

木片散堆碎料水分迁移系数的研究

尚德库 姜日顺 艾沐野

(东北林业大学)

摘要 本文首次提出利用梯度转换法,实验测定动态传质控制方程中的质扩散系数及传质边界条件中的质交换系数,求算了表面以下蒸发界面深度及其对蒸发速率与相对蒸发深度的关系。实验表明,多孔物料表面下的相对蒸发深度在1%以下时,对质迁移率的影响极为显著。质交换系数也是蒸发界面深度的函数。

质扩散系数是含水率的函数。本文采用变系数分段线性化的方法,利用质扩散方程的解析解验算了所求出的质扩散系数、质交换系数及蒸发界面深度的可靠性。理论验算表明,无量纲质迁移势的理论值与实验值之间的相对误差不大于6%,从而说明,利用梯度转换法测定木片料床的质迁移系数的方法是可行的。

关键词 木片;梯度转换法;水分迁移系数。

前言

由于木片形状、尺寸极不规则,组相间的相互交叉^[1]以及木材性质的随机性,木片碎料的质迁移特性与其它散堆多孔物料(粮食、土壤等)既有类似之处,又具有本身的特点,主要体现在它的生物性和物理性质的随机性上。对于木片散堆碎料质迁移特性的研究,目前国内外尚不多见,研究方法尚不成熟。随着木片利用的数量日趋增加,对其物性进行深入研究有重要理论和实际意义。本文提出利用梯度转换法,实验测定动态传质控制方程中的质扩散系数及传质边界条件中的质交换系数。

一、梯度转换法

如图1所示,木片中的水分是以周围气体为媒介,向环境中扩散的。木片含水率与周围空隙中的空气湿度有着一定的关系。在吸湿极限以上,木材中的水分蒸发类似于自

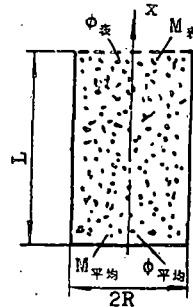


图1 木片中水分向环境扩散

M —木片料床中的含水率,%; ϕ —空隙中的相对湿度,%; L —柱体高度,cm; R —柱体半径,cm

由水,界面上的湿度趋于饱和($\phi = 100\%$);在吸湿极限以下,湿度和含水率的关系可用等温吸附线来描述(图2)^[2]。当界面 $X > L$ (图1)处的湿度 $\phi_{\infty} < \phi_{表}$ 时,界面 $X \leq L$ 处木片中的水分将向外界扩散,从而使 $M_{平均} > M_{表}$, $\phi_{平均} > \phi_{表}$,并形成含水率梯度和湿度梯度,即

$$\Delta M / \xi = (M_{平均} - M_{表}) / \xi \quad \dots (1)$$

收稿日期:1991.7.3.

*本研究由国家教委优秀青年教师科研基金资助,特此致谢。

及 $\Delta\phi/\xi = (\phi_{\text{平均}} - \phi_{\text{表}}) / \xi \dots (2)$

式(1)和(2)中:

$M_{\text{平均}}$ —料床平均含水率;

$M_{\text{表}}$ —料床表层含水率;

ΔM —料床平均和表层含水率之差;

ξ —表面下蒸发界面深度或蒸发层厚度, cm;

$\phi_{\text{平均}}$ —料床内部空隙间空气的湿度;

$\phi_{\text{表}}$ —料床表层空隙间空气的湿度;

$\Delta\phi$ —料床内部和表层空气的湿度差。

归纳起来,可得出如下结论:

1. 两质迁移势 $\Delta M/\xi$ 和 $\Delta\phi/\xi$ 互相制约, 图2所示的等温吸附线, 即确定了吸湿极限以下木材含水率与空气湿度之间的关系, 故按这种特定规律, 两质迁移势可互相转换。

