经 验 交 流

压力容器用大直径法兰连接密封垫片的选用

高俊峰[1]，吴树济[2]

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

摘 要：随着设备的大型化和操作参数的不断提升，法兰连接的密封问题越来越突出，适时化解已显得越来越重要。其中，正确选择大直径法兰用垫片是急需探讨的问题。根据大直径法兰连接结构的特点，结合不同垫片的特性，提出了大直径法兰垫片的选用建议，并结合工程实践，介绍了使用专利产品——双金属自密封复合垫片解决大直径法兰连接密封问题的案例。

关键词：大直径法兰；密封；垫片；双金属自密封波齿复合垫片

中图分类号：TH49；TB42 **文献标识码**：B **文章编号**：1001－4837(2012)10－0067－04

doi：10.3969/j. issn. 1001－4837. 2012. 10. 013

Selection of Connecting Sealing Gaskets for Large－diameter Flanges in Pressure Vessels

GAO Jun－feng[1], WU Shu－ji[2]

(1. PetroChina Refining & Chemicals Company, Beijing 100007, China; 2. Guangzhou Dongshan South Seals Co., Ltd., Guangzhou 510030, China)

Abstract: With the larger size and higher parameter of equipment, sealing problems for flange connection have appeared more and more prominent, meanwhile solving these problems timely has also become more and more important. It is an urgent and worthy discussion about how to select gaskets properly for large－diameter flanges. According to the characteristics of large diameter flange connection, and combined with the characteristics of various gaskets, the gasket selecting suggestion for large－diameter flange was put forward. Besides, combined with the engineering practice, application examples were introduced where the connection sealing problems for large－diameter flange have been solved by adopting the latest patent products－double metal self sealing composite gasket.

Key words: large－diameter flange; seal; gasket; bimetal self sealing corrugated and serrated combined gasket

0 引言

随着现代石油化工装置的大型化，包括各种容器、换热器等在内的设备，其尺寸越来越大，参数越来越高。例如现在大型石化装置的设备其直径通常都在 DN1000～2000，有些甚至达到 4000 mm。相应地，管道通径也越来越大，不少大型装置的配管系统都超过 DN600。压力容器、压力管道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上述尺寸的大直径法兰上。特别是石化系统，长期以来不少装置的换热器、容器及其连接管道的法兰密封问题相当突出，直接影响到装置的生产，成为安全生产的隐患。为了解决这些泄漏难题，在不断寻求和开发更优的密封方法和垫片的同时，应针对大直径法兰连接的特点并结合垫片的特性，对现有垫片的适应性进行分析研究，以便能更有针对性地选择合适的垫片来解决密封难题。

1　大直径法兰连接密封问题的特点及其要求

根据密封理论，法兰连接结构中使用的垫片实现密封应满足两个条件：

(1)预紧时，在螺栓力作用下，通过法兰使其垫片受到压缩、产生变形并阻塞垫片内部和法兰表面的泄漏通道实现初始密封；

(2)操作时，垫片能及时有效回弹，补偿密封面的分离并保留一定的比压以实现密封。

其中，垫片预紧时通过压缩变形填补的除垫片材料内部的微观间隙和法兰密封表面的微观不平度(粗糙度)外，还包括法兰表面的宏观不平度等，是实现初始密封的必要条件。与较小尺寸法兰相比，对大直径法兰而言，往往存在以下问题：

(1)在生产制造过程中法兰表面加工质量不易保证，会出现粗糙度和形位公差较大等影响密封的问题；

(2)刚度裕量减小，在各种载荷作用下更易发生变形和/或扭曲；

(3)不易获得良好的预紧状态。

分析垫片的压缩变形情况可知，由于垫片是通过两个连接法兰受压缩而使垫片形成相应的压缩应力的，因此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的均匀性。法兰表面突出部分的垫片压缩应力要比凹下部分大。也就是说，在法兰表面存在宏观不平度(即变形)的情况下，垫片比压的分布是不均匀的。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阻塞介质泄漏通道并达到密封所需的比压时才能确保连接的密封性。由此可见，要使大直径法兰连接获得良好的密封，垫片的压缩变形和有效的回弹补偿就显得特别重要。因此解决大直径法兰密封问题，首先应选用具有一定量的压缩变形和足够有效回弹补偿能力的垫片，在此基础上，辅以合理的预紧程序实现可靠的密封。其中，垫片的压缩—回弹性能更为重要，它与垫片的结构形式、尺寸和材料等有关。

