

# 浅谈化工设备密封技术

刘建军 高琳昊 刘晓佳 包学峰

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

**摘要:** 化工生产中,设备密封性能至关重要,关乎生产安全、效率与产品质量。本文阐述了密封技术原理,涵盖接触式、非接触式及特殊工况密封三类。介绍了填料密封、机械密封、迷宫密封、磁力密封、干气密封等常用技术及其特点。分析了金属、非金属及复合密封材料的性能与选型要点。最后以反应釜、离心泵、管道连接为例,说明密封技术在典型化工设备中的应用。旨在为化工设备密封技术的合理选型与应用提供全面参考,保障化工生产安全高效运行。

**关键词:** 化工设备; 密封技术; 应用

**引言:** 化工设备常面临高温、高压、强腐蚀等复杂工况,一旦密封失效,会造成介质泄漏,引发环境污染与资源浪费,引发安全事故。深入研究化工设备密封技术具有重要意义。本文将系统介绍化工设备密封技术原理、常用密封技术、密封材料性能与选型,并结合典型化工设备分析密封技术应用,为化工行业密封技术的优化与升级提供理论支持与实践指导。

## 1 化工设备密封技术的原理

化工设备密封技术旨在防止流体介质泄漏,保障生产安全与效率,其原理基于不同密封结构对流体压力、接触面形态及材料特性的综合利用。主要分为以下接触式密封、非接触式密封和特殊工况密封三类,工作原理各有侧重。(1)接触式密封。通过密封元件与密封面的紧密贴合阻断介质泄漏通道。以填料密封为例,将弹性填料填充于轴与填料函间隙,通过压盖轴向压紧使填料产生径向膨胀,依靠填料与轴表面的摩擦力和变形封堵泄漏路径;机械密封则利用动环与静环两个光洁、平直的端面在流体压力和弹簧力作用下紧密贴合,形成微小的流体膜实现密封,流体膜厚度仅几微米,既能防止介质泄漏,又可减少摩擦磨损。(2)非接触式密封。不依赖表面直接接触,通过特殊结构形成的物理屏障限制介质流动。迷宫密封通过梳齿状间隙对流体产生节流效应,使流体压力逐步降低,泄漏量减小;磁力密封利用永磁体的吸力传递扭矩,将动密封转化为静密封,彻底消除轴封处的泄漏风险;气膜密封则在密封端面间注入高压气体,形成微米级气膜,实现零接触、低磨损的密封效果。(3)特殊工况密封技术<sup>[1]</sup>。如高温密封采用耐高温合金材料和膨胀系数匹配的结构设计,防止因热变形导致密封失效;高压密封通过增加密封面比压、优化密封结构增强承压能力;耐腐蚀密封则选用聚四氟乙烯、陶瓷等耐蚀材料,避免介质与密封元

件发生化学反应。

## 2 化工设备中常用的几种密封技术

### 2.1 填料密封技术

填料密封其核心结构由填料函、填料、压盖及螺栓等部件精密组合而成。填料函通常镶嵌于设备壳体内部,为填料提供安装空间并引导介质流向;压盖与螺栓配合,通过施加轴向压力,实现对填料的挤压变形。其工作原理基于填料材料的可压缩特性,当压盖收紧时,填料在填料函内发生径向膨胀,如同弹性塞子般紧密贴合轴表面与填料函内壁,有效堵塞介质泄漏通道,从而达到密封效果。在填料材料的选择上,早期广泛应用的石棉填料,因存在致癌风险及环保隐患,已逐渐被市场淘汰。取而代之的是聚四氟乙烯(PTFE)、芳纶纤维等新型材料。PTFE凭借其优异的化学稳定性,能够耐受强酸、强碱等腐蚀性介质的侵蚀,同时具备极低的摩擦系数,在降低能耗与减少轴表面磨损方面表现出色,成为腐蚀性介质工况下的首选材料;芳纶纤维填料则以高强度、高耐磨性著称,适用于高转速、高压力的严苛环境。填料密封技术具备显著的优势,其结构简单直观,零部件易于加工制造,大幅降低了生产成本;安装与维护流程简便,操作人员无需复杂的专业培训即可完成检修工作,在小型离心泵、搅拌机轴封等低速、低压的旋转或往复运动设备中,成为经济实用的密封解决方案。

### 2.2 机械密封

机械密封其核心结构由动环、静环、弹性元件(弹簧)及辅助密封圈等关键部件协同构成。动环紧密安装于旋转轴上,随轴一同高速运转;静环则稳固固定于设备端盖,两者在流体压力与弹簧力的双重作用下,以极高的精度紧密贴合,形成宽度仅数微米的密封端面。在密封端面之间,存在着一层极薄的液膜,这层液膜犹

