

核电厂蒸汽发生器传热管断裂事故运行管理

王伟 胡勤

大亚湾核电运营管理有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i2.7589

[摘要] 蒸汽发生器传热管断裂是核电厂二级概率安全分析(Probabilistic Safety Assessment, PSA)中评估的重大事故。当蒸汽发生器的传热管在工作的情况下爆裂时,会释放出大量放射性物质。这一事故发生的频率相对较低,但由于放射后果,不符合我国放射性物质的验收标准,引起了相关工作者的大量关注。本文对于核电厂蒸汽发生器传热管破裂的原因以及探测手段进行分析,并探讨了处理此类事故的方法。

[关键词] 蒸汽发生器; 传热管故障; 处理策略

中图分类号: TB752+.4 **文献标识码:** A

Operation and management of steam generator heat transfer pipe fracture in nuclear power plant

Wei Wang Meng Hu

Daya Bay Nuclear Power Operation and Management Co., LTD

[Abstract] The steam generator heat transfer pipe fracture is a major accident evaluated in the secondary probability safety analysis (Probabilistic Safety Assessment, PSA) of the nuclear power plant. When the heat transfer tube of the steam generator bursts at operation, it releases a large amount of radioactive material. The frequency of this accident is relatively low, but due to the radioactive consequences, it does not meet the acceptance standards of radioactive substances in China, which has caused a lot of attention from relevant workers. This paper analyzes the causes and detection means of the rupture of the steam generator, and discusses the methods to deal with such accidents.

[Key words] steam generator; failure of heat transfer pipe; processing strategy

引言

蒸汽发生器传热管断裂是指在初始阶段,由于蒸汽发生器传热管道两端剪切断裂,导致大量放射性物质释放到环境中的风险。这是一种严重事故,需要核电厂PSA进行重点评估。我国《核动力厂环境辐射防护规定》将蒸汽发生器的单根传热管破裂归类为罕见和极限事故。在二级PSA中,能够构建事故进程事件树(APET),并确立各分支事件的发生条件概率,对于蒸汽发生器传热管破裂的风险进行定量评估。

1 诱发蒸汽发生器传热管断裂事故的现象

1.1 压力诱发型破裂

满功率使用时,蒸汽发生器一回路压力是15.5MPa,二回路蒸汽发生器输出的压力(也就是饱和压力)是6.7MPa,蒸汽发生器传热管两边的压力差是8.8MPa。如果一回路的压力变大,或者二回路的压力变小,可能导致蒸汽发生器的传热管压差持续扩大。当压差增至11.0MPa或更高时,蒸汽发生器存在传热管断裂风险^[1]。

1.2 温度诱发型破裂

经过长时间且足够高的温度作用,材料的塑性将发生变化,以缓解其所承受的载荷。这种塑性变形现象被称为蠕变。蠕变的发生与材料的温度、暴露时间以及所受的应力密切相关,这些参数的增加会导致蠕变程度的加剧。值得注意的是,蠕变对温度的变化特别敏感。如果蠕变累积到一定程度,材料会因为塑性应力过大而损坏,这种损坏方式就叫做蠕变断裂。

2 蒸汽发生器传热管断裂事故的探测手段

2.1 CVI的放射性探测

通过监测冷凝器中的放射性水量,可以检测蒸汽发生器传热管的裂缝。当蒸汽流量高时,可以快速检测到报警。但是该方法的缺点在于主蒸汽隔离阀在关闭时失去功能;如果蒸汽流量较低(<10t/h),线路反应速度需要较长时间;无法确认泄漏率;无法区分什么原因导致了蒸汽发生器事故。

2.2 APG的放射性探测

通过蒸汽发生器的取样管线,探测蒸汽发生器二次侧的放射性水平。在APG运行停止后,取样管线仍可正常运作,不会受到影响,但会减少样本流量,从而对检测可靠性造成影响。该方法

的优势在于其能够精确锁定出现故障的蒸汽发生器; 其测量范围广泛, 覆盖了从满功率到停堆工况的所有状态。然而, 在安全壳隔离的第二阶段, 如果安全壳隔离阀出现失电或失气的情况, 该方法可能会丧失其测量功能; 难以确定测量的放射性物质造成的泄漏; 测量管过长, 导致泄漏检测延迟^[2]。

2.3 VVP的放射性探测

每个蒸汽发生器的VVP管道都配有KRT探头, 每个传感器可以同时检测两个区域。当反应堆达到临界状态时, 可以探测100m以内的蒸汽发生器传热管破损。此外, 泄漏率可以在20%/Pa (Pa为额定功率) 以上时实现数量化。因此, 当功率低于20%P时, 警报将被抑制。该方法的优点在于能够清楚区分具体故障的蒸汽发生器; 高功率探测灵敏, 可以将泄漏率量化; 其不足之处包括: 在低功率状态下, 探测受到限制; 在低速率条件下, 反应速度较慢; 无法准确测定泄漏率等。

