

文章编号:1007-9629(2023)03-0289-10

## 基于灰度与彩色图像处理的木破率测量法

杨 滨, 郝景新\*, 刘拓宇, 徐大鹏, 鲁 成

(中南林业科技大学 材料科学与工程学院, 湖南长沙 410004)

**摘要:**提出了基于灰度、彩色图像处理的正交胶合木木破率数字快速测量方法,并且通过对以落叶松和碳化竹为基材、酚醛树脂和异氰酸酯为胶黏剂的试样进行干湿剪切条件下的破坏试验,验证了该方法的可行性.结果表明:基于灰度与彩色图像处理法计算出的木破率均与试验值符合较好,满足了工程应用的要求;木材破坏层次和木破率图像颜色的变化对测量精度的影响较大,胶黏剂固有色的变化对阈值分割的木破率灰度图像测量法的精度影响较大,环境影响则是像素统计的木破率彩色图像测量法的主要影响因素.

**关键词:**正交胶合木;图像处理法;木破率;测量;试验

中图分类号:TU531.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.010

## Wood Failure Percentage Measurement Method Based on Grayscale and Color Image Processing

YANG Bin, HAO Jingxin\*, LIU Tuoyu, XU Dapeng, LU Cheng

(College of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry  
Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** A fast digital measurement method of cross-laminated timber wood failure percentage based on grayscale and color image processing was proposed. To verify the feasibility of this method, the shear failure samples prepared with larch and carbonized bamboo as the base material and phenolic resin and isocyanic acid as the adhesives were tested under dry and wet shear conditions. The results show that the wood failure percentage calculated by the gray-scale and color image processing methods are in good agreement with the experimental values, and the errors meet the requirements of engineering applications. However, the color change of the wood damage level and the wood failure percentage image have a greater impact on the measurement accuracy. Among them, the change of the inherent color of the adhesive has a greater impact on the accuracy of the threshold segmentation gray-scale wood failure percentage image measurement method, while the environmental impact is the main factor of the color wood failure percentage measurement method of pixel statistics.

**Key words:** cross-laminated timber; image processing; wood failure percentage; measurement; experiment

正交胶合木(CLT)是通过胶黏剂将木材或其他锯材在垂直方向上相互胶合而成<sup>[1]</sup>的木结构建筑材料,它克服了传统木材横纹强度低的弱点,使各向异性的木材转变为双向力学性能良好的结构材料<sup>[2]</sup>.相比于力学性能,胶合性能同样是CLT的重要性能<sup>[3]</sup>.

木破率作为评价胶合性能的重要依据之一<sup>[4]</sup>,胡小霞等<sup>[5]</sup>、董惟群<sup>[6]</sup>和Simon等<sup>[7]</sup>已经开展了部分研究,但木破率图像测量法在不同条件下的适应性研究还十分鲜少.因此,本文对此展开研究,以期为提高不同条件下木破率的测量精度提供一定的科学指导.

收稿日期:2022-01-18; 修订日期:2022-05-12

基金项目:湖南省教育厅优秀青年基金(22B0277);国家级大学生创新训练计划项目(202110538010);湖南省重点研发项目(2016NK2156)

第一作者:杨 滨(1995—),男,宁夏中卫人,中南林业科技大学硕士生.E-mail: yangbinzn@163.com

通讯作者:郝景新(1982—),男,湖南长沙人,中南林业科技大学教授,硕士生导师,博士.E-mail: haojingxin@csuft.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

落叶松:四面刨光,气干密度为 $0.64 \text{ g/cm}^3$ ,未经过任何物理、化学处理.碳化竹板:平均密度为 $0.73 \text{ g/cm}^3$ ,无任何缺陷.胶黏剂采用目前CLT生产企业常用的2种胶黏剂<sup>[8]</sup>:酚醛树脂(PF),为棕红色液体;异氰酸酯(MDI),主剂为乳白色黏稠液体,固化剂为棕黑色液体改性MDI.根据GB/T 50329—2002《木结构试验方法标准》要求,试样需要在干态和湿态2种条件下进行剪切破坏.故以此为条件设计试样的变量和水平(见表1),按照试样的试验组合设计表(见表2)制备试样,共计4组.将试样浸入 $10\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水中24 h后立即进行剪切破坏,并测量其木破率.

表1 试样的变量和试验水平

Table 1 Variable and experimental level of specimen

Level factor	Adhesive(A)	Shear state(B)
1	PF	Wet
2	MDI	Dry

表2 试样的试验组合

Table 2 Test combinations of specimens

Group	Code	Adhesive(A)	Shear state(B)
1	A1B1	PF	Wet
2	A1B2	PF	Dry
3	A2B1	MDI	Wet
4	A2B2	MDI	Dry

### 1.2 木破率测量方法

#### 1.2.1 基于传统尺规的木破率测量法

传统木破率测量法指具备正常视力且受过培训的实验人员借助自然光或在光照度为 $800\sim 1\ 000 \text{ lx}$ 的光源下,通过有机玻璃尺测量试样受剪切破坏后的破坏面.按照LY/T 2720—2016《胶合面木破率的测定方法》,测量木材纤维被胶黏连或撕裂下来的面积(A)与试件受剪切面积(S),两者之比即为木破率(L):

$$L = \frac{A}{S} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.2 基于图像处理的木破率测量法

##### 1.2.2.1 基于阈值分割的灰度图像测量法

###### 1.2.2.1.1 图像采集

图像采集环境为安装有24个T8灯管(功率为40 W,色度为6 500 K,额定电压为220 V)的室内空间,总面积 $150.79 \text{ m}^2$ ,光照度 $954.97 \text{ lx}$ .空间内光源统一,光线未直射在试样剪切面上,满足木破率的测量条件.同时,当前木破率图像采集角度均为正交垂

直拍摄形式<sup>[6-7]</sup>.为了便于比较,同样将手机(iPhone 6s plus,后置1 200万像素的Isight摄像头)用支架架起并调整倾斜角度,使其与木破率试样保持正交垂直拍摄状态(见图1),确保木材破坏区域无阴影后进行采集,既可得到分辨率为74 dpi的彩色木破率图像.

