

二段填料泵试运时机械密封泄漏的原因分析与对策研究

李学斌 郑逸 李旭强

新疆心连心能源化工有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i4.15464

[摘要] 本研究聚焦于新疆心连心能源化工有限公司内聚甲醛项目中所使用的二段填料离心泵,在设备初次运行测试期间遭遇了机械密封频繁泄漏的问题。首先,文章概述了机械密封的基本构造及其工作原理;接着,基于实际运行测试与拆解检查过程中收集到的数据,详细探讨了导致泄漏的具体因素,并据此提出了针对性的对策。

[关键词] 甲醛制备; 机械密封; 泄漏; 原因分析

中图分类号: TQ326.51 **文献标识码:** A

Analysis on the causes and countermeasures of mechanical seal leakage of two-stage packing pump during trial operation

Xuebin Li Yi Zheng Xuqiang Li

Xinjiang Xinlianxin Energy & Chemical Co., LTD.

[Abstract] In this paper, the frequent leakage of mechanical seal of the two-stage packing centrifugal pump in the formaldehyde preparation unit of Xinjiang Xinjiang Energy and Chemical Co., Ltd. during the trial operation after installation of the equipment was deeply analyzed. This paper first introduces the structure and working principle of the mechanical seal, and then analyzes the leakage cause in detail according to the actual situation of trial operation and disassembling and maintenance, and puts forward effective preventive measures accordingly.

[Key words] Formaldehyde preparation; mechanical seal; leakage; cause analysis

引言

机械密封作为一种广泛应用于流体旋转机械(如离心泵、离心机、反应釜和压缩机等)的轴封装置,其主要功能是防止介质通过轴与设备之间的圆周间隙发生泄漏。由于机械密封具备泄漏量小、使用寿命长等显著优点,已成为传动设备中最为重要的轴密封方式之一。然而,不正确的安装或组装可能导致机械密封在短时间内失效并发生泄漏。本文通过对甲醛制备装置中二段填料泵的机械密封泄漏案例进行分析,旨在深入探讨泄漏原因,并提出有效的解决方案。

1 离心泵机械密封的结构和原理

1.1 机械密封的结构

机械密封作为一种轴向旋转密封技术,其实现原理基于弹性元件对动环与静环之间形成的摩擦副进行预压紧,并借助介质压力及弹性元件自身施加的压力来确保密封效果。该装置通常由多个关键组件构成,包括但不限于活动环、固定环、以及它们各自的密封圈、弹簧座、定位螺丝钉和防止转动的销钉等。这些组件共同组成了四大主要部分:主密封单元、辅助密封系统、补偿机制以及动力传输机构。除此之外,还配备了诸如冷却、冲

洗与润滑等功能性的支持设施。

1.2 密封原理

泵用机械密封通常由五个独立的密封区域组成,这些区域协同工作,以阻挡介质沿各种潜在路径泄漏。这五个主要密封部位包括:静环与其安装座之间、密封压盖与泵体之间、动环与轴套之间、轴套与泵轴之间,以及动环与静环之间。其中,前两者为静态密封,第三和第四位置则属于准静态密封,通常采用O型圈或V型圈等弹性密封件来实现密封效果。最为关键的则是动环与静环之间的密封。在设备运行期间,密封液的压力和弹簧等弹性元件产生的轴向载荷促使动环紧贴静环,同时允许其在保持接触的基础上相对滑动。需要指出的是,虽然增加O型圈的压缩比可以提升端面的贴合力,但这种方式容易引起接触力随时间减弱,并使恢复时间变长。此外,介质温度升高会削弱接触力的维持能力,而系统压力则有利于接触力的稳定。由于密封端面之间贴合极紧,界面间仅存在微小缝隙,介质在通过此极窄通道时,会形成一层极薄的液膜。这层液膜一方面提升了流体阻力,从而抑制泄漏,另一方面也为摩擦副提供润滑,有助于密封长期稳定运行。但若该液膜出现汽化或消失现象,动

