

# 罗茨真空泵在常减压装置中的应用

李玉柱 龚大虎 杨景坤 姚刚

甘肃腾格里绿色能源有限公司金昌发电分公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16576

**[摘要]** 为解决常减压装置中传统蒸汽抽真空工艺能耗高、维护复杂的问题,本文重点探讨罗茨真空泵的节能优化潜力。通过对比分析ZJY型罗茨泵与液环泵的组合工艺,结合甘肃某发电分公司常减压装置改造案例,模拟减压塔真空度调整对渣油拔出率的影响。研究结果表明:罗茨-液环机组可降低塔顶真空度至2.7kPa,年运维成本降低至850万元。由此可见,罗茨泵通过干式运行与高效抽气,显著降低能耗并减少油污染,是常减压装置真空系统升级的最优选择。

**[关键词]** 罗茨真空泵; 常减压装置; 应用

中图分类号: TB752 文献标识码: A

## Application of Roots Vacuum Pump in Atmospheric and Vacuum Distillation Units

Yuzhu Li Dahu Gong Jingkun Yang Gang Yao

Jinchang Power Generation Branch, Gansu Tenggeri Green Energy Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the issues of high energy consumption and complex maintenance associated with traditional steam vacuum extraction processes in atmospheric and vacuum distillation units, this paper focuses on exploring the energy-saving optimization potential of Roots vacuum pumps. Through a comparative analysis of the combined process of ZJY Roots pumps and liquid ring pumps, along with a case study of the revamping of an atmospheric and vacuum distillation unit at a power branch company in Gansu, the impact of adjusting the vacuum degree of the vacuum tower on residue extraction rate was simulated. The results show that the Roots-liquid ring unit can reduce the top vacuum degree to 2.7 kPa, increase the yield of waxy oil by 5%, and lower the annual operation and maintenance costs to 8.5 million RMB. Thus, the Roots pump, with its dry operation and efficient pumping, significantly reduces energy consumption and oil pollution, making it the optimal choice for upgrading the vacuum system of atmospheric and vacuum distillation units.

**[Key words]** Roots vacuum pump; Atmospheric and vacuum distillation unit; Application

## 引言

常减压装置作为石油炼制的核心工艺单元,其减压塔的深拔效率直接依赖于真空系统的稳定运行。传统水环泵和滑阀泵因能耗高、维护复杂等局限性,已难以满足现代炼化行业对节能环保的严苛要求<sup>[1]</sup>。罗茨真空泵凭借其无油污染、高抽速(30~10000L/s)及宽压力范围(10~10^-1Pa)的特性,在真空蒸馏、溶剂回收等环节展现出显著优势。尤其在处理含轻组分油气时,其干式运行可避免油乳化问题,同时与前级泵协同实现高效节能(电耗降低15%~20%)。本文通过分析罗茨泵的转子间隙控制、材料耐腐蚀性等关键技术,结合甘肃某发电分公司常减压装置改造案例,探讨其在常减压装置中的优化配置方案及经济效益,为炼厂真空系统升级提供理论依据。

## 1 罗茨真空泵概述

### 1.1 工作原理

罗茨真空泵是一种基于容积式抽气原理的高效真空设备,该装置内的气冷罗茨泵组和水环式真空泵组分别安装在第一钢件底座与第二钢件底座上。罗茨水环真空泵机组主要由一台罗茨真空泵、一台水环真空泵、一台级间换热器、一台水环真空泵工作液换热器等设备组成。因节能的需要,且罗茨真空泵采用变频电机,水环真空泵采用工频电机。罗茨真空泵工作过程可分为以下三个阶段: (1) 转子啮合与气体吸入。泵腔内两个“8字形”转子通过齿轮箱实现1:1同步反向旋转,转子与泵壳间保持0.1~0.8mm精密间隙。当转子旋转至进气口时,月牙形腔体容积增大形成负压,气体被吸入转子与泵壳形成的封闭空间。(2) 气体传输与无压缩特性。转子持续旋转将气体沿泵腔轴向推移,由于转子间无物理接触且间隙极小,气体在传输过程中既不被压缩也不膨胀,保持恒定容积状态<sup>[2]</sup>。(3) 排气与返流控制。当转子顶部转过排气口边缘时,封闭空间与高压排气侧连通,部分

