

适用于空气静压轴承的空气 净化系统的研制

张汉广、邹文信、邓玉新、郭德申

摘 要

本文介绍了空气轴承所需压缩空气的净化方法及净化系统流程图。提出了应用于空气静压轴承净化空气的设计指标。文中着重介绍了提高净化系统过滤效果的技术途径、过滤介质的选择和实现各项设计指标的措施。介绍了净化系统主要性能指标的测试方法及测试结果。

一、前 言

为在长时间内保持空气静压轴承的设计指标和使用性能，必须使供气中没有可降低轴承性能的固态、液态和气态杂质。压缩空气中杂质污染是十分严重的。来源于大气中的灰尘颗粒，足以穿过压缩机的滤网，液态杂质包括有凝结水蒸汽和压缩机中的润滑油，气体杂质包括有水蒸汽和油蒸汽。

油、水会使空气轴承摩擦力矩显著增加，使气隙面沾污积垢而影响轴承的工作性能；大量的尘埃粒子进入空气轴承会引起轴承面的划伤、卡死。压力波动会引起涡流力矩变化，尽管它的变化很小，在某些应用场合也是不允许的。所以，进入空气轴承的空气必须要除油、除水、除尘和稳定压力。

为满足与长期保持空气静压轴承的性能要求，我们建立了压缩空气净化系统。经一年多的使用和对净化空气进行的多项测试，结果表明净化后的压缩空气达到了性能指标，满足了使用要求。

二、空气净化系统的性能指标及流程图

1. 性能指标：

- ① 含尘粒度不大于 $0.5\mu\text{m}$ 。
- ② 露点温度不高于 -45°C 。
- ③ 含油量（按体积比）小于 1×10^{-6} 。
- ④ 稳压精度不低于 $\pm 2\%$ 。
- ⑤ 系统全路压降不大于 0.3kgf/cm^2 。

2. 系统流程图：

系统的布置须保证各项指标的实现，使净化后的空气稳定性好，洁净度高，长时间使用

效果好，以及压降损失最小。(图 1 为系统流程图省略，见本期内“人工调平衡三轴气浮试验台及其空气静压球轴承的性能研究”图8。)

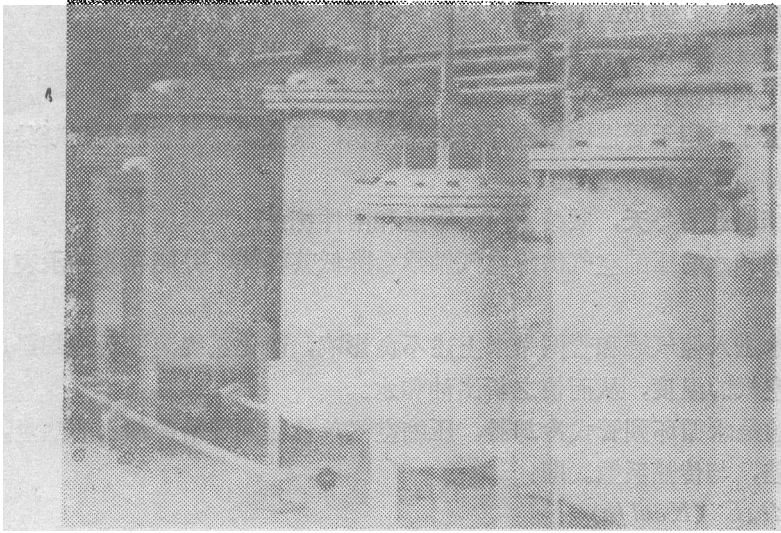


图 2 净化系统主要设备

本净化系统设备较多，拟采用集中控制和自动闭路处理。这样既可以缩短维护净化系统的时间，同时也可以减少管理人员。

三、固态、液态、气态杂质的过滤

在各种杂质中，固态颗粒是最容易从压缩空气系统中去除的杂质。去除固态颗粒的方法很多，本系统采用玻璃纤维做为空气过滤材料。

在纤维过滤器中，玻璃纤维以网状形式填装。当空气进入容器内便沿着纤维网的孔隙流动，压缩空气中的灰尘就一层一层地被吸附在纤维束上。

系统采用的玻璃纤维过滤器纤维层厚为500mm，其使用性能如下：

1. 使用温度：最高93.5℃。
2. 最高空气流速：140m/min。
3. 新玻璃纤维的阻力：在空气流速为90m/min时为2.75mm水柱。
4. 积尘后的最大阻力：在空气流速为90m/min时为12.5mm水柱。
5. 过滤能力：在空气流速为90m/min时为0.55m³/cm²。
6. 过滤效率：新纤维介质为98%，积满尘埃时为88%。

