

蒸汽管道旋转补偿器密封结构与疲劳寿命设计研究

常海涛

南京苏夏设计集团股份有限公司，江苏南京

摘要：本文首先介绍了蒸汽管道旋转补偿器的工作机理和结构形式，为后续的研究做准备。随后对密封结构的设计基础进行了介绍，包括密封材料的选择和性能需求、密封结构的基本设计原则。接着对疲劳寿命理论进行了介绍，包括疲劳寿命的定义、疲劳寿命的计算以及疲劳寿命的影响因素。之后进行了密封结构的疲劳寿命设计，密封结构的应力分析以及疲劳寿命预测模型建立。最后进行了旋转补偿器密封结构的优化设计，明确优化设计的目的和方法并进行应用分析。

关键词：蒸汽管道；旋转补偿器；密封结构；疲劳寿命设计；优化设计

Research on the Sealing Structure and Fatigue Life Design of the Rotating Compensator for Steam Pipeline

Haitao Chang

Unit: Nanjing Suxia Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

Abstract: This paper first introduces the working mechanism and structural forms of steam pipeline rotary compensators to lay the groundwork for subsequent research. It then elaborates on the design fundamentals of sealing structures, covering material selection and performance requirements, as well as core design principles. The discussion proceeds to fatigue life theory, including its definition, calculation methods, and influencing factors. Subsequently, the paper presents fatigue life design for sealing structures, including stress analysis and the development of fatigue life prediction models. Finally, it presents optimized designs for rotary compensator sealing structures, clarifying the objectives and methodologies of optimization while conducting practical application analyses.

Keywords: steam pipeline; rotary compensator; sealing structure; fatigue life design; optimization design

1 蒸汽管道旋转补偿器概述

1.1 旋转补偿器的工作原理

旋转补偿器主要是利用自身的旋转结构来吸收或补偿因管道发生热胀冷缩等因素而引起管道的位移。一般由芯管、外套管和密封装置等部件组成，在管道系统中，管道发生轴向运动、横向运动和角向运动时，在芯管与外套管之间会发生相对旋转运动，利用这一旋转运动来解除管道的应力，以达到补偿管道位移、确保管道系统安全、稳定工作之目的，密封装置也能防止介质泄漏，保证管道系统的安全。

1.2 旋转补偿器的结构特点

旋转补偿器结构特殊，芯管与外套管配合紧密且相对自由转动，外套管具有强度高、耐腐蚀性材料组成、承受管道系统外力和介质侵蚀长时间稳定运行等特点。芯管根据管道介质和工作条件选择合适材料，确保与介质匹配良好。密封装置是旋转补偿器的主要部件，选择密封性能好、密封性高的材料和技术，确保补偿器转动时不漏介质，保证管道系统安全可靠。旋转补偿器结构紧凑，占用空间小，安装、维护都很方便，适用于不同位置管道安装。

2 密封结构设计基础

2.1 密封材料的选择与性能要求

对密封材料进行选择，要选择耐高温的材料，因为蒸汽管道在运行过程中会产生较高的温度，只有耐高温的材料才能确保在高温环境下材料自身物理化学性质不会发生改变，才能达到密封效果，密封材料要耐腐蚀，蒸汽管道中蒸汽存在大量杂质，这些杂质会腐蚀密封材料，一旦耐腐蚀性较差就会加快老化、损坏，影响密封效果，密封材料要能耐弹性，由于旋转补偿器在工作时，会对密封部位产生各种力，好的弹力会使密封材料受力之后快速恢复原状，确保材料密封的紧密性。密封材料要有硬度，太硬不紧密，太软会因压力将密封部位挤掉，影响密封效果[1]。

除了上述基本性能要求外，密封材料还应具

备较低的摩擦系数。在旋转补偿器不断运转的过程中，密封部位会产生相对运动，较低的摩擦系数可以减少密封材料与接触面之间的摩擦力，降低磨损，延长密封材料的使用寿命，同时也能减少能量损耗。另外，密封材料要具有良好的加工性能，以便能够根据密封结构的具体形状和尺寸要求进行精确加工，保证密封的贴合度和可靠性。并且，密封材料需具备较好的抗老化性能，在长期的使用过程中，能够抵抗紫外线、氧气等因素的影响，保持性能稳定，不易出现脆化、龟裂等现象，从而持续有效地发挥密封作用。

