垫片密封机理及其影响因素

广州市东山南方密封件公司　吴树济 高级工程师

在流体静密封领域中,通常将密封分为流体静密封和流体动密封二大类。通过垫片密封件使法兰联接处获得密封的被称为流体静密封。在法兰联接中,除非使用不可拆卸的方法,(例如将密封元件与法兰进行密封焊接),否则所有联接严格来说都会产生或多或少泄漏而无法达到绝对密封。因此,现代密封技术在评价设备联接的密封性能时往往引入泄漏量这一指标。即联接的密封性能达到哪一个数量级的泄漏率,所谓密封是指它的泄漏率是 1×10-1ml/s 还是 1×10-6ml/s 的问题,而不是漏还是不漏的问题。因此,也可以说密封是一个相对的概念。在垫片密封件的产品标准中,要求垫片进行性能试验时,往往规定其泄漏量指标。我们在研究流体静密封时实际上是研究流体的泄漏过程通过泄漏过程的研究,找出影响泄漏过程的因素,也就找到提高法兰联接密封性方法。

一. 静密封的机理概述

在法兰联接中,流体通过联接处的泄漏途径有两条，一是流体通过密封垫片与法兰表面之间的通道泄漏(即介面泄漏)，二是流体穿过密封垫片本身的渗漏。后者主要发生在垫片材料本身使用非致密性材料如纤维状或多孔材料时才会出现,在法兰联接中是更常见的是垫片元件与法兰之间的泄漏。

关于垫片的密封机理的描述,可以粗略地认为,垫片材料在法兰的压紧力下发生变形,填补了法兰表面的微观不平度,从而堵塞了流体的流通最终形成密封不漏的过程。但实际上进一步研究表明流体的泄漏过程的表述比这复杂得多。不同学者从不同的角度以数学公式来描述泄漏量与影响泄漏因子的函数关系。

米勒和纳乌认为,有关垫片密封件的泄漏过程因垫片的工作状况不同而涉及三种不同机理。

a. 连续流(泊肃叶流)机理

在垫片的工作载荷较低的情况下,其泄漏过程为连续流(泊肃叶流)状态,连续流的流量公式为:

$$Q_{m1}=G\cdot\{\frac{\rho}{\eta}\}\cdot\Delta p$$

G 为表征流道几何形状的几何参数,

在规则流道时可表征为长度、宽度、高度。但实际上,垫片与法兰表面接触处所形成的微观流道不可能为简单的规则流道。它既曲折又多变,其长度和横截面是变化的。同此,表征几何参数的 G 值实际上难以确定。{p/n}为表征被密封流体的特性,p 为密度,n 为粘度。△为法兰联接的压力差

从以上公式可知,泄漏量与表征几何参数的 G 值和法兰联接的压差△p 成正比,也与表征流体特性的密度成正比,而与流体的粘度成反比。

b. 努森流(自由分子流)机理

在进一步增加垫片的工作载荷时,流体泄漏通道的尺寸减小,直至连续流不再可能存在。在被减小的通道的尺寸下其泄漏过程只能为努森流(自由分子流)状态。努森流的流量公式为:

$$Q_{m2}=G_1\cdot\sqrt{\left\{\frac{Mw}{RT}\right\}}\cdot\Delta p$$

G1 为表征流道几何形状的参数。
M 为分子重量,T 为绝对温度。

c. 扩散机理

当进一步压紧垫片,使泄漏的通道大约为流体分子大小时,流体在通道里的泄漏成为扩散过程,其流量公式表达为:

$$Qm3=G2 \cdot D(T) \cdot \triangle p$$

G2 为表征流道几何形状的参数。

D(T)为扩散系数,它取决于流体的类型和垫片材料,而且还取决于温度。泄漏流被流体浓度差驱动并受扩散系数而不是粘度的控制，一般而言,垫片的泄漏率可以表达为:

$$Qm=Qm1+Qm2+Qm3$$

虽然在垫片的泄漏过程中会包含上述几种机理,但通常,当垫片的工作状态和运行工况确定后,其泄漏过程往往以其中一种为主。

二. 影响垫片的密封性能的因素

尽管如前所述，人们已从理论上提出了流体静密封的密封机理,但试图利用在这些机理中提出的公式来定量地计算垫片的泄漏率,以确定其密封性几乎不可能。因为所有泄漏量的表达式中,作为表示泄漏通道的几何形状的参数 G1,G2,G3 的定量值无法确定。但是,我们仍然可以利用上述的三种泄漏机理及其泄漏量表达式来分析研究法兰联接中与联接相关的各种因素对密封性能的影响。

