

浅谈离心式压缩机干气密封装置结构原理及应用

路华

神华巴彦淖尔能源有限责任公司

【摘要】压缩机是一种气体加压的流体机械，分为活塞式压缩机、螺杆式压缩机、离心式压缩机、直线式压缩机等。主要用于集输管网的长距离输送和制冷领域的相关工作，在集输和化工领域较为常见。密封系统是保证压缩机工艺气体不泄漏和外界环境介质不污染工艺气体的重要保证。目前，干气密封系统是技术最先进、应用效果最好的。

【关键词】离心式压缩机；干气密封；结构原理；应用

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.12.123

一、干气密封装置结构原理

1. 干气密封结构原理。典型的干气密封结构包含有静环、动环组件（旋转环）、副密封O形圈、静密封、弹簧和弹簧座（腔体）等零部件。静环位于不锈钢弹簧座内，用副密封O形圈密封。弹簧在密封无负荷状态下使静环与固定在转子上的动环组件配合，在动环组件和静环配合表面处的气体径向密封有其先进独特的方法。配合表面平面度和光洁度很高，动环组件配合表面上有一系列的螺旋槽，当端面外侧加工有流体动压槽（ $2.5\sim 10\mu\text{m}$ ）的动环旋转时，流体动压槽把外径侧（称之为上游侧）的高压密封气体（干气）泵入密封端面之间。旋转的动压槽将干气吸入并使干气沿浅浅的槽道向内径方向流动。由于密封坝的阻挡，从动压槽外径至动压槽内径，密封端面之间的压力逐渐增加。动、静环之间的动压推开静环，在密封端面之间形成很薄的一层气膜（ $1\sim 3\mu\text{m}$ ）。这样动、静环的密封端面工作在非接触状态下，密封端面之间的气膜完全阻塞了压力相对较低的工艺介质的泄漏通道，理论上实现了工艺介质的零泄漏。由于供入干气密封的干气压力大于叶轮组件两端的工艺气压力（平衡管压力），所以供入干气约85%经内侧迷宫流进工艺气流之中，阻挡工艺气不能流进干气密封。理论上实际内侧迷宫装置并不能完全阻断工艺气外漏。剩余15%的密封干气和很少一点内侧迷宫没有挡住的工艺气混合，从动、静环密封端面之间流过。经过动、静环之后的干气，由排放口和配套的管道、压力开关、限流孔板、流量计后排放到火炬燃烧区烧掉。在干气密封的外侧也有一道迷宫密封装置，供入迷宫密封的隔离气（氮气）与这道迷宫密封相配合，阻挡外侧轴承的润滑油向干气密封一侧流动，保护干气密封。供入迷宫密封的隔离气不但能起隔绝润滑油的密封作用，而且能起动、静环的冷却作用。

