

短周期工业材干缩率和干燥应变规律的研究

滕通濂* 周永东 孟京明 陈省兰 朴成汉

摘要 研究了短周期工业材在干燥过程中木材表层和内部各层干缩率及弹性和塑性应变的变化规律。结果表明,基准硬度水平对应应变值的大小和最大应变值的到达时间有显著影响。干燥前期,木材表层伸张弹性应变最大值随着温度和平衡含水率的增加而减少,木材表层塑性应变则随平衡含水率的增加而增加。正确调节基准初期阶段的平衡含水率水平,能有效地控制干燥前期应变最大值,从而达到控制干燥质量的目的。

关键词 短周期工业材; 木材干燥; 弹性应变; 塑性应变; 收缩率

Shrinkage and Drying Strain of Timber from Fast-growing Plantation Wood

Teng Tonglian Zhou Yongdong Meng Jinming Chen Shenglan Piao Chenghan

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract The development of both elastic and plastic strains of timber surface and internal layers from fast-growing plantation wood *Populus tomentosa*, *Pinus massoniana* etc. was studied. Results showed that the hardness-level of drying schedules had much influence on both the drying strain developed and the time when it reached its maximum value. At the primary stage of drying, the maximum value of elastic tension strain of the timber surface increased with drying temperature rising, and decreased with increment of equilibrium moisture content (EMC). If the EMC could be correctly set at the primary stage of drying, the maximum value of the tension strain could be controlled and then good drying quality could be gained.

Keywords Fast-growing plantation wood; Wood drying; Elastic strain; Plastic strain; Shrinkage

木材干燥过程中表层水分首先蒸发,当其含水率降至纤维饱和点时,产生收缩,而相邻内层的含水率仍高于纤维饱和点而未收缩,因各层收缩不一致而产生干燥应力和应变。在以前的诸多研究中,揭示了阔叶树材在干燥过程中存在相当大的干燥应力,在干燥前期,外层受拉伸应力,内层受压缩应力,随着干燥的进行,外层逐渐由受拉伸应力变为受压缩应力,而内层则变为受拉伸应力,这种应力垂直于纹理方向。干燥应力是导致初期端、表裂和后期内裂的直接原因。本研究通过切片法探求短周期工业材在非稳态干燥条件下木材内部干缩率和干燥应变的发生、发展和变化规律,考察和分析干燥基准水平对应

变的影响,为制定合理的干燥工艺提供理论依据

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

见《木材工业》,1998,12(4):3~7

1.2 试验方法

在实验室小型干燥机内进行,选用多段含水率基准(基准表略)。

干缩率和应变的测量 采用切片法测量应变值,试验板刨光后尺寸有600 mm×100 mm×25 mm和600 mm×100 mm×50 mm两种,干燥前测定按事先已标定的各测点之间的长度(L_0)和在同一试验板上制取的分层试验片在室内缓慢气干后的长度(L_4)。在干燥过程中定时取出,按标定的测点,沿顺纹方向,依次切下15 mm厚的含水率和应变试片,然后将应

变试片沿厚度方向劈成 5~ 10块 (50 mm 厚劈成 10 块, 25 mm 厚劈成 5块)小试片,测定试验片劈开前后的长度 L_1 、 L_2 和重量 G_1 、 G_2 。然后将小试验片放在室内气干至含水率平衡后再测量其长度 (L_3),最后各试验片和含水率试片在 $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 鼓风干燥箱内烘到绝干后称重 (G_0)。按下式计算应变值和干缩率:

$$\text{弹性应变 } E = (L_1 - L_2) / L \times 100 \cdots \cdots (1)$$

正值为伸张弹性应变,负值为压缩弹性应变。

$$\text{塑性应变 } P = [(L_0 - L_3) - (L_0 - L_4)] / L_0 \times 100 \cdots \cdots (2)$$

