滚筒式烘干机传质现象的适用方法综述

Sajad Salavatidezfouli*[1]、Arash Hajisharifi†[1]、MicheleGirfoglio‡[1]、GiovanniStabile§[1]和 Gianluigi Rozza¶[1]

[1]数学领域，mathLab，SISSA，博诺梅阿路265号，I-34136 的里雅斯特，意大 ly

arXiv:2304.03533v1 [math.NA] 7 Apr 2023

摘要

滚筒式烘干机提供了一种不受天气条件影响、快速且便捷的纺织品干燥方式，因此在普通家庭中得到广泛使用。然而，纺织品的人工干燥会消耗大量能源，在北欧国家，居民用电量中约有8.2% 用于纺织品干燥（Cranston等人，2019）。多位作者采用实验和数值方法研究了衣物烘干周期的各个方面，以了解并改进这一过程。关于滚筒式烘干机蒸发物理机制的首个转折点研究由 Lambert等人（1991）于20世纪90年代初提出。借助Chilton–Colburn类比，他们引入了面积传质系数的概念，以处理 $evaporation\ rate$。蒸发速率被认为是干燥机的主要系统参数，借助该参数可以估算包括干燥时间、效能、含水量和效率在内的其他性能参数。此后，基于这一概念发表了多项实验或数值研究；此外，为获得更高的准确度，该模型随后被发展为零维模型（Deans，2001）和一维模型（Wei 等人，2017）。

近期文献着重运用量纲分析或图像处理技术，建立干燥指标与系统参数之间的关联。然而，这些回归模型的有效性因机器而异，因此尚无法推广。本文讨论了此前用于估算滚筒式烘干机蒸发速率的所有模型。对相关文献的综述表明，所有此前用于预测干衣机蒸发速率的模型在准确度和适用性方面都存在一些局限。

要点：

- 洗烘一体机是第二大民用电能消耗设备，
- 实验结果因机器而异，难以推广，
- 面积传质是评估蒸发速率的关键参数，
- 近期已有多位作者提出了更复杂的模型。**关键词**：滚筒式干衣机；蒸发速率；面积传质系数；综述

符号说明

$\dot{m}$ 质量流量 [kg/s]Q 传热速率 [W]$\dot{V}$ 流动速率 [m^3/s]A 面积 [m^2]a 活度系数 [−]$C(t)$ 瞬时含水量 [%]C_p 比热 [J/kgK]D 扩散系数 [m^2/s]d 直径 [m]g 重力 [m/s^2]h 传热系数 [W/m^{2}K]h_{fg} 蒸发潜热 [kJ/kg]k 传质系数 [m/s]k_B 玻尔兹曼常数 [J/K]kA 面积–质量传质系数 [m^3/s]L 长度 [m]m 重量 [kg]N 滚筒角速度 [rpm]NTU 传递单元数 [−]P 压力 [Pa]PO 功率 [W]RH 相对湿度 [%]T 温度 [K]t 时间 [sec]V 体积 [m^3]w 含湿量 [kg/kg]

希腊字母

α 热扩散率 [m^2/s]β 织物特性 [−]χ 含水量 [m^3]ϵ 效能 [−]λ 热导率 [W/mK]ν 动量扩散率 [m^2/s]ρ 密度 [kg/m^3]

τ	无量纲停留时间 [–]

无量纲数

Gu	古赫曼数
Le	刘易斯数
Le’	修正刘易斯数
Nu	努塞尔数
Pr	普朗特数
Re	雷诺数
Sc	施密特数
Sh	舍伍德数
Sh_a	面积-舍伍德数

下标

a	Air
amb	环境
clo	衣物
d	Drum
$evap$	已蒸发
ext	外部
f	Flow
g	干球
gw	湿球
h	加热器
in	入口
LH	潜热
$mois$	水分
out	出口
sat	饱和度
$surf$	表面
t	纺织品
th	厚度
tot	总计
v	蒸汽
w	水

1 引言

围绕如何最优利用有限能源以及如何实现气候变化目标的持续讨论，促使人们将关注点转向干燥等高能耗技术。干燥又称脱水或除水，是指在保持产品质量和结构的同时，将材料中的水分去除至特定值的过程。传统干燥方法是在有风和／或阳光照射的室外进行。然而，在现代社会，由于空间有限且人们需要更快的干燥时间，各种人工干燥方法应运而生（Stawreberg 等，2012）。因此，干燥系统广泛应用于食品加工、纺织品、造纸、木材、陶瓷、矿物、制药、暖通空调与通风以及生物技术等家用和工业领域（Zahed 等，1995；Khaldi 等，2017；Alishah 等，2018；Oueslati 等，2018；Lowrey 和 Reboux，2020；Salhi 等，2021；Wang 等，2021）。

干燥大约占过程工业能耗的 25%，被认为是能耗最高的操作之一（Kudra, 2004；Kemp, 2011）。工业干燥系统最早应用于化学工程领域，可追溯至数十年前（Kerkhof and Coumans, 2002）。尽管干燥过程在工业中的应用广泛，但其发展历程较短，尚不足以满足当今在全球能源危机、生命周期成本最低化和环境友好型技术方面的需求（Defraeye, 2014）。

干燥技术的一项应用是干燥衣物等多孔织物。数十年来，家用滚筒式干衣机的使用量持续增长（Ng and Deng, 2008）。与此同时，干燥也是最耗能的过程之一（Minea, 2015）。根据美国能源部的图表（图 1），在家用电器中，干衣机的耗电量仅次于热水器，位居第二（MI-NOS, SCOTT, 2018）。对于一周只使用一两次的电器而言，这一耗电量相当可观，更何况有些电器会持续运行。因此，干衣机如今被视为普通家庭中不可或缺的电器，因为它们可靠且干燥速度快（Gatari´c et al., 2021）。德国和美国分别有超过 40% 和 80% 的家庭配备了干衣机（Bhandari, 2009），且这一市场仍在稳步增长（Maya-Drysdale et al., 2019）。不过，干衣机唯一的缺点是电能消耗大（Stawreberg 和 Nilsson, 2010）。据估算，美国超过 3% 的住宅能耗来自干衣机（Bassily and Colver, 2003b），而全球这一比例约为 8%（Bansal et al., 2010）。随着消费结构和居住环境（居住空间及环境退化）的变化、健康意识的增强（阳光晾晒仅能杀死 15% 的细菌），以及干燥护理设备的发展，滚筒式干衣机的使用日益普及，年增长率达 10.9%（Shircliff, 2016）。织物干燥过程能耗高且耗时，完成干燥需要很长时间（最长可达 3 小时，具体取决于干燥条件或干燥机型号）。此外，能源危机和环境保护已成为公众关注的焦点。因此，干衣机制造商非常重视提高脱水能效，以维持市场份额、竞争力和可持续发展能力（Wei 等人，2017）。

干衣机通过将热气体流入放置纺织品的滚筒中，以去除其中的含水量。滚筒式干衣机根据循环方式和能源分为两种类型（Novak 等，2019）。在所谓的 排气式干衣机 中，干燥在开放循环中进行，热空气流经滚筒后排放到环境中。而在 冷凝式干燥机 中，机器内的气体进行封闭循环，从纺织品中吸收含水量，然后在冷凝器中失去湿度。这些系统的示意图如图 2 和图 3 所示。

排气式干衣机使用分别由气化器或电加热器提供的热气体或热空气，而.....

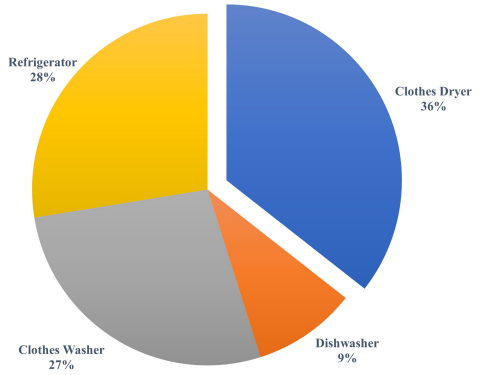


图 1：标准家用电器的能耗

在冷凝式干燥机中，电加热器是能量来源。在现代干燥机中，也就是热泵干燥机，干燥机内嵌入了热泵循环，有助于在整个系统中实现热回收（Dietrich，德国专利3407439，1984年）。由于主要部件之间相互依赖，热泵滚筒式干燥机被视为一个复杂系统。该系统简而言之由两个封闭循环组成：一是热泵循环，其中工质通常为R134a（Rasti等，2012；Senthilkumar，2019；Siddiqui等，2020）；二是涉及空气-水混合物的干燥循环。两个循环之间的热交换发生在冷凝器和蒸发器处（TeGrotenhuis等，2017），如图4所示。

自21世纪初以来，已有关于热泵系统发展数值模型的报道（Saensabai andPrasertsan, 2003；Sarkar etal., 2006a,b；Paland Khan, 2008；Wang et al., 2010；Novaketal., 2011）。通常结合实验方法和数值方法来研究热泵干燥机，更重要的是，数值部分所占的比例随时间推移而增加（Svensson, 2018；Brandt et al., 2019）。

排风式干燥机和热泵干燥机安装在与洗衣机分离的机器中，因此需要更多安装空间。然而，典型的冷凝式干衣机可以嵌入洗衣机中，因此非常适合家用场景。这种同时进行洗涤和干燥的特定机器称为 洗烘一体机。在这些机器中，气体混合物通过环境空气或水作为冷却介质进行冷凝。在所有上述干燥系统中，冷凝式干燥机是一种很有前景的方法，其干燥过程所需的能源更少、干燥时间更短，且无需额外的安装空间。因此，它占据了美国市场的很大份额（Denkenberger, D.; Calwell, C.;Beck, N.;Trimboli,B.; Driscoll, D.; Wold, C., 2013）。

图5展示了冷凝器干燥器中的干燥周期。在该循环期间有四个主要模块；风扇、加热器、滚筒 和冷凝器。风扇使气体混合物在循环中流动，并且不会影响混合物的热力学性质。然而，混合物在其他模-

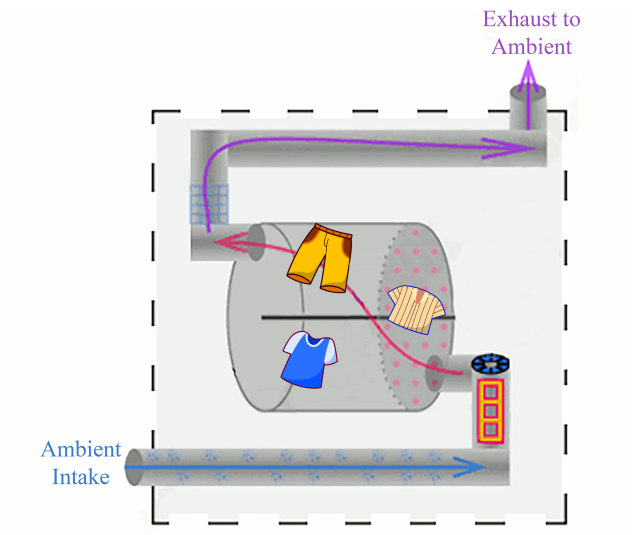


图 2：排气式干衣机干燥周期示意图。

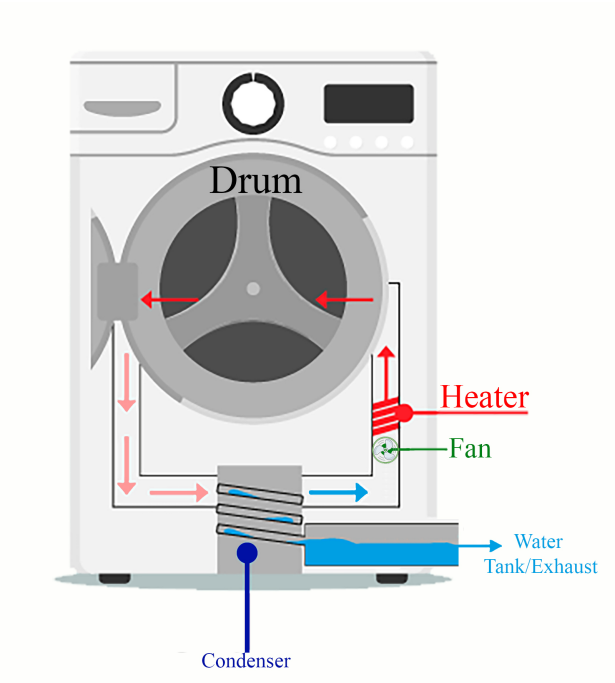


图 3：冷凝式干衣机干燥周期示意图

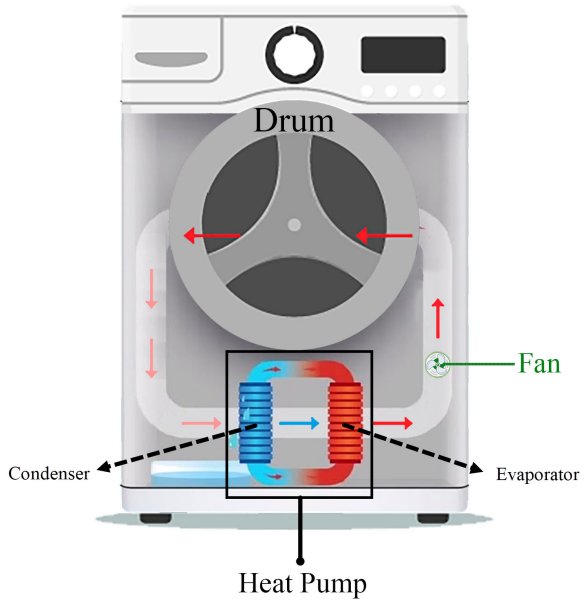


图 4：热泵干燥机干燥周期示意图

模块。通常，加热器放置在风机风道中，因此通常将其视为一个单独的模块。因此，在干燥循环中，每个模块之后可以分别考虑三个独立的区段。这些区段在图5中分别以 a、b 和 c 符号表示。与干燥周期相关的主要热力学参数包括干球温度、绝对湿度（含湿量）和相对湿度。根据图5，在理想条件下，每个模块中的热力学参数变化如下：

- 风机/加热器（$a \ -> \ b$）：干球温度升高。由于未发生相变，水蒸气和空气的质量（即绝对湿度）保持不变。空气吸收水蒸气的能力与温度有关。因此，相对湿度降低。如图 6 所示，空气沿水平线从点 a 移动到点 b。

- 滚筒（$b \ -> \ c$）：当热空气流过湿衣物时，会蒸发其中的含水量，并因此冷却下来。因此温度降低。然而，绝对湿度和相对湿度都会增加，直至达到饱和条件。这对应于图 6 中从b 到c 的虚线路径。

