

涤纶筒子纱高压热风干燥理论探讨和测试

华 一 志

(常州针织总厂)

【提要】 作者通过对热风穿透筒子纱时热质交换的分析,建立了筒子纱稳定干燥阶段水分蒸发的理论模型,推导出圆柱形筒子纱径向热风温度分布方程及水分蒸发方程。测定了干燥容器内空气压力和低弹涤纶筒子纱水分蒸发速度之间的关系,得出在稳定干燥阶段,水分蒸发速度近似地和空气压力的1.3次方成正比的结果。

筒子纱(以下称筒纱)染色后的干燥,在色织产品中已成为直接影响产质量及成本的一个重要工序。为了提高质量,降低成本,现多采用在高压密闭容器内使热风穿过筒纱纱层的高压热风干燥法,该设备的主要结构见图1。

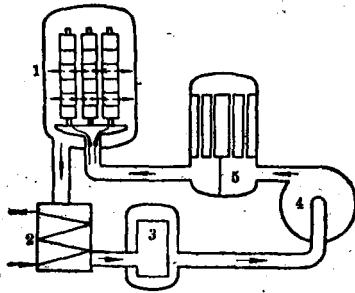


图1 高压热风干燥设备结构示意图

1-筒纱干燥容器; 2-冷却器; 3-雾气分离器;
4-鼓风机; 5-热交换器。

脱水后的筒纱装在密闭容器1中,充入压缩空气使容器内形成高压,由鼓风机驱动的热风穿过纱层,使筒纱干燥,经过纱层的高压含湿热风,进入冷却器2冷却后,凝聚成雾状析出。雾状水珠在雾气分离器3中被分离出来,达到一定容量后自动排出。经分离后的低温饱和空气再由鼓风机送入热交换器5加热供用。如此不断循环至筒纱烘干。

筒纱高压热风干燥过程中的热质交换较为复杂,目前仅对热风轴向通过柱状纤维集合体的干燥情况有些初步分析^[1]。本文在对

低弹涤纶筒纱试验的基础上进行分析,同时探讨及测定了容器内压力对干燥效率的关系。

一、高压热风干燥的三个阶段

在日本日阪公司的 UEFC-100/114 热风干燥设备上,用 130 旦的低弹涤纶丝圆柱形筒子纱进行染色后的高压热风干燥试验。干燥后筒纱外径为 22 厘米,内径为 7 厘米,密度为 0.35 克/厘米³,每批装纱总重量为 126 公斤。含水量为 38.5~40.6% (对干纱重)的筒纱,在表压分别为 0.2、0.9、1.8 和 2.9 公斤/厘米² 的四种容器压力下进行干燥。热风的初始温度为 108°C。测定干燥过程中不同时间热风穿过筒纱后的温度变化情况,发现在四种不同工作压力下进行热风干燥时,出筒纱的热风温度随干燥时间变化的曲线形状

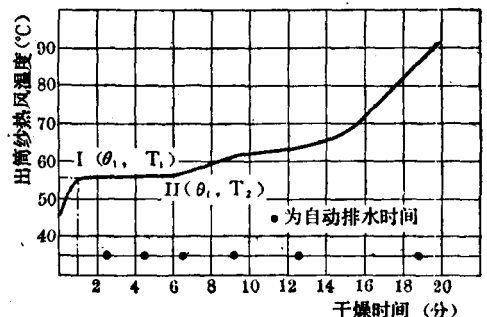


图2 热风干燥时出筒纱热风温度-时间关系曲线
(容器表压2.9公斤/厘米²;筒纱含水量40.6%)

是基本相同的, 参见图2。从出筒纱的热风温度变化情况, 可把干燥过程分为三个阶段。

第一阶段: 初始温度为 108°C 的热风穿过常温含水筒纱后, 由于含水筒纱的吸热作用, 温度下降很多。随着干燥过程的进展, 出筒纱的热风温度在很短时间 T_1 内升到 θ_1 。这是因为在干燥开始阶段, 热风与筒纱的温度差 $\Delta\theta$ 很大, 热风与含水筒纱间的热交换作用比较强烈; 筒纱吸收的大量热量主要用来提高其本身的温度。随着含水筒纱温度上升, $\Delta\theta$ 逐渐减小, 热风通过热交换而消耗的热量也随之下降, 故出筒纱的热风温度迅速上升。第一阶段约占筒纱烘干总时间的10%左右, 并根据含水筒纱的初始温度和热风状态而变化。