气体因压差发生返流,导致腔内压力骤升后排出泵外。主轴每转一圈可完成4次气体输送循环。该泵需与前级泵(如旋片泵)串联使用,其干式运行特性(无需润滑油)和30~10000L/s的抽速范围,使其在化工、制药等领域具有显著优势。罗茨真空泵工作原理示意图如图1所示。

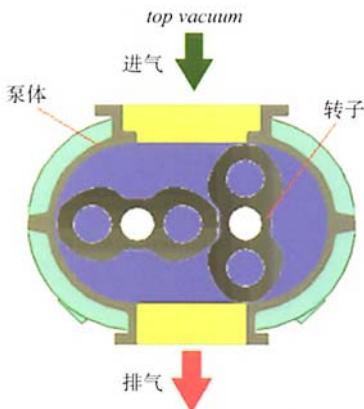


图1 罗茨真空泵工作原理示意图

### 1.2 关键设计参数

罗茨真空泵的关键设计参数直接影响其抽气效率和运行稳定性。其中,转子型线的选择尤为关键,渐开线型转子因容积利用率高(可达85%以上)且加工精度易于保证,成为主流设计。其型线通过齿轮同步实现严格相位差,减少气体回流,抽气速率较摆线型提升约15%~20%;而摆线型虽制造简单,但容积利用率较低,多用于对成本敏感的中低端场景。间隙控制方面,转子与泵壳、转子间的间隙通常维持在0.1~0.8mm范围内,过大会导致气体泄漏,过小则易引发摩擦<sup>[3]</sup>。例如,某石化装置将间隙从0.5mm优化至0.3mm后,极限真空度从 $1 \times 10^{-2}$ Pa提升至 $6.5 \times 10^{-3}$ Pa。材料选择上,化工领域多采用316L不锈钢或双相钢转子以抵抗硫化氢腐蚀,泵壳则常用球墨铸铁表面喷涂聚四氟乙烯(PTFE)涂层,兼顾强度与耐酸性。此外,转子的动平衡精度需达到G2.5级,确保在3450~4100r/min高速运行时振动值低于4.5mm/s。这些参数需通过CFD流场模拟和有限元分析协同优化,例如某型号泵通过渐开线型线配合0.25mm间隙设计,在抽除油气混合物时寿命延长了30%。

### 1.3 性能优势

罗茨真空泵凭借其独特的双转子设计,在化工领域展现出显著的技术优势。其抽气速率覆盖30至10000L/s的宽范围,可快速建立真空环境,尤其适合常减压装置中需高效处理大量溶剂蒸汽的工况<sup>[4]</sup>。干式运行是该泵的另一大亮点,通过无油润滑设计彻底避免了传统油封泵的污染风险,特别适用于处理含腐蚀性气体或易凝介质的化工流程。此外,其宽工作压力范围(1Pa至1000Pa)能稳定匹配减压塔的深拔工艺需求,确保馏分分离效率。在能效方面,罗茨泵的等温压缩特性降低了能耗,配合变频技术可进一步节能15%以上。其模块化结构也便于维护,转子间隙的精密控制(0.1~0.8mm)保障了长期运行的可靠性,成为现代炼油装置真空系统的优选方案。

