

节能型家用真空干衣机设计说明书

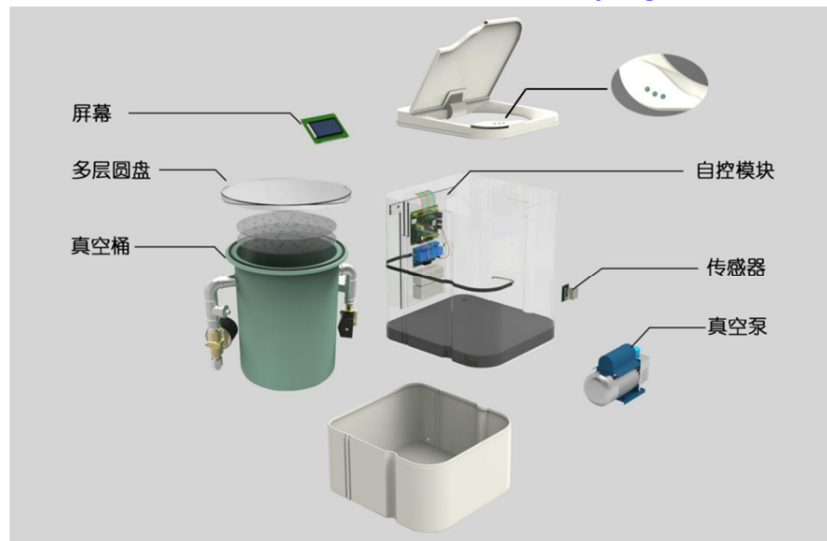
设计者：蒋滨繁

（北京科技大学机械工程学院热科学与能源工程系北京 100083）

作品内容简介

针对衣物洗护后不易晾干等现象，本项目利用真空加速水分蒸发的原理，结合单片机自动控制模块，设计了节能型家用真空干衣机。通过使用真空泵降低了样品所处的装置内的绝对压力，利用真空干燥代替热电干燥，装置开口处采用 O 型橡胶配合高强度的有机玻璃构成压紧式结构保证密封性，而装置内部为多层圆盘，与普通干衣装置相比提升了干燥质量。同时用自控模块代替常规干衣机的定时装置，自动控制的间断式干燥减少了定时装置持续干燥带来的能量消耗。此装置解决了自然干燥耗时长及易受环境污染、热电干衣能耗大的问题，若使用此真空干衣机代替热电干衣机，一次干衣可节能 60%，按一周使用三次，一次使用 1.5h，则一年可节电 11.4 亿度，折合标煤 37.9 万吨，减少了二氧化碳排放量 9.4 亿公斤，二氧化硫排放量 322.15 万公斤，氮氧化物排放量 280.46 万公斤。

联系人：蒋滨繁 联系电话：18810630487 email: jiangbinfan@163.com



1 研制背景及意义

1.1 我国干燥箱发展现状

近年来，随着人民生活水平的提高，以干衣机为代表的干燥机越来越多的走进我国人民的生活，而现有的干衣机按照烘干所使用的能源可以分为燃气式、电热丝加热式、PTC 自限温元件加热式，即所用原理均为电热烘干，此种烘干方式相比自然晾干在一定程度上提高了干衣效率，但同时热电干衣过程中温度较高，一般在 60°C 以上，易对衣物造成损伤，此外热电干衣机消耗大量电能，资料显示，目前的家用干衣机功率普遍为 1000w-2000w，干衣时间在 30min（单薄衬衫）以上，造成很大能量消耗，而在其发展方向上仍是对电热装置的改进较多，新原理的干燥机研究较少。另外现有日常干燥机仅有干燥衣物一项功能，形式较单一。

1.2 真空干燥的可行性分析

真空干燥是利用将试样的环境压力降到该温度下水蒸气分压以下而使水发生沸腾现象从而快速蒸发达到干燥的目的，此项技术现多试用于药品浓缩、木料干燥等工业生产，并比传统烘干方法有更高的效率，同时相比于热电烘干上千瓦的功率，本装置的功率仅为百余瓦。而本装置利用此项技术，并将其小型化、个人化，同时设计自控模块间断式抽气减少能耗。此装置用于衣物干燥，不仅提高干燥效率也提升干燥质量。

