

金属缠绕垫片失效机理与管控策略研究

刘双羽

玉门炼油厂，甘肃 酒泉 735200

DOI:10.61369/ETQM.2025120010

摘要：金属缠绕垫片是炼化企业法兰连接系统的关键密封件，对保障装置安全运行和环保有很重要的意义。本文围绕其结构与密封原理，分析了垫片压缩应力、介质压力和泄漏率，阐述了V形金属带的自紧效应和回弹性能对密封稳定性的作用。结合本厂实际案例，归纳了选型错误、安装不规范和应力松弛导致的典型失效模式，提出选用带内外环的金属缠绕垫片和波齿复合垫片等改进方案。实践显示，优化选型、规范安装和加强维护能显著降低静密封泄漏率。文章最后展望了高性能材料和全生命周期管理对静密封技术影响，为装置长周期安全运行提供了思路。

关键词：静密封垫片；压缩应力；泄漏率；可持续发展

Research on The Failure Mechanism and Control Strategies of Metal Spiral Wound Gaskets

Liu Shuangyu

Yumen Refinery, Jiuquan, Gansu 735200

Abstract : The metal wound gasket is a critical component ensuring the safety and environmental compliance of flange connections in refining and chemical enterprises. Starting from its structural characteristics and sealing mechanism, this paper systematically analyzes the dynamic coupling relationship among gasket compression stress, medium pressure, and leakage rate, and elucidates the crucial role of the self-tightening effect and resilience of the V-shaped metal strip in maintaining sealing stability. Based on practical application cases, it summarizes typical failure modes caused by improper selection, non-standard installation, and stress relaxation, and proposes improvement solutions such as selecting metal wound gaskets with inner and outer rings and serrated metal composite gaskets. Practice demonstrates that by optimizing gasket selection, standardizing installation procedures, and strengthening operational maintenance, the static sealing leakage rate can be significantly reduced. Finally, the article provides an outlook on the development of static sealing technologies, including high-performance materials and life-cycle cost management, offering direction for the long-term safe operation of the equipment.

Keywords : static sealing gasket; compressive stress; leakage rate; sustainable development

静密封是一种专门用于连接两个相对静止的表面，从而有效阻止流体或者气体泄漏的密封部件。在炼化企业的各类设备体系里，它的应用十分广泛，在管道法兰、压力容器以及阀门等设备的连接部位，常常被使用。在静密封领域，常用的垫片一般包括：橡胶垫、芳纶垫、金属缠绕垫等。这些材料具备很好的弹性和密封性能。在一定的压力和温度条件下，它们可以成为可靠的密封屏障，将流体和气体牢牢阻隔。同时，它们还拥有一定的耐腐蚀性和耐磨损性，能够应对炼化介质中可能含有的腐蚀性物质以及机械磨损带来的影响，为炼化设备的安全稳定打下很好的地基。

本文主要介绍金属缠绕垫片。它是一种优良的复合材料密封件，其由一层金属带和一层填充料(石墨带)经紧密、连续和螺旋形交替缠绕而成，具有结构简单，成本低，对介质和温度适应性强，耐压范围宽，安装预紧力小以及有多道密封等优点，因此与其它密封垫片相比，具有无可比拟的优越性。大量用于高温高压的压力容器和管道等结构中，解决了长期存在的跑、冒、漏、滴的问题。

一、金属缠绕垫基本结构与设计

(一) 垫片基本结构

1. 金属带

作为垫片的核心骨架，金属带由薄型冷轧钢带精密轧制而成V形等几何截面，以此获得垫片所需的弹性与回弹性能。从性能上看，W形截面能提供更优的回弹性，但由于其制造工艺复杂、成本高昂，在本厂的实际应用中，V形带是更为经济高效的选择。在材质方面，可选范围涵盖低碳钢、304/316不锈钢至特种合金，本厂基于广泛的工况需求，主要采用304或316不锈钢。在制造过程中，该成形金属带与柔性石墨填料紧密缠绕，二者协同作用，确保了垫片在面对法兰微量分离时，仍能通过其回弹维持足够的密封预紧力。

2. 非金属带

金属缠绕垫片的非金属带起密封作用，因此非金属填料具有耐高温、高压的性能及稳定的化学性能。本厂非金属填料主要使用柔性石墨。

3. 加强环

外加强环在安装过程中有定位作用，也叫定心环，材料通常采用碳钢，并经过防锈处理。内外加强环对提高垫片性能有一定影响。由于金属带的断面形状使垫片获得一定的弹性，再加上内外环，则当基本型垫片受压时，外环和内环分别处于受拉和受压状态。当基本型垫片载荷下降时，内外环储藏的能量释放，提高垫片的回弹力，增加了垫片对温度和压力变化的适应能力，同时内外环的存在，能够保证垫片有足够的强度，在外加螺栓载荷过载时，不被压溃。

