

石化超高压离心压缩机干气密封国产化

杨 冀

中密控股股份有限公司 四川 成都 610045

【摘要】：在石油化工超高压离心压缩机机组的干气密封应用中，由于国内企业的相关业绩少，大部分配套均采用进口产品，本文通过在某石化厂国产化的具体案例，介绍在超高压循环氢离心压缩机机组国产化过程中干气密封设计、制造及操作时应考虑注意的事项。

【关键词】：石化；压缩机；密封

Localization of Dry Gas Seal for Ultra-high Pressure Centrifugal Compressor in Petrochemical Industry

Ji Yang

Zhongmi holding co., ltd. Sichuan Chengdu 610045

Abstract: In the application of dry gas seal of ultra-high pressure centrifugal compressor unit in petrochemical industry, due to the lack of related achievements of domestic enterprises, most of the matching products are imported. This paper introduces the matters needing attention in the design, manufacture and operation of dry gas seal in the process of localization of ultra-high pressure circulating hydrogen centrifugal compressor unit through a specific case of localization in a petrochemical plant.

Keywords: Petrochemical; Compressor; Seal

前言

2019年10月30日，我公司接到某石化厂电话通知，某超高压循环氢干气密封连续两次出现问题导致机组跳车，此密封为进口产品，供货时间十分长，无法满足现场生产要求，要求我们尽快协助进行国产化工作。本文也就是在这个背景下展开。

1 机组的基本参数

2019年10月30日接到用户的求助电话后，次日我司即派员赶到现场，此超高压密封用于该石化厂加氢装置，机组主要参数如下：

介质：循环氢；入口压力：18.1MPa；出口压力：19.65MPa；

入口温度：55℃；出口温度：65.4℃；

密封轴径：φ100mm；正常转速：7122r/min；

暖机转速：≥750r/min；盘车转速：≤1/3r/min；

密封主要结构见下图：

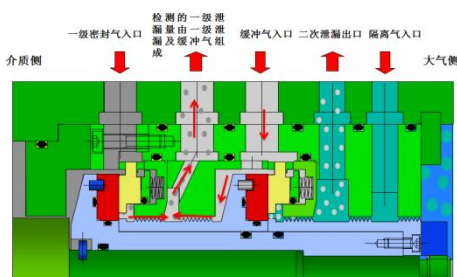


图1

2 进口密封的损坏情况

经过解体，我们发现：介质侧密封的动静环已经磨损十分严重，不可复用，如图2；同时检查大气侧动环也发现有油状附着，同时有黑色附着物，如图3。



图2（摩擦副受损严重，不可复用）



图3（动环有油污、黑色附着物）

从密封的损坏情况看，介质侧动静环应该是在运行过程中存在较长时间的接触，从大气侧密封动环的损坏情况来看，初

步怀疑密封的失效是介质气带液造成的。但是密封系统控制盘前有除液单元，系统内有过滤器等仪器仪表（过滤器虽然主要是去除颗粒的作用，但仍然有一定的除液效果。）那么液体是从何而来？

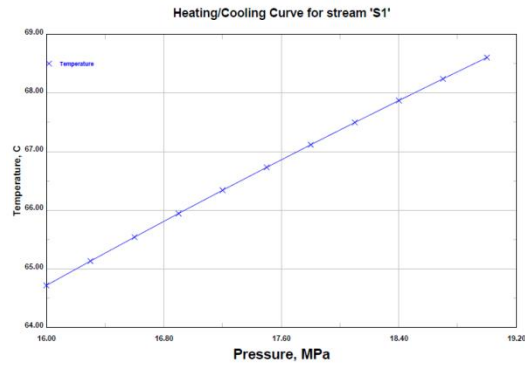
怀疑是介质中的重组分，在一级密封气进气管线（从干气密封控制系统盘站到密封腔之间）内由于温度下降，冷凝而来，于是，我们重点检查了压缩机介质的组分。

