

文章编号:0253-4339(2021)01-0160-07
Gdoi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.01.160

血管真空冷冻干燥过程的传热传质研究

桂 超^{1, 2} 陶乐仁^{1, 3} 张雅琦¹

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 新乡学院土木工程与建筑学院 新乡 453003;
3 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093)

摘 要 本文采用无接触式称重法监测猪主动脉冷冻干燥过程,实时获取脱水速率,针对升华过程,通过采用准稳态传热模型结合脱水速率的变化来进行计算,获得升华温度、升华界面位移及传热量的变化规律。冻干参数分别设定为:预冻结温度-40℃、一次干燥-20℃、二次干燥10℃、冻干箱压力10Pa。结果显示,样品的平均含水量为74.24%,其中自由水含量为71.96%。在一次干燥阶段,升华温度缓慢升高并最终接近搁板温度。随着传热温差的减小,传热量迅速下降,自由水移除速率减慢。冰晶的升华主要集中在血管内外壁处,其传热量占总升华热的70%~90%。随着传热量的减少,升华界面的移动速度减缓。在升华干燥前期传质阻力随干燥层厚度以恒定速率增长,而后期受传热的限制传质阻力增幅变大。

关键词 冷冻干燥;传热传质;脱水速率;升华温度;传质阻力

中图分类号:TB61⁺1; R318.52 文献标识码:A

Study on Heat and Mass Transfer of Vacuum Freeze-drying Process
for Blood Vessels

Gui Chao^{1, 2} Tao Leren^{1, 3} Zhang Yaqi¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang, 453003, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract In this study, the contactless weighting method was used to monitor the freeze-drying process of porcine aortas, and the dehydration rate was obtained in real time. For the sublimation drying process, the quasi-steady heat transfer model combined with the change in the dehydration rate could be used to calculate the change law of sublimation temperature, sublimation interface displacement, and heat transfer on each surface. The freeze-drying parameters were set as follows: the pre-freezing temperature was -40℃, the primary drying temperature was -20℃, the secondary drying temperature was 10℃, and the pressure of the freeze-drying chamber was 10 Pa. The study showed that the average moisture content of the sample was 74.24%, and the free water content was 71.96%. During the primary drying, the sublimation temperature increased slowly and eventually approached the shelf temperature. As the heat transfer temperature difference decreased, the heat transfer decreased rapidly, and the removal rate of free water decreased gradually. The sublimation of ice crystals was mainly concentrated in the inner and outer walls of the blood vessels, and its heat transfer accounted for 70%-90% of the total sublimation heat. With the decrease in heat transfer, the moving velocity of the sublimation interface decreased gradually. During the early stage of sublimation drying, the mass transfer resistance increased at a constant rate with the thickness of the dried layer, whereas during the later stage, the increasing rate of mass transfer resistance increased significantly with the restriction of the heat transfer.

Keywords freeze-drying; heat and mass transfer; dehydration rate; sublimation temperature; mass transfer resistance

血管移植技术是一种有效解决相关疾病的方法。与人造血管相比,人体血管优越的细胞外基质特点更适用于临床移植及修复。因此,移植材料的保存及原始特性的维持非常重要。多数研究显示,真空冷冻干燥技术有利于材料的长期保存^[1],而且可以在很大程度上保留其原始特性^[2]。此外,冻干过程具有清除内皮组织的作用,在一定程度上可以降低免疫反应^[3-4]。

