

红松、水曲柳木材的热学性质与 密度、含水率、温度的关系

张文庆 徐淑霞 陈锦芳

中国林业科学研究院木材工业研究所

1986年7月 北京

红松、水曲柳木材的热学性质与 密度、含水率、温度的关系

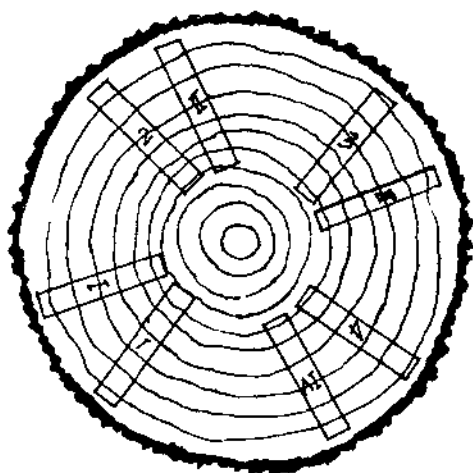
张文庆 徐淑霞 陈锦芳

木材是一种多孔的具有吸湿性和吸水性的天然有机材料。当环境温度和湿度发生变化时，或对木材进行冷、热处理，如蒸煮、热压、干燥等，木材的含水率和温度也随之发生变化。木材密度也是影响其热学性质的主要因子。因此，研究木材热学性质与密度、含水率、温度的关系具有实用意义。

一、材料和方法

(一) 材料

在北京市贮木场中，挑选生长正常的红松 (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) 圆木，每种三根，长均为6米，小头直径都在55厘米以上。从每根试材由下向上1~2米和2.8~3.8米处截取两段。在材质均匀无明显缺陷处选取60×15×6厘米的径板(图1)。试材端头涂上防裂材料，在通风的室内气干至平衡含水率。红松试材共截取研究热学性质与含水率关系用试板11块，与温度关系用试板10块；水曲柳试材共选取热学性质与含水率关系试板19块，与温度关系用试板17块。从每块试板上，接连截取一组三块15×15×6厘米的粗制试样，放在烘箱中，先在50℃烘5~7天，然后逐渐升温至 $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，烘至接近绝干，供制作试样用。



1~4为不同含水率试板
I~IV为不同温度试板

图1 试材分配

(三) 方法

1. 采用非稳热流原理的国产 DRM-I 型导热系数测定仪，按《木材热物理性质测定方法》^[3] (草案) 进行试验。

2. 试样温度的控制

研究木材热学性质与温度的关系，用同一批烘干材试样（含水率在0.8%以下，下同）在予定的温度条件下测定。试样初始温度控制方法如下：

0℃。将试样装置在放有吸湿剂的真空干燥器内，从干燥器盖子的孔口引入热电偶和加

注：试验结果的相关关系，是钱培工同志计算的。

热器电线，封闭孔口。把干燥器放在冰箱中，使试样内外层温度稳定在 $0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ （用热电偶测量，下同）。

20°C 。将试样放在密封的干燥器内，在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 的恒温室内存放 5~7 天，试样温度达到平衡。

40°C 、 60°C 、 80°C 、 100°C 。先将试样装置在 40°C 烘箱中，约 4~6 小时，内层温度可达平衡。试验后，将烘箱升温至 60°C ，试样内层温度平衡后再进行试验。试样 80°C 、 100°C 的控制方法，与 40°C 、 60°C 相同。

3. 试样含水率的控制

研究木材热学性质与含水率的关系，用同一批试样在不同含水率条件下测定。试样含水率调整方法如下：

0%，将试样放在 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至接近绝干。

8%、13%、18% 左右。将试样放在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度分别为 $50 \pm 5\%$ 、 $70 \pm 5\%$ 、 $90 \pm 5\%$ 的恒温恒湿室内，使试样含水率达到基本平衡状态。调整好一个含水率，试验后再调整另一含水率状态。

水饱和材。将试样浸入水中约 2~3 个月可达水饱和状态。红松试样的含水率为 $62 \sim 101\%$ ，水曲柳试样的含水率为 $105 \sim 140\%$ 。因试样产生湿胀变形，需按规定尺寸再次制作。

试样在纤维饱和点至水饱和材之间，调整两个含水率试验点。将水饱和材试样放在温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $90 \pm 5\%$ 的恒温恒湿室内，使试样中的水分慢慢蒸发。当薄试样达到预定重量时，装入密闭的干燥器中低温（ 10°C 左右）保存。为使每组三块试样的含水率大致相同，可按公式（1）计算出厚试样达到薄试样含水率时的重量，以便掌握试样含水率调试过程。

$$G = [(\rho_1 - \rho_2) + \rho_3] \times V \quad (1)$$

式中：G——厚试样达到薄试样含水率时的重量，以克计；

ρ_1 ——薄试样烘干后的密度，以克每立方厘米计；

ρ_2 ——厚试样烘干后的密度，以克每立方厘米计；

ρ_3 ——薄试样调湿后的密度，以克每立方厘米计；

V——厚试样调湿后的体积，以立方厘米计。

将调湿后的厚试样和薄试样放在同一个干燥器内，低温保存 20 天，使试样内水分分布基本均匀。

三、结果分析

（一）热导率

热导率（导热系数） λ 是用来说明材料传导热量的能力。它表示在一块厚度为一米的材料上，两边温差为 1°C ，在一小时内通过一平方米表面积所传导的热量，以千卡每米小时摄氏度计。材料的热导率愈小，隔热保温性能愈好。建筑部门把热导率小于 0.2 千卡每米小时摄氏度的材料叫做隔热保温材料。烘干木材 20°C 时的热导率，红松为 0.0766 千卡每米小时摄氏度，水曲柳为 0.0966 千卡每米小时摄氏度。

1. 热导率与密度的关系

由于木材内孔隙较小，空气不能在孔隙中畅通。烘干材的热传导，主要靠木材物质和细胞腔、细胞间隙中的空气导热，热的对流和辐射作用很小。

烘干材的热导率随密度增加而增大,呈直线关系(图2)。这是由于空气的热导率很小,在静止状态下,0°C时为0.022千卡每米小时摄氏度,比木材物质的热导率小得多。因此,木材密度愈大,孔隙率愈小,热导率就愈大。

表1 木材热导率与密度的相关关系(烘干材, 20°C)

