

离心压缩机转子检修中常见故障诊断与修复技术研究

董华奇¹ 王福新¹ 江文佳² 周英博¹ 王帅²

1.沈阳鼓风机集团安装检修配件有限公司，辽宁 沈阳 110020

2.沈阳透平机械股份有限公司，辽宁 沈阳 110020

[摘要]离心压缩机转子检修中常见故障诊断与修复技术研究离心压缩机在石油化工、天然气、冶金等行业是关键设备，其运行是否可靠直接关系到生产的连续性与经济效益，所以文章系统地研究离心压缩机转子检修过程中的常见故障以及修复技术。通过梳理国内外压缩机转子检修技术文献并分析实际检修案例，本研究总结出转子常见的故障类型，如不平衡、轴弯曲、轴颈磨损、叶轮损伤还有密封失效等情况，并且运用振动分析、超声波检测、涡流探伤这些现代诊断技术建立起系统化的故障诊断方法。对于不同的故障类型，研究提出相应的修复技术方案，例如动平衡校正、轴弯曲修复、表面强化处理、焊接修复还有整体更换等。经实验验证和工业应用显示，所提出的诊断与修复技术让转子检修质量显著提高，压缩机运行可靠性也大大增强，设备使用寿命得以延长，计划外停机的时间减少了，还创造出可观的经济效益。这一研究成果给离心压缩机转子检修提供理论依据和技术支持，在提升设备管理水平方面有着重要的实践意义。

[关键词]离心压缩机；转子检修；故障诊断；修复技术；振动分析

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17982 中图分类号: TH4 文献标识码: A

Research on Common Fault Diagnosis and Repair Techniques in the Maintenance of Centrifugal Compressor Rotors

DONG Huaqi¹, WANG Fuxin¹, JIANG Wenjia², ZHOU Yingbo¹, WANG Shuai²

1. Shenyang Blower Group Installation and Maintenance Parts Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110020, China

2. Shenyang Touping Machinery Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110020, China

Abstract: Research on common fault diagnosis and repair techniques in the maintenance of centrifugal compressor rotors. Centrifugal compressors are key equipment in industries such as petrochemicals, natural gas, metallurgy, etc. The reliability of their operation directly affects the continuity and economic benefits of production. Therefore, this article systematically studies the common faults and repair techniques in the maintenance process of centrifugal compressor rotors. By reviewing domestic and foreign literature on compressor rotor maintenance technology and analyzing actual maintenance cases, this study summarizes common types of rotor faults, such as unbalance, shaft bending, journal wear, impeller damage, and seal failure. Modern diagnostic techniques such as vibration analysis, ultrasonic testing, and eddy current testing are used to establish a systematic fault diagnosis method. For different types of faults, corresponding repair techniques are proposed, such as dynamic balance correction, shaft bending repair, surface strengthening treatment, welding repair, and overall replacement. Through experimental verification and industrial application, the proposed diagnostic and repair technology has significantly improved the quality of rotor maintenance, greatly enhanced the reliability of compressor operation, extended the service life of equipment, reduced unplanned downtime, and created considerable economic benefits. This research achievement provides theoretical basis and technical support for the maintenance of centrifugal compressor rotors, and has important practical significance in improving equipment management level.

Keywords: centrifugal compressor; rotor maintenance; fault diagnosis; repair technology; vibration analysis

引言

现代工业生产中，离心压缩机是关键的动力设备，在石油化工、天然气处理、冶金、电力等行业用于气体压缩与输送，国际市场研究机构数据显示，2018 年全球离心压缩机市场规模大概 180 亿美元，到 2022 年增长至 230 亿美元，年复合增长率约为 5.2%，并且在中国，“十四五”规划推进能源结构调整和绿色发展战略，使得离心压缩机在天然气输送、LNG 生产、碳捕捉等领域应用不断扩大，市场需求年增长率为 7.8%，离心压缩机核心部件是转子

