

氦低温系统中油过滤技术研究

袁金辉 白红宇

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要:说明了低温系统螺杆压缩机使用润滑油的作用,分析指出对于氦气进行油过滤的重大意义,并详细介绍了氦低温系统中油的过滤系统。通过研究油分离的原理及方法,对各过滤环节进行深入研究,为低温系统长期稳定、安全、可靠地运行奠定基础。

关键词:氦 油过滤 低温系统

中图分类号: TB652, TE626. 32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6516(2005)06-0024-04

Study of oil removal technology in helium cryogenic system

Yuan Jinhui Bai Hongyu

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: For the purpose to provide high purity helium in EAST helium cryogenic system, oil removal is of much importance. Its essential elements consist of oil separator, oil filter and activated charcoal adsorption equipment. This paper describes the oil removal principle and method in detail.

Key words: helium; cryogenic system; oil removal technology

1 引言

EAST 氦制冷机选用喷油螺杆压缩机组。就气体压力提高的原理而言,螺杆压缩机与活塞压缩机相同,都属于容积式压缩机;就主要部件的运动形式而言,又与透平压缩机相似。所以螺杆压缩机兼有上述两类压缩机的优点:(1)可靠性高,寿命长;(2)操作维护方便;(3)动力平衡性好;(4)适应性强;(5)多相混输,能耐液体冲击,可压缩含液气体。

螺杆压缩机润滑油选用 32 号合成油,润滑油在压缩机内起到如下几个方面的作用:(1)润滑轴承,降低噪声、提高寿命;(2)保证为机壳和转子之间提供足够的密封,减小轴向泄漏;(3)冷却压缩机,使压

缩过程接近等温,提高效率;(4)冲去压缩机中的粉尘微粒,保护系统免于腐蚀。

由于润滑油的使用使压缩机排出的高压氦气含有大量油雾。氦气中若含有较高浓度的油雾,久而久之低温系统管道内壁会淤积形成油质薄膜,阻塞管道,不利于氦气的流动;氦气中的油雾严重影响了氦气的热物性,不利于氦气在膨胀机中的膨胀降温,降低了氦气良好的传热性能;同时对氦气的回收循环使用造成很大困难。因此压缩机排出的氦气必须进行油分离和气体纯化处理,使氦气中杂质含量低于 5 ppmV(1 ppmV 表示 1 体积的氦气中含有 1×10^{-6} 体积的杂质气体),以满足低温系统运行要求。而分离出来的油需及时返回到压缩机,以保证压缩机的正常

收稿日期:2005-08-01;修订日期:2005-10-09

作者简介:袁金辉,男,26岁,硕士研究生。

润滑。本研究将主要介绍 EAST 低温系统中油的去除流程及原理;整个除油系统包括以下几个环节:压缩机内的油分离,滤油器的过滤及活性炭吸附器对油蒸气的吸附。图 1 为 EAST 低温系统油过滤流程简图。

2 压缩机机内的油过滤系统

喷油螺杆压缩机中,在压缩氮气的同时大量的油被喷入压缩机的齿间容积,这些油和被压缩氮气形成

的油气混合物,在经历相同的压缩和排气过程后被排到机组的油气分离器中。为了降低机组排气中的含油量和循环使用机组中的润滑油,必须利用油气分离器把润滑油有效地从气体中分离出来。在压缩后的油气混合物中,润滑油以气相和液相两种形式存在,处于气相的润滑油是由液相的润滑油蒸发产生的。其数量的多少取决于压缩机出口油气混合物的温度压力,以及润滑油的饱和蒸气压。

