

间接加热回转干燥机的设计

沈 江

江苏竣业过程机械设备有限公司, 江苏 扬州 225200

[摘要]文中是根据干燥过程的基本原理,针对其他机型的特点和社会需求,在已有成功设计实例的基础上,参考以前设计者的经验和结论,进行的设计。在深入了解回转圆筒干燥机的功能原理的基础上,为了提高干燥效率引入了间接加工方法,进行了热功计算,以及一些相应的试验与实验,同时对设备的强度刚度计算,另外分析了此类干燥机的动力参数,并对设备运行过程中容易出现的问题的一些部件与部位,进行优化设计与改良。

[关键词]圆筒;干燥机;成球机;间接加热

DOI: 10.33142/ec.v8i3.15623

中图分类号: TK173

文献标识码: A

Design of Indirect Heating Rotary Drying Machine

SHEN Jiang

Jiangsu Junye Process Equipment Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China

Abstract: The article is based on the basic principles of the drying process, taking into account the characteristics and social needs of other models, and referring to the experience and conclusions of previous designers on the basis of successful design examples. On the basis of a deep understanding of the functional principle of the rotary cylinder dryer, indirect processing methods were introduced to improve drying efficiency. Thermal work calculations and corresponding experiments were conducted to calculate the strength and rigidity of the equipment. In addition, the power parameters of this type of dryer were analyzed, and some components and parts that are prone to problems during equipment operation were optimized and improved.

Keywords: cylinder; drying machine; ball forming machine; indirect heating

1 新型回转圆筒干燥机

1.1 干燥机的设计背景

干燥是通过一定的方法将物料中的水分或其他溶剂去除或减少的操作,通常各种产品含水量都有一定的要求,以便于贮存、运输、加工和使用。例如食盐、尿素和硫氨等,当其干燥到含水率为 0.2%~0.5%左右时,物料不易结块,使用比较方便。

1.2 回转圆筒干燥机的工作原理

需要干燥的湿物料由皮带输送机或斗式提升机送到料斗,然后经过料斗的加料机构通过加料管进入进料端。加料管大斜度要大于物料的自然倾角,以便物料顺利进入干燥机内干燥,干燥圆筒是一个与水平线成倾斜的旋转圆筒。物料从一端加入,载热体由低端进入,与物料成逆流接触,也有载热体和物料一起并流进入筒体。随着圆筒的旋转物料受重力作用运行到较低的一端,湿物料在移动过程中,因为圆筒被加热,故受到筒体壁的加热,蒸发出水份,另一方面与逆流的热空气接触蒸发出水份,蒸发出来水份随逆流的热空气从一端排出。圆筒内壁上还装有抄板,抄板把物料抄起又落下,使物料与热气流接触表面增大,以提高干燥速率与效果,并使物料前进。热体经干燥以后一般经旋风除尘器将气体内所带物料捕捞下来,回流至干燥机的物料入口。

1.3 工艺流程

工艺流程分为物料流程、空气流程等组成。

1.3.1 物料流程

物料由给料机均匀的给入干燥机,在干燥机中,物料在重力及抄板的作用下沿着筒壁逐渐下降,在此过程中,物料和热空气接触得到热量,物料与被加热的筒壁得到热量,将水分汽化蒸发从而使产品含水率降低,降低含水率的物料继续下降成球状经过筛网筛分合格的产品排入进入物料产品库,不合格物料由外输送管道再次回到物料入口重新干燥成球。

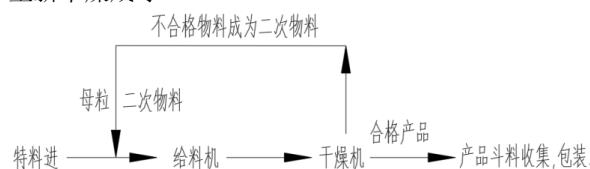


图1 物料流程图

1.3.2 空气流程

热空气,从干燥机出料端进入圆筒内,再与干燥机内部的物料再相遇,使物料加热的同时带出被蒸发的水蒸气从另一端排出,经过除尘后最终排入大气。另外利于现有的生产厂区中的烟气热能,进入干燥机夹套,从一端进入,另一端出来后烟气回到原系统中。

