

矿 井 支 护 设 计

〔土〕采矿博士，C. 拜 隆 教 授

A. 阿里欧格卢副教授

煤炭部泰安采煤技术咨询中心

1 9 8 4 . 1 2

矿 井 支 护 设 计

〔土〕C.拜隆教授和A.阿里欧格卢副教授

谈鸣时译 史国华校

译 序

C. 拜隆教授，攻读于德拉姆大学皇家学院，获海底采煤专业博士学位。曾于1980—81年间受聘在美国弗吉尼亚大学执教，向研究生和大学生讲授了“岩石力学原理”、“采矿工程应用”和“煤矿顶板管理”等三门课程。现任土耳其伊斯坦布尔大学采矿工程系主任。曾公开发表过论文24篇，交流文章15篇。

A. 阿里欧格卢副教授，攻读于纽卡斯特大学，获岩石力学博士学位。在伊斯坦布尔大学执教，教授充填和地层控制课程。曾公开发表论文35篇。

本书系两位作者根据多年从事教学和科研写成。

其中拱架支护及长壁工作面使用单体支柱和液压支架支护方式的计算，就现有书本来看尚介绍不多。因此，本书对目前及今后一定时间内，在迅速提高我国煤炭产量的研究和实践中，对科研、生产和大中院校师生会有一些帮助。

锚杆和桁架一章蒙沈国富老师予以指正，在此表示感谢。

谈鸣时

1984.6. 山东泰安

山东矿业学院

44415103

第一章 坑木支护

第一节 矿井中木支护的状况

二次世界大战结束前，木材（坑木）曾是采矿作业中用于支护的最重要材料。之后，钢材成为用于矿井支护的主要材料。考虑木材作为支护材料的原因是其仍然用于一些小型煤矿和金属矿。

坑木是一种轻质材料，在支护系统中便于运输和使用。栋木具有 $0.73\text{克}/\text{厘米}^3$ 的密度和 $1200\text{公斤}/\text{厘米}^2$ 的抗挠强度。比钢材轻10倍，但强度低1倍。用作“短期”支护，坑木是一种经济的材料。

木材用于矿井支护既有优点也有缺点。尽管其重要作用有所下降，但发现木材仍用于许多采矿作业的支护系统中。优点如下：

1. 木材重量轻，便于运输、锯砍、处理和架成井下的棚子。
2. 木材沿一定的纤维结构断裂，在其彻底破坏之前，发出可见和可闻的信号。木材给予矿工心理上的安全感胜于钢材。
3. 折断了的材料可回收，用作木楔，垫块。

缺点如下：

1. 机械强度（抗挠、抗拉、抗弯、抗剪、抗压）都取决于纤维结构和木材内部存在的天然缺陷。
2. 湿度对强度有十分明显的影响。
3. 处于潮湿条件下，大量菌类有害于坑木，明显地降低其强度。
4. 坑木是一种易燃材料，在支护中能使火情迅速蔓延并产生有毒气体。

第二节 矿井坑木的工程特性

1 纤维结构

木材含有45—50%左右的纤维素，20~25%的木质素，5%的果胶和20%的其它物质〔1,p.56〕。纤维素是形成木组织外壁的一种多糖物，这些组织称谓纤维。木质素在木材中是胶结态的物质。是一种三维的苯基丙烷单元聚合物。果胶是包在组织外壁的浆状胶质物，由于暴露在

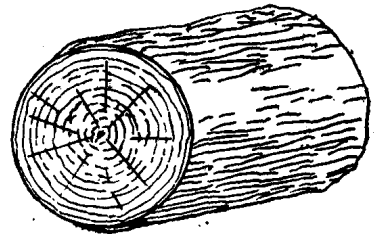


图1.1 - 木材的粗视结构

水中，对膨胀和收缩是十分敏感的〔2, p. 315〕。

木材的结构示于图1.1。这一“活性”组织就在树皮下的外侧形成一层薄层。逐年这一层相继死掉和形成“年轮”，木材的“坚硬”部份是坑木的主要部份。

2 影响木材的因素

水。在坑木中水是最重要的成份。水份的25%左右是在活性组织中，余下的75%左右在纤维间的空隙中。新砍倒的树含水30—35%。空隙中水份的损耗是由于环境的温度和相对湿度。在正常的条件下(20°C和相对湿度80%)，水的含量约为20%。任何木材的含水量小于此值时被认为是干燥的，相反，当木材的含水量超过30%时则被认为是潮湿的。在图1.2中可看到环境的影响〔2, p. 319〕。