## 2 罗茨真空泵在常减压装置中的具体应用

### 2.1 系统配置方案

#### 2.1.1 与前级泵的串联设计

在常减压装置中,罗茨真空泵需与旋片泵等前级泵串联组成真空机组,以覆盖从粗真空到高真空的连续抽气需求<sup>[5]</sup>。其串联设计遵循分级压缩原则:旋片泵作为前级泵首先将系统压力从大气压降至 $1 \times 10^2$ Pa范围,为罗茨泵提供启动压力;随后罗茨泵以30~10000L/s的抽气速率进一步将压力降至 $1 \times 10^{-2}$ Pa量级,满足减压塔深拔工艺要求。机组配置时需严格控制抽速比,通常旋片泵抽速为罗茨泵的1/2~1/4,避免压缩比过高导致排气温度超标。关键设计要点如下:(1)在罗茨泵入口设置气镇阀防止可凝蒸气液化;(2)采用变频电机实现抽速无级调节;(3)配置差压保护装置防止过载。该方案通过前级泵处理大量气体与罗茨泵高效抽吸的协同,显著降低能耗并延长设备寿命。

#### 2.1.2 真空度控制与减压塔深拔工艺的匹配

罗茨真空泵在常减压装置中的真空度控制与减压塔深拔工艺匹配,需通过多级泵组协同实现。典型配置采用罗茨泵(工作压力1~100Pa)作为中真空级主泵,串联旋片泵(前级泵)或液环泵(粗抽级),形成三级抽气系统。系统通过电动气动阀(如DN50波纹管阀)实现泵组启停切换,并配备高真空计(如电容薄膜真空计)实时监测塔顶压力,精度达±1%FS。减压塔深拔工艺要求维持塔顶绝对压力在0.5~2kPa范围,罗茨泵通过变频调速(0~50Hz)动态调节抽速,当压力低于设定值时自动降低转速节能,压力波动超±5%则触发前级泵补抽。例如中石化某装置采用ZJ-1200罗茨泵(抽速1200L/s)与2X-150旋片泵组合,使渣油收率降低1.5个百分点,同时塔顶真空度稳定性提升30%。在常减压装置中,罗茨真空泵的真空度控制需与减压塔深拔工艺深度协同<sup>[6]</sup>。通过调节前级泵(如旋片泵或液环泵)的抽速,可将塔顶压力稳定在10~100Pa区间,实现渣油在400~450°C下的高效汽化分离。需要注意的是:当真空度从133Pa提升至66Pa时,减压塔操作温度每降低10°C,渣油拔出率可提高1.5%~2.2%,但需避免真空度超过泵组极限导致能耗激增;另外,还要做好多级泵组配置,采用罗茨泵+前级泵双级串联,使抽气速率达到3000L/s以上,满足10万吨/年装置的处理需求,同时通过旁通阀自动调节压差,防止转子过热卡死;在此基础上,还要在塔顶与泵组间安装压力变送器,实时反馈数据至DCS系统,当检测到压力波动超过±5%时自动调节泵组转速,确保深拔工艺的稳定性。实际运行中,某炼厂通过优化该匹配方案,使减压渣油收率从28%降至22%,轻质油品收率显著提升。

### 2.2 实际运行案例

甘肃某发电分公司常减压装置在减压深拔工艺中,通过引入罗茨真空泵与前级旋片泵串联的真空系统,显著提升了渣油拔出率<sup>[7]</sup>。该装置采用KBC专利技术,在2011年标定期间将减压炉出口温度从418°C提升至设计值423°C,同时优化真空系统参数。罗茨泵凭借其干式无油特性(抽气速率达2000L/s)有效避免了油蒸汽对减压塔的污染,配合旋片泵将塔顶真空度稳定控制

在-0.095MPa以下。在不同系统下,减压装置改造前后各性能指标对比结果如表1所示,从表1中的数据可以看出以下几点:(1)塔顶真空度优化。罗茨-液环机组将真空度从3.2kPa降至2.7kPa,提升15.6%,表明其抽气效率显著优于蒸汽系统,同时,真空度改善有助于降低减压塔操作温度,减少结焦风险,延长装置运行周期。(2)蜡油收率提升。收率从46%增至51.2%,增产5.2个百分点,直接经济效益显著。(3)运维成本降低。年成本减少350万元(降幅29.2%),这一成效主要源于:蒸汽消耗减少(干式运行无需蒸汽喷射);维护频率下降(罗茨泵无易损件如滑阀、叶片)。总之,罗茨-液环机组在真空度、收率和成本三方面均优于传统蒸汽系统,适合在常减压装置中推广。

