

粉煤灰对石墨混凝土热力学性能影响研究

王 帅 袁程浩 律 叶

(国网冀北电力有限公司工程管理分公司, 北京 100071)

【摘要】 能源桩集成了建筑桩基与地源热泵技术, 既承担建筑荷载又利用浅层地热能。本文聚焦于石墨与粉煤灰掺量对石墨混凝土强度与热物性参数的优化开展试验研究。试验结果显示, 石墨掺量为 5% 时表现出最佳效果, 石墨添加强化了传热, 但石墨的脆性结构不利于混凝土强度和致密性; 同时, 5% ~ 10% 的粉煤灰掺量不仅显著增强了混凝土的抗压强度, 还改善了混凝土的和易性与保水性; 然而随着粉煤灰掺量的继续增加, 混凝土的导热系数逐渐下降, 其中 10% 粉煤灰掺量成为导热系数变化的转折点。通过构建能源桩缩尺模型, 本研究证实了石墨-粉煤灰传热强化型能源桩能有效促进桩基埋管内循环液体的全程换热。本研究推荐石墨与粉煤灰掺量分别为 5%, 10%。

【关键词】 能源地下结构; 石墨混凝土; 粉煤灰; 传热强化; 缩尺模型

【中图分类号】 TU528

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0150

Influence of fly ash on the thermodynamic properties of graphite concrete

WANG Shuai YUAN Chenghao LÜ Ye

(Engineering Management Branch of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100071, China)

【Abstract】 Energy piles integrate building pile foundations with ground-source heat pump technology, bearing building loads while also harnessing shallow geothermal energy. This study focuses on optimizing the strength and thermophysical parameters of graphite concrete through the incorporation of graphite and fly ash. Experimental results indicate that a graphite content of 5% yields the best performance, as the addition of graphite enhances heat transfer but its brittle structure adversely affects concrete strength and density. Meanwhile, a fly ash content ranging from 5% ~ 10%, not only significantly boosts the compressive strength of the concrete but also improves its workability and water retention. However, as the fly ash content increases, the thermal conductivity of the graphite concrete gradually decreases, with a 10% fly ash content marking a turning point in this trend. Verification through the construction of a scale model of an energy pile confirms that graphite-fly ash heat transfer-enhanced energy piles can effectively facilitate heat exchange throughout the circulating fluid within the embedded pipes of the pile foundation. This study recommends a graphite content of 5% and a fly ash content of 10%.

【Key words】 energy pile; graphite concrete; fly ash; heat transfer enhancement; scale model

0 引言

我国建筑能耗在全国能源消耗总量中的占比高达 45.5%, 其中用于建筑运行的能耗占比近 21.3%^[1]。中国地热能发展报告显示, 中国大陆 336 个主要城市浅层地热资源开发潜力巨大^[2]。地源热泵技术作为受国家政策支持的一种新型节能环保技术得到了广泛的推广应用^[3], 而能源地下结构通过将建筑桩基与地源热泵技术相结合, 在有效节省地下空间资源的同时, 还能充分利用地热能资源, 用于室内冬季供暖及夏季制冷^[4]。当前对能源地下结构理论计算模型的研究主要集中于如何提高其传热性能, 具体应用是

通过优化换热管形式^[5-6]、改进管内流体^[7-8]等方法实现, 但其提升效果十分有限^[9]。通过增强桩体材料传热性能成为新的研究热点, 现有研究者开展了系列探究, 提出掺入适量的相变材料^[10]、钢纤维^[11]、碎屑橡胶^[12]、SiC^[13] 以及各类复合材料^[14-15] 等制备改性混凝土, 获得了保证力学性能的同时增强导热性能的结论, 但所用材料成本较高, 导致难以实现工业化。调研发现, 石墨作为导热性能强、化学稳定性良好且原料丰富、价格便宜的耐高温材料, 其应用于混凝土可提升导热性能, 但强度随添加量增加逐渐下降^[16]。孙小巍等^[17] 发现石墨掺量增加使蒸压加气混凝土孔隙总面

积、孔隙率及平均孔径增大,导致蒸压加气混凝土干密度和抗压强度下降。冯溪源^[18]研究表明石墨烯加入混凝土能够提升其导热系数。Liu 等^[19]研究表明石墨的添加导致混凝土产生裂纹,对力学强度产生不利影响。赵燕茹等^[20]验证了石墨类材料的加入可促进混凝土的导电性能,但会造成混凝土基体内部出现孔洞和微裂缝。屈春来等^[21]、张 雷等^[22]均获得了类似的结论。基于此,本研究拟添加一种在提升混凝土强度的同时,不影响其导热性能的低成本材料。