3 蒸汽发生器传热管断裂的处理策略

3.1 运行人员的处理策略

(1) 确认紧急停堆生效: 紧急停堆是一项至关重要的措施, 目的在于迅速降低堆芯功率, 有效减少蒸汽发生器排放功率。此举不仅能显著降低传热管破裂导致的反应堆冷却剂在二次侧汽化的风险, 而且通过降低堆芯功率, 有助于确保反应堆的安全稳定运行, 从而有效防范二次回路遭受严重污染的可能性。(2) 严格隔离事故蒸汽发生器: 必须严密封闭断裂处, 坚决防止断裂情况进一步恶化, 确保核设施安全。(3) 通过辅助给水系统(ASG)、主给水系统(ARE)冷却堆芯: 辅助给水系统(ASG)和主给水系统(ARE)一起工作, 帮助冷却反应堆的核心。万一出现紧急情况, 安全系统会自动隔离ARE装置, 并启动ASG系统。在反应堆余热排出系统(RRA)开始工作时, ASG和汽机旁路系统(GCT)会一起为反应堆的冷却提供额外的保障, 确保反应堆冷却到可以安全排出余热的程度。如果ASG系统失效, 要赶紧恢复ARE系统的功能, 继续负责冷却反应堆, 保证核电站安全稳定地运行。(4) 平衡一、二回路间的压力: 为了减小蒸汽发生器泄漏的风险, 让一回路和二回路的压力保持平衡。一回路降压方法可以采用: 暂停高压注射泵, 然后恢复化学和容积控制系统的上充功能; 看主泵是不是在运行, 如果它在运行, 就用喷淋降压, 如果没在运行, 就用辅助喷淋降压。同时, 还得控制好出问题的蒸汽发生器APG的排污流量。(5) 在处理发生断裂故障的蒸汽发生器APG时, 需控制排污流量以保持二次侧压力稳定, 直至一、二次侧压力达到平衡。(6) 一旦实现压力平衡, 应停止运行并确保泄漏已从一次回路至二次回路停止, 从而进入后备状态。一回路和故障蒸汽发生器间的压力应同步变化, 以实现维修冷停堆的过渡。在某些操作条件下, 主泵可能停止运行。为确保向维修冷停堆过渡并保证喷淋正常运行, 防止不对称自然循环方式的出现, 至少需启动一台反应堆冷却泵。同时, 为防止反应堆冷却剂稀释风险, 禁止启动传热管断裂的蒸汽发生器回路上的反应堆冷却剂泵。在完成上述操作后, 一回路和故障蒸汽发生器均需降压。正常操作程序要求在进入维修冷停堆之前启动RRA。

3.2 蒸汽发生器传热管断裂的压力控制

在处理蒸汽发生器中的传热管破裂故障时, 在故障蒸汽发生器通过APG排放至废液排放系统的过程中, 下列现象便会显现: 当蒸汽发生器内液位高于U形管内液位时, 水位降低, 热水蒸发, 而压力实则未下降; 当蒸汽发生器的水面下降到U形填料的顶部时, 水面的下降会导致填料中的蒸汽突然冷凝。这就是蒸汽发生器在事故中受压的原因。如果一次回路的压力与故障蒸汽发生器的压力之间的偏差增加, 蒸汽发生器的水面增加, U形梁再次浸入水中, 导致压力增加, 泄漏减少; 在操作过程中, 逐步降低液位并持续进行监测。这一举措将对一次及二次压力、水面波动产生直接影响。为确保系统稳定, 必须及时调整APG排放量, 以迅速将蒸汽发生器水位控制在安全范围内, 并减轻一回路的压力负荷, 防止系统发生重复振动。在蒸汽发生器热管破裂的紧急情况下, 对蒸汽压力的有效控制将成为事故处理与管理的核心任务。

由于传热管破裂而降低蒸汽发生器压力的一种特殊方法是密封与蒸汽发生器横截面接触的蒸汽。该过程包括通过蒸汽发生器的排放方向将破裂的蒸汽发生器传热管排放到TER中, 直到管束顶部露出。在此期间, 随着蒸汽体积的增加(可能不会保持在1.5MPa/h), 导致传热管破裂的蒸汽发生器的蒸汽压力相对于初始水平降低。在由于传热管破裂而导致蒸汽发生器液位狭窄的区域, 应增加排放速率, 然后降低约20t/h, 以防止蒸汽发生器压力突然下降, 暴露时可能导致传热管破裂。如果蒸汽发生器的压力由于传热管破裂而迅速下降, 则表明传热管开始暴露。然后必须调整排放速率以将压力降低1.5MPa/h。

3.3 避免主蒸汽安全阀的卡开

当蒸汽发生器的传热管断裂时, 有缺陷的蒸汽发生器的压力由APG排放流量控制。在控制失效的情境下, VVP安全阀将异常排放并固定在开启状态, 可能引发严重后果。VVP安全阀的固定开启表明蒸汽发生器的二次侧存在破损。此时, PTR001BA换料水箱里的硼酸水会经过安注泵进入堆芯, 然后流到蒸汽发生器的二次侧, 最后通过安全阀排到大气里。但是, 如果蒸汽发生器的二次侧损坏了, 安全壳地坑里就无水可用, 安注泵就可能坏掉, 不能正常工作。这样一来, 堆芯冷却剂可能会直接从VVP破损的地方排到大气里, 让堆芯暴露并受损。因此, 将连续监督规程(SPI规程)和事故堆芯监视规程(U1规程)作为指导, 保证堆芯的安全。只要蒸汽发生器的二次侧有裂缝, 或者一、二次侧之间的压力不平衡, 立即启动U1规程。U1规程可以快速冷却并让一回路恢复非承压状态, 防止冷却剂继续流失, 保证堆芯充满水, 从而维护堆芯安全。在蒸汽发生器的传热管出问题, 操作人员必须迅速控制故障蒸汽发生器的压力, 防止VVP安全阀打开。若安全阀出现卡死现象, 操作员必须立即采取有效应对措施^[3]。

