波齿复合垫片的设计、性能及其质量

广州市东山南方密封件有限公司　吴树济　高级工程师

柔性石墨金属波齿复合垫片（简称波齿复合垫片）是上世纪90年代初由我公司根据作者本人的实用新型专利开发研制生产的专利产品，[1] [2] 它以其特殊结构设计和优秀的性能而成为新一代高性能法兰联接密封垫片。[3] [4] [5] [7] [8] [9] [10] 波齿复合垫片研制项目荣获了广州市人民政府颁发的广州市科技进步二等奖，1999年被广东省科学技术委员会评为广东省级重点新产品。2000年波齿复合垫片的专利实施项目被评为第四届广州市专利实施奖二等奖，并在第十届全国发明展览会上被评为新技术产品金奖。经二十年的推广和应用，目前已在石油化工各种设备上获得广泛应用，受到广大用户的高度好评和欢迎。仅2000～2009年十年间由我公司生产销售的波齿复合垫片产品总量超过 120万 件。我公司的产品覆盖中石化、中石油和中海油三大系统企业超过43家，装置超过34种，几乎涵盖石化生产装置。【详见“柔性石墨金属波齿复合垫片及其应用”】 [11]该专利产品在2003年专利保护期结束后已由我公司和北京机械院标准所等单位制订了国家标准。[12] [13] 此后密封件行业内其他厂家也开始其生产和制造。但由于各生产厂家的产品设计能力和技术水平的差异使波齿复合垫片的性能和质量参差不齐，从而会影响了产品的正常使用。本文针对波齿复合垫片的设计、性能及其质量等方面的问题进行分析研究和讨论，从而可以了解不同厂家生产的波齿复合垫片，其性能、质量的差异并非垫片本身的问题，而是由于各生产厂家对产品的设计存在差异而造成的。要确保波齿复合垫片的性能和质量，必须对产品进行正确设计。

一．波齿复合垫片的结构特征及其设计

波齿复合垫片的基本设计理念，是垫片要由足够坚固的具有金属线密封作用的弹性金属骨架加上大含量的石墨相复合构成，在某种意义上也可以说它是在综合波纹垫片的金属骨架的弹性和齿形组合垫片的金属线密封及两者复合的石墨密封特性的基础上，使其特性发挥至极的结果。正如我们在各种文章和资料上所描述的，其结构特征是由特殊设计的波齿状金属骨架和适当厚度的柔性石墨复合而成。因此，波齿复合垫片设计的关键也就在于金属骨架的正确设计和石墨厚度的适当设计。这两者设计的结合才能获得具有密封性能优异、压缩－回弹性能好、寿命长、安全可靠和安装使用方便等一系列优良

广州市东山南方密封件公司

特性的波齿复合垫片产品。

1. 波齿复合垫片的金属骨架设计

根据波齿复合垫片的基本设计理念，金属骨架的设计首先要既符合波纹垫的结构特征，又要符合齿形垫的结构特征，也就是说其金属骨架要形成所谓“波齿状”的结构。波齿垫金属骨架的典型结构已在国标“柔性石墨金属波齿复合垫片　技术条件”（GB/T 19066.3-2003）作了规定，如图1所示。

