

# 数字散斑相关方法在木材科学中的应用及展望

江泽慧<sup>1</sup>, 费本华<sup>1</sup>, 张东升<sup>1</sup>, 马少鹏<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

**[摘要]** 随着现代光电子和计算机技术的发展以及数字图像处理理论的深入, 数字散斑相关方法 (DSCM) 迅速成为实验力学领域一种重要的测试方法。文章介绍了 DSCM 的基本原理, 并对其在木材科学领域的应用进行了综述, 包括在木材常规力学测试和木材断裂、微观力学以及复合材料力学测试等方面的应用及一些新的成果。最后根据木材材料的特点, 对 DSCM 在木材科学上的进一步应用提出了几点建议。

**[关键词]** 数字散斑相关法 (DSCM); 木材科学技术; 变形测量

**[中图分类号]** S771; S711 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2003) 11-0001-07

## 1 前言

传统的木材力学测试采用电阻应变测试方法。这种电测法虽然是一种很成熟的力学测试方法, 但是该方法以点测量为基础, 不能获得全场的变形信息, 在木材力学测试领域中具有一定的局限性<sup>[1~3]</sup>。近年来, 光测方法逐渐受到许多学者的重视, 其中数字散斑相关方法 (digital speckle correlation method, DSCM) 以其全场、非接触、高精度、测量敏感范围大等特点获得了重要的成功<sup>[4,5]</sup>。DSCM 是基于数字图像处理的一种变形场测试方法, 由 I. Yamaguchi, W. H. Peters 和 W. F. Ranson<sup>[6,7]</sup>等人于 20 世纪 80 年代初提出, 后又经许多学者的发展成为一种比较成熟的变形场测试方法, 并成功地应用于包括木材等许多种材料的各种力学测试研究中。

除了上述特点, DSCM 应用于木材力学测试上还具有其他优势, 包括: 设备简单, 仅需要一套普通的数字化图像采集设备即可完成数据采集; 数据处理方法简单, 可以编制软件全自动进行<sup>[8]</sup>; 实验消耗极小, 利于进行大批量的重复实验总结规

律。DSCM 的特点和木材非均匀特性对测试方法的特殊要求决定了 DSCM 在木材科学中具有广阔的应用前景。

## 2 DSCM 原理及测试分析系统

### 2.1 DSCM 原理

DSCM 又称为数字图像相关 (digital image correlation, DIC)、数字图像/散斑相关 (Digital image/speckle correlation, DISC) 以及数字强度相关方法 (Digital intensity correlation method, DICM) 等, 其基本原理是匹配物体表面不同状态下的数字化散斑图像上的几何点, 跟踪点的运动获得物体表面变形信息。散斑场可由激光照射漫反射表面后干涉产生, 也可由人工斑化的方法制作, 木材表面的一些特殊纹理也可以当作散斑场进行分析。两种不同成因的散斑图如图 1 示。

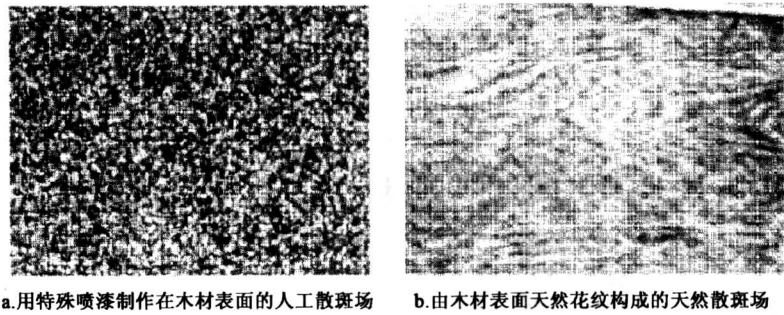
DSCM 通过匹配变形前后两幅散斑图像上对应点在变形前后的几何位置获得点的变形信息<sup>[9,10]</sup>。设:

$$I_s = F(x, y), \quad (1)$$

$$I_t = G(X, Y), \quad (2)$$

**[收稿日期]** 2003-06-16; **修回日期** 2003-08-07

**[作者简介]** 江泽慧 (1938-), 女, 江苏扬州市人, 中国林业科学研究院教授, 首席科学家, 博士生导师



a.用特殊喷漆制作在木材表面的人工散斑场 b.由木材表面天然花纹构成的天然散斑场

图 1 不同类型散斑场

Fig.1 Different kinds of speckle field

a. Wood surface painted by special paint; b. Nature wood surface with special texture

