

# 浅析往复式压缩机节能降耗技术

余俊杰

中海油能源发展装备技术有限公司机电技术服务中心 天津 300452

**摘要:** 本文聚焦于往复式压缩机的节能降耗技术研究, 特别关注机械层面的技术优化方案, 通过对压缩机运行期间的能量损耗机制进行分析, 结合实际工程项目案例, 详细讨论了包括机械结构改进、密封技术升级以及润滑系统优化在内的关键技术措施, 通过构建数据模型并与实际操作数据进行对比分析, 验证了在节能降耗方面的有效性, 为实现往复式压缩机的高效运作提供了理论基础和实践指导。

**关键词:** 往复式压缩机; 节能降耗; 机械技术; 密封技术; 润滑系统

往复式压缩机作为在工业领域广泛使用的气体压缩设备, 在石油化工、天然气输送和制冷等行业扮演着至关重要的角色。能源成本的持续上涨, 环境保护标准不断提高, 如何提高往复式压缩机的能效, 减少能耗已成为业界关注的核心问题。鉴于机械技术是影响压缩机性能的关键因素, 优化改进对于节能降耗具有直接且显著的影响, 本文将从机械设计、制造工艺及运行维护三个角度深入分析提升往复式压缩机能效的技术路径。

## 一、往复式压缩机能量损耗分析

### (一) 机械摩擦损耗

机械摩擦损耗在往复式压缩机的操作过程中, 是造成能量损失的重要原因之一, 机制涉及复杂的力学和材料相互作用<sup>[1]</sup>。组件结构角度, 活塞与气缸壁、连杆与曲轴以及十字头与滑道等部件之间的持续相对运动, 在高压和高速条件下会产生较大的摩擦力。如活塞与气缸壁, 不仅要承受由压缩气体引起的轴向压力, 还要在往复运动中产生切向摩擦力。根据热力学分析, 在压缩比为8、排气压力达到10MPa的情况下, 单个活塞与气缸壁间的摩擦力可达到500至800牛顿。

### (二) 泄漏损耗

气体泄漏是往复式压缩机能量损耗的另一重要环节, 主要发生在活塞环、填料函、阀门等密封位置<sup>[2]</sup>。如活塞环密封, 活塞环在压缩过程中需紧密贴合气缸壁, 防止高压气体向吸气侧回流, 但由于热膨胀变形和磨损, 活塞环难以始终维持理想的密封状态。实验数据表明, 当活塞环磨损达到0.2毫米时, 气体泄漏量将增加40%, 若与气缸壁之间的间隙超过设计值0.15毫米, 泄漏损失可导致压缩机的容积效率降低12%。

填料函密封失效也是常见的泄漏来源之一, 填料

函通常采用多层密封环结构, 依靠弹簧力与气体压力实现密封效果, 但填料环在长期运行中会因磨损、老化或安装不当使密封性能下降。在某石化企业的压缩机维护记录中, 由于填料函泄漏造成的能耗损失占总能耗的8.7%, 检测发现填料环的压缩率从初始的25%降至12%, 密封间隙由0.3毫米扩大至0.8毫米。阀门密封面的腐蚀与变形也会引发气体泄漏, 尤其是在高压和高含硫气体工况下, 阀门密封失效的风险显著增加, 密封泄漏可使压缩机的整体效率降低8%~12%, 浪费能源, 可能引发安全隐患, 如易燃易爆气体泄漏导致火灾或爆炸事故。

### (三) 余隙容积损耗

余隙容积指活塞到达上止点时, 活塞端面与气缸盖之间以及气阀通道内残留气体的空间, 尽管余隙容积是压缩机设计中不可避免的一部分, 但直接影响到压缩机的吸气量与压缩比<sup>[3]</sup>。依据理想气体状态方程, 余隙容积内的高压气体在吸气过程中会先膨胀, 占据部分气缸容积, 减少实际吸入的新鲜气体量。当余隙容积占气缸工作容积的5%时, 在压缩比为6的情况下, 理论吸气量将减少大约8%。

## 二、机械技术节能降耗优化措施

### (一) 机械结构优化设计

#### (1) 降低运动部件质量

降低运动部件质量是提升往复式压缩机能效的重要途径, 其核心在于通过材料革新与结构优化减少惯性力, 进而降低驱动系统的能耗<sup>[4]</sup>。在材料选择上, 传统铸铁、铸钢等金属材料虽具有较高的强度和耐磨性, 但密度较大, 导致运动部件惯性力增加。随着材料科学的发展, 钛合金、碳纤维复合材料等轻质高强度材料逐渐应用于

压缩机制造。钛合金的密度仅为铸铁的40%，而抗拉强度却能达到铸铁的2倍以上，将其应用于活塞制造，可显著降低往复运动惯性力。某石化企业将直径200mm的铸铁活塞替换为钛合金活塞后，相关数据见表1。

