

纤维煤矸石骨料混凝土力学性能研究进展

王 凯, 刘华新*

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年3月22日; 录用日期: 2025年4月13日; 发布日期: 2025年4月24日

摘 要

作为煤炭开采与加工活动的副产品, 煤矸石在中国境内的再利用率相对较低。通过一系列处理步骤, 如破碎和筛分, 将这种废弃物转化为适用于混凝土制造的骨料已经成为一种有效的资源回收策略。然而, 由于煤矸石自身的强度普遍低于传统使用的天然骨料, 其在混凝土中的比例越高, 往往会导致最终材料的抗压能力下降。为了克服这一局限性, 研究者们探索了通过添加各种纤维来增强基于煤矸石的混凝土结构性能的方法。不同种类的纤维对于改善混凝土各项力学指标(包括但不限于抗压、劈裂抗拉及弯曲强度)的效果各异。本综述旨在概述煤矸石的基本物理化学特征, 并讨论不同类型纤维对提升此类特殊混凝土性能的作用机制, 为未来相关领域的深入探究奠定基础。

关键词

煤矸石, 纤维, 抗压强度, 劈裂抗拉强度, 抗弯折强度

A Review of Mechanical Properties of Fiber Gangue Aggregate Concrete

Kai Wang, Huaxin Liu*

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Mar. 22nd, 2025; accepted: Apr. 13th, 2025; published: Apr. 24th, 2025

Abstract

Coal gangue is the waste produced in the process of coal mining and processing in China, and the comprehensive utilization rate is low. The gangue through crushing, screening and other processes into aggregates that meet the requirements of concrete, and then mixed into the concrete has become the main way of resource utilization. The strength of gangue is usually lower than that of natural aggregates, so with the increase of gangue substitution rate, the compressive strength of

*通讯作者。

concrete tends to decrease. In order to improve the mechanical properties of gangue concrete, fibers are usually added to enhance its compressive strength. Different types of fibers have different effects on the compressive strength of concrete. Therefore, this paper introduces the physicochemical properties of gangue and summarizes the effects of fibers on the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of gangue concrete, to provide reference for future research on fiber gangue concrete.

Keywords

Gangue, Fiber, Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Bending Strength

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矸石(CG)是在煤炭开采过程中形成的一种灰色或黑色页岩。鉴于中国在全球煤炭生产和消费方面均占据首位[1], 该国同样面临着大量煤矸石废弃物的挑战。这类固体废物的大规模堆积不仅侵占了宝贵的土地资源, 还可能给周边环境及生态系统带来多重负面影响[2]。为减轻此类废弃物对自然界的不利影响, 探索有效的管理和再利用策略显得尤为重要。例如, 通过将煤矸石转化为水泥、轻质混凝土骨料、耐火材料等建筑材料, 或是应用于煤炭回收以及与煤混合燃烧发电等方式, 不仅可以减少其堆放量, 还能促进资源循环利用。

朱泽忠等人[3]针对淮南地区的煤矸石强度进行了研究, 发现其强度仅相当于普通石子的 52.04%。通过综合分析材料本身的强度、压碎指标以及实验数据, 他们确定了煤矸石作为混凝土粗骨料的最佳适配强度为 C30。Huang [4]与孙钢柱等人[5]的研究表明, 当煤矸石细骨料替代比例低于 20%时, 对混凝土抗压强度的影响几乎可以忽略不计; 若替代率为 20%, 则制成的煤矸石混凝土抗压性能较佳, 甚至优于常规混凝土; 但一旦替代率超过 20%, 抗压能力开始减弱; 特别是当这一比例达到 30%以上时, 该类型混凝土的抗压性将低于传统材料。李文龙等人[6]尝试通过添加粉煤灰和玻璃纤维来改进煤矸石材料的机械特性, 结果证明粉煤灰能够增强混凝土抵抗裂缝的能力; 同时, 加入玻璃纤维后形成的复合效应有助于形成更加紧密且均匀的整体结构, 减少了脆弱界面的存在, 进而提高了含有煤矸石粗骨料混凝土的劈裂抗拉力。李佳鑫等人[7]采用物理激活与化学激活相结合的方法激发了煤矸石骨料的活性, 在保持早期强度不变的前提下提升了中后期强度, 其中弯曲强度增加了 5.97 MPa。总体来看, 由于煤矸石颗粒形状复杂且大小不一, 这导致以其为主要成分制作而成的混凝土难以达到理想的填充效果, 从而影响整体强度表现。此外, 如果煤矸石中含有过量水分, 则会影响混凝土固化过程, 进一步削弱其强度。

