

大型氦制冷机螺杆压缩机除油系统设计及设备选型分析

盛林海 庄明 张启勇 郝德松

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

摘要: 氦压缩机除油系统是氦制冷机中压缩和液化两大工段之间的重要部分, 其流程设计、参数选择、设备的设计选型和操作方式将直接影响整个系统的运行效率和成本。本文对氦气除油系统的设计方法进行了阐述、分析和总结, 提出了针对大型氦制冷机螺杆压缩机组的工艺流程设计、参数选择、设备选型及计算和操作方式的方法。

Abstract: Oil removal system of helium compression unit is an important part between helium compression and liquefaction process, and its process design, parameter selection, components design and selection, operating style will affect the efficiency and cost of the whole system. The design methods of oil removal system were stated, analyzed and concluded, then the methods including process design, parameter selection, components selection and calculation, operating style were proposed.

Key words: helium refrigerator, Oil removal system, adsorber, filter

引言

在大型氦制冷系统中, 氦气压缩和液化是两大关键性的工艺步骤, 而压缩后的氦气除油系统是这两个阶段之间的重要部分。氦气除油系统的运行状况直接影响到氦气的液化阶段各设备包括膨胀机在内的工作效率, 除油净化处理不彻底会直接使氦制冷机运行的能耗增大或者导致制冷机故障, 因此除油系统的工艺流程设计、参数选择、选型计算都非常关键。

一、压缩氦气的杂质成分及净化处理参数

氦制冷机中普遍要求使用高纯度氦气, 而压缩氦气中杂质的来源有^[1]: 补充氦气中的杂质; 反扩散带来的影响; 新安装的管道内壁面放气; 润滑油放气; 吸附器再生不彻底时导致的放气; 使用湿式气柜时杂质渗入氦气; 压缩机润滑油带来的污染; 另外还有系统内残存的和运行时产生的固体颗粒等。除油系统功能是去除压缩氦气中的油、水和固体颗粒, 设计参数见表 1。

表 1 5kW/4.5K 氦制冷机除油系统设计参数

Table 1 Design parameters of oil removal system of 5kW/4.5K helium refrigerator

	含油量	含水量	固体颗粒
除油前	100ppm(W)	5ppm (V)	10 个/L, 各种粒径
除油后	≤10ppb	≤1ppm	≤3μm

二、氦螺杆压缩机除油系统工艺步骤

一般大型氦制冷系统中螺杆压缩机除油系统包括以下工艺过程: (1) 机械式分离法及凝聚式分离法分级除油; (2) 活性炭吸附法除油; (3) 采用分子筛等进行除水干燥;

(4) 对固体粉尘进行过滤。如图 1 和图 2 所示分别为 EAST 氦制冷机的除油系统的控制画面和实物图。

2.1 分级高效滤油

螺杆压缩机出口气体含油量很高，可用雾、沫和液滴来区分油滴大小^[2]，当液粒直径小于 $10\mu\text{m}$ ，为“雾”， $10\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 为“沫”，大于 $1000\mu\text{m}$ ，则称为“液滴”。机械式分离法包括重力分离或者离心分离等方式，可去除气体中的绝大多数直径大于 $1\mu\text{m}$ 的油滴，而凝聚式分离法，利用专业滤材制成的油气分离滤芯，通过吸附、拦截、长大、沉降的机理去除气体中直径小于 $1\mu\text{m}$ 的细小的油颗粒，EAST 氦制冷机中采用多级油气分离器将压缩氦气中含油量从 100ppm 降到 0.5ppm 。

