

塔式光热电站项目利用水介质进行吸热塔系统初期功能调试的方法

唐慧其

上海电气电站工程公司 上海 201100

摘要:塔式光热电站项目以熔盐作为显热储热介质,熔盐熔点温度较高,230℃时进入结晶凝固的相变临界点。因此熔盐一旦进入吸热塔系统要求系统必须具备维持熔盐始终处于熔融状态的能力,这对于新建项目系统调试初期是比较困难和具有较大技术和安全风险。而水的熔点较低,以水作为熔盐吸热塔系统的试验介质开展初期功能调试活动,达到熔盐进入系统前的可靠性验证目的,可以有效规避熔盐调试的风险,并可提前项目调试进度,因此利用水介质循环进行吸热塔系统初期功能调试的方法研究具有切实工程意义。

关键词:光热电站;吸热塔;熔盐;水循环

1 概述

塔式光热电站从物理特性、经济性考虑,主要选择熔融盐(又称熔盐)介质作为显热储热材料,目前最为广泛商业应用的复合熔盐由40%硝酸钾和60%硝酸钠配合成^[1],为了保持熔盐始终处于熔融状态,需要确保维持最低260℃介质温度,这就需要吸热塔管道、阀门、仪表保温以及电伴热等系统均已达到完备的工作状态。由于熔盐介质的特性,决定了熔盐一旦进入吸热塔系统,整个系统就已进入了几乎不可逆的运行状态,调试过程可能发生的设备故障、熔盐泄漏等问题将变得难以处置,且极易造成管道冻盐和泵、阀门等设备损坏,甚至引发次生安全事故。这一要求,也使得调试进度与系统内安装和单体调试不能并行开展,项目工期将大大延长。

鉴于直接使用熔盐开展初期调试存在较大的风险和不确定性,考虑水与熔盐具有相似的流体性能,密度比熔盐低且基本不用考虑水熔点温度的问题,水介质对系统硬件要求大大减低,几乎不会引发次生事故,因此用水作为循环介质对熔盐吸热塔系统进行冷态试验,调试和验证系统的基本保护和控制功能,有助于降低后期熔盐吸热塔系统热态调试过程风险并缩减调试工期。

2 塔式吸热器系统简介

塔式吸热系统由冷盐泵、上升管、入口罐、压缩空气罐、管屏、管屏流量调节阀、出口罐、下降管、下降管液位调节阀、冷热盐分隔阀和其他旁路、疏盐、排气阀门组成,如图1。

冷盐泵从冷盐罐向吸热器给盐,熔盐经过上升管、下旁路、上旁路,与下降管液位平衡并逐步向上填充,液位到达上旁路后完成塔填充。正常运行时,应在吸

热器达成预热条件后进行继续进行吸热器填充,管屏排空阀、疏盐阀、管屏调阀同时打开,冷盐泵提高填充流量,入口罐进入压力控制模式,熔盐填充至入口罐和出口罐启动液位,流量逐步提高至全流量,并切换下降管调节阀至出口罐液位控制模式以控制出口罐液位至运行液位,关闭疏盐阀,进入管屏温度控制回路,入口罐液位控制在正常运行液位,入口罐压力跟随管屏流量调整,镜场启动能量模式向吸热器聚光,热盐由下降管进入热盐罐存储,吸热塔由此完成熔盐吸热过程。