因此, 为了提升煤矸石混凝土的机械性能, 通常会掺入纤维材料以加强其结构稳定性。本文探讨了煤矸石的基本物理化学特性, 并综合分析了不同纤维对于改善煤矸石混凝土抗压性、劈裂拉伸强度及弯曲韧性方面的作用效果。

2. 煤矸石的理化性质

2.1. 物理性质

为充分利用煤矸石作混凝土骨料, 需考虑其物理性质对混凝土性能的影响。煤矸石抗压强度 300~4700 Pa, 低强度煤矸石作骨料可能降低混凝土力学性能, 增加裂缝风险, 故需严控抗压强度以满足设计要求;

煤矸石密度 2100~2900 kg/m³, 堆积密度 1200~1800 kg/m³, 低密度、不规则颗粒增加拌合难度和摩擦力, 降低流动性; 堆积密度低则颗粒间空隙大, 可能导致混凝土硬化时体积收缩或变形, 影响结构稳定性和耐久性[8]。煤矸石吸水率 2.0%~6.0%, 影响混凝土拌合物和硬化性能; 多孔性导致混凝土内部孔隙结构复杂, 影响耐久性和抗渗性[9]。另外, Duan 等人[10]通过对煤矸石样品进行 XRD(X 射线衍射)分析, 如图 1 揭示了煤矸石的矿物相组成。分析结果表明, 煤矸石中主要包含方英石、高岭石、黄铁矿以及钙长石等多种矿物成分。其中, 方英石作为一种硅酸盐矿物, 它的存在增加了煤矸石的硬度和耐磨性; 高岭石则是一种典型的黏土矿物, 具有层状结构, 它的存在使得煤矸石具有一定的塑性和粘结性。这些矿物的存在, 不仅反映了煤矸石复杂的成因过程, 也为煤矸石资源的综合开发利用提供了宝贵的矿物学信息。

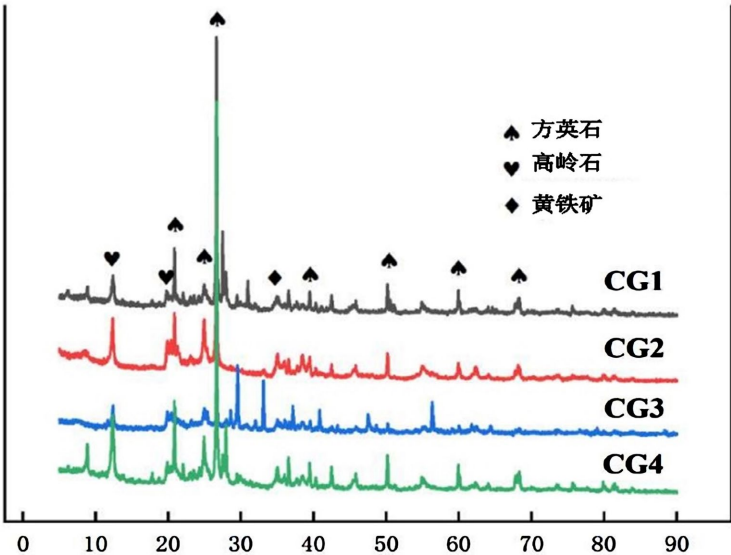


Figure 1. XRD analysis of gangue samples
图 1. 煤矸石样品 XRD 分析

2.2. 化学性质

Duan 等人[10]运用 XRF 分析技术, 对我国山西、河北、重庆及新疆四个代表性地区的煤矸石样品进行了化学成分分析, 如表 1 显示, 这些地区煤矸石(CG)样品的主要化学成分包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO, 同时还含有少量的 K₂O、MgO、Na₂O、TiO₂ 以及 SO₃ 等元素。其中, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO 这四种元素占据了 CG 样品主要化学成分的 80%以上。活性 SiO₂ 和 Al₂O₃ 可在一定条件下与 Ca(OH)₂ 发生火山灰反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙或水化硫铝酸钙等产物, 这些产物能够显著提高煤矸石的强度; CaO 和 MgO 含量的增加可以提高煤矸石的碱度, 从而增强其抗酸性侵蚀的能力[11]。

