

缠绕式垫片分级设计制造理论和技术*

顾伯勤 陈 晔 陆晓峰

(南京工业大学机械与动力工程学院 南京 210009)

摘要：通过不同材料、不同结构的组合以及制造工艺参数的合理选择，可制成不同性能的缠绕式垫片以适应不同介质、不同工况的使用要求。提出了缠绕式垫片分级设计与制造的概念，建立了基于垫片结构参数和生产工艺参数优化以及螺柱凸缘联接紧密性分析方法的分级设计制造理论，探讨了相关技术。实践表明，该技术的推广应用可有效提高缠绕式垫片的设计、制造和使用水平。

关键词：缠绕式垫片 分级设计 分级制造

中图分类号：TB42

0 前言

缠绕式垫片是一种由一定几何断面的成形金属带、非金属填料带以及加强环组成的组合式垫片(图 1)，其特点是压缩、回弹性能好，强度高，具有多道密封和一定的自紧作用；对凸缘压紧面的表面缺陷、压力和温度变化以及机械振动造成的影响不太敏感，能在高温、低温、高真空和冲击振动等苛刻工况条件下保持其优良的密封性能；特别是通过不同材料、不同结构的组合以及工艺参数的合理选用，可制成性能各异的产品，以适应不同介质、不同工况的使用要求。该类垫片是石油、化工、核能、航空航天和军工等行业设备和管道中广泛应用的密封件。

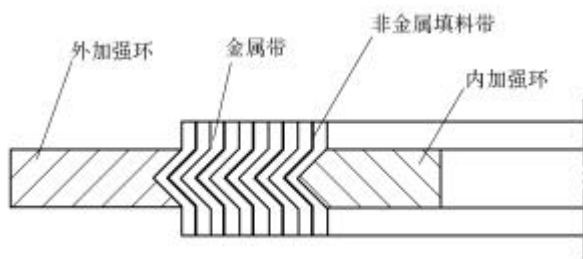


图 1 缠绕式垫片结构

1 缠绕式垫片的分级

缠绕式垫片可依据其基本性能和适用工况分级。工况主要是指垫片适用的温度、压力和介质；垫片基本性能可从两方面来描述，一是其力学性能，

包括压缩回弹特性、蠕变和应力松弛特性等；二是其基本密封特性，它是与泄漏率相联系的，是衡量垫片综合性能的主要指标。

缠绕式垫片对使用温度和介质的适应性主要通过选用不同的金属带和非金属填料带组合来实现；而其基本性能以及适用的压力等级则需采用不同的垫片结构参数和制造工艺来满足。

常用的金属带和非金属填料带的大致适用温度范围如表 1、2 所示^[1-3]。

表 1 常用金属带的最高使用温度

金属带	低碳钢	0Cr18Ni9	1Cr18Ni9Ti
最高使用温度 $q/$	500	800	800
金属带	0Cr18Ni12Mo2Ti	00Cr17Ni14Mo2	Hastelloy 合金
最高使用温度 $q/$	800	800	1 100
金属带	Monel 合金	Inconel 合金	Ti 合金
最高使用温度 $q/$	800	820~1 100	1 100

表 2 常用非金属填料带的适用温度范围

非金属填料带	聚四氟乙烯	特制石棉	
适用温度范围 $q/$	-200 ~ 260	-200 ~ 500	
非金属填料带	柔性石墨	云母柔性石墨	
适用温度范围 $q/$	-270 ~ 600(氧化性介质)	-200 ~ 400	
	-270 ~ 800(非氧化性介质)		
非金属填料带	陶瓷纤维	芳纶纤维	碳纤维
适用温度范围 $q/$	-200 ~ 1100	-200 ~ 300	~480

目前，美国、日本以及我国的凸缘联接设计规范^[4-5]中将缠绕式垫片的预紧比压规定为 69 MPa，而并未考虑工况的影响，这导致低级别凸缘联接中螺柱力偏小和高级别凸缘联接中垫片预紧比压过高，从而影响了该产品的安全使用。

