《石化设备检修技术》（2013）（刊文）

换热器法兰连接用密封垫片的选用

吴树济　吴凯珺

（广州市东山南方密封件有限公司，510445）

摘要：换热器法兰连接垫片的密封问题一直是影响石油化工装置安全和连续生产的重要因素。本文在分析换热器法兰连接密封特点的基础上，结合近些年来随着密封技术的发展而出现的新型密封垫片产品，针对石油化工装置的具体情况提出了换热设备法兰连接用垫片的选用建议，供相关人员参考。

长期以来，法兰连接的泄漏是困扰石油化工装置正常生产的主要问题之一。实际情况表明，法兰连接的密封难点更多的是集中在像换热器这样的大型设备上。随着各种装置的大型化和高参数，设备对法兰垫片的密封性要求越来越高，致使垫片出现泄漏的情况越加严重。换热器是石油化工装置中普遍使用的重要设备。换热器垫片的泄漏不仅影响装置的正常生产，更是危及装置、人员的安全。因此，针对换热器法兰连接的特点，分析研究其产生泄漏的原因，结合垫片密封技术的新发展和新产品，从垫片的正确选用方面着手加以解决应是合符实际的对策。

一．换热器法兰连接密封的特点［1］

1．换热器法兰相对于管法兰其尺寸普遍较大，大型石化装置的换热设备其通径往往在DN1000～2000，甚至更大。由此造成法兰普遍存在如下问题：

（1）大法兰在加工过程中其表面质量不容易保证，不仅法兰表面的粗糙度较大而且往往容易形成较大的宏观变形。

（2）大法兰其刚性相对较小，在操作条件下受到诸如介质作用力，温度应力和其他各种各样应力的作用而使法兰密封部位更容易产生宏观变形。

正是存在上述的宏观变形使大尺寸的换热器法兰相比于小尺寸的管法兰更容易出现泄漏。根据以往密封原理，密封是通过螺栓的负荷压缩垫片使其变形致密并填塞法兰表面的粗糙度和不平，从而阻止被密封介质从垫片材料内部的微观间隙和法兰表面通过而达到的。螺栓负荷通过法兰作用于整个垫片上使其变形。但由于法兰表面存在宏观变形，垫片在法兰表面的变形并不均匀一致，法兰表面凹下部分相对于法兰表面其他部分所受的压缩变形较小，因而该处垫片材料内部和与法兰表面间的界面致密性较小，从而容易形成泄漏通道。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使其致密性都达到所要求的情况下才能形成良好的密封。

对诸如换热器这类设备大尺寸法兰而言，所用的垫片必须要有足够的压缩变形量来弥补其表面的宏观不平度才能确保其密封不漏。由此可见，要使换热器法兰连接获得良好的密封，垫片压缩变形的补偿能力就显得特别重要。从弥补法兰表面的粗糙度特别是其宏观不平度（变形）的角度看，垫片的压缩变形越大就越有利于密封。因此选择用

于换热器等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。除了垫片所受的压缩应力外，其变形能力主要取决于垫片的结构形式、材料、尺寸（特别是垫片厚度）等。

2. 换热器的操作条件复杂，不仅温度压力等工艺参数高，而且波动变化大也是造成换热器垫片容易泄漏的重要原因。

操作压力对密封的影响主要体现在其对法兰连接的力与变形协调关系的改变上。在操作状态下由于介质压力所形成的轴向分离力的作用，原来预紧状态下的螺栓力和垫片应力都会发生变化，螺栓力随之增加，而垫片应力则随之下降。这种变化取决于法兰连接各元件的刚度。另一方面，操作温度对密封的影响则主要体现在由于法兰连接中各元件的温度变化不协调而引起包括垫片在内的各元件受力的变化。例如，在设备降温过程中法兰温度下降比螺栓温度快所形成的温差使螺栓负荷减少，垫片应力随之下降而导致泄漏。在已有法兰连接的情况下，上述的垫片应力下降主要取决于垫片本身的压缩—回弹特性。因而，在选择垫片时必须考虑垫片的良好压缩—回弹性能才能确保连接的密封性。

二．换热器垫片的选用

1. 选用垫片的一般性准则

垫片的选择有两种情况，一是从设计的角度进行选择，就是在设备设计时考虑选用垫片。另一种是从使用的角度进行选择，也就是根据已有的设备条件来选择合适的垫片。但不管是那种选择，以下列出的垫片选用的一般性准则仍然是应该遵循的。