关于粉煤灰对混凝土的各类性能的影响已有比较成熟的研究。罗小博等^[23]、董 越等^[24]用粉煤灰制备混凝土与充填体,对其各项力学性能指标进行测试。鲁丽华等^[25]验证了在混凝土中掺入粉煤灰可以改善其和易性、泌水性和耐久性,还会影响其抗压强度。曹润倬等^[26]探究了超高性能混凝土掺入超细粉煤灰后各项性能的响应,研究成果揭示超细粉煤灰能够增强超高性能混凝土的流动特性,并提升其微观结构的紧密度。张志刚等^[27]得到高掺量粉煤灰有利于亚高温下高延性混凝土的拉伸力学性能的结论。以上结论为粉煤灰改善石墨混凝土的性能提供了可靠依据。但上述研究主要关注粉煤灰对混凝土力学性能、工作性能、耐久性等的的影响,对于石墨混凝土在

能源地下结构中的导热强化作用缺乏深入研究。因此,亟需进一步探究粉煤灰掺量对石墨混凝土导热性能的具体影响,以及如何通过优化掺合料配比来提高其导热效率。综上所述,本研究拟开展石墨混凝土导热强化试验,探究最佳石墨掺量作为对照组,在石墨混凝土的基础上掺入不同量的粉煤灰替代水泥,以探究粉煤灰掺量对石墨混凝土的强度与热物性参数的影响。进一步,拟通过搭建能源桩缩尺模型,可视化该传热强化型混凝土的实际换热效能,为粉煤灰-石墨混凝土应用于能源地下结构提供一定的参考。

1 试验材料及方案

1.1 材料选用与测试设备

试验的材料及方案如图 1 所示。石墨混凝土原材料:选取天然河砂作为细集料,细度模数为 2.6,堆积密度 $1.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,含水率为 3%;选取砂石作为粗集料,粒径在 15 ~ 20 mm,连续级配且无针状和片状石块,石子密度 $2.72 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,含水率为 4%;石墨采用 32 目大鳞片石墨粉,含碳量 99%;水泥采用 P-O 42.5 水泥;减水剂采用聚羧酸高效减水剂(母液型,主要成分为 HPEG 丙烯酸),减水率达到 28%,含气量 3.0%,氯离子含量为 0.01%。

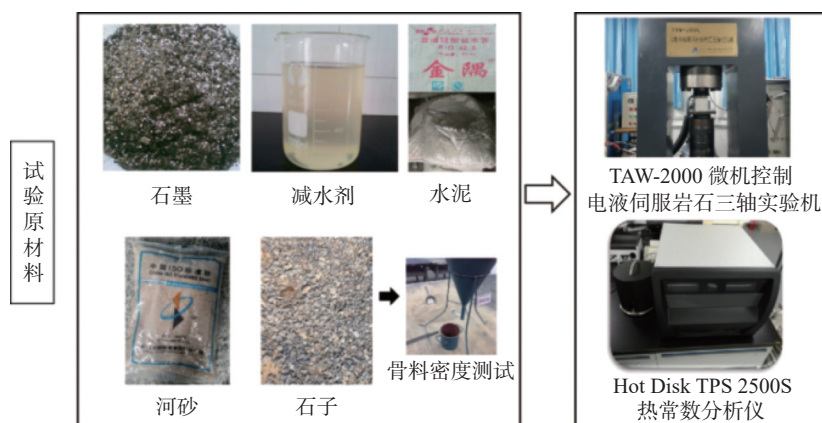


图 1 试验方案

Fig. 1 Experimental design

力学性能测试方法参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),试验压力机为 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机,加载速率为 0.06 mm/min。导热系数测量采用 HOT-DISK-TPS 2500S 热常数分析仪,使用聚酰亚胺覆膜探头。

1.2 配比设计

试验配制 C40 的混凝土,基于《普通混凝土设计规程》(JGJ 55—2011)中的设计方法,结合石墨混凝

土工作性能要求,选用坍落度为 55 ~ 70 mm 的配合比进行设计,选定水胶质量比为 0.41,将石墨作为细骨料部分替代砂子,设置 4 组不同质量含量(0%, 2%, 5%, 8%)的石墨进行试验。依据《混凝土外加剂应用技术规程》(GB 50119—2013)^[28],采用聚羧酸系高性能减水剂,经净浆流动度试验确定最佳掺量,将母液与水充分混合之后再倒入水泥砂子中进行搅拌。最终配合比如表 1 所示。

表 1 石墨混凝土试块配合比
Tab. 1 Graphite concrete specimen mix proportions

石墨质量比/%	水泥/g	砂/g	碎石/g	水/g	石墨/g	减水剂/g
0	500	559	1136	205	0	25
2	500	514	1136	205	45	25
5	500	446.5	1136	205	112.5	25
8	500	379	1136	205	180	25

1.3 试块制备

将石墨、砂与水泥拌匀后,加入减水剂溶液继续搅拌,待出浆后掺入碎石及剩余水继续搅拌。新拌混凝土通过坍落度测试后,装入模具捣实、填补,最终刮平成型,静置 24 h 后拆模,放入标准恒温恒湿养护箱。试块规格为边长 100 mm 正方体,石墨混凝土制备试块照片如图 2 所示。此外,测量导热系数的试块采用电导率试模浇筑,圆柱体尺寸为 $\phi 10 \times 5$ cm。