2　现用大直径法兰连接垫片简析

2.1　石棉(或无石棉)橡胶板

这种材料强度不高，有一定变形能力，因而能较好地弥补法兰表面的微观不平(粗糙度等)，并在一定程度上弥补其宏观不平度，可作为参数不高场合下的大直径法兰用垫片。由于这种垫片材料密封性能并不高，其泄漏率通常在 $1\times10^{-2}\sim1\times10^{-3}$ cm³/s 左右，特别是使用时很容易发生应力松弛，影响它的密封性能和寿命，难以满足现代大型石油化工设备的高参数和长周期密封要求。因此，在密封性要求较高的场合，也应审慎选用。

2.2　铁包垫

这种垫片通常由薄金属包覆石棉板类材料构成，使用温度和压力较石棉(或无石棉)橡胶板稍高，也是参数不高场合下的大直径法兰用垫片之一。但由于其密封性能也并不好，其泄漏率通常仅为 1×10^{-2} cm³/s。因此，建议只用于对密封性要求不高的大直径法兰上。

2.3　金属平垫、齿形垫(组合垫)

由于这类垫片材料能耐高温、高压，因而常被用于高参数场合，有时也被用于高参数的大直径法兰上。但不少应用实例表明，由于此类垫片的压缩变形量极小，即使在极高的应力下也难以补偿法兰的宏观不平度，加上其回弹量也极小，凡是以这类垫片作为大直径法兰连接用垫片时，其密封性往往无法满足设备要求而被迫放弃。因此不推荐这种垫片用于大直径法兰连接上。

2.4　缠绕式垫片

这种垫片的压缩—回弹性和密封性能都较好，特别是带内外加强环型缠绕垫，能承受高温高压的作用和操作参数的波动，因而是目前使用比较广泛的垫片之一。由于这种垫片具有较大的压缩变形量(厚度 4.5 mm 的垫片其总变形量可以

达到1.35 mm)，因而能较好地补偿法兰的宏观不平度，是目前在换热器和容器等大直径法兰上使用较为普遍的垫片。但从实际应用效果来看，在大直径法兰上使用缠绕式垫片仍然存在不少问题。缠绕式垫片有“内外加强环型”、“外加强环型”、“内加强环型”和“基本型”结构，分别适用于不同法兰型式。由于结构不同，性能也有所差异。除了内外加强环型的缠绕式垫片能代表其性能外，其他型式的缠绕式垫片都因结构的原因而影响其性能和使用。缠绕式垫片的损坏主要是“压溃”、“失稳”和“散架”。“压溃”是指垫片受压时外径金属钢带的焊点被“拉脱”使垫片溃散而破坏，这种损坏在不带外加强环的缠绕式垫片上很容易发生。“失稳”是指垫片受压时其密封材料产生向内“凹陷”的破坏，这种损坏在不带内加强环的缠绕式垫片上很容易发生。“散架”是指垫片在生产、运输和安装过程中由于垫片本身结构的不牢固、不稳定，受到碰撞等外力作用而发生的松散损坏。所有这些损坏的发生都会随着垫片的尺寸增大而增加，在一定程度上限制了其在大直径法兰上的使用。

2.5　柔性石墨复合垫片

这是一种经由冲刺的薄金属板上复合柔性石墨构成的板材加工而成的垫片(也称高强石墨垫)。这种垫片具有包括密封性在内的较好的综合性能，特别是它具有较好压缩变形能力。如厚度4 mm的垫片其压缩变形量可达到1 mm左右，相比石棉橡胶板要大。而且，在特殊情况下这种垫片还可以叠层使用，其变形量可以通过加大垫片厚度来获得进一步提高，从而在用于大直径法兰上时更为有利。也就是说，在实际应用上可以根据法兰的具体大小和应用条件对垫片的厚度进行特殊设计，以确定垫片的相应厚度来确保其变形补偿能力能满足密封要求。但因为这种垫片的主体材料为柔性石墨，其强度很低，用在压力较高的场合下其安全性不够，一旦渗漏就很容易迅速扩大造成事故。因此，一般建议将这种垫片用于介质压力不高的、非重要场合使用较为合适。