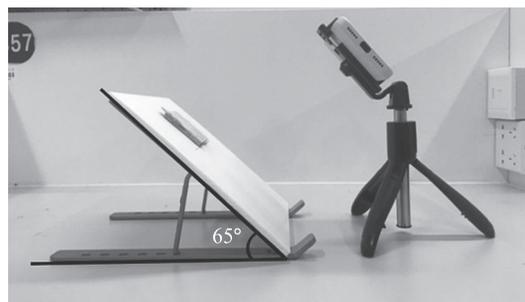


图1 图像采集设备及环境

Fig. 1 Image acquisition equipment and environment

###### 1.2.2.1.2 图像分割

图像分割指通过统计学方法选取最佳阈值,将目标区域从背景中分割出来.本文首先将木材的破坏区域从背景中分割出来,然后通过木材破坏区域与图像总区域的像素之比得到木破率.

Otsu算法的最大特点是通过遍历图像灰度值的方式计算类间方差( $g$ ),自动获得阈值来对灰度图像进行二值化处理<sup>[9]</sup>以达到分割目的.欲使物体颜色与背景色的分割效果最佳,必须得到最佳阈值,即类间方差为最大值.直方图常表现为双峰形式,因此最佳阈值常位于直方图中2座山峰间的山谷中一点.它的衡量标准为:当该阈值使物体和背景之间的类间方差越大,即分割阈值时,物体与背景的分割效果越好.

对于图像 $I(x, y)$ ,图像的大小为 $M \times N$ .设物体与背景的分割阈值为 $T$ , $X_0$ 为图像中像素值小于阈值的像素个数, $X_1$ 为大于阈值的像素个数, $P_0$ 为木材破坏面积所占比例, $\mu_0$ 为平均灰度值, $P_1$ 为背景所占比例,平均灰度为 $\mu_1$ ,图像的总平均灰度值为 $\mu^{[10]}$ ,则:

$$P_0 = \frac{X_0}{M \times N} \quad (2)$$

$$P_1 = \frac{X_1}{M \times N} \quad (3)$$

$$X_0 + X_1 = M \times N \quad (4)$$

$$P_0 + P_1 = 1 \quad (5)$$

$$\mu = P_0 \mu_0 + P_1 \mu_1 \quad (6)$$

$$g = p_0 (\mu_0 - \mu)^2 + p_1 (\mu_1 - \mu)^2 \quad (7)$$

将式(5)代入式(6)得到等价公式:

$$g = p_0 p_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (8)$$

通常二值化图像中亮度值低于最佳阈值的像素被认为是背景,被赋予“0”值(暗区);而亮度值高于最佳阈值的像素被认为是木材破坏区域,被赋予“1”值(亮区);根据式(1)设  $c$  为木材破坏区域面积,即像素值为1的像素点总数;sum为二值图像的像素点总数, $m$ 为图像长度, $n$ 为图像宽度.则木破率计算公式为:

$$L = \frac{c}{\text{sum}} = \frac{c}{m \times n} \times 100\% \quad (9)$$

### 1.2.2.2 基于像素统计的彩色图像测量法

数字图像中单位像素所代表的面积( $p$ )相同,彩色图像中的像素选取易于采用颜色辨别,因此可以通过像素统计法实现彩色图像木破率的测量.将数字图像导入Photoshop软件,通过直方图命令直接读取整幅图像的像素点个数  $\sum_{(x,y) \in S} 1$ .同时,采用魔棒工具准确选取木材的破坏区域,再次通过直方图获得木材破坏区域的像素点总数  $\sum_{(x,y) \in A} 1$ ,两者之比即木材破坏区域的像素点总数与试样图像像素点总数之间的比值.则木破率的计算公式为:

$$L = \frac{A}{S} = \frac{p \sum_{(x,y) \in A} 1}{p \sum_{(x,y) \in S} 1} = \frac{\sum_{(x,y) \in A} 1}{\sum_{(x,y) \in S} 1} \times 100\% \quad (10)$$

### 1.3 浅色与深色图像相似度检验方法

为了探究图像颜色深浅变化对木破率测量的影响,需要对图像进行相似度( $\Delta y$ )检验.彩色图像相似度检测方法是将对浅色图像与深色图像的RGB通道直方图进行匹配,各通道相似度的平均值即为整幅图像的相似度.灰度图像相似度是利用归一化方式对2种图像类型的灰度图像进行相似度测量.

图像通道直方图相似度的算法检验所应用到的公式如下:

$$\Delta y = \frac{\sum_{i=1}^n \min(H1(i), H2(i))}{\min(\sum_{i=1}^n H1(i), \sum_{i=1}^n H2(i))} \quad (11)$$

式中: $H1$ 为原图; $H2$ 为比较图; $H1(i)$ 为原图通道直方图计算值; $H2(i)$ 为原图通道直方图计算值,对图像RGB通道相似度的平均值求解,即为整张图像的相似度值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 木破率数字表征结果

#### 2.1.1 基于阈值分割的灰度图像测量法

图2为木破率的数字测量方法.木破率图像在初始采集状态的效果如图2(a)所示.通过Matlab数字

软件中Cut和Rgb3rgy图像处理函数对初始图像进行手工裁剪和自动实现灰度化<sup>[11]</sup>,选取灰度直方中最佳阈值自动完成图像分割.但二值化图像中的木材破坏区域存在大量的噪点,与实际木材的破坏情况不符,造成了测量误差.因此,需要采用腐蚀、膨胀和填充等形态学处理方法来去除噪点,以达到降噪的效果<sup>[12]</sup>.

统计得出木材破坏区域灰度值总数与图像灰度值总数分别为104 029和166 320,通过式(9)得到该图像的木破率为62.55%.该方法的测量流程快速、简洁、易操作,处理结果与实际破坏情况吻合度高,在测量试样数量较大时具有明显的优势.

#### 2.1.2 基于像素统计的彩色图像测量法

Photoshop是一种常见的图像测量工具,主要通过调整羽化值和魔棒工具,根据像素值颜色之间的差别达到快速选取木材破坏区域的目的.测量流程如图2(b)所示,将被裁剪图像通过2次直方图便可分别求得木材破坏区域像素点个数和整幅图像的像素点总数,由式(10)得到该图像的木破率为70.68%.

该方法测量流程具有机动性强、准确度高等优点,可以适应复杂的实验条件.但较强的主观能动性和冗长的测量时间容易造成测量误差,且处理结果与实际破坏情况存在一定差异,故测量试样数量较小时可以考虑使用该测量方法进行木破率测量.

