

紫花苜蓿茎秆在常压热风干燥中的传质模拟研究

车 刚¹, 李成华², 汪 春¹, 万 霖¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 沈阳理工大学, 沈阳 110168)

摘 要: 根据斐克定律和质量守恒原理, 建立了可以预测干燥过程中苜蓿茎秆内部水分分布的常压热风干燥的传质数学模型。通过对扩散模型边界条件的处理, 结合紫花苜蓿茎秆内部水分扩散的干燥试验结果, 采用数值模拟方法确定了干燥苜蓿茎秆的传质系数。结果表明, 干燥苜蓿样本的含水率与模拟分析含水率的决定系数为 $R^2 = 0.927$, 模拟分析具有较高的准确度。在此基础上进行的苜蓿茎秆内部水分分布的模拟计算保证了与苜蓿非稳态干燥过程的一致性。

关键词: 常压热风干燥; 苜蓿茎秆; 传质模型; 数值模拟

中图分类号: TS205.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0027-05

车 刚, 李成华, 汪 春, 等. 紫花苜蓿茎秆在常压热风干燥中的传质模拟研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 27-31.

Che Gang, Li Chenghua, Wang Chun, et al. Moisture mass transfer simulation of alfalfa stem convective airflow drying [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 27-31. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

苜蓿 (*Medicago Sativa*, L) 是栽培历史悠久、种植面积较大的一种多年生豆科牧草, 它以产量高、营养丰富、适口性好而享有“牧草之王”的美誉。苜蓿植株分为粗茎秆、叶片和优质茎秆, 优质茎秆是主茎上的二级分枝。粗茎秆、叶片和优质茎秆的平均质量分别约为 47.7%、35.8%、16.5%, 茎秆约占植株总质量的 65%。茎秆近似一个圆柱体, 粗茎秆的平均直径是 3.52 mm, 优质茎秆的平均直径为 2.30 mm, 汁液含量丰富, 其外表面的角质层是防止水分蒸发的天然屏障, 但是却给苜蓿的干燥增加了难度, 茎叶的干燥速率相差 2~3 倍^[1], 因此, 紫花苜蓿干燥的关键是茎秆部分。苜蓿茎秆干燥是一个复杂的传热传质过程, 目前常用的指数干燥模型、Page 干燥模型均属经验模型, 只能描述干燥过程中苜蓿茎秆平均含水率变化, 无法表现茎秆内部水分的扩散过程。分析苜蓿茎秆内部的水分扩散机理对于深入研究苜蓿的干燥特性及劣变发生的机理具有重要的意义^[2]。干燥过程中, 苜蓿的物理性质、化学性质和营养成分都要发生变化, 其中大多数变化都与温度、水分和时间有关。如果能够准确地预测干燥过程中苜蓿茎秆内部水分的分布和温度的分布随时间的变化, 就可以优化干燥参数和干燥工艺, 以防止苜蓿干燥品质的下降。在现有描述物料干燥过程内部传热传质的数学模型中, 扩散

模型应用较为普遍。但质热参数都作为确定值给出, 与实际干燥过程具有一定差距^[2]。为获得苜蓿常压干燥过程实用的水分传递方程, 本文根据试验测得的干燥特性值, 确定了苜蓿干燥中的传质系数, 模拟研究苜蓿茎秆干燥的传质过程, 为进一步研究紫花苜蓿的干燥工艺奠定理论基础。

1 紫花苜蓿茎秆传质数学模型

1.1 苜蓿茎秆模型简化

简化紫花苜蓿茎秆为圆柱体, 如图 1 所示。苜蓿茎秆按照一维柱体非稳态质扩散过程处理, 收缩量忽略不计, 即体积不发生变化。根据蒸发前沿面理论, 蒸发前沿面距表面为 s , 蒸发前沿面为水分在某条件下(界面边界条件)完全蒸发的面。 $R-s \leq r \leq R$ 区域定义为干区, $0 \leq r \leq R-s$ 的区域定义为湿区, r 为茎秆截面区域内任意半径, R 为茎秆模型最大半径值。

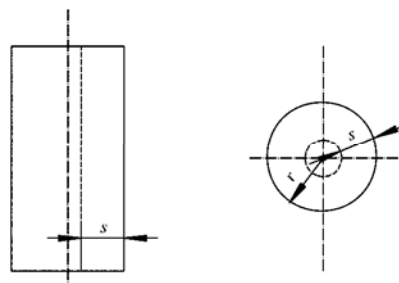


图 1 苜蓿茎秆简化传质模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of moisture transfer of alfalfa stem

