泵机械密封性能分析和优化改进

轻烃类机泵密封失效原因分析与改进方案的优化——本文基于机械密封的特点和工作原理，对国内某炼化公司气体分馏装置机泵机械密封泄漏原因进行了详细的技术分析，提出了合理的改进方案，并且取得了良好的应用效果，为同类型机泵机封设计选型、原因分析、技术改造提供了宝贵的经验。

文 / 袁帅 刘光辉 赵君昌 贾伟峰

PROCESS-Tip
* 更多信息请扫描二维码：
chem.vogel.com.cn
* 反馈编码：A220440

离心泵是炼化装置必不可少的动力设备，机泵是否能够运行正常，直接关系到装置安全、生产稳定性和连续性，而正常运行的关键主要取决于机械密封的可靠性。国内外由于机械密封失效导致发生多起着火事故，损失巨大。机械密封近年来已取得长足进步，可靠性及寿命都得到了大幅提升，但某些机泵由于配置不合理，实际工艺参数与实际运行数据存在偏差以及流量、压力设置等造成机械密封运行寿命不长，泄漏频繁。

国内某石油化工公司 70 万 t/a 气体分馏装置，所有轻烃类机泵均采用串联式机械干气密封（机械密封 + 干气密封），其中脱丙烷塔进料泵设计型式为 BB5，5 级叶轮，首级采用双吸结构，操作介质为经过脱硫的液化气，操作温度为 40 ℃，出口压力 2.72 MPa，机封冲洗方案选用 P11+72/76，首级密封冲洗液为机泵二级出口介质外引至 P11 系统，抑制密封选用外引 0.7 MPa 系统氮气。开工初期装置在设计工况下运行，首级机械密封频繁泄漏，导致装置无法长期运行并存在安全隐患，备件消耗和维修成本也大幅度上升，为降低安全风险及人力物力消耗，全面优化势在必行。

本文作者供职于浙江石油化工有限公司。

泄漏事件经过及原因分析

装置投产初期该泵在介质性质满足设计要求及运行工况在性能曲线优选范围内的情况下，机械密封频繁泄漏。该泵在运行过程中，机封本体过热并伴随着尖锐刺耳的摩擦声。经对失效机封拆检，发现首级密封动环磨损严重（动环为碳化硅材质，静环采用硬质合金材质），并且干气至放火炬管线单向阀孔板前堵塞严重（为动环磨损造成）。故判断造成机械密封失稳的主要原因为首级机封动环与静环未形成有效液膜，运转过程中动静环干摩擦并产生大量摩擦热。最终导致动环磨损严重，密封失效（见图 1、图 2）。

图 1 一级动环磨损状态

图 2 磨损后抑制密封腔内部状态

原因分析

根据 API682 标准规范要求，对于接触式湿密封（不含抑制密封）的密封腔设计压力应比流体最大饱和蒸气压高 30% 以上，或比流体最高温度高至少 20 ℃时的压力，并且密封在合理工况范围内连续运转寿命不低于 25 000 h，现实却远未达到使用要求。

1. 冲洗液流量过低

该泵原设计机械密封 P11 冲洗液为二级叶轮出口外引 DN15 管路，经三通分两路给驱动端和非驱动端机械密封，作为首级冲洗液使用。机械密封在运转寿命尾声会出现冲洗管线两侧温差上升（一侧为二级出口温度，一侧为环境温度），温度低的一侧机封本体过热，短时间内失效，造成该现象的主要因素为机泵两端冲洗流量严重分配不匀（分流后流量会成指数下降），流量低的一侧由于动静环摩擦副端面无冷却润滑冲洗介质，造成动静环干磨超温损坏，进而密封失效。

