

塔式熔盐太阳能光热发电技术分析

沈亚军

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000

DOI:10.61369/EPTSM.2025010018

摘要 : 本文研究目旨在详细分析塔式熔盐太阳能光热发电技术。研究阶段, 分析技术的政策背景, 介绍示范项目, 随后分析技术实现原理、塔式熔盐太阳能光热电站的结构、关键实现技术, 并指出技术运行阶段的管道冻盐、熔盐泄漏风险与应对措施。期望本文成果能够在促进社会对熔盐太阳能光热发电技术的深度了解同时, 促进技术本身的可持续发展, 从而在宏观为国家清洁能源产业的发展添砖加瓦, 推动该技术在电力产业充分发挥优势。

关键词 : 塔式熔盐光热技术; 技术原理; 电站结构; 冻盐风险

Analysis of Tower Molten Salt Solar Thermal Power Generation Technology

Shen Yajun

Power Construction Corporation of China, Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710000

Abstract : The purpose of this study is to provide a detailed analysis of tower molten salt solar thermal power generation technology. During the research phase, the policy background of the technology was analyzed, and demonstration projects were introduced. Subsequently, the principles of technology implementation, the structure of tower molten salt solar thermal power plants, and key implementation techniques were examined. Additionally, risks such as frozen salt in pipelines and molten salt leakage during the technology operation phase were identified, along with corresponding countermeasures. It is hoped that the results of this paper will not only promote a deeper understanding of molten salt solar thermal power generation technology in society but also facilitate the sustainable development of the technology itself. Ultimately, this will contribute to the development of the national clean energy industry at a macro level and enable this technology to fully leverage its advantages in the power industry.

Keywords : tower molten salt solar thermal technology; technical principles; power plant structure; frozen salt risk

近年来, 我国大力推动新能源发电项目, 致力于加快清洁能源的转型, 有效应对化石能源枯竭带来的挑战。为推进熔盐光热技术研究与应用的发展, 国家政府近年来陆续颁布了多项指导性政策, 更进一步推动了该项技术的快速发展。目前, 塔式熔盐太阳能光热发电技术, 已经成为最具竞争力的清洁能源发展方向, 故而对塔式熔盐太阳能光热发电技术的研究, 是促进社会、相关企业对熔盐太阳能光热发电技术的深入理解、推进技术与产业可持续发展的重要研究行为。

一、塔式熔盐太阳能光热发电政策与示范项目背景

(一) 政策背景

2023年4月, 国家能源局发布《关于推动光热发电规模化发展有关事项的通知》, 提出了产业需要力争在“十四五”期间每年在光热发电领域新增开工规模满足300万千瓦左右。2023年6月, 能源局再次发布《关于开展熔盐储热等能源增加综合利用项目安全排查的通知》, 旨在为熔盐太阳能光热发电项目起到安全风险管理的指导, 并提出针对性风险管控的措施。2023年8月, 工信部等四部门发布《新产业标准化领航工程实施方案(2023年—2035年)》, 提出了研究光热发电标准, 并提出对塔式熔盐项目、菲涅尔发电配套技术以及槽式发电技术等大容量储热技术标准的研究要求。在熔盐太阳能光热发电快速发展背景下,

2024年, 国家发展改革委、国家能源局针对新能源发电并网发布了《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》, 为塔式熔盐太阳能光热发电的并网作出了有效的技术指导, 同时在2024年4月将包括塔式熔盐太阳能光热发电等47个项目纳入《绿色低碳先进技术示范项目清单(第一批)》文件内。除国家政策之外, 我国内蒙古、山西、山东、甘肃、江苏等地方政府也纷纷针对熔盐发电项目颁布地方性政策。例如内蒙古自治区人民政府, 针对“十四五”期间光热发电发布《自治区新能源倍增行动实施方案的通知》, 力争在“十四五”后的2025年全区新能源发电装机量达到1.5亿千瓦以上, 发电量达到3000亿千瓦时。大量政策背景, 推动了熔盐光热发电项目的发展, 为产业提出了明确的发展方向、要求, 并提供了并网等一系列技术保障。