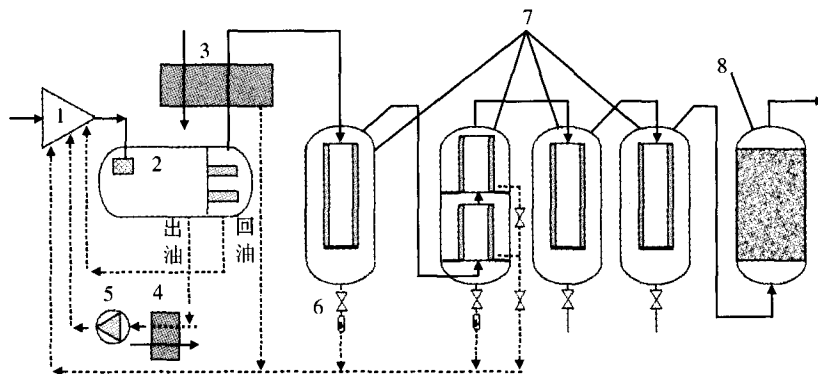


图 1 EAST 低温系统油过滤流程简图

1. 压缩机;2. 油分离器;3. 水冷冷却器;4. 油冷却器;5. 油泵;6. 放油阀;7. 滤油器;8. 活性炭吸附器。

——氮气路;-----油回路

Fig. 1 Sketch of oil removal process in EAST cryogenic system

处于液相的润滑油占了所有喷入润滑油中的绝大部分,但这种液相油滴的尺寸范围分布很广。大部分油滴直径通常处在 $1\ \mu\text{m} \sim 50\ \mu\text{m}$, 少部分的油滴可小至与气体分子具有同样的数量级,仅有 $0.01\ \mu\text{m}$ 。显然,大油滴和小油滴的性质会有较大的差异。其中直径在 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右的油滴最难分离。

在压缩机组采用卧式油分离器,从压缩机排出的高压氮气,进入油分离器后先通过气液分离用的不锈钢丝滤网,然后降低流速,改变方向,向油分离器的另一端排去。在这个过程中,分离器的壁面及设置的挡油板可作为流动方向上的障碍物,油气混合物与障碍物碰撞后,大量的润滑油因为惯性及重力的作用沉降到油分离器底部,剩余的含有微量油份的氮气以较低的速度再通过油分离滤芯,被最后分离,并通过油分离器底部的回油阀回到压缩机中,以确保挡油板之后的筒体底部尽量少存油。靠近油分离器出口的滤芯采用的是化纤网,分油效果好,价格低廉,当分油效果不够理想时即可更换。

经过油分离器后氮气中大量的润滑油得以分离,氮气的含油量大约可降至 $30 \sim 50\ \text{ppmW}$ ($1\ \text{ppmW}$ 表示 $1\ \text{g}$ 氮气中含有 $1 \times 10^{-6}\ \text{g}$ 的油),并且此时的油滴

直径多在 $1\ \mu\text{m}$ 以下。油分离器分离出的油通过油回路冷却加压后返回至压缩机继续润滑压缩机组。

在压缩机组后面配有 1 台卷板式水冷却器,经过水冷却器后氮气从 $100\ ^\circ\text{C}$ 冷却至常温 $25\ ^\circ\text{C}$ 。在此过程中一部分气相的油冷凝后沉积在冷却器中,并通过油回路返回至压缩机继续使用。这样使得氮气中的油蒸气量大大减少,减轻了后续除油的负担。

3 高效滤油器的过滤

压缩机内的油分离器可以很有效的分离直径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的油滴,而对于直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 油滴的过滤,需由多级的高效滤油器来完成。滤油器采用亲和聚结法,由过滤和聚结两个过程组成。这种分离方法中所采用的元件为多孔过滤材料,当油气混合物到流入过滤元件之前,直径大于材料孔径的油滴将在元件的表面被过滤出来。然后利用过滤材料内部流道形状和大小的变化,可使进入其内部的小直径油滴在惯性力等的作用下,在材料的纤维上聚结为大的油滴并被过滤出来。

亲和聚结法中过滤元件的孔径将决定分离效果的好坏。如果材料的孔径较大,则许多小直径的油滴

将无法被分离出来。然而,也不必要把材料的孔径做得太小,这主要是因为随着被过滤出来的大油滴在过滤材料上聚结,元件材料孔径的有效流通面积被明显减小,从而可使更小直径的油滴被分离出来。事实上,当分离元件材料的孔径太小时,不但会使流动阻力增加和产生较大的压降,而且会使一部分油在气体压差的作用下通过分离元件。另外孔径越小,也越容易被进入元件的灰尘等其他杂物所堵塞。在亲和聚结法分离油滴时,氮气的流速也不能太大而导致氮气的二次污染;滤油器 I、滤油器 II 采用中等过滤效率、快速排油的过滤器,滤油器 III、滤油器 IV 采用过滤效率高、慢速排油的过滤器,这样可以减少二次污染,提高总的除油效率。

