

管道法兰使用橡胶垫片密封时紧固力矩的选取和限制

李强

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ETQM.2025080008

摘 要 : 本文系统研究管道法兰橡胶垫片密封的紧固力矩选取规范与限制条件。分析表明, 法兰密封面配合形式与橡胶材质特性构成力矩选择基础。接触宽度直接影响密封比压分布, 需满足 ASME B16.20、GB/T 9126-2008 等标准规定的 3-6mm 下限要求。紧固力矩设计需综合系统压力、垫片压缩回弹特性和螺栓规格, 设定预紧力下限时应兼顾初始密封比压与温度应力衰减补偿。研究强调需控制垫片最大承载应力, 平衡材料特性与密封可靠性, 通过标准化力矩参数优化实现密封系统的长效稳定运行。

关 键 词 : 管道法兰; 橡胶垫片; 应力限值; 垫片最小接触宽度

Selection and Limitation of Tightening Torque when Rubber Gasket is Used for Sealing Pipeline Flange

Li Qiang

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : This paper systematically examines the selection criteria and limitations for the tightening torque of rubber gasket seals in pipeline flanges. The analysis reveals that the form of the flange sealing surface and the characteristics of the rubber material form the basis for torque selection. The contact width directly influences the distribution of the sealing pressure ratio, which must meet the minimum requirement of 3-6mm as specified by standards such as ASME B16.20 and GB/T 9126-2008. The design of the tightening torque should consider the system pressure, the compression rebound characteristics of the gasket, and the bolt specifications. When setting the lower limit of the pre-tightening force, it is essential to balance the initial sealing pressure ratio with the compensation for temperature stress decay. The study emphasizes the need to control the maximum bearing stress of the gasket, balancing material properties with sealing reliability, and achieving long-term stable operation of the sealing system through the optimization of standardized torque parameters.

Keywords : pipe flange; rubber gasket; stress limit; minimum contact width of gasket

引言

法兰密封性能受配合形式、材料特性及接触宽度等因素制约。橡胶垫片与密封面的配合形式决定应力分布特征, 不同材质橡胶的压缩回弹特性直接影响密封可靠性。接触宽度规范确保有效密封带形成, 标准限值综合材料性能与工况参数。有关资料统计表明, 管道密封失效多发生在法兰连接处, 导致法兰密封失效的主要原因是密封垫片受力不均匀和不当的螺栓预紧力。通过分析法兰连接螺栓预紧力与法兰金属密封圈压紧状态的力学关系, 找到控制的标准和限制的条件, 以提高橡胶密封的可靠性提升使用能效, 避免过载或松弛导致的法兰密封失效。

一、基本信息介绍

(一) 橡胶垫片与法兰密封面配合形式

在管道法兰密封系统中, 橡胶垫片与法兰密封面的配合形式直接影响密封性能和使用寿命。橡胶垫片通常采用平面型、突面型和凹凸型三种主要配合形式。不同配合形式适用于不同的工况

要求, 对垫片的压缩率和回弹性能要求各异。平面型要求垫片具有较好的压缩性, 而凹凸型更注重垫片的回弹保持能力。在实际应用中, 密封面粗糙度、平整度以及垫片硬度等因素均会影响接触应力分布, 进而影响密封效果。合理的配合形式选择需综合考虑系统压力、介质特性、温度范围等参数, 确保在满足密封要求的同时避免因过载导致垫片失效^[1]。

作者简介: 李强 (1989.02-), 汉族, 湖北咸宁人, 本科, 工程师, 研究方向: 静止机械密封。

（二）常用橡胶垫片及其特性介绍

在管道法兰密封系统中，橡胶垫片的选择直接影响密封性能和系统可靠性。工程实践中常用的橡胶垫片主要包括丁腈橡胶、氟橡胶、硅橡胶和乙丙橡胶等类型。丁腈橡胶垫片具有优异的耐油性和耐磨性，适用于石油类介质，工作温度范围通常在-30℃至100℃之间。氟橡胶垫片展现出卓越的耐高温和耐化学腐蚀特性，可在-20℃至200℃环境下保持稳定性能，特别适用于强酸强碱介质。硅橡胶垫片具有良好的耐热性和弹性恢复能力，适用于食品和医药行业，温度适应范围可达-60℃至230℃。乙丙橡胶垫片则以其出色的耐候性和耐臭氧性能见长，常用于户外或存在氧化性介质的工况环境。各类橡胶垫片的硬度、压缩率和回弹率等参数存在显著差异，直接影响其在法兰密封中的应力分布和密封效果。在实际应用中，需根据介质特性、温度条件和压力等级等因素综合考虑，选择具有适当物理性能和化学稳定性的垫片材料，以确保密封系统的长期可靠运行。不同材质的橡胶垫片对紧固力矩的敏感程度各异，这也是力矩选取时需要考虑的关键因素之一^[2]。