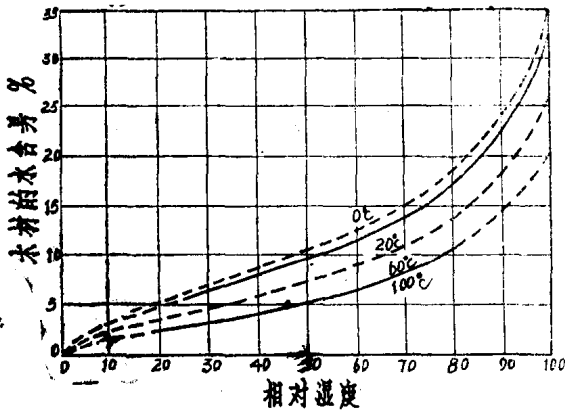


图1.2 环境影响到木材的水含量

坑木的缺陷。作为一种天然材料，木材有许多由其生长条件造成的缺陷。节疤、树杈的下部影响抗挠强度。此外，由

表1.1 一些材料的抗拉强度

材	料	抗拉强度 (公斤/厘米 ²)
钢丝的最大值		32000
淬硬的铁丝		5500~8400
建筑用钢材		5200~6200
淬硬的铜丝		4200~4900
醋酸人造纤维		10000
羊毛		3500
棉花		2800~8000
麻纤维		8800~6000
针叶树木材		500~1500
宽叶树木材		200~2600
竹材		1000~2300

见参考文献1

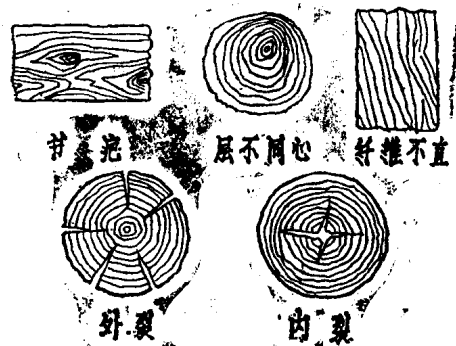


图1.3 木材的天然结构缺陷

于风和日照条件，年轮或许并不同心，以及干燥条件可能形成龟裂。这些缺陷已列举于图1.3〔2, p. 319〕。

3 坑木的强度

矿井坑木承受挠曲、压缩、弯曲和剪切的作用力。在以下几段中说明在这些条件下坑木的强度和影响这些强度的因素。

抗拉强度。特别是平行于纤维结构时，木材的最大强度是抗拉强度。在表1.1〔1, p. 323〕中列举了一些材料的抗拉强度。木材平行于木纹(“木纹”和“纤维”可互换地用于说明木纤维结构)

的抗拉强度是极高的，经过风干的情况下 ($u=12\%$)，某些木材可能达到3000公斤/厘米²的最大值。但有许多因素影响这些值。杰尼〔4〕对一些木材早期和后期木纤维所

表1.2 木纤维的平均抗拉强度

木材种类	早期木纤维 (公斤/厘米 ²)	后期木纤维 (公斤/厘米 ²)
红 木	4850	9140
雪特大针枞	8230	9070
斯拉希松	3300	6470
道格拉斯枞	3590	9980
白 枞	5130	7310
红 杉	3340	4780
白 松	4220	4640

见参考文献4和1

研究的抗拉强度值列举于表1.2〔1,p.322〕。遗憾的是，这一高的抗拉强度由于种种原因而在结构中未得到发挥作用。

承载方向与木纹角的关系对抗拉强度有明显的影 响。鲍曼研究了 几种木材抗拉、抗 挠和抗压强度的变化值，在图1.4〔1,p.326〕中列出了一些偏差量。

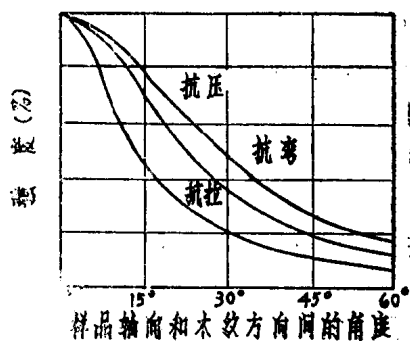


图1.4 抗拉强度和木纹方向间的关系

从芬兰松来看 (图1.5)，密度与抗拉强度有一正比关系〔1,p.327〕。

相反，湿度能降低抗拉强度。许多研究工作者都指出：纤维的含水量从10%到饱和点，如图1-6所示，抗拉强度呈线性地下降。根据美国林产品实验室的报导，含水量增加1%，沿木纹的抗拉强度降低3%左右。许多研究工作者的意见是含水量在8—10%间，抗拉强度达到最高值。

节疤和树杈也能降低木材的强度，因为周围的木纹遭到破坏；节疤的纤维结构几乎垂直于木材的纤维，

抗裂强度。在木材使用中最大抗裂强度起到重要的作用。风干的木材，平行于木纹的最大抗裂强度仅达到沿木纹抗拉强度平均值的50%左右。木材在压力和拉力方面的不同动态特性可由其纤维结构来表示。紧密相靠并胶结的纤维结构受得住极高的拉应力；