（1）选用垫片的性能必须能满足设备要求

设备对垫片的性能要求主要包括：

密封性—这是显然易见的，选择垫片时其密封性必须能满足设备的要求。但有两方面情况值得注意。一是密封是一个相对的概念。对某些设备来说可能对密封性要求并不高，1×10^{-2} cm³(N)/S 的泄漏率就被认为是密封的。但对另一些设备来说，泄漏率必须达到 1×10^{-4} cm³(N)/S 甚至以上才能被认为是密封的。因此垫片的选择应根据设备对密封性的要求进行。另外也要注意，所选用的垫片能否具有设备所要求的密封性能。也就是说，垫片本身所具有的密封性随着垫片的型式、结构、材料等不同而不同。有些垫片的密封性只能达到 1×10^{-2} cm³(N)/S 的泄漏率，而另一些则可达到 1×10^{-5} cm³(N)/S 泄漏率。因此，在以密封性作为性能要求选择垫片时，应首先确定设备的密封性指标也就是容许的泄漏率，然后在此基础上对照垫片本身所能达到的的密封性来选择那些能满足设备密封性的垫片。

密封寿命—这是一个与垫片使用时间相关的性能。垫片的密封寿命是指垫片的密封性能满足设备要求的情况下时间的长短。垫片的密封寿命取决于垫片的型式、结构、材料等，但相对而言，垫片的构成材料是否随时间而发生变化是判断垫片密封寿命长短的重要依据。通常垫片的密封性会随着使用时间的延长而发生变化，但只要这种变化仍然在满足设备密封性要求的范围内，垫片仍然符合寿命的要求。以密封寿命作为性能要

广州市东山南方密封件有限公司

求选择垫片时，首先要确定设备对垫片使用寿命的要求（如设备检修期等），以此为依据对照垫片本身所具有的密封寿命性能来选择相应的垫片。

安全可靠性—垫片的安全可靠性直接影响到设备乃至装置的持续安全生产，因此安全可靠性应作为垫片选择的重要准则予以重视。由于垫片的结构型式和材料不同其安全可靠性会有很大差异，例如一般来说，金属垫片的安全可靠性很高，而非金属垫片的安全可靠性相对较差，金属与非金属材料复（组）合的则于两者之间。

使用安装性—垫片的使用安装性是指垫片在运输和现场安装时是否方便、容易。一般说来，垫片的使用安装性虽然不会直接影响到垫片的密封性能，但如果垫片在运输和安装过程中容易损坏就会延误施工工期，造成浪费。因此在选择垫片时其使用安装性能也应作为选用的因素加以考虑。

适应性—选择垫片应该与介质的特性相适应，应考虑与介质的相容性，耐腐蚀性，还有就是与环境的适应性等。

（2） 选用垫片时经济性的考虑

从控制工程建设或维护检修成本的角度出发，选择垫片时无疑应对其经济性加以考虑。但这里的所谓经济性不仅是指垫片本身的价格成本，而且还包括其他隐性成本。例如选择一个价格相对便宜但性能一般的垫片与选择一个价格稍高但性能更好的垫片相比，前者似乎节约了购买垫片的费用，但如果在往后的安装过程中却容易出现损坏而更换，甚至在使用过程中不能确保密封而需要采取诸如停车更换或现场“打包”堵漏等后续措施进行补救，这时所产生的费用（即所谓隐性成本）显然要比垫片的价格高了不知多少倍，这样的选择是得不偿失的。（事实上，这种事例在很多企业里几乎经常发生，以至不胜枚举）由此可见，即使从经济性来考虑选择后者应该更为明智。因此，选择垫片时其经济性的考虑不应简单化仅考虑垫片本身的价格，而应从密封性、使用寿命、安全可靠性和使用安装性能等各方面加以综合考虑，才能选择出真正符合要求的密封件。

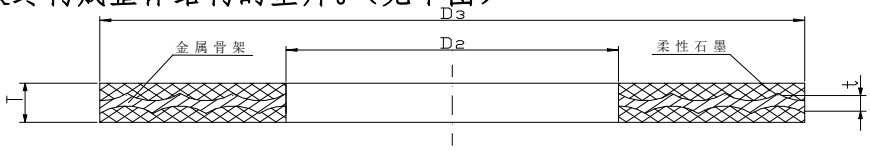
2. 适合用于换热器法兰连接的新型垫片

由于现代石油化工生产装置的大型化和高参数使得包括换热器在内的各种设备对密封垫片的性能提出越来越高的要求。人们不仅千方百计寻求性能更为优良的密封材料，而且力图从结构上加以创新，以获得高性能的密封件产品。近些年来，不仅出现性能极为优异的柔性石墨密封材料，而且出现结构新颖，性能更好的密封件产品。1990年代初期，由本文作者发明和研制生产的专利产品—“柔性石墨金属波齿复合垫片”[2] [3]因结构新颖，性能优异，已成为二十年来广泛用于石油化工各装置的设备普遍使用的密封件并且取得很好的效果而受到广大用户的高度好评。近几年，本文作者又进一步发明和研制生产了性能更加优异的新型专利产品—“双金属自密封波齿复合垫片”，[4] [5] [6]并在近几年推广应用中为解决那些使用其他垫片不能密封的泄漏难题上发挥其独特的作用，从而受到广大用户和设计单位的高度好评和广泛欢迎。

