

化工离心泵机械密封改造后运行可靠性提升及对装置能耗成本的影响

严增治（中海石油中捷石化有限公司，河北 沧州 061108）

摘要：化工离心泵机械密封改良十分有必要，新材料加上新的设计，大量减少介质渗漏可能性，摩擦损耗也会减小，检修周期变长，意外停止运转的次数变少。这种改良给机泵运转增添保障，经济收益会变得更好。因为电量消耗变少，电费开支就会少许多，设备维修的花费也降低不少。装置可持续稳定运行，生产率提高，产量增加。维持当前工艺稳定，整个化工设备设施长久、高效运作的过程得到推动，企业发展也得到新动力。

关键词：化工离心泵；机械密封改造；能耗成本；经济效益

中图分类号：TQ055.8 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）029-0067-03

Improvement of operational reliability and impact on energy consumption cost of chemical centrifugal pumps after mechanical seal modification

Yan Zengzhi (CNOOC Zhongjie Petrochemical Co., Ltd., Cangzhou Hebei 061108, China)

Abstract: It is necessary to improve the mechanical seal of chemical centrifugal pumps. With new materials and designs, the possibility of medium leakage is greatly reduced, friction loss is also reduced, maintenance cycles are longer, and the number of unexpected shutdowns is reduced. This improvement adds assurance to the operation of the pump, and the economic benefits will become better. Because electricity consumption decreases, electricity bills will be much lower, and equipment maintenance costs will also be significantly reduced. The device can operate sustainably and stably, with increased productivity and output. Maintaining the stability of the current process promotes the long-term and efficient operation of the entire chemical equipment and facilities, and provides new impetus for the development of the enterprise.

Keywords: chemical centrifugal pump; Mechanical seal modification; Energy consumption cost; economic benefits

机械密封失效是化工离心泵运行过程中常见的问题，传统的密封结构在高温高压环境下存在着材料磨损以及热变形等风险，这使得整个系统的能耗水平也明显上升。本项研究采用新型复合材料并结合动态平衡的设计理念，很好地解决了高压高温工况下密封端面稳定性不足的技术难题，同时大大缩减了设备的运维成本并提高了能量转换的效率。研究成果详细剖析了密封性能改善同系统能耗之间的联系，给化工行业实施节能降耗工作提供了宝贵的理论支撑和实际操作上的指引。

1 机械密封改造的技术原理

1.1 材料耐蚀、耐磨性能优化研究

机械密封改造过程中材料的耐腐蚀性与耐磨性改良是提升密封长久运行能力的主要根基，凭借挑选适合化工复杂工况的高性能材料来保证密封件的持久耐用。针对化工离心泵输送介质含酸、碱、盐、有机溶剂等腐蚀性成分，改造时抛弃传统碳钢或铸铁密封环，改用碳化硅、氮化硅等先进陶瓷材料，这种陶瓷材料具有非常高的化学稳定性，在强酸强碱环境下不会产生腐蚀，能够长时间保持密封面的结构完好。就密封组件内部弹性元件及辅助密封件而言，像波纹管、O

型圈之类，使用氟橡胶或者全氟醚橡胶取代传统的丁腈橡胶，其耐化学腐蚀的范围被大幅度拓宽，可以应对多种有机溶剂以及强氧化剂的腐蚀，从而免除传统橡胶材料在复杂介质里容易出现的溶胀、硬化、开裂之类的老化现象。

1.2 端面动压润滑结构设计

端面动压润滑结构设计属于机械密封改造的重要技术突破，通过改良密封端面的微观几何结构以做到润滑效果加强与摩擦损耗减小的目的。改造后的机械密封，在动环或者静环的密封端面上加工出精心设计的沟槽图案，通常会存在螺旋槽、人字槽、阶梯槽等不同形式的流体动压结构，当密封件随着泵轴一同旋转的时候，这些沟槽就会催生一些特殊的流体动力学现象。当动环高速运转的时候，沟槽能够把泵腔内输送的流体主动吸进密封端面中间，从而形成一层比较均匀且稳定的液膜。这层液膜可以把本来直接接触的动环与静环端面巧妙地分离开来，保留着微小的间隙，让固体之间的干摩擦或者边界摩擦变成液体摩擦，从而大幅度减小摩擦阻力和减少摩擦热量的产生。沟槽的尺寸参数经过精确计算设计，包含槽深、槽宽、槽间距以及螺旋角度等等，保证在各种不同的转速、压