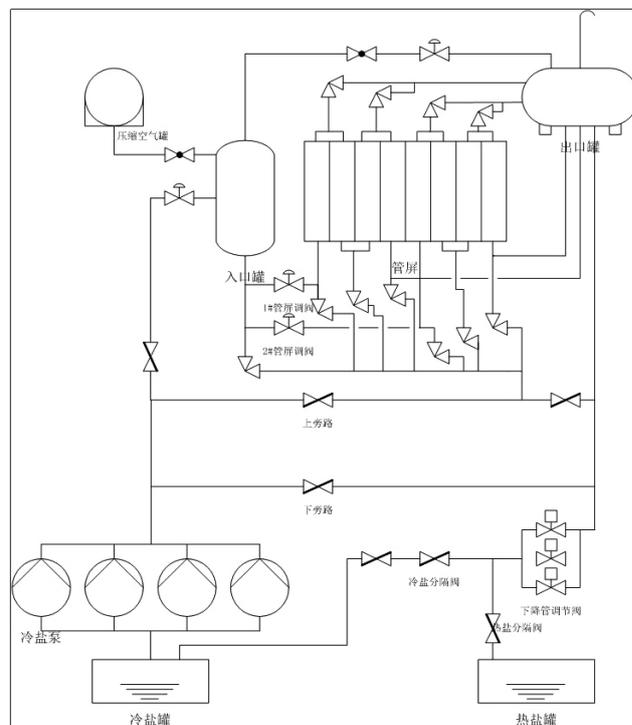


图1 塔式吸热器系统

整个吸热储能的过程涉及多套系统分组控制和集成控制，主要包括有：

- 2.1 冷盐泵功能组、启停顺控、跳闸保护；
- 2.2 塔填充（旁路填充）顺控；
- 2.3 下降管、出口罐液位控制；
- 2.4 吸热器紧急停车保护；
- 2.5 入口罐压力、液位控制；
- 2.6 管屏流量、温度控制；
- 2.7 吸热器填充、疏盐顺控。

3 吸热器水循环冷态试验的方法

3.1 试验的实现目标

水循环冷态试验是以水代替熔盐介质，在不加热管道设备和镜场不聚光的状态下填充进入吸热器系统，从而实现检查系统完备性和循环能力，检查和调整盐泵、阀门、仪表的运行参数，验证上述分系统和集成系统控制保护逻辑的正确性和完整性，使系统在进入热态之前具备整套运行能力，从而提前发现和处理系统缺陷，减少热态系统调试工作量和调试风险。

3.2 试验方法

3.2.1 试验的前置条件

试验前应完成吸热器检查，包括：（1）机务完工，水压试验、吹管、严密性试验均已通过；（2）单体调试完成，检查单体调试报告，确认数据满足设计要求；（3）盐泵试转完成，本体机械、电气、热工数据符合设计；（4）空气压缩机调试完成，具备稳定产气和持续运行能力；（5）冷盐罐完工交付，具备储水能力；（6）吸热塔内主管道范围安全警戒，防止试验过程管道振动、泄漏等产生安全影响；（7）紧急停车系统传动完成，紧急停车按钮、逻辑具备触发条件，紧急停车动作

机构动作正常。

3.2.2 试验前的准备

试验前需要对作为试验介质的水的容量进行计算，对水的化学性质进行分析，以满足试验需求和水介质对吸热器系统管道、管件、设备最小化学影响。

（1）环境温度应在5℃以上，否则应在水中加入防冻剂。

（2）用于试验的水介质须满足下表条件，以保证吸热器系统不被化学腐蚀。

表1 水循环试验水质要求

PH值	> 10
阳离子电导率	< 3μS/cm
Cl ⁻	< 1ppm

3.2.3 水的容量应按照完成填充、最大体积流量循环考虑，并提前在冷盐罐注入适量水。

3.2.4 控制逻辑定值、计算公式参数需要按照水介质进行调整。由于水与熔盐的密度存在差异，吸热器设备、管道是基于熔盐介质设计，在水循环试验开始前，需计算并按照水的密度对保护控制定值、计算公式等进行调整，以使系统适应水介质循环，并保障水循环试验时设备安全。如吸热器管屏设计限定介质流速为4.8m/s，相应进入吸热器的水的流量限定为1100Kg/s。吸热器试验时由三台冷盐泵组给水，每台冷盐泵最大流量为1200m³/s，则进入吸热器循环水的质量流量为1000Kg/s，给水至吸热器入口压力为18.2Bar，入口罐压力13.8Bar，不考虑介质重力影响管屏压降为13.3Bar，此时管屏内水的流速约为4.4m/s在设计限定范围内。

主要水循环设定参数较熔盐介质参数调整如表2。

表2 水循环试验设定参数调整

	测点	熔盐	水	单位	动作
1	盐泵出口母管压力	40	19	Bar	填充至上旁路
2	吸热器上升管入口压力	6.5	2.5	Bar	开隔离门填充MSR
3	入口罐压力	18.5	13	Bar	吸热器启动吸热模式
4	入口罐压力	8	5	Bar	吸热器启动管屏循环
5	管屏入口压力	4.9	2.55	Bar	管屏充满
6	管屏出口压力	1.8	0.94	Bar	管屏充满
7	单列管屏允许最大流量设定	783	407	Kg/s	管屏温度控制的最大流量限值
8	给盐泵流量	1491	776	Kg/s	管屏填充
9	给盐泵流量	224	116	Kg/s	上旁路循环
10	入口罐启动液位	4500	4500	mm	入口罐填充
11	入口罐运行液位	5600	5600	mm	吸热模式
12	出口罐启动液位	1600	1600	mm	出口罐填充
13	出口罐运行液位	750	750	mm	吸热模式

