000~4800	91~110	2.63~2.65	6	7~15



图1 玄武岩纤维  
Fig. 1 Basalt fibre

### 1.2 试件制备

以C30强度等级的混凝土为基准,玄武岩纤维按照体积掺量的0、0.5%、1%、1.5%进行掺入,放入模具中,静置24 h后拆模,制成100 cm×100 cm×100 cm的混凝土试块,然后将试块放入标准养护箱中,在温度为(20±2)℃、湿度不低于95%的条件下养护28 d,抗压强度试验按照GBT 50081-2011《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行测定。每一种体积掺量的玄武岩纤维混凝土分别记为B-0、B-0.5、B-1、B-1.5。

### 1.3 试验方法

将养护好的试块从养护箱里取出,自然晾干,然后用马弗炉对试块进行高温试验,达到目标温度后恒温1 h,再冷却至室温。

将高温后的试块放入装有水的玻璃皿中完全浸没,然后放入真空干燥箱中,只进行抽真空饱水,不再进行干燥处理,并不断监测试块的质量变化,直至试块质量不再变化,使试块达到饱水状态。然后将饱水后的试块放入100℃的干燥箱烘干10 h,再测量试块的质量,其原理是利用混凝土饱水前后的质量变化来测定混凝土孔隙率。

采用WAW-1000电液伺服万能试验机,对高温后的试块进行抗压试验,为了获得准确的实验数据,加

载时速率不宜过快，严格控制加载速率为 0.1 MPa/s。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 高温后玄武岩纤维混凝土孔隙率

高温后玄武岩纤维混凝土的孔隙率如图 2 所示。总体来看各组分玄武岩纤维混凝土孔隙率相差不大，随着温度的升高，玄武岩纤维混凝土的孔隙率不断增大。常温下，孔隙率大约在 3% 左右；经过 200 °C 高温作用后，孔隙率增长至约 4%；经过 400 °C 高温作用后，孔隙率迅速增长至约 6%，此时可以看出，随着玄武岩纤维掺量的增加，高温后混凝土的孔隙率有所下降，提高了内部结构的完整性；经过 600 °C 高温作用后，孔隙率则急剧增长至约 10%；经过 800 °C 高温作用后，孔隙率则超过了 10%，此时各组混凝土孔隙率基本保持同一水平。从玄武岩纤维混凝土高温后的孔隙率变化可以看出，混凝土内部孔隙结构的变化主要是在 400 °C 高温作用以后，说明高温对混凝土内部劣化程度显著增加。

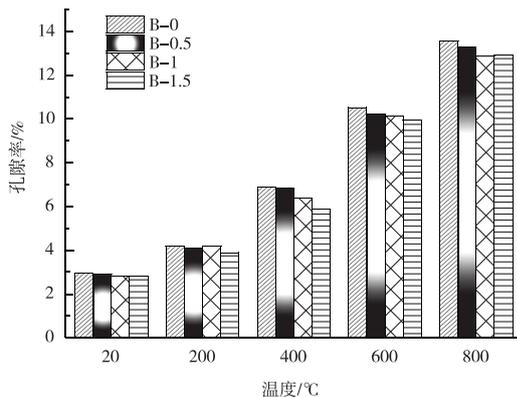


图 2 高温后玄武岩纤维混凝土孔隙率  
Fig. 2 The porosity of basalt fiber concrete after high temperature

### 2.2 高温后玄武岩纤维混凝土抗压强度

高温后玄武岩纤维混凝土抗压强度如图 3 所示。随着温度的不断升高，玄武岩纤维混凝土的强度先增加后降低，在 200 °C 时抗压强度达到峰值；当温度达到 400 °C 以上时，抗压强度则迅速下降，400 °C 时下降幅度约为初始强度的 10%；在 600 °C 高温时，抗压强度则继续下降，下降幅度约为 30%，800 °C 时，素混凝土抗压强度下降幅度约为 70%，强度损失严重，而不同掺量的玄武岩纤维混凝土抗压强度与素混凝土相比则有不同程度提高，0.5% 体积掺量的玄武岩纤维混凝土强度下降幅度约为 65%，1% 体