第二阶段: 图2中曲线从I点到II点的一段, 即出筒纱的热风温度基本稳定不变。这表明热风通过含水筒纱后的热量消耗不随时间变化。此时热风传递给筒纱的热量等于筒纱中水分汽化所需的热量, 即筒纱中水分蒸发速度不变。图2中标出的自动排水时间间隔在这阶段中基本相同, 也证明了蒸发速度是不变的。这个阶段的长短, 根据筒纱脱水后的初始含水量及热风的状况而变化。

第三阶段: 在时间 T_2 以后, 出筒纱的热风温度再次缓慢上升, 在这过程中热质交换又一次处于不稳定状态。表明热风传给筒纱的热量除一部分消耗于水分蒸发外, 有一部分加热筒纱, 使筒纱温度再次升高, 同时热交换量随筒纱温度的升高而不断下降, 直到筒纱完全烘干。在这阶段内, 自动排水的时间间隔愈来愈长, 证明了在此阶段中干燥速度越来越低。

二、稳定干燥阶段的分析

筒纱内的水分, 除纤维吸附的化合水外, 其余存在于纱线表面和纱线内各纤维之间, 部分也存在于卷绕纱线间的微小空隙中。在

稳定干燥阶段, 假定筒纱内各处密度均匀, 温度相等。设此时的温度为 t , 这个 t 也就是热风的湿球温度。

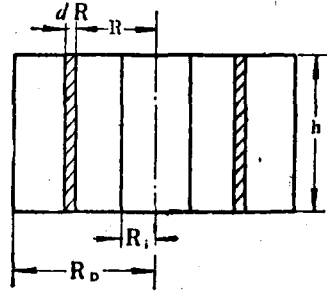


图3 筒纱尺寸示意图

见图3, 筒纱内半径为 R_1 , 外半径为 R_0 , 高为 h , 空隙度为 ε , 热风初始温度为 θ_0 。取筒纱半径 R 处的微小

距离 dR 上微元体积 dV 。设进入 dV 的热风温度为 θ , 出 dV 的热风温度为 $\theta + d\theta$, 则热风经过 dV 后的热量消耗 dq_1 为:

$$dq_1 = -Q\gamma C_p d\theta \quad (1)$$

式中: Q 为热风体积流量; γ 为热风密度; C_p 为热风的定压比热, 由于热风含水量仅在百分之几的范围内变化, C_p 可以近似地用干空气的比热代替。

在 dV 内, 热风和筒纱间的热交换量 dq_2 可用牛顿冷却定律计算:

$$dq_2 = aF(\theta - t) \quad (2)$$

式中: a 为热风 and 含水筒纱之间的换热系数; F 为 dV 体积内纱线暴露在热风下的面积。

设含水筒纱的比表面积为 S_0 , 则 $F = S_0(1 - \varepsilon)dV$, 而 $dV = 2\pi h R dR$, 代入方程(2)可得:

$$dq_2 = 2\pi h S_0(1 - \varepsilon)a(\theta - t)R dR \quad (3)$$

在稳定干燥阶段, 热风与含水筒纱间的热交换量就是热风通过筒纱后的热消耗量, 即 $dq_1 = dq_2$, 可得:

$$\frac{d\theta}{(\theta - t)} = - \frac{2\pi h S_0(1 - \varepsilon)a}{Q\gamma C_p} R dR \quad (4)$$

