法兰连接密封垫片的特性及其选用

吴树济　　高级工程师
（广州市东山南方密封件有限公司）

法兰连接密封垫片是工业生产装置中应用最广的配件之一，随着大型石油化工企业的发展，设备对密封垫片的性能也不断提出越来越高的要求。石油化工生产实践表明，设备和管道的密封失效是影响装置安全和生产的主要问题之一。但随着密封技术的发展，在密封失效的同时，新的密封材料和结构的垫片也不断涌现，因此更好地了解垫片材料的特性，以便根据自身生产的需要选择合适的垫片，不仅是现代工业生产管理所必须，而且是使企业能“安全、稳定、长周期、满负荷、优质”生产的保证。

本文在介绍各种垫片的性能特点和适用范围的基础上，提出垫片选用方面的准则和建议，供有关人员在设备维修时参考。

一．主要垫片材料的结构性能特点及适用范围

1．石棉橡胶板

（1）结构特点

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。在石油与炼化装置上多数使用的是经硫化处理的耐油石棉橡胶板。石棉橡胶板是由石棉纤维、胶料和其它填充材料经混炼加热和与辊压而成。

（2）性能特点及其应用

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，高于此温度时石棉纤维内的结晶水会分解而失去强度），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，价格便宜，因此，一直以来是应用较广的传统密封材料。

选用石棉橡胶板作为垫片有两个问题应着重考虑。一是这种材料密封性能并不高（其密封性通常在1×10^{-2} ～1×10^{-3} Cm/N/S左右），这种垫片在使用时很容易发生应力松弛现象，而在高温作用下其胶料成分会发生变化而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。二是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，因此从环保的角度其应用应加以限制。随着人们对设备密封要求的提高以及密封技术的发展，石棉橡胶材料已逐步为其他新材料所代替，使用量正逐渐减少。一般可应用于温度、压力不高的非重要设备场合。

2．非石棉橡胶垫

（1）结构特点

非石棉橡胶垫片是由于石棉材料因环保问题而逐渐被禁用淘汰而出现的新型密封材料。它可由除石棉以外的各种有机或无机纤维、胶料和其它填充材料经混炼加热和与辊压而成。随着构成的纤维材料的不同，其耐温耐压等性能也有所变化。

（2）性能特点及其应用

广州市东山南方密封件公司

非石棉橡胶垫片的特性总体上类似于石棉橡胶板垫片，但在耐温性能上则远不及石棉橡胶板高，即使采用“凯夫拉”这样高等级纤维制造，其最高使用温度也不超过350℃。在应用上，作为符合环保要求的产品，非石棉橡胶板垫片主要是作为石棉橡胶板垫片的替代品，用于温度和压力不高的一般场合使用。

3. 铁包垫

（1）结构特点

铁包垫通常是在石棉橡胶板、非石棉橡胶板或柔性石墨板等芯板的基础包覆镀锌铁皮或不锈钢薄板构成的。这是一种较早使用于高温场合的垫片，制作上也不困难。

（2）性能特点及其应用

由于石棉橡胶板、非石棉橡胶板或柔性石墨板为金属所包覆，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。有了石棉橡胶板、非石棉橡胶板或柔性石墨板作为铁包垫的内在芯板材料，与其他金属平垫相比有一定弹性，因而在早期高参数设备中使用较为普遍。

但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1×10^{-2} Cm^3N/S）。这是因为从密封机理看，它实际上是金属与金属的接触密封，在这种状态下，要达到良好的密封性就必须施加相当高的密封比压，而在这样高的比压下，作为填充材料的芯板往往已被压坏而失去作用，另一方面，在使用过程中，各种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。因此，在高参数重要场合已逐渐为其他性能更好的垫片所取代。

这种垫片一般推荐用于对密封性要求不高的场合，如用于温度较高（根据芯板材料）、压力较低而对密封性的要求不高的非重要场合。

3. 聚四氟乙烯垫片（平垫、包覆垫）

（1）聚四氟乙烯平垫片

聚四氟乙烯板制成的垫片具有良好的密封性能、尤其是优秀的抗各种介质的腐蚀性能和洁净性能使它在要求耐腐蚀和洁净场合获得广泛的应用。但由于聚四氟乙烯材料的“冷流”特性影响了其密封性，因此一般用于温度为-196～250℃、压力较低的场合。