2 设计方案

2.1 基础原理

真空干燥的理论基础可以由克拉珀珑---克劳修斯公式说明：

$$P_s = 4.1868 \frac{L}{V'' - V'} \ln T + C$$

V'' ， V' ——分别是气体和液体水的
的比容， m^3/kg

L ——汽化潜热， kJ/kg

P_s ——在温度 T 时的饱和蒸汽压，
Mpa

T ——绝对温度，K

由该公式可发现：水的汽化温度随着压力的降低而降低，在真空条件下容易实现低温汽化，这是真空干燥的理论基础；即当压力 P_s 不变时，对系统加热，则有更多的液体汽化；当 T 不变时，降低 P_s ，同样会有更多的液体汽化，均可起到加快干燥的速度的作用。

由图 2,1 可看出，水在真空条件下更易实现低温汽化。因此，降低压强可增强液体汽化，利用此项原理，结合自动控制模块设计了真空干衣装置。

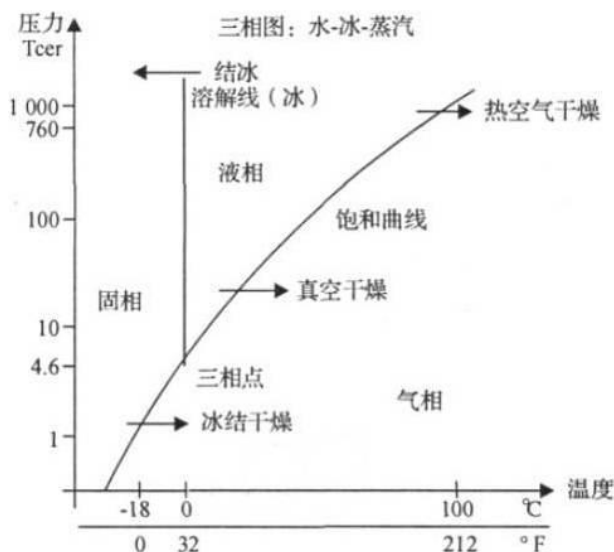


图 2.1 真空干燥原理图

2.2 结构部分

2.2.1 真空筒开口设计

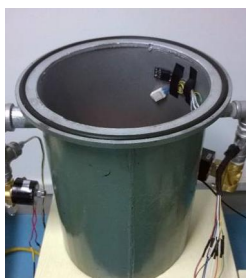


图 2.2.1 真空桶实物图



2.2.2 桶口 O 型橡胶图

考虑到该真空装置开口的特殊性，为使桶盖易开易合同时保证其工作时的密封性，采用 O 形橡胶真空密封，橡胶材料为透气性小，常用于气密性密封的丁基橡胶，如图 2.2.1 及 2.2.2 所示。O 形圈装入密封槽后，其截面承受接触压缩应力而产生弹性变形。不承载时，因其自身具有的弹性力作用而对接触面产生一个预接触应力；承载时随着压差逐渐增大 O 形圈发生位移，移向低压侧，并进一步加大弹性变形，紧逼和封闭了密封间隙，卸载后也由于预接触

应力的存在仍能保证密封效果。

2.2.2 真空桶内部结构设计



图 2.2.3 桶内部结构图

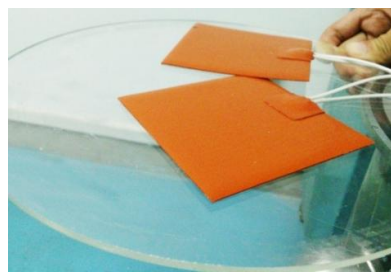


图 2.2.4 圆盘实物图

为了增大桶内的空间利用率，提升干燥效率，同时考虑到桶的内部空间有限，因此其内在结构采用分层式设计，可用于同时干燥多件不同物品。隔板为导热系数较高的铝质材料，每层均铺有小功率（8w）的电热片，以防止在真空状态下隔板上的毛巾结霜，保证了干燥质量。

