

玄武岩纤维对煤矸石混凝土抗扭性能的影响

吴艳丽¹, 王丹净²(1. 黄河交通学院交通工程学院, 河南 焦作 454950; 2. 中国矿业大学力学与土木工程
学院, 江苏 徐州 221000)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。为了提高煤矸石混凝土构件的材料力学性能, 采用玄武岩纤维对混凝土进行改性。运用经验公式预测了 4 种玄武岩纤维掺量下混凝土的弹性模量, 利用有限元软件对煤矸石混凝土构件进行扭转数值模拟, 并据此提出了极限承载力的经验公式。结果表明: 由经验公式得到的煤矸石混凝土弹性模量预测值与实测结果的误差较小; 通过数值计算得到的玄武岩纤维改性煤矸石混凝土构件的扭转曲线符合相关实验的实测结果; 在煤矸石水泥砂浆中掺入玄武岩纤维可以显著提升煤矸石骨料之间的黏结性能, 进而加强煤矸石混凝土构件的抗扭性能。

关键词: 陶瓷及复合材料; 煤矸石; 混凝土; 受扭构件; 玄武岩纤维; 有限元; 极限扭矩

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.006

中图分类号: TD926;TU31 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0036-05

引用格式: 吴艳丽, 王丹净. 玄武岩纤维对煤矸石混凝土抗扭性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 36-40.

WU Yanli, WANG Danjing. Influence of basalt fiber on torsion resistance of gangue concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 36-40.

随着自然资源的日渐枯竭和建筑材料要求的日渐提高, 越来越多的学者和工程技术人员采用矿物掺合料以改善混凝土的力学性能, 并将其广泛应用于工程当中^[1]。当前, 我国采矿固体废物排放形势不容乐观, 其中煤矸石是排放量最高的废料之一。煤矸石是煤炭开采过程中产生的废渣, 大量的煤矸石的排放严重占用了土地资源, 污染了矿山土壤, 不仅对我国的土地和生态环境造成影响, 也造成了巨大的资源浪费, 因此, 为了实现煤矸石的综合利用, 降低生产成本, 维护矿山环境和资源可持续发展, 针对煤矿煤矸石产量大、利用率低等问题, 一些学者对煤矸石废料作为混凝土粗骨料的可行性进行了讨论, 采用煤矸石为原料制备的陶粒进行混凝土的配制能够大大改善其力学性能、抗冻耐久性和抗侵蚀性等性能^[2-3]。

由于大跨结构和大型桥梁建设的不断发展, 抗扭强度成为混凝土构件的一种关键性能指标^[4]。

一般的混凝土普遍存在抗拉、抗扭强度低, 易开裂的缺点。因此, 大量学者尝试在混凝土物料中加入不同类型的纤维来提升构件的强度性能^[5]。由于玄武岩纤维具有强度大, 易加工与适用好等优点, 使其掺入混凝土后能够有效地改善构件的性能, 尤其是抗拉、抗扭性能。目前, 玄武岩纤维改性煤矸石混凝土 (BFMC) 在建筑工程中已经取得了一些应用, 且对纤维改性混凝土受扭变形性能进行了相关研究, 但关于极限扭矩的理论和实验还不够完善^[6-7]。总体来说, 当前主要采用实验的方法对 BFMC 构件抗扭性能进行研究。然而, 玄武岩纤维改性混凝土构件扭转性能的影响因素众多, 例如纤维种类、长度、掺量和分布特征等, 使得采用实验的研究方法耗费大量的时间和原材料。对于混凝土材料而言, 在有条件的情况下应该尽量采用实验方法, 同时辅以数值模拟检验。有限元数值模拟内部程序具有相应的计算方

收稿日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678563); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划 (2020GGJS285)

作者简介: 吴艳丽 (1985-) 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为土木工程与建筑材料。