冻干脱水过程是一个复杂的传热传质耦合过程,不同的工艺条件对样品的性能有着重要影响^[5-6]。

实时监测冻干过程,了解其动态特性是保证样品性能的关键。N. Milton 等^[7]提出了动态压力测量法,通过分析冻干箱压力升高的因素,进行回归分析,得到升华过程的准确参数。A. A. Barresi 等^[8]将基于卡尔曼滤波器的“智能瓶”与动压测量法结合,每次动压测量后参数实现初始化,弥补了间歇式测量的不足。很多专家提出通过建立冻干模型来预测冻干过程的变化。O. C. Sandall 等^[9]提出稳态传热传质模型,升华界面均匀后退。D. F. Dyer 等^[10]提出了准稳态模型,考虑了二元气体扩散传质的影响。R. J. Litfield 等^[11]提出了一维升华-解析模型,通过非稳态能量传递模拟冻干过程的动态变化。P. Sheehan 等^[12]提出多维动态模型,较为准确地模拟出瓶装溶液的冻干过程。

国内外对血管冻干保存及移植的研究较多,但涉及脱水过程的预测及传热传质的研究较少。本文以猪主动脉为研究对象,采用无接触式称重装置实时监测冻干过程中样品的脱水变化。同时建立升华过程的准稳态传热数学模型,结合脱水速率的变化规律逐时计算升华温度、传热量、升华界面位移及传质阻力。通过分析,进一步了解主动脉冻干过程的动态变化规律。

1 材料与方法

1.1 实验设备

1.1.1 冻干机

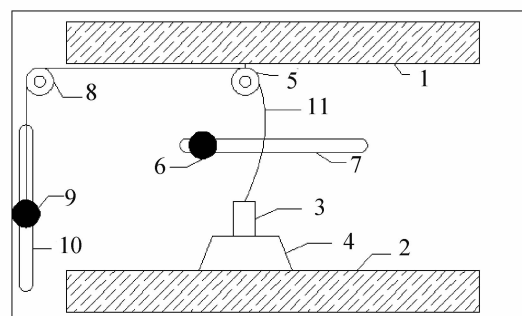
采用田枫 TF-SFD-2 真空冻干机进行实验。冻干机的搁板温度和冷阱温度可分别降至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻干箱绝对压力可降至约 2 Pa 。该设备配有可编程控制器及数据采集系统,可实时调节冻干参数并记录实验数据。

1.1.2 无接触式称重装置

冻干过程中采用无接触式称重装置监测样品脱水进程,在不开启冻干箱门的情况下逐时测量脱水量及脱水速率的变化,从而保证冻干过程的连续性。称重原理如图 1 所示,通过移动磁铁来调节样品的位置,每次称重结束后将样品置于搁板上。采用的电子天平精度为 0.001 g ,并在低温低压下进行了修正。

1.2 实验材料及冻干方案

本文以猪主动脉为研究对象,实验材料来自昆山定点生猪屠宰场。首先去除材料表面杂质,然后在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 质量分数为 0.9% 的生理盐水中浸泡 12 h ,最后剪切成 10 个尺寸大致相当的环段,约长 20 mm ,厚 2.2 mm ,外径 18 mm 。取其中 2 个样品分别用于实时称



1 上层搁板;2 下层搁板;3 样品;4 电子天平;5 定滑轮 I;
6 磁铁组 I;7 滑动槽 I;8 定滑轮 II;9 磁铁组 II;
10 滑动槽 II;11 细棉线。

图 1 无接触式称重原理

Fig. 1 The principle of contactless weighing

重和测温,其余样品仅做冻干前后称重测量。测温时热电偶插入主动脉壁中心位置。

在冻干实验开始前,首先将冻干箱预冻 3 h ,然后将处理好的主动脉段置于搁板上进行快速冻结。待样品冻结至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下并稳定 1 h ,然后抽真空并调节搁板温度至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,进行一次干燥。待称重样品的质量不再变化时结束一次干燥,调节搁板温度至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,进行二次干燥。待样品质量再次不变时结束整个冻干过程。

1.3 脱水测量

所有样品冻干前后进行称重,最终脱水率为:

$$\varphi = \frac{m_0 - m_{\text{fd}}}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

