排灌机械工程学报 第28卷 第4期
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering Vol. 28 No. 4

羰化循环泵的机械密封设计

何玉杰，张　丽，黄铭科，刘三华，张军辉
（江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘　要：针对在羰基化合成醋酐工艺装置中，国产羰化循环泵在投入使用后机械密封很快失效的情况，提出对密封选材、结构设计、型式及辅助系统布置的改造方法.从经济性方面考虑结合挂片试验结果，确定采用哈氏B2作为机械密封的结构材料，全氟醚橡胶作为辅助密封材料；将机械密封设计成两级串联集装式平衡型机械密封结构，以此防止所输送的易燃、易爆、有毒高危介质（如醋酸、碘甲烷、碘化氢、丙酸等）外漏；对密封采用PLAN 32 + PLAN 54 + PLAN 62的冲洗方案，改善密封工作环境；首级密封静环的前面设置挡环和卡簧，控制静环轴向位移；对压力较高的次级密封的各个参数进行了合理的选取和设计，保证端面的承压能力并减少摩擦生热，从而大大提高了机械密封的使用寿命和可靠性.

关键词：羰化循环泵；羰基化合成；机械密封；材料；设计计算
中图分类号：S277.9；TH311　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－8530(2010)04－0325－05

Design of mechanical seal used in carbonylation recycle pump

He Yujie, *Zhang Li*, *Huang Mingke*, *Liu Sanhua*, *Zhang Junhui*
(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Aiming at the problem that the mechanical seal of domestic carbonylation circulation pump fails soon after putting into use in the process plant of acetic anhydride synthesis, the choice of sealing materials, transformation method for structural design, type and arrangement of auxiliary systems were proposed. Considered from economical aspect that combined the result of coupon corrosion test, Hastelloy B2 was adopted as structure material of the mechanical seal, and KALREZ as a secondary sealing material. In order to prevent the leakage of transportation medium that is flammable, explosive, toxic, high-risk(such as acetic acid, iodine, methane, hydrogen iodide, propionic acid, etc.), the mechanical seal was designed as cartridge cascaded balance type structure. PLAN 32 + PLAN 54 + PLAN 62 method was adopted on seal to improve the seal working condition. To control axial displacement of the first stage static ring, retaining ring and circlip were set up in front of it. The various parameters of secondary seal in higher pressure were reasonably selected and designed to ensure the pressure ability that the friction face can take and reduce the heat which was generated by friction. As a result, the service life and reliability of mechanical seal are greatly increased.

Key words: carbonylation recycle pump; carbonylation synthesis; mechanical seal; material; design calculation

收稿日期：2009－10－21
基金项目："十一五"国家科技支撑计划项目(2006BAB03A02)；江苏省高新技术项目(BG2006024)
作者简介：何玉杰(1962—)，男，河北沧州人，高级工程师(heyujie@ujs.edu.cn)，主要从事密封设计研究.
张　丽(1987—)，女，江苏泰州人，硕士研究生(zhanglizhengjiang@126.com)，主要从事密封设计研究.

万方数据

多年来,通过大量引进国外先进的设计及制造技术,我国石化用泵在产品质量以及技术性能方面都有了很大的提高,但与同种类型的国外泵相比,特别是在高温泵、耐腐蚀泵及其他高要求的泵中,其质量和可靠性方面都还存在很大的差距.这主要是由国内的工艺水平落后,加工精度低,耐腐蚀、耐高温材料品种少,选材不当,密封装置使用寿命短等决定的.随着石化工业的发展,对耐腐蚀技术要求的提高,一般的耐腐蚀材料已经无法满足苛刻的工作条件的需要,而特殊的耐腐蚀材料制造成本高.近年来,为了节省材料,国内外对基底金属(或合金)材料表面涂覆技术[1]进行了广泛研究,由于影响涂覆得到的复合材料的耐腐蚀性能的因素很多,目前国内还没有研究出完善的制备方法.与国外产品相比,国内产品耐腐蚀力弱,并且在制备或使用过程中涂层容易裂口.另外,我国的机械密封及其辅助系统的设计和应用水平低,高参数(高温、高压、高速、高腐蚀)的工况下,装置运行可靠性差.目前,国外著名的密封公司大多拥有自主开发的机械密封设计软件,我国在这方面的研究开发工作还只是处于起步阶段.

