

# 热态性能试验安全管控方式分析

欧颜超

(中国核电工程有限公司华东分公司, 浙江 嘉兴 314300)

**摘要** 本文以国内某核电厂热态性能试验安全风险管控的难点、重点为基础, 对比以往同型号核电厂的热态性能试验安全管控方式, 综合阐述核电厂热态性能试验过程中热态性能试验安全管控方式对热态性能试验中风险的控制作用。通过热态性能试验风险分析, 得出热态性能试验的主要风险为人员烫伤风险和火灾风险, 分析导致上述主要风险的因素, 通过讨论和分析提出安全管控措施, 以期为后续核电厂热态性能试验安全管控方式提供有益参考。

**关键词** 核电厂; 热态性能试验; 设备性能验证; 安全风险管理

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.001

## 0 引言

热态性能试验是核能领域中设备性能验证的关键环节, 热态性能试验应尽可能模拟电厂的运行条件, 包括高温、高压等预期工况<sup>[1]</sup>。如何在热态性能试验过程中保障人员及设备安全, 降低安全事故风险, 已成为核能行业关注的焦点。热态性能试验安全管控措施是降低安全事故风险的重要手段。如何确定和落实热态性能试验的安全管控措施不仅是技术层面的挑战, 更是对管理能力的考验。通过安全专项控制方案、风险预案、安全监督巡检、风险告知的协同合作, 可以有效降低试验风险, 保障热态性能试验的顺利进行。

## 1 热态性能试验风险分析

### 1.1 热态性能试验主要风险

以国内某核电厂为例, 通过对热态性能试验涉及的区域环境、设备状态及相关作业进行分析, 热态性能试验的主要安全风险及导致因素如下:

(1) 跑水风险: 在线检查不仔细、隔离措施不到位、临时装置水管连接不紧、水位控制不当、冲洗后临时管线内水未排尽导致的跑水。(2) 火灾风险: 上充泵、主泵等启动运行过程中发生火灾或厂房内可燃物料发生的火灾。(3) 物体打击风险: 高压导致的飞射物打击。(4) 触电风险: 系统跑水引起电缆、盘柜、电机等设备漏电。(5) 职业健康风险: 电机运行过程中产生的噪声、厂房内甲醛浓度超标等。(6) 机械伤害风险: 转动部位无防护、飞射物割伤等。(7) 室息风险: 容控箱等储存氮气设备存在漏点。(8) 烫伤风险: 试验

人员操作高温阀门 / 管线时未佩戴隔热手套、隔热服。

### 1.2 热态性能试验风险分析

对上述热态性能试验主要风险及导致因素进行分析, 可能导致人身伤害的风险因素为火灾风险、物体打击风险、触电风险、机械伤害风险、窒息风险、烫伤风险。根据以往核电建设经验, 人员烫伤及易燃物着火有在热试期间发生的记录, 而物体打击、触电、机械伤害、窒息在基本安全管控措施及隔离做好后, 发生的概率较低。因此, 本文主要从热态性能试验的烫伤及火灾的角度来探讨热态性能试验期间的安全管控方式。

## 2 人员烫伤风险及火灾风险安全管控方式

### 2.1 风险控制措施层级

风险控制措施按优先级可以划分为本质安全(消除、替代)、技术改进(减弱、隔离)、工程控制、管理控制、个体防护、应急处置等层级, 每类层级的控制效果低于前一类层级, 通常采用多个层级的组合<sup>[2]</sup>。以下列举每个层级可以实施的措施: (1) 本质安全(消除、替代): 一是消除, 从根本上消除危险源, 如移除危险源、停止使用危险有害物质、不再使用某设备、消除单调的工作或导致负面压力的工作等; 二是替代, 降低危险源的危害, 如用低危险性替代高危险性、用低危害物质替代高危害物质等。(2) 技术改进(减弱、隔离): 一是减弱危险源的影响, 如减少原材料使用量、降低危害物质浓度、降低设备使用电压等; 二是隔离, 将人与危险源隔离开, 如机械设置防护装置、设置隔

作者简介: 欧颜超 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 安全管理。

离区等。（3）工程控制：降低风险发生概率，如临边设置防护栏杆、现场通风排气、设置安全警示标识等。

（4）管理控制：如发布程序制度、制定安全操作规程、开展教育培训、执行专项施工方案、落实安全技术交底、开展专项安全检查等。（5）个体防护：即个人防护用品，如安全帽、防护面罩/眼镜、防尘口罩、防烫服等。