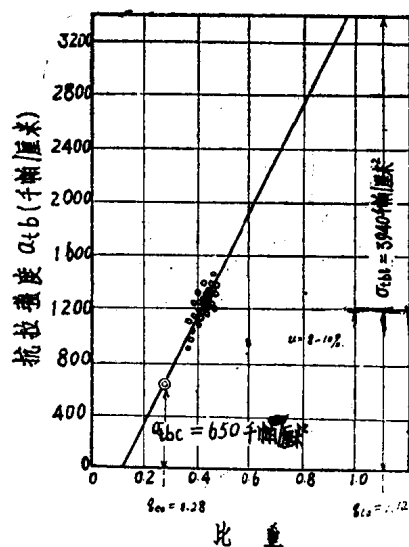


图1.5 抗拉强度和比重间的关系

在压力下，个别纤维有可能出现过早地弯曲，开始断裂〔1, p. 355〕。

在承载角度和木纹方向的影响中，抗裂强度比抗拉强度更明显。考尔门〔5〕对松木和菊木的研究可见图1.7和1.8〔1, p. 341—342〕。

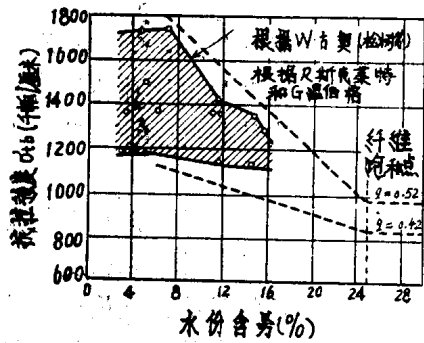


图1.6 抗拉强度和含水率间的关系

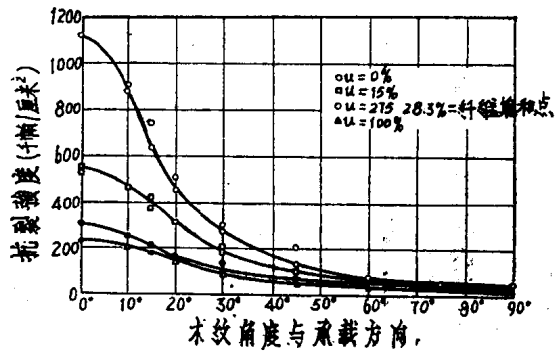


图1.7 松木抗裂强度和木纹角度之间的关系

木材沿木纹的抗压强度随密度增大而提高，这个概念不仅适用于一种木材，并且适用于所有木材的全部密度。图1.9列举了烘干、风干和水饱和条件下的这种情况〔1, p. 345〕。

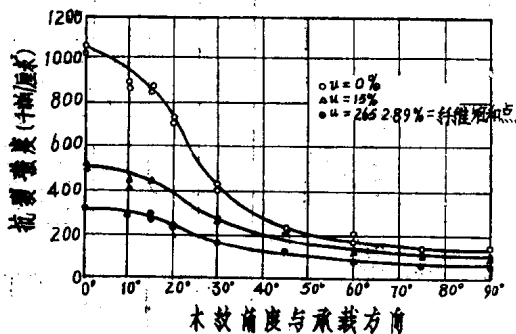


图1.8 松木抗裂强度和木纹角度之间的关系

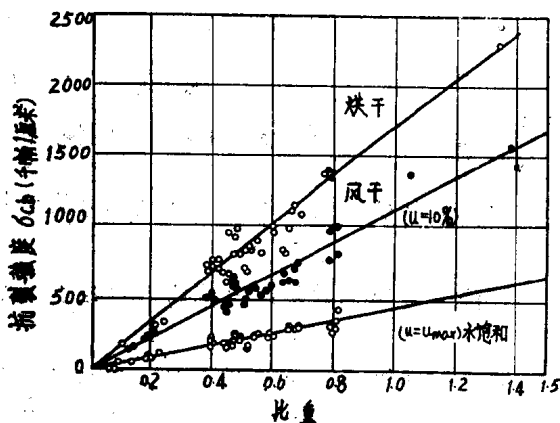


图1.9 在不同含水率时抗裂强度和比重间的关系

水份在木材抗裂强度中是最重要的因素。由于水淀积在微胞之间，引起胞间吸力减小，并因此而粘合。在考尔门〔5〕的研究中看到的这一作用列举于图1.10〔1, p. 348〕。水份达到18%以后，强度差别不大，但下降到干燥条件下的一半左右。

从图1.11可看到，矿山安全研究学会的狄克松和霍根〔6〕之研究与这些数据完全相吻。水份达到20%后，抗裂强度从500公斤/厘米²降到250公斤/厘米²左右，但不再进一步下降。萨克西纳和辛格〔7〕在印度中央采矿研究中心的近期研究也表明：木材抗裂强度的下降是水份起主要作用〔2, 12〕。如图1.11和1.12所示，木柱的承载能力随水份增加而显著地下降。水份达15%后，作用变得不重要了。