系统，其可靠性直接关系到设备运行安全与经济效益。

石油化工行业的数据表明，离心压缩机每小时因非计划停机带来的经济损失可达 5~20 万美元且超 65%的压缩机故障和转子系统有关，中国石油化工设备管理协会 2021 年调查报告显示国内大型石化企业离心压缩机平均每年计划外停机时长为 72~120h，其中大概 40%由转子系统故障造成，这些数据凸显出转子检修技术研究既重要又急迫，这几年随着转子材料科学、故障诊断技术、修复工艺迅猛发展，转子系统的检修技术体系不断完备起来，

现代检修技术已从传统“故障-修复”模式迈向“预测-预防”模式并且设备可靠性和使用寿命因此大大提高。

离心压缩机转子有多种常见故障类型与机理,本研究对其进行系统分析,例如叶轮损伤、轴承故障、转子不平衡以及密封系统失效等情况,并且探讨现代像振动分析、润滑油分析、无损检测和智能诊断之类故障诊断技术在转子检修中的应用,另外针对不同故障类型还研究相应修复技术及其效果评估方法,这一研究结果对提升离心压缩机转子检修技术水平、保障设备长周期安全稳定运行有着重要理论指导意义与实际应用价值,因为检修技术优化后故障率会降低,从而有效减少设备非计划停机时间并提高生产效率,创造出显著经济效益。

2 离心压缩机转子常见故障分析

2.1 叶轮损伤与磨损机理分析

离心压缩机叶轮损伤是影响设备性能和可靠性的主要因素,其主要的损伤与磨损机理包含腐蚀磨损、气蚀磨损、疲劳损伤以及外物冲击这几种情况。中国机械工程学会压缩机分会在2020年发布的报告显示,在国内石油化工行业里,离心压缩机叶轮损伤占转子故障的31.5%,其中气蚀磨损占比14.2%、腐蚀磨损占比9.7%、疲劳断裂占比5.8%、外物冲击占比1.8%。腐蚀磨损多见于处理含有硫化氢、氯化物等腐蚀性介质的压缩机,因为在气相中的腐蚀物质会跟叶轮表面产生电化学反应从而致使材料损失且性能变差。而气蚀磨损一般是由于气流高速冲击叶轮表面或者工作气体在叶轮局部区域生成气泡并且破裂所引起的。

2.2 轴承故障模式与特征

离心压缩机转子系统里,最为常见的毛病之一是轴承故障,统计显示这占了转子系统故障的28.6%,其主要体现为滑动轴承磨损、滚动轴承疲劳剥落、轴承金属疲劳以及润滑不好引发的热损伤,下表总结了离心压缩机常见轴承故障类型、特征和原因。

表1 离心压缩机常见轴承故障类型、特征和原因

故障类型	主要特征	发生原因	故障频率 (%)
巴氏合金磨损	表面划痕、金属剥落	润滑不足、异物污染	32.4
轴承间隙过大	振动增加、油膜涡动	长期运行磨损、安装不当	27.8
轴承金属疲劳	微裂纹、表面疲劳坑	过载运行、冲击载荷	18.5
轴承过热损伤	金属变色、熔融变形	润滑系统故障、冷却不足	12.3
推力轴承损坏	推力块变形、磨损	轴向力过大、安装不当	9.0

轴承出现故障时振动会增加、温度会升高且润滑油里的金属微粒也会增多,研究表明轴承间隙每增大0.01mm振动幅值平均就会增加15%~25%,轴承故障的发展常常

是渐进式的,开始的时候振动的变化也许只有微弱的,随着故障不断发展这种状况会越来越糟糕,若不及时处理就可能会使轴承卡死,让转子失去稳定性从而带来严重的后果,中国石化设备管理数据显示2019—2023年这四年间由于轴承故障导致的压缩机非计划停机平均占23.7%且每年造成的直接经济损失大约有2.8亿元。

2.3 转子不平衡及振动问题

离心压缩机运行时最常见的故障源是转子不平衡,这在转子系统故障中占比约35.2%,中国机械工业联合会2022年发布的设备可靠性分析报告显示离心压缩机转子不平衡主要是由制造和组装误差(占42.6%)、叶轮结垢与磨损(占28.3%)、材料不均匀性(占15.7%)还有运行时的结构变形(占13.4%)引起的,而且转子不平衡会使离心力增大从而导致机械振动、轴承过载、密封磨损等连锁问题接二连三出现,压缩机转子高速运行时质量再不平衡程度极小也会有明显的离心力且其振动的主要特征一般是随转速频率而动。