1.2 苜蓿茎秆传质模型的建立

常压热风干燥苜蓿是一个典型的非稳态过程, 结合苜蓿茎秆的形状及组成特点, 按一维柱体非稳态质扩散

收稿日期: 2006-07-15 修订日期: 2006-10-10

基金项目: 黑龙江省教育厅重点攻关项目(105112007; 10551228)

作者简介: 车 刚(1972-), 山东平度人, 博士, 副教授, 主要从事干燥过程理论与设备研究。大庆 黑龙江八一农垦大学工程学院, 163319。Email: chegang180@yahoo.com.cn

过程进行分析。根据斐克定律及质量守恒原理,组成描述苜蓿草段干燥过程中完整的扩散微分方程组如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial x(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(D(x, \tau) \cdot r \cdot \frac{\partial x(r, \tau)}{\partial r} \right) \right] \\ (0 < r < R, \tau > 0) \\ x(r, \tau) \Big|_{\tau=0} = M_0 (0 \leq r \leq R, \tau = 0, M_0 = 78.6\%) \\ \frac{\partial x(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (r = 0, \tau > 0) \\ -D \frac{\partial x(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\frac{\partial x}{\partial \tau} \frac{R}{2} \quad (r = R, \tau > 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 D ——质扩散系数,是含水率与时间的函数, m^2/s ; x ——苜蓿茎秆含水率, % (wb); τ ——时间, s; M_0 ——苜蓿茎秆的初始含水率, % (wb)。

2 干燥过程模型的离散化分析

结合苜蓿薄层干燥试验结果,对茎秆作均质处理(机械压裂和去除表皮层),虽然质扩散系数 D 是含水率与时间的函数,但可以近似认为 D 是常数。采用等距网格法,用一组同心柱壳划分茎秆柱体。对左边界采用三点一侧差分格式的形式,对右边界采用内节点处理,联立确定完整的离散化方程组如式(2)所示:

$$\begin{cases} x_i^1 = M_0 \\ x_i^{j+1} = (1 - 2f_0)x_i^j + (1 + \frac{1}{2(i-1)})f_0x_{i+1}^j + \\ (1 - \frac{1}{2(i-1)})f_0x_{i-1}^j \\ i = 2, 3, 4, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \\ x_m^{j+1} = 2f_0x_{m-1}^j + (1 - 2f_0)x_m^j - \frac{2\Delta\tau}{\Delta r} (1 + \frac{1}{2(m-1)})f(j) \\ j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \\ x_1^{j+1} = \frac{1}{3}(4x_2^{j+1} - x_3^{j+1}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \end{cases} \quad (2)$$

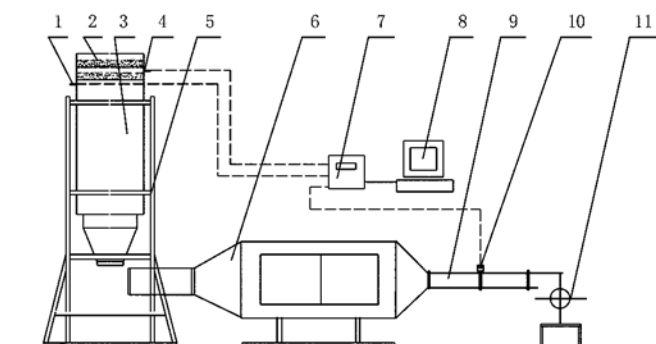
式中 f_0 ——时空步长比, $f_0 = \frac{D\Delta\tau}{\Delta r^2}$; $f(j)$ —— j 时刻苜蓿茎秆单位传质表面脱水率, $f(j) = \frac{x(j) - x(j+1)}{\Delta\tau} \cdot \frac{R}{2}$; $x(j)$ —— j 时刻苜蓿茎秆的平均含水率, % (wb); i ——内部网格节点。

3 试验材料和方法

3.1 试验材料和试验装置

试验所用材料为大庆市银锣集团牧场提供的紫花苜蓿优质茎秆,其初始含水率为 75%~79% wb。试验装置采用八一农垦大学干燥试验室研制的 5MG-50 型牧

草薄层干燥试验台。干燥试验台结构如图 2 所示。



1. 温度传感器 2. 搁网筛层 3. 干燥室 4. 高温湿度传感器
5. 支架 6. 高温加热器 7. 电控柜 8. 计算机 9. 风管
10. 涡街式流量计 11. 风机