根据一次干燥结束时称重样品的质量,其自由水含量为:

$$\varphi = \frac{m_0 - m_{\text{pd}}}{m_0} \quad (2)$$

在干燥过程中每小时记录一组称重数据,包括时间间隔为 20 min 的两次称重值。采用差值平均法,则该时间段的平均脱水速率为:

$$G_i = \frac{m_{i,a} - m_{i,b}}{20 \times 60} \quad (3)$$

结合样品的自由水含量,逐时自由水移除率为:

$$\psi_i = \frac{m_0 - \bar{m}_i}{m_0 \phi} \times 100\% \quad (4)$$

2 升华过程理论计算

2.1 传热模型

根据微 CT 研究显示,升华过程主要集中在血管段内外壁面附近,升华界面由内外壁面同时向中间移动,壁厚并未发生明显变化^[13-14]。由于干燥室的压

力较低,忽略对流传热^[15],样品表面传热以导热和热辐射为主。现将样品的几何模型考虑为三维圆环,如图 2 所示。表面热交换分为 4 部分,其中底面为导热,其余表面为热辐射。表面热量经相应的干燥层传递至升华界面,供冰晶升华。

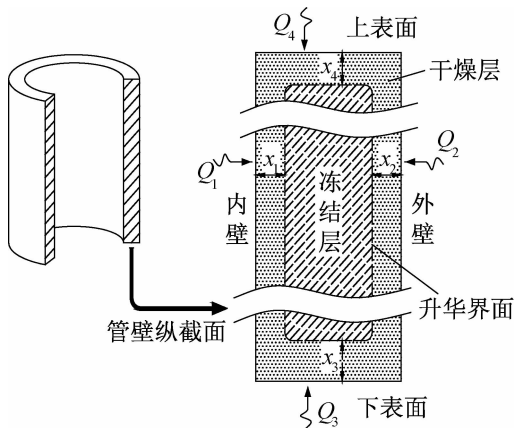


图 2 主动脉段升华干燥过程传热示意图
Fig. 2 The schematic diagram of heat transfer during sublimation drying of aortic segment

随着干燥的进行,升华界面逐渐向中间移动,干燥层厚度逐渐增加。由于升华干燥时间较长,因此任意时刻下的传热过程均可近似地看作稳态,将升华过程看作由多个稳态点组成的准稳态传热传质过程^[16]。随后通过已获得的脱水速率变化规律,结合稳态传热数学模型,逐时计算升华温度、升华界面位移、各表面传热量及传质阻力。

理论计算需要如下假设条件:1)忽略对流传热;2)干燥层热流密度方向垂直于升华界面;3)自由水在组织内均匀分布;4)一次干燥过程中无结合水析出;5)升华界面具有相同温度;6)冻结层无温度梯度;7)冻干箱内只有水蒸气。

2.2 数学模型

内外壁面及顶端的热流密度为:

$$q_{i,j} = \sigma \varepsilon (T_{pl}^4 - T_{i,j,sur}^4), \quad j = 1, 2, 4 \tag{5}$$

底面的热流密度为:

$$q_{i,j} = \alpha (T_{pl} - T_{i,j,sur}), \quad j = 3 \tag{6}$$

其中: $\alpha = 1.5358 \times 10^{-3} p_e$ ^[17]。

内壁处干燥层的热流密度为:

$$q_{i,j} = \frac{\lambda}{r_j} \frac{T_{i,j,sur} - T_{i,s}}{\ln \frac{r_j + x_{i,j}}{r_j}}, \quad j = 1 \tag{7}$$

外壁处干燥层的热流密度为:

$$q_{i,j} = \frac{\lambda}{r_j} \frac{T_{i,j,sur} - T_{i,s}}{\ln \frac{r_j}{r_j - x_{i,j}}}, \quad j = 2 \tag{8}$$

底面和顶端处干燥层的热流密度为:

$$q_{i,j} = \frac{\lambda}{x_{i,j}} (T_{i,j,sur} - T_{i,s}), \quad j = 3, 4 \tag{9}$$