笔者介绍的羰化循环泵是石化用泵的一种,其所输送的介质具有腐蚀性强、有毒、有害、高危的特征,国内传统的不锈钢材料制造的机械密封在投入使用后不久就出现了较严重的腐蚀,加之高温、高压使得端面间液膜汽化,产生干摩擦,加速腐蚀、磨损,加快密封圈老化,加速了密封的失效,冲洗液进入醋酸,产品质量降低,该泵无法长期、有效、安全的运行.因此,目前国内所有羰基化合成醋酐工艺装置中的羰化循环泵均依赖于进口.为了实现该泵的国产化,笔者从提高该泵的材料的耐腐蚀性及可靠的密封性能出发,根据对现有装置用泵的调研以及材料挂片试验结果,就羰化循环泵机械密封的材料以及高温、高压的苛刻工况,在密封结构设计、型式、辅助系统布置及选材[2]上针对进口泵的机械密封进行了国产化改造.

1 机械密封的选材

1.1 金属材料

在羰化循环工艺装置中,泵的工作环境:温度为170~199 ℃,压力为5.0 MPa,介质为醋酸、碘甲烷、醋酸甲酯等混合液.

在此工况条件下介质对金属材料具有非常强的腐蚀性,一般常用的金属材料很难抵抗腐蚀,随着温度的升高,腐蚀速率逐渐增大,当温度升高到一定值,金属材料的耐蚀性会急剧下降.图1中曲线为单一醋酸介质的腐蚀速率曲线.根据腐蚀速率曲线划分了5个材料使用区域,其中区域Ⅰ为低温、低含量的低腐蚀区.从区域Ⅱ可以看出醋酸在中含量时,其腐蚀较强,低含量和高含量时腐蚀性较弱.随着温度的升高,对材质的要求也越高,区域Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ表明了在更高温度及不同的质量分数下醋酸腐蚀性的区域划分.在不同区域中材料的选择如表1所示[3].

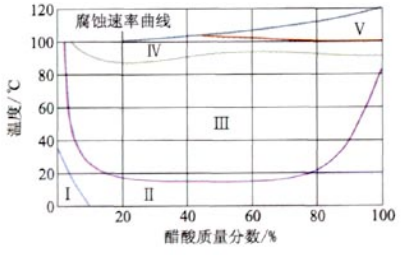


图1 醋酸溶液中的材料使用区域(腐蚀率≤0.1 mm/a)

Fig. 1 Materials utilization region in acetic acid solution (corrosion rate≤0.1 mm/a)

表1 不同区域中的材料选择

Tab. 1 Selection of material in different regions

序号	区域Ⅰ	区域Ⅱ	区域Ⅲ	区域Ⅳ	区域Ⅴ
1	碳素钢	1Cr17Mo2Ti	1Cr18Ni9Ti	1Cr18Ni12Mo2Ti	高硅铸铁
2	低合金钢	1Cr18Ni9Ti	1Cr18Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	钛
3	普通铸铁	铝(<40 ℃)	0Cr17Mn13MoTi	0Cr17Mn13Mo2N	蒙乃尔合金
4	1Cr13	1Cr18Ni12Mo2Ti	1Cr17Mn9Ni3Mo3Cu2N	0Cr17Mn9Ti3Mo3Cu2N	哈氏合金 B,C,D
5	1Cr17Mo2Ti	高硅铸铁	高硅铸铁	高纯铝	银
6	1Cr18Ni9Ti		钛	高硅铸铁	锆

在羰化循合成工艺中,除了醋酸的腐蚀外,还存在碘腐蚀,温度为180 ℃,综合图1和表1数据,在羰化循合成装置中对不同金属材料做挂片试验,将试样加工成10 mm×10 mm×5 mm,将其投入试验环境中24 h后,发现在羰化循合成装置中,锆合金的耐腐蚀性最好,哈氏合金次之,在24 h的挂片试

万方数据

验中，材料基本未见腐蚀，这是因为锆合金在室温下就能和空气里的氧气反应，生成附着力很强的致密的氧化膜，从而提高了抵抗强腐蚀的性能；哈氏合金本身属于高镍基合金，它以镍、钼作为主要的合金元素，旨在提高对各种介质和温度的适应能力，而且具有很好的抗腐蚀能力. 由于生产技术水平的限制，目前国内只能得到初级锆材产品，工业装置用的锆和锆合金主要依赖于进口，供货周期很长而且锆材料的价格非常昂贵. 综合考虑材料的成本、性能、来源、制造工艺等诸方面的因素，采用哈氏 B2 (00Ni70Mo28)合金替代锆合金制作机械密封的压盖、轴套及金属内件的材料.