在使用过程中，由于纤维层中灰尘不断增加，压力损失越来越高，当压力损失为开始使用时的3~4倍时，就需更换新的纤维过滤介质了。

除去液、气态杂质比除去固态杂质要困难，因为它的粘度较大，往往粘附在供气管道的壁上腐蚀供气管道。液、气态杂质一旦进入空气静压轴承的气隙面内，对轴承的高精度表面的腐蚀也是很严重的。目前大多数工业用过滤器对于处理液、气态杂质的效果甚微。为除去液、气态杂质，系统采用了粗、精两级过滤，对那些大颗粒的液、气态杂质通过水冷却、油水分离和合理采用包括储气罐在内的排泻阀门系统去除，这样可以使压缩空气得到初步净

化，避免腐蚀管道，并可降低精过滤器的负担。

众所周知，空压机最后一级排气温度可达140~170℃。在这种温度下，压缩空气中所含的水蒸汽及油均为气态。如带至储气罐和管网中，将产生下列影响：

(1) 油蒸汽聚集在储气罐中，形成易燃物，有时甚至是爆炸混合物。

(2) 带走了润滑油。

(3) 由于渣子沉积于管道内减少了管道截面积，聚集在个别管段内的凝结水在受到气流压力的作用下有引起水击的危险。

(4) 在冰冻地区的冬天，凝结水可使管道和附件冻结。

(5) 含有油和水的压缩空气供给空气轴承会降低其性能，并能导致轴承表面严重腐蚀。

为防止油、水进入储气罐和管网带来上述不良影响，净化系统装设后冷却器，以降低进入储气罐前压缩空气的温度，从而使之析出油和水。

系统中采用的是水循环列管式冷却器。压缩空气单位时间传给冷却水的热量，取决于传热面积，平均温差，与传热系数。即：

$$Q = K \Delta t_m F \quad (Kcal/h)$$

式中：

冷却器的热负荷： $Q = 5000 (Kcal/h)$ 。

传热系数： $K = 40 (Kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ 。

压缩空气与冷却水的平均温差： $\Delta t_m = 50 ^\circ C$ 。

传热面积： $F (m^2)$ 。

根据上式及已知条件确定后冷却器所需传热面积：

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_m} \\ = \frac{5000}{40 \times 50} = 2.5 (m^2)$$

油、水分离器是采用能使气流产生环形回转同时产生撞击并折回，两种形式相结合的结构。当气流进入分离器中，气流受装置内部挡板的阻挡即进行二次环形回转。这种结构分离密度较大的油滴和水滴的效果比单纯利用其中一种结构好得多。

系统设置储气罐，主要为减弱活塞式压缩机排出的周期脉动气流稳定压缩空气管道中的压力，同时可进一步分离空气中的油和水，实现安全停车，选择储气罐容积的计算公式为：

$$V_s = 1.15 \frac{q}{p_s - p_1} \cdot t$$

式中：

容积系数：1.15。

贮气罐内充入的空气压力： $p_s = 10 (kgf/cm^2)$ 。

用户所需工作压力： $p_1 = 8 (kgf/cm^2)$ 。

单位时间内空气消耗量： $q = 1 (m^3/h)$ 。

储气罐工作时间： $t = 6 (h)$ 。

储气罐所需容积： V_s 。

将已知条件代入方程得到：

$$V_c = 1.15 \frac{1}{10-8} \times 6 = 0.575 \times 6 = 3.45 (\text{m}^3)$$

为验证压缩空气经冷却和油水分离后的效果，在使用过程中进行了取样观察。

条件：压缩机开机时间为 2 小时，经储气罐储存，净化系统连续使用时间为 8 小时。

结果：1. 夏季：在湿度大的天气，可冷却分离出 300~350g 油水混浊液。

2. 冬季：在湿度小的天气，可冷却分离出 200~250g 油水混浊液。

大量的油、水杂质在系统前部被分离，为系统后部的精过滤器减小了工作负荷，延长了使用寿命。所以在压缩机后设立后冷却器与油水分离器对提高全系统的过滤效果是很有必要的。

净化系统中微小的固态颗粒和油、水蒸汽也将对空气轴承产生损害，这是因为它在轴承间隙内可能凝结成蜡状沉淀物。由于等熵膨胀而引起的冷却，这种凝结一般发生在进气孔后。这种凝结物附着在对着进气孔的轴承表面，呈黄棕色蜡状细线状态。