静环间将发生泄漏, 并造成摩擦磨损加剧, 最终使密封系统寿命大幅降低^[1]。

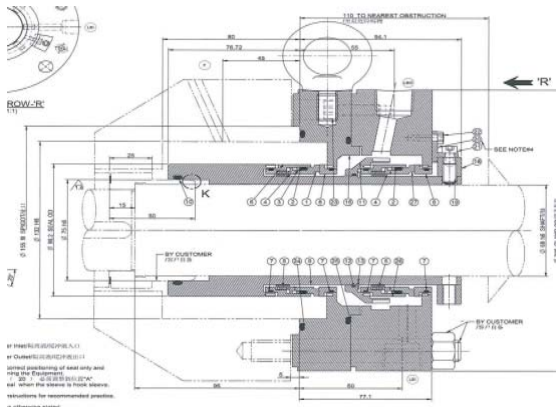


图1 机械密封结构示意图

在设备正常运行期间,所输送的介质为温度约80℃的液体。为有效抑制液膜汽化现象的发生,并提升机械密封部件的使用寿命,该系统特别设计了热隔离结构与自循环冷却冲洗系统。热隔离装置的核心作用是将高温介质与机械密封区域有效分离,实现隔热和限流功能,从而有效降低动静环接触界面的温度及端面负荷。同时,自循环冷却系统则由多个组成部分协同运行,包括机械密封腔体、循环液回路、磁性过滤单元、冷却模块、隔离阀门及其配套的冷却水输送管道等,形成稳定的冷却与冲洗回路。

2 试运情况

该泵在完成安装后开始进行试运行。在此过程中,采用PLAN53A冲洗方案的密封液罐液位出现了明显的下降趋势,这表明机械密封出现了内漏问题。为了解决这一问题,工作人员采取了停机措施,并对系统进行了置换和清洗。随后,他们更换了备用机封,希望能够解决泄漏问题。然而,令人失望的是,即使采取了这些措施,泄漏问题仍然持续存在^[2]。

这种情况表明, 泄漏问题可能不仅仅是由单一因素引起的, 而是可能涉及到多个方面的复杂问题。持续的泄漏现象引起了技术人员的高度重视, 他们意识到可能需要进行更深入的检查和分析, 以找出问题的根本原因。

3 检查处理

在泵首次停运后,技术人员对泵进行了全面的拆卸检查,并更换了出现泄漏的机械密封。在解体检修过程中,他们发现了几个关键问题:

(1) 泵轴损伤: 泵轴表面存在明显的深度划痕。经调查发现, 这是由于安装过程中的操作失误造成的。具体来说, 安装人员在装配过程中未松开顶丝, 导致轴在移动过程中被划伤。这种划痕不仅影响了轴的表面质量, 还可能导致密封失效。

(2) 机械密封部件损坏: 原装机械密封的外密封补偿环端面出现了沟槽, 这可能是由于长期运行或者不当操作造成的。更严重的是, 内密封补偿环和非补偿环出现了破损, 产生的碎屑颗粒进一步加剧了轴的磨损, 虽然程度较轻, 但仍然对密封效果产生

了不利影响。

(3) 密封圈问题: 端盖密封圈和轴套密封圈都出现了明显的溶胀现象。这种情况可能有两个原因: 一是密封圈的材质与工作介质不兼容, 导致化学反应; 二是密封圈长期暴露在高温环境中, 超出了其耐受范围。尽管在安装过程中使用了润滑油来涂抹密封圈, 试图改善其性能, 但这种方法并未能有效解决溶胀问题^[3]。

在第二次更换备件机封时,技术人员又发现了新的问题。外端盖侧的非补偿环出现了碎裂,这可能是由于材料疲劳或者安装应力造成的。更值得注意的是,尽管更换了新的密封件,O型圈的溶胀问题依然存在。这一现象表明,问题的根源可能不在于单个部件的质量,而是整个系统的设计或运行条件存在缺陷。