为变形前后两幅散斑图,  $I_s$  称为源图像, 即基准图像, 代表起始状态;  $I_t$  称为目标图像, 代表变形后状态。一般假设散斑图像在物体变形过程中具有不变性<sup>[11]</sup>, 则有:

$$I_t = G(X, Y) = F(x + u, y + v), \quad (3)$$

式中  $u, v$  为点  $(x, y)$  在 Lagrange 坐标下的位移, 如式 (4)。

$$\begin{cases} u = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x}x + \frac{\partial u}{\partial y}y + \dots \\ v = v_0 + \frac{\partial v}{\partial x}x + \frac{\partial v}{\partial y}y + \dots \end{cases} \quad (4)$$

如图 2 所示, 假设要对  $I_s$  上点  $P$  的运动进行跟踪, 则需求得点  $P$  在  $I_t$  上的匹配点。为此, 先在源图像上取点  $P$  的特征散斑图案  $f_P(i, j)$ :

$$f_P(i, j) = F(x, y) \cdot W(i, j, x, y, w, h), \quad (5)$$

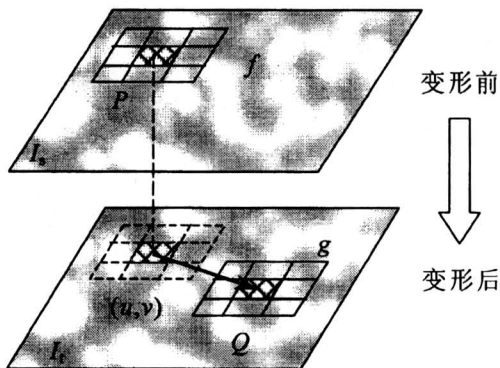


图 2 相关匹配示意图

Fig.2 Sketch of the correlation match

式中,  $(i, j)$  为  $P$  点在  $I_s$  上的坐标,  $W(i, j, x, y, w, h)$  是窗口函数, 定义为:

$$W(i, j, x, y, w, h) = \begin{cases} 1 & i - w/2 \leq x \leq i + w/2, j - h/2 \leq y \leq j + h/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad (6)$$

其中  $w, h$  为相关窗口。

同理, 在变形后目标散斑图像上取目标散斑图案  $g_Q(I, J)$ 。其中,  $(I, J)$  含有待求位移及其梯度项的未知量;  $Q$  为散斑图案  $g$  在  $I_t$  上的对应点。 $I, J$  一般不是整数, 所以  $g_Q(I, J)$  的灰度值要由整像素位置处的灰度值通过插值获得。由式 (3) 可知, 对于一组符合实际变形的变形量, 散斑图案  $f$  和  $g$  在理论上相同, 如果变形量不符合实际时,  $f$  和  $g$  有较大的差异。定义一个相关函数:

$$C = C(f, g), \quad (7)$$

来表示  $P, Q$  两点特征散斑图案  $f$  和  $g$  的相似程度, 也即  $P, Q$  两点的匹配程度。对于按一定规则设计的相关函数 (如式 8), 其极值点 (本文中为最大值) 表示最佳匹配, 因此, 极大值点所对应的变形量即为要求的实际变形量。

$$C = \frac{\sum \sum [(f - \langle f \rangle) \cdot (g - \langle g \rangle)]}{[\sum \sum (f - \langle f \rangle)^2 \cdot \sum \sum (g - \langle g \rangle)^2]^{1/2}} \quad (8)$$

上述匹配搜索算法可以达到像素级的精度, 但这样的精度对于常规的力学实验远远不够, 因此在完成像素级的匹配后, 还要进一步利用特殊的数学方法, 获得亚像素级的匹配点的位置, 以获得更高的测量精度。对于质量较好的散斑图, DSCM 的位移测量精度可以达到 0.01 像素。

### 2.2 DSCM 测试和数据分析系统

DSCM 的测试和数据分析由硬件系统和软件系统两部分组成。硬件系统由 CCD 摄像机、图像采

集卡、监视器、计算机以及 A/D 卡组成 (见图 3)。CCD 负责拍摄物体表面的图像, 传输到图像卡进行数字化后存贮到计算机中以便处理; 监视器实时显示实验过程中的图像; 计算机是整个系统的控制中心, 由其发出指令协调各部分工作, 保存和处理图像并输出最后结果。