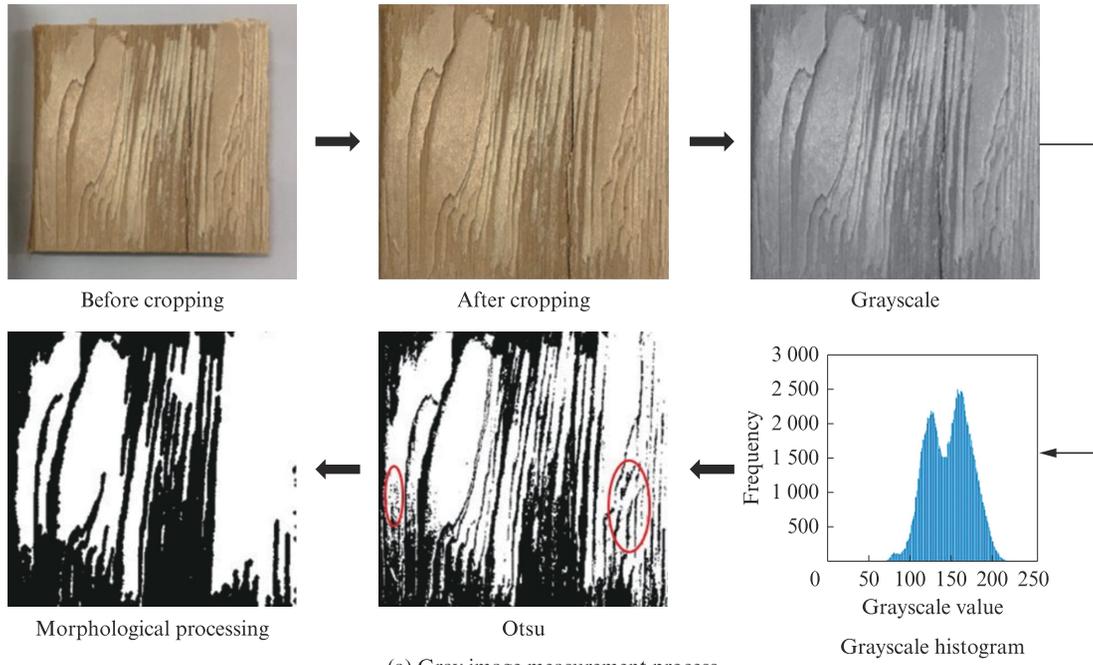
### 2.2 不同条件下木破率的测量结果分析

2.1中采用2种木破率图像测量法对同一条件下同一木破率图像进行测量,由于测量工具的计算机制不同造成测量结果的差异.因此,对不同条件下2种图像测量法的测量精度进行探究.为了便于研究本试验的不同条件,将湿态剪切破坏的PF、MDI试样进行烘干处理得到干态木材破坏试样.通过试验测量法(Experiment)、基于阈值分割的灰度图像测量法(Grey)和基于像素统计的彩色图像测量法(Colour)分别对4种条件下的剪切破坏试样进行木破率测量.

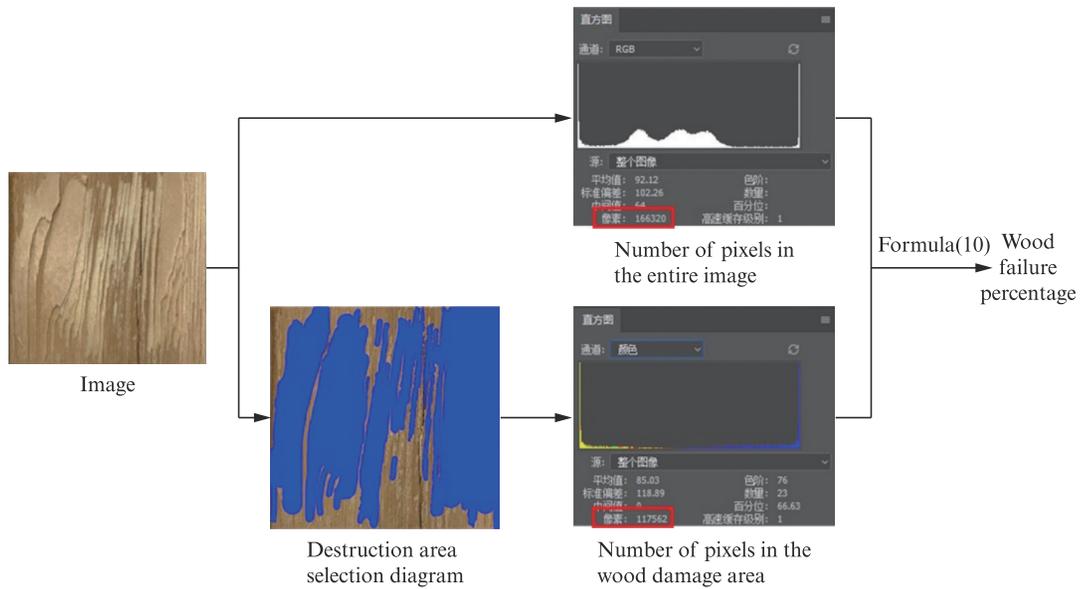
表3为不同条件下3种木破率的测量结果.分别对每组实际测量值与2种图像测量值进行方差分析,以验证图像测量值与实际测量值是否存在显著差异.同时,进行绝对误差和相对误差分析(见表4)来反映图像测量法的精度.

由表4可知:

(1)A1B1、A1B2、A2B1和A2B2条件下彩色图像测量法的测量结果与实际测量值均无显著差异,说明不同条件下,木破率都可以通过图像测量法进行测量.A2B2条件下灰色图像测量法的测量结果与



(a) Gray image measurement process



(b) Color image measurement process

图2 木破率的数字测量方法

Fig. 2 Digital measurement method of wood failure percentage

实际测量值存在显著差异.因为胶合面中MDI区域被计入木材破坏区域,所以无法进行测量.

(2)A1B1条件下灰度图像测量法的误差最小,测量精度最高;A2B2条件下灰色图像测量法的误差最大,测量精度最差.但相对误差更能反映测量的可信程度,不同条件下图像测量法的相对误差均小于20%,满足工程实际的要求.其中,与MDI图像相比,PF图像条件下木破率的测量误差较小,测量精度较高.在PF图像条件下,湿态剪切条件下的测量精度大于干态剪切条件,灰度图像测量法的测量精度大于彩色图像测量法.由此可得,2种图像测量法在不

同条件下的适应性有较大差异.

