

机车用喷油式螺杆空气压缩机油分法兰密封性能研究

王希营 郭志杰

(中车株洲电力机车有限公司 湖南 株洲 412001)

摘要: 由于铁路机车制动系统对供风设备的可靠性要求较高的特点,喷油式螺杆空气压缩机因其优越的可靠性,在国内外铁路、轨道交通行业制动系统中得到了广泛的应用。但因其设备内部存在润滑油,并且运用环境始终受到交变温度、交变压力和冲击振动等的影响,渗油是喷油式螺杆空气压缩机的最主要故障。本文根据渗油比例最高的螺栓法兰密封结构为例,通过从分密封材料、预紧力、安装方式、平面度、粗糙度和密封结构等方面进行理论分析,通过测试验证,为提高铁路、轨道行业喷油螺杆空压机密封安全提供应用参考。

关键词: 空压机法兰渗油; 螺栓法兰接头; 密封

0 引言

铁路轨道交通行业用喷油螺杆空气压缩机油分法兰的密封结构为螺栓法兰连接接头,其密封性是由各组成元件(油分盖法兰、油分法兰、油气筒法兰、垫片和紧固件)共同决定的,保证螺栓法兰接头的密封性,螺栓需提供足够的预紧力压缩垫片,在垫片的密封接触面上产生足够且均匀的压缩应力,才能保证有效的密封效果。本文从螺栓预紧力、垫片材料和尺寸、法兰平面度和运用工况等因素逐一进行分析和验证,确定了螺杆空气压缩机油分法兰结构密封性的关键因素,为铁路系统螺栓法兰密封结构设计提供参考。

1 主要的渗漏种类

1.1 界面渗漏型

在密封垫片表面与其接触的表面之间由于存在通道,而产生的一种泄漏。

1.2 渗透渗漏型

渗漏介质通过密封垫片毛细管作用而形成,这种渗漏发生在的纤维材料制成的密封垫内部。

1.3 破坏渗漏型

由于急剧磨损、变形、失效等因素,使渗漏间隙增加而造成的一种危险性泄漏。

2 影响渗油的主要因素

2.1 预紧力的影响

ASME VIII -1的非规定性附录S中明确指出非标法兰设计计算的“最重要目的之一是确定螺栓的数量和尺寸”,因为预紧应力越大,变形量越大。一方面有效地填补了法兰面的粗糙度,使界面的泄漏大为减少;另一方面,使得垫片本身内部毛细孔被压缩,泄漏通道的截

面减小,泄漏阻力增加,从而泄漏率大大减小。但压紧力过大,易将垫片压溃,失去回弹能力,无法补偿由于温度、压力引起的法兰面分离,同时也可能引起螺栓屈服,造成应力松弛导致渗漏概率增加。因此要维持良好的密封,必须使垫片的压紧应力保持在一定的范围内。

2.2 密封垫材料的影响

油分法兰密封结构由法兰、垫片和紧固件三部分组成,其中垫片是核心,为保证密封性能在选用垫片时应主要考虑以下几个方面。

2.2.1 相容性

对于螺杆空气压缩机主要密封介质为压缩空气及油气混合物,要求垫片材质须有足够的耐油性能。

2.2.2 温度要求

因机车、动车用螺杆空气压缩机使用环境温度在 $-40 \sim 55^{\circ}\text{C}$,而空气压缩机正常运转温度应小于 120°C ,因此要求密封材料最小耐温范围在 $-40 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.3 压力要求

机车用螺杆空气压缩机的正常工作压力为 $0 \sim 1\text{MPa}$,因此密封垫片的介质压力应大于 1MPa 。

2.2.4 回弹能力

密封垫片应具有足够的回弹力,垫片的变形可以补偿螺栓和密封面的分离值,而使预紧密封应力下降到不小于工作密封应力,法兰仍保持良好的密封状态,相反,如果垫片的回弹能力不足,密封应力下降到工作密封应力以下,甚至密封口重新出现缝隙,则密封失效。

2.3 粗糙度的影响

相同法兰预紧应力下,法兰密封面粗糙度不同,渗漏率不同。通常密封面粗糙度越小,形成渗油通道的可能性越小,渗漏量越小。这主要是由于粗糙度小的密封表面,其凹凸易被非金属垫片填平,从而使得界面泄漏大为减少。

2.4 平面度的影响

油气分离器的密封结构,油细分离器(简称油分)法兰安装在油分盖和油气筒法兰之间,使用全平面密封的方式,在油分法兰上下面采用了非金属垫片密封。密封原理为在螺栓拧紧过程中,通过螺栓预紧力使垫片产生足够的压缩变形,从而堵塞密封接触表面及垫片内部的微小通道,如果施加在垫片上的应力形变不足以弥补法兰平面之间的间隙,就存在渗漏风险。