如一道精密的屏障，兼具润滑与密封的双重功能：一是有效降低动环与静环之间的摩擦，减少磨损；二是阻止介质泄漏，确保密封效果。机械密封通过精巧的结构设计与力学原理，显著减少了泄漏通道，同时将摩擦损耗控制在极低水平，实现了高效密封，其泄漏量通常能够严格控制在微量级，远优于其他传统密封技术。在适用范围上，机械密封展现出强大的适应性，能够满足从低温（-200℃）到高温（500℃）、低压（常压）到高压（35MPa）、低转速到高转速（≤20000r/min）以及强腐蚀等各类复杂工况的严苛要求。正因如此，机械密封被广泛应用于反应釜、高速离心泵等化工关键设备，成为保障生产安全与稳定运行的核心技术。

### 2.3 迷宫密封

迷宫密封技术的核心结构由环形密封齿与轴套组成，密封齿呈梳齿状，与轴表面之间形成曲折且狭窄的间隙通道。当流体流经这些间隙时，会经历多次节流降压过程：在间隙处，流体流速瞬间增加，压力能转化为动能；随后进入扩大腔室，流速降低，动能又转化为热能散发出去。通过这一反复的能量转换过程，流体的压力显著降低，泄漏量也随之大幅减少。迷宫密封技术的优势源于其非接触式的工作特性，由于密封齿与轴之间不存在直接摩擦，极大地降低了磨损，延长了设备使用寿命，同时减少了能耗，提高了运行效率。这种特性使其特别适用于汽轮机、压缩机等高速旋转设备的轴端密封，能够在高转速、高温、高压的复杂工况下稳定运行。

### 2.4 磁力密封

磁力密封通过创新的设计理念，将传统的动密封转化为静密封，从根源上彻底消除了泄漏风险。其结构主要由内磁转子、外磁转子及隔离套三部分构成。内磁转子与转动轴紧密相连，随轴一同旋转；外磁转子则由电机驱动；两者之间通过隔离套分隔，隔离套通常采用不锈钢等非导磁材料制成。工作时，外磁转子的旋转磁场通过隔离套传递给内磁转子，利用磁性耦合原理实现动力的无接触传递，从而带动轴及设备内部部件运转。这一技术在密封性能上具有无可比拟的优势，完全避免了介质与外界的接触，杜绝了泄漏的可能性，特别适用于处理剧毒、易燃易爆、高纯度介质的化工设备，如制药、精细化工行业的反应釜，能够有效保障生产安全与产品质量。由于不存在机械接触，磁力密封几乎没有摩擦损耗，设备运行稳定，维护周期大幅延长。

### 2.5 干气密封

干气密封其核心原理基于流体动压效应。在动环表面，通过精密加工技术制作出微米级的螺旋槽结构。当

轴旋转时，气体被高速泵入螺旋槽中心，随着气体不断被压缩，产生强大的流体动压力，推动密封端面分离，形成厚度稳定在3 - 5 μm的气膜。这层气膜如同一个无形的弹性屏障，不仅能够有效阻止介质泄漏，实现零泄漏的密封效果，还能避免密封端面的直接接触，显著减少磨损，大幅延长设备使用寿命。干气密封在应用领域展现出独特的优势，尤其适用于离心压缩机、涡轮膨胀机等高速旋转设备的气体介质密封<sup>[2]</sup>。相较于其他密封技术，其运行过程中能耗低，无需额外的润滑系统，降低了设备的运行成本；密封性能稳定可靠，能够在高转速、高压的工况下持续高效运行。

## 3 密封材料的性能与选型

### 3.1 金属密封材料

不锈钢作为最常用的金属密封材料之一，其耐蚀性源于表面形成的钝化膜，能有效抵御多种化学介质的侵蚀。如304不锈钢对硝酸、有机酸等具有良好耐受性，适用于食品、制药等行业的管道密封；而316L不锈钢因添加钼元素，在氯离子环境下的耐点蚀能力显著增强，常用于海水淡化、氯碱化工等设备。铜合金则以良好的导热性和减摩性著称，锡青铜、铝青铜等材料强度高、耐磨性好，适用于高温、高压且需频繁拆装的密封场合，如高压阀门的阀座密封。但金属材料存在密度大、加工难度高的问题，且在强氧化性酸或碱性环境中仍可能发生腐蚀，选型时需结合工况精确评估。

### 3.2 非金属密封材料

聚四氟乙烯（PTFE）被誉为“塑料王”，其耐温范围广（-200℃~260℃），化学稳定性极佳，几乎不与任何化学试剂反应，是强腐蚀介质密封的首选材料，如浓硫酸、王水输送管道的垫片。石墨材料则以出色的耐高温性能见长，在惰性气氛中可耐受3000℃高温，且具有良好的自润滑性，适用于高温蒸汽、熔融金属等密封场景。石墨的柔韧性使其能紧密贴合密封面，填充微小间隙，降低泄漏风险。但PTFE的冷流特性和石墨在氧化性环境中的易损性，限制了它们在部分工况下的应用，选型时需充分考虑介质特性与环境条件。

