DOI：10.7672/sgjs2026030001

迪拜沙漠地区光热电厂建造技术

张希黔[1],黄乐鹏[1],张凤举[2],朱　甜[1]
(1. 重庆大学土木工程学院,重庆　400045; 2. 中建三局第二建设工程有限责任公司,湖北　武汉　430074)

[摘要] 在全球能源结构转型与碳中和目标背景下,聚光太阳能热发电(CSP)因具备大规模储热与稳定供能能力,在沙漠地区展现出良好的应用前景。高温、强风、风沙频发及地质条件复杂等极端环境因素,对光热电站关键结构与设备施工技术和工程可靠性提出了更高要求。依托迪拜 700MW 光热+250MW 光伏混合发电项目,提出沙漠地区自制固化剂自动化固沙技术、高温环境下“方变圆”吸热塔建造技术、超大型吸热器整体滑移与高空就位技术、大规模定日镜快速精准定位与数字化安装技术、熔盐储热罐高承载力隔热基础施工技术,在极端沙漠环境下保证良好的施工适应性、结构安全性与工程可靠性,提升施工效率与建造质量,降低工程风险与综合成本。

[关键词] 发电站;光热发电;吸热塔;定日镜;储热罐;滑模;安装;定位
[中图分类号] TU74　　[文献标识码] A　　[文章编号] 2097-0897(2026)03-0001-07

Construction Technology of Concentrated Solar Power Plant in Dubai Desert Area

ZHANG Xiqian[1], HUANG Lepeng[1], ZHANG Fengju[2], ZHU Tian[1]
(1. *School of Civil Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing*　400045, *China*;
2. *The Second Construction Co., Ltd. of China Construction Third Engineering Bureau*, *Wuhan*, *Hubei*　430074, *China*)

Abstract: Against the backdrop of the global energy transition and carbon neutrality targets, concentrated solar power (CSP) shows strong potential for deployment in desert regions due to its capability for large-scale thermal energy storage and stable power output. However, extreme environmental factors such as high temperature, strong winds, frequent sandstorms and complex geological conditions put forward higher requirements for the construction technology and engineering reliability of key structures and equipment of CSP plants. Based on the Dubai 700MW CSP + 250MW photovoltaic (PV) hybrid power project, an integrated set of construction technologies is presented, including automated sand stabilization using a self-developed curing agent, square-to-circular heat absorption tower construction under high-temperature conditions, overall sliding and high-elevation positioning of an ultra-large heat absorber, rapid and precise layout with digitalized installation for a large-scale heliostat field, and construction of high load bearing thermally insulated foundations for molten salt heat storage tanks. Engineering practice indicates that these technologies provide strong construction adaptability, structural safety, and engineering reliability in extreme desert environments, significantly improving construction efficiency and quality while reducing risks and overall costs.

Keywords: power station; photothermal power generation; heat absorption tower; heliostats; heat storage tank; sliding formwork; installation; positioning

0　引言

在全球碳中和与能源结构转型背景下,聚光太阳能热发电(CSP)因具备高效能量转换与大规模储热能力,成为应对可再生能源间歇性输出的关键支撑技术。中东沙漠地区凭借年均超 3 500h 的太阳辐照时间和丰富未利用土地,为超大规模 CSP 项目建设提供了优越资源条件。然而,极端沙漠环境(高温、强风、风沙及水资源匮乏)对吸热塔、定日镜场与熔盐储热罐等核心设施施工与运维提出严峻

[作者简介] 张希黔,教授,博士生导师,E-mail:zxq027@163.com
[通信作者] 黄乐鹏,副研究员,E-mail:huang_lepeng@cqu.edu.cn
[收稿日期] 2025-07-21

挑战,如沙土工程特性不确定性大、超高吸热塔滑模施工精度难控制、镜场布点误差易累积、储热罐基础隔热与沉降耦合机制尚不清晰等,制约了系统效率与长期运行稳定性,亟需在复杂环境下实现高效、可靠、成本可控的工程建造。

