石油化工设备技术,2012,33(5)·57·
Petro-Chemical Equipment Technology

新型双金属自密封波齿复合垫片结构及其性能特点

吴树济[1],高俊峰[2]

(1. 广州市东山南方密封件有限公司,广东 广州 510030;
2. 中国石油天然气股份有限公司炼油与化工分公司,北京 100007)

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及其密封性能特点。试验研究和实际应用表明,该垫片不仅保留了以往柔性石墨金属波齿复合垫片的一系列优异性能,而且具有与普通"强制密封"型垫片完全不同的"压力自密封"特性,其密封性能更为可靠。

关键词:密封 垫片 压力自密封 双金属自密封波齿复合垫片

大型石化企业和火力发电站、核电站等对密封件的性能提出了愈来愈高的要求。人们不仅千方百计寻求性能优良的密封材料,而且力图从结构上加以革新,以期获得高性能的密封件。例如,上世纪90年代初由笔者之一发明并研制生产的"柔性石墨金属波齿复合垫片",其结构完全不同于以往的传统垫片,因而具有更为优秀的综合性能[1-2]。但现有的各种垫片仍然属于"强制密封"型垫片。也就是说,这些垫片的密封性能完全依靠螺栓的强制力,一旦原有的螺栓预紧力由于诸如压力、温度等参数变化时,其垫片应力就会减小,从而降低了垫片的密封能力,出现泄漏。为此,本文作者之一经研究,在原有柔性石墨金属波齿复合垫片的基础上,设计了一种全新结构的双金属自密封波齿复合垫片。该复合垫片已获得国家专利授权[3-5],是根据"压力自密封"原理设计的。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性能。

1 双金属自密封波齿复合垫片的基本结构

双金属自密封波齿复合垫片是由两片金属叠合后,在其外圆周上通过熔焊方法将两者融合在一起而成为整体结构的金属骨架。骨架的上、下片金属的外表面加工有特殊设计的环型圆弧形沟槽,而且上、下表面的沟槽互相错开,使金属骨架的整体形状构成波齿状结构。然后在特殊结构骨架的外表面复合上适当密度的柔性石墨材料,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见图1。

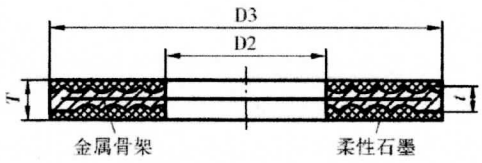


图1 双金属自密封波齿复合垫片的典型结构示意

2 双金属自密封波齿复合垫片的密封性能

从外观上看,双金属自密封波齿复合垫片与普通柔性石墨金属波齿复合垫片几乎没有什么差别,但实际上其工作原理则完全不同。虽然双金属自密封波齿复合垫片的安装预紧与其他垫片一样,都是通过联接螺栓被紧密地压在两法兰之间,在垫片表面形成相应的垫片预紧应力。对一般按"强制密封"原理设计的普通垫片而言,在操作状态下,当压力介质进入设备或管道时,垫片的初始预紧应力会因各种原因而下降。例如,压力进入系统后会在两法兰之间形成相应轴向力。此轴向力会使法兰联接中的螺栓力和原有的垫片应力都发生变化。螺栓力会随内压的升高而升高,而垫片初始预紧应力则随内压的升高而减少。又如介质温度的波动引起法兰与螺栓的变形、不协调而

收稿日期:2012-04-28。

作者简介:吴树济,男,1964年毕业于华南理工大学化工机械专业,一直从事化工机械设备和密封技术设计研究工作,获多项密封技术专利,高级工程师。

Email:wushuji-gz@163.com

形成的垫片预紧应力的减少，或垫片本身蠕变松弛特性等都会使垫片的预紧应力下降，从而导致垫片密封性能下降而产生泄漏。但对"压力自密封"原理设计的双金属自密封波齿复合垫片来说，在操作状态下，进入法兰系统的压力介质同时会渗透到金属骨架的两金属片之间的微观缝隙，并作用于两金属片的内表面，使上下两金属片分别受到外压，从而在相应法兰面上形成附加的垫片应力。该附加的垫片应力随介质压力而定，其最大值可以达到被密封介质的压力。也就是说，在相同条件下，双金属自密封波齿复合垫片在操作状态下的应力比以往按"强制密封"设计的垫片始终多出一种大小相当于介质压力的附加应力。这种附加应力的存在会使原来因各种原因而减少的垫片应力得到了补偿或增加，从而使双金属自密封波齿复合垫片具有比现有的其他垫片更为优秀的密封性能。