1.2 摩擦副材料

摩擦副选用了热导率高的 SiC 材料作静环[4]以及具有良好的自润滑性的浸树脂石墨作为动环. 该摩擦副的使用保证了密封面间的润滑性和耐磨性. 同时该摩擦副材料有很好的耐腐蚀性和耐高温性，适合于该机械密封工作的工况.

1.3 辅助密封材料

在羰基合成工艺工况条件下，常用材料(橡胶、聚四氟乙烯)均不能满足使用要求，根据相关资料及进口产品的使用情况，决定采用全氟醚橡胶[5](KALREZ)作为辅助密封材料. 全氟醚橡胶是一种合成弹性体，具有和聚四氟乙烯类似的热稳定性和耐化学性，耐高温压缩永久变形性能超越了一般氟橡胶，在强腐蚀的环境中老化的速度缓慢，材料成分纯净，很少溶解或排放到介质中，可在较高温度和腐蚀环境中长期使用.

2 密封结构形式的设计

2.1 密封参数

密封参数中压力取为 4.6 MPa，温度为 180 ℃，转速为 2 950 r/min，轴径为 50 mm，介质为醋酸、碘甲烷、醋酸甲酯等.

2.2 结构形式

考虑到介质的工况为高温、高压、有毒、腐蚀性强，采用两级串联集装式平衡型机械密封结构，为了降低密封腔的温度，将摩擦产生的热量及时带走，防止液膜汽化，确保介质的“0”泄漏，按照 API 682 标准[6]要求设置密封辅助系统，为机械密封创造适宜的工作环境，结合装置工况条件，选用 API 682 PLAN 32 + PLAN 54 + PLAN 62 方案，其密封结构及系统图见图 2.

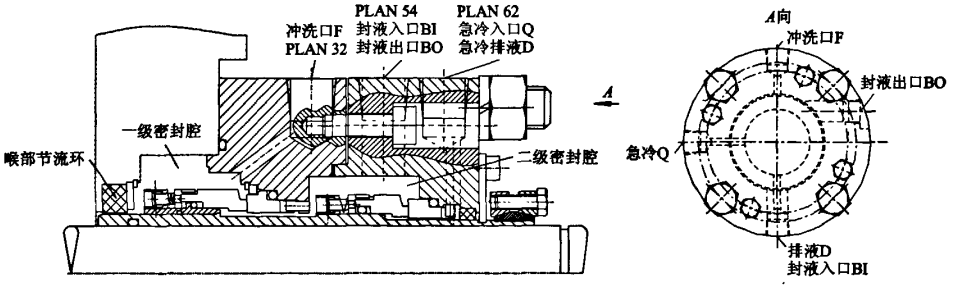


图 2 羰化循环泵集装机械密封结构及系统图

Fig. 2 Structure and system diagram of mechanical assembled seal used in carbonylation recycle pump

泵腔内介质压力为 4.3 ~ 4.4 MPa，首级密封压力为 0.2 ~ 0.3 MPa，次级压力为 4.4 ~ 4.6 MPa，介质温度为 180 ℃. 为了防止液膜的汽化导致密封面间发生干摩擦，首级采用 API PLAN 32 的冲洗方案[7]，用一路外来温度较低的冲洗流体注入密封腔，对介质侧密封进行强制冲洗带走热量，并可以通过调整冲洗液流量大小的方法来控制密封腔的温度. 同时在首级密封腔的前部加一节流环(见图 2)，冷却液经过节流环时，压力降低从而减少了通过的泄漏量，并且可以控制泵腔介质与首级密封腔介质的热传导，起到一定的温度控制作用. 次级密封采用 API PLAN 54 + 62 冲洗方案，PLAN 54 利用泵或压力系统来维持循环，使用醋酸乙酯作隔离液[8]，隔离液的压力较首级密封腔高 0.187 MPa，从而能够保证首级密封介质不会泄漏到次级密封腔中，PLAN 62 是通过在大气侧设置简单的抑制密封，在两个密封之间引入压力稍高于大气压力的中性流体，这是为了防止大气侧有颗粒积累而设置的，可以起到一定的保护作用，并可降低次级密封静环工作环境温度. 次级密封在正常工作时主要起隔离、保护作用，一旦首级密封失效，即作为主密封使用.