目前,我国光热产业呈加速发展态势,光热发电装机容量与装机规模不断增加,技术水平持续提升,以敦煌 100MW 熔盐塔式光热电站为代表的工程已具备一定示范效应[1]。相比之下,迪拜 700MW 光热+250MW 光伏混合发电项目作为全球规模最大、系统最复杂的 CSP 工程,在装机规模、环境复杂性和运行挑战等方面更具代表性,其吸热塔高度达 262m,定日镜数量超过 7 万面,占地面积约 4 400 万 m^2[2]。因此,该项目为验证复杂环境下 CSP 系统构建与集成提供了理想平台。

为提升光热发电系统构筑物施工适应性与运行可靠性,国内外学者在沙土固化、滑模施工及镜场布点等方面开展了大量研究。在地基加固与资源化利用方面,沙土固化技术已被广泛探索。疏浚沙土经化学固化、高温烧结或物理脱水处理后,可用于制备砖材、陶粒、回填料及混凝土细骨料,但仍存在强度发展缓慢、易开裂、拌合性能差及脱水处理困难等问题。相比之下,风积沙水泥固化在力学性能改善方面表现较好,三轴试验及数值模拟结果表明其可有效提升地锚承载性能[3]。在混凝土筒体施工方面,传统分段吊装与高空拼装方法由于滑模平台刚度不足、定位精度差及与下部结构连接复杂等问题,施工周期长且成本高[4-6],为此,陈杨化等[7-8]提出了滑模平台地面组装后整体吊装施工技术,有效缩短了工期并降低了工程成本。在定日镜系统方面,房淼森等[9]从镜场排布优化、结构精度控制与调试策略入手,引入大气透射效率和能量衰减因子,构建了高效镜场布置模型;吕佳阳等[10]基于光学利用效率指标,分析了纬度变化对镜场布置的影响并提出适应性方案。在结构设计层面,程松等[11]通过桁架结构优化提升镜面成型精度与整体稳定性,而光斑投射模拟研究进一步揭示了镜面安置位设计对调试精度和运行安全的重要作用[12]。

尽管国内外在沙土固化、异形滑模施工、镜场数字化布点及隔热承载基础设计等方面取得一定进展,仍存在固化材料耐久性不足、滑模施工温变补偿与变形控制技术不成熟、镜场误差在线校正机制薄弱及基础隔热与沉降协同控制手段不完善等关键瓶颈。为系统应对上述挑战,本文提出材料+工艺+数字化+监测一体化技术框架,通过现场取样与试验优化固沙配方,研发自适应温控滑模平台提升结构成型精度,集成盐水护壁湿成孔工艺与智能布点机器人实现镜场高效布设与误差控制,设计复合隔热承载基础以实现热、力、沉降协同调控。该体系在迪拜 700MW 光热+250MW 光伏混合发电项目中实施验证,结果表明其在极端环境下具有良好的施工适应性与推广应用潜力。

1 光热发电技术原理及其沙漠环境适配性

1.1 光热发电与光伏发电技术基本原理对比

光热发电与光伏发电是 2 种主要的太阳能利用方式,二者原理与系统构成不同[13]。光热发电通过槽式或塔式定日镜等聚光装置将太阳辐射集中至吸热器,将光能转化为高温热能,并借助熔盐等介质实现储热与释热,经换热驱动汽轮机发电,可在夜间或阴天持续供电,其基本原理如图 1 所示。光伏发电基于光生伏打效应,在 PN 结内建电场作用下将光能直接转化为电能,但受日照条件影响且缺乏储能能力,具有一定间歇性[14]。

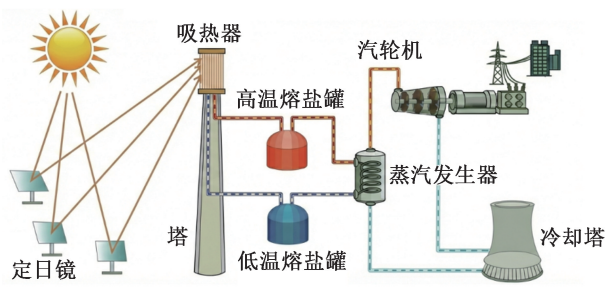


图 1 光热发电原理

Fig. 1 Principle of photothermal power generation

1.2 沙漠环境对光热发电系统的适配性

沙漠地区太阳辐射强、日照时间长且无遮挡,为光热发电提供了优越的资源条件[15-16]。在该环境下,光热发电一方面可依托充足日照实现较高的能量转化效率,另一方面通过熔盐储热系统储存白天获取的热能并在夜间或阴天释放,从而提升电力输出的稳定性[17-18]。但高温与风沙也会带来传热介质稳定性控制困难、镜面污染及吸热效率下降等问题,需通过针对性工程设计与技术优化提高系统可靠性。

