

文章编号: 1006-2971 (2009) 04-0031-03

无热再生吸干机前加装冷干机的能耗分析

鞠红霞

(普莱克斯(中国)投资有限公司, 上海 200120)

摘 要:通过对冷干机与无热再生吸干机组合系统在吸附过程和解吸过程中的吸附床温度变化分析, 确定该系统与单台无热再生吸干机相比并不具有因为进气水分的减少, 而等比例减小吹扫气量的节能优势。

关键词:无热再生吸干机; 冷干机; 吸附热; 解吸热

中图分类号: TQ051.8 **文献标识码:** A

Energy Cost Analysis of Heatless Dryer and Combination of Heatless Dryer and Refrigeration Dryer

JU Hong-xia

(Praxair (China) Investment Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract With the desiccant bed temperature change in adsorption and desorption processes, a conclusion is given that a combination of heatless dryer and refrigeration dryer has no energy saving advantage with a lower moisture load and a proportionally reduced purge flow, compared with a only heatless dryer

Key words heatless dryer; refrigeration dryer; adsorption heat; desorption heat

1 引言

无热再生吸附式压缩空气干燥机(以下简称无热再生吸干机),是实现压力露点温度 -40°C 以下或更低压力露点温度的有效手段,其结构简单,制造、安装、使用和维护方便,因此广泛应用于各行各业。但是其需要消耗部分产品干空气,用于吸附剂的吹扫再生,能耗较高。因此,无热再生吸干机的节能措施,一直受到广大用户的重视。目前一种流行的观念是,在无热再生吸干机前,加装冷冻式干燥机后,能够起到减少吸干机水分负荷、等比例延长吸干机工作时间,但不增加再生吹扫气量,从而实现节能的目的。本文通过分析计算,指出该观点并不正确。

2 空压机和有热再生吸干机基本参数

以某名牌空压机产品参数为例:水冷无油螺杆空压机,标称排气量 $32.9\text{ Nm}^3/\text{min}$ (标称排气量定

义在 20°C 、1 am、相对湿度0%),排气压力7 Bar,其电机功率是223.7 kW。该种空压机,如果每年满负荷运行8000 h,按平均电价0.6元/kWh计算,年消耗电费高达107万元。

如果用户生产工艺过程需要 -40°C 压力露点温度的压缩空气,假设采用某国际名牌的无热再生吸干机,工作压力7 Bar,进气温度 38°C 、进气相对湿度100%、吸干机循环时间6 min。根据制造商的样本资料,吸干机需要14.4%的压缩空气用于吹扫再生,此外每次减压放气还会浪费大约2%的压缩空气,因此总的耗气量是16.4%,这相当于每年浪费电费 $107 \times 16.4\% = 17.5$ 万元。因此节约无热再生吸干机的能耗,意义重大。

上述无热再生吸干机的主要技术参数如下(根据制造商的数据):

额定进气温度:	38°C
额定进气相对湿度:	100%
额定进气压力:	7 Bar
额定进气流量:	$32.9\text{ Nm}^3/\text{min}$

收稿日期: 2009-07-05

额定出气压力露点温度: -40°C
 吸附剂填充容积: 0.322 m^3
 吸附剂类型: 活性氧化铝
 吸附剂填充量: 245 kg
 吸附剂定压比热: $0.92\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
 吸附剂吸附热: 2930 kJ/kg
 吸附塔重量: 约 150 kg
 碳钢金属比热: $0.48\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$

3 无热再生吸干机的耗气量

无热再生吸干机的耗气量由吹扫耗气量和减压排气耗气量组成。

业界广泛采用的计算吹扫耗气量的方法是

$$Q_p/Q_{in} = 1/P_r \times 1.15^{[2]} \quad (1)$$

式中 Q_p ——吹扫耗气量, Nm^3/min

Q_{in} ——进气量, Nm^3/min

P_r ——压缩比

式(1)的含义是:无热再生吸附干燥机采用的是变压吸附原理,也就是等温吸附过程。一般认为吹扫排气温度近似等于进气温度。由于水蒸气的饱和分压力只是温度的函数,因此,相同温度的空气,其单位体积饱和含水量相同。这样,一定进气体积流量所带给吸附剂的水分负荷,需要相同温度、相同体积的吹扫气来带走。考虑到水分解吸的效率,实际耗气量比计算值增加约 15%。

