# 垫片密封技术、特性及其选用

广州市东山南方密封件公司

广州市东山南方密封件有限公司

（ 吴树济　 吴凯珺　编）

(版权所有，请勿翻印)

# 密封技术交流内容

## 一．垫片密封理论概述

（一）垫片泄漏机理

（二）影响垫片泄漏的因素

## 二．近些年来垫片密封技术的发展

（一）新材料

（二）新结构

（三）新设计理念

## 三．主要垫片产品的结构性能特点及适用范围

（一）石棉橡胶板

（二）非石棉橡胶板

（三）铁包垫

（四）聚四氟乙烯平垫和聚四氟乙烯包覆垫

（五）金属平垫

（六）金属环垫

（七）石墨复合垫

（八）缠绕式垫片

（九）柔性石墨金属波齿复合垫片（波齿复合垫）

（十）双金属自密封波齿复合垫片

## 四．垫片的选用

（一）法兰连接对垫片的要求

（二）用户选用垫片的准则

（三）垫片选用的一般推荐和建议

（四）确保法兰连接密封的必要条件

（五）垫片选用的一般程序

## 五．容器和换热器等大型设备法兰连接的密封特性和垫片选用

（一）大型设备法兰连接及其密封特性

（二）解决大尺寸法兰连接密封的途径

（三）大直径法兰垫片的选用建议

（四）特殊使用工况场合下大直径法兰密封问题及其解决方案

广州市东山南方密封件公司

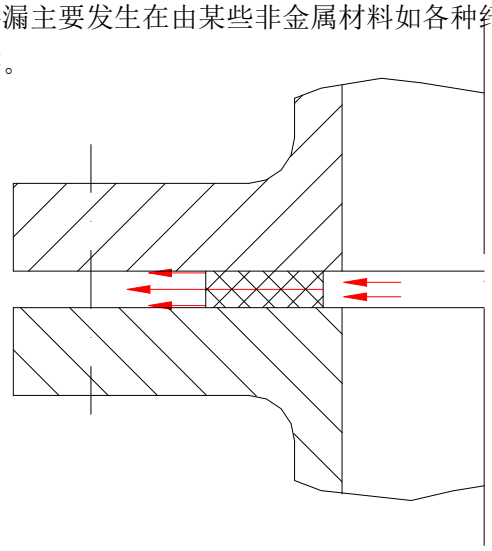
# 一. 垫片密封理论概述

## （一）垫片泄漏的机理

### 1. 垫片泄漏的途径

（1）通过垫片材料内部的渗漏

这种渗漏主要发生在由某些非金属材料如各种纤维构成的垫片上，如石棉橡胶板和非石棉橡胶板等。



（2）通过垫片与法兰接触面的泄漏（界面泄漏）

界面泄漏是法兰联接垫片的主要泄漏形式。

### 2. 垫片密封机理

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，一方面减少了垫片材料内部的空隙（如果有的话），另一方面填补了法兰表面的宏观不平度和微观粗糙度，从而减小或堵塞了流体的流通最终形成密封不漏的过程。但进一步研究表明，实际上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。

根据米勒和纳乌提出的垫片泄漏过程涉及三种不同机理：

（1）连续流（泊肃叶流）机理

泄漏量的表达式　　$Q_{m1}=G\cdot\{\frac{\rho}{\eta}\}\cdot\Delta p$

G－表征流道几何形状的几何参数

$\{\frac{\rho}{\eta}\}$－表征被密封流体的特性，ρ为密度，η为粘度

Δp－法兰联接的压力差

（2）努森流（自由分子流）机理

泄漏量的表达式　　$Q_{m2}=G'\cdot\sqrt{\left\{\frac{Mw}{RT}\right\}}.\Delta p$

广州市泰山南方密封件公司

$G'$ —表征流道几何形状的参数

$M_W$—分子重量

T-绝对温度

（3）扩散机理

泄漏量的表达式　　$Q_{m3}=G'' \cdot D(T) \cdot \Delta p$

$G''$ —表征流道几何形状的参数

D(T)—扩散系数（取决于流体特性，垫片材料，温度等）

一般而言，垫片的泄漏率可以表达为：

$$Q_m=Q_{m1}+Q_{m2}+Q_{m3}$$

虽然在垫片的泄漏过程中会包含上述几种机理，但通常，当垫片材料、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） 影响垫片泄漏的因素

根据上述密封机理可对影响垫片泄漏的各种因素进行分析，了解影响法兰连接密封性的原因，以便更好地解决法兰泄漏问题而达到密封的要求。

**1. 垫片应力**

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：

（1）在低应力下：泄漏通道的尺寸较大（如约为 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。

（2）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，（如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。

（3）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（如约为流体分子大小，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（防渗透性），强度和变形能力，压缩-回弹特性，松弛性能等。

（2）材料的物理、化学特性，包括与介质温度的适应性（耐温性），与介质的化学适应性（耐蚀相容性）等。

**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

广州市东山南方密封件公司

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（Δp）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。在垫片安装力不变的情况下，流体压力越大形成的法兰轴向分离力越大，垫片的剩余应力就越小。

（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性能的改变甚至直接破坏。

（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ρ，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

除了如上所述，温度、压力等运行工况的变化固然会直接影响到联接的密封性外，还由于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，一旦工况发生变化将引起将垫片应力发生改变，从而影响到联接的密封性。

**4. 法兰联接的构件**

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，其密封性能也不同，这自然会直接影响到联接的密封性。

（2） 垫片尺寸：（包括垫片的厚度及宽度）

垫片厚度及宽度的大小从两方面影响到垫片的密封性能：

一方面垫片厚度和宽度决定了泄漏通道的多少和长短，。

另一方面垫片的厚度和宽窄又分别与垫片的压缩回弹性能和垫片应力等相关联。因而同样影响到垫片的密封性能。

（3）法兰联接的刚性

法兰联接中各元件的刚性，特别是联接螺栓和垫片的刚性对联接的密封性影响主要表现在操作状态下对垫片应力的改变上。

（4）法兰及密封元件的表面状况（如宏观不平度，微观粗糙度等）

① 法兰及垫片密封部位的宏观不平度影响到垫片受到压缩时垫片应力的均匀性，在存

广州市东山南方密封件公司

在宏观不平度的情况下，垫片各处受压应力是不均匀的，某些部位的应力较高而另外部位的应力较低，当宏观不平度较大时，较低应力的部位可能因应力过低而无法密封。

② 法兰及垫片密封部位的微观粗糙度对密封的影响是显而易见的，粗糙的表面加大了垫片材料填塞界面微观间隙的难度，从而影响法兰联接的密封。

## 二．近些年来垫片密封技术的发展

### （一）新材料

**1. 柔性石墨板**

这是上世纪 60 年代出现的综合性能最为优秀的密封材料，具有密封贴合性好，耐温性能好，耐腐蚀性能极其优秀等一系列优异性能，它的出现是静密封材料的一次革命。

过去普通的柔性石墨在氧化性介质中的最高使用温度应不高于 450℃，但近些年又有发展，研制出抗氧化性高温柔性石墨，其最高使用温度可达 650℃。

**2. 非石棉橡胶板（无石棉橡胶板）**

这是以无机或有机纤维替代石棉纤维与橡胶等材料混炼生产的是一种符合环保要求的通用密封新材料，是使用参数不高场合下作为普通石棉橡胶板的代用品。

**3. 新型无机耐高温材料**

近些年又引入新的诸如云母板、蛭石板无机材料作为耐更高温度的密封材料， 云母板的最高使用温度达 850℃，而蛭石板的最高使用温度可达 1200℃。这些材料既可单独使用，也可作为填充材料用于其他结构型式的垫片上，如作为缠绕式垫片的填充材料，波齿复合垫片的复合材料等。

### （二）新结构

**1. 柔性石墨金属复合板**

随着柔性石墨新材料的出现，由金属薄板作为骨架，与柔性石墨复合而成。是一种为解决柔性石墨材料因强度不高而无法单独使用而出现的垫片材料。

**2. 柔性石墨金属波齿复合垫片**

这是我公司 90 年代初研制开发的专利产品。由特殊设计的波齿状金属骨架与柔性石墨复合而成。它与以往其他垫片相比具有一系列更为优异性能因而在石油化工装置上，特别是在容器、换热器等大尺寸法兰上获得广泛应用和好评。该垫片已制订了国标。

**3. 双金属自密封波齿复合垫片**

这是我公司 90 年代末、2000 年代初研制开发的又一项专利技术产品。该产品改变了垫片传统的“强制密封”设计原理，采用新的“压力自密封”原理进行设计，从而成为最新一代高性能密封垫片。

### （三）新设计理念

**1. 传统的“强制密封”设计理念**

过去法兰联接垫片是以“强制密封”理论进行设计，垫片的密封完全依靠螺栓的强力收紧应力使垫片材料发生变形而堵塞垫片与法兰界面上的通道或材料内部通道以达到密封不漏。

“强制密封”法兰联接的力学特性是法兰联接中法兰、垫片、螺栓等各受力元件形成的“静不定”结构，其特点是其中任何一个受力元件发生变化都会引起其它受力元件的变化。

广州市东山南方密封件公司

依据“强制密封”设计的垫片，根据法兰联接的力学特性可以清楚地了解到垫片的机械性能、密封介质压力、螺栓初始预紧力、螺栓刚性等都会影响到垫片应力从而影响到垫片的密封性能：

① 垫片的机械性能（压缩—回弹特性）的影响

垫片的回弹曲线斜率小（即垫片柔软而富有弹性）有利于操作状态下保持更高的垫片应力。

② 密封介质压力的影响：

密封介质压力与操作状态下垫片应力成反比关系，即密封介质压力越高，垫片应力下降越大。

③ 螺栓初始预紧力的影响：

螺栓初始预紧力与操作状态下垫片应力成正比关系，即螺栓初始预紧力越高，垫片应力就越高。

④ 螺栓刚性的影响：

螺栓刚性与垫片应力成正比关系，即刚性的螺栓（短而粗的螺栓）比柔性的螺栓（长而细的螺栓）能获得更高的垫片垫片。

由此可见，建立在传统的“强制密封”理论基础上的法兰连接密封垫片，在其他条件相同的情况下其密封性能取决于连接的螺栓力。在操作状态下任何使螺栓力发生变化的因素都会改变垫片的应力而影响到其密封性能。在法兰联接中各元件（即法兰、螺栓和垫片）一定的情况下，操作条件（操作压力、温度等工况）就成为影响法兰联接密封的主要因素。其中操作压力的影响更为直接而普遍。在操作状态下，由于介质压力的存在总是使垫片预紧应力下降从而降低垫片的密封能力，最终可能导致连接发生泄漏，因此介质压力就成为影响法兰联接密封性能的主要因素。

**2. 新的“压力自密封”设计理念**

针对传统“强制密封”设计的垫片存在的问题，近几年，我公司独创了 “压力自密封”的垫片设计新理念。

我公司根据“压力自密封”原理进行新型垫片设计，在垫片结构设计上利用这种设计新理念不但化解了被密封的介质压力对法兰联接密封的不利影响，而且将不利转化成有利，利用被密封介质的压力来进一步提高法兰联接的密封性能，从而研制开发了结构、性能独特的专利产品—双金属自密封波齿复合垫片系列产品。新的“压力自密封”设计理念使这一专利系列产品具有以往其它垫片无法比拟的更为优异的密封性能。**（具体参见双金属自密封波齿复合垫片部分）**

