

Technical analysis of mechanical and welding tube blockage in steam generator heat transfer tubes of nuclear power plant

Dongli Wang

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract

When non-destructive testing of steam generator heat transfer tubes in nuclear power plants reveals excessive wear, tube plugging becomes necessary. As an effective repair method for steam generator tubes, this technique promptly seals faulty components to prevent escalation and ensure normal operation. This study examines mechanical plugging methods including roll expansion plugs, drawing-type plugs, and welded tube plugging technologies. It analyzes their working principles, technical characteristics, current applications, and challenges, while discussing their practical effectiveness and optimization strategies in nuclear power plants through case studies. The research aims to provide guidance for preventive or corrective maintenance of steam generator heat transfer tubes in nuclear power plants.

Keywords

steam generator; heat transfer tube; blockage; reliability

核电站蒸汽发生器传热管机械堵管与焊接堵管技术分析

王东利

中广核核电运营有限公司, 中国·广东深圳 518124

摘要

核电站蒸汽发生器传热管进行无损检测, 如果出现磨损超标则需要进行堵管, 堵管技术作为蒸汽发生器传热管一种有效的修复手段, 能够及时封堵故障传热管, 避免故障进一步扩大, 保障蒸汽发生器的正常运行。通过研究机械堵管包括辊胀式堵头和拉拔式堵头及焊接堵管技术, 分析其工作原理、技术特点、应用现状及面临的挑战, 并结合实际案例探讨其在核电站中的应用效果及优化方向。为核电站蒸汽发生器传热管预防性或纠正性维修提供指导。

关键词

蒸汽发生器; 传热管; 堵管; 可靠性

1 引言

蒸汽发生器作为核电站核岛系统的核心设备, 其主要功能是将核反应堆产生的热量传递给二次侧的水, 产生蒸汽驱动汽轮机发电。蒸汽发生器的传热管是热量传递的关键部件, 通常由耐高温、耐腐蚀的材料制成, 如因科镍合金(Inconel600或690)等。然而, 由于长期运行、水质问题、制造缺陷或运行环境变化等因素, 传热管可能出现泄漏、堵塞等问题, 导致蒸汽发生器性能下降, 甚至威胁核电站的安全运行。

2 蒸汽发生器传热管故障分析

蒸汽发生器传热管的故障主要表现为泄漏和堵塞两种

形式。泄漏通常是由于传热管材料老化、腐蚀或制造缺陷导致的, 而堵塞则可能由水垢、沉积物或异物引起。这些故障不仅会影响蒸汽发生器的热交换效率, 还可能引发更严重的安全问题, 例如二次侧污染或机组停运。

3 机械堵管技术

国外发达国家在传热管堵管领域已经研制了多种形式的堵头结构, 形成了比较成熟的工艺[1]。我国由于核电站发展较晚, 因此核电站蒸汽发生器堵管技术主要沿用国外堵管技术, 期中机械堵管技术是一种通过物理手段封堵故障传热管的方法, 通常主要包括辊胀式堵头和拉拔式堵头两种形式。

3.1 辊胀式堵头堵管

辊胀式堵头是一种通过机械胀接实现密封的堵头结构。其主要由堵头本体和胀接部分组成, 堵头通常采用耐高温、耐腐蚀的材料(如因康镍合金或不锈钢)制成。辊胀式堵头

【作者简介】王东利(1982-), 男, 满族, 中国河北承德人, 本科, 高级工程师, 从事核电机械研究。

的结构设计使得其能够通过胀接过程与传热管形成紧密的密封。

工作原理：辊胀式堵头堵管的核心是通过堵管机对传热管进行胀接，使传热管的材料发生塑性变形，从而实现密封。堵头通常由耐高温、耐腐蚀的材料制成，如不锈钢或因康镍合金。

技术特点：

密封性好：辊胀式堵头堵管通过材料的塑性变形实现密封，密封性较高。

操作复杂：辊胀式堵头堵管需要精确控制胀管压力和行程，操作较为复杂。

适用范围广：适用于不同直径和长度的传热管。

应用案例：在日本的核电站中，辊胀式堵头堵管技术被用于修复复杂结构的传热管泄漏点。通过辊胀式堵头堵管，可以实现精准封堵，避免对其他传热管造成影响。

3.2 辊胀式堵头安装工艺过程

机械辊胀式堵头的安装工艺工程如图1，主要包括：

1. 准备工作：检查传热管状态：在进行堵管操作前根据传热管的直径和长度，选择合适尺寸的辊胀式堵头。必须对传热管堵头进行全面检查，确保其没有损伤或变形。堵管工具标定（使用前）：将工具枪连接在力矩表单元上，测量其实际力矩，用力矩表上的显示值与堵管机控制单元和计算机上显示值比较，并调整一致。