表 1 4 台滤油器的滤芯规格

Table 1 Cartridge type of four oil filters

滤油器编号	滤芯型号
滤油器 I	超精过滤器滤芯 10 支
滤油器 II	LG120 型压缩气体高效除油器上下两级 各 12 支 ARS 滤芯
滤油器 III	10 支 MF30/50 滤芯
滤油器 IV	10 支 SMF30/50 滤芯

图 1 中 4 台滤油器的过滤机理基本相似,其中第二个滤油器经改进后采用了上下两级过滤,且氮气从滤芯的下部流进。仅以滤油器 III 中的一个滤芯进行分析,来研究它们的除油机理,如图 2、图 3 所示。



图 2 滤芯视图

Fig. 2 View of cartridge

滤芯采用超细玻璃纤维滤纸,内外衬采用不锈钢材质确保滤芯的防腐和高强度;大表面积可确保更高

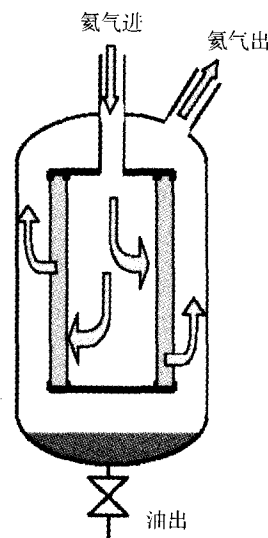


图 3 滤油器结构简图

Fig. 3 Structure diagram of oil filter

效率及较低的压降;两层涂层可确保不被合成油侵蚀;“O”型圈密封可确保压缩氮气联接紧密。

氮气从滤芯的上端入口进入滤芯的内部,过滤后从滤芯的外层流出,最终从滤油器的出口流入到下一环节。玻璃纤维滤芯的过滤机理如下。

图 4 显示的是直径大于 $3 \mu\text{m}$ 油滴的惯性碰撞。这些油微粒具有很高的动量,使得它们可以沿着氮气的流线运动,并与纤维材料发生碰撞;图 5 显示的是直径介于 $0.5 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 油滴的直接拦截。这些油微粒沿着流线运动,并当其路径十分接近纤维组织时,这些油微粒就会聚结。但也不是所有的油滴都被聚结;图 6 显示的是直径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 油滴的布朗运动。直径很小的油滴与氮气分子碰撞后可自由运动,粒径越小,布朗运动越剧烈,油滴微粒与纤维组织碰撞的可能性也就越大。