树 种	试验次数	相 关 回 归 方 程	相关系数 (r)	相 关 系 数 临 界 值 ($r_{\alpha} = 0.05$)
红松	18	$\lambda_0 = 0.0392 + 2.806 \times 10^{-4} \rho_0$	0.75	0.444
水曲柳	34	$\lambda_0 = 0.0393 + 1.089 \times 10^{-4} \rho_0$	0.66	0.330

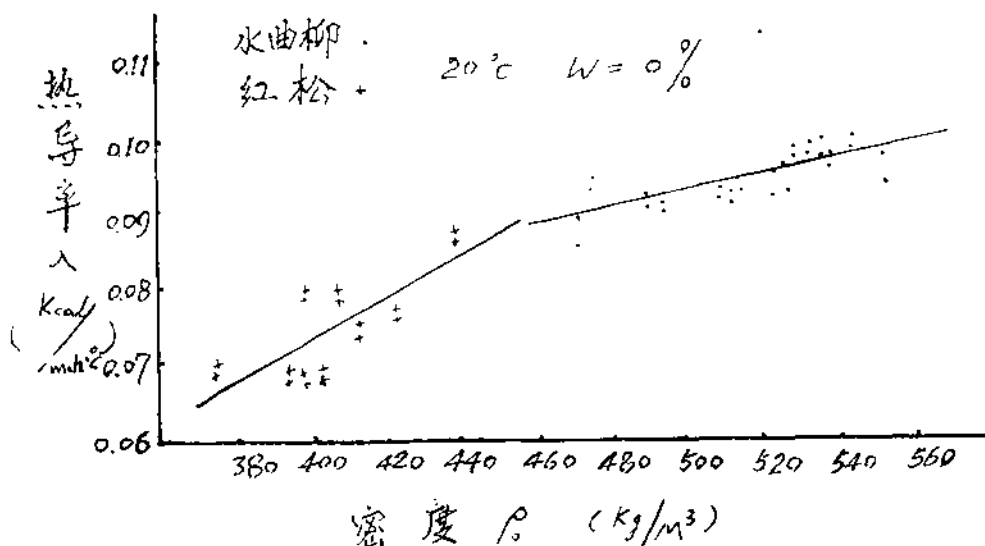


图2 木材热导率与密度的关系

2. 热导率与含水率的关系

木材有易于吸湿和解吸的性能。采伐季节、存放时间和场所以及冷、热处理时工艺条件不同,木材含水率往往有很大差异。由于温度20°C时水的热导率为0.514千卡每米小时摄氏度,为空气热导率的23倍,为烘干材红松、水曲柳热导率的5倍以上。所以木材中含水愈多,空气愈少,热导率就愈大。

红松、水曲柳木材,在含水率0%~纤维饱和点,纤维饱和点~浸水至饱和状态,热导率均随含水率的增加而增大。增大的比率,水曲柳木材含水率在纤维饱和点以下,略小于红松。

表2 木材热导率与含水率和密度的相关关系(20°C时)

树 种	热 流 方 向	含 水 率 状 态	试 验 次 数	相 关 回 归 方 程	相关系数 (r)	复相关系数		相关系数 临界值 ($r_{\alpha} = 0.05$)
						热导率与 含水率 (P_1)	热导率与 密度 (P_2)	
红松	弦向	纤维饱和点以下	88	$\lambda_w = 0.0229 + 1.397 \times 10^{-3} w + 2.363 \times 10^{-4} \rho_0$	0.77	0.71	0.28	0.207
		纤维饱和点以上	66	$\lambda_w = 0.2011 + 6.202 \times 10^{-4} w - 2.224 \times 10^{-4} \rho_0$	0.69	0.62	0.19	0.238
水曲柳	弦向	纤维饱和点以下	152	$\lambda_w = 0.027 + 1.656 \times 10^{-3} w + 1.202 \times 10^{-4} \rho_0$	0.95	0.93	0.21	0.158
		纤维饱和点以上	114	$\lambda_w = -0.18 + 1.966 \times 10^{-3} w + 1.918 \times 10^{-4} \rho_0$	0.98	0.98	0.05	1.86

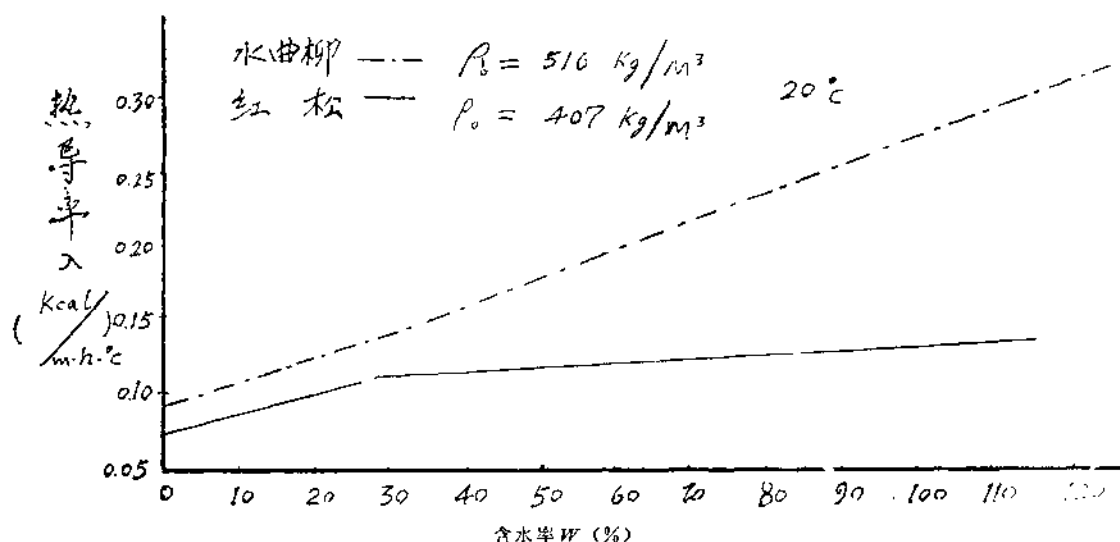


图3 木材热导率与含水率的关系

维饱和点以上，而红松与水曲柳相反（图3）。

3. 热导率和温度的关系

红松、水曲柳烘干材在温度0~100°C范围内，热导率随温度的升高而增大。木材温度升高时，木材分子和木材孔隙中空气的热运动会增加，使热导率增大。

表3 木材热导率与温度和密度相关关系（烘干材）

树 种	热 流 方 向	试 验 次 数	相 关 回 归 方 程	相 关 系 数 (γ)	复相关系数		相关系数 临 界 值 ($\gamma_a = 0.05$)
					热导率 与温度 (P_1)	热导率 与密度 (P_2)	
红松	弦向	108	$\lambda_t = -0.0323 + 8.906 \times 10^{-5} t + 2.643 \times 10^{-4} \rho_0$	0.78	0.43	0.65	0.187
水曲柳	弦向	204	$\lambda_t = 0.0164 + 1.265 \times 10^{-4} t + 1.512 \times 10^{-4} \rho_0$	0.82	0.62	0.54	0.137