2.3 自控部分

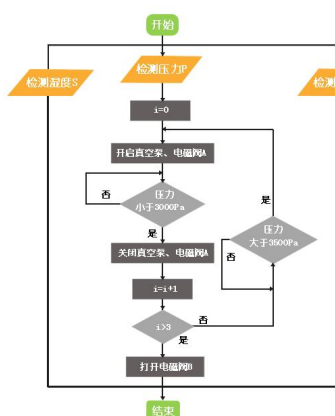


图 2.3.1 自控模块流程图



图 2.3.2 自控模块实物图

由于装置采用真空干燥，试样处于完全密封空间内难以掌握其干燥情况，同时由于系统内外压差的存在不易开盖，因而为使干燥装置更方便智能，采用自控装置代替定时装置，采用压力检测控制的方式，使装置在 3000-3500pa 之间反复抽气与暂停三次后，使装置进气电磁阀开启，使桶内恢复常压。本装置的自控装置由单片机控制，通过传感器采集信号并反馈给单片机进行间断式抽气控制，在达到相应真空度的情况下给水分足够的时间汽化，同时显示器和单片机连接，并实时显示此时压力、温度、湿度的数值，给人以直观的体验。

3 理论设计计算

3.1 干燥装置中桶内壁的强度计算

$$\text{圆桶计算壁厚 } S_0 = 1.25 D_B \left(\frac{P}{E_t} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0.4} = 1.25 \times 300 \times \left(\frac{0.1}{1.95 \times 10^5} \cdot \frac{30}{30} \right)^{0.4} = 1.40 \text{mm}.$$

$$\text{壁厚附加量 } C = C_1 + C_2 + C_3$$

C_1 : 钢板的最大负公差附加量，一般情况下均取 0.5mm;

C_2 : 腐蚀速度(单面腐蚀取 $C_2=1\text{mm}$, 双面腐蚀取 $C_2=2\text{mm}$;

C_3 : 封头冲压时的拉伸减薄量, 取 $C_3=0$ 。

壁厚附加量 C 为: $C=C_1+C_2+C_3=0.5+1+0=1.5\text{mm}$

根据实验要求, 我们选取圆筒内径 $D_B=30\text{mm}$;

选取材料温度为 25°C 时的弹性模量 $E_t=1.95 \times 10^5\text{Mpa}$, $L=300\text{mm}$ 。

则圆桶的实际壁厚应该为: $S=S_0+C=1.40+1.5=2.9\text{mm}$

对实际的壁厚进行强度校核:

为了确定真空室的壁厚, 应按薄壳理论对真空室进行强度计算。所谓薄壳, 就是其厚度大大小于它的曲率半径。实际上薄壳应具备这样的条件: $\frac{S}{D_B} \leq 0.04$ 。

经计算: $\frac{S}{D_B} = \frac{2.9}{300} = 0.010 < 0.04$, 因此壁厚符合要求。

水压试验进行校核:

容器进行外压水压实验时应满足 $|\sigma| \leq 0.9\sigma_s$, $|\sigma| \leq 0.06E(\frac{S}{R_B})$

σ_s : 材料在 20°C 时的屈服极限

E : 材料的弹性模量

S : 圆桶的壁厚 (包括壁厚附加量)

R^b : 圆桶内半径

$|\sigma|$: 外压水压测试时产生应力的绝对值

外压水压试验压力为 0.196Mpa 。

选用灰铸铁, 则抗压强度极限 $\sigma_b > 250\text{Mpa}$; 弹性模量 $118\text{-}126\text{Gpa}$ 。

由于铸铁是脆性材料, 发生形变较小, 破坏形式为直接断裂, 因此可以近似用强度极限代替屈服极限。

代入数值: $0.9\sigma_s = 0.9 \times 200 = 180\text{Mpa} > 21\text{Mpa}$,

$0.06E(\frac{S}{R_B}) = 0.06 \times 118 \times 10^3 (\frac{2.9}{147.1}) = 139.58\text{Mpa} > 21\text{Mpa}$ 。

