

【論述】

從熱質傳送方程式探討高溫乾燥木材 水份蒸發之機理

吳學旦¹ 郭蘭生² 方專任³

一、前言

木竹材乾燥後方可獲穩定之尺寸安定性及良好之加工性。欲乾燥甫砍伐下之高含水量生材，在不產生諸如端裂及蜂巢裂等乾燥缺點大前提下，多賴高溫及高濕乾燥條件達成。快速乾至一定含水量之傳統加溫乾燥木材所涉及的熱及質量傳導方程式包含：傳導率 (conductivities)，傳導係數 (transfer coefficient) 及其他性質。欲明瞭高溫時木材乾燥之機理，首先應估測出熱擴散係數 (thermal diffusive coefficient) 及利用路易斯數 (Lewis number, 1976) 計算出質量擴散係數。

1933年阿諾氏 (Arnold) 利用空氣濕度計做試驗結果謂：「木材蒸發時之液體並非純水時，因需考量流體邊界層之層流次層 (laminar sublayer) 之影響，故所測得之路易斯數 (Lewis number) 較 1 大，介於 2 至 3 之間。」就水而言，路易斯數 (Le) 與 1 接近，故可將阿諾方程式簡化成路易斯數以表示木材水分之蒸發性。

由於木材乾燥時，其表面上方之熱氣流受攪動程度及木材表面之粗糙度之影響並不穩定。故吾人期盼利用簡單之路易斯數來說明高溫乾燥木材時水份蒸發之機理。路易斯利用絕熱之水分飽和器 (saturator)，不計溫

度對潛熱之影響，做濕球溫度試驗，可得下列公式：

$$l \Delta w + c \Delta T = 0 \dots\dots\dots(1)$$

l ：水之潛熱

w ：空氣之含水量

c ：混合體之比熱

T ：混合體之溫度

按理想氣體定律：

$$w = (\varepsilon p) / (P - p) \dots\dots\dots(2)$$

(2)式中之 ε 為空氣中水分含量與空氣之比， P 為大氣壓， p 為水蒸氣之壓力。若 $p \ll P$ ，則 $dw = \varepsilon dp / P$ 及方程式 (1) 變成

$$l \varepsilon \Delta p = -c P \Delta T \dots\dots\dots(3)$$

再按薄膜係數定義：

$$q = h \Delta T \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{及 } f = d \Delta p \dots\dots\dots(5)$$

q ：熱流 (heat flux，即熱量除以單位面積)

h ：熱傳導係數

f ：質量流 (mass flux)

d ：質量擴散係數

Δp ：水蒸氣壓力差

就絕熱狀態而言，方程式 (4) 可寫成：

$$q = -l f \dots\dots\dots(6)$$

結合上列諸方程式吾得下列路易斯關係式：

1. 國立屏東科技大學木材工業系教授
Professor, Department of Forestry, NPUST.
2. 國立中興大學森林系教授
Professor, Department of Forestry, NCHU.
3. 國立中興大學森林研究所碩士生
Graduate student, Department of Forestry, NCHU.

$$h/d = (Pc) / \varepsilon \dots\dots\dots(7)$$

熱擴散係數與質量擴散係數之比即是路易斯關係式之真諦。

二、理論

1. 乾濕度線及路易斯關係式

若濕球溫度一定時，方程式 (8) 繪於濕度圖（見下圖）上，可得一直線，其斜率為 $-h_y/Mbky \lambda_w$ 且與 100% 曲線在 T_w 處相交，此線叫做濕度線（psychrometric line，即虛線）。來自方程式 (8) 的濕度線與來自方程式 (9) 的絕熱飽和線（adiabatic saturation line，即實線）均對 100% 飽和濕度線作圖，此線間之關係視 C_s 及 $h_y/Mbky$ 之相對大小值而定。

$$\frac{H-H_w}{T-T_w} = -\frac{h_y}{Mbky \lambda_w} = -\frac{c_p}{\lambda_w} \left(\frac{N_{sc}}{N_{pr}}\right)^m \dots\dots\dots(8)$$