## 三．主要垫片材料的结构性能特点及适用范围

### （一） 石棉橡胶板

这是应用最早的传统密封材料，包括普通型和耐油型二大类、其中又分高压、中压和低压各种牌号。在炼油装置上多数使用的是耐油石棉橡胶板。

**1. 结构特点**

石棉橡胶板系由石棉纤维、胶料和其它填充材料经混炼加热和与辊压而成。

**2. 性能特点**

广州市华山南方密封件公司

（1）材料本身具有一定压缩-回弹性，能获得一定密封性。

（2）由于石棉纤维强度较高，又能耐较高的温度（石棉耐温性能通常在 480℃以内）因此高压型石棉橡胶板可在较高的温度和压力下使用。

（3）材料来源广泛、制造上便于工业化生产，能根据需要在现场做成各种形状和规格的垫片，使用较为方便。

**3. 存在问题**

（1）这种材料的密封性能并不高（其密封性通常在 $1\times10^{-2}$ ~$1\times10^{-3}Cm^3N/S$ 左右），特别是这种垫片在使用时很容易发生应力松弛现象，影响它的密封性能和寿命，因而难以满足现代大型石油化工工业中设备的高参数和长周期的要求。

（2）由于石棉系人们公认的致癌物，从七十年代起，世界上不少国家已陆续制订法律将其列入禁用范围，我国也在逐步要求禁用。

因此，随着人们对设备密封要求的提高以及密封技术的发展，石棉橡胶板材料已逐步为其他新材料所代替，使用量正逐渐减少。

**4. 应用场合**

（1）因密封性能不高，一般只应用于温度压力较低的非重要设备和管线场合。

（2）又因其为致癌物，故应尽量少用或不用。

## （二） 非石棉橡胶板

由于石棉纤维的致癌特性而被禁用，因此非石棉橡胶板是作为石棉橡胶板的替用材料而出现的。

**1. 结构特点**

它是由各种合成纤维与橡胶以及填充材料经混炼加热和辊压而成。

**2. 性能特点**

与石棉橡胶板类似，但耐温性能不及石棉橡胶板。

**3. 存在问题**

与石棉橡胶板类似，但不存在致癌问题。

**4. 应用场合**

（1）因其密封性能与石棉橡胶板类似，故应用场合也与其类似，是传统的石棉橡胶板的替代品。

（2）其价格比石棉橡胶板高，特别是进口材料价格相当高，除非为了作为紧急备用材料（通常是整板）外，否则与其采用高价的非石棉板垫片不如选用其他性能更好、价格不高的垫片。

## （三） 铁包垫

这是一种早期用于高温高压场合的传统密封材料。

**1. 结构特点**

通常是以石棉橡胶板（或其他耐温材料如柔性石墨板、无机陶瓷纤维板等）作为芯板，表面包覆镀锌铁皮或不锈钢薄板构成的。

**2. 性能特点**

（1）由于石棉橡胶板等芯材为金属所包覆，不直接与高温介质接触，在一定程度上提高了垫片的耐温耐压性能。采用其他耐温材料作为内芯，更能进一步提高其耐温性能。

广州市东山南方密封件公司

（2）与其他金属平垫相比有一定的可压缩性和弹性，因而在早期高参数设备中使用较为普遍。

（3）垫片的整体性较好，运输、安装使用较为方便。

**3. 存在问题**

（1）由于垫片在使用时是外表包覆金属与法兰表面相接触，其对法兰表面粗糙度的补偿能力较低，因而密封效果较差。试验研究和实际使用都已证明这种垫片的密封性在各类垫片中是比较差的（其密封性指标通常仅为 $1\times10^{-2}$ $Cm^3N/S$）。

（2）在使用过程中，石棉橡胶板等芯板的应力松驰也会导致压紧应力减少而使其丧失密封性，其使用寿命难以满足现代设备长周期运转的要求。

（3）使用石棉橡胶板做芯板的因其含有石棉致癌物，故其应用受到限制。

**4. 应用场合**

（1）可用于参数不高、对密封性能要求不高的非重要场合。也可以用于高温（根据包覆材料）低压但密封性要求不高的场合。

（2）不推荐用于易燃、易爆和有毒的场合，或对密封性要求较高的重要场合。

## （四） 聚四氟乙烯平垫和聚四氟乙烯包覆垫

这是一类通常用于腐蚀性介质和洁净场合的垫片材料。

**1. 结构特点**

（1）聚四氟乙烯平垫由板材直接加工而成。

（2）聚四氟乙烯材料包覆垫通常是由聚四氟乙烯材料通过机械加工或热翻边方法包覆石棉（或非石棉）橡胶板构成。

**2. 性能特点**

（1）耐腐蚀性能极其优秀，而且洁净不污染 。

（2）聚四氟乙烯材料包覆垫除保持了聚四氟乙烯材料的良好密封性外，还改善了四氟乙烯材料的冷流性和弹性使垫片能保持长期密封性能。

（3）作为耐腐蚀材料使用时其耐温度范围很广（-250℃~+250℃）。

**3. 存在问题**

聚四氟乙烯材料本身存在“冷流”特性，而且其“冷流”现象随温度和压力的升高而加大。垫片材料的“冷流”特性直接影响到垫片应力的丧失，从而影响垫片的密封性。因而使其应用的温度和压力均受到限制。

**4. 应用场合**

（1）在常温范围内可以广泛用于腐蚀性介质或要求洁净、不受污染的场合。

（2）高于常温范围的应考虑使用压力不能过高，以免因“冷流”而引起垫片应力降低导致密封失效。

## （五） 金属平形垫

这是传统的高温高压垫片，包括由各种金属材料构成的平垫和齿形垫或齿形复合垫片。

**1. 结构特点**

金属平垫由金属板材直接加工而成，结构简单。齿形垫通过其表面加工成齿状、减少了接触面，提高了密封比压，能形成金属线密封，从而改善了垫片的密封性。齿形组合垫

广州市东山南方密封件公司

是在齿形垫表面复合适当厚度的柔性石墨，从而进一步提高了垫片的密封性能。

**2. 性能特点**

耐高温高压（根据金属材料的耐温性能而定），安全可靠性高。

**3. 存在问题**

（1）压缩性能差，对法兰表面加工缺陷的补偿能力差，因而对法兰表面的加工精度要求比较高。

（2）弹性差，回弹量小，在装置运行不稳定或其他原因使温度、压力发生变化的场合容易出现泄漏。

（3）密封比压高，因而要求螺栓力也较大。

**4. 应用场合**

（1）可用于操作工况参数稳定的高温高压场合。

（2）不推荐用于温度、压力等工况参数波动的场合。

（3）不推荐用于大型设备（如容器、换热器等）的场合。

## （六） 金属环垫

**1. 结构特点**

通常包括八角垫和椭圆垫等。由整体金属加工而成，密封部位能形成高比压的金属窄面或线密封。

**2. 性能特点**

（1）密封性能良好，有一定弹性和压力自密封作用，在一定程度上能适应操作工况参数的波动。

（2）耐高温高压，安全可靠性高。

**3. 存在问题**

（1）法兰连接结构较复杂，无论金属环垫还是法兰本身的制造精度要求较高，成本也较高。

（2）由于加工的偏差往往无法获得压力自密封的效果。

（3）要求配套的法兰加工出较高精度的梯形槽。而梯形槽不仅削弱了法兰的强度，其根部系应力集中的部位，容易造成法兰的整体损坏。

（4）要求安装技术高，安装不好就难以达到予期密封效果。

**4. 应用场合**

（1）一般可用于中小规格法兰上密封要求较高和参数变化的高温高压场合。

（2）对用于大通径法兰上不仅金属环垫和法兰的加工精度要求高、成本高，而且对法兰连接的安装技术要求更高，往往难以获得令人满意的密封效果。

## （七） 石墨复合垫

石墨复合垫俗称高强垫或高强石墨复合垫。其中包括三种结构型式

**1. 结构特点**

它以冲刺的 0.10~0.15mm 左右金属薄板为骨架，在其表面复合柔性石墨构成。作为骨架的金属薄板仅起增加强度和整体刚性的作用，以便制作和使用较为方便，起密封作用的仍

广州市东山南方密封件公司

然是柔性石墨材料本身。

**2. 性能特点**

（1）具有柔性石墨作为密封材料的所有特性，诸如耐高温、耐腐蚀，有一定压缩-回弹性，密封性能好等。

（2）可以做成板材，方便储存，可根据需要现场加工以便应急使用。

**3. 存在问题**

安全可靠性不足。由于金属骨架仅起增加整板的强度和刚性以方便加工、运输和安装，起密封作用的仍然是柔性石墨材料本身。而柔性石墨材料本身的强度极低，在使用时一旦出现渗漏事故，泄漏就会迅速扩大而无法补救，因而其安全可靠较差。

**4. 应用场合**

（1）一般用于压力不高的普通场合或高温低压的非重要场合。特别适合于上述场合下的异型和大尺寸的垫片。

（2）不推荐用于易燃、易爆和有毒等对密封性要求高的重要场合。

## （八） 缠绕式垫片

这也是早期的传统垫片。依照填充材料（诸如柔性石墨，石棉等）不同又有不同的品种。

**1. 结构特点**

由金属成型带（通常为“V”型）与填充带材（如柔性石墨等）交替缠绕而成。现有的缠绕式垫片绝大多数采用柔性石墨填充而成柔性石墨缠绕式垫片。

有四种结构形式：基本型，内环型，外环型和内外环型，以适用于不同法兰面。

**2. 性能特点**

（1）具有良好的压缩性和密封性能，能适应高温高压参数的要求。

（2）具有良好的回弹性，能在温度和压力变化的场合仍能保持较好的密封性。

（3）带内外环的缠绕式垫片的安全可靠性较高。

由于缠绕式垫片（特别是带内外环型缠绕垫）具有上述的优良性能，因而一直以来在法兰联接中应用最广的垫片之一，特别是在中小通径法兰上应用非常普遍。

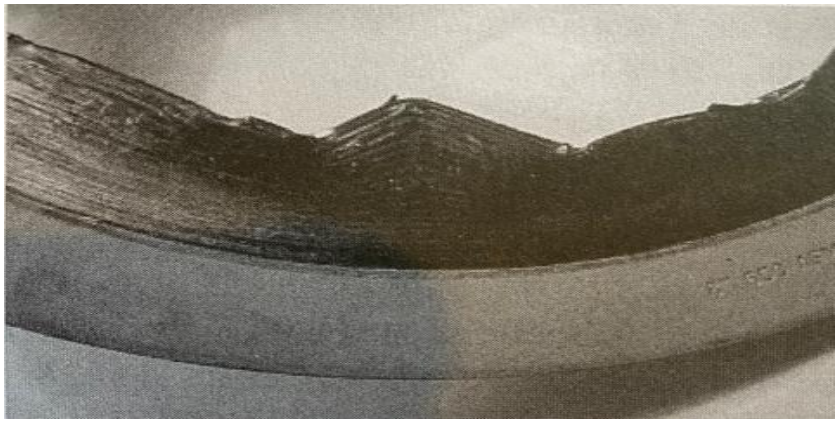
**3. 存在问题**

由于结构和制造上的原因，缠绕式垫片的缺陷也很明显。正如 90 年代就有专家指出“这种垫片目前用得最多，但问题也出得最多”，这就是人们通常所说的“散架”和压溃（或称“失稳”）问题。