正值为压缩塑性应变,负值为伸张塑性应变
木材干缩率 $S = (L_0 - L_1) / L_0 \times 100 \cdots \cdots (3)$

2 试验结果和讨论

2.1 木材干燥过程中表层和内部各层弹性应变特点

研究表明,在不同的干燥基准下干燥,木材表层和内部各层弹性应变的发展和变化规律基本相同。以厚度均为 5 cm 的毛白杨和马尾松板为例,分别采用五号基准和三号基准,干燥特性见图 1和图 2 由图可知,干燥过程中弹性应变的一般规律是:干燥开始,木材表层处于伸张弹性应变状态,在干燥前期,表层伸张弹性应变数值逐渐增加,到最大值后又逐渐缓慢减小至 0 后转向压缩弹性应变发展;在干燥后期,压缩弹性应变值也逐渐增加至最大值后又逐渐减小或稳定保持至干燥终了。中心层的弹性应变值的发展和变化规律与表层相对应,干燥开始,中心层受压缩弹性应变,其值开始缓慢增加至最大值后又逐渐减小到 0,然后应变转向为伸张应变,应变值又从 0 增至最大值后又减小接近 0 其他各层弹性应变的变化规律大体一致,但比表层滞后一段时间。干燥过程中典型的木材内部弹性应变的发展变化过程极似正弦波状的变化过程。波峰和波谷的极大值一般出现在表层和中心层,其他各层皆介于这二者之间。但是初含水率低于纤维饱和点,厚度 25 mm 的日本落叶松未发现上述明显的规律性。

干燥过程中,木材表层伸张弹性应变的最大值和应变转向时间先于中心层。在本次试验条件下测定的一组短周期工业材表层和中心层弹性应变最大值到达时间、当时含水率和平均含水率以及应变转向时间见表 1

2.2 木材干燥过程中表层和内部各层塑性应变特点

不同树种和工艺条件对短周期工业材塑性应变的发展和变化过程影响极大,但也有其共同的特点(在毛白杨、日本落叶松、马尾松、杉木中观察到的),在干燥初期,木材表层呈现伸张塑性应变,随着干燥的进行,表层伸张塑性应变逐渐增加至最大值后又逐渐减小,到了干燥后期,表层塑性应变变

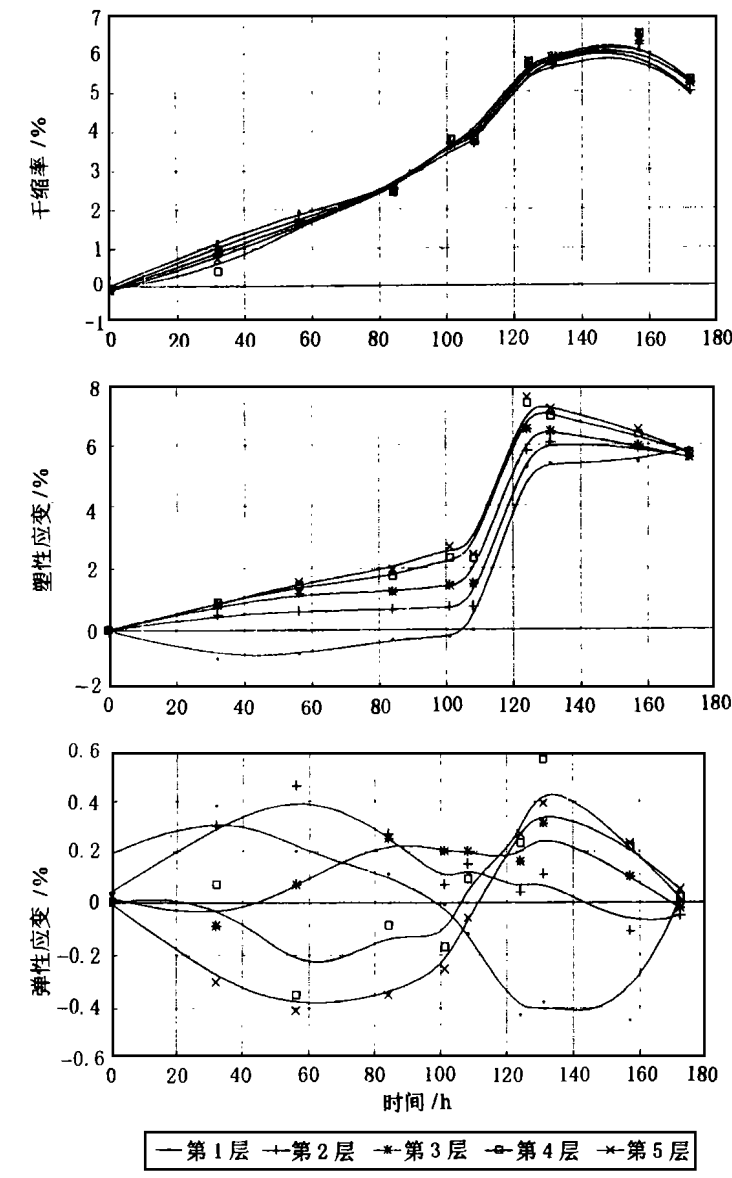


图 1 毛白杨木材干燥过程干缩率、弹性和塑性应变曲线
Fig. 1 Shrinkage, elastic and plastic strain curves of *Populus tomentosa* testing specimen during drying