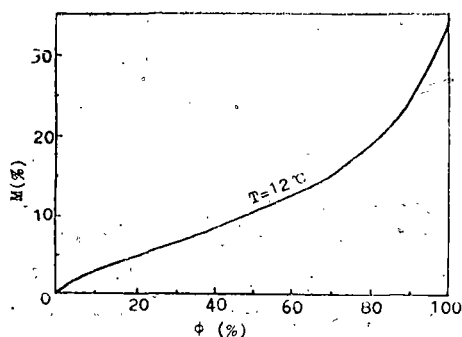


图2 木材等温吸附线^[2]

2. 转换后的某质迁移势, 均可作为质迁移的推动力。同时, 无论取那个质迁移势, 导致的质迁移率必定相等。

空隙间空气的状态可由气体状态方程描述^[2], 即

$$PV_{\text{气}} = \frac{W}{18} RT \dots (3)$$

或

$$P \varepsilon V = \frac{W}{18} RT \dots (4)$$

$$AH = \frac{W}{V \cdot \varepsilon} = \frac{18P}{RT} \dots (5)$$

式中:

P —水蒸汽分压, cmHg;

$V_{\text{气}} = \varepsilon \cdot V$; 为空隙中气体的体积, cm^3 ;

ε 为空隙率, $\varepsilon = V_{\text{气}}/V$, V 为料床体积, cm^3 ;

W —水蒸汽含量, g;

R —气体常量, $R = 6.23 \text{ cmHg}/(\text{mol} \cdot \text{k})$;

T —K氏温标, K;

AH —绝对湿度, $\text{g}(\text{水蒸汽})/\text{cm}^3(\text{湿空气})$ 。

按Fick定律, 应用式(5), 求得水蒸汽分压差导致的质扩散率或水分迁移率为

$$\begin{aligned} J_a &= -D_a \cdot \varepsilon \frac{AH_{\text{平均}} - AH_{\text{表}}}{\xi} \\ &= -D_a \cdot \frac{\varepsilon P_o}{RT} \cdot \frac{\phi_{\text{平均}} - \phi_{\text{表}}}{\xi} \\ &= -D_a \cdot \frac{18 \varepsilon P_o}{RT} \cdot \frac{\Delta\phi}{\xi} \dots (6) \end{aligned}$$

式中:

J_a —气相质扩散率, $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$;

$AH_{\text{平均}}$ 、 $AH_{\text{表}}$ —分别为料床平均和表层的绝对湿度, g/cm^3 ;

P_o —饱和水蒸汽分压, cmHg;

$\phi_{\text{平均}}$ 、 $\phi_{\text{表}}$ —料床平均和表层湿度;

D_a —气相质扩散系数, cm^2/s ;

$\Delta\phi$ —料床平均和表层湿度差

气相质扩散系数 D_a 可由下式求得^[2]:

$$D_a = 0.22 \left(\frac{76}{P_o} \right) \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \dots (7)$$

式(7)中 P_o —大气压力, cmHg。

由含水率梯度引起的水分迁移率为

$$\begin{aligned} J_M &= -D_M \frac{\rho_o (M_{\text{平均}} - M_{\text{表}})}{\xi} \\ &= -D_M \frac{\rho_o \Delta M}{\xi} \dots (8) \end{aligned}$$

式(8)中:

J_M —含水率梯度导致的水分迁移率, $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$;

ρ_0 —料床的绝干密度, g (绝干木材)
/ cm^3 (料床体积);

D_M —含水率梯度作为推动力时的质扩散
系数, cm^2/s 。

因 $J_0 = J_M$, 由式(6)和式(8)得

$$D_M = D_0 \frac{18 \varepsilon P_0}{P_0 RT} \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta M} \dots \dots (9)$$

式(9)中的 $\Delta \phi / \Delta M$ 可由图2所示的
等温吸附线确定(这里采用了有限量)。应
用这里叙述的梯度转换法, 本实验测定了动
态质扩散方程中的质扩散系数和边界条件中
的质交换系数。