①如果主蒸汽安全阀打开, 且安注泵没问题, 可以按照U1的规程来让一回路冷却和降压。同时, 让一回路和二回路的压力平衡, 防止制冷剂跑掉, 保证堆芯的安全。②如果主蒸汽安全阀卡住, 安注泵无法正常工作, 用一回路应急补水来处理。③连接移

动式泵组,建立临时补水管线,经由管线从换料水箱或其他可靠水源取水,并借助临时泵将所取之水引入一回路系统中,以确保一回路的补水需求得以满足。④在具备PTR水箱使用条件的情况下,应通过PTR水箱向接地回路注入所需水量。待PTR水箱中的水使用完毕后,需从其他合适水源取水,并通过泵送方式将水注入PTR水箱中。若PTR水箱因故无法使用,可以从任何水源取水,连接到临时供水点,并使用临时泵直接注入一回路。

3.4 双汽腔导致的震荡和波动

当蒸汽发生器的传热管破裂,APG需要对故障蒸汽发生器降压时,在故障蒸汽发生器中,水处于饱和状态并与蒸汽混合,进而与一回路相连,形成双汽腔结构,相当于为一回路增设了一个稳压器。在故障蒸汽发生器排空后,其内部水位降至U形管束,此时一回路中的水相较故障蒸汽发生器内的水温度较低。因此,每滴水流经U形管束时,会使附近的蒸汽冷凝,导致故障蒸汽发生器内部压力突发降低,使一、二回路之间的压力差增大,泄漏减少。为应对此种情况,有必要采取措施减少振荡:①通过实施APG排污,降低故障蒸汽发生器的压力。考虑到蒸汽发生器具有窄量程范围的特点,其压力下限恰好位于U形管束顶部,因此在特定范围内,需要增强APG的排污力度,以优化降压效果。②当脱离窄量程的下限时,应适当减少排放流量。考虑到管道暴露于外部环境时,蒸汽冷凝将加速故障蒸汽发生器的压力下降,因此需调整排放速度,确保降压速率稳定在1.5MPa/h。③在离开窄量程的过程中,为了迅速降低一回路压力并降低泄漏量,防止二回路蒸汽闪蒸后压力恢复至水位降低前的水平,建议将二回路压力始终维持在一回路压力低于0.2MPa的状态,使一回路压力不低于二回路。

4 蒸汽发生器传热管的安全评定方法

在蒸汽发生器传热管运行过程中,使用多功能涡流计检测传热管中的涡流。多功能涡流流量计在采集工作站上远程控制,

在涡流传感器测试前后对传热管进行传感器定位和传感器降噪。当传感器向后移动时,传热管数据收集工作已圆满完成。在测试线圈中,多功能涡流计产生1至1000kHz频率范围内的谐波电流,同时激发五个或更多检测频率。该设备可在差分模式和绝对模式下运行,允许调整相位角 0° 至 360° 。在检查过程中,采用爬行器式探头定位器,精确确定探头位置,确保涡流传感器按照预定计划移动至所有传热管。同时,通过操作探头推拔器,将探头精准放置于传热管内部。而涡流检测探头则缠绕在推拔器的传感器板上。推拔器与传感器通过管道连接,从而实现了对整个检测过程的精确控制。传感器从管道传输到被测试的传热管。检查轴向传感器时,使用14.7mm的探头检验传热管弯管段,使用15.5mm的中频或高频轴向传感器(线圈直径)检查整个传热管,使用15.5mm的三线圈旋转探头来检验传热管存在异常的区域,实现精细化检验目的。

5 总结

综上所述,本文对核电厂蒸汽发生器传热管出现断裂的原因进行分析,在此基础上提出了改进方法,为蒸汽发生器的运行效果提供了更加可靠的保障,并确保运行稳定性。

[参考文献]

[1]马若群,王臣,盛朝阳,等.核电厂蒸汽发生器老化管理分析研究[J].核安全,2021,20(05):93-99.

[2]邱桂辉,任红兵,周鹏,等.核电厂蒸汽发生器传热管接管运行特性研究[J].核科学与工程,2023,43(06):1294-1299.

[3]佟海山,李明达,周德强.蒸汽发生器传热管缺陷涡流无损检测方法研究[J].机械研究与应用,2020,33(5):180-185+188.

作者简介:

王伟(1987--),男,汉族,安徽省池州市人,硕士研究生,大亚湾核电运营管理有限责任公司,工程师,研究方向:核电运行。