2.5 工况的影响

2.5.1 温度影响

螺杆空气压缩机组在运行过程中内部温度约80~100℃,在此温度下,密封元件材料的物理性能和力学性能都将发生变化,高温下的非金属垫片屈服极限降低、塑性变形量增大、蠕变加剧,回弹性能下降,当垫片回弹量小到不足以补偿介质压力、温度等附加荷载引起的密封面的分离时,密封结构就存在渗漏风险。并且随着温度的升高,垫片的老化、失重、蠕变、松弛现象就会越来越严重。温度越高,泄漏越容易发生。

2.5.2 压力的影响

当螺杆空气压缩机正常工作时,内部承受压力约1MPa,螺栓在拉伸应力下被拉长,法兰密封面沿彼此分离的方向移动,密封面与非金属垫片之间的压紧力下降,垫片的压缩量减少。介质两侧的压力差越大,空压机内部油气混合物就越易克服泄漏通道的阻力,泄漏就越容易。

2.5.3 时间的影响

对法兰、垫片和螺栓的密封连接施加螺栓载荷时,作用在垫片上的压紧应力会使垫片变薄,经运转一段时间后,垫片厚度将继续减小,并且在温度和压力的交变作用下,垫片上的应力也会逐渐减小,最终因应力小于密封阻力时,将导致密封面被分离,从而造成界面型渗漏。

3 渗漏类型的确认

通过对铁路轨道交通行业用喷油螺杆空气压缩机渗漏机组的拆解检查,未发现封垫片有磨损、变形及失效的破坏型渗漏,观察密封垫片横截面未发现通过密封垫片毛细管作用而形成的渗透泄漏,而是在密封垫片与其接触法兰表面之间存在油路通道,润滑油因空压机内部压力和温度的影响从油气筒内渗漏至油气筒外侧的界面性渗漏。

4 分析和验证

4.1 预紧力的分析

螺栓预紧力是保证空压机正常工作状态下法兰密封的最主要措施。同时螺栓法兰接头安全密封技术(二)

中也指出按照EN13335试验方法绘制垫片压强泄漏关系图标,说明了预紧螺栓载荷越大,初始垫片压缩压强越大,越不容易泄漏。

铁路、轨道交通行业应用工况下,某非金属垫片供应商提供的计算后的密封压力为20MPa,所以螺栓预紧力作用于密封面之间的压力值只有满足此数值的条件下,才可实现该机组油分法兰密封的可靠密封。

4.2 密封垫片的分析

喷油式螺杆空气压缩机行业常用三种垫片:CSA-90材质垫片,HD 3822材质垫片,TS 9016材质垫片。这三种垫片的耐油性能,工作温度范围,工作压力要求和密封性能等都满足铁路行业空压机组的使用要求,其主要材质都是芳纶纤维、橡胶加粘合剂组成,在空压机其他密封位置也有着广泛的应用,但基本未发现过渗油现象,因此可以排除密封垫片材质的原因。

4.3 粗糙度的分析

油分法兰的密封结构,油分法兰安装在油分盖和油气筒法兰之间,使用全平面密封的方式。按照机械设计法兰连接密封面的粗糙度要求,全平面橡胶垫密封型式法兰表面粗糙度 $Ra_{6.3} \sim 3.2 \mu m$ 。

对其空压机组用油分密封法兰的粗糙度进行测试,检测结果粗糙度均 $< 3.2 \mu m$,符合标准和设计要求,由此可知油分法兰位置渗漏非粗糙度原因。

4.4 平面度的分析

空气压缩机组油分法兰结构,由油分盖法兰、油分法兰、油气筒法兰三部分共同组成,之间通过非金属垫片进行密封。

拆解渗油空压机组,分别对油分盖平面度、油气筒平面度、油分法兰平面度进行测量,测试结果如下:

密封结构的各法兰平面度的总公差极限最大值0.44mm,而非金属垫片在80Nm预紧力作用下,以CSA-90材质垫片为例,3mm厚垫片其形变量约为0.3mm,因此在理论上存在密封垫片压缩量不足以弥补垫片尺寸公差,存在由于个别位置形变量较小,致使压强低于20MPa的密封应力要求,存在渗漏风险。

4.4.1 应力验证

使用压敏垫片进行垫片应力测试,进行垫片应力测试发现:油分法兰平面由于平面度公差较大,导致部分位置应力低于20MPa,为避免法兰密封压力局部过小。螺栓拧紧力矩由80Nm提升至90Nm的同时,将平面度最差的油分法兰平面调整至0.12mm,该结构的极限公差值约为0.16mm,理论上非金属垫片能够弥补该平面度公差带来的局部压力过低问题。

4.4.2 工程验证

选用一台螺杆空气压缩机首先使用平面度0.4mm的油细分离器进行15h的运转测试,试验完成后进行拆解

检查。然后更换成平面度 0.12mm 的油细分离器再次进行 15h 的运转测试，试验完成后进行拆解检查。

通过试验证明，当油分法兰平面度在 0.4mm 时，经拆解发现油分法兰表面已出现渗油通路，证明了垫片的变形量已不足以弥补密封面的总误差值，油分法兰在压力作用下形变压平后，将导致部分密封区域的压强偏低，存在渗油隐患。在同一台机组上使用 0.12mm 平面度油分法兰的机组，经过试验证明，