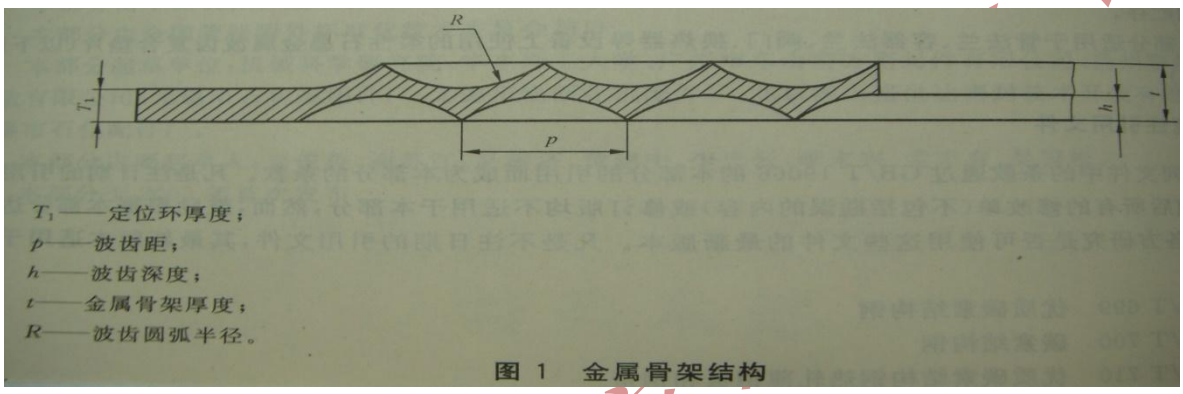


图 1　金属骨架结构

从上述标准典型结构图可知，波齿复合垫的金属骨架设计参数包括 波齿距P、波齿深度h、金属骨架厚度t、波齿圆弧半径R 等，不同的参数设计决定了金属骨架和波齿复合垫片的特性。因此，要获得波齿复合垫片的最佳性能，就要很好研究这些参数对垫片性能的影响，确定合适的垫片设计参数，从而设计生产出性能优异的波齿复合垫片产品。但产品标准并没有规定这些参数值，具体数值要由生产厂家设计确定。

在进行波齿复合垫片产品的金属骨架设计时，包括波齿距P、波齿深度h、金属骨架厚度t、波齿圆弧半径R 等各种参数并非固定不变，这些参数还应根据产品的通径规格大小和公称压力大小与之相适应，才能使波齿垫最终获得其优异的性能。

我公司正是基于上述的设计理念，通过大量试验和长期研究，针对各种法兰标准确定了各种公称通径和公称压力下相应垫片骨架的不同设计参数。也就是说，我公司设计生产的垫片，其金属骨架的设计参数是根据垫片的规格大小和压力的高低而采用不同的数值大小，此设计能保证垫片的性能获得最佳的效果。

2. 柔性石墨复合层的设计

柔性石墨复合层的设计是确保波齿复合垫片能否获得优异性能的另一关键。柔性石墨的填充量取决于填充石墨的密度、金属骨架的结构尺寸和垫片的使用工况，而填充石

墨的密度又与使用压力等工况相关。在石墨填充设计时，如果填充量不足，垫片压缩后石墨密度过低，不仅降低了垫片的承压能力，容易使垫片过压损坏，而且压缩－回弹性能低，密封性能差。如果填充量过大，垫片压缩后石墨无法全部压入波齿状沟槽内，不仅使垫片密封性能受到影响，而且影响到垫片使用的安全可靠性。因此不同规格大小和压力等级的波齿复合垫片，其石墨的填充密度和填充量是不同的。

我公司已根据垫片的不同规格和压力等级的金属骨架参数，通过大量试验和研究确定其石墨填充密度和填充量，从而使我公司设计生产的波齿复合垫片具有最佳的性能。

二．波齿复合垫片的性能指标

垫片的性能指标是检验垫片质量是否符合要求的最重要项目。目前大部分垫片标准都对此作了规定。垫片生产厂家所生产的垫片只有在经相关权威机构检测，其性能指标符合产品标准规定的要求时，其质量才被认可。波齿复合垫片的压缩－回弹和密封性能等主要性能指标在国标“柔性石墨金属波齿复合垫片　技术条件”（GB/T 19066.3）已作了明确规定。表 1 是波齿复合垫片产品标准所规定的垫片压缩回弹性能试验的试验条件和指标。表 2 是波齿复合垫片产品标准所规定的垫片密封性能试验的试验条件和指标。

表 1　波齿复合垫片产品标准所规定的垫片压缩回弹性能试验的试验条件和指标。

试样规格　/mm	压缩应力/MPa	加载、卸载速度/（MPa/s）	压缩率/%	回弹率/%	备注
Φ120.5×Φ84×3.0	45±1.0	0.5	35±10	≥15	金属骨架材料为奥氏体不锈钢

表 2.　波齿复合垫片产品标准所规定的垫片密封性能试验的试验条件和指标。

试验条件					允许泄漏率/（ml/s）	
试样规格　/mm	压缩应力/MPa	试验介质	试验温度/℃	试验压力/MPa	1 级	2 级
Φ120.5×Φ84×3.0	45±1.0	99.9%氮气	20±5	1.1 倍公称压力	≤ 1.0×10^{-4}	≤ 1.0×10^{-3}
注：试验垫片的金属骨架材料为奥氏体不锈钢。						

广州市东山南方密封件公司

柔性石墨波齿复合垫片的生产厂商应按垫片标准的要求，在完成产品系列设计和确定生产工艺过程后提供符合要求的试验试样由国家权威检测机构进行压缩－回弹性能和密封性能试验（即所谓“型式试验”），并获得符合产品标准要求的性能指标才能投入生产。