节疤和树杈对抗裂强度的影响不

如抗拉强度大，尽管如此，这一问题不应掉以轻心 [1, p.353]。

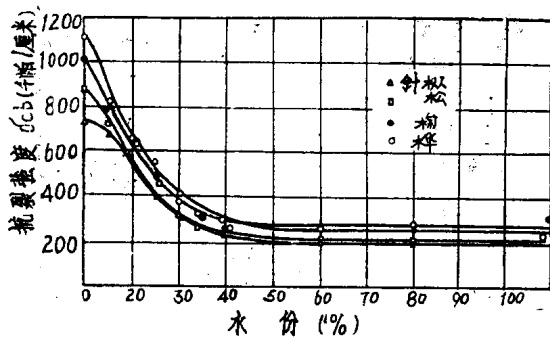


图1.10 多种木材抗裂强度和水份间的关系

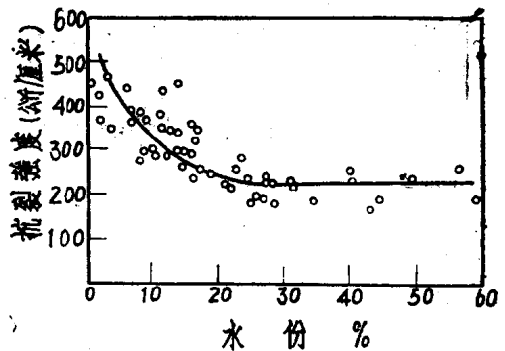


图1.11 水份对木材抗裂强度的影响

抗弯强度。根据坑木的轴线平行于纤维来测量抗弯强度。如果长度与直径比小于11，则在压力下要考虑抗裂强度 [1, p.414]。根据一些研究人员的意见，木材的抗弯强度 [2, p.329] 取决于如下条件 (见图1.13)：

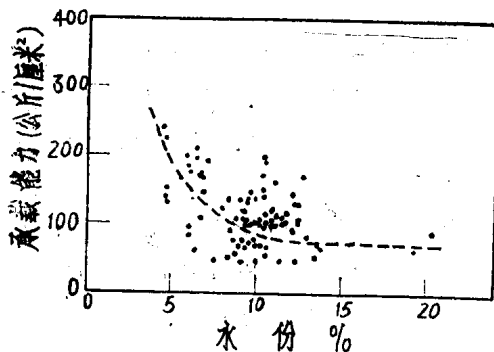


图1.12 木材的水份和承载能力之比

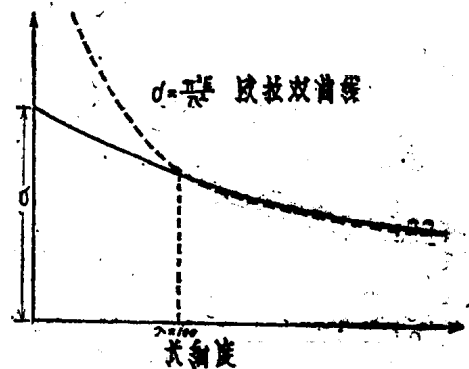


图1.13 抗弯强度与长细比之比

$$\sigma = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \lambda > 100 \text{ 时} \quad (1.1)$$

$$\sigma = \sigma_c (1 - a\lambda + b\lambda^2) \quad \lambda < 100 \text{ 时} \quad (1.2)$$

式中 λ = 细长度比 = $4l/d$

E = 坑木的弹性模量

σ = 坑木的抗弯强度

σ_c = 坑木的抗裂强度

a, b = 坑木的质量常数；作为规则的矿井坑木， $a=0, b=2$

l = 坑木的长度

d = 坑木的直径

表1.3提出了规则坑木的抗弯强度。

表1.3

矿井坑木的抗弯强度

直径 〔d(厘米)〕	长度 〔l(米)〕	细长度 $\lambda=4l/d$	抗弯强度 (公斤/厘米 ²)	密度 (克/厘米 ³)	含水量(%)
16.1	1.00	24.8	284.0	0.560	20.3
13.2	1.00	30.3	384.3	0.616	21.5
12.7	1.20	37.8	322.1	0.637	19.4
12.5	1.20	38.4	221.7	0.555	23.2
14.2	1.50	42.3	280.7	0.686	21.9
16.5	1.50	36.4	207.0	0.585	24.3
16.5	1.80	43.7	175.2	0.670	25.7
16.0	1.80	45.0	271.3	0.630	22.7
13.5	2.00	59.0	214.5	0.638	21.3
16.1	2.00	49.0	233.9	0.664	24.3

见参考文献2

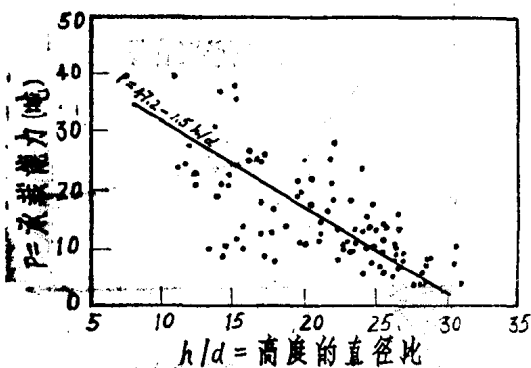


图1.14 一根支柱的承载能力

萨克西纳和辛格〔7〕提出了以下抗弯强度的算式和数值，系根据在印度进行大量坑木试验的结果，见图1.14〔7, p. 12〕和表1.4。

$$P = 47.2 - 1.5h/d \quad (1.3)$$

式中 P = 支柱的载荷能力，吨

h = 立柱的高度，毫米

d = 立柱的平均直径，毫米

抗挠强度(断裂模量)。水平坑木处于承受弯应力的情况下，上部纤维处于压力下和下部纤维处于拉力下。因为抗拉强度

比抗压强度大得多，如图1.15所示〔8; 1, p. 361〕，中轴线位于和压力侧相比更靠近于拉力侧。

表1.4

立柱的载荷能力

高度一直径比 (h/d)	5	10	15	20	25
载荷能力(吨)	39.7	32.2	24.7	17.2	9.7

见参考文献7

如图1.16〔2, p. 330〕所示，断裂模量由横梁中心上的载荷来测出。在载荷下测出了挠曲度并绘出了曲线。有若干个变形带。首先是承载的弹性带并与挠曲度成正比。虽然程度较轻，但这一关系在第二带中是持续的。最后，在 P 的峰值载荷下，最外层的纤