（三）橡胶垫片接触宽度对密封性的影响

橡胶垫片的接触宽度是影响法兰密封性能的关键参数之一。接触宽度直接影响垫片与法兰密封面的接触应力分布和密封比压。当接触宽度过小时，单位面积承受的压紧力增大，可能导致垫片材料过度压缩甚至发生塑性变形，降低回弹性能；同时过窄的接触面难以有效覆盖法兰表面的微观缺陷，增加泄漏风险。反之，过大的接触宽度会分散螺栓预紧力，导致密封比压不足，同样影响密封效果。接触宽度与垫片材料的弹性模量、硬度等特性密切相关，不同材质的橡胶垫片存在最佳接触宽度范围。在实际应用中，接触宽度需与法兰结构尺寸、螺栓数量及分布相匹配，确保形成均匀连续的密封带。此外，温度变化引起的热膨胀差异也会改变接触宽度与密封性能的关系，在高温工况下需考虑材料热膨胀系数的影响。合理的接触宽度设计应兼顾密封可靠性和垫片使用寿命，避免因局部应力集中导致的早期失效^[3]。

（四）相关标准对垫片最小接触宽度的规定

行业标准对橡胶垫片最小接触宽度的规定主要基于密封性能要求和材料特性。ASME B16.20标准规定，对于非金属平垫片，最小接触宽度不应小于3mm；GB/T 9126-2008《管法兰用非金属平垫片》则要求橡胶垫片的最小接触宽度根据法兰规格和压力等级确定，通常在3-6mm范围内。HG/T 20606-2017《钢管管法兰用非金属平垫片》针对不同公称直径的法兰，规定了相应的最小接触宽度要求，DN50以下法兰不小于3mm，DN50-DN300法兰不小于5mm，更大尺寸法兰则需达到6mm以上。这些标准规定考虑了垫片材料的压缩回弹性能、法兰表面粗糙度以及系统工作压力等因素，确保在各种工况下都能形成有效的密封带。标准还要求垫片接触宽度应均匀连续，不得存在局部过窄区域，以保证应力分布的均匀性。对于特殊介质或极端工况，标准允许根

据实际情况适当增大最小接触宽度要求，但不得低于规定的基本值^[4]。

二、使用橡胶垫片进行力矩紧固的存在的问题和解决方案

（一）紧固力矩表设计

紧固力矩表的设计需基于系统压力等级、垫片材料特性、法兰规格尺寸等关键参数。首先应根据法兰公称直径和压力等级确定基础力矩范围，通常随着法兰尺寸增大和压力等级提高，所需紧固力矩相应增加。其次需考虑橡胶垫片的材质特性，不同橡胶材料的压缩模量和回弹性能差异显著，如氟橡胶需要比丁腈橡胶更高的初始预紧力。螺栓规格也是重要影响因素，M16螺栓的推荐力矩值通常比M12螺栓高出40%-60%。环境温度变化会导致橡胶材料性能改变，高温工况下的力矩补偿系数通常为常温条件下的0.8-1.2倍。力矩表还应规定紧固顺序，一般采用十字交叉对称拧紧方式，分2-3个阶段逐步达到目标力矩值。对于重要场合，建议在力矩表中注明允许的力矩偏差范围，通常控制在标称值的±15%以内。设计完成的力矩表需通过压力测试验证，确保在规定的紧固力矩下既能形成有效密封，又不会造成垫片过度压缩或螺栓过载^[5]。