### 2.3 不同条件下木破率图像测量法的适应性

2种试样基材(竹材、木材)和胶黏剂颜色在干、湿剪切条件下呈现程度不一的深浅变化,而这种变化直接表现为木破率图像颜色的深浅变化.因此,本研究以湿态剪切条件下的木破率图像为深色,干态剪切条件下的木破率图像为浅色作为变量,探究基于图像处理的木破率测量法测量结果的影响机制.

#### 2.3.1 浅色图像条件下基于阈值分割的灰度图像测量法适应性

图3为灰度图像的灰度值和亮度变化分析图.图

表3 不同条件下3种木破率的测量结果  
Table 3 Measurement results of three kinds of wood failure percentage under different conditions

No.	A1B1			A1B2			A2B1			A2B2		
	Experiment	Colour	Grey									
1	10.00	10.65	9.54	11.00	14.42	13.41	25.00	32.40	20.10	25.00	24.41	41.94
2	49.00	53.01	50.42	65.00	68.08	63.87	9.00	10.90	23.51	27.00	24.32	79.69
3	63.00	66.94	64.10	63.00	67.49	65.97	19.00	22.50	16.50	19.00	24.69	85.94
4	27.00	29.99	28.79	35.00	41.34	40.74	17.00	20.95	43.69	44.00	28.91	10.05
5	40.00	49.20	43.11	49.00	52.85	51.24	17.00	21.72	32.94	35.00	38.65	70.88
6	62.00	65.29	64.92	58.00	71.87	69.82	36.00	40.19	26.97	36.00	39.54	82.58
7	89.00	93.46	92.65	87.00	97.14	94.24	14.00	19.60	37.97	45.00	39.70	63.23
8	52.00	66.88	50.00	56.00	71.08	70.24	21.00	15.89	12.75	21.00	25.46	31.96
9	58.00	61.48	59.97	59.00	65.63	61.35	23.00	32.00	20.10	32.00	30.03	82.14
10	46.00	44.62	44.85	44.00	53.47	47.27	32.00	34.00	12.54	34.00	25.28	65.14
11	66.00	72.27	64.99	68.00	83.17	82.71	23.00	30.25	17.98	23.00	35.62	64.21
12	62.00	65.24	65.19	70.00	71.09	69.94	34.00	36.34	23.56	34.00	25.62	62.12
13	60.00	62.48	61.28	62.00	63.17	64.09	42.00	50.30	24.44	42.00	35.11	61.71
14	75.00	79.52	75.91	75.00	77.17	78.17	41.00	45.89	31.31	41.00	25.65	66.15
15	25.00	24.01	24.99	29.00	25.18	25.00	27.00	29.57	15.48	27.00	30.51	62.51
16	85.00	87.15	87.09	85.00	89.47	88.13	33.00	38.51	25.45	33.00	26.11	49.99
17	90.00	93.14	93.10	93.00	93.85	92.57	31.00	28.28	31.00	31.00	30.55	82.15
18	78.00	76.21	77.29	74.00	77.28	78.00	75.00	78.48	59.35	75.00	72.79	95.51

表4 实测值与图像测量值的方差、误差分析  
Table 4 Variance and error analysis of measured value and image measured value

Variance type		A1B1		A1B2		A2B1		A2B2	
		Colour	Grey	Colour	Grey	Colour	Grey	Colour	Grey
Variance analysis	F value	0.23	0.24	0.61	0.33	0.58	0.29	0.32	26.58
	F critical value	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13
	Significance	No	No	No	No	No	No	No	Yes
Absolute error		4.05	1.77	9.24	7.81	4.69	11.42	6.17	33.43
Relative error/%		8.00	3.00	18.70	15.78	19.51	53.20	19.30	112.00

4为不同条件下的阈值分割结果.图5为灰度图像的灰度值变化和相似度.

浅色PF图像的亮度越高,试样基材的灰度值越大.木材与竹材区域的灰度值分别为139和190,说明区域间灰度值对比度大,有明显的界限.这种界限是由于PF的分子量较小,易渗透在木材的细胞腔中,受剪切破坏时木材纤维被撕裂的层次较深.同时,深层木材的破坏形式有助于掩盖胶层区域,使胶合面中只存在木材与竹材区域,有利于对图像进行阈值分割.分割效果与实际情况匹配度较高(见图4(b)),表明基于阈值分割的灰度图像测量法可以在该条件下进行测量.

MDI的固有色相明显,灰度值略大于木材破坏

区域的灰度值.因为MDI试样受剪切破坏时木材被撕裂的纤维多为浅层破坏形式,无法覆盖MDI区域明显的色相.其次,木材破坏边缘的完整度较差,且木材与竹材灰度值的差值减小,导致木材与竹材的破坏区域无明显界限,不利于进行图像测量.由图3可知,木破率图像中竹材、木材和胶黏剂灰度值的大小依次为:胶黏剂>木材>竹材.欲求得木破率,其阈值应介于木材与竹材之间,但同时会将胶黏剂区域计入木材破坏区域,造成测量错误(见图4(d)).因此,浅色MDI图像条件下无法使用此方法进行直接测量,须对MDI区域进行涂色(该颜色的最大灰度值必须小于木材区域的最小灰度值),便可以直接实施测量.