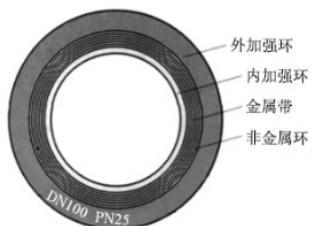


图1

图1

金属缠绕垫片是由一定几何截面的成型金属带和非金属填充材料带组成的一种复合型垫片，其包括基本型、基本型加内环或外环以及基本型加内外环的结构如图2。

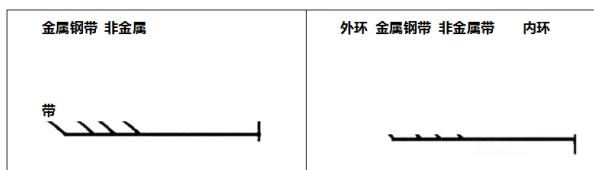


图2 金属缠绕垫片结构

(二) 垫片基本结构

金属缠绕垫片四种基本类型

1. 基本型 (A型)

A型垫片(图2)无内外加强环，适用于榫槽面法兰和凹凸

面法兰。

2. 内加强型 (B型)

B型垫片(图3)只有内加强环，适用于凹凸面法兰。

3. 外加强环 (C型)

C型垫片(图4)只有外加强环，适用于平面法兰和凸面法兰。



图2



图3

4. 内外加强环 (D型)

D型垫片(图5)有内外加强环，适用于平面法兰和凸面法兰。

二、金属缠绕垫片垫片密封性能参数

(一) 初始压紧应力和密封比压

影响垫片密封关键性能的参数有初始压紧应力和密封比压。垫片密封的本质是通过施加外部载荷，阻断介质泄漏的通道。初始压紧应力：在设备或管道未通入介质前，通过螺栓拧紧，在法兰面上产生巨大的压紧力。这个力使垫片，特别是其非金属填充材料(如石墨)发生压缩变形，并填充法兰密封面的微观不平整处，从而形成初始的密封条件。密封比压是形成初始密封所需的小单位面积上的压紧力。如果初始压紧应力不足，无法达到密封比压，即使在无压状态下，垫片也可能泄漏。

(二) 垫片的回弹与自紧效应

当设备投入运行，介质压力引入后，系统的受力状态发生根本性变化。螺栓载荷发生变化，介质压力会在法兰连接系统的内部产生一个试图将两片法兰撑开的“内压推力”。这个推力会部分抵消螺栓的初始预紧力，导致作用在垫片上的残余压紧力减小。当螺栓载荷因内压而减小，法兰有微量的分离趋势时，垫片中像弹簧一样被压缩的金属带会试图回弹，释放储存的弹性势能，从而持续地对法兰面保持一个压紧力。这个回弹能力保证了在压力波动或热循环时，密封依然有效。对于V形金属带，介质压力本身会渗透到垫片结构的缝隙中。介质压力作用在金属带的V形槽上，会产生一个向外扩张的力，这个力会增加垫片对法兰面的压紧力。这就是“自紧作用”，它使得金属缠绕垫片在更高的工作压力下，密封能力反而越强。

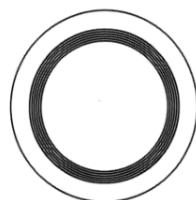


图4

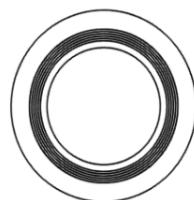


图5

(三) 泄漏率

泄漏率是衡量金属缠绕垫片密封性能的关键指标，与其受力情况息息相关。其中，垫片应力 (σ_g) 是操作状态下垫片实际承受的压紧应力。该应力由螺栓预紧力、介质内压及法兰系统刚度共同决定。一般而言，垫片应力越高，泄漏率越低。但应力过高会导致非金属柔性石墨填充材料被过度压缩甚被压坏，同时可能引起金属带发生塑性变形，导致使垫片没有回弹能力。随着压力或温度的波动，金属缠绕垫片的密封性能彻底失效。因此，理想情况下，垫片应拥有两种性质：一是良好的压缩性，即在压力不太大的情况下，就可产生足够变形，把法兰面上细小的不平整地方填严实；二是优异的回弹性，能在没有压力或压力变小的情况下，能弹回到大部分初始形状。泄漏率 (L) 与垫片应力 (σ_g) 及介质压力 (P) 的关系可用以下经验模型近似表达：

$$L \propto \frac{P^n}{(\sigma_g)^m}$$

其中，n 和 m 为与垫片结构和材料相关的常数。该模型清晰地揭示了二者对泄漏率的影响规律：介质压力 (P) 的增大会导致泄漏率升高，而垫片压紧应力 (σ_g) 的增加则可有效降低泄漏率。