研究表明，螺柱凸缘联接的公称压力等级与合理的垫片预紧比压之间存在一定的关系，其数值如表 3 所示。

* 江苏省“六大人才高峰”资助项目(苏人通[2005]6号)。20050430收到初稿，20050912收到修改稿

表3 螺柱凸缘联接的公称压力等级与相应的垫片预紧比压

螺柱凸缘联接的公称压力等级 p_n/MPa	≤ 2.0	2.5~6.8	10.0
垫片的预紧比压 y/MPa	40	70	100

中国国家标准《缠绕式垫片技术条件》规定的缠绕式垫片的基本性能指标如表4所示^[6]。

表4 缠绕式垫片的基本性能指标

垫片材料	性能指标			泄漏率 $L/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ (试样公称直径为 80 mm)
	压缩率 $r_1/\%$	回弹率 $r_2/\%$	应力松弛率 $r_3/\%$	
金属带 + 特制石棉		≥ 19	≤ 28	1.2×10^{-5} (1级)
金属带 + 柔性石墨	18~30	≥ 17	≤ 18	1.0×10^{-4} (2级)
金属带 + 聚四氟乙烯		≥ 15	≤ 13	1.0×10^{-3} (3级)

可见，为使缠绕式垫片满足不同的使用工况，保证各种工况条件下联接的紧密性，必须建立垫片的分级设计理论，开发分级制造技术。

2 缠绕式垫片分级设计制造原理和方法

缠绕式垫片分级设计制造分为两部分：一是垫片结构参数和制造工艺参数的优化，以保证产品具有最佳性能；二是建立联接系统的紧密性分析方法，依据该方法，将工作压力和工作温度作为设计条件，对产品进行设计，使之满足联接系统的最大允许泄漏率和强度要求。

2.1 垫片结构参数和制造工艺参数的确定

2.1.1 垫片结构参数

缠绕式垫片结构参数主要包括金属带厚度、填料带厚度、成形金属带的宽度、高度和角度等。

研究中采用的金属带厚度为 0.2 mm；填料带厚度为 0.5 mm、宽度为 5.8 mm。常用的缠绕式垫片名义厚度为 4.5 mm。实际生产中垫片厚度通常控制在 4.5~4.7 mm，非金属填料带应均匀高出金属带 0.2 mm，则成形金属带的宽度应为 4.3 mm，其高度采用 1.5 mm。如图2所示，设成形前金属平带的宽度为 b_1 ，成形金属带直边宽度为 b_2 ，高度为 h ，角度为 2α ，则在满足成形后金属带宽度为 4.3 mm 的条件下有

$$2b_2 + \frac{2h}{\cos \alpha} = b_1 \quad (1)$$

$$2b_2 + 2h \tan \alpha = 4.3 \quad (2)$$

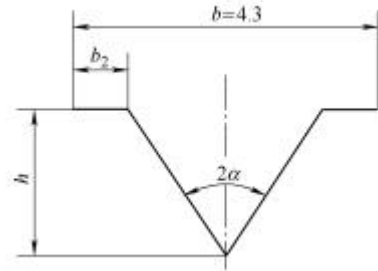


图2 成形金属带的几何形状和尺寸

成形前金属平带宽度 b_1 取 5.1、5.3 和 5.5 mm 三种，则由式(1)和(2)可得到成形金属带的几何尺寸如表5所示^[7]。

表5 金属带的几何尺寸

成形金属带尺寸	成形前金属平带宽度 b_1/mm		
	5.1	5.3	5.5
成形金属带宽度 b/mm	4.3	4.3	4.3
成形金属带高度 h/mm	1.5	1.5	1.5
角度 $2\alpha/(\text{°})$	111.6	95.85	80.9
直边宽度 b_2/mm	0.24	0.70	1.04
斜边长度 l/mm	2.31	1.94	1.71