（1） 使用中的“失稳”和“散架”问题

所谓“失稳”是指垫片的密封部分在螺栓力的作用下受过分压缩而在内径处发生径向屈曲（内瘪）变形而向内“坍塌”的损坏，从而使垫片密封失效。下图是垫片“失稳”损坏照片。

广州市东山南方密封件公司



而所谓“散架“是指垫片的密封部分在螺栓力的作用下受过分压缩而在外径处的钢带焊点被“拉脱”，使钢带发生松散破坏了垫片密封部分的整体结构，从而使垫片密封失效。

缠绕垫在使用时发生“失稳”和“散架”的实质是填充材料在受压缩的情况下产生的横向内应力对内、外缠绕钢带作用的结果：

① 填充材料的横向内应力向内作用于缠绕钢带上类同于外压容器承受外压力的作用，在内应力达到一定值时会发生“失稳”。为了防止缠绕垫“失稳”就必须设置足够强度的内环。

② 同样，填充材料的横向内应力向外作用于缠绕钢带上类同于承受内压的容器在内压力的作用下产生环向应力，由内应力产生的环向应力达到一定值时就会拉脱钢带上的碰焊点而导致“散架”。为了防止缠绕垫“散架”就必须设置足够强度的外环。

因此，只有同时设置了外环和内环的带内外环型缠绕垫才能防止垫片在使用时发生“失稳”和“散架”的可能。

（2）除带内外环型缠绕垫外，其它型式缠绕垫(包括基本型、内环型、外环型)的使用，其性能均因其结构问题而受到影响

① 基本型缠绕垫：

基本型缠绕垫是既易于发生“拉脱”又易于出现“失稳”破坏的垫片，即使用于内外径均受约束的榫槽面法兰上，由于垫片的内外径在榫槽内的安装间隙较大，在高负荷作用下仍然容易压溃而“散架”和“失稳”，从而使其无法达到像内外环型缠绕垫那样的良好性能。

② 内环型缠绕垫：

带内环型缠绕垫用于凹凸法兰时，虽然内环的加固防止了垫片的“失稳”，但由于垫片外径与法兰凹面尺寸的安装间隙较大，在高负荷作用下容易压溃 “散架”而影响性能。“散架”后的垫片密封部分虽然受法兰凹面的约束而不至于完全损坏，但垫片应力已大为降低，即使重新拧紧螺栓也难以提高垫片密封本体的应力以求到密封，因为实际上在这种情况下螺栓负荷已被内环所吸收，垫片密封本体的应力无法获得相应的提升。

③ 外环型缠绕垫：

带外环型缠绕垫用于突（平）面法兰时，虽然外环的加固防止了垫片的“散架”，但由于没有内环的约束加固，在高负荷作用下容易发生“失稳”破坏而使其密封失效。

（3）大尺寸缠绕式垫片由于结构上的原因，无论制造、运输和安装都非常容易“溃散”，而且大尺寸的缠绕垫在使用时更容易发生“失稳”和“散架”而使其应用受到很大限制。

（4） 生产工艺不同，产品质量和性能会受到影响，特别是外环安装不好会直接影响到

广州市东山南方密封件公司

垫片的性能。

4. 应用场合：

（1）缠绕式垫片的应用范围较广，可用于各种工况参数场合，包括高温、高压场合和温度、压力变化的场合。普遍用于中小规格管法兰上。

（2）为了避免其“散架”和“压溃”应根据法兰密封面的型式配用相应型式的垫片：

① 基本型缠绕垫仅用于榫槽法兰。

② 外环型缠绕垫虽然可用于突（平）面法兰上，但建议限于小规格低压场合。

③ 突（平）面法兰应尽量优先采用带内、外加强环的缠绕式垫片。突（平）面法兰配用外环型缠绕式垫片时不推荐在高压场合使用。以聚四氟乙烯填充的外环型缠绕垫不适用于突（平）面法兰。

② 凹凸面法兰应采用带内环型缠绕式垫片。但在压力较高、尺寸较大的场合不推荐选用缠绕式垫片。

③ 大尺寸法兰不推荐选用缠绕式垫片。

（4）在易燃、易爆和有毒介质等重要场合选用缠绕式垫片时应慎重。大尺寸法兰建议尽量不用，中小尺寸的法兰应配用带内外环型缠绕式垫片，压力较高时尽量不用带内环缠绕垫和带外环缠绕垫。

## （九） 柔性石墨金属波齿复合垫片（波齿复合垫片）

**柔性石墨金属波齿复合垫片是我国研制开发的独有垫片产品。**

柔性石墨金属波齿复合垫片是我公司于 1992 年初根据我公司董事长吴树济高级工程师发明的 2 项专利技术（“改进型金属—膨胀石墨复合垫片”和“换热设备复合垫片”）开发研制成功的专利产品。该专利产品曾被广州市科委列为研制项目和广州市经委列为新产品开发项目，并通过了由广州市科委和广州市经委联合组织的鉴定。波齿复合垫片研制项目荣获广州市人民政府颁发的广州市科技进步二等奖。1999 年波齿复合垫片被广东省科学技术委员会评为广东省级重点新产品。2000 年波齿复合垫片的专利实施项目被广州市专利管理局评为第四届广州市专利实施奖二等奖，并在第十届全国发明展览会上被评为新技术产品金奖。

1992 年我公司根据上述专利技术成功研制开发了柔性石墨金属波齿复合垫片系列产品（含“管法兰用柔性石墨波齿复合垫片”、“容器用柔性石墨波齿复合垫片”和“换热器用柔性石墨波齿复合垫片”等系列产品），并制订了产品企业标准进入市场。由于柔性石墨波齿复合垫片的独特结构和特性使其在石油化工等各个领域很快获得广泛应用，并在推广应用中为广大用户解决了各种使用其他垫片不能解决的密封难题而受到用户的高度好评和认可。

2003 年起我公司作为该垫片国标制订的主要起草单位，参与了柔性石墨金属波齿复合垫片国标（含 GB/T19066.1-2003 ，GB/T19066-2-2003 和 GB/T19066.3-2003）的制订工作，2008 年 “柔性石墨金属波齿复合垫片 尺寸”（GB/T19066.1-2008）和“大直径钢制管法兰用垫片”（GB/T13403-2008）（波齿垫部分）的修订工作和 2020 年“管法兰用金属波齿复合垫片 第 1 部分：PN 系列”（GB/T 19066.1-2020）和“管法兰用金属波齿复合垫片 第 2 部分：Class 系列”（GB/T 19066.2-2020）修订工作。

2018 年我公司作为参编单位参与制订了石油化工行业标准“石油化工管壳式换热器用柔性石墨波齿复合垫片”（SH/T 3430-2018）制订工作。

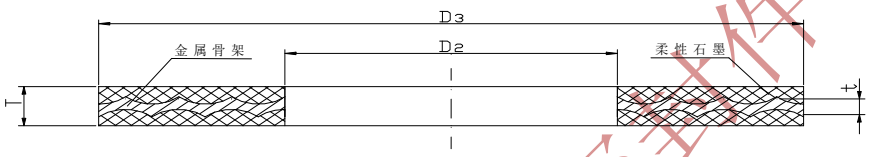
广州市东山南方密封件公司

至目前为止，除了容器用的柔性石墨金属波齿复合垫片的尺寸系列仍然执行我公司内部标准外，包括管法兰用和换热器用的柔性石墨金属波齿复合垫片均有相应产品可供选用。对有特殊需求的波齿复合垫片我公司亦可提供相应服务。

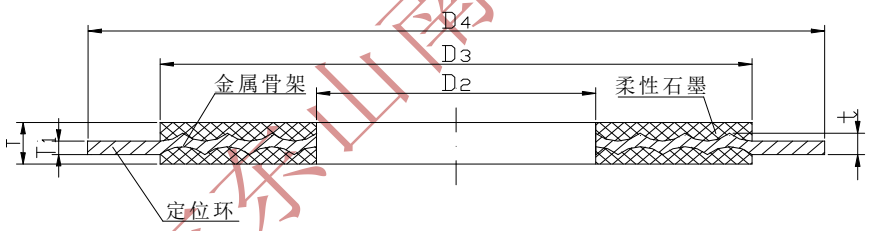
**1. 结构特点**

柔性石墨金属波齿复合垫片的基本结构是由特殊设计的波齿状金属骨架上复合适当密度的柔性石墨材料构成。所谓特殊设计的波齿状金属骨架，其结构特点是既有波纹状的弹性，又有齿尖状尖峰，既有别于波纹垫的骨架又有别于齿形垫的骨架，从而成为具有线密封作用的弹性骨架。在此骨架上再复合适当填充量的柔性石墨后便构成富有压缩-弹性骨架和优良密封材料的结构整体、性能独特的垫片。根据配用的法兰面不同其垫片结构型式分别有基本型、带定位环型、带定位耳型以及用于换热器上的带隔条型柔性石墨波齿复合垫片。

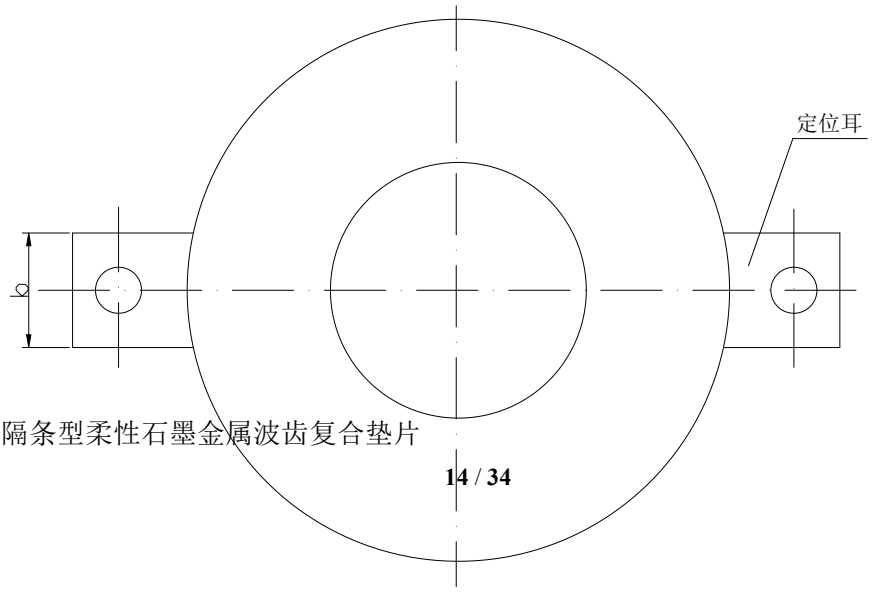
基本型柔性石墨金属波齿复合垫




带定位环型柔性石墨金属波齿复合垫




带定位耳型柔性石墨金属波齿复合垫




带隔条型柔性石墨金属波齿复合垫片

广州市泰山南方密封件公司

**波齿复合垫片垫片的密封原理：**

波齿复合垫片在使用时通过法兰的压紧，其上复合的石墨材料完全被压入波齿状金属骨架上的沟槽内形成高密度石墨团，与此同时金属骨架上下表面的环形齿峰与法兰面紧密接触并在法兰的进一步压紧下产生弹性变形，石墨被高度压缩和封闭在金属骨架与法兰面之间所形成的环形封闭空间里，由此形成了多道金属线密封和柔性石墨密封的双重密封作用。

**2. 性能特点**

（1）优异的密封性

由于波齿复合垫片具有齿形金属线密封和非金属柔性石墨密封的双重密封作用，而且它的密封带是完全隔开的(这有别于缠绕式垫片的螺旋形带)。同时，波齿复合垫片的石墨含量丰富，同样宽度的密封面其石墨有效面积大，而且垫片压缩量较大，能有效地补偿法兰表面宏观不平度（这对大通径法兰特别重要），因此使它具有比其他垫片（包括缠绕垫）更为优良的密封性。