法，能模拟较复杂的测试过程，模拟结果直观性强，且可以较为快速地得到结果^[8-9]。因此，利用有限元法进行BFMC受扭构件的扭转模拟具有重要意义。

本文采用有限元数值仿真的方法开展构件的扭转性能分析，并与实际的测试结果进行同步对比，以此验证计算模型的可靠性与准确性，最后改进了BFMC构件的扭矩计算方法，为BFMC构件的设计与性能分析提供重要参考依据。

1 数值模拟的参数确定

1.1 材料参数选取

本研究采用的混凝土配合比参考文献^[10]，见表1。采用P.O. 42.5级硅酸盐水泥熟料作为胶凝剂。粗骨料选用煤矸石圆形颗粒，煤矸石的技术参数见表2，粒径在10~22 mm范围之内，相比一般的碎石粗集料，煤矸石具有较低的弹性模量，故工业中采用的陶粒大多由煤矸石为原材料制造。细骨料为中等粒级的河砂。玄武岩纤维长度的平均值为30 mm，长径比26.5，对照组为纤维掺量为0的试件，同时选用玄武岩纤维掺量为0、0.5%、1.0%和1.5%的煤矸石混凝土进行抗扭性能的研究。

表1 混凝土的基本配合比/(kg/m³)

Table 1 Basic concrete mix proportion					
煤矸石	中砂	水泥	水	粉煤灰	减水剂
680	620	350	175	88	1.8

表2 煤矸石骨料的材料参数

Table 2 Relevant parameters of ceramist aggregate				
抗压强度/ MPa	干密度/ (kg/m ³)	吸水率	表观密度/ (kg/m ³)	粒径/mm
48.5	1025	8.5%	1285	7.5~22

1.2 BFMC的弹性模量

因此玄武岩纤维改性煤矸石混凝土(BFMC)的弹性模量亦较低。前人推荐使用^[11]的煤矸石混凝土弹性模量近似计算公式，如式(1)：

$$E_{IC} = \sqrt{2.02\rho f_{cu,k}} \quad (1)$$

式中： E_c 为混凝土的弹性模量； ρ 为混凝土表观密度； $f_{cu,k}$ 为混凝土轴心抗压强度。

根据公式(1)计算了BFMC的弹性模量值，结果见表3。可以看出随着玄武岩纤维掺量提高，试件的弹性模量呈小幅增大趋势。将经验公式计

算结果与实验结果^[11]进行对比，两者之间的想相对误差在3.0%以内，说明采用该公式预测BFMC构件的弹性模量较为准确、有效。

表3 混凝土弹性模量的预测结果

名称	纤维含量/%			
	0	0.5	1	1.5
经验公式结果/GPa	33.71	33.94	34.77	34.96
实测结果/GPa	33.30	33.40	33.90	34.00
相对误差/%	1.21	1.59	2.50	2.70

2 BFMC构件的有限元分析

2.1 有限元模型建立

运用等效均质化方法将混凝土简化为均质材料，本研究采用ABAQUS软件建立BFMC构件的有限元三维仿真模型。BFMC构件的跨度设为2000 mm，截面高度和宽度分别为200 mm与150 mm。模拟的BFMC构件采用的HPB300型的光圆钢筋，箍筋与纵筋的直径分别为6 mm和10 mm。BFMC构件的底端与顶端各设置2根长纵筋，箍筋的间距设置为150 mm，受扭构件端部采用的箍筋以100 mm间距加密。

2.2 受扭工况下的数值计算

BFMC构件三维模型的混凝土材料设为Solid单元，钢筋选用Truss单元，共划分单元6028个，节点数目10208个。钢筋与混凝土材料间的连接设为固定约束，BFMC构件一端设为刚性约束，扭转荷载施加在构件自由端。BFMC计算的本构模型参考文献^[12]，并将其输入有限元软件中进行扭转分析。钢筋材料属性为弹塑性模型，将计算的BFMC构件弹性模量作为计算参数，泊松比设为0.25，钢筋的泊松比和弹性模量分别定为0.3和210 GPa。图1给出了BFMC构件的数值仿真计算结果与实验的实测结果，其中 B_f 表示玄武岩纤维的掺量。