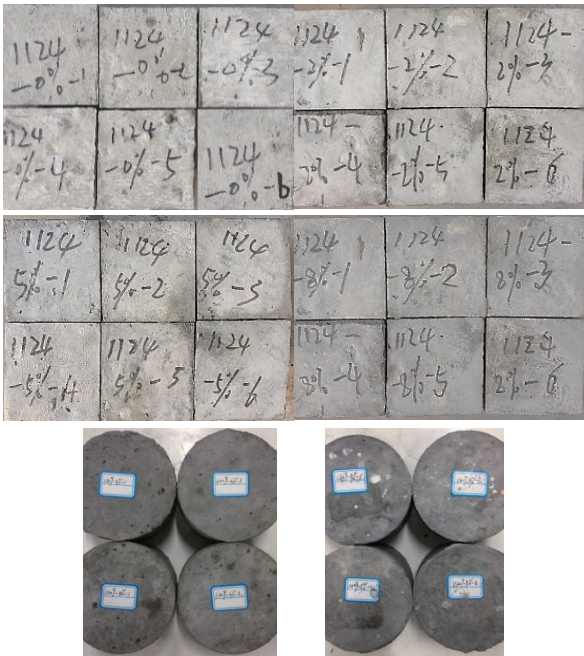


图 2 不同石墨含量混凝土试块
Fig. 2 Concrete specimens with different graphite content

2 石墨混凝土试验结果

对石墨掺量为 0%, 2%, 5%, 8% 的混凝土试样进行 28 d 抗压强度与导热系数测试试验,根据测量数据得到二者变化趋势如图 3 所示。

由试验结果可知,与基准组相比,8% 石墨混凝土强度衰减较为严重,下降量趋近 50%。而随着石墨添加量的增加,混凝土的导热性能不断增强,呈现“加速上升”趋势。8% 添加量的石墨混凝土导热系数为 2.73 W/(m·K)。根据曲线可知石墨掺量在 5% 时抗压强度下降 23%,导热性能增长显著,但继续增

大添加量时抗压强度太低,因此选择 5% 石墨添加量的方案开展下一步探究。

本试验采用 VHX5000 超景深显微镜观察拍摄石墨含量 8% 试样截面。图 4(a)、图 4(b)分别是 200 和 500 倍率下试样截面照片。200 倍率下可清楚观察到石墨通道的存在,可观察到 A, B, C, D, E 五个区域(红圈标注)内的石墨粉在细骨料及水泥水化产物形成的缝隙充分填充,石墨颗粒之间的距离随着石墨量的增多越来越小,近似形成连续互相搭接的结构。放大 A 通道,得到 500 倍率下的微观图,此时石墨在高倍率灯光下呈现明显金属光泽且明显反光,连续的石墨粉颗粒在水泥水化产物中形成连续的石墨通道。

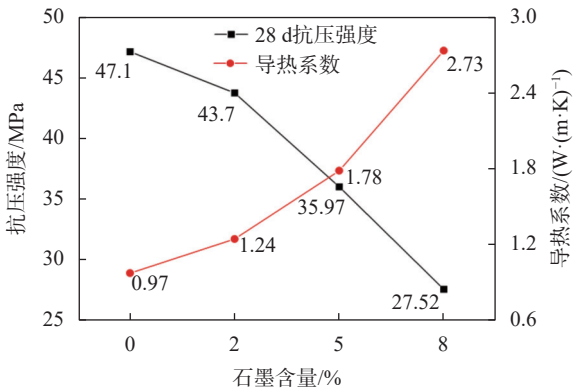


图 3 石墨混凝土导热系数与抗压强度正交曲线
Fig. 3 Orthogonal curve of thermal conductivity versus compressive strength for graphite concrete

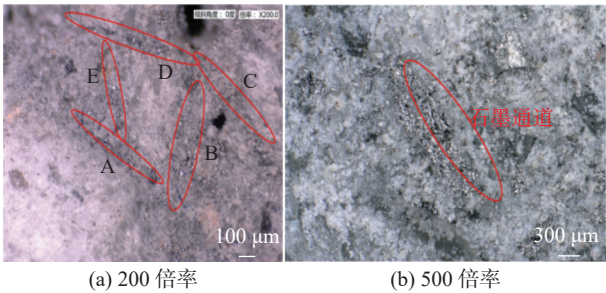


图 4 200 和 500 倍率下试样截面照片
Fig. 4 Photographs of the specimen cross-section at 200× and 500× magnification

为了更加直观地观察石墨通道立体图,利用超景深显微镜自带的景深合成算法,对图 4(a)的通道

进行三维立体合成,如图 5 所示。混凝土中不同材料热导率差异较大,在传热强化型石墨混凝土中,石墨导热系数与导热能力远远强于混凝土水泥基体材料,混凝土热传递同样遵循串联热阻原则,当混凝土中石墨含量较少时,在充分搅拌的情况下石墨颗粒互相分散,对传热提升的效果不明显。微观图像显示,石墨超过一定添加量后,其在试样中形成连续搭接通道,有效降低了热阻,显著提升了混凝土的整体导热性能。但是石墨作为脆性的片状结构,在混凝土中大量存在时也使得细微孔隙增多,密度较砂子更小,使得混凝土整体密度下降。综上所述,石墨通道的存在一方面使得传热快速强化,但另一方面,其对强度与和易性的不利影响不容忽视。