图 2 牧草干燥试验台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of alfalfa drying test-bed

3.2 试验和计算方法

在 5MG-50 型牧草干燥试验台上,设定干燥温度为 170℃,表现风速 0.3 m/s,将长度为 200 mm 的苜蓿草茎段按顺序无重叠地排列一层,使每一个苜蓿茎秆段都能得到充分地接触热风介质,而且将茎秆两端用蜡纸封住,减少茎秆水分的轴向流失,保证试验结果的可靠性。利用扩散模型进行干燥过程的数值模拟计算,计算控制精度为两次采样点平均含水率的最大差值小于 0.1%。由试验含水率曲线,采用三次样条函数插入足够多的计算点,选定合适的网格比,利用 MATLAB 设计优化程序,与实际试验值对比确定合理的均质传质系数,并模拟苜蓿茎秆内部水分分布随时间的变化,分析苜蓿茎秆内部水分扩散过程。

4 结果与分析

4.1 质扩散系数的确定

由试验数据作均质处理只是一种实际过程的近似,确定的是苜蓿茎秆的平均扩散系数。以苜蓿优质茎秆的多组试验均值为参照值,进行模拟计算,迭代计算时空步长比 f_0 和模型层数 n 的最优值。非稳态质扩散模型的计算层数 n 在 7~9 层的平均传质系数 D 的稳定性较好,而且最终模拟含水率均值接近试验值(5.12% wb)。模拟计算结果如图 3 所示。

在 MATLAB 的程序计算中,随着时空步长比 f_0 和模型层数 n 的值不同,苜蓿茎秆内部含水率也不同。当模型的计算层数 n 设定为 8 层时,其苜蓿茎秆模拟计算终值与试验最终值相对误差小于 6%,利用反问题法计算并确定苜蓿优质茎秆的传质系数为 $D = 4.798 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。同理,可以计算出普通苜蓿茎秆及经过机械处理的茎秆的平均传质系数 D 值如表 1 所示,其中 σ 为

标准差, R^2 为样本决定系数。

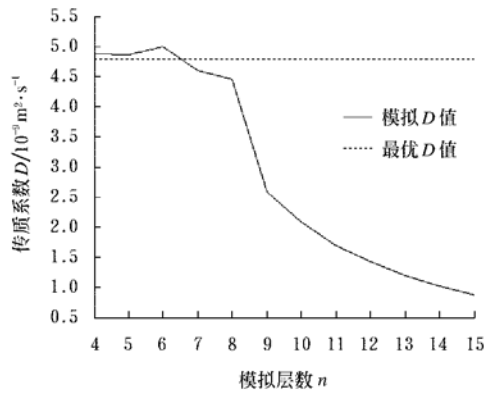


图 3 苜蓿茎秆传质系数 D 值

Fig. 3 Moisture transfer coefficient of alfalfa

表 1 质扩散模型计算结果表

Table 1 Results of moisture transfer model of alfalfa

物料名称	$\Delta\tau$ /s	σ / 10^{-4}	R^2 /%	D / $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	备 注
优质茎秆	5	5.63	92.0	4.798	处理蜡质
—	5	4.36	90.0	1.035	不处理
优质茎秆	5	6.28	90.0	5.780	机械处理
混合茎秆	5	7.36	91.0	4.546	机械处理

建立的非稳态质扩散模型的准确性通过干燥过程动态特性的试验含水率与茎秆内部水分扩散模拟值的拟合程度检验, 其结果如图 4 所示, 其相关系数 $R^2 = 0.92$ 。试验验证采用时段测定法进行检验, 试验相对误差为 8.7% 左右。在保证传质模型有效性的前提下, 试验相对误差不超过 10% 的精度用于工程问题可以接受。在此基础上进行的苜蓿内部水分分布的计算保证了与苜蓿优质茎秆非稳态干燥过程的同步性。苜蓿茎秆干燥过程中角质层是最主要的传质阻力。在相同的干燥条件下, 较高的干燥温度对蜡质层有一定的破坏作用, 但是必须经过茎秆处理才能提高平均传质系数, 接近叶片的干燥速率, 提高整株苜蓿干燥的可操作性^[8]。