（1）柔性石墨金属波齿复合垫片 [7] [8]

波齿复合垫片系由特殊构造的金属骨架与膨胀石墨材料复合而成。金属骨架上、下

表面开有相互错开的特殊形状的同心圆沟槽，其上复合上一层适当厚度的膨胀石墨材料，最终构成整体结构的垫片。（见下图）



由于复合垫片的金属骨架既系带尖齿、又是波纹状的，故名为波齿复合垫片。使用时由于法兰的压紧，复合在垫片上的石墨材料被压缩进入沟槽，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进一步压紧下产生弹性变形，使膨胀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密闭空间里，由此形成了波齿复合垫片的特有性能，一道道金属骨架的尖齿峰连同被高度压缩的柔性石墨材料构成一道道严密的密封，整个复合垫片实际上具有多道金属密封与柔性石墨材料密封的联合作用。而特殊构造的金属骨架就像弹性元件一样使波齿复合垫片具有良好的弹性。由于波齿复合垫片的特殊构造使之与其他类型垫片相比具有一系列更为优异的性能特点：

优异的密封性—由于波齿复合垫片具有齿形金属密封和非金属柔性石墨密封的双重作用，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)，因此使它具有特别优良的密封性。气密性试验表明，波齿复合垫片即使在35MPa压紧下也能达到极高的密封性(泄漏率可达 10^{-5} cm^3/s 级)。

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石墨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。

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。

使用安装方便—波齿复合垫系带金属骨架的整体结构，在运输和使用安装中不必担心像缠绕式垫片那样会“散架’。此外，波齿复合垫片厚度较薄(通常2～4mm)，在用于凸凹型或榫槽型法兰时可以留出足够深度作为凸型法兰安装时定位用，因而安装方便，能确保安装质量，避免缠绕式垫片通常因厚度较大，影响定位而容易产生“压偏”的现象。

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。

经济性—波齿复合垫片是一种经济型垫片。尤其是在石油化工和电厂中各种油品，蒸汽等非腐蚀性流体场合，采用由碳钢材构成的波齿复合垫代替缠绕式垫片或齿形垫等可为用户节省费用。

波齿复合垫片自90年代初研制生产以来以其独特结构和优异性能很快在石化系统各装置上获得广泛应用。据统计，仅广州市东山南方密封件公司在2000～2009年十年间向43家石化企业供应的波齿复合垫片达120万件，其中用于换热器等大型设备上达到81800件，几乎遍及所有生产装置。

值得注意的是，尽管波齿复合垫片的出现已有多年而且从2003年已制订了国家标准，但市场上的产品的质量良莠不齐，性能差异明显，严重影响到波齿复合垫片的应用。这是因为波齿复合垫片的生产完全不同于其他常规垫片，由于其结构特殊，从金属骨架的设计到石墨填充都需要精心设计并通过试验验证才能使产品达到其优异的性能，如果生产企业没有这方面的设计技术自然无法生产出好的产品。事实上，市场上有不少所谓“波齿垫”其结构与真正的波齿复合垫片的设计相去甚远，其性能也无法达到产品标准规定的要求。因此，在选用波齿复合垫片的同时还应特别注意供应商对产品的技术设计能力和产品质量(用户可通过要求供应商提供波齿复合垫片的性能试验数据加以确定)。

(2) 双金属自密封波齿复合垫片 [9] [10]

与过去传统垫片的“强制密封”不同，双金属自密封波齿复合垫片是按“压力自密封”原理设计的新型垫片。它由两片金属叠合后在其外圆周通过熔焊方法将两者融合在一起而形成整体结构的“压力自密封”金属骨架，然后像柔性石墨金属波齿复合垫片一样，在金属骨架的上下表面加工有特殊设计的波齿状沟槽，此特殊结构骨架的外表面再复合上适当厚度的柔性石墨材料，最终构成了双金属自密封波齿复合垫片。双金属自密封波齿复合垫片的典型结构如图所示。