3 粉煤灰改性石墨混凝土

为兼顾石墨混凝土的导热性与力学性能,本文

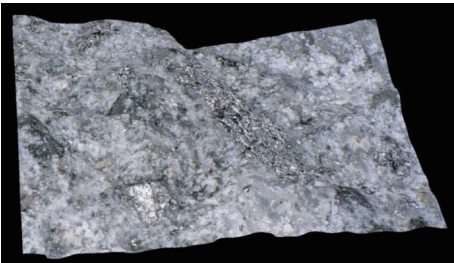


图 5 混凝土石墨通道三维立体图
Fig. 5 Three-dimensional diagram of graphite channels in concrete

引入粉煤灰作为掺合料,探索其对石墨混凝土性能的协同调控效应。基于以上石墨混凝土的试验结论,拟添加粉煤灰制备粉煤灰-石墨混凝土,开展其强度与热物性影响探究。选用 5% 石墨组作为空白组,用粉煤灰替换一定比例的水泥(5%, 10%, 15%, 20%)制备粉煤灰-石墨混凝土试块。配合比设计如表 2 所示。

表 2 粉煤灰-石墨混凝土设计配合比
Tab. 2 Design mix proportions for fly ash-graphite concrete

粉煤灰质量比/%	水泥/g	砂/g	碎石/g	水/g	石墨/g	粉煤灰/g	减水剂/g
0	500	446.5	1136	205	112.5	0	25
5	475	446.5	1136	205	112.5	25	25
10	450	446.5	1136	205	112.5	50	25
15	425	446.5	1136	205	112.5	75	25
20	400	446.5	1136	205	112.5	100	25

制备试块步骤与石墨混凝土类似,此次试验每组配比制备 12 个试样,分成 4 批试块,分别测量 7, 28, 60 d 强度与导热系数,取三次平均值为最终结果。部分试块照片见图 6。



图 6 不同粉煤灰含量的石墨混凝土试块
Fig. 6 Graphite concrete specimens with different fly ash contents

3.1 强度测试

测得的单轴抗压强度如图 7 所示,由于粉煤灰前

期水化反应慢,水泥被取代得越多,早期强度就越低。为展示数据的离散程度,图中添加了误差条以表示标准差。从图中可以看出,所有试验数据的标准差均介于 0.5 ~ 1.5,表明试验结果具有良好的重复性和较高的可信度。后期粉煤灰水化反应加快,强度有所上升。粉煤灰本质是在一定的激发条件下形成的玻璃

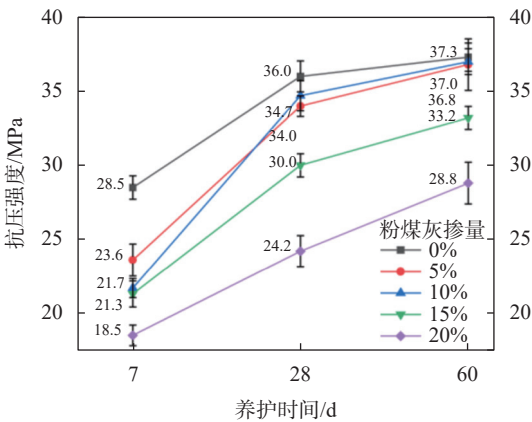


图 7 粉煤灰石墨混凝土不同龄期强度曲线
Fig. 7 Strength curves of fly ash graphite concrete at different ages

体状态的 SiO_2 和 Al_2O_3 , 由于水泥的水化速度明显快于粉煤灰, 因此粉煤灰掺入水泥会导致混凝土的早期强度大幅下降。然而, 粉煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 与硅酸盐水泥反应的主要产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应, 在水泥石 C-S-H 硬化后的孔隙内形成水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶, 显著减少了混凝土的孔隙率, 提高了水泥石的致密性^[29-30]。因此, 尽管粉煤灰混凝土的早期强度通常较低, 但随着时间的推移, 后期强度逐渐增加。

7~28 d 时 5% 与 10% 试块组的抗压强度增长迅速, 60 d 时 5% 与 10% 试块组的抗压强度已接近空白组, 预期后期粉煤灰混凝土强度还将进一步增长。粉煤灰含量超过 15% 时, 试块强度发展过慢且 60 d 强度较低, 因此确定粉煤灰合理掺量范围为 5% ~ 10%。试验过程中实测坍落度及保水性记录见表 3, 坍落度筒提起后无稀水泥浆或仅有少量稀水泥浆自底部析出, 表明混凝土拌合物保水性良好。坍落度筒提起后如有较多的稀浆从底部析出, 锥体部分的混凝土也因失浆而集料外露, 则表示此新拌混凝土的保水性不好。