2 迪拜沙漠地区光热电站关键施工技术

2.1 自制固化剂自动化固沙

迪拜 700MW 光热+250MW 光伏混合发电项目位于代赫纳沙漠腹地,场地为起伏沙丘,局部高差约 40m,植被缺乏(见图 2)。传统植物固沙与化学固沙剂方法效率低、成本高且适应性不足,难以满足超大规模场地平整施工需求,因此需采用经济、

高效、环保的自动化固沙工艺,快速固化表层并形成稳定施工面。

图 2　沙漠腹地原始地貌

Fig. 2　Original landform of the desert hinterland

2.1.1　固沙材料利用

对场地周边地质条件进行了勘察,通过钻探与取样确认沙漠深层土中广泛分布含硫酸盐和石膏的石灰质胶结砂岩,该类材料具有良好的胶结性能,可作为固沙材料加以利用,其典型形态如图 3 所示。经检测,相关土体整体呈碱性且硫酸盐含量较低,其固结作用主要来源于所含二水石膏在洒水条件下发生的胶结反应。

图 3　含硫酸盐和石膏的胶结砂岩

Fig. 3　Cemented sandstone containing sulfates and gypsum

2.1.2　水化学作用与盐壳固化

水在土体固化过程中同时发挥物理与化学作用。物理作用上,适量水分有利于钙质砂压实,水分过多会因水膜增厚降低密实度,而水分不足易导致颗粒破碎和胶结不均,已有研究表明,润湿可使未胶结砂强度暂时提高约 70%,但干燥后仅保留约 21%,并伴随约 17%的变形,可知水分调控对土体稳定性至关重要。化学作用上,水通过溶蚀、结晶和离子交换改变土体结构,其中盐类矿物(如方解石、白云石和石膏)沉淀填充孔隙,可增强抗压强度。盐壳形成是强度提升的关键机制,且孔隙内盐晶体生长较颗粒包裹方式更有效,可显著提高颗粒间摩擦力和抗风蚀性能;高温水热条件进一步促进盐晶体重组,形成多层复合盐壳,从而提升土体耐高温与抗裂性能。

2.1.3　沙漠土固化改性及耐水性提升

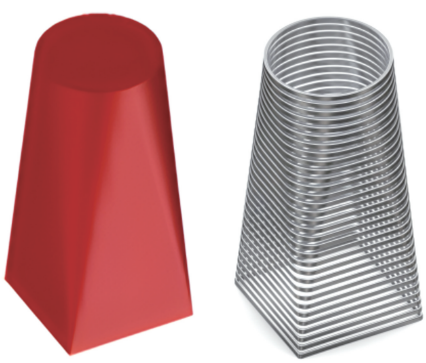
针对沙漠土固化材料耐水性不足的问题,提出了经济高效的水溶性外加剂改性方案。鉴于方解石、白云石和石膏等晶体结构耐水性有限,传统石灰改性方法施工难度较大,本研究采用硅酸铁铝、偏铝酸钠、水玻璃、聚合硫酸铝和聚醚磺化油按 3∶1∶1∶1∶0.2 的配合比制备 5%浓度水溶性外加剂。通过利用沙漠高温促进碳酸盐向白云石转化,优化碱度环境改善石膏结晶,并引入活性铝组分显著提升耐水性能。研究表明,在石膏催化和高温条件下可形成致密的白云石微晶结构,配合低碱度养护水进一步提高结晶质量与耐水性,从而有效抑制固化土遇水强度衰减,并实现沙漠土固化性能整体提升。

2.2　高温环境下“方变圆”吸热塔建造技术

吸热塔是光热电厂的核心结构之一,其建造难度较大,尤其是在高温环境下。本项目吸热塔高度达 262m,为世界最高吸热塔,且为异形结构,施工过程中需解决滑模施工和大跨度预应力梁支撑等技术难题。

