

论工业固废基复合地基技术在大面积软地基处理中的应用研究

——以煤气化渣为例

张光辉 陈治刚

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 宁夏 银川 750021

摘要：针对宁东地区煤化工产业大量堆存的煤气化渣等工业固废资源化利用难题，结合大型煤化工项目普遍面临的软土地基处理需求，本文提出一种基于煤气化渣的新型复合地基处理技术。通过室内试验、现场试验工程及长期监测，系统评估了该技术在承载力提升、沉降控制、环境安全性及经济性方面的综合性能。

研究表明：采用3：7气化渣-土复合材料填筑地基，压实度 $\geq 93\%$ ，可实现地基承载力特征值达152kPa，工后总沉降控制在185mm以内，差异沉降小于2%，满足工业建筑地基设计要求。同时，固废资源化利用率超过80%，单位面积处理成本较传统碎石桩和CFG桩分别降低约30%和55%。通过设置双层石灰土-黏土防渗体系并布设长期环境监测网络，有效阻隔了重金属等潜在污染物的迁移路径，地下水与土壤质量持续稳定，符合国家环保标准。与传统复合地基技术（如碎石桩、CFG桩）相比，该技术在资源节约、低碳排放、施工效率和综合效益方面具有显著优势，为工业固废大宗化、高值化利用与软土地基绿色处理提供了创新路径。研究成果可为类似工业园区、矿区及沿海软土地区的地基处理工程提供理论支撑与实践范式。

关键词：煤气化渣；复合地基；软土地基；固废资源化；环境安全性；绿色建造

引言：随着我国煤化工产业的快速发展，宁东能源化工基地已形成年处理煤炭千万吨级的产业集群。伴随而来的，是煤气化渣、粉煤灰等工业固废的大规模产生。据不完全统计，截至2024年，宁东地区累计堆存工业固废逾2亿吨，其中煤气化渣占比超过40%，长期堆存不仅占用大量土地资源，还存在扬尘、渗滤液污染等生态环境风险，已成为制约区域可持续发展的突出瓶颈。与此同时，新建煤化工厂区多位于黄河冲积平原或低洼地带，普遍存在深厚软土层（如淤泥质土、粉质黏土），天然地基承载力低（普遍 $< 100\text{kPa}$ ）、压缩性高、沉降大，难以满足大型装置基础、重型储罐及长距离管廊的承载与变形控制要求。传统地基处理方式如换填、预压、碎石桩、CFG桩等虽技术成熟，但普遍存在材料消耗大、碳排放高、施工周期长、成本高昂等问题，难以适应现代绿色低碳发展的战略需求。在此背景下，探索“以废治地、变废为宝”的技术路径，将工业固废转化为地基工程材料，实现“环境治理—资源利用—工程安全”三位一体协同发展，已成为当前岩土工程与循环经济领域的研究热点与实践方向。本文基于宁东煤制油项目实际工程背景，提出以煤气化渣为主要骨料的复合地基处理技术，通过材料配比优化、施工工艺

控制、防渗体系设计与长期性能监测，系统验证其在大面积软土地基处理中的可行性与优越性，旨在为工业固废资源化与绿色建造提供可复制、可推广的技术方案。

1 复合地基的基本原理与分类

1.1 复合地基的定义与特点

（1）复合地基的组成与荷载传递机制：复合地基由天然地基土和增强体两部分组成，通过两者协同工作承担上部荷载。荷载传递时，上部结构荷载先作用于基础，再由基础传递至增强体和周围地基土。增强体通过置换、挤密、排水等作用提高地基承载力，荷载在两者间的分配取决于刚度差异，通常增强体承担更多荷载，再通过侧面摩擦或端承向地基深处传递。

（2）复合地基与桩基础的区别：复合地基中增强体与地基土共同承担荷载，基础直接与地基土接触；桩基础中桩体是主要受力构件，基础通常不与桩间土直接传递荷载。此外，复合地基中增强体刚度相对较低，桩基础中桩体刚度较高，且复合地基处理范围一般为基础底面以下一定深度，桩基础桩体可延伸至更深的硬土层。

1.2 复合地基的分类

（1）按增强体方向分类：纵向增强体复合地基的增强体呈竖向或斜向布置，如碎石桩、水泥土桩等，通过

竖向受力提高地基性能；横向增强体复合地基的增强体呈水平方向分布，如土工格栅、加筋土垫层等，主要通过约束地基土侧向变形发挥作用。

（2）按增强体性质分类：散体材料桩复合地基以碎石、砂等散体材料形成桩体，依靠桩体挤密和排水作用增强地基；柔性桩复合地基采用水泥土、石灰土等材料，桩体刚度较低，与地基土协同变形能力强；刚性桩复合地基则使用钢筋混凝土等刚性材料，桩体刚度大，能显著提高地基承载力，减少沉降^[1]。