（2）聚四氟乙烯包覆垫片

聚四氟乙烯包覆垫是在诸如石棉橡胶板、非石棉橡胶板或柔性石墨板等芯板上包覆聚四氟乙烯薄板构成。与纯聚四氟乙烯板制成的垫片相比，包覆垫的芯板改善了垫片压缩-回弹性能从而提高了垫片密封性能，纯聚四氟乙烯的包覆层仍然保持了原来优秀的抗各种介质的腐蚀性能和洁净性能，因此总体上改善了垫片的密封性能和使用寿命。

4. 高强石墨复合垫

（1）结构特点

高强石墨复合垫片是以经冲刺的金属薄板为骨架，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，但起密封作用的仍然是柔性石墨材料本身。

（2）性能特点

广州市东山南方密封件公司

高强石墨复合垫具有柔性石墨的一切优良特性，因此它具有较好的密封性能，能耐很高的温度，因而可以作为非石棉密封材料取代传统的石棉橡胶板。但由于作为主要构成材料的柔性石墨强度较低，一旦出现泄漏就很快扩大形成大的事故，因而在高压、重要场合下使用其安全性不够，所以仅推荐用于一般参数下的非重要场合，或高温低压非重要场合下使用。

5.金属平垫（齿形垫、齿形组合垫）

（1）结构特点

金属平垫包括由各种金属材料构成的平垫和齿形垫或齿形组合垫。

金属平垫结构简单，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。

齿形组合垫通过在齿形垫的表面复合一层膨胀石墨材料，又进一步提高了垫片的密封性能。

（2）性能特点及其应用

金属平垫（齿形垫、齿形组合垫）由整体金属构成，能耐高温高压，安全性高，在高应力状态下具有良好的密封性能，特别是齿形组合垫较之一般平垫和齿形垫具有更好的密封性，因而是过去高温高压场合应用较多的一种垫片。

但这种类垫片的最大缺点是垫片本身没有什么弹性，即使在高应力状态下其压缩变形量和回弹量都极小，既不利于垫片对法兰表面粗糙度和宏观不平度的补偿，也容易在操作状态下受法兰轴向负荷的影响而使垫片的应力急剧下降，使密封性失效。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就往往出现泄漏。此外它对法兰表面的加之精度要求比较高。螺栓予紧力也较大。这种垫片推荐用于法兰尺寸不大、设备运转时温度压力等参数较为稳定的高温高压场合。

6. 金属环垫

（1）结构特点

金属环垫通常包括八角垫和椭圆垫等。这种垫片系整体金属加工而成。

（2）性能特点及其应用

能耐高温高压，安全性高，能形成高比压的金属线密封，而且具有一定弹性和压力自密封作用，能适应设备参数变化的场合使用。

但这种密封结构较复杂，不仅法兰表面要求加工出高精度的梯形槽，而且垫片本身的制造精度要求较高，因而密封连接的成本也较高。在实践中还发现法兰表面的梯形槽不仅削弱了法兰的强度，其根部系应力集中的部位，还会造成法兰的整体损坏，影响法兰连接的安全性。此外这种垫片要求安装技术高，安装不好就难以达到预期密封效果。

这种垫片一般可用于密封要求较高和参数变化的高温高压场合。

7. 缠绕式垫片

（1）结构特点

缠绕式垫片在30年代国外就已采用，我国六十年代以后开始大量生产和推广使用，早期缠绕式垫片系以石棉作为填充材，由于石棉填充的缠绕式垫片其包括密封性在内的综合性能均不如柔性石墨，而且石棉系致癌物，因而现在的缠绕式垫片多以膨胀石墨作为填充材料。

（2）性能特点及其应用

广州市东山南方密封件公司

柔性石墨缠绕式垫片具有良好的密封性能，能适应高温高压参数的要求，其回弹性也较好，在温度和压力变化的场合仍能保持较好的密封性（其密封性指数通常可达 1×10^{-4} Cm^3N/S），系以往使用较为普遍的垫片。