2.2.1　可调式滑模平台设计

本项目吸热塔采用“天圆地方”的结构形式,“方变圆”结构段标高为 51.000~82.000m,最大收分角度达 11°,最小径向收分尺寸单位为 m。这种复杂的几何形状对滑模施工要求高,传统的滑模平台难以适应如此大的变形和变径需求,因此需设计新型可调式滑模平台。根据吸热塔“方变圆”的特点,按照每次混凝土浇筑 300mm 对该段混凝土筒体结构进行切割建模,如图 4 所示。



a 三维模型　　b 平面切割示意

图 4　吸热塔“方变圆”结构三维模型与平面切割

Fig. 4　Three dimensional model and planar sections of the square-to-circular heat absorption tower

针对吸热塔“方变圆”结构施工需求,设计可调式滑模平台,辐射梁采用 2m 高钢结构桁架,主辐射梁 8 榀,副辐射梁 32 榀,可提供足够的刚度应对“方变圆”段变形需求。模板采用 3012 型钢模拼接而成,相邻模板间通过螺栓连成整体。模板收分处设计为下宽上窄的形状,以便在施工过程中进行结构

尺寸调整。每榀辐射梁上设置 1 台 6t 穿心式千斤顶,通过千斤顶拉力控制门架滑动距离,从而实现墙体形状的调节。

滑模平台总体构成包括辐射梁、木架板、门架及挂架、辐射梁间斜拉连接件和临时支撑柱。选用 6t 千斤顶,行程为 25mm。布置千斤顶时根据各辐射梁承载力进行分组,共布置 64 台。千斤顶底座安装可自动调节的旋转底板,以保证千斤顶顶升方向与支撑杆方向的一致性。

2.2.2 高温环境下滑模施工控制

高温环境下混凝土凝结特性对滑模施工质量具有决定性影响。通过缓凝剂与减水剂配合比试验优化高温混凝土配合比,采用普通硅酸盐水泥并掺入硅灰改善混凝土和易性与耐久性。试验结果表明当水泥与硅灰质量比为 97∶3、水灰比约为 0.35 时,混凝土和易性较好且可有效降低黏模风险;在 60℃条件下初凝时间控制在 3~4h,满足连续滑模施工要求。施工过程中通过综合降温与隔热措施控制混凝土入模温度≤26℃,并降低模板及作业区温度,以保证高温条件下滑模施工的稳定性与成型质量。

本项目吸热塔塔身结构采用上述技术施工,在变形变径段平均滑模速度约 2m/d,圆形段平均滑模速度约 3.5m/d,最快滑模速度达 5m/d,大幅度缩短工期。

2.3 超大型吸热器整体滑移与高空就位

吸热器是光热发电系统的关键设备,其安装精度直接影响系统运行效率。本项目吸热器整体重达 1 636t,需在狭窄筒体内提升至 262m 高度,施工难度大,传统分件吊装与高空拼装方式效率低且安全风险高。为此,提出超大型吸热器整体滑移与高空就位技术,其核心为地面预组装、整体滑移及液压同步提升[19-20]。通过地面完成吸热器整体组装并进行质量检测,避免高空作业风险,并在提升阶段采用 16 套液压同步提升系统,结合实时监控与纠偏控制技术,实现超大型吸热器同步、平稳和安全就位。

2.3.1 吸热器整体滑移

为实现吸热器平稳滑移,设计专用滑移轨道,综合考虑吸热器质量和尺寸,确保滑移过程的稳定性与安全性。滑移轨道采用高强度钢材制造,以满足承载要求,并布置于吸热塔底部,与塔体中心线对齐,保证吸热器沿直线平稳滑移。轨道表面涂覆润滑剂,以降低摩擦阻力,提高滑移效率。

