

核电厂凝汽器真空系统中氦质谱检漏的应用分析

李欢

(上海核工程研究设计院有限公司 上海 200233)

摘要: 本文主要介绍了凝汽器真空系统及氦质谱真空检漏方法,并以某 AP1000 核电站真空系统为例,说明氦质谱检漏在凝汽器真空系统检漏中的操作方法,对后续同类型核电厂的真空检漏具有一定的借鉴意义。

关键词: 氦质谱检漏;凝汽器真空系统;AP1000

0 引言

凝汽器真空度是凝汽器特性的主要指标,对于核电机组的安全稳定运行以及机组的经济性都有较大影响。研究表明:在运行过程中,若机组凝汽器真空下降 1%,机组的热耗将上升 0.6% ~ 1%。因此,对于核电机组来说,真空检漏工作就变得极其重要。相比于传统的真空检漏方法,氦质谱真空检漏具有灵敏度高、结果准确以及不停机检测等优点。随着国内核电业务的不断拓展,氦质谱检漏技术在机组凝汽器真空检漏中将得到越来越多的应用。

1 凝汽器真空系统

1.1 凝汽器真空的形成

凝汽器内的真空的形成是由于汽机低压缸末级排汽在流经钛管表面时,被管内侧的循环水(海水)带走热量,蒸汽受到急速冷却骤然凝结成水,其比容急剧缩小(在 4kPa 的压力下,蒸汽的比容比水大 30000 多倍),原来被蒸汽充满的空间便会形成高度的真空。

而 AP1000 机组的汽轮发电机组在升速之前,依靠凝汽器抽真空系统的汽侧抽真空泵将凝汽器壳体内侧及与之相连管道内的空气抽出,形成机组启动所需要的真空。

1.2 凝汽器真空的维持

在核电厂机组的运行过程中,由于真空系统无法达到绝对严密,允许存在一定泄漏率。因此,漏入系统内的空气及补水中溶解的气体,最终会在凝汽器壳侧内积聚。这些不凝结的气体如果不能及时排出,在凝汽器内越积越多会导致凝汽器真空恶化,使汽轮机内蒸汽的焓降减小,出力降低,影响汽轮发电机组的正常运行。为解决不凝结气体积聚的影响,核电厂通常设置带有射气抽气器的水环式抽真空泵将凝汽器内的不凝结气体不断抽出,维持凝汽器内的高真空。

1.3 凝汽器真空系统漏气的危害

若凝汽器的真空恶化,会导致汽轮机低压缸的排汽压力升高,排汽温度升高,蒸汽的焓降变小,不仅会降低汽机的循环热效率,还可能出现严重的热膨胀,危及汽轮机的运行安全。此外,凝汽器真空度下降,会造成凝汽器内空气分压力增大,增加了空气在凝结水中的溶解度,使水中的含氧量增大,造成对蒸汽管道、疏水管道、汽轮机叶片及凝汽器等设备的腐蚀。

2 氦质谱检漏技术概述

氦质谱检漏仪是以氦气作为示漏气体,对真空设备的微

小漏隙进行定位、定量和定性检测的专用检漏仪器。具有性能稳定、灵敏度高、操作简便和检测迅速等特点。

2.1 凝汽器真空系统传统检漏方法

在核电厂的安装过程中,凝汽器真空系统一般采用灌水法进行检漏。采用符合要求的合格水灌至凝汽器喉部,静置 24 小时后观察液位的下降高度是否满足设计要求。采用灌水法进行检漏,具有漏点易于辨识、操作简单、处理后验证方便等优点。但由于灌水的高度一般在凝汽器喉部,因而凝汽器喉部以上的部分,例如低压缸本体的检漏并不能采用该方法。在核电厂运行或热态调试过程中,汽轮机组的负荷、温度发生较大变化时,由于设备的热胀冷缩产生的巨大应力,可能会造成部分法兰松动或焊缝损伤,从而引起漏气。此外,系统内介质的冲刷和腐蚀会进一步对阀门、法兰和焊缝的造成损害,使得漏气现象变得更加严重。因此,系统在运行过程中的检漏工作也极为重要。