对于这些微量的油、水和微小的固态颗粒，系统采用了滤纸型高效净化材料做为过滤介质。对高效过滤材料的要求是：过滤效率高；有一定的强度和刚度；过滤材料易于加工和装配。参照国家建委建筑科学研究院空调所对几种国产滤纸在同比速下所作油雾透过系数测定和阻力测定的资料，系统选用 149# 滤纸作为过滤材料。149# 滤纸是在木质纤维纸浆中加入少量的兰石棉纤维所制成的纸板，它的厚度为 1.1 毫米。由于厚度比其它滤纸都大，因此在相同外力作用下，它比其它型号滤纸产生的挠度小，抗张力也大，作为压缩空气过滤材料来说，比其它滤纸都更合适些。149# 滤纸的透过系数很低，所以它对空气的阻力比其它滤纸要大，但对压缩空气来说影响不大。

上面对消除固、液、气态杂质的方法，选材进行了分析。为进一步验证所采用方法的效果，对新建过滤系统及连续累积工作 1000 小时的过滤系统分别进行了尘埃粒子数和压力降变化的检测。

0.5μm 尘埃颗粒检测：

条件：新建净化系统，连续使用一个星期

测试仪器：Y09—1 尘埃粒子计数器

表 1

读 数 次	时 间	时 间		
		1 分 钟	2 分 钟	10 分 钟
1		0	0	7
2		1	0	4
3		0	3	6
4		0	1	
5		1	0	
均 值		0.4	0.8	5.7

$$0.4 \times 2 = 0.8 (\text{个/升})$$

$$0.8 \times 1 = 0.8 (\text{个/升})$$

$$5.7 \times 0.2 = 1.14 (\text{个/升})$$

0.5μm 尘埃颗粒检测：

条件：净化系统连续使用1000小时
 测试仪器：Y09—1尘埃粒子计数器

表 2

读 数 次 数	时 间	1 分 钟			2 分 钟			10 分 钟		
1		0			0			20		
2		0			4			16		
3		0			1			11		
4		3			1					
5		0			10					
6		1			0					
7		1			1					
8		2			1					
9		0			2					
10		1			9					
均 值		0.8			2.9			15.6		

$0.8 \times 2 = 1.6$ (个/升) $2.9 \times 1 = 2.9$ (个/升) $15.6 \times 0.2 = 3.1$ (个/升)

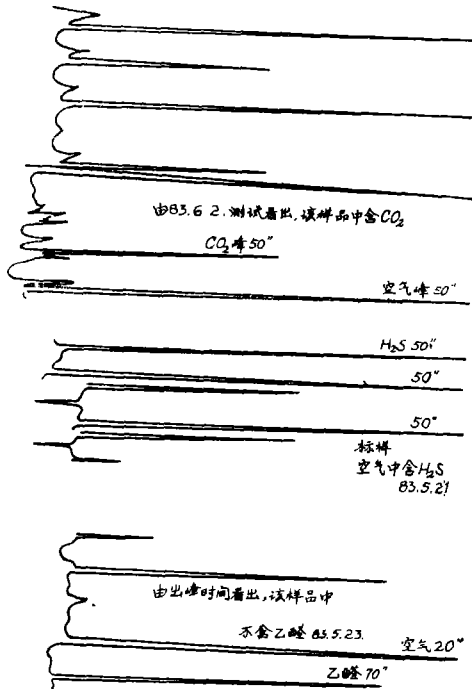


图 3 气相色谱仪测试曲线 (复制)

从表 1 和表 2 可看出，连续使用1000小时的净化系统残留的尘埃粒子数与新建净化系统相比变化不大。两种条件下采用了相同的输入压力，压降变化不大于0.1kgf/cm²，说明系统经长时间使用过滤效果是理想的。