2.3.2 液压同步提升、实时监控与纠偏控制

本项目将 16 台液压千斤顶分别安装于 16 座提升门架上,每 4 台千斤顶共用 1 座液压控制台。千斤顶采用楔形夹紧式钢绞线锁定结构,具备自动夹紧与机械自锁功能,在顶升、复位及下降过程中均可实现可靠受力转换。同时,通过设置二级液压控制机制,实现无载复位与受控下降。系统配置多重故障保护措施,可在液压或电源异常情况下将荷载自动锁定于底部锚固装置,避免负载长期悬置于液压系统中,并支持在悬挂状态下进行必要的设备维护[21]。提升过程由远程集中控制系统统一管理,通过主从总线实现各千斤顶同步运行,实时采集并监测顶升荷载与行程数据。系统允许单机荷载偏差控制在 5%以内,并在吸热器每提升 15~20m 高度后对千斤顶行程进行同步校正,从而确保超大型吸热器在狭窄筒体内实现安全、平稳和高精度提升。

2.3.3 吸热器滑移与高空同步提升

液压驱动方式沿轨道将整体预组装的吸热器平稳推移至塔体内部。在高空提升阶段,通过自主研发提升装置与方法,布设 16 套提升门架,结合远程控制系统对千斤顶行程及荷载进行实时监控与调节。提升过程中,千斤顶锚具夹片与钢绞线束反复张拉超过 1 100 次,需同时满足高强度与疲劳耐久性要求。为提升运行安全性,在吊点外侧配置 16 套防碰撞装置,有效防止设备偏移与干涉风险,最终实现 1 636t 整体吸热器在直径受限的筒体内精确提升至 262m 高空。

本项目采用上述技术实现了吸热器(高 35.8m、直径 22.3m、重 1 586t)在筒体内整体滑移,并提升至吸热塔顶就位。整个提升过程历时约 20h,最快提升速度达 10m/h,安全高效地实现了世界最高、最重吸热器的整体吊装,解决了超大型吸热器高精度、安全安装的关键技术难题,如图 5 所示。

图 5 吸热器地面滑移

Fig. 5 Heat absorption tower ground sliding

2.4 大规模定日镜快速精准定位与数字化安装

定日镜是塔式光热发电系统的核心部件(见图

6),其安装效率和精度直接关系到系统聚光性能[22]。本项目需安装 7 万面定日镜,涉及 40 万个组件,任务繁重。为提升施工效率与精度,开发物联网数字化管理平台(BEAMS 系统),实现安装数据的实时记录与可追溯管理。针对沙漠地区施工难题,改进了成孔设备,使成孔效率提升 50%。实际施工中定日镜日均安装量达 300 面,定位误差控制在 5cm 以内,显著提高了施工效率并保障了系统运行质量。

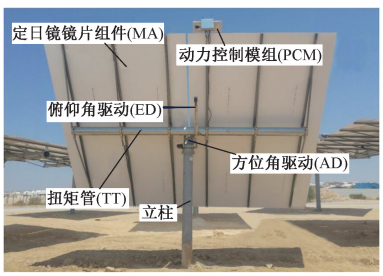


图 6　定日镜

Fig. 6　Heliostat

2.4.1　定日镜快速精准定位

针对沙漠地区土质松散、传统钻孔易塌孔的问题,采用盐水护壁长螺旋湿成孔技术[20],通过持续注入盐水并利用其蒸发结晶后的固结作用,有效避免孔壁坍塌。钻孔完成后,采用差分 GPS 对立柱坐标、垂直度和方位角进行精准测量,并通过二维码将测量数据与设计信息同步至镜场施工管理系统,实现安装偏差的有效控制[19]。采用自制改装的 3t 叉车吊装立柱,立柱固定与精调通过定制三脚架调节与加固装置完成,依次进行坐标、标高、方位角及垂直度调整,满足设计精度要求。

2.4.2　定日镜数字化安装

集成 BIM、大数据、物联网、无线传输及云平台等技术,构建镜场施工管理系统,覆盖设计、采购、预组装、施工及运营全过程。通过 BIM 模型集成多专业设计信息,实现可视化管理;依托大数据与物联网技术,对定日镜构件实施二维码溯源管理,实时采集与更新安装状态;结合无线传输与云平台分析功能,实现施工数据的实时交互、进度动态优化及精度控制。该数字化安装技术有效提升了施工效率,降低了安装误差,为大规模定日镜工程建设提供了参考[23-24]。

本项目采用上述技术将单根立柱施工时间控制在 12min 以内,单组定日镜上部安装时间≤20min。通过立柱调整工具,将立柱坐标偏差控制在 3cm 以内,垂直度和方位角偏差均<1°。