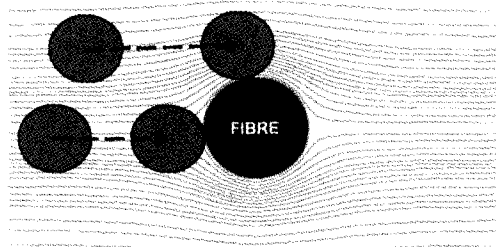


图 4 惯性碰撞

Fig. 4 Inertial impaction

从上述分离过程可以看出,较大的油微粒经过玻璃纤维时机械碰撞后被直接过滤,流到滤油器底部。

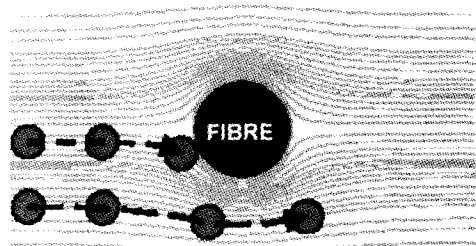


图 5 直接拦截

Fig. 5 Direct interception

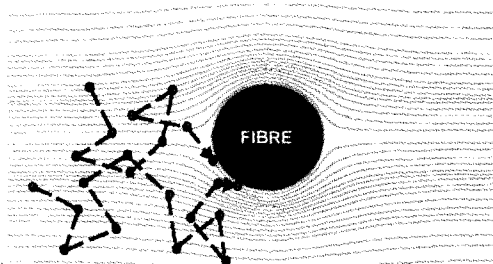


图 6 布朗运动

Fig. 6 Brownian movement

微米量级甚至更小的油微粒(粒径小于 $1 \mu\text{m}$),在经过玻璃纤维的过程中,逐渐凝聚成油滴,并逐渐长大,当运动到滤芯外表面时,由于油的表面张力较大,先聚集在滤芯的外表面上,随着时间的推移,越积越大,慢慢顺着滤芯的外表面流下,最后落到滤油器底部。由于氮气的粘性系数很小,极易穿过玻璃纤维,在穿过滤芯后,改变流动方向,向滤油器上方流动(如图 3 所示)。由于氮气的相对分子质量很小,流动速度又很小,也就是说所具有的动能很小。因此,在改变方向流动时,对油的携带能力是微乎其微的。这样就可使得氮气中液相的油微粒得到很好地分离。分离出的油沉积到滤油器底部,通过自动阀门的控制从油回路返回到压缩机中重新润滑;氮气则进入下一级滤油器继续过滤。

采用以上机械碰撞法和亲和聚结法可以很好地分离出氮气中液相的润滑油,使得氮气中油的含量从几千个 ppmW 量级减小到少于 0.1 ppmW,但不能有效分离处于气相的润滑油微粒。进一步的油气分离需采用化学的方法,通常利用活性炭的吸附作用,清除处于气相的润滑油。

4 吸附器中的吸附

在图 1 所示的吸附器中填充了 2 t 左右、直径为

3 mm 的圆柱状活性炭,主要作用是吸附氮气中的油蒸气以及其它的杂质气体。活性炭是表面电中性的非极性疏水性物质,适合于对有机物的吸附,被吸附物质在水中的溶解度越小,则吸附性越好,而且活性炭有较大的比表面积、价格便宜、再生温度低^[3,4]。

含有油蒸气的氮气从吸附器的底端进入,经过固定床充分吸附后从吸附器顶端流出。由于油蒸气和杂质气体不断占据活性炭的空穴,使活性炭的比表面积不断减小,长时间运行后导致吸附器性能变差,因此根据实际需要需定期更换活性炭,使用过的活性炭再生后重新使用以节约成本。经活性炭吸附后氮气中的油含量降至 0.01 ppmW 的量级。

5 测量仪器的使用

为了能对除油后氮气中的油含量及其它杂质气体进行检测,以评估我们的除油系统,使用油分析仪进行采样分析,采样点取在压缩机站总出口处。其工作原理是:为检测氮气中油雾的含量,需在热解室中将油雾分解成小分子的气态烃类,然后将其送入检测室中进行检测。在检测室中,利用光电效应即通过交流电在两个金属电极间放电,刺激气体发光。在滤光片后面装有一个包含光电二极管的传感器,用此传感器得到发光气体的光电流,再利用放大器将光电流转换成电压值,通过连接电缆将电压值传送到计算板,最后经过 AD 转换装置就可以得到被测物质的浓度。

6 总结

润滑油的过滤是整个氮低温系统很重要的环节之一,通过油分离器、滤油器及活性炭吸附器后,氮气中含有的油得到了很好的过滤,并通过油分析仪来在线检测氮气中油的含量。另外,常温下干燥器对 H_2O 的吸收、80 K 温区活性炭吸附器对 O_2 和 N_2 的吸附、20 K 温区吸附器对 Ne 和 H_2 的吸附使得最终氮气中油含量低于 0.01 ppmW,其他杂质气体含量小于 5 ppmV,以保证氮低温系统长期安全可靠运行。

参 考 文 献

- 1 Helium refrigeration, final oil removal, by Guy Gistau-Baguer, Name of the Lab, Beijing, PRC, 5th to 9th May 2004: 1 ~ 40
- 2 郁永章. 容积式压缩机技术手册. 北京:机械工业出版社, 2000. 636 ~ 637
- 3 罗吉友. PHC245 型氮气压缩纯化机组的研制. 真空与低温, 1996 (9): 125 ~ 130
- 4 蒋维钧, 等. 化工原理(第 2 版)下册. 北京:清华大学出版社, 2002. 398