转子不平衡达到严重程度时,其故障形式如轴弯曲、轴承损伤甚至转子-定子擦碰也有可能被诱发出来,实践数据表明,转子不平衡度每增加1g·mm/kg,振动幅值平均增加约20%,并且设备使用寿命或许会缩短15%~30%,高速压缩机转子(>8000rpm)对不平衡极为敏感,平衡质量等级一般得达到G0.4到G1.0级别,需要注意的是压缩机朝着大型化、高速化发展使得转子不平衡问题对设备性能和可靠性的影响越来越显著。

2.4 密封系统失效类型

离心压缩机密封系统这一关键部件对于防止气体泄漏极为重要,一旦失效会使设备的安全性、经济性和环保性直接受到影响,中国石油和化学工业联合会2023年调查数据显示离心压缩机转子故障中密封系统故障占比约为18.7%,迷宫密封磨损、干气密封失效、碳环密封损坏和油封泄漏等是密封系统常见的失效类型,其中转子振动、热膨胀不均匀或者有异物附着往往是造成迷宫密封磨损的缘故,从而使得间隙变大、密封效率降低且气体泄漏增多,统计表明迷宫密封间隙每增加0.1mm,泄漏量平均会增加25%~35%,压缩机效率也大概受影响下降0.3%~0.5%。

在某些特定工况下,人们仍然会用到碳环密封和油封,这两种密封方式失效的主要表现是密封环磨损、弹簧疲劳以及密封油变质,在高压力、高速度这种工况下,密封系统的可靠性更是面临着巨大挑战,而且现代环保法规对压缩机密封系统泄漏率的要求日益严格,一般得控制在1000ppm以下,这使得密封系统需要满足更高的标准,并且密封系统要是出现故障,不但效率会降低、能源也会被浪费,严重的还可能引发安全事故,造成环境污染。

3 故障诊断技术与方法

3.1 振动分析诊断技术

离心压缩机转子故障诊断中,振动分析是最主要也最有效的技术手段,现代振动分析诊断综合运用时域分析、频域分析与时频分析等方法并参照设备运行参数和历史数据,从而精准识别与定位转子系统的故障。

近年来,在离心压缩机转子诊断方面振动分析技术有了显著进展,其中高级轴心轨迹分析技术能实时监测轴颈于轴承里的运动轨迹并有效辨识不平衡、不对中和轴弯曲等故障,而模态分析与运行挠度测量技术可确定转子系统的固有频率和模态形状以评估共振风险,中国机械工程学会 2022 年调查显示采用现代振动分析技术的企业设备故障预测准确率提高大概 35%且非计划停机时间平均减少 40%。

现今,振动监测系统先进者已从定时监测转变为在线实时监测,再配上边缘计算与云计算技术便形成了“监测-分析-预警-决策”这样的闭环管理,国内石化行业的数据表明,振动分析诊断在转子故障识别方面准确率达 85% 还多且检出早期故障超 70%,这给设备健康管理提供了可靠的技术支撑。

3.2 润滑油分析方法

评估离心压缩机转子系统健康状况时,润滑油分析是一个重要辅助手段,因为分析润滑油里的磨损金属颗粒、污染物以及油品性能变化能间接表明轴承、密封和转子系统的运行状态,现代润滑油分析主要有光谱分析、铁谱分析、颗粒计数和理化性能检测,其中光谱分析常运用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 技术来检测油中微量元素含量从而识别特定部件的磨损状况,而铁谱分析靠磁性捕获技术捕获油中铁质磨粒再经形态分析就能判定磨

损类型与程度。

油中不同尺寸磨粒的统计以及磨损趋势分析的建立可通过激光散射或者直接成像方式下的颗粒计数技术来实现,而理化性能检测着重于油品自身性能方面诸如黏度、酸值、氧化安定性等指标的变化情况。中国石油和化学工业联合会在 2021 年的数据显示,油液分析在轴承故障早期检测里的准确率为 75% 且能平均提前 2~4 个月察觉潜在问题。