(二) 示范项目

2024年11月30日,我国首批“沙戈黄”项目内最大规模塔式光热项目正式全容量并网发电,该项目为我国已投运、规模最大塔式光热电站。该项目国家首批“光热+”示范电站,750兆瓦总装机容量,其中熔盐光热发电占比110兆瓦、640兆瓦为光伏发电,光热电站安装11960面五边形定日镜,建设200m高吸热塔。作为国内首创五边形“巨蜥式”定日镜,该项目具有抗风性能强、荷载均匀分布、面型精度高且跟踪误差小的特点,受热后的高温熔盐会被传输至具有良好保温效果的存储罐内,待夜间进行能量释放,生产蒸汽来驱动发电机组发电^[1]。图1为该示范项目实拍图:



图1 塔式熔盐光热发电示范项目实拍图

二、塔式熔盐太阳能光热发电技术原理与电站结构

(一) 塔式熔盐太阳能光热发电技术原理

塔式熔盐光热发电技术,是利用定日镜设备,将太阳光聚集在中心吸热塔的吸热器,通常聚光倍数在500倍~1000倍,这一技术具有蒸汽参数高、聚光倍数高、发电效率高的特征。图2为塔式熔盐光热技术原理图:

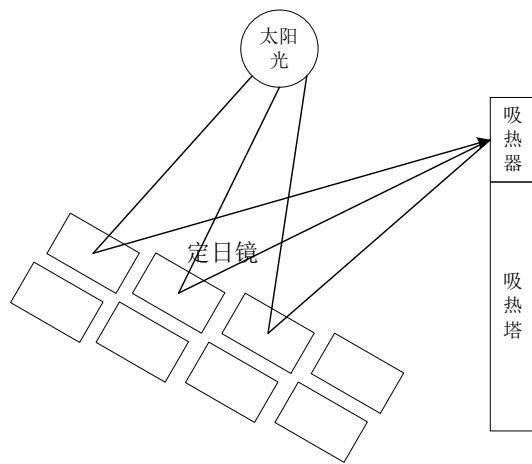


图2 塔式熔盐光热技术原理图

光热技术下,吸热工质是塔式熔盐光热技术核心部分。通常,光热技术吸热工质集中于水、热油、熔盐。塔式光热电站中常用工质为熔盐,部分情况下会使用水。线性菲涅尔技术下吸热工质主要集中于水,热油则主要用于槽式光热电站。

(二) 塔式熔盐太阳能光热发电站结构分析

1. 电站结构

塔式熔盐太阳能光热电站结构由定日镜场、动力发电系统以

及熔盐系统联合组成。其中,熔盐系统包括蒸汽发生系统、储热系统以及吸热系统。系统化工作期间,塔式熔盐太阳能光热发电站利用太阳辐射能,通过聚光和热传递,实现电能的转化。此技术依赖于集聚镜、吸热塔、熔盐循环与热转化等核心组件的协同工作。图3为塔式熔盐光热电站结构图:

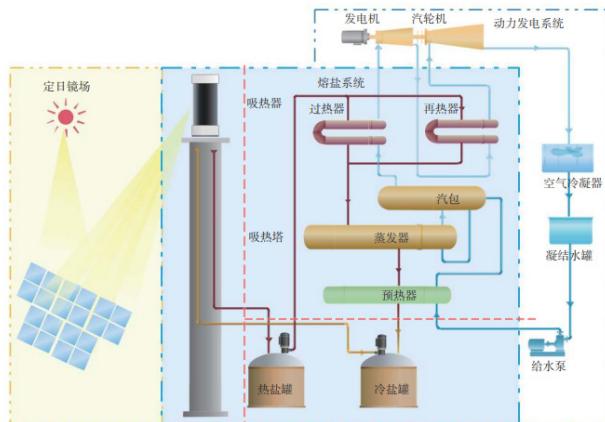


图3 塔式熔盐光热电站结构图

在塔式熔盐光热发电系统中,定日镜场内数以百计的平面镜,会被分布在地面特定区域。这些定日镜会基于计算机控制自动、精确调整方位角度,有效将太阳辐射聚集到中心塔(吸热塔)塔的顶吸热器。吸热器作为塔式光热系统核心单元,由高效的光热转换材料制作而成,负责将集中光束转化为热能,内部流动介质为熔盐,主要由硝酸钠、硝酸钾组成。熔盐有着良好的热传导性能以及宽广的液态温度区间(通常在238°C~600°C范围内)。系统运行阶段,熔盐会在吸热器中被加热至约290°C~565°C,随后被储存在系统内高温熔盐罐中,这一过程可以实现热能的储存,同时,高温熔盐优秀的保温性能优异,可实现昼夜连续发电。电站运行阶段,对热能的输送、转化过程主要依赖于热交换器。高温熔盐通过管道输送到热交换器后会与水进行热交换。水在接受热量后,能够产生高压蒸汽,蒸汽负责驱动汽轮机旋转,随后汽轮机带动发电机运转,继而将能量转换为电能。汽轮机的余热,则会通过空气冷凝器回收,将蒸汽冷凝为水,再送回到循环系统内,确保水资源可以得到高效利用。