一般而言，在干燥机的理想条件下，预计滚筒出口处的空气已完全饱和，即相对湿度为100%（Stawreberg，2011a；gorenje，2013）。然而，在实际机器中，出口气体混合物可能无法达到饱和，尤其是在干燥周期的中期或末期（Somdalen 和 K¨ohler，2018）。这对应于图6中从b 到c 的实线。

- 冷凝器（$c \ -> \ a$）：最后，在冷凝器中，饱和气体冷却下来，其含水量凝

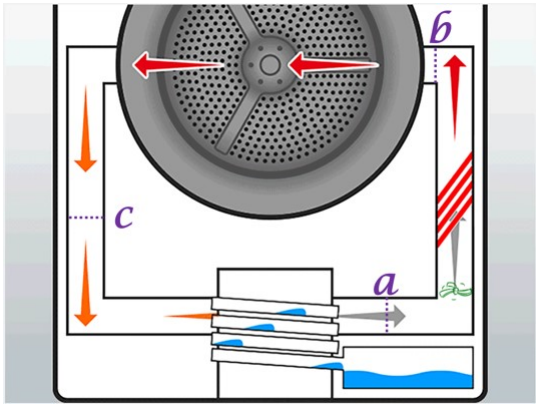


图5：冷凝式干燥机干燥周期中的不同阶段。

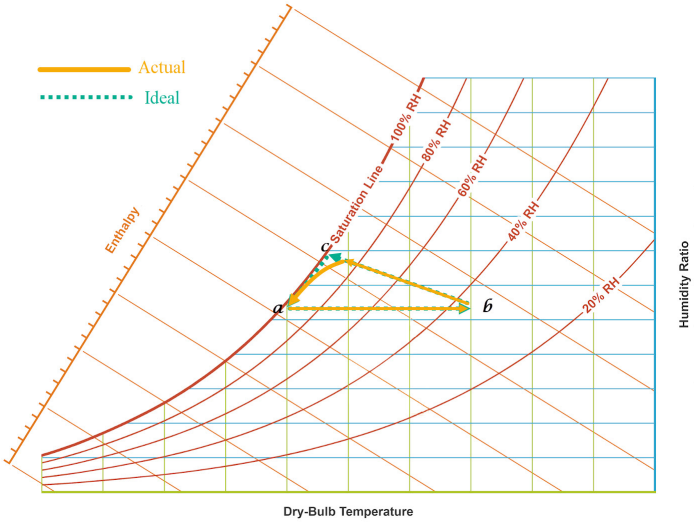


图6：湿空气图中的理想干燥周期。

结。这一过程在相对湿度恒定的条件下发生，如图 6 中从 c 到 a 的路径所示。

最后，各模块中空气的热力学变量变化列于表1中。

2 物理现象

对干燥现象的分析比单独分析热传递或等温传质更为复杂（Choi等人，2002；Park等人，2003）。在湿物料的干燥过程中，热质传递同时发生在固体内部以及干燥介质的边界层中（Lee等人，2006b）。

具体而言，在冷凝式干燥机中，气体混合物和衣物都会经历多种物理现象。通常，在电机的驱动下，滚筒及其中的衣物不断旋转，同时热且近乎干燥的空气进入滚筒。在滚筒中，热气体与湿衣物混合，并穿过纺织品的孔隙。在这一过程中，会发生各种类型的传热和传质。

表1：混合物在循环中的热力学变化

模块	风机/加热器	Drum	冷凝器
Path	a $->$ b	b $->$ c	c $->$ a
干球温度	$T_{dry}\uparrow$	$T_{dry}\downarrow$	$T_{dry}\downarrow$
相对湿度	RH↓	RH↑	相对湿度≃
绝对湿度	绝对湿度≃	AH↑	AH↓

会发生各种机制。衣物之间以及衣物与空气之间分别存在传导传热和对流传热，而辐射则发生在干燥机内各个部件之间。传质分别促使衣物中的水分蒸发到空气中，以及空气混合物在滚筒和冷凝器中冷凝。除此之外，加热器的开关会带来瞬态效应，以维持恒定的干燥温度；衣物在滚筒内的随机运动也增加了复杂性。干燥过程中涉及的现象及其发生的模块列于表 2。

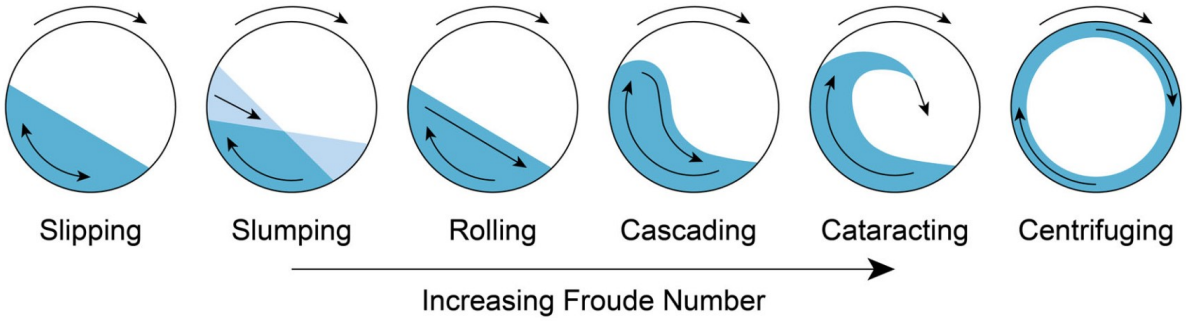
此外，Jones 等人识别出了干燥周期中滚筒内不同的两相流型（Jones 等人，2022）。因此，如图 7 所示，滚筒内存在六种随弗劳德数变化的流动状态，展现了衣物在翻滚过程中经历的运动范围。研究得出，随着转速提高，流动和湍流会变得更加紊乱，在高角速度下形成完全的环状流。但这项研究未能将这些流动状态与干燥特性联系起来。

3 方法

滚筒式干衣机中涉及的模块是各行业中的常见设备，因此，已有大量文献探讨风机/加热器、旋转滚筒或冷凝器（SHEN and LU，2013；Yousef 等人，2014；Enteria 等人，2015；Mensah and Choi，2017；Zhang 等人，2019；KhalsaandSadhu，2021；Zolotarevskiy 等人，2022）。此外，由于滚筒是干燥发生所在循环中最重要的模块，因此，在可能的情况下，单独研究该模块可以为评估干燥效率提供必要的参数。但遗憾的是，干燥周期的推导必须综合考虑所有相关组件，因此，所谓的模块化方法不适用于滚筒式干衣机。这是因为每个模块的运行条件可能会影响其他模块的工作状态。例如，风机通道中的气体流量与通过所有其他模块的压力损失相对应。对于滚筒或冷凝器中的传质速率，同样可以作出类似解释。因此，即使是确定单个组件的性能，也需要考虑所有模块。因此，文献倾向于考虑一种涵盖所有部件的控制体积法，并求解整个系统的质量守恒和能量守恒，例如图 8 所示的 Deans 为开环排气式干衣机提出的方法，后文将对此进行讨论。

在 20 世纪 90 年代以前，公开文献中关于衣物干燥技术的出版物数量很少（Conde，1997）。此外，早期研究更多关注制造阶段的纺织品干燥过程（Conde，1997）。对滚筒式干衣机滚筒模块的初步研究始于观察和实验测量方法的应用（Fontana 等人，2016；Akyol 等人，2015）。Hekmat and Fisk 发表了最早的一批研究之一，提出了降低气流量、回流排气等实用方法，以提高干燥效率（Hekmat and Fisk，1984）；这些方法可节省 33% 的能源，但会显著延长干燥时间（Boudreaux 等人，2021）。Spruit 测量了滚筒内温度和湿度的变化，以评估干燥性能（Spruit，1988）。他们发现，织物负载量比额定值高 20%，会使滚筒式干衣机的能量干燥效率提高 66%。他们还观察了入口变量变化对干燥性能的影响。Kadoya 等人首次尝试优化冷凝式干衣机（Kadoya 等人，1984）。他们尝试优化换热器的风扇，从而简化系统、减轻重量，并降低设备成本。之后，Kim（1999）进一步发展了这项工作，采用田口实验设计（DOE）方法（Roy，2001）优化风扇性能并降低噪声。

早期研究的主要问题是缺乏理论重点。这些研究采用了相当相似的常规方法，在干燥周期内测量温度和湿度指标等重要参数，并观察这些变量对入口条件的敏感性。他们甚至成功优化并预测了干燥过程的流动。例如，Lemaire 等人报告了系统改变干燥过程参数（空气入口温度、负载率、再循环率、通风机容量和滚筒转速）所产生的影响，并为其燃气加热滚筒式烘干机建立了干燥过程的经验模型（Conde，1997年）。然而，由于缺乏合适的数学模型，很难将这些发现推广到其他机器。



Fi图 7：随着弗劳德数增加，旋转滚筒中的流动状态（Jones 等人，2022）

表 2：物理现象

现象	**模块**
多组分流动（空气和蒸汽）	风机/加热器、滚筒、冷凝器
多体动力学（MBD）（衣物旋转）	Drum
传热（对流和辐射）	风机/加热器、滚筒、冷凝器
传热（衣物之间的传导）	Drum
可变热物性	风机/加热器、滚筒
多相流动（气体和水）	滚筒、冷凝器
传质（蒸发和冷凝）	滚筒、冷凝器

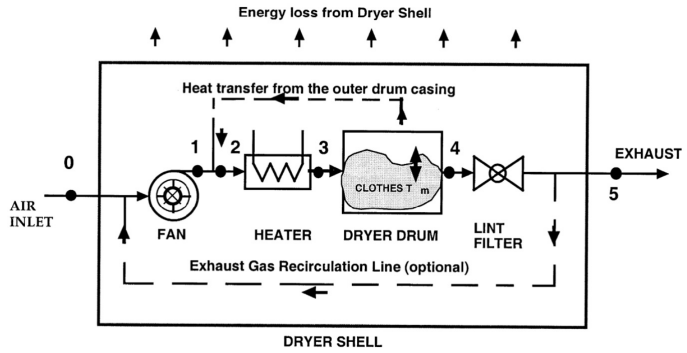


图8：半开放式回风干燥机周围控制体的示意框（Deans，2001）

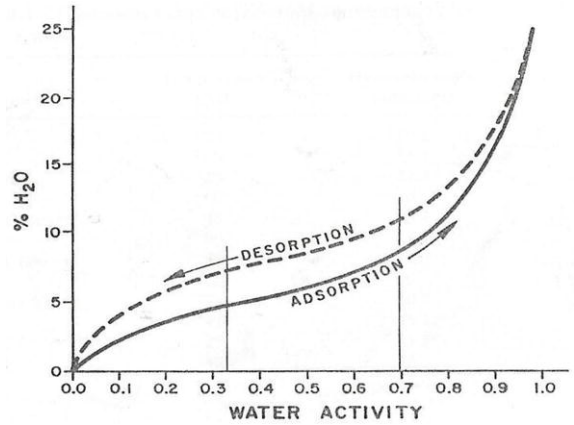


图9：典型的水分吸附等温线（Aviara，2020）

3.1 Lambert模型

如果不考察干燥周期中物理现象的理论层面，就很难理解机器参数之间的关系。因此，20世纪90年代以前的研究大多仅限于实验研究，彼此之间缺乏适当的相互关联。织物干燥周期的数学建模需要预先掌握基础物理知识，从而实现工艺设计并最大限度地降低能源成本（Kahveci 和 Cihan，2007）。

最早一项关注数学层面的干燥机研究由 Lambert 等人（1991）开展。他们的目标是基于 Chilton–Colburn 类比（也称为修正雷诺类比（C.engel 和 Ghajar））建立纺织品滚筒干燥机中干燥过程的传热传质模型，该类比联系了传热传质现象（Ashrae.，1985）。需要指出的是，这种方法已广泛应用于多孔介质、半导体、食品、农业、Condebelt 和蒸馏等领域的干燥研究中（Tsilingiris，2012，2015；Collazo-Abreu 等人，2018；Gu 等人，2018；Brummans，2019；He 等人，2020；Buysse，2021；Sabau 等人，2020；Nienke 等人，2021；Chasiotis 等人，2021）。在此基础上，他们通过以下关系估算了滚筒中的质量蒸发速率：

$$\dot{m}_{\mathrm{ev}} = kA\left(P_{\mathrm{t}} - P_{\mathrm{x}}\right) = kA(\omega_s - \omega_{out})\,, \qquad (1)$$

其中， k 和 A 分别为衣物的蒸发系数和表面积。通常将乘积 kA视为一个整体，称为面积传质系数。滚筒中的所有物理过程都可以用面积传质系数来描述，后文将对此进行更详细的说明。

P_{t} 和 P_{x} 分别为纺织品表面和干燥空气（主体空气）的水蒸气分压。 P_{t} 的估算方法如下：

$$P_{\mathrm{t}}\left(x_{\mathrm{t}}, T_{\mathrm{t}}\right) = P_{\mathrm{sat}}\left(T_{\mathrm{t}}\right) a\left(x_{\mathrm{t}}\right)\,, \qquad (2)$$

其中， P_{sat} 是温度的函数。水分活度 a 是待干燥介质含水量的函数。尽管水分活度还以复杂的方式取决于温度和过程方向（例如干燥而非润湿），在聚合层面，近似曲线的应用令人满意。描述 a 曲线在文献中通常称为吸附等温线。

吸附等温线展示了纺织品含水量与平衡相对湿度（水分活度）之间的关系。换言之，在给定的恒定温度下，吸附等温线表示每个湿度值所对应的含水量（Glaskova和Aniskevich，2009）。 a 增加时，含水量通常也会增加，但二者并非线性关系（Ghimire，2017）。这些曲线只能通过实验确定，无法通过计算显式推导。图9展示了一条典型的吸附等温线。如图所示，材料在蒸发和冷凝过程中的行为并不遵循同一条曲线。一般而言，这类曲线的形态可能各不相同，具体取决于织物材料。吸附等温线的另一种典型特征是滞后现象（Jiang等，2019）。

对于干燥过程，只需考虑解吸过程（蒸发）。首次尝试描述各种纺织品的解吸等温线是由（Krischer和Kast，1987）完成的，该研究被视为该领域的主要参考文献。Lambert 回归出以下关系式，用于估算活度系- 数（Lambert 等人，1991）：

$$a = 1 - \frac{\beta^* M_{\mathrm{c}} + \delta}{1 + \delta^{\gamma * M_{\mathrm{c}}}} \qquad (3)$$

其中， M_{c} 是衣物的含水量，其他系数取决于织物的类型。图10展示了各种织物的活度系数，即高孔隙率的织物（如羊毛）以及低孔隙率的织物（如尼龙和棉）。根据该图，棉织物的表面将在大部分干燥周期内处于饱和状态。值得注意的是，只有在干燥过程的后期，不同织物的解吸等温线才会变得显著。

