

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.07.063

污泥燃煤电厂协同焚烧工程案例分析

卢义程

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 污泥燃煤电厂协同焚烧仍是今后相当长一段时间的主流工艺技术。以扬州市污泥干化协同焚烧为例,基于污泥全干化与燃煤电厂协同焚烧发电的关键技术问题诸如污泥含固率控制、掺烧条件、电厂污染物控制、干化厂污染物控制等深入剖析基础上,简要介绍工程关键工艺参数设计和技术要点分析。污泥干化厂结合燃煤电厂协同焚烧须密切关注污水、臭气、烟道受热面侵蚀和烟气处理等难题,污泥干化厂生产污水和臭气污染物控制仍是工程应用须重点关注的内容。污泥干化结合燃煤电厂协同焚烧有待结合工程实践不断提高技术水准,使之切合行业发展的循环经济碳中和的目标。

关键词: 污泥全干化;污泥含固率;工艺设计;两段式(两级)干化;燃煤电厂协同焚烧(掺烧);碳中和

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)07-0234-05

1 技术背景

2018年住房和城乡建设部统计^[1]全国3919座污水处理厂市政污泥产生量达1353.3万t/a,折合80%含水率脱水污泥6766万t/a。国内现状污泥处置方式仍然是以填埋和土地利用为主。借鉴国外行业发展比较成熟的管理经验,在发达大中城市宜推行包括独立焚烧和协同焚烧等为主的技术方向。如2016年德国环保局统计^[2]全国市政污泥焚烧处置占比64.4%,其中独立焚烧占比25%,大型煤电厂协同焚烧占比26%,水泥窑协同焚烧占比7%,垃圾焚烧厂协同处置占比3%。2017年修订的污泥法^[3]详细描绘了“焚烧增加、农用减少和土地利用逐步禁止”的大趋势,并计划于2032年关闭所有大中型污泥农用处置途径,单独污泥焚烧和结合燃煤电厂协同焚烧成为今后一段时间内德国的主流技术途径。

上海市政府于2018年12月底批复了《上海市污水处理系统和污泥处理处置规划(2017—2035)》,明确了独立焚烧为主、协同焚烧为辅、建材或统筹利用兼顾的主流方向^[3]。污泥独立焚烧投资成本均相对较高,今后相当长的一段时间内结合大中型燃煤电厂掺烧仍是市政污泥焚烧不可或缺的主流技术方向。以扬州市为例,污泥干化厂选址位于经济技术开发区古渡路,总占地约2.67hm²。一期工程占地约

1.87hm²,建筑面积8359m²;二期工程占地约0.8hm²,建筑面积5300m²。一期工程设计规模300t/d(80%含水率,下同),二期工程设计规模200t/d。设计采用热干化和热电厂协同焚烧的技术路线。设计中充分运用低碳和循环经济先进理念,厂址选择紧邻扬州第二发电有限责任公司和扬州港口污泥发电有限公司,周边还有扬州市亚东水泥厂。污泥全干化产品可作为补充燃料与燃煤掺烧发电,电厂协同焚烧的粉煤灰结合水泥厂生产水泥。干化热源利用扬州港口污泥发电有限公司的余热蒸汽或者来自第二热电厂的余热蒸汽。工艺设备选择两段式干化,经国内实践验证能耗较低,污泥干化单位蒸发量综合能耗0.69kWh/kgH₂O。一期运行验证单位污泥量多年平均蒸汽消耗量仅0.7~0.75t/t,在同行业中蒸汽消耗量处于较低水平。一期工程成功投运五年后顺利启动了二期工程的建设。

2 掺烧技术与相关法规

2.1 热电厂掺烧技术分析

市政污泥与燃煤电厂协同焚烧,单纯从技术角度分析,脱水污泥、半干污泥和全干污泥均能结合电厂循环流化床或煤粉炉焚烧,德国和我国均有大量的试验工程验证。国内如常州、苏州等地均曾尝试循环流化床机组直接掺烧市政脱水污泥的试验工程,过去曾作为缓解污泥出路的重要手段之一使用。国内外经验均表明直接利用脱水污泥掺烧,有效的做法是利用飞灰回混的调质方式^[4]。而采用脱水污泥直喷入炉的方