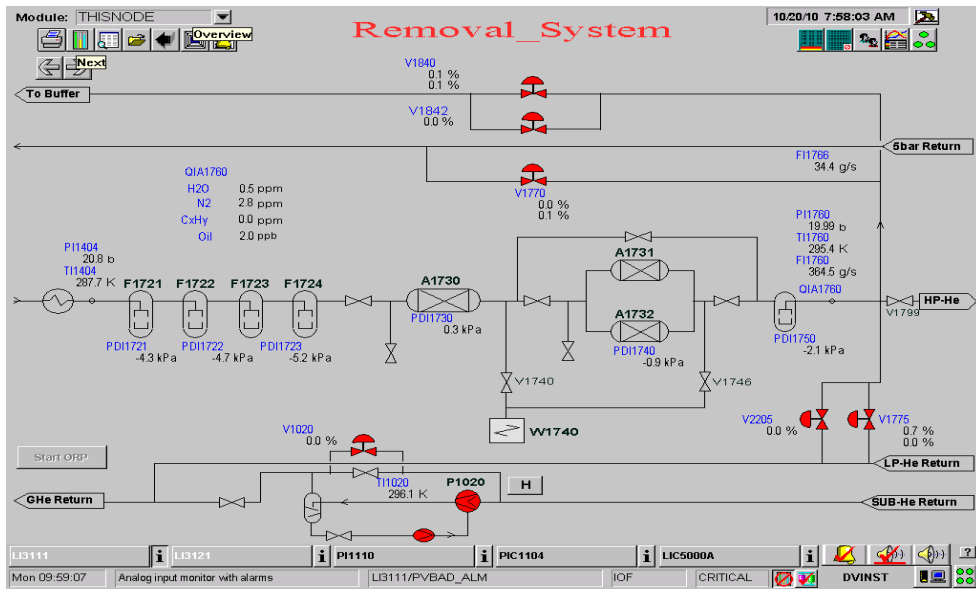


图 1 EAST 氦制冷机除油系统的控制画面

Fig.1 Control interface of oil removal system of EAST helium refrigerator



图 2 EAST 氦制冷机除油系统

Fig.2 Oil removal system of EAST helium refrigerator

2.2 活性炭吸附

油气分离器去除压缩氦气中绝大多数油后，因为油和气存在互溶性，极少部分润滑油无法通过以上的方式分离出来，可以采用固定床吸附器加以去除。由于吸附油后吸附剂再生效果不好，另外吸附剂再生温度比较高，高温对系统的阀门、密封垫的寿命和材质提出了较高的要求，有些吸附剂比如活性炭价格低廉，在条件允许的情况下可选择吸附剂一次性使用不再生，保持吸附的高效性。目前 EAST 氦制冷机中采用 3 号活性炭作为一次性吸附剂将氦气含油量从 0.5ppm 降到 10ppb，以前 3 号活性炭再生利用时控制再生温度在 120℃~150℃ 范围内。

2.3 除水干燥

压缩后的氦气含有微量的水分，仍可采用固定床吸附器除水。为保证系统良好的密封性，防止再生高温氮气带来的负面影响，EAST 氦制冷机的干燥器也改变了运行方式，不使用再生后的吸附剂，将含水量从 5ppm 降到了 1ppm 以下，装置中吸附剂是型号为 13X 的分子筛，以前 13X 分子筛再生利用时控制再生温度在 250℃~300℃ 之间。

另外，对于循环密闭系统开始运行时水分含量较高，必须对气体进行干燥。随着介质的循环水分含量越来越低，气体的纯度越来越高，又由于在后级还有吸附剂，在实际运行时，可以根据气体纯度分析仪的测试结果分时段将氦气旁通而不经分子筛干燥器，可减少能耗和气体压降。

2.4 过滤除尘

压缩氦气经过压缩机、吸附器、干燥器后往往带有固体颗粒，主要是金属和金属氧化物粉末、吸附剂破碎后的微小颗粒等。可采用多孔性固体过滤材料或采用专业滤材制成滤芯进行过滤，前者压降较大，但可利用气体反吹的方法清理滤材表面，从而增加使用寿命，后者压降较小，使用寿命较短，可以根据需要进行选择。