需要注意的是，随着时间的推移，人们为织物干燥过程中的水分活度提出了更复杂的关系式。例如，基于含水量和衣物温度的 Yi 模型如下（Yi

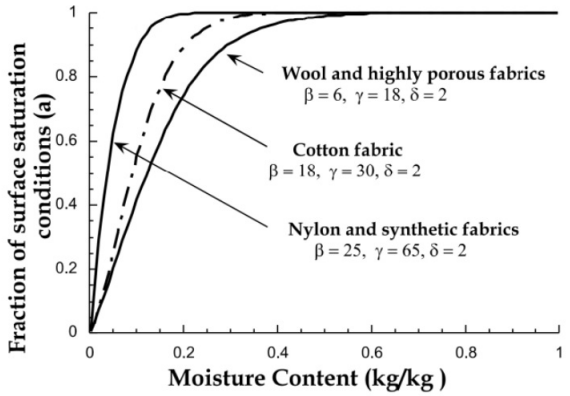


图10：不同织物的解吸等温线（Aviara，2020）

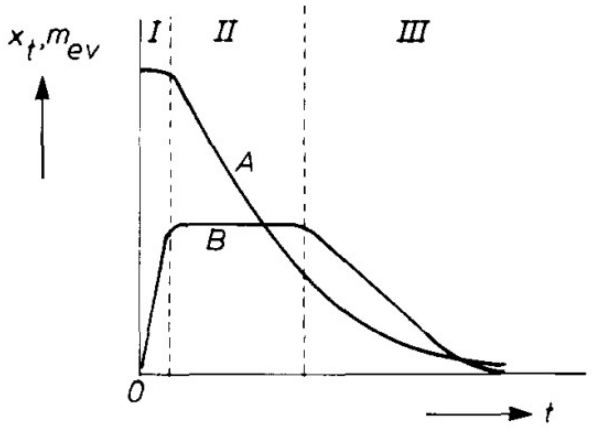


图11：干燥过程示意图：瞬态（I）、恒速阶段（II）和降速阶段（III）。（A）含水量 x_t 随时间 t 的变化；（B）蒸发速率 $\dot{m}_{ev}$ 随时间的变化（Lambert 等人，1991）

等，2015）：

$$a\left(x, T_{cl}\right) = 1 - e^{\left(-\alpha . x(t) . h_{fg} / k_B . T_{cl}\right)} . \tag{4}$$

借助公式 1，Lambert 报告了烘干机周期中的蒸发速率，并据此将其划分为三个阶段。通常，干燥过程从瞬态变化开始，由初始状态转变为稳态。尽管滚筒内可能发生一些局部蒸发，但加热器能量的大部分都用于提高衣物的温度。这一阶段也称为瞬态，如图 11 所示。在此期间，含水量几乎保持不变，而蒸发速率开始上升。

在下一阶段，即恒速阶段或稳态，含水量单调下降。换言之，输入功率主要用于蒸发衣物中的水分。需要注意的是，只有当纺织品的含水量足够高，能够使水分活度在至少一段时间内近似等于 1 时，才会出现这一阶段；这在干燥机中是常见情况。此外，在这一阶段，所有过程参数都趋于保持恒定，尤其是蒸发速率。水分活度等于 1 意味着蒸发速率不受解吸等温线影响。

当含水量 x_t 足够低时，水分活度会偏离 1。这是因为自由水表面的假设不再成立。水分活度降低的同时，蒸发速率也会下降。由此产生的过剩功率会直接用于加热纺织品和滚筒。因此，水分活度的降低会部分通过增加 P_{sat} （式 2）得到补偿。这便进入降速 阶段，其特征是排气温度升高，蒸发速率 $\dot{m}_{ev}$ 降低（Lambert 等人，1991）。

回到公式 1，剩下的未知量是面积传质系数 kA。然而，目前尚无通用的数学模型可用于描述这一参数，这反映了传质机制的复杂性。因此，文献中对该系数的处理方式各不相同。一些作者采用了.....的概念。

表3：导热系数（Bergman 等人，2011）

过程	h(W/m2·K)
自然对流	
Air	1∼10
水	200∼1000
强制对流	
Gas	20∼100
高压蒸气	500∼35000
水	1000∼1500
水的相变	
沸腾	2500∼3500
蒸气冷凝	5000∼25000

热质传递之间的类比，以处理这一变量（Huang等，2019）。修正刘易斯数可以关联对流传热和传质系-数，其定义如下（Shircliff，2016）：

$$\mathrm{Le}' = \frac{h}{\lambda C_P} \tag{5}$$

对流传热系数 h 的大致范围列于表3。乍看之下，似乎应考虑基于相变的系数；但仔细来看，传热实际上发生在衣物中的水与上方的饱和空气层之间。因此，必须将其视为强制对流，故 $h = 20 \sim 100$ 的数值似乎更适用。然而，目前尚不清楚恰当的数值是多少。考虑到 h 上限与下限之间的差异很大，不够精确的取值可能会显著改变蒸发速率。值得一提的是，式1中有效衣物面积 A 的确定较为复杂，文献对此采用了不同的处理方法（Huang等，2019；Adapa等，2002a,b）。

上述复杂性使作者们倾向于依据实验数据采用恒定的面积传递系数（Deans，2001）。例如，Bengtsson等（2014）采用了一个数值为

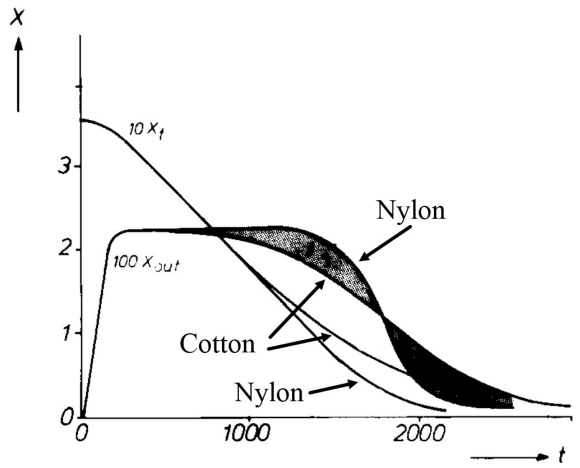


图 12：两种织物干燥过程示意图（Lambert 等人，1991）

$0.036kg/sBar$。尽管这种方法源自实验数据，精度更高，但采用恒定系数仍然并不理想。如前所述，尤其是在干燥的最后阶段，蒸发速率会下降。因此，如果要模拟整个干燥周期，这种方法并不适用。因此，文献中往往在模拟热泵滚筒式干衣机时采用这一假设。基本上，考虑到热泵循环带来的复杂性，采用恒定的面积传递系数是合理的。

回到 Lambert 模型，通过公式 1，他能够计算尼龙和棉织物随时间变化的蒸发速率。所得蒸发曲线及含水量如图 12 所示。两种织物的含水量在瞬态 和恒速阶段 期间表现出相似的变化规律。在填充速率 阶段开始时存在偏差，此时水活度不同，且远离 1。

还有其他方法可用于推导滚筒式干衣机中蒸发的关系式。然而，干燥模型可能具有挑战性且计算成本高昂（ Turner 和 Mujumdar，1996）。Ng 和 Deng 基于终止控制方法开发了一种衣物干燥半经验模型（Ng 和 Deng，2008）。然而，他们的模型仅涵盖干燥周期的最后恒速阶段和降速阶段。Haghi 采用了一个数学模型，其速率方程描述了织物纤维中的水分与织物孔隙内空气中的水分之间的传质过程（Haghi，2001；Nordon 和 David，1967）。这类模型能够提供一些局部信息，但过于复杂且计算成本过高，不适合用于优化。此外，这些模型需要大量关于热物性以及热质传递系数的输入信息，因此没有受到太多关注。

3.2 Deans模型

由于 Lambert 模型简单且切实可行，已有多项研究采用或改进该模型来预测干燥周期（Bejan等人，2004；Lee等人，2006a；Stawreberg 和 Nilsson，2013）。Deans 根据质量和能量平衡建立了数学模型，用于分析干燥机系统的干燥性能（Deans，2001；Jian 和 Zhao，2017）。该模型重点研究烘干机滚筒内部的热质传递流动，通过对干燥机各节点处的空气/水蒸气混合物进行总质量和能量平衡来实现分析。这些节点的位置，以及空气/水蒸气流动和能量流动路径的说明，见图 8。重构后的模型使其能够追踪干燥机的能量输入和损失，同时纳入气流再循环。对空气/水蒸气混合物采用总能量平衡，可识别出不重要、因而可以忽略的部件。模型采用模块化结构，因此能够在循环过程中调整加热器功率等机器输入参数。在研究潜在节能措施时，这种方法十分重要（Deans，2001）。

坦率地说，Dean的模型主要关注烘干机滚筒，因为该部件的高效运行决-定了整个设备中的质量和能量流。该模型采用的主要简化假设是：织物、衣物的含水量与滚筒壁具有相同的温度。由于在干燥周期中最难测量的变量是衣物温度（Gluesenkamp等人，2018），因此他们根据滚筒中的能量平衡将该变量表示如下（Deans，2001）：

$$\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{clo}}}{\mathrm{d}t}=\frac{H_{\mathrm{in}}-H_{\mathrm{out}}-H_{\mathrm{evap}}-\dot{Q}_{\mathrm{loss}}}{(\dot{m}C_p)_{\mathrm{dry\ clo}}+(\dot{m}C_p)_{\mathrm{moist}}+(\dot{m}C_p)_{\mathrm{d}}}\,, \tag{6}$$

可改写如下（Deans，2001）：

$$\frac{T_{\mathrm{out}}-T_{\mathrm{clo}}\ -\left(\frac{H_{\mathrm{evap}}-\dot{Q}_{\mathrm{loss}}}{hA}\right)}{T_{\mathrm{in}}-T_{\mathrm{clo}}-\left(\frac{H_{\mathrm{evap}}-\dot{Q}_{\mathrm{loss}}}{hA}\right)}=\mathrm{e}^{-\left[\frac{hA}{(m_{\mathrm{a}}C_p)_{\mathrm{average}}}\right]}\,, \tag{7}$$

其等于（Lee等人，2019）：

$$T_{\mathrm{c}+dt}=T_{\mathrm{c}}+\left[\frac{\dot{m}_a\left(h_{\mathrm{in}}\ -h_{\mathrm{out}}\ \right)-\dot{Q}_{\mathrm{loss}}\ +\dot{m}_{\mathrm{evap}}\,h_{\mathrm{evap}}}{\dot{m}_{\mathrm{dry\ clo}}Cp_{\mathrm{dry\ clo}}+\dot{m}_{\mathrm{dry\ clo}}Cp_{moist}+\dot{m}_dCp_d}\right]\Delta t\,. \tag{8}$$

式 8 是一个广为人知的方程，用于估算滚筒内的温度变化，已在多项研究中得到应用（Bejan等人，2004；Lee等人，2006a；Stawreberg 和 Nilsson，2013）。比热容取决于衣物和机器材料，通常假定为常数，因为其随温度变化的幅度可以忽略不计。 h_{evap}是汽化焓（蒸发潜热），是温度的函数。 $\dot{m}_a$ 是进入滚筒的干空气质量流量，通过实验测定。

Q_{loss} 是从滚筒干燥机的外壁传递到环境空气中的对流传热损失，这是

气体混合物温度和环境温度以及机器尺寸的函数。该项会随着气体混合物温度的变化而在循环的每个步骤中发生变化。不过，热量损失最大的是加热器模块，因为此处气体混合物的温度最高。为简化起见，Deans 将其视为加热器模块温度的函数。最后，热量损失项的形式如下（Bengtsson等，2014）：

$$Q_{\text{loss}} = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{a}}}{L_{th}} \cdot A_{ext} \left(T_{hater} - T_{amb}\right) , \tag{9}$$

其中，λ_{air} 为空气的导热系数。L_{th} 和A_{ext} 分别为干燥机外壳的厚度和外部表面积。努塞尔数是对流传热与导热机制的比值，其定义如下（Bergman 等人，2011；Granryd 和 Melinder，2005）：

$$\text{Nu} = 0.13 \cdot (\text{Gr} \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad 10^8 < \text{Gr} \cdot Pr < 10^{12} \tag{10}$$

Gr 和 Pr 分别为格拉晓夫数和普朗特数，其定义如下：

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{Momentum diffusivity}}{\text{Thermal diffusivity}} \tag{11}$$

$$\text{Gr} = \frac{g\beta \left(T_{heater} - T_{ambient}\right) {L_{th}}^3}{\nu^2} = \frac{\text{Buoyancy Force}}{\text{Viscous Force}} \tag{12}$$

其中，g 和 β 分别为重力加速度和热膨胀系数。

Deans 提出了以下关系式来计算蒸发速率，以取代 Lambert 的关系式（公式 1）：

$$\dot{m}_{\text{evap}} = kA \left[a\omega_{\text{M}} - \frac{\left[\omega_{\text{inlet}} + \omega_{\text{exhaust}}\right]}{2} \right] , \tag{13}$$

因此：

$$\dot{m}_{\text{a}} \left[\omega_{\text{inlet}} - \omega_{\text{exhaust}}\right] = kA \left[a\omega_{\text{M}} - \frac{\left[\omega_{\text{inlet}} + \omega_{\text{exhaust}}\right]}{2} \right] \tag{14}$$

为简化起见，一些作者认为衣物的含湿量等于入口空气的含湿量（Lee 等人，2019）：

$$\dot{m}_{\text{a}} \left[\omega_{\text{inlet}} - \omega_{\text{exhaust}}\right] = kA \left[a\omega_{\text{inlet}} - \frac{\left[\omega_{\text{inlet}} + \omega_{\text{exhaust}}\right]}{2} \right] , \tag{15}$$

其中，ω_{M}、ω_{inlet} 和 ω_{exhaust} 分别为衣物表面饱和空气以及滚筒入口和出口处空气的含湿量。$\dot{m}_{\text{a}}$ 为入口处的干空气质量流量。方程 14 中唯一的未知量是出口处的比湿 $\omega_{exhaust}$，可通过时间确定，进而计算出蒸发速率 $\dot{m}_{\text{evap}}$。

通过求解能量和质量平衡方程，Deans 预测了干燥机中各变量随时间的变化，如图 13 所示。滚筒相关参数显示在左侧。相对湿度（图表 A）预测显示，滚筒内的相对湿度在几乎整个干燥周期内均为 100%，但开始阶段和末尾阶段（分别为瞬态阶段和降速阶段）除外。衣物温度和出口温度（图表 B 和 C ）的变化趋势相似。含水量的变化（图表 D ）与前文所述（图 11）相近。右侧展示了有关整个控制体（图 8）的其他指标。