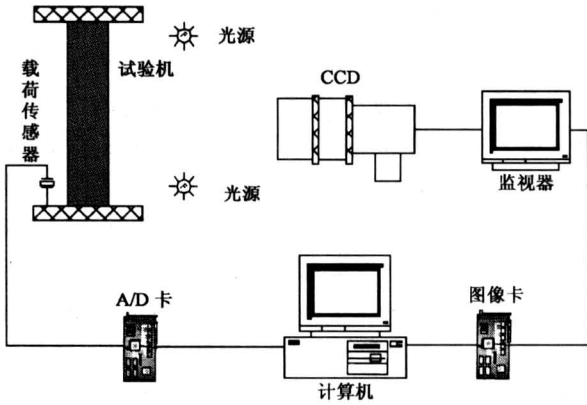


图 3 DSCM 的硬件系统

Fig.3 Hardware system of DSCM

软件系统用来对试验中采集到的散斑图像进行处理获得所需的变形场信息。DSCM 算法的计算量相当大, 因此在设计软件时不但要考虑计算精度, 还要考虑计算消耗。图 4、图 5 为通过 DSCM 系统测量得到的一个三点弯木材试件表面的位移场。

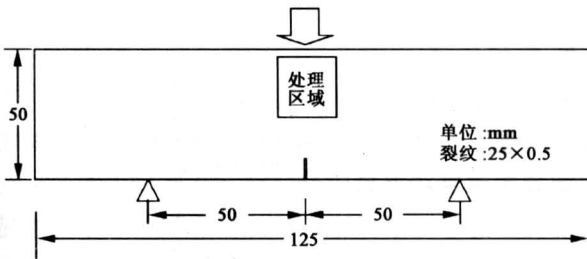


图 4 木材三点弯试件及 DSCM 处理区域

Fig.4 Wood three-point bending specimen and DSCM processing area

### 3 DSCM 在木材科学上的应用

DSCM 在木材科学上的应用最初是从木材的蠕变研究开始的, Agrawal<sup>[12]</sup> 曾在 1989 年应用 DSCM 获得了木材蠕变的全场变形图, 同时研究了 DSCM 测试系统对测量木材蠕变的适应性, 并且把 DSCM 图像测试变形的效果同普通电测进行了比较, 结果表明 DSCM 具有高效、精确和快速等特

点, 可以成功地应用到木材蠕变测量当中。Choi 等在 1990 年用 DSCM 对木材压缩进行了研究。这两项研究标志着 DSCM 在木材科学中应用的开端。随后 Choi, Zink, Sutton 和 Samarasinghe 等应用 DSCM 进行了木材的常规力学测试和木材的细观力学测试以及木质复合材料的力学特性研究。下面分几个方面对这些工作进行综述。

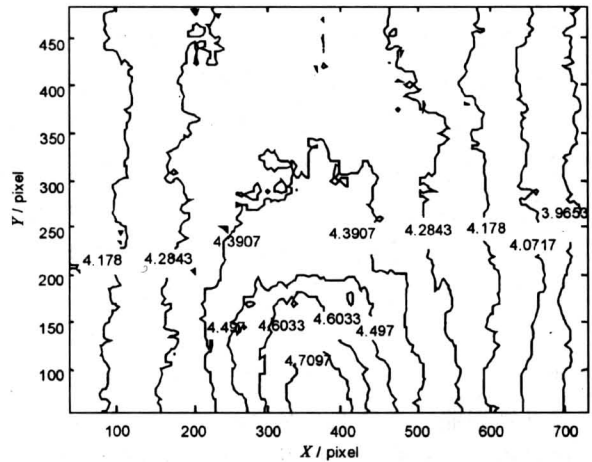


图 5 某一载荷下处理区域内纵向位移分布 (位移单位: 像素)

Fig.5 Vertical displacement on certain load (displacement unit: pixel)

#### 3.1 木材常规力学测试

木材常规力学测试包括普通的压缩、拉伸以及弯曲载荷下木材的变形规律测试, 这些测试对于了解木材的基本力学性质具有重要意义。考虑到 DSCM 的优点, 应用 DSCM 进行木材的常规力学测试可以得到一些重要的新结果, 这些结果对于深刻认识木材的力学性质以及指导木材加工工艺等都有重要意义。

木材压缩特性的研究是认识木材力学性质的最基本的手段, 同时对木材的某些加工工艺 (如木质复合材料的热压工艺和木材密实化压缩过程等) 具有重要的指导意义。应用传统的电测方法对木材压缩进行测试时, 只得到贴片点的变形信息, 因而在分析时只能近似假设压缩过程中木材在平行于荷载方向上的变形基本相同。Choi 等<sup>[13,14]</sup> 应用 DSCM 对 1 mm x 1 mm x 4 mm 木材小试件进行单轴顺纹压缩实验获得了试件表面平行和垂直于荷载方向的变形场, 发现在平行于加载方向上变形场具有较大的起伏, 其应变变化范围为 -1.0 % ~ 0.76 %,