收稿日期:2022-03-24

作者简介:卢义程(1974—),男,硕士,高级工程师,从事市政污水、污泥和有机废弃物工程设计工作。

式并不成功,脱水污泥掉落到风嘴附近发生干化造成炉内温度分布不均匀,脱水污泥超量投加易造成炉床内 $15^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 以上的温度下降。尤其锅炉机组在低于60%负荷运行因风帽附近的炉床温度下降造成机组无法运行。还有脱水污泥因工业污染的重金属 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子超标时,以 SiO_2 、 CaO 为主的灰分熔流点无序波动^[3],烟道内积灰难以清除,还易造成静电除尘和布袋除尘效率的急剧下降从而引起电厂系统产能大幅度减少造成巨大的经济损失。

参照德国类似的污泥干化结合电厂或水泥厂的掺烧经验,极个别污泥干化厂由于建设时间较早,污泥干化至40%~70%TS含固率结合循环流化床燃煤锅炉协同焚烧,其余污泥干化厂均将污泥干化至75%TS甚至90%TS后结合循环流化床锅炉或煤粉炉实施协同焚烧^[4]。针对含水率偏高的脱水污泥或半干污泥掺烧须注意锅炉受热面或空预器受热面因污泥中氯、硫等污染物造成烟气酸露点升高引起的侵蚀和耐热材料的疲劳破坏。当电厂锅炉烟道受热面和烟气处理系统改造费用太高时,首选按全干污泥实施协同焚烧可能更经济。

污泥干化装置的设计和运转十分依赖实践和经验,末端协同焚烧的政策或技术特点决定了进料污泥品质控制。借鉴热电厂大气污染控制的政策法规,京都议定书规定了六项主要的温室气体排放控制,包括二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、一氧化二氮(N_2O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化合物(PFCs)和六氟化硫(SF_6)。二氧化碳以外的温室气体均折算成二氧化碳当量实施配额和碳交易管理^[4]。参照欧洲委员会的决议2007/589/EC,市政污泥和沼气可以作为生物质替代燃料实现碳中和的指标交易,尤其全干化或半干化市政污泥热值接近褐煤,替代热电厂燃煤可以计算为零排放。全干化污泥可以折算的二氧化碳排放当量大约 $0.7\sim 1.1\text{ tCO}_2/\text{t}$,单纯脱水污泥协同焚烧因为热值太低在碳中和实现碳减排交易方面没有优势。市政污泥与燃煤电厂协同焚烧在大气有机污染物控制方面因为电厂锅炉焚烧温度高且停留时间充足,不存在污染排放的风险。

2.2 参考技术标准及关键点

上海结合外高桥电厂和上电漕泾发电厂等试点项目于2021年4月颁布《燃煤耦合污泥发电厂大气污染物排放标准》(DB 31/1291—2021),为市政污泥结合燃煤电厂掺烧处置明确了各项技术条件和污染控制的基本考核目标^[6]。上海地标于2021年6月1

日正式实施,标准明确规定燃煤耦合污泥电厂二噁英类污染物的排放限值为 $0.02\text{ ngTEQ}/\text{m}^3$,远高于《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)中规定的 $0.1\text{ ngTEQ}/\text{m}^3$;利用烟气混合稀释作用降低二噁英类污染物排放基本杜绝。汞及其化合物排放限值明确为 $0.01\text{ mg}/\text{m}^3$ 。燃煤耦合污泥发电锅炉的污泥掺烧率不应大于5%,该干污泥掺比控制与德国干污泥与燃煤电厂协同焚烧后灰渣实施建材利用的限制类似^[4]。

2021年12月9日,江苏省生态环境厅发布《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB 32/4148—2021),新标准^[7]于2022年7月1日起正式执行;针对单台出力65 t/h以上发电锅炉明确了与污泥掺烧有关的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、汞及其化合物、烟气黑度等排放限值。其中规定汞及其化合物排放限值为 $0.02\text{ mg}/\text{m}^3$ 。与上海地标不同,江苏省标似乎没有针对二噁英提出特别的限值要求。