表 3 粉煤灰石墨混凝土坍落度及保水性试验表
Tab. 3 Slump and water retention tests for fly ash-graphite concrete

水胶质量比	粉煤灰掺量/%	坍落度/mm	保水性
0.41	0	61	差
0.41	5	80	一般
0.41	10	92	一般
0.41	15	104	好
0.41	20	115	好

试验数据验证了粉煤灰作为添加剂在石墨混凝土制备过程中的积极效应。具体而言, 粉煤灰的掺入显著改善了石墨混凝土在拌合阶段的和易性, 这一关键性能的提升对于确保施工过程中的操作便利性和混凝土质量至关重要。和易性的改善主要得益于粉煤灰颗粒的细小特性, 这些微小颗粒在拌和过程中能够充分发挥其形态效应, 有效减少了混凝土中粗集料、细集料以及外掺料等不同组分间的摩擦阻力。这一效应促进了混凝土内部各组分的均匀分布, 使得混凝土的流动性得以增强, 即坍落度显著增大, 这对于维持混凝土工作性的稳定具有重要意义。在混凝土制备和施工过程中, 坍落度的保持是确保混凝土质量的关键因素之一。粉煤灰通过其微观填充效应和一定的化学反应活性, 能够减缓混凝土内部水分的蒸

发和化学反应导致的坍落度降低, 从而保持混凝土良好的工作性。

针对石墨混凝土特有的泌水和离析问题, 粉煤灰同样展现出了显著的改善效果。石墨颗粒因其较大的比表面积且不参与水泥的水化反应, 往往会导致混凝土内部水分分布不均, 处理不当便会出现泌水现象。粉煤灰的掺入, 通过增加浆体量和改善浆体的黏聚性, 有效缓解了这一问题。粉煤灰的形态效应使得更多的水泥浆体均匀包裹在石墨颗粒和其他集料周围, 增强了混凝土的保水性, 从而在宏观上显著提升了混凝土的稳定性和耐久性。综上所述, 粉煤灰的加入不仅通过其物理和化学作用优化了石墨混凝土的和易性和坍落度保持性, 还有效减少了泌水和离析现象, 为石墨混凝土在实际工程中的应用提供了更加可靠的性能保障。这一研究成果对于推动石墨混凝土技术的进一步发展具有重要意义。

3.2 导热测试

试验测得的导热系数结果如图 8 所示。随着粉煤灰掺量的逐步增加, 石墨混凝土的导热系数呈现出整体的下降趋势。在不同粉煤灰掺量(0%, 5%, 10%, 15%, 20%)条件下, 混凝土的导热系数分别为 1.88, 1.89, 1.85, 1.73, 1.49 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 对应的标准差为 0.16, 0.13, 0.15, 0.10, 0.13, 均在 0.10 ~ 0.16, 波动较小, 表明试验数据具有良好的稳定性与较强的可信度。具体而言, 当粉煤灰掺量在 10% 及以下时, 导热系数的变化相对平缓, 表明在这一掺量范围内, 粉煤灰对石墨混凝土导热性能的影响较为有限。然而, 一旦粉煤灰掺量超过 10%, 导热系数的下降速度明显加快, 显示出粉煤灰掺量增加对石墨混凝土导热性能的显著削弱作用。这一结论与曹国举等的研究结果高度一致^[31], 进一步验证了粉煤灰掺量对石墨混凝土导热性

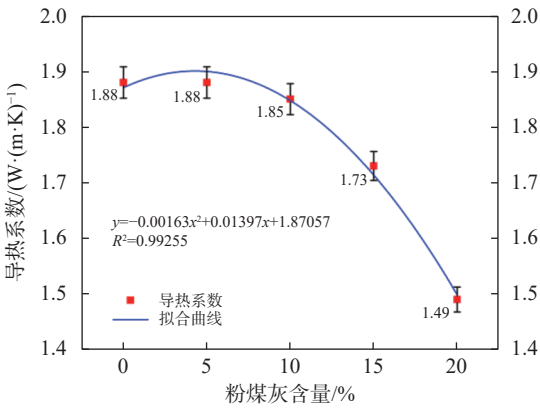


图 8 不同粉煤灰掺量下石墨混凝土导热系数
Fig. 8 Thermal conductivity of graphite concrete at different fly ash content levels

能影响的规律性。粉煤灰、矿渣等外掺料与水泥石相比,其导热系数显著降低。因此,在替换超过一定掺量(本研究中为 10%)的水泥后,石墨混凝土的导热系数会出现明显的衰减。对于需要高导热性能的能源桩而言,这种导热系数的下降会产生一定的负面作用,影响热交换效率。

在综合考虑石墨混凝土的强度需求和换热效果的基础上,本研究提出了一个合理的掺量推荐。具体而言,石墨掺量保持在 5%,而粉煤灰掺量推荐为 10%。这一掺量组合旨在平衡石墨混凝土的导热性能、力学性能和成本效益,为能源桩等特定应用场景提供性能优异且经济可行的材料解决方案,本研究为石墨混凝土在实际工程中的应用提供了数据支持和理论指导。