三、金属缠绕垫片在炼化企业中的应用

经过一段时间摸索和实践，要严把垫片和安装的质量关，针对不同的法兰形式选用对应金属垫片，用力矩扳手对边均匀紧固，同时要求平稳操作。针对本厂静密封泄漏状况进行了全面细致的技术分析，查找出造成全厂静密封泄漏率高的部位主要有：主工艺系统、热力系统的管线法兰、阀门法兰以及其他密封面。通过对泄漏部位的观察与分析，发现原使用的芳纶垫片或橡胶垫存在着几个问题：（1）垫片材料本身强度、弹性不够，在介质温度、压力出现波动时，极易发生泄漏；（2）垫片两侧表面密封情况良好，但介质沿着垫片内部纤维向外渗漏，出现冒烟、结焦以及毛细管现象；（3）在较高温度下使用一段时间后，出现老化现象，垫片回弹性下降甚至断裂，出现渗漏；（4）安装时螺栓预紧力太大，造成垫片部分失弹发生渗漏。

芳纶垫片和橡胶垫存在一些不足，特定条件下金属缠绕垫片优势更明显。多数时候，我们选带304不锈钢加强环内外形式的垫片，填充料用柔性石墨。用在重要工艺、热力管网法兰密封处，基本能杜绝泄漏，改善了厂内管道法兰密封情况。另外，阀门大盖易泄漏，新阀门打压试漏时，我们把部分装置阀门大盖法兰垫片换成了新型石墨金属波齿垫片，也可以减少泄漏。

在设备管理工作中，静密封也是重点内容。为让静密封管理有效，现在我厂作业前会做预约计划，让工作程序化。把设备维护检修流程按时间或内容，合理分成操作单元，明确各部门责任，提升工作质量、有效控制全过程。实际效果很好：一是能控制操作条件变化导致的密封泄漏；二是严格巡检、执行规范，能

早发现、早处理潜在泄漏点，形成管理闭环。另外，这方法减少了工作随意性，让操作人员养成严谨科学的工作习惯。

四、金属缠绕垫片主要失效模式分析与控制策略

本部分结合现场实践，系统梳理了金属缠绕垫片在炼化装置中的四种主要失效模式，并从设计选型、安装操作及运行维护等环节，提出了针对性的控制策略。

(一) 选型不当

选型不当是导致垫片早期失效的首要原因。其根源在于未能充分评估介质腐蚀性、温度压力波动范围等服役工况，或对垫片结构类型（如基本型与带环型）的适用场合理解不清。例如，在热油系统中选用不耐高温氧化的普通橡胶垫，或在凹凸面法兰上误用了无定位环的基本型垫片。

控制策略：建立基于工况的垫片选型规范。对于高温高压波动工况，优先选用带内外环的金属缠绕垫或波齿复合垫；对于腐蚀性介质，则需匹配特殊合金带材的垫片。

(二) 安装操作不规范

垫片安装质量影响密封效果，安装不当如位置不正确、压紧力不够或过大等，会导致密封不良或失效。主要原因包括对安装要求和操作规程了解不充分；对设备结构和类型了解不足；安装过程缺乏检查和测试手段等。

控制策略：加强对安装要求和操作规程的学习培训；深入研究设备结构和类型；安装过程中加强检查和测试，确保垫片正确安装和压紧。借鉴行业经验，结合实际进行安装工作。

(三) 老化损坏

垫片在使用过程中受介质、温度、压力等因素影响会老化损坏，严重时导致介质泄漏和设备损坏。主要原因有介质中腐蚀性物质的侵蚀；高温高压环境的破坏；垫片材料本身性能和寿命限制等。

控制策略：选择具有良好耐腐蚀性和耐高温性能的垫片材料；加强对垫片使用过程的监测和维护；定期检查和更换垫片，确保密封性能和使用寿命。借鉴行业经验，结合实际进行维护和更换工作。