（6）应急处置：如制定应急预案或现场处置方案、配备应急设施、装备及物资等。

## 2.2 人员烫伤风险管理方式优化

人员烫伤能量源主要为热态性能试验过程中产生的高温蒸汽及高温介质流通的高温管道。高温蒸汽泄漏后，由于人员未做好个人防护措施暴露在高温蒸汽的能量源下，导致人员烫伤；高温管道未设置保温层，人员意外触碰导致人员烫伤。因此，要控制人员烫伤风险，就要对高温蒸汽及高温管道设置安全管控措施。根据现场调查及相关专业人员讨论，热态性能试验过程中可能发生高温蒸汽泄漏及人员触碰高温管道的情况如下：（1）热态性能试验范围内安全阀、释放阀相关区域蒸汽泄漏。（2）热态性能试验一回路高温高压、二回路高温高压相关系统及WSD系统内有法兰连接的相关区域蒸汽泄漏。（3）热态性能试验高温管道的边界电动阀和气动阀因人员误动蒸汽泄漏。（4）高温管道未设置保温层。（5）人员在高温管道上作业或作业地点靠近高温管道<sup>[3]</sup>。

根据以上风险措施层级对人员烫伤的安全管控方式进行探讨可知，热态性能试验的高温是不可消除的，从这个角度来看，本质安全是不适用的，因此可以从技术改进（减弱、隔离）、工程控制、管理控制、个体防护方面考虑人员烫伤的安全管控方式。

经讨论和现场核实，高温蒸汽烫伤风险的管控方式有：（1）根据现场具体情况，选取对应的方式对蒸汽排放区域设置调试管控区，并粘贴相关警示标识。

（2）根据现场具体情况，选取对应的方式对蒸汽排放区域设置调试管控区，并粘贴相关警示标识。（3）试验前对蒸汽排放区域人员进行清场。（4）法兰连接处蒸汽泄漏时，及时关闭相关阀门，阻断蒸汽排放。（5）对高温管道的边界电动阀和气动阀进行隔离上锁。（6）试验期间，安排人员在相关入口处旁站或封闭入口门，禁止人员进入。

高温管道烫伤风险管理方式有：（1）根据现场具体情况，选取对应的方式对高温管道裸露区域设置调试管控区，并粘贴相关警示标识。（2）人员在高温管道或靠近高温管道的区域作业时，需穿戴防烫服<sup>[4]</sup>。

为有效控制蒸汽烫伤、高温管道烫伤等安全风险，通过对多台核电机组热态性能试验进行分析和讨论，并考虑到对以往安全管控方式的优化，本文提出了对核电高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置制作列表，有针对性地对热态性能试验期间的高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置开展安全管控，对上述风险点位置设置安全管控区，安全管控区有限制人员出入数量或对风险进行警示的作用，从而降低人员烫伤风险。

从空间方面看，该安全管控方式避免了以往根据经验设置热试安全管控区，导致安全管控区设置遗漏的情况。根据这一原则，对某核电机组热态性能试验期间高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置进行辨识，高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置共106个风险系统设备或房间区域，分为热试进水前（25个）、离开60℃平台前（68个）、主蒸汽暖管前（13个）三个部分阶段设置调试管控区，避免风险位置安全管控区设置遗漏。

从时间方面看，这一安全管控方式通过分阶段设置调试管控区，可以使当前阶段未设置管控区的区域工作正常进行，既规避了安全风险，又解决了统一设置管控区导致非当前热试阶段的管控区内作业不能正常进行的问题，提高了作业效率，节省了人力、物力成本。

## 2.3 火灾风险管理方式优化

根据多台核电机组热态性能试验经验，并组织对热态性能试验火灾风险进行讨论，热态性能试验的火灾风险主要包括：柴油机区域火灾风险，主泵间火灾风险，配电间、机柜间火灾风险，辅助给水泵间火灾风险，高温管道或热试期间高温部分导致靠近管道的易燃物阴燃，设备冷却水泵间火灾风险等。通过以往机组经验及分析和讨论，热态性能试验的火灾风险主要来源于配电或机柜间电路短路或过载、高温管道或热试期间高温系统设备部分导致靠近管道的易燃物阴燃从而导致火灾。

由于配电或机柜间电路短路或过载导致的火灾在以往的核电热试期间较少发生，因此本文主要对热态性能试验期间高温管道或高温系统设备部分导致靠近管道的易燃物阴燃这一火灾风险点展开讨论。

由上文可知，热试期间会对高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置设置安全管控区，从而限制人员出入数量，对风险进行警示。但是对于火灾风险尤其是阴燃情况的火灾成效并不大。