传统的检漏方法包括灌水法、烛火法和卤素法。但上述方法都具有一定的局限性:灌水法查漏需要在停机状态下进行,且无法发现机组运行时由于膨胀不均,使连接法兰出现张口而引起的泄露;烛火法适用于真空系统简单或小范围内的检漏工作,而核电厂的真空系统涉及范围广再加上 AP1000 电厂所使用的氢冷发电机组,因此不允许该方法进行真空检漏;卤素法常采用氟利昂作为示漏气体,容易对操作人员造成伤害,且现场复杂的管路布置环境也会给卤素探测仪的使用带来不便,容易出现遗漏未检测到的位置。

2.2 氦质谱检漏方法的优点

氦质谱检漏仪是以氦气作为示漏气体对真空设备的微小漏隙进行检测的专用仪器。采用氦气作为示漏气体具有以下优点:

- (1) 氦气的质量数小,穿透能力强,能穿透微小细缝;
- (2) 无色无味,无毒性,不会对操作人员人身安全造成危害,也不会污染工作环境;
- (3) 氦气是惰性气体,化学性质稳定,不会与真空系统内介质发生反应;
- (4) 在空气环境中的含量极少且组分基本恒定,满足检测灵敏度的要求,减少了本底对检测准确性的干扰。

3 氦质谱检漏技术的应用

以国内某 AP1000 核电厂为例,来说明氦质谱在凝汽器真空系统检漏中的应用。

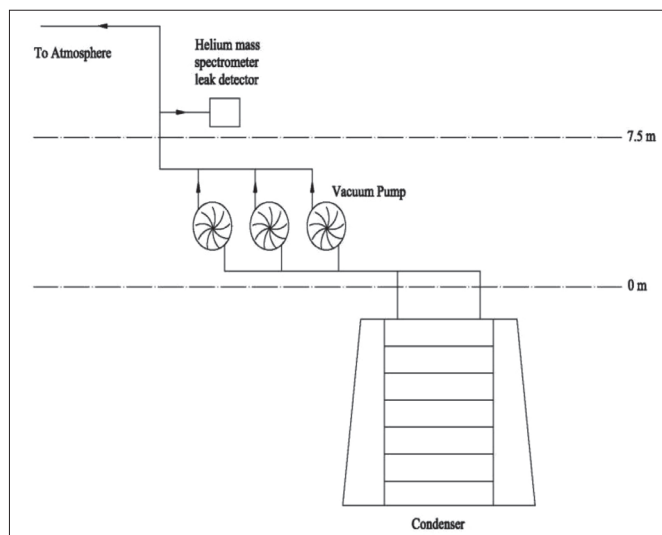


图 1 氦质谱仪取样点位置示意图

3.1 氦质谱仪取样点的设置

如下图 1 所示，凝汽器抽真空泵位于 0 米层，排气管道从 7.5 米层通向大气，为便于人员操作，可在 7.5 米层的管道上开孔作为氦质谱仪的探头取样点。

3.2 氦质谱仪检漏的使用方法

在凝汽器真空系统可疑泄露处喷少量氦气，若有漏点存在，所喷的氦气会混在空气中一同被吸入真空系统，从而被在上述取样点的氦质谱检漏仪检测到氦气的存在。并且可以通过氦质谱仪上仪表读数的大小判断出漏点的大小。

3.2.1 采取先上后下的原则

由于氦气质量数为 4，比空气轻，极易上飘，在进行系统的检漏时，若先检测下部，喷洒的氦气容易发生上飘进入系统的上部漏点而产生漏点位置的误判。因而，AP1000 核电厂真空系统的检漏过程中要采用先上后下的方法，从汽轮机所在的 16 米层开始逐层检查至 -9.5 米层，每一层的阀门、焊缝和法兰也要按照标高的高低顺序（先高处后低处）进行检测。

在检测过程中，准确判断漏点的位置是极其重要的。如图 2 所示，若在检测管道阀门时发现 A 处存在漏点，再检测下部管道焊缝 B 处也发现氦质谱仪的仪表读数高于正常值。造成读数偏高的有两种可能：一是管道焊缝 B 处存在漏点；另一种可能性是喷氦检测时，氦气上飘到 A 处漏点。

针对上述情况，若两根管道之间间距较小，可按下列方法进行判断 B 处是否真正存在漏点。当 B 处检测时仪表读数比 A 处大（A、B 处喷氦量要求基本一致），说明 B 处肯定存在漏点；当 B 处检测到的数值比 A 处小很多，则可认为是氦气上飘从 A 处进入系统引起的，B 处不存在漏点；当 B 处检测到的数值稍小于 A 处，则需要等待 A 处漏点处理完成后，重新喷氦检测进行判断。