二、实验研究

采用的实验装置如图3所示。柱体底面

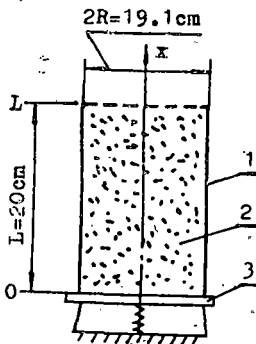


图3 实验装置示意图

1. 有机玻璃柱体; 2. 木片; 3. 天平

封闭, 上表面与环境进行质交换。定期称量
柱体内材料平均含水率和表层含水率的变
化, 由称测表层数片木片测定(某时刻称完
后放回原处)。实验材料为桦木木片, 初含
水率及终含水率的测定采用称重法(天平精
度1%), 符合美国ASTM同类检测方法
的要求。实验数据如表1所示。

料床蒸发面积 $286.37cm^2$; 柱体容积为
 $5,727.52cm^3$ 。美国ASTM规定, 称试件
的天平感量应小于或等于水份扩散率基本稳定
后, 试件总失水量的1%。由于2周以后水
分扩散率基本为常数, 由累计水分蒸发量
 $108.89 \times 1\% = 1.0089$, 远远大于所用天平
的感量(0.01g)。

三、实验结果

实验结果如表2所示。 D_0 由式(7)求
得, D_M 由式(9)求得, 其中 $\varepsilon = 0.66^{[3]}$,
 $\rho_0 = 0.175g/cm^3$, ϕ 表按等温吸附线(图2)
由测定的 M 表求得。

随着干燥过程的进行, 多孔物料水分的
蒸发将在物料的表面以下进行, 表面下的蒸
发界面(干湿区交界面)将向湿区动态迁移。
由于物料表层下的蒸发现象对水分迁移率有
重要影响, 对此进行研究是非常重要的^[4]。

表1 木片碎料等温自然干燥实验数据

观测数(i)	累计时间 (s)	累计水分 蒸发量(g)	质扩散率 $\frac{g}{cm^2 \cdot s}$	环境湿度 (%)	环境温度 (℃)	$M_{平均}$ (%)	$M_{表}$ (%)
初始	0	0	0	45	10.0	36.47	36.47
1	165,600	14.2	5.74×10^{-7}	45	10.0	35.15	32.31
2	266,400	27.0	3.85×10^{-7}	45	12.8	33.97	26.92
3	504,000	52.1	3.61×10^{-7}	45	13.8	31.65	16.92
4	720,000	74.5	3.61×10^{-7}	50	14.0	29.57	16.92
5	972,000	87.8	3.15×10^{-7}	50	14.7	28.33	15.38
6	1,170,000	100.6	3.00×10^{-7}	50	13.7	27.15	15.38
7	1,332,000	108.8	2.85×10^{-7}	50	12.8	26.39	15.38
平均			3.69×10^{-7}	47.5	11.5		

表2 实验结果

i	$D_a, \text{cm}^2/\text{s}$	$D_M, \text{cm}^2/\text{s}$	ξ_a, cm	ξ_m, cm	$\alpha_a, \text{cm}^2/\text{s}$	$\alpha_m, \text{cm}^2/\text{s}$	$\alpha'_m, \text{cm}^2/\text{s}$
1	0.2343	6.232×10^{-6}	-0.054	-0.054	4.339	3.924×10^{-5}	1.70×10^{-6}
2	0.2384	8.14×10^{-6}	-0.273	-0.263	0.873	1.06×10^{-5}	1.503×10^{-6}
3	0.2398	1.044×10^{-5}	-0.780	-0.746	0.307	4.759×10^{-6}	3.448×10^{-6}
4	0.240	1.686×10^{-5}	-1.034	-1.034	0.232	5.543×10^{-6}	4.029×10^{-6}
5	0.241	1.755×10^{-5}	-1.558	-1.262	0.155	4.728×10^{-6}	4.75×10^{-6}
6	0.2397	2.056×10^{-5}	-1.433	-1.411	0.167	4.953×10^{-6}	4.525×10^{-6}
7	0.2384	2.095×10^{-5}	-1.319	-1.416	0.181	5.03×10^{-6}	4.30×10^{-6}