实验得到的曲线与仿真计算结果具有较好的拟合效果(图1)，说明数值计算建立的模型和参数的设置具有一定合理性，能够为BFMC构件的受扭行为提供准确的预测结果。在BFMC构件出现开裂现象前，材料处于弹性变形中，构件内部的混凝土和钢筋共同抵抗扭转荷载，使得扭矩-转角($T-\theta$)关系曲线呈线性上升的变化特征。

随着扭转荷载持续的提高, BFMC 构件内逐渐开裂, 裂隙扩张程度不断提高。由于钢筋是 BFMC 构件内承载扭矩的主要材料, 扭矩-转角曲线的斜率随扭转角增加而减小, 扭矩的增速趋于减

缓。在扭矩达到峰值条件下, BFMC 构件内的钢筋发生屈服变形, 混凝土材料大面积开裂, 构件承受的扭矩荷载值衰减, 扭矩-转角 ($T-\theta$) 关系曲线不断降低。

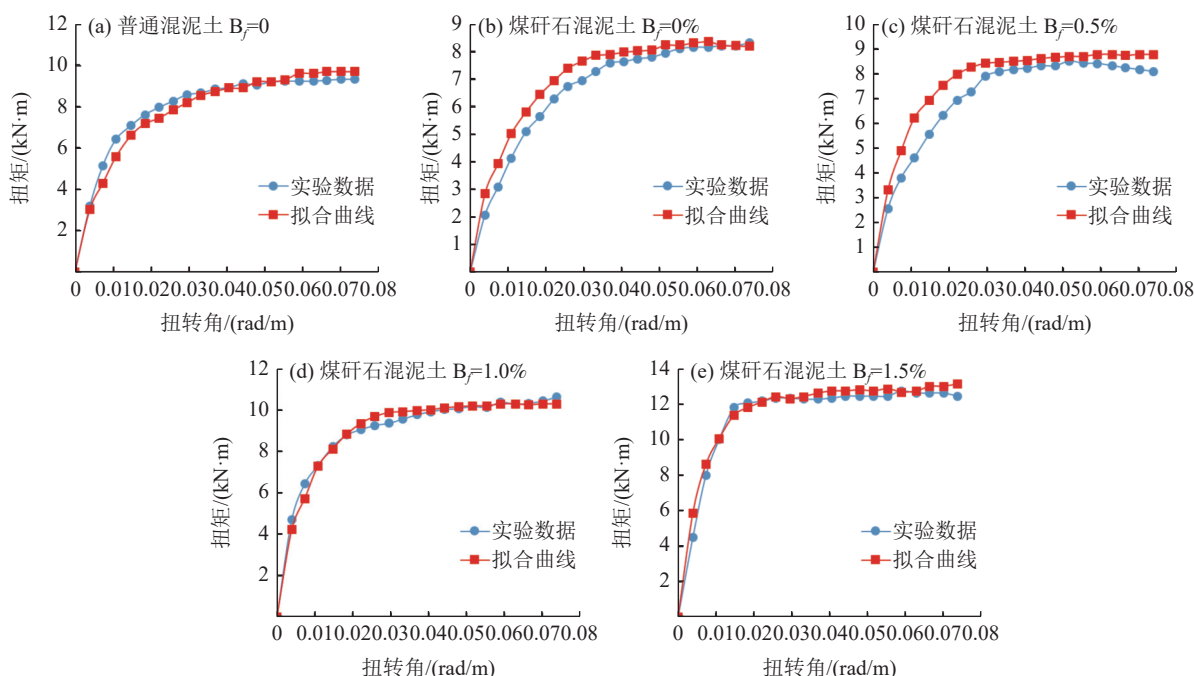


图1 扭矩与单位扭转角曲线

Fig.1 Curves of torques and unit torsion angles

图2给出了有限元计算和实验得到的开裂扭矩和极限扭矩结果, 数值计算与实测的开裂扭矩与极限扭矩误差均不到5%。从图3可以直观地看出随着玄武岩纤维掺量 B_f 增加, BFMC 构件开裂扭矩与极限扭矩也随之变化。此外, BFMC 构件

