

考虑表面粗糙度与空化效应的组合密封润滑探讨

方长兴

北京联工密封科技有限公司，北京，101102；

摘要：在石油工程设备中密封润滑系统的工作效果，直接关系到设备的稳定运行，本文就从组合密封润滑的相关影响因素入手，着重分析了表面粗糙度和空化效应的影响，在此基础上提出了综合考虑表面粗糙度和空化效应的组合密封润滑设计思路。希望本次研究可有效地改善密封性能并延长石油设备服役寿命，为油田工程设备的安全高效运行提供可靠支撑。

关键词：石油工程设备；考虑表面粗糙度；空化效应；组合密封润滑

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.017

引言

在石油工程设备中密封润滑系统是其核心部件，对石油设备的稳定运行发挥着重要作用，随着石油工程设备装备向高速化及精密化等方面的发展，常规密封润滑方法已经很难适应越来越苛刻的工作条件^[1]。在密封润滑的影响因素中，表面粗糙度发挥着显著的影响作用，直接影响着油膜的形成和维持，此外空化这种非常复杂的现象，对密封润滑也有很大的影响，空化现象的出现不但对油膜的稳定起到了很大的干扰，而且还可能会对密封部件造成破坏，因此在密封润滑设计时，应考虑这两方面的影响因素。

1 组合密封润滑系统的基本结构

组合密封是一项综合润滑技术，通过密封元件、高压润滑系统、高品质润滑油等，共同构成了一个能适合多种工况的润滑系统，以满足苛刻工况条件下高效润滑与保护的目的，如图1中所示，就是一个针对石油化工设备的组合密封润滑系统。

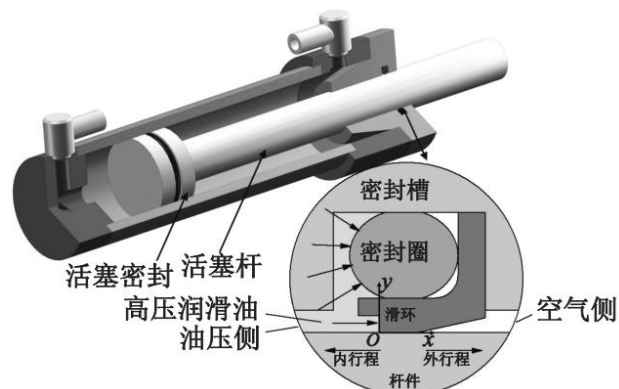


图1 组合密封润滑系统结构示意图

在图1中所示的组合式密封构造中，活塞密封件和

密封槽可使活塞杆与密封凹槽间的高压润滑油可以形成稳定的润滑薄膜，减少摩擦及磨损以防止泄露。这种结构可使油压侧与空气侧间能形成良好的密封接口，保证了液压系统的密封性。这是一种活塞密封装置，由活塞杆及密封槽等所构成，构成了一种可靠的密封件，为了满足活塞杆运动时的动力变化，对其进行了密封槽的优化设计，密封槽内的密封环时一条带有一定弹性的橡胶条，其受高压油的挤压时能够缓冲摩擦力并对因表面粗糙而产生的微小不平整进行填充^[2]。为了避免由于高压差引起的密封圈过大的变形和破坏，在设计过程中也要考虑到气侧的压力平衡。在进行组合密封润滑时，还应注意材料的选用及表面处理工艺，在苛刻的工作条件下，密封环的材质一般要求有很好的抗磨损及抗高压等性能，另外柱塞与凹槽的表面处理工艺也是影响其组合密封润滑性能的关键，在加工组合密封润滑系统时，各元件的表面质量必须严格控制，以改善密封面接触特性及降低摩擦磨损，达到延长组合密封润滑系统使用寿命的目的。

2 组合密封润滑的相关影响因素

2.1 表面粗糙度对密封润滑的影响

表面粗糙度是影响密封与润滑特性的重要参数，其对界面微结构特性有重要影响，并对油膜的生成与维持产生不可忽视的作用，表面粗糙度可影响油膜厚度及分布，大的粗糙度会造成油膜的局部破碎，进而增大摩擦磨损；但当表面粗糙度太低时，密封间隙就不能被有效地填满从而降低了密封性能，因此对其进行合理的设计与加工，是改善其润滑性能的关键。另外表面粗糙程度也会影响润滑油在密封件上的流动与分布，从而对油膜

的稳定性及密封性能产生重要的影响^[3]。在实际应用中,应加强各元件的粗糙度控制,实现对组合密封润滑系统各部件表面的质量优化,改善其粘附力及分布均匀性进而提升其密封润滑性能。