（二）橡胶垫片最大承载应力限制

橡胶垫片的最大承载应力限制是法兰密封系统设计中的关键参数，其取值直接影响密封性能和垫片使用寿命。橡胶材料的最大允许应力取决于其材质类型、硬度等级和工作温度等因素。对于常用的丁腈橡胶垫片，其最大承载应力通常控制在15-25MPa范围内，而氟橡胶由于具有更好的机械性能，最大承载应力可达30-40MPa。该限制值的确定需要考虑垫片的压缩永久变形特性，过高的应力会导致橡胶分子链断裂，产生不可恢复的塑性变形。在实际应用中，最大承载应力还需考虑长期服役条件下的应力松弛现象，通常取初始预紧应力的1.2-1.5倍作为安全裕度。温度、工作介质均对橡胶材料的应力限制有显著影响。同时在系统设计时，应确保螺栓预紧力转换到垫片上的实际应力不超过材料允许值，同时满足形成初始密封所需的最小比压要求。对于动态工况或压力波动较大的系统，还需考虑交变载荷导致的疲劳效应，进一步降低最大允许应力值。通过合理控制垫片承载应力，既能保证密封效果，又能避免垫片过早失效或螺栓过载^[6]。

（三）螺栓预紧力矩下限

在管道法兰采用橡胶垫片密封的系统中，螺栓预紧力矩下限的确定涉及多个关键因素。首先需要考虑橡胶垫片形成初始密封所需的最小比压要求，不同类型橡胶材料的这一参数存在显著差异。对于常用的丁腈橡胶垫片，形成有效密封的最小比压通常为3-5MPa，而氟橡胶垫片则需要5-8MPa的最小比压。这一参数直接影响预紧力矩下限的计算基准。螺栓预紧力矩下限还需考虑系统工作压力引起的轴向分离力。根据帕斯卡原理，系统内压会在法兰结合面产生与压力成正比的分离力，预紧力矩必须能够克服这一分离力并保持足够的残余压紧力。通常要求残余压紧力不低于工作压力产生分离力的1.5-2倍，以确保在各种工况下都能维持密封效果。

温度变化对预紧力矩下限有重要影响。橡胶材料的弹性模量

随温度升高而降低,在高温工况下需要更大的初始预紧力来补偿这一变化。同时还需考虑热膨胀差异导致的附加应力,特别是当法兰与螺栓材料不同时。对于温度波动较大的系统,预紧力矩下限应适当提高以应对热循环导致的应力松弛。长期服役条件下的应力松弛现象是确定预紧力矩下限时不可忽视的因素。橡胶材料在持续压缩状态下会发生应力衰减,初始预紧力需考虑这一衰减量。通常建议初始预紧力比理论计算值提高20%–30%,以补偿服役期间的应力松弛。对于重要场合,还应定期检查并重新紧固,以维持足够的密封压力。螺栓预紧力矩下限的计算还需考虑法兰刚度和垫片压缩特性的匹配关系。过低的预紧力矩会导致垫片压缩不足,无法形成连续的密封带;过高的预紧力矩则可能引起垫片过度压缩甚至损坏。合理的预紧力矩下限应在确保初始密封的前提下,为后续可能需要的补充紧固预留适当空间^[7]。

ASME PCC—1—2013标准给出法兰螺栓安装的应力下限值,一般为螺栓室温屈服强度的20%–30%。限制螺栓安装的最低应力是为了避免因安装螺栓载荷计算的不精确而导致安装螺栓应力过低,从而降低法兰接头的密封性。同时也要考虑该力矩可能导致橡胶垫的过压缩甚至压溃失效风险。其中较窄的垫片密封面接触宽度表现尤为突出^[8]。

(四) 垫片最小接触宽度确认

垫片最小接触宽度的确认是管道法兰橡胶垫片密封系统设计的重要环节。该参数的确定需基于密封介质的特性、系统工作压力以及橡胶材料的力学性能等多方面因素。对于液体介质密封,最小接触宽度通常要求较气体介质更宽,以补偿可能的渗透现象。在高压工况下,接触宽度需相应增加以分散密封应力,通常压力每提高1MPa,最小接触宽度需增加0.5–1mm。橡胶材料的压缩回弹性能直接影响接触宽度要求,高弹性材料如硅橡胶可适当减小接触宽度,而硬度较高的材料如氟橡胶则需要更大的接触宽度以确保密封效果。法兰表面粗糙度对最小接触宽度有显著影响。粗糙度过大会导致实际接触面积减小,需通过增加名义接触宽度进行补偿。通常Ra值每增加0.8 μm ,最小接触宽度应相应增加10%–15%。温度变化引起的热膨胀差异也需要考虑,特别是当法兰与管道材料不同时,需预留足够的接触宽度余量。对于直径较大的法兰,还需考虑法兰翘曲变形的影响,通常在法兰外缘部位需要比内缘更大的接触宽度^[9]。

