

核电站安全壳喷淋系统给水管道的布置对系统响应时间的影响分析

付涵飞

上海核工程研究设计院股份有限公司北方分院 山东 烟台 264000

【摘要】：核电站安全壳喷淋系统的应急响应效能，与给水管道的布置形式存在紧密关联。给水管道的路径规划、构件布设及空间排布，直接作用于介质传输效率，进而改变系统整体响应时长。科学的管道布置能够减少介质输送阻碍，保障事故工况下系统快速投入运行。不合理布置则会拖慢介质输送进程，削弱喷淋系统的应急保障作用。探析管道布置与响应时间的内在联系，可为喷淋系统设计优化提供方向，提升核设施事故工况下的安全防护能力。

【关键词】：核电站；安全壳喷淋系统；给水管道的布置；系统响应时间

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.079

引言

安全壳喷淋系统是核电站应对极端工况的重要安全设施，其快速响应能力直接关系设施整体安全。给水管道的布置作为喷淋介质的输送载体，布置形式对系统启动与作用发挥时效有着关键影响。事故状态下，系统能否迅速建立喷淋效果，很大程度上取决于管道布局的合理性。明晰管道布置各类要素对响应时间的作用机制，识别布局中的不利因素，可为系统性能提升提供依据，也为后续深入开展相关分析与优化工作奠定基础。

1 核电站安全壳喷淋系统给水管道的布置的核心要求与基本原则

1.1 给水管道的布置的核安全核心要求

核电站安全壳喷淋系统给水管道的布置需以核安全为首要前提，满足事故工况下的应急传输需求，确保介质能够在规定时间内到达喷淋终端，发挥冷却降压作用。管道布置需符合核安全相关规范，具备足够的结构强度和密封性，能够承受事故状态下的高温、高压冲击，避免因管道破损、泄漏导致系统失效。同时，管道布置需兼顾应急启动的便捷性，确保在系统触发后，介质可快速通过管道输送至各个喷淋区域，无明显滞留和传输盲区。此外，管道布置还需考虑核设施的整体布局，与其他系统管线合理避让，避免相互干扰，保障整个核电厂系统的协同运行，为系统快速响应提供基础保障。

1.2 给水管道的布置的基本设计原则

给水管道的布置需遵循合理性、经济性和可靠性相结合的基本设计原则。合理性原则要求管道路径设计简洁顺畅，尽量缩短介质传输距离，减少弯头、阀门等局部阻力构件的数量，降低介质流动过程中的能量损耗，为缩短系统响应时间创造条件。经济性原则要求在满足安全和性能要求的前提下，优化管道布置方案，减少管道材料用量和施工难度，控制工程成本，但不得牺牲系统响应效率和安全性能^[1]。可靠性原则要求管道布置具备良好的可维护性和冗余设计，关键部位需设置备用管线或应急切断装置，避免因单一管道故障导致整个喷淋系统无法正常启动，确保系统在各种工况下都能稳定响应、有效运行。

1.3 给水管道的布置与系统响应时间的内在关联

给水管道的布置与系统响应时间存在直接且密切的内在关联，管道布置的每一个环节都会通过影响介质传输效率，进而作用于系统响应时间。管道路径的长短直接决定介质传输的基础时间，路径越短，介质从水源输送至喷淋终端的时间越短，系统响应速度越快；反之，路径过长会显著增加介质传输耗时，延长系统响应时间。管道的管径选择、弯头数量、阀门类型等布置要素，会影响介质流动阻力，阻力越大，介质流动速度越慢，传输时间越长，系统响应越滞后。此外，管道的布置方式还会影响系统启动时的介质填充速度，合理的布置可减少管道内空气滞留，加快介质填充进程，进一步缩短系统响应时间。

2 影响系统响应时间的给水管道的布置关键问题

2.1 管道路径设计不合理导致传输距离过长

管道路径设计不合理是导致系统响应时间延长的主要问题之一，部分布置方案未充分结合安全壳内部布局和喷淋终端位置，盲目规划管道路径，导致介质传输距离大幅增加。部分管道存在迂回绕行现象，原本可直线布置的管线被设计为曲线或折线，不仅增加了管道长度，还增加了介质流动过程中的沿程阻力。此外，部分管道布置未优先考虑喷淋终端的分布特点，将水源与喷淋终端的连接路径设计得过于复杂，导致不同区域喷淋终端的介质传输时间差异较大，部分区域喷淋启动延迟，影响系统整体响应效率，无法实现全区域快速喷淋冷却的目标。