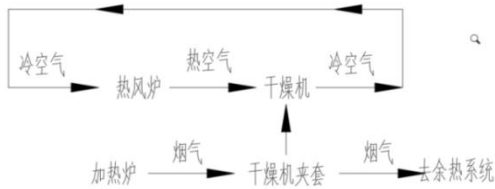
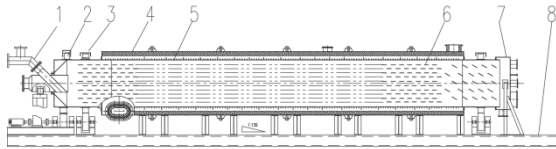


图2 空气流程图

1.4 结构简图

本案设计采用了组合式加热的方式，一部分热量是由干燥介质经过传热壁传给被干燥物料，另一部分热量则由热风直接与物料接触而传热的，是直接加热与间接加热两种形式的组合，简图如下示：



1-进料装置；2-传动装置；3-托轮挡轮；4-夹套；5-回转圆筒；6-抄板；7-出料装置；8-钢架底座；

图3 干燥机简图

2 干燥机工艺计算

为某集团公司的湿法造粒设计一款组合式加热回转干燥机根据工艺方提供的资料，成品干燥后粒状物料产量为：1500kg/h（设含水量0.5%）

2.1 设计条件

被干燥物料名称	粒状湿物料
流向	逆流
物料进口含水量	$W_1=50\%$
物料出口含水量	$W_2<0.5\%$
产量	1500kg/h
比重（相对密度）	1.8
物料入口温度	$\theta_1=60^\circ\text{C}$
物料出口温度	$\theta_2=160^\circ\text{C}$
物料粒度	1mm左右
空气速度	0.5m/s
室外空气温度	$t_0=27^\circ\text{C}$
湿球温度	$t_w=17^\circ\text{C}$
热空气进口温度	$t_1=300^\circ\text{C}$
干燥器出口空气温度	$t_2=160^\circ\text{C}$
物料的比热	$C_s=0.203\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$
物料的堆密度	$r_s=300\text{kg/m}^3$

2.2 物料衡重和热量衡

干燥机通过热功平衡计算求得所需要换热面积（此处省略），根据换热面积大致假设筒体的直径与长度，另外，在筒体取计算结构尺寸的基础上，设计时通过增加抄板及螺旋板来加强筒体的换热效率，提高传热系数，从而取得一定的实际生产裕量。

2.3 设备参数计算和确定

2.3.1 转筒的转速 n 和倾斜率 S 的选择

筒体转速一般为：

$$n = \frac{6 \sim 10}{D} \quad (1)$$

其中： D 为转筒的直径，标态下空气的密度：

1.293Kg/m³，换算成工况下： $\rho = 1.293 \times 0.9 \times 0.58 = 0.675\text{Kg/m}^3$ 。

$$\text{筒体面积: } P = \frac{L}{\rho \times 0.5} = \frac{0.812}{0.675 \times 0.5} = 2.4\text{m}^2 \quad (\text{风速 } 0.5\text{m/s},$$

物料带出量较少)。

选筒体直径 $D=2.25\text{m}$ ：

$$n = \frac{8}{2.25} = 3.5(\text{rpm}) \quad (2)$$

筒体的倾斜度一般为 $0 \sim 8^\circ$ ；取倾斜角 $\beta=2^\circ$ ，斜率 $S=3.5\%$ 。

2.3.2 停留时间

$$\tau = \frac{1.77z\alpha}{\beta \times D \times n} \quad (\text{min}) \quad (3)$$

式中： α —物料休止角（度）；

Z —转筒长度（m）； $Z=13\text{m}$

$D=2.25\text{m}$ ；斜度 $\beta=2^\circ$ ； $n=3.5\text{rpm}$ ；

$$\tau = \frac{1.77 \times 13 \times 35}{2 \times 2.25 \times 3.5} = 51.1(\text{min}) = 3066 \quad (\text{s})$$