由式(6)和(8)求出蒸发界面的深度:

$$\xi_a = -\frac{18D_a \varepsilon P_0 \Delta \phi}{RTJ_a} \quad (10)$$

及

$$\xi_m = -\frac{D_M \rho_0 \Delta M}{J_M} \quad (11)$$

式中: ξ_a —气相蒸发界面深度, cm;

ξ_m —骨架蒸发界面深度, cm。

可见, $\xi_a \approx \xi_m = \xi$ (表2)。令相对蒸发速率及相对蒸发深度分别为:

$$\eta = \frac{J_a}{J_{\text{水}}} = \frac{J_M}{J_{\text{水}}} \quad (12)$$

及

$$\delta = \frac{\xi_a}{L} 100\% \approx \frac{\xi_m}{L} 100\% \quad (13)$$

式中: η —相对蒸发速率;

$J_{\text{水}}$ —水表面自由蒸发速率(与木片碎片干燥同步测定), $J_{\text{水}} = 7.65 \times 10^{-7} \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$;

δ —相对蒸发深度, %;

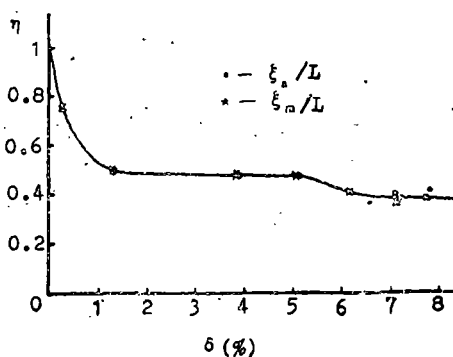
L —料床厚度, cm。

表3是本研究测得 η 随 ξ 的变化情况与Luikov和Morgon的研究结果^[4]相比较。虽然实验条件和材料不一样,但反映出对于多孔物料来说, η 随 ξ 减小的规律是一致的。相对蒸发速度 η 随表面下相对蒸发深度 δ 的变化如图4所示。

由图4可见,当 δ 小于1%时($\xi \approx$

表3 η 值与Luikou和Morgon数相比较

ξ, cm	相对蒸发速率		
	η	Luikou	Morgon
0.5	0.75	0.86	0.435
3.0	0.50	0.34	0.097

图4 η 与 δ 的变化关系

3 mm), η 随 δ 变化非常显著,而后减缓,这与有关报道相吻合^[4]。

多孔物料在静止的空气中发生表面以下蒸发时,水分迁移率与推动力之间仍具有类似牛顿公式的关系:

$$\begin{aligned} J_a &= \frac{AH_0 D_a \varepsilon}{\xi} (\phi_\xi - \phi_\infty) \\ &= AH_0 \cdot \alpha_a \cdot \varepsilon (\phi_\xi - \phi_\infty) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} J_M &= \frac{\rho_0 D_m}{\xi} (M_\xi - M_\infty) \\ &= \rho_0 \alpha_m (M_\xi - M_\infty) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: ϕ_{ξ} —蒸发界面 ξ 的湿度;

AH_0 —蒸发区 ξ 上的湿容量, g/cm^3 ;

M_{ξ} —蒸发界面 ξ 处的含水率;

M_{∞} —木材平衡含水率;

ϕ_{∞} —环境湿度;

α_s —水蒸汽浓度差或分压差为推动力时的质交换系数,

$$\alpha_s = D_s / \xi, \quad \text{cm/s};$$

α_m —含水率为推动力时的质交换系数,

$$\alpha_m = D_M / \xi, \quad \text{cm/s}.$$

显然,由式(14)和(15)可求出 ϕ_{ξ} 和 M_{ξ} :

$$\begin{aligned} \phi_{\xi} &= \frac{J_s \cdot \xi}{AH_0 D_s \varepsilon} + \phi_{\infty} \\ &= \frac{J_s}{AH_0 \alpha_s \varepsilon} + \phi_{\infty} \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\xi} &= \frac{J_M \xi}{\rho_0 D_M} + M_{\infty} \\ &= \frac{J_M}{\rho_0 \alpha_m} + M_{\infty} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