1. 垫片应力

垫片应力是指法兰联接中法兰通过螺栓拉力对垫片形成的压应力，垫片应力的大小直接影响到泄漏率表达式中的泄漏通道的几何形状及其大小，即表征泄漏通道的几何参数 G1,G2,G3。如前所述，在低应力下,泄漏通道的尺寸较大(约为 1μm 级)，泄漏将主要以连续流的状态进行。这时的泄漏量也比较大。加大螺栓拉紧力后，垫片受到较大的压缩，泄漏通道的尺寸变小，(达到分子平均自由路径的数量级约为 0.1μm 级)，主要的泄漏将服从自由分子流的状态。这时的泄漏量将大为减少。再进一步加大螺栓的拉紧力，垫片在极高应力作用下，泄漏通道尺寸极小(约为流体分子大小,达到纳米级)无法形成介质流，仅以扩散方式向外泄漏，从而使联接达到相当高的密封性。由此可知，通过对垫片施加足够的应力以使密封部位的泄漏通道尺寸变小是联接达到所要求的密封性能的必要条件。

2. 垫片材料

垫片材料对密封性的影响表现在二个方面;

（1）垫片材料本身的物理机械特性，包括材料的致密性，强度和变形能力，压缩-回弹性，松弛性能等。材料本身致密性不高的，其内部已存在泄漏的通道，容易产生渗漏。这些材料包括那些带纤维状的垫片材料如石棉或其他纤维构成的复合板材或填充纤维的塑料材料等，在介质压力较高时都容易发生流体从垫片本身透漏出来的现象(俗称“冒汗”)。对介面泄漏，强度高，变形能力小的垫片材料(如金属材料)需要更大的螺栓拉力才能使介面的泄漏流道变小，因而使联接达到预期的密封性能变得较为困难。要使联接易于获得好的密封性，选择强度低，变形能力大的材料会更好些。

材料的压缩-回弹性能和松弛性能等对泄漏的影响主要表现在它在垫片使用过程中对垫片应力的改变上。压缩回弹性能好，松弛率小的材料在垫片使用过程中更能保持垫片的原有

广州市东山南方密封件公司

应力状态，从而不使原有的泄漏通道变大,以保持垫片原有的密封性。

由此可知，在通常的垫片材料中很容易比较出以橡胶板或金属板作垫片时它们谁更容易达到令人满意的密封性效果。橡胶材料和金属材料都具有很好的致密性，因而通过材料内部的泄漏都不大会发生。但对介面泄漏而言，橡胶材料具有较低的强度，较大的变形能力，几乎完全的压缩回弹性，极小的松弛率，因而具有非常优秀的密封性能。而金属材料强度高，变形能力小，极小的压缩回弹性使它的密封性远不如橡胶材料。

用柔性石墨材料制作的垫片，经压缩后致密性也非常高，一般不会发生流体穿过密封材料的泄漏。由于它的变形能力很大，贴合性极好，在很小应力下会发生很大的变形而堵塞法兰表面的微观泄漏通道而达到良好的密封。

（2）材料的化学特性。垫片材料的化学特性主要是指它与被密封流体的相容性或垫片材料对流体的抵抗能力。在垫片材料无法抵抗流体侵蚀的情况下，材料本身的结构及物理机械性能的变化当然相应地改变了垫片的原有状态，垫片的密封功能自然也随之受到破坏。由于材料本身的松弛特性或在流体作用下垫片材料的特性随时间而发生改变，法兰联接的密封性也会随之而变，这就是我们通常所说的垫片密封寿命。

3. 运行工况

法兰联接的运行工况是指法兰垫片使用时的操作条件，包括被密封流体的压力、温度及流体的特性。

（1）流体压力

流体压力是法兰联接产生泄漏的动力。流体压力对联接密封的影响表现在二个方面，一方面是从前面所述的流体静密封的三种机理的泄漏量表达式中可以看到，垫片的泄漏量直接与流体的压力(△p)成正比关系。另一方面，流体压力的影响还表现在它在垫片使用过程中对垫片应力的改变上。由于流体压力的存在总是使法兰产生分离的作用力，这种作用力与法兰对垫片的压紧力是相反的，也就是说它抵消了螺栓力对垫片的作用，使垫片应力被减少。因此,流体压力越大，垫片应力的减少越显著，泄漏量也就是随之变大。

（2）流体温度

流体温度对联接密封的影响同样表现在二个方面。一方面是我们可以从前述的三种密封机理的泄漏量表达式看到，泄漏量与温度的直接关系是流体的某些特性(如粘度η,密度ρ、扩散系数 D(T)等与温度相关。因此，联接的密封性直接受流体的温度影响。

另一方面，流体温度对密封性的影响又表现在温度对垫片材料的直接破坏。例如，在高温下垫片材料的物理机械性能诸如变形能力，强度，压縮-回弹性能及蠕变松弛等材料性能会发生变化，甚至分解、熔化等，这就是我们通常所指垫片材料“抗温能力”或者“耐温能力。