2 复合地基处理大面积软地基的技术与方法

2.1 碎石桩复合地基

（1）碎石桩的施工工艺与加固机理：碎石桩施工常用振动沉管法、冲击成孔法等。振动沉管法通过振动锤将沉管沉入土中，拔出沉管后填入碎石，再通过振动挤压使碎石密实成桩。其加固机理主要包括置换作用（碎石桩置换软土，形成刚度更高的复合地基）、排水固结作用（碎石桩作为排水通道，加速软土孔隙水排出，促进地基固结）和挤密作用（施工时振动挤压周围土体，提高土体密实度）^[2]。

（2）碎石桩在处理大面积软地基中的应用案例：某沿海工业园区占地约200万平方米，地基为深厚淤泥质土。采用直径500mm的碎石桩，桩长8-12m，等边三角形布置，间距1.5-2.0m。处理后地基承载力特征值从80kPa提升至150kPa，工后沉降控制在200mm以内，成功满足厂房与道路建设要求^[3]。该案例中，碎石桩通过排水与置换协同作用，有效解决了大面积软土地基的沉降与承载力问题。

2.2 CFG桩复合地基

（1）CFG桩的构造特点与承载机理：CFG桩（水泥粉煤灰碎石桩）由水泥、粉煤灰、碎石、砂等材料加水拌合而成，桩体强度较高（28天立方体抗压强度为10-25MPa），介于柔性桩与刚性桩之间。其构造特点是桩顶通常设置褥垫层，协调桩与桩间土的变形。承载机理表现为桩体承担主要荷载（通过侧摩阻力和端承力传递），褥垫层使桩间土参与受力，形成桩-土协同工作的复合地基。

（2）CFG桩复合地基的设计与施工要点：设计时需根据上部荷载确定桩长、桩径（常用400-600mm）、桩间距（1.5-3.0m）及褥垫层厚度（100-300mm，材料多用砂石），通过复合地基承载力验算控制设计参数。施工多采用长螺旋钻孔灌注成桩，需注意控制拔管速度（避免桩身缩颈或断桩）、保证混合料坍落度（通常160-200mm），且成桩后需养护28天以上方可进行基坑开挖，确保桩体强度达标^[4]。某住宅小区地基处理中，CFG桩复合地基使地基承载力从100kPa提升至250kPa，沉降量控制在150mm内，体现了其在高层建筑物地基处理中的优势。

3 传统技术的局限性

尽管传统技术在工程中广泛应用，但仍面临以下挑战：

资源依赖性强：碎石桩需大量天然砂石，CFG桩依赖水泥（碳排放高）、钢材，加剧资源消耗与碳足迹；

施工周期长：桩基需逐根施工，且CFG桩需28天养护期，难以满足大规模快速填筑需求；

环境代价高：未系统评估工业固废的环境风险，缺乏全过程污染防控机制；

经济性不足：单位面积成本高，尤其在偏远地区运输成本显著增加。

表1 典型案例对比

技术类型	工艺参数	承载力提升 (kPa)	工后沉降 (mm)	单位成本 (元/m ²)	固废资源化率 (%)
碎石桩复合地基	直径500mm，间距1.5-2.0m	150-200	≤ 200	120-140	< 5
CFG桩复合地基	桩径500mm，桩长10m	200-300	≤ 100	180-220	< 5
煤气化渣复合地基	气化渣-土配比3：7，压实度 ≥ 93%	152	≤ 185	85-95	≥ 80

4 工业固废基复合地基技术原理与设计方法

4.1 技术路线与系统架构

本文提出的煤气化渣复合地基技术采用“材料优化-填筑控制-防渗保障-智能监测”四位一体技术路线：

材料调控：通过击实试验、CBR试验、无侧限抗压强度测试，确定最优气化渣-土配比（推荐3：7），确保压实度 ≥ 93%、CBR ≥ 4%、无侧限抗压强度 ≥ 80kPa；

填筑工艺：采用水平分层填筑法，松铺厚度 ≤

30cm，碾压遍数 ≥ 6遍（初压+强振+终压），含水率控制在20%-23%；

防渗体系：设置“15cm石灰土+50cm黏土+15cm石灰土”双层防渗结构，渗透系数 ≤ 1×10⁻⁷cm/s；

监测系统：布设沉降板、分层沉降计、地下水监测井、土壤重金属检测点，实现长期动态监控。

4.2 材料特性与工程适配性

煤气化渣为气流床气化工副产物，主要成分为SiO₂、Al₂O₃、CaO，具备一定火山灰活性。经破碎筛分

后,粒径分布良好,可作为优良的填筑骨料。其物理力学参数如下:

天然密度: $1.8\sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$

最佳含水率: 21%

最大干密度: $1.72\text{g}/\text{cm}^3$ (击实试验)

CBR值: 4.2% (浸泡96h)