### 3.3 复合材料

金属-橡胶复合垫片是典型代表，以金属骨架提供高强度和刚性支撑，橡胶层则利用弹性变形填充密封面的不平整，实现紧密贴合。如金属缠绕垫片由金属带与柔性石墨带交替缠绕而成，金属带保证结构强度和耐压性，石墨带提供良好的密封性和耐温性，可在-200℃~650℃、压力0~25MPa的范围内稳定工作，广泛应用于管道法兰、换热器等密封部位。此类材料兼具金

属的承压能力与非金属的密封性能,且成本低于纯金属密封件,在化工、石油、电力等行业中应用日益广泛<sup>[3]</sup>。但复合材料的性能受组成比例和制造工艺影响较大,需严格把控生产过程,确保其在复杂工况下的可靠性。

#### 4 典型化工设备中的密封技术应用

##### 4.1 反应釜的密封技术应用

反应釜作为化工生产中物料混合、反应的核心设备,其密封需同时满足高温、高压、强腐蚀及搅拌轴动态旋转的复杂工况要求。由于反应过程常涉及易燃易爆、有毒有害介质,密封失效可能引发泄漏甚至爆炸事故,因此对密封技术的可靠性与安全性要求极高。在低速、低压且介质危险性较低的反应釜中,填料密封因结构简单、成本低而被选用,但需定期维护以确保密封效果。对于大多数常规反应釜,机械密封是主流选择。单端面机械密封适用于压力和密封要求相对较低的场合;而双端面机械密封通过在两组密封端面间注入隔离液,可有效隔离介质与外界,常用于高压、高毒或易挥发介质的密封。磁力密封凭借其零泄漏特性,在制药、精细化工等高纯度、高危险性反应釜中广泛应用,通过磁性耦合实现无接触传动,彻底消除轴封泄漏风险。

##### 4.2 离心泵的密封技术应用

离心泵作为化工流体输送的关键设备,其密封主要面临高速旋转、压力波动及介质冲刷等挑战。离心泵的密封不仅要防止介质泄漏,还需减少摩擦能耗,确保泵的高效运行。对于输送一般介质的离心泵,填料密封虽存在摩擦损耗大的缺点,但因其成本低、易更换,仍在部分低参数工况下使用。机械密封则凭借优异的密封性能和较长的使用寿命,成为离心泵密封的首选。单弹簧机械密封结构简单,适用于清洁介质;多弹簧机械密封受力均匀,可适应介质粘度变化大的工况。针对含有颗粒杂质的介质,常采用带有冲洗系统的机械密封,通过引入清洁冲洗液带走杂质,防止颗粒进入密封端面造成磨损。在输送易燃、易爆、有毒介质时,串联式机械密封或干气密封可提供更高的密封可靠性,干气密封通过在密封端面形成气膜,实现零泄漏和低磨损运行,尤其适用于输送气体或易汽化液体的离心泵。

##### 4.3 管道连接的密封技术应用

化工管道系统分布广泛,连接点众多,密封性能直接影响整个工艺流程的安全性与连续性。管道连接密封需适应不同管径、压力等级及介质特性,同时要考虑安装便捷性与维护成本。法兰连接是管道系统中最常用的密封形式,其密封效果主要取决于垫片材料和螺栓预紧力。在低压、非腐蚀性介质管道中,橡胶垫片成本低、安装方便;而在高温、高压或腐蚀性环境下,金属缠绕垫片、金属齿形垫片等因其良好的压缩回弹性能和耐高温耐压性而被广泛应用。对于输送剧毒、易燃易爆介质的管道,需采用密封性更好的透镜垫或八角垫,配合高强度螺栓实现紧密密封。螺纹连接密封在小口径管道中应用较多,通常采用聚四氟乙烯生料带、密封胶等辅助密封材料增强密封效果。对于需要频繁拆卸的管道连接,快拆式密封结构如卡箍连接,凭借其操作便捷、密封可靠的特点,在食品、制药等行业得到广泛应用<sup>[4]</sup>。在特殊工况下,如低温管道,需选用耐低温材料的密封件,并采取保冷措施防止密封部位结霜、泄漏。

结束语:化工设备密封技术是保障化工生产稳定运行的关键环节。通过对密封技术原理、常用密封方式、密封材料性能及典型设备应用的研究,认识到不同密封技术各有优劣,需根据具体工况合理选型。在实际应用中,应综合考虑介质特性、压力温度、设备转速等因素,选择最适合的密封方案。随着化工行业的不断发展,对密封技术将提出更高要求,需持续创新研发,提升密封性能。

#### 参考文献

- [1]刘晓艳.浅谈化工设备安装施工技术[J].汽车世界,2019(17):173-173.
- [2]杨勇,王海全.浅谈化工设备密封技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2019(7):300-301.
- [3]臧玮.浅谈液压及密封技术在石油机械中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(21):171-173.
- [4]王德余,王基龙,杨中兴.浅谈液压及密封技术在石油机械中的应用[J].中国设备工程,2021(8):213-214.