参照江苏省和上海市新近颁布的有关污泥干化后与燃煤电厂耦合发电的大气污染控制排放限值要求,污泥干化后送燃煤电厂除了注意与燃煤的掺比控制外,电厂自身的大气污染物排放须兼顾自身燃料相关的大气污染控制和有关掺烧污泥更高的排放要求。意味着电厂的制粉系统、锅炉烟道系统和烟气处理环节须引起高度关注。如循环流化床锅炉有可能涉及输煤破碎环节、烟道省煤器、砂回流、烟气脱硫脱硝等子系统的更新改造实现高可靠度的达标。

3 泥质控制与干化工艺

参照德国排水协会技术规范ATV-DVWK M379^[8],干化后产品含固率小于85%(TS)属于半干化,干化产品含固率不小于85%(TS)是全干化。全干污泥产品在粉尘控制、臭气控制和输送便利性方面均有较大优势;借鉴德国经验,结合大型燃煤电厂和水泥厂掺烧均采用全干污泥协同焚烧方式实现处置。扬州市污泥干化厂采用的两段式干化技术可实现75%(TS)至90%(TS)的目标含固率入炉,末端处置循环流化床炉和煤粉炉均存在。一期工程污泥干化生产线按照100 t/d一条线,计3条生产线。二期工程按照100 t/d一条线,计2条生产线。年生产按照7 500 h/a考核,干化产品温度不大于 40°C ,产品含固率75%~90%(TS)。

与干化掺烧密切相关的另一项指标是污泥含水量,扬州市主城区因存在部分合流制改造分流制不彻

底的区域,污水污泥含砂量相对较高;据检测分析反馈,最高含砂量接近40%;直接影响污泥干化工艺和设备的设计,以及污泥输送环节的耐磨选材设计。系统设计和设备采购环节均按最高含砂量40%作为控制条件执行。

污泥处理流程包括污泥卸料站、污泥储料仓、污泥干化生产线、干污泥卸料等高度集约化设计,全过程封闭生产。全干化的产品利用成品料仓短时储存后装车密闭外运至附近热电厂掺烧发电,热能利用热电厂余热蒸汽。污泥处理工艺基本流程见图1。

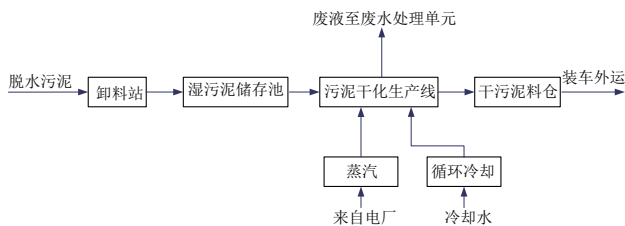


图1 污泥处理工艺基本流程示意图

污泥干燥采用两段式或称两级干化工艺（一级处理后污泥干度达到40%~55%(TS)，二级干化处理后污泥含固率可达到75%~90%(TS)）。污泥在可塑性阶段切碎成颗粒配合带式干燥机出口粉尘含量低于3‰。针对扬州市污泥含砂量特别高的特征,设计和调试阶段设定相对较高的一级干化含固率50%~55%(TS),提高切碎机入口的污泥粘度,降低磨损和阻力;确保产能稳妥可靠。系统设计带式干燥机的补充热源采用一段废热(污泥废气余热和蒸汽冷凝水余热)和补充蒸汽相结合的方式实现能量的最大限度回收。

干化系统共5条生产线,其特征如下:

生产数量:5套;

设计进泥干度:20%~30%(TS);

设计出泥干度:75%~90%(TS);

年运行时间:7500 h/year。

每一条干化处理线的设计参数如下:

蒸发能力:3792 kgH₂O/h(20~90%(TS));

设计物料通量:975 kg(TS)/h。

每一条处理线包括以下4个主要部分:

薄层蒸发器;

切碎机;

带式干燥机;

与工艺一体化的热量回收。

干污泥出料通过斗式提升机输送到干污泥料仓,再由干污泥料仓装车运送至发电厂进行掺烧。

4 生产污水污染控制

4.1 生产污水的产生

污泥干化生产污水一般来源有车间冲洗污水、干化尾气冷凝水、除臭残液等。针对两段式或两级干化工艺,由于中间环节造粒生产冲洗产生大量的颗粒污泥洗涤污水,与干化尾气洗涤和除臭残液等构成主要的生产污水。每条干化线产生的冷凝污水流量约为3.3 m³/h,按照满负荷生产日均计算污水排放量约588 m³/d,生产工艺排水产污系数约1.0~1.2 m³/t混合污水。