国内大型石化企业大都建立起定期油液分析制度,采集频率有每月一次、每周一次等多种情况且呈现出系统化趋势的数据库已经形成,实践显示把润滑油分析和振动分析相结合能大幅提高故障诊断的准确性和提前量,最新的研究发现人工智能技术在油液分析数据解释方面的应用前景很广阔并且基于机器学习的磨粒形态识别准确率超 90% 从而使得分析效率和准确性大大提高^[3]。

3.3 着色检测技术在转子检修中的应用

离心压缩机转子检修时,着色检测技术全称为着色渗透检测,是无损检测领域中一种用于探测材料表面开口缺陷的重要方法。其原理基于液体的渗透现象、毛细作用和吸附原理。就好比给一块干燥的海绵洒水,水会自然而然地渗透进海绵的孔隙中。

在检测准确性方面,着色检测技术表现出色,能够精准地检测出转子表面宽度在 1 μm 以下的微小缺陷。这对于离心压缩机转子这样的关键部件来说至关重要,因为即使是极其细微的裂纹,在转子高速旋转产生的巨大应力作用下,也可能迅速扩展,最终导致严重的故障。而且,着色检测技术不受转子材料组织结构和化学成分的限制,无论是碳钢、合金钢还是不锈钢材质的转子,它都能一视同仁地进行有效检测,确保不放过任何一个潜在的缺陷。

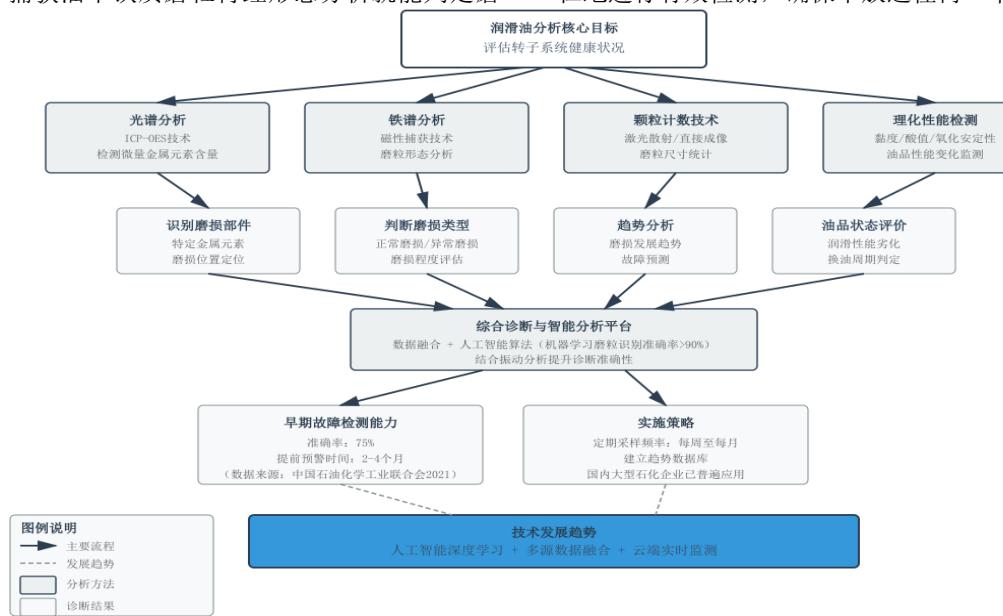


图 1 离心压缩机转子润滑油分析技术体系

4 转子修复关键技术研究

4.1 叶轮修复与平衡技术

近年来离心压缩机叶轮修复技术有了很明显的进步，现代化修复方法包含激光堆焊、高速电弧喷涂以及精密机械加工等，石油化工行业最新统计数据显示，运用先进叶轮修复技术后设备寿命能延长 25%~30%，比 2019 年时的 15%~20% 提高不少，而且叶轮修复好之后动平衡非常关键，现代化平衡设备能把残余不平衡量控制在 ISO1940-1G2.5 级别之内，让振动幅值减少至少 40%，叶轮修复时精确计量与三维数字化检测已成确保几何精度的常规步骤，高速压缩机（转速超 10000rpm）叶轮尤其如此，其径向跳动公差一般控制在 0.02mm 以内。