油雾对空气静压轴承表面的腐蚀，同样是不可忽视的问题。因此采用气相色谱仪及质谱仪对净化空气中的含油量进行了测试分析，测试曲线见图 3 及图 4。经色谱、质谱仪所测曲线的对比分析得出：空气中含油量（按体积比）可达1ppm(1×10⁻⁶)数量级。根据使用情况表明，1ppm的含油量可以保证空气静压轴承长期的使用性能。

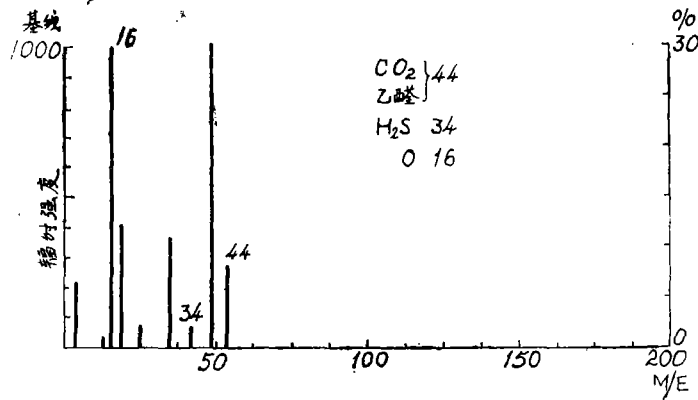


图4 质谱仪测试曲线(复制)

质谱: (8709)—1.00(9 70 10), 样品: 空气

记录: 1982.12.3. 峰值: M/E 40.0 INT.314.0

四、空气中冷凝水的消除

压缩空气经后冷却器,油、水分离器冷却分离后,仍有一定的含水量,其含量取决于空气的温度、压力和相对湿度。本系统原温度为60℃,平均相对湿度为64%,湿空气的露点可通过下式得到:

$$P_s(T_2) = \varphi p_s(T_1) = 0.64 \cdot p_s(T_1)$$

式中:

P_s : 饱和水蒸汽压。

T_2 : 露点温度。

T_1 : 系统中气体温度。

φ : 平均相对湿度。

查表得到: $p_s(T_1) = 0.126$ 。

$$\therefore P_s(T_2) = 0.64 \times 0.126 = 0.081 \text{ 查表: } T_2 = 45^\circ\text{C}.$$

知道了湿空气的露点之后,预先使湿空气温度降到露点以下,先使水分凝析出来,使湿空气以后在系统中流动时不会因温度降低而析出水来。因此,对要求供给干燥压缩空气的空气静压轴承来说,必须设立除湿干燥装置。压缩空气的干燥是利用具有吸湿性能的吸附剂(如硅胶、铝胶和分子筛等)吸收空气中的水分,以达到干燥的目的。同样,已被吸附的水份可以用解吸的方法从吸附剂中释放。在干燥装置中,系统选用的吸附剂是细孔硅胶,它是一种高活性可再生的固体吸附剂。具有高微孔结构,较稳定的化学惰性和高的热稳定性。

系统硅胶床层高度是根据露点不高于-45℃的指标进行设计的。根据这一指标,参考有关硅胶性能的资料及数据(见表3及表4),将床层高度设计为700毫米,其实际露点可达-60℃。当如此高的床层露点降到-40℃以下,硅胶就会很快地达到“转效点”,而使其析取冷凝水的性能丧失。

表3 单位面积不同高度硅胶床层出口空气湿含量、露点与时间的关系

实验工作时间	硅胶床层高度			
	出口空气露点 (含水量g/m ³)			
	500mm	1000mm	1500mm	2000mm
60(min)	-60.6℃(0.02)	-60.6℃(0.02)	-60.7℃(0.02)	-61.8℃(0.016)
90(min)	-60.6℃(0.02)	-60.6℃(0.02)	-60.7℃(0.02)	-61.8℃(0.016)
120(min)	-25℃(0.7)	-60.6℃(0.02)	-60.7℃(0.02)	-61.8℃(0.016)
300(min)	-9℃(8.82)	-51℃(0.056)	-60.7℃(0.02)	-61.8℃(0.016)
360(min)		-16.8℃(1.4)	-60.6℃(0.02)	-61.0℃(0.018)
		-3℃(5.98)	-57.8℃(0.026)	-61.0℃(0.018)
			-41℃(0.158)	-61.0℃(0.018)