升华热通过 4 个表面传递至相应的升华界面,供冰晶升华,升华热可由式(10)和式(11)表示:

$$Q_{i,t} = \sum_{j=1}^4 Q_{i,j} = \sum_{j=1}^4 q_{i,j} F_{i,j}$$

$$Q_{i,t} = G_i \Delta H \tag{11}$$

逐时升华体积可由样品总体积结合自由水移除率来表示,如式(12)所示:

$$V_{i,t,sub} = V_i (\phi_i - \phi_{i-1}) \tag{12}$$

将冰晶密度和升华潜热考虑为常数,各表面处逐时升华体积与其表面传热量成正比,由式(13)表示:

$$\frac{V_{i,j,sub}}{V_{i,t,sub}} = \frac{Q_{i,j}}{Q_{i,t}}, \quad j = 1 \sim 4 \tag{13}$$

根据升华界面均匀后退原理,逐时的升华面积及升华体积由样品几何尺寸结合干燥层厚度变化来表示。然后联立式(5)~式(13)可以计算出逐时的升华温度 $T_{i,s}$, 表面传热量 $Q_{i,j}$, 升华界面位移 $x_{i,j}$ 。

考虑水蒸气由升华界面传递至干燥层外表面,升华界面水蒸气压力由升华温度决定,传质阻力可以表示为:

$$R_i = \frac{(p_{i,s} - p_e) F_{i,s}}{1\,000 G_i} \tag{14}$$

3 结果与分析

3.1 冻干过程

利用实时称重法监测冻干过程,一次干燥时间长达 47 h 53 min,脱水率高达 71.96%,该值可看作样品自由水总含量。由于自由水移除较为彻底,二次干燥过程仅耗时 3 h 3 min。冻干后样品的脱水率如表 1 所示,平均含水量约为 74.24%,明显高于真空烘干机的测量值(72.01%±0.5%)^[18]。

表 1 冻干样品脱水率

Tab.1 The dehydration rate of lyophilized samples		
样品编号	脱水率/%	平均脱水率/%
1	74.26	74.24
2	73.03	
3	75.28	
4	74.14	
5	75.36	
6	73.75	
7	74.33	
8	74.01	
9	74.01	
10	74.24	

生物材料内部的自由水主要由游离水和少量毛细水组成。毛细水广泛存在于组织间隙中,纤维组织在高温低压的环境下会大面积塌陷、紧缩,黏连在一起的组织可导致部分毛细水和结合水难以移除。而在真空冷冻干燥过程中,低温低压下移除自由水不会引起组织结构发生显著变化,尽管冻干过程耗时较长,但可以实现残余水分的完全移除。因此冻干过程有着更高的脱水率。

冻干参数的变化如图 3 所示。在整个干燥阶段,冻干箱压力维持在约 10 Pa,冷阱温度低于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在一次干燥初期阶段,搁板迅速升温并稳定至设定值。受低压环境的影响,环境温度迅速升高,短时间内趋于稳定并略高于搁板温度。样品测量温度逐渐上升,9 h 后超过搁板温度,此时温升幅度较小,仅为 0.16 K/h 。二次干燥开始后,样品温度迅速升高并稳定,同时冻干过程结束。

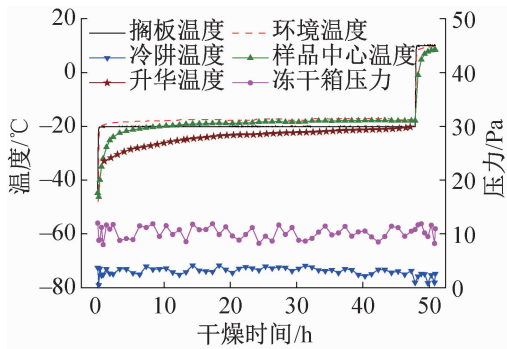


图 3 冻干参数随干燥时间的变化

Fig. 3 The change of parameters with drying time

假如采用测温法控制冻干过程,在一次干燥开始 9 h 后将会结束这一阶段,此时自由水移除率仅为 49.84%。然而样品温度高于搁板温度时,脱水过程仍在继续。尽管热电偶探头放置在组织壁中心位置,但探头的插入会破坏血管组织,留下微小缝隙,这足以导致探头附近的冰晶提前升华。当热电偶探头无法触及冻结层时,将无法准确测量冰晶的温度。此外,升华界面实时移动,且血管壁较薄,无法通过温度传感器准确监测。