H：濕度

H_w ：在濕球溫度 T_w 時之濕度

N_{sc} ：Schmidt number

N_{pr} ：Prantl number

λ_w ：液體在濕球溫度 T_w 時之潛熱

$$\frac{H-H_s}{T-T_s} = -\frac{C_s}{\lambda_s} = -\frac{C_{pB}+C_{pAH}}{\lambda_s} \dots\dots\dots(9)$$

H_s ：飽和濕度；

C_s ：濕熱（Humid heat）

在一般之乾燥條下，下列近乎正確之方程式叫做路易斯關係式（Lewis relation）：

$$h_y / (Mbky) = C_s$$

當此關係式存在時，濕度線與絕熱飽和線基本上相同。

2. 路易斯關係式在高溫及高蒸氣壓下水分蒸發之應用

將方程式 (1) 寫成微分式：

$$C_p dT = -dw$$

$$(Ca+wC_v)dT = -[\lambda_l + C_v(T-T_l)]dw$$

下標 l 與液體表面有關， $C_v(T-T_l)$ 表示加熱水蒸氣至溫度 T ，利用氣體方程式，且假定氣體為空氣（雙原子）

$$Ca = 3.5 Ra \dots\dots\dots(10)$$

就水蒸氣（三原子）而言：

$$C_v = 4R_w \dots\dots\dots(11)$$

方程式 (2) 可改寫成：

$$w = (\varepsilon p) / (P-p) \dots\dots\dots(12)$$

將上式微分之：

$$dw = (\varepsilon P dp) / (P-p)^2 \dots\dots\dots(13)$$

將 $\varepsilon = Ra / R_w$ 代入，方程式(9)變成：

$$dT / [(\lambda_l/R_w) + 4(T-T_l)] = - (2P dp) / [(7P+p) + (P-p)] \dots\dots\dots(14)$$

為積分目的，將方程式 (14) 之右邊改寫成下式：

$$dT / [(\lambda_l/R_w) + 4(T-T_l)] = -\frac{dp}{4} \left[\frac{1}{P+p} + \frac{1}{7P+p} \right] \dots\dots\dots(15)$$

從液面之溫度 T_l 之邊界層及相對應之氣壓 P_l 積分之：

$$\frac{\lambda_l/R_w}{(\lambda_l/R_w) + (T_o-T_l)} = \frac{7P+P_o}{P-P_o} \frac{P-p_l}{7P+p_l} \dots\dots\dots(16)$$

(16)式可以下式示之：

$$\frac{P_o+p_l}{T_o-T_l} = \frac{7P+p_l}{2P[(\lambda_l/R_w)+4(T_o-T_l)]} \dots\dots\dots(17)$$

參考方程式 (9) 可知，上式方括弧內之值等於 λ_l/R_w ，因水在 T_l 溫度蒸發，最後溫度達 T_o 。利用方程式 (4)，(5)，(6) 可得：

$$h/d = [(7P+P_l)(P-p_o)R_w] / 2P \dots\dots\dots(18)$$

三、在木材乾燥上之應用

俟木材乾燥一段時間後，木材表面水分含量將低於纖維飽和含水量，且水蒸氣壓將會低於表面溫度之飽和水蒸氣壓。將方程式 (14) 按木材表面條件 T_s 及 P_s 積分，方程式 (17) 可寫成：

$$\frac{P_o+p_s}{T_o-T} = \frac{(7P+p_s)(P-p_o)}{2P[(\lambda_l/R_w)+4(T_o-T_l)]} \dots\dots\dots(19)$$

且就薄膜係數而言：

$$\frac{h}{d} = \frac{(7P+p_s)(P-p_o)R_w}{2P} \dots\dots\dots(20)$$

四、結論

1. 本文所述理論可將路易斯關係式延伸至高溫及高壓之情況。
2. 當蒸氣壓較小時，本文所述之水蒸氣蒸發量與溫度之關係回歸到簡單之路易斯關係式。
3. 利用 h/d 比值之大小可供設計最適化木材乾燥基準表之參考。

五、參考文獻

McCabe, W. L.(1976)Unit Operation of Chemical Engineering, pp751-755, McGraw -Hill, USA.

