

医用分子筛制氧设备性能优化设计试验

杜钢 曹玉库

(第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘要:从吸附剂的筛选及用量确定、吸附塔的设计计算、工艺流程以及吸附程序和吸附周期的试验等方面进行研究改进, 使得医用分子筛制氧设备的性能进一步优化。

关键词:分子筛; 变压吸附; 吸附塔; 吸附程序; 吸附周期

中图分类号: TQ116.19 **文献标识码:** B

Optimization Design and Experiment on Performance of Oxygen Generating Equipment with Medical Molecule Sieve

DU Gang, CAO Yu-ku

(The 718 Research Institute, Handan 056027 China)

Abstract: Properties of oxygen generating equipment with medical molecule sieve were further optimized on the basis of studies on the selection and quantity of adsorbent, the design and calculation of absorption tower, process flow and testes of adsorption process and adsorption cycle.

Keywords: Molecule sieve, PSA, absorption tower, adsorption process, adsorption cycle

0 引言

氧气的应用越来越广, 特别在医疗保健方面的应用也越来越受到人们的重视。氧气的制造方法主要有分离法、化学法及电解法等, 而分离法又有深冷法、吸附法及膜分离法。其中变压吸附法(PSA)作为一种新的气体分离与纯化技术是1958年由国外两项专利提出来的。我国是在上个世纪60年代开始进行变压吸附技术的研究, 先后开发出变压吸附制氧、制氮、制氢等设备, 并且逐步由小型化到中型化再向大型化发展。我所也是国内较早开始变压吸附技术设备研发的单位, 也有变压吸附制氧、制氮和制氢设备进入市场, 但是没有形成规模。1998年, 有关部门编制发布了《医用分子筛制氧设备通用技术规范》, 变压吸附制氧设备以其现场制氧, 方便快捷, 设备投资小, 制

氧成本低等优势作为医用氧制备的一种方式被广泛采用, 并有取代钢瓶供氧和液氧罐供氧的趋势。现在我们研制开发的PY系列医用分子筛制氧设备已有PY-03、PY-05、PY-3、PY-6、PY-9、PY-12等几种规格的产品进入市场, 并受到用户的好评。为了进一步增强市场竞争力, 应在努力提高设备质量的基础上, 不断优化设备性能, 特别在降低能耗上下功夫, 进一步扩大与其它制氧方式相比的优势。

1 医用分子筛制氧设备的基本原理

医用分子筛制氧设备是采用变压吸附原理, 即空气中的氧气和氮气在吸附剂上的吸附容量、吸附速度和吸附力等方面的差异以及吸附剂在不同压力下对氧气和氮气的吸附容量具有较大的差异来实现氧气和氮气的分离。在一定压力下分子筛吸附空气中的氮

气,弱吸附组分氧气作为产品输出,减压时氮气解吸,同时吸附剂得到再生。通常 PSA 制氧装置采用的分子筛是改型氧 5 分子筛,其孔径约为 5A,对空气中的氮气的吸附量远高于对氧气的吸附量,并能吸附空气中的酸、碱、CO₂、氧化物、卤素等对人体有害的物质,从而获得符合医用氧标准的高纯度氧气。

2 优化设计提高性能

变压吸附制氧设备的性能好坏,除了配套设备压缩机、高效除油器、空气和氧气缓冲罐、氧气增压机设计选型匹配合理质量可靠外主要取决于变压吸附主机的性能。

目前,国内外变压吸附制氧技术的研究开发主要围绕节能降耗和装置进一步大型化两个目标进行的。而医用分子筛制氧设备属于微型和小型设备,主要用于医疗保健、家庭氧疗、室内环境、高原补氧等民用场合,除了满足制氧浓度和流量的基本要求外,对设备的体积、噪音、运行成本和价格等方面均有严格限制,必须研究更先进的技术,使设备更高效、更紧凑。我们在以下几方面对传统的工艺和设备进行了研究改进,取得了明显效果。

2.1 优选工艺流程

变压吸附分为高压吸附常压解吸 (PSA)、常压吸附真空解吸 (PVSA) 和低压吸附真空解吸 (VPSA) 三种方式。三种方式比较而言,真空解吸的效果优于常压解吸的方式,主要是解吸用真空泵的能耗比原料空气压缩所需的能耗小。另外变压吸附制氧装置吸附

塔的数量通常为 3 塔 4 塔,其优点是产氧压力比较连续稳定,氧气的收率也比较高。但其弱点在于配套设备比较多,控制比较复杂,设备生产成本比较高。医用分子筛制氧设备属于小型及微型设备,应优先考虑降低生产成本,减少用户投资。因此采用高压吸附常压解吸和两塔的工艺流程。使得设备控制简化、可靠性提高、操作维修简单、销售价格较低、用户乐于采用。