的开裂扭矩随纤维掺量 B_f 上升近似呈线性增长趋势。当玄武岩纤维掺量 B_f 低于1%时, 极限扭矩增幅不明显, 当纤维掺量 B_f 超过1.5%时, 两种扭矩出现了急剧提升的现象。

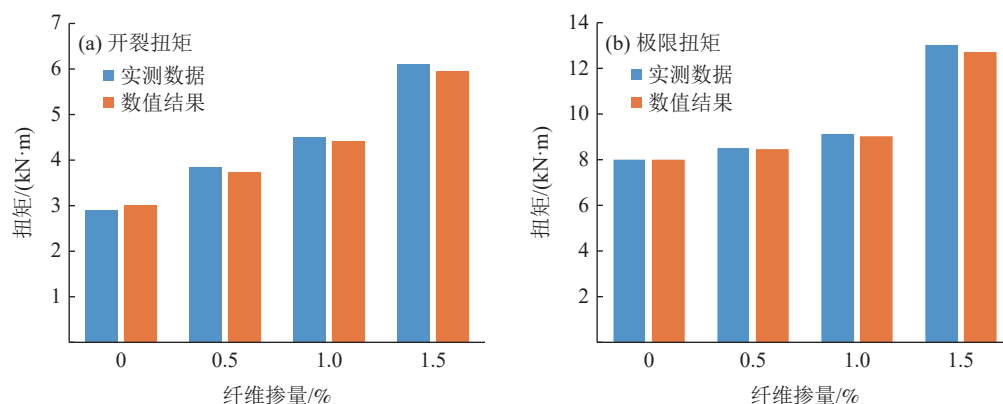


图2 不同类型 BFMC 构件的扭矩指标

Fig.2 Torque indexes for different types of BFMC components

根据有限元计算, 得到了图3的 BFMC 受扭构件在不同工况下的扭矩和单位转角 ($T-\theta$) 之间的曲线。在玄武岩纤维掺量 $B_f \leq 1.0\%$ 条件下, BFMC

构件的极限扭矩明显低于普通混凝土构件, 说明普通混凝土抗扭性能比煤矸石混凝土更优异。相比普通碎石粗集料, 煤矸石颗粒具有更高的脆性

特征，导致煤矸石混凝土试件的延性和韧性下降。在受到较大的扭转荷载作用时，煤矸石混凝土发生脆性破坏的程度更高。当在煤矸石混凝土物料中掺入玄武岩纤维后，BFMC构件的极限扭矩随纤维掺量 B_f 增加而不断提高。当 $B_f=0.5\%$ 时，BFMC构件极限扭矩增幅为6.09%； $B_f=1\%$ 条件下的极限扭矩增加值大约为 $B_f=0.5\%$ 时的2倍； $B_f=1.5\%$ 条件下的极限扭矩增加幅度约为56%。综合测试结果可知，当玄武岩纤维掺量 B_f 达到1.5%时，BFMC梁的抗扭性大约提高至普通混凝土构件的1.5倍。