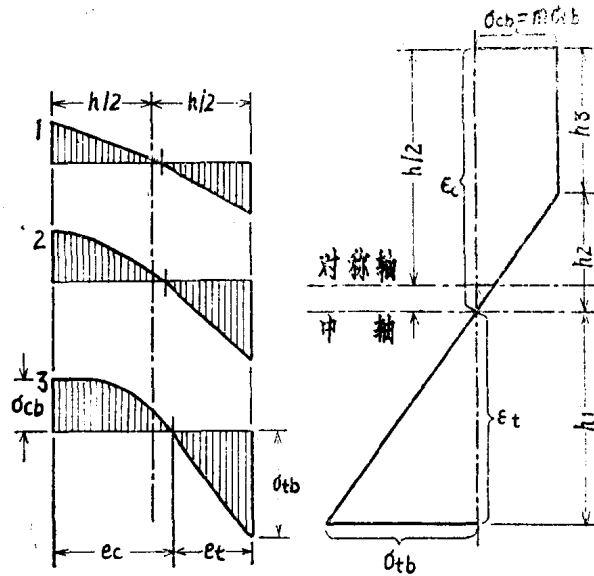


图1.15 弯曲的中轴位置

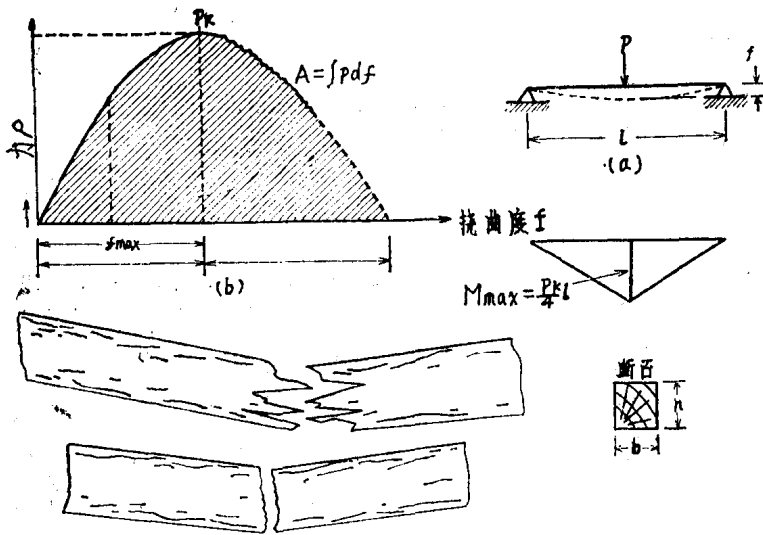


图1.16 在抗弯试验中的木材及断裂形式

维断裂。这一断裂并不是突然发生的，而是纤维结构由此及彼扩大的结果，已示于图中下部。坑木的这一重要动态特性提供了断裂时可见可闻的信号，同时依然承受某些载荷，并使有足够的时间来更换矿井中的支架。应估计到对矿工心理上的影响。

抗弯强度或断裂模量可按下式计算：

$$\sigma_b = \frac{M_{max}}{W} \quad (1.4)$$

$$M_{\max} = \frac{P l}{4} \quad (1.5)$$

$$W = \frac{bh^3}{6} \quad (1.6)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_K l / 4}{bh^3 / 6} = \frac{3}{2} \frac{P_K l}{bh^3} \quad (1.7)$$

式中 σ = 抗挠强度 (断裂模量)

M_{\max} = 最大挠曲运动

P = 断裂载荷

l = 跨距, 横梁长度

W = 断面模量

b = 横梁宽度

h = 横梁厚度

f = 挠曲度

A = 由于挠曲而要完成的工程量

由于挠曲而要完成的工程量可由曲线以下的面积 (图1.16中的阴影面积) 或由下式中的 A 算出:

$$A = \int P df \quad (1.8)$$

由于载荷造成挠曲而要完成的最大工程量为 $P_K f_{\max}$ 。工程量与最大工程量之比的 n 是“完工的系数”，并是木材质量的一项测定方法 [1, p.365]。

$$n = \frac{A}{P_K f_{\max}} = \frac{\text{阴影面积}}{P_K f_{\max}} \quad (1.9)$$

n 的值约为 0.7, 但是, 因节疤和树杈等天然缺陷可能下降到 0.5。

与纤维方向或取向有关的载荷也影响到挠应力。根据温特 [9] 对槐木的研究, 在图 1.17 中列出了其抗拉、抗挠和抗裂强度。抗裂强度受纤维方向的影响甚小 [1, p.366]。