三、除油系统设计及设备选型

3.1 油气分离器滤芯

大型氦制冷机中大多使用开启式喷油双螺杆压缩机，压缩机出口是氦气和油的混合物，经过压缩机本身自带的油气分离元件（demister-除雾器和 coalescer-凝聚分离滤芯）进行分离后，再进入油气分离器进行深度分离。EAST 氦制冷机对螺杆压缩机出口气体含油量要求定为 100ppm (W)，这也是油气分离器入口气体含油量的初始值。

由于油气分离滤芯的滤材和结构的多样性，对于压缩氦气的油气分离效果差别很大，大多数厂家主要采用试验的方法获得数据、图表或者经验公式来确定具体的油气分离方案。图 3、4 是国内某专业生产厂家的 SLX 型油气分离滤芯性能测试曲线^[3]。

根据油气分离元件的性能确定几级分离后，选择滤芯型号。然后根据总的氦气体积流量、滤面面积和滤面流速的大小要求来确定每级滤芯的数量，图 5 是某种油分滤芯尺寸图。

3.2 活性炭吸附器

3.2.1 吸附剂选型

氦气经过油气分离器分离之后进入吸附器中去除残存的油。在固定床吸附器中，常见的固体吸附剂有分子筛、硅胶、活性氧化铝和活性炭。活性炭孔隙发达^[4]，比表面积高达 1000m²/g。同时它表面呈电中性，适于对有机物进行吸附。活性炭的全部微孔表面积占空隙总面积的 90% 以上，在国外此类装置中，活性炭也是最常用的吸附剂。

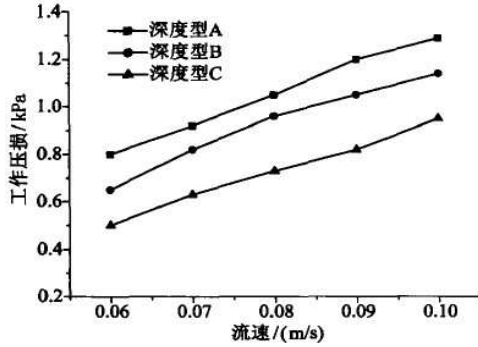


图 3 压损随流速变化曲线

Fig.3 Pressure loss versus velocity

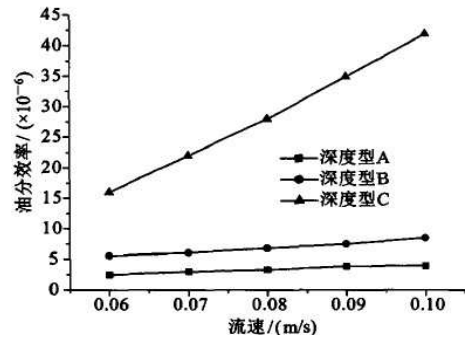


图 4 油分效率随流速变化曲线

Fig.4 Oil separation efficiency versus velocity

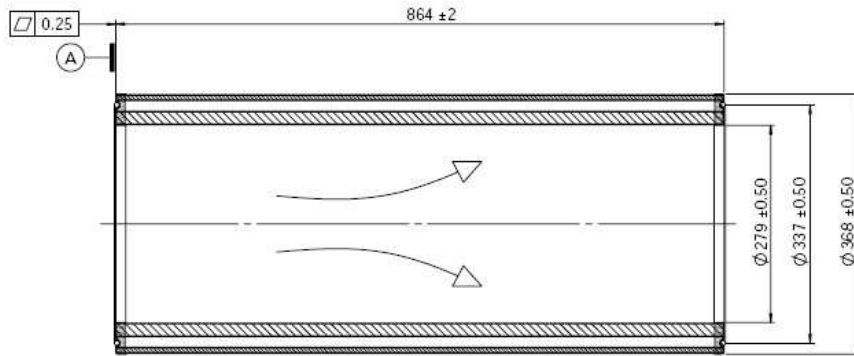


图 5 油分滤芯尺寸图

Fig5 Dimension of oil filter cartridge

3.2.2 活性炭用量计算

计算的前提假设有：气相中吸附质浓度低；在等温条件下进行操作；传质区长度保持不变；传质区比床层长度小得多。活性炭对压缩机润滑油的动态吸附量是计算固定床吸附器吸附剂用量的关键性指标，往往需要采用试验的方法测出该值的大小。在中科院等离子体物理研究所 5kW/4.5K 氦制冷机设计中，准备通过试验的方法测定 3 号活性炭对螺杆压缩机润滑油（MH-41）在特定工况下的相关曲线和动态吸附值，作为计算依据，在这里对两种方法作简要介绍：

