

# 精细化工反应釜机械密封失效原因分析与安全改进措施

杨琪瑛<sup>1</sup>, 闫佳佳<sup>2</sup>

(1. 山东诚泰安全技术咨询有限公司, 山东 济南 250100;  
2. 利华益汇海新材料(利津)有限公司, 山东 东营 257400)

**摘要** 在精细化工生产流程中, 反应釜是核心设备, 其机械密封性能直接决定生产的连续性、安全性以及产品质量。机械密封一旦失效, 会引发物料泄漏、环境污染、安全事故等严重问题, 给企业造成巨大的经济损失。本文从设备材质、制造工艺、安装精度、工况条件以及介质特性等多个维度, 深入剖析了精细化工反应釜机械密封失效的原因, 并提出了相应的安全改进措施, 以期为相关人员提供有益参考。

**关键词** 精细化工; 反应釜机械; 密封失效; 密封材料

中图分类号: TH17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.22.042

## 0 引言

精细化工生产的产品广泛应用于医药、农药、涂料等多个领域, 为社会发展提供了不可或缺的原材料与产品支持。然而, 在生产过程中常涉及具有易燃易爆、强腐蚀性的化学物料, 这对反应釜机械密封提出了极高的要求。一旦机械密封失效, 物料泄漏到环境中, 不仅会直接污染土壤、水体, 破坏生态平衡, 引发环境危机; 而且, 当泄漏物料属于有毒有害物质时, 还会威胁周边居民的身体健康, 导致急性或慢性中毒事件。此外, 物料泄漏造成的原材料浪费和生产中断, 会大幅增加企业的生产成本, 削弱市场竞争力, 阻碍精细化工行业的可持续发展。因此, 探讨精细化工反应釜机械密封失效原因及安全改进措施具有现实意义。

## 1 精细化工反应釜机械密封失效原因探讨

### 1.1 机械密封自身结构问题

机械密封在精细化工反应釜中扮演着至关重要的角色, 其结构设计的合理性直接关乎密封性能与使用寿命。若设计存在缺陷, 密封面比压分布不均的情况便会频繁出现。在实际生产中, 部分精细化工企业的反应釜机械密封动环与静环配合精度欠佳, 在长时间的持续运行过程中, 动环与静环之间的接触压力分布呈现不均匀状态, 局部区域承受着远超正常范围的摩擦力。这就如同道路上某段路面长期承受过重车辆的碾压, 燕先出现破损一样, 随着时间的推移, 这些局部区域会遭受严重磨损, 进而破坏密封面的完整性, 导致密封失效, 物料泄漏<sup>[1]</sup>。物料一旦泄漏, 不仅会

造成物料损失, 影响生产效率, 而且当泄漏的物料为易燃易爆物质时, 安全隐患便会急剧增加, 泄漏点极有可能成为引发火灾或爆炸事故的导火索。机械密封结构设计的不合理性还体现在密封元件选型与布局方面。例如: 密封弹簧刚度选择不当, 若刚度过强, 会使密封面压力过大, 加速密封元件的磨损; 若刚度过弱, 密封面则无法紧密贴合, 同样容易引发泄漏。此外, 密封腔尺寸若与密封元件不匹配, 会导致密封效果显著降低, 使得机械密封在运行过程中难以达到理想状态, 失效风险大幅增加。

### 1.2 工艺介质影响

精细化工生产所涉及的工艺介质特性复杂多样, 其中腐蚀性与高粘度特性较为常见, 这对机械密封构成了极大的危害。强腐蚀性工艺介质对于机械密封的密封元件而言, 犹如一场猛烈的“腐蚀风暴”。在使用腐蚀性介质的精细化工产品时, 机械密封的金属部件首当其冲, 强酸性介质具有强大的侵蚀力, 能够快速腐蚀金属部件。以不锈钢材质的密封部件为例, 在强酸性环境下, 金属表面原子会与酸性介质发生化学反应, 逐渐溶解, 致使密封面出现坑洼, 破坏了密封面的平整度, 使得密封元件无法紧密贴合, 进而丧失密封性能<sup>[2]</sup>。高粘度介质对机械密封的影响也不容小觑。高粘度介质在机械密封运转时, 会给密封元件施加无数阻力, 如同给密封元件戴上了沉重的“枷锁”, 导致摩擦阻力显著增加。这类似于人在深水中行走时, 会明显感受到水的阻力带来的吃力感。在高粘度介质的作用下, 密封面温度会迅速升高, 而高温环境又会

加速密封元件的老化与磨损，使密封元件的材料性能逐步劣化，例如橡胶类密封件会变硬变脆，塑料类密封件可能会发生变形，最终导致密封性能下降，直至密封失效。此外，一些含有颗粒杂质的工艺介质在机械密封运转时，就像微小的“研磨颗粒”，会进一步加剧密封面的磨损，大大缩短机械密封的使用寿命。