2.6　柔性石墨金属波齿复合垫片

这是20世纪90年代初研制生产的新型垫片[1-2]，它是在特殊设计加工的波齿状结构的金属骨架上复合适当厚度的柔性石墨材料构成。该垫片不仅金属骨架设计特殊而且复合的柔性石墨层较厚，其压缩变形量很大(厚度4.0 mm的垫片其总压缩量可以达到1.5 mm)，能很好地补偿法兰的宏观不平度，其回弹量与缠绕垫相当，因而具有很好的压缩—回弹特性和优异的密封性能，再加上它的安全可靠性和克服了缠绕垫片容易压溃、失稳和散架的缺陷，目前已经成为大直径管法兰和压力容器尤其是换热器等大直径法兰上普遍使用的垫片，适用于包括高温、高压和工况参数波动等各种场合[3-5]。

3　一种新型双金属自密封波齿复合垫片

以往垫片多是按“强制密封”理论设计制造的，也就是说，这些垫片在安装使用时都是通过强有力的螺栓力将法兰拉紧，在垫片上形成足够的大比压来达到密封。但在实际使用时，一旦原有比压由于各种原因(例如压力、温度的波动或垫片材料本身的蠕变松弛等)降低至一定程度就会发生泄漏。这是导致目前不少连接法兰仍然存在泄漏的主要原因。

针对上述问题，一种新型垫片——双金属自密封波齿复合垫片应运而生。它是根据压力自紧密封原理设计的垫片，能利用被密封介质的压力来提高垫片密封比压，从而使垫片始终保持良好的密封。该复合垫片已获得国家专利授权[6-8]。根据该专利研制开发的“双金属自密封波齿复合垫片”，已成功应用于管法兰和设备法兰。

3.1　双金属自密封波齿复合垫片的结构特点

双金属自密封波齿复合垫片是由特殊设计的金属骨架和在其上复合适当厚度的柔性石墨材料构成。金属骨架由两片金属叠合后在外周通过熔焊方法将两者熔合成一整体，其上下表面设计加工有相互错开的圆弧形同心槽，从而构成波齿状整体结构的金属骨架。双金属自密封波齿复合垫片的典型结构如图1所示。

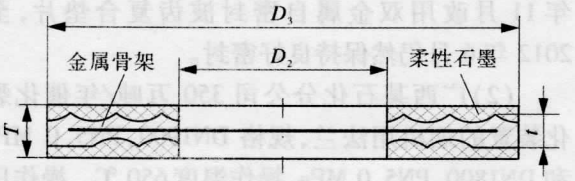


图1　双金属自密封波齿复合垫片的结构

3.2　双金属自密封波齿复合垫片的工作原理

虽然双金属自密封波齿复合垫片的安装与其他垫片一样是通过螺栓预紧实现初始密封，但在操作状态下其工作原理却完全不同。按强制密封理论设计的普通垫片，在被密封介质压力升高后，由于密封面的分离会使原有比压减少，从而发生泄漏。而对以压力自紧密封原理设计的双金属自密封波齿复合垫片，介质压力升高后，介质会通过间隙进入两金属间并向上下金属片施压，将介质压力传递给垫片与法兰接触面上，同步提高了操作状态下垫片的密封比压，使垫片能始终保持其良好的密封。

3.3　双金属自密封波齿复合垫片的性能特点

双金属自密封波齿复合垫片的整体结构除了金属骨架是由双金属组合外，其他结构和材料与以往的柔性石墨金属波齿复合垫片一样，因此它保留了柔性石墨金属波齿复合垫片原有的密封性良好、安全可靠性高、使用安装方便、适应性广等特点[3-5]，其特征参数 m，y 值也和柔性石墨金属波齿复合垫片相同。但由于其金属骨架按压力自紧密封原理设计，使它的密封性能更优，对压力、温度波动的适应范围也相应加宽。尤其是该垫片在操作状态下，介质压力始终作用于上、下金属片，使其压向上、下法兰面并形成与介质压力同步提升的附加密封比压，使那些表面不平的法兰同样能获得良好的密封性能。从原理上说，这种垫片适用于大直径的高温、高压（包括温度、压力存在一定波动）的管法兰和容器法兰。

