

用 SIEVERS* TOC 分析仪来避免锅炉不当启动及其成本

案例分析 | 电力

| 背景

美国田纳西河谷管理局（TVA, Tennessee Valley Authority）所属的艾伦联合循环发电厂（Allen Combined Cycle Plant）位于田纳西州孟菲斯市近郊，艾伦发电厂是田纳西河谷管理局的第七家联合循环发电厂。发电厂于 2018 年新增 2 台天然气轮机（每台 33 万千瓦）、1 台燃烧蒸汽轮机（42 万千瓦）、以及 3000 块太阳能板（约 1 万千瓦）。发电厂的总发电量超过 100 万千瓦，为 50 多万户家庭供电。

艾伦发电厂的前身是拥有 55 年历史和三个燃煤机组的艾伦化石燃料发电厂。天然气发电的排放很低，艾伦发电厂于 2018 年成为管理局的最高效的天然气发电厂¹。在发电高峰时段²，发电厂每天要用 7 - 10 百万加仑（约 26500 - 38000 m³/天）的水来冷却冷凝器。由于在生产效率和资产优化方面有较高要求，发电厂难以承受因停机而造成重大经济损失，因此采用了总有机碳（TOC, Total Organic Carbon）监测法来预防因乙二醇（glycol）泄漏而导致停机，造成高昂损失。

| 挑战

艾伦发电厂的锅炉给水系统的设计与管理局的其它两家发电厂的锅炉给水系统的设计相同。去年，这三家发电厂的闭环冷却水系统都发生了乙二醇泄漏，不得不停产维修，以维护设备安全。艾伦发电厂寻求建立一种更积极主动的监测工艺来避免再度发生此类停产维修。

艾伦发电厂的技术人员检查了冷却水回路，测试了冷凝水和加有冷却水（约含 35% 乙二醇）的冷凝水。测试结果表明，污染是由泄漏到锅炉给水泵中的少量乙二醇引起。泄漏的原因有以下两条，都涉及到密封不良：

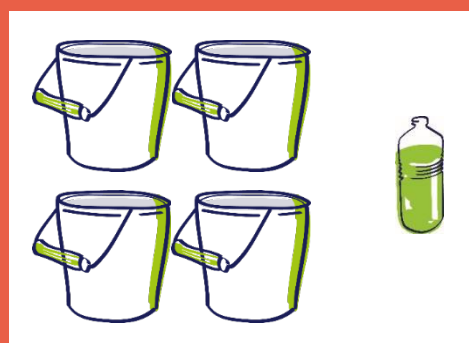


图 1. 左侧为最初估计的导致设备损坏和 pH 值偏移所需的乙二醇量，右侧为实际上能造成发电厂停产和管道老化的乙二醇量。

1. 当发电设备不运行而闭环冷却水系统正常运行时，冷却水与锅炉给水泵之间有约 150 PSI 的压力差。如果给水泵的密封不良，就会导致乙二醇泄漏。
2. 当发电设备运行时，如果给水泵的密封不良，也会导致乙二醇泄漏。

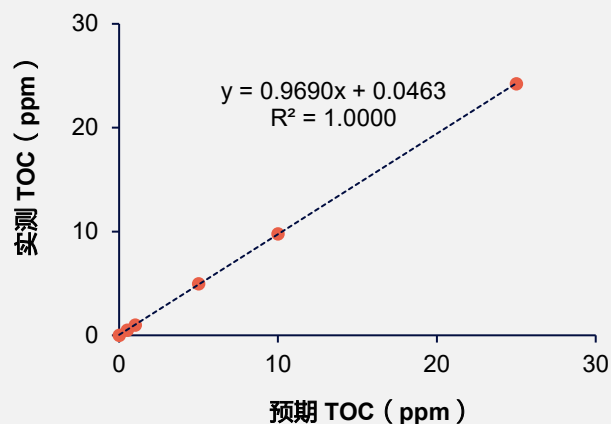
发电厂只有迅速确定停机的根本原因，才能尽快恢复生产，降低经济损失。

乙二醇在室温和正常压力下为非离子状态，因此无法用 pH 值或电导率等传统监测技术来检测乙二醇泄漏。但当给水进入低压（70 - 80 PSI）、中压（300 - 350 PSI）和高压（1600-1800 PSI）桶之后，水中的乙二醇会氧化成乙酸等有害的有机酸，使水的 pH 值从 10 迅速降到 5。随着水从液体变为蒸汽，低 pH 值的环境会使金属呈熔融状态，使管道壁被腐蚀变薄。低 pH 值甚至还能在 24 至 48 小时内使管道壁穿孔，造成更严重的管道破损。艾伦发电厂在调查锅炉事故时，最初以为需要几加仑的乙二醇才能造成这样的锅炉损坏，但实际上只需半升乙二醇就能造成发电厂停产（见图 1，1 加仑约为 3.79 升）。

