新型双金属自密封复合垫片的研制开发

吴树济*

（广州市东山南方密封件有限公司）

摘要：介绍了最新专利产品——双金属自密封波齿复合垫片的基本结构和工作原理及其特性，该垫片具有与普通强制式密封垫片完全不同的压力自密封特性。实际使用表明：在使用其他垫片无法达到密封的法兰联接上使用该新型垫片会获得很好的密封效果。

关键词：压力自密封 双金属自密封 复合垫片 波齿复合垫片 平垫片

中图分类号 TQ055.8*3 **文献标识码** A **文章编号** 0254-6094(2012)04-0456-05

现代工业生产的大型化、高参数，尤其是大型石化企业、火力发电站及核电站等对密封件性能提出了愈来愈高的要求。寻求性能和结构更为优良的密封材料一直是密封技术工作者梦寐以求的目标。近些年来垫片材料和结构方面均有一定改进和发展，使密封技术有了不少的进步，但在密封件的结构方面并没有根本性的突破。大多数垫片的结构仍然是传统的由各种材料做成的平垫或复合垫，在密封原理上仍然是传统的强制密封。即使上世纪 90 年代初由笔者发明并研制生产的柔性石墨金属波齿复合垫片因结构新颖、密封性能良好而成为新一代高性能垫片，并已广泛用于石油化工和电力等部门并取得很好的效果而受到广大用户的好评[1-2]，也仍然未能突破强制密封的原理。也就是说，这些垫片在安装使用时必须通过强有力的螺栓力将法兰拉紧，在垫片上形成足够的垫片应力才能达到密封不漏。而在实际使用时，一旦原有的垫片预紧力由于各种原因（例如垫片材料本身的蠕变松弛特性、由内压力所形成的轴向力、法兰联接中联接件与被联接件在温度发生变化时其变形不协调等）而降低，至一定程度时就会发生明显泄漏。实际上，只要使用目前按强制密封原理设计制造的垫片，上述情况几乎是难以避免的。为此，笔者提出一种新型复合垫片——双金属自密封复合垫片，该复合垫片已获得国家专利授权[3-5]。双金属自密封复合垫片最大特点是根据压力自密封原理设计，它能利用被密封介质的压力来提高垫片应力，从而使垫片始终保持良好的密封。

1 基本结构特点及分类

双金属自密封复合垫片的基本构造是由两片金属叠合后在其外圆周通过熔焊将其熔合在一起而形成整体结构的金属骨架。然后在骨架的外表面复合上非金属材料柔性石墨构成。目前，广州市东山南方密封件有限公司已按该项专利技术研制开发了两个品种的双金属自密封复合垫片：一种是在双金属金属骨架的外表面复合增强柔性石墨材料构成的“双金属自密封复合平垫片”（图 1）；另一种是为了提高垫片的综合性能，金属骨架的外表面如同以往的柔性石墨金属波齿复合垫片一样设计加工成波齿状结构，从而形成由两片金属组成的波齿状整体金属骨架，然后在骨架外表面复合适当厚度的柔性石墨材料构成的“双金属自密封复合垫片”（图 2），两种产品分别适用于不同场合。