相关标准对垫片最小接触宽度有明确规定,如ASME B16.20要求橡胶垫片的最小接触宽度不得小于3mm,对于高压场合则需达到5mm以上。实际应用中还需考虑安装误差和长期服役后的应

力松弛影响,通常在设计值基础上增加20%–30%的安全余量。通过计算流体压力产生的分离力与垫片接触面积的关系,可以验证所选取的最小接触宽度是否满足密封要求。合理的接触宽度应确保在最大工作压力下,垫片接触应力仍能维持在不低于材料规定的最小密封比压^[10]。

三、典型案例分析

某电厂蒸汽管道法兰连接处,施工方为追求密封效果,将紧固力矩提高至标准值的150%。过大的压缩力导致氟橡胶垫片产生永久变形,失去弹性恢复能力。在随后的热循环过程中,由于垫片无法补偿法兰的热位移,最终在运行三个月后发生密封失效。检测发现垫片压缩量超过允许值的40%,材料内部出现明显裂纹。某化工厂的酸性介质输送管道中,操作人员忽视了橡胶垫片最小接触宽度的要求,选用了过窄的垫片。在标准力矩紧固后,虽然短期密封效果良好,但由于接触面积不足,垫片局部应力过高。长期运行后,垫片出现应力松弛和化学腐蚀的双重作用,导致密封性能逐步劣化,最终发生突发性泄漏^[11]。

在海洋平台的海水管线系统中,由于未考虑海水温度变化对橡胶材料性能的影响,设计的紧固力矩未留足够余量。冬季低温导致垫片硬度增加,弹性下降,原有的预紧力无法维持有效密封,出现季节性泄漏现象。该案例说明环境温度变化对紧固力矩的选取具有重要影响。

四、结论

综上所述,研究表明,管道法兰橡胶垫片密封系统需综合考量密封面配合形式、材料特性及接触宽度规范。平面型、凹凸型等密封面适配不同压力与工况,丁腈、氟橡胶等材质需匹配介质温度及化学特性。接触宽度须满足ASME B16.20、GB/T9126–2008标准规定的最小3–6mm要求,确保应力均匀分布。紧固力矩设计应结合法兰规格、系统压力与垫片压缩回弹特性,控制最大承载应力(丁腈15–25MPa,氟橡胶30–40MPa),并设定不低于分离力1.5–2倍的预紧力矩下限。实践表明,标准化力矩参数与严格应力限制可平衡密封可靠性与材料耐久性,避免过载或松弛导致的失效。

参考文献

- [1] 李华,王刚.法兰连接密封机理及橡胶垫片选型研究[J].压力容器技术,2023,40(3):45–50.
- [2] 张伟,陈明.橡胶垫片压缩回弹特性对法兰密封性能的影响[J].机械工程学报,2024,60(2):112–118.
- [3] 刘强,赵磊.基于ASME标准的法兰密封接触宽度优化设计[J].化工设备与管道,2023,62(1):34–39.
- [4] 国家标准GB/T9126–2008.管法兰用非金属平垫片[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [5] 孙立,黄斌.高温高压法兰密封系统的螺栓紧固力矩研究[J].核动力工程,2023,44(4):89–94.
- [6] 杨帆,郭振宇.橡胶垫片承载应力与密封失效关联性分析[J].润滑与密封,2023,48(5):123–128.
- [7] 行业标准HG/T20606–2017.钢制管法兰用非金属平垫片[S].北京:化学工业出版社,2022.
- [8] ASME 美国机械工程师协会标准.ASME PCC—1—2013《压力边界螺栓法兰连接安装指南》.美国机械工程师协会,2013.
- [9] 周晓东,李建国.动态工况下法兰密封力矩优化策略[J].流体机械,2024,52(3):76–81.
- [10] 黄伟,张明.法兰螺栓紧固力矩的优化计算方法[J].石油化工设备,2024,53(1):56–61.
- [11] 李明,吴昊.橡胶垫片密封性能的多因素耦合分析[J].工程力学,2024,42(2):201–208.