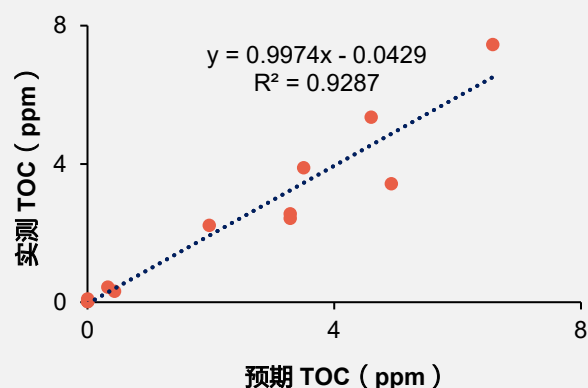
停产会给发电厂带来重大经济损失。管理局估计，停产 5 天的经济损失高达 170 万美元。没有蒸汽就无法发电，因此艾伦发电厂用一台燃气轮机作为备用，以减少停机损失。如果没有备用轮机，管理局的发电厂可能会面临 500 万美元以上的停产损失，具体损失金额取决于当时的发电量需求。此外，设备损坏还会使发电设施加速老化，从而进一步加大损失。

| 解决方案

艾伦发电厂采用 TOC 分析法来测量有机污染物，TOC 分析法是一种能够快速、准确、可靠地检测乙二醇泄漏的取样工艺。TOC 浓度与泄漏的乙二醇浓度呈正比线性关系，因此可以用 TOC 来检测超纯给水中的微量乙二醇，如图 2a 所示。在开始 TOC 监测之前，管理局进行了一系列测试，以确定能触发 TOC 响应的加标乙二醇浓度（见图 2b）。



(a)



(b)

图 2. (a) Sievers 分析仪实验室先前完成的测量结果，以及在宽浓度范围内回收率大于 97 % 的乙二醇（ethylene glycol）测量结果。(b) 管理局用丙二醇（propylene glycol）进行的类似测量结果。

此时用正常测量值的基线与峰值结果相比较来定义行动限。测试结果表明，仅几盎司乙二醇的泄漏就会产生 400 - 700 ppb 的 TOC 结果。在正常情况下，纯冷凝水中的 TOC 浓度应低于 100 ppb，通常在 20 ppb 附近。

TOC 分析仪将有机化合物氧化成 CO₂，并测量所产生的 CO₂。有多种方法可以用来进行氧化和检测，而艾伦发电厂采用膜电导检测和紫外过硫酸盐氧化法。这种 TOC 方法被广泛用于饮用水处理、制药、半导体等行业的从原水到超纯水的监测。

测试程序包括 TOC 分析和各种样品检查，能够有效预防有害的乙二醇泄漏。操作人员可以根据测试结果来制定日常监测步骤，也可以根据测试结果来决定是否切换或关闭设备。图 3 是决策流程示意图。