（2）回弹性能优良，密封寿命长

由于波齿复合垫片具有特殊构造的波齿状弹性骨架，而且构成复合垫片的金属和柔性材料具有极好的耐高温、耐流体侵蚀的性能、不会老化，垫片的弹性主要由特殊构造的金属弹性骨架产生，不必担心使用时会发生应力松驰，因此能长期保持优异的密封性能。

（3）安全可靠性高

波齿复合垫片使用时金属骨架的环形齿峰与法兰面紧密接触，其柔性石墨材料为坚固的金属骨架和法兰面所封闭，因此不必担心膨胀石墨材料会被高压流体冲走，也不必担心会像缠绕式垫片那样被压‘散架’或“压溃”(“失稳”)，波齿复合垫片实际上具有与金属垫片同样的安全可靠性。

（4）使用安装方便

波齿复合垫是带金属骨架的整体结构，即使垫片尺寸很大，在运输和使用安装中都不必担心像缠绕式垫片那样会“散架’。

（5）适应性广

波齿复合垫片几乎可以适用于绝大多数场合，包括高、低温(-200～600℃)和高、低压(真空～25.0MPa)场合，由相应的金属骨架材料制造的波齿复合垫片可用于包括大多数腐蚀性流体在内的各种场合。

**3. 应用场合**

（1）应用范围很广，可用于易燃、易爆和有毒等对密封性要求较高的场合。

广州市东山南方密封件公司

（2）可用于高温、高压场合，温度压力有波动的场合。

（3）由于波齿复合垫片安装时其压缩量较大，能有效地补偿法兰表面宏观不平度，特别适用于对密封性要求较高的容器、换热器等大型设备的大法兰上使用。

**4．垫片型式选用**

波齿复合垫片根据配用的法兰面不同其结构型式分别有基本型、带定位环型、带定位耳型以及用于换热器上的带隔条型柔性石墨波齿复合垫片。由于波齿复合垫片是由整体结构坚固的骨架构成，不存在缠绕式垫片的“失稳”或“散架”等缺陷，因此可根据法兰面型式选用相应的垫片型式：

① 基本型－用于榫槽法兰、凹凸面法兰。

② 带定位环型－用于突面（平面）法兰。一般推荐用于中、小规格法兰上。

③ 带定位耳型－用于突面（平面）法兰，安装更为方便。一般推荐用于中、大规格法兰上。

④ 带隔条型－用于换热器法兰。

**5. 实际应用**

我公司的波齿复合垫片自1992年研制开发成功后以其独特的结构和优异的性能很快在石油化工等各工业部门获得了广泛应用。特别是，在波齿复合垫片的应用过程中，无论在推广应用阶段还是此后的广泛应用均能为广大用户解决了不少以往使用其他垫片所不能解决的密封难题，因而受到广大用户的一致认可和高度好评，并成为波齿复合垫片的主要生产供应商。

据我公司不完全统计，我公司所生产供应的波齿复合垫片的应用情况如下：

（1）石化系统应用我公司生产的波齿复合垫片企业超过40多家，其中：

中石化系统超过27家，

中石油系统超过8家，

中海油系统超过3家，

其他石化系统超过5家。

（2）我公司的波齿复合垫片在石化装置的应用

据粗略统计，在石化系统中使用我公司的波齿复合垫片装置几乎涵盖石油化工的所有主要装置，如：

蒸馏、催化裂化，加氢、脱硫，硫磺，重整、气分、MTBE、焦化（延迟焦化），溶剂、减粘、芳烃，汽油加氢，航煤加氢、蜡油加氢，加氢处理、加氢精制、加氢裂化，制氢，烷基化，S-ZORB、裂解、汽加，酸性水汽提，苯抽提，氢提浓，丁二烯、芳烃、碳五，产品精制，聚乙烯、聚苯乙烯、苯乙烯、聚丙烯等等。

（3）近15年来我公司的波齿复合垫片生产供应量

据粗略统计，仅从2000～2014年这15年中，我公司生产销售的波齿复合垫片产品总量超过 **186万 件**，年均超过**12.4万件**，其中：

DN 650以上（容器和换热器）的波齿复合垫片超过 **14万** 件。

在2010～2014年这5年，通径DN1000以上的超过 **2.76** 万件。最大通径**DN4000**。

**【（参见附录资料：柔性石墨金属波齿复合垫片及其应用　(公司内部资料)】**

广州市东山南方密封件公司

**6. 存在问题**

尽管波齿复合垫片已有相应的国家标准，但由于产品标准对产品的结构、参数（诸如骨架的波齿间距、圆弧槽的尺寸等）、石墨填充量、甚至垫片的密封面宽度等都未有明确规定，而是由生产商自行确定。因此不同生产厂商也因设计、制造工艺等技术水平和实际应用经验不同而造成产品的性能、质量差异相当大。用户在选用时还应确认生产供应商的资质和产品质量。为此用户在选用垫片时应对以下与垫片性能质量高度相关的问题认真予以关注和重视，否则会严重影响垫片的密封性能和效果。

(1) 关于垫片的波齿状骨架设计

波齿复合垫片的波齿状特殊结构的骨架设计是确保垫片性能的关键。我公司在 90 年代申请专利后经多年试验研究和大量而广泛的应用实践确立了波齿垫骨架的基本结构型式并在产品标准制定时订入波齿复合垫片国标中。（见下图）

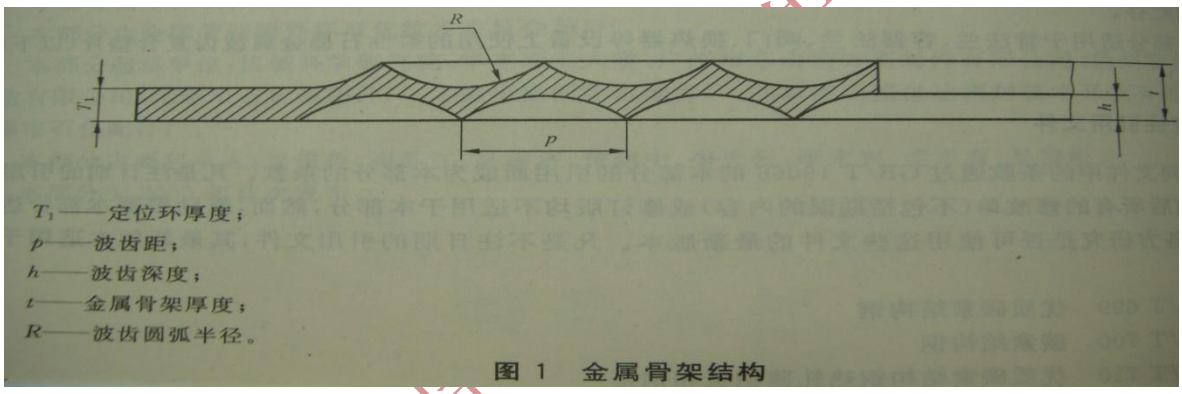
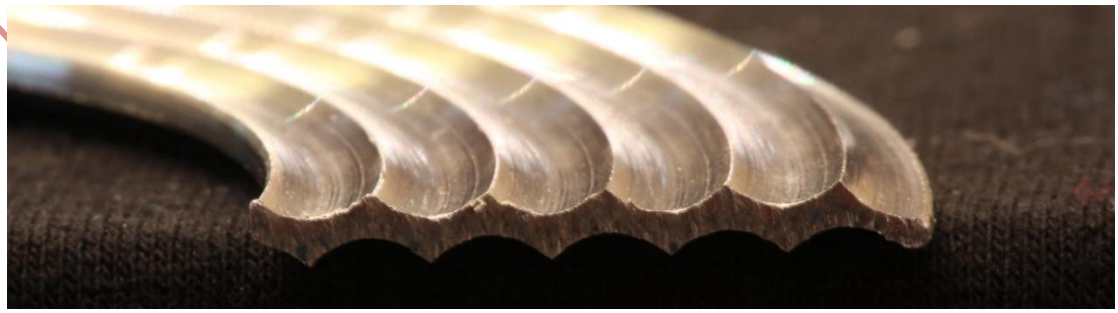



图 1　金属骨架结构

从图中可以看到，波齿状骨架的设计参数包括骨架厚度 t、波齿距 p、波齿深度 h 和波齿圆弧半径 R 等。显然，不同的参数设计直接影响到垫片的性能。问题是这些参数在波齿复合垫片产品的国家标准中并没有详细规定，这些参数而是由各生产厂家自行设计的。因此，不同设计，产品性能和质量就完全不同，产品的性能完全取决于生产厂家的研发和设计能力、技术水平和实际应用的经验。从市场供货产品的实际情况来看也确实如此。以下可以看到各厂家设计生产的波齿垫骨架是不同的。（如下图所示）

我公司生产的波齿复合垫片骨架结构图



其它一些厂家生产的波齿复合垫片骨架结构图



由此可见，不同厂家所设计生产的产品结构差异之大。

（2）关于石墨复合（填充）量

石墨复合（填充）量同样是影响波齿复合垫片性能的关键因素。石墨填充量应与垫片的使用工况相适应，填充量少了不仅达不到密封效果，而且可能因过压使骨架被“压溃”损坏，填充量多了则石墨“浮”于表面，骨架的作用不能发挥而且降低了产品的安全性。我公司在产品设计时是根据波齿复合垫片的密封原理、柔性石墨的压缩特性、波齿状骨架的参数和垫片的不同使用压力分别进行计算来确定石墨复合量，以确保垫片具有优良密封性能。

（3）关于垫片的密封面宽度

垫片的密封面宽度也是影响垫片性能的因素。原则上垫片的宽度应与使用工况相适应。太窄了不能获得很好密封效果，太宽了螺栓力不够同样不能达到好的密封效果。制订管法兰用波齿复合垫片国家标准时已对标准规格的垫片宽度有所建议，但并非强制性规定，具体尺寸仍可由生产商设计确定。2018 年制订的石油化工行业标准“石油化工管壳式换热器用柔性石墨波齿复合垫片”（SH/T 3430-2018）所列的垫片尺寸也是推荐值而非强制性规定，也

是考虑到允许各生产商可根据各自设计而有所差异。我公司也根据多年的研究、设计计算和实践制订了容器（包括换热器）用的柔性石墨波齿复合垫片尺寸系列，作为我公司的生产依据。我公司的尺寸系列与标准的推荐值稍有差异（标准推荐值基本上采用缠绕垫的宽度，我公司的系列宽度相较于标准推荐的宽度大些，特别是大通径法兰），从我公司近 30 年设计生产该产品的实践来看，目前我公司所确定的产品尺寸系列是合适的，能确保产品性能合符使用要求，用户可以放心选用。

从上述情况可知，因产品标准对产品结构及其设计参数，诸如波齿状骨架的结构、尺寸和石墨填充量等影响产品性能的内容均未作规定。因此，不同的生产企业，因技术水平、设计制造能力不尽相同而形成产品质量也参差不齐。选用时建议用户应特别注意考察供货单位的资质、技术、设计和制造的水平和能力。用户可根据产品标准的规定要求生产厂家提供有效的符合产品标准规定的性能指标检测报告作为产品质量符合要求的证明。