2.2 管道阻力构件设置不当增加流动损耗

管道阻力构件设置不当会显著增加介质流动损耗，进而延长系统响应时间。弯头、阀门、变径管等构件是管道布置中不可或缺的组成部分，但过多设置或不合理设置会大幅增加局部阻力。部分布置方案中，管道弯头数量过多，且部分弯头角度设计不合理，导致介质在流动过程中产生剧烈的涡流和能量损耗，降低流动速度。阀门选型不当或安装位置不合理，会增加介质通过时的阻力，部分阀门开启过程繁琐，也会延迟介质传输进度^[2]。此外，变径管的设置不符合介质流动规律，导致介

质在变径处产生局部涡流, 进一步增加流动阻力, 延长介质传输时间, 影响系统响应的及时性。

2.3 管道布置冗余不足且缺乏应急保障

管道布置冗余不足且缺乏有效的应急保障措施, 会导致系统响应的稳定性和及时性受到影响。部分布置方案中, 未设置备用管道或备用路径, 当主管道出现破损、堵塞等故障时, 无法快速切换至备用管线, 导致介质传输中断, 系统无法正常启动, 大幅延长响应时间。此外, 管道布置过程中未考虑应急维修和快速处置需求, 管线布置过于密集或隐蔽, 一旦出现故障, 维修人员无法快速抵达故障部位进行处置, 进一步延误系统启动时机。同时, 部分管道未设置必要的压力监测和流量调节装置, 无法及时发现介质传输过程中的异常, 也会影响系统响应的及时性和有效性。

3 优化给水管道布置以缩短系统响应时间的具体措施

3.1 优化管道路径设计缩短介质传输距离

优化管道路径设计是缩短系统响应时间的核心措施, 需结合安全壳内部布局、喷淋终端分布和水源位置, 规划简洁顺畅的管道路径。在设计过程中, 优先采用直线布置方式, 最大限度缩短水源与各喷淋终端之间的传输距离, 减少管道迂回绕行。针对不同区域的喷淋终端, 合理划分管道分支, 采用辐射式布置方式, 确保各分支管线长度均匀, 避免部分区域传输距离过长。同时, 结合核设施整体布局, 合理避让其他系统管线, 在不影响其他系统运行的前提下, 优化管道路径, 确保介质能够快速、顺畅地传输至各个喷淋终端, 为缩短系统响应时间奠定基础。

3.2 合理设置阻力构件降低流动能量损耗

合理设置阻力构件可有效降低介质流动能量损耗, 提升介质传输速度, 进而缩短系统响应时间。在管道布置过程中, 严格控制弯头数量, 优先选用大角度弯头, 减少介质流动过程中的涡流和能量损耗, 确保介质流动顺畅。合理选型阀门, 优先选用阻力小、开启速度快的阀门, 优化阀门安装位置, 避免在介质传输的关键路径上设置过多阀门, 减少阀门对介质流动的阻碍^[3]。科学设置变径管, 确保变径过渡平缓, 符合介质流动规律, 避免在变径处产生局部涡流, 降低流动阻力。通过优化阻力构件的设置, 最大限度减少介质流动损耗, 提升传输效率, 缩短系统响应时间。

3.3 完善管道冗余设计强化应急保障能力

完善管道冗余设计、强化应急保障能力, 可确保系统在故障工况下仍能快速响应, 避免响应时间延长。在管道布置过程中, 针对关键管线设置备用管道和备用路径, 采用双回路布置方式, 当主管道出现故障时, 可快速切换至备用管线, 确保介质传输不中断, 保障系统正常启动。合理规划管道布置密度,

避免管线过于密集或隐蔽, 预留足够的维修空间, 方便维修人员在故障发生时快速抵达现场进行处置, 缩短故障处置时间。同时, 在管道关键部位设置压力监测、流量调节和故障报警装置, 及时发现介质传输过程中的异常情况, 便于工作人员快速采取应对措施, 确保系统响应的及时性和稳定性。

4 给水管道布置优化的实施要点与注意事项

4.1 结合安全壳结构特点优化布置方案

给水管道布置优化需紧密贴合安全壳结构特征, 保障布局与整体构造相适配, 兼顾系统响应效率与结构安全。安全壳内部空间局促、设备管线密集, 优化路径时需结合壳体尺寸与分区布局, 规避与墙体及设备的干涉。依据密封与抗冲击要求确定管道安装点位及固定形式, 保障事故工况下管路稳定可靠。同时结合壳内温湿度环境选用适配管材, 减少环境因素对介质输送与管路运行效率的干扰, 为系统快速响应筑牢结构基础。

4.2 兼顾系统协同性避免与其他系统冲突

给水管道布置优化需兼顾与核电站其他系统的协同性, 避免与其他系统管线、设备发生冲突, 确保整个核电厂系统协同运行, 不影响系统响应时间。在优化布置方案时, 需全面梳理安全壳内其他系统的管线布局和设备位置, 合理规划喷淋系统给水管道的路径和安装位置, 与其他系统管线保持安全距离, 避免相互干扰^[4]。同时, 考虑喷淋系统与给水系统、冷却系统等相关系统的协同工作需求, 优化管道连接方式和接口设计, 确保介质传输顺畅, 避免因系统协同不畅导致介质传输延迟, 影响系统响应时间。此外, 还需配合其他系统的运行要求, 合理设置管道的阀门、监测装置等, 确保各系统协同发挥作用。

