

## 巧用 Excel 进行冷冻干燥机热力计算

冷冻干燥机设计者在热力计算时可以使用成熟的专业计算软件，这是国外财大气粗的大公司的通常做法，但我们发现，利用 excel 软件的强大功能，常常也足以胜任。其实工程技术人员通常使用的 excel 功能，也仅仅是其丰富功能的冰山一角而已。这里我们发现 excel 中一个非常好用的迭代功能，可以自动计算得到某些中间参数，避免多次计算人为选择数值的繁琐，实现自动数据获取。



### 冷冻干燥机热力计算过程介绍

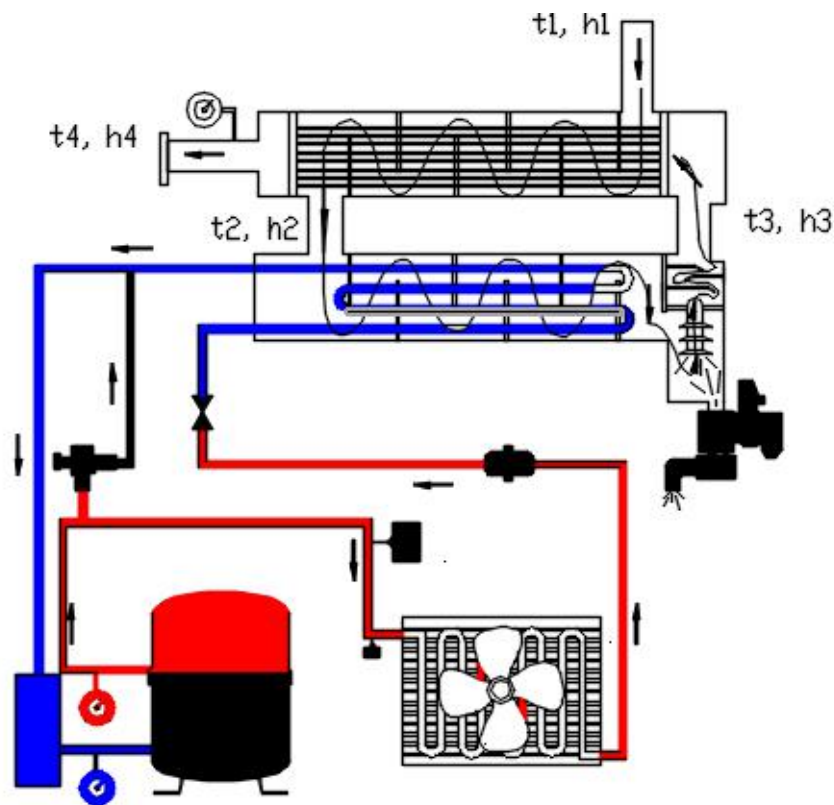
#### 一、输入条件

确定冷干机的输入性能参数时，可以参照国家标准 JB/T 10526-2017 一般用冷冻式压缩空气干燥器 表 1 规定工况 A2 满负荷。

进气温度： 38℃	进气压力： 0.7MPaG	进气相对湿度： 100%	冷却空气进气温度： 38℃
冷却水进水温度： 29℃	环境空气温度： 38℃	干燥机进口流量占额定流量的比例： 100%	

## 二、常规的冷干机流程图

下面是一个典型的风冷冷干机流程图：



## 三、Excel 计算

干燥机性能参数计算时涉及到的公式和物性参数可以参考很多文献，这里我们推荐黄虎主编的《压缩空气干燥与净化设备》、郁永章主编的《容积式压缩机技术手册》。

开始一款冷干机的性能设计，通常都是从需求入手，逐步推导确定压缩空气系统和制冷压缩系统的换热和功率性能参数。这里，我们只是涉及冷干机关于预

## 冷器和蒸发器的性能参数和数据的计算。

表 1 用来计算预冷器和蒸发器的性能数据，其中有 2 个重要数值来源于我司内控标准：压缩空气进排口温差 12℃和压力露点 3℃。表格中的中间公式在参考文献中都有详细的叙述，这里就不再长篇累牍的重复。但是在计算时遇到一个难点，如何确定预冷器后排气温度呢，这个数值没有可用的公式，不能直接计算出来，通常我们使用表 2 的方法求解。