此外，他还通过数值方法成功对干燥时间和效率进行了敏感性分析，如图 14 所示。以系统当前运行状态作为设定点（图中的交点），通过数值方法估算了输入功率、衣物质量、环境温度和相对湿度以及入口流量变化对干燥时间和能耗的影响。环境湿度升高会使干燥时间延长、能耗增加；而环境温度、空气流量和输入功率升高，则会加快干燥并降低能耗。需要指出的是，输入功率包括风扇、滚筒旋转和加热器的功率。

Deans 提供的数值方法进一步帮助后续研究人员对衣物干燥循环进行建模（Stawreberg 和 Nilsson，2013；Somdalen 和 K¨ohler，2018；Huang等，2019）。Gluesenkamp 几乎采用了相同的方法来评估干燥性能（Gluesenkamp等人，2018，2019）。如图 15 所示，滚筒中一件衣物的显热和潜热变化可描述如下：

$$\dot{m}_a c_p dT = h \; dA \left(T_{\text{surf}} - T\right) \tag{16}$$

$$\dot{m}_a h_{fg} d\omega = k \; dA \left(\omega_{\text{surf}} - \omega\right) h_{fg} \tag{17}$$

其中，T_{surf} 和 ω_{surf} 分别为织物表面的温度和湿度比，并假设它们在整个滚筒内均匀分布。A 和 h_{fg} 分别为湿表面积和水的蒸发潜热。对于每个常微分方程，在假设表面温度空间均匀的情况下，可对整个表面积分（Gluesenkamp 等人，2019）。由此得到热质传递方程，分别如式 18 和式 19 所示：

$$T_{\text{out}} = T_{\text{surf}} - \left(T_{\text{surf}} - T_{\text{in}}\right) e^{-NTU} \tag{18}$$

$$\omega_{\text{out}} = \omega_{\text{surf}} - \left(\omega_{\text{surf}} - \omega_{\text{in}}\right) e^{-NTU} \tag{19}$$

其中，NTU 定义为传递单元数（Shen 等，2016）：

$$NTU = \frac{hA_t}{\dot{m}_a c_p} , \tag{20}$$

或作为换热器的一般规则，Bergman 等人（2011）：

$$\text{NTU} = -\ln(1 - \varepsilon) \tag{21}$$

通过改写公式 18 和 19，他们引入了两个参数，即热湿传递有效性，用于表征干燥周期的效率：

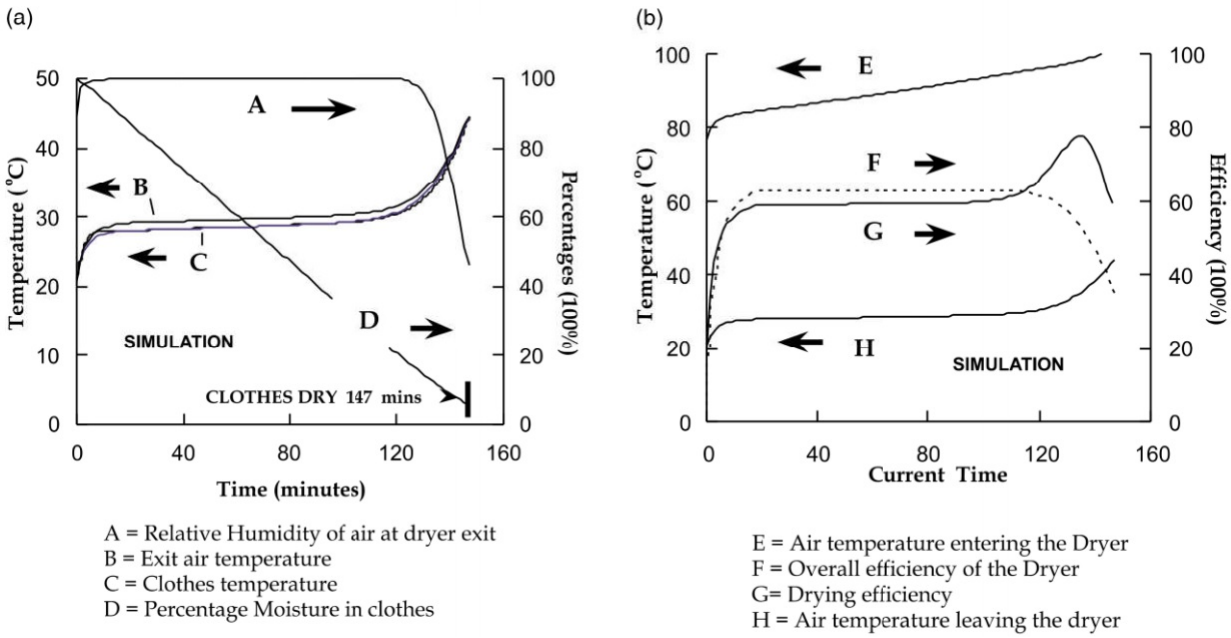


图13：Deans 数值模型的结果（Deans，2001）

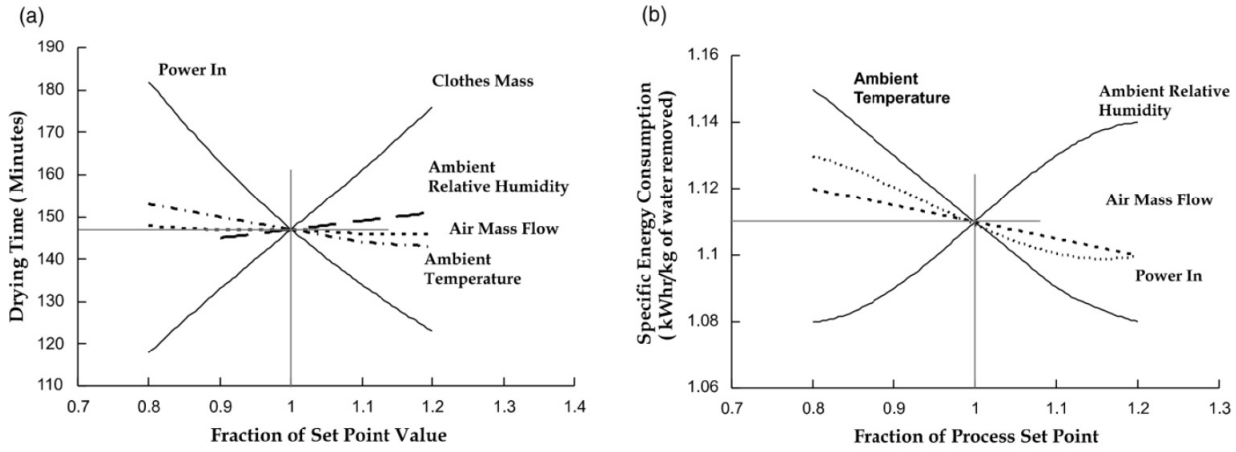


图14:　　干燥时间和过程效率对设计参数的敏感性（Deans，2001　　）

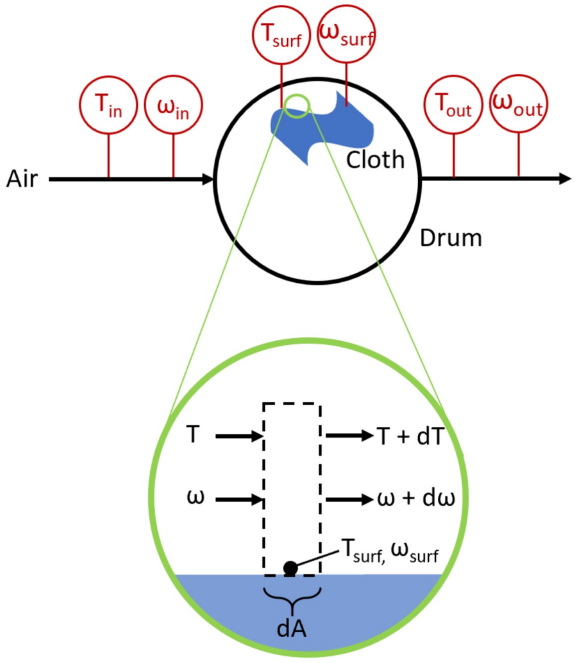


图15：干燥机滚筒内热质传递过程的宏观层面（上）和微分视图（下）（Gluesenkamp 等人，2019）

$$\varepsilon_{\mathrm{H}}=1-\frac{\mathrm{T}_{\mathrm{surf}}-\mathrm{T}_{\mathrm{out}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{surf}}-\mathrm{T}_{\mathrm{in}}} \tag{22}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{M}}=1-\frac{\omega_{\mathrm{surf}}-\omega_{\mathrm{out}}}{\omega_{\mathrm{surf}}-\omega_{\mathrm{in}}} \tag{23}$$

指标 in、out 和 $surf$ 分别表示滚筒入口、出口和衣物表面的区域。滚筒入口和出口处的温度与比湿通过传感器直接测量。由于衣物的温度和湿度难以测量，他们采用了以下两个假设。

首先，假设衣物表面处于饱和状态：

$$\omega_{\mathrm{surf}}=\omega_{\mathrm{surf,sat}} \tag{24}$$

由此可以根据表面温度计算含湿量。结合公式23和24：

$$\varepsilon_{\mathrm{M}}=1-\frac{\omega_{\mathrm{surf,sat}}-\omega_{\mathrm{out}}}{\omega_{\mathrm{surf,sat}}-\omega_{\mathrm{in}}} \tag{25}$$

$\omega_{\mathrm{surf,\ sat}}$ 是衣物表面温度下的饱和蒸汽压力（即 $P_{w,\ sat}=f(T_{surf})$）和大气压力 P_a 的函数（Gluesenkamp 等人，2018）：

$$\omega_{\mathrm{surf,sat}}=\frac{0.622P_{w,sat}|_{T_{\mathrm{surf}}}}{\left(P_a-P_{w,sat}|_{T_{\mathrm{surf}}}\right)} \tag{26}$$

回想一下，Lewis数刻画了同时存在对流热质传递的流动：

$$\mathrm{Le}=\frac{\mathrm{Sc}}{\mathrm{Pr}}=\frac{\alpha}{D}=\frac{\text{Thermal diffusivity}}{\text{Mass diffusivity}} \tag{27}$$

其中，D 是扩散系数。Sc 和 Pr 分别为施密特数和普朗特数。假设热质传递效能相等（即假设刘易斯数为1），则式 22 和 23 也相等：

$$\varepsilon_{\mathrm{H}}=\varepsilon_{\mathrm{M}} \tag{28}$$

通过减少变量，他们可以通过求解公式22至28来估算干燥周期的效率。

Gluesenkamp 估算了不同试验中 3kg 衣物干燥负载的干燥效能，如图 17 所示。因此，停留时间的增加对效能影响很小。而气流量和入口温度在干燥的所有阶段都会提高效能。

随后，他们引入了一种用于蒸发速率回归的量纲分析，该分析将在第 3.4 节中讨论。

Deans 模型基于零维数值分析来求解能量平衡。一些作者通过计算衣物之间的导热，考虑了滚筒轴向上的温度变化（Wei 等人，2017）。然而，与传统的零维模型相比，所提出的一维方程组在准确度方面并未显示出显著提升。

值得一提的是，许多研究采用了与 Deans 和 Lambert 类似的方法（即能量和质量平衡）来评估干燥机性能。不同之处在于它们在过程中纳入的细节。例如，Conde 对配备热回收换热器的干燥机进行了评估（通常为交叉流空气-空气换热器，用于预热滚筒入口处的空气流）（Conde，1997）。Huelsz 等人将干燥机组件的辐射和对流热损失均纳入考虑，以获得更高的准确度（Huelsz 等人，2013）。其能量/质量平衡模型示意图如图 18 所示。与 Deans 的模型（8）相比，不同之处在于忽略了空气旁路，并为控制体增加了不同的损失项。Jian 和 Zhao 在干燥机的冷凝器部分采用了板翅式换热器（Jian 和 Zhao，2017），并报告了水流量对干燥性能的影响。Lee等人研究了热泵存在时的干燥性能（Lee等人，2019）。他们基于以下关系式评估干燥效率（Prasertsan 等人，1996），该关系式在相关研究中被频繁使用：

$$\eta_{dry}=\frac{T_{in}-T_{out}}{\mathrm{T_{in}}-T_{out}}=\frac{\omega_{out}-\omega_{in}}{\omega_{\mathrm{sat}}-\omega_{\mathrm{in}}} \tag{29}$$

另一个经常报告的参数是比湿提取率（SMER）（Lee和Kim，2009）：

$$\mathrm{SMER}=\frac{\dot{m}_{ev}}{PO_{tot}} \tag{30}$$

3.3 Yi 模型

确定式 14 中衣物比湿 ω_{M} 的正确表达式至关重要。这是

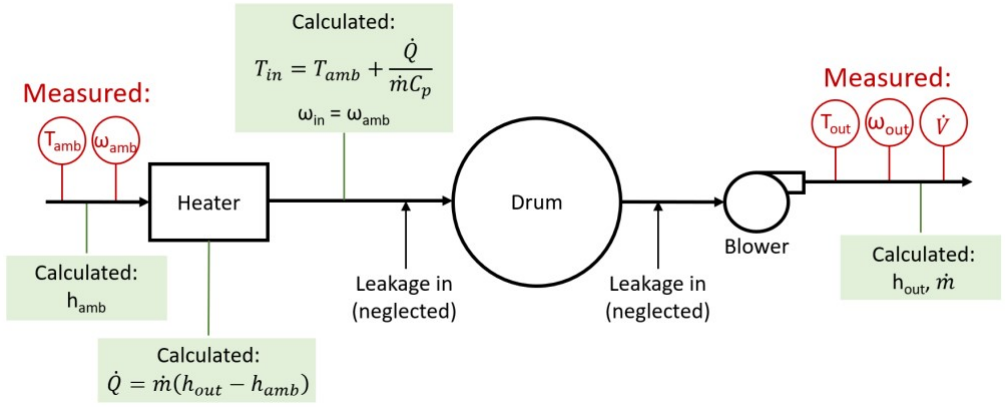


图 16：实验评估中的工艺及仪器示意图（Gluesenkamp 等人，2018）

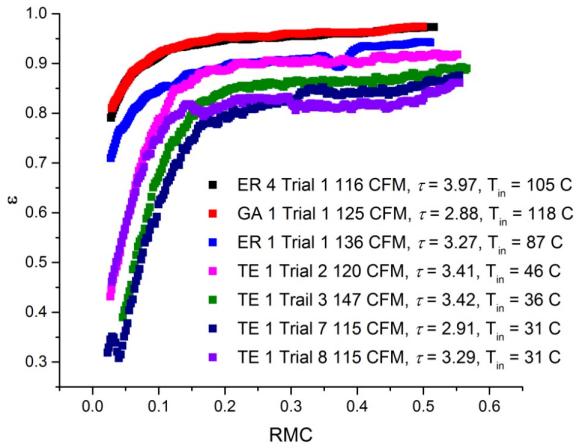


图 17：不同滚筒停留时间、风机流量和滚筒入口温度下的剩余含湿量（RMC）效能（Gluesenkamp 等人，2019）

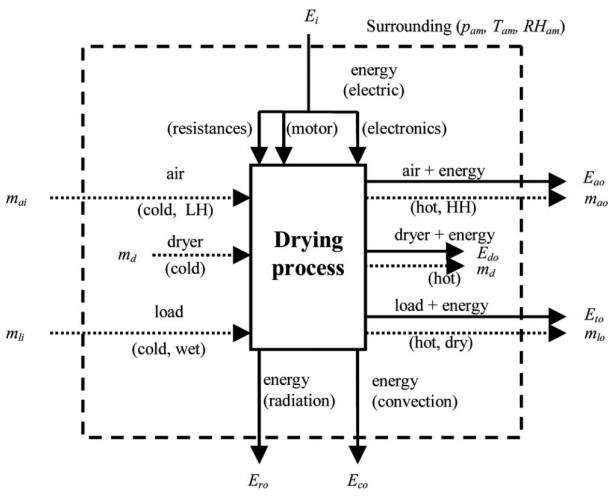


图 18：干燥过程示意图，展示质量（点状箭头）和能量通量（连续箭头）（Huelsz 等人，2013）

可以将其视为等于饱和比湿，即 $\omega_{\mathrm{M}} = \omega_{sat}$。尽管先前的方法采用传统等温线图（图 10）来考虑织物材料的影响，但这种方法基于实验数据的回归（（Krischer 和 Kr¨oll，2013））。相反，Yi 建议利用基于玻尔兹曼常数的概率密度函数（PDF）来解释其背后的物理机制（Yi 等，2015）。为此，他们首先量化了衣物中未蒸发水 $m_w^{\text{no -evap}}{}_{,\mathrm{cl}}$ 的量，表示为：