3.4　双金属自密封波齿复合垫片的应用实例

近几年来，在包括大型容器、换热器等在内的大直径设备法兰上，有过采用双金属自密封波齿复合垫片来解决密封难题的实例[9-11]。

（1）洛阳某石化公司 140 万吨/年延迟焦化装置焦炭塔顶部大油气管线，法兰规格为 DN600，PN5.0 MPa。该系统每 18 h 切换一次，每次切换时温度从常温急升至 420 ℃，常出现泄漏。2010 年 11 月改用双金属自密封波齿复合垫片，至 2012 年 6 月仍然保持良好密封。

（2）广西某石化分公司 350 万吨/年催化裂化装置的烟机用法兰，规格 DN1900，PN5.0 MPa 和 DN1800，PN5.0 MPa，操作温度 650 ℃，操作压力 0.3 ~ 0.5 MPa。由于操作温度高，法兰尺寸较大，自 2010 年开工后不久就发生泄漏，甚至因此而停机，改用双金属自密封波齿复合垫片后一直保持很好的密封。

（3）双金属自密封波齿复合垫片在上海高桥某石化公司 80 万吨/年连续重整装置重整四合一 R201 反应器（操作温度达 500 ℃，压力 0.36 ~ 0.64 MPa，介质为氢、烃等，垫片尺寸 1712 mm × 1640 mm × 4.5 mm，材质为 321 + 柔性石墨）、R251 再生器（操作温度 530 ℃，压力 0.4 MPa，介质为氮气 + 氧气 + 催化剂等，垫片尺寸 1772 mm × 1700 mm × 4.5 mm，材质为 316L + 柔性石墨）和 E201 重整进料换热器（操作温度 500/549 ℃，压力 0.92/0.61 MPa，介质为整进料 + 循环氢气 + 反应出料，垫片尺寸 800 mm × 752 mm × 4.5 mm，材质为 304 + 柔性石墨）等设备法兰上应用，均取得很好的密封效果。

至目前为止，已有超过 3600 件双金属自密封波齿复合垫片成功地用于 DN650 以上的大直径法兰上，其中 DN1000 以上的超过 2000 件，DN1500 以上的超过 600 件，垫片最大直径已达 3300 mm。双金属自密封波齿复合垫片为解决大直径法兰密封问题提供了又一途径。

4　结语

与小直径法兰相比，造成大直径法兰密封不良的原因在很大程度上是由于法兰本身存在的宏观变形造成的，因此选用垫片时应更多地考虑其压缩回弹性能对不平度、变形等的补偿能力，并兼顾安装等其他方面的要求。新型双金属自密封波齿复合垫片不仅具有较大的补偿能力，而且由于采用了与以往“强制密封”完全不同的“压力自紧密封”原理进行设计，因而对提高大直径法兰密封性能有所帮助。

参考文献：

[1] 吴树济. 改进型金属—膨胀石墨复合垫片：中国，90215559[P]. 1991 - 06 - 19.

[2] 吴树济. 换热设备复合垫片：中国，92215173[P]. 1992 - 08 - 12.

[3] 梁建原，吴树济. 换热器用新型波齿复合垫片[J]. 压力容器，1993，10(4)：87 - 88.

（下转第 80 页）

主要报道领域:化工机械、化学工程及设备、化工材料及防腐蚀、泵阀管道等通用设备、计算机应用等领域的学术论文、应用研究、发展动态、国内外新技术、综述等。

具体报道范围:传热、蒸发、干燥、造粒、粉碎、过滤与分离、混合、精馏、吸附、压力容器、化工机泵、化工材料及防腐蚀、化工仪器及自动化、化工计算机应用等。

读者对象:化工、石化、制药、轻工、食品、冶金和机械等行业包括高等院校、科研设计院所和工厂等单位的教学、科研、工程技术人员和管理人员。

《化工装备技术》2013 年订价,每期 12 元,全年 72 元,每双月 10 日出版,各地邮局均可订阅。若误了邮局订期,可直接向本编缉部订阅。国内刊号:CN 31—1587/T,国际刊号:ISSN 1007—7251。编辑部地址:上海市斜土路 2421 号 2 号楼,邮编:200030,编辑部电话:021 - 64483993,传真:021 - 34240529,E - mail:hgzbjs@ sina. com. cn,网址:http://hgzb.chinajournal. net. cn。