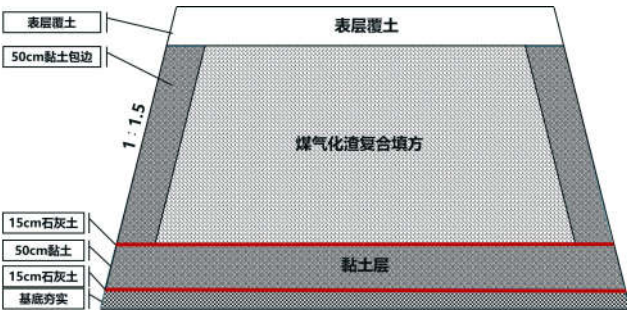
pH值: 9.5~10.5 (碱性,有利于重金属固化)

注:数据来源于宁东基地实验室检测报告(2024)

5 实验工程实施与效果评估

5.1 工程概况

在宁东煤制油项目厂区选取 200m^2 试验场地,填方深度4~6m,下伏土层为粉质黏土(承载力特征值 80kPa ,压缩模量 4.5MPa)。采用气渣-土(3:7)混合料分层填筑,每层压实后厚度 $\leq 25\text{cm}$ 。



5.2 性能检测结果

承载力:静载荷试验测得复合地基承载力特征值 $f_{spk} = 152\text{kPa}$,满足设计要求($\geq 150\text{kPa}$);

沉降控制:监测周期18个月,工后总沉降 185mm ,差异沉降 1.8% ,符合《GB 50007-2011建筑地基基础设计规范》工业建筑要求($\leq 200\text{mm}$);

环境安全性:连续监测地下水pH、As、Cr、Pb等指标,均低于《GB 15618-2018土壤环境质量标准》与《GB/T 14848-2017地下水质量标准》限值,未发现显著污染迁移。

5.3 施工工艺优化

含水率调控:现场采用洒水车或晾晒调节,确保接近最佳含水率;

压实控制:20t振动压路机,行驶速度 $\leq 2\text{km}/\text{h}$,复压4遍(弱振2遍+强振2遍),压实度达94%;

防渗层施工:分层摊铺、错缝碾压,7天无侧限抗压强度 $\geq 0.8\text{MPa}$ 。

6 讨论与创新点

6.1 技术创新性

大宗固废资源化路径创新:首次将煤气化渣作为主体填料用于大面积软土地基处理,实现固废消纳率 $\geq$

80%,减少天然土方开挖量50%以上;

材料-结构-环境一体化设计:提出“复合填料+防渗层+监测网络”系统解决方案,兼顾工程性能与环境安全;

绿色低碳效益显著:单位面积碳排放较CFG桩降低约60%,符合“双碳”战略导向。

6.2 应用前景与推广建议

本技术适用于:煤化工、火电、冶金等工业固废富集区;沿海、河网地区软土地基处理;

大面积厂区、道路、堆场等低-中荷载工程。

未来研究方向:多源固废(粉煤灰、炉渣、脱硫石膏)协同配比优化;冻融循环、高水位条件下长期性能研究;基于BIM+IoT的智能监测平台开发^[9]。

7 结论

煤气化渣复合地基技术可有效实现工业固废的大宗化、高值化利用,破解“固废围城”难题;通过科学配比与施工控制,地基承载力可达 152kPa ,工后沉降控制在 185mm 以内,满足工业建筑使用要求;双层防渗体系与长期环境监测有效保障了地下水与土壤安全,环境风险可控;与传统技术相比,单位成本降低30%~55%,施工周期缩短30%以上,综合效益显著;该技术为绿色建造与可持续发展提供了新范式,具备广阔推广应用前景。

推动标准建设:建议编制《工业固废基复合地基技术规范》,明确材料、设计、施工与验收标准^[6];

加强跨学科协同:联合环境工程、材料科学、岩土工程等领域,开发高效稳定化技术;

发展智能监测:引入物联网、大数据分析,构建“感知-预警-决策”一体化平台;

争取政策支持:呼吁政府出台固废资源化补贴、绿色信贷等激励政策,鼓励企业绿色转型。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ 79-2012建筑地基处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2]刘春明.房屋建筑工程软土地基施工处理及管理措施[J].砖瓦,2022(6):108~110.
- [3]葛永祥,赵华勇,陈萌萌,等.新型CFG桩在流塑性软土中的创新应用[J].中国建筑金属结构,2025,24(2):67~70.
- [4]张天宇.CFG桩加固软土地基承载特性及变形研究[J].石材,2025(2):40~42.
- [5]吴宇豪,许宇星,王晓伟,等.CFG短桩处理软弱地基的处理效果与探讨[J].广东建材,2025,41(1):72~75.
- [6]王清,张可能.工业固废在地基处理中的应用进展[J].岩土工程学报,2023,45(3):401~410.