这些发现强调了在泵系统维护中全面检查和根本原因分析的重要性。它们也突显了在选择材料、设计系统和进行安装时需要考虑多方面因素,包括材料兼容性、工作环境、操作规程等。只有通过系统的方法来解决这些问题,才能确保泵的长期可靠运行。

4 泄漏原因分析

一般来说,离心泵机械密封泄漏的原因有以下六点:

(1) 安装过程中可能出现的问题包括：例如，如果机械密封弹簧的预压缩量不足，则会导致端面比压偏低；此外，在装配前若未在密封圈上涂抹润滑剂，则可能导致密封圈在安装后出现显著变形或损伤等问题。

(2) 若选用的O型橡胶圈规格不匹配,将导致机械密封的静态密封功能失效;此外,密封圈过紧或过松均会对动静环产生不利影响:当动环与轴套间的密封圈过于紧密时,会妨碍动环必要的轴向位移调节;反之,若静环上的密封圈过松,则在动环发生轴向移动时可能导致静环从其基座上脱落。O型圈接触腐蚀问题同样不容忽视,在通常情况下,特定类型的腐蚀往往并非孤立存在,而是集中在某些区域,从而加剧了腐蚀范围的扩展和深度的增加。一旦腐蚀程度达到0.01毫米以上,表明化工离心泵的密封性能已严重受损,泄漏风险显著提高。

(3) 硬质颗粒损伤: 当工作介质中含有颗粒状物质时, 这些颗粒在设备运行过程中可能会进入摩擦副区域, 从而对动环和静环的密封端面造成磨损。机械摩擦引起的密封失效可归纳为以下几点: 首先, 在离心泵运行过程中出现抽空、气蚀或憋压现象, 这将导致内部轴向力增加, 使得静环接触面发生分离; 其次, 安装时如果存在过大的预紧力, 则会导致摩擦副端面过度磨损甚至损伤^[4]。

(4) 泵转子的轴向移动量较大: 为了确保机械密封的有效性, 密封面必须维持一定的压力。这就需要机械密封中的弹簧具备足够的压缩程度, 从而为密封端面提供必要的推力。当设备运转时, 这种设置能够产生满足密封需求的压力。为了达到这一目标, 要求泵轴的轴向位移不能过大, 通常应控制在 0.5 毫米以内。

(5)当离心泵出现显著振动时,特别是如果这种振动影响到了机械密封组件,那么动环与静环之间的密封界面可能无法正

常协同工作。这种情况会导致液膜稳定性受损,进而破坏整个系统的密封性能。

(6)当机械密封的冷却系统效能不足时,可能会导致端面液膜出现汽化现象。具体来说,如果自循环冲洗冷却系统的磁性过滤网发生堵塞,或是冷却器的换热效率下降,都会引起通过机械密封部分水流减少及温度上升的问题。这将使得由动静环接触面上摩擦产生的热量不能被有效散发出去,从而导致端面间形成的液体薄膜发生汽化,并且加剧泄漏情况。特别是在泵以高速运转并且输送高温介质的情况下,确保机械密封得到充分冷却显得尤为重要。

接下来根据试运和解体检修情况进一步分析:

(1)在机泵完成注水并启动后,于最初的10小时内带负荷运行期间,未观察到机械密封出现任何泄漏现象。

(2)在完成机械密封装置的拆解检查后,确认所有O型橡胶密封圈均处于良好状态,因此可以排除由于安装错误、O型密封圈损伤或尺寸不符而导致的泄漏问题;

(3)对前置泵滤网进行了细致检查,未发现任何异物。进一步解体检验显示,动环与静环的密封面没有受到外来物质导致的摩擦损伤,从而排除了给水过程中杂质影响的可能性。

(4)对泵的磨损状况进行了检测,测量结果显示泵的推力间隙处于正常范围,据此可以排除因转子轴向移动过大而导致泄漏的可能性;