**【参见附录资料：“波齿复合垫片的设计、性能及其质量 ” （公司内部资料）】**

## （十）双金属自密封波齿复合垫片

**双金属自密封波齿复合垫片也是我国研制开发的独有垫片产品。**

双金属自密封波齿复合垫片是近十年根据我公司董事长吴树济高级工程师的专利发明研制生产的国内外独创的专利新产品。该垫片是在我公司 90 年代初开发研制的专利产品-波齿复合垫片的基础上研制开发的又一新型高性能垫片专利产品。

**全新的设计理念——由传统的“强制密封”设计理念改变为“压力自密封”设计理念。**

该垫片从根本上改变了密封设计理念，将过去 **“强制密封”的设计原理**改变为**“压力自密封”的设计原理**。众所周知，以往传统的垫片设计的力学基础是完全建立在**“强制密封”**原理上。也就是说，法兰连接是通过螺栓预紧使垫片密封部位形成一定垫片应力而达到密封。在操作状态下包括由介质压力形成的分离力和其他因素会降低原有预紧的垫片应力而影响其密封性能。而新型垫片是按**“压力自密封”**原理进行设计，这种垫片的结构设计能使预紧的垫片应力在操作状态下不会受到介质轴向力的影响而降低，而且还会增加其垫片应力进一步提高其密封性。双金属自密封波齿复合垫片实际上是在原来密封性能优异的波齿复合垫片的基础上，通过新的结构设计以利用被密封介质本身的压力来进一步提高其密封性能，从而创造出比以往各种垫片（包括波齿复合垫片在内）的所有其他垫片更为优秀的全新一代密封垫片产品。

双金属自密封波齿复合垫片专利产品包括自紧式波齿复合垫片、带隔条复合垫片和外压用复合垫片等多项专利技术。从 2010 年开始我公司根据以上专利技术陆续研制开发的双金属自密封波齿复合垫片系列产品已形成了三大系列产品并推向市场：

广州市东山南方密封件公司

（1）管法兰用双金属自密封波齿复合垫片

（2）容器法兰用双金属自密封波齿复合垫片

（3）换热器用双金属自密封波齿复合垫片

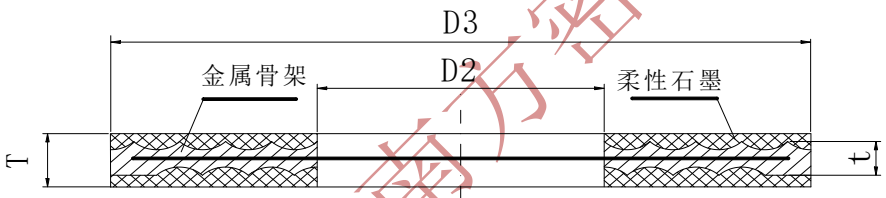
**1. 结构特点：**

和柔性石墨波齿复合垫片一样，双金属自密封波齿复合垫片也是在特殊设计的骨架上复合适当柔性石墨填充量构成。特殊设计的骨架由两片表面加工有环形特殊沟槽的金属片叠合，在其外周经熔焊后构成整体波齿状金属骨架与适当密度的柔性石墨复合而成。双金属构成的金属骨架从整体上看就像前述的波齿复合垫片骨架一样，波齿垫的骨架是整体金属件，上下表面加工后成为波齿状金属弹性骨架。而双金属自密封的金属骨架是由上下两片金属拼焊成整体，其上下表面再加工后构成双金属结构的波齿状金属弹性骨架。

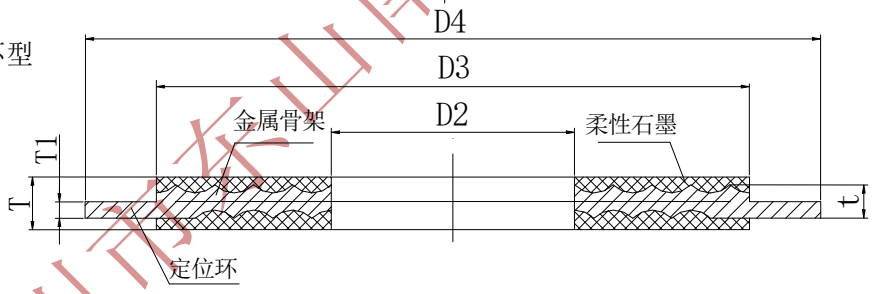
和波齿垫一样，双金属自密封骨架的上下表面同样要根据使用工况复合适当厚度的石墨。

双金属自密封波齿复合垫片同样根据配用的法兰面不同其垫片结构型式分别有基本型、带定位环型、带定位耳型以及用于换热器上的带隔条型柔性石墨波齿复合垫片。

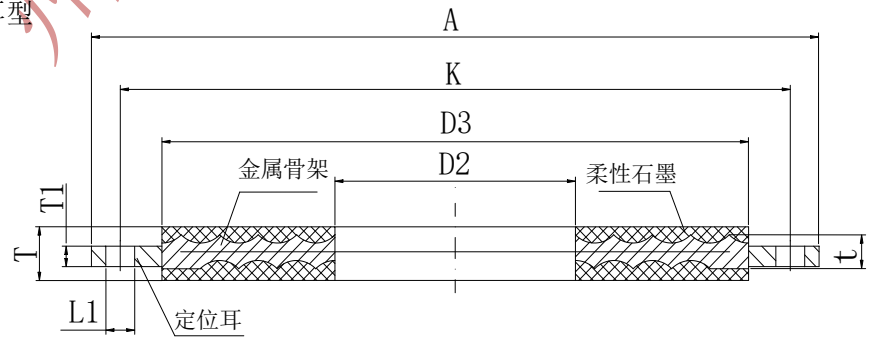
基本型

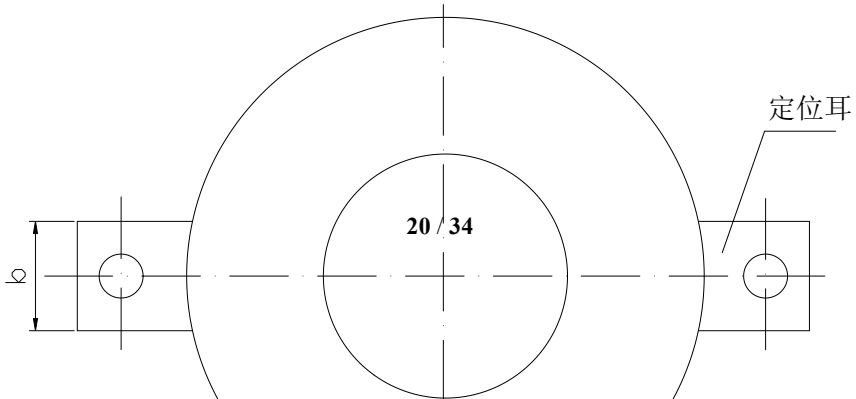



带定位环型




带定位耳型






广州市东山南方密封件公司

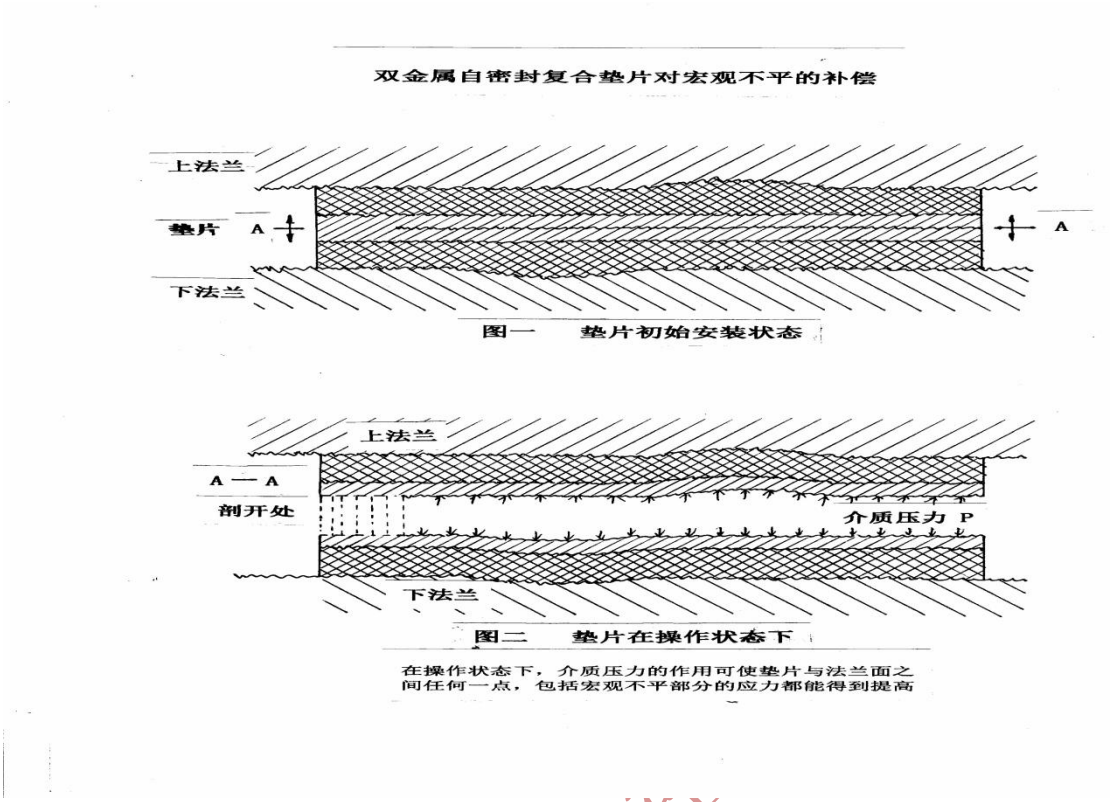
（1）双金属自密封波齿垫的密封原理：

双金属自密封波齿垫的安装和其他垫片一样，通过螺栓拉紧形成垫片的初装应力。在操作情况下，被密封介质进入后会形成相应的轴向分离力。对一般按“强制密封”原理设计的垫片，此轴向力会使原有初装预紧的（包括操作状态下其他因素导致的）垫片应力下降，下降的垫片应力值低于密封所需要的应力时就会出现泄漏。但对以“压力自密封”原理设计的双金属自密封波齿复合垫来说，压力自密封垫片的“自密封设计”从两个方面解决了“强制密封设计”存在的问题。

一方面是在操作情况下，自密封垫片两片金属间相较于存在软性密封材料的垫片与法兰表面间更容易进入被密封的介质，介质压力会使两金属片向外扩张压向上下密封表面，使密封表面的垫片应力相对于以往按“强制密封”设计的垫片应力增加了一种附加应力，此应力值最大可达到介质的压力。（参见附图）由此可知，在操作状态下，按“压力自密封”原理设计的双金属自密封垫的垫片应力不仅不会降低预紧时的垫片应力，反而增加垫片应力使垫片的密封性获得进一步提高。按“压力自密封”原理设计的双金属自密封波齿复合垫不仅消除了介质轴向力对垫片应力的影响，同样对操作情况下因其他因素使垫片应力的减少起到补偿作用，从而确保和提升法兰连接的密封性能。

另一方面，在操作情况下由介质内压形成的密封表面附加应力是直接作用于密封表面的任何地方（点）上的，（这与螺栓力通过法兰作用于密封表面上是不同的，因为法兰的刚性无法将螺栓力传递到密封面的凹下部位）因此能使密封面上任何凹下部位的应力都能得到提高和补充，因而能使密封面上包括凹下部分的任何部位都得到良好的密封。（参见下面附图）也就是说这种垫片的压力自密封作用对法兰表面的不平度偏差有其特有的补偿能力，因而在这种情况下相比于较其他垫片更具其特别优秀的密封特性。