2.3.3 填充率检验

$$\varphi = \frac{\tau V_s}{V} \quad (4)$$

式中： V_s —每秒钟的加料体积， $V_s = \frac{G_1}{r_s}$ ，产量 $G_1=0.347\text{kg/s}$ ，

$$\text{堆比重 } r_s = 300\text{kg/m}^3, \quad V_s = \frac{0.347}{300} = 0.001157(\text{m}^3/\text{s}) ;$$

$$V \text{—转筒体积, } V = \frac{3.14}{4} \times 2.25^2 \times 13 = 51.66(\text{m}^3),$$

$$\varphi = \frac{3450 \times 0.001157}{51.66} = 0.0774, \quad \text{即 } 7.74\% \text{填充率}。$$

2.4 筒体设计

筒体跨距暂按： $Z_m=14.5(\text{m})$ 。

筒体材料取 S31603 钢，取 $Z_m=14.5(\text{m})=14500(\text{mm})$ 。

2.5 对比实际应用

根据以上计算数据，查到相关论文中的实际应用，有实例干燥机产量为 1530kg/h 时的直接加热干燥机设备直径 $\times$ 长度为 $2.5\text{m} \times 18\text{m}$ ，同样的直接加热设备在本公司现有的设备上，相当产量均直径在 2m 以上。

2.6 模拟试验

根据理论计算，我公司将产品等比例缩小后，进行了

一次干燥试验。



图4 实验干燥机

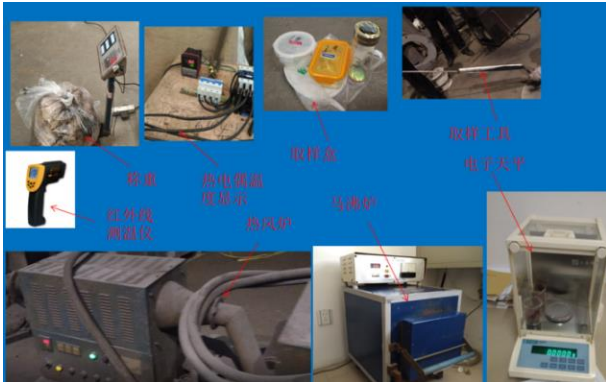


图5 蒸发实验器具

下面是实验样品送检测中心检测数据结果：

表1 样品含水率报告

项目	批号	检测前 (g)	检测后 (g)	含水量%
1 号样	①	3.1745	3.1680	0.20
	②	3.3002	3.2916	0.26
2 号样	①	2.6326	2.6297	0.11
	②	2.6667	2.6635	0.12
3 号样	①	3.2028	3.1993	0.11
	②	2.7747	2.7720	0.10
原样	①	4.0252	2.1711	46.06
	②	2.8759	1.5528	46.01

3 CFD 仿真

3.1 说明

组合式加热干燥过程还是非常复杂的。在干燥过程中，气流的性质及颗粒的特性沿着干燥管长度方向都会发生显著变化的。虽然多相流理论的研究已取得了不少进展，但由于流动的复杂性以及模型假定的局限性，数值模拟结果和实际情况之间或多或少还存在着差距，因而对工艺过程多相流的理论模拟和求解方法还在不断地完善中。

3.2 仿真技术

本次仿真技术模型如下图所示：工作流程是潮湿物料由 N1 口进入，在内部加热、旋转条件下，物料由前段逐渐向后段推移过程中逐渐蒸发水分而变干燥。加热温度、管道直径、管道长度、干空气流量，物料初始含水量等等