力和运动粘度条件下，都能形成足够厚且强的液膜。

2 运行可靠性提升的表现

2.1 泄漏率下降与工艺稳定性提升

机械密封改造后，最直接的是运行可靠性得到改善，体现为泄漏率大幅下降，从而有效增强了化工装置的整体工艺稳定性。改造前，传统机械密封一般运行3到6个月，会由于材料磨损、结构老化等种种因素，泄漏状况渐渐浮现出来，平均泄漏量可以达到6到10滴/min，而且在介质粘度较低或者压力很高的工况下，还会出现连续渗漏的情形，这样既造成了贵重介质的损失，又给装置安全运行埋下了重大安全隐患。改造过的机械密封凭借材料上的改良和结构上的改变，对于泄漏的控制能力得到了明显的加强，处在正常工作状态时，泄漏率可以被稳定地控制在一滴每分钟之下，有些优化情况更好的工况，甚至可以做到接近零泄漏的程度。泄漏率降低直接减少介质损失，避免因介质泄漏造成工艺系统参数的波动，如化工反应进料系统，离心泵输送原料介质泄漏时，会导致反应器进料量不稳定，影响反应转化率和产物纯度，改造后进料量波动从 $\pm 5\%$ 下降至 $\pm 1.5\%$ 以内。稳定的介质输送保障反应条件一致，使产品质量波动降低，合格产品产出率提升，降低环境的污染风险，为装置连续稳定运行提供保障。

2.2 摩擦副寿命延长

改造后的机械密封，通过改善摩擦条件、优化材料性能，延长了摩擦副的实际使用寿命，降低了密封组件的更换频率。传统机械密封的摩擦副由于材料耐磨性差，润滑条件有限，在化工离心泵复杂的工况下，使用寿命较短，一般每6-12个月就要停机更换摩擦副组件，频繁地更换不仅增加了维护的工作量和备件的消耗，还会导致设备非计划停机，影响生产的连续性。改造后的机械密封摩擦副采用了耐磨损的陶瓷材料，配合端面动压润滑结构形成的稳定液膜，减少摩擦副之间的直接接触磨损，使摩擦副的磨损速率大大降低。正常工况下，改造后的摩擦副使用寿命可达24-36个月，部分运行工况较好的离心泵可达到48个月以上，使用寿命较传统密封提高了很多。摩擦副使用寿命延长，大幅减少密封失效引起的非计划停机次数，延长了离心泵的有效运行时间，减轻了维护人员工作强度，为化工装置实现长周期运行创造了有利条件。

3 能耗成本的影响机制

3.1 机械损耗降低与经济效益方向

机械密封的改造使机械损耗大幅下降，离心泵稳定运行周期延长，直接降低了装置加工成本。传统的

机械密封因摩擦副之间缺少润滑，在摩擦的过程中常常处于边界摩擦状态，摩擦阻力大，摩擦损耗占泵轴功率的5%-8%。以一台110kW的化工离心泵为例，按年运行8400h计算，改造前每年机械密封摩擦损耗的电能为4400-7040kW·h。而改造后的机械密封依靠端面动压润滑，形成稳定的液膜，摩擦系数从原来的0.1-0.3降低至0.02-0.05，摩擦损耗占泵轴功率比例也降低至1%-2%。根据以上计算，改造后的这个泵每年因摩擦损耗约合电能880-1760kW·h，一台泵每年可以节约3520-5260kW·h的电能。按照工业用电一度0.8元计算，一年可以节约电费2816-4208元。

3.2 延长维护周期实现的间接经济消耗方向

维护周期延长，停机维护次数减少，间接经济效益明显。传统机械密封使用寿命短，每年需更换2-3次，每次更换需要消耗价值4000元左右的密封备件，并且每次更换还要消耗施工成本8000元左右。而且每次停机更换时间在6-8h左右，在此期间存在大量的安全环保风险，如烫伤、有毒介质泄漏造成人员中毒等。改造后机械密封维护周期延长，每年更换频次减少到0.3-0.5次。仅此一项，每年可节省密封备件费用6800-10000元，节省施工成本13600-20000元。同时减少设备停机检修的安全、环保风险，从此方面的间接经济效益可达数万元。

3.3 系统振动抑制与经济消耗方向

机械密封运行稳定以后，离心泵系统的振动被控制，这使得整个装置的能耗水平得到了优化。传统的机械密封因为摩擦不均匀、密封失效或者安装精度差等原因会产生异常振动，这种振动会通过泵轴传到整个泵体及管道连接处。通过测量可知，在传统密封运行期间，其振动速度的有效值可达到4.5mm/s，而经过改造以后就下降至1.2mm/s以下。振动会加大密封件及轴承等零部件的磨损程度，配合间隙发生改变，摩擦阻力增大，轴承运行温度升高，能耗会增加10%。而且管道共振加大了介质的流动阻力，泵出口的流量会降低，若维持原流量就要多消耗8%的能量。改造之后的机械密封，结构设计得到改良，精度得到提升，振动大幅缩减，轴承的运行温度恢复正常，传动能效缩减5%，管道的阻力变小，泵的工作效率也有所改善，每年可以省下约3.2万元的能耗成本。

4 实施改造的关键环节

4.1 密封参数与泵体工况的匹配性研究

机械密封改造效果好坏的关键是密封参数与泵体工况能否精确匹配，这对它的表现和适用范围起到决定性作用。改造之前，要全方位考量泵体运行的主要工况参数，比如输送介质的理化性质、操作温度、压