(5)在试运行阶段,泵的轴承没有表现出显著的振动现象,从而消除了给水泵因振动而可能对机械密封造成影响的可能性。

(6)在试运行阶段,当两套机械密封出现泄漏时,观察到密封水温均超过了70°C,特别是驱动端达到了80°C。造成这一现象的原因在于冷却水管路发生堵塞,导致流经的水量减少,进而影响了冷却器的换热效率。根据制造商提供的技术文档,如果密封水温超过65°C,将显著缩短机械密封件的使用寿命,并增加泄漏的风险。

(7)在设备完成解体检修后,发现驱动端机械密封的动环端面出现了径向裂纹,这通常是由于热损伤引起的典型现象。同时,两组机械密封的动静环接触面上出现了一层黑色薄膜,表明异常高温加剧了静环的磨损。

(8)排除其他可能的泄漏原因后,结合制造商对密封水温的具体要求和动环因热损伤导致的情况,可以确定此次泄漏的根本原因。首先,泵的高速运转使动静环端面产生大量摩擦热,且输送介质温度较高,导致散热效果不理想;其次,冷却水质量差,导致管路堵塞及流速不足,从而使机械密封区域的温度进一步升高,冷却效果减弱。最终,随着热量积累,机械密封接触面的温度过高,液膜出现蒸发现象。此外,热隔离装置的存在降低了密

封腔内的压力,进一步促进了蒸发过程。一旦液膜开始汽化,动静环之间的摩擦力减小,泄漏量增加,静环磨损加剧,而动环则可能因过热而发生开裂^[5]。

5 结论及对策分析

此次机械密封泄漏事故的直接诱因是由于密封水温超出正常范围,导致端面液膜发生汽化现象。而更深层次的原因则是冷却水质量欠佳以及冷却管道出现阻塞情况。为避免此类问题重演,有必要采取有效的对策。

首先,应严格监控密封水温度,确保其始终处于制造商推荐的操作区间内。对于冷却水品质不佳的问题,建议提高冷却器过滤网清洁频次,并对磁性过滤装置进行定期保养,以维持冷却系统的工作效率。

此外,将冷却器与过滤网的清洗作业纳入每月例行维护计划中,并构建起一套体系化的维护策略显得尤为重要。较低的密封水温度和充足的水流对于保障机械密封的安全运转及其使用寿命具有决定性意义,因此改善密封水供应系统同样不可或缺。

实行预见性的维护方案,比如运用先进技术手段开展周期性检测,并建立设备健康档案,有助于及早识别潜在故障。最终,持续优化维护流程与方法,营造一种学习型组织文化氛围,并与设备供应商保持紧密联系,都是保证设备长期稳定运行的关键要素。

需要强调的是,在设备状态良好与否的因素构成中,检修工作的贡献占三成,而七成则归功于日常维护保养。唯有通过细致入微且系统化的维护保养工作,才能确保设备始终保持最佳性能状态,从而有效延长使用寿命,同时大幅降低非计划停机时间与维修费用,为企业平稳生产及长远发展奠定坚实基础。

【参考文献】

[1] Jin L, Che L. Experimental study on stress relaxation of rubber O-ring for mechanical seal[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2691(1).

[2] 王悦. 化工离心泵机械密封失效原因探讨[J]. 当代化工研究, 2022, (05): 30-32.

[3] 丁思云, 李凤成, 王永乐, 等. 基于故障与失效分析的机械密封运行维护方法研究[J]. 流体机械, 2020, 48(03): 27-31.

[4] 程少华. 化工泵机械密封泄漏分析及检修研究[J]. 信息周刊, 2019(49): 0477.

[5] 张经国, 张正江. 一种填料密封结构及卧式转鼓釜: CN202221174612.9[P]. CN218267220U[2025-03-14].

作者简介:

李学斌(1970--),男,汉族,河南新乡人,大学本科,工程师,研究方向:化工控制过程设备。