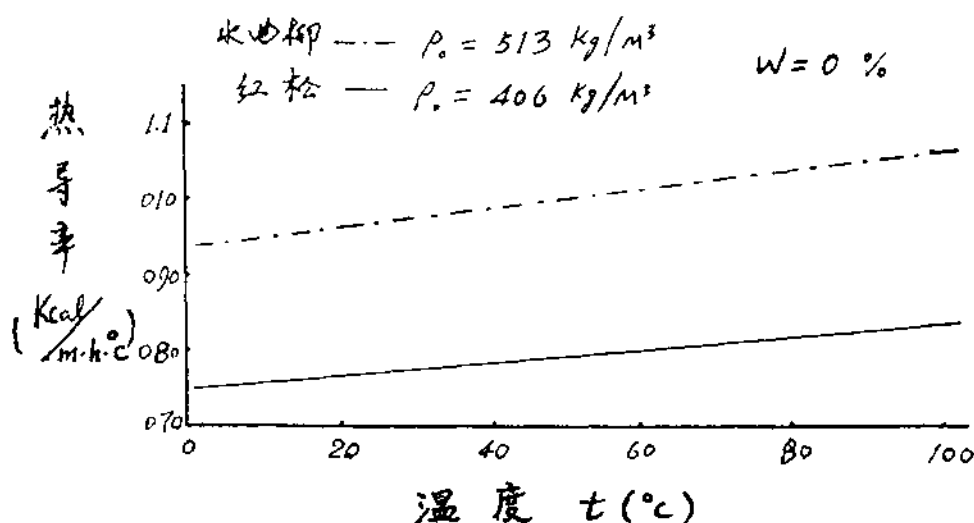


图4 木材热导率与温度的关系

木材的热导率与温度成比率这一规律,与很多保温材料相同。设木材温度为 t_1 、 t_2 时的热导率分别为 λ_1 、 λ_2 , 则热导率与温度的关系式为〔5〕:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{237 + t_2}{237 + t_1} \quad (2)$$

F. Kollmann〔7〕认为,木材的热导率与温度的关系和木材的孔隙率及绝干材的密度有关。若把温度变化 1°C 时热导率的变化为 $\Delta\lambda\%$, 与木材孔隙率 e 之间的关系式为:

$$\Delta\lambda = 1.47e - 0.367 = 1.1 - 0.98\rho_0 \quad (3)$$

木材温度在 $-50^\circ\text{C} < t < 100^\circ\text{C}$ 时与热导率和密度的关系式为:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \left\{ 1 - (1.1 - 0.98\rho_0) \frac{t_1 - t_2}{100} \right\} \quad (4)$$

按红松木材热导率与温度和密度的关系式,和式(2)、式(4)的计算结果列于表4。可以看出式(2)和式(4)的计算值均较本试验结果大。

表4 不同关系式计算的热导率(烘干材)

树 种	本 试 验 20°C	80°C 时		
		本 试 验	按 式 (2)	按 式 (4)
红 松	0.0766	0.082	0.09228	0.1088
水曲柳	0.0966	0.1042	0.1163	0.1312

(二) 热扩散率

热扩散率(导温系数) α , 指材料加热或冷却时各部温度趋于一致的能力,以平方米每小时计。材料的热扩散率愈大,说明达到同样温度的速度愈快。

热扩散率与比热 c 、热导率 λ 、密度 ρ 的相互关系式为、

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (\text{平方米每小时}) \quad (5)$$

热扩散率是反映不稳定传热条件下材料内部变化的热学性质。在计算木材冷、热处理时,要用热扩散率数值。

温度 20°C 时烘干木材的热扩散率,红松为 0.000569 平方米每小时,水曲柳为 0.000592 平方米每小时。

1. 热扩散率与密度的关系

试验证明,红松、水曲柳木材的热扩散率与密度的相关系数 r , 均小于相关系数临界值,说明二者没有关系(图5)。

表5 木材的热扩散率与密度的相关关系(烘干材)

树 种	试 验 次 数	相 关 系 数 (r)	相 关 系 数 临 界 值 ($r_a = 0.05$)
红 松	18	0.235	0.444
水曲柳	34	0.204	0.330