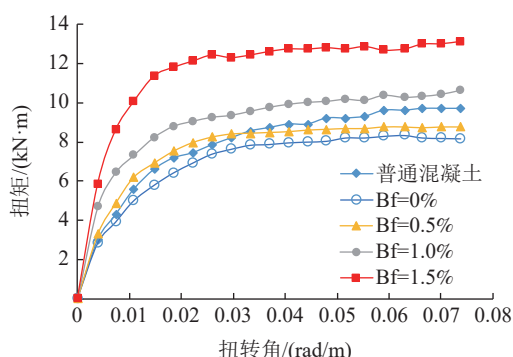


图3 不同纤维掺量下构件扭矩与转角关系曲线
Fig.3 Relation curves between torque and rotation angle

2.3 改性机理分析

本研究给出了不含纤维的煤矸石混凝土和掺量为1.5%的BFMC构件的受扭破坏形态。由于玄武岩纤维的掺杂改性作用，BFMC构件发生扭转破坏时裂缝宽度显著减小。究其原因，在水泥水化物的凝结硬化过程中，硬化后的水泥石与玄武岩纤维之间发生胶凝作用，煤矸石骨料形成一定强度的结合体。随着扭矩荷载逐渐增长，玄武岩纤维和水泥水化产物的黏结将扭矩传递给纤维。在玄武岩纤维约束作用下，混凝土砂浆的开裂延伸得到有效的阻碍，新裂纹的数量明显减少。因此，纤维改性作用提高了煤矸石混凝土的延性和受扭性能。

采用扫描电子显微镜实验获得的SEM图像观测了BFMC在养护28d后的内部微观结构形态，结果见图4。根据图4(a)可以看出：煤矸石混凝土内部形成的水化物胶结程度较高，结构较为密实。从图4(b)可以看出：在煤矸石水泥砂中掺入玄武岩纤维后，纤维起到连接煤矸石骨料和水泥凝胶体的作用，使得BFMC构件内部形成了整体性较好的粘结强度，对材料的抗扭性能有直接的

改善效果。微观观测结果同时也验证了BFMC构件受扭破坏形态改变的内在原因。

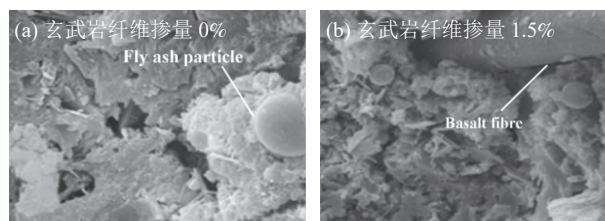


图4 BFMC的SEM
Fig.4 SEM of BFMC

3 结 论

(1) 由经验公式得到玄武岩纤维煤矸石混凝土弹性模量和实测结果较为接近，为采用经验公式计算的混凝土弹性模量进行BFMC构件扭转有限元分析提供了数据基础。通过对扭转荷载-角度的关系曲线进行对比，发现有限元的计算结果可以有效地吻合实测结果。

(2) 对比实验结果和有限元分析结果，发现BFMC构件的极限扭矩随玄武岩纤维掺量的增加而提高，掺量为1.5%时，BFMC构件的抗扭性能大约提高为普通混凝土的1.5倍。

(3) BFMC构件中的水泥水化物在硬化过程中与玄武岩纤维之间发生黏结结合，提升了构件的抗扭性能。因此，采用玄武岩纤维和煤矸石制备混凝土可以大幅提高受扭构件的实际工作性能。

参考文献：

- [1] Xie J H, Zhao J B, et al. Investigation of the high-temperature resistance of sludge ceramicsite concrete with recycled fine aggregates and GGBS and its application in hollow blocks[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 34.
- [2] 谷玲钰, 刘振英, 刘银. 利用煤矸石制备多孔陶瓷的及力学性能研究[J]. 矿产综合利用, 2018(5):135-137.
- GU L Y, LIU Z Y, LIU Y. Research on the preparation and mechanical properties of porous ceramics using gangue[J]. Mutipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(5):135-137.
- [3] 王庆贺, 李喆, 张玉琢, 等. 基于两相复合材料的煤矸石混凝土弹性模量研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(2):254-261.
- WANG Q H, LI Z, ZHANG Y Z, et al. Research on elastic modulus of gangue concrete based on two-phase composite materials[J]. Journal of Shenyang University of Architecture

(Natural Science Edition), 2021, 37(2):254-261.