按照计算得到的成形金属带结构尺寸，结合不同的工艺参数制造垫片，并对垫片的性能进行试验，便可确定最佳的垫片结构参数。

2.1.2 垫片制造工艺参数

除了垫片的结构参数外，工艺参数亦显著影响垫片的性能。工艺参数主要是指垫片制造过程中的压紧力和金属带的拉紧力，这两个参数直接影响垫片的缠绕密度。传统的制造方式对生产工艺参数的控制十分粗略，甚至完全不加控制，因而产品质量无法保证。本研究在压紧轮后加一小型气缸、成形金属带盘轴上安装电磁离合器，通过专用控制器调节气缸内气体压力和施加于电磁离合器上的激磁电压分别调节压紧力和金属带拉紧力的大小^[7]。设压紧轮上的压紧力为 F_c ，则

$$F_c = \frac{p}{4} d^2 \quad (3)$$

式中 F_c ——压紧轮上的压紧力

d ——气缸活塞直径

p ——气缸内气体压力

改变压力 p ，就可调节垫片缠绕时的压紧力。

电磁离合器的转矩可由式(4)计算

$$M = K m D_{av} U^2 \quad (4)$$

式中 M ——电磁离合器的转矩

K ——与电磁离合器结构有关的常数

m ——摩擦片间的动摩擦因数

D_{av} ——摩擦面的平均直径

U ——激磁电压

若成形金属带盘直径为 D , 则金属带的切向拉紧力为

$$F_t = \frac{2K m D_{av} U^2}{D} \quad (5)$$

式中 F_t ——金属带的切向拉紧力

D ——成形金属带盘直径

改变激磁电压 U 便可调节金属带拉紧力的大小。

金属带压紧力和拉紧力的连续精确可调, 是制造高质量垫片的重要条件。依据经验选定一系列数值后, 结合不同的垫片结构参数制造产品, 并对产品的压缩回弹特性、蠕变和应力松弛特性以及基本密封特性进行试验, 就可使产品的性能与结构和工艺参数取得最佳匹配。

2.2 螺柱凸缘联接系统的紧密性分析方法

2.2.1 垫片基本性能及其表示方法

垫片的压缩特性和回弹特性可分别由式(6)、(7)表示

$$S_K = (A_C - B_G) D_K^{N_C} \quad (6)$$

$$\frac{S_G}{S_K} = A_S + B_S \left(\frac{D_G}{D_K} \right)^{(A_T + B_T q)} \quad (7)$$

式中 S_K, S_G ——预紧和操作时的垫片应力

D_K, D_G ——预紧和操作时的垫片压缩量

q ——温度

A_C, B_C, N_C ——压缩特性公式的回归系数

A_S, B_S, A_T, B_T ——回弹特性公式的回归系数

垫片蠕变特性可由式(8)表示

$$\frac{D_{GR}}{D_K} = 1 + (B_R + C_R q) \ln t \quad (8)$$

式中 t ——时间

D_{GR} ——计及蠕变量的垫片总压缩量

B_R, C_R ——回归系数

垫片基本密封特性可由式(9)表示

$$L = A_L p S_G^{M_L} q^{N_L} \quad (9)$$

式中 L ——体积泄漏率

p ——介质压力

A_L, M_L, N_L ——回归系数

2.2.2 垫片基本性能的试验研究

压缩回弹性能试验的目的是研究垫片在某一恒定的预紧应力等级 S_K 、不同温度下, 其压紧应力和变形量的关系, 确定材料本构关系式(6)和(7)中的各系数; 蠕变性能试验的目的是研究垫片在不同预紧应力等级 S_K 、不同温度 q 下, 其蠕变量 D_R (D_{GR} -

D_K) 与时间 t 的关系, 确定蠕变方程式(8)中的各系数; 密封性能试验的目的是测定垫片在不同预紧应力等级 S_K 、不同温度 q 以及不同介质压力 p 下的泄漏率 L , 研究压紧应力 S_G 、介质压力 p 及温度 q 与泄漏率 L 的关系, 确定密封特性方程(9)中的各系数。