但是，由于结构和制造上的原因，缠绕式垫片的缺陷也是很明显的。这就是人们通常所说的“散架”和压溃（或称“失隐”）问题。所谓“散架”包括两种情况：一是在制造、运输和安装过程中垫片发生散开而损坏。这是由于缠绕式垫片结构上只是通过缠绕互相咬合成形，使垫片无法形成整体牢固的结构，因而很容易散开损坏，给垫片的运输和安装造成困难，这种情况尤以大规格垫片（如冷换设备上的垫片）为甚。二是缠绕式垫片在使用过程中受到很大的压紧力，外层用以固定的焊点在周向力的作用下很容易发生拉脱损坏，使整个垫片“散架”最终导致密封失效。由于周向应力的大小与直径成正比，垫片的规格越大，拉脱损坏就越易。

所谓“压溃”（或“失稳”）是垫片在使用时受很大的压紧比压，填充物（柔性石墨）受压产生的内应力向内径方向作用于内层钢带，使钢带受到外压力作用。当外压力超过一定值时，由钢带围成的钢带圈犹如薄壁容器受过分外压力作用而失去稳定性，局部地方向内凹陷，使垫片发生损坏，导致密封失效。压紧力越高，垫片尺寸越大就越容易发生“压溃”。从现场调查看，不少用于冷换设备的缠绕式垫片经使用后拆开法兰时发现垫片已被压“散架”或“压溃”，因而泄漏往往就从这些部位发生。

柔性石墨缠绕式垫片适应性比较广，可用于各种参数场合，包括在参数变化的场合下使用，但为了避免其“散架”和“压溃”应尽量采用带内、外加强环的缠绕式垫片作为大规格设备，如冷换设备上的垫片。选用缠绕式垫片时必须对其“散架”和“压溃”的问题给予足够的重视和考虑。在综合考虑各种因素的情况下决定其取舍。

近些年出现以能耐高温的无机材料作为填充材料的缠绕式垫片。例如使用云母作为填充材料，其最高使用温度可达 800℃，而使用蛭石作为填充材料，其最高使用温度可达 1000℃以上。

8. 波齿复合垫片

（1）结构特点

波齿复合垫片是九十年代以来才发展起来的新一代法兰密封垫片，它是由广州市东山南方密封件公司吴树济高级工程师发明和研制的专利技术产品。这种垫片的主体是特殊设计的波齿状金属骨架，在此骨架基础上，复合适当厚度的柔性石墨材料，最终构成整体结构的垫片。

（2）性能特点及其应用

由于波齿复合垫片具有金属线密封和非金属柔性石墨密封的双重作用，因此具有非常优异的密封性，（其密封性指标高达 1×10^{-5} Cm^3N/S）。

波齿复合垫片在法兰压紧下，不仅被封闭的柔性石墨被高度压缩，而且金属骨架产生弹性变形，使之成为具有高弹性的垫片，因而不仅能适应参数变化的场合而且其使用寿命长，能长期保持良好的密封性能。

波齿复合垫片的金属骨架是整体金属制造的，其柔性石墨材料在使用时为坚固的金属骨架和法兰面所封闭，因此不必担心柔性石墨材料会被高压流体冲走，也不必担心会像缠绕式垫片和其它垫片那样被压坏，可见波齿复合垫片实际上具有与整体金属垫片（如金属平垫、齿形垫等）同

广州市东山南方密封件公司

样的安全可靠性。

由于波齿复合垫片系带金属骨架的整体结构，在运输和使用安装时不必担心像缠绕式垫片那样会“散架”，而且垫片厚度适当、安装方便，可避免缠绕式垫片通常因厚度较大而容易产生压偏的现象。

波齿复合垫具有广泛的适应性，由相应的金属骨架材料制造的波齿复合垫可用于包括高、低温（-200℃～+1000℃）和高、低压（真空～25.0Mpa）以及包括大多腐蚀性流体在内的各种场合。近些年我公司又研制了采用耐高温的柔性石墨和云母、蛭石等无机材料作为复合材料，进一步提高了垫片的耐温性能，例如采用蛭石材料作为复合材料，最高使用温度可达1000℃。