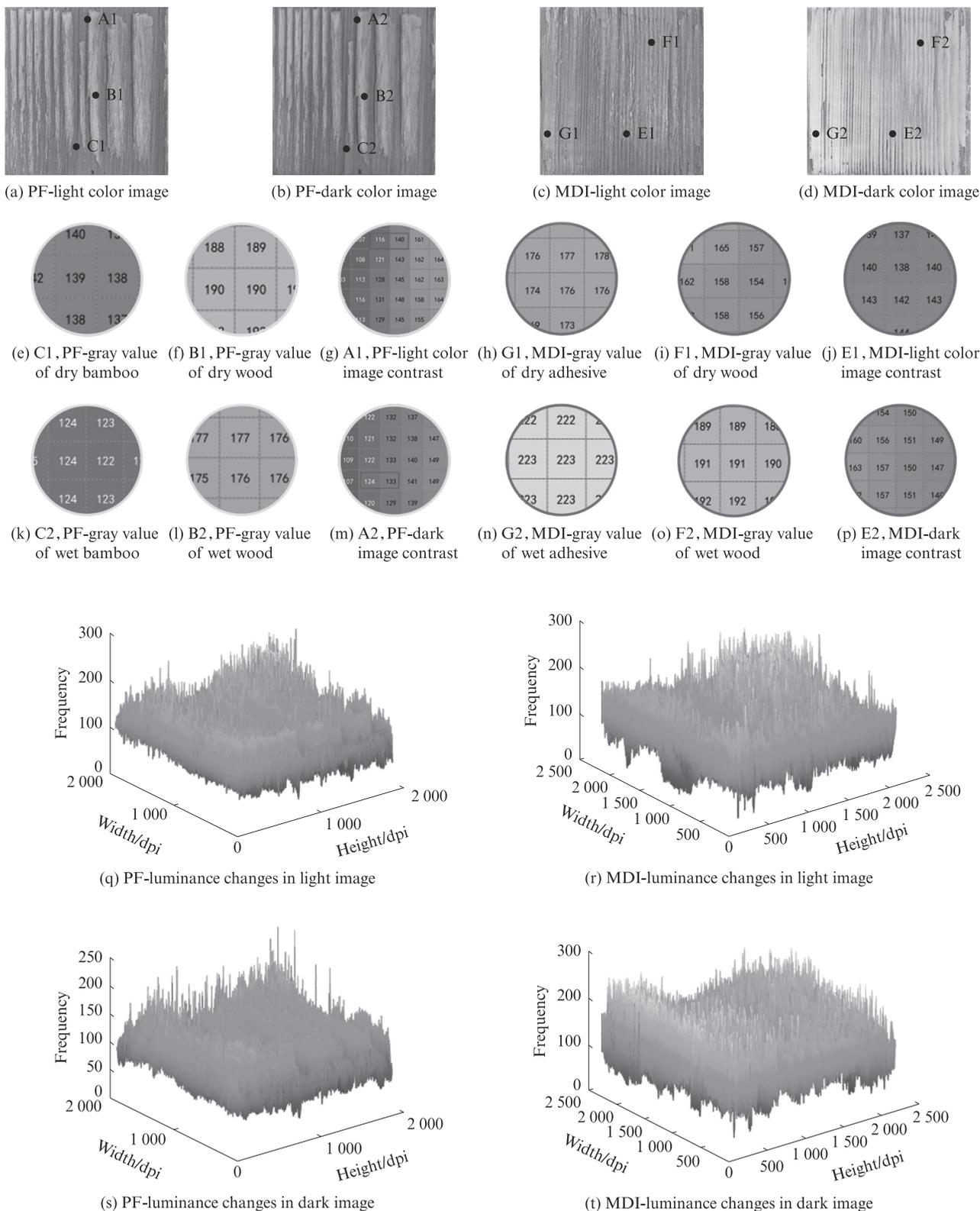


图3 灰度图像的灰度值和亮度变化分析图

Fig. 3 Analysis diagram of gray value and brightness change of gray image

2.3.2 深色图像条件下基于阈值分割的灰度图像测量法的适应性

由图3可知,深色MDI木破率图像的亮度整体大于浅色MDI木破率图像,与PF木破率图像

完全相反.这归因于MDI的固有色为白色,当其遇水后水分子将照射在MDI上的光进行遮挡,使其产生了三维方向的影子,提高了白色的色相和饱和度.MDI的灰度值可达223,木材破坏区域和

MDI区域的最大差值可达16.其次,木材浅层破坏形式将黏接底部的胶黏剂颜色映射至表层,造成了木材区域灰度值显著提高的假象,使木材与背景中的竹材和胶黏剂区域相混淆,对阈值分割造成了较大的影响.因此,该方法也无法直接对深色MDI木破率图像进行直接测量(见图4(c)),需要进行涂色辅助.

PF图像中木材的破坏层次均为深层破坏形式,区域界线显著且区域内的灰度值与竹材区域的灰度

值对比关系显著,图像处理结果更加符合实际情况(见图4(a)),是4种图像类型下最优的测量条件.通过式(11)计算深色与浅色图像的相似度值均值为0.855 2(见图5(a)),而MDI图像(见图5(b))的相似度值均值仅为0.557 7,说明胶黏剂颜色的深浅变化造成了图像相似度的降低,测量精度随着相似度的降低而降低.灰度PF图像条件下只存在木材与竹材区域,胶合区域均有木材破坏现象,区域间界限明显,满足木破率的测量条件.