高温、高压会导致密封端面变形和 pv 值的增

万方数据

高、液膜破坏、磨损加剧，致使密封失效，因此应采用较大平衡系数的的机械密封，以降低端面比压，防止密封端面变形.

由于次级密封腔的压力较首级密封腔高 4.2 ~ 4.3 MPa，为了防止首级密封静环脱出，从而导致整个密封装置失效，特在首级密封静环的前面设置了挡环和卡簧(见图 3)，控制静环以及静环 O 型圈的轴向位移.

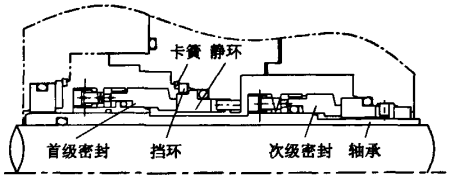


图 3 羰化循环泵串联机械密封布置图

Fig. 3 Layout of series connection mechanical seal used in carbonylation recycle pump

2.3 设计计算

因首级密封压力较小(0.2 ~0.3 MPa)，属于标准常规范畴，在此不作论述，仅对次级密封作详细的设计计算[9].

2.3.1 密封端面宽度

密封端面宽度 b 在机械密封的设计中是一个很重要的参数，端面摩擦产生的热与密封端面的宽度成正比，较窄的端面可以降低温升，因此，在刚度和强度允许的条件下，应尽量选取较窄的端面宽度[10]. 但是过窄的密封面会导致端面接触比压增加，温度升高，磨损加剧. 因此设计时必须合理的选取密封端面宽度. 取端面宽度 b = 4.5 mm.

2.3.2 载荷系数

载荷系数 K 反映的是介质压力加到密封端面的载荷程度，该密封为内流式平衡型机械密封[10]，其载荷系数

$$K = \frac{A_e}{A} = \frac{D_2^2 - d_0^2}{D_2^2 - D_1^2}, \qquad (1)$$

式中 A_e 为动环承受介质压力的有效面积；A 为密封端面接触面积；D_1 为密封端面内径，mm；D_2 为密封端面外径，mm；d_0 为平衡直径，取为 50 mm.

内流式平衡型机械密封其载荷系数 K 的取值范围为 0.55 ~ 0.85.

由于醋酸乙酯的粘度比较低，因此取载荷系数 K = 0.6.

2.3.3 密封端面接触直径

内装式密封的端面接触内径

$$D_1 = -2b(1-K) + \sqrt{d_0^2 - 4b^2K(1-K)} = 46.2 \text{ mm}, \qquad (2)$$

$$D_2 = D_1 + 2b = 55.2 \text{ mm}. \qquad (3)$$

2.3.4 弹簧比压

弹簧力

$$F_S = \frac{Gd^4f}{8nD^3} \times M = 73.6 \text{ N}, \qquad (4)$$

式中 n 为弹簧有效圈数，取为 6；D 为弹簧中径，取为 5.0 mm；G 为材料剪切模量，取为 71 000 N/mm^2；d 为弹簧丝径，取为 0.6 mm；f 为弹簧变形量，取为 4 mm；M 为弹簧个数，取为 12.

弹簧比压

$$p_S = \frac{F_S}{S} = 0.1027 \text{ MPa}, \qquad (5)$$

式中 S 为摩擦端面面积，

$$S = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) = 716.39 \text{ mm}^2. \qquad (6)$$

2.3.5 端面膜压系数

对于液相内流式密封端面膜压系数

$$k_m = \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{1}{2\ln(R_2/R_1)} = 0.53, \qquad (7)$$

式中 R_1，R_2 分别为密封端面内、外半径，mm.

2.3.6 端面比压的计算

图 4 为机械密封动环的轴向受力及压力分布示意图.

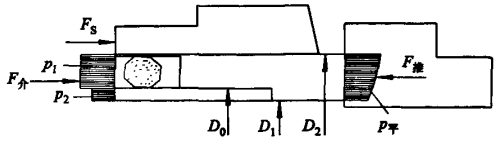


图 4 动环的轴向受力示意图

Fig. 4 Axial force diagram of moving ring

压紧力

$$F_S = p_S \cdot \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2), \qquad (8)$$

介质在动环上的压紧力

$$F_介 = p_1 \cdot \frac{\pi}{4}(d_0^2 - D_1^2) + p_2 \cdot \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_0^2), \qquad (9)$$