3.3 传热强化型能源桩室内模拟试验验证

鉴于该传热强化型混凝土应用于实际工程的局限性,为探究其对能源地下结构换热效率的影响,搭建了能源桩室内模型进行试验。试验系统由模型箱、温控水箱及两类试验桩构成(见图 9)。模型箱中共埋设有两根尺寸相同的试验桩,分别为普通能源桩与石墨-粉煤灰的传热强化型能源桩,环境温度为 18℃ 左右。试验桩内部换热管采用螺旋型埋管形式,螺距 3 cm,管内径 1 cm,通过埋管与温控水箱循环泵形成闭环热交换系统。桩体内部设置 4 根竖向主筋与多根环形箍筋,螺旋盘管沿骨架外缘布设,并通过热敏电阻实现温度监测,布置情况见图 10。



图 9 能源桩模型试验实物图
Fig. 9 Physical model of energy pile test

取能源桩中部位置的温度扩散曲线为例,如图 11 所示。在循环介质初始温度为 32℃ 的条件下,传热强化型能源桩在与土体热交换达到稳定状态后,展现出更高的桩周土体温度,这表明其在运行过程中释放了更多的热量。进一步地,通过对比距能源桩中心轴 45 cm 处土体的温度,发现普通能源桩处该位置的温度更接近初始值,从而印证了传热强化型能源桩释放的热量在土体中具有更广泛的扩散范围,能够有效提升热交换的覆盖面积和效率。通过对能源桩

材料的优化,特别是加入石墨-粉煤灰这一复合材料,本研究发现其能够显著提升能源桩的传热性能。石墨因其优异的导热性能,而粉煤灰则通过其形态效应和微观结构特性,共同作用于能源桩内部循环液体的换热过程,有效提高了热交换效率。该试验验证了新型复合材料的实际换热效能,为推动粉煤灰-石墨混凝土在建筑节能与浅层地热利用中的规模化应用提供了理论依据与实践基础,也为实际工程中提高地热能的开发利用效率提供了技术支持。

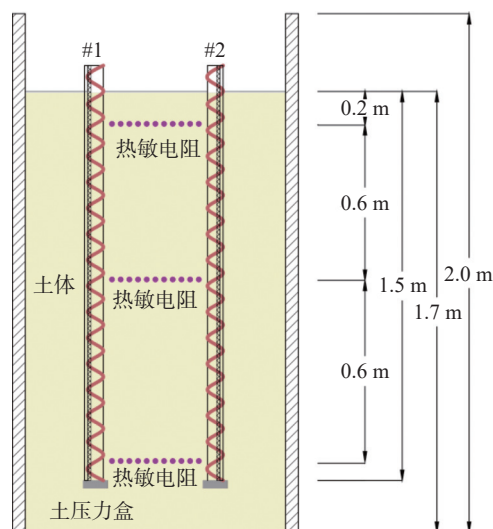


图 10 传热强化模型试验热敏电阻的布设情况示意图
Fig. 10 Schematic diagram of thermistor placement in model test for heat transfer enhancement

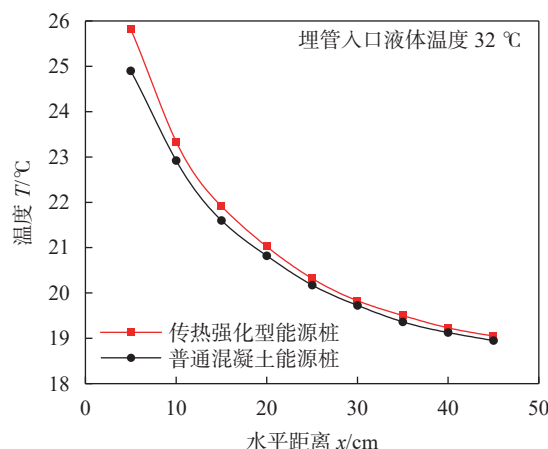


图 11 管内液体温度 28℃, 传热强化型能源桩与普通能源桩-土温度扩散曲线对比

Fig. 11 Comparison of temperature diffusion curves between enhanced heat transfer energy piles and conventional energy piles at a liquid temperature of 28℃ inside the pipe

4 结论

本研究基于能源地下结构桩体材料的传热强化以提升其换热效率,基于石墨混凝土最佳石墨掺量,引入不同掺量(0%, 5%, 10%, 15%, 20%)的粉煤灰制

备粉煤灰-石墨混凝土,并开展一系列热学、力学试验以及室内缩尺模型试验,得到以下结论:

(1)根据掺量 0%, 2%, 5%, 8% 的石墨混凝土 28 d 抗压强度与导热系数测试结果的正交曲线可知,石墨掺量在 5% 时近似达到曲线的交点,此时导热系数增长近两倍、强度下降 23%,同时满足强度及导热性能的要求。8% 石墨试样截面的微观形貌表明,石墨通道的形成强化了传热效果,但石墨的脆性结构对混凝土强度和密度的不利影响。