广州市东山南方密封件公司




**【参见所附资料“新型双金属自密封波齿复合垫片的结构及其性能特点”】**

（2）自密封性能试验：

为了验证双金属自密封波齿复合垫片的自密封性能，我们在低垫片应力下对普通波齿复合垫片和双金属自密封波齿复合垫片进行密封性对比试验。下表是低组装应力下密封性对比试验结果。

**表 1　两种垫片密封性能对比试验结果**

| 垫片名称 | 预紧螺栓负荷/N | 预紧应力/ MPa | 试验压力/ MPa | 内压轴向力/N | 升压后螺栓负荷/N | 垫片残余预紧应力/ MPa | 垫片应力/ MPa | 泄漏率/ml·s$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 双金属自密封波齿复合垫片 | 12838 | 1.4 | 2.0 | 25480 | 29753 | 0.47 | 2.47 | 0 |

广州市东山南方

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 普通柔性石墨波齿复合垫片 | 13926 | 2.1 | 2.0 | 27244 | 30635 | 0.52 | 0.52 | 0.121 |

从表 1 可知，在低应力下普通波齿复合垫片已经发生泄漏（在 0.52MPa 低应力下不能密封并不奇怪），但双金属自密封波齿复合垫片却还能保持密封，（因为它的垫片应力实际上已达到 2.47MPa）这充分说明了双金属自密封波齿复合垫片确实具有很好的“压力自密封”性能。

**【参见所附资料“新型双金属自密封波齿复合垫片自密封性能试验”】**

**2. 性能特点**

（1） 特别优异的密封性

双金属自密封复合垫片是在原来柔性石墨金属波齿复合垫片的基础上进一步发展而来的，因此它除了保留原有波齿复合垫片的优异密封性外，更由于“压力自密封”的作用而密封性更为优秀。而且更进一步，由介质内压形成的附加应力是直接作用于密封表面的任何地方（点）上的，（这与螺栓力通过法兰作用于密封表面上是不同的，因为法兰的刚性无法将螺栓力传递到密封面的凹下部位）因此能使密封面上任何凹下部位的应力都能得到提高和补充，因而能使密封面上包括凹下部分的任何部位都得到良好的密封。也就是说这种垫片的压力自密封作用对法兰表面的不平度偏差有其特有的补偿能力，因而在这种情况下相比于较其他垫片更具其特别优秀的密封特性。

双金属自密封波齿复合垫片所具有的对宏观不平度的补偿特性对大尺寸的法兰如容器、换热器尤为重要。

（2）密封寿命长-“压力自密封”结构使它能长期保持密封。

由于双金属自密封复合垫片的骨架设计成“压力自密封”型结构，在操作状态下压力介质会变成附加的垫片应力，它随介质压力的存在而存在。因此，在垫片的预紧应力不管是因介质轴向力的影响还是垫片本身的特性（如应力松弛）或因介质压力的升高或操作温度的波动等各种原因而减少时都会使垫片应力得到补偿和加强，从而使垫片始终保持高的垫片应力，因而其密封性能比现有的其他垫片更能得以长期保持。

（3） 安全可靠性高

和波齿复合垫片一样，双金属自密封复合垫片的骨架是整体金属的，结构牢固，安全可靠。而且由于双金属自密封波齿复合垫片的“压力自密封”作用使得波齿状结构的上下金属片始终贴紧上下法兰面，使柔性石墨等被紧密地封闭在金属骨架的凹槽与法兰面之间，从而使它具有像金属平垫片和齿形垫一样的安全可靠性，而且不必担心会像缠绕式垫片那样被压“散架”或“压溃”而损坏。

（4） 使用安装方便

与波齿复合垫片一样，双金属自密封复合垫片的整体刚性结构使它在运输和安装过程中不必担心像缠绕式垫片那样会“散架”，这对大直径管法兰和容器、换热器法兰尤其有利，

广州市东山南方密封件公司

而且它具有多种定位方式（带定位环型和定位耳型）使它安装极为方便。

（5） 适应性广

双金属自密封复合垫片既可用于低温（－196℃）和高温(600℃)，也可以用于低压和高压(42.0MPa)，由相应的金属骨架材料制造的双金属自密封复合垫片亦可用于几乎所有腐蚀性流体的各种场合。

双金属自密封复合垫片可以用于各种规格大小法兰上，尤其适用于大通径的法兰上比其他垫片更为优秀。

**3. 应用场合**

（1）应用范围广泛，可用于各种工况场合，特别适用于包括易燃、易爆和有毒等对密封性要求高的场合。

（2）特别适用于高温、高压场合和温度压力波动的场合。

（3）适用于各种大小规格法兰，特别适用于大通径法兰。

由于双金属自密封波齿复合垫片安装时其压缩量较大，能有效地补偿法兰表面宏观不平度，而且其特有的“压力自密封”作用，特别适用于对密封性要求较高的容器、换热器等大型设备的大法兰上使用。

大量应用实例已经证明，双金属自密封波齿复合垫片是目前所有垫片中性能最好的法兰垫片。它的“压力自密封”性能使它即使在大尺寸法兰和操作工况参数波动的情况下仍能保持法兰连接的良好密封性，因此在上述场合应优先选用双金属自密封波齿复合垫片。

**4. 实际应用**

新型双金属自密封波齿复合垫片产品从 2009 年底、2010 年初开始在石油化工各装置的现存泄漏难点上试用并逐步扩大使用均取得很好的效果，解决了这些部位的密封难题，其中也包括那些采用了碟形弹簧补偿装置但仍然难以密封的难题。

至目前为止，该产品已在石油化工系统中广泛用于各种高温高压场合、温度和压力波动变化的场合、尤其是容器和换热器等大直径法兰上均取得非常好的密封效果，为用户单位解决了大量过去使用其他垫片所不能解决的泄漏难题，从而受到广大用户各级领导的高度好评。

（1）应用概况

① 实际应用的企业

近几年双金属自密封波齿复合垫片已在石油化工系统和工程配套的设备制造行业等各行业获得广泛应用。据我们的不完全统计，至 2015 年选用该垫片的企业超过 119 家。其中：

中石化系统的企业有 27 家

中石油系统的企业有 18 家

中海油的企业有 4 家

其他石化企业有 19 家

与石化企业工程配套的大型石化设备制造企业超过 28 家

② 实际应用的石化装置

近几年，双金属自密封波齿复合垫片专利产品以其前所未有的优异性能在石化系统的各种装置上获得了广泛应用。至目前为止，其实际应用的石化装置已超过 29 套。

例如：

广州市东山南方密封件公司

常减压装置，重整装置（连续重整装置），重油催化裂化（催化）装置，（制硫装置）硫磺回收装置，汽油吸附脱硫（S-Zorb）装置，异丙醇装置，制氢装置，焦化装置，加氢装置，加氢裂化装置，蜡油加氢装置，渣油加氢装置，干气制乙苯装置，裂解装置，（轻）柴油加氢装置，航煤加氢装置，焦化汽油加氢装置，润滑油加氢装置，聚丙烯装置，汽提装置，煤化工-水煤浆净化装置， PX 装置，芳烃，正丁烷装置，轻烃回收装置，动力系统，储运装置，甲醇装置，甲醇制烯烃（MTO）装置，聚丙烯装置等。

③ 实际应用数量：

双金属自密封波齿复合垫片新专利产品从 2009 年底、2010 年初开始试用，经推广应用和不断扩大使用，至 2019 年 3 月为止在各石化装置的实际使用总数已超过 **86510** 件。其中

垫片直径小于 **650 mm** 的超过 **64120 件**。

垫片直径 **650 mm** 以上的超过 **22380 件，其中：**

**650～1000 mm** 的超过 **8860 件**

**1000～1500 mm** 的超过 **9170 件**

**1500～2000 mm** 的超过 **3640 件**

**2000～3000 mm** 的超过 **660 件**

**3000 mm** 以上的有 **38 件 （垫片最大尺寸达 3398 mm ）**

**【详见附录资料“双金属自密封波齿复合垫片应用资料汇编之一 ”“双金属自密封波齿复合垫片 应用概况”】**

（2）应用实例：

① 在石化企业上的应用实例

**【详见附录资料“双金属自密封波齿复合垫片应用资料汇编之二” “双金属自密封波齿复合垫片在部分石化企业上的应用实例”】**

② 在石化装置上的应用实例

**【详见附录资料“双金属自密封波齿复合垫片应用资料汇编之三” “双金属自密封波齿复合垫片在石化装置上的应用实例”】**

③ 在容易泄漏设备上的应用实例

**【详见附录资料 “双金属自密封波齿复合垫片应用资料汇编之四” “双金属自密封波齿复合垫片在容易泄漏设备上的应用实例”】**

**5. 垫片型式与选用**

（1）垫片型式与法兰型式配用

与波齿复合垫片一样，双金属自密封波齿复合垫片也根据配用的法兰面不同其结构型式分别有基本型、带定位环型、带定位耳型以及用于换热器上的带隔条型垫片。由于双金属自密封波齿复合垫片也是由整体结构坚固的骨架构成，不存在缠绕式垫片的“失稳”或“散架”等缺陷，因此同样可根据法兰面型式选用相应的垫片型式：

① 基本型－用于榫槽法兰、凹凸面法兰。

② 带定位环型－用于突面（平面）法兰。一般推荐用于中、小规格法兰上。

③ 带定位耳型－用于突面（平面）法兰，安装更为方便。一般推荐用于中、大规格法兰上。

广州市番山南方密封件公司

（2）垫片选用方法

我公司已制定了双金属自密封波齿复合垫片产品的企业标准,目前执行的最新标准是《双金属自密封波齿复合垫片》(Q/DSMF 2-2014)。与此同时，我公司还根据国内外管法兰、容器（含换热器）法兰标准制定了相应配套的双金属自密封波齿复合垫片尺寸系列供用户选用。因此，符合标准的各种法兰（包括管法兰、容器法兰和换热器法兰）均可直接选用。用户只需向我公司提供法兰的标准、规格、参数即可获得相应的垫片。

对于非标准法兰或特殊要求的法兰可与我公司联系进行特殊设计。

一有关垫片选用资料请参考公司网站的相关资料。

**【参见附录资料“双金属自密封波齿复合垫片选型资料　（公司内部资料）”】**

**6. 存在问题**

**由于**双金属自密封波齿复合垫片是在原有的波齿复合垫片的基础上进一步发展研制的，双金属自密封波齿复合垫片除了由双金属片构成波齿状骨架而与波齿复合垫片由整体金属构成波齿状骨架不同外，其他是相同的。因此有关波齿复合垫片在设计、生产等方面所存在的问题在双金属自密封波齿复合垫片上同样存在，用户在选用产品时同样应关注生产厂商的设计能力、技术水平和生产加工能力，以确保产品质量。（请参见前面波齿复合垫片的**6. 存在问题**部分的内容）