在外观上双金属自密封波齿复合垫片与过去的柔性石墨金属波齿复合垫片几乎没有差异，两者的安装和预紧也一样，但在操作状态下其工作原理则完全不同。在操作状态下，包括柔性石墨金属波齿复合垫片在内的普通垫片由于介质形成的轴向分离力作用会使垫片原有的预紧力减少，密封能力下降，可能导致密封失效。但对双金属自密封波齿复合垫片来说，操作状态下的介质会渗透进入组成金属骨架的两片金属间的微观间隙内，由于此介质压力的作用使两片金属分别压向上下两法兰面，从而使垫片与上下法兰面上的应力增加，最大可增加至介质的压力值。也就是说，由于双金属自密封波齿复合垫片的“压力自密封”结构，使得垫片避免了普通垫片因介质压力形成的轴向分离力的作用而减少的预紧力的下降，从而使垫片的原有密封能力得以保持。也可以说，双金属自密封波齿复合垫片与普通垫片相比，其最大特点是在操作状态下密封性能不受介质压

力的影响。

由于双金属自密封波齿复合垫片是在原有柔性石墨金属波齿复合垫片结构的基础上进一步改进发展的，因此它除了具有原来柔性石墨金属波齿复合垫片的所有优异性能一优异的密封性、回弹性能好、密封寿命长、安全可靠性高、使用安装方便、适应性广等外，还由于它的“压力自密封”作用使其密封性能更好，寿命更长，安全可靠性更高，而且对法兰密封面的宏观补偿能力更为有效，更有利于诸如压力容器、换热器一类大尺寸法兰连接获得良好的密封。

近几年来，双金属自密封波齿复合垫片在解决石油化工系统的各种设备密封难题上已经发挥了很好的作用，其中包括那些采用碟形弹簧补偿装置而仍然泄漏的密封难题。特别是作为换热器法兰连接垫片其效果更为显著。目前该垫片已在中石化、中石油、中海油三大石化系统的40多家企业的各种装置上获得应用，总数已超过 27000件，其中在直径650 mm以上的超过 6560 件，1000 mm以上的超过3760件，1500 mm以上的超过1140 件，2000 ～3000mm的超过180件 ，3000mm以上的有 30件 ，最大尺寸达 3300 mm。

2．换热器垫片选用的一般性建议

石油化工装置的换热器型式多样，使用工况复杂多变，垫片的选用难以针对具体设备，在此仅就换热器垫片选择中的相关情况提出一般性建议以供参考。

（1）换热器法兰的尺寸普遍较大，应充分考虑法兰加工过程和使用时产生的宏观变形对密封影响，因此垫片选用的基本原则是所选择的垫片应有足够的压缩变形量以提高其对大尺寸法兰宏观变形的补偿能力。为此，建议垫片选择时原则上应选其压缩变形量相对较大的垫片如非金属材料类构成的或金属与非金属材料复合的垫片。

（2）一般来说，金属平垫、齿形垫或齿形组合垫等金属类垫片不适合选作包括换热器在内的大尺寸设备法兰用垫片。因为金属垫片的压缩变形量极小，无法对法兰表面存在的任何宏观变形进行补偿，从而容易导致垫片的密封能力不足而泄漏。

（3）连接法兰面的型式为凹凸面的换热器，应尽量避免选用缠绕式垫片。由于用于大尺寸凹凸面上的缠绕式垫片既无外环加强，又无内环加固，垫片的密封部位极易被压溃而使密封失效。而且大尺寸缠绕式垫片结构松散，极易在运输安装过程中损坏而增加成本，拖延工期造成额外损失。

（4）连接法兰面的型式为突（平）面的换热器（包括其他大尺寸的其他设备），可以选用带内外环的缠绕式垫片，但应结合垫片的尺寸大小，考虑其运输和安装是否存在问题。

（5）柔性石墨复合垫片（即高强石墨垫片）有一定压缩性和密封性，也容易制成大尺寸垫片，运输安装也没有什么问题，但安全可靠性不足，仅推荐用于操作参数不高的非重要场合。

（6）新型柔性石墨金属波齿复合垫片和双金属自密封波齿复合垫片不仅具有一系列优异的密封性能，而且具有较大的压缩变形量，能很好补偿包括换热器在内的大尺寸法

广州市东山南方密封件有限公司

兰面的宏观变形而获得良好的密封，因而特别适用于包括换热器在内的大尺寸设备法兰上。尤其是双金属自密封波齿复合垫片的“压力自密封”作用，更有利于垫片对法兰面上任何部位的变形进行自动补偿，从而使换热器法兰连接获得更为可靠的密封性。

（7）低压高温等非重要场合使用的换热器法兰垫片可选择能耐高温的柔性石墨复合垫片（即高强石墨垫片）（垫片的耐温能力取决于柔性石墨材料）。对密封性要求较高的也可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。