Table 1. The main chemical composition of coal gangue (%)
表 1. 煤矸石主要化学成分(%)

来源	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
山西	60.41	19.48	7.20	3.78	3.70	2.36	1.25	1.16	0.17
河北	38.26	17.85	20.88	1.20	0.18	0.46	0.24	0.63	20.07
重庆	39.08	20.49	14.72	1.24	7.53	1.21	0.89	2.89	10.87
新疆	63.84	23.10	3.67	3.85	1.48	1.05	0.971	1.45	0.218

3. 纤维煤矸石骨料混凝土力学性能研究

3.1. 抗压强度

材料在受压条件下抵御破坏的能力被称为抗压强度, 这一特性对于确保建筑结构的安全与稳固至关重要。如果建筑材料的抗压性能不佳, 则当其承受外部负荷时, 极有可能引发结构失效, 进而造成安全隐患。鉴于此, 对抗压强度的研究成为评估纤维煤矸石混凝土力学特性的关键组成部分之一。

周彦森等人[12]用 60%煤矸石粗骨料制备地聚物混凝土, 研究纳米 SiO_2 (0~2.5%)与钢纤维(0~1.25%)单独及组合对其抗压性能的影响。发现钢纤维添加量增加, 抗压强度增强; 但纳米 SiO_2 、钢纤维超过 1.5%、1%最佳量后, 正向效应减弱。总体而言, 钢纤维贡献更显著, 二者共同作用有良好协同效果, 尤其在钢纤维 1.0%、纳米 SiO_2 2.0%时。Zhong 等人[13]同样细致研究了多种类型及不同掺入量的纤维对煤矸石地聚物混凝土力学性能的具体影响, 并借助扫描电子显微镜(SEM)技术, 深入剖析了其力学性能增强的内在机理。他们的研究成果表明, 在纤维掺入量适度的情况下, 可以显著提升试件的抗压强度; 然而, 一旦掺入量超出适宜范围, 反而会导致抗压强度下滑, 甚至低于未添加纤维的对照组水平。如图 2 所示的微观结构图, 当纤维掺入量适中时, 其周围并未观察到明显的孔隙或疏松基质, 且裸露的纤维末端与地质聚合物基质紧密结合; 相反, 当纤维掺入量过高时, 会出现纤维团聚现象, 如图 2(b)所示, 纤维之间相互缠绕, 这势必会增加孔隙的形成, 降低凝胶材料间的密实程度, 从而导致抗压强度的下降。

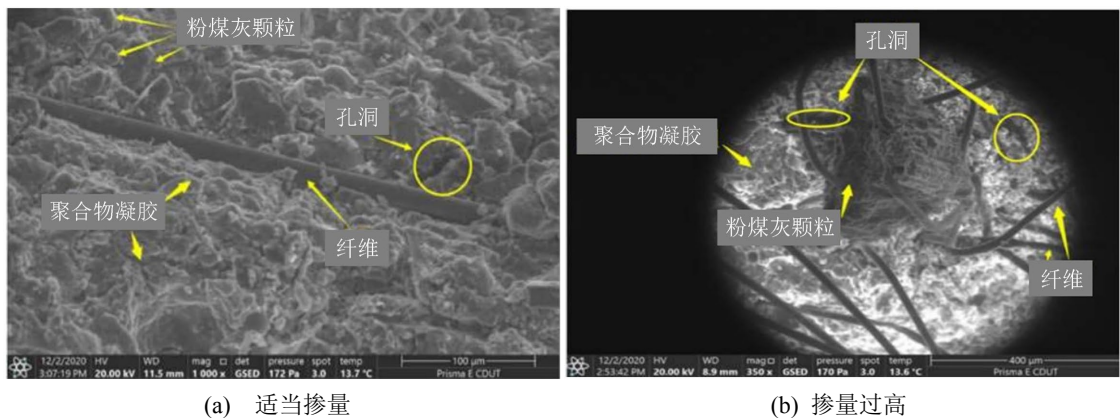


Figure 2. Microstructure of fiber-reinforced coal gangue geopolymer concrete
图 2. 纤维增强煤矸石地聚物混凝土微观结构