# 四. 垫片的选用

## （一）法兰联接对垫片的要求

在选择垫片前必须首先了解法兰连接对垫片有哪些基本要求。

概括起来，法兰连接对垫片的要求主要包括如下几个方面：

**1. 性能要求**

(1) 密封性与使用寿命；

(2) 对温度、压力和介质适应性；

(3) 安全可靠性；

(4) 使用方便性。

**2. 环境相容性**

**3. 经济性**

## （二）用户选用垫片的准则

**1. 根据法兰的连接形式（环槽密封还是平密封）和密封面型式（榫槽、凹凸还是平面）由此确定选用垫片的类别和型式。**

（1）法兰的连接形式决定垫片类别：

环槽型法兰只能选用金属环垫。

平面型法兰可选用各种类型平垫。

（2）平面型法兰的密封面型式决定垫片的型式：

无论榫槽面、凹凸面还是平面（突面）法兰都应选用与之相适应的结构和尺寸的平垫。

广州市东山南方密封件公司

**2.根据使用介质的性质、参数（温度和压力）、使用要求和法兰尺寸大小，结合垫片的特性确定垫片的种类、型式和材料。**

**3.在满足使用要求的前提下适当考虑经济性。**

不同垫片形式和材料，其价格会有所不同，有时还会有较大的差异，在满足使用要求的前提下可适当考虑选用价格便宜的垫片。但垫片作为配件，与其整体设备的价值相比，毕竟是低值品。尽管用量有时不少，但实际上所占的维修费用并不高。因此应以满足设备的性能要求为主，宁可多花点钱采用性能较好的垫片也不要为节省一点费用而给设备的正常使用留下隐患，特别是现代化工业企业十分强调“安全、稳定、长周期、满负荷、优质生产”，采用性能较好的密封件就会减少设备管理工作量和因泄漏停车抢修的可能性，使企业设备管理水平得到进一步的提高，从而保证了企业的正常生产和获得更大的经济效益。从这点看，所谓“多花点钱能买个放心”是值得的。因此在垫片选用上应在确保使用要求的基础上再适当考虑其价格。

## （三）垫片选用的一般性推荐和建议

垫片的选用一般是根据不同法兰型式、使用工况和密封性能要求并结合各种垫片的性能进行。下面是针对目前普遍使用的主要垫片品种和应用场合的选用提出一般性推荐和建议。

**1.不同法兰面型式应选用与之相配的垫片型式：**

（1）榫槽面法兰

通常可选用基本型垫片。但在选用基本型缠绕式垫片时应考虑其易于“散架”和“失稳”的缺陷可能对密封性能构成影响和风险，相对于选用同样具有优良密封性能的基本型波齿复合垫片会更合适。如果对密封性能要求更高的则选用基本型双金属自密封波齿复合垫片会更合适，尤其是大直径法兰更好。

（2）凹凸面法兰

通常可选用内环型缠绕式垫片、基本型波齿复合垫片或基本型双金属自密封波齿复合垫片。但在选用内环型缠绕式垫片时应考虑其易于“散架”的缺陷可能对密封性能构成影响和风险，相对于选用同样具有优良密封性能的基本型波齿复合垫片就不会因此而影响密封性能。同样，如果对密封性能要求更高的则选用基本型双金属自密封波齿复合垫片会更合适，尤其是大直径法兰更好。

（3）突（平）面法兰

通常可选用内外环型缠绕式垫片、定位环型或定位耳型波齿复合垫片、定位环型或定位耳型双金属自密封波齿复合垫片。但对大直径法兰在选用内外环型缠绕式垫片时应考虑其制造、运输和安装过程均易于“松散”的缺陷构成整个垫片的损坏而造成损失，相对于选用同样具有优良密封性能的定位环型或定位耳型波齿复合垫片而不会“松散”损坏就较为合适。同样，如果使用工况较为恶劣而对密封性能要求更高的话则选用定位环型或定位耳型双金属自密封波齿复合垫片会更为理想。

在缠绕式垫片标准中，外环型缠绕垫虽然可用于突（平）面法兰，但鉴于外环型缠绕垫片存在压溃“失稳”损坏而影响密封的风险，因而不建议在突（平）面法兰上使用外环型缠绕垫，尤其是在使用工况较为恶劣和对密封性能要求较高场合。因此在国标 GB/T 4622.1-2009 缠绕垫标准 2.5 章节中关于突面和全平面法兰可选用带外定位环型时特别注明

广州市东山南方密封件公司

“标准的使用者需考虑到不带内环内径处又无约束的情况下，缠绕式垫片可能会发生径向屈曲而影响正常使用的风险”，而标准中 2.6 章节也特别提出“突面和全平面法兰应优先选用带内环和定位环型，当填充材料为聚四氟乙烯时应选用该垫片。

**2.根据使用介质的性质、工况参数（温度和压力）、密封性能要求和法兰尺寸大小，结合垫片的特性确定垫片的种类、型式和材料。**

（1）根据被密封介质的特性选用

① 对易燃易爆性、毒性等介质　　。

易燃易爆性和毒性介质场合使用的垫片对密封性的要求很高，必须选用那些密封性能特别优秀、完全能满足密封性要求的垫片。建议：

首选包括密封性能在内综合性能极其优秀的新型双金属自密封波齿复合垫片，其次是柔性石墨金属波齿复合垫片，对中小规格的平面法兰也可以选用带内外环型缠绕式垫片。

② 对腐蚀性、渗透性、溶胀性等介质

一般情况下，在常温或温度不高、压力较低或介质要求清洁的场合可选用聚四氟乙烯类材料的垫片，如聚四氟乙烯平垫、聚四氟乙烯包覆垫等。

由于柔性石墨同样具有极其优秀的耐腐蚀性，防渗透性和溶胀性，在温度、压力较高的场合可选用能耐介质腐蚀的金属和柔性石墨构成的缠绕式垫片、波齿复合垫片或双金属自密封波齿复合垫片。

（2）根据法兰连接的操作工况参数特性选用

在法兰连接的操作工况属于高温、高压或操作温度、压力发生交变波动或法兰系统存在振动等场合对垫片的性能要求相当苛刻。高温高压场合不仅要求密封而且要求垫片在垫片构成材料有足够的承压能力和耐温性能。在压力、温度波动情况或系统震动的情况下要达到密封则要求垫片具有良好压缩-回弹特性和补偿能力。为此，必须选用那些结构强度高而密封性能好的金属及其复合类垫片。建议：

① 优先选用双金属自密封波齿复合垫片，其次柔性石墨金属波齿复合垫片。

② 也可选用缠绕式垫片，但建议限于在中小规格平面法兰上选用带内外环型缠绕垫。

③ 如果选用金属平垫建议仅用于温度、压力等操作工况稳定的小规格法兰上。不推荐在大直径的容器、换热器等法兰上使用。

（3）根据使用要求的指标有较为严格的场合选用

使用者对法兰连接的要求，包括要达到密封的程度，寿命长短、安全可靠性、使用安装上的难易、对工艺流体介质的污染、以及对周围环境的污染等有所特定的场合，选用垫片时应对这些要求给予特别对待。

① 根据对密封性的要求选用

试验研究表明各种垫片所能达到密封的程度是不同的，例如铁包垫片的密封性能指标只能达到 $1\times10^{-2}$ $cm^3/s$ 水平，石棉橡胶板的密封性能指标只能达到 $1\times10^{-3}$ $cm^3/s$ 水平，而像双金属自密封波齿复合垫，柔性石墨金属波齿垫，缠绕式垫片等的密封性能指标都能达到 $1\times10^{-4}$ ～$1\times10^{-5}cm^3/s$ 水平。因此如果法兰联接对垫片的密封性能指标有所要求时就必须选择那些能满足其密封性要求的垫片。（石化行业对垫片的密封性能指标要求达到 $1\times10^{-4}$ 水平以上）因此，对密封性要求较高的场合就不能选用密封指标不符合要求的（诸如石棉橡胶板、无（非）石棉橡胶板、铁包垫）垫片

广州市东山南方密封件公司

② 根据对密封使用寿命的要求选用

垫片的密封寿命在很大程度上影响到设备的使用周期长短。对设备使用周期有较长预期的应该选用那些从材料到结构构成上都能具有较好应力松弛性能的垫片。建议选用双金属自密封波齿复合垫，柔性石墨金属波齿垫，缠绕式垫片等金属与非金属复合构成的垫片。

③ 根据对安全可靠的要求选用

不同类型的垫片其安全可靠性也有所不同。在高温高压、易燃易爆和有毒介质的场合，应选择那些安全可靠性高的垫片。仅以安全可靠性而言可以选用金属构成的垫片（如金属环垫、齿形垫或齿形组合垫等），但综合密封性能的其他因素选用金属与非金属复合构成的垫片（如双金属自密封波齿复合垫，柔性石墨金属波齿垫，缠绕式垫片等）应更为合适。不推荐那些安全可靠性差的垫片例如纯石墨垫片、普通石墨复合垫（高强石墨垫）等。

④ 根据对使用安装的要求选用

垫片的使用安装是否方便和难易也会影响到垫片的选择，特别是大尺寸法兰联接应选用那些整体性好的垫片，以方便安装。仅以安装方便而言，可以整体金属构成的垫片（如金属环垫、齿形垫或齿形组合垫等），但综合密封性能的其他因素选用双金属自密封波齿复合垫片、柔性石墨金属波齿复合垫片等更为合适。不推荐选用整体性不好、容易松散溃坏的缠绕式垫片。

④ 根据对工艺介质的污染、以及对周围环境的污染的要求选用

对工艺流体介质要求洁净的场合应首选聚四氟乙烯材料构成的平垫，包覆垫。在温度压力较高的情况下可采用对介质不污染材料填充的双金属自密封波齿复合垫片、波齿复合垫片或缠绕式垫片。

石棉类材料对环境的污染已人所共知，因此在垫片选用上应不用或尽量少用这类垫片。

## （四）确保法兰连接密封的必要条件

**1. 选择合适的垫片**

所谓选择合适的垫片是指所选的垫片首先要能满足其应用场合下的性能要求，包括其密封性、密封寿命、安全可靠性，环境适应性，运输安装性等要求，然后在此前提下再考虑其经济性。

**2. 重视垫片产品质量**

由于垫片供应商的技术、工艺和生产水平和管理的差异，即使是根据相同的产品标准生产但其质量也会千差万别，特别是对如波齿垫这种产品，其结构参数在产品标准中并无规定而是由生产厂自行设计的产品，产品的质量和性能完全取决于生产厂的设计技术水平。因此，对于在产品标准中具有性能指标要求的产品（如波齿复合垫和缠绕垫等）用户可以要求生产厂商提供有效的产品检测报告作为产品质量符合标准要求的证明，同时应考察生产商的资质、产品研发设计能力、生产技术水平、生产设备条件和管理水平等，以获得能满足要求的高质量产品。

**3. 正确安装和使用垫片**

垫片的使用安装应根据实际情况制定相应的安装使用规范，包括：

（1） 安装前应对法兰连接的各相关元件（如法兰、螺栓和垫片等）进行检测是否符合质量的要求。特别是对已经使用过的法兰、螺栓更应仔细检查。法兰表面旧必须清理干净，



广州市东山南方密封件公司

确保表面无影响密封性能的缺陷。

（2）由于使用过的旧垫片已经丧失了原有的压缩—回弹性能因而无法确保其密封性能，因此应重新更换新的垫片。即使是新垫片，一经安装并被螺栓上紧至预紧状态但因某种原因而卸下的情况下也不建议重新安装使用，因为此时的垫片经此前的安装预紧已丧失其对法兰表面表面不平度和粗糙度等加工缺陷的补偿能力，因而将难以确保垫片符合密封性能的要求。