脱水速率的变化趋势如图 4 所示。在干燥初期,脱水速率较快,此时冰晶的升华量较大,随后迅速下降,直至降低为 0 g/s 时结束一次干燥。二次干燥初期脱水速率有所增加,但增幅较小,在短时间内迅速降低为 0 g/s 。

通过脱水速率结合能量方程获得升华温度的变化规律如图 3 所示。在一次干燥过程中,升华温度缓慢升高并始终低于搁板温度,进一步说明样品测量

温度不能作为监测冻干过程的标准。

一次干燥阶段自由水移除率的变化如图 5 所示,初始阶段移除速率较快,80 % 的自由水在升华干燥前半时间段内移除。随着干燥时间的增加,移除速率逐渐减小,最后 20 % 自由水的移除过程耗时超过 20 h。

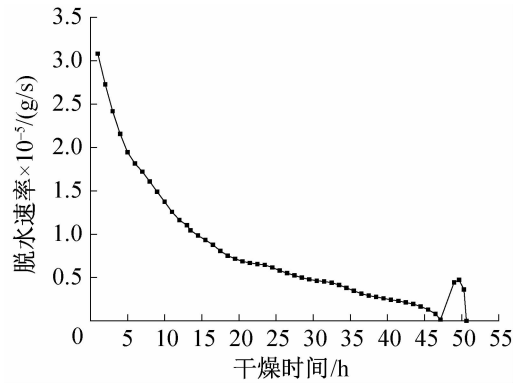


图 4 脱水速率随干燥时间的变化

Fig. 4 The change of dehydration rate with drying time

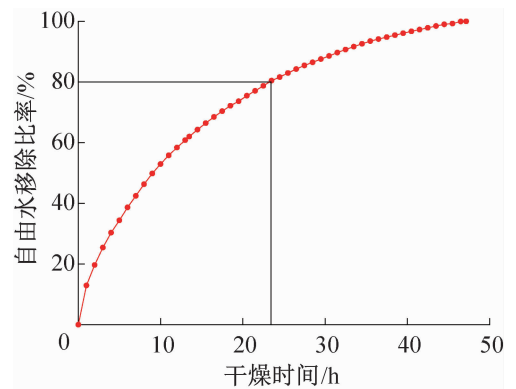


图 5 自由水移除比率的变化

Fig. 5 The change of free water removal ratio

在一次干燥后期自由水移除速率较慢,单位时间(h)内的移除率不足其自由水总含量的 1 %。这主要有三方面原因:首先是传热的限制,随着升华界面温度的升高,传热温差减小,升华热供应不足;其次是传质的限制,干燥层厚度增加引起传质阻力增大;最后是额外能量引起,毛细水广泛存在于组织间隙,其移除过程既需要升华热又需要克服表面力,而且血管等生物材料组织结构相对紧密,因此升华干燥后期脱水进程缓慢。

3.2 传热传质分析

样品表面传热量的变化如图 6 所示。随着自由水移除率的增加,传热量逐渐减少。在同一时刻下,外壁传热量相对较大,其次是内壁。内外壁面的传热量占总升华热的 70%~90%。由于导热传热,底面的