若两根管道之间的距离远大于管道直径，当检测到 B 处的数值比 A 处小，可在 B 处上方的 C 处喷适量的氦气，若仪表读数与在 B 处喷氦时变化不大，说明 B 处不存在漏点，这是因为氦气上飘无法到达 B 处，仪表的读数是由氦气进入 A 处所引起的。同理，若仪表读数比在 B 处喷氦时小很多，则

说明 B 处存在漏点。

3.2.2 分区域检测

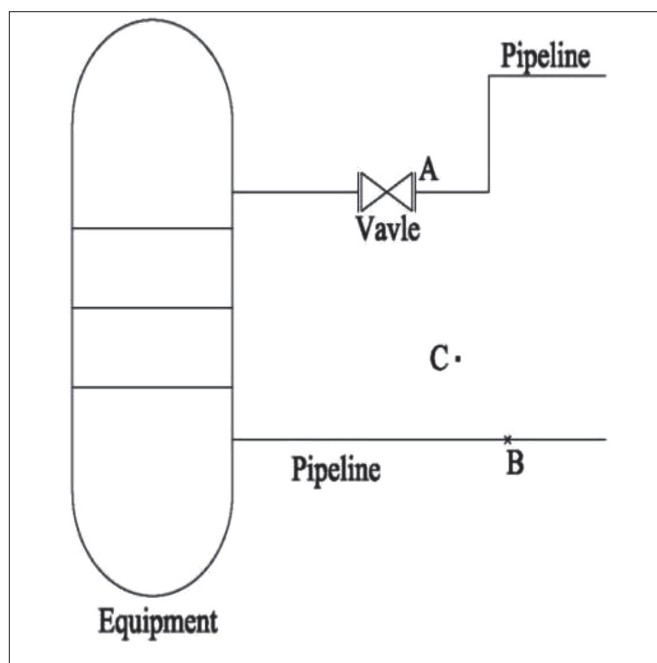


图 2 上、下部漏点检测判断示意图

AP1000 核电厂真空系统庞大，涉及到的管道和阀门较多，部分管道的法兰较大，焊接管道的焊缝长，逐个进行检测需要花费较长时间。为了提高工作效率，可采用分区域的检测方法来提高检漏工作的效率。可以根据现场的实际情况，采取就近原则对于同一平台的待检测系统划分为一个区域，对该区域内的阀门、法兰和焊缝同时进行喷氦检测，若氦质谱仪检测不到数据，则可排除该区域存在漏点的可能性，这样能迅速定位到漏点的大致位置，极大的提高了检测速度。

3.2.3 通风对检漏的影响

该 AP1000 核电厂汽轮机厂房的通风系统是通过屋顶风机及新风机组在汽机厂房内形成强制对流，保持夏季厂房内具有合适的温度，另外设置了扰动风机，防止厂房内局部过热。在冬季，通过暖风机来保证厂房内温度满足人员和设备的防冻要求。

在厂房内通风设备启动时，空气的强制流动会带动氦气四处飘散，容易出现氦气飘到其他位置的漏点使氦质谱仪的仪表读数高于正常值，从而无法准确判断检测位置的泄露情况。因此，在执行检漏操作时，应关闭上述通风设备，减少空气流动的影响。若真空系统的检漏工作正好安排在夏季或冬季，则建议夏季在清晨或黄昏时段，冬季在午间时段进行该工作。

3.2.4 保温层内的检漏方法

凝汽器抽真空系统涉及到的管道大部分都有保温层。若漏点在保温层内，是不容易被检测和发现的，拆除保温层才便于查找漏点，但无目的的拆除会造成浪费。针对于这类情况，可利用尖锐的工具捅破保温层，进行喷氦检测，并适当加大（下转第 25 页）

身热膨胀量不同产生的内应力,加上荒煤气管道自身重量、管道内部积灰重量、各箱体连接支管等限制了管道的变形,最终导致管道焊缝被管道自身的热膨胀而拉裂。

通过分析 11# 高炉、5# 高炉煤气管道开裂位置均发生



图 1 管道中下部积灰

在 4# 箱体主管道与变径连接焊缝处、配合(见图 2),为此,做进一步分析说明:

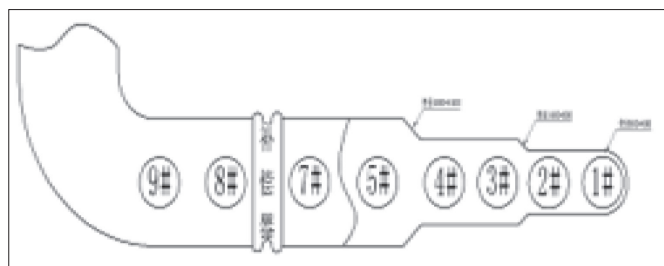


图 2 4# 箱体主管道与变径连接焊缝处易发生开裂

(1) 荒煤气管道在 7# 支管与 8# 支管之间设置了 1 台大拉杆波纹补偿器, 9# 支管处紧邻南侧大弯头, 荒煤气管道 7# 支管至大弯头区间的热膨胀变形应力被补偿器吸收, 所以管道南侧开裂并不多见;

(2) 荒煤气管道 1#-7# 支管区间总长度在 30m、区间

没有设置补偿器, 由于 4# 支管位置处于 1#-7# 箱体中间位置, 荒煤气管道焊缝承受热膨胀变形应力最大, 是荒煤气管道开裂多集中于 4# 支管处的主要原因;

(3) 荒煤气管道在 4# 支管处设置管道变径一个, 管道变径为自制拼接而成, 焊缝聚集焊接应力增大, 是荒煤气管道焊缝开裂的又一主要原因;

(4) 荒煤气管道变径处、荒煤气聚集流动使温度变化更为明显、导致管道热膨胀量增加, 是造成管道变径处开裂的次要原因。

3 煤气管道预防开裂措施

在荒总管 4# 支管处设置一台大拉杆补偿器来弥补荒总管 1#-7# 支管区间的热膨胀应力变化所导致的管道焊缝开裂, 新增补偿器的补偿量 $= 0.01\text{mm} \times \text{荒煤气峰值温度} \times \text{荒煤气总管长度} - \text{在线补偿器补偿量}$ 。

管道变径优先使用热成型过渡变径或者使用圆锥体卷管变径, 避免使用拼接管道变径, 减少管道变径处的焊接应力聚集。

管道接头采用搭接方法施工时、焊脚高度与管道母材厚度相当、焊缝应饱满不得有焊接缺陷、焊缝焊接完成后对焊缝进行焊接加强板、增加焊缝焊接强度。

4 结语

荒煤气管道通过现有施工焊接方式、并加装焊接加强板经测算后能够承受目前煤气压力。荒煤气管道开裂主要原因是由于管道中下部积灰后荒煤气管道温波动导致管道内部应力所致。目前可以通过安装补偿器的方法解决管道开裂问题。

探讨补偿器采用法兰与荒煤气管道连接, 荒煤气管道分段制作、管道和弯头端部焊接法兰进行组装的可行性。荒煤气管道内部安装导流叶片引导煤气在管道内部的气体流向, 改善管道下部积灰现象发生。

参考文献:

- [1] 陈文峰, 赵金旭, 应婷, 蔡春秋. 冶金有色行业 - 煤气作业操作资格培训教材 [M]. 北京: 团结出版社, 2011.23-25.
- [2] 于宗宝. 工业管道工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.1-8.
- [3] 柳金海, 陈百诚. 金属管道焊接便携手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.12-14.

(上接第 23 页)

所喷的氦气量。当发现漏点时, 拆除保温层进行漏点定位, 若未发现漏点, 则不需拆除保温层, 以免造成浪费。

4 结语

AP1000 核电厂凝汽器真空的状况不仅关系到电厂的经济效益, 还关系到核反应堆的安全稳定运行。氦质谱检漏技术能够对真空系统进行定位、定性和定量检漏, 在火电等领域已广泛推广并得到有效验证。因此, 将氦质谱检漏技术应用于 AP1000 电厂的真空系统的检漏工作是一项成熟可靠的选

择。

参考文献:

- [1] 史锡兆. 火力发电厂凝汽器真空系统氦质谱检漏技术 [J]. 真空电子技术, 1997, 000(005): 35-39.
- [2] 何己有. 氦质谱检漏仪检测原理及应用 [J]. 聚酯工业, 2011, 024(002): 54-57.
- [3] 何鹰, 顾文新. 火力发电厂凝汽器检漏技术探讨 [J]. 电力自动化设备, 1998, 066(002): 41-43.