将方程(4)积分求解, 代入边界条件 $R = R_1$ 时, $\theta = \theta_0$, 可得:

$$(\theta - t) = K(\theta_0 - t)\exp(-\beta R^2)$$

$$\beta = \pi h S_0(1 - \varepsilon)a/Q\gamma C_p,$$

$$K = \exp(\beta R_1^2) \quad (5)$$

由方程(5)可知, 出筒纱时热风温度 θ 有

如下方程:

$$(\theta_0 - t) = K(\theta_0 - t) \exp(-\beta R_0^2) \quad (6)$$

表明在稳定干燥阶段, 出筒纱的热风温度与热风初始温度和热风湿球温度之差成正比, 与筒纱内径平方和外径平方差成指数函数关系下降。

将方程(5)代入方程(3), 可得到筒纱内半径 R 处 dV 微元体积内单位时间热风向筒纱传递的热量 dq_2 为:

$$dq_2 = 2\beta Q\gamma C_p K(\theta_0 - t) \exp(-\beta R^2) R dR \quad (7)$$

由于稳定干燥阶段热风向纱线传递的热量全部用于水分的蒸发上, 则在 dV 微元体内每公斤干空气蒸发筒纱水分的速度 dM (公斤水/公斤干空气) 可近似地表达为: $dM = dq_2 / Q\gamma\Delta H$, 式中: ΔH 为水在温度 t 时的汽化潜热。

热风通过筒纱每公斤干空气带走的水分

蒸发量 $d = \int_{R_i}^{R_o} dM$, 对 dM 积分得:

$$d = \frac{C_p(\theta_0 - t)}{\Delta H} [1 - K \exp(-\beta R_0^2)] \quad (8)$$

稳定干燥阶段, 每公斤干空气蒸发筒纱的水分和热风的初始温度与湿球温度之差成正比, 随筒纱外径的平方成指数函数上升, 并以 $C_p(\theta_0 - t) / \Delta H$ 为其极限值。

将方程(6)代入方程(8), 化简得:

$$d = C_p(\theta_0 - \theta_0) / \Delta H \quad (9)$$

式中: C_p 是干空气的比热, 为 0.24 大卡/公斤·度。

方程(9)说明, 稳定干燥阶段每公斤干空气通过筒纱后蒸发水分和热风的初始温度与热风出筒纱时的温度差成正比, 和水分在热风湿球温度下的汽化潜热成反比。

在不同的容器压力下测定的热风干燥情况主要特性数据见表 1。

表 1 不同容器压力下筒纱热风干燥情况

容器压力 (表压公斤/厘米 ²)	筒纱初始含水量 (%)	热风初始温度 (°C)	稳定干燥时出筒 纱热风温度(°C)	出冷却器热风温度 (°C)	稳定干燥时间 (分)	总干燥时间 (分)
0.2	40.5	108	48	27	23	103.0
0.9	38.5	108	49	27	13	46.5
1.8	38.6	108	52	31	8	30.5
2.9	40.6	108	57	36	5	19.5

热风干燥稳定阶段, 每公斤干热空气所蒸发的水分量, 按方程(9)进行计算的结果见表 2。

由于在稳定干燥时期热风向含水筒纱传递的热量全部用于水蒸发上, 热风状态的变化是等焓变化过程, 每公斤干空气中含湿量的计算方程为^[2]:

$$d = 622 P_{汽} / P_{气} \quad (10-a)$$

式中: d 为每公斤干空气的含湿量(克); $P_{汽}$ 为混合气体中的水蒸汽分压; $P_{气}$ 为混合气体中的干空气分压。

含湿量为 d 的每公斤干空气热焓计算方程为^[3]:

$$i = 0.24 t_0 + 0.001 d (595 + 0.47 t_0) \quad (10-b)$$

式中: t_0 为湿空气的干球温度(°C)。

在高压干燥系统中, 首先由容器工作压力 P (近似地用容器表压加一个大气压代替) 及冷却器出口温度 θ_1 为依据, 求得饱和空气中的含湿量 d_1 和该状态下每公斤干空气的热焓值 i_1 。并计算出出热交换器温度为 θ_0 , 含湿量 d_1 的热风热焓值 i_0 。据稳定干燥过程热风等焓变化的特点, 可求得出筒纱时热风温度为 θ_0 的热风含湿量 d_2 。每公斤干热空气通过筒纱时蒸发的水分量 d 为: $d = d_2 - d_1$, 而加热每公斤干空气所用的热量 q 为: $q = i_0 - i_1$ 。则每消耗一大卡热量所能蒸发的水分量, 即热风的干燥效率 η , 除冷却器部分外在不考虑向周围环境散热的条件下:

$$\eta = d / q = (d_2 - d_1) / (i_0 - i_1)$$

按方程(10-a)及(10-b)计算, 在不同容

表2 容器压力对稳定干燥行为的影响

容器压力 (表压公斤/厘米 ²)	由方程9计算的d值 (克/公斤干空气)	由方程10计算的d值 (克/公斤干空气)	加热每公斤干空气需要的热量 (大卡/公斤干空气)	热风干燥效率 (克/大卡)
0.2	25.2	24.2	29.0	1.20
0.9	24.8	23.5	27.7	1.18
1.8	23.6	22.1	25.9	1.17
2.9	21.6	20.0	22.8	1.14

器表压下热风干燥情况的数据见表2。

考虑到测量带来的误差，在筒纱高压热风干燥稳定阶段，由方程(9)、(10)计算所得的结果可认为是相当符合的。随容器压力的提高，低弹涤纶筒纱热风干燥时，稳定干燥阶段每公斤干热空气蒸发的水分有所减少，同时热风干燥效率稍有下降，但不十分明显。

由于压力系统内空气的密度 γ 和压力 P 成正比，单位时间内热风蒸发水分的数量 D 为： $D=Q \cdot \gamma \cdot d$ 。随着容器压力的提高，虽然每公斤干热空气蒸发的水分量有所下降，但 Q 和 γ 相应地增加更快，各种因素综合作用的结果，引起稳定干燥阶段单位时间内水分的蒸发量随压力的提高而增加，干燥所需的时间随着下降。试验证明，随容器压力的增加，稳定干燥时间和总干燥时间逐步下降，如表1和图4所示。

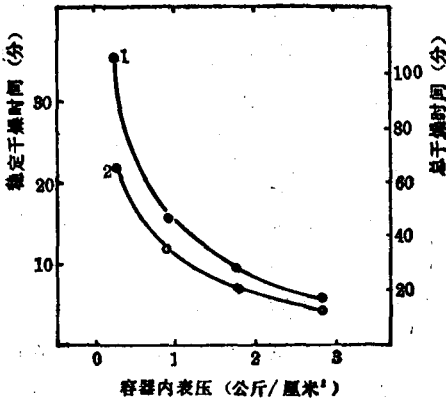


图4 容器压力对干燥时间的影响

1-总干燥时间；2-稳定干燥时间。

试验表明，稳定干燥时间 T ，在试验条件下近似地和容器内绝对压力 P 的1.3次方成反比。 $P \approx p + 1$ ，这里 p 为容器表压值。 $T \cdot P^{1.3} \approx \text{常数}$ 。

在热风初始温度一定时，容器压力对设备壳体的温度分布不产生明显的影响。单位时间内设备向周围环境的散热损失，在不同压力下差异不大，且容器压力的提高对热风干燥效率无明显影响，但能明显地缩短干燥时间。为此，在设备情况许可条件下提高容器内的压力，对提高生产率、节约能量是有利的。

三、结 论

1. 低弹涤纶筒纱高压热风干燥可分为升温、稳定干燥、不稳定干燥三个阶段。
2. 稳定干燥阶段，每公斤干热空气通过筒纱后蒸发的水分量可近似地按下式计算：
$$d \approx C_p(\theta_0 - \theta_s) / \Delta H$$
并近似地取 $d_{\max} \approx C_p(\theta_0 - t) / \Delta H$ 为极限值。
3. 随容器压力的提高，稳定干燥阶段每公斤干热空气蒸发的水分量有所下降，但热风干燥效率无明显变化。
4. 随容器压力的提高，稳定干燥时间和总的干燥时间缩短。采用设备许可的高压力工作，有利于提高生产率和降低能量消耗。

参 考 资 料

[1] 《基础纤维工学》V. P.269, (日).
[2] 沈维道等著：《工程热力学》，P.322~323, 1965.