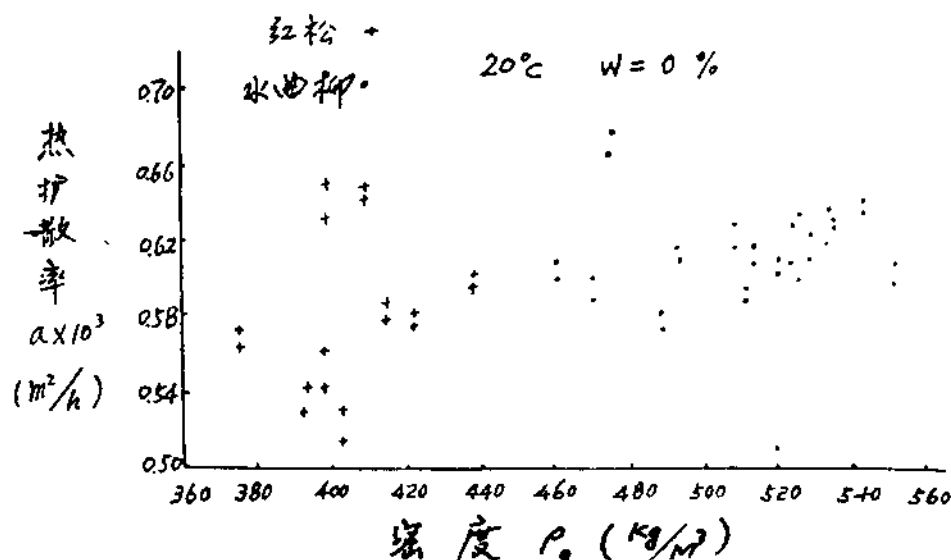


图5 木材热扩散率与密度的关系

2. 热扩散率与含水率的关系

由图6可以看出,红松、水曲柳木材含水率在0%至纤维饱和点,纤维饱和点至水饱和状态,热扩散率是随含水率的增大而减小。减小的比率,纤维饱和点以下大于纤维饱和点以上。这是由于热扩散率取决于热导率与比热之比值。当含水率增加时,热导率和热容量都增加,但增加的比率不一样,这就决定了热扩散率随含水率的变化规律[2]。

在木材热扩散率与含水率和密度的相关关系中,与含水率的关系是主要的,密度的影响通常很小。

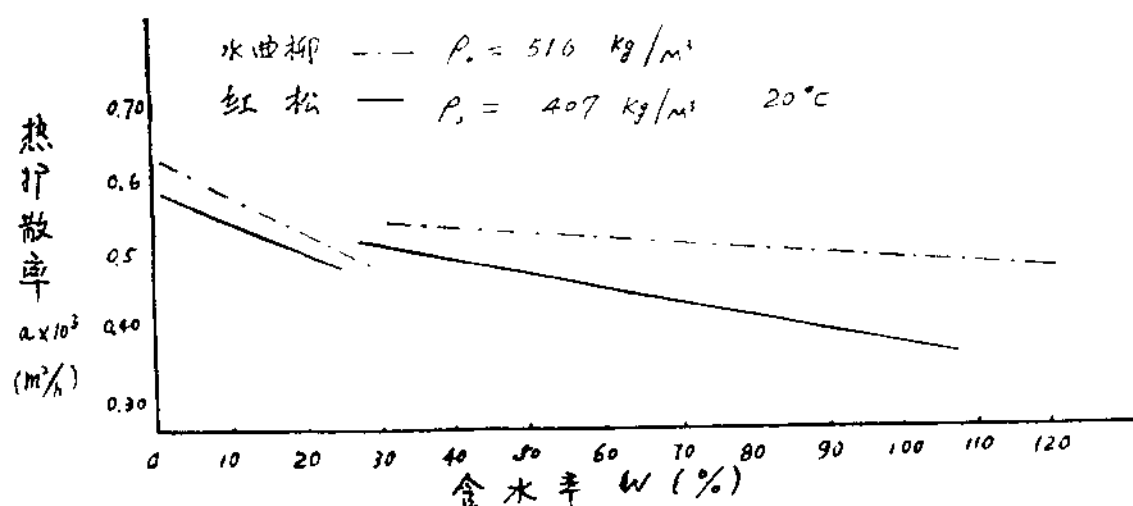


图6 木材热扩散率与含水率的关系

表 6 木材热扩散率与含水率和密度的相关关系 (20℃时)

树种	热流方向	含水率状态	试验次数	相关回归方程	相关系数 (Y)	复相关系数		相关系数临界值 (Y ₀ = 0.05)
						热扩散率与含水率 (P ₁)	热扩散率与密度 (P ₂)	
红松	弦向	纤维饱和点以下	88	$a_w = 2.878 \times 10^{-4} - 4.148 \times 10^{-8} w + 7.071 \times 10^{-7} \rho_0$	0.752	-0.699	0.283	0.207
		纤维饱和点以上	66	$a_w = 6.81 \times 10^{-4} - 1.798 \times 10^{-8} w - 2.918 \times 10^{-7} \rho_0$	0.889	-0.914	-0.101	0.238
水曲柳	弦向	纤维饱和点以下	152	$a_w = 4.53 \times 10^{-4} - 4.962 \times 10^{-8} w + 3.121 \times 10^{-7} \rho_0$	0.851	-0.834	0.151	0.158
		纤维饱和点以上	114	$a_w = 5.708 \times 10^{-4} - 7.601 \times 10^{-7} w - 3.405 \times 10^{-8} \rho_0$	0.818	-0.820	-0.020	0.186

3. 热扩散率与温度的关系

烘干材的热扩散率随温度升高而下降 (图7)。本试验结果与满久^[5]的结果相同, 而与 Б. С. Чудиннов^[8] (1968) 的结论相反。

木材热扩散率随温度的变化规律, 与木材温度升高时热导率和热容量的增大比率有关。满久^[5]的试验表明, 在温度 0~100℃ 范围内, 烘干材 (w = 0%) 横向的热扩散率随温度的升高而减小; 木材含水率在 10~100% 时, 热扩散率则随温度升高而增大。

表 7 木材热扩散率与温度和密度的相关关系 (烘干材)

树种	热流方向	试验次数	相关回归方程	相关系数 (Y)	复相关系数		相关系数临界值 (Y ₀ = 0.05)
					热扩散率与温度 (P ₁)	热扩散率与密度 (P ₂)	
红松	弦向	108	$a_t = 3.892 \times 10^{-4} - 1.004 \times 10^{-6} t + 4.928 \times 10^{-7} \rho_0$	-0.491	-0.476	0.118	0.187
水曲柳	弦向	204	$a_t = 4.864 \times 10^{-4} - 1.035 \times 10^{-6} t + 2.875 \times 10^{-7} \rho_0$	-0.833	-0.815	0.116	0.137