[4] 邱继生, 姚谦峰. 纯扭作用下钢纤维混凝土梁极限扭矩计算方法的研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1):78-81+97.

QIU J S, YAO Q F. Research on the calculation method of ultimate torque of steel fiber concrete beams under pure torsion[J]. Industrial Building, 2010, 40(1):78-81+97.

[5] 张凯军, 霍冀川, 黄阳, 等. 攀西地区某用于制造纤维的玄武岩工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2021(2):163-167.

ZHANG K J, HUO J C, HUANG Y, et al. Process mineralogical study of a basalt used for fiber manufacturing in West Panzhi region[J]. Mutipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):163-167.

[6] 张保涛, 刘继明, 李得生, 等. 矩形型钢混凝土复合受扭构件抗扭刚度的研究[J]. 混凝土, 2019(5):24-27.

ZHANG B T, LIU J M, LI D S, et al. Research on torsional stiffness of rectangular section steel-concrete composite torsional members[J]. Concrete, 2019(5):24-27.

[7] 孙秋荣, 刘磊. 轻骨料纤维喷射混凝土力学性能及破坏特征数值研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(4):28-34+49.

ZHANG Q R, LIU L. Numerical study on mechanical properties and damage characteristics of lightweight aggregate fiber shotcrete[J]. Composites Science and Engineering, 2021(4):28-34+49.

[8] 孙秋荣, 刘磊. 轻骨料纤维喷射混凝土力学性能及破坏特征数值研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(4):28-34+49.

SUN Q R, LIU L. Numerical study on mechanical properties

and damage characteristics of lightweight aggregate fiber shotcrete[J]. Composites Science and Engineering, 2021(4):28-34+49.

[9] 王宇航, 王雨嫣, 胡少伟. 海洋结构 CFRP 环向约束钢管混凝土柱在压弯扭荷载下的力学性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(8):96-105.

WANG Y H, WANG Y Y, HU S W. Mechanical properties of CFRP ring-confined steel-tube concrete columns for marine structures under compressive bending and torsion loading[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(8):96-105.

[10] 王怀亮, 朱建威. 高性能煤矸石混凝土高温后受压本构关系研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11):200-209.

WANG H L, ZHU J W. Research on the compressive principal relationship of high-performance gangue concrete after high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(11):200-209.

[11] 黄磊, 王小平, 等. 煤矸石混凝土单轴受力下的塑性损伤模型应用研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(7):81-83+44.

HUANG L, WANG X P, et al. Application of plastic damage modeling to gangue concrete under uniaxial force[J]. Building Structure, 2012, 42(7):81-83+44.

[12] 范新宇, 邵永健, 杭子彦, 等. 型钢混凝土梁弯扭性能实验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(2):90-97.

FAN X Y, SHAO Y J, HANG Z Y, et al. Experimental study on flexural and torsional properties of section steel and concrete beams[J]. Industrial Building, 2021, 51(2):90-97.

Influence of Basalt Fiber on Torsion Resistance of Gangue Concrete

WU Yanli¹, WANG Danjing²

(1.Huanghe Jiaotong University, Traffic Engineering College, Jiaozuo 454950, Henan, China; 2.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. In order to improve the mechanical properties of concrete, basalt fiber is used to prepare torsional members of gangue concrete. The empirical formula is used to predict the elastic modulus of concrete with four kinds of basalt fiber content. Then, the finite element software is applied to carry out torsion numerical simulation of gangue concrete members and the empirical formula of ultimate bearing capacity is proposed. The results show that the error between the predicted elastic modulus and the measured one is relatively small. The torsion curves of the basalt fiber modified concrete members obtained by numerical calculation accord with the measured results of related tests. Adding basalt fiber into gangue concrete can significantly improve the bonding performance of concrete mortar, which thus strengthens the torsional resistance of concrete members.

Keywords: Ceramics and composites; Coal gangue; Concrete; Torsional member; Basalt fiber; Finite element; Limit torque