(2)粉煤灰-石墨混凝土 7, 28, 60 d 抗压强度结果显示,早期强度普遍偏低,后期强度将越来越高。粉煤灰合理掺量为 5%~10%。粉煤灰的加入可改善石墨混凝土拌合时的和易性,可抑制混凝土坍落度的损失,减少混凝土泌水与离析现象。

(3)粉煤灰-石墨混凝土导热系数测试结果表明,随着粉煤灰掺量的增加,石墨混凝土导热系数逐步降低。相较于未掺粉煤灰的石墨混凝土,在 10% 掺量下导热系数变化基本不大,超过 10% 掺量后导热系数下降较快。考虑强度需求与换热效果,本研究推荐石墨、粉煤灰掺量分别为 5%, 10%。

(4)通过室内搭建能源桩缩尺模型,对比传热强化型能源桩与普通混凝土能源桩传热试验数据,发现传热增强型能源桩能更有效地将热量传递至周围土体。证实了加入石墨-粉煤灰复合材料可以提升能源桩的传热性能,提高桩基内部循环液体在整个换热过程中的热交换效率。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J]. 建筑, 2024(2): 46-59. (Research report on energy consumption and carbon emissions of buildings in China (2022)[J]. Architecture, 2024(2): 46-59. (in Chinese))
- [2] 周博睿. 我国地热能开发利用现状与未来趋势[J]. 能源, 2022(2): 77-80. (ZHOU B R. Current status and future trends of geothermal energy development and utilization in China[J]. Energy, 2022(2): 77-80. (in Chinese))
- [3] 袁年侠, 张春枝. 国内土壤源热泵技术研究成果综述[J]. 建筑节能, 2017, 45(8): 119-124. (YUAN N X, ZHANG C Z. Summary of the research results of ground-source heat pump technology in China[J]. Building Energy Efficiency, 2017, 45(8): 119-124. (in Chinese))
- [4] 温继伟, 侯珺洸, 刘星宏, 等. 能源地下结构研究及应用进展[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 119-130. (WEN J W, HOU J L, LIU X H, et al. Research and application progress of energy underground structures[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 119-130. (in Chinese))
- [5] 赵 蕾, 高 林, 张 爽, 等. 不同埋管形式能量桩换热性能与承载性能的对比研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 81-90. (ZHAO L, GAO L, ZHANG S, et al. Exploration of the thermo-mechanical features of energy piles in regard to the different types of buried pipes[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 81-90. (in Chinese))
- [6] HARIDY S, ALNAQBI K, RADWAN A, et al. Optimizing the thermal performance of energy piles using response surface methodology[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 41: 102637.
- [7] BARUA H, SINAKI M Y, FARHAD S. Study on geothermal heat exchangers with nanofluids containing ceramic nanoparticles[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2023, 15(1): 011008.
- [8] 李 贵, 韩宗伟, 杨灵艳, 等. 地埋管流体速度对地源热泵系统运行性能影响研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(10): 1334-1339. (LI G, HAN Z W, YANG L Y, et al. Study on the influence of buried pipes fluid velocity on the operation performance of ground source heat pump system[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(10): 1334-1339. (in Chinese))
- [9] 汤 场, 刘干斌, 周 晔, 等. 循环温度荷载作用下相变能源桩的传热性能研究[C]//桩基工程技术进展 2021. 杭州: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会, 2023: 248-254. (TANG Y, LIU G B, ZHOU Y, et al. Investigation on thermal characteristics of phase change pile under cyclic temperature loads[C]//Advances in Pile Foundation Engineering 2021. Hangzhou: Chinese Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Technical Committee on Foundation of China Association for Engineering Construction Standardization, 2023: 248-254. (in Chinese))
- [10] 陆 江, 瞿铭良, 田帅奇. 相变微胶囊/加气混凝土复合材料的热工性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 341-346, 363. (LU J, QU M L, TIAN S Q. Thermal performances of micro-encapsulated phase change materials/aerated concrete composite materials[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 341-346, 363. (in Chinese))
- [11] 何文昌, 孔祥清, 周 聪, 等. 钢纤维再生混凝土力学性能和微观结构研究[J]. 混凝土, 2020(12): 44-49. (HE W C, KONG X Q, ZHOU C, et al. Investigation on mechanical properties and microstructure of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. Concrete, 2020(12): 44-49. (in Chinese))