各种参数如何影响潮湿物料干燥过程，涉及多相流和颗粒运动相耦合。

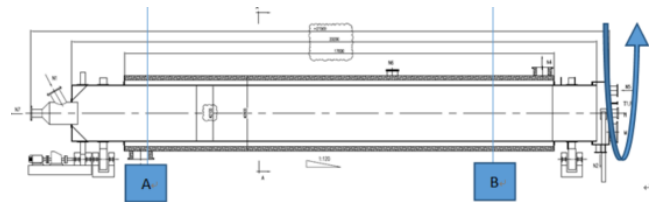


图6 仿真模型

3.3 仿真条件

本次仿真我们考虑物料颗粒表面附着水，也就相当于炭黑颗粒均匀地分布于液相水之中。分析干燥机的工作机理我们发现：

管壁提供热量，先传递热量到液滴，液滴蒸发，所以影响蒸发的温度与颗粒无关。

通过物料进口量的大小和物料颗粒直径，我们发现物料颗粒之间距离大于 10 倍物料直径，物料颗粒之间相互作用不大，涉及的颗粒的碰撞和破碎效应较弱。

颗粒大小不一样，表面积也不一样。影响蒸发的表面积大小可以通过水相直径进行等价约束。

通过以上分析发现，本次仿真可暂不考虑物料颗粒。通过物料颗粒流入量的多少和含水率，用等量的液相水替代。

因此本次仿真计算做如下假设：

本次仿真暂不考虑物料颗粒，仅考虑空气、水蒸气、液态水三相的流动传热和相变情况。

由 N1 口按照物料含水量等比例注入液态水，然后模拟液态水在容器内的相变过程。

可监测初始截面 A 含水率和截面 B 含水率，通过含水率的变化分析加热温度、管道直径、管道长度、干空气流量，物料初始含水量等等各种参数对蒸发的影响，间接考察上述参数的影响权重。

3.4 计算结果分析

CFD 计算模型如下图所示：

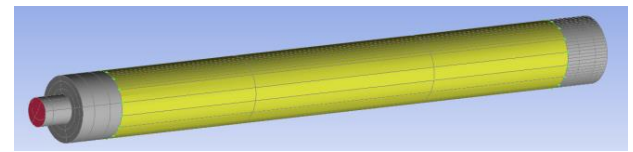


图7 CFD 模型

计算参数为：进口空气流量 500kg/h，进口空气温度 20℃，进口物料颗粒（水和物料）3000kg/h，夹套内烟气入口入口金属壁温 385℃，出口温度 200℃，旋转速度 3rpm，倾斜角度 1：120，物料颗粒直径考虑 1mm。

本次仿真采用欧拉多相流理论和离散相颗粒追踪相结合的技术，物料颗粒从最左侧孔进入，然后在后面圆筒内流动、加热、蒸发、扩散，最后从最右侧排除。

物料颗粒直径=1mm,其中间截面水汽分布如下图所示:

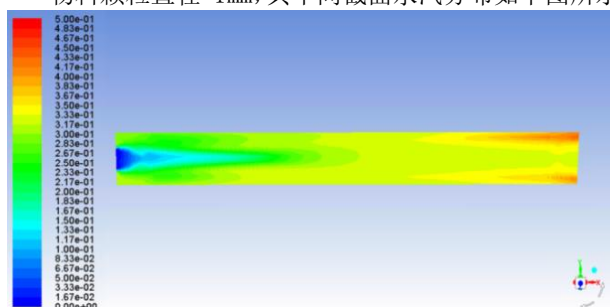


图8 水汽分布图

截面平均水汽浓度分布如下图所示:

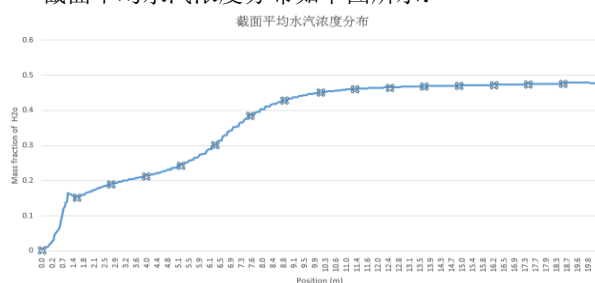


图9 平均水汽浓度分布图

可以发现物料水汽蒸发在 9m 之内的管道长度内蒸发剧烈,9m 之后蒸发变得缓慢,与真实蒸发比较一致。

中间截面温度分布如下图所示:

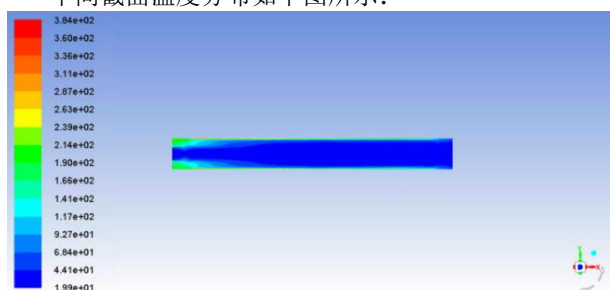


图10 中间截面温度分布图

4 筒体及支撑部分设计与计算

4.1 筒体

筒体是回转圆筒干燥机的基体。筒体内部既进行热介质的传递又输送物料,筒体大小标志着干燥机的规格和生产能力。筒体应满足一定的刚度和强度。

4.1.1 筒体跨度计算

干燥机的长度与直径比一般小于 12,要用两头支撑。因为本设备圆筒外有夹套,内部走高温烟气,需要内部耐火砖保温,固夹套不能转动,回转圆筒的支撑只能设置在二头,包括传动齿轮。这是外夹套加热的一个特殊点也是难点。

本案取直径 2.5m,长度 17m,满足常规结构比例。

4.1.2 筒体壁厚计算

筒体壁厚与许多因素有关,若跨径比偏小,壁厚可略

小;反正需增大,筒体的最小厚度按以下经验公式核算:

$$\delta_{\min} = 7.07 \times 10^{-4} \times k \frac{R^2}{\sigma_s} \quad (5)$$

式中: K—抄板与筒体壁重量比的系数,对于升举式抄板 K=1.6;

R—筒体半径 1250mm。

σ_s —筒体材料在操作温度下的许用应力,本案采用不锈钢材料 S30408,查 GB150.2-2011 表 5,按 350 度温度下是 111Mpa。

得筒体厚度最小为 16.518mm 考虑腐蚀磨损等并圆整后取筒体厚度 20mm。

4.1.3 夹套筒体

夹套筒体根据内部耐火砖厚度以确实夹套筒体直径取 3500mm,内部保温层厚度为 160mm,夹套筒体根据经验取 10mm,取普通碳钢材料, Q235-B。

4.1.4 筒体弯矩与应力分析计算

筒体看作是受均布载荷的简支梁建立弯矩图分析弯矩应力校核合格,筒体变形计算合格,具体计算省略。在滚轮与托轮安装处由于安装应力的原因适当加厚此局部筒体的厚度,本案取 30mm。

4.2 滚轮,托轮,挡轮

滚轮的断面有实心矩形,正方形,空心箱形多种,小型回转圆筒也有用钢轨或型钢弯制而成。本案采用矩形滚轮,形状简单。截面整体性,铸造相对来说缺陷少,裂缝少。滚圈也可采用锻造。

滚轮的作用是支撑整个筒体的质量,使其能在托轮上回转,因此托轮和滚轮都必须有足够的刚性,本案采购 35CrMo 合金钢锻件材料。

滚轮的接触应力按如下公式校核合格。

$$\sigma_s = 0.0132 \sqrt{\frac{qE(R_r + R_t)}{R_r R_t}} \quad (6)$$

式中: q—和用在滚轮单位长度上的均布载荷;

E—材料弹性模量;

R_r —滚圈外径;

R_t —托轮外径;

托轮装置是承受整个回转部分的重量,是在重负荷下工作的部件,托轮安装需要使筒体能平稳转动,中心线夹角宜成 60° , 结构分布如下图示。

轴承可以用滚动轴承也可以用滑动轴承,承受较大载荷时,所需滚动轴承尺寸也较大,使安装体积较大。

托轮轴强度计算按如下公式,进行校核。

$$d = \sqrt[3]{\frac{2.5 \times N (l_1 - b_1)}{0.2[\sigma]}} \quad (7)$$

N—托轮处所受力,大小等于托轮处支撑反力

L_1 —轴承跨距;