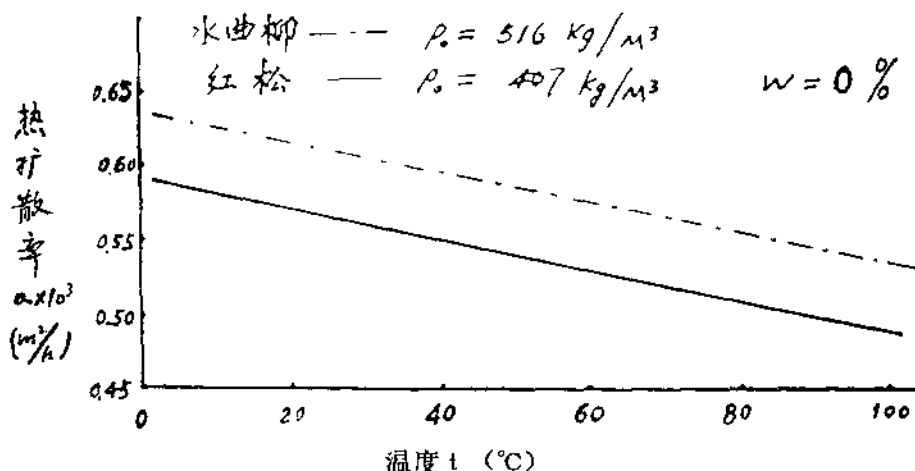


图 7 木材热扩散率与温度的关系

(三) 比热

材料的比热 C, 是指 1 千克材料温度升高或降低 1℃ 所吸收或放出的热量, 以千卡每千克摄氏度计。

本试验中木材的比热 C ，是由热导率 λ 、热扩散率 a 、密度 ρ 三个参数按公式 $C = \frac{\lambda}{a \cdot \rho}$ 求得。烘干材在 20°C 时，红松的比热为 0.330 千卡每千克摄氏度，水曲柳为 0.298 千卡每千克摄氏度。

1. 比热与密度的关系

试验证明，红松木材的比热与密度的相关系数小于相关系数临界值，证明二者没有关系。水曲柳木材的比热是随密度增大而减小，相关系数为 -0.59 ，相关程度显著。

表 8 木材的比热与密度的关系（烘干材， 20°C ）

树 种	试验次数	相 关 回 归 方 程	相关系数 (γ)	相关系数临界值 ($\gamma_0 = 0.05$)
红 松	18	—	0.097	0.444
水曲柳	34	$C_0 = 0.402 - 3.5 \times 10^{-4} \rho_0$	-0.59	0.330

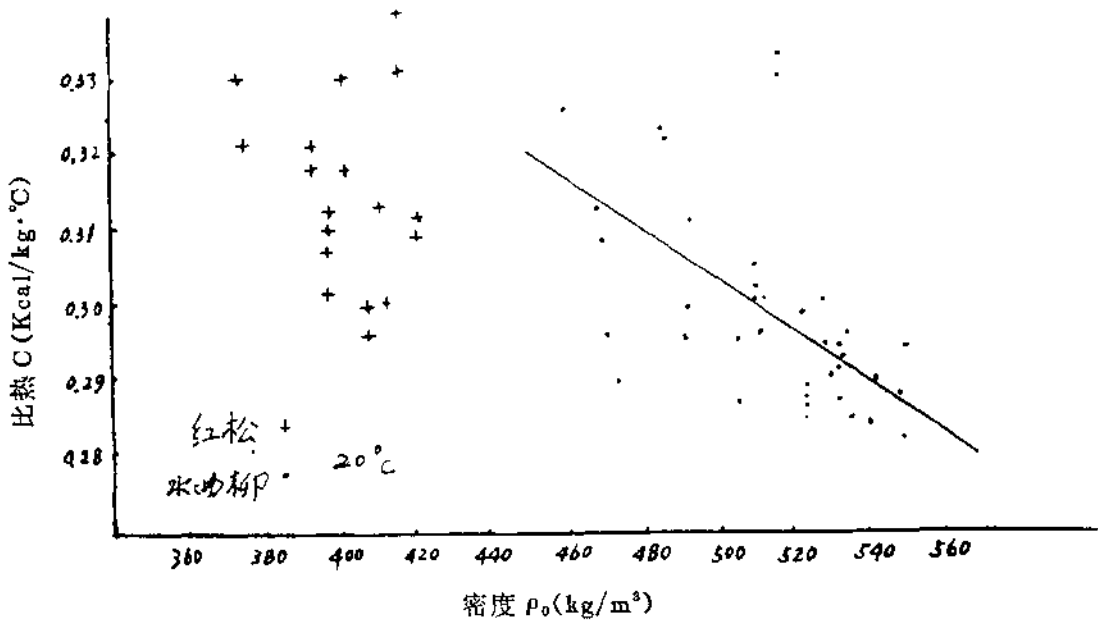


图 8 木材比热与密度的关系

2. 比热与含水率的关系

木材的含水率对比热影响较大。红松、水曲柳木材含水率在 0%~纤维饱和点，纤维饱和点~水饱和状态，比热均随含水率升高而增大，呈直线关系。增大的比率纤维饱和点以下大于纤维饱和点以上（图 9）。这是由于水在 20°C 时的比热为 1 千卡每千克摄氏度，比烘干木材的比热大 3 倍左右，所以木材吸湿后比热必然增大。

从表 9 可以看出，红松、水曲柳木材含水率在纤维饱和点以下，及水曲柳木材在纤维饱和点以上，比热与含水率的相关系数 γ ，都在 0.95 以上，为极端依存关系；红松木材在纤维饱和点以上的相关系数为 0.636，相关程度显著。复相关系数 P_1 和 P_2 可进一步说明，主要是比热与含水率关系密切，密度的影响通常很小。

表9 木材比热与含水率和密度的相关关系 (20℃)

树种	含水率状态	试验次数	相关回归方程	相关系数 (Y)	复相关系数		相关系数临界值 (Y _{0.05})
					比热与含水率 (P ₁)	比热与密度 (P ₂)	
红松	纤维饱和点以下	88	$C_W = 0.387 + 7.347 \times 10^{-3}W - 1.839 \times 10^{-4}P_0$	0.969	0.968	-0.057	0.207
	纤维饱和点以上	66	$C_W = 1.194 + 1.493 \times 10^{-3}W - 1.723 \times 10^{-4}P_0$	0.636	0.422	0.366	0.238
水曲柳	纤维饱和点以下	152	$C_W = 0.531 + 7.024 \times 10^{-3}W - 4.624 \times 10^{-4}P_0$	0.953	0.932	0.181	0.158
	纤维饱和点以上	114	$C_W = 0.576 + 2.631 \times 10^{-3}W - 3.712 \times 10^{-4}P_0$	0.956	0.993	-0.074	0.186