计算方法一（穿透曲线法）^{[4][5]}：按照试验数据绘出穿透曲线如图 6 所示。计算传质区中未饱和分率：

$$\varphi = \frac{\int_{w_a}^{w_b} (c_0 - c) dw}{(w_b - w_a) c_0}$$

(1)

ϕ --未饱和分率

w_b --实测值，吸附柱完全被穿透时，流经吸附柱的工质总质量 kg

w_a --实测值，吸附柱刚开始被穿透时，流经吸附柱的工质总质量 kg

c_0 --理论上吸附柱被穿透的浓度 ppm

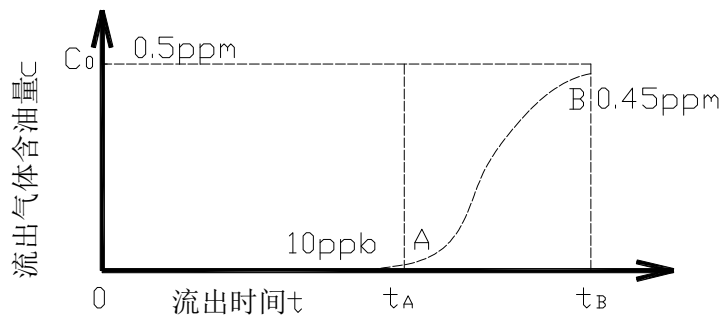


图 6 穿透曲线示意图

Fig6 Schematic curve of penetration process

计算传质区形成所需要的时间:

$$t_F = (1 - \phi)(t_B - t_A)$$

(2)

t_F --传质区形成的时间 s

t_B --实测值，完全穿透的时间 s

t_A --实测值，开始穿透的时间 s

计算传质区高度:

$$Z = h(t_B - t_A) / (t_B - t_F)$$

(3)

Z --传质区高度 m

h --实测值，床层高度 m

计算传质区移动速度:

$$R = Z / (t_B - t_A)$$

(4)

R --传质区移动速度 m/s

计算在试验工况下破点刚出现(10ppb)时的动态吸附率:

$$N_o = \frac{\int_0^{w_a} (c_0 - c) dw}{\rho_b v} \quad (5)$$

N_o --动态吸附率 kg(吸附质)/kg (吸附剂)

ρ_b --装填密度 kg/m³

v --实测值, 床层体积 m³

计算床层饱和度:

$$\eta = \frac{h - \phi Z}{h} \quad (6)$$

η --床层饱和度%, 一般大于 90%

以上各值按照试验时采集的数据进行计算得出,以下按照测试数据进行活性炭吸附器的相关计算。

因为试验装置是对实际工况的模拟,采用相同的温度、压力、空床流速、流体浓度、孔隙率等,所以其动态吸附率是相近的。

按照动态吸附率,算出活性炭质量:

$$M = G_o T C_0 / N_o \quad (7)$$

M --活性炭的质量 kg

G_o --氮气的质量流量 kg/s

T --设定值, 床层使用时间 s

按照相同的空床流速计算床层直径:

$$D = \sqrt{\frac{4W}{\rho v \pi}} \quad (8)$$

D --直径 m

ρ --气体密度 kg/m³

W --质量流量 kg/s

v --气体空床流速 m/s

按照吸附剂体积计算床层高度:

$$H = \frac{4M}{\rho_b \pi D^2} \quad (9)$$

确定筒体截面直径与高度的关系：

$$n = H / D \quad (10)$$

n --高径比

如果高径比不在 2~3 之内，可适当调节流速和床层使用时间来调整高径比。将直径和床高取圆整值后，确定活性炭实际用量(可适当多取 10%)。

计算方法二（希洛夫方程）^[5]：

在固定工况下，固定床实际使用时间和理论持续时间有如下关系：

$$t = t_b - t_m = KH - KH_m \quad (11)$$

$$K = a_m / (vC_0) \quad (12)$$

t --床层实际使用时间 s

t_b --床层理论持续时间 s

t_m --床层持续时间损失 s

K --吸附层保护作用系数

H --床层高度 m

H_m --床层高度损失 m

a_m --吸附剂的平衡静吸附量 kg(吸附质)/m³(吸附剂)

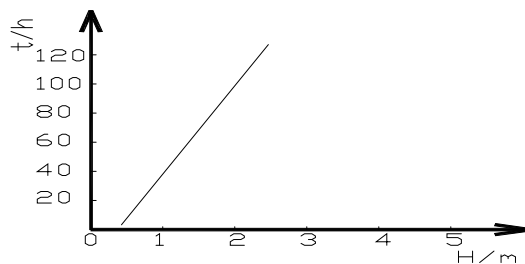


图 7t-H 曲线示意图

Fig7 Relation between t and H

对于一定体系，固定工况下固定床的实际使用时间和床高成正比。试验时，制做两个不同高度的小型活性炭吸附柱，采用相同的截面积和空床流速，其中空床流速和实际设计制造的吸附器相同，图 7 是曲线示意图。

测量斜率 K 和截距 KH_m ：

以上各值按照试验时采集的数据进行计算得出，以下是床层外形尺寸的相关计算：
计算床层外形尺寸：

$$H = (t + KH_m) / K \quad (13)$$

按照公式（8）计算床层直径 D ：

按照公式（10）计算高径比：

调整气体空床流速和床层实际使用时间来确定高径比，再计算活性炭质量。

活性炭吸附器压降计算--按照欧根公式计算^[6]：

$$\left(\frac{\Delta P}{H} \right) \frac{\varepsilon^3 d_p \rho}{(1 - \varepsilon) G_s^2} = \frac{150(1 - \varepsilon)\mu}{d_p G_s} + 1.75 \quad (14)$$

ΔP --压降 Pa

d_p --吸附剂颗粒直径 mm

ε --床层孔隙率

μ --气体粘度 Pa.s

G_s --单位截面积气体流速 kg/m².s

两种测试动态吸附值方法各有特点。前者采集数据较多，采用计算机进行数据采集和手工计算，应用更加方便。由于实验的活性炭柱传质层高度在整个层高上不可忽略，实测值比理论值会略微偏小，但不会影响设计计算。

3.3 干燥器

3.3.1 干燥剂选型

在此类的干燥器中，一般选用硅胶或者分子筛等作为干燥剂。在水气分压较低的范围分子筛对水的吸附能力极高，吸水性不受温度影响，机械性能好，适用于压缩气体的深度干燥。本系统内不考虑干燥剂的再生问题，分子筛是首选。硅胶是极性吸附剂适用于高湿气体的干燥，且硅胶吸水时放热量较大，吸水性随温度的升高而降低，所以硅胶不适用于本系统。

3.3.2 吸附剂动态吸附容量^[8]

在设计计算用的吸附容量, 应是动态吸附容量。一般说来分子筛静态的吸附容量在 21% 左右, 动态吸附容量在 12% 左右, 但是为了再生和保险起见可取 8.4%。很多设计是采取这 8% 一吸附值, 也有一些厂家选取的吸附容量在 5.7% 左右, 是由于使用较大的流速或者考虑到再生不彻底等因素。