塔式熔盐太阳能光热发电系统其独特之处优秀的储热能力,这一特性可有效克服、削弱日照不稳定、昼夜交替对发电过程稳定性带来的影响。即便在无日照条件下,高温熔盐巨大热容量,也允许其在并网后持续性输出热能,保证电站并网后供电的连续性、稳定性^[2]。

2. 关键技术

塔式熔盐太阳能光热电站的关键技术在于熔盐工质、吸热器、熔盐阀门与储罐。熔盐工质方面,系统工质主要集中于二元熔盐,俗称太阳盐,主要组成材料为60%NaNO₃+40%KNO₃,太阳盐凝固点为220°C,最高耐温为620°C。吸热器方面,常规锅炉的受热面和烟气主要采用对流换热形式(水冷壁锅炉除外),采取换热管四周换热。对比之下,塔式吸热器设计采用受光面单侧辐射换热形式,换热面积较小,仅为管周形式1/2左右,同时受光侧和背光侧的壁温温差高达数百度。运行过程中,电站吸热系统采取白天启动、夜晚停机的形式,因此吸热器对吸热管承受热膨胀应力、温差应力以及低周疲劳的能力有着较高要求。

吸热器安装在上百米的吸热塔上，故而设计期间，需要注意尽量减少吸热器的尺寸与重量，以提升安装便捷性，节约安装成本。因此，吸热管在热流密度设计上远高于锅炉，且有着更薄的管壁。

熔盐阀门与储罐方面，熔盐具有凝固点高的特征，故而系统在停机后需要面临一定的冻盐风险，特别是阀门部位，一旦设计结构存在缺陷，可能导致停机、疏盐阶段无法有效疏尽，故而常规锅炉所使用的闸阀不予考虑，而是应使用三偏心蝶阀。熔盐储罐主要用于储存冷熔盐、热熔盐工质，采取现场分段焊接安装形式。通常，熔盐储罐为整个系统中质量要求最高节点，需保证施工、安装质量，以维持后续运行的安全性与稳定性^[3]。

三、塔式熔盐太阳能光热发电系统运行风险分析。

(一) 管道冻盐风险

1. 风险成因与危害

管道冻盐风险，为塔式熔盐太阳能光热发电系统运行主要风险之一，这一风险来源于熔盐在低温下的固化问题。冻盐现象发生的成因具有多样性特点，如环境温度骤变，管道材料保温性能不足或是热管理系统故障等。具体分析，首先，环境温度的变化造成管道冻盐最常见原因。熔盐工作温度区间通常在290° C~565° C之间。夜间或阴天，若管道没有保持足够温度，熔盐容易在低温条件下出现冷凝问题继而形成固态盐，造成管道堵塞。这种情况在昼夜温差较大区域的塔式光热电站尤为明显。其次，管道伴热保温措施不足同样是导致冻盐风险成因。保温材料质量、厚度、施工工艺的有效性，都会直接影响保温效果。例如，若存在保温层不够厚、材料导热性能不佳或是伴，外界冷空气更容易侵入管道造成管道内熔盐温度下降，导致其凝固。特别是在管道较长情况或是管道弯曲部位，保温措施更难实现全面覆盖，有可能成为冻盐风险薄弱环节。最后，热管理系统故障同样会导致冻盐风险。管道中的熔盐循环，需依赖于加热器与泵的协同工作，一旦加热器或泵因故障运转，熔盐无法保持高温流动状态。热量传递、散失失衡背景下会造成局部管道温度下降。此外，冻盐现象对整个熔盐太阳能光热系统造成的后果十分严重，如管道堵塞、设备损坏、运行中断。