李九阳等人[14]探究了煤矸石骨料及砂替代比例、钢纤维与聚丙烯纤维添加量对混杂纤维煤矸石混凝土抗压性能的影响, 发现当替代率均为 30%, 且钢纤维与聚丙烯纤维分别以 0.75%和 0.2%比例加入时, 混凝土可达 C30 强度标准。查文华等人[15]则研究了玄武岩纤维掺量与长度对煤矸石混凝土抗压性能的影响, 发现纤维体积占比在 0.10%~0.15%间、长度为 18 mm 时, 能显著提升抗压强度, 超过此比例则增强效果不再明显。

综上所述, 当前的研究综合采用了宏观与微观分析方法, 系统探讨了多种纤维类型、掺量及长度对煤矸石混凝土抗压性能的具体影响。研究结果显示, 尽管所有类型的纤维均能在一定程度上提高材料的抗压强度, 但这种增强效果却会因纤维的具体掺入比例及尺寸的不同而有所变化; 特别值得注意的是, 当纤维含量超过某一特定值时, 进一步增加其含量反而可能会对材料的抗压能力产生负面影响。

3.2. 劈裂抗拉强度

混凝土的劈裂抗拉强度, 即在特定试验条件下测得的一种衡量其抵抗拉伸变形能力的重要指标。李

九阳等人[16]为了提升煤矸石的有效利用价值,研究了以煤矸石陶粒替代粗骨料、煤矸石陶砂替代细骨料的比 例,以及剪切型钢纤维的掺入量对煤矸石混凝土劈裂抗拉性能的影响。他们采用了三因素三水平正交设计的方法进行实验,并通过扫描电子显微镜(SEM)技术从微观角度探究了煤矸石和钢纤维如何影响混凝土的劈裂抗拉特性。数据分析表明,各因素对于劈裂抗拉强度的作用大小排序为:煤矸石陶砂替代比例 > 煤矸石陶粒替代比例 > 钢纤维添加量;当煤矸石陶粒替代率为 30%,煤矸石陶砂替代率为 20%,且钢纤维含量为 0.4%时,混凝土表现出最佳的劈裂抗拉性能。

杨秋宁等人[17]的研究基于一种以煤矸石完全取代普通混凝土中粗骨料的新型材料,探讨了不同体 积比例下聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯(PP)以及钢(ST)纤维对这种材料力学性质的影响。研究发现,过量添加 PVA 和 PP 纤维反而会抑制由煤矸石制成的混凝土强度增长,存在一个最佳掺入量;而当 ST 纤维的掺入 量达到总体积 2%时,能够显著提升该类型混凝土的整体机械性能,尤其是在增强其劈裂抗拉强度方面效 果尤为突出。

王磊等人[18]探讨了聚丙烯纤维对混凝土性能的影响,特别是在提高煤矸石利用率和增强保温效果 方面的作用。研究中采用了特定配比的煤矸石保温混凝土,并考察了不同比例的纤维掺入量如何影响材 料的抗压强度、弹性模量及早期裂缝抵抗能力。实验结果显示,在纤维体积分数从 0.00%增加至 0.20%的 过程中,混凝土试样的立方体抗压强度与轴向抗压强度经历了先升后降的变化趋势;与此同时,其弹性 模量有所下降。值得注意的是,随着纤维添加量的增加,混凝土表现出更佳的抗裂性和更加显著的延性 破坏特性。

综上所述,通过适当调节煤矸石集料的替代比例、纤维类型及其添加量,能够显著提升煤矸石混凝 土的劈裂抗拉性能。众多学者在研究煤矸石混凝土劈裂抗拉强度中,基于不同煤矸石取代率,建立了劈 裂抗拉强度与抗压强度的关系公式,如表 2 所示。

Table 2. Formula for calculating the tensile strength of fiber coal gangue concrete
表 2. 纤维煤矸石混凝土抗拉强度计算公式

序号	煤矸石取代率	抗拉强度公式
1	0、30%、50%、70%、100%	$f_{spt} = 0.076 \cdot (f_c)^{0.75}$
2	0、25%、50%、75%、100%	$f_{spt} = 0.19 \cdot (f_c)^{0.7}$
3	0、25%、50%、75%、100%	$f_{spt} = 0.24 \cdot (f_c)^{0.68}$
4	0、30%、50%、70%、100%	$f_{spt} = 0.407 \cdot (f_{cu})^{0.49143}$