以上述干燥机为例,压缩比 = 8,因此

$$Q_p/Q_{in} = 1/8 \times 1.15 = 14.4\%$$

减压排气耗气量的计算方法(按某国际名牌的无热再生吸干机的技术资料)是

$$D = V_f \times P_r / CT \quad (2)$$

式中 D ——每次减压排气的耗气量, Nm^3/min

V_f ——是吸附塔的自由容积 m^3 ,是指吸附塔内未被吸附剂占据的体积,包括吸附塔内填充吸附剂后剩余的容积,以及吸附剂颗粒之间的空隙和吸附剂颗粒小球内部的孔隙容积。根据经验,对于直径 3~5 mm 的活性氧化铝,吸附塔自由容积一般是吸附剂填充体积的 75%左右。上述干燥机中,吸附剂的填充容积 0.322 m^3 ,自由容积 = $0.322 \times 75\% = 0.24\text{ m}^3$

P_r ——压缩比,本例中压缩比等于 8

CT ——排气间隔时间 = 干燥周期时间, min,

本例为 3 min

将上述数据代入式(2)算出减压排气量是 $0.64\text{ Nm}^3/\text{min}$,是进气流量的约 2%。

上述计算中,隐含的前提是:无热再生吸附和解吸过程是等温过程。实际上,无热再生吸附式干燥机在吸附和解吸的过程中,温度是变化的,不是严格的等温过程。

4 无热再生吸干机吸附床的温度变化

仍以上述空压机、干燥机系统为例。当进气温度为 38°C 、进气相对湿度为 100%、进气压力为 7 Bar,进气流量为 $32.9\text{ Nm}^3/\text{min}$ 时,根据理想气体方程

$$p_1 \times V_1 / T_1 = p_2 \times V_2 / T_2^{[1]} \quad (3)$$

式中 p_1 ——标称压力, 1 Bar

V_1 ——标称流量, $32.9\text{ Nm}^3/\text{min}$

T_1 ——标称温度, $(20 + 273)\text{ K}$

p_2 ——实际进气压力, $(7 + 1)\text{ Bar}$

T_2 ——实际进气温度, $(38 + 273)\text{ K}$

因此,干燥机实际体积流量 V_2 可算出为 $4.365\text{ m}^3/\text{min}$ 。

在 $CT_1 = 3\text{ min}$ 干燥周期内,干燥机内压缩空气的流过质量为

$$M_i = V_1 CT_1 \rho_1 \quad (4)$$

式中 当 $i = 1$ 时

M_1 ——干燥机内压缩空气的流过质量, kg

ρ_1 ——标称条件下的空气密度, $1.2\text{ kg/Nm}^3^{[1]}$

根据式(4),计算出 M_1 为 118.4 kg 。

38°C 时,单位体积的饱和水蒸气含量是 $q_1 = 0.046\text{ kg/m}^3^{[4]}$,在一个 $CT_1 = 3\text{ min}$ 的干燥周期内,吸附剂吸附的水量 W_1 是

$$W_i = V_2 CT_i q_i \quad (5)$$

算出当 $i = 1$ 时, $W_1 = 0.6\text{ kg}$

水蒸气在活性氧化铝上的吸附热 $h_1 = 2930\text{ kJ/kg}$ (厂家数据),因此,干燥过程产生的吸附热 H_1 是

$$H_i = W_i \times h_i \quad (6)$$

算出当 $i = 1$ 时, $H_1 = 1758\text{ kJ}$

这些吸附热,将使得吸附剂(245 kg,比热 $0.92\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)和流过的压缩空气(118.4 kg ,比热 $1.006\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}^{[1]}$),以及吸附塔(碳钢重量 150 kg ,碳钢金属比热 $0.48\text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)产生温升。计算可得温升是 4.2°C 。这个温升数据,与实际工作中的经验相符。

无热再生吸干机的吹扫气,一般来自产品干空

气,通过节流孔板进行节流后,提供给再生塔。由于干燥压缩空气的性质相当接近理想气体,而根据工程热力学知识,理想气体绝热节流前后温度不变^[1],因此,吹扫气的温度等于产品干空气的出气温度,是 $38 + 4.2 = 42.2^{\circ}\text{C}$ 。

要达到良好的再生效果,吹扫气必须将前一个周期吸附的水分完全解吸、排出吸附塔。按前述,吹扫气的流量 Q_p 是进气流量 Q_{in} 的 14.4%,即

$$Q_p = V_1 \times \rho_1 \times 14.4\% \quad (7)$$

计算可得 $Q_p = 5.68 \text{ kg/min}$ 。吹扫气工作时间是 2.5 min (干燥机需要大约 30 s 完成减压排气、升压、切换等动作),因此吹扫气的流过质量 $M_p = 14.2 \text{ kg}$ 。