3 根据损坏情况进行的分析

3.1 介质组分

1	操作条件（库）									
	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况
2	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况
3	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况	设计工况
4	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分
5	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分	组分
6	H2	85.4222	85.2762	87.0008	87.5034	86.0611	85.700			
7	C1	10.04	6.332	5.5794	0.589	10.1819	9.0654	9.1004		
8	C2	50.07	2.7802	2.0866	1.0506	1.089	1.2767	1.3277		
9	C3	44.03	2.3226	2.3491	0.7646	0.7765	2.5403	2.6854		
10	C4	58.12	0.672	0.6396	0.1321	0.1364	0.6417	0.6812		
11	H2S	34.08	5.52ppm	5.94ppm	2.44ppm	5.42ppm	3.6ppm	3.70ppm		
12	NH3	17.04	0.103ppm	0.11ppm	0.0079ppm	0.0061ppm	0.046ppm	0.0527ppm		
13	H2O	16.02	0.1519	0.1537	0.1128	0.1155	0.1368	0.1397		
14	HCN	72.15								
15	CS2	72.15								
16	CS2+		3.3686	0.3148	0.3790	0.3888	0.2876	0.295		
17	N2	26.00							100	
18	O2									
19	CO2									
20	CH4									
21	HCN	36.50								
22										
23										
24	合计	100	100	100	100	100	100	100		
25	平均分子量	16.02	5.58654	5.590171	4.344031	4.450513	5.311972	5.429163	28	

根据介质的组分核算介质露点曲线：



由此可见露点在 64-69 摄氏度左右，现场压缩机出口引出的密封气温度也在 70 左右℃左右，已经临界介质露点，再经过压缩机出口引到到干气密封系统盘站之间的连接管线、干气密封系统内部的管线、再到控制系统盘站到干气密封本体间的管线，虽然有电伴热，但是很难达到理想效果，进密封的介质气温度临近露点，（此部分应有热量损失计算）是造成密封带液的主要原因。

从这个原因着手，一级密封气增加低压蒸汽（150℃）伴热，并在一级密封气进气处增加测温探头，保持介质气温度在 70-80℃，防止密封带液。

3.2 密封本体槽型及计算方向

单从密封一级进气温度考虑这次密封失效还不够全面，密封本体槽型我们也进行了计算。

3.2.1 循环氢组分

循环氢组分见表 1。

表 1 循环氢组分（mol%）

组份	mol%	组份	mol%
H2	87.46	I-C4H10	0.32
CH4	9.30	H2O	0.18
C2H6	1.74	C5H12	0.13
C3H8	0.82	C4H10	0.05

3.2.2 压缩机操作条件

压缩机操作条件见表 2。

表 2 压缩机操作参数

项目	参数	项目	参数
压缩机机型	BCL407/B	入口/出口温度	55℃ / 65.4℃
密封轴径	100mm	额定转速	7122 r/min
入口压力	17.75~18.2MPaA	最大连续转速	r/min
出口压力	19.75~20.15MPaA	跳闸转速	r/min

3.2.3 密封设计参数

密封设计参数见表 3。

表 3 干气密封设计参数

项目	数据	项目	数据
轴径	100mm	最低设计转速	800 r/min
静态设计压力	20.0 MPaG	动平衡精度	G2.5
动态设计压力	20.0 MPaG	轴向位移	±2.5 mm
设计温度	-10~160℃	径向位移	±0.25 mm
最大设计转速	12000 r/min		

3.2.4 泄漏率指标

用户提出的密封端面泄漏率指标见表 4。

表 4 干气密封泄漏率指标

转速 (r/min)	密封压力 (MPaG)	期望值 (Nm³/h)	保证值 (Nm³/h)
0	17.65	≤5	≤10
9710	15	≤10	≤20

3.2.5 槽型选择

干气密封槽型主要有分为两类：单向槽和双向槽。两种槽形都已非常成熟，相比之下单向槽有更大的气膜刚度及气膜厚度，有更低的端面脱离速度及更好的抗干扰能力，对工况的适应性更好，耐受性更为优异。而双向槽的特点为泄漏量相对较低，且能适应反转的工况，因此其尤其适用于可能发生反转的