4.2 生产污水处理试验研究

污泥干化产生污水主要污染集中于干化冷凝液和中间造粒工艺冲洗水,主要特征污染指标有COD_{cr}、BOD₅、NH₃N等。就NH₃N指标而言,一级间接干化产生污水量少,但污染物浓度高,最高可达2500 mg/L;直接干化冷凝液NH₃N最高达500 mg/L^[8]。生产混合污水特征污染物浓度按经验TN100~200 mg/L, NH₃N100~150 mg/L。一期工程生产阶段开展了300 m³/d的生产性试验装置跟踪摸索工艺技术和设计参数。污泥干化厂产生的污水经预处理达标后通过市政管道最终纳入3 km处的六圩污水处理厂。试验工程基本流程见图2。

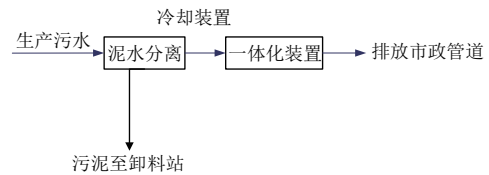


图2 生产性试验污水处理基本流程图

生产污水处理流程设计采用泥水分离后初步沉淀+一体化生物接触氧化装置方式实现二级处理达到纳管标准。经过连续三年以上的生产性试验证明污水处理工艺的合理性,为二期工程全面设计污水处理站提供了参考数据。

4.3 污水处理工程设计

一二期工程污泥处理设计规模500 t/d对应的污水处理站设计规模建议600 m³/d。据实际运行监测的数据统计分析,执行《污水排入城市下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)中表1-A类指标),污水处理站设计进出水水质见表1。

污水预处理工艺流程见图3。

干化冷凝污水采用板式换热器降温后纳入污水处理单元,确保进入污水处理流程水温不超过40℃。污水处理技术路线拟采用“调节池(含事故池)+混凝

表1 污水处理系统设计进水水质 单位:mg/L

水质指标	COD _{cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水水质	2000	400	1500	130	180	30
本次执行标准	500	350	400	45	70	8

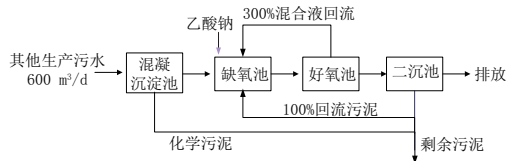


图3 污水处理系统工艺流程图

沉淀+生物反应池+斜板沉淀池+排放水池”的工艺,核心生物反应池拟采用单段式AO活性污泥法,水力停留时间约30h,按试验工程验证能稳妥达标。污泥处理采用“重力浓缩+带式压滤脱水”,脱水污泥直接泵送污泥卸料站进入污泥干化流程。

5 臭气排放控制

全流程精细化臭气控制是污泥处理工程成败的关键。臭气收集处理的基本原则是强化封闭源头管控、分类收集、多途径末端处理^[9]。核心须关注高强度臭气尽可能采用砖砌或混凝土砌筑的小空间封闭后高频次抽风除臭。如污泥卸料池、污泥储存池、切碎机间等与脱水污泥或半干污泥密切接触且散发臭气的空间抽风次数以18次考虑,依靠高频次抽风形成高强度负压确保臭气不外溢。其余与臭气散发相关的空间以6~12次换气次数补充除臭以加强封闭除臭效果。臭气处理按照一期和二期污泥干化车间单独各1套臭气收集和处理系统分别处理一期和二期工程产生的臭气。