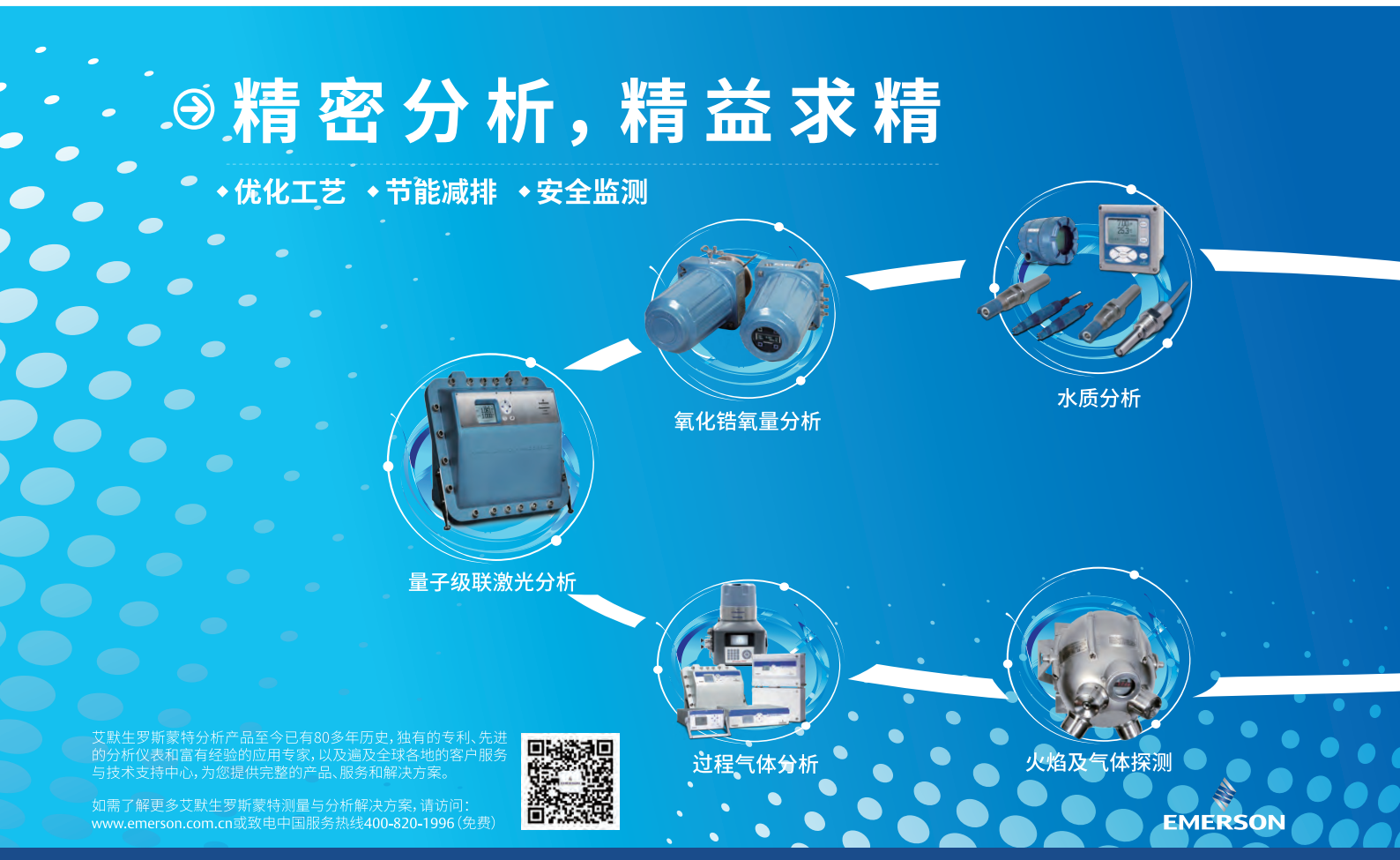
表 1　密封报警参数对比值

报警时间	报警压力变化 (MPa)	入口流量变化（L/h）		峰值变化时间间隔（min）	
7 月 21 日 22:25	0.105	0.881	915	14.9	5
8 月 3 日 9:52	0.1	0.798	1 354	15.7	3
8 月 20 日 15:24	0.096	1.017	1 062	16.8	3
报警压力控制：0.07~0.12MPa；入口流量控制 :800~1500 L/h					

2. 机泵本体设计缺陷

经现场测量，喉部衬套间隙为 2 mm（规范要求为 0.2 ~0.5 mm），衬套与机体设计两处 ϕ5mm 的通孔（如图 3）。喉部衬套的作用为使泵轴与金属衬套之间保持一定间隙，以此来保证密封腔压力。该设计失去了对密封腔压力的控制，过流部位由于间隙过大，造成介质在腔内停留时间过短，从而导致流量增大，

图 3　机泵喉部衬套



腔内压力降低。

3. 冲洗液压力过低

经化验分析介质在 20 ℃时饱和蒸气压为 0.711 MPa。根据规范要求，密封腔压力至少要大于该温度下的饱和蒸气压 0.35 MPa。对运行阶段机封内压盖开孔实测机泵运转过程中的密封腔压力，机泵运转前驱动端及非驱动端密封腔压力接近入口压力为 0.9 MPa, 运转后两端密封腔压力为 0.95 MPa，远低于标准要求。加之冲洗介质经泵升压后，存在一定温升，其要求的密封腔压力更高一些。推断导致密封频繁泄漏的直接原因为密封腔压力裕量（VPM）不够，促使密封腔内介质发生闪蒸现象，说明在该区域已经进入气液混相，并马上进入完全气相状态。导致摩擦副之间无法建立有效液膜。