3.2.5 试验的过程

试验过程按照先子、分系统再整套，先下后上，先保护再控制，先手动再自动的原则开展。试验流程如图2所示。

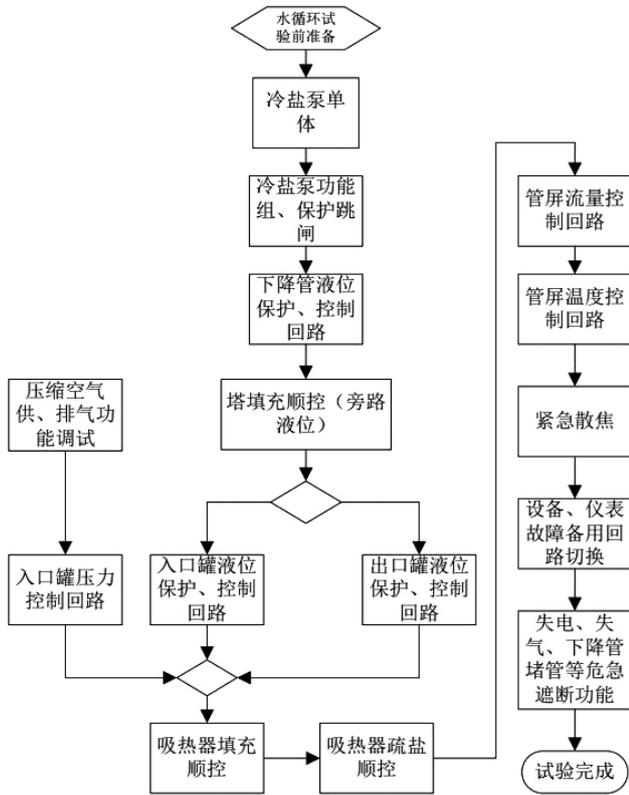


图2 水循环试验流程

冷盐泵单体水循环试验，是以单台冷泵及其自循环阀门为试验对象，配合下旁路和下降管液位调节阀手动操作，运行盐泵启动和停止程控以验证盐泵出口流量、压力，自循环阀门响应动作，检查盐泵本体振动、温度、电流、变频反馈等参数符合设计，完成检查和试验盐泵首出跳闸条件验证。冷盐泵组的配置是三用一备，1#和2#泵互为备用完成塔填充操作，在任何一台盐泵故障、跳闸或者人为切换情况下，控制逻辑应自动选择备用泵并联启，泵组水循环试验可以验证选择器的切换和切换时的瞬态工况，保证泵组在动作下输出介质的流量、压力等参数满足吸热器稳定运行。

下降管液位由三台液动控制阀组成的调节阀组进行PID控制，使下降管液位维持在目标液位，液位超调范围可控。三台控制阀同步动作，设计容量为两用一备，即任何一台阀门故障，两台调节阀的通流容量满足最大流量液位调节需求。水循环试验时，通过设定不同目标液位，完成阀组液位控制PID的整定，模拟正常工况和阀门故障工况下的阀组阀位响应和危急工况下的阀门安全动

作响应等。

在完成盐泵泵组、和阀组分系统水循环试验后，吸热塔就具备了塔填充的基本条件，然后进行吸热塔填充和疏盐程控的调试，填充程控将水自动填充至上旁路，使吸热塔具备吸热器旁路模式运行能力。需要泵组和阀组形成水循环回路进行联调，此时单泵最小流量运行，试验工况对泵组和阀组相对友好。

入口罐压力和液位控制、出口罐液位控制是吸热器运行启动的基本控制回路，如表2所示，水循环试验入口罐压力、液位和出口罐压力、液位目标设定，另有多个保护设定值，填充和正常运行时均应保持在设定值上下允许范围内，不能触发报警和保护。出口罐为常压罐，向大气排空，入口罐通过压力平衡阀联通出口罐向大气排空，因此入口罐和出口罐对液位有非常敏感的保护要求，防止热态运行时熔盐外溢。入口罐液位控制也受到压力的影响，压力控制回路由压缩空气储罐出口调节阀组执行，由2个大容量调节阀和1个小容量调节阀组成，以实现对入口罐压力的快速和精确控制。水循环试验完成塔填充后，手动增加泵组输出完成入口罐和出口罐的填充，并调节入口罐压力扰动管屏流量和入口罐液位，对入口罐液位PID控制器进行整定使液位控制阀调节并维持入口罐液位稳定。出口罐液位由下降管调节阀控制，管屏流量对出口罐液位产生扰动，应整定和验证出口罐液位控制器，并验证液位波动触发下降管调节阀安全开或盐泵跳闸后液位响应，不允许介质外溢。