### 1.3 操作与维护不当

操作人员在设备启动、运行以及停车过程中的操作规范程度，与机械密封的使用寿命密切相关。在某工厂反应釜启动阶段，操作人员未按照规定进行缓升温生压速操作，致使机械密封瞬间承受了远超正常范围的冲击载荷，如同遭受重锤猛击一般。这种情况与汽车启动时猛踩油门对传动系统造成的冲击类似，但对机械密封的损害更为严重。机械密封弹簧在过度压缩后，密封面因冲击而受损，受损后的密封面无法再满足原有的密封性能要求，物料泄漏风险显著增加。设备日常维护不到位也是导致机械密封失效的重要原因之一。若未能及时对设备进行检查保养，就如同人体未定期进行健康体检，潜在的问题将难以被发现与解决。在机械密封长期运行过程中，密封面不可避免地会堆积杂质，这些杂质就像“磨料”，会加剧密封面的磨损。若维护人员未能及时清洗密封面，杂质的积累将加速密封面的磨损，最终导致密封失效<sup>[3]</sup>。弹簧作为机械密封的关键弹性元件，其弹性会随着使用时间的增长而逐步下降。如果维护人员未定期检查弹簧弹性并及时更换失效弹簧，当弹簧无法提供足够的弹性力时，密封面将无法紧密贴合，从而引发泄漏。润滑系统对于机械密封的正常运行同样至关重要，若维护不当导致润滑不足，会加速密封元件的磨损，显著增加机械密封的失效风险。

## 2 精细化工反应釜机械密封安全改进措施

### 2.1 优化机械密封结构设计

采用先进的机械密封结构对于提升密封性能具有重要意义。平衡型机械密封通过独特的设计，能够有效降低密封面压力，减少磨损。这种密封结构通过对腔内压力的巧妙平衡，使密封面压力分布更为均匀，为密封面提供了均匀受力的保障。在实际使用过程中，其使用寿命得以延长，泄漏风险显著降低。在密封元件的生产过程中，提高制造精度至关重要。严格控制动环与静环的配合公差，从源头上确保密封性能的稳定性。高精度的制造工艺能够保证动环与静环在运行时紧密贴合，有效避免因配合不当而产生的泄漏隐患。在特殊工况下，如高温、高压与强腐蚀等极端环境，对机械密封结构设计提出了特殊要求。此时，需要进

行定制化设计，根据具体工况需求，精准匹配密封元件的材质、尺寸和结构形式，以满足生产需求。在高温高压且强腐蚀性的反应釜中，特殊的密封腔结构设计以及耐高温和耐腐蚀材料的选用，再结合密封弹簧设计的优化，能够有力推动机械密封在恶劣环境下稳定运行，显著提升生产的安全性与可靠性<sup>[4]</sup>。

### 2.2 选择合适的密封材料

根据工艺介质特性选择恰当的密封材料是保障机械密封性能的关键举措。在强腐蚀性介质的工况下，陶瓷、碳化硅等材料展现出优异的耐腐蚀性，可作为密封面制作的理想选择。陶瓷具有极高的化学稳定性，能够有效抵御强酸碱介质的侵蚀，使密封面如同披上了坚固的铠甲。碳化硅同样具备出色的耐腐蚀性能，且硬度高、耐磨性好，在强腐蚀伴有颗粒磨损的工况下表现卓越。在高粘度介质工况下，聚四氟乙烯凭借其良好的自润滑性能，具有更为显著的适用性。聚四氟乙烯材料的低摩擦系数能够有效减少高粘度介质带来的摩擦阻力，降低密封面的磨损，从而延长机械密封的使用寿命。在实际生产中，还需综合考虑工艺介质的温度、压力等因素来选择密封材料。在高温环境下，要求密封材料具备强大的耐高温性能，确保在高温工况下密封材料性能稳定，避免出现变形和老化等问题，从而使机械密封在复杂工况下能够保持良好的密封性能，提高生产的安全性与稳定性。

### 2.3 加强操作与维护管理

制定详细的操作规程对于规范操作人员的行为至关重要。在设备启动前，要求操作人员对设备进行全面检查，确保机械密封处于良好状态，这就如同汽车驾驶员在行驶前对车辆部件进行检查以确保正常运行一样。启动时，必须严格按照规定的速率缓慢升压升速，避免机械密封承受过大的冲击载荷。在设备运行过程中，操作人员要密切关注设备的运行状态，以便及时发现异常情况。同时，要强化日常维护保养工作，定期对机械密封进行检查，及时发现并处理潜在问题，这类似于给设备定期进行“体检”。定期清洗密封面，防止杂质堆积，减少磨损现象。检查弹簧弹性，及时更换失效弹簧，确保始终能够提供足够的弹性力，保证密封面紧密贴合。维护好润滑系统，为密封元件提供良好的润滑，降低摩擦阻力，延长机械密封的使用寿命。此外，要加强对操作人员的培训，提高其操作技能与安全意识，使其深刻认识到规范操作与维护管理对于机械密封寿命和生产安全的重要性，从人为因素层面降低机械密封失效风险，保障精细化生产的安全稳定运行。