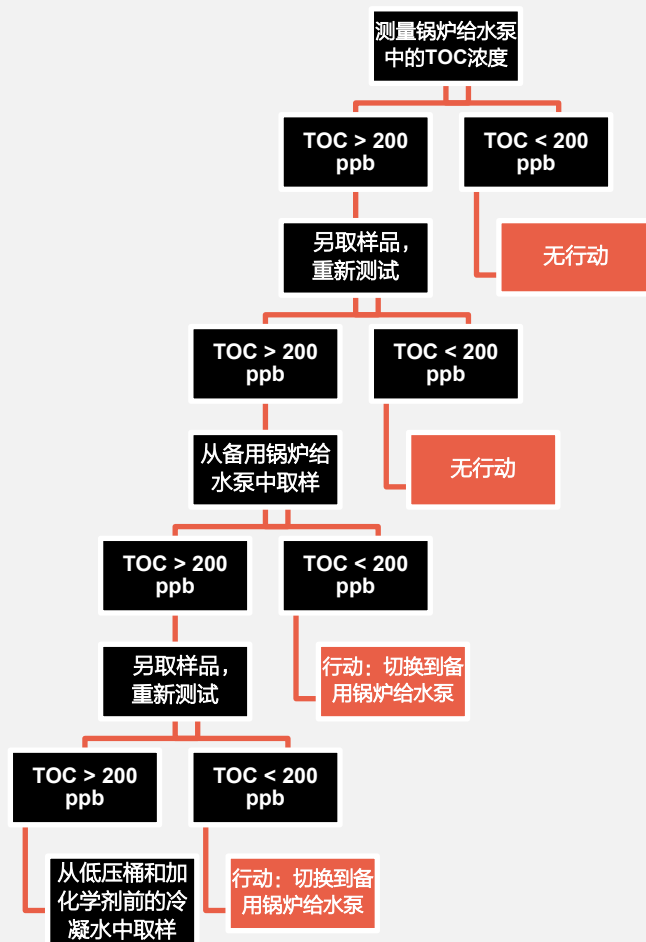


图 3. 田纳西河谷管理局艾伦发电厂采用 TOC 分析法来检测乙二醇泄漏的操作程序流程示意图，包括行动限和步骤。

在开始操作之前，先从锅炉给水泵的水池中取样，测量 TOC。发电厂有两个锅炉给水泵。如果在泵 A 中测出高于痕量的 TOC，则测试并使用泵 B，除非在泵 B 中也测出高于痕量的 TOC。每天进行两次样品分析，检查是否有足以损坏设备或系统的 TOC 结果。

也可以从低压桶中取样，因为低压桶是较早的检测点。在更换锅炉给水泵的机械密封材料时完成低压桶取样，以确保密封材料保持良好性能。如果发现低压桶中有泄漏，应彻底冲洗和清洁系统，去除有机酸并恢复较高的 pH 值。以往的测试方法具有破坏性，在不进行破坏性测试的情况下很难彻底分析管道壁变薄的原因。但 TOC 测试法则不同，能够提供易测量和可重复的 TOC 数据，是一种稳健耐用的检测技术，帮助艾伦发

电厂在发生停机事件和设备老化之前就能够监控、测量、预防乙二醇泄漏。

此项检测技术提高了发电厂的运营信心，未来可以在全管理局推广，实现连续的在线监测。

结论

一家大型跨国电力公司使用在线型监测工具来保护设备资产、控制水处理工艺。保证蒸汽纯净，就能最大程度地提高生产效率，最大程度地减少停机时间，从而确保电力和天然气的生产、配送、销售。

即便是针孔般小的乙二醇泄漏，都会损坏发电厂的工艺设备。在较高的温度和压力下，乙二醇会降解为有机酸，进而酸化水流，加快系统腐蚀。虽然无法准确量化发电设备老化或管道壁变薄所造成的损失，但发电厂停产一天就会损失数百万美元的营业收入。pH 值和电导率都难以检测到给水泵中的乙二醇泄漏，因而无法及时提醒操作人员系统中的有机酸降解。TOC 分析法被证明是检测乙二醇泄漏的最有效方法，实验室或在线的 TOC 检测浓度从低到高，范围非常广。当发现 TOC 浓度偏离了典型工艺浓度时，就表示有乙二醇泄漏。

艾伦发电厂采用 TOC 分析法来监控设备运行，能够及时采取措施保护设备，维持发电厂的正常运营。使用膜电导检测技术的 TOC 分析仪能够检测到极低浓度的乙二醇泄漏，并且具有回收乙二醇和有机酸的超高灵敏度。事实证明，TOC 分析仪非常有助于发电厂的运营监控。当分析仪第一次检测到乙二醇泄漏事件时，即完成了分析仪的投资回报。田纳西河谷管理局艾伦联合循环发电厂用 TOC 分析法建立了乙二醇检测工艺，为发电厂带来了更高的运营信心和更好的资产保护。

参考文献

1. "Allen Combined Cycle Plant." TVA, www.tva.gov/Energy/Our-Power-System/Natural-Gas/Allen-Combined-Cycle-Plant.
2. "Allen Combined-Cycle Power Plant, Tennessee, United States of America." Power Technology | Energy News and Market Analysis, www.power-technology.com/projects/allen-combined-cycle-power-plant-tennessee/.