表 1：整机热力性能计算表（以 1.5m<sup>3</sup>/min 流量为例）

项目	符号	单位	数值
大气压力	$P_0$	Pa	101340
压缩空气流量		m <sup>3</sup> /min @1atm 38℃	1.5
压缩空气质量流量		kg/min	1.808
干燥机压缩空气进气压力	$P$	BarG	7
干燥机进气温度	$t_1$	℃	38
干燥机进气湿度	$\phi_0$	%	100
干燥机进排气温差	$t_1-t_4$	℃	12
干燥机排气温度	$t_4$	℃	26
出口压力露点	$t_p$	℃	3
压力露点	$t_3$	℃	3
干燥机进气温度时的饱和蒸汽压力	$p_1$	mbar	66.3147182
压力露点温度的饱和蒸汽压力	$p_3$	mbar	7.580311526
干燥机出气温度时的饱和蒸汽压力	$p_4$	mbar	33.63132103
干燥机进气温度时压缩空气的含湿量	$d_1$	kg/kg	0.005199066
压力露点温度时压缩空气的含湿量	$d_3$	kg/kg	0.000589928
干燥机出气温度时压缩空气的含湿量	$d_4$	kg/kg	0.000589928
析水=预冷+蒸发器排冷凝水	$d_1-d_4$	kg/kg	0.004609138
干燥机进气温度时的焓	$h_1$	kJ/kg	51.52213691
预冷器回气进口-压力露点温度时的焓	$h_3$	kJ/kg	4.49070046
干燥机出气温度时的焓	$h_4$	kJ/kg	27.60792402
预冷器热交换量 $h_4-h_3$	$\Delta h_{4-3}$	kJ/kg	23.11722356
热侧预冷器后的焓 $h_2=h_1-\Delta h_{4-3}$	$h_2$	kJ/kg	28.40491335
蒸发器热交换量 $h_2-h_3$	$\Delta h_{2-3}$	kJ/kg	23.91421289
预冷器后温度	$t_2$	℃	参照表 2 填写为 22.8

预冷器换热量-最优分配时需求值		kw	0.70
蒸发器换热量		kw	0.72
预冷器换热量/蒸发器换热量比值			96.7%

参照表 2, h2 焓值为 28.40491335kJ/kg, 根据经验数据或者粗略查表, 对应的温度大约在 22-23℃ 附近, 从数值 22℃ 开始按照 0.1℃ 递增直到 22.9℃, 每个温度求出对应焓值, 最后发现 22.8℃ 的焓值 28.400994 kJ/kg 最接近, 最后在表 1 中人工填写 t2 为 22.8℃。