为了证实双金属自密封波齿复合垫片的密封性能，我们选择了规格同为 DN100 双金属自密封波齿复合垫片（ϕ150 mm×ϕ106 mm×3.0 mm）和普通的柔性石墨金属波齿复合垫片（ϕ149 mm×ϕ117 mm×3.0 mm）进行密封性能对比试验。为了便于观察和比较，本试验采用低预紧应力进行。也就是说，采用较低的螺栓预紧力，使垫片预紧应力处于较低水平，以便试验介质通入后垫片应力进一步降低，从而观察和对比两种垫片的密封性。

本试验是在广州市东山南方密封件有限公司密封试验室的实际型法兰垫片密封性能试验装置上完成的。垫片加载系统由 8 个经标定的应力螺栓和应变仪（配有 24 点平衡箱）组成，可随时测量试验过程中螺栓力，因而亦可随时了解垫片应力的变化。两种垫片的密封性能对比试验结果见表 1。

表 1 两种垫片的密封性能对比

项目	双金属自密封波齿复合垫片	普通柔性石墨波齿复合垫片
垫片预紧应力/MPa	1.4	2.1
试验介质压力/MPa	2.0	2.0
升压后垫片残余预紧应力/MPa	0.47	0.52
垫片在操作状态下的实际应力/MPa	2.47	0.52
泄漏率/(mL·s^{-1})	0	0.121

从表 1 试验数据可以看到，在垫片预紧应力很低，而被密封的介质压力较高情况下，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高泄漏率。

按一般密封理论，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。因此，在本次试验中，普通柔性石墨金属波齿复合垫片产生泄漏并不奇怪。但同样在低应力下，双金属自密封波齿复合垫片却能保持良好的密封性，这说明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。这是由于该垫片是按"应力自密封"原理设计的，因此在介质压力存在的情况下，该垫片表面与法兰面之间的实际垫片应力并不是像其他普通垫片那样只有预紧的剩余应力，而是预紧剩余应力与介质内压力的总和。此应力始终高于介质压力。这就解释了为什么普通柔性石墨金属波齿复合垫片不能密封而双金属自密封波齿复合垫片在同样条件下却仍然能获得良好密封性能的原因。

3 双金属自密封波齿复合垫片性能特点

双金属自密封波齿复合垫片的特殊构造、密封原理及与其他垫片密封性能对比试验结果可知，该垫片具其他垫片所无法媲美的优异特性：

（1）可靠的密封性 由于双金属自密封波齿复合垫片采用特殊设计的具有"压力自密封"特性的波齿状金属骨架结构和密封性能优异的柔性石墨作为复合层，因而它除了保持了柔性石墨金属波齿复合垫片的优异密封性能外，更因为它的压力自密封作用使它的密封性获得进一步提高。尤其是由于压力的追随性，通过介质压力的作用使法兰密封面上的任何凹下部分的垫片应力都因此而得到提高，从而使整个法兰表面均能达到优异的的密封性能。

（2）使用寿命长 像柔性石墨金属波齿复合垫片一样，双金属自密封波齿复合垫片同样采用耐高温、抗蠕变的特殊设计的金属骨架和柔性石墨复合而成，具有很好的压缩回弹特性，而且由于双金属自密封波齿复合垫片具有"压力自密封"的结构，使得该垫片在操作状态下应力因压力、温度等因素而减少获得了补偿和加强，从而使垫片始终保持高的垫片应力，从而延长密封寿命。

（3）安全性能高 该垫片除了金属骨架是由双金属组合外，其他构造和柔性石墨金属波齿复合垫片一样牢固，而且，还由于它的"压力自密封"结构使它与法兰表面密封部位始终紧密接触，从

而具有更高的安全可靠性。

(4) 安装方便　与柔性石墨垫片一样，整体刚性结构的双金属自密封波齿复合垫片使它在运输和安装过程中不会像缠绕式垫片那样会“散架”，因而特别适合于用在大直径的法兰(诸如容器、换热器)上。