热流密度较大,但受限于传热面积较小,因此传热量小于侧面。顶端传热面积小且仅依靠辐射传热,因此传热量最小。

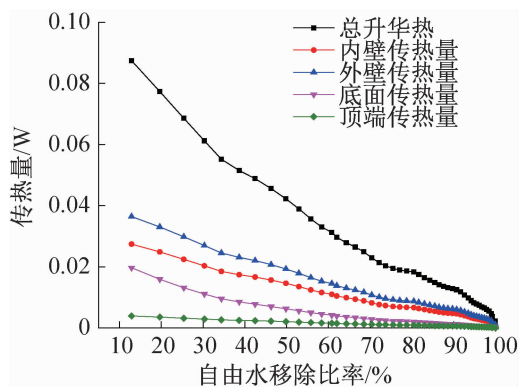


图 6 升华过程中传热量的变化

Fig. 6 The change of heat transfer during sublimation process

样品内外壁面处升华界面的位移变化如图 7 所示。升华界面随着干燥时间逐渐后移,干燥层厚度增大。由于传热量的减少,升华界面的移动速度逐渐减慢。其中外壁的传热量高于内壁,因此外壁干燥层厚度的变化相对较大,在相同时间内外壁的冰晶升华量较多。

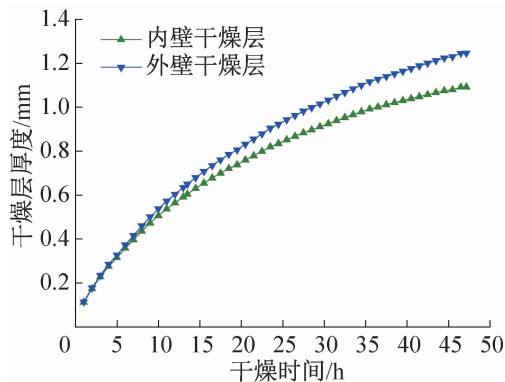


图 7 内外壁面附近升华界面位移变化

Fig. 7 The change of sublimation interface displacement near the inner and outer walls

样品上下表面处升华界面位移变化如图 8 所示。干燥层厚度随着干燥时间逐渐增大,升华界面移动速率稳定,底面干燥层移动更为明显,这源自于底面导热拥有更高热流密度。尽管上下升华界面移动速度较快,但受限于传热面积,实际升华量小于内外侧表面。

传质阻力的变化如图 9 所示。传质阻力随干燥层厚度的增加逐渐增大。通常传质阻力与干燥层厚度成正比。在一次干燥前期,传质阻力以恒定速率增长,传质渗透率也可近似看作常数,符合一般冻干传

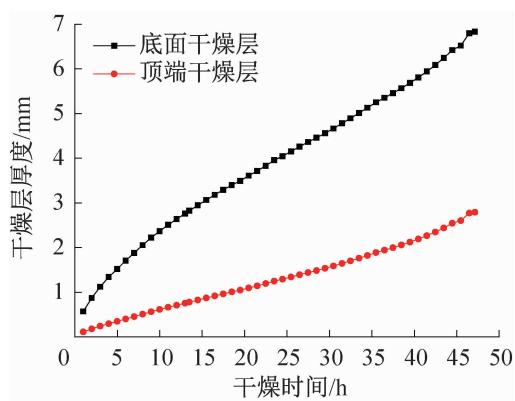


图 8 上下表面附近升华界面位移变化

Fig. 8 The change of sublimation interface displacement near the upper and bottom surfaces

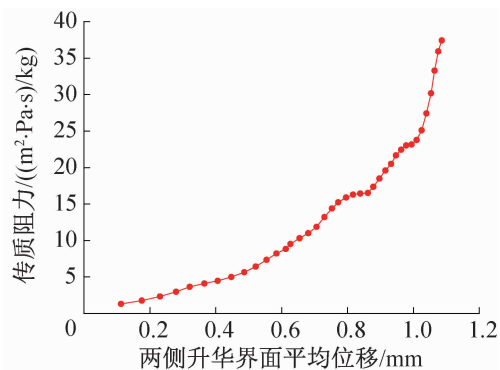


图 9 传质阻力的变化

Fig. 9 The change of mass transfer resistance

质规律,说明传质控制在初期较为明显。一次干燥中后期,传质阻力增幅变大,说明传热控制逐渐占据主导地位^[17],额外增加的传质阻力是由升华热不足引起。干燥层内外传质压差较大,而传热温差减小,传热量不足对升华过程的限制也愈发明显。