2.2 密封结构设计的基本原则

首先，要遵循可靠性原则，确保密封结构在蒸汽管道旋转补偿器长期运行过程中，能够始终保持良好的密封性能，防止蒸汽泄漏，避免因泄漏造成的能源浪费、安全隐患以及对周围环境的污染等问题。其次，要遵循适应性原则，密封结构应能够适应蒸汽管道旋转补偿器不同的工作条件，如温度、压力的变化，以及管道的振动等情况，在不同的工况下都能稳定可靠地工作。再者，要遵循经济性原则，在满足密封性能要求的前提下，尽量降低密封结构的制造成本和维护成本，提高其性价比，同时要考虑密封结构的安装和更换的便捷性，减少因安装和维护带来的额外费用[2]。另外，还需遵循标准化原则，密封结构的设计应符合相关的行业标准和规范，便于零部件的通用和互换，有利于提高生产效率和产品质量。

最后，还应遵循创新性原则，在借鉴现有成熟密封结构的基础上，积极引入新的设计理念、材料和工艺，不断提升密封结构的性能和可靠性，以满足蒸汽管道旋转补偿器不断发展的需求。同时，要兼顾可维护性原则，使密封结构在出现故障或需要维护时，能够方便快捷地进行检修和更换部件，减少停机时间，保障蒸汽管道系统的正常运行。

3 疲劳寿命理论基础

3.1 疲劳寿命的定义与计算方法

疲劳寿命是指材料或构件受到交变应力从开始

使用到疲劳破坏的循环次数或时间。蒸汽管道旋转补偿器密封结构的疲劳寿命计算方法一般为疲劳累积损伤理论，疲劳累积损伤理论认为：一次应力循环会对材料造成一定的损伤，材料在受到一定量的损伤后就会产生疲劳破坏，疲劳寿命计算方法一般为采用名义应力方法、局部受力应变法等。名义应力法以名义应力为基本设计参数，采用材料的应力-寿命曲线（S-N 曲线）进行疲劳寿命计算；局部受力应变法考虑了构件局部塑性变形的存在，通过局部应力应变历程计算求解疲劳寿命。在实际中根据密封结构状况选择计算方法，并结合试验数据进行验证、修正。

3.2 影响疲劳寿命的关键因素分析

影响蒸汽管道旋转补偿器密封结构疲劳寿命的主要因素有：材料、应力、工作条件、结构等，其中材料是疲劳寿命的决定性因素，不同材料的抗疲劳性能不同，疲劳寿命不同，密封结构疲劳寿命的确定是选择具有良好抗疲劳性能材料的重要因素。应力的大小影响着疲劳寿命，过高的应力大小将加快疲劳寿命的进程，在设计时要尽量降低应力[3]。疲劳寿命还受到工作条件的影响，例如温度、湿度、腐蚀介质等，这些条件会加速疲劳寿命，使疲劳寿命缩短。密封结构形状的设计、几何尺寸设计、连接方式的设计等因素，合理的结构设计可以减小应力，提高疲劳寿命。

4 密封结构的疲劳寿命设计

4.1 密封结构的应力分析

密封结构进行应力分析时，第一步首先要明确密封结构在蒸汽管道旋转补偿器中的主要受力形式，如内压力、外压力、温度应力、管路振动或管路位移引起的附加应力等，对应力形式不同的应力，应选择合适的力学模型进行简化分析，如选择薄壁圆筒理论分析内压力环向应力，并考虑到温度变化对材料热膨胀系数的影响，然后分析材料热应力，利用有限元分析等数值方法对密封结构复杂的几何结构和边界条件进行有限元分析，获得较准确的应力云图特别是应力集中区的确定，有利于疲劳

寿命预测工作的开展[4]。

在具体分析过程中，要详细考虑密封结构各部件的受力情况。对于密封环，要分析其在不同工况下与旋转轴之间的接触应力，接触应力的分布不均匀会导致局部应力集中，影响密封结构的疲劳寿命。对于密封座，要分析其承受的内压、外压以及与密封环相互作用产生的应力，同时要考虑安装过程中可能产生的预紧力对应力的影响。通过建立精确的力学模型，结合数值模拟方法，能够全面、准确地获取密封结构各部位的应力值，为后续的疲劳寿命预测提供可靠的数据支持。