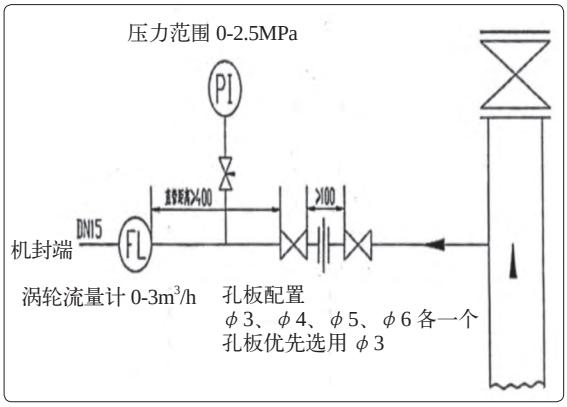


图 4 改造后冲洗示意图

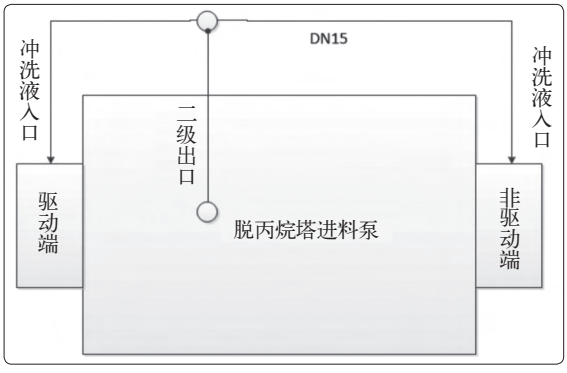


图 5 改造前冲洗示意图

方案优化与实施效果

为使流体满足所需压力、流量和温度的要求，有如下几种方法可以实现：

（1）利用冷却冲洗液以降低密封腔流体温度，使其饱和蒸气压根据温度的降低而降低。

（2）通过向后移动耐磨环或堵住叶轮平衡孔来提高密封腔的压力。

（3）利用外部冲洗流体提高密封腔压力。

（4）将喉套间隙减小来提高密封腔压力。

根据实际情况，方案 2 和方案 4 涉及到机泵本体动改，改造后对轴串量会产生不可避免的影响，而方案 1、方案 3 及机封本体动改三种方式操作最为简便实用。

优化冲洗液流量及压力

该泵原设计为二级叶轮出口外引 DN15 管路，经三通分两路给驱动端和非驱动端机械密封作为首级冲洗液使用。优化设计为，驱动端冲洗管路维持原设计不变，非驱动端采用外引泵出口高压介质作为冲洗液单独冲洗，维持管径不变的同时，沿途增设截止阀、孔板（ϕ3mm、ϕ4mm、ϕ5mm、ϕ8mm 4 种规格，初选 ϕ3mm）、现场压力表及涡街流量计（如图 4），使驱动端和非驱动端冲洗液流量及压力均得到保障，以此来增加密封腔压力和冲洗流量。

优化机械密封结构

结合以往改造经验，针对此类临近饱和蒸气压的轻烃类使用工况，对动环的结构优化，加端面开深槽结构，降低密封面的产热量，前置独立节流装置以此营造机械密封独立密封腔压力，节流环设计为碳化硅材质，双边预留 0.1 mm 余量，以此避免介质压力过大造成密封腔超压（如图 5）。节流环在运转过程中会随着冲洗介质的流动状态调整至最佳位置，既保证了密封腔压力，又与冲洗液通流部位达到平稳过流。

利用冷却冲洗液降低流体温度

该泵密封腔外部设计为可通入冷却液夹套形式，为下进上出，内螺纹联接形式，可利用装置服务站所提供的循环冷却水引至夹套，通过调整流量来控制密封腔内部温度，以此来降低介质温度，使其饱和蒸气压降低，以保证液膜维持良好。

实施效果

改进后运转实测，机封本体温度 45 ℃左右，密封腔压力实测 1.0 MPa，非驱动端新增冲洗管线表压为 1.1 MPa, 密封腔压力为 1.08 MPa，流量为 1.44 m^3/h，机械密封本体及冲洗管线温度无异常，且运行良好，达到了预期效果。该优化方案有效地解决了之前密封频繁泄漏的问题，延长了机械密封的使用寿命 , 直接节省了大量的维修费用和配件费用 , 更避免了装置非计划停工 , 保障了安全运行，提高了装置的经济效益。

结论

综上所述，机械密封在轻烃类机泵上的应用由于介质的特殊性和复杂性，为保证稳定工作，密封端面之间一般要求形成稳定的液膜，避免干摩擦，从而导致密封发热和增加磨损。因此由于介质汽化而引起的液膜破坏是制约性能的主要因素。所以从设计选型阶段就要结合实际，不仅要从机械密封上优化选择，而且在机泵选型制造阶段及工艺条件上也要重视，最大化地提升设备运行的合理性和科学性。