运行工况。相较于单向槽，双向槽气膜刚度较低且气膜厚度较小，抗干扰能力相对较弱，对机组运行精度要求较高。

3.2.6 动静环材料选择

静环材料选择反应碳化硅喷涂 DLC 涂层，动环材料选择无压烧结碳化硅

3.2.7 计算过程简述

采用专业的干气密封软件计算气膜参数，重点优选动环端面的槽形参数，并分析在密封盘车、启动、停止、变转速、变压力以及稳态运行工况下的端面性能。

第一步，建立干气密封计算模型，改变槽坝比、槽深、及槽数，分别计算密封端面气膜刚度、泄漏率、气膜厚度的变化趋势。综合考虑气膜刚度、泄漏率、气膜厚度等因素，确定优化的槽型参数。第二步，根据优化后的槽型参数，计算和分析密封在变转速、变压力工况的性能。第三步，计算密封端面开启压力和开启转速，分析密封在盘车、暖机等特殊工况的性能。第四步，计算一级和二级密封在稳态运行工况下的端面气膜参数，分析密封在稳态工况下的性能。通过计算得知，槽数变化对气膜厚度、气膜刚度以及泄漏率的影响相对较小。在 10.0MPa、17.7MPa 和 20MPa 压力下，随着槽数的增加，气膜厚度、气膜刚度和泄漏率均呈抛物线趋势变化。当槽数 $n=18$ 时，三种压力下的密封端面气膜刚度、泄漏率以及气膜厚度均达到最大值。因此，本项目端面槽数暂定 18 个。根据以上暂定的参数，计算 20MPa 下密封端面的气膜性能。20MPa 压力下，密封端面泄漏率为 $12.9 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，满足表泄漏率要求。此时获得了较大的气膜厚度 $2.23\mu\text{m}$ 和气膜刚度 $9.42\text{E}+09 \text{ N/m}$ ，因此最终确定本项目的槽形参数如表中所示。

表 5 槽型优选结果

槽坝比	槽堰比	螺旋角 (°)	槽数	槽深 (μm)	泄漏率 (Nm^3/h)	气膜厚度 (μm)	气膜刚度 (N/m)
0.53	0.5	18	18	6	12.9	2.23	9.42E+09

密封在 20MPa 压力下，随着转速的变化，密封端面气膜刚度、气膜厚度变化连续，不存在阶跃性突变；端面最小气膜厚度大于端面开启临界气膜厚度密封端面处于非接触状态。因此，在变转速工况下，密封端面不会发生端面接触摩擦，密封运行可靠。在 7122r/min 的转速下，端面气膜刚度随密封压力的升高而增大。密封泄漏率随压力升高逐渐增大。端面气膜厚度随压力增大减小，20MPa 时出现气膜厚度极小值为 $2.23\mu\text{m}$ ，零压差时出现气膜厚度的极大值 $5.4\mu\text{m}$ 。当转速恒定为 7122r/min 时，随压力的变化，密封端面气膜厚度、气膜刚度以及泄漏率的变化趋势连续，不存在阶跃性突变；当压力在 0~20MPa 范围内波动时，密封端面最小气膜厚度大于开启临界气膜厚度 $1.2\mu\text{m}$ ，密封端面处于非接触状态。因此，在变压力工况下，密封端面不会发生接触摩擦，密封运行可靠。

综上所述，密封在转速 0~10500 r/min 和压力 0~20MPa 范围内运行时，密封端面最小气膜厚度始终大于端面开启临界气膜厚度，密封端面不会存在接触摩擦，可以满足机组升速、升压以及硫化钝化等工况中压力和转速动态变化的运行需要。

4 最终方案及运行效果

经过与用户一起讨论后，根据上述计算，最终确定槽型为单向螺旋槽，利用更好的气膜刚度以提高密封运行过程中的抗带液能力；同时通过系统一级密封气进气温度的改善，以及密封本体槽型的调整，国产化密封本体于 2019 年 11 月安装投用，并一次试车成功，各项指标均满足用户的使用要求。

参考文献:

- [1] 朱海胜.压缩机干气密封技术及其应用[J].化学工程与装备,2021(12):183-184.
- [2] 胡伟杰.液化气泵用干气密封失效分析及优化改造[J].广州化工,2021,49(22):86-87.
- [3] 陈勇.某装置干气密封主密封气线失效原因分析[J].中国设备工程,2021(S2):75-77.
- [4] 刘文山,信和勇,武炜.离心式天然气压缩机密封气系统优化改造[J].化工管理,2021(33):174-175.
- [5] 徐岩.关于干气密封在离心压缩机上的应用研究[J].中国设备工程,2021(23):113-114.
- [6] Chen Jinlin,TangLiping,DingXuexing,SiJiaxin,ChenDelin,SunBaocai. Frictional Vibration Performances of Dry Gas Seal Rings with DLC Film Textured Surface via Chaos Theory[J]. Tribology Transactions,2021,64(4):
- [7] F Al Dossary,A Al Turiki,T Al-Alshaikh. High-pressure gas compressor dry gas seal system enhancement case study[J]. Hydrocarbon Processing,2020.
- [8] 甘捷,朱治鹏,蒋安荔,等.压缩机干气密封系统不稳定运行状态分析及对策[J].压缩机技术, 2021, (4): 36-39.
- [9] 王凌霄,王昌.干气密封在产品气压缩机中的应用与维护[J].现代工业经济和信息化,2020,10(10):4.