2.2 空化效应及其在密封润滑中的作用

空化效应也是影响密封性能的主要原因之一,特别是在高转速及高压条件下这一影响更为突出,空化效应是指流体内部产生空泡进而发生破碎,从而破坏油膜的稳定性可加剧密封部件的磨损,甚至引起密封失效^[4],空化现象的产生除了与流体本身的物性有关外,还与密封结构设计及润滑介质供给模式等因素有很大关系,当润滑油供给不充分或压力变化剧烈时,空化现象会出现在密封与润滑系统的接触面上,因此掌握并抑制空化效应是改善密封润滑性能的关键。

2.3 表面粗糙度与空化效应的协同效应

表面粗糙度和空化效应不仅分别能够影响密封润滑性能,且二者还可相互协同促进,进一步加大对密封润滑的影响,粗糙表面的微结构特性会促进空化形核及破碎等现象,进而对油膜的稳定性产生重要影响,如在粗糙度高的地方会更易产生空泡群,而空泡群的破碎则会加剧磨损量,进而使粗糙度进一步恶化并形成一个恶性循环^[5]。为此在密封润滑系统的设计中,必须兼顾表面粗糙度与空化效应,并对两者进行优化以减小两者的不利影响。通过对密封表面粗糙度的精细调控及密封结构的合理设计,实现对密封润滑性能的有效提升。

3 考虑表面粗糙度与空化效应的组合密封润滑设计

3.1 优化设计的目标与影响因素

为提高设计质量,首先要有清晰且有针对性的优化设计目标,掌握其所面对的各类印象因素。组合密封润滑设计其主要目的是减小摩擦及降低空化效应,提升整体的可靠性与稳定性。在实现这一目标时,设计人员要考虑可能面临一系列的影响因素,在此基础上充分利用流体力学及机械工程等相关学科的知识,对密封润滑系统进行优化设计。这就需要设计师既具有较强的理论功底,又具有较强的实际应用能力,进而在设计中作出合理的判断^[6]。设计人员为应对表面粗糙度对其润滑特性的影响问题,必须在设计方案中明确精密的表面加工工艺,实现对其表面形貌的调控以达到最优的润滑效果,

此外设计人员还应充分考虑空化效应对密封性能的影响,并从系统设计及相关参数调节等方面着手进而降低空化的产生。同时设计人员也要考虑到多个目标间的协同,如兼顾密封性能与减小摩擦系数,设计人员需对其进行全面的理论分析与试验验证,以寻求权衡的设计方法,设计人员可借助计算机辅助设计技术,如计算机辅助设计(CAD)及计算机辅助工程(CAE)等技术,和虚拟仿真技术进行模拟实验,不断调整相关参数,来提升设计精度与质量。

3.2 密封元件的优化设计

为了保证组合密封润滑性能,应保证各密封元件能在负责的工作条件下仍保持理想的密封效果,在设计时就需要从材料的选用及元件的尺寸等方面进行全面的考虑。元件质量与其抗磨损抗腐蚀等性能密切相关,因此如何选用合适的材料是关键,为了适应高压高温与强腐蚀性等苛刻条件,对密封件的材质提出了更高的要求,应选用既能耐高压又能耐化学腐蚀的高强度合金钢或高性能高分子材料。在结构及尺寸设计方面,要求密封单元的结构要能适应工作环境的变化,如高压或机械振动等,密封件的几何结构应该是最为合理的,这样可以减小应力集中,防止在高压下产生变形和破坏,此外精确的尺寸控制也保证了密封件和匹配零件之间合适的间隙,从而可以形成一层有效的润滑薄膜,并避免过度的磨损和泄露。另外由于表面粗糙程度对油膜的生成与保持具有重要的影响,因此在结构优化设计中,密封件的表面处理也是一个不容忽视的环节,应采用先进的机械加工方法,如研磨抛光及涂层等,可以有效地减小密封件的表面粗糙度,改善其密封性能,另外在设计密封件时,也应该将空化效应考虑在内。空化效应会引起局部润滑膜的损伤,使密封部件磨损加剧,严重时会引起密封失效,所以在对其进行设计时,必须对其进行合理的结构与选材,以减少空蚀产生的危险,如可以通过增大密封件的柔韧性或者使用抗气蚀能力好的材料来缓解空化效应,另外在设计密封件时,还应充分考虑其与润滑油之间的交互作用,保证润滑油在密封件上能生成一层稳定均匀的润滑薄膜,从而降低摩擦磨损及提高组合密封润滑性能。