$$m_{w,\mathrm{cl}}^{\text{no -evap}}\ (\beta, \chi, T_{\mathrm{clo}}) = m_{w,\mathrm{clo}}^{\max} a\,(\beta, \chi, T_{\mathrm{clo}}) \tag{31}$$

$$a\,(\beta, \chi, T_{\mathrm{clo}}) = 1 - \exp\left(-\frac{\beta\chi Q_{\mathrm{LH}}}{k_B T_{\mathrm{clo}}}\right) \tag{32}$$

其中，$m_w^{\max}{}_{,\ \mathrm{clo}}$ 为衣物中的最大含水量，$a\,(\beta,\ \chi,\ T_{\mathrm{clo}})$为活度系数，$\beta$是用于表征衣物面料类型的性质参数，$Q_{\mathrm{LH}}$ 为汽化潜热，k_B 为玻尔兹曼常数（Huang，2008）。因此，他们能够通过数值方法估算水活度系数。图 19 展示了不同衣物类型的水活度系数对比。显然，他们的模型能够追踪实验趋势。

滚筒内蒸发速率的估算基于衣物表面的流体膜类比。因此，对于邻近液膜，空气中的水量不能超过其饱和值。由此，ω_{M}可由以下不等式表示：

$$\gamma m_{w,\mathrm{clo}}^{\max}\,(T_{\mathrm{clo}})\,a\,(\beta, \chi, T_{\mathrm{clo}}) \geq m_{\mathrm{air}}\,\omega_{w,\ \mathrm{air}}^{\mathrm{sat}}\ (T_{\mathrm{clo}})\,a(\beta, \chi, T) \tag{33}$$

其中，γ 是衣物界面处的解吸加权因子，其值小于 1。他们使用 MATLAB 软件对这组微分方程进行了数值求解。他们针对两种衣物（图 20）和不同负载质量（图 21）验证了所得结果。如图所示，合成织物和棉织物在干燥过程中呈现出相近的温度范围。此外，负载质量对干燥时间的影响呈线性。

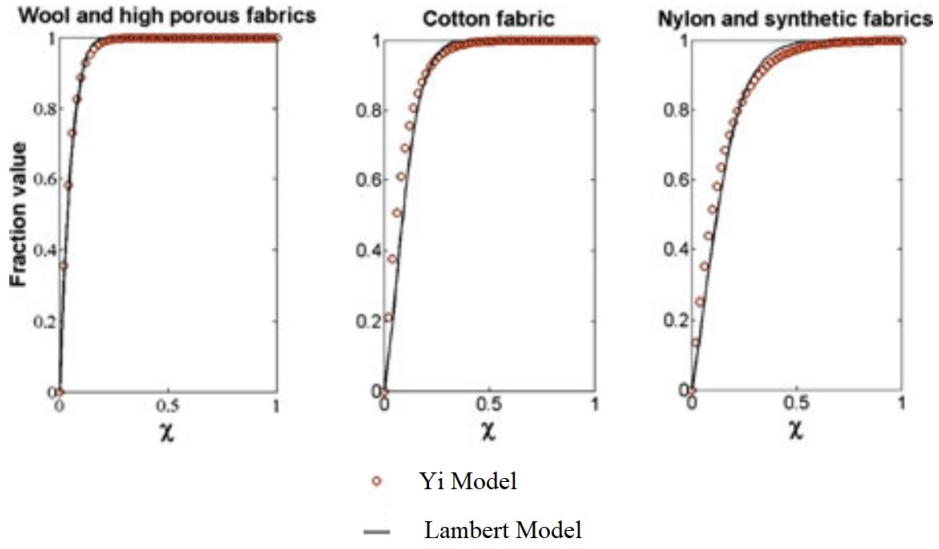


图 19：不同织物采用数值法（Yi）和实验法（Lambert）得到的活度系数（Yi 等人，2015）

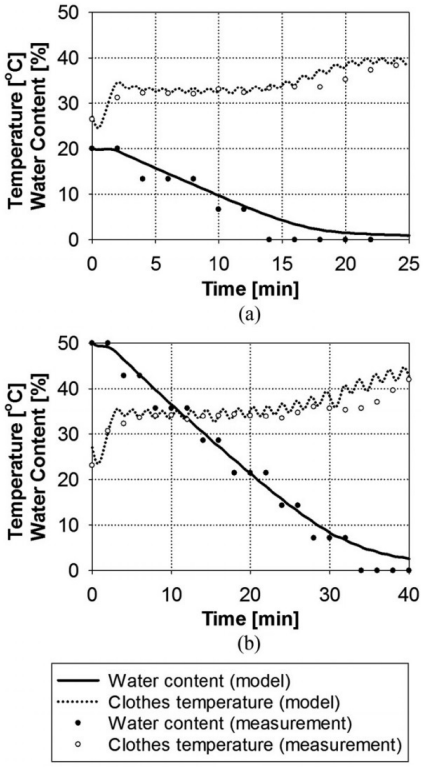


图 20：模拟与实验所得衣物温度和含水量的对比：（a）合成纤维织物；（b）棉织物（Yi 等人，2015）

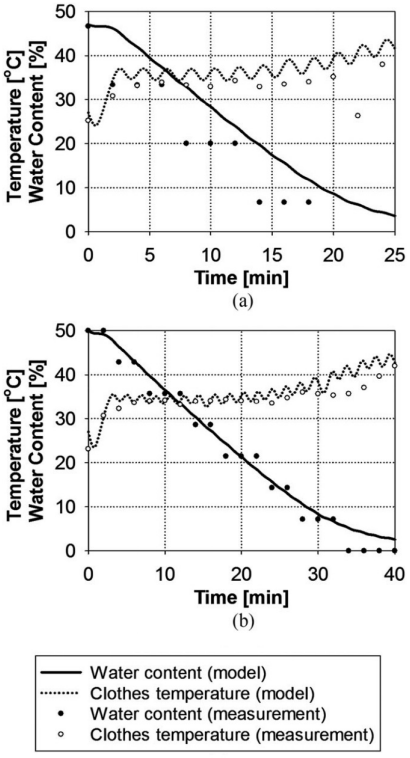


图 21：不同衣物负载下衣物温度和含水量的对比：（a）1.5 kg；（b）2.8 kg（Yi 等人，2015）

3.4 回归

此前的所有方法都利用 Chilton-Colburn 类比来研究滚筒中的传质。然而，一些作者尝试采用基于舍伍德数的量纲分析，将机器参数与蒸发速率联系起来。Bassily 的研究被认为是这一领域的开创性研究之一（Bassily and Colver，2003a）。

Sherwood数（Sh）（也称为传质努塞尔数）是对流传质与扩散传质速率之比（Cochran 等，2009）。

$$\mathrm{Sh} = \frac{h_{evap} L}{D} = \frac{\text{Convection mass transfer}}{\text{Diffusion rate}} \tag{34}$$

其中， h_{evap} 和 L 分别为对流传质系数和长度尺度。

Bassily 建立了一个无量纲关联式，用于估算面积-舍伍德数 $\mathrm{Sh_a}$（其定义将在后文给出），该数是滚筒角速度 $\mathrm{N_d}$、织物重量 $\mathrm{M_t}$、雷诺数 Re、施密特数 Sc 和古赫曼数 Gu 的函数。施密特数和古赫曼数的定义如下（Smolsky 和 Sergeyev，1962；Kovacı 等，2022）：

$$\mathrm{Sc} = \frac{\nu}{D} = \frac{\text{Momentum diffusivity}}{\text{Diffusion rate}} \tag{35}$$

$$\mathrm{Gu} = \frac{T_g - T_{gw}}{T_g} \tag{36}$$

其中， T_g 和 T_{gw} 分别为气体干球和湿球温度。

他们使用 32 次实验运行，得出了 Sh_a 的以下关系式：

$$\mathrm{Sh}_a = 0.028 M_t^{0.58} N_d^{0.06} \mathrm{Gu}^{-1.38} \mathrm{Re}^{0.35} \mathrm{Sc}^{1.22} \tag{37}$$

然后，可按如下公式使用面积-舍伍德数 Sh_a 确定面积传质系数 kA（Rasti 和 Jeong，2021）：

$$kA = \frac{\mathrm{Sh}_a \times D}{d_d}\ , \tag{38}$$

其中， d_d 和 D 分别为滚筒直径和扩散系数。

扩散系数是瞬时含水量 $C(t)$ 的函数：

$$D = -1.71778 \times 10^{-7} \left(\frac{C(t)}{1.2727} \right)^5 \tag{39}$$

测量得到的面积-舍伍德数与关联式计算的面积-舍伍德数之间的比较如图 22 所示。

近来的文献越来越倾向于根据机器输入参数回归干燥指标（Gluesenkamp等人，2019；Novak 等，2019）。Noval等人提出了干燥时间、蒸发速率和面积传质系数与体积流量、入口温度及相对湿度之间的关系，如下所示：

表 4：方程 45 中的系数（Gluesenkamp 等人，2019）

系数	AHAM 2009	AHAM 1992
a	0.677584	0.354049
b_1	-4.456546	-2.11532
c_1	0.015385	0.00212
d_1	0.290916	0.403633
d_2	-0.071735	-0.087495
d_3	0.007304	0.008034
d_4	-0.000249	-0.000252

$$t = 39434 \times \dot{V}_{\mathrm{in}}^{-0.9065} T_{\mathrm{in}}^{-0.8338} \mathrm{RH}_{\mathrm{in}}^{0.1598} \tag{40}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{evap}} = 5.53 \times 10^{-7} \dot{V}_{\mathrm{in}}^{0.8305} T_{\mathrm{in}}^{0.8066} \mathrm{RH}_{\mathrm{in}}^{-0.1914} \tag{41}$$

$$kA = 9.06 \times 10^{-8} \dot{V}_{\mathrm{in}}^{0.6824} T_{\mathrm{in}}^{-0.5561} \mathrm{RH}_{\mathrm{in}}^{-0.0293} \tag{42}$$

Gluesenkamp推导出了一个用于预测滚筒内传热传质现象效能的相关式。效能是以下五个参数的函数：织物重量 m_c、织物含水量 m_w、滚筒内空气重量 m_a、进气流量 $\dot{m}_a$以及下落时间（即一件衣物从滚筒顶部落到底部所需的时间）t：

$$\varepsilon = f\left(m_{clo}, m_w, m_a, \dot{m}_a, t\right) \tag{43}$$

通过 Buckingham π 定理，他们得到了以下无量纲参数：

$$\pi_1 = \varepsilon \pi_2 = \frac{\dot{m}_a t}{m_a} \pi_3 = \frac{m_{clo}}{m_a} \pi_4 = \frac{m_w}{m_a} \tag{44}$$

他们对 π_2 和 π_3采用了一阶多项式，而对 π_4则采用了四阶多项式：

$$\pi_1 = a + b_1\pi_2 + c_1\pi_3 + d_1\pi_4 + d_2\pi_4^2 + d_3\pi_4^3 + d_4\pi_4^4 \tag{45}$$

他们开展了一组实验，以确定 HLD-1-1992（100% 类棉床单、桌布、浴巾、长袖衬衫、T恤衫、枕套、短裤、洗脸巾、手帕（AHAM，1992））和 HLD-1-2009（100% 棉制品，包括床单、枕套、毛巾（AHAM，2009））中公式 45 的系数。系数值如表 4 所示。

尚无关于干燥机输入参数敏感性分析的报告，因此，对于回归中的自变量尚未达成一致。

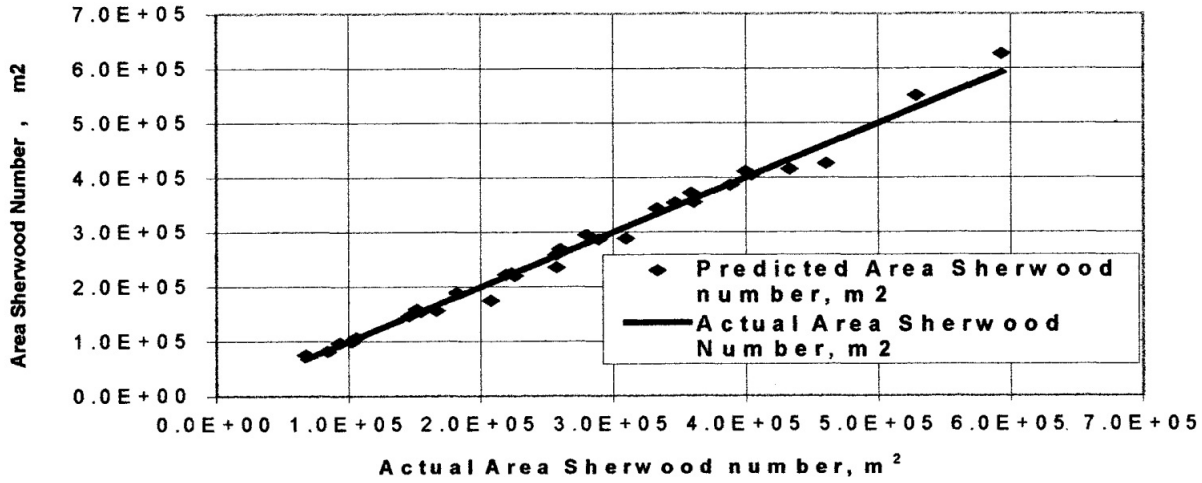


图 22：测量和预测的面积舍伍德数（Bassily 和 Colver，2003 a)