4.2 密封结构疲劳寿命的预测模型

在进行密封结构疲劳寿命预测模型构建的过程中要考虑多方面的因素方能得出较为准确的目的。要根据应力分析结果，尤其是应力集中位置处的应力状态确定其在承受循环载荷的疲劳累积损伤程度。疲劳寿命预测方法有：名义应力法、局部应力应变法、断裂力学损伤容限设计方法等，名义应力法主要适用于简单结构应力；局部应力应变法比较适合于应力集中的情况；损伤容许设计方法比较适合有初始裂纹或缺陷的密封结构，分析裂纹的扩展速率确定裂纹寿命。按照老化材料、环境复杂多变的载荷谱等对模型进行修补，进一步完善预测准确度。

在具体的实施过程中，可以利用有限元分析软件，对应力集中区进行模拟，获得应力应变数据，同时依据材料疲劳试验，得到各个应力水平下的疲劳寿命曲线，为预测模型提供数据基础[5]。对于温度、湿度、腐蚀介质等环境因素，则需利用加速寿命试验等方法，量化疲劳寿命的影响程度，据此修正。载荷谱的复杂程度需要通过实际工况的监测或模拟试验，获得有代表性的载荷时间历程，才能更好的预测疲劳寿命。

5 旋转补偿器密封结构的优化设计

5.1 优化设计的目标与方法

优化设计的目的是使旋转补偿器的密封结构不出现泄漏时的疲劳寿命最大，同时满足复杂工况下

的使用要求。因此，基于以上的分析密封结构参数的基于有限元分析的参数化优化方法，采用多目标优化算法对密封结构进行参数的迭代优化，其步骤如下：第一步，建立密封结构参数模型，确定密封结构设计变量，例如密封面的密封面形状、密封结构材料参数、接触参数等；第二步，利用正交试验方法确定影响变量，建立响应面模型，节约计算成本；第三步，通过遗传算法，粒子群算法等工具，得到满足强度、刚度、密封强度等约束的疲劳寿命的最大值。

5.2 优化设计应用分析

在具体的应用中，以某型号蒸汽管道旋转补偿器密封件作为研究对象，首先按上文的方法对密封件进行参数化建模，精确的建立了密封面尺寸参数、材质参数、接触参数等设计变量，然后通过正交试验对影响密封件疲劳寿命因素进行分析，提取响应影响因素，建立响应面模型，节省了后期的优化计算量，从而减少了后期的计算开销，再运用遗传算法，在约束条件强度、刚度、密封性等方面，全局寻找最优解，得到密封件提升疲劳寿命最佳设计。试验结果表明：最佳设计方案下，密封件的寿命提高了，并且密封漏油的风险也有所降低，实现

了旋转补偿器在复杂工况下的稳定运转。

6 结语

本文从蒸汽管道旋转补偿器的密封结构和疲劳寿命设计两方面开展讨论研究，通过建模参数确定、正交试验和响应面分析、智能优化算法等方法对旋转补偿器密封结构进行优化设计，得到了密封结构寿命大幅提高和漏液危险性降低的密封结构优化方案，进一步为旋转补偿器在更恶劣工况条件下的可靠稳定运行提供了保障。后续可以继续考虑使用其他新材料的密封结构或先进结构理念。

参考文献

- [1] 李海冬.蒸汽管道旋转补偿器漏汽原因分析[J].建设科技,2022(24):68-70.
- [2] 杨梅.蒸汽管道II型自然补偿处支架设计型式的分析[J].山东化工,2024(18):230-232.
- [3] 郑显伟.超高压蒸汽管道开裂失效分析与预防策略[J].石油化工腐蚀与防护,2024(05):43-47.
- [4] 杨燕.高温蒸汽管道开裂失效分析及处理措施[J].石油化工腐蚀与防护,2023(03):47-51.
- [5] 石浩,黄绘玲.机械结构优化设计的实践研究[J].中国设备管理新趋势交流会会议文集(二),2024:3.