4 结论

本文采用无接触式称重装置监测猪主动脉冻干过程,参数设定为:一次干燥-20℃,二次干燥10℃,冻干压力10Pa。采用准稳态传热数学模型结合脱水速率,逐时计算升华温度、传热量、升华界面位移及传质阻力,得到结论如下:

1)通过实时称重准确地测定猪主动脉平均含水量为74.24%,其中自由水含量为71.96%。

2)在升华干燥阶段,样品温度迅速升高并超过搁板加热温度,而升华温度缓慢升高并始终低于加热温度,证实了样品的测量温度不能准确反映升华进程。

3)随着升华温度的升高,传热温差减小,传热量

逐渐下降,其中内外壁面较为明显。冰晶的升华主要来自侧面,辐射传热占总升华热的 70%~90%。

4)在冻干过程中,受传热的限制,内外壁处升华界面移动速率逐渐减小。由于传热面积较小,上下表面处于干燥层移动速率相对稳定。

5)在冻干前期,传质阻力随干燥层厚度的增加以恒定速率增长,传质控制较为明显。随着的传热量的减少,传质阻力增幅变大,传热对升华进程的限制愈发明显。

符号说明

- F —— 升华界面面积, m^2
- G —— 脱水速率, g/s
- ΔH —— 升华潜热, J/g
- L —— 样品长度, m
- m —— 样品质量, g
- p —— 压力, Pa
- Q —— 传热量, W
- q —— 热流密度, W/m^2
- R —— 传质阻力, $(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})/\text{kg}$
- r —— 样品半径, m
- T —— 温度, $^\circ\text{C}$
- V —— 体积, m^3
- x —— 干燥层厚度, m
- α —— 底面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- ε —— 表面发射率
- λ —— 干燥层导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- σ —— 黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- φ —— 脱水率, %
- ϕ —— 自由水质量比重
- ψ —— 自由水移除率, %

下标

- 0 —— 初始
- a —— 每组称重数据中第一次测量
- b —— 每组称重数据中第二次测量
- e —— 冻干环境
- fd —— 冻干后
- i —— 逐时, $i = 1, 2, 3 \cdots n$
- j —— $j = 1 \sim 4$ 分别代表内壁、外壁、底面和顶端
- pd —— 一次干燥后
- pl —— 搁板
- s —— 升华界面
- sub —— 升华区域
- sur —— 干燥层外表面
- t —— 总的

本文受上海市动力工程多相流动与传热重点实验室基金

项目 (1N-15-301-101) 资助。(The project was supported by Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer of Power Engineering Project(No. 1N-15-301-101).)

参考文献

[1] WARD M A, KANEKO T, KUSAKABE H, et al. Long-term preservation of mouse spermatozoa after freeze-drying and freezing without cryoprotection[J]. Biology of Reproduction, 2003, 69(6):2100-2108.

[2] 申江, 李帅, 齐含飞. 低温真空干燥对胡萝卜品质的影响[J]. 制冷学报, 2012, 33(2):64-67. (SHEN Jiang, LI Shuai, QI Hanfei. Influence of low temperature vacuum drying on the quality of carrots [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(2):64-67.)

[3] GOLDMAN M H, STRONG D M, BRICKLEY-PARSONS D, et al. Lyophilized veins as vascular substitutes[J]. Transplantation Proceedings, 1979, 11(2):1510-1511.