（3） 针对具体法兰连接应预先按规定确定螺栓的预紧负荷进行安装上紧，特别是重要设备应采用相关上紧设备并确保螺栓达到预定的负荷。

（4） 针对具体法兰连接制定螺栓上紧程序，包括上紧顺序和多次上紧的程序，以确保垫片各处受压均匀有效。应特别注意的是螺栓不能采用一次上紧的方法进行安装，否则会因垫片应力分布不均而严重影响其密封性能。

**4. 特殊情况应慎重处理**

（1）关于采用碟形弹簧装置

① 由于碟形弹簧具有高负荷-变形的特点，因而在某些法兰联接中由于各种原因（诸如使用工况的波动尤其是温度的激烈波动或垫片的应力松弛等）造成垫片应力降低而影响垫片密封性能无法密封的情况下，可考虑采用加装碟形弹簧装置方法来补偿垫片的弹性不足，以保持达到密封要求的垫片应力。但因增加碟形弹簧补偿装置成本较高，尤其是高温碟形弹簧价格昂贵，应慎重选用。

值得注意的是，对是否需要采用碟形弹簧补偿装置时首先要对法兰密封的失效要进行具体分析，确认密封失效的真正原因是否确实因使用工况恶劣引起或垫片选用不当所致。随着垫片密封技术的进步，目前国内已研制开发了诸如双金属自密封波齿复合垫片的高性能垫片产品。近十年来，我公司的双金属自密封波齿复合垫片已在很多工况恶劣场合获得应用，很好地解决了过去用户认为需要采用碟形弹簧补偿装置才能解决的密封难题。（可参看我公司关于双金属自密封波齿复合垫片的应用实例）

因此，建议在法兰连接使用工况较为苛刻场合可以优先选用新一代高性能双金属自密封波齿复合垫片产品。只有在选用上述垫片仍然不能获得令人满意的密封效果而确实需要时再使用碟形弹簧装置，毕竟采用碟形弹簧附加装置的成本实在太高了。

② 应特别注意并非所有泄漏问题都能通过加装碟形弹簧可以解决的。碟形弹簧可以补偿垫片的平均应力，但不能补偿垫片的局部应力不足。因此，碟形弹簧可以解决哪些因平均应力不足而产生的泄漏，但不能解决那些因宏观变形过大而引起的泄漏问题。（参看前面双金属自密封波齿复合垫片性能特点部分内容）。

建议在哪些使用工况苛刻的情况下使用双金属自密封波齿复合垫片仍不能获得令人满意的密封情况下可以进一步加装碟形弹簧附加装置来解决其密封难题。

（2）加强用户与生产厂商的联系是解决密封难题的好方式

由于法兰连接的使用工况千差万别，对那些使用工况条件苛刻而又重要的设备连接来说，要获得良好密封往往是相当困难的，而且处理不好甚至会引发事故。这类问题的解决不仅需要从技术上采取各种措施，更需要使用方与供货方等多方的密切合作。因此，对这类特殊情况的处理必须慎重，建议多与生产厂商联系解决。如果需要甚至可以由供应商针对具体工况进行特殊设计和生产供货。

广州市东山南方密封件公司

### （五） 垫片选用一般程序

**1. 根据使用场合和工况以及密封的要求确定垫片的种类和材料**

**2. 根据法兰的联接型式确定垫片的型式**

（要特别注意缠绕垫型式的选用）

**3. 根据法兰的通径和压力按垫片尺寸系列标准选择具体垫片尺寸**

（要特别注意垫片厚度与榫槽法兰或凹凸法兰型式的配用）

**4. 非标或特殊情况可按要求与生产供应商联系进行特殊设计**

## 五. 容器和换热器等大型设备法兰连接密封特性和垫片选用

### （一）大型设备法兰连接及其密封特性

大型石化装置的设备其直径通常都在 DN1000～2000,有些甚至达到 4000mm。设备的大型化和高参数对法兰连接的垫片提出了越来越高的要求。实际上，一直以来法兰的密封难点更多的是集中在大直径的法兰上。特别是石化系统，长期以来不少装置的换热器和容器法兰密封问题相当突出，直接影响到装置的生产，成为生产安全的隐患。相同条件下，大法兰比小法兰更难密封的原因是大尺寸法兰表面容易产生更大宏观变形（表面不平度或波纹度）和粗糙度：

**1. 在生产制造过程中法兰表面加工质量难以保证，从而存在较大的粗糙度，法兰表面更容易形成不同程度的宏观不平度。**

**2. 在各受力元件的作用下法兰容易发生变形或扭曲。**

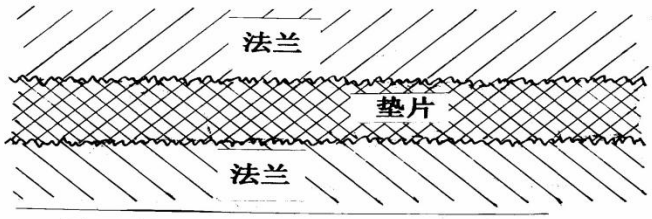
**3. 在操作状态下，法兰由于压力和温度的作用下也更容易变形甚至扭曲。**

研究分析垫片被压缩变形情况可知，法兰表面的宏观不平度会直接影响到法兰表面与垫片相接触的各点的压缩应力（压缩变形）的均匀性。法兰表面突出部分的压缩应力（压缩变形）要比凹下部分大，因而在法兰表面存在宏观不平度（即变形）的情况下垫片应力的分布是不均匀的。法兰表面的宏观不平度越大，其不均匀的程度就越大。当法兰表面凹下部分的垫片压缩应力小于密封所需的应力时，泄漏就会从此处发生。因此，只有在法兰和垫片相接触的表面各点通过垫片的压缩变形获得足够的补偿并达到密封所需的应力时才能确保连接密封不漏。如下图所示，图一是垫片在理想平面上受压缩的情况，其压缩应力是均匀的。图二是垫片在存在宏观不平度的情况下受压缩的情况。由于各处压缩量不同，因而其压缩应力也不同。

由此可见，要使大尺寸法兰连接获得良好的密封，垫片的压缩变形补偿能力就显得特别重要。从弥补法兰表面的粗糙度和宏观不平度（变形）的角度，垫片的压缩变形越大就越有利于密封。因此选择用于大尺寸法兰的垫片应以其是否具有较大的压缩变形能力作为主要依据。

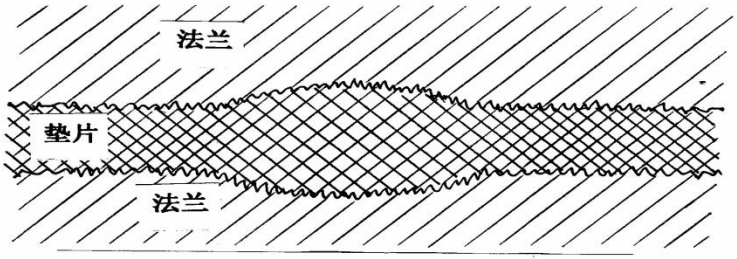
广州市东山南方密封件公司

垫片在法兰面上的压缩变形和压缩应力




图一 垫片在理想平面中均匀受压缩

垫片压缩变形（应力）＝平均压缩变形（应力）




图二 垫片在宏观不平表面中非均匀受压

垫片的局部压缩变形（应力）≠平均压缩变形（应力）

### （二）解决大尺寸法兰连接密封的途径

**1. 选用大压缩量的垫片，以提高其对法兰表面粗糙度和宏观不平度（变形）的补偿能力来达到密封。**

**2. 选用具有能自动补偿变形能力的“压力自密封”的垫片－双金属自密封波齿复合垫片 。**

由于双金属自密封波齿复合垫片是按“压力自密封”设计的。在操作情况下介质进入双金属之间并分别压向上下金属，压力的无处不在以及压力的追随性使石墨受压缩趋向于更均匀，因而达到自动补偿的目的。

### （三）大直径法兰垫片的选用建议

1. 一般的非重要场合的低压大直径法兰用垫片可选用柔性石墨复合垫片。

应特别注意的是，为了提高其对法兰表面粗糙度和宏观不平度（变形）的补偿能力，确保密封，应采用足够厚度的垫片，必要时应按法兰的表面粗糙度和宏观不平度（变形）的大小进行设计计算以确定垫片的厚度。

如果法兰连接装置对密封性能和安全性要求较高或者使用压力较高的也可以选用柔性石墨金属波齿复合垫片，或者选用性能最为优秀的双金属自密封波齿复合垫片。

2. 中等尺寸的平面（突面）法兰可以选用带内外环的缠绕式垫片，但选用柔性石墨金属波齿复合垫片或双金属自密封波齿复合垫片会更好。

3. 对密封性有较高要求的大直径法兰用垫片可选用柔性石墨金属波齿复合垫片，但选用双金属自密封波齿复合垫片会更好。

4. 高温高压场合、温度压力变化的场合或对密封性要求较高的重要场合的大直径法兰用垫片应选用双金属自密封波齿复合垫片。

【详见附录资料“压力容器用大直径法兰连接密封垫片的选用”和“换热器法兰连接用密封垫片的选用”】

### （四）特殊使用工况场合下的大直径法兰密封问题及其解决方案

1. 在法兰宏观变形较大的情况下可采用经特殊设计的大补偿量的厚垫片。

2. 在温度波动特别激烈的场合可采用双金属自密封波齿复合垫片加碟型弹簧补偿装置的解决方案。

**广州市东山南方密封件公司　　2021.5**

**（公司内部资料，版权所有，请勿翻印）**

广州市东山南方密封件公司

## 参考资料

**（一） 柔性石墨金属波齿复合垫片及其应用　(公司内部资料)**

（ 广州市东山南方密封件有限公司 总工程师　 吴树济 高级工程师）

**（二）波齿复合垫片的设计、性能及其质量　（公司内部资料）**

（ 广州市东山南方密封件有限公司 总工程师　 吴树济 高级工程师）

**（三） 新型双金属自密封波齿复合垫片结构及其性能特点**

《石油化工设备技术》2012. 第 33 卷第 5 期

（广州市东山南方密封件有限公司 总工程师　 吴树济 高级工程师）

（中石油总公司炼油化工分公司装备管理处 高级主管 高俊峰 高级工程师）

**（四） 新型双金属自密封波齿复合垫片的研制开发**

《化工机械》2012. 第 39 卷第 4 期

（ 广州市东山南方密封件有限公司 总工程师　 吴树济 高级工程师）

**（五） 新型双金属自密封波齿复合垫片自密封性能试验 （公司内部资料）**

（ 广州市东山南方密封件有限公司 总工程师　 吴树济 高级工程师）

**（六）新型双金属自密封波齿复合垫片的应用—**

《石油化工设计》2012.第 29 卷第 2 期

（广州市东山南方密封件有限公司 吴树济　钟海强 ）

（中石化金陵分公司　杨树人　黄鑫 ）

**（七）双金属自密封波齿复合垫片选型资料　（公司内部资料）**

（广州市东山南方密封件有限公司）

**（八）压力容器用大直径法兰连接密封垫片的选用**

《压力容器》　2012，第 29 卷第 10 期

（中石油总公司炼油化工分公司装备管理处 高级主管 高俊峰 高级工程师）

（广州市东山南方密封件公司　　总工程师 吴树济 高级工程师）

**（九）换热器法兰连接用密封垫片的选用**

《石化设备检修技术》 （文稿）

（ 广州市东山南方密封件有限公司　　吴树济　　吴凯珺）

**（十）双金属自密封波齿复合垫片应用资料汇编 （公司内部资料）**

（广州市东山南方密封件有限公司　总工程师　　吴树济 高级工程师）

广州市东山南方密封件公司