2 工作原理

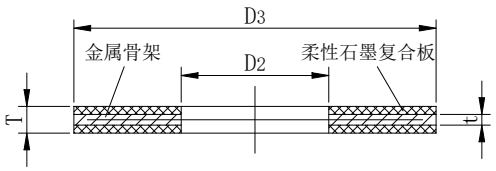


图 1　双金属自密封复合平垫片

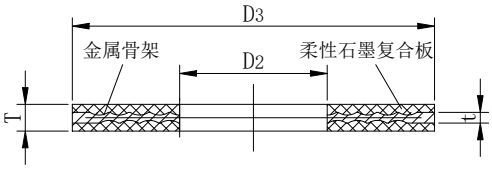


图 2　双金属自密封波齿复合垫片

法兰联接中通过联接螺栓的拉紧力在垫片上形成初始预紧应力，在操作状态下其初始预紧应力因各种原因而下降。对现有按强制密封原理设计的普通垫片而言，垫片原有预紧应力的减少必然导致垫片密封能力下降，下降到一定程度时就会出现泄漏。但对按压力自密封原理设计的双金属自密封复合垫片则不同，但操作状态下，压力介质会渗透进入金属骨架的两金属片之间的微观缝隙。由于叠合在一起的金属骨架上下两金属片外圆周边已被完全紧密地熔合在一起，介质不会从此处泄漏出去。进入两金属片之间微观缝隙处的介质压力作用于两金属片的内表面，使两金属片分别向外压向相应的法兰面，从而在双金属自密封复合垫片的上下外表面与法兰面之间形成附加的垫片应力。此附加垫片应力随介质压力的存在而存在，其值可以达到介质的压力值。也就是说在操作状态下双金属自密封复合垫片的应力比相同操作情况的普通垫片始终多出一种附加应力，其值与介质压力相当。这种附加应力的存在使原来因压力升高或其他原因而减少的垫片应力得到了补偿和增加，从而使双金属自密封复合垫片具有比现有的其他垫片更好的密封性能。甚至在极端情况下，即使双金属自密封复合垫片的预紧应力因各种原因而丧失，但垫片与法兰面之间存在与介质压力相当的附加应力，而使垫片仍能保持一定的密封性能。因为双金属自密封复合垫片的附加垫片应力是由介质压力形成的，介质压力越高，所形成的附加垫片应力也越大，随之其密封也越容易得到保证。可见双金属自密封复合垫片具有与以往所有垫片完全不同的压力自密封特性，因而成为与所有以往强制密封垫片完全不同的新型压力自密封垫片。

3　密封性能试验

为了验证双金属自密封复合垫片的密封特性，特别是其压力自密封性能，笔者对双金属自密封波齿复合垫片进行密封性能试验，并和现有普通垫片进行对比。为了能更好地观察垫片的压力自密封性能，本试验采用低预紧应力，以便内压升高时在预紧应力进一步降低后来观察和测量垫片在此工况下的密封性。

本试验垫片加载系统由 8 个应力螺栓和应变仪（配备 24 点平衡箱）组成，可随时测量试验过程中法兰螺栓力的变化，因而亦可随时了解垫片应力的变化。试样为双金属自密封波齿复合垫片，对比试样采用柔性石墨金属波齿复合垫片。之所以选择柔性石墨金属波齿复合垫片作为对比，是因为在现有垫片类别中其密封性能比较好，而且在结构（自密封结构除外）和材料等方面两者均较相似而易于比较。试样尺寸分别为：

双金属自密封波齿复合垫片　Φ152mm×Φ106mm×3mm

柔性石墨金属波齿复合垫片　Φ149mm×Φ117mm×3mm

双金属自密封波齿复合垫片与柔性石墨金属波齿复合垫片密封性能对比试验结果见表 1。

表 1 试验结果对比

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 $mL \cdot s^{-1}$
双金属自密封波齿复合垫片	12.838	1.4	2.0	25.480	29.753	0.47	2.47	0.000
普通柔性石墨波齿复合垫片	13.926	2.1	2.0	27.244	30.635	0.52	0.52	0.121

从表 1 数据可以看到，两种垫片的试验条件基本相同，垫片的预紧应力都很低（双金属自密封波齿复合垫片的预紧应力仅为 1.4MPa，而普通柔性石墨金属波齿复合垫片虽略高些，但也仅为 2.1MPa），在试验介质压力为 2.0MPa 的情况下，试验结果表明双金属自密封波齿复合垫片仍能保持密封不漏，而普通柔性石墨金属波齿复合垫片则已产生较大泄漏率（0.121mL/s）。