2. 传热管清洁：清除传热管表面的污垢和杂质，确保堵头能够与传热管紧密接触。

3. 传热管整形：将整形工具头插入传热管，堵管机驱动整形工具头对传热管进行整形，使传热管平整。

4. 传热管胀管：启动堵管机，对传热管进行胀接操作。堵管机通过施加压力，使传热管的材料发生塑性变形，与堵头形成紧密的密封。

5. 记录与报告：详细记录辊胀操作的参数，编写堵管操作报告，总结操作过程和结果。

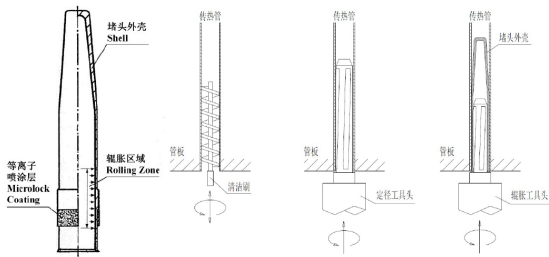


图1：传热管清洁→传热管整形→传热管胀管

3.3 拉拔式堵头堵管

拉拔式堵头是一种通过机械拉拔实现密封的堵头结构。其主要由堵头本体和拉拔部分组成，堵头材料同样采用耐高温、耐腐蚀的材料。拉拔式堵头的设计使得其能够通过拉拔过程与传热管形成紧密的密封。

拉拔式堵头堵管是通过拉拔机对传热管进行拉拔，使

传热管与堵头之间形成紧密的密封。这种方法适用于传热管泄漏或严重堵塞的情况。

工作原理：拉拔式堵头堵管的核心是通过拉拔机对传热管进行拉拔，使传热管的材料发生塑性变形，从而实现密封。堵头通常由耐高温、耐腐蚀的材料制成，如不锈钢或因康镍合金。

技术特点：

可靠性高：拉拔式堵头堵管通过机械密封，可靠性较高，适用于长期运行。

操作简便：拉拔式堵头堵管的操作相对简单，可以在现场快速完成。

适应性强：适用于不同直径和长度的传热管。

应用案例：在法国的核电站中，拉拔式堵头堵管技术被广泛用于蒸汽发生器传热管的修复。通过拉拔式堵头堵管，可以有效封堵泄漏或堵塞的传热管，保障蒸汽发生器的正常运行。

3.4 拉拔式堵头工艺过程

机械拉拔式堵头的安装工艺工程如图2，主要包括：

1. 准备工作：首先需要对传热管进行全面检查，确保其适合进行拉拔堵管操作。清除传热管表面的污垢和杂质，确保堵头能够与传热管紧密接触。根据传热管的直径和长度，选择合适尺寸的拉拔式堵头。

2. 芯轴旋入：拉拔芯轴正旋转入堵头，使其与膨胀块啮合；

3. 堵头插入：将堵头插入待堵传热管内；

4. 膨胀块拉拔：拉拔膨胀块使堵头外壳膨胀，其外壳密封环与传热管内壁贴合，形成密封；

5. 芯轴旋出：拉拔芯轴反旋转出。

6. 记录操作参数：详细记录拉拔操作的参数，以便后续分析和参考。

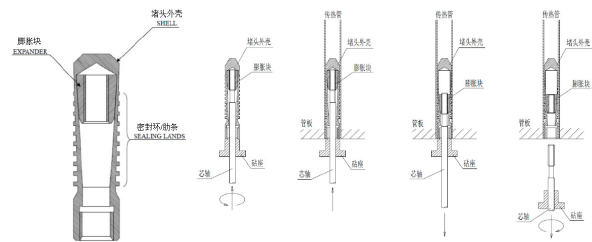


图2：拉拔式堵头安装过程

4 焊接堵管技术

国外西屋公司已开展了焊接堵管设备研究并将其搭载在管孔爬行机器人上，实现了自动焊接堵管维修，缩短了维修时间，提高了维修效率 [2]。焊接堵管技术是一种通过焊接手段封堵故障传热管的方法。