作为比较,应用牛顿公式求算质交换系数

$$\alpha'_m = \frac{J_M}{\rho_0 (M_{\text{表}} - M_{\infty})} \quad (\text{cm/s}) \dots\dots\dots (18)$$

计算结果见表2。显然 α_m 和 α'_m 在同一数量级。当 ξ_m 增大至3mm时, α_m 显著变小,说明蒸发阻力增大。但在不考虑表面以下蒸发特性时, α'_m 在含水率差较大的表面蒸发初期反而较小,这似乎与实际物理现象不符。

实验表明,质扩散系数 D_M 随含水率的减小而增大(图5)。由公式(7)、(8)和(9)可得

$$\begin{aligned} J_M &= 0.22 \left(\frac{76}{P_s} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{1.76} \\ &\quad \cdot \frac{18 \varepsilon P_0 \Delta \phi}{RT \xi} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

由式(19)可见,当大气压力 P_s 一定时,木片碎料干燥时的水分迁移率 J_M 与空隙

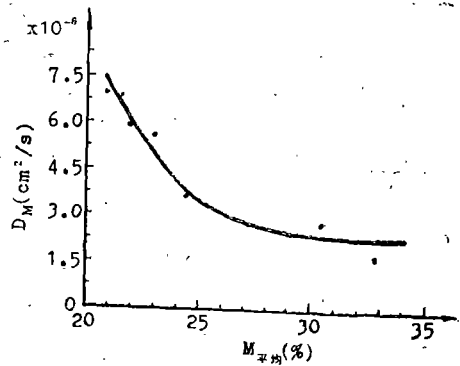


图5 质扩散系数与平均含水率的关系

率 ε 、温度 T 和水蒸汽分压差 $P_0 \Delta \phi$ 成正比,与蒸发界面深度 ξ 成反比。

四、理论验证

实验模型(图3)的一维质迁移过程可由下式描述,即

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_M \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (20)$$

及边界条件:

$$M(x,0) = M_{\text{初}}, \quad t=0, \quad 0 \leq x \leq L \dots\dots\dots (21)$$

$$D_M \frac{\partial M(0,t)}{\partial x} = 0, \quad x=0 \dots\dots\dots (22)$$

$$\begin{aligned} D_M \frac{\partial M(L,t)}{\partial x} + \alpha_m (M_{\text{表}} - M_{\infty}) \\ = 0, \quad x=L \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

式中: t —时间, s

$M_{\text{初}}$ —料床初含水率, 46.5%

与传热相类似, 传质付里叶准数及传质比奥准数分别为

$$\begin{aligned} F_{oM} &= \frac{D_M \cdot t}{L^2} \quad \text{和} \quad B_{iM} = \frac{\alpha_m L}{D_M} \\ &= \frac{L}{\xi} \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

由式(23)可见,当考虑表面下蒸发时,传质比奥准数 B_{iM} 实际上是相对蒸发深度的倒数。对于时间间隔 i 到 $i+1$,近似取

D^M 为常数, 则式 (18) 的解析解为^[5]

$$E = \frac{M(x,t) - M_{\infty}}{M_{初} - M_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \mu_n \frac{X}{L} \right) e^{-\mu_n^2 F_{oM}} \dots\dots\dots (25)$$

其中:

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2 B_{1M} (B_{1M}^2 + \mu_n^2)^{\frac{1}{2}}}{\mu_n (B_{1M}^2 + B_{1M} + \mu_n^2)} \dots\dots\dots (26)$$

$$\mu_n \cdot \tan \mu_n = B_{1M} \dots\dots\dots (27)$$

上式中, μ_n 为特征方程(26)的 n 个正根。对于时间间隔 i 到 $i+1$ ($i = 0, 1, 2, \dots 6$), 可求得相应的 F_{oM} 和 B_{1M} (见表 4)。

表4 理论验证结果

i	B_{1M}	F_{oM}	E		M_1 (%)	
			实验值	计算值	实验值	计算值
1	370.4	2.58×10^{-3}	0.95	0.95	35.15	35.15
2	76.3	3.95×10^{-3}	0.91	0.89	33.97	33.56
3	26.8	1.03×10^{-2}	0.82	0.76	31.65	30.12