2. 常用干气密封型式。（1）单端面干气密封。单端面干气密封示意，如图1所示。

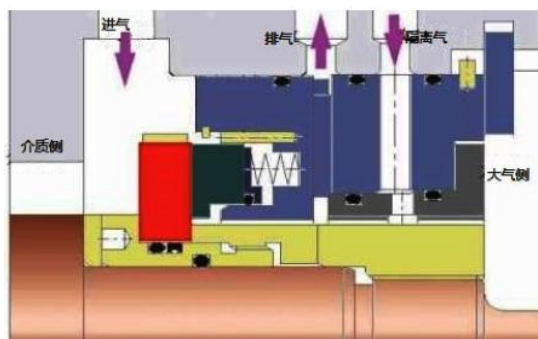


图1 单端面干气密封

（2）串联式干气密封。串联式干气密封示意，如图2所示。

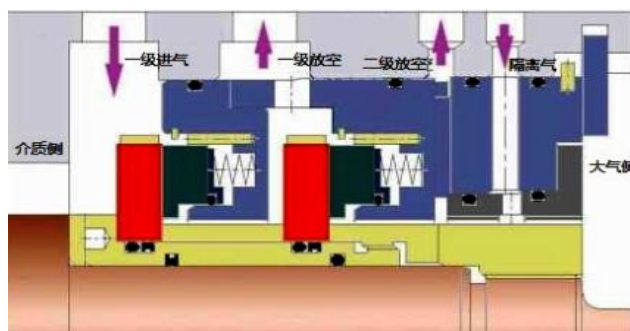


图2 串联式干气密封

一套串联式干气密封可看作是两套或更多套干气密封按照相同的方向首尾相连而构成的，与单端面结构相同，密封所用气体为工艺气本身。通常情况下采用两级结构，第一级（主密封）密封承担全部或大部分负荷，而另外一级作为备用密封不承受或承受小部分压力降，通过主密封泄漏出的工艺气体被引入火炬燃烧。剩余极少量的未被燃烧的工艺气通过二级密封漏出，引入安全地带排放。当主密封失效时，第二级密封可以起到辅助安全密封的作用，可保证工艺介质不会大量向大气泄漏。除此之外，干气密封常用型式还包括带中间进气的串联式干气密封和双端面干气密封。

二、干气密封应用影响因素分析

1. 密封气源。密封气源的类型、质量均会对干气密封的性能产生影响。在干气密封的理论研究中，通常把密封气处理为理想气体。计算表明，随着压力的增高，氮气的气膜刚度与气膜阻尼与理想气体近似相等，说明氮气与二氧化碳等其他气体相比，对干气密封的性能影响最小。密封气源压力或流量不足时，会导致压缩机内部气体向密封腔流动，其中携带的杂质会损坏干气密封，同时，气源压力或流量不足会使动环和静环不能开启。密封气带液或含有杂质，会造成密封端面污染，密封制造厂对密封气质量均有严格要求，设计密封气过滤器和干燥器，保证密封气干燥并不含大于 $3\mu\text{m}$ 的颗粒。密封气除本身带液外，还可能发生在停车过程中，机组密封气一般使用压缩机出口工艺气，随着机组停车，压力降低，温度下降，当温度下降至密封气露点温度条件，易产生液化现象，导致整个密封气带液。

2. 动静环材质。动静环材质的选取、材质配对必须适合机组工况要求。动静环材质配对分硬对硬配合、硬对软两种。硬对硬配合，动环为碳化硅，静环为碳化硅并经表面涂覆类金刚石碳涂层（DLC）处理，以福斯制造厂为代表，此种

配对的好处在于,在机组停车过程中,动静环贴合瞬间摩擦力较小,且耐磨损能力较好。但此种配对方式由于静环涂层DLC的特殊性,如果遇到频繁启停、长时间低速运行或杂质进入摩擦副端面等非正常运行情况时,可能会造成DLC涂层局部脱落;另外,DLC涂层本身也存在加工制作时出现不稳定的问题,在长时间大摩擦力下运行也可能造成DLC涂层的局部脱落。脱落的DLC涂层碎片硬度较高,机组开车过程中转速较高,若掉到轴上形成如车刀一般,会造成转子严重损坏。硬对软配合,动环为硬质合金或碳化硅,静环为石墨(较软且具有自润滑性)。约翰克兰制造厂生产的干气密封装置,硬质动环(碳化钨/碳化硅)设计有旋转槽,静环为碳石墨,能够承受速度和压力的快速变化,使其具有非接触寿命高的特点。

3. 开停车过程。干气密封的使用主要包括开、停车及正常运行三个过程,尤其是开停车过程对干气密封的可靠性及使用寿命的影响最明显。开停车过程容易发生的低转速摩擦,离心压缩机开停车时,机组原始盘车时转速很低,按干气密封运行原理,此时不能使动静环处于开启状态,不能形成气膜,从而导致干气密封在低转速下出现干磨现象。大型离心压缩机设备,正常运转通常引入高压端工艺气作为一级干气密封气源。开车时,工艺气不具备使用条件,需备旁路,引入氮气作为密封气源保护干气密封启动时可能导致的损坏,待设备正常运转,可切换至系统自身密封气源。开停车程序容易发生系统进油,从系统本身出发,导致进油的原因主要有:(1)在启动油系统之前未通入隔离气。(2)机组突然停车,密封气及隔离气突然中断,油系统未及时停止。(3)全厂晃电,油系统和密封气系统均停止,但晃电过程中高位油箱的油还继续往机组提供润滑油,从而导致油进入密封系统。(4)隔离气密封组件损坏,此组件失效而导致油进入干气密封系统。