《焊接技术》杂志(邮发代号:6 - 43)

《焊接技术》杂志是由天津焊接研究所与中国工程建设焊接协会联合主办,国内外公开发行的介绍焊接技术发展新趋势、新设备、新工艺、新材料等内容的专业期刊。继 1993 年之后,连续入选国家中文核心期刊(已入编 2011 版《中文核心期刊要目总览》),并被选为金属学、金属工艺学科的核心期刊;1996 年荣获全国第二届优秀科技期刊三等奖;2000 年荣获华北地区优秀期刊奖;自 1995 年至 2009 年,在天津市科技期刊评估评优中连续八届被评为一级期刊,连续七届荣获优秀期刊奖。2001 年进入中国期刊方阵,被评为双效期刊。2003 年至今被科技部收录为“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)。本刊还被“中国学术期刊(光盘版)”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“万方数据 - 数字化期刊群”《中国核心期刊(遴选)数据库》及科技部西南信息中心《中文科技期刊数据库》全文收录。

《焊接技术》以为广大作者、读者、焊接工作者服务,促进焊接行业发展为办刊宗旨,以推动焊接行业技术进步,提高焊接人员素质为办刊方针。

《焊接技术》杂志实用性强、信息量大、知识面广,重点报道国家重点工程现场施工中的先进经验;科研与生产中的新技术、新成果;国内外焊接新技术、新设备、新工艺、新材料。本着全方位为焊接行业服务的原则,在栏目安排上,既有著名专家学者对行业发展有指导意义的高水平学术论文,又有来自工程建设第一线的焊接工作者的具体工艺实践和生产经验;既反映国内外焊接行业发展的现状,又体现对焊接行业未来的展望。

本刊开设的主要栏目有:专题综述、试验与研究、工艺与新技术、焊接设备与材料、焊接质量控制与管理、焊工之友、全国焊接工程创优经验交流等。

《焊接技术》杂志由天津市邮局总发行,全国各地邮政局(所)均可订阅。国际标准连续出版物号:ISSN 1002—025X,国内统一连续出版物号:CN 12—1070/TG。

本刊定价 8.00 元/册,全年 12 期,邮局订阅 96 元整(全年),希广大读者每年 10 ~ 11 月到当地邮局订阅。地址:天津市河北区南口路 40 号,邮编:300232,电话:(022)27631854(编辑),(022)86562792(广告),E - mail: hjjsh1972@126. com。

(上接第 70 页)

[4] 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.

[5] 吴树济,钟海强. 新一代法兰垫片 - 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.

[6] 吴树济,刘秀英. 复合垫片:中国,200720053323[P]. 2008 - 06 - 04.

[7] 吴树济,刘秀英. 自紧式波齿复合垫片:中国,201020594151[P]. 2011 - 05 - 18.

[8] 吴树济,刘秀英. 带隔条复合垫片:中国,201020594153[P]. 2011 - 08 - 03.

[9] 吴树济,杨树人,黄鑫,等. 新型双金属自密封波齿复合垫片的应用[J]. 石油化工设计,2012,29(2):34 - 36.

[10] 许伟. 脱硫反应器大法兰泄漏原因分析与改进[J]. 石油化工设计,2012,29(2):62 - 64.

[11] 梁文元,蔡纪宁,李双喜,等. 挤压成型金属波纹管机械密封结构的优化设计[J]. 流体机械,2010,38(6):17 - 20.

收稿日期:2012 - 06 - 28 **修稿日期**:2012 - 09 - 25

作者简介:高俊峰(1971 -),男,高级工程师,高级主管,主要从事动静设备管理工作,通信地址:100007 北京市东城区东直门北大街 9 号中国石油天然气股份有限公司炼油与化工分公司装备管理处,E - mail:gaojf@ petrochina. com. cn。