图 1.18 [10] 表示水份和温度影响抗弯强度呈直线下降 [1, p.369]。

西姆斯 [11] 在研究中指出了节疤和树杈对芬兰木材的影响。节疤如果位于张力带中靠近临界断面处 [1, p.373], 则木材的断裂模量会大大下降。节疤的直径明显地降低抗挠强度。

图 1.19 清楚地说明了这一影响。

(疲劳应力的持续性在对木材的影响中是逐步严重的。根据格拉夫 [12] 的研究, 示于图 1.20, 木材的承载能力在 10—20 天后 [1, p.376] 降至 60%。

抗剪强度。木材的极限抗剪强度明显地比抗扭强度低。根据木材手册 [13, p.28] 规定, 作为实芯的木构件, 可取平行于木纹的剪应力为允许的扭曲剪切力, 以及按比例范围, 可取该值的 $2/3$ 作为极限扭曲剪应力。垂直于木纹的剪应力比平行于木纹的高 3—4 倍 [1, p.414]。

纽林和威尔森 [14] 发现抗剪强度 τ_s 和密度 R 之间有一抛物线的作用关系, 其中

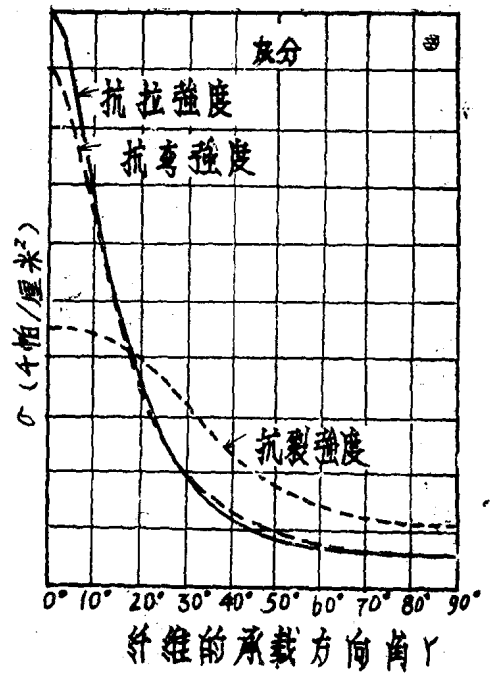
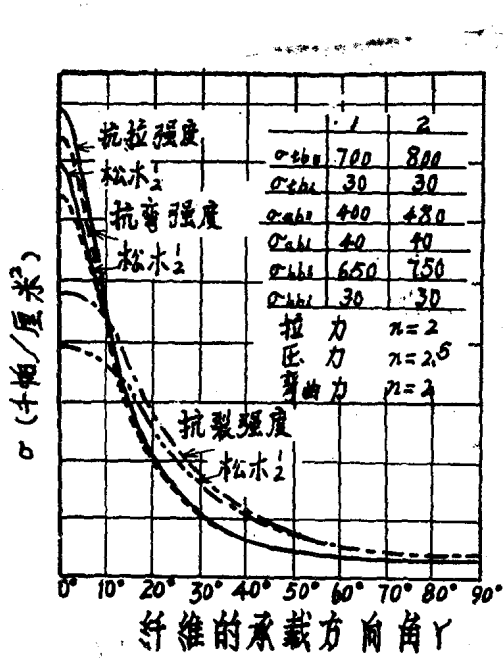