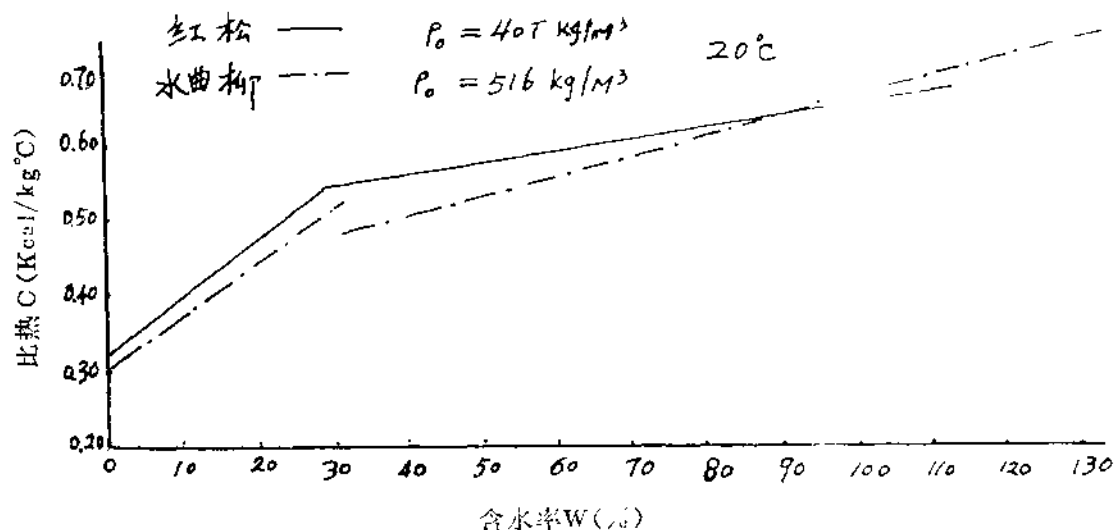


图9 木材比热与含水率的关系

3. 比热与温度的关系

红松、水曲柳烘干材在温度 0~100℃ 范围内, 比热是随温度升高而增大, 呈直线关系 (图10), 相关系数 Y 均在 0.9 以上, 为相互依存关系。从复相关系数可知, 比热主要受温度的影响, 与密度的关系较小 (表10)。

表10 木材比热与温度和密度的相关关系 (烘干材)

树种	试验次数	相关回归方程	相关系数 (Y)	复相关系数		相关系数临界值 (Y _{0.05})
				比热与温度 (P ₁)	比热与密度 (P ₂)	
红松	108	$C_t = 0.282 + 1.102 \times 10^{-3}t + 6.25 \times 10^{-5}P_0$	0.902	0.902	0.025	0.187
水曲柳	204	$C_t = 0.495 + 1.018 \times 10^{-3}t + 4.04 \times 10^{-4}P_0$	0.913	0.876	0.256	0.137

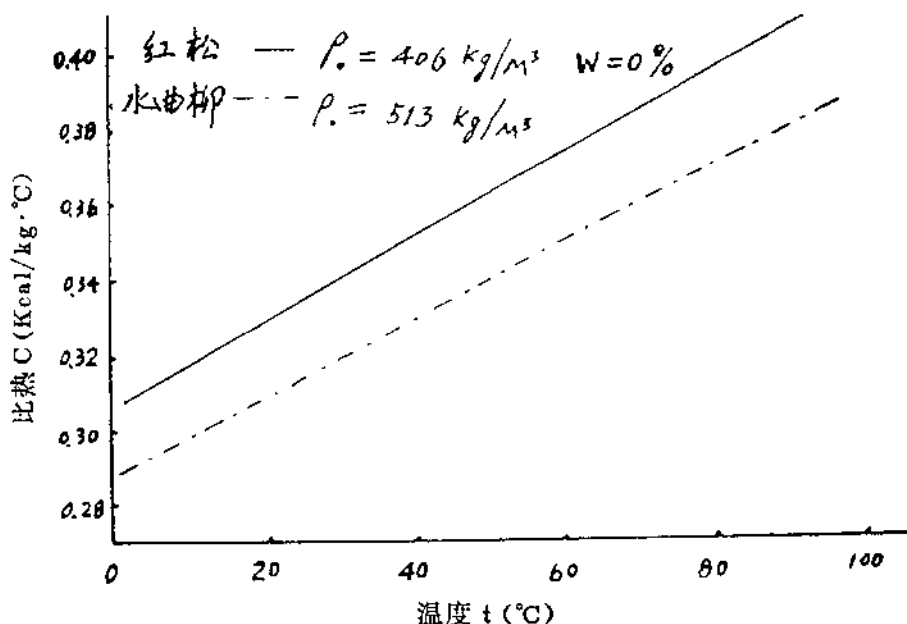


图10 木材比热与温度的关系

如不考虑密度对比热的影响,红松、水曲柳木材的比热与温度0~100℃的关系列于表11。

表11 比热与温度的相关关系 (烘干材, 20℃)

树 种	试验次数	相 关 回 归 方 程	相关系数 (γ)	相关系数临界值 (γ _α = 0.05)
红 松	18	$C_t = 0.306 + 0.00122 t + 0.12 \times 10^{-5} t^2$	0.902	0.444
水曲柳	34	$C_t = 0.259 + 0.00213 t + 0.87 \times 10^{-5} t^2$	0.850	0.330

如将1千克烘干材从温度 t_1 加热到 t_2 ,在温度 t_1 到 t_2 范围内的平均比热 C_m ,可用下式求得:

$$C_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (C_1 + C_2 t + C_3 t^2) dt \quad (6)$$

式(6)可化为

$$C_m = C_1 + \frac{1}{2} (t_2 - t_1) C_2 + \frac{1}{3} (t_2^2 + t_2 t_1 + t_1^2) C_3 \quad (7)$$

把烘干材的比热与温度0~100℃的关系式代入式(7),求得红松的平均比热为0.371千卡每千克摄氏度,水曲柳为0.336千卡每千克摄氏度。

F. Dunlap^[7]1912年用热量计法测定了二十种木材100块试样在106~0℃之间的比热,提出绝干材的比热与温度的关系式为:

$$C_0 = 0.266 + 0.00166 t \quad (8)$$

木材20℃的比热,按式(8)计算为0.299千卡每千克摄氏度,与本试验水曲柳的比热0.298千卡每千克摄氏度基本相同。红松木材的比热较大,为0.330千卡每千克摄氏度,可