（3）流体特性

流体特性对联接密封的影响也有二个方面。一方面是流体本身的物理性能的影响。正如三种密封机理中泄漏量的表达式中所表示的流体密度 p,粘度η、扩散系数 D(T)等特性都直接与泄漏量相关。另一方面是流体的某些特性对垫片材料的侵蚀作用等直接导致材料的损坏，这就是我们通常所指的垫片材料“抗蚀能力”。

（4）运行工况的变化

法兰联接机构系由拉力螺栓、法兰及垫片等构件共同组成的静不定结构，因此各构件间的应力一应变关系是互相制约的。任何构件的应力应变发生变化都会引起其他构件的应力应变相应变化。在运行工况中，其工况条件如温度、压力甚至环境都有可能发生变化。例如实际操作中由于工艺的需要，温度和压力的变化是常有的事，而周围环境的变化如气温的骤冷骤热或甚至一场暴雨都会使法兰联接的温度分布发生变化（特别是在法兰联接部位未经保温的情况下）。所有这些变化都会使联接中的拉力螺栓与被压件（包括法兰盘、垫片等）之间

广州市东山阁石密封件公司

的应力一变形协调发生变化而引起垫片应力发生变化，从而影响到联接的密封性。

通常情况下，流体压力的突然升高一方面如前面泄漏公式所示增加了流体泄漏的动力，而另一方面会使垫片应力下降，这些都会最终导致泄漏增加。尤其是流体温度的突然下降，这时法兰的温度下降较之螺栓更快，法兰的收缩较之螺栓更大，两者的差异就造成了法兰联接发生松弛，垫片应力下降而使泄漏增加。

4. 法兰联接的结构

包括法兰联接的各构件的结构及尺寸也同样影响到联接的密封性。这包括:

（1）垫片的结构型式

显然，不同的垫片形式或者即使垫片材料相同但垫片结构不同，同样影响到联接的密封性。例如金属平垫和金属环垫，虽然两种都是金属材料构成，但显然其密封性有很大差异。而同样由金属和膨胀石墨构成的波齿复合垫、缠绕式垫片以及高强石墨垫，其密封性能也各不相同。因而根据使用要求选择合适的垫片型式以获得令人满意的密封效果显得尤为重要。

（2）垫片尺寸

垫片尺寸包括垫片的厚度及宽度，其大小直接影响到垫片的泄漏通径的多少和长短，也就是在三种密封机理中泄漏量表达式中表示流道几何参数 G1,G2,G3 的大小。一方面厚度较小和宽度较大的垫片其泄漏通道比垫片厚度大和宽度较窄的垫片少而长，因此泄漏量自然会少些。但另方面较厚的垫片有更好的压缩-回弹性能，它对法兰表面的不平度以及温度、压力的变化有更大的补偿能力，从而具有较好密封性。理论上较窄的垫片虽然因通径较短而容易泄漏，但窄的垫片承压面小，更容易获得高的垫片应力而使泄漏通道的尺寸大为减少，反而大大提高了垫片的密封性能。

（3）法兰联接的刚性

法兰联接的刚性对密封性的影响主要表现在垫片装配后进入操作状态时，由于流体压力的升高而使垫片应力发生变化上。根据法兰联接的变形协调关系可知，垫片应力会随内压的升高而降低。在内压一定时其降低值与联接件（螺栓）和被联接零件（法兰的垫片）的刚性和初始安装应力有关。在初始安装应力一定时，在螺栓的刚性大，而被联接件（尤其是垫片）的刚性小，垫片应力的降低值较小，因而能保持较好的密封性。螺栓的刚性与其长径比相关，短而粗的螺栓有较大的刚性。垫片的刚性取决于垫片的回弹特性。垫片的回弹量越大，刚性越小，垫片应力的降低值越小，垫片的密封性就越好。

（4）法兰及密封元件的表面状况

法兰及密封元件的表面状况包括法兰及垫片密封部位的宏观不平度及微观粗糙度。宏观不平度对密封的影响是显而易见的，要求一个在宏观上其加工表面凹凸不平的联接装置具有良好的密封性是很困难的，除非所选用的垫片材料（如橡胶类材料）具有极好的压缩-回弹特性，其压缩量足以弥补法兰表面的所有凹凸不平部位。反映微观状态的表面粗糙度对密封的影响主要体现在上述三种密封机理中三个表征几何参数的 G1,G2,G3 上。粗糙度越小，微观泄漏的通道也越小，泄漏的阻力越大，密封性越高，这尤其是在采用变形能力小的垫片（如金属垫片）时,粗糙度的影响是明显的。

广州市东山密封件公司