b1—轴承结构宽度。

因设备具有一个倾斜角度,故在转动时需要有挡轮来阻挡,限制筒体轴向来回窜动。挡轮同样需要成对放置。

按如下公式计算挡轮强度与轴径大小。

$$F_{ad} = G_0 \left(\frac{f}{\cos \alpha} - \sin \beta_1 \right) \quad (8)$$

$$d_{cp} \geq \left(\frac{0.59}{[p_0]} \right)^2 \frac{EF_{AD}}{h} \quad (9)$$

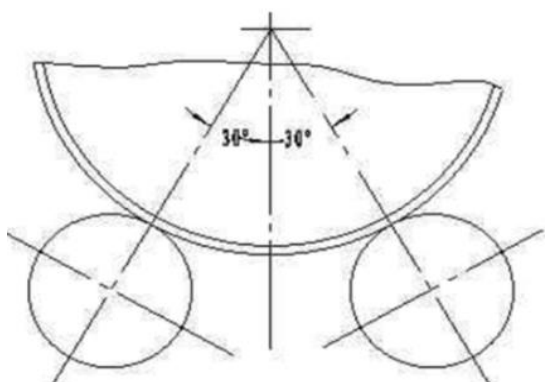


图 11 托轮与滚轮结构

5 传动部件的设计与计算

5.1 电机选型

回转圆筒干燥机是用于固体颗粒的干燥加热设备,操作时周围环境温度较高,灰尘较大,选用电动机时应防尘、防腐防爆,还应具有通风冷却装置,以适应高温的需要,本案选用变频电机 90KWP8 减速机选用齿轮减速机 ZLY250-14。

传动比,大小齿轮等计算按照机械设计手册进行详细计算,大齿轮 M2=20, Z=162, 小齿轮 M1=20, Z=23。轴与齿轮同样选用 35CrMo 的材料,满足材料强度的同时兼顾材料韧性。

5.2 轴承

轴承考虑到冲击载荷,除了径向还有轴向载荷都是需要考虑的,故选用 SKF 球面轴承,此轴承为 SKF 的专利产品,其强度计算按照机械设计手册初步计算后,是到了 SKF 轴承供应商的确认。

5.3 联轴器

联轴器大都为标准件,一般可以根据机器的工作条件选定合适的类型,在选用时可根据计算得到的轴的直径及传动的转矩,还有轴的转速,从设计手册上选出所需要。

本案选用弹性销齿式联轴器 ZL4 与 ZL9。

6 密封与润滑

6.1 密封

因为回转圆筒在转动,故进出口与回转,夹套与回转圆筒之间都需要进行密封,密封件的选用也比较重要,这涉及到将来车间与现场环境的影。

密封类型分为如下几种:

迷宫型:结构简单易制作,易安装,不需维护,缺点是那个密封性能差,只适用于一些简单介质,小颗粒状,无毒无害环境。

填料型:结构相对简单,易制作,密封性能一般,但磨损严重,将来需要不断的维护,更换填料等。

弹簧板型:结构是由多块弹簧板相互重叠实现密封,按结构制作相对复杂一些,成本高,安装简单,密封性能一般,目前此结构应用最为广泛。

弹簧压块型:此结构是由多块压块,每块压块上都装有弹簧,通过弹力压紧压块使其与筒体进行密封。此结构比较复制,安装困难,但密封性能较高。

本案考虑到对环境的影响,故采用弹簧压块式的结构,以及迷宫密封相结构的方法,相对成本较高。

6.2 润滑

回转干燥机传动零件中如轴,轴承,齿轮都需要进行润滑,轴承具体的润滑油或脂的型号按照供应商的要求。大小齿轮采用润滑油浸润方式润滑,托滚与滚圈采用石墨润滑,在托轮上安装固定石墨块,石墨块由弹簧压紧后与托轮进行摩擦实现润滑。

7 结束语

在对回转干燥机从工艺到结构的整个设计过程中,有时会忽视制造与安装方面的问题,比如设备高温滚圈与托轮位置,4 个托轮与回转筒体的轴线的对称等等很多都需要在设计时提前考虑难点,在结构方面进行优化,在能提高效率的同时,尽可能的降低制作与安装难度。

【参考文献】

- [1]金国森. 等干燥设备设计手册[S]. 上海:上海科技出版社,1989.
- [2]潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京:北京化学工业出版社,1998.
- [3]机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

作者简介:沈江(1975.7—),毕业院校:1999 年毕业于同济大学,所学专业:机械制造工艺与设备,当前就职单位:江苏竣业过程机械设备有限公司,职务:总工程师,职称级别:副高级工程师。