图1.17 纤维的方向对木材抗拉、抗裂和抗弯强度的影响

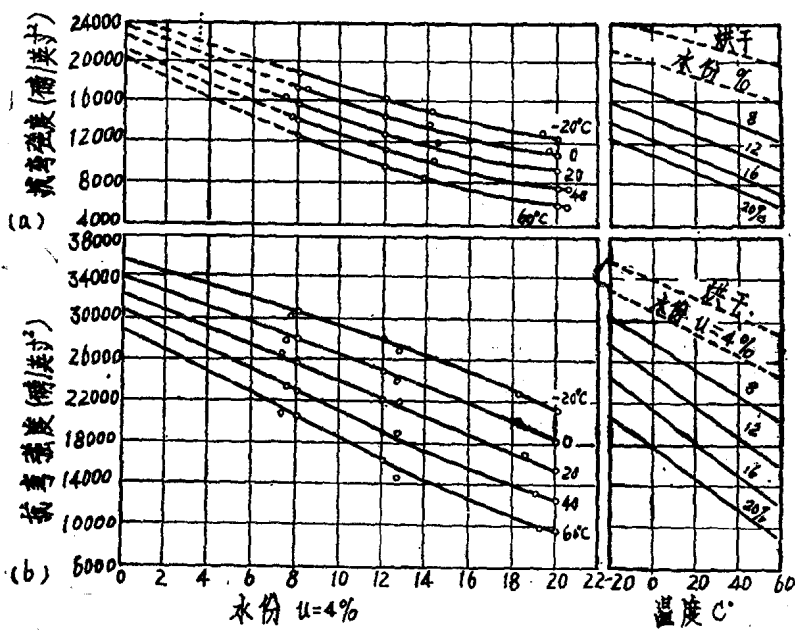


图1.18 水份和温度对木材抗弯强度的影响

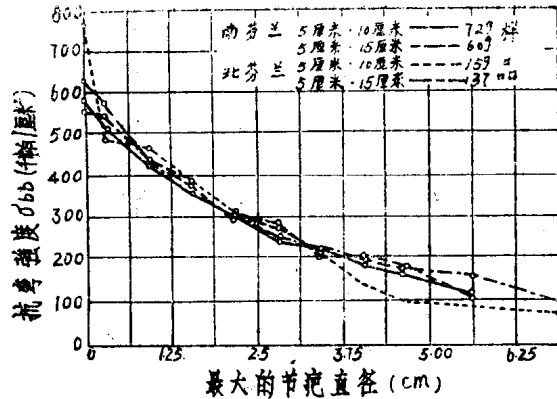


图1.19 节疤的直径影响到木材的抗弯强度

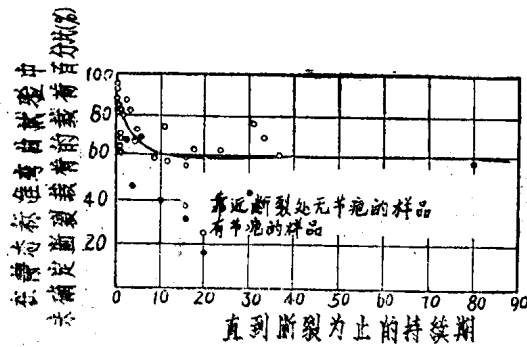


图1.20 载前的持续期影响到木材抗弯强度

重量是以湿材体积烘干值为基础的，见下：

$$\tau_s = AR^{\frac{2}{3}}$$

(1.10)

式中 τ_s = 抗剪强度，公斤/厘米²

R = 密度（烘干体积除以湿材体积），克/厘米³

A = 切向平行于木纹的情况：

湿材193，风干材281 (u=12%)

径向平行于木纹的情况：

湿材179，风干材255 (u=12%)

自始至终，水份影响到强度。埃尔曼的研究工作〔15〕可见图1.21〔1，p. 404〕。

强度的数值。表1.5根据凯尔维兹〔15〕使用柱状试样的研究结果列举了一些商品木材横断面上多方面的机械特性

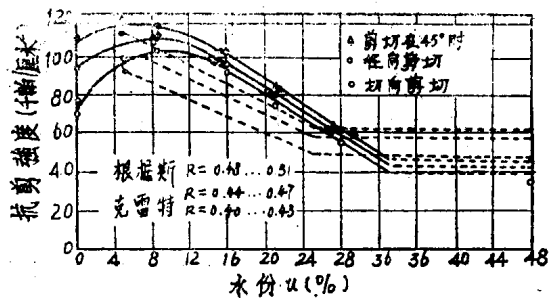


图1.21 水份影响木材的抗剪强度

表1.5 一些商品木材的机械特性

样品种类	抗拉强度 (千帕/厘米 ²)	抗弯强度 (千帕/厘米 ²)	抗震能力 (千帕·厘米·厘米 ²)	裂纹		密度 (克/厘米 ³)	水份 (u=)
				Oc1 = $\frac{P_{max}}{F}$ 千帕/厘米 ²	双裂缝样品 双裂缝样品		
栎木	83—97 90	128—141 135	1.2—1.4 1.3	8.4—9.5 8.8	20.2—31.8 26.3	0.64—0.68 0.66	12.1—12.6 12.4
山毛榉	96—118 107	135—146 142	1.4—1.6 1.5	8.3—8.8 8.6	24.6—38.1 31.1	0.67—0.73 0.69	11.5—11.8 11.7
铁树	— —	58—91 80	0.9—1.3 1.2	7.1—9.7 8.1	27.1—33.3 30.2	0.73—0.78 0.77	10.8—11.3 11.2
槐木	101—127 112	62—167 113	1.3—1.8 1.5	8.5—10.0 9.6	25.4—42.3 30.6	0.67—0.73 0.76	8.6—9.1 0.8
胡桃树	98—114 105	169—183 175	1.6—2.2 1.9	8.8—12.7 11.7	21.1—32.6 29.7	0.58—0.66 0.60	10.9—11.4 11.2
梨莓木	50—60 58	90—92 91	1.0—1.7 1.3	6.6—7.3 7.0	20.7—25.4 22.8	0.57—0.59 0.58	9.8—10.1 10.0
赤杨木	69—79 73	92—99 96	0.9—1.4 1.2	6.4—7.4 7.0	24.5—26.5 25.9	0.53—0.56 0.55	10.4—10.8 10.7
针枞木	33—40 38	42—49 46	0.7—1.0 0.9	4.1—5.1 4.6	15.0—20.4 17.3	0.48—0.69 0.54	11.5—11.6 11.7
落叶松	48—52 50	69—77 75	0.9—1.1 1.0	4.8—5.5 5.2	11.3—27.9 20.1	0.66—0.72 0.68	11.6—12.3 12.1
松木	32—37 34	53—64 57	0.7—1.0 0.8	4.7—5.4 5.1	15.1—19.6 17.4	0.51—0.58 0.55	10.9—13.7 12.0