表1 铸铁活塞与钛合金活塞对比表

部件	材料	质量 (kg)	能耗 (kW·h)	能耗降低率
活塞	铸铁	15.2	85.6	-
活塞	钛合金	8.3	79.5	7.2%

在结构设计领域应用拓扑优化技术对连杆、曲轴等关键部件进行轻量化设计，去除不必要的材料。如采用中空结构的连杆，在保持所需强度的同时减少重量，优化应力分布。中空连杆的质量与实心连杆相比可降低15%~20%，显著降低了惯性力。通过有限元分析(FEA)对组件进行动态仿真，精确预测各种工况下的受力情况，进一步优化结构设计，实现质量与性能之间的最佳平衡。

### (2) 优化曲柄连杆机构

曲柄连杆机构作为将旋转运动转化为往复运动的关键组件，设计参数直接影响压缩机的动力性能以及能耗<sup>[5]</sup>。连杆长度与曲柄半径的比例( $\lambda$ )是影响活塞运动特性的关键因素。 $\lambda$ 值较小时，活塞在行程两端的加速度变化较为平缓，加速度峰值较低，有助于减小惯性力；若 $\lambda$ 过小，会导致气缸长度增加，增大设备的体积。当 $\lambda$ 处于0.2至0.3范围内时，活塞的速度于加速度曲线表现最佳，能够有效减少机械振动，降低摩擦损耗。

以某型号压缩机为例，通过将 $\lambda$ 从0.18调整至0.25，活塞在行程端点的加速度峰值由120m/s<sup>2</sup>降至95m/s<sup>2</sup>，惯性力减少了大约21%。优化曲柄连杆机构中的运动副间隙同样至关重要，合理设计能确保部件的灵活运动，减少碰撞损耗。采用可调节间隙结构，根据设备运行状态动态调整间隙值，如某企业通过在十字头与滑道之间安装液压调节装置，实现了实时补偿因磨损导致的间隙增大，使摩擦损耗降低了15%，显著提升了设备的运行稳定性。

## (二) 密封技术升级

### (1) 新型密封材料应用

密封材料的性能直接影响压缩机的密封效果，传统的橡胶、皮革等在耐磨损性、耐高温性以及化学稳定性方面存在局限，难以满足现代工业高参数工况的需求。聚四氟乙烯(PTFE)因出色的化学稳定性、低摩擦系数(0.05~0.1)和良好的温度适应范围(-196℃至260℃)备受青睐，但硬度较低，单独使用时容易磨损。通过添

加碳纤维、石墨等，可以显著提高PTFE的耐磨性与机械强度。如某天然气压缩机将传统橡胶活塞环替换为碳纤维增强的PTFE活塞环后，相关数据如表2。

表2 传统橡胶活塞环与碳纤维增强PTFE活塞环对比表

密封材料	泄漏量 (m <sup>3</sup> /h)	能耗 (kW·h)	能耗降低率
传统橡胶	3.2	120.5	-
碳纤维增强PTFE	1.3	113.4	5.8%

新型纳米复合材料也逐渐被引入密封领域，纳米二氧化硅、石墨烯等的添加，能够显著改善密封材料的表面性能与力学性能。含有5%纳米二氧化硅的密封材料，抗磨损性能提高了30%，气体渗透率减少了40%，有助于减少气体泄漏，延长密封件的使用寿命，降低维护成本。

### (2) 密封结构改进

密封结构的创新设计是减少气体泄漏的关键。迷宫式浮动密封采用多级齿形构造，延长气体泄漏路径，采用节流降压的原理减少泄漏量。其特有的悬浮式结构，能对轴的偏心率、震动进行自动校正，防止了密封件与轴之间的直接接触，从而减少磨损。在某炼油厂，使用迷宫式浮动密封后，其泄漏量降低至传统填料密封的28%，维护周期由原来的3个月延长到12个月。

另外，干气密封和磁流体密封等无接触密封技术也在往复压缩机中得到了广泛的应用。干气密封由于在密封面之间产生气膜而达到了无接触的效果，因此具有很低的摩擦损耗和较高的安全性。在高压氢气压缩工况下，干气密封的泄漏量只有传统密封的1/10。而磁流体密封是通过磁流体的磁场进行约束，形成动态密封屏障，适用于高真空、高速旋转工况。这些新型密封结构的应用，保证了压缩机的高效可靠运行。

## (三) 润滑系统优化

### (1) 智能润滑控制

传统定时定量润滑方式已很难满足压缩机复杂变化的工作条件，经常出现润滑不足或过量的现象。智能润滑系统利用多种传感器对压缩机的工作状态(转速、温度、压力等)进行在线检测，并根据预先设定的控制策略，实现对润滑油的供给与压力的动态调节。比如，在启动阶段，该系统会自动地提高润滑油的供给量，使其迅速生成润滑膜；在低负荷运行时，减少供油量避免浪费。某化肥厂在压缩机上安装智能润滑系统后，通过压力传感器监测十字头滑道压力，根据压力变化调整润滑油供给，相关数据见表3。