我公司从波齿复合垫片研制到投入生产都一直利用我公司密封技术研究室自建的垫片性能试验装置进行性能检测和研究，同时还根据规定提供试样由国家权威检测机构进行性能试验，以确定我公司生产的波齿复合垫片完全符合国家标准规定的质量标准。表3是国家相关权威检测机构－合肥通用机电产品检测院近几年来对我公司生产的柔性石墨波齿复合垫片所进行的部分压缩－回弹性能试验和密封性能试验检测数据。

表3 我公司设计生产的波齿复合垫片性能试验检测部分数据

检测编号	压缩率（%）		回弹率（%）		密封泄漏率（cm^3/s）	
	标准规定值	检测值	标准规定值	检测值	标准规定值	检测值
NO2008JM287	35±10	25.4	≥15	27.0	≤ 1.0×10^{-4}（一级）	0.96×10^{-5}
		25.6		26.7		0.85×10^{-5}
		25.8		26.6		0.10×10^{-4}
NO2012JM297		25.3		22.2		0.27×10^{-4}
		25.8		22.9		0.34×10^{-4}
		26.8		23.3		0.50×10^{-4}

从上表数值可以看到，我公司设计生产的波齿复合垫片其性能数据完全符合国家标准的要求，而且其数值比较好，尤其是回弹率比标准值高出很多，密封性能指标也大大超过国家标准的要求。

三．目前波齿复合垫片设计、生产和应用中存在的问题

正如前面所述，与其他垫片不同，波齿复合垫片是一种特殊设计生产的垫片产品，其产品性能完全取决于产品的设计（金属骨架的设计和石墨填充设计）和工艺。如果波齿复合垫片不能正确设计，垫片就不可能达到应有的性能。波齿复合垫片自90年代初作为专利产品推向市场并于2003年制订了国标后，生产该产品厂家越来越多，但从市场反馈的情况来看，有些产品性能无法达到标准的规定，从而影响了用户的使用。究其原因并非垫片本身的问题，而是因厂家生产的产品质量参差不齐所至。而导致各厂生产