试验在垫片高温性能试验装置上进行^[8]。同一试验条件下取三个垫片试样进行重复试验, 以排除数据的偶然性。试样尺寸和试验方案如表 6, 部分试验结果如图 3~5 所示。

表 6 垫片试样和试验方案

垫片类型及尺寸	压缩回弹性能试验	蠕变性能试验	密封性能试验
缠绕式垫片			$S_K=40, 55, 70,$
材料: 0Cr18Ni9 +	$S_K=40, 55, 70,$	$S_K=40, 55,$	85 MPa
柔性石墨	85 MPa	70, 85 MPa	$q=15, 150, 300,$
尺寸: $\varnothing 95 \text{ mm} \times$	$q=15, 150, 300,$	$q=15, 150, 300,$	400, 500
$\varnothing 121 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$	400, 500	400, 500	$p=0.6, 2.0, 3.5,$
			5.0 MPa

由图 3~5 可见, 垫片的弹塑性变形量均随垫片应力的增大而增大, 压缩曲线和回弹曲线均非直线且不重合, 具有非线性、非保守的特征。即使在室温条件下, 垫片的蠕变也会发生, 温度越高, 蠕变量越大。蠕变使联接结构松弛, 最终导致失效。显然泄漏率随垫片应力的增大而减小, 随介质压力的增大而线性增大, 流体通过垫片的泄漏具有粘性流体层流的特征。

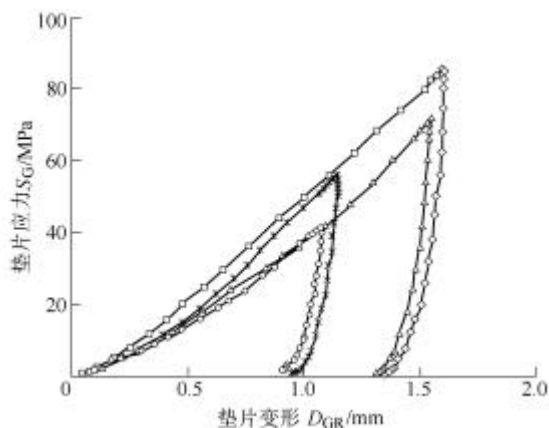


图 3 试验温度 500 时的压缩回弹曲线

由试验数据回归分析得到的垫片性能表达式(6)~(9)中的各系数列于表 7 中。

2.2.3 联接系统的变形协调方程

螺柱凸缘联接是一个预应力静不定结构。预紧状态下, 各元件就处于较高的应力水平。在操作工况下, 由于流体压力和温度的共同作用, 使凸缘弯矩、螺柱载荷、垫片应力均发生改变, 相应的凸缘位移、螺柱伸长量、垫片变形量也发生改变, 这些变形量是相容的, 符合联接系统的变形协调条件