2.5　熔盐储热罐高承载力隔热基础施工

熔盐储热罐是光热发电系统的关键储能设备,其基础需同时满足高承载力与高效隔热要求。本项目储热罐运行温度最高达 565℃,单罐熔盐储量达数万 t,对基础结构设计与施工技术要求高。针对上述特点,提出涵盖结构设计、材料选择及施工控制的综合技术方案,以确保储热罐基础安全性与隔热性。

2.5.1　基础结构设计与材料选择

储热罐基础采用复合结构设计,由下至上包括级配砂层、通风管、钢环墙、保温砖、耐火砖、陶粒层、耐火混凝土及碎石层(见图 7)。钢环墙保证基础整体性与承载力,保温砖、耐火砖及陶粒层共同提供隔热性,其中陶粒层作为主要隔热介质,其承载力与隔热性需重点控制。陶粒材料需具备高承载力、耐化学腐蚀和低导热性,通过试验确定其堆积密度、粒径及防火等级等参数。针对陶粒材料压实困难和检测手段不足的问题,采用小型夯实机械

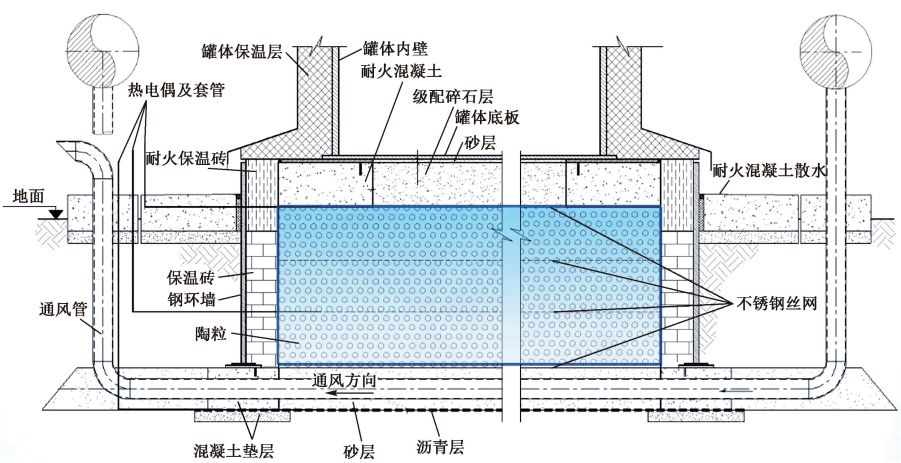


图 7　熔盐储热罐基础设计

Fig. 7　Foundation design of the molten salt heat storage tank

配合预铺钢板进行间接碾压,实现陶粒层的有效压实并避免结构扰动。

2.5.2 施工控制

储热罐基础施工采用分层施工工艺,关键工序包括钢环墙安装、陶粒填充及耐火混凝土浇筑等,通过动态与静态平板荷载试验及数字化监测手段,对回填层承载力和施工质量进行全过程控制,确保基础结构安全性与隔热性满足设计要求。

3 施工效益分析

本项目实现年均减排二氧化碳约 160 万 t,有力支撑迪拜清洁能源战略,通过高效利用沙漠太阳能资源,显著降低化石能源依赖并改善区域生态环境。同时,本项目建设直接创造约 4 000 个就业岗位,间接带动约 10 000 个就业岗位,并通过技术转让与人员培训,提升了当地新能源工程建设与运维能力。依托本项目形成的研究+应用+总结+推广一体化技术路线,通过模型试验、数值仿真与 BIM 技术协同应用,有效提升了施工效率与工程质量水平,为同类光热电站建设提供了可复制、可推广的工程示范。

4 结语

1)针对沙漠沙土转运与固化难题,结合模拟分析和化学分析等,研发了沙漠地区自制固化剂自动化固沙技术,完成大规模场地平整和沙漠固化作业,提升施工效率,降低施工成本,为后续工程建设奠定基础。

2)针对高温干燥环境下吸热塔“方变圆”滑模施工难题,研发了集大刚度滑模平台、低黏度混凝土及综合控制于一体的适宜性滑模施工技术,保障了 262m 高吸热塔在极端气候条件下的高精度连续施工。