3.3 润滑剂的优化选择及处理

在考虑表面粗糙度与空化效应时,润滑剂选择也是

一个需要重点考虑的内容,既要能在密封部件间形成一层稳定的润滑薄膜,又要具有优良的物理化学性质,以适应高压高温及强腐蚀等恶劣环境。选用润滑油时首要考虑的是它的基础油种类及粘度级别,基础油的种类对其抗氧化及抗泡沫等基本性质有重要的影响,而粘度级别对润滑薄膜的生成与维持有直接的影响,为了保证在较高的压力下保持良好的润滑膜,就必须选用高粘度的润滑油,但是高粘性润滑油也会增大操作阻力,如何兼顾润滑效果与高效性是目前亟待解决的问题,具体的解决办法就是如添加剂,通过加入抗氧化剂或防锈剂,改善了润滑油的化学稳定性可延长了润滑油的使用寿命。此外兼容性也是一个需要考虑的重要因素,若是润滑油的化学或物理性能和密封材料会产生互相作用,就必然会影响到密封润滑性能,所以所选择的润滑剂要和密封材料有良好的兼容性。另外润滑油也应该和其它液体兼容,例如冷却剂或液压油等。在使用过程中还应充分考虑使用环境及运行工况等因素。比如为了避免高温条件下的润滑油被氧化、分解,必须选用耐热性能好的润滑油,在腐蚀性介质中为了防止被腐蚀,必须选用耐腐蚀性强的润滑油。总体来看润滑剂的选择也是需要重点考虑的,在组合密封润滑时应明示润滑剂的使用标准,避免在使用过程中因使用劣质润滑剂而影响润滑性能的情况发生。

3.4 高压润滑系统的优化设计

在综合考虑壁面粗糙和空化效应的组合密封润滑系统中,高压力润滑体系的设计尤为关键,其决定否能够在高压力条件下实现连续稳定的润滑,进而保证其使用的可靠性和耐用性。为了使密封元件在高压环境下的高效润滑,必须从润滑剂的输送及控制精度等方面进行设计。为满足高压力工作条件下的特殊需要,对润滑的输送与分布系统进行优化,包括选择高压泵及管路,并结合实际情况设置润滑油分布器,高压泵要求有充足的压力输出及流量调节功能,以克服管路内的阻力及渗漏,保证润滑油能顺畅地输送到各润滑点。在管道的设计上,必须要在高压力及高热膨胀等复杂条件下,保证管线不发生断裂渗漏。润滑油分布器的设计要求保证润滑油能被平均分布在单个的密封件上,防止由于分布不均而造成的润滑过少或过量,另外为了保证系统的正常工作,

必须对其精度进行有效的控制,为了满足各种工况的要求,必须对润滑油的用量及温度等进行准确的监控与调整,可在系统中安装传感器及冷却装置等部件,能够及时调整以保证组合润滑系统的稳定性。

4 结束语

通过对表面粗糙度和空化效应的深入研究,揭示其对组合密封润滑的作用机理,并提出相应的优化设计思路。总体来看表面粗糙度的微结构特性对润滑薄膜的形成和维持起着至关重要的作用,同时空化效应是决定薄膜稳定性的一个重要因素,因此在设计组合密封润滑系统时应兼顾这两个影响因素,通过对密封件表面粗糙度的优化,以及密封元件和高压润滑系统的优化设计,及在使用中合理选择润滑剂,尽可能减少表面粗糙度及空化效应的影响,进而提高密封润滑性能并有效提升设备寿命。

参考文献

- [1] 张毅,钟思鹏,熊思阳,等. 应力松弛下滑环组合密封性能研究[J]. 机械科学与技术,2024,43(09):1485-1492.
- [2] 张毅,杨强,杨林,等. 齿形滑环组合密封热弹流润滑模型求解及分析[J]. 机械强度,2022,44(02):497-502.
- [3] 赵乐,索双富,时剑文,等. 旋转组合密封圈表面结构对密封性能的影响[J]. 润滑与密封,2021,46(01):19-26.
- [4] 张静林,魏雯,桂丽. 油田设备润滑管理存在的问题及应对策略研究[J]. 中国设备工程,2024,(06):82-84.
- [5] 周杨. 石油企业设备润滑管理措施探讨[J]. 云南化工,2018,45(04):238.
- [6] 朱海平,栾玉恒,刘林,等. 设备润滑管理在石油化工企业中的应用研究[J]. 中国设备工程,2020,(03):72-73.

作者简介:方长兴(1974.02-),男,汉族,浙江省温州市人,研究生,中级工程师,研究方向:旋转类骨架油封的技术研发和实用性验证。