表 1 木材弹性应变最大值

Tab. 1 Maximum value of elastic strains of testing specimen during drying											
树种	厚度 mm	基准号	木材表层弹性应变					木材中心层弹性应变			
			最大值 %	到达时间 h	表层含水率 %	平均含水率 %	转向时间 h	最大值 %	到达时间 h	中心层含水率 %	转向时间 h
毛白杨	50	5	0.31	41.4	20.0	47.9	98.9	0.38	60.8	63.8	111.6
毛白杨	50	4	0.18	49.4	20.0	34.1	110.8	0.26	69.6	20.0	100.8
毛白杨	50	3	0.30	34.6	21.5	43.5	93.6	0.33	85.2	43.8	—
毛白杨	25	1	0.13	22.8	25.0	34.7	54.9	0.20	32.0	54.8	66.6
毛白杨	25	2	0.05	18.8	20.6	43.1	54.3	0.24	35.1	45.8	—
马尾松	50	3	0.30	24.0	19.0	29.5	75.8	0.26	44.4	31.3	91.4
马尾松	50	4	0.20	29.7	19.9	32.3	50.0	0.26	40.0	35.2	59.0
火炬松	25	1	0.34	47.0	21.3	—	61.8	0.38	53.0	40.0	59.8
火炬松	25	2	0.25	46.4	22.2	44.3	—	0.19	49.0	47.0	66.1
杉 木	50	中试	0.28	71.5	18.2	92.7	229.2	0.31	106.4	123.0	248.1
日本落叶松	25	1	0.48	27.3	15.5	20.4	—	—	—	—	—
日本落叶松	25	2	0.39	17.0	17.5	20.7	—	—	—	—	—