Arnold, J. H.(1933)The Theory of Psychrometer. Physics 4: July 255-262, September 334-340.

Lewis, W. K.(1922)The evaporation of a liquid into a gas. Mechanical Engineering 44:445.

Threlkeld, J. L.(1965)Thermal Environmental Engineering. Prentice-Hall, New York.

Hunter, A. J., and Sutherland, J.W.(1997)The evaporation of water from wood at high temperatures. Wood Science and Technology 31:73-76.

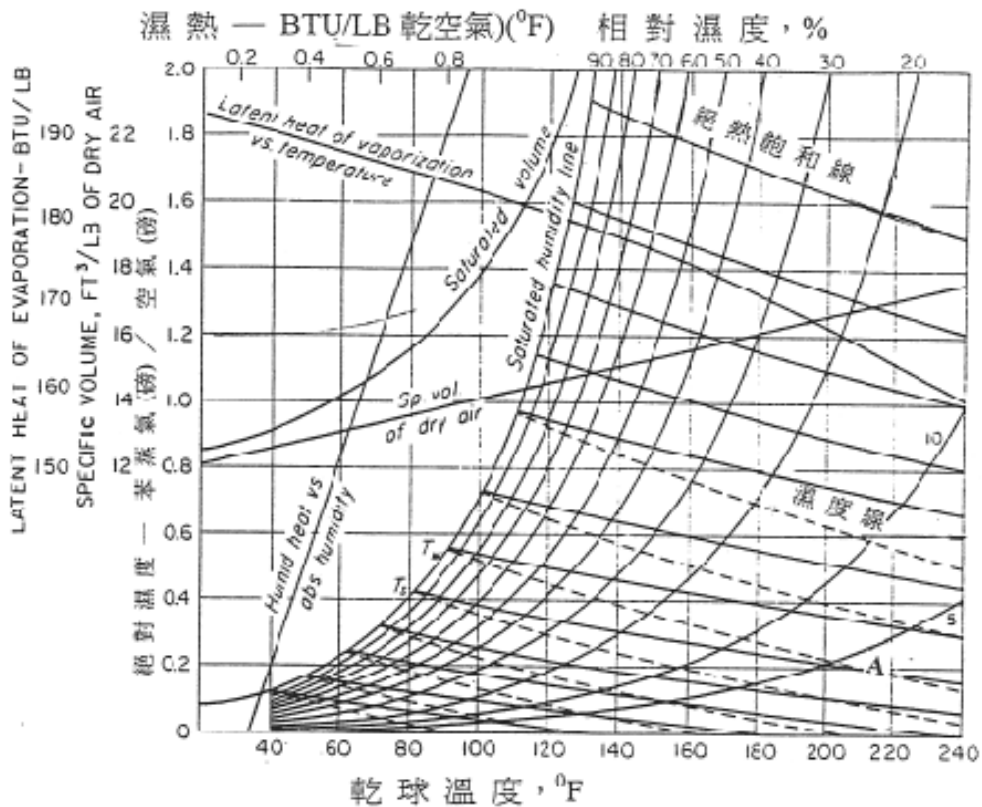


圖 1. 空氣苯混合蒸氣之濕度圖，在圖中 A 點的 T_w 值 (濕球溫度) 91°F 較 T_s 值 (絕熱飽和溫度) 81°F 為高

Fig. 1. Humidity chart for air-benzene vapor mixtures(Point A($T_w=91^\circ\text{F}$) T_s (adiabatic saturation temperature) 81°F)