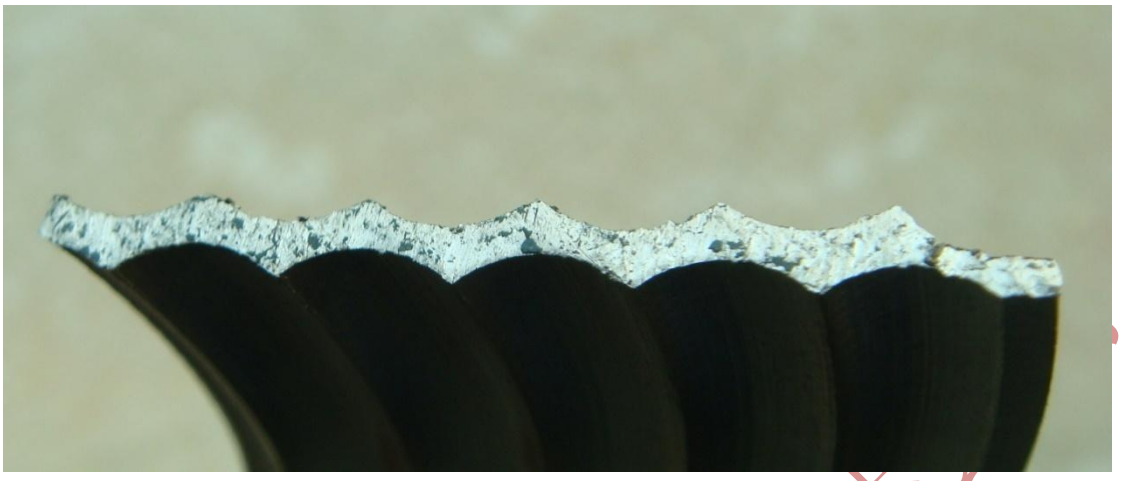
广州市东山南方密封件有限公司

的垫片质量差异的关键是在于垫片的设计。不少厂家由于技术力量不足，无法对产品进行正确的设计，以至无法按标准要求提供产品的压缩－回弹和密封等方面的性能数据。

例如，波齿复合垫的金属骨架形状不仅应符合国标的规定为“波齿状”结构（参见“我公司设计生产的波齿复合垫片金属骨架剖面图”），而且要求各参数（包括 t、p、h、R 等值）的设计要适当，再加上适当的柔性石墨填充量才能获得波齿复合垫片的优异性能。但有些厂家所设计生产的所谓波齿复合垫片却完全不按标准的规定。例如有些厂家金属骨架的结构设计只是在厚厚的钢板上随意加工几条沟槽，然后随便贴上石墨就成为所谓波齿复合垫片，（参见“某些厂家设计生产的波齿复合垫片骨架剖面图”而又有些厂家则把金属骨架压成波纹状再贴上石墨也成为所谓波齿复合垫片（此结构实际上是波纹垫的结构），（参见“某些厂家生产的所谓波齿垫片其金属骨架实际上是波纹状而非波齿状”） 更有甚者把齿形组合垫当成波齿复合垫向用户供货，如此五花八门，自然难以确保波齿复合垫片的质量。

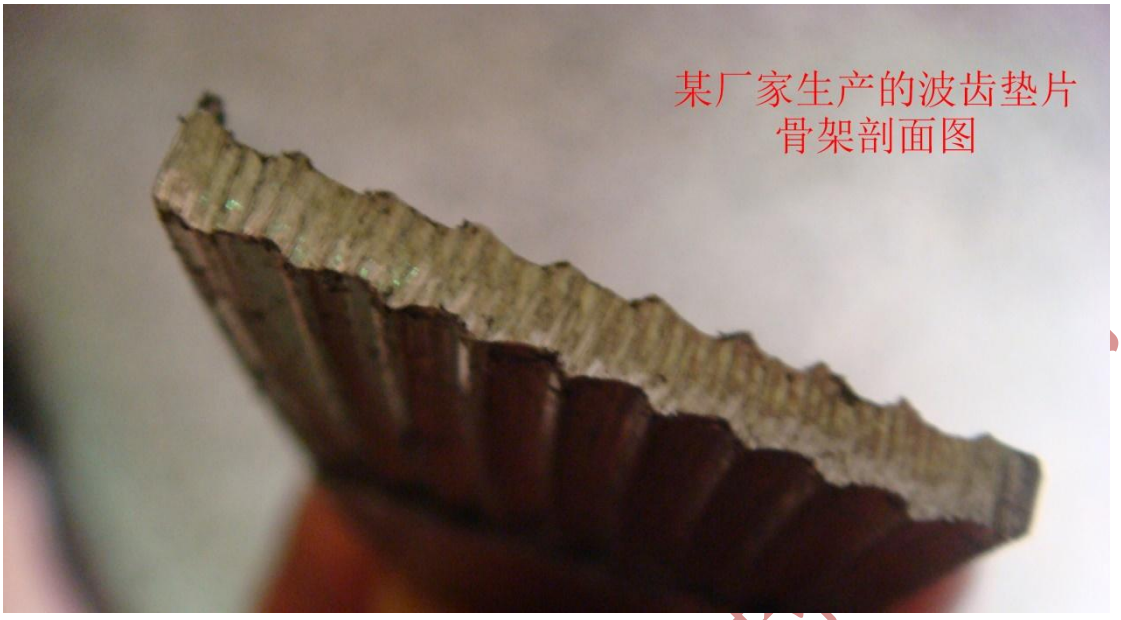
我公司设计生产的波齿复合垫片金属骨架剖面图（见下图）







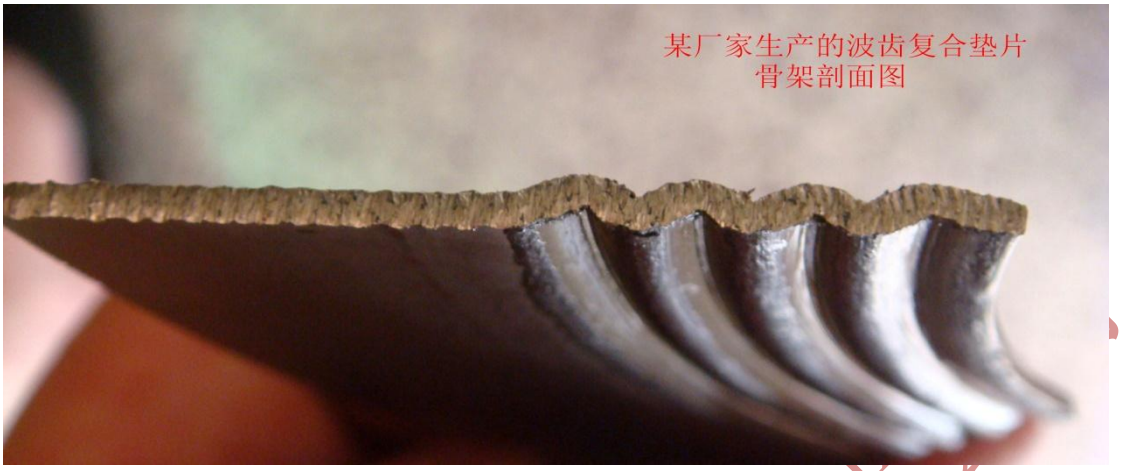
某些厂家设计生产的波齿复合垫片骨架剖面图（见下图），这些生产厂家设计生产的波齿复合垫片，其骨架结构尺寸并非真正波齿状，骨架厚重，沟槽加工随意而肤浅，因而性能必然无法达到波齿复合垫片的要求。