当 $\xi < 10\text{mm}$ 时, $\frac{X}{L} = \frac{L - \xi}{L} \approx 1$,

$F_{oM} < 0.01$, 故可近似按表层蒸发考虑。由 Peoschl^[6] 提供的 $E = f(F_{oM}, B_{1M})$ 计算表, 可求得由式(25)表达的无量纲质迁移势 E 的理论值 (表 4)。

表 4 表明, 利用梯度转换法求得的质扩散系数 D_M 和质交换系数 α_m 及蒸发界面深度 ξ , 解析解算出的理论值与实验值相比较, 含水率最大相对误差小于 6%, 从而表明本文提出的理论方法及取得的实验结果是可靠的。

五、结 论

本文首次提出可采用梯度转换法测定木片碎料的质扩散系数和与环境间的质交换系数。且较为深入的讨论了表面下蒸发的问

题。利用求出的物性参数, 质扩散方程的解析解与实验值比较, 相对误差小于 6%。

相对蒸发速率随蒸发界面深度增大而减小。数值上与 Luikov 的结果相接近。相对蒸发深度小于 1% 时, 对相对蒸发速率的影响最为显著。

质扩散系数随含水率的减小而增大。质交换系数依赖于蒸发界面深度。蒸发界面深度增加, 质交换系数变小, 说明此时蒸发阻力增大。

实验结果显示, 本文提出的理论方法是可行的。木片碎料初含水率大于 50% 时的情况, 需进一步研究。

(责任编辑 袁东岩)

参 考 文 献

- [1] Shang Deku, 1990, Water transport processes in wood particle materials, J. of Northeast Foreatry University, No.1.
- [2] Siau, F.J., 1984, Transport processes in wood, Springer-Verlag, Berlin etc.
- [3] Marta-Lena, E. et al., 1988, Mathematical modelling of transport processes and degradation in piles of forest fuel material. Research Notes No. 134/1988, The Swedish University of Agricultural Sciences, Carpenberg.
- [4] Keey, R.B., 1972, Drying principles and practice, Pergamon Press, Oxford etc.
- [5] Luikov, A.V., 1968, Analytical heat diffusion theory, Academy Press Inc., London.
- [6] Poeschl, D., 1932, Berechnung der Oberflaechentemperaturen geometrisch einfacher Koerper bei Abkuehlung oder Erwaermung der Isolierstoffe, Z.Zngew, Math.Mech. 12: 280.

A study on the coefficients of water movement in piled wood chips

Shang Deku Jiang Rishun Ai Muye

(Northeast Forestry University)

Abstract The method of gradient transformation was initialized in the paper. The diffusion coefficient in the governing differential equation of mass transfer and the surface emission coefficient on the boundary condition were experimentally determined. The effect of undersurface evaporation was quantitatively analyzed. The relationship between relative evaporation rate and the relative depth of evaporation surface was given. The experiment showed that the relative depth of evaporation below 1% influenced the relative evaporation rate significantly. The surface emission coefficient was also a function of the relative depth of evaporation.

The diffusion coefficient was a function of moisture content. By taking into account of the dependent of the above mentioned coefficients on the relative depth of evaporation and moisture content, the reliability of the given coefficients was tested by using the analytical solution of the governing differential equation of mass transfer. This showed a deviation in less than 6% between the measured values and the calculated values, which posed the results of the study as a valid exploring.

Keywords Wood chips; Method of gradient transformation; Coefficient of water movement

(上接第 6 页)

[3] 成俊卿主编, 1985, 木材学, 中国林业出版社。

[4] 王恺、白雪松, 1991, 国外小径原木加工与利用现状及进展, 世界林业研究, 4(3)。

[5] NCSU research program will benefit industry, 1989, Forest Products Journal,

39(1): 50.

[6] 森岗茂, 1990, 木材的染色及其利用, 第32次工艺美术设计学大会报告。

[7] 中国林学会木材工业学会论文集(3), 1989, 速生林木的综合利用, 《林产工业》编辑部。