积掺量的玄武岩纤维混凝土强度下降幅度约为 60%，1.5% 体积掺量的玄武岩纤维混凝土强度下降幅度约为 55%，说明玄武岩纤维能够提高混凝土高温损伤后的抗压强度。这是因为温度达到 400 °C 以上时，混凝土从内部开始出现劣化现象，在玄武岩纤维体积掺量为 1.5% 时，可以明显增强混凝土温损后的抗压强度，这是由于玄武岩纤维在混凝土高温过程中约束了内部裂缝的扩展，保持了内部结构的完整性，提高了混凝土高温后的抗压强度。

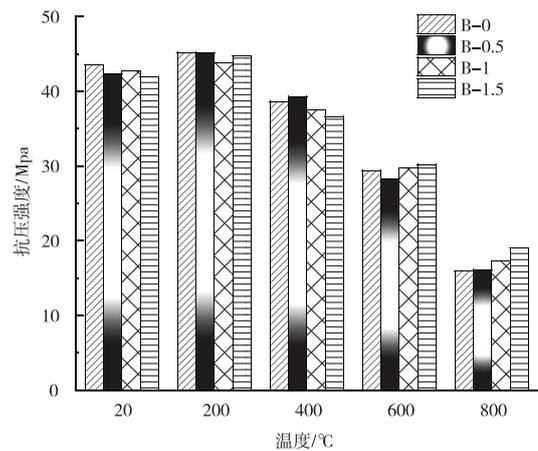


图 3 高温后玄武岩纤维混凝土抗压强度  
Fig. 3 Compressive strength of basalt fiber reinforced concrete after high temperature

## 3 机理与讨论

### 3.1 质量损失对玄武岩纤维混凝土孔隙结构的影响

混凝土在高温环境下的质量损失是由于水的质量散失导致的，混凝土中的水包括结合水、吸附水以及毛细孔水。其中结合水是在水泥水化过程中变成水化产物，吸附水是吸附在凝胶体材料表面的水，毛细孔水是脱离表面束缚力，存在于毛细孔中的水。高温后玄武岩纤维混凝土质量损失率与孔隙率关系如图 4 所示。经过 200 °C 高温作用后，孔隙率小幅增大，主要是混凝土中毛细孔水受热蒸发，导致混凝土孔隙增大；经过 400 °C 高温作用后，混凝土孔隙率增幅较大，主要是混凝土内部失去化学结合水，混凝土开始出现细微裂缝并不断延伸，导致孔隙率进一步增大；经过 600 °C 作用，混凝土的孔隙率急剧上升，由于混凝土内部胶凝材料氢氧化钙严重脱水分解，内部孔隙结构发生严重破坏，小孔隙不断扩展成大孔隙，导致混凝土孔隙率增大；经过 800 °C 作用后，内部孔隙之间出现扩展，裂缝和孔隙之间

材料科学

出现贯通，导致孔隙率进一步增大。

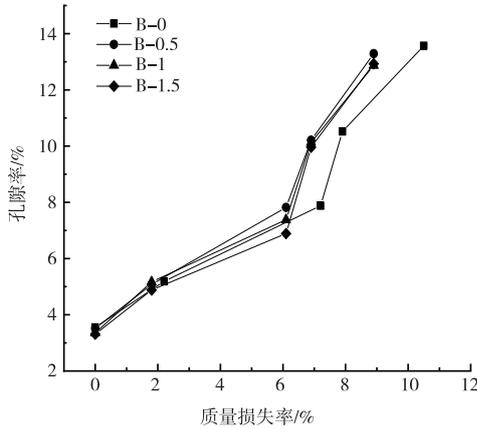


图4 高温后质量损失率与孔隙率的变化规律  
Fig. 4 The change rule of mass loss rate and porosity after high temperature

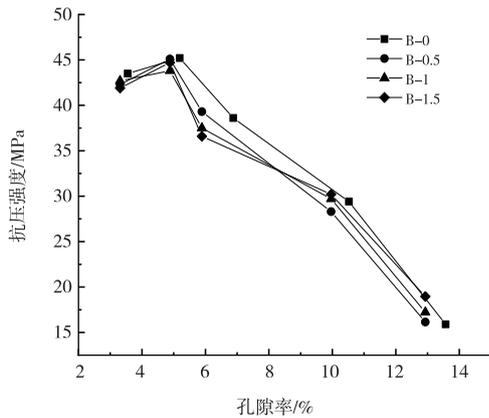
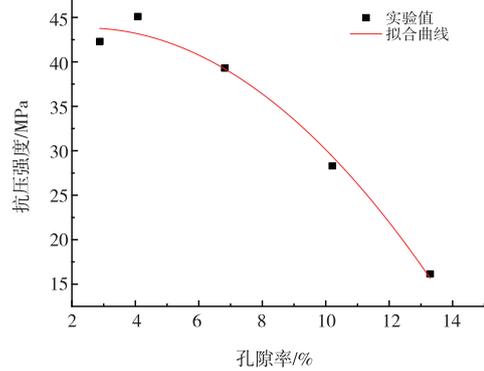