4.1 直焊接堵管

工作原理：直接焊接堵管的核心是通过焊接手段将堵

头固定在传热管的泄漏点或堵塞点，形成密封。焊接过程中，需要精确控制焊接参数，以避免对传热管造成进一步损伤。

技术特点：

密封性好：直接焊接堵管通过焊接实现密封，密封性较高。

操作复杂：直接焊接堵管需要精确控制焊接参数，操作较为复杂。

适用范围广：适用于不同直径和长度的传热管。

应用案例：在美国的核电站中，直接焊接堵管技术被用于封堵传热管的小型泄漏。通过直接焊接堵管，可以快速封堵泄漏点，避免故障进一步扩大。

4.2 间接焊接堵管

间接焊接堵管是通过在传热管的两端焊接堵头，将故障传热管完全封堵。这种方法适用于传热管泄漏或严重堵塞的情况。

工作原理：间接焊接堵管的核心是通过焊接手段将堵头固定在传热管的两端，形成密封。堵头通常由耐高温、耐腐蚀的材料制成，如不锈钢或因康镍合金。

技术特点：

可靠性高：间接焊接堵管通过焊接实现密封，可靠性较高，适用于长期运行。

操作简便：间接焊接堵管的操作相对简单，可以在现场快速完成。

适应性强：适用于不同直径和长度的传热管。

应用案例：在韩国的核电站中，间接焊接堵管技术被广泛用于蒸汽发生器传热管的修复。通过焊接堵头，可以有效封堵泄漏或堵塞的传热管，保障蒸汽发生器的正常运行。

5 堵管技术的应用现状及挑战

机械堵管实质是依靠残余应力将堵头与管子紧密结合，一旦应力松弛或消失将导致堵管失效 [3]。该项技术在核电

站蒸汽发生器的维修中得到了广泛应用，尤其是在故障传热管的修复和封堵方面。然而，堵管技术在实际应用中也面临一些挑战。

5.1 应用现状

机械拉拔式堵管技术目前在国内 CNP600、M310、AP1000、VVER 等核电机组已广泛工程应用，机械辊胀式堵管技术在 M310、CPR1000、EPR 机组已广泛工程应用，焊接堵管主要应用核电役前机组的预防性堵管。

机械堵管：机械辊胀堵管技术在美国、韩国等核电站中得到了广泛应用，拉拔式堵管在各国核电站均有应用。

焊接堵管：焊接堵管技术在加拿大、美国、法国及俄罗斯等核电站中得到了广泛应用，尤其是在复杂结构的传热管堵管中。

5.2 面临的挑战

操作复杂性：焊接堵管需要精确控制焊接参数，操作较为复杂。

材料选择：堵管材料的选择需要考虑耐高温、耐腐蚀等性能，材料选择较为困难。

成本问题：堵管技术的实施需要一定的设备和人力资源，成本较高。

6 机械堵管与焊接堵管的比较

机械堵管和焊接堵管是两种常用的堵管技术，各有优缺点。辊胀式堵头和拉拔式堵头作为两种常用的机械堵管技术，各有其独特的工艺过程和适用场景。辊胀式堵头通过胀接实现密封；拉拔式堵头通过拉拔实现密封。在实际应用中，选择合适的堵头技术需要综合考虑传热管的状态、泄漏程度以及操作条件等因素。通过详细掌握这两种堵头的工艺流程，可以更好地应用于核电站蒸汽发生器传热管的修复和维护，保障核电站的安全稳定运行。如表 1 所示

表 1：蒸汽发生器堵管技术对比

项目	辊胀式堵管	拉拔式堵管	焊接堵管
工作原理	通过堵管机对传热管进行胀接，使传热管与堵头之间形成紧密的密封。	通过拉拔机对堵头进行拉拔，使传热管与堵头之间形成紧密的密封。	通过焊接手段将堵头固定在传热管的泄漏点或两端，形成密封。
技术特点	- 密封性好，通过材料的塑性变形实现密封。 - 需要精确控制胀管时间和力矩。	- 可靠性高，通过机械密封。 - 可以在现场快速完成。	- 密封性好，通过焊接实现密封。 - 操作复杂，需要精确控制焊接参数。
利弊对比	- 操作相对简单，需要精确控制胀管参数。	- 操作简单，需要精确控制拉拔参数。	- 操作复杂，需要精确控制焊接参数。

7 结论

核电站蒸汽发生器传热管的可靠性直接关系到核电站的安全稳定运行。机械堵管（包括辊胀式堵头和拉拔式堵头）和焊接堵管技术作为两种常用的堵管技术，各有优缺点。机械堵管操作简便、适应性强，适用于传热管泄漏或严重堵塞的情况；焊接堵管密封性好、适用范围广，适用于复杂结构的传热管堵管。未来，随着技术的不断进步，堵管技术将更加智能化、高效化和环保化，为核电站的安全稳定运行提供

更加可靠的保障。

参考文献

- [1] 程檀. 蒸汽发生器传热管机械堵头的安装及拆除[J]. 设备管理与维修, 2020 (21): 124-126.
- [2] 周政. 在役核电站蒸汽发生器返修堵管自动焊工艺研究. 金属加工 2025 (04) 111-117
- [3] 王仕航. 核电站蒸汽发生器传热管机械堵管工艺评定. 压力容器 2021 (01) 75-86