能是树脂含量较多的影响。

(四) 蓄热系数

蓄热系数 S ，是表示在周期性热作用下，材料储蓄热量的能力，以千卡每平方米小时摄氏度计。

在建筑中，材料的许多热现象都带有一定的周期波动性。如室外空气和太阳辐射在24小时的变化；室内供暖设备供热不均；冷冻制冷设备冷却不均，以及木材干燥、蒸煮供热不均等，都会引起周期性的热波动。当材料的一侧受到周期热作用时，表面吸收或放出的热流是按同一周期波动，因而也使材料表面和内部温度按同一周期波动。在直接受热的一侧，材料表面温度波动的剧烈程度与材料的蓄热系数有关。材料的蓄热系数愈大，表面温度波动愈小，材料的热稳定性愈好。所以蓄热系数是材料表面对热周期波动作用敏感程度的一个特性指标。

材料的蓄热系数 S 与导热率 λ 、比热 C 、以及热作用的周期（时间 τ ，以小时计）有关，可用下式表示：〔2〕〔4〕

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda \cdot C \cdot \rho}{\tau}} = 2.507 \sqrt{\frac{\lambda \cdot C \cdot \rho}{\tau}} \text{ (千卡每平方米小时摄氏度)} \quad (9)$$

当热波动周期为 24 小时，公式 (9) 可写为：

$$S_{24} = 0.51 \sqrt{\lambda \cdot C \cdot \rho} \text{ (千卡每平方米小时摄氏度)} \quad (10)$$

蓄热系数也是不稳定传热条件下热学性质指标，它与热扩散率 a 之间有如下关系：

$$S = \sqrt{\frac{2\pi}{\tau}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \text{ (千卡每平方米小时摄氏度)} \quad (11)$$

当热波动周期为 24 小时，式 (11) 可化为：

$$S_{24} = 0.51 \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \text{ (千卡每平方米小时摄氏度)} \quad (12)$$

烘干木材 20℃ 时，红松的蓄热系数 S_{24} 为 1.632 千卡每平方米小时摄氏度，水曲柳的 S_{24} 为 1.992 千卡每平方米小时摄氏度。因木材含水率和温度对比热、热导率、热扩散率有影响，因此，对蓄热系数也有影响。

1. 蓄热系数与密度的关系

红松、水曲柳烘干材的蓄热系数，是随密度的增加而增大（图11）。

表12 木材蓄热系数与密度的相关关系（烘干材，20℃）

树 种	试验次数	相 关 回 归 方 程	相 关 系 数 (γ)	相 关 系 数 临 界 值 ($\gamma_{0.05}$)
红 松	18	$S_{24} = -0.516 + 5.158 \times 10^{-3} \rho_0$	0.85	0.444
水曲柳	34	$S_{24} = 0.993 + 1.87 \times 10^{-3} \rho_0$	0.58	0.330

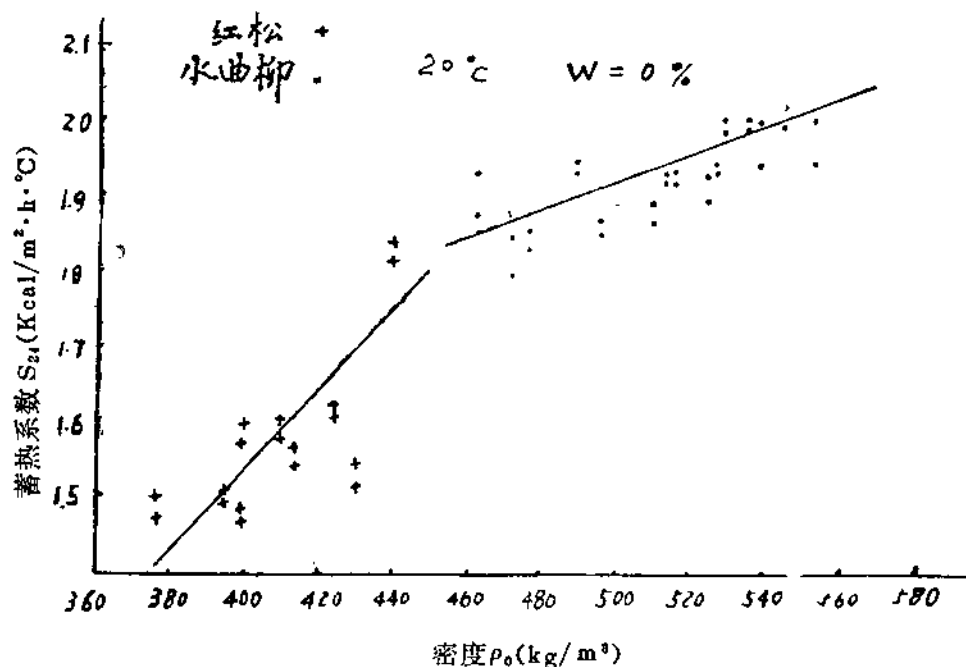


图11 木材蓄热系数与密度的关系

2. 蓄热系数与含水率的关系

木材含水率在0%至浸水到饱和状态范围内，蓄热系数随含水率增加而增大。增大的比率，水曲柳木材在纤维饱和点以下略大于纤维饱和点以上，而红松与水曲柳相反。蓄热系数与含水率的关系密切，受密度的影响很小。

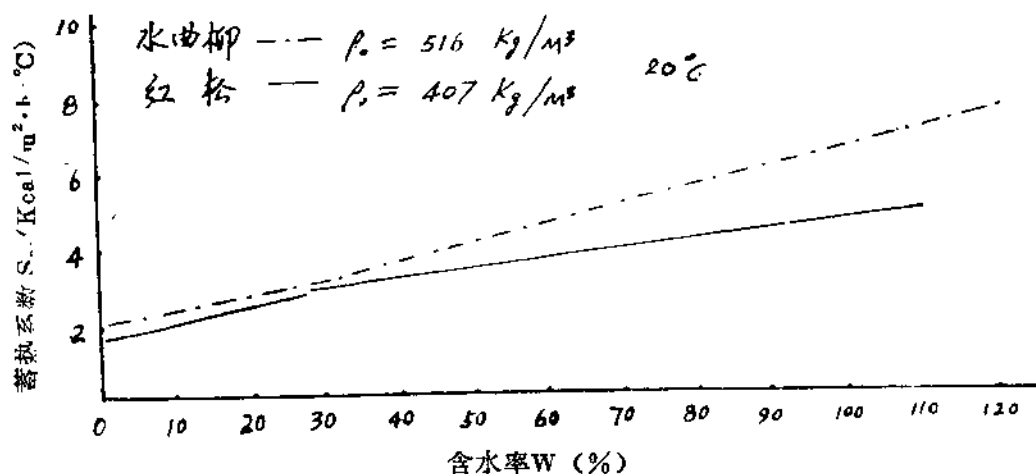


图12 木材蓄热系数与含水率的关系

表13 木材蓄热系数与含水率和密度的相关关系 (20℃时)