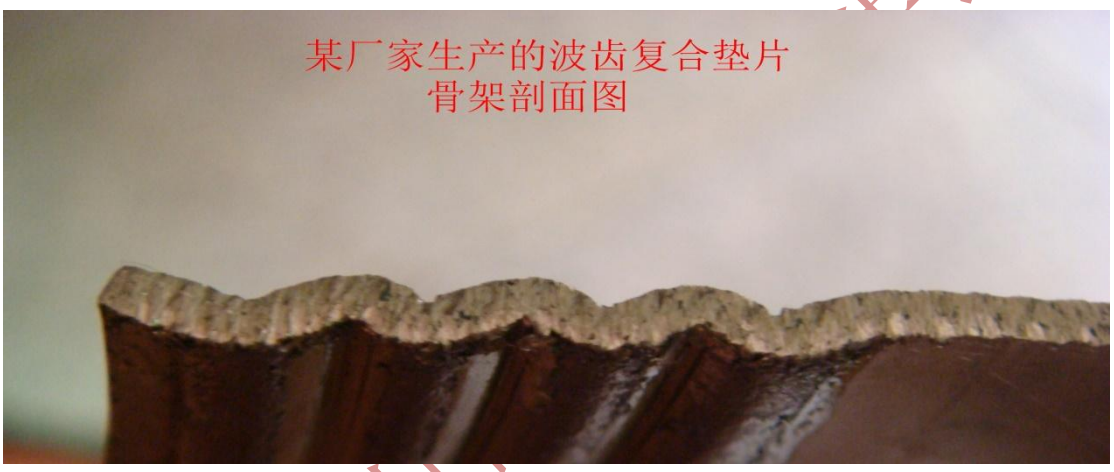




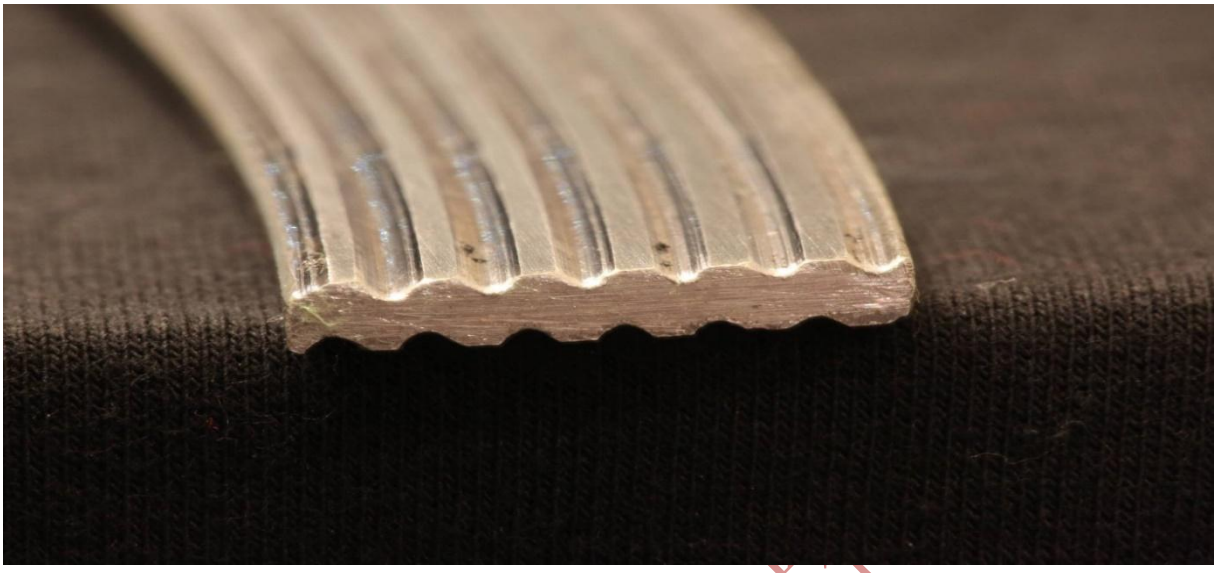
某些厂家生产的所谓波齿垫片其金属骨架实际上是波纹状而非波齿状







某些厂家设计生产的波齿复合垫片骨架剖面图（见下图），这些生产厂家设计生产的波齿复合垫片，其骨架结构尺寸并非真正波齿状，而是具有较大梯型平台的厚重结构，不仅骨架缺乏弹性而且垫片压缩后石墨难以进入沟槽而仍然覆盖在平台上，从而影响垫片的性能和使用的安全性。





从上述三种骨架剖面图可以看到，不同厂家在波齿复合垫片的设计上确实存在很大的差异，从而最终造成各厂生产的产品质量的巨大差距。因此，用户在采购中为确保波齿复合垫片的产品质量，必须确认以下两点，缺一都不能保证垫片的质量：

1. 生产厂是否按波齿复合垫片产品标准的规定进行设计制造。也就是说，波齿复合垫片的金属骨架结构设计是否符合标准规定的“波齿状”结构，而且其参数设计合理，柔性石墨填充量合适。

2. 在此基础上生产厂家是否能按标准的规定提供符合标准要求的压缩－回弹率和

密封性能指标，作为产品符合标准规定的质量依据。

此外，用户在确认波齿复合垫片生产厂家时还应特别注意，光凭生产厂家有生产该类垫片的许可证是不够的。因为目前垫片生产许可证的申理是将波齿复合垫片和高强石墨垫片（即柔性石墨复合增强垫）归类为石墨复合垫类，在生产许可证审查时只要在相同类别产品中提供其中一种产品进行型式试验，其指标符合该产品标准要求时，该类别的其他产品均可获得生产许可。因此有些生产厂家在波齿复合垫片无法保证质量的情况下（即在型式试验时无法保证所提供的波齿复合垫片试样试验数据符合标准规定的指标），会转而提供较易获得通过的高强石墨垫片的型式试验来取得石墨复合垫类的生产许可，从而同时获得波齿复合垫片的生产许可。所以，用户在确认生产供应商能否提供符合产品质量标准的波齿复合垫片时，应特别向垫片生产厂索取波齿复合垫片的压缩、回弹和密封等性能检测数据，才能获得真正符合产品标准要求的波齿复合垫片。