一期工程带式干燥机内部产生的高浓度臭气总流量约为 $3 \times 4\,000 = 12\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,温度 88°C ,相对湿度为21%。带式干燥机产生的高强度热臭气须先进行冷却处理,在冷却塔内使之温度下降至 40°C 左右;然后再送至化学洗涤塔单元处理。化学洗涤塔设氧化和碱洗两级处理方式实现高标准臭气控制后由排气筒排放。一期工程化学洗涤的臭气总流量约 $42\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,实际运行特征污染物指标达标,排气筒臭气浓度不超过500;但气象条件欠佳时有微量异味气体散发至厂界处。二期工程除臭设计在一期工程的基础上进行了优化改进,干燥机内部产生的高浓度臭气先进入湿式洗涤塔并增加臭氧处理单元再进入化学处理单元。卸料池、储泥池、污水处理站产生的空间气体等采用“臭氧氧化+次氯酸钠氧化+碱洗+气液分离的方式处理,带式干燥机周边的空间

气体直接纳入到生物滤池;生物滤池设计规模同时兼顾卸料池、储泥池、污水处理站等空间气体的风量,臭气排放筒的高度距地面为25m。计划待二期工程除臭设施调试成功并取得良好成效后,利用二期工程取得的经验数据用于一期工程的除臭升级改造以改善厂区大气环境。拟设计排气筒臭气浓度目标控制在200以内。

6 干污泥安全储存输送技术

接近全干的干污泥安全储存及输送主要涉及干污泥的品质管理、粉尘防爆、臭气散逸、甲烷及氢气集聚引起自燃、与燃煤电厂炉型和输送制粉系统匹配等多方面难题。85%TS以上的全干污泥适合采用气力输送、螺旋、皮带、斗提等输送方式^[10]。经生产实践摸索,调试生产初期曾尝试85%TS以上的含固率出料车辆短驳至电厂煤棚,夏季高温天气在卸料堆放和输送过程多次发生偶尔高速风吹造成自燃。后续摸索控制75%~80%TS的出料含固率,结合全过程的封闭输送控制含氧量和臭气;基本杜绝了干污泥的自燃和臭气散逸。

颗粒污泥在干化处理线出口处直接落入皮带输送机上,输送机全流程包含干污泥料仓按照1用1备方式配备。干污泥颗粒通过皮带输送机和斗式提升机直接送至干污泥料仓暂存,然后装车外运与燃煤混合掺烧。为保证干污泥的全封闭装卸作业,污泥料仓下方设可伸缩卸料管道伸入下方装卸料斗,卡车直接搬运装卸料斗外运。输送机及干污泥料仓上方配置水喷雾喷头配合感温电缆在超温时防护冷却确保干污泥输送的消防安全。

7 污泥于燃煤电厂掺烧效益分析

扬州市污泥干化厂热干化的蒸汽热源有2路:扬州市第二电厂和扬州港口污泥发电有限公司的 $200^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C} @ 8\text{bar}(\text{g})$ 过热蒸汽。经过热干化的干污泥颗粒产品作为低品质燃料可以作为扬州第二发电厂或污泥发电有限公司的补充燃料,与燃煤协同焚烧的灰渣也可以结合亚东水泥厂作为水泥生产的熟料。六圩污水处理厂产生的再生水作为该循环经济产业园的工业水水源,也是污泥干化厂的工业用水的补充水源之一。据2021年月均生产统计分析,日处理污泥284t/d,吨污泥干化电耗 63.7 kWh/t ,单位蒸汽消耗 0.75 t/t 。干污泥平均含固率81.3%TS,月平均产量58.32t/d,折合碳减排平均约 $53 \text{ t CO}_2/\text{d}$ 。

按今后满负荷生产日产干污泥 80%TS 含固率 125 t/d, 折合碳中和指标约 112.5 t CO₂/d。

8 结 语

(1)一期工程竣工结算总投资约 1.55 亿元。二期工程总投资约 1.2 亿元, 计划 2022 年中全面投产。目前扬州市政府给予运营单位的单位脱水污泥处理费用约 480 元/t, 其中电耗占 80 元/t, 蒸汽消耗占 196 元/t。

(2)末端协同焚烧借力扬州第二发电厂(2 × 600 MW)和污泥发电厂(2 × 24 MW), 总燃煤消耗约 12 000 t Ce/d, 符合干污泥协同焚烧控制 5%掺比的基本条件;对电厂及其灰渣建材利用影响很小且合规。