3.3.3 干燥剂用量计算:

$$M = \frac{C_0 V t}{a} \quad (15)$$

M --干燥剂用量 kg

V --处理气体流量 m^3/h

C_0 --吸附质浓度 ppm (V)

t --工作周期 h

a --设计动态吸附容量 m^3/kg

合适气体流速的选取选取气体从下往上的流动方式, 为了使料层不产生运动的允许气体流速, 可根据 E.A 雷督克斯半经验公式进行估算:

$$G_s = \sqrt{0.0167 \rho \rho_b d_n g} \quad (16)$$

如果气体自上往下流动, 系数 0.0167 发生改变, 可在 0.025~0.032 选择。

G_s --单位面积上气体质量流速 $kg/m^2.s$

d_n --吸附剂颗粒平均直径 m

g --重力加速度 m/s^2

《深冷手册》^[7]规定分子筛干燥器空塔气体流速一般不超过 0.05m/s, 可直接选取空塔流速为 0.05m/s 计算, 对于这一点有文献提出异议, 很多实际应用中气体流速大大超出此值^[8]。按照《化工原理》^[4]所述气体吸附时空塔流速可以达到 0.3~0.6m/s, 影响空塔流速选择很重要的一个方面是压降的要求, 有厂家按照国外的一些算法, 这类气体的干燥器流速取值在 0.2m/s 左右。表 2 摘录了部分企业分子筛干燥器的使用参数^[8]。

表 2 摘录部分企业分子筛干燥器使用参数

Table 2 Operating parameters of molecular sieve dryers of some companies

名称	上海高桥化工	北京前进化工厂裂	大港油田膨胀制
----	--------	----------	---------

	厂裂解气分离	解气分离	冷天然气脱水
处理量 m ³ /h	6000	82000	50000
气体分子量		23.4	20.64
吸附压力 kPa(A)	3348	3673	1520
吸附温度	20	15~20	15~30
干燥塔直径 m	1.2	2.8	2.6
操作周期 h		24	24
空塔流速 m/s	0.05	0.0915	0.189
原料气含水量 ppm	6000	650	1000~1700
脱后气含水量 ppm	60	1	1
吸附容量%		5.75	8.4
分子筛堆重度 kg/m ³	700	634	745
干燥塔高径比	3	1.9	2.5
分子筛直径 mm	φ 3~5	条状, 当量 φ 4	φ 3~5
分子筛产地	上海, 大连	日本	大连

按照选取的空塔流速计算床层直径, 公式 (8):

吸附床层高度, 公式 (9):

吸附床层高径比, 公式 (10):

调整气体空床流速和床层实际使用时间来确定高径比。

压降仍按照欧根公式计算, 公式 (14):

3.4 粉尘过滤器

3.4.1 过滤介质选材

过滤介质有以下几种: 织物介质, 可截留颗粒的最小直径为 5~65μm; 多孔性固体介质, 可截留直径为 1~3μm 的颗粒; 堆积介质, 用于固体含量很少的情况; 新型材料, 表 3 是某种进口的新型玻纤材料。

固体杂质的出现, 是因为气体经过固体吸附剂时有时会导致颗粒破碎产生粉尘, 或气流把系统中的细小颗粒带出, 而粉尘过滤器的作用是将气体中的固体颗粒最终除去。在 EAST 装置中选用的是一种多孔性塑料管, 属于多孔性固体介质。

3.4.2 过滤元件用量计算

在过滤过程中^[6], 颗粒被过滤介质截留所引起的阻力相对很小可以忽略时, 其过滤为过滤介质阻力为主的过滤, 在计算过滤介质阻力时, 只需考虑介质的阻力。

计算过滤介质阻力:

$$R_m = r_m \times L_m \quad (17)$$

R_m --过滤介质阻力 m⁻¹

L_m --过滤介质厚度 m

r_m --过滤介质比阻 m^2

在规定压降的情况下，选好滤材，则可以计算气体的流速：

$$u = \Delta p / (r_m L_m \mu)$$

(18)