注: f_{spt} 为劈裂抗拉强度; f_c/f_{cu} 分别为轴心抗压强度、标准立方体抗压强度。

3.3. 抗弯折强度

混凝土的抗弯折强度,也就是通常所说的抗折强度,指的是在受到弯曲力作用时,混凝土抵抗断裂 的能力。在建筑施工领域,混凝土经常面临各种复杂的外力作用,其中就包含了弯曲力。因此,抗折强 度成为了评价混凝土品质及其耐久性的一个关键参数。

姚贤华等人[19]探索了使用破碎后的煤矸石骨料全面替代传统混凝土中的粗细骨料,并通过添加不 同比例的纳米 SiO₂ 和聚丙烯纤维(PPF)来改善材料性能。该研究旨在评估在单独或共同作用下,这些添加 剂对提高混凝土抗折强度的有效性。实验结果显示,在 7 天龄期时,混凝土样品的抗折强度提升了 43.5%, 而在 28 天龄期时,则达到了 44.9%的增幅。

李铠驿等人[20]探讨了煤矸石骨料的替代比例与钢纤维添加量对混凝土梁抗弯性能的影响。他们运

用有限元分析软件 ABAQUS 构建了三根具有不同煤矸石替代率和钢纤维含量的梁模型, 并进行了弯曲模拟实验。通过对这些掺入了钢纤维的煤矸石骨料混凝土梁在不同条件下抗弯承载力变化规律的研究发现: 随着煤矸石替代比例的提高, 梁的极限承载力有所下降; 而加入钢纤维则能有效增强此类混凝土梁抵抗裂缝的能力, 提升其开裂时所能承受的最大荷载, 但对于提高梁的整体极限承载力作用较为有限。

周梅等人[21]利用自燃煤矸石作为轻质粗骨料, 并以钢纤维为增强材料, 设计并制备了五组不同钢纤维含量的混凝土样本, 随后进行了抗折强度测试。研究发现, 在钢纤维添加比例低于 2% 的情况下, 随着其含量的逐渐增加, 基于自燃煤矸石的轻质混凝土的抗折性能得到了显著提升。

总而言之, 煤矸石混凝土的抗折强度受到诸如煤矸石替代比例、纤维类型及其掺入量等多种因素的影响。通过科学地调控这些变量, 能够显著增强该种混凝土材料的抗折性能, 进而提升其力学特性和耐久年限。基于不同煤矸石取代率试验, 部分学者建立了抗折强度与抗压强度之间的计算公式, 如表 3 所示。

Table 3. Formula for calculating the flexural strength of fiber coal gangue concrete
表 3. 纤维煤矸石混凝土抗折强度计算公式

序号	煤矸石取代率	抗拉强度公式
1	0、30%、50%、70%、100%	$f_f = \alpha_f \alpha_c \sqrt{f_c}$ $\alpha_f = 1.6855r - 0.008$ $\alpha_c = -0.8945x + 0.8397$
2	0、25%、50%、75%、100%	$f_f = \frac{(-0.56r^2 + 0.53r + 0.8)}{\exp(11.6C)} \sqrt{f_c}$
3	0、30%、50%、70%、100%	$f_f = 0.20991 \cdot (f_{cu})^{0.79301}$

注: f_f 为抗折强度; f_{cu} 为标准立方体抗压强度; r 为煤矸石取代率; x 为水灰比; C 为煤矸石骨料含碳率。

4. 结论

- (1) 纤维煤矸石混凝土的力学特性受到多方面因素的影响, 其中主要包括煤矸石的替代比例、所添加纤维的种类及其含量。
- (2) 在纤维增强的煤矸石混凝土中, 所采用的主要纤维类型为钢纤维与聚丙烯纤维, 而混合纤维则较少使用。
- (3) 纤维对于提升煤矸石混凝土的力学特性主要体现在增强其韧性和强度方面。在一定掺量范围内 (例如小于 1.5% 或 2%), 随着钢/聚丙烯纤维添加比例的增加, 这种材料的力学表现会有所提高。但是, 如果纤维的比例过高, 则可能引发纤维聚集的问题, 从而削弱了原本预期的强化效果。
- (4) 通过在混凝土内部构建一个三维网络, 纤维能够在材料承受外部载荷时分担部分拉伸应力。这一机制有助于延迟裂缝的出现与扩展, 进而增强混凝土的整体强度和抗裂性能。