参考资料

[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] 吴树济，波齿复合垫片及其在石化设备上的应用[C]
第六届石化设备密封学术讨论会论文 ,北京：中国石油学会石油炼制委员会，中国石化设备管理协会，中国石化总公司重大设备国产化办公室 ， 1994 年

[4] 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[C] 第七届石化设备密封学术讨论会论文 ,北京：中国石油学会石油炼制委员会，中国石化设备管理协会，中国石化总公司重大设备国产化办公室 ， 1996 年

[5] 吴树济， 新型金属－膨胀石墨复合垫片 波齿复合垫片
《流体工程》 第 21 卷 第 9 期 1993 年 9 月

[6] 梁建原 郑伟权 吴树济，换热器用新型波齿复合垫片
《压力容器》 第 10 卷 第 4 期 1993 年 4 月

[7] 郭海东 李勇强， 波齿复合垫片在加氢装置高温高压换热器上的应用
《压力容器》 第 12 卷 第 6 期 1995 年 6 月

广州市东山南方密封件公司

[8] 陈大秋　程绍武，波齿复合垫片在我厂的应用
《石油化工设备技术》　第17卷　第3期　1996年5月
[9] 孙永杰，波齿复合垫片及其应用
《石油化工设备》　第27卷　第1期　1998年1月
[10] 王学兵　宋兴武，波齿复合垫片在加氢裂化装置上的应用
《石油化工设备技术》　2004年　第6期
[11] 吴树济. 柔性石墨金属波齿复合垫片及其应用　公司内部资料
[12] 柔性石墨金属波齿复合垫片　尺寸　GB/T　19066.1－2008
[13] 柔性石墨金属波齿复合垫片 技术条件　GB/T　19066.3－2003

广州市东山南方密封件有限公司　吴树济　高级工程师

2012－10－30

广州市东山南方密封件有限公司