表3 传统定时润滑与智能润滑系统对比

润滑方式	摩擦损耗 (kW)	能耗 (kW·h)	能耗降低率
传统定时润滑	18.6	92.3	-
智能润滑	16.4	88.3	4.3%

智能润滑系统还具备故障预警功能。通过对润滑油温度、粘度、杂质等参数的检测，系统可提前发现润滑异常。比如，如果润滑油的温度超出了规定的临界值，或者是金属磨粒的含量增加，那么该系统就会发出警报，调节润滑方案，从而防止由于润滑失效而造成的设备损伤。另外，系统还支持远程监测和数据处理，使操作人员可以在云平台上实时了解润滑状态，并对其进行合理的调整。

### (2) 润滑油性能提升

润滑油的性能直接关系到压缩机的摩擦损耗和能效。低粘度润滑油的流动性能更佳，可以减小流体的阻力，降低搅拌功耗。但是，粘度降低会对油膜的承压性能产生一定的影响，所以要根据工作条件选用适当的粘度等级。新型合成润滑油以全合成基础油和高性能添加剂为原料，具有优异的低温流动性、抗氧化性和抗磨损性能。试验结果显示，以PAO（聚 $\alpha$ -烯烃）为原料制备的压缩机，在同等工作条件下，其机器效率较使用矿物油的压缩机提高4.2%。

添加剂技术的进步也为润滑油性能提升提供了支持。利用二硫化钼纳米颗粒、石墨烯纳米片等纳米添加剂，可在摩擦表面形成自修复膜，降低摩擦系数。某企业将0.3%的二硫化钼纳米颗粒加入到压缩机润滑油中，活塞与气缸壁间的摩擦系数从0.08降至0.06，磨损量减少了35%。另外，采用环保型润滑油，可以减少废油的处置成本，满足可持续发展的要求。通过对润滑油性能进行优化，可以提高压缩机的能效，提高其工作的可靠性。

## 三、其他节能降耗改造措施

### (一) 卸荷器改造

传统的卸荷器通常面临动作迟钝、气体调节精度不足，使得压缩机在部分负荷条件下运行时能耗较高。新型卸荷器通过采用电磁控制或液压控制系统，实现了更为精确的气体量调节。如在一家化工企业中，将原有的机械式卸荷器升级为基于电磁控制技术的卸荷器后，系统能够根据实际用气需求快速做出响应，在低负荷状态下实现进气量的精准控制。改造后该压缩机在非满负荷运行条件下的能耗降低了10%至15%，有效避免了不必

要的压缩工作，提高了能源使用效率。

### (二) 变频改造

通过改变电机的供电频率，灵活调整压缩机的转速，实现气量的连续调节。以往压缩机依靠旁通或回流调节气量，造成大量能源浪费，实施变频改造后，以某天然气输送项目压缩机能依据管道内气体流量和压力变化实时调整转速，当用气需求降低时自动降速运行，避免了恒速运行时的多余功耗。经测算，压缩机变频改造后，年耗电量减少了18%，降低了运营成本，提高了设备的稳定性。

### (三) 无级气量调节改造

无级气量调节系统突破了传统有级调节的局限，能在0-100%范围内连续精确调节气量，借助智能控制系统和特殊的执行机构，实时监测工艺需求，精准控制压缩机的吸气量。中科炼化煤制氢装置的循环气压缩机采用无级气量调节系统后，振动明显降低，电耗大幅减少，预计每年可为企业节约200多万元。应用有效避免了压缩机在部分负荷下的“大马拉小车”现象，显著提升了能源利用效率，为同类型装置的节能改造提供了成功范例。

## 结论

本文通过对往复式压缩机机械技术层面的深入分析，对压缩机进行了一系列的节能优化设计。研究表明，结果从机械结构的优化、密封技术的技术、润滑系统的改进等方面可以达到节能降耗的目的。未来，随着新材料、新工艺的不断发展，往复式压缩机节能降耗技术将向智能化、集成化方向进一步发展，为工业领域的绿色低碳转型提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 汪伟, 许捷, 李雪源, 等. 往复式天然气压缩机节能降耗技术探讨[J]. 中国设备工程, 2022, (S1): 65-67.
- [2] 李冠男. 往复式压缩机能耗增加的原因分析及节能降耗技术探究[J]. 中国设备工程, 2021, (23): 108-109.
- [3] 杨小平. 浅析往复式压缩机节能降耗技术[J]. 科技与创新, 2021, (01): 169-170+173.
- [4] 景奇佳, 程松. 往复式压缩机变频和余热回收节能降耗技术及效果分析[J]. 科技创新导报, 2020, 17(16): 49-50+52.
- [5] 魏爱芳. 浅析往复式压缩机节能降耗技术[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2019, (09): 174-175.