模型。例如，Gluesenkamp 未考虑滚筒转速或空气温度（Gluesenkamp 等，2019）。

此外，虽然回归方程的实现速度很快，因为无需求解任何微分方程，但这些关联式的有效性仅适用于基准机器。换言之，所述方程无法推广到其他滚筒式干衣机。在这方面，Rasti 和 Jeong 比较了 Bassily、Gluesenkamp 和 Novak 提出的回归模型（（Rasti 和 Jeong，2021））。对于最低和中等衣物负载，Gluesenkamp 和 Novak 的模型分别能够捕捉蒸发的物理过程。然而，在高负载（ 9kg）下，没有任何模型能够预测这些现象。值得一提的是，对于该特定机器，Bassily 模型在所有情况下都未能捕捉其物理过程。

3.5 运动动力学

随着测量技术的发展，近年来滚筒式干衣机领域出现了一个新的研究方向。在这方面，一些作者尝试将蒸发热力学与滚筒内衣物的运动联系起来。可利用现代光学方法和高速视频采集仪器（如正电子发射粒子追踪（PEPT））来可视化流动和衣物，并追踪干燥过程中的织物。随后，借助图像处理技术，主要是神经网络（NN）方法，可以推导出示踪织物的重心及其运动特性。典型流程如图 24 所示。

Yu 等人根据衣物运动推导出了干燥速率和单位能耗除湿量的关系（Yu 等人，2021b）。他们报告的单位能耗除湿量如下：

$$\mathrm{SMER} = -4.1 - 0.1x_1 + 0.02x_2 + 0.69x_3\ , \qquad (46)$$

其中， x_1 和 x_2 分别为示踪物总运动面积与织物铺展面积的比值，且 x_3 是滚筒中心与示踪织物中心之间的距离。如图25所示，通过图像处理技术推导出干燥过程中衣物的动态特征，包括衣物轨迹、速度和停留时间。因此，还得出了其他结果，例如运动状态（依据图7中的说明）。Yu 等人（2021a）和Lee等人（2022）也开展了类似研究。

这种技术也被认为与具体机器有关。由于关于这种技术的研究较少，因此很难将其与其他方法进行比较并作出准确评估。

4 蒸发速率

上述方法涵盖了有关滚筒式干衣机的大部分文献，这些文献主要侧重于预测干衣机运行过程。有趣的是，所有数值研究和大多数实验研究都有一个共同目标，即评估蒸发速率。了解蒸发速率后，便可确定用于评估系统性能的重要参数。在这些参数中，单位能耗除湿量和干燥时间最为重要。其他辅助变量，如干燥均匀性，也可以与蒸发速率相关（Yu 等人，2018；Wei 等人，2018；Hu 等人，2016；Chen-Yu 和 Emmel，2018）。此外，干燥速率会影响干燥周期内衣物的起皱情况（El Fil 和 Garimella，2022）。

简而言之，文献中有四种主要方法可用于预测这一数值。下文将介绍这些方法的详细内容。

4.1 直接法

该方法旨在直接测量滚筒内各部件的重量。随着滚筒旋转，滚筒内的物品持续受到离心力和科里奥利力的作用。因此，测量值可能会出现较大的波动。该方法在文献中并不常见，不过——

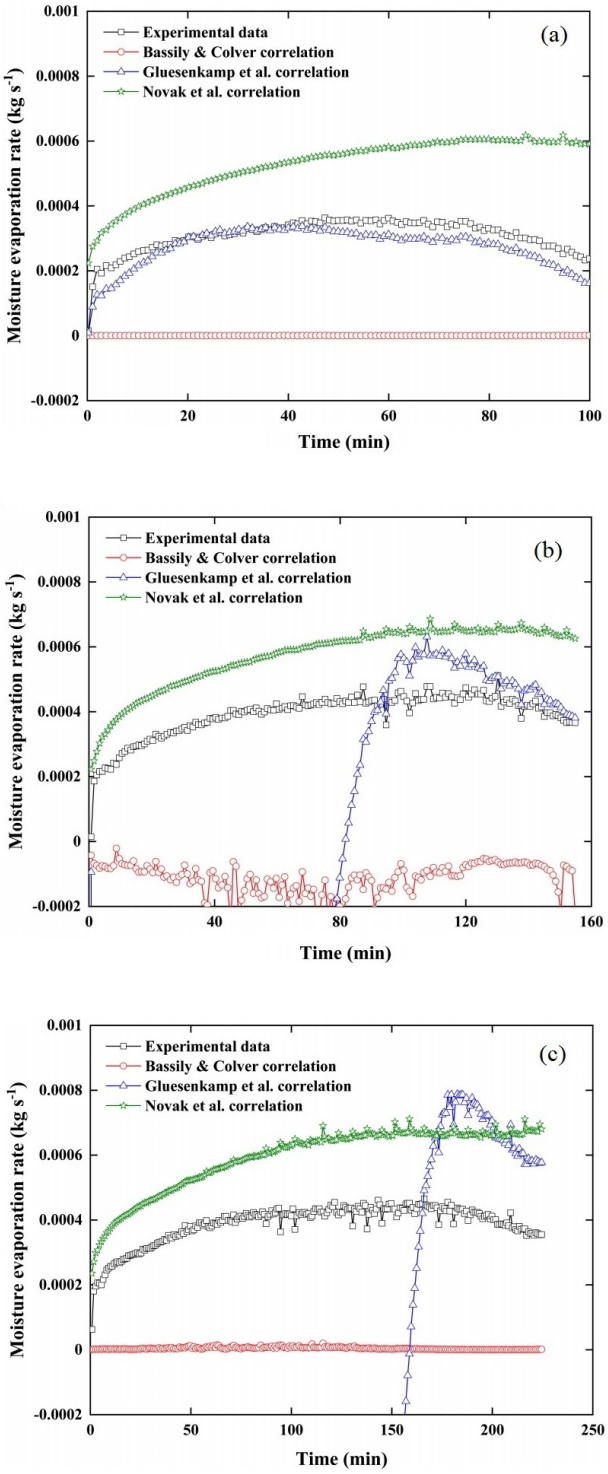


图23：不同负载下不同回归模型的蒸发速率比较；(a) 3 kg，(b) 6kg 和 (c) 9 kg（Rasti 和 Jeong，2021）

然而，曾被一些作者采用（Higgins 等人，2003）。Higgins等人采用了采样频率为1sec的台秤，对滚筒内物料进行连续测量。图26 展示了含水量随时间的变化。如图所示，所得数据存在噪声，但仍可通过加入特定的滤波器和平均函数加以利用。

4.2 恒速阶段

文献中有一些研究在整个干燥周期内采用恒定蒸发速率（Bansal 等，2001）。We 等人在其数值方法中采用了 $3.5\,\frac{kg}{h}$ 的蒸发速率（Braun 等，2002）。

滚筒内温度和含水量随时间呈非线性变化趋势。例如，衣物温度和水分随时间的典型变化如图27和图28所示。采用所谓的蒸发恒速阶段可能会导致对干燥起始（瞬态）阶段和最终（降速阶段）阶段的估计产生误差。

如前所述，恒定蒸发速率这一理念仅用于结合热泵循环的研究中。在这些情况下，重点主要放在热泵的性能上。此外，由于考虑热泵会增加数值模型的复杂性，因此这一假设是可以接受的。因此，不建议将这种方法用于冷凝器滚筒干燥机。

4.3 Chilton–Colburn 类比

作为最早提出滚筒式干衣机数学模型的先驱之一，Lambert 估算了蒸发速率（式 1），其中面积传质系数 kA 可视为常数，其数值可通过实验（回归）或 Sherwood 类比确定。完整说明已在前文给出。

图 30 总结了上述蒸发速率计算方法及重要输出指标。表 5 还列出了其他一些研究中用于评估蒸发速率的方法。

5 结论

滚筒式干衣机如今已成为常见的家用电器，为纺织品干燥提供了便捷方式。本文对已发表的有关家用滚筒式烘干机分析的文献进行了批判性综述。数十年来，研究重点一直是对干燥机内的热质传递进行建模。为此，研究人员采用了多种方法来预测性能指标，尤其是蒸发速率。

利用 Chilton–Colburn 类比，他们能够根据衣物的性质以及滚筒的入口温度和湿度，定义面积传质系数

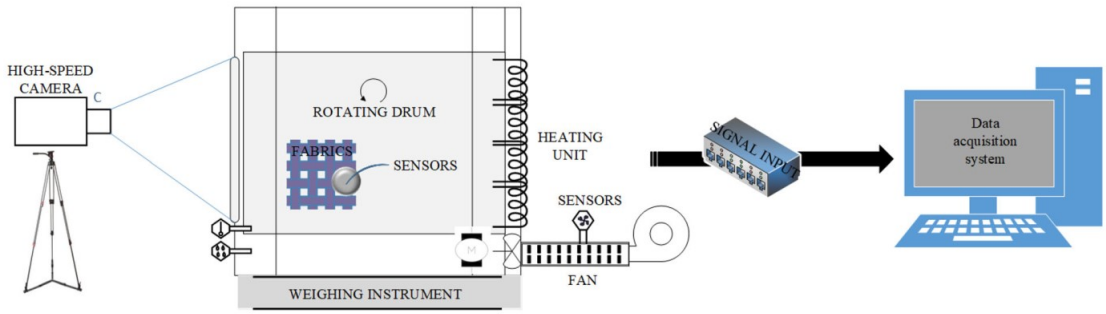


图24：视频采集与处理系统示意图（Yu 等人，2021b）

表5：以往研究中用于蒸发速率的部分方法列表

研究者	Year	模型
Lee等人（Lee等人，2019）	2019	Lambert
Huang等（Huang等，2019）	2019	Lambert
Sian 与 Wang (Sian 与 Wang, 2019)	2019	Lambert
Yadav 和 Moon（Yadav 和 Moon，2008b,a）	2008	Lambert
Deans（Deans，2001）	2001	Lambert
Yi 等人（Yi 等人，2015）	2015	修改版 Lambert
Cengel 和 Ghajar（C.engel 和 Ghajar，2020）	2014	修改版 Lambert
Bengtsson等（Bengtsson等，2014）	2014	恒速阶段
Stawreberg（Stawreberg，2011b）	2011	恒速阶段
Stawreberg 和 Nilsson（Stawreberg 和 Nilsson，2013）	2013	恒速阶段
Cranston 等人（Cranston 等人，2019）	2019	恒速阶段
Novak 等 (Novak 等，2019)	2019	恒速阶段
Higgins 等人（Higgins 等人，2003）	2003	直接法