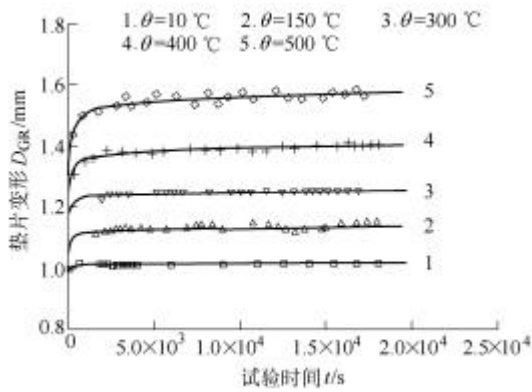


图4 垫片预紧应力70 MPa、不同试验温度下的蠕变特性曲线

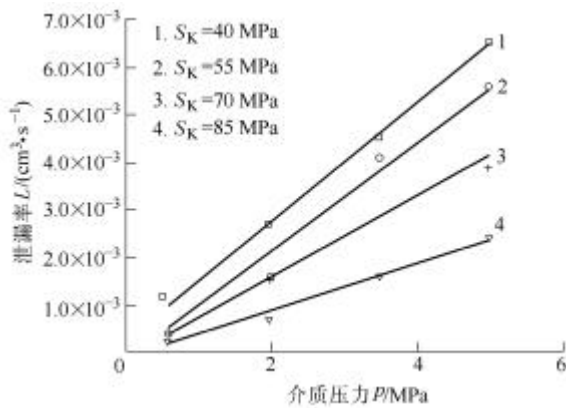


图5 试验温度400 时泄漏率与垫片预紧应力和介质压力的关系(试验介质：氮气)

表7 垫片压缩回弹性能、蠕变性能和密封性能公式中的回归系数

垫片性能及公式	回归系数	
	符号	数值
压缩性能 式(6)	A_C	73.80
	B_C	0.070
	N_C	1.300
回弹性能 式(7)	A_S	-0.002 5
	B_S	0.960
	A_T	17.940
蠕变性能 式(8)	B_T	0.087 0
	B_R	1.38×10^{-3}
密封性能 式(9)	C_R	2.00×10^{-5}
	A_L	1.20×10^{-3}
	M_L	0.401
	N_L	-0.670

$$D_K - D_G = l_2 - l_1 + 2(D_{F2} - D_{F1}) + D_R \quad (10)$$

式中 l_1, l_2 ——预紧和操作时的螺柱变形量

D_{F1}, D_{F2} ——预紧和操作时的凸缘变形量

D_R ——垫片蠕变量

将螺柱、凸缘和垫片在预紧和操作工况下的变形量代入式(10)得到

$$D_K - D_G - D_K(B_R + C_R q) \ln t - [q_B^t W_2 - q_B W_1 + l_0(a_B^t q_2 - a_B q_1)] - 2[q_F^t M_2 + q_F p - q_F M_1 - d_F(a_F^t q_2 - a_F q_1)] = 0 \quad (11)$$

式中 q_B, q_B^t ——预紧和操作温度下螺柱的弹性系数

q_P^t ——考虑压力膨胀效应时的凸缘弹性系数

a_B^t ——操作温度下螺柱材料的线膨胀系数

a_F^t ——操作温度下凸缘材料的线膨胀系数

l_0 ——螺柱初始计算长度

q_1, q_2 ——预紧和操作温度

q_F, q_F^t ——预紧和操作温度下凸缘的弹性系数

W_1, W_2 ——预紧和操作时的螺柱载荷

M_1, M_2 ——预紧和操作时的凸缘力矩

p ——操作压力

d_F ——凸缘厚度

3 分级设计制造方法的应用

结构和工艺参数对缠绕式垫片的性能影响很大。因此，对于不同压力等级、不同使用工况条件，特别是高温高压或温度压力波动频繁的场所，可选择不同材料、不同结构、不同工艺参数的匹配，制造垫片，保证产品有足够的适应苛刻工况的能力，确保实际使用中密封联接系统的安全可靠性。

对于某一特定的螺柱凸缘联接，已知其最大允许泄漏率为 L_{max} 。实际联接的泄漏率随垫片宽度和介质粘度的增大而减小，随垫片直径的增大而增大。为了应用试验室条件下得到的垫片泄漏方程式(9)，必须把实际螺柱凸缘联接的最大允许泄漏率 L_{max} 折算成试验条件下垫片试样的泄漏率 L 。当密封间隙中流体的流动为层流状态时，折算公式为

$$L = \frac{b_2 D_1 h_1^t}{b_1 D_2 h_1} L_{max} \quad (12)$$

式中 b_1, b_2 ——试验垫片和实际垫片的有效宽度

D_1, D_2 ——试验垫片和实际垫片的外径

h_1 ——试验介质的粘度

h_1^t ——实际介质在操作温度下的粘度

L ——试验条件下垫片试样的泄漏率

L_{max} ——实际螺柱凸缘联接的最大允许泄漏率

根据泄漏率 L 、操作压力 p 和温度 q ，可由式(9)计算得到所需的垫片残余压紧应力 S_G 以及相应的螺柱操作载荷 W_2 ，然后可由联接系统变形协调方程式(11)计算得到垫片预紧应力 S_K 。