树种	热流方程	含水率状态	试验次数	相关回归方程	相关系数 (Y)	复相关系数		相关系数临界值 (Y _{α=0.05})
						蓄热系数与含水率 (P ₁)	蓄热系数与密度 (P ₂)	
红松	弦向	纤维饱和点以下	88	$S_{24} = 0.563 + 0.038W + 5.22 \times 10^{-3}\rho_0$	0.96	0.92	0.29	0.267
		纤维饱和点以上	66	$S_{24} = 4.061 + 0.023W - 4.537 \times 10^{-3}\rho_0$	0.83	0.78	-0.11	0.238
水曲柳	弦向	纤维饱和点以下	152	$S_{24} = 1.189 + 0.047W + 1.426 \times 10^{-3}\rho_0$	0.81	0.81	0.07	0.158
		纤维饱和点以上	114	$S_{24} = 0.835 + 0.049W + 4.689 \times 10^{-3}\rho_0$	0.98	0.98	0.05	0.186

3. 蓄热系数与温度的关系

红松、水曲柳烘干材在温度 0 ~ 100% 范围内, 蓄热系数随温度升高而增大, 呈直线关系。

表14 木材蓄热系数与温度和密度的相关关系 (烘干材)

树种	热流方向	试验次数	相关回归方程	相关系数 (Y)	复相关系数		相关系数临界值 (Y _{α=0.05})
					蓄热系数与温度 (P ₁)	蓄热系数与密度 (P ₂)	
红松	弦向	108	$S_{24} = 0.552 + 3.619 \times 10^{-3}t + 5.026 \times 10^{-3}\rho_0$	0.91	0.74	0.54	0.187
水曲柳	弦向	204	$S_{24} = 0.597 + 4.532 \times 10^{-3}t + 2.541 \times 10^{-3}\rho_0$	0.89	0.82	0.34	0.137

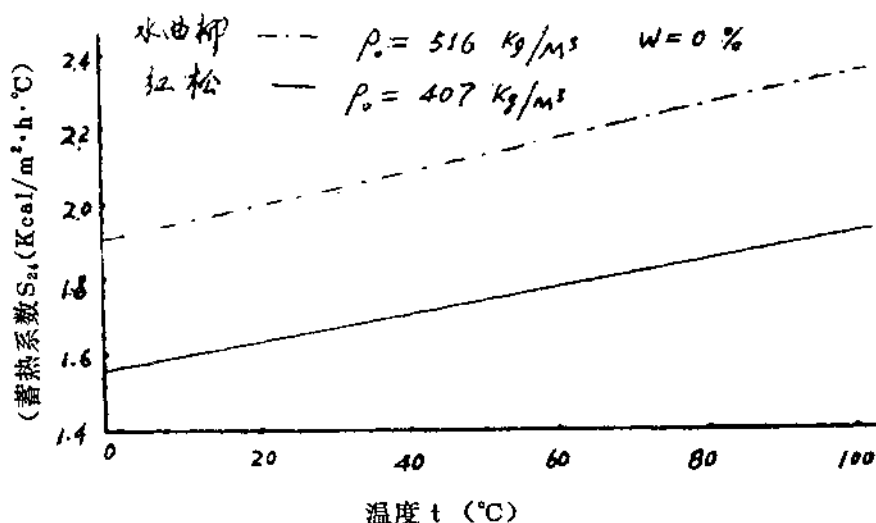


图13 木材蓄热系数与温度的关系

四、结 论

1. 红松、水曲柳 (以下简称木材) 烘干材 ($W = 0.8\%$) 的热导率随密度增加、温度升

高而增大，呈直线关系。

2. 因水的热导率比烘干木材的大五倍以上，故木材的热导率随含水率升高而增大。增大的比率纤维饱和点以下大于纤维饱和点以上。

3. 烘干木材的热扩散率与密度大小无关。但随温度的升高而下降，呈直线关系。

4. 木材的热扩散率随含水率增大而减小，减小的比率，纤维饱和点以下大于纤维饱和点以上。

5. 水曲柳烘干材的比热随密度增大而减小，呈直线关系，相关程度密切；红松木材的比热与密度大小无关。木材的比热随温度升高而增大，呈直线关系。

6. 由于水的比热比烘干木材的比热大三倍以上，故木材的比热随含水率升高而增大。增大的比率纤维饱和点以下大于纤维饱和点以上，呈直线关系。

7. 烘干木材的蓄热系数，随密度的增大、温度升高而增大，均呈直线关系。

8. 木材的蓄热系数随含水率升高而增大。增大的比率，水曲柳木材纤维饱和点以下略大于纤维饱和点以上，红松木材则与此规律相反。

参 考 文 献

- 〔1〕 西安冶金建筑学院建筑物理实验室，1977，建筑热工设计，中国建筑工业出版社。
- 〔2〕 沈樾元等，1981，建筑材料热物理性能，中国建筑工业出版社。
- 〔3〕 张文庆等，1985，木材热物理性质试验方法的研究，中国林业科学研究院木材工业研究所研究报告，木工（1985）5号（总14号）。
- 〔4〕 厦门水产学院制冷教研室，1981，制冷技术问答，农业出版社。
- 〔5〕 北原觉一，1966，木材物理，森北出版社。
- 〔6〕 Dunlap F., 1912, The specific heat of wood. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Bulletin N110. Washington, D. C.
- 〔7〕 Kollmann F., 1968, Principles of Wood Science and Technology, I. Solid Wood, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- 〔8〕 Чудинов Б. С., 1968, Теория Тепловой Отражки Древесины.