因此,我们改变传统的四塔或三塔流程而采用两塔流程及加压吸附常压解吸工艺,工艺流程图如图 1 所示。

空气经过压缩机加压并冷干,经高效除油器进一步除油,进入空气缓冲罐稳压,压缩空气进入变压吸附主机,由控制系统按照设定控制程序经吸附塔吸附后产品氧气进入氧气缓冲罐,而经降压解吸出的氮气自动排出室外,进入氧气缓冲罐的氧气根据用户的要求再经氧气增压机进一步增压后进入氧气储罐供用户使用。

2.2 吸附剂的筛选

目前市场销售的变压吸附制氧装置用吸附剂品牌很多,通过调研比较选用美国 UOP 公司生产的氧 5 型分子筛,虽然价格高于其他品牌,但其吸附效率高,吸附速度快,累计使用寿命为 10 万小时以上。这样可以减少吸附剂的用量,减小设备体积和重量,满足设备小型化的要求。

2.3 吸附剂用量的计算及修正

根据选用的美国 UOP 公司生产的氧 5 型分子筛的性能及设备运行工艺条件,在保证氧气流量及纯度

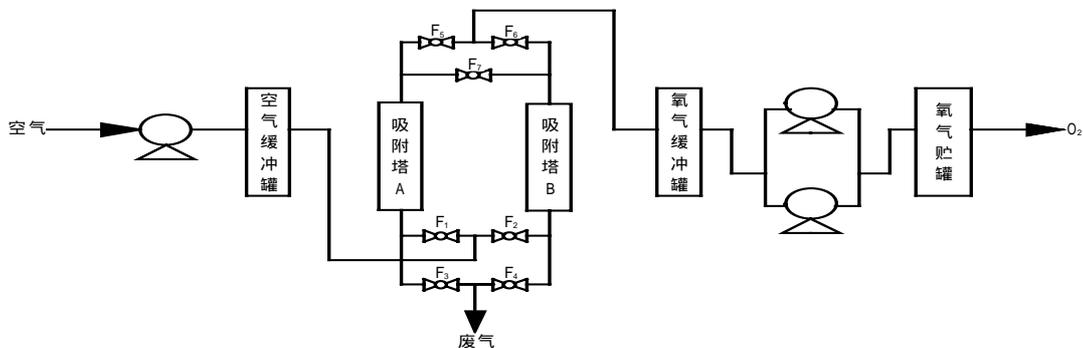


图 1 变压吸附分子筛工艺流程图

的前提下尽量减少吸附剂的装填量。理论最低装填量可以按下列公式(1)计算确定。若吸附压力为 P ，在膨胀到 P' 后进行再生，这样 1m^3 容积吸附剂可去除的氮气体量为 N_A (m^3)。

$$N_A = \frac{(K+1) \varepsilon P' X_A T_0}{P_0 T} - \delta \quad (1)$$

式中： ε 为吸附床的空隙率；

δ 为单位体积床层再生后残留的氮气组分量， m^3 ；

K 为氮气的吸附系数；

X_A 为空气中氮气含量；

P_0 、 T_0 为标准状态下气体的压力和温度，MPa、 $^\circ\text{K}$ ；

T 为吸附床的工作温度， $^\circ\text{K}$ 。

若需要处理的原料空气量为 N_F (m^3)，则需要的床层容积为 V_B (m^3)。

$$V_B = N_F \cdot X_A / N_A \quad (2)$$

吸附剂用量 G_B 可以由床层容积 V_B 乘以床层的密度 ρ_B 求得，即：

$$G_B = V_B \cdot \rho_B \quad (3)$$

以 PY-3 型分子筛制氧设备为例，其原料空气处理量为 $50\text{m}^3/\text{h}$ ，吸附床的最小容积为 32 升，分子筛用量为 22kg，两个吸附塔分子筛的总用量为 44kg。但是通过小型试验装置的试验，吸附剂的理论用量不能满足氧气产量及纯度的要求。另外如按理论用量使得吸附周期太短，加大了程控阀门的开启频率，缩短阀门的生命周期。通过反复试验比较确定吸附床的容积为 44L，两个吸附塔分子筛装填量为 60kg，通过正式样机实际运行试验，此装填量比较恰如其分。

2.4 吸附塔的工艺设计

吸附塔的结构及尺寸是影响变压吸附制氧装置性能的重要因素，其中气流速度及高径比的大小又是确定吸附床尺寸的主要参数。当吸附塔中气流速度低时气体穿过分子筛颗粒之间的空隙流动，当气流速度增大到一定程度时，分子筛颗粒开始呈现流化状态，