3)针对吸热器滑移及狭窄空间内提升就位难题,研发了吸热器提升装置与方法,通过多门架液压系统和远程控制技术,实现了 1 636t 超大型吸热器在狭窄筒体内安全提升至 262m 高空。

4)研发并应用了大规模定日镜快速精准定位与数字化安装技术,提升了定日镜安装效率和精度,实现了施工过程的数字化管控,为电站高效运行提供保障。

5)针对熔盐储热罐承载与隔热一体化复合基础,研发了陶粒介质匀质压实与检测方法,形成了施工及验收标准,有效降低了热损失,提升了储热系统运行效率。

参考文献:

[1] 段雯娟. 敦煌“超级镜子”大放光芒 里程碑:中国首个百兆瓦级熔盐塔式光热电站实现满负荷发电[J]. 地球,2019(9):42-44.
DUAN W J. Dunhuang “Super Mirror” shines brightly: China’s first 100MW molten salt tower photothermal power station realizes full load power generation[J]. Earth,2019(9):42-44.

[2] 施晓飞,姜震. 迪拜 700 兆瓦光热太阳能电站项目[J]. 电力勘测设计,2020(6):2.
SHI X F, JIANG Z. Dubai 700MW photothermal solar power station project[J]. Electric power survey & design,2020(6):2.

[3] 陈杨化,李煜然,陈传琪,等. 沙漠地带场地平整机械的自动化施工研究——GNSS-机械控制系统的应用分析[J]. 建筑施工,2021,43(1):92-94.
CHEN Y H, LI Y R, CHEN C Q, et al. Research on automatic construction of site leveling machinery in desert area—Application analysis of GNSS mechanical control system[J]. Building construction,2021,43(1):92-94.

[4] 何春涛,张建. 大跨度桁架整体吊装施工技术[J]. 山西建筑,2007,33(13):135-137.
HE C T, ZHANG J. Construction technology for whole erection of large span truss[J]. Shanxi architecture, 2007, 33(13):135-137.

[5] 王志朋. 大型炼油厂焦炭塔高空整体吊装施工技术分析探讨[J]. 中外建筑,2009(1):152-155.
WANG Z P. Analysis on the integrally hoisted construction of large-scale oil refinery coke drum[J]. Chinese and overseas architecture,2009(1):152-155.

[6] 张绍平,刘卫健,胡长明,等. 复杂场地大跨度通廊单机整体吊装技术[J]. 施工技术,2012,41(2):73-76.
ZHANG S P, LIU W J, HU C M, et al. Integral lifting technology of long-span vestibule by single crane under complicated field conditions[J]. Construction technology,2012,41(2):73-76.

[7] 陈杨化,胡卫兵,喻宁招,等. 高空大型滑模钢平台整体吊装安装技术[J]. 建筑施工,2021,43(8):1539-1541.
CHEN Y H, HU W B, YU N Z, et al. Integral hoisting of high altitude large sliding steel platform[J]. Building construction, 2021,43(8):1539-1541.

[8] 陈杨化,陈李,喻宁招,等. 高空滑模钢平台拆除整体吊装技术[C]//2020 年全国土木工程施工技术交流会论文集,2020.
CHEN Y H, CHEN L, YU N Z, et al. Integral hoisting technology for dismantling aerial slipform steel platforms[C]// Proceedings of the 2020 National Conference on Civil Engineering Construction Technology,2020.

[9] 房淼森,逯静,姜奕雯. 定日镜能量传输效率建模及镜场排布设计[J]. 太阳能学报,2021,42(1):112-116.
FANG M S, LU J, JIANG Y W. Heliostat energy efficincy modeling and field layout design[J]. Acta energiae solaris sinica, 2021,42(1):112-116.

[10] 吕佳阳,张嘉英. 塔式光热电镜场布置方案的研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2020,51(5):531-538.
LÜ J Y, ZHANG J Y. Theoretical study on the arrangement scheme of tower photothermal electron microscope field[J]. Journal of Inner Mongolia University (natural science edition),

2020,51(5):531-538.