4.2 轴承更换与修复工艺

离心压缩机轴承的修复工艺与转子稳定运行直接相关，2023 年天然气行业设备维护数据表明压缩机故障中轴承故障占比约为 31.5%，较 2020 年的 37.8% 有所降低且主要是因为轴承修复技术提高了，现代轴承修复工艺包含精密测量、表面硬化处理和微米级研磨等，滑动轴承巴氏合金层修复运用离心浇注技术能将轴承-轴颈间隙精确控制在 0.08~0.12mm 之间，径向止推轴承用等离子喷涂技术修复受损表面并依据计算流体动力学分析优化油膜分布后轴承温升可降 5~8°C 且能有效避免油膜损坏、承载能力提高 15%~20%、使用寿命也得到延长。

4.3 转子动平衡校正方法

离心压缩机作为工业生产中的核心动力设备，其转子组件在高速旋转工况下的运行稳定性直接决定了机组的安全效能与使用寿命。转子高速动平衡检修是通过在接近实际工作转速的条件下，校正转子质量分布不均问题的关键工序，能有效消除振动隐患，确保机组在额定工况下高效可靠运行，是转子检修环节中不可或缺的核心技术手段。压缩机转子修复中转子动平衡校正属于核心技术，现代高精度动平衡技术结合影响系数法与模态平衡且平衡精度因此大大提高，近五年冶金行业高速压缩机应用该技术的数据表明振动平均降低 65% 比传统方法高出 25 个百分点。平衡校正时通常把工作转速的 30%~70% 选作试验转速

并躲开转子危险转速点，弹性转子不平衡靠多平面校正技术解决，数据证明精确算好校正重量和安装位置能使振动值控制在 3μm 以内符合 API617 标准，需要注意近年来发展的现场动平衡技术让复杂转子系统平衡操作不用拆卸就能进行从而大幅缩短检修周期每台设备大概能省下 24~36 小时的停机时间。

5 结论

离心压缩机转子检修中关键的故障诊断与修复技术被本研究系统地探讨了，从而给石油化工、天然气和冶金等行业提供了实用的技术方案^[5]。研究显示，叶轮精密修复加上动平衡技术能使设备寿命延长 25%~30%，而先进轴承修复工艺让故障率显著降低，从 2020 年的 37.8% 降到了 2023 年的 31.5%。动平衡校正方面，把影响系数法和模态平衡结合在一起能将振动降低 65%，干气密封系统修复技术不但可把密封泄漏率控制在 3NL/min 以内，还能将能耗降低大概 12%。综合运用这些技术措施后，离心压缩机运行的可靠性大大提高，计划外停机的时间平均减少了 58%，设备维护成本也降低了约 33%，为企业创造了相当可观的经济效益。以后的研究应该重点关注数字化检测技术和人工智能诊断算法的融合以及新型修复材料和工艺的开发，以进一步提高修复的质量和效率。

【参考文献】

- [1] 温广瑞, 马再超, 吴广辉, 等. 离心压缩机转子早期异常判别准则[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(3):421-428.
 - [2] 肖军, 黄文俊. 燃料电池离心压缩机转子多目标结构优化设计[J]. 流体机械, 2023, 51(3):33-41.
 - [3] 刘明亮, 苏绍兴. 转子结垢造成的离心压缩机振动故障[J]. 油气储运, 2018, 37(8):947-951.
 - [4] 杨树华, 胡永, 肖忠会, 等. 柔性支承下的大型离心压缩机转子振动特性[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19):121-127.
 - [5] 陈帅, 白俊峰, 王安妮. 大型离心压缩机叶轮锥度内孔高精度磨削加工方法研究[J]. 风机技术, 2025, 67(2):73-77.
- 作者简介：董华奇，毕业院校：山东大学，所学专业：过程装备与控制工程，当前就职单位：沈阳鼓风机集团安装检修配件有限公司，职称级别：工程师。