波齿复合垫片目前已在石油、化工、电力等工业装置上得到广泛应用并获得很好的效果，为用户解决了不少过去使用其它垫片而长期存在的泄漏难题。因而成为综合性能最好的新型密封垫片之一。

由于波齿复合垫片的性能优异、安全可靠、适应性广、价格适中而广泛用于各种参数场合，包括高温高压和参数变化的场合，特别是用作冷换设备等大型设备的垫片，其优越性更为突出。

目前存在的突出问题是垫片的质量参差不齐。尽管已有产品国家标准，但标准对产品的结构参数未作具体规定而是由生产厂家确定，因此不同生产厂家因设计、生产技术水平和工艺条件所限，产品性能质量也会不同，选购时应予以特别关注。

9. 双金属自密封复合垫片

（1）结构特点

双金属自密封波齿复合垫片是广州市东山南方密封件有限公司董事长吴树济高级工程师于1990年代末发明的专利产品。它是由两片金属叠合后在其外圆周经融合将两者组合在一起，然后在其上下表面加工成波齿状的圆弧型沟槽，由此构成带同心圆弧型沟槽的波齿状金属骨架，最后在金属骨架表面复合上适当厚度的柔性石墨而构成双金属自密封波齿复合垫片。该垫片的最大特点是它与众不同的“自密封”性能。由于它是双层骨架结构，使用时介质压力进入两金属间的间隙并形成向外作用力，此力在垫片和法兰表面形成与介质压力相当的新增垫片应力（此即为由介质压力形成的自密封应力），此力随介质压力的存在而存在，而且随压力的增大而增大，因而它的密封性能较之其它普通垫片更好，更有保证。双金属自密封波齿复合垫片除了具有与柔性石墨金属波齿复合垫片同样的密封性能优异、压缩回弹性好、密封寿命长、使用时不会被压溃，安全可靠、安装方便、适应性广等一系列优异性能外，更由于它的“自密封性”而成为最新一代法兰连接的高性能的垫片。特别适用于对管道和设备法兰联接的密封性能和寿命要求较高的石油化工及火力发电等大型现代装置的管道和设备上是使用。

（2）性能特点及其应用

（1）“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，最高可以达到介质的压力值。因此，在垫片的预紧应力不管是因垫片本身的特性（如应力松弛）还是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。甚至在螺栓初始预紧应力接近消失的极端情况下，由于其**“压力自密封”**作用所形成的相当于介质压力的垫片应力的存在，垫片仍能保持一定密封性。

（2） 优异的密封性

双金属自密封复合垫片表面采用众所周知的密封性能优异的柔性石墨作为复合层，因而其密封性能特别优秀。特别是在垫片骨架是波齿状结构时，正如以往的柔性石墨金属波齿复合垫片那样，其金属齿峰更起到多道金属线密封作用，而圆弧形沟槽上填充的柔性石墨材料不仅具有很好的密封贴合性而且能很好地补偿法兰表面的微观缺陷，因此垫片具有金属线密封和柔性石墨密封的双重作用，使它在较低的垫片应力下即能达到极高的密封性。

（3）安全可靠性高

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。特别是**双金属自密封波齿复合垫片的**波齿状结构能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垫片如齿形组合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”。

（4） 使用安装方便

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”，而且它具有多种定位方式使它安装极为方便。

（5） 适应性广

双金属自密封复合垫片既可用于低温和高温，也可以用于低压和高压，而且特别适用于温度和压力波动的场合。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与波齿复合垫片同样具有广泛的适应性，由相应的金属骨架材料制造的**双金属自密封复合垫片**可用于包括高、低温（-200℃～+1000℃）和高、低压（真空～25.0Mpa）以及包括大多腐蚀性流体在内的各种场合，而且性能更好。与波齿复合垫片一样，近些年我公司又研制了采用耐高温的柔性石墨和云母、蛭石等无机材料作为复合材料，进一步提高了垫片的耐温性能，例如采用蛭石材料作为复合材料，最高使用温度可达1000℃。

双金属自密封复合垫片目前已在石油、化工、电力等工业装置上得到广泛应用并获得很好的效果，为用户解决了不少过去使用其它垫片而长期存在的泄漏难题。因而成为综合性能最好的新型密封垫片之一。