综上: 厚度符合要求。

因此我们的实验用桶壁厚为 5mm 。

3.2 装置内到达真空的理论时间计算

当室温为 25°C , 查的水的饱和蒸汽压为 3169pa 。真空泵选取旋片式真空泵, 其型号为 VP-2, 抽气速率为 $3.6\text{m}^3/\text{h}$, 极限真空为 5pa , 电源 $220\text{V} \sim / \text{Hz}$, 电机功率为 150w 。查真空设计手册, 此泵抽到 3169pa 需要时间大约 $t_1 = 6\text{min}$ 。

由于真空泵在将真空容器抽到 6min 之前, 压力还未达到 3169pa , 相对于饱和蒸汽压下的水分汽化速度慢得多, 忽略不计, 即只假设水在真空容器中只有达到饱和蒸汽压后才蒸发。在室温 25°C , 饱和蒸汽压 3169pa 下, 设 u 为液体的蒸发速率 (单位时间内从单位液体表面蒸发出去的液体的体积)。

假定所有蒸汽分子只要碰到液体表面时就会凝结, 并且一切从液体表面蒸发出去的分子都立即被抽走。设饱和蒸汽可以视为理想气体, 饱和蒸汽的压强为 p 、热力学温度为 T 、分子的平均速率为 v 、分子数密度为 n_g 、密度为 r_g , 分子的质量为 m , 摩尔质量为 M , 液体的分

子数密度为 n_1 、密度为 r_1 ，普适气体常量为 R ，圆周率为 π ，则有 $u=J/n_1=n_g v/(4n_1)=(p/r_1) \cdot [M/(2\pi RT)]^{1/2}$ 。

对于 25°C 的水，已知 $T=298\text{ K}$ ， $p=3169\text{ Pa}$ ， $r_1=1.00 \times 10^3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $M=18.0 \times 10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， $R=8.31\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

代入上式得 $u=(p/r_1) \cdot [M/(2\pi RT)]^{1/2}=1.0732 \times 10^{-2}\text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

毛巾单侧面积为 $27.3 \times 27.3\text{ cm}^2$ (毛巾对折干燥，只考虑单侧面积)，则 $U=u \times 27.3 \times 27.3=7.998\text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}=7.998\text{ g/s}$ ，实验所用毛巾吸水 30 g ，则在恒温为 25°C ，恒压为 3169 pa 下完全干燥需要时间为 $t_2=30/7.998=3.75\text{ s}$ 。

那么真空泵将此毛巾“抽干”需要的理论时间 $t=t_1+t_2=363.75\text{ s}=6.06\text{ min}$ 。

4 工作原理及性能分析

4.1 工作原理

利用真空干燥原理，采用真空泵使桶内达到真空环境加速衣物水分汽化，自控模块实时检测桶内压力及温湿度的变化，当压力达到设定条件时，单片机控制相应的继电器管脚实现真空泵断电停止工作及大小电磁阀的开合，完成干燥。

如图 4.1 所示，A、B 为电磁阀，真空桶向单片机输出压力、温度、湿度信号，由单片机输出显示在显示屏上，同时监测压力信号，达到设定值后向继电器输出控制信号。继电器控制泵及电磁阀开关，抽气时真空泵及电磁阀 A 打开、电磁阀 B 关闭，达到设定的压力值后泵及电磁阀 A 关闭，桶内保持低压一段时间后，再次开启真空泵及电磁阀 A，使压力再次下降后保持低压，反复三次后电磁阀 B 打开与大气连通，桶内压力恢复为常压。