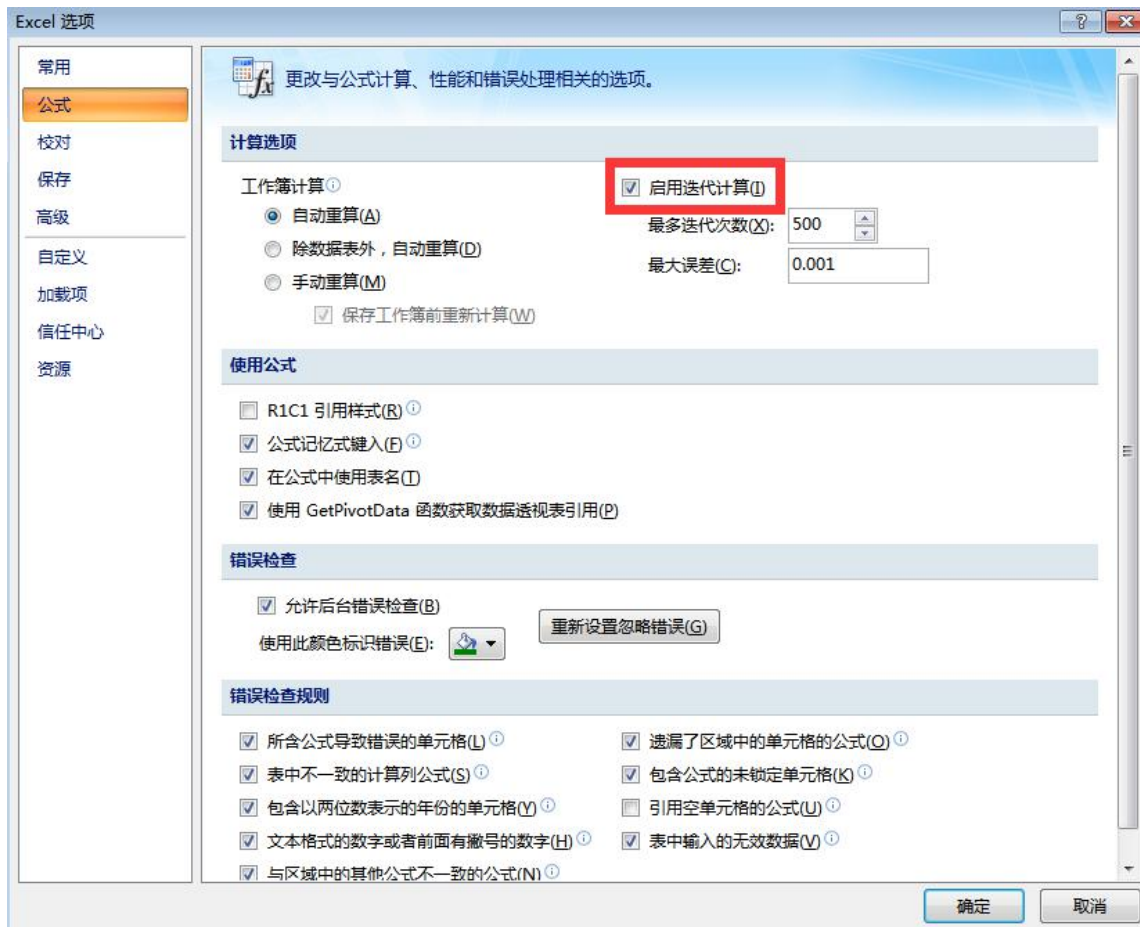
表 2 : 性能参数表

预冷器后温度	t <sub>2</sub>	℃	22	22.1	22.2	22.3	22.4
预冷器后温度时压缩空气的含湿量	d <sub>2</sub>	kg/kg	0.0020631	0.0020757	0.0020885	0.0021013	0.0021141
预冷器后温度时的饱和蒸汽压力	p <sub>2</sub>	mbar	26.447529	26.609283	26.771900	26.93538	27.099743
热侧预冷器后的焓 - 检验用	h <sub>2</sub>	kJ/kg	27.332230	27.465197	27.598341	27.73166	27.865168
预冷器后温度	t <sub>2</sub>	℃	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9
预冷器后温度时压缩空气的含湿量	d <sub>2</sub>	kg/kg	0.0021271	0.0021401	0.0021532	0.0021663	0.0021795
预冷器后温度时的饱和蒸汽压力	p <sub>2</sub>	mbar	27.264977	27.431090	27.598086	27.765970	27.934746
热侧预冷器后的焓 - 检验用	h <sub>2</sub>	kJ/kg	27.998852	28.132717	28.266764	28.400994	28.535408

#### 四：迭代功能的引用

t2 人工计算后手动填写, 在非标产品的性能计算时容易疏忽忘记更新。不能自动计算时 excel 不能自动浮动赋值, 那有没有一个 excel 功能实现自动计算? 经过学习发现 excel 有一个很好的迭代功能可以有效实现循环引用, 实现自动计算, 控制计算误差在可接收的范围。

首先启用 excel 中的中的迭代计算功能, 如下面的图片所示。



其次按照需求输入下面的 IF 函数：

$$D28=IF(ABS(D25-D31)<0.1, D28, IF(D25<D31, D28-0.1, D28+0.1))$$

单元格说明：D25 为目标数值 28.40491335kJ/kg，D31 为当前单元格 D28 计算数值，即温度计算对应的焓值。

计算过程说明：当 D25 和 D31 差值的绝对值小于 0.1 时迭代结束即焓值相差小于 0.1kJ/kg，固定 D28 数值为最终计算结果。在差值比较大，迭代没有完成之前，每次在原来的 D28 数值上减少或增加 0.1℃，如果需求数值小于计算数值，则递减，相反则递增。这样迭代才有收敛性，计算才能有效终结。

计算结果：表格 D28 计算数值为 22.8，D31 数值为 28.40099373，焓值相差 0.004。

下面图片显示结果：

25	热侧预冷器后的焓 $h_2=h_1-\Delta h_{4-3}$	$h_2$	kJ/kg	28.40491335
26	蒸发器热交换量 $h_2-h_3$	$\Delta h_{2-3}$	kJ/kg	23.91421289
27				
28	预冷器后温度	$t_2$	℃	22.8
29	预冷器后温度时压缩空气的含湿量	$d_2$	kg/kg	0.002166323
30	预冷器后温度时的饱和蒸汽压力	$p_2$	mbar	27.7659703
31	热侧预冷器后的焓 -检验用	$h_2$	kJ/kg	28.40099373

工程技术人员如果能有效利用 excel 的迭代等其他强大的功能，将有效提高工作效率及设计输出的正确性。以此心得体会与广大技术同仁共勉。