(四) 垫片应力松弛

垫片使用过程中会发生应力松弛，导致密封性能下降。主要原因包括垫片材料本身的应力松弛特性；长时间受压力和温度作用加剧应力松弛；安装过程中压紧力不均匀或过大等。控制策略：优选抗应力松弛性能好的材料，如高弹性的特种合金带材与改性石墨。加强对垫片使用过程的监测和维护；采用增加垫片厚度、提高压紧力等方法提高密封性能。借鉴行业经验，结合实际选择和使用垫片。

五、静密封垫片技术发展趋势

目前，玉门炼油厂生产装置正在迈向“四年一修”乃至更长周期运行目标，对法兰连接密封的可靠性提出了更高要求。传统

静密封垫片在常减压、催化裂化等常规装置中表现稳定，但在加氢裂化、重整等高温高压及强腐蚀工况下，其性能局限性也很明显。为应对这方面的问题，我厂的静密封技术要朝着高性能化、精细化及全生命周期成本控制的方向迈进。

（一）探寻延长检修周期的垫片材料

垫片材料的性能直接决定了其在我厂严格工况下的适用性与寿命。在非金属材料领域，高性能柔性石墨仍在我厂应用广泛。未来，可以考虑探索抗氧化浸渍石墨在高温含氧环境中的使用情况，努力延长检修周期。在金属材料领域，应对腐蚀是选材料关键点。在加氢装置等高温高压环境，我厂已逐步将普通不锈钢带材升级为316L不锈钢；对于更具腐蚀性的反应产物管线，未来探索镍基合金的缠绕垫片应用可行性。

（二）结构优化与新型垫片应用

对于垫片结构，我厂的核心目标是实现：在不显著增加螺栓预紧力下，实现更优异的密封效果与更强的抗工况波动能力。波齿复合垫片在我厂部分高温高压阀门和换热器法兰上已经试用。这种垫片通过金属波齿骨架提供的机械强度，依靠表面软质石墨层做好初始密封，对于热油泵出口等存在剧烈温度波动的部位特别适用。与传统缠绕垫相比，波齿垫预紧力要求相对低，能有效保护老旧法兰面；其优异的应力松弛性能更能适应长周期运行。未来，也在逐步扩大其应用范围。此外，针对循环水场等大口径、低压法兰密封难题，将推广采用芳纶垫替代传统的橡胶垫，以解决其易老化、密封寿命短的问题。^[1]

（三）成本与绿色协同共进

目前，环保法规越来越严格，企业降本增效需求也很迫切，

静密封管理需顺应绿色与全生命周期成本的发展趋势。绿色安全是选型的硬性要求。我厂已全面弃用石棉垫片，改用纶垫片，有效减少了挥发性有机物（VOCs）的无组织排放，既履行了环保责任，又保障了员工健康。高性能垫片虽单价高，但泄漏率极低、长周期运行可靠、维护频次大幅降低，还能避免非计划停车带来的巨大经济损失。综合权衡，为进一步优化成本与性能，可将常规垫片与高性能垫片搭配使用。^[2]因此，推动密封方案科学选型，是实现装置“安、稳、长、满、优”运行的必然之举。

六、结论

静密封垫片是设备中的小元件，却对炼化装置的安全、稳定、环保及长周期运行起着至关重要的作用。本厂以程序化工作推进精细化管理，针对高温高压、强腐蚀等不同工况，将波齿复合垫片与金属缠绕垫片搭配使用。波齿复合垫片靠独特波齿结构分散压力，金属缠绕垫片以良好弹性和耐腐蚀性适应苛刻条件，二者协同显著降低了静密封泄漏率。全生命周期成本理念成为炼化企业可持续发展的“助推器”，让企业重视静密封垫片，从选型、使用到维护的全流程管理，不再仅关注初始采购成本，而是综合考量垫片全生命周期性能、维护及泄漏损失等因素。此外，我们密切跟踪行业动态，积极探索高性能、环保化静密封垫片，以契合炼化企业对密封性能的高要求，助力行业绿色转型与高质量发展。^[3]

参考文献

- [1] 鲁立,胡梦佳,蔡志鹏,李克俭,吴瑶,潘际銮.核级管端法兰面在线堆焊修复的残余应力 [J].清华大学学报(自然科学版),2020(01).
- [2] 徐红彦,苗奎,舒晓君.浅谈装配中螺纹联接扭矩分析 [J].新技术新工艺,2021(01).
- [3] 蔡暖姝,闻克勤.非石棉密封垫片及其在石油化工工程中的应用 [J].化工设备与管道,2007(04).