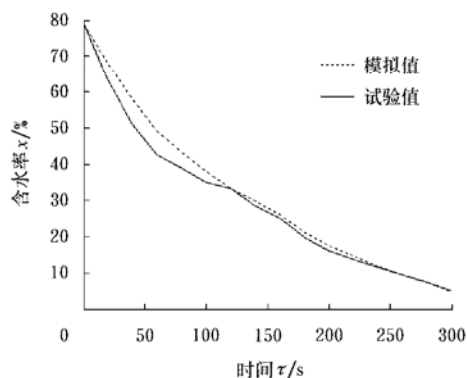


图 4 干燥试验与模型计算含水率比较

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated moisture contents

4.2 模拟分析

从图 4 干燥试验拟合曲线可以看出, 模拟模型的拟合程度高, 这与通常的干燥经验模型有所区别。因此作进一步的分析, 利用 MATLAB 进行数值分析, 在 MATLAB 中用最小二乘法拟合采样函数值进行数值分析。拟合结果与数据统计分析结果如图 5 和表 2 所示。

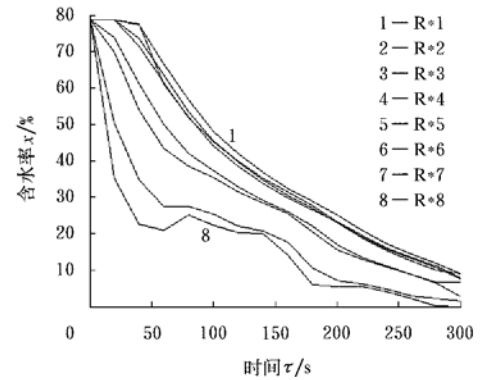


图 5 苜蓿茎秆内部模拟含水率的变化

Fig. 5 Simulated moisture distribution of inside alfalfa stem

表 2 试验平均值与模拟值对照表

Table 2 Comparison of experimental data with simulated data

时间/s	模拟平均含水率/%	试验平均含水率/%	相对偏差/%
0	78.60	78.60	0
20	67.96	63.30	7.36
40	58.16	53.50	8.71
60	49.23	44.96	9.49
80	43.38	39.90	8.72
100	37.93	34.99	8.40
120	33.34	31.20	6.85
140	29.83	28.53	4.55
160	25.99	25.08	3.62
180	21.17	19.74	7.24
200	17.48	16.05	8.90
220	14.57	13.77	5.80
240	11.91	11.64	2.31
260	9.48	9.47	0.10
280	7.36	7.30	0.82
300	4.72	5.12	7.81

图 5 是苜蓿茎秆内部不同节点随时间变化的含水率曲线。图中 $R^* 1 \sim R^* 8$ 依次表示茎秆由中心到外表面的节点位置, $R^* 1$ 表示苜蓿茎秆的中心, $R^* 8$ 表示苜蓿茎秆的外表面。从图 5 可知, 干燥过程中, 苜蓿茎秆表面的降水速度要比中心部分快得多, 内部形成很大的水分梯度, 加速了水分由中心向表层的扩散。在整个干燥过程中, 茎秆中心水分不断向表层扩散, 含水率继续

下降,由于表皮角质层的阻水能力(较高温度对角质层有一定的破坏作用),内部水分不能有效地蒸发,因而浅层的含水率升高。从理论上讲,水分的累积有利于提高下一个干燥段的降水速率。 R^* 1~ R^* 4 位置的含水率变化不明显, R^* 7~ R^* 8 位置的含水率变化显著,存在升水段,说明茎秆表层部分的水分变化幅度不均匀,浅层的水分传递不通畅,这是由于茎秆蜡质层的阻水性和茎秆的非均质性综合作用的结果,进一步说明茎秆内部水分扩散过程的非稳态性。

整个干燥过程中苜蓿茎秆含水率的模拟值和实测值十分接近。在相同的干燥条件下干燥前期(0~ 100 s)相对偏差较大;干燥后期(200 s 以后)的模拟值和实测值平均偏差小于 5%。存在偏差的原因一方面是因为苜蓿的生理因素,如自由水分分布的差异,茎秆收缩引起的厚度和密度变化的影响;另一方面是模型过于理想化,约束条件不全面,在干燥模拟中未考虑温度梯度的影响及温度与水分的耦合作用。在干燥前期和干燥后期的模拟平均含水率与实测平均含水率非常接近。