如果计算得到的 S_K 与表 3 所推荐的垫片预紧比压值基本一致，则认为所设计的产品满足实际螺柱凸缘联接对最大允许泄漏率和垫片预紧比压的要求。否则，可调整垫片的结构参数和工艺参数，重新制造垫片，并进行垫片的性能试验和连接系统的紧密性分析，直至满足要求。

南京赛博过程工业装备有限公司采用该技术和相应的成套装备，从事缠绕式垫片制造。产品经燕山石化公司和南化公司等单位的使用表明，其性能优良、密封可靠，总体性能优于进口产品。

4 结 论

(1) 缠绕式垫片的分级应以其基本性能和适用工况为依据。工况主要是指垫片适用的温度、压力和介质。垫片基本性能主要包括压缩回弹特性、蠕变特性、应力松弛特性和基本密封特性。垫片的基本密封特性是与泄漏率相联系的，是衡量垫片综合性能的主要指标。

(2) 缠绕式垫片的分级设计制造可通过其结构参数和制造工艺参数的优化以及螺柱凸缘联接的紧密性分析来实现。合理选择金属带和填料带的厚度、成形金属带的宽度、高度、角度等垫片的结构参数以及制造过程中金属带压紧力和拉紧力等制造工艺参数制造产品，并对产品的基本性能进行试验，就可使产品的性能与结构和工艺参数取得最佳匹配，而产品使用性能的检验则可通过螺柱凸缘联接的紧密性分析来实现。

(3) 缠绕式垫片分级设计制造技术的推广应用将有助于促进垫片生产企业的技术改造，提高我国密封件设计、制造和应用水平。

参 考 文 献

- [1] 顾伯勤, 李新华, 田争. 静密封设计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [2] 蔡仁良, 顾伯勤, 宋鹏云. 过程装备密封技术[M]. 北京:

化学工业出版社, 2002.

- [3] 顾伯勤. 新型静密封材料及其应用[J]. 石油机械, 2003, 31(2): 50-52, 58.
- [4] GB 150-1998 钢制压力容器[S].
- [5] ASME Rules for construction of pressure vessels[M], Section VIII, Division 1. New York: ASME, 1989
- [6] GB 4622.3-1993. 缠绕式垫片技术条件[S].
- [7] 陆晓峰, 顾伯勤. 缠绕式垫片生产新技术与装备[J]. 石油机械, 1999, 27(8): 29-31.
- [8] 顾伯勤, 陆晓峰. 垫片高温性能试验装置及测漏方法研究[J]. 石油机械, 1999, 27(1): 39-41, 46.

THEORY AND TECHNOLOGY OF CLASSIFICATION DESIGN AND MANUFACTURE OF SPIRAL WOUND GASKETS

GU Boqin CHEN Ye LU Xiaofeng

(College of Mechanical and Power Engineering,
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009)

Abstract : By selecting appropriate metallic strip and nonmetallic filling strip materials, and adopting reasonable structure sizes and production technological parameters, spiral wound gaskets with good performances can be fabricated, which are suitable for the diverse rigorous operating conditions such as high and low temperature, high pressure, vibration, corrosion medium and so on. The concept of the classification design and manufacture of spiral wound gaskets is put forward. The corresponding theory and technology are investigated, which based both on the optimization of the structure sizes and production technological parameters of gaskets and on the tightness analysis method of bolted flanged connections. This technology will contribute the design, manufacture and use of spiral wound gaskets.

Key words : Spiral wound gasket Classification design
Classification manufacture

作者简介: 顾伯勤, 男, 常务副院长、教授、博士生导师。主要从事研究生教学和流体密封与测控技术研究。

E-mail: bqgu@njut.edu.cn