参考文献

[1] Mujtaba Munir, M.A., Liu, G., Yousaf, B., Ali, M.U., Abbas, Q. and Ullah, H. (2020) Synergistic Effects of Biochar and Processed Fly Ash on Bioavailability, Transformation and Accumulation of Heavy Metals by Maize (*Zea mays* L.) in Coal-Mining Contaminated Soil. *Chemosphere*, **240**, Article 124845. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124845>

[2] Peng, W., Liu, Y., Lin, M., Liu, Y., Zhu, C., Sun, L., et al. (2022) Toxicity of Coal Fly Ash and Coal Gangue Leachate to *Daphnia magna*: Focusing on Typical Heavy Metals. *Journal of Cleaner Production*, **330**, Article 129946.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129946>
- [3] 朱泽忠. 煤矸石混凝土的研制及其性能测试[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
 - [4] Huang, Y. and Zhou, A. (2021) Study on Mechanical Properties of PET Fiber-Reinforced Coal Gangue Fine Aggregate Concrete. *Geofluids*, **2021**, Article 6627447. <https://doi.org/10.1155/2021/6627447>
 - [5] 孙钢柱, 关罡, 许荣盛. 煤矸石作细集料的混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(8): 87-89, 98.
 - [6] 李文龙. 掺玻璃纤维粉煤灰煤矸石骨料混凝土强度与抗裂性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(13): 49-53.
 - [7] 李佳鑫, 舒志乐, 孙启明, 等. 不同活化方式对煤矸石胶砂力学性能的影响研究[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 252-257.
 - [8] 王栋民, 房奎圳. 煤矸石资源化利用技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021.
 - [9] Yu, L., Xia, J., Xia, Z., Chen, M., Wang, J. and Zhang, Y. (2022) Study on the Mechanical Behavior and Micro-Mechanism of Concrete with Coal Gangue Fine and Coarse Aggregate. *Construction and Building Materials*, **338**, Article 127626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127626>
 - [10] Duan, D., Wang, C., Bai, D. and Huang, D. (2024) Representative Coal Gangue in China: Physical and Chemical Properties, Heavy Metal Coupling Mechanism and Risk Assessment. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, **37**, Article 101402. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101402>
 - [11] Benarchid, Y., Taha, Y., Argane, R., Tagnit-Hamou, A. and Benzaazoua, M. (2019) Concrete Containing Low-Sulphide Waste Rocks as Fine and Coarse Aggregates: Preliminary Assessment of Materials. *Journal of Cleaner Production*, **221**, 419-429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.227>
 - [12] 周彦森, 刘兵兵, 孙晓静, 等. 纳米-纤维改性煤矸石地聚物混凝土力学性能研究[J/OL]. 人民长江, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20240914.1151.002.html>, 2025-04-22.
 - [13] Xu, Z., Wu, J., Zhao, M., Bai, Z., Wang, K., Miao, J., *et al.* (2022) Mechanical and Microscopic Properties of Fiber-Reinforced Coal Gangue-Based Geopolymer Concrete. *Nanotechnology Reviews*, **11**, 526-543. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0033>
 - [14] 李九阳, 陈立, 罗靖炜, 等. 混杂纤维煤矸石混凝土的宏微观性能分析[J/OL]. 矿产综合利用, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.td.20231108.1617.020.html>, 2025-04-22.
 - [15] 查文华, 张晓丽, 张文鑫, 等. 玄武岩纤维煤矸石混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2023(4): 110-114.
 - [16] 李九阳, 陈立, 胡广朝, 等. 钢纤维煤矸石混凝土劈裂抗拉强度的宏微观分析[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2023, 23(7): 145-150.
 - [17] 杨秋宁, 景严谊, 张东生. 纤维及矿物掺合料对煤矸石混凝土力学性能的改性研究[J]. 功能材料, 2022, 53(7): 7150-7156.
 - [18] 王磊, 张泽平, 张云飞, 等. 聚丙烯纤维煤矸石保温混凝土力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2019, 48(21): 1-3+15.
 - [19] 姚贤华, 郭晓宁, 韩瑞聪, 等. 纳米 SiO₂ 和聚丙烯纤维对全煤矸石骨料混凝土力学性能与微观结构的影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1402-1419.
 - [20] 李铠驿, 蔡斌. 煤矸石骨料取代率和钢纤维掺量对混凝土梁抗弯性能影响的有限元分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2022, 39(6): 5-8+26.
 - [21] 周梅, 朱涵, 汪振双. 钢纤维增强自燃煤矸石轻集料混凝土试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6): 715-720.