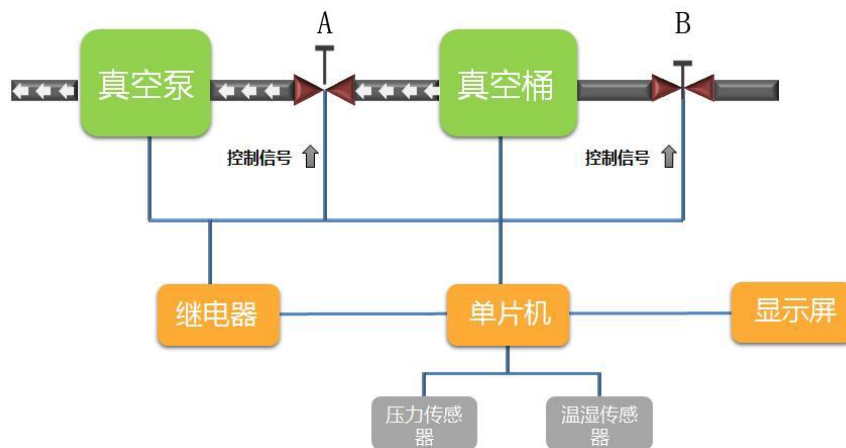


图 4.1 设备工作图

4.2 实做模型的干燥效果分析

4.2.1 实做模型实验数据分析

为检测节能型家用干衣机的干衣效果，以毛巾为例进行了干燥实验。抽气开始时，观察

到桶内压力、温度在真空泵的作用下均显著下降，一定时间后压强下降变化趋于缓慢，是因为随着压强的下降，越来越多的液体水汽化，同时由于漏气等原因影响使压强保持不变，随即关闭真空泵及抽气阀门，保持低压，桶盖上开始出现水雾，由于水分在低压下继续蒸发可进一步观察到桶盖上水珠增多，但随着桶内水蒸汽含量的增加，水分蒸发速率减小，因此再次抽气降低压强和桶内水蒸汽含量，使更多的液体汽化，此时可观察到桶盖上水珠减少，按如此工作模式，抽气-暂停三次后干燥结束。

约 15min 后干燥结束，电能表测得耗电为 0.026kw.h，毛巾质量减少量约为 28g，干燥过程中毛巾的质量、压强、水分蒸发速率随时间的变化曲线如表 4.2.1.1 所示，绘制曲线如图 4.2.1.1 和图 4.2.1.2 所示：

表 4.2.1.1 毛巾的质量、压强、水分蒸发速率随时间的变化数值记录表

时间/min	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
毛巾质量/g	70	69.3	68	66.3	64.8	63.3	61.4	59.9	58.3
压力/pa	100569	40278	19059	11668	8733	6970	6058	5553	5807
蒸发量 g/min	0	1.6	3.2	3.2	3.6	3.2	3.2	3.6	2.4
时间/min	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
毛巾质量/g	57.1	56.1	55.4	54.9	54.8	53.7	52.3	51	50.1
压力/pa	6054	6302	6550	6798	7044	6087	5549	5800	6048
蒸发量 g/min	2.4	2	1.2	0.8	0.4	2	3.2	2.4	1.6
时间/min	9	9.5	10	10.5	11	12	13	14	15
毛巾质量/g	49.3	48.8	48.5	48.4	47.2	44.5	43	42.3	42.2
压力/pa	6300	6547	6799	7044	6073	5804	6304	6807	7304
蒸发量 g/min	1.6	0.8	0.4	0.4	2.4	2	1.2	0.4	0