一般而言，在垫片应力较小的情况下要达到密封是困难的，特别是在垫片应力小于被密封介质压力的情况下要达到密封不漏几乎是不可能的。因此，对普通柔性石墨金属波齿复合垫片来说产生泄漏并不奇怪，因为此时其残余预紧应力只有 0.52MPa。双金属自密封波齿复合垫片能保持良好密封性的原因是该垫片上存在与普通柔性石墨金属波齿复合垫片不同的应力状况。在介质压力存在的情况下，垫片表面产生了与介质压力相当的附加应力。因此，双金属自密封波齿复合垫片的实际垫片应力并非仅为表列的残余预紧应力 0.47MPa，而应该是在内压升高后预紧应力的剩余应力与介质内压力的总和，即 2.47MPa。也就是说，在双金属自密封波齿复合垫片试验中，当内压上升到 2.0MPa 时虽然原有的预紧应力下降到 0.47MPa，但压向上下法兰面的垫片应力实际为 2.47MPa。此应力始终高于介质压力，因而使垫片仍能保持良好的密封。由此可见，双金属自密封波齿复合垫片的密封性能不仅取决于垫片预紧力，同时还取决于被密封的介质应力，这就是所谓压力自密封的原理。

4 性能特点

4.1 优异的密封性

由于双金属自密封波齿复合垫片是根据压力自密封原理设计的，而且其表面同样采用密封性能优异的柔性石墨作为复合层，因而使其具有优秀的密封性能。压力自密封作用使介质内形成的附加应力直接作用于密封表面的任何点上（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得到提高和补充。对双金属自密封波齿复合垫片来说，正如以往的柔性石墨金属波齿复合垫片那样，垫片骨架是波齿状结构时，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，因此垫片像以往的柔性石墨金属波齿复合垫片一样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较高的密封性。

4.2　压力自密封结构

由于双金属自密封波齿复合垫片的骨架设计成压力自密封结构，在操作状态下压力介质会变成附加的垫片应力，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，这种附加应力使原有的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，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存在，垫片仍能保持一定密封性。

4.3　安全可靠性

双金属自密封波齿复合垫片的骨架是整体金属的，结构牢固，安全可靠，特别是对双金属自密封波齿复合垫片来说，像普通柔性石墨金属波齿复合垫片一样的波齿状结构能使柔性石墨被紧密地封闭在金属骨架的凹槽与法兰面之间，从而使其具有像金属垫片一样的安全可靠性。而且由于整体结构牢固，不必担心在高应力时会像缠绕垫片那样被压溃或失稳而损坏。

4.4　使用安装方便

双金属自密封波齿复合垫片的整体刚性结构使它在运输和安装过程中克服了缠绕式垫片会散架的缺陷，这对用于大直径管法兰和容器、换热器法兰尤其有利，而且其具有的多种定位方式使安装极为方便。

4.5　适应性广

双金属自密封波齿复合垫片既可用于低温（至 196℃）和高温（达 600℃），也可以用于低压和高压（42.0MPa），而且特别适用于温度和压力波动的场合、大直径管法兰和容器换热器法兰以及对密封性要求较高的重要场合。由相应的金属骨架材料制造的双金属自密封波齿复合垫片亦可用于几乎所有腐蚀性流体的场合。

5　应用实例

双金属自密封波齿复合垫片研制成功后已于 2008 年开始在石油化工系统逐步推广应用，通过实际应用进一步验证了其不同于现有其他垫片的优异性能，例如：

a. 2008 年 11 月南京金陵石化新建的 600kt/a　PX 装置上的 5 种规格的管法兰（DN150～600mm），设计压力 3.6MPa，设计温度 505℃，操作温度 330℃，介质为氢气及轻烃等。采用其他垫片无法密封，改用双金属自密封波齿复合垫片后密封效果很好，装置正常投产。

b. 2009 年 10 月南京金陵石化分公司运行三部一工区 III 焦化装置的焦化塔顶部大油气管线法兰垫片， DN 600 mm, 压力 0.23MPa，温度从常温到 420 ℃变化，介质为汽油和瓦斯，原来一直存在泄漏，即使采用碟形弹簧补偿也无济于事。改用双金属自密封波齿复合垫片后效果很好，解决了多年以来一直存在的密封难题。

c. 南京金陵石化分公司 1500kt/a 加氢裂化装置上的柴油、原料油换热器（E1014），直径 1600 mm，管程/壳程压力 1.20MPa/ 0.9MPa，管程温度 212～236℃，壳程温度 134～160℃。自