燃烧的三要素为可燃物、助燃物、点火源，要在热态性能试验期间杜绝火灾，就要阻断燃烧三要素其

中一个<sup>[5]</sup>。热试期间的助燃物为空气，热试期间所有作业都处于开放空气中，因此不能阻断；热试期间的点火源为高温管道或高温系统设备部分，热试过程中，相应的管道和系统设备必须达到一定的温度，才能完成热试，因此不能阻断；热试期间的可燃物主要为热试期间靠近高温管道的木板、高温设备泄漏的油等，可以通过安全检查，热试期间巡检及时清理拆除，因此可以阻断。

热态性能试验期间，为了降低火灾风险，主要从可燃物方面阻断燃烧的形成，避免导致火灾。因此，热态性能试验前安全专项检查及热态性能试验期间安全巡检是杜绝火灾发生的重要手段。热态性能试验前安全专项检查期间将靠近高温管道或高温系统设备部分管道的易燃物进行清理，热试期间安全巡检排查专项检查遗漏的可燃物从而完成对热试期间火灾风险的控制。

以往的热态性能试验期间安全巡检由有热试经验的安全人员或相关专业人员开展，由于人的局限性可能会导致部分偏、边、角或个人认知意外的高温位置检查遗漏，从而导致热态性能试验期间安全巡检不

到位。对此，本文提出使用热成像仪开展热态性能试验期间安全巡检这一优化建议。

红外热像仪利用红外探测器和光学成像物镜接收被测目标的红外辐射能量分布图形，反映到红外探测器的光敏元件上，从而获得红外热像图，热像图上面的不同颜色代表被测物体的不同温度。红外热像仪可将实际探测到的热量进行精确量化，同时测量物体表面各点温度的高低，直观显示物体表面的温度场，并以图像形式显示出来。因此可以通过热成像仪测量出高温部位，并将高温位置旁的易燃材料进行清理，如防火木材的碳化温度范围通常在 180 ~ 250 °C 之间，为了防止防火木材阴燃可以通过热成像仪对区域进行温度场测量，将靠近 180 °C 温度以上的防火木材进行清除。对于其他可燃物的自燃温度可通过 Arrhenius 方程估算<sup>[6]</sup>：

$$k = A \cdot e^{-E_a/(RT)} \quad (1)$$

式(1)中， $k$  为反应速率常数， $A$  为指前因子（与木材种类相关）， $E_a$  为活化能（碳化木约 80 ~ 150 kJ/mol）， $R$  为气体常数， $T$  为绝对温度 (K)。

使用热成像仪开展热态性能试验期间安全巡检与传统的热试安全巡检对比见表 1。

表 1 安全巡检优化前后对比

对比点	传统的热试安全巡检	优化后的热试安全巡检
针对性	覆盖面广，检查范围以个人经验为导向	使用热成像仪能够精准地测量出高温位置
人因因素影响	检查以个人经验为导向，人因因素对检查的影响较大	检查以热成像仪测量结果为导向，人为因素影响较小
检查达成的效果	只能检查出高温位置，不了解具体温度	可测量高温位置的温度，可根据温度利用公式判断是否会导致周边可燃物自燃

### 3 结束语

近些年，国家已批准建设多个核电项目，热态性能试验期间的安全管理对于核电项目建设进度有非常重要的影响。因此，核电机组热态性能试验安全管控方式对热试期间的安全管理举足轻重。热态性能试验过程中的安全管控方式必须根据建设工程的实际情况合理选择并开展，本文针对热态性能试验期间的人员烫伤风险及火灾风险，通过讨论和分析提出一系列优化后的安全管控方式，以期为后续热态性能试验的安全管理提供借鉴，进而降低热态性能试验安全风险，减少事故发生。

能试验要求(GB/T 41584-2022)[S]. 北京：中国标准出版社，2023.

- [2] 中国核工业集团有限公司. 安全环保风险辨识与分级管控:Q/CNNC GB 22-2021[S].<https://www.cnnc.com.cn/2021-11-22>.
- [3] 生态环境部. 建设项目环境风险评价技术导则:HJ 169-2018[S]. 北京：中国环境出版社,2019.
- [4] 罗云, 裴晶晶, 徐铭. 安全风险管理 - 宏观安全风险预控与治理 [M]. 北京：科学出版社,2020.
- [5] 孙金华, 王青松. 火灾风险评估与控制方法 [M]. 北京：机械工业出版社,2020.
- [6] [美]K.J. 莱德勒. 化学动力学导论 [M]. 北京：高等教育出版社,1987.

### 参考文献:

- [1] 国家标准化管理委员会.压水堆核电厂装料前热态性