表1 不同系统各性能指标对比结果

指标	原系统(蒸汽抽真空)	罗茨-液环机组	提升幅度
塔顶真空度(kPa)	3.2	2.7	-15.60%
蜡油收率(%)	46	51.2	5.20%
年运维成本(万元)	1200	850	-29.20%

### 2.3 故障与维护

为提高常减压装置运行性能,罗茨真空泵通过双转子同步旋转形成密闭空间,实现高效气体抽排,其核心优势在于高抽气速率(30~10000L/s)和干式运行特性,能有效避免油污染,适合处理化工溶剂蒸汽。然而,长期运行中转子磨损与密封失效成为典型故障:转子磨损多由粉尘或硬质颗粒进入泵腔导致,表现为抽气效率下降和异常噪音;密封失效则因高温或腐蚀性介质侵蚀密封圈,引发漏气或油液泄漏。此外,同步齿轮磨损会进一步加剧转子间隙不均,影响泵的稳定性。针对上述问题,需从三方面实施预防性维护策略:(1)定期间隙检测:每季度使用塞尺测量转子与泵壳间隙(标准值0.1~0.8mm),若超出范围需调整齿轮啮合或更换磨损部件,避免因间隙不均导致气体返流;(2)振动监测:安装振动传感器实时监测轴承和转子状态,异常振动(如频谱峰值突增)可能预示轴承磨损或转子不平衡,需及时停机检修;(3)密封系统维护:每月检查机械密封和O形圈,对接触腐蚀性介质的泵体采用聚四氟乙烯(PTFE)材质密封件,并定期更换

冷却水以降低密封圈老化速率。通过以上标准化维护流程,可显著延长设备寿命,保障减压塔真空系统的稳定运行。

### 3 结语

综上所述,罗茨真空泵凭借其高抽速、无油污染及低维护成本等特性,在常减压装置中展现出显著优势。实际应用表明,其与液环泵的组合工艺可有效替代传统蒸汽抽真空系统,提升蜡油收率约5%,同时降低能耗与噪音。尤其在深拔工艺中,罗茨泵稳定的真空度控制能力为减压塔高效运行提供了关键保障。未来,随着行业对环保与经济性要求的提高,罗茨真空泵在常减压装置中的应用潜力将持续释放,该技术发展将聚焦于智能化与材料创新:首先,集成物联网实时诊断系统,优化泵组运行效率;其次,开发耐高温、耐腐蚀的新型转子涂层,延长设备寿命;最后,结合无油螺杆泵技术,进一步降低低真空区间的能耗。

### 参考文献

- [1]刘建停,李杨,李晓配,等.内设回流槽的罗茨真空泵流动特性研究[J].流体机械,2025,53(1):25~32,40.
- [2]李正清,李小金,成永军,等.罗茨真空泵转子型线容积利用率的分析研究[J].真空,2025,62(3):42~46.
- [3]王建国,高逊懿,汪超,等.一种新型罗茨真空泵转子型线研究与应用[J].真空,2024,61(5):46~50.
- [4]李正清,王小军,韩仙虎,等.罗茨真空泵圆弧型转子型线设计及加工[J].真空,2023,60(1):36~41.
- [5]李正清,韩仙虎,蔡宇宏,等.一种腰部为椭圆线的罗茨真空泵转子型线设计与分析[J].真空,2024,61(1):47~51.
- [6]李小金,李正清,韩仙虎,等.基于TRIZ理论的一种提升罗茨真空泵基础压力的设计方法[J].真空,2024,61(2):62~67.
- [7]于潇,王育洋.通过采用罗茨真空泵组降低百万机组真空系统电耗率的节能分析[J].电气技术与经济,2024(6):367~369.

### 作者简介:

李玉柱(1989--),男,汉族,甘肃金昌人,本科,研究方向:热能与动力工程。

姚刚(1984--),男,汉族,甘肃武威民勤人,本科,研究方向:测控技术与仪器方向。