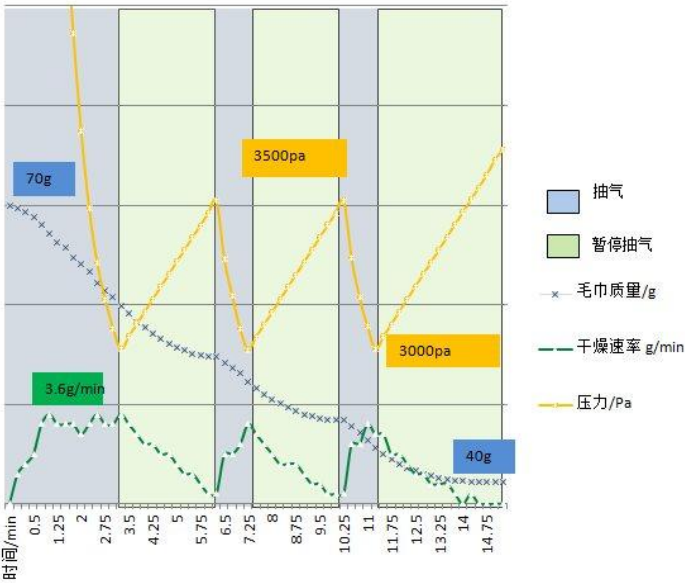


图 4.2.1.2 毛巾质量、压强、水分蒸发速率随时间的变化曲线

从图上可以看出，在抽气过程中，随着压强的下降，水分的汽化速率随之增大，毛巾的

质量也显著减小；而在第一次暂停抽气和关闭抽气阀门后，桶内压强受毛巾内水分汽化和漏气等因素的影响缓慢回升，而水分的汽化速率随压强的上升而减小，毛巾质量的减小量也随之变缓；再次抽气时，桶内压强下降，水蒸气含量下降，毛巾内水分的蒸发速率上升，毛巾的质量再次显著减小，如此间断式抽气三次后便可在低能耗的情况下达到良好干燥效果。

待干毛巾原重为 70g，干毛巾重约 30g，定义干燥指数 $\alpha = \Delta m / m_0$ ， Δm 为干燥前后试样质量的变化， m_0 为干湿试样的质量差，即毛巾吸水量，则算的真空干衣机的干衣指数约为 0.69。

本装置在进行实验过程中，真空度和干燥效果均未达到预期要求，主要原因是装置所用真空桶为自己改装，气密性上存在一些问题，漏气率较高，没有很好的解决，并且真空泵与真空桶的匹配性也不是很好，因此真空度未达到理想值，水分不能到达沸点迅速蒸发实现预期的干燥效果。根据实验结果能够看出在当前状态下，已经有比较明显的干燥效果，如果装置能够达到理想的工作情况将能够实现预期的干燥要求。

4.2.2 实做模型干燥效果对比

将真空干衣的效果与热电干衣进行比较，当两者的空间利用率都达到 100%时，热电干衣平机均干燥 1g 耗时 0.01h，耗电 0.00316kw.h；真空干衣机平均干燥 1g 耗时 0.0053h，耗电 0.00083kw.h。从图中可以明显看出，在干衣指数相同，即达到相同干燥效果的情况下，真空干衣机耗时仅为热电干衣机的 1/2，耗电仅为其 1/3，即一次使用真空干衣机代替热电干燥可省电 60%左右。

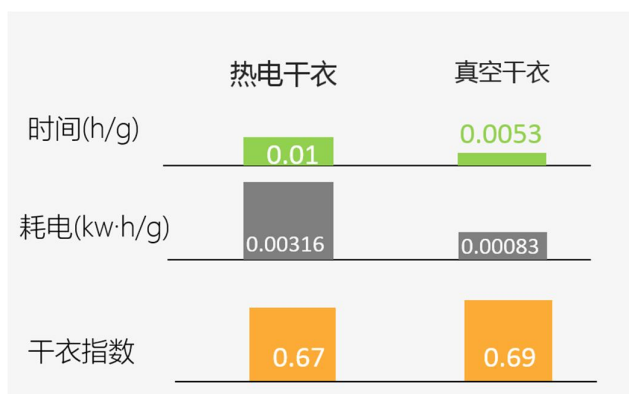


图 4.2.2 热电和真空干燥三种干燥方式比较图

由实验数据及图表分析可得：相比自然烘干和热电烘干，在达到大约相同干燥指数的情况下，真空干衣机需要的时间和能耗都大幅度减少，大大节约了干燥所需的能耗和时间，而且本装置如果能达到理想状况，还能进一步改善干燥效果，因此真空干燥的方式很有优势。