(5) 适应范围广　采用不同骨架材料制造的双金属自密封波齿复合垫片，其使用范围广泛。既可用于低温(低至－196 ℃)，也可用于高温(高达 600 ℃)，最高使用压力可达 42.0 MPa。而且特别适用于操作温度、压力变化的场合、大直径法兰(诸如容器、换热器法兰)或密封性要求较高的重要场合(如易燃、易爆等介质)。当骨架采用相应的耐腐蚀材料制造时，双金属自密封波齿复合垫片亦可用在几乎所有腐蚀性流体的场合。

4　双金属自密封波齿复合垫片实际应用

双金属自密封波齿复合垫片研制成功后现已在石油化工系统逐步推广应用。成功地为用户解决各种泄漏难题，进一步验证了双金属自密封波齿复合垫片不同于现有其它垫片的优秀性能。例如：广州石化新建的汽油吸附脱硫装置脱硫反应器(R-7101)法兰，通径 DN1500，操作温度 416～441 ℃，操作压力 3.1 MPa，介质为氢气、汽油、吸附剂(颗粒状)等。原设计为缠绕式垫片，据了解不少装置的密封效果都不理想。2010 年 1 月选用了双金属自密封波齿复合垫片后，密封效果很好，使装置顺利投产。炼油二部新建的重整装置的再生器(R301)法兰，通径 DN2000，压力 0.6 MPa，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，解决了多年未能很好解决的难题。又如长岭石化 280 万吨催化装置废热锅炉蒸汽管线，在装置开工后出现严重泄漏，大量蒸汽弥漫整个车间。2011 年初在 PN11.0 MPa，DN40～DN400 的管线共 7 种规格，200 多个泄漏点上更换采用双金属自密封波齿复合垫片，投用后密封效果很好，彻底解决了该装置的泄漏难题。

由此可见，双金属自密封波齿复合垫片的研制和推广应用，以其独特而优异的性能为成功地解决各种装置(尤其是大型化，高参数的装置)的设备(如容器和换热器)和管道的法兰联接泄漏难题提供了一种很好的产品。

参考文献：

[1] 吴树济. 改进型金属—膨胀石墨复合垫片：中国，90215559.8[P].

[2] 吴树济. 换热设备复合垫片：中国，92215173[P].

[3] 吴树济，刘秀英. 复合垫片：中国，ZL 20072005 3323.3[P].

[4] 吴树济，刘秀英. 自紧式波齿复合垫片：中国，ZL 201020594151.1[P].

[5] 吴树济，刘秀英. 带隔条复合垫片：中国，ZL 2010 20594153.0[P].

(上接第 56 页)

的力学条件，裂纹的方向与应力状态也完全相符；产生缺陷区域内的安全裕量非常大，不具备强度破坏的条件。综合材料应力腐蚀的敏感性和塔釜介质含有 Cl^-、硫化物、溶解氧等腐蚀介质的条件，可以判定缺陷是应力腐蚀造成的。

(2) 计算结果得到了 D-410EO 精制塔塔底封头与筒体连接区域的应力分布规律。

参考文献：

[1] 郭志军，陈东风，李亚军，等. 油气田高含 H_2S、CO_2 和 Cl^- 环境压力容器腐蚀机理研究进展[J]. 石油化工设备，2008，37(5)：53-58.

[2] 冯星安，黄柏宗，高光第. 对四川罗家寨气田高含 H_2S、CO_2 腐蚀的分析及防腐设计初探[J]. 石油工程建设，2004，30(1)：10-14.

[3] 肖纪美. 腐蚀与防护全书应力作用下的金属腐蚀·应力腐蚀·氢致开裂·腐蚀疲劳·摩耗腐蚀[M]. 北京：化学工业出版社，1990：131-175.

[4] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京：冶金工业出版社，1983：240-280.

[5] 张蕴强. 户部寨气田腐蚀分析及腐蚀防护[J]. 石油与天然气化工，2003，32(3)：173-175.

[6] 张卫义，田海晏，陈罕. 一种有效的开孔接管结构的三维有限元建模方法[J]. 石油化工设备，2001，30(4)：29-31.

[7] Wilson E L，Taylor R L，Doherty W P，et al. Incompatible displacement model[J]. ONR Sympos，1969，43-57.

[8] 田海晏，张卫义. D510 脱气塔塔底封头裙座连接区域应力腐蚀力学分析[J]. 石油化工设备技术，2011，32(4)：13-16.

[9] JB 4732—1995　钢制压力容器—分析设计标准[S].

[10] 李建国. 压力容器设计的力学基础及其标准应用[M]. 北京：机械工业出版社，2004，1.