(3)污泥与燃煤电厂协同焚烧立足粉尘控制、安全防爆、臭气散逸控制以及输送便利,宜采用接近全干化的污泥入炉焚烧,即污泥干化至 75%~80%TS 是经实践检验安全可靠的最佳范围。因污泥品质如含砂量的差异对适宜的两级干化含固率目标有少量影响。接近全干污泥替代化石燃料实现协同焚烧能计入碳中和计量范畴。

(4)若城镇污水污泥因接纳工业污水造成重金属指标超标,须严密关注协同焚烧对炉膛烟道受热面侵蚀和烟道积灰,甚至静电除尘和布袋除尘的效率下降等问题,经科学评估适当考虑技术改造措施可望长效运行。

(5)因污泥焚烧造成飞灰量大且飞灰因结合水分相比单纯燃煤焚烧飞灰粘性高,易产生烟道积灰或烟气处理单元的积灰问题。生产运行管理须严格管控加强维护管理,确保生产运行的安全。

(6)污泥干化厂的设计建设须严密关注生产全过程的污水排放和臭气控制,尽可能从源头管控污水污染物产生、臭气污染物的精细化技术管控和低能耗达标;节约污水处理和臭气处理等辅助设施的投资和运行费用。

致谢:感谢扬州中法环境股份有限公司提供的基础信息和技术数据。

参考文献:

[1] 张辰,段妮娜,张莹,等.污水处理厂污泥独立焚烧工艺路线及适用性分析[J].给水排水,2021,47(1):41-48.
 [2] Sewage Sludge disposal in the Federal Republic of Germany[S].2018.
 [3] 上海市污水处理系统污泥处理处置规划(2017-2035)[Z].2018.
 [4] Advisory Guideline DWA-M387E,Thermal Treatment of Sewage Sludge Co-Incineration in Power Plants[S].2012.
 [5] 金东振.废弃物手册[M].北京:科学出版社,2004.
 [6] DB 31/1291—2021,燃煤耦合污泥发电厂大气污染物排放标准[S].
 [7] DB 32/4148—2021,燃煤电厂大气污染物排放标准[S].
 [8] Advisory leaflet ATV-DWK-M379E Drying of Sewage Sludge [S]. 2004.
 [9] 刘红,赵晓峰.污泥干化焚烧处理厂臭气防控和措施探讨[J].节能环保,2020(12):23-24.
 [10] 胡维杰.城镇污水污泥燃煤电厂协同焚烧技术解析[J].中国给水排水,2021,37(8):24-31.

(上接第 229 页)

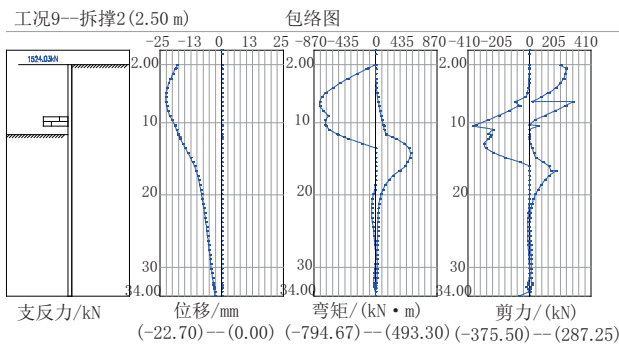


图 10 方式三围护结构内力与变形包络图

表 1 不同换撑方式对比

方式	围护结构			主体结构	
	弯矩 / (kN·m)	剪力 / kN	水平位移 /mm	止水节点	配筋率
一	819.1	485.3	25.7	0	6.3%
二	812.0	335.5	20.0	52	4.2%
三	794.7	375.5	22.7	0	4.4%

该基坑已按第三种换撑方式施工完毕,根据监测数据,围护结构最大水平位移 23.05 mm,与理论计算基本一致。主体结构满水试验一次合格,在保证主体结构质量同时,节约工期 43 d。

6 结 语

本文总结了一般及特殊条件下换撑设计方法,并提出利用水池主体结构的扶壁(或壁柱)、内部纵向壁板作为一种换撑体系,在工程实际应用中达到了预期效果,可为同类设计和施工提供借鉴。

参考文献:

[1] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
 [2] 朱小军.软土深基坑工程控制拆撑变形的换撑设计方法[J].岩土工程学报,2010,21(z):256-260.
 [3] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].