未出现渗油通道，密封效果良好。经过验证油分法兰平面度公差大是造成油分法兰位置渗漏的主要原因。

4.5 工况的分析

螺杆空气压缩机在加载 / 卸载运行（连续运转运行）的工况下比在运行 / 停机的工况下其工作时间更长，所受到的压力、温度作用时间更长。通过大量铁路用空压机油分位置渗油故障数据对比，使用加载 / 卸载运行方式的空压机渗油故障率远大于运行 / 停机方式的空压机。

结合空压机在线运行数据分析，连续运转的空压机年运行时间约 3000h，个别空压机年运转时间已达到 4000h，而空压机始终处于较高的温度，对比运行 / 停机方式的空压机，垫片的蠕变松弛更为严重。

油分法兰密封接头连接后初始力矩约 90Nm，常温静态 4h 后螺栓力矩衰减至 9.5%，空压机运行 4h 后螺栓力矩衰减至原力矩的 21.5%，因此在相同的维护周期内，连续运转的空压机因垫片应力下降更为严重，存在界面渗漏的风险更大。

温度越高，相同时间下垫片的压强剩余越小；温度不变时，垫片的压强随时间的延长而降低，基本上 8h 后趋于稳定。由于应力松弛将导致垫片密封应力降低，当应力低于最小密封要求时，就会有渗漏风险。

为了保证密封结构的垫片密封应力，可以在法兰安装 8h 后对紧固螺栓进行二次紧固的方式。

图 1 是空压机组运转 8h 后进行二次紧固直至运转 154h，油分法兰螺栓力矩值的测量结果。由测试数据可知，空压机运转 8h 螺栓力矩衰减至 70%，经过二次紧固后，空压机组运行 154h 的螺栓力矩基本稳定，力矩保持为初始力矩的 92%。为了保证油分法兰密封所需的应力，进行二次紧固可以有效的保证垫片的密封应力，减少渗漏的可能。

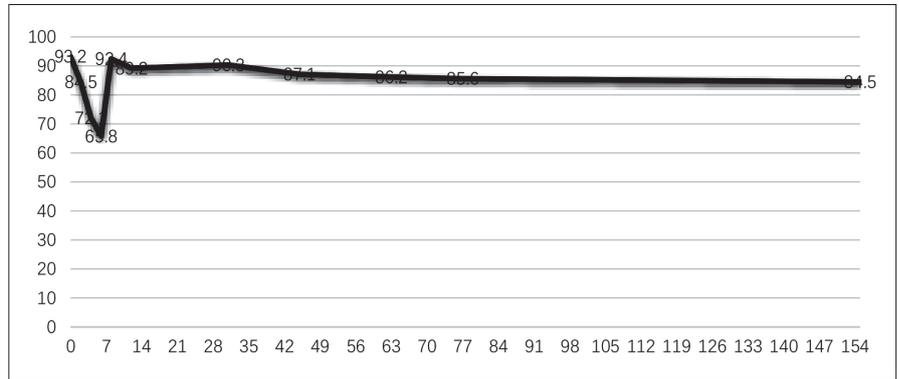


图 1 二次紧固螺栓应力

5 结语

喷油式螺杆空气压缩机组的油分法兰在全生命周期内的密封有效性和安全性很大程度上取决于密封应力的大小、均匀性和稳定性。

(1) 安装螺栓载荷必须大于供应商推荐的最小螺栓预紧载荷，在垫片的密封接触面上才能产生足够的压缩应力，使垫片压缩变形，填充法兰密封表面的不平整或者表面缺陷而造成的密封通道。

(2) 油分法兰各平面的总极限公差之和必须小于垫片的变形量，由螺栓预紧力传递至垫片的密封压力才能分布均匀，不会因为局部位置密封应力过低而产生渗漏通道。

(3) 法兰接头在空压机组运行后，因压力、温度和振动等因素的作用下，垫片应力出现松弛，导致残余在垫片上的密封应力降低，在螺栓法兰接头组装 8h 后，进行二次紧固能有效地避免应力松弛，可以提高密封垫片载荷的稳定性。

参考文献:

- [1] ASME VIII-1-2007, 锅炉和压力容器规范 (第 VIII 卷) 第 1 分册: 压力容器建造规则 [S].
- [2] 蔡仁良, 蔡暖姝, 等. 螺栓法兰接头安全密封技术 (一)—安全装螺栓载荷 [J]. 化工设备与管道, 2012, 49(3): 12-17.
- [3] 蔡仁良, 蔡暖姝, 等. 螺栓法兰接头安全密封技术 (四)—垫片应力 [J]. 化工设备与管道, 2013, 50(3): 6-15.

作者简介: 王希营 (1983.01-), 男, 汉族, 河北衡水人, 本科, 工程师, 研究方向: 质量技术。