2. 风险应对措施

为有效抵御管道冻盐风险带来的危害，应采取多种应对策略联合实施的形式。首先，企业应提升管道的保温效果建设、改造阶段选择高效保温材料，优化保温层厚度与施工工艺，确保管道在低温环境下始终维持熔盐高温。其次，应针对管道、设备设置自动控制系统，实时监测管道温度波动情况，以便及时调整加热功率、熔盐流速参数，以确保运行阶段温度变化始终处于可控范围。最后，对于伴热保温设备应采取冗余设计，如备用加热装置、泵系统，确保主系统故障工况下快速启动备用系统，始终维持熔盐在正常温度下流动^[4]。

参考文献

- [1] 姚亚军. 塔式太阳能光热发电熔盐罐设计探讨 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27(10): 117-120.
- [2] 许利华, 侯晓东, 刘可亮. 塔式熔盐太阳能光热发电技术 [J]. 能源研究与信息, 2020, 36(03): 135-142.
- [3] 彭恒, 闫伟华. 太阳能光热发电新技术工艺路线综述 [J]. 电站系统工程, 2020, 36(03): 25-26.
- [4] 李冉. 塔式太阳能光热电站经济效益分析 [J]. 上海节能, 2020, (01): 74-77.
- [5] 江晶亮, 顾磊, 陈世通. 塔式熔盐太阳能光热电站蒸汽发生器传热数值模拟设计计算 [J]. 锅炉技术, 2021, 52(1): 14-20.

(二) 熔盐泄漏风险

1. 熔盐泄漏风险，多数情况源于系统管道、阀门、熔盐储罐等设备的材质老化、机械损伤亦或是密封不良。首先，熔盐作为一种高温介质，长时间输送过程中会对管道内壁产生化学腐蚀效应，特别是在管道连接处、弯曲部位，长期的热应力、机械应力作用下，管道可能会出现微小裂纹，随后逐渐扩展，最终发展为泄漏点。其次，机械损伤同样为熔盐泄漏的重要成因，如施工不当、外界撞击或是地震灾害等一系列偶发事件，均可能导致管道、储罐物理损伤，密封性遭到破坏，进而引发泄漏。最后，密封材料的老化、失效需要得到重点关注。系统长期运行于高温环境之下，一些密封材料如垫圈、密封胶，在高温环境下容易出现硬化、老化问题，继而失去弹性、密封效果，为泄漏埋下潜在。

熔盐泄漏事故对于系统带来的危害十分广泛。首先，泄漏将直接造成热介质损失，降低系统热效率、发电能力。泄漏量较大情况下需要进行机组停机检修，为企业带来经济损失。其次，熔盐泄漏，可能对周围设备、设施产生带来损害。高温熔盐泄漏后，对于附近的电气设备、机械结构可能造成灼烧、腐蚀侵害，同时熔盐泄漏对环境安全也会构成威胁。大量熔盐泄漏背景下一旦进入土壤和水体，可能导致土壤盐碱化、水源污染问题，对生态环境带来破坏，且高温熔盐泄漏亦有可能引发火灾甚至爆炸，威胁现场工作人员的安全。

2. 风险应对措施

应对熔盐泄漏风险，同样需采取综合性措施。首先，设计、材料选择方面，应选用耐高温、抗腐蚀性能优良的金属材料作为储罐、管道材料，推荐使用进口高镍合金，同时优化管道、储罐的厚度与结构，增强结构的抗疲劳、抗压能力。同时，关键位置应采取双层管道设计，确保内层管道泄漏期间外层管仍可起到暂时防护作用。其次，密封材料应选用耐高温、耐腐蚀性能优异的密封材料，并安排专人定期检查、更换老化密封件，确保其长期的有效、稳定性。最后，企业应利用无损检测技术，针对管道内部开展定期检查，及时发现、修复潜在的泄漏点。同时，应配置灵活的应急响应、监测系统，一旦发现泄漏迹象可能迅速启动应急预案，有效控制事态的发展，将对泄漏带来的损失降至最低^[5]。

四、结语

综上分析，本文针对塔式熔盐太阳能光热发电技术分析进行了详细分析，在对塔式熔盐光热项目政策背景、示范项目加以分析后，围绕技术原理、发电站结构与关键技术、系统运行期间的风险类型与应对策略进行详细探讨，继而形成较为完整、全面的塔式熔盐太阳能光热发电的技术体系，供社会、电力产业借鉴、参考，以在宏观推动塔式熔盐发电产业的高质量发展，为我国电力产业的绿色转型起到有效推动。