二．垫片的选用

1. 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) 垫片性能

这是最主要的要求，它包括：

a、密封性与使用寿命；

b、对温度、压力和介质适应性；

广州市东山南方密封件公司

c、安全可靠性；

d、使用方便性。

(2) 相容性

包括系统相容性和环境相容性，前者系指垫片材料对系统介质的相容性，后者系指环境对垫片的要求。

(3) 经济性

在满足使用要求的前提下对经济性进行总合考虑。

2. 用户选用垫片的准则

（1）根据法兰的连接型式确定垫片的基本类型。

（2）根据使用介质的性质，参数（温度和压力）及要求，结合垫片的特性确定垫片的种类和材料。介质性质包括易燃易爆性、毒性、腐蚀性、渗透性、溶胀性和辐射性等。

使用参数主要系指介质的温度、压力及其操作波动情况、系统振动情况等。

使用要求指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。

（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。

3. 垫片选用的一般建议

下面是根据上述的垫片材料特性和垫片选用方面的准则提出垫片选用的一般建议，供参考。

（1）高温高压蒸汽和易燃、易爆、有毒介质等场合必须确保法兰联接的密封性能良，安全可靠。因此，在垫片的选用上应采用性能优异的金属或半金属垫片如双金属自密封波齿复合垫片，柔性石墨金属波齿复合垫，缠绕式垫片、齿形组合垫、金属环垫等。其中双金属自密封波齿复合垫片的综合性能最好，可作为首选产品。其次可选用综合性能较好而价格适中的柔性石墨金属波齿复合垫片。特别是容器、换热器等大尺寸法兰尤其应优先采用双金属自密封波齿复合垫片和柔性石墨金属波齿复合垫片。如果选用缠绕式垫片则应是带内外加强环的。金属平垫或齿形垫只能在操作参数无波动的情况下使用，但在实际生产过程中参数不波动的情况是很少的。金属环垫理论上性能较好，但由于实际上受制造、安装等因素影响很大，往往难以获得满意的效果，而且成本高，选用时应慎重考虑。

（2）对温度、压力有变化的场合或存在振动，冲击的场合（如压缩机、泵等动设备的法兰连接等）应采用具有良好回弹特性的垫片，如双金属自密封波齿复合垫片、柔性石墨金属波齿复合垫或

缠绕式垫片（缠绕式垫片应系带内外加强环的）。由于双金属自密封波齿复合垫片具有“压力自密封”性能，因此应作为该场合下的首选垫片。

（3）渗透性介质（如热媒（导热姆或联苯导热油）加热系统）不推荐石棉橡胶板等含纤维材料作为密封件，应采用防介质渗透性强，不会溶胀和膨胀的柔性石墨材料为主体的密封件，如双金属自密封波齿复合垫片，波齿复合垫，缠绕式垫片或高强石墨复合垫等。由于热媒介质渗透性强，对密封性要求很高，应首选高性能的双金属自密封波齿复合垫片以确保其密封性的要求。

（4）在石油化工工业中带一般性腐蚀性介质的场合可采用不锈钢骨架的波齿复合垫或缠绕式垫片，要求较高的重要场合可采用双金属自密封波齿复合垫片。压力不高的场合亦可选用高强石墨复合垫。对强腐蚀性介质的场合下可采用聚四氟包复垫片或平垫。

（5）以石棉为基材的密封材料如石棉橡胶板等因环保要求应尽量少用或不用。该类材料性能往往不能满足使用要求，容易造成事故隐患，故一般只能用于低参数不重要场合如普通水，汽和油品等。对已往较多使用石棉橡胶板的低参数不重要场合，建议采用高强石墨垫代替，这种垫片虽然价格上比石棉橡胶板稍贵些，但性能好得多，系目前使用较为普遍的石棉橡胶板的代用材料。非石棉橡胶板是从环保的角度作为石棉橡胶板的代用材料，但目前价格较高，尤其进口材料成本很高，一般情况下不推荐采用。

（ 广州市东山南方密封件有限公司 内部资料 版权所有 ）

2022年修订

广州市东山南方密封件公司

广州市东山南方密封件公司