三、干气密封装置的应用

1. 离心式压缩机基本结构和原理。GE公司生产的PCL804离心式压缩机为4级叶轮结构,主要由叶轮、扩压器、弯道、回流器等组成。离心式压缩机增压是通过高速旋转的叶轮上的叶片对连续流动的气体做功,将叶轮的机械能传给气体。旋转的气体在离心力作用下沿着叶轮的扩散式通道由中心向外缘流动。在流动的过程中压力升高绝对速度增加。从叶轮流出的气体在流经扩压器的扩散形通道时,一部分速度动能转换成压力能,使气体的绝对速度降低,压力进一步提高。

2. 干气密封安装位置。干气密封装置安装在压缩机主轴两端,紧靠进、排气轴端位置,起到避免压缩机腔体内工艺气往轴端外泄漏的作用。主轴两端靠近干气密封处安装了轴承,其中进气端安装径向轴承和止推轴承,排气端安装径向轴承。在压缩机运行时干气密封与径向轴承间不断注入隔离气(氮气)以避免轴承中的润滑油通过轴端进入到干气密封组件中。

3. 干气密封系统工艺流程。(1)密封气(干气)供给流程。为达到密封效果,进入干气密封组件中的密封气必须洁净、干燥,且要求压力稍高于腔体内部工艺气压力。干气的供给途径可以有两种来源:备用氮气系统;机组运行后从

压缩机出口处引来的工艺气。(2)密封气(干气)气质要求。上述气体中的任一种气体都要先经过滤器滤去其中的杂质,再通过加热器将其温度加热到适合范围(高于露点温度 20°C ,大约为 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$),确保工艺气中易凝结物质以气态存在。因为任何进入干气密封的液态物质对干气密封的功能和工作寿命都不利,所以必须避免。最后经过调压阀调压后(大于压缩机平衡管压力 100 kPaG)才能供入干气密封。总之,干气密封要求密封气的压力、流量适当,并且干净、干燥。(3)干气密封维护。干气密封维护主要是对密封气供气系统的维护。干气密封对密封气的气质要求很高,水分、颗粒杂质、润滑油进入干气密封都会对干气密封造成损害。供入干气密封的密封气必须经外部的干气系统处理成符合要求的密封气。为了得到洁净、干燥的密封气,目前普遍的做法是在干气密封系统中安装前置凝结过滤器和前置电加热器。

四、干气密封装置常见故障及处理

1. 干气密封装置常见故障。干气密封装置常见故障表现在运行过程中一级放空压差逐步升高,而且机组每一次起停都会造成放空压差增大,最终导致干气密封的一级放空压差达到停机值,使机组停机。即使在干气密封系统中已经安装了前置凝结过滤器和前置电加热器,也会出现上述问题。原因主要为:(1)电加热器的加热温度控制偏低,经过调压阀节流后温度会更低。在冬季运行时,由于密封气管线未进行保温处理,密封气在进入干气密封装置时,温度可能已经低于“露点”温度,凝结成液态,并随着密封气进入干气密封装置使其失效。(2)当压缩机组处于停止状态时,由于压缩机进出口的工艺气压力相等,密封气体不流动,密封气电加热器也不会投用,随着温度逐步降低,可能达到“露点”温度以下,从而析出液体。待下次机组启动时进入干气密封装置使其失效。

2. 干气密封装置常见故障的处理。针对该类故障,约翰克兰(John Crane)公司设计了相应的气体处理装置GCU,其主要组成部件就是凝结过滤器、气体增压装置和电加热器,以改善现有干气密封装置的工作条件。与之前的气体处理装置相比,增加了一个依靠压缩空气驱动的增压装置。该装置主要特点为:(1)在压缩机组正常运行时,气体增压装置不工作。(2)在压缩机带压停机期间,气体增压装置投入运行,使得密封气流动起来,以保证电加热装置投用,提高密封气的温度。防止析出液体。(3)压缩机组放空后启动,当压缩机系统压力到达 0.1 MPa 时,气体增压装置就投入运行,以保证干气密封装置处的气体不产生倒流,防止干气密封装置被工艺气中固体颗粒污染。

总之,随着化工行业的不断发展,离心式压缩机的应用越来越广泛。干气密封装置作为离心式压缩机轴封的关键部件,在压缩机实际运行中起到至关重要的作用。

参考文献

- [1] 杨焯, 渠建儒. 离心式压缩机干气密封系统常见故障分析[J]. 天然气与石油, 2015, 33(3): 87-89, 94.
- [2] 魏星. 浅谈离心式压缩机干气密封装置结构原理及应用[J]. 上海煤气, 2019(3): 16-20.