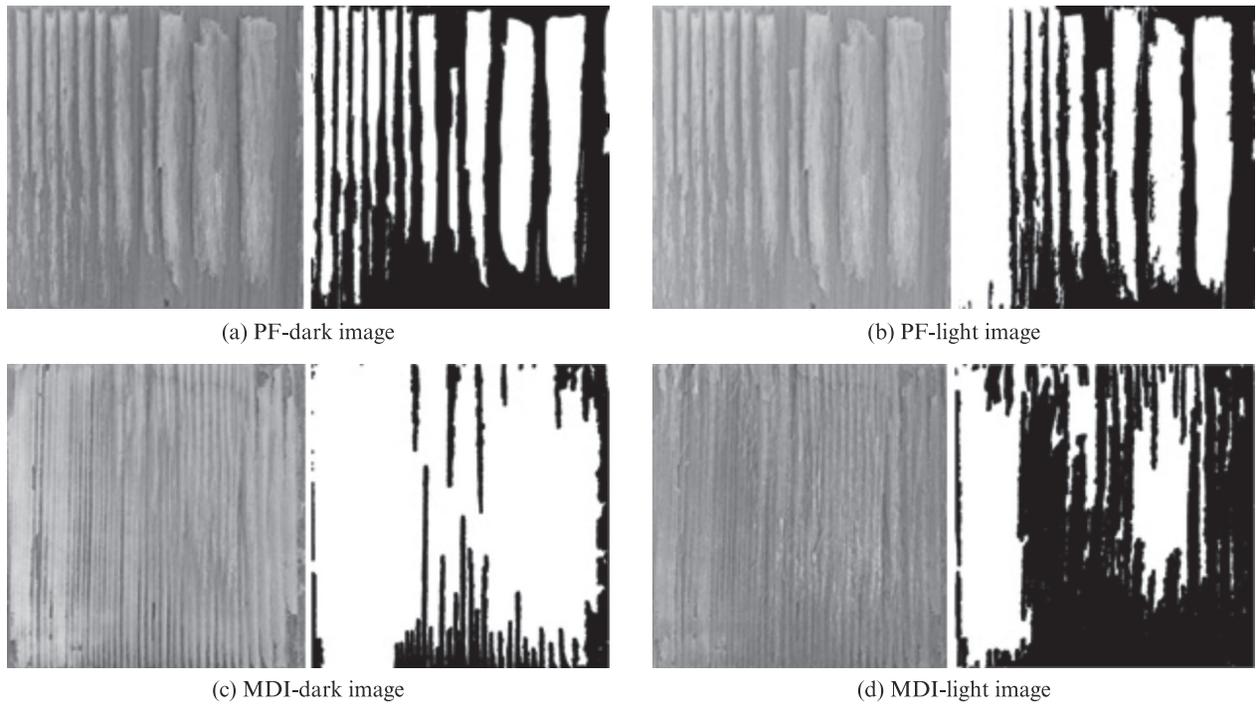


图4 不同条件下的阈值分割结果

Fig. 4 Threshold segmentation results under different conditions

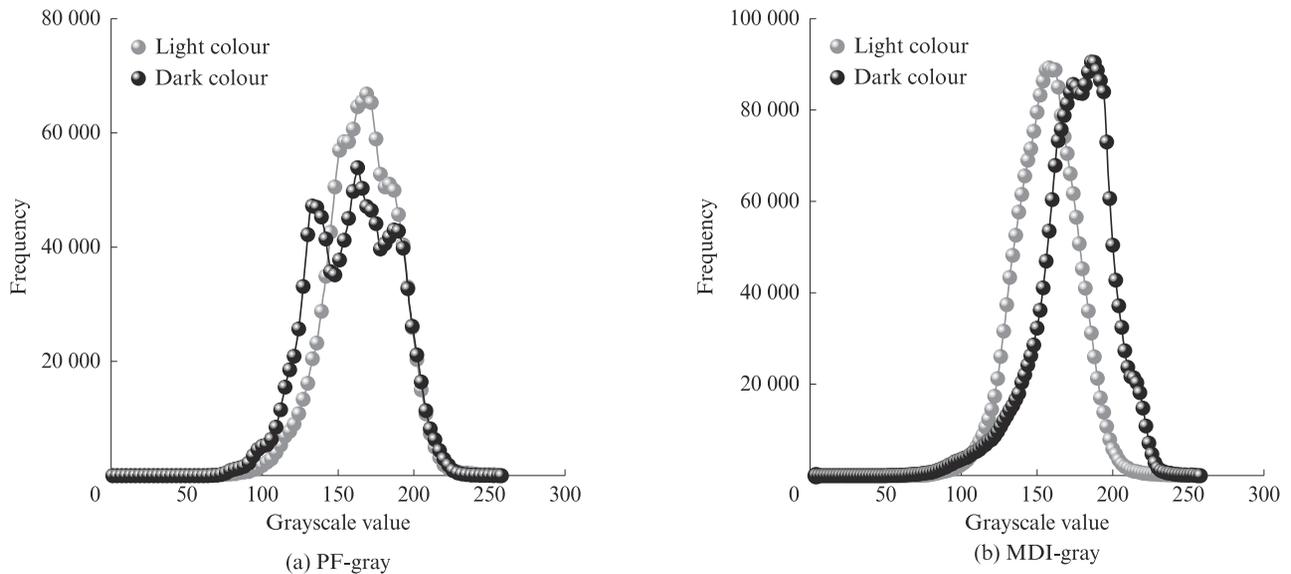


图5 灰度图像的灰度值变化和相似度

Fig. 5 Gray value change and similarity of gray image

### 2.3.3 浅色图像条件下基于像素统计的彩色图像测量法的适应性

图6为不同条件下的选区示意图.图7为彩色图像RGB通道的灰度值变化与相似度.

对浅色PF图像的RGB通道(见图7)分析发现,各通道的灰度值分布集中,木材深层破坏形式较为集中的破坏区域是造成这一现象的主要原因,但选区边缘的完整度差(见图6(b)).这归因于木材、竹材受到光、热、微生物及外界环境的影响而发生变色<sup>[13]</sup>.同时,木材中单宁分子中苯环上的酚羟基较为活泼,受日光照射时会被氧化成酮基,从而使单宁颜色变深<sup>[14]</sup>.其次,木材的含水率通常在8%~12%,随着温度的变化,部分水分的蒸发伴随着萜烯类挥发性抽提物的挥发,同样造成了木材变色的发生<sup>[15]</sup>,导致像素颜色发生变化.这种像素颜色的变化造成选区效果较差,说明环境影响是造成测量误差的因素之一.

MDI图像(见图6(a))中木材的破坏层次多为浅层破坏,覆盖胶黏剂能力差、区域间界线模糊、破坏界面完整度差和表面存在大量的细小纤维均会对图像像素的颜色造成很大影响.魔棒工具无法单独在该条件下对破坏区域进行选取,需要结合套索、填充、画笔和橡皮擦等工具进行图像处理,延长了时间,降低了效率,提高了误差.其中,因木材破坏区域覆盖能力差,无法遮盖MDI胶黏剂明显的固有颜色,造成图像RGB基色通道的灰度值出现

频率高于PF彩色图像,最高可达99 129个(见图7(d)).综上所述,在彩色MDI图像条件下,影响基于像素统计的彩色图像测量法的最大因素是木材的破坏层次.

### 2.3.4 深色图像条件下基于像素统计的彩图测量法的适应性

与浅色PF图像选区大小相比,深色PF图像的选区范围小,边缘完整度更高(见图6(c)).魔棒工具主要通过像素颜色差别达到创建选区的目的,而图像像素变化受多种条件的影响,如单宁与水中金属离子反应引起木材颜色变化等.植物单宁分子内含有多个邻位酚羟基作为多基配体与一个中心离子络合形成环状的螯合物,在不同的pH值下产生沉淀形成的螯合物颜色也有所不同.如潮湿条件下单宁多酚物质中的羟基与铁离子发生络合反应形成黑色的单宁酸铁<sup>[16]</sup>,在很大程度上不溶于水造成木材变色现象<sup>[17-18]</sup>.

通过对比深色和浅色2张彩色木破率图像的相似度(见图7)发现:木破率图像的深浅变化对2种胶黏剂图像的G通道和B通道无显著影响,但是对R通道影响较大;PF图像的平均相似度为0.829 28,MDI图像的平均相似度仅为0.656 04,深色MDI图像(见图6(e))的框选区域更精确,且部分与在胶黏剂区域的浅层木材破坏纤维同样被选取,与实际现象相吻合,符合测量的要求,适应性强,可以提高测量结果的精确度.