### 3 机械密封安全改进措施的实施成效与展望

#### 3.1 机械密封改进措施实施效果

某精细化工企业在实施上述安全改进措施后，取得了显著成效。反应釜机械密封失效现象大幅减少，通过优化结构设计，成功解决了应力集中和摩擦不均的问题，有效延长了密封件的使用寿命。在材料选择方面，采用新型耐腐蚀与耐高温材料，显著提升了密封性能。加强操作与维护管理后，操作流程更加规范，机械密封得到定期检查维护，人为失误或维护不当导致的失效问题得到有效避免。据统计，该企业机械密封的失效次数从每年10次显著减少为2次，因密封失效引发的物料泄漏事故次数也大幅降低。随着泄漏的减少，生产环境的安全性逐步提升，生产效率因停工事故的减少而逐步提高，经济损失也随之降低。同时，物料泄漏的减少降低了对环境的污染风险，符合绿色生产的要求。安全改进措施的实施有力地提升了企业的安全生产水平，经济效益和社会效益逐步显现<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 机械密封技术展望

随着精细化工行业的快速发展和技术的不断进步，对反应釜机械密封性能的要求也日益提高。未来，机械密封的改进将主要集中在技术创新与智能化管理两个方面。在技术创新方面，需要加大研发投入，开发新型机械密封技术和材料。积极探索具有更高耐腐蚀性、耐磨性和耐高温性能的密封材料，以适应复杂多变的化工生产环境。同时，开展新型密封结构设计的研究，如自适应密封技术，使其能够根据工况变化自动调整密封压力，提升密封的可靠性和适应性。在智能化管理方面，智能化监测手段的应用将成为重点。企业可通过安装传感器和实时监测系统，全面掌握机械密封的运行状态，包括温度、压力、振动等关键参数的变化。借助大数据分析与人工智能技术，系统能够对监测数据进行深度分析，提前预警潜在的失效风险，并实现预测性维护，避免突发性故障的发生，进一步提高生产效率，降低维护成本，延长设备使用寿命。在工业互联网快速发展的背景下，机械密封监测数据可集成于企业生产管理系统，实现全流程智能化管理，为精细化工行业的安全高效生产提供有力支持，推动行业可持续发展。为更好地将技术创新与智能化管理落地，精细化工企业需强化人才培养与跨领域合作。一方面，加大对专业技术人才的引进与培养力度，打造一支既懂化工工艺，又精通密封技术和智能化管理的复合型团队。另一方面，深化与科研院校、设备供应商的合作，实现产学研用的深度融合。此外，行业协会应发挥积极作用，制定统一的技术标准与规范，

引导企业有序开展机械密封的改进工作，助力精细化工行业迈向高质量发展新阶段。

#### 3.3 推动行业合作与标准化建设

精细化工领域的安全提升，仅靠单个企业的努力是远远不够的，全行业的协同合作与标准化建设同样至关重要。未来，企业应积极主动地加强技术交流与合作，分享安全改进成果与技术经验，共同攻克机械密封技术难题。可借助行业协会或技术联盟等形式，组织专家团队深入研究机械密封的共性问题，并提出切实可行的应对举措。标准化建设对于提升行业整体安全水平具有重要意义。制定统一的机械密封设计、制造、安装和维护规范，能够明确行业生产行为，减少因标准不统一导致的质量与安全隐患。标准化建设还能为企业技术研发提供明确的方向和依据，推动行业技术快速进步。在行业合作与标准化建设的双重推动下，精细化工行业的安全水平将得到显著提升，为行业的可持续发展提供有力支撑。

### 4 结束语

精细化工反应釜机械密封失效问题不容忽视，深入分析失效原因并采取针对性的安全改进措施，对于提升机械密封的可靠性、保障精细化工生产的安全稳定运行具有关键作用。在实际生产中，企业可搭建数字化管理平台，实时监控机械密封的运行参数，实现故障的提前预警。加强对员工的技术培训，提升其对机械密封原理、安装、维护的认知与操作技能，确保每个环节规范执行。同时，积极参与行业交流合作，分享成功经验与技术成果，共同攻克机械密封难题。推动行业标准化建设，统一密封设计、制造与检测标准，规范市场秩序。通过多管齐下，有效降低机械密封失效风险，实现精细化工行业的安全生产与可持续发展，为行业的高质量发展筑牢根基。

### 参考文献：

- [1] 李煜,李庆生,陆玮.高压反应釜螺纹式快开结构强度分析[J].轻工机械,2024,42(01):98-104.
- [2] 余洋.聚合反应釜搅拌轴机械密封泄漏原因分析及解决方案[J].石油和化工设备,2024,27(11):84-89.
- [3] 牛芳芳.搪瓷反应釜破裂的粘接修复工艺[J].化学与粘合,2020,42(03):231-233.
- [4] 张克非.精细化工反应安全评估方法在高危化工工艺中的应用[D].北京:北京化工大学,2021.
- [5] 丰建国,周生龙,万素萍.基于AI的精细化工生产反应安全风险评估方法[J].化工管理,2024(31):106-109.