（8）高温高压和易燃、易爆、有毒介质等重要场合必须确保法兰联接的密封性能良，安全可靠。因此，推荐选用性能优异的柔性石墨金属波齿复合垫，但对密封性和安全可靠性要求高的场合应选用性能更好的双金属自密封波齿复合垫片。

（9）高温高压场合的换热器法兰也可以选用八角垫等金属环垫。理论上金属环垫的密封性能比较好，安全可靠性也高，但由于在实际应用上受法兰和垫片的加工制造精度、安装要求等因素影响很大，往往难以获得满意的效果，而且成本高，法兰环槽应力集中容易对法兰造成损坏，选用时应慎重考虑。

（10）对操作温度和压力略有波动的场合，一般情况下可选用柔性石墨金属波齿复合垫片，而对密封性要求较高或安全可靠性较高的情况下应选用双金属自密封波齿复合垫片。操作压力变化大的推荐选用其密封性能免受介质压力影响的双金属自密封波齿复合垫片。

（11）对压力、温度等操作参数波动较大，特别是温度变化激烈的场合应在选用双金属自密封波齿复合垫片的同时附加碟型弹簧补偿装置。

（12）热媒（导热姆或联苯导热油）加热系统不应采用石棉橡胶板或非石棉橡胶板一类材料作为密封件，应采用防介质渗透性强，不会溶胀的柔性石墨材料为主体的密封件如柔性石墨金属波齿复合垫片和双金属自密封波齿复合垫片。由于热媒介质渗透性强，对密封性和安全可靠性要求很高，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。

（13）对带一般性腐蚀性介质的场合可选用不锈钢骨架的柔性石墨金属波齿复合垫，要求较高的重要场合可采用不锈钢骨架的双金属自密封波齿复合垫片。压力不高的非重要场合亦可选用不锈钢增强的高强石墨复合垫。

（14）以石棉为基材的密封材料如石棉橡胶板等应尽量少用或不用，因为该类材料不仅不符合环保要求，而且性能往往不能满足要求，造成事故隐患，故一般只推荐用于低参数、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非重要场合，建议采用高强石墨垫或非石棉橡胶板代替。

参考文献：

[1] 高俊峰，吴树济 ： 压力容器用大直径法兰连接密封垫片的选用

广州市东山南方密封件公司

《压力容器》 VOL 29， 2012 NO 10
[2] 吴树济：改进型金属一膨胀石墨复合垫片
中国，90215559［P］1991-06-19
[3] 吴树济：换热设备复合垫片
中国，92215173［P］1992-08-12
[4] 吴树济，刘秀英：复合垫片
中国，200720053323［P］2008-06-04
[5] 吴树济，刘秀英：自紧式波齿复合垫片
中国，201020594151［P］2011-05-18
[6] 吴树济，刘秀英：带隔条复合垫片
中国，201020594153［P］2011-08-03
[7] 吴树济：波齿复合垫片及其在石化设备上的应用[A]
第六届石化设备密封学术讨论会论文集[C]
北京：中国石油学会石油炼制委员会等，1994；147－150
[8] 吴树济，钟海强：新一代法兰垫片一波齿复合垫片在石油化工设备上应用的新进展
[A] 第七届石化设备密封学术讨论会论文集[C]
北京：中国石油学会石油炼制委员会等，1996；368－371
[9] 吴树济，高俊峰：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，VOL .33 NO.5
[10]吴树济，杨树人，黄鑫，钟海强：新型双金属自密封波齿复合垫片的应用
《石油化工设计》2012 ， VOL .29 NO.2

作者介绍：

吴树济：高级工程师，现任广州市东山南方密封件有限公司董事长，总工程师。长期从事密封技术试验研究和产品开发。60～70年代在机械部通用机械研究所工作期间所承担的密封件基础件攻关项目曾获机械部奖励。80年代在上海石化总厂机械研究所工作期间参与多项中石化总公司设计研究项目，其中承担的DN800蝶式止回阀获中石化总公司科技进步三等奖、上海市新产品二等奖。八十年代以来获得多项密封件专利，其中包括已制定了国家标准的产品“柔性石墨金属波齿复合垫片”，以及近几年研制开发成功、目前已获得广泛应用的最新专利产品一“双金属自密封波齿复合垫片”。

吴凯珺：工程师。现任广州市东山南方密封件有限公司董事长助理，公司副总经理兼营销部经理。长期从事密封技术和产品推广应用工作，并与用户和工程建设单位（设计院）开展密封技术交流和讲座。

广州市东山南方密封件公司