[11] 程松,邹宗峰.平面桁架构建的定日镜面形支撑结构优化及实验[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(12):2310-2320.
CHENG S,ZOU Z F. Optimization and experiment of heliostat surface shape bracing structure based on plane truss[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science),2020,54(12):2310-2320.

[12] 何杰,杜行,奚正稳,等.塔式太阳能定日镜安置位的研究[J].技术与市场,2020,27(10):1-5.
HE J,DU H,XI Z W,et al. The stow position of heliostats at CSP tower plant[J]. Technology and market,2020,27(10):1-5.

[13] 杨永礼.可再生能源背景下我国光热发电的前景探析[J].黑龙江科技信息,2017(6):121.
YANG Y L. Analysis on the prospect of photothermal power generation in China under the background of renewable energy [J]. Heilongjiang science and technology information, 2017 (6):121.

[14] 占瑜.关于2种太阳能发电前景的对比分析[J].湖北农机化,2019(9):67.
ZHAN Y. Comparative analysis of two kinds of solar power generation prospects[J]. Hubei agricultural mechanization,2019 (9):67.

[15] 刑天.沙漠——隐藏在荒凉外表下的宝库[J].知识就是力量,2019(7):20-23.
XING T. Desert—a treasure house hidden under the desolate appearance[J]. Knowledge is power,2019(7):20-23.

[16] 宋潇逸,杨依然,李煜然.大型沙漠区域槽式光热电站的场平设计优化[J].电力勘测设计,2021(7):50-57.
SONG X Y,YANG Y R,LI Y R. Optimization of site-leveling design of thermal power projects for trough solar energy in large desert area[J]. Electric power survey & design,2021(7):50-57.

[17] 周捷三.投资沙漠之光 光热发电万亿市场开启[J].中国战略新兴产业,2015(18):20-22.
ZHOU J S. Investing in desert solar thermal power: a trillion-yuan market is emerging[J]. China strategic emerging industry,2015 (18):20-22.

[18] 宋潇逸,杨依然,李煜然.沙漠区域槽式光热电站的场平设计优化[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(S1):10-16.
SONG X Y,YANG Y R,LI Y R. Optimization of site-leveling design of thermal power projects through solar energy in large desert area[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2021, 54(S1):10-16.

[19] 张锋凌,喻宁招,顾冬,等.塔式光热电站吸热器整体吊装施工技术[J].施工技术,2021,50(22):97-101.
ZHANG F L,YU N Z,GU D,et al. Integral hoisting construction technology of heat absorber in tower CSP plant[J]. Construction technology,2021,50(22):97-101.

[20] 胡卫兵,张锋凌,缪勇,等.光热电站熔盐罐基础陶粒土回填施工技术[J].施工技术(中英文),2021,50(18):99-103.
HU W B,ZHANG F L,MIU Y,et al. Construction technology of expanded clay backfilling in salt tank foundation for the CSP plant[J]. Construction technology,2021,50(18):99-103.

[21] 杨海平,王建华.高空、大跨度后张预应力异型梁模架支撑体系施工[J].四川建筑,2007,27(4):165-166.
YANG H P, WANG J H. Construction of formwork support systems for high-altitude, large-span post-tensioned irregular beams[J]. Sichuan architecture,2007,27(4):165-166.

[22] 冯子恒,孟维凯,张锋凌,等.塔式光热电站大规模定日镜立柱快速施工技术[J].施工技术(中英文),2021,50(16):80-82.
FENG Z H,MENG W K,ZHANG F L,et al. Rapid construction technology of large-scale heliostat column in tower CSP station [J]. Construction technology,2021,50(16):80-82.

[23] 张锋凌,陈杨化,陈维虎,等.光热电站大规模定日镜施工中的数字化技术应用[J].建筑施工,2022,44(2):387-389.
ZHANG F L, CHEN Y H, CHEN W H, et al. Application of digitization technology in large-scale heliostat construction of solar-thermal power station[J]. Building construction, 2022, 44 (2):387-389.

[24] 王晓雷.光热电站大规模定日镜施工中的数字化技术应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(4):1-3.
WANG X L. Application of digital technologies in large-scale heliostat construction for solar thermal power plants [J]. Theoretical research in urban construction,2025(4):1-3.