[4] 张高孟, 李鸿儒, 杨东岳, 等. 冻干同种小血管移植的实验研究[J]. 制冷学报, 1982, 3(4):54-59. (ZHANG Gaomeng, LI Hongru, YANG Dongyue, et al. Experimental study on lyophilized small vessel transplantation [J]. Journal of Refrigeration, 1982, 3(4):54-59.)

[5] 殷猛, 刘萌芳, 曹清, 等. 真空冷冻干燥过程中猪主动脉搏血管的力学性能[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(51):9539-9544. (YIN Meng, LIU Mengfang, CAO Qing, et al. Mechanical properties of porcine aorta after vacuum freeze-drying processes [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2010, 14(51):9539-9544.)

[6] 刘萌芳, 陶乐仁, 殷猛, 等. 猪主动脉搏血管真空冷冻干燥方法的优化[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(6):1142-1145. (LIU Mengfang, TAO Leren, YIN Meng, et al. Optimization of the freeze-drying method for pig aorta [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(6):1142-1145.)

[7] MILTON N, PIKAL M J, ROY M L, et al. Evaluation of manometric temperature measurement as method of monitoring product temperature during lyophilization[J]. Plasma Science and Technology, 1997, 51(1):7-16.

[8] BARRESI A A, VELARDI S A, PISANO R, et al. In-line control of the lyophilization process. A gentle PAT approach using software sensors[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 32(5):1003-1014.

[9] SANDALL O C, KING C J, WILKE C R. The relation between transport properties and rates of freeze-drying of poultry meat[J]. AIChE Journal, 1967, 13(3):428-438.

[10] DYER D F, SUNDERLAND J E. Heat and mass transfer mechanisms in sublimation dehydration[J]. Journal of Heat Transfer, 1968, 90(4):379-384.

- [11] LITCHFIELD R J, LIAPIS A I. An adsorption-sublimation model for a freeze dryer [J]. *Chemical Engineering Science*, 1979, 34(9):1085–1090.
- [12] SHEEHAN P, LIAPIS A I. Modeling of the primary and secondary drying stages of the freeze drying of pharmaceutical products in vials: numerical results obtained from the solution of a dynamic and spatially multi-dimensional lyophilization model for different operational policies [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1998, 60(6): 712–728.
- [13] 陶乐仁, 刘萌芳, 吴建青, 等. 不同预冻速率对猪主动脉冻干过程的影响及升华界面的移动特性分析[C]//第六届全国低温生物医学及器械学术大会论文集. 青岛: 中国制冷学会, 2009:49–54. (TAO Leren, LIU Mengfang, WU Jianqing, et al. Effects of pre-cooling rate on the freeze-dried pig artery and the analysis about its movement of sublimation interface[C]//6th National Conference on Cryobiology and Devices. Qingdao: Chinese Association of Refrigeration, 2009:49–54.)
- [14] 吴建青, 陶乐仁, 刘萌芳, 等. 冻干猪主动脉过程中升华界面移动特性实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(7): 1175–1177. (WU Jianqing, TAO Leren, LIU Mengfang, et al. Study on the characteristic of sublimation interface's movement in freeze-drying of the pig's aorta[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(7): 1175–1177.)
- [15] AYDIN E S, YUCEL O, SADIKOGLU H. Modelling and simulation of a moving interface problem; freeze drying of black tea extract[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2017, 53(6):2143–2154.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat transfer*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.)
- [17] 华泽钊. 冷冻干燥新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (HUA Zezhao. *New technology of refrigerant desiccation*[M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [18] 刘萌芳. 猪主动脉冻干理论研究及移植应用[D]. 上海: 上海理工大学, 2013. (LIU Mengfang. *Study on the freeze-drying theory of porcine aortic vascular and its application*[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2013.)

通信作者简介

陶乐仁, 男, 教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn。研究方向: 低温生物医学技术, 低温与制冷技术, 传热传质强化。

About the corresponding author

Tao Leren, male, professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn. Research fields: cryobiomedical techniques, cryogenic and refrigeration technique, heat and mass transfer enhancement.