端面液膜在动环上的推开力

$$F_推 = p_平 \cdot \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) = k_m \cdot p_2 \cdot \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2), \qquad (10)$$

式中 $p_平$ 为端面液膜的平均压力，所以动环上所受的

万方数据

合力(沿压紧力方向)

$$F = F_S + F_{介} - F_{推}. \tag{11}$$

端面比压

$$p_b = \frac{F}{\frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)} =$$

$$p_S + p_1\frac{d_0^2 - D_1^2}{D_2^2 - D_1^2} + p_2\frac{D_2^2 - d_0^2}{D_2^2 - D_1^2} - k_m p_2 =$$

$$0.403\ \text{MPa}, \tag{12}$$

式中 p_2 为密封液压力,取为 4.6 MPa; p_1 为大气压力,取为 0.1 MPa.

2.3.7 校核 pv 值

密封面的平均速度

$$v = \frac{n\pi\bar{R}}{60} = \frac{n\pi(D_1 + D_2)}{120} = 7.83\ \text{m/s}, \tag{13}$$

式中 n 为动环转速, r/min; $\bar{R}$ 为动环平均半径,m,

$$\bar{R} = \frac{(D_1 + D_2)}{4}; \tag{14}$$

$$pv = 0.403 \times 7.83 = 3.155\ 49\ \text{MPa} \cdot (\text{m/s}). \tag{15}$$

摩擦副材料选用的是动环为浸脂石墨和动环为碳化硅的组对,查手册可得,平衡型结构[pv] = 13.7 MPa·(m/s),故满足要求.

3 结 论

在羰化循环泵用机械密封的设计过程中,以可靠性为前提兼顾经济性,机械密封摩擦副以及其他机械密封的零部件采用耐腐蚀、耐高温等综合性能好的材料.窄的摩擦副端面及密封辅助系统保证了端面的散热、冷却和润滑.最终设计好的羰化循环泵用机械密封在试验台上进行台架试验,运转状况良好.现场安装使用已有 5 个月,未见泄漏,密封性能稳定.

参考文献(References)

[1] 亓新华,张玉泉,荆瑞俊.高硬度耐腐蚀纳米复合镀层的研究现状[J].腐蚀与防护,2007,28(7):329-332.
Qi Xinhua, Zhang Yuquan, Jing Ruijun. Current research status of hard corrosion-resistant nano-composite coatings[J]. *Corrsion and Protection*, 2007,28(7):329-332. (in Chinese)

[2] Wright F K, Cameron W. The design and seletion of materials for a general purpose mechanical seal[J]. *Materials and Design*, 1987,8(1):46-50.

[3] 王 华,陈 鹏.醋酸装置中的特殊材料[J].石油化工自动化,2007,44(5):26-29.
Wang Hua, Chen Peng. The special materials used in the acetic acid unit[J]. *Automation in Petro-chemical Industry*, 2007,44(5):26-29. (in Chinese)

[4] Zhou J F, Gu B Q. Heat-transfer character analysis of rings of mechanical seal[J]. *Chinese J Mech Eng*, 2006,42(9):201-206.

[5] 李振环.全氟醚橡胶的性能及应用[J].流体机械,2006,34(12):52-55.
Li Zhenhuan. Performance and application of perfluoroela stomers[J]. *Fluid Machinery*, 2006,34(12):52-55. (in Chinese)

[6] American Petroleum Institute. API 682, Shaft sealing systems for centrifugal and rotary pumps [S]. Third Edition. 2004:112-114.

[7] 何玉杰,李质情,李 强.高压锅炉给水泵流体动压密封的研究[J].水泵技术,2008(3):30-33.
He Yujie, Li Zhiqing, Li Qiang. Analysis on hydrodynamic mechanical seals used in high pressure boiler feed [J]. *Pump Technology*, 2008(3):30-33. (in Chinese)

[8] Nrtzel J P. Seal technology, a control for industrial pollution[J]. *Lubrication Engineering*, 1990,46(8):483-490.

[9] 王耀红,杨 光.锅炉循环水泵机械密封设计探讨[J].排灌机械,2003,21(1):12-14.
Wang Yaohong, Yang Guang. Design on mechanical seal for boiler cycle water pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2003,21(1):12-14. (in Chinese)

[10] Xiong Shunhe, Salant R F. A dynamic model of contacting mechanical seal for down-hole tools[J]. *Journal of Tribology*, 2003(4):391-402.

(责任编辑 徐云峰)

万方数据