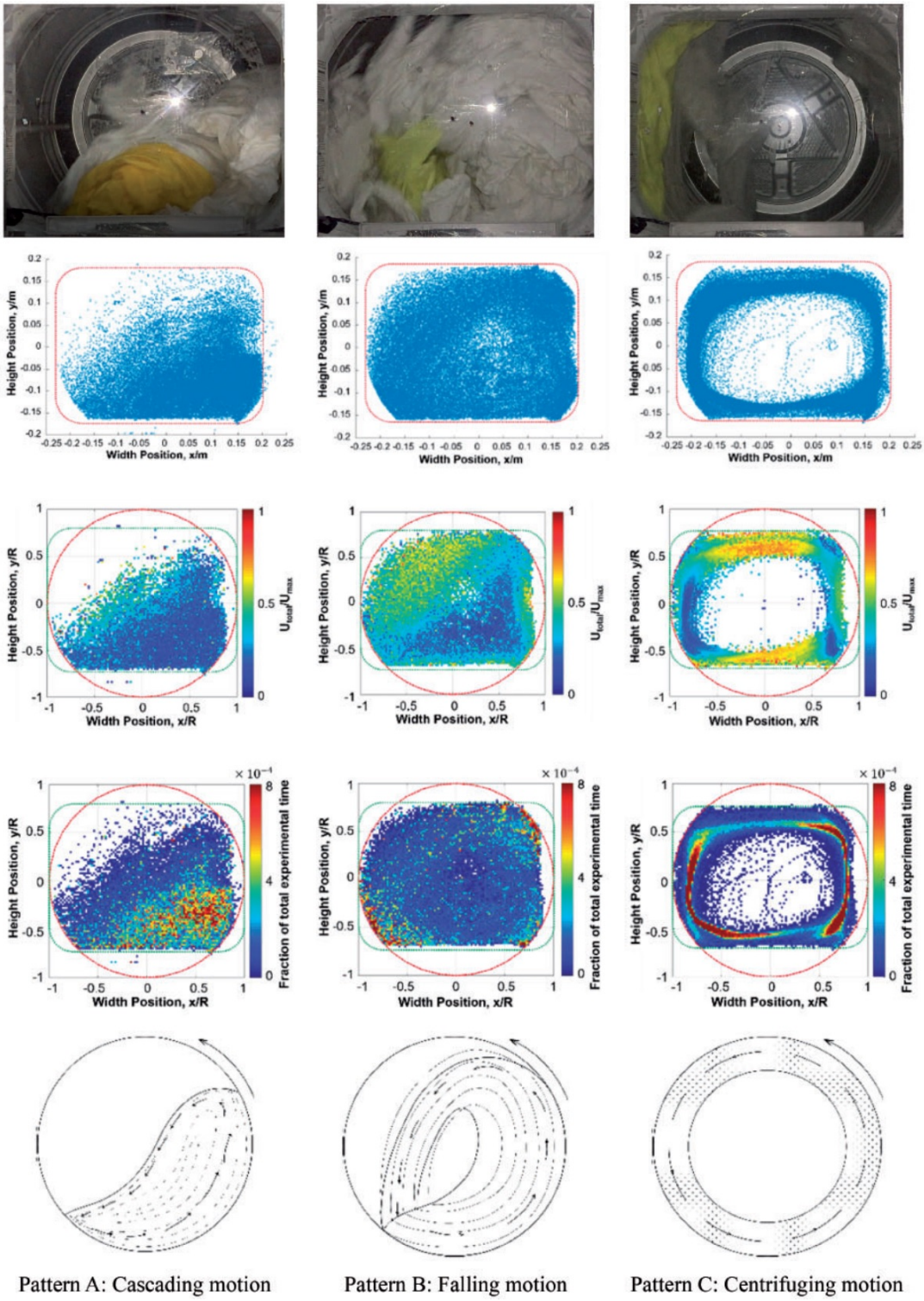


图 25：三类 棉纺织品横向运动的轨迹。从上到下：实验图像、轨迹
ies，速度分布，re 停留时间分布及各运动模式的示意图（Yu 等人，2021b）

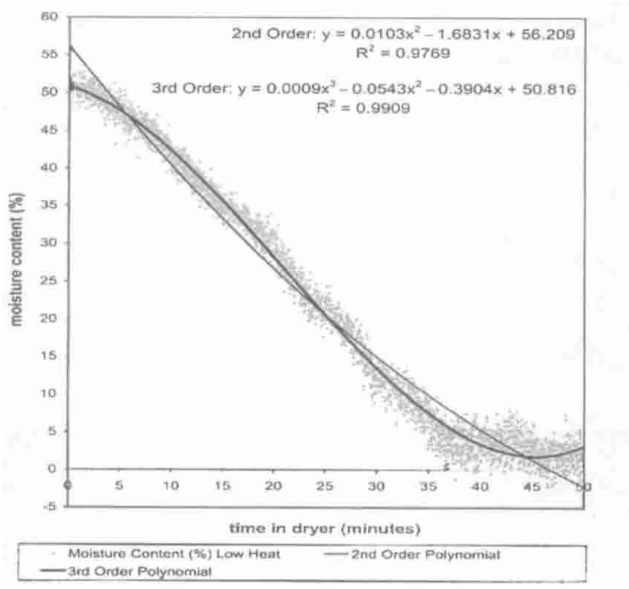


图26：低温设置下滚筒干燥过程中含水量的变化（Higgins 等人，2003）

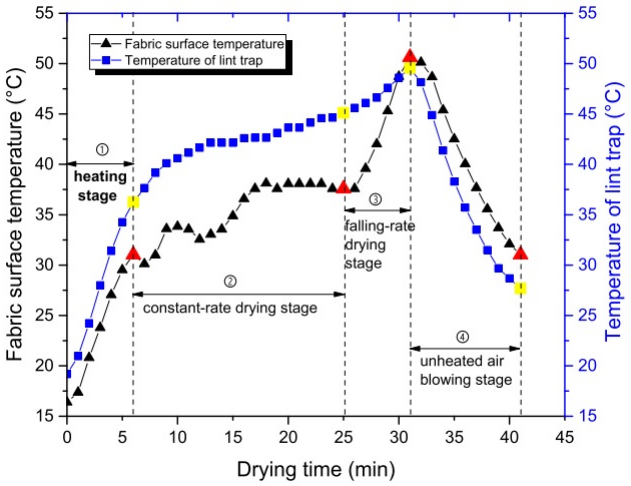


图27：干燥过程中滚筒温度的变化（Yu 等人，2021a）

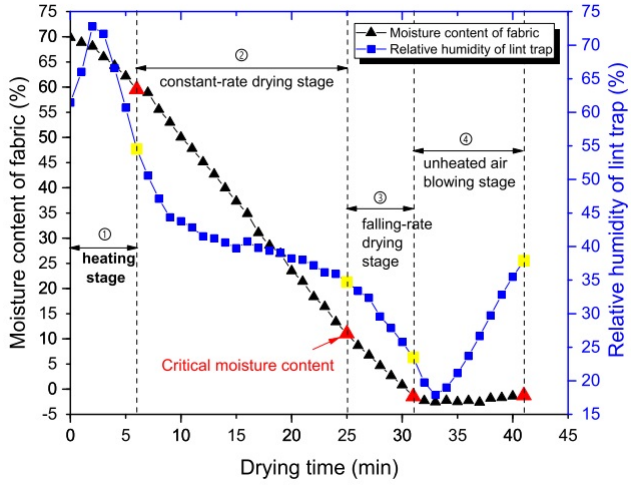


图 28：干燥过程中水分的变化（Yu 等人，2021a）

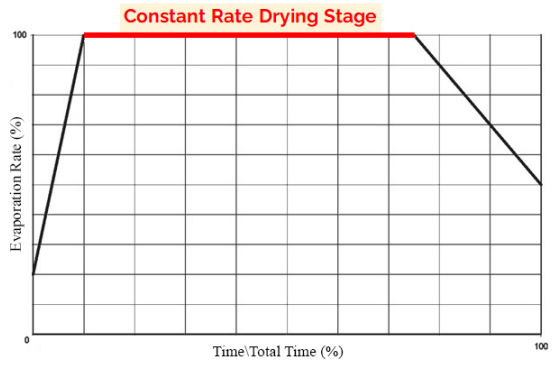


图 29：典型蒸发速率随时间的变化

为研究水分蒸发速率。蒸发速率可视为主要的干燥指标，据此可分别推导出干燥时间、效率、效能和单位能耗除湿量。此外，Lambert 将整个干燥周期中的蒸发划分为三个阶段，即瞬态、恒速阶段和降速阶段。

在过去三十年中，基于这一概念发表了若干实验研究或数值研究。此外，Deans、Gluesenkamp 和 Yi 随后通过考虑更多复杂因素并减少假设，对该模型进行了开发和参数化。此外，部分文献着重利用量纲分析和相似性，将干燥速率与机器参数关联起来。例如，Bassily 推导出了面积-舍伍德数与衣物质量、滚筒角速度、干空气质量流率及几何参数之间的关联式。后来，Novak 和 Gluesenkamp 提出了更精确的模型。综述中介绍了回归结果的有效性，并指出这种方法缺乏所需的准确度。

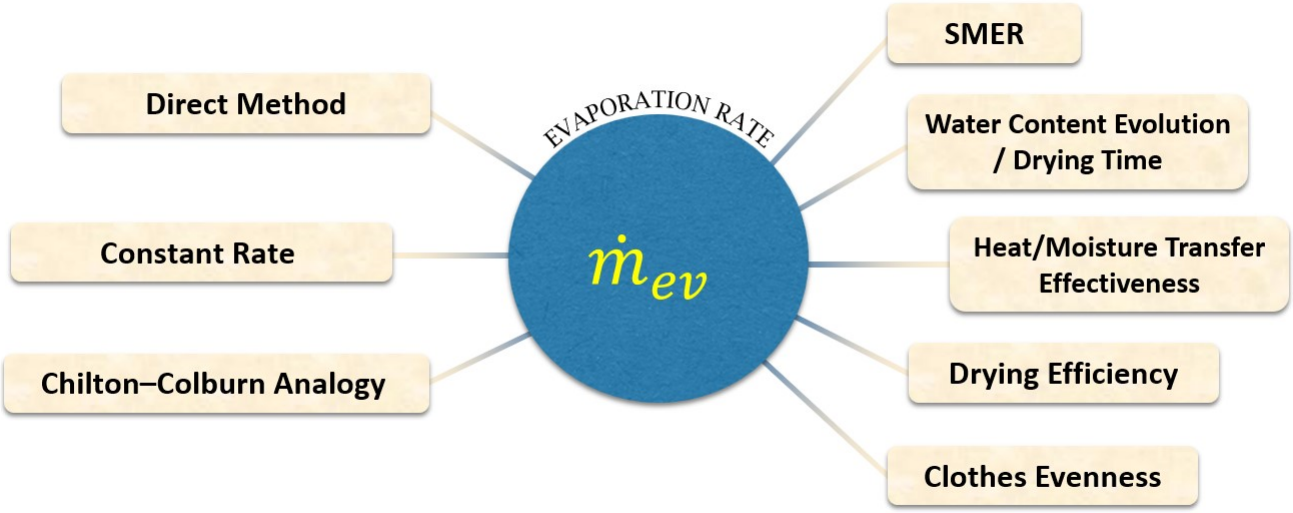


图30：评估滚筒式干衣机蒸发速率的方法

6 参考文献

参考文献

Adapa, P.K.,Schoenau,G.J.,Sokhansanj, S.,2002a. 特种作物热泵干燥机系统的性能研究——第1部分：仿真模型的开发。International Journalof Energy Research 26, 1001–1019。

Adapa, P.K., Schoenau, G.J., Sokhansanj, S., 2002b. 热泵干燥机系统的性能研究：用于特种作物——第2部分：模型验证。International Journal of Energy Research 26, 1021–1033。

AHAM, 1992. 测试布料详见 AHAM 出版物 HLD-1-1992《家用滚筒式干衣机》。

AHAM, 2009. 测试布料详见 AHAM 出版物 HLD-1-2009《家用滚筒式干衣机》。

Akyol, U., Erhan Akan, A., Durak, A., 2015. 热空气纺织品干燥过程的模拟与热力学分析。《纺织学会期刊》106, 260– 274.

Alishah, A., Kiamahalleh, M.V., Yousefi, F., Emami, A., Kiamahalleh, M.V., 2018. 太阳能辅助热泵干燥香菜：实验研究。《国际空调与制冷期刊》26, 1850037.

Ashrae., 1985. ASHRAE 基础手册。Mar Lin Book Company.

Aviara, N.A., 2020. 食品和农产品的水分吸附等温线及等温线模型性能评估。《2020年代吸附》143.

Bansal, P., Braun, J., Groll, E., 2001. 提高传统滚筒式衣物干燥系统的能效。《International Journal of Energy Research》25, 1315–1332。

Bansal, P., Islam, S., Sharma, K., 2010. 家用滚筒式衣物干燥机的一种新型设计。《应用热工程》30, 277–285。

Bassily, A.M., Colver, G.M., 2003a. 衣物干燥机滚筒内面积传质系数的相关性研究。《Drying Technology》21, 919–944。Bassily, A.M., Colver, G.M., 2003b. 电动衣物干燥机的性能分析。《Drying Technology》21, 499–524。

Bejan, A., Dincer, I., Lorente, S., Miguel, A., Reis, H., 2004. 现代技术中的多孔介质中的复杂流动结构。Springer Science & Business Media.

Bengtsson, P., Berghel, J., Renstr¨om, R., 2014. 使用仿真模型和实验装置对闭式热泵滚筒干衣机进行性能研究。Drying Technology 32, 891–901.

Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., De Witt, D.P., 2011. 传热导论。John Wiley & Sons.

Bhandari, B., 2009. 居民能耗调查（RECS）。

Boudreaux, P., Gluesenkamp, K.R., Patel, V.K., Shen, B., 2021. 干衣机空气泄漏的测量与分析。Drying Technology 39, 2105–2117.

Brandt, N., Alpoegger, T., Tegethoff, W., Bockholt, M., Moehlenkamp, A., Koehler, J., 2019. 不同 R744 热泵滚筒干衣机系统拓扑结构的火用分析。《应用热工程》161, 114107.

Braun, J., Bansal, P., Groll, E., 2002. 空气循环热泵干衣机的能效分析。《International Journal of Refrigeration》25, 954–965。

Brummans，L.，2019。《多孔介质中的油墨干燥建模》。博士论文。埃因霍温理工大学。

Buysse，S.，2021。《造纸机的干燥机部：建模与模拟》。博士论文。代尔夫特理工大学。

C،engel, Y., Ghajar, A., 2020. 热质传递：基础 [与] 应用。纽约市。

C،engel, Y.A., Ghajar, A.J., . 热质传递：基础与应用（国际单位制第四版），2015年。美国纽约。

Chasiotis, V., Tzempelikos, D., Filios, A., 2021. 评估水分扩散模型在分析薰衣草叶片对流干燥动力学中的应用。Computation 9, 141.

Chen-Yu,J.H.,Emmel, J.,2018.常规与高效率洗衣机和干燥机的织物护理性能比较。《时尚与纺织品》5, 1–19。

Choi, K.B., Park, S.I., Park, Y.S., Sung, S.W., Lee, D.H., 2002. 小米在连续多级流化床中的干燥特性。Korean Journal of Chemical Engineering 19, 1106–1111.

Cochran, M., Goodnight, J., Babin, B., Eckels, S., 2009。采用表面张力元件增强除湿的冷凝式干燥机。《应用热工程》29，723–731。

Collazo-Abreu, P.L., Morej´on-Mesa, Y., Fern´andez-Chuairey, L., V´azquez-Alfonso, Y., 2018. 用于分析太阳能种子干燥的数学模型与实验模型。《农业技术科学》27, 89–98. Conde, M.R., 1997年. 洗衣店滚筒式干燥过程中的能量守恒。《应用热工程》17, 1163–1172. Cranston, J., Askalany, A., Santori, G., 2019. 通过结合吸附与热泵实现洗烘一体机高效干燥。《能源》183, 683–692. Deans, J., 2001. 家用滚筒式干衣机的建模。《应用热工程》21, 977–990. Defraeye, T., 2014. 干燥过程的先进计算建模——综述。Applied Energy 131, 323–344. Denkenberger, D.; Calwell, C.; Beck, N.;Trimboli, B.; Driscoll, D.; Wold, C., 2013. 北美热泵式干衣机潜在节能效果分析。https://c2e2.unepdtu.org，最后访问于2022-11-05。Dietrich, H., 德国专利3407439, 1984年. 热泵专利。El Fil, B., Garimella, S., 2022. 服装/纺织品干燥节能技术的最新进展。《干燥技术》40, 2235–2250。

Enteria, N., Yoshino, H., Mochida, A., Takaki, R., Satake, A., Baba, S., Tanaka, Y., 2015. 使用多示踪气体稀释法对干燥剂加热、通风和空调系统进行性能测试。《国际空调与制冷杂志》23, 1550027。

´Fontana, E., Donca, R., Mancusi, E., Ulson de Souza, A.A., Guelli Ulson de Souza, S.M., 2016。多孔纺织品介质中热湿传递的数学模型与数值模拟。《纺织学会期刊》107，672–682。

ˇGatari´c, P., Sirok, B., Hoˇcevar, M., Novak, L., 2021。负载质量、滚筒转速和负载组成对热泵滚筒式干衣机干燥均匀性的影响。《Drying Technology》，1–13。

Ghimire, A., 2017。《工程学基本原理》。Lulu.com。

Glaskova, T., Aniskevich, A., 2009. 环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料的水分吸收。Composites Science and Technology 69, 2711–2715。

Gluesenkamp, K.R., Boudreaux, P., Patel, V.K., Good- man, D., Shen, B., 2019. 滚筒式干衣机滚筒中热质传递效能的高效关联式. Energy 172, 1225–1242.