2005 年装置开工以来就经常发生泄漏。2010 年 3 月改用双金属自密封波齿复合垫片后至今效果很好，这期间曾经过开停工和多次工艺操作波动，均未发生任何泄漏。

d. 中石化广州分公司汽油吸附脱硫装置的主体设备脱硫反应器（R-7101），使用温度 416～441℃，使用压力 3.1MPa，介质为氢气、汽油及吸附剂（颗粒）等，法兰密封面尺寸为 1727 mm×1540 mm，在其他单位的同类设备在该处法兰采用缠绕式垫片密封效果不好的情况下，该公司于 2010 年 1 月改用双金属自密封波齿复合垫片效果很好，使该装置得以顺利投产。

e. 中石化广州分公司炼油二部重整装置上的再生器（R301）法兰，通径 2000 mm，压力 0.6MPa，温度高达 600℃，介质为氮气。原用其他垫片均无法令人满意，2010 年 4 月初改用双金属自密封波齿复合垫片后密封效果很好，解决了多年未能解决的问题。

f. 云南天安化工有限公司的碳氢装置大型生产设备垫片通径 1900 mm（垫片实际尺寸为 2036 mm×1970 mm×5.0 mm），压力 4.0MPa，常温。因其特殊场合（可燃有毒气体）的需要而对密封性要求很高，设备垫片安装后要用专用便携式检测装置（CASCHECK）测量和监控，泄漏率要求小于 0.01%。该公司原采用包括缠绕式垫片和齿形垫等其他垫片均无法达到要求。2010 年 4 月改用双金属自密封波齿复合垫片后密封效果很好，经现场检漏仪器测量密封性能完全达到该装置的要求。

6 结束语

目前，广州市东山南方密封件有限公司根据专利技术研制开发的双金属自密封复合垫片包括双金属自密封波齿复合垫片和双金属自密封波齿复合平垫片两个品种，每个品种又包括可用于管法兰和容器法兰的基本型、带定位环型、带定位耳型和换热器专用型垫片。双金属自密封波齿复合垫片适用于压力较高的重要场合，双金属自密封波齿复合平垫片适用于中低压场合。双金属自密封复合垫片是法兰密封垫片的升级换代产品，可替代石棉橡胶垫、铁包垫、石墨复合垫、缠绕式垫片、齿形垫、齿形组合垫以及普通柔性石墨金属波齿复合垫片等而性能更为优秀。可广泛用于石油、化工、电力、轻纺及冶金等工业部门作为各种设备（容器、换热器等）、管道和阀门的法兰联接的理想密封元件。尤其是压力温度变化的场合、大直径法兰和对密封性要求较高的重要场合下使用，更能充分显示双金属自密封复合垫片的优良密封性能。

参考文献

[1] 吴树济. 改进型金属－膨胀石墨复合垫片 [P]. 中国： 90215559.8.1991.

[2] 吴树济. 换热设备复合垫片 [P]. 中国：92215173.3.1992.

[3] 吴树济，刘秀英. 复合垫片 [P]. 中国：ZL200720053323.3.2007.

[4] 吴树济，刘秀英. 自紧式波齿复合垫片[P]. 中国：ZL201020594151.1.2010.

[5] 吴树济，刘秀英. 带隔条复合垫片 [P]. 中国：ZL201020594153.0.2010.

（收稿日期：2011-09-23）

*吴树济. 男. 1941 年 9 月生. 高级工程师. 总工程师. 董事长. 广东省广州市. 510230

Development of New Dual-metal Self-sealed Composite Gaskets

Wu Shu-ji