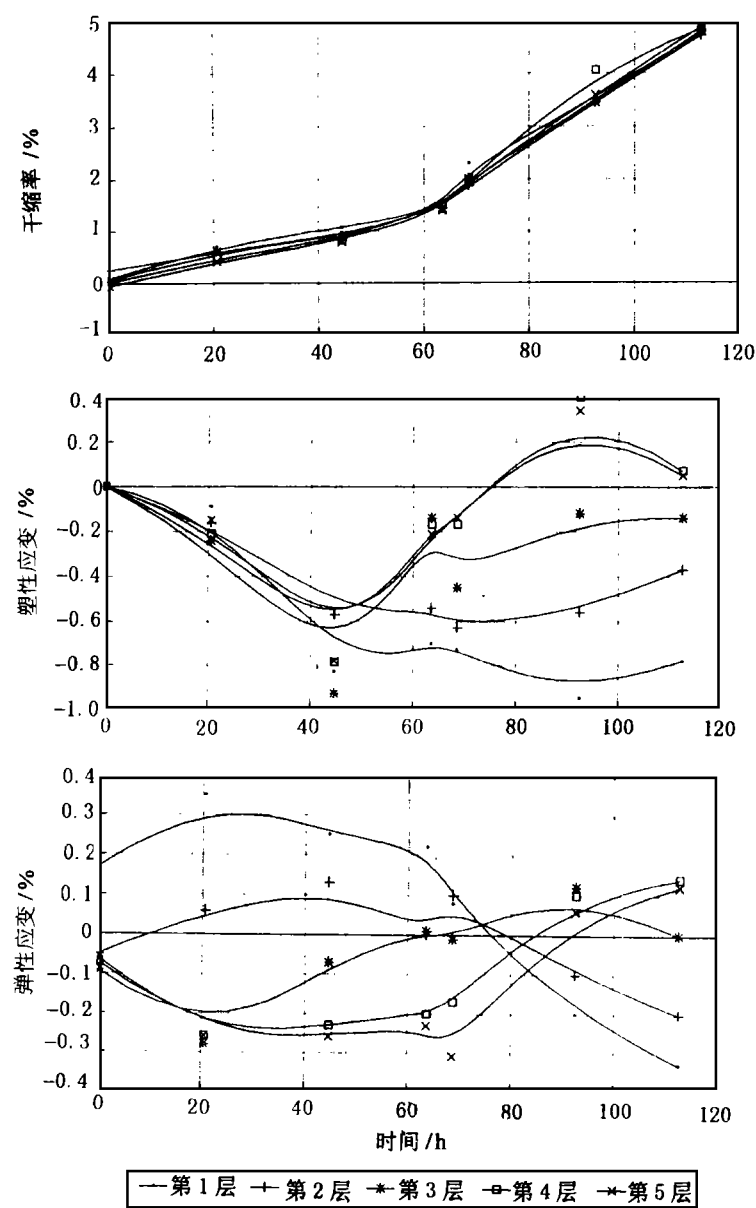


图 2 马尾松木材干燥过程干缩率、弹性和塑性应变曲线
Fig. 2 Shrinkage, elastic and plastic strain curves
of *Pinus massoniana* testing specimen during drying

化大体上有两种情况,一种是如毛白杨达到最大值后逐渐减小至 0 而后转变为压缩塑性应变,另一种是达到最大值后缓慢减小至干燥终了,始终保持伸张塑性应变 而木材中心层的塑性应变,也大致有两种,一是如日本落叶松和毛白杨,在干燥初期,呈现压缩塑性变形,随着干燥的进行,逐渐增加到最大值,然后逐渐减小到 0 后转变为伸张应变至最大

值后又缓慢减小,至干燥终了仍保持少量的伸张塑性应变;另一种是马尾松和毛白杨在干燥初期,中心层也呈现伸张塑性应变,随着干燥的进行,伸张塑性应变值增加至最大值(比表层最大值小)后又逐渐减小至 0 后转向压缩塑性应变,直至干燥终了。特别要指出的是刺槐塑性应变发展过程,从干燥开始到结束,表层和中心层均呈现为压缩塑性应变,因试验次数少,含水率很低,故此项结果还不足以证实其普遍性程度,今后尚需进一步研究。总之,本试验的几种典型短周期工业材都是密度小、材性变异很大的针叶树材和软阔叶树材,塑性应变的发展和变化过程曲线比较复杂

在本试验条件下,木材表层塑性应变最大值、到达时间、表层当时含水率和木材平均含水率见表 2

表 2 木材表层塑性应变最大值

Tab. 2 Maximum value of plastic strains of testing specimen during drying							
树种	厚度 mm	基准号	表层塑性应变				
			最大值 %	到达时 间 / h	表层含 水率 %	平均含 水率 %	
毛白杨	50	3	0.93	85.5	12.4	28.0	
毛白杨	50	4	2.13	60.7	15.0	26.3	
马尾松	50	3	0.76	53.4	16.9	19.0	
马尾松	50	4	3.36	53.2	12.2	19.6	
日本落叶松	25	1	2.44	35.7	15.0	20.4	
日本落叶松	25	2	1.41	30.7	11.5	14.7	
杉 木	50	中试	0.30	217.9	9.1	22.6	
毛白杨	50	中试	0.69	34.2	14.3	33.5	

注:木材内层塑性应变最大值不十分明显,因此未测定

2.3 干燥过程中木材表层和内部各层的

收缩率

典型的收缩率变化曲线有以下特点:

(1)平均初含水率和表层初含水率远高于纤维饱和点时,干燥初期(包括预热期间)不收缩或因热膨胀而略有伸长,伸长量与干燥(或预热)温度成正比。当干燥继续进行,平均含水率仍然较高,但表层含水率已降到纤维饱和点以下时,此时开始收缩,干缩率曲线开始缓慢上升,当平均含水率降到纤维饱和点后,干缩率以近似直线地快速增加并达到最大值后保持稳定或略有下降,直到干燥终了。

(2)平均初含水率略高于纤维饱和点,但表层含水率已低于纤维饱和点时,干燥初期即开始收缩,收缩率曲线随干燥的进行缓慢增加,当平均含水率低于纤维饱和点之后,收缩率快速增加,收缩率曲线变陡。