吸热器填充和疏盐顺控是正向和反向的两个程控过程，填充顺控实现系统自动将介质由上旁路填充至吸热器并切换进入管屏温度自动控制或自动退出吸热器介质，这一过程的水循环试验是要检查各个动作的时序性，验证和调整控制逻辑使各动作机构逐步动作到位并准确产生热工参数反馈后进入下一步序。填充和疏盐顺控需要反复试验并找到阻碍程序下行的原因，比如阀门时间过快或过慢、步序等待延时过长或过短等，在反复试验过程中修改控制逻辑或调整参数，使填充顺控的每一步得以完成，最终切换进入吸热器管屏流量、温度串行控制模式。在使用熔盐介质运行情况下，此时吸热器开始自动跟踪镜场入射功率变化并吸收热能。

管屏流量控制由入口调门控制，在入口罐压力、液位控制器，出口罐液位控制器整定完成可投入自动运行的情况下，对管屏流量控制器进行整定，以保证管屏流量不超过最大流量限定，并可稳定控制管屏出口流量。在压力和液位稳定的情况下，通过改变入口罐压力，观察管屏调节阀动作状态，对控制器进行整定，使管屏出

口流量扰动收敛。也可改变管屏流量设定,观察和整定流量控制器使阀门动作调节出口流量至需求值。

吸热器运行工艺最核心的是对管屏温度的控制,在上述液位、压力、流量控制器完成调试并可投入自动的情况下,可进行管屏温度控制器的水循环试验。此时并没有来自镜场聚焦能量输入,因此需要用辅助配置一套能量模拟程序,以仿真镜场入射功率的变化。通过模拟程序,给温度控制器输入一定镜场入射能量值,观察和调节温度控制器生成流量需求值是否符合设计并作整定。模拟入射能量逐步提高至最大设计功率,并进行波动仿真。流量与温度控制器组成串行控制器是吸热器熔盐温度控制的核心,水循环试验可通过仿真器模拟镜场功率变量验证吸热器控制工艺。

除了基本吸热器温度控制,水循环试验可以仿真试验100%入射功率下镜场紧急散焦工况,观察控制器对管屏温度变化梯度的控制状态,确保吸热器管屏出口温度在可控状态下由最高运行温度逐步降低。

在熔盐介质下,一些事故工况的保护功能验证试验具有极高的风险和事故损害的不可逆性,比如设备故障工况下主、备用控制回路切换试验,全厂失电、失气事故工况和下降管100%堵塞工况的危急遮断试验等,可以通过水循环试验进行调试和验证,使系统在遇到这类危急事故工况时,快速触发ESD保护退出系统运行并将熔盐介质安全、可控地疏回盐罐。

水循环试验结束,应整理试验数据和编辑试验报告,将试验结果和试验遗留问题汇编和分析以供后续热态调试进一步调试和完善。

3.2.6 试验之后

试验结束之后需恢复控制和保护定值设定、逻辑强制、安全隔离措施等,定值参数由水介质参数恢复至熔盐介质参数。

同时应使用压缩空气将吸热器系统吹干,防止液态或气态水残留在系统内对吸热器材料造成腐蚀。

结论

利用水介质进行塔式光热电站吸热器系统冷态调试,规避了使用熔盐介质参与初期系统整套调试过程的设备、人员安全风险,同时也大大降低了初期调试的难度,试验人员在技术上、心理上可以相对轻松地进行各项功能试验工作,将调试工作前置至冷态工况,完整验证各种不同参数设定下的系统控制和保护功能反应,尽可能地在冷态过程中发现和解决问题,并使吸热器系统在熔盐介质填充进系统前已具备基本控制和安全保护功能。

但水循环试验仍然具有局限性,不能完全代替热态熔盐介质调试,未来水循环试验技术的发展,还取决于水介质和熔盐介质下试验数据的收集和比较。由于水循环试验依赖于仿真器,仿真器的仿真能力决定了试验结果与熔盐介质调试真实结果的偏差,需要更多的实践积累、数据采集分析和模型完善。

参考文献

- [1]张耀明,邹宁宇.太阳能热发电技术[M].化学工业出版社,2019年10月.
- [2]王金梁,吴华栋.太阳盐的热力学性质及其在光热发电中的应用[J].发电设备,2021年9月:第35卷第5期.
- [3]赵锋锋.太阳盐光热发电系统安全风险初探[J].经营与管理,2018年:第8卷第12期.
- [4]臧平伟,丁路,孙登科.塔式太阳能熔盐吸热器进出口缓冲罐设计[J].创新与实践,2019年:第26卷第10期.
- [5]高维,徐蕙,徐二树,余强.塔式太阳能热发电吸热器运行安全性研究[J].中国电机工程学报,2013年1月:第33卷第2期.
- [6]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年:第36卷第3期.