参考文献1和15

表 1.6 节疤对标准强度的影响

样品种类	比重	水份 (%)	样品尺寸			螺旋形的木纹 (每米在一个表面上的节疤最大直径(厘米))	抗裂强度 (千帕/厘米 ²)	
			(厘米)	(厘米)	(厘米)			
松木	0.48	>25	6.54	10.09	34.91	9	无节疤	185
"	0.48	>25	6.32	10.54	28.80	6	2.2	113
"	0.56	>25	6.29	10.06	49.72	10	3.3	105
"	0.60	>25	6.36	10.38	49.30	20	5.0	95
"	0.41	~14	6.42	7.54	39.48	8	无节疤	329
"	0.48	~14	7.53	11.44	34.90	11	2.8	279
"	0.46	~14	6.39	7.51	49.57	8	3.0	235
针纵木	0.43	~14	5.92	11.51	29.60	0	无节疤	354
"	0.40	~14	7.00	12.10	50.16	8	1.4	292
"	0.42	~14	7.97	10.95	49.80	9	2.9	263

见参考文献1和16

表1.7 木材的抗扭强度

样品种类	密度 (克/厘米 ³)	水份 (%)	抗扭强度(千帕/厘米 ²)		断裂变形(°/厘米)		资料来源
			保持纤维 平行于纵轴	保持纤维 垂直于纵轴	保持纤维 平行于纵轴	保持纤维 垂直于纵轴	
针叶材							
针	0.35—0.42	11.9	87—101	32—36	0.96—1.33	1.8—2.0	K.休帕
"	0.45	12	{ 1r=186 2r=181	25	—	—	H.卡林顿
"	0.48	10.8	141—162	30—62	1.1	2.3	O.克莱默
木	0.50—0.55	12.2	134—140	43—50	0.95—1.8	1.37—1.42	K.休帕
心材	0.65	10.8	163—178	39—64	0.7	1.0	O.克莱默
边材	0.56	11.3	135—167	—	0.6—0.9	—	O.克莱默
阔叶材							
宽	0.67	12	2001	—	—	—	O.克莱默
桦	0.66—0.69	11.3	246—250	151—156	2.6—3.0	2.0	K.休帕
山	0.67—0.71	11.7	190—220	112—114	1.2—2.0	1.0—1.5	" "
栎	—	9	158—213—250	—	1.5—2.5	—	F.考尔门
槐	—	12.0—16.3	140—188—238	—	1.6—3.0	—	" "
"	—	空气干燥	210—245	—	—	—	R.鲍曼
"	0.81—0.83	11.3	258—277	156—158	1.8—2.1	1.2—1.5	O.克莱默
"	0.65	9.5	179—262—345	136—167—209	1.3	1.3—1.7	" "
胡桃木	0.60	8.1	275—303—326	135—152—162	1.0—1.2	1.4	" "

见参考文献7

〔1, p.333〕。根据格拉夫〔12〕的研究,在表1.6中提出了一些木材的抗裂强度。根据许多研究人员提供的数据,在表1.7〔1, p.396〕中说明了木材的抗扭强度。

在木结构件中的安全许应力,根据土耳其桥梁和建筑工程学会的标准列于表1.8〔2, p.336〕。

表1.8 木材结构件的安全应力(公斤/厘米²)

应力型式	1 类		2 类		3 类	
	松木	栎木	松木	栎木	松木	栎木
挠应力	130	140	100	100	70	75
连续梁中的挠应力	140	155	110	120	75	80
平行于纹理的拉力	105	110	85	100	0	0
平行于纹理的碎裂力	110	120	85	100	60	70
垂直于纹理的碎裂力	20	30	20	30	20	30
平行于纹理的剪应力	9	12	9	10	9	10
垂直于纹理的剪应力	27	36	27	30	27	30

见参考文献2

允许强度。因为木材是一种天然材料,有许多未知因素影响到强度,所以必须有较大的“安全系数”。最好的做法是试验手头上的材料强度,并根据这些确定下来的强度来使用。“安全应力”可用下式计算:

$$\sigma_{sf} = \frac{\bar{X} - KS}{n} f_k f_y \quad (1.11)$$

式中 σ_{sf} = 安全(允许)应力

\bar{X} = 从无任何缺陷的小试样件上得出的平均强度

K = 保证强度很少有可能超限的统计常数,一般 K 取2

S = 从无任何缺陷的小试样件上得出的标准误差

n = 作为持续期长,大多数情况下支架承载的安全系数。用于承载下的挠应力

$n = 2.25$; 用于碎裂应力和剪应力 $n = 1.4$

f_k = 一项天然缺陷系数。英国标准 f_k 为 0.4—0.75。有很多节疤和裂缝的木柱取 0.5。根据其缺陷木柱应存放一段时间

f_y = 载荷持续期的一项系数。持续期长, $f_y = 1$; 持续期短, $f_y = 1.5$ 。

一个计算实例说明了这一方程。假设在无天然缺陷的栎木柱上作试验,平均抗挠强度 \bar{X} 为 1270 公斤/厘米², 标准误差 S 为 300 公斤/厘米²。求用于持续期长,无缺陷木柱上的安全挠应力。在方程(1.11)中 $k \approx 2$ 。

$$\sigma_{sf} = \frac{\bar{X} - KS}{n} f_k$$