吹扫气进入再生塔前,大气露点温度大约 -57°C (压力露点温度 -40°C @ 7 Bar),含水量相当低,视为干空气。利用前一个周期储存的吸附热以及吹扫气体带入的热量,带走前一个周期吸附的 0.6 kg 水分后,吹扫排气中的含水量是

$$Q_i = W_i / M_p \quad (8)$$

计算可得,当 $i = 1$ 时, $Q_1 = 0.042 \text{ kg/kgDA}$ (DA, Dried Air, 干空气)。

为了解吸这些水分,需要的解吸热也是 1758 kJ。这部分热量将来自于吸附剂、吹扫气以及吸附塔的降温。计算得到降温幅度是 5.6°C 。这样,吹扫气的排气温度将降低到: $42.2 - 5.6 = 36.6^{\circ}\text{C}$ 。

在 36.6°C 条件下,干空气的密度 ρ_{21} 是 $1.14 \text{ kg-DA/m}^{3[3]}$,因此吹扫气的湿度 Φ_1

$$\Phi_1 = Q_1 \times \rho_{21} \quad (9)$$

计算可得 $\Phi_1 = 0.048 \text{ kg/m}^3$,其对应的露点温度是 34.9°C 。

吹扫气的排气温度高于其露点温度,可以保证吸附剂的再生效果,同时也与实际情况相符合。

5 冷干机后的无热再生吸干机吸附床的温度变化

如果在无热再生吸干机前加装了冷干机,假设进气温度降低到 30°C 、进气露点温度下降到 10°C (单位体积的饱和水蒸气含量是 $q_s = 0.0086 \text{ g/m}^{3[4]}$),空气的流量不变。则进气含水量降低到原来的 $0.0086 / 0.046 = 19\%$,因此处于节能考虑,干燥机的干燥周期可以延长到原先的 5 倍,即 $CT_2 = 15 \text{ min}$ 。15 min 干燥工作时间内吸附的水量 W_2 同样根据式 (5),当 $i = 2$ 时,计算得到 $W_2 = 0.55 \text{ kg}$ 。

干燥过程产生的吸附热 H_2 根据式 (6),得到 H_2

$= 1612 \text{ kJ}$ 。

15 min 内流过干燥机的空气质量根据式 (4),当 $i = 2$ 时, $M_2 = 592.2 \text{ kg}$ 。

这些吸附热,将使得吸附剂和流过的压缩空气以及吸附塔产生温升,计算可得温升是 1.8°C 。因此,加装冷干机后,吸附过程产生的温升很小,吸附热主要随着压缩空气而流出了系统。干空气的出口温度是: $30^{\circ}\text{C} + 1.8^{\circ}\text{C} = 31.8^{\circ}\text{C}$ 。

为了实现节能,希望采用同样流量 ($Q_p = 5.68 \text{ kg/min}$) 的吹扫气,仍然吹扫 2.5 min,吹扫气的质量还是 14.2 kg,吹扫气的入口温度仍按与干空气温度相同计算即 31.8°C 。如果将前一周 15 min 内吸附的 0.55 kg 水分带走,则吹扫排气中的含水量 Q_2 根据式 (8) 计算得到, $Q_2 = 0.039 \text{ kg/kgDA}$ 。

为了解吸这些水分,需要的解吸热也是 1612 kJ。这部分热量将来自于吸附剂、吹扫气以及吸附塔的降温,计算得到降温幅度 5.2°C ,则吹扫气的温度将降低到: $31.8 - 5.2 = 26.6^{\circ}\text{C}$ 。

在 26.6°C 条件下,干空气的密度 ρ_{22} 是 $1.177 \text{ kg-DA/m}^{3[3]}$ 。因此吹扫排气的湿度根据式 (9),当 $i = 2$ 时, $\Phi_2 = 0.046 \text{ kg/m}^3$,对应的露点温度是 34.3°C 。

可见,吹扫气的温度远远低于其排气的露点温度,这显然是不可能的。因为当吹扫气的温度降低到其出气露点温度时,其所含水分就会凝结出来,留在吸附床中;吸附床就会由于再生不良导致残余水分含量增大,出气露点温度恶化。因此,如果在无热再生吸干机前加装了冷干机,为了达到相同的出气露点温度要求,就必须增加吸干机的吹扫气量,提供吸附剂足够的解吸热量。

6 结论

在无热再生吸干机前加装冷干机,为了满足吸附剂解吸时需要的热量要求,就必须增加吹扫气量,从而增大了吸干机的能耗。所以,在无热再生吸干机前加装冷干机后能等反比例延长吸干机吸附时间,但不增加再生吹扫气量,从而达到节能目的的想法是不正确的。但是,上述分析不适用于冷干机与有热再生吸干机的组合。

参考文献:

- [1] 沈维道,童钧耕. 工程热力学 [M]. 高等教育出版社, 2007.
- [2] 李申. 压缩空气净化原理及设备 [M]. 浙江大学出版社, 2005.
- [3] 尉迟斌,等. 实用制冷与空调工程手册 [M]. 机械工业出版社, 2002.