Gluesenkamp, K.R., Boudreaux, P.R., Shen, B., Good- man, D.K., Patel, V.K., 2018年。《干衣机滚筒热质传递效能的实验测量》。技术报告。橡树岭国家实验室（ORNL），美国田纳西州橡树岭。gorenje，2013年。《典型的欧洲冷凝式干燥机》。https://www.automaticwasher.org/cgi-bin/TD/TD-VIEWTHREAD.cgi?47306-35，最后访问日期：2022-08-08。Granryd, E., Melinder, ˚A., 2005年。《间接系统用二次制冷剂》。Refrigerating Engineering，Granryd，KTH，斯德哥尔摩 6，2–6。Gu, L., Min, J., Tang, Y., 2018年。《传质对水面与气流之间热质传递特性的影响》。International Journal of Heat and Mass Transfer 122，1093–1102。Haghi, A., 2001。《干燥过程的数学模型》。Acta Polytechnica 41。He, Q., Li, C., Xue, J., Chen, J., 2020。《使用干燥空气对天然气管道干燥等温过程的建模与模拟》。Drying Technology 38，1400–1410。Hekmat, D., Fisk, W.J., 1984年。《提高家用干衣机的能源性能》。技术报告。劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL），美国加利福尼亚州伯克利。

Higgins, L., Anand, S., Hall, M., Holmes, D., 2003年。《滚筒烘干对针织和机织棉织物若干特性的影响：第一部分：实验概述以及温度设置、干燥机内时间与水分含量之间的关系》。Journal of the Textile Institute 94，119–128。

Hu, W.W., Wei, Y.H., Ding, X.M., Wu, X.Y., 2016. 织物参数和初始含水量对干燥机中机织棉织物平整外观的影响，载于：《关键工程材料》，Trans Tech Publ.，第466–472页。

Huang,K., 2008。统计力学。John Wiley & Sons。

Huang,X.m.,Zhao,Y., Liu, H.q., 2019. 家用气体衣物干衣机干燥过程的模拟与实验研究。《工程数学问题》2019。

Huelsz, G., Urbiola-Soto, L., L´opez-Alquicira, F., Rechtman,R.,Hern´andez-Cruz, G., 2013. 排放式电动干衣机的总能量平- 衡方法。Drying Technology 31, 576–586。

Jian,Q.,Zhao, J., 2017. 采用独特水冷换热器的冷凝式滚筒干衣机的干燥性能分析。《应用热工程》113, 601–608。

Jiang, Z., Xi, Y., Gu, X., Huang, Q., Zhang, W., 2019。基于孔径分布的水泥基材料水蒸气吸附滞后现象建模。Cement and Concrete Research 115, 8–19。

Jones, C., Corona,A.,Amador,C.,Fryer,P., 2022. 家用干衣机中织物和干衣机柔顺纸运动的动力学。Drying Technology 40, 2087–2104。

Kadoya, K., Ohrnichi, Y., Hosokawa,F.,Yamamoto,T.,Ishihara, T., 1984年。配备新型热交换器风扇的冷凝式干衣机。《国家技术报告》第30卷，613–619页。

Kahveci，K.，Cihan，A.，2007。《传输现象……食品工程研究与发展》，13。

Kemp, I.C., 2011. 干燥机能量分析基础。《现代干燥技术》4，1–46。

Kerkhof, P.J., Coumans, W.J., 2002. 干燥：一项引人入胜的单元操作。《化学工程学报》1，1–2。

Khaldi, S., Korti, A.I.N., Abboudi, S., 2017. 通过基于计算流体动力学的改进措施，改善间接式太阳能干燥器内的空气流动分布。《国际空调与制冷期刊》25，1750022。

Khalsa, K.P.S., Sadhu, S., 2021. 采用蒸发式冷凝器提升家用冰箱性能的实验研究。《国际空气调节与制冷杂志》29，2150015。

Kim,J.K.,1999.使用田口法对干衣机换热器-风扇外壳进行的最佳设计。KSME国际期刊 13, 962–972。Kovacı,T., Dikmen, E.,S¸ahin,A.S¸.,2022. 薄荷叶冷冻干燥的热质传递性能评估。《食品加工与保藏杂志》46, e16536。Krischer,O.,Kast,W., 1987. 干燥技术的科学原理（德文）。施普林格，柏林。Krischer, O.,Kr¨oll, K., 2013. 干燥技术的科学基础。施普林格出版社。Kudra, T., 2004.干燥中的能源方面。Drying Tech- nology22, 917–932。Lambert,A.,Spruit, F., Claus,J.,1991. 将建模作为评估节能措施影响的工具，案例研究：滚筒式干燥机。Applied Energy 38, 33—47。Lee, B.H., Sian,R.A.,Wang, C.C., 2019. 适用于热泵滚筒式干衣机的基于理性原理的模型。Drying Technology 37, 691–706。Lee,H.,Carr,W., Ok,H.M., AS, E., 2006a. 纺织品的干燥：《工业干燥手册》。

Lee, J., Yun, C., Park, C.H., 2022. 面料特性和滚筒转速对滚筒式干衣机内衣物运动及干燥性能的影响。《纤维与聚合物》，1–12。

Lee, K.H., Kim, O.J., 2009. 间歇式热泵干燥机干燥性能与节能效果的研究。Drying Technology 27，565–573。

Lee, K.S., Yang, B., Pyo,S.Y., Kim,H.G.,Lee,D.H.,Kim, S.D.,2006b. 滚筒式干衣机配备冷凝器的干燥性能。韩国化学工程学报 23, 658–662。

Lowrey, S., Reboux, G., 2020. 低环境温度下旋转式压缩机的性能。《国际空调与制冷期刊》28，2050037。

Maya-Drysdale, L., Iversen, N., Gydensen,A.,Skov Hanse,O., 2019. 关于家用滚筒式干衣机的综述研究 -最终报告。

Mensah,K.,Choi,J.M., 2017.能耗与稳定性研究：恒温恒湿试验箱。空气调节与制冷国际期刊 25, 1750010。

Minea，V.，2015。热泵辅助干燥系统概述，第I部分：集成、控制复杂性和新型创新概念的适用性。《干燥技术》33，515–526。

MINOS, SCOTT, 2018. 16 种洗衣房省钱方法。https://www.energy.gov/energysaver/articles/16-ways-save-money-laundry-room，最后访问于2022-08-08。

Ng, A.B., Deng, S., 2008. 干衣机衣物干燥过程的一种新型终止控制方法。Applied Energy 85,818–829。

Nienke, T., Embrechts, H., Kwade, A., Eggerath, D., 2021. 喷嘴设计对薄膜工业对流干燥影响的实验与数值研究。Drying Technology，1–11。

Nordon, P., David, H., 1967。吸湿性纺织材料中水分与热的耦合扩散。《International Journal of Heat and Mass Transfer》10，853–866。

ˇ Novak, L., Gatari´c, P., Sirok, B., 2019. 滚筒入口空气条件对家用滚筒式干燥机干燥过程的影响。Drying technology 37, 781–792.

Novak,L., Schnotale,J.,Flaga-Marya ´nczyk,A., 2011. 热- 泵滚筒式干衣机的制冷剂选择。国际制冷学杂志。

Oueslati, H., Mabrouk,S.B., Mami, A., 2018. 太阳能干燥器的热建模——数值模拟、分析和性能评估。International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 26, 1850032。

Pal, U., Khan, M.K., 2008. 恒定干燥速率条件下热泵干燥机不同部件设计的计算步骤。Drying Technology 26, 864–872.

Park, Y.S., Shin, H.N., Lee, D.H., Kim, D.J., Kim, J.H., Lee, Y.K., Sim, S.J., Choi, K.B., 2003. 使用热重分析仪测定颗粒的干燥特性。Korean Journal of Chemical Engineering 20, 1170–1175. Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Ngamsritrakul, P., Prateepchaikul, G., 1996. 热泵干燥机第1部分：模型模拟。International Journal of Energy Research 20, 1067–1079. Rasti, M., Hatamipour, M., Aghamiri, S., Tavakoli, M., 2012. 使用烃类混合制冷剂提高家用冰箱的能效指数。Measurement 45, 1807–1813. Rasti, M., Jeong, J.H., 2021. 干衣机内衣物水分蒸发速率估算模型综述。International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 29, 2130001. Roy, R.K., 2001. 使用田口方法进行实验设计：改进产品与工艺的16个步骤。John Wiley & Sons. Sabau, A.S., Contescu, C.I., Jellison, G.D., Howe, J.Y., Armstrong, B.L., Daniel, C., Babinec, S., 2020. 红外加热与自然对流引起的蒸发。Heat and Mass Transfer 56, 2585–2593. Saensabai, P., Prasertsan, S., 2003. 部件布置、环境条件和干燥条件对热泵干燥机性能的影响。Drying technology 21, 103–127。

Salhi, M., Chaatouf, D., Raillani, B., Dihmani, N., Amraqui, S., Moussaoui, M., Mezrhab, A., Fontaine, J.P., 2021. 间接式太阳能干燥器动态与热行为的数值分析：出口的影响。International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 29, 2150001. Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.R., 2006a. 跨临界二氧化碳热泵干燥机：第1部分，数学模型与模拟。Drying technology 24, 1583–1591. Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.R., 2006b. 跨临界二氧化碳热泵干燥机：第2部分，验证与模拟结果。Drying Technology 24, 1593–1600。

Senthilkumar, D., 2019. 低温处理对蒸汽压缩制冷系统所用 R600a 和 R290 制冷剂中 tic 纳米粉末的影响。International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 27, 1950040.

Shen, B., Gluesenkamp, K., Bansal, P., Beers, D., 2016. 热泵干衣机模型的开发。International Refrigeration And Air Conditioning Conference .

SHEN, C.C., LU, J.H., 2013. 不同车速下冷凝器的性能。International Journal of Air-Conditioning andRefrigeration 21, 1350013.

Shircliff, M., 2016. 使用多物理场建模与模拟预测家用干衣机的干燥过程。博士论文。Western Kentucky University.

Sian, R.A., Wang, C.C., 2019. CO2 与 R-134a 热泵滚筒式干衣机的比较研究——一种理性方法。International Journal of Refrigeration 106, 474–491。

Siddiqui, M., Owes, A., Al-Amri, F., Saeed, F., 2020. 寻找低全球变暖潜能值替代制冷剂的最新进展：综述。International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 28, 2030004。

Smolsky, B., Sergeyev, G., 1962. 液体蒸发过程中的热质传递。International Journal of Heat and Mass Transfer 5, 1011–1021。

Somdalen, R., K¨ohler, J., 2018. 新型热电式衣物干燥机概念的理论研究。Materials Today: Proceedings 5, 10323–10332。

Spruit, F., 1988年。《滚筒干燥机模型》。埃因霍温理工大学工业工程系，.....

Stawreberg, L.，2011a。《滚筒干燥机能效改进：技术发展、洗衣习惯与能源标签》。博士论文。卡尔斯塔德大学。

Stawreberg, L.， 2011b。《滚筒干燥机能效改进：技术发展、洗衣习惯与能源标签》。博士论文。卡尔斯塔德大学。

Stawreberg, L., Berghel, J., Renstr¨om, R., 2012. 冷凝式滚筒干衣机中因空气泄漏造成的能量损失。应-用热工程 37, 373–379。

Stawreberg, L., Nilsson, L., 2010. 冷凝式滚筒式干衣机的比除湿率与泄漏率建模。《应用热工程》30, 2173–2179。

Stawreberg,L., Nilsson,L.,2013. 使用特定控制策略对小负载进行滚筒干燥所实现的潜在节能量。Applied Energy 102, 484–491。

Svensson, C., 2018。使用通用理论模型对热泵滚筒式干衣机进行流动分析。博士论文。隆德大学。

TeGrotenhuis, W., Butterfield, A., Caldwell, D., Crook,A.,Winkelman, A., 2017. 高效率混合热泵干衣机的建模与设计。《应用热工程》124, 170–177。

Tsilingiris, P., 2012. 太阳能蒸馏系统中的热质传递综合分析——限制条件与有效范围研究。《太阳能》86, 3288–3300.

Tsilingiris, P., 2015. 太阳能蒸馏系统中传质系数建模的理论推导与比较评估——鲍恩比方法。《太阳能》112, 218–231。

Turner, I.,Mujumdar, A.S., 1996. 干燥技术中的数学建模与数值技术。CRC出版社。Wang, D., Cao, X., Li,X.,Li, Y.,Wang, X., 2021. 空气除湿级联式热泵干燥系统的实- 验研究。International Journal of Refrigeration 131, 235–243。

Wang, K.,Cao,F.,Wang,S.,Xing, Z.,2010. 采用水侧串联加热并联循环的高温热泵性能研究。International Journalof Refrigeration 33, 1142– 1151。

Wei, Y.,Gong,R.H., Ning,L.,Ding, X., 2018. 通过干燥过程优化提升家用干衣机的能效。Drying Technology 36,790–803.Wei, Y.,Hua,J.,Ding,X.,2017. 用于模拟家用排气式滚筒干衣机内多孔棉织物干燥过程中热湿传递的数学模型。《纺织学会期刊》108, 1074– 1084。

Yadav, V., Moon, C., 2008a. 家用干衣机中的织物干燥过程。Applied Energy 85, 143–158.

Yadav, V., Moon, C., 2008b. 家用干衣机中织物干燥过程的建模与实验研究。Applied Energy 85, 404–419.

Yi,T.,Dye,J.C.,Shircliff,M.E.,Ashrafzadeh,F.,2015.空气通风式干衣机中薄衣物的新型基于物理学的干燥模型. IEEE/ASME 机电一体化学报 21, 872–878。

Yousef, K., BOLIN,C.,ENGEDA,A.,HEGAZY, A.,2014.制冷剂作为发电厂冷凝器冷却介质的实验研究。国际空气调节与制冷期- 刊 22, 1450024。

Yu,X., Cao,W.,Ding, X.,2021a. 织物的机械性能对其在家用滚筒式烘干机中运动和干燥性-能的影响。Drying Technology 39, 528–547。

Yu, X., Cao, W., Wei, Y., Ding, X., 2018. 家用滚筒干燥过程中机织棉织物的起皱机理。Drying Technology 36, 1098–1106。

Yu, X., Li, Y., Ding, X., 2021b. 棉纺织品在家用滚筒式烘干机中的运动动力学及其对干燥性能的影响。《纺织研究杂志》91， 851–873。

Zahed, A., Zhu, J.X., Grace, J., 1995. 批次式和连续式流化床干燥机的建模与模拟。Drying Technology 13, 1–28.

Zhang,Z.、Gui,N.、Ge,L.、Li,Z.， 2019。倾斜三维滚筒中颗粒混合的数值研究及一种新的粒径混合指数。《Advanced Powder Technology》30， 2338–2351。

Zolotarevskiy, V., Gallo, S.C., Pereira, M.P., Barnett, M.R., 2022. 使用离散元法对叶轮式滚筒磨损试验进行建模。《Wear》510, 204509。