(3)木材表层和内部各层的收缩率变化曲线一致。一般在干燥初期,表层收缩率略高于中心层,而到干燥后期却是中心层高于(也有低于)表层,各层收缩率差异并不显著,收缩率曲线在有的区段呈重叠状。在本试验条件下,各树种收缩率最大值范围在2.26%至6.10%(见表3)。

表 3 短周期工业材的收缩率最大值
Tab. 3 Maximum value of shrinkage of specimen tested

树种	厚度 mm	基准号	收缩率 最大值 %	到达最大值 时间 /h
毛白杨	50	5	6.10	148.0
毛白杨	50	3	3.60	117.4
毛白杨	50	4	2.55	117.0
毛白杨	25	1	2.36	84.1
毛白杨	25	2	2.26	61.1
火炬松	25	1	4.32	147.2
火炬松	25	2	4.18	78.2
日本落叶松	25	1	5.80	79.6
日本落叶松	25	2	5.25	67.9
马尾松	50	3	4.80	112.6
马尾松	50	4	5.32	135.5
杉木	50	中试	5.16	293.0

2.4 讨论

2.4.1 干燥缺陷与干燥应力的关系 研究表明,木材干燥初期,表层水分首先被蒸发,含水率很快下降,此时相临内层含水率仍高于纤维饱和点,木材表层纤维倾向收缩,但受到未收缩的内层纤维的限制而受到伸张应力,内层纤维则受到压缩压力。随着水分继续蒸发,表面含水率继续降低,收缩率增加,干燥应力加大。当表层含水率降到一定值时,表层与内层含水率梯度相当陡,可能产生很大的干燥应力,当这种干燥应力超过木材横纹抗拉强度极限值时就会发生开裂等缺陷。同时也表明,木材强度与含水率成抛物线下降,在含水率一定时与温度成线性降低^[2]。

在干燥初期,木材初含水率很高,因而强度较低,可以认为此时是木材干燥最容易发生开裂的危险期。所以,干燥初期应力的 大小是造成木材表裂的直接原因。而表层塑性应变所引起的永久变形则是产生内裂的主要原因。

应变是应力的一种显示形式,本试验条件下测定的应变最大值见表 1 同时发现,发生应变最大值时的表层含水率约在 15%~23% 之间(平均 20% 左右),木材平均含水率(统计数)在 40% 左右,这是干燥的危险期。在本试验中都未发生明显的表裂,但个别试验板有细短端表裂和节子周围的细短裂,仅在日本落叶松一块板观察到细短表裂 1 条。封端与不封端的对照试验结果表明,封端减少水分从端部过度蒸发,对防止端裂以及由端裂延伸到端表裂有明显的效果。本次试验和特性试验的所有树种均未发现有内裂,因此可以认为,短周期工业材在常规对流干燥条件下,引起的永久变形值不会形成产生内裂的应力极限值。

2.4.2 干燥基准与干燥应变的关系 在不同的干燥条件下,同树种木材干燥过程中厚度方向各层的弹性和塑性应变的变化规律基本上是一致的。但是,干燥基准的硬度水平对弹性和塑性应变值大小和出现最大应变值的时间有显著的影响。许多研究表明,在干燥过程中,木材表层伸张弹性应变最大值随着温度的增加而减少,干燥初期平衡含水率的高低对表层弹性、塑性应变都有较大影响^[2,5,16,17]。本试验采用的常规基准(基准 1)与高温基准(基准 2)的对照试验结果,证实了提高温度水平木材表层弹性应变最大值减少,而且到达最大值的时间提早。采用高温基准可以比常规基准缩短初期阶段的延续时间。在相同温度下,木材表层和内层弹性应变随平衡含水率的增加而减少(基准 3 与基准 4 对照)。表层弹性应变到达最大值时间滞后。木材表层塑性应变最大值则随平衡含水率的增加而增加。

3 结论

1)在本试验条件下测定的毛白杨、马尾松、火炬松、杉木、日本落叶松等短周期工业材木材表层弹性应变最大值和当时含水率分别为 0.03%~0.48% 和 15%~25%,平均值分别为 0.27% 和 20.3%;木材中心层弹性应变最大值和当时含水率分别为 0.19%~0.38% 和 31.3%~123%,平均值分别为 0.28% 和 57.6%。干燥前期木材表层伸张弹性应变最大值,在相同的平衡含水率下,随温度的增加而减少,在相同温度下,随平衡含水率的增加而减少。