4.3 自控模块的实际检测

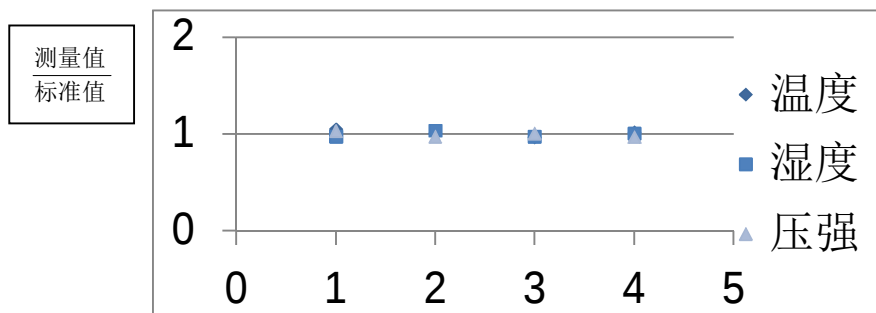


图 4.3 自控模块的测量值与标准值得比较图

自控模块设计连接完成后，对其压力、温度、湿度做了实验矫正，实验结果如上，从图

4.3 可以看出,该自控模块的压力及温湿传感器的测量准确,均在实验误差允许范围内,即可进行使用测量。

5 创新点及应用

5.1 装置设计创新

1) **真空干燥代替热风干燥减少干衣时间提升干衣品质。**相比于常用的热电或强风干燥装置,我们的装置采用真空干燥原理,利用水分在低压环境中的快速蒸发实现快速干燥的目的,同时不仅节省了干燥时间,提高了干燥质量,还大大节约了常规干燥的能量消耗。

2) **多层圆盘代替普通圆筒加强干燥速度提升干燥质量。**为增大桶内的空间利用率提升干燥效率,内在结构采用分层式设计,干燥多件物品的同时保证干燥质量。

3) **智能控制代替定时装置保证干衣效果节省多余能耗。**通过温湿及压力传感器的实时监测与反馈,进行间断性抽气,在保证干燥效果的同时,减少了由于定时装置持续工作带来的多余能量消耗。

5.2 应用范围

本装置适用于各大中小型城市,尤其适合空气湿度高,降雨量降水量大的南方地区使用。

6 效益分析

6.1 社会效益

按照国家标准,一吨标准煤可发 3000 度的电,而每燃烧一吨标准煤就会产生二氧化碳 2620 公斤,二氧化硫 8.5 公斤,氮氧化物 7.4 公斤。若使用此真空干衣机代替热电干衣机,一次干衣可节能 90%,按一周使用两次,一次使用 1.5h,则一年可节电 11.4 亿度,折合标煤 37.9 万吨,减少了二氧化碳排放量 9.4 亿公斤,二氧化硫排放量 322.15 万公斤,氮氧化物排放量 280.46 万公斤。在节约能源的同时,大大减少了污染物的排放,缓解了温室效应。

6.2 应用前景

近年来由于雾霾等环境因素,人们渐渐的放弃传统晾晒习惯,越来越多的倾向于进行室内干燥,使得干燥装置的使用需求量大大增加。据 2013 年统计家用干燥装置的市场需求增长率达 50%以上,市场前景极为可观。

另外由于生活品质的提高原有干衣机干衣效率低,耗时耗电量过大。本作品对于干燥装置从原理到结构的改进将节约大量的电能与时间,为使用者带来方便与快捷的干燥效果。

参考文献

- [1]达道安.真空设计手册.第三版.北京:国防工业出版社.2004
- [2]沈维道.童钧耕著.工程热力学.第四版.北京:高等教育出版社.2011
- [3]刘鸿文.材料力学.第 5 版.[M].北京:高等教育出版社.2011