表4 单位面积不同高度硅胶床层的出口空气湿含量

床层高度(mm)	500	1000	1500	2000
气体出口点温度(℃)	9	-51	-60.1	-61.8
气体出口含水量(g/m ³)	8.82	0.056	0.02	0.016

设计700毫米床高并适当增加其过滤面积，硅胶干燥装置在有效时间内实现-45℃的露点温度是完全可能的。

当硅胶工作一个阶段，吸附剂达到饱和后须加热再生以除去吸附水。再生吸附剂的时间间隔可通过下式计算：

$$Z = \frac{G_2}{G_3} (h) \dots\dots①$$

在干燥过程中吸附剂所吸收的水分量：

$$G_2 = G_1 \times \alpha \dots\dots②$$

干燥器内装填硅胶重量： $G_1 = 50(\text{kgf})$ 。

吸附剂设计吸附容量：取 $\alpha = 8\%$ 。

将已知代入②式： $G_2 = 4(\text{kgf})$ 。

每小时随空气进入干燥器的水分量：

$$G_3 = \frac{V_1 \times d \times 60}{1000} \dots\dots③$$

进入干燥器的容气量： $V_1 = 183(\text{l}/\text{min})$ 。

压缩空气经后冷却器出口温度 $t = 40^\circ\text{C}$ 时的湿含量： $d = 50.91(\text{g}/\text{cm}^3)$ 。

将已知代入③式：

$$G_3 = \frac{183 \times 0.05091 \times 60}{1000} = 0.559(\text{kgf}/\text{h})$$

∴系统中硅胶干燥器的工作时间为：

$$Z = \frac{G_2}{G_3} = \frac{4}{0.559} \approx 7(h)$$

为保证连续工作的需要，两台硅胶干燥器采用并联联接交替处理和使用。

五、供气压力的稳定

供气压力的稳定在空气静压轴承应用中是非常重要的，许多空气静压轴承的精度要依靠较高的稳定供气压力来实现。

供气压力的波动受很多因素的影响。由于压缩机在开、关机时所产生的压差和空气轴承流量的变化，将导致供给的压缩空气压力在很大范围内波动，为获得恒定的供压除减少压缩机的开、停次数利用储气罐稳定压力外，主要还是通过稳压阀调节压缩空气压力使之保持恒定。

系统采用QTY-15-S₂型调压阀，其使用性能基本满足了空气静压轴承的要求。

不断提高稳压精度无疑对保持空气静压轴承工作性能有好处。应达到多高的压力稳定精度能够使各类空气静压轴承均能保证其良好的工作性能，这方面工作我们做的还不够，也是今后需进一步研究的问题。

六、结 论

1. 净化系统经连续使用一年的时间仍保持了高洁净度、高稳定性和低压降的性能，满足了空气静压轴承对净化空气的使用要求。

2. 高效过滤纸可获得高洁净度的过滤空气，且产生的压力降很小。是一种较理想的高效过滤介质。

3. 小于 1×10^{-6} 含油量的洁净空气长时间的使用不会腐蚀空气轴承的高精度表面。

4. -45°C 的露点温度可以充分吸取空气中的冷凝水，使之达到理想的干燥度。

目前，在精密机械行业及在特殊工况条件下工作的场合，空气静压轴承的研制与应用已越来越多的引起人们的兴趣。但对空气静压轴承所需压缩空气的净化问题往往还被忽视。为使空气静压轴承能够长时期保持其设计性能，延长其使用寿命，必须进一步研究压缩空气的净化问题，最终使其达到：高洁净度、高稳定性、小型化、标准化、系列化。以满足今后广泛应用空气静压轴承的需要。

付瑞卿同志协助我们对系统油含量进行了检测，并提供了测试曲线，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] C·N戴维斯；《空气过滤》，国防工业出版社，1979。
- [2] 压缩空气站设计手册编写组；《压缩空气站设计手册》，中国建筑工业出版社，1974。
- [3] 气动技术编写组；《气动技术》，北京出版社，1980。
- [4] 玻璃纤维的生产及应用编写组；《玻璃纤维的生产及应用》，中国建筑工业出版社，1974。