u --气体流速 m/s

按照整体气量和单根滤材处理量的比值来确定塑料管的数量。

表 3 某进口新型玻纤滤料的物理性能

Table 3 Physical properties of some new glass fibre filter

型号	单位	XLG95	XLG85	XLG65	XLG45
		(F8)	(F7)	(F6)	(F5)
颜色		黄色	粉红	橙色	琥珀
单位克重	g/m ²	76	67	73	94
厚度	mm	6.4	6.4	6.4	6.4
压降	Pa	79.6	47.3	19.9	12.4
初始平面过滤效率	%	73	53	23	12
平均过滤效率	%	90-95	80-85	60-65	40-45
可燃性（美国 UL 等级）		2	2	2	2

压降测试参数：气体流速 0.13m/s，取样为 0.61m×0.61m；效率测试参数：气体流速 0.13m/s，取样为 0.61m×0.61m，测试颗粒直径为 0.3μm~0.5μm。

如果采取相同的垂直于滤面的流速 0.13m/s，单层 XLG95 滤棉的压降为 79.6Pa。因此可以直接采取该滤面的气体流速作为设计参考值，滤芯可以采取多层复合（外层可以采用纳污量更高的其他材质）。图 8 是用这种材料为中科院等离子体物理研究所 500W 氦制冷机设计的粉尘过滤器，体积很小，可以直接装夹在管道上，便于拆卸更换。

四、压缩氮气除油净化系统使用上的特殊性：

4.1 压力升降要平稳缓慢，避免滤芯和吸附层遭受不稳气流的冲击，导致滤面损坏、气流短路以及吸附剂破碎；

4.2 泄压时，其泄压口要位于该系统之后，严格规定气流方向，避免反向气流冲击滤芯和多孔性塑料过滤管而造成变形，如内部密封损坏将严重影响其过滤效果；

4.3 由于系统泄压时，吸附器的吸附能力下降，饱和层会放气污染气体，所以系统停机时，系统内部的气体纯度将会下降，这些气体最好单独收入规定的容器，作为不纯气体处理，避免影响二次开机运行；

4.4 单个容器的泄压口和抽空口位于出口端，充气口位于入口端；

4.5 吸附剂快速装填，尽量避免被空气污染，影响吸附效果。

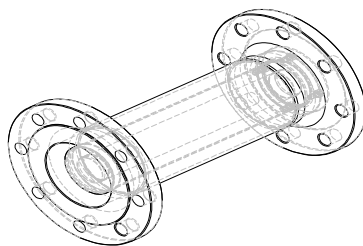


图 8 500W 氦制冷机粉尘过滤器外形

Fig8 Dust filter configuration of 500W helium refrigerator

五、结论

本文阐述了大型氦制冷机除油系统的设计及使用的几个方面，并在实际工作中得到了验证。吸附器的动态吸附值的测定，目前正在准备当中。测试方案和测试仪器基本准备就绪，测试流程已经确定，此方法对测试值的准确性有待进一步的实践检验。

参考文献:

- 1 袁金辉, 白红宇.大型氦低温系统中的杂质净化[J].低温工程, 2006(4):28:31.
- 2 辛宝丰.气液分离器的设计和选择[J].医药工程设计, 1986(3).
- 3 张金权, 畅云峰, 姚建国.油气分离元件的试验研究[J].制冷与空调, 2008(2):68-70.
- 4 蒋维钧, 雷良恒, 刘茂林, 戴猷元, 余立新.化工原理(下)[M].北京:清华大学出版社, 2003.
- 5 蒋文举, 宁平.大气污染控制工程[M].四川:四川大学出版社, 2007.
- 6 蒋维钧, 戴猷元, 顾惠君.化工原理(上)[M].北京:清华大学出版社, 2003.
- 7 化工第四设计院.深冷手册[M].北京:燃料化学工业, 1979.
- 8 桑田.天然气脱水使用国产3A分子筛的几点体会[J].石油与天然气化工, 1985(4):28-31.