分子筛的物理特性决定其流化速度的大小，可通过公式(4)进行计算：

$$\mu_m = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) g}{1650 \mu} \quad (4)$$

式中： d_p 为分子筛颗粒直径，m；

ρ_s 为分子筛颗粒的密度， kg/m^3 ；

ρ 为空气密度， kg/m^3 ；

μ 为空气黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

由于吸附塔中有空气流过时，分子筛是相对静止的，即使气流速度低于分子筛流化速度的极限值，也会使分子筛颗粒产生移动和磨损。因此在吸附塔设计时，气体的空塔流速一般取流化速度极限值的 70% 左右。UOP 氧 5 分子筛的流化速度约为 $0.1\text{m}/\text{s}$ ，则空塔流速应为 $0.07\text{m}/\text{s}$ ，PY-3 型制氧设备的空气处理量为 $50\text{m}^3/\text{h}$ ，压力为 0.5MPa ，通过计算，吸附塔的内径为 0.235m 。为了选用标准钢管加工吸附塔，相近尺寸的标准钢管为 $\phi 245 \times 6.5$ ，其内径为 $\phi 232$ ，基本满足要求。

根据吸附塔直径、分子筛装填量及分子筛堆密度经过计算求出吸附床层的高度为 1.04m ，高径比 $1.04/0.232=4.48$ ，满足常规高径比 3~8 的要求。

2.5 吸附程序及吸附周期的优化试验

吸附程序及吸附周期的优化对整个制氧装置的性能至关重要，根据整个工艺流程及吸附器的尺寸设计几种吸附程序。而吸附周期的长短与吸附床的尺寸以及吸附压力、气体流量、吸附温度等工艺参数相关，在进行相关计算时，工艺参数的选择是理想稳定值，但由于医用分子筛制氧设备是小型设备，吸附周期短，只有几十秒的时间，所以，气体流量、压力及温度是不稳定的，并且波动比较大，所以吸附周期的计算结果是粗略的。因此吸附程序及吸附周期的优化必须通过试验确定，为此设计了三种试验方案，如图 2、图 3 和图 4。

通过对 PY-3、PY-6、PY-9、PY-12 等几种规格的医用分子筛制氧设备的反复试验比较，按照吸附流程

吸附器	A	吸 附					逆 向 降 压	逆 向 升 压	冲 洗	逆 向 升 压	正 向 升 压	
	B	逆 向 降 压	逆 向 升 压	冲 洗	逆 向 升 压	正 向 升 压	吸 附					
时间 (S)		0	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T					
程 控 阀	A	1										
		3										
		5										
	B	2										
		4										
		6										
	7											

图 2 吸附程序及吸附周期试验方案一

吸附器	A	吸 附					逆 向 降 压	冲 洗	逆 向 升 压	正 向 升 压		
	B	逆 向 降 压		冲 洗	逆 向 升 压	正 向 升 压	吸 附					
时间 (S)		0	T ₁	T ₂	T ₃	T						
程 控 阀	A	1										
		3										
		5										
	B	2										
		4										
		6										
	7											

图 3 吸附程序及吸附周期试验方案二

及吸附周期试验方案三效果最好,即在原料压缩空气流量稳定的情况下,产品氧气纯度稳定在 93% 以上,

氧气产量最高。吸附周期为 65s 时比较适宜,但对不同设备略有差异,还须在设备调试时适当调整确定 T

吸附器	A	均压升	正向充压	吸 附		均压降	逆向降压		冲洗		
	B	均压降	逆向降压		冲洗	均压升	正向充压	吸 附			
时间 (S)		0	T ₁	T ₂	T ₃		T ₄	T			
程控阀	A	1	■								
		3						■			
		5		■							
	B	2						■			
		4		■							
		6						■			
	7	■					■			■	

图 4 吸附程序及吸附周期试验方案三

说明：  程控阀开启；  程控阀关闭

及 T₁、T₂、T₃、T₄ 的大小，使设备性能达到最佳状态。

3 结论

通过对医用分子筛制氧设备性能优化设计试验研究，吸附剂选择美国 UOP 公司的氧 5 分子筛，通过计算和试验确定吸附剂的用量和吸附塔的工艺尺寸及其修正值，设计全套设备的工艺流程；反复试验选择了吸附程序及确定吸附周期的调整规律，从而使医用分子筛制氧设备的性能更加优化，大大提高了产品的市场竞争力，为我所的医用分子筛制氧设备尽快形成产业规模打下了良好基础。

作者简介：杜钢（1968~），男，工程师。1992 年毕业于唐山工程技术学院机械制造及加工工艺专业。现从事医用分子筛制氧设备的研究开发以及 180 工厂的生产管理工作。