2)短周期工业材干燥初期,木材表层呈现伸张塑性应变,应变值逐渐增加,至最大值后又逐渐减

少。干燥后期,发展变化规律不十分明显,各树种间也有差异。在本试验条件下测定的毛白杨、马尾松、日本落叶松、杉木等木材表层塑性应变最大值为0.30%~3.36%,最大值的平均值为1.50%,当时的表层含水率和木材含水率的平均值分别为13.3%和23.0%。干燥前期,木材表层塑性应变最大值随平衡含水率的增加而增大

3)干燥过程中木材表层和内部各层收缩率变化呈现相同的规律,初含水率较高的木材干燥初期,由于木材热膨胀而稍有伸长,随着含水率降低,收缩即开始,至纤维饱和点之后,收缩率与干燥时间成线性增加,当收缩率达到最大值之后,收缩率成抛物线状逐渐减少至平稳。本试验条件下各个树种的收缩率范围为2.26%~6.10%。

4)在本试验条件下,在木材内部的干燥应力值均未达到致木材破坏的极限值。表明了短周期工业材可以采用中、高温快速基准,只要正确调节基准初期阶段的平衡含水率水平,就能有效地控制干燥应力水平,可以防止初期开裂,获得较好的干燥质量

4 参考文献

1 成俊卿主编.木材学.北京:中国林业出版社,1985.9

2 满久崇磨(日).木材的干燥.马寿康译.北京:轻工业出版社,1983.8

3 农林水产省林业试验场编(日).木材工业手册.高家炽等译.北京:中国林业出版社,1988.9

4 何定华.红松薄板高温干燥的研究.林业科学,1988,24(3):308~312

5 约翰·F肖若著.木材传热传质过程.肖亦华,滕通濂,郭焰明译.北京:中国林业出版社,1988

6 郭焰明.南方阔叶树材干燥初期应变特点的研究.木材工业,1995,9(4):6~10

7 Rosen H N. Empirical Model for Characterizing Wood Drying Curves. Wood Science, 1980, 12(4)

8 McMilen J M. Drying Stresses in Red Oak. Forest Prod. J., 1955, 2

9 McMilen J M. Drying Stresses in Red Oak, Effect of Temperature. Forest Prod. J., 1955, 8

10 Jung H S, Lee N H and Lee S J. Stress in Drying Wood in Relation to Moisture Gradient. IUFRO Wood Drying Symposium, 1989

11 Erickson R W. Mechano-sorptive Phenomena in Drying Red Oak. IUFRO Wood Drying Symposium, 1989

12 Dahlblom O, Petersson H and Ormarsson S. Numerical Simulation of the Development of Deformation and Stress in Wood during Drying. IUFRO International Wood Drying Conference, 1994. 8

(上接第6页)

遍存在断裂。这是由于压机闭合时,在模具侧壁上的某一部分刨花在压机闭合时的某一时刻先被压实。当压机继续下降时,这一部分不再往下移动,而已被压紧部分的刨花继续下移,这时将出现断裂。为使侧壁上的刨花分布均匀,铺装时在支脚中心用一芯棒搅拌(试验号4~9),使凹模内的刨花有一定的紧密程度。最理想的是刨花纵向平行于侧壁,这种铺装方式可使侧壁上的刨花分布得到明显改善。

3 结论

1)按本试验条件,支脚的空心圆锥体密度应在0.43 g/cm³以上。但由于支脚铺装困难,质量波动大,故空心圆锥体密度以0.45 g/cm³以上为宜。

2)刨花用振动式铺装机铺装时,铺装时间以15 s

以内为宜。本试验中,在用云南松刨花和实验室振动仪,振动铺装时的筛网孔径为31.5 mm的条件下,能保证在15 s以内铺完。

3)振动铺装时,支脚中心应使用棒形物进行“搅拌”,使刨花得到适当的预“密实化”。

4)振动铺装机的筛网应做成如图8所示的形状。

5)铺装完毕后,在筛网上刨花残留部分的高度应大于支脚上方筛网突出部分的高度 h (图8)。

4 参考文献

1 张娟娟.木质托盘——一种有发展潜力的木材制品.木材工业,1990,4(1):33~35

2 Haataja et al. Method for Molding Articles Having Non-planar Portions from Matted Wood Flakes, U. S. Patent 4 40 708, Apr., 03, 1984

3 昆明人造板机器厂.模压工业托盘生产线