- [12] BEIRAM A A H, AL-MUTAIREE H M K. The effect of chip rubber on the properties of concrete[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 60: 1981-1988.
- [13] 尹 雅, 李庆文, 乔 兰, 等. SiC 对能源桩混凝土传热与力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37(10): 21060198. (YIN Y, LI Q W, QIAO L, et al. Effect of SiC on the heat transfer and mechanical properties of energy pile concrete[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(10): 21060198. (in Chinese))
- [14] REN X, DING Y X, LIU Q F, et al. Effect of different volume fraction of steel fiber/graphite on thermal conductivity and compressive properties of concrete[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 1003830.
- [15] CUI H Z, ZOU J P, GONG Z, et al. Study on the thermal and mechanical properties of steel fibre reinforced PCM-HSB concrete for high performance in energy piles[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 128822.
- [16] 隋智力, 赵春雷, 李庆文, 等. 基于石墨混凝土的能源桩传热特性强化研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2021, 46(1): 83-88. (SUI Z L, ZHAO C L, LI Q W, et al. Study on heat transfer enhancement of energy pile based on graphite concrete[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2021, 46(1): 83-88. (in Chinese))
- [17] 孙小巍, 张雯琪, 杨 林, 等. 石墨尾矿蒸压加气混凝土性能研究 [J]. 非金属矿, 2022, 45(5): 92-96. (SUN X W, ZHANG W Q, YANG L, et al. Study on properties of graphite tailings autoclaved aerated concrete[J]. *Non-Metallic Mines*, 2022, 45(5): 92-96. (in Chinese))
- [18] 冯溪源. 石墨烯混凝土能源桩体材料性能及其热力耦合作用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024. (FENG X Y. Study on material properties and thermodynamic coupling of graphene concrete energy pile[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese))
- [19] LIU H B, XUE J, LI B, et al. Effect of graphite tailings as substitute sand on mechanical properties of concrete[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(7): 2635-2653.
- [20] 赵燕茹, 姚 波, 魏 迪, 等. 石墨类导电混凝土电阻率及导电机理分析 [J]. 功能材料, 2024, 55(3): 3150-3158. (ZHAO Y R, YAO B, WEI D, et al. Analysis of resistivity and conductive mechanism of graphite conductive concrete[J]. *Journal of Functional Materials*, 2024, 55(3): 3150-3158. (in Chinese))
- [21] 屈春来, 薛少欣, 辛 悦, 等. 石墨对混凝土导热系数及抗压强度影响规律分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 243-248. (QU C L, XUE S X, XIN Y, et al. Analysis of the influence of graphite on the thermal conductivity and compressive strength of concrete[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(13): 243-248. (in Chinese))
- [22] 张 雷, 李旭阳. 能源桩石墨混凝土强化传热特性研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2025, 54(10): 157-162. (ZHANG L, LI X Y. Research on enhanced heat transfer characteristic of graphite concrete in energy pile[J]. *Construction Technology*, 2025, 54(10): 157-162. (in Chinese))
- [23] 罗小博, 宋 彧, 郭启明, 等. 粉煤灰掺量对混凝土力学性能影响的试验研究 [J]. 混凝土, 2021(8): 88-90, 95. (LUO X B, SONG Y, GUO Q M, et al. Experimental study of influence of the mechanical behavior about fly ash content on concrete[J]. *Concrete*, 2021(8): 88-90, 95. (in Chinese))
- [24] 董 越, 杨志强, 高 谦, 等. 粉煤灰掺量对铁尾砂充填材料性能的影响 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2018, 43(1): 219-225. (DONG Y, YANG Z Q, GAO Q, et al. Effect of fly ash content on properties of backfilling materials prepared with iron tailings[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2018, 43(1): 219-225. (in Chinese))
- [25] 鲁丽华, 潘桂生, 陈四利, 等. 不同掺量粉煤灰混凝土的强度试验 [J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(1): 107-111. (LU L H, PAN G S, CHEN S L, et al. Strength of concrete with different contents of fly ash[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2009, 31(1): 107-111. (in Chinese))
- [26] 曹润倬, 周茗如, 周 群, 等. 超细粉煤灰对超高性能混凝土流变性、力学性能及微观结构的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2684-2689. (CAO R Z, ZHOU M R, ZHOU Q, et al. Effect of ultra-fine fly ash on rheological properties, mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(16): 2684-2689. (in Chinese))
- [27] 张志刚, 赵 林, 张 沛, 等. 亚高温下不同粉煤灰掺量高延性混凝土的力学性能 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50(5): 831-836. (ZHANG Z G, ZHAO L, ZHANG P, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites with different fly ash contents at sub-elevated temperature[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(5): 831-836. (in Chinese))
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土外加剂应用技术规程: GB 50119—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for

- concrete admixture application: GB 50119—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [29] SHAIKH F U A, SUPIT S W M. Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles[J]. [Construction and Building Materials](#), 2015, 99: 208-225.
- [30] 涂永明, 刘东运, 张 雨. 提升粉煤灰混凝土抗碳化性能试验研究 [J]. [东南大学学报 \(自然科学版\)](#), 2020, 50(4): 599-605. (TU Y M, LIU D Y, ZHANG Y. Experimental study on boosting carbonation resistance of fly ash concrete[J]. [Journal of Southeast University \(Natural Science Edition\)](#), 2020, 50(4): 599-605. (in Chinese))
- [31] 曹国举, 宫经伟, 马 利, 等. 不同温度条件下混凝土导热系数影响因素研究 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12): 144-150. (CAO G J, GONG J W, MA L, et al. Influence factors of thermal conductivity of concrete under different temperature conditions[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2019, 36(12): 144-150. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-01