5 结 论

1) 推导的紫花苜蓿常压热风干燥的传质数学模型,可以精确预测干燥过程中苜蓿草段内部水分的分布情况。计算结果与曲线拟合分析表明,优质茎秆在计算层数为 8 层时,模拟含水率与试验值拟合较好,决定系数为 $R^2 = 0.927$ 。

2) 经过处理的茎秆内部水分的扩散过程表现出较好的均质性与非稳态性。优质茎秆的平均传质系数为 $D = 4.798 \sim 5.780 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3) 苜蓿茎秆干燥过程中角质层是最主要的传质阻力。在相同的干燥条件下,较高的干燥温度对蜡质层有一定的破坏作用,但是必须经过茎秆处理才能提高平均传质系数,从而提高整株苜蓿干燥的可操作性。

[参 考 文 献]

- [1] Rots C A, Abrams S M. Losses and quality changes during alfalfa hay harvest and storage[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(2): 350– 355.
- [2] Shahabad S K, Patel F T. Kinetics of dehydration of green alfalfa[J]. Drying Technology, 1996, 14(5): 1197– 1234.
- [3] Mullet A, Berea A, Rosella C. Drying model of carrots [J]. Drying Technology, 1989, 7(3): 537– 557.
- [4] Zhang Q, Litchfield J B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer [J]. Drying Technology, 1991, 9(1): 233– 244.
- [5] James A, Stewart R. Moisture migration during storage of preserved high moisture grams [J]. Transactions of ASAE, 1985, 18: 378– 393.
- [6] Arum S. Mujumdar. Drying technology in agriculture and food sciences [M]. New York: Science publishers, Inc, 2000: 191– 211.
- [7] Bonanza C, Michonc. Moisture diffusion in gelatin slabs by modeling drying kinetics [J]. Drying Technology, 1997, (15): 2045– 2059.
- [8] 车 刚,汪 春,李成华,等.紫花苜蓿常压热风干燥试验研究[J].农机化研究,2004,3(6): 177– 179.
- [9] 李业波,泰玉昌,李业德.土豆干燥过程中内部传热传质的数值模拟[J].农业工程学报,1996,12(3): 52– 55.
- [10] 杨俊红,诸治德,顾惠军,等.蔬菜种子干燥中种皮的效应与优化传热传质机理[J].工程热物理学报,1997,18(6): 721– 724.
- [11] 王 俊,刘正怀.切片土豆间歇干燥过程传热传质模拟研究[J].农业工程学报,2000,16(6): 107– 109.
- [12] Krokida, Maroulis Z B, Marinos-Kouris D. Heat and mass transfer coefficient in drying[J]. Drying Technology, 2002, 12(1): 713– 720.
- [13] Hassini L, Azzouz S, Belghith A. Estimation of the moisture diffusion coefficient of potato during hot-air drying[J]. Drying, 2004, 2(8): 1488– 1495.
- [14] Kimberly Ryland, Wang L J, Alejandr Amezquit, et al. Estimation of heat transfer coefficients of cooked boneless ham[J]. Review of Undergraduate Research in Agricultural and Life Sciences, 2006, 1(1): 5– 17.
- [15] 车 刚.紫花苜蓿保质干燥试验研究及干燥设备的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2006.

[1] Rots C A, Abrams S M. Losses and quality changes during alfalfa hay harvest and storage[J]. Transactions of

Moisture mass transfer simulation of alfalfa stem convective airflow drying

Che Gang¹, Li Chenghua², Wang Chun¹, Li Yuqing¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang August First Land Reclamation University, Daqing 163319, China;

2. Shenyang University of Technology, Shenyang 110168, China)

Abstract: According to Fick's law and principle of mass conservation, mass transfer model for convective airflow drying of alfalfa was established for forecasting moisture distribution inside alfalfa stem. Through boundary condition treatment of diffusion model and combination of experiment results of moisture diffusion inside alfalfa stem, moisture diffusion coefficient was calculated by using the method of numerical simulation. The result showed that determination coefficient on experimental data with simulation results was 0.927, which indicated that simulation had higher accuracy. Moisture diffusion simulation inside alfalfa stem was in accordance with non-steady drying procedure.

key words: convective airflow drying; alfalfa stem; mass transfer model; numerical simulation