图5 高温后孔隙率与抗压强度的变化规律  
Fig. 5 The change rule of porosity and compressive strength after high temperature

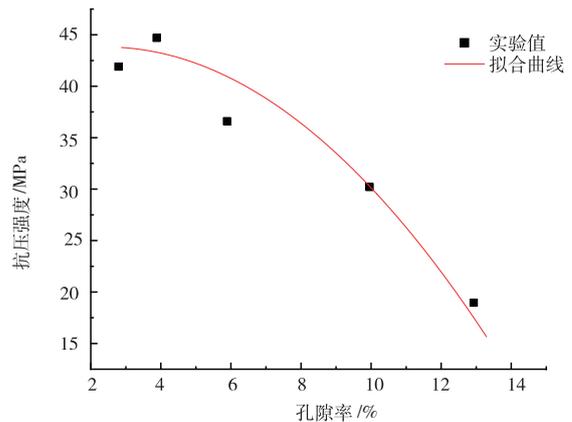
3.2 孔隙结构对抗压强度的影响

混凝土在高温过程中，骨料之间会发生复杂的物理化学反应，导致混凝土内部的孔隙结构也随之发生改变，进而造成混凝土的抗压强度降低。如图5所示，在200℃时，孔隙率虽然增大，但是混凝土强度并没有降低反而有所提高，这是因为自由水与未熟化的水泥发生二次水化反应，从而提高了混凝土的强度，孔隙率虽然略有增加，但是孔隙结构并未发生实质性改变。400℃时，孔隙率迅速增大，由于化学结合水的蒸发，混凝土中的C-S-H凝胶开始受热脱水分解，骨料之间的黏结程度下降，导致混凝土抗压强度也迅速降低；600℃时，混凝土的孔隙率继续增大，水泥水化产物高温后基本分解，导致性

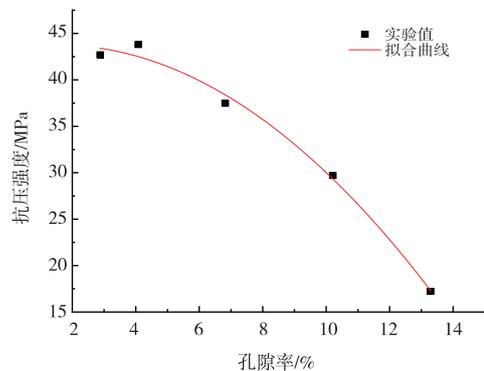
能退化，造成混凝土抗压强度急剧降低；800℃时，混凝土的孔隙率进一步增大，此时混凝土内部孔隙周围的裂缝相互贯通，整体结构开始松散，孔隙结构破坏严重，抗压强度大幅降低。对玄武岩纤维混凝土的孔隙率与抗压强度进行回归分析，高温后玄武岩纤维混凝土的孔隙率与抗压强度的具体关系曲线如图6所示，相关系数的平方均大于0.95以上，相关度较好。