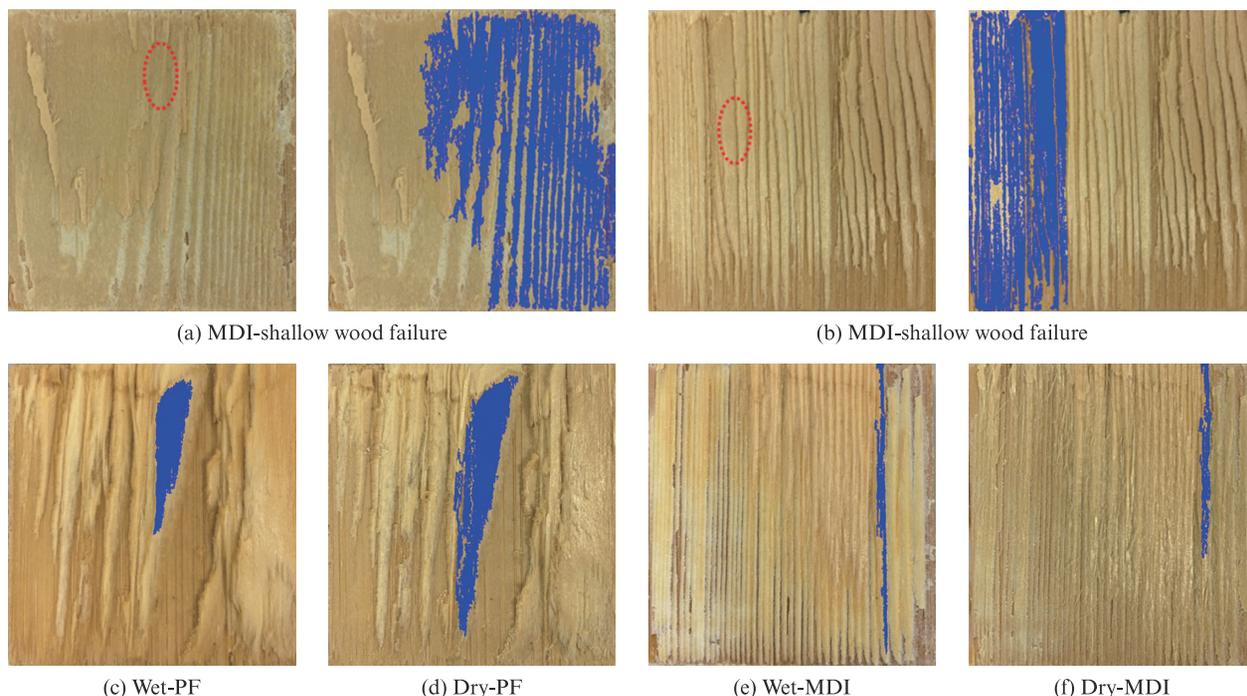


图6 不同条件下的选区示意图

Fig. 6 Schematic diagram of selected area under different conditions

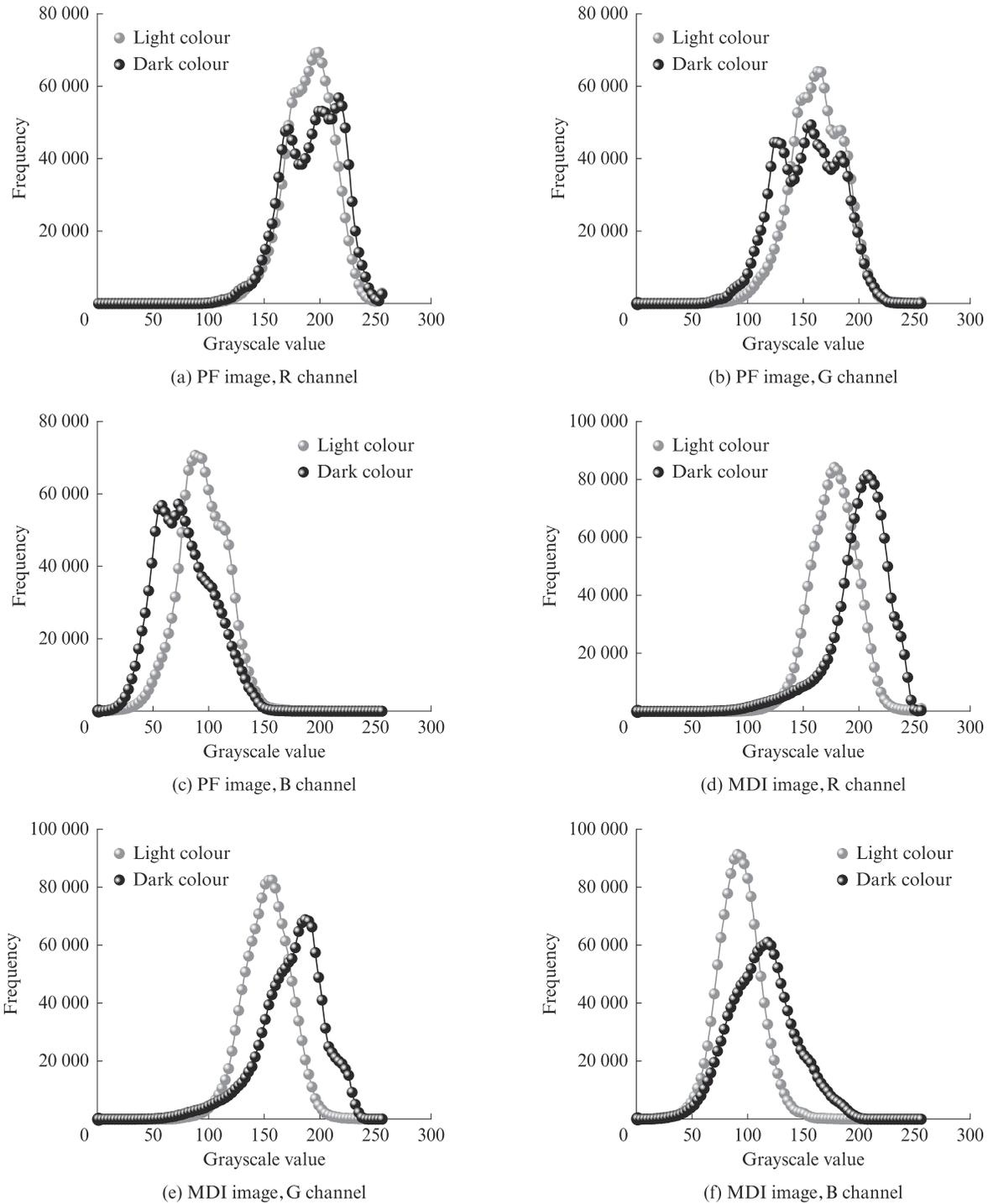


图7 彩色图像RGB通道的灰度值变化与相似度  
 Fig. 7 Gray value change and similarity of RGB channel of color image

### 3 结论

(1)针对不同条件下基于灰色与彩色图像的木破率测量法,其测量结果与实际测量值一致,满足实际应用.