力波动程度以及转速等等。针对不同的腐蚀介质，要合理挑选密封材料，对于强腐蚀性介质，可优先采用化学稳定性较好的材料；处理含有固态颗粒的介质时，则需重点加强耐磨性能。由于温度变化会明显改变密封件的热膨胀特性，在设计期间就要把实际温控范围纳入考量范畴，通过改良结构布局保证密封组件，即使在极端工况下也能维持较好的贴合度。运行压力的高低直接关系到密封比压的选取，要通过精确核算介质压力和弹簧力的均衡状况，从而选出恰当的密封比压数值，防止因为比压不够而致使泄漏或者因为比压过大造成过度磨损。

4.2 安装精度控制标准

机械密封改造项目能否成功，主要取决于安装工艺是否精确，对设备运行的可靠性和使用寿命起到决定性作用。在装配之前，要对密封腔体进行清理，去除上面的杂质、油渍、氧化层等污染物，保证安装环境干净无尘。在装配时，要注意轴套与泵轴的同心度偏差，防止因为偏心造成端面受力不均，出现局部过载现象，造成磨损；还要仔细检查动静环端面的平行度，采用高精度测量仪器确保接触面均匀贴合，消除由于间隙分布不均，造成的介质泄漏或者润滑失效。密封压盖装配这一块，要采取均匀对称的紧固方法，才能防止压盖受力不均而造成密封元件变形，进而影响到它的密封效果。装配完毕之后，就要先后做静态检测和动态检测，前者用来判断装配过程中密封是否可靠，后者则主要检查运行状态下密封件是否稳定以及运动是否灵活，有没有出现卡涩或者异常振动的情况，而且要根据准确的工艺参数调控，给设备的稳定运行做充分准备。

5 行业市场应用价值

5.1 技术引领市场新机遇

化工行业竞争越来越激烈，离心泵机械密封改造所带来的运行可靠性，变成了企业争夺市场制高点的技术武器。环保规定越发严苛，生产效率需求不断上升，传统高泄漏、高能耗的机械密封已经不能满足市场需求。经过改良的机械密封技术，凭借其良好的密封效果和较低的摩擦损耗，减少了装置的能耗成本，使企业在节能减排上更有优势。有些大型化工企业采用新的材料并改良机械密封设计后，不仅降低了由于泄漏造成的物料损失和环保风险，而且明显改善了生产效率，产品的合格率也得到了提高。这种技术创新受到很多下游客户喜爱，企业的订单数量增多。这种技术的推广应用也促使上下游关联产业得到飞速发展，密封件制造公司加大研发力度，生产出更合适的高性能产品，工程服务公司拓展业务范围，提供更优

质更专业的安装调试和维修服务。就市场发展方向而言，化工行业正朝智能化、绿色化方向发展，机械密封改造是重要部分。它能够给整个产业链带来新的增长点，推动行业技术革新和产业升级，给企业开拓了更为宽广的市场空间，实现了可持续发展。

5.2 全生命周期成本核算的优越性

从全生命周期成本核算来看，化工离心泵机械密封改造有明显的经济优势。在开始投入时，新型机械密封和配套系统的购置成本较高，但是寿命长、维修频次少，所以综合成本较低。拿一个中型化工企业来说，过去使用传统机械密封时，每年因频繁更换密封件、修理设备、处理泄漏事故等产生的费用高达几十万元。经过机械密封改造以后，采用耐磨、耐腐蚀的新材料和新的设计，每年只需做少量的常规检查和保养工作。按照计算结果，改造后的机械密封在未来五年间的总花费比传统密封减少了约40%。而且由于运行可靠性得到改进，设备的意外停机次数变少，生产效率也就提高了，这就使得企业在不知不觉中提高了经济效益。就能源耗费而言，改造后的机械密封摩擦损耗变小，能耗成本自然而然就跟着减少。从整个生命周期的成本角度来看，机械密封改造在长时间运作过程中能够给企业带来不错的经济效益，这是化工企业加强自身竞争能力，达成降本增效目的的有效途径。

6 总结

机械密封的革新设计明显加强了化工离心泵的运行可靠性，它的节能优点主要表现在能耗缩减和保养费下降两方面。这条技术路线给高能耗化工行业赋予了值得推广的方向，往后应当高度融合材料学和流体力学，进而促使相关产业朝着绿色可持续方向前进。

参考文献：

- [1] 王晓辉.化工离心泵机械密封失效原因和处理措施探析[J].中国设备工程,2025,(03):163-165.
- [2] 刘腾,郭雷.石油化工离心泵的检修及维护技术[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(17):193-195.
- [3] 马雷,孙成典,杜玉国.化工离心泵机械密封失效原因[J].模具制造,2023,23(09):133-135.
- [4] 孙成典,马雷.石油化工离心泵的故障分析及维护[J].模具制造,2023,23(09):289-291.
- [5] 王小刚.离心泵的机械密封技术改造[J].科技成果转化与研究,2010(8):2.

作者简介：

严增治（1989-），男，汉族，河北省泊头市人，学士学位，石油炼制专业中级工程师，研究方向：石油化工。