4.3 严格遵循核安全规范把控设计质量

给水管道布置优化需严格遵循核安全相关规范和标准, 把控设计质量, 确保优化方案符合安全要求, 同时有效缩短系统响应时间。在设计过程中, 严格按照核安全法规、行业标准的要求, 确定管道的材料、管径、压力等级等关键参数, 确保管道具备足够的安全性和可靠性。加强设计过程中的质量管控, 对管道路径、阻力构件设置、冗余设计等关键环节进行严格审核, 避免设计缺陷导致系统响应时间延长或安全隐患。同时, 结合过往工程实践经验, 借鉴成熟的管道布置方案, 避免重复出现影响系统响应时间的设计问题, 确保优化后的管道布置方案既满足核安全要求, 又能有效提升系统响应效率。

5 管道布置优化对系统响应时间的提升效果与实践应用

5.1 管道布置优化对响应时间的具体提升效果

管道布置优化可从多个维度提升系统响应效率, 缩短响应时间, 具体效果体现在介质传输、系统启动和应急处置三个方面。通过优化管道路径, 缩短传输距离, 可直接减少介质从水

源输送至喷淋终端的基础时间,确保喷淋介质快速抵达目标区域,提升系统启动速度^[5]。合理设置阻力构件,降低流动能量损耗,可提高介质流动速度,减少介质传输过程中的滞留时间,进一步缩短系统响应时间。完善冗余设计和应急保障措施,可避免因管道故障导致的响应延迟,确保系统在各种工况下都能快速启动、稳定运行,提升应急处置的及时性。优化后的管道布置方案,能够有效解决原有布置中存在的各类问题,全面提升系统响应效率。

5.2 管道布置优化方案的实践适配性分析

管道布置优化方案需具备良好的实践适配性,能够结合不同核电站的具体情况,灵活调整应用,确保在实际工程中能够有效缩短系统响应时间。不同核电站的安全壳结构、喷淋系统配置、运行工况存在差异,优化方案需针对这些差异进行调整,避免照搬照抄。对于新建核电站,可在设计阶段直接采用优化后的管道布置方案,从源头把控系统响应效率;对于已建成的核电站,可结合现有管道布局,进行针对性的优化改造,在不影响现有系统运行的前提下,调整管道路径、优化阻力构件设置、完善冗余设计,实现系统响应时间的缩短。同时,优化方案还需考虑施工难度和成本控制,确保方案具备可实施性。

参考文献:

- [1] 马铭泽,蒋达飞,马鹏飞,等.核电站安全壳预应力监测设备改造升级与运维提升研究[J].设备监理,2025,(04):1-4+11.
- [2] 尚自端,孙渝刚,常宸宇,等.核电站新型屏蔽厂房和安全壳设计展望[J].南方能源建设,2025,12(04):183-188.
- [3] 李杰.基于机器学习的核电站安全壳地震早期预测及概率安全评估研究[D].太原理工大学,2025.
- [4] 朱瑞峰,张俊宝,吴崇志,等.非能动核电站钢制安全壳焊接及焊后热处理探讨[J].压力容器,2025,42(06):74-81.
- [5] 吴星怡,李鑫波,贡金鑫,等.预应力混凝土安全壳时变预应力损失评估[J].建筑结构,2025,55(12):67-75.

5.3 管道布置优化的实践应用价值与推广意义

管道布置优化的实践应用,不仅能够有效缩短安全壳喷淋系统的响应时间,提升核设施的应急保障能力,还具有重要的应用价值和推广意义。在实践应用中,优化后的管道布置方案可降低系统故障发生率,减少因响应延迟导致的安全风险,为核设施安全运行提供有力保障。同时,优化方案能够在满足核安全要求的前提下,合理控制工程成本,提升工程建设和改造的经济性。此外,管道布置优化的相关经验和方法,可推广应用于各类核电站的喷淋系统设计和改造中,为行业内同类系统的优化提供参考,推动核安全保障水平的整体提升,助力核电站实现安全、稳定、高效运行。

6 结语

本文围绕核电站安全壳喷淋系统给水管道的布置与系统响应时间的关系展开研究,明确管道布局对介质输送效率与应急启动速度的重要作用。合理规划路径、优化构件设置、完善冗余配置,可有效缩短响应时长,提升事故工况下的冷却降压能力。相关优化思路可为喷淋系统设计与改造提供参考,进一步增强核电站安全防护水平,保障核设施长期稳定运行。