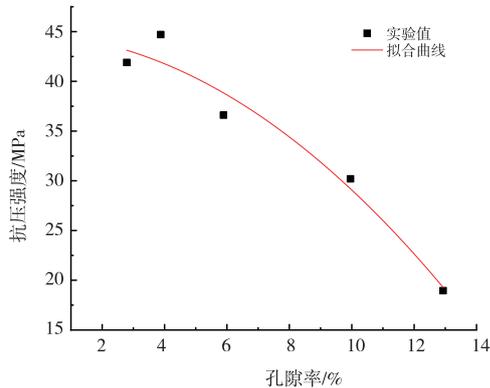
(a) B-0



(b) B-0.5



(c) B-1



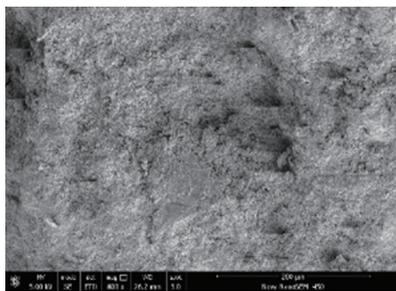
(d) B-1.5

图 6 高温后玄武岩纤维混凝土孔隙率与抗压强度的关系曲线

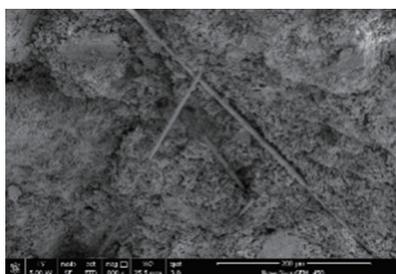
Fig. 6 The relationship between porosity and compressive strength of basalt fiber reinforced concrete after high temperature

### 3.3 微观结构分析

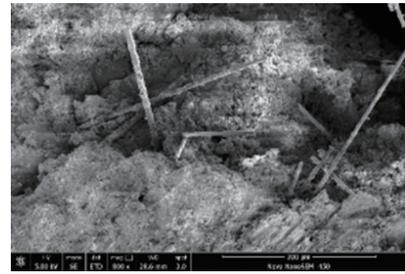
玄武岩纤维混凝土高温后电镜扫描图如图 7 所示。由图 7 可以看出常温下玄武岩纤维混凝土的孔隙较少，内部结构紧密且完整，随着温度的升高，玄武岩纤维混凝土内部的孔隙结构发生了明显的变化，水化产物开始分解，玄武岩纤维从骨料中脱落，失去了对内部结构的锚固性，玄武岩纤维混凝土内部也出现了大量的孔隙，孔隙周围出现明显裂缝且向四周延伸，造成玄武岩纤维混凝土内部微观结构劣化严重，因此玄武岩纤维混凝土抗压强度显著降低，这也是玄武岩纤维混凝土抗压强度衰减的原因。



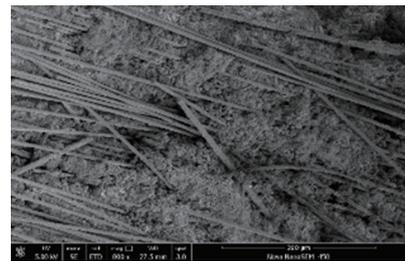
(a) 20 °C



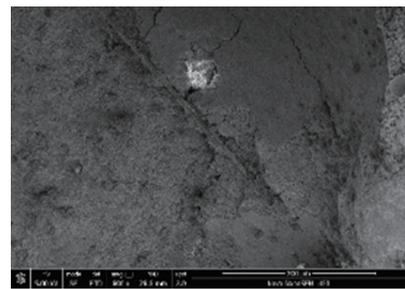
(b) 200 °C



(c) 400 °C



(d) 600 °C



(e) 800 °C

图 7 高温后玄武岩纤维混凝土的 SEM 图像  
Fig. 7 SEM images of basalt fiber reinforced concrete after high temperature

## 4 结论

(1) 在 400 °C 以上高温时，玄武岩纤维混凝土的抗压强度开始下降，下降幅度约为 10%，温度对玄武岩纤维混凝土产生了明显的损伤效应，而对于掺入玄武岩纤维的混凝土，抗压强度则有所提升。说明玄武岩纤维提高了混凝土高温后的力学性能，对高温损伤具有一定的抑制作用。

(2) 玄武岩纤维混凝土在高温下的孔隙率随着温度升高，不断增大。在 400 °C 以上高温时，孔隙率则急剧增长，而此时玄武岩纤维混凝土的强度损失也急剧增大，二者具有同一性。说明高温后玄武岩纤维混凝土的孔隙结构的改变对强度的影响比较大，玄武岩纤维混凝土在高温作用下（下转第 87 页）