(2)不同条件下木材的破坏层次和试样基材的颜色变化均会使图像的亮度、灰度值和相似度发生变化,从而影响木破率的测量精度.但只需在不同条

件下选择合适的测量方法,便可以提高木破率的测量精度.其中PF图像可选择基于阈值分割的灰度图像测量法,在湿态剪切条件下效果最佳;MDI图像只能选择基于像素统计的彩色图像测量法.

(3)木破率图像的颜色变化对测量精度的影响较大,其中胶黏剂颜色的变化对基于阈值分割的灰度图像测量法的影响较大,而基于像素统计的彩色图像测量法主要受环境的影响.

## 参考文献:

- [ 1 ] LI M Y, ZHANG S B, GONG Y C, et al. Gluing techniques on bond performance and mechanical properties of cross-laminated timber (CLT) made from *Larix kaempferi* [J]. *Polymers*, 2021, 13(5):733-741.
- [ 2 ] 孙超, 肖从真, 李建辉, 等. 正交胶合木剪力墙抗震性能试验研究[J]. *建筑科学*, 2021, 37(9):1-12.  
SUN Chao, XIAO Congzhen, LI Jianhui, et al. Experiment research on seismic behavior of cross-laminated timber shear wall [J]. *Building Science*, 2021, 37(9):1-12. (in Chinese)
- [ 3 ] 陈国骏, 宋焕, 王志强, 等. 正交胶合木胶合耐久性研究进展[J]. *林产工业*, 2021, 58(5):34-37.  
CHEN Guojun, SONG huan, WANG Zhiqiang, et al. Progress on gluing durability of cross-laminated timber [J]. *China Forest Products Industry*, 2021, 58(5):34-37. (in Chinese)
- [ 4 ] 谢力生, 陶钧, 刘嘉诚, 等. 不同胶黏剂对俄罗斯落叶松木材胶合性能的影响研究[J]. *林产工业*, 2019, 56(12):9-12, 37.  
XIE Lisheng, TAO Jun, LIU Jiacheng, et al. Study on the influence of gluing properties to russian larch with different types of adhesives [J]. *China Forest Products Industry*, 2019, 56(12):9-12, 37. (in Chinese)
- [ 5 ] 胡小霞, 陈鹏, 徐正东, 等. 木材破坏率的影响因素及测定方法初探[J]. *木材加工机械*, 2011, 22(4):15-18, 46.  
HU Xiaoxia, CHEN Peng, XU Zhengdong, et al. The influencing factors and measuring method of the rate of wood failure [J]. *Forestry and Grassland Machinery*, 2011, 22(4):15-18, 46. (in Chinese)
- [ 6 ] 董惟群. 竹木复合正交胶合木胶合工艺及力学性能评价[D]. 南京:南京林业大学, 2019.  
DONG Weiqun. Evaluation of bonding technology and mechanical properties of bamboo-wood composite cross-laminated timber [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [ 7 ] SIMON A, ZAKIAH A, MAREN H. Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, 76(4):1205-1222.
- [ 8 ] 周海宾, 刘晓娜, 韩刘杨, 等. 胶黏剂和指接接头对胶合木性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5):752-757.  
ZHOU Haibin, LIU Xiaona, HAN Liuyang, et al. Influence of adhesive type and finger joint on properties of glulam [J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(5):752-757. (in Chinese)
- [ 9 ] 余泽东. 基于otsu算法和Hu不变矩的交通信号识别[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2020, 53(4):371-376.  
YU Zedong. Traffic lights recognition with otsu algorithm and Hu invariant momengts [J]. *Journal of Wuhan University (Engineering)*, 2020, 53(4):371-376. (in Chinese)
- [ 10 ] 李晓焯, 王克俭, 谷建才, 等. 基于图像处理的疏透度测定及结构关系研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1):239-245.  
LI Xiaoye, WANG Kejian, GU Jiancai, et al. Image processing based on the measurement of opacity and structural relationship [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1):239-245. (in Chinese)
- [ 11 ] 李豪, 王德志, 魏永起, 等. 发泡混凝土孔结构快速检测与精准识别[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(1):105-112.  
LI Hao, WANG Dezhi, WEI Yongqi, et al. Rapid detection and accurate identification of foamed concrete pore structure [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1):105-112. (in Chinese)
- [ 12 ] 孙浩凯, 高阳, 郑新雨, 等. 基于图像统计的带预制缺陷混凝土破坏机理[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6):1154-1162.  
SUN Haokai, GAO Yang, ZHENG Xinyu, et al. Failure mechanism of precast defective concrete based on image statistics [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6):1154-1162. (in Chinese)
- [ 13 ] 李茜然, 赵雨婷, 郑欣欣, 等. 西加云杉木材单宁铁变色因素及防治[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(5):54-60.  
LI Xiran, ZHAO Yuting, ZHENG Xinxin, et al. The influence factors and prevention of iron discoloration induced by tannin in the picea sitchensis wood [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(5):54-60. (in Chinese)
- [ 14 ] 段新芳. 木材变色防治技术[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2005:147-148.  
DUAN Xinfang. Wood discoloration and their prevention [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2005:147-148. (in Chinese)
- [ 15 ] 陈瑶. 木材热诱发变色过程中发色体系形成机理[D]. 北京:北京林业大学, 2012.  
CHEN Yao. Mechanism of the formation of chromophore system of heat-induced color change of wood [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [ 16 ] HON D N S, MINEMURA N. Wood and cellulosic chemistry [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2000:385-442.
- [ 17 ] MILA I, SCALBERT A, EXPERT D. Iron withholding by plant polyphenols and resistance to pathogens and rots [J]. *Phytochemistry*, 1996, 42(6):1551-1555.
- [ 18 ] GUST J, SUWALSKI J. Use of Mossbauer spectroscopy to study reaction products of polyphenols and iron compounds [J]. *Corrosion*, 1994, 50(5):355-365.