## 参 考 文 献

- [1] 刘军, 宋晔, 张建全, 等. 装配式柔性面层土钉墙支护结构体系研究 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (5): 565-568.
- [2] 赵志伟. 废弃矿山地质环境影响评估与恢复治理研究 [J]. 世界有色金属, 2022 (8): 223-225.
- [3] 张宗领. 基于整体三维有限元模型的粉质黏土深基坑土钉支护参数分析 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2021, 34 (4): 686-691.
- [4] 付宪章, 武登辉, 赵庆亮, 等. 紧邻既有住宅建筑的深基坑支护及降水设计施工实例 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (2): 177-180.
- [5] 赵志伟. 废弃矿山地质环境影响评估与恢复治理研究 [J]. 世界有色金属, 2022 (08): 223-225.
- [6] 胡敏云, 欧阳维杰, 陈乾浩, 等. 复合土钉墙工作特性的细观数值模拟研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49 (4): 442-448.
- [7] 林君伟, 阮永芬. 土钉支护结构设计参数研究 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (2): 170-172.
- [8] 陈才贤, 陈磊, 黄智强. 高海拔软破大断面巷道支护设计及参数优选研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (10): 88-94.
- [9] 闫腾飞, 陈保国, 张磊, 等. 深基坑地连墙支护体系动态调整方法及应用 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (2): 356-367.
- [10] 曹成威, 石钰锋, 詹涛, 等. 考虑动态施工超长管棚预支护力学特性及参数影响分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (6): 98-104.
- [11] 曹成威, 石钰锋, 詹涛, 等. 考虑动态施工超长管棚预支护力学特性及参数影响分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (6): 98-104.
- [12] 刘啸, 华心祝, 杨朋, 等. 深井切顶留巷顶板错动判据与支护参数量化研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38 (6): 1122-1133.
- [13] 杜帅, 康天合, 张智敏. 复合顶板中锚固力扩散模型及其支护参数优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41 (11): 112-117.
- [14] 姜早龙, 张杰, 张志军, 等. 基于 BIM 和遗传算法的填海地区深基坑支护结构优化研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2021, 37 (2): 210-217.
- [15] 盛晓杰, 陆汉光. 基于 FLAC3D 的岩土预应力锚固支护数值模拟 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (2): 206-209, 295.

(上接第 81 页)

孔隙结构的改变也是强度衰减的重要原因。

(3) 玄武岩纤维混凝土的孔隙率随着温度的升高不断增大, 是由于玄武岩纤维混凝土内部的自由水和结合水的蒸发, 导致玄武岩纤维混凝土胶凝物质逐渐脱水分解, 进而导致玄武岩纤维混凝土内部孔隙结构发生改变, 玄武岩纤维混凝土在高温作用下细观结构的改变是玄武岩纤维混凝土宏观力学强度衰减的重要原因, 这也是玄武岩纤维混凝土高温后力学性能劣化的损伤机理。

## 参 考 文 献

- [1] 刘鑫, 杨鼎宜, 骆静静, 等. 高温中钢纤维混凝土抗压强度试验研究 [J]. 混凝土, 2018 (1): 31-34, 41.
- [2] 常传鹏, 田波, 黄世武, 等. 高温下聚丙烯纤维混凝土抗压强度试验研究 [J]. 公路工程, 2014, 39 (5): 324-327, 336.
- [3] 董玉洁, 刘华新, 李庆文, 等. 混杂纤维混凝土高温后力学性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2019 (5): 62-65, 70.
- [4] 杨智硕, 陈明霞, 叶梅新. 超高强玄武岩纤维混凝土抗火性能 [J]. 混凝土, 2020 (3): 89-91, 96.
- [5] 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.
- [6] 李长安. 玄武岩纤维混凝土耐高温性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 96-100.
- [7] 戎虎仁, 王海龙, 褚少辉, 等. 高温作用下不同掺量玄武岩纤维混凝土力学性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 56-60.
- [8] 陈炜, 何耀, 林可心, 等. 高温后玄武岩纤维高强混凝土的力学特性 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (5): 1246-1250.
- [9] 薛维培, 高聪, 申磊, 等. 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 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 742-748.
- [10] 元成方, 高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土高温后的孔隙结构特征研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42 (4): 122-126.
- [11] 曹郭俊. 多尺度聚丙烯纤维混凝土高温后力学性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [12] 申嘉荣, 徐千军. 高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (2): 2046-2051.
- [13] 陈晓婷, 赵人达. 高温对混凝土孔隙率及渗透性影响的试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2007 (2): 11-14.
- [14] 戎虎仁, 顾静宇, 曹海云, 等. 高温后混凝土强度与孔隙结构变化规律试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (5): 1573-1578.