这表明受压试件的某些区域在加载方向上甚至承受拉应力。这一点说明对木材力学性质均匀变形的假设是不符合实际的。为了进一步对比这种非均匀性, Zink 等还对铝和木材进行了压缩对比实验, 发现各向同性的铝表面的变形场较光滑, 而各向异性的木材变形场起伏较大, 在相同荷载下铝试件应变  $\epsilon$  变化范围为  $1.8 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ , 而木材  $\epsilon$  为  $1.25 \times 10^{-3} \sim 2.95 \times 10^{-3}$ 。这说明相对于铝, 木材的非均匀程度更高。费本华<sup>[15]</sup>等应用 DSCM 对木材和铝进行三点弯断裂对比试验, 研究发现试件变形的位移场与 Zink 对变形场的研究具有相似的规律, 进一步证实了木材的力学性质的非均匀性。关于木材的压缩破坏机理, Choi<sup>[16]</sup>在研究中认为, 变形场在压缩区边缘的木射线周围出现应变集中, 随着荷载的增加, 应变集中的区域增大, 最后围绕木射线周围形成了一个破坏区。Choi 指出这种破坏是由于木射线周围的应力集中和组成木射线的纤维屈曲而导致的。从全场的变形演化过程中可以看出, 木材甚至在荷载水平低于比例极限时, 一些局部的应变集中区已经开始发展。Zink 还发现在试样的局部区域出现垂直于荷载方向上的应变较平行于荷载方向上的应变大的现象, 此现象对已被接受的泊松比概念提出了质疑<sup>[17]</sup>。这些现象进一步表明了木材的力学性质的非均匀性, 同时也展示了木材的破坏行为的复杂性。因此, DSCM 的全场测量结果更有助于全面展示木材的力学性质并分析木材中载荷传递的机理和失稳发生的原因。除此之外, Zink, Davidson 和 Hanna 还采用 DSCM 对  $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm} \times 101.6 \text{ mm}$  大试样进行了同样的顺纹压缩试验, 试验结果同 Choi 的小试样类似, 说明 DSCM 在试样的观测尺度上具有很好的适应性。另外, 徐曼琼和金观昌等<sup>[18]</sup>在木材的压缩实验中用 DSCM 测量木材的弹性模量, 发现 DSCM 具有光路简单, 数据处理简便等优点。

同样, 为了考察木材的力学性质的非均匀性, Samarasinghe 和 Kulasiri 等<sup>[19]</sup>用 DSCM 分别对材料各向同性的橡胶和材料各向异性的木材进行了顺纹和横纹方向拉伸变形场的观测对比实验。结果表明当橡胶试样被拉伸时, 水平和垂直方向上的变形场均相当光滑; 而木材被横纹拉伸时, 拉伸方向的变形场比较均匀光滑 (同橡胶一样), 被顺纹拉伸时, 其变形场轮廓线非常复杂。这不但说明了木材力学性质的非均匀性, 而且揭示了其明显的各向异

性。当木材被顺纹拉伸时, 木材内部发生了滑移和剪切变形, 因此其变形场非常复杂。Jernkvist 和 Thuvander<sup>[20]</sup>在木材径向拉伸试验过程中, 发现木材的径向和弦向变形场起伏也很大, 且具有不同的特征, 进一步证实了上述结果。

木材的抗弯强度亦称静曲极限强度, 为最重要的木材力学性质之一, 主要用作建筑物的屋架和地板等易于弯曲的构件以及木桥的梁等的设计<sup>[21]</sup>。Zink 等用 DSCM 对小试件木材抗弯特性进行了静曲试验, 实验结果描绘出了木材抗弯过程中变形场的分布。关于木材弯曲的理论计算, Navier 公式的前提是假定弯曲梁的截面上应力的分布为直线并且对称。实际上, 当弯曲荷载超过比例极限后, 木材产生塑性变形并常伴生微破坏, 这些因素都将影响木梁截面中性层的位置和应力分布, 因此计算木结构梁抗弯强度的公式只能为经验公式。Zink 应用 DSCM 进行的木梁的抗弯实验表明, 加载初期中性轴靠近梁的上缘受压部位, 随着荷载的增加中性轴向下缘受拉部位移动, 并指出由于木材的抗拉强度大于抗压强度, 因此木结构梁的顶部较底部先达到极限强度, 这是导致中性层向抗拉部位移动的原因。这一实验从木结构梁在弯曲过程中的中性层的移动进一步证实了木材的力学性质的非均匀性。

以上结果从不同角度证实了木材力学性质的非均匀性和各向异性, 同时展示了 DSCM 在进行木材的常规力学测试方面的优越性。除此之外, DSCM 的应用对于许多实际问题也有指导意义。对于木材加工和改性中的一些复杂问题, 如在木材密实化和木质复合材料压缩过程 (在这些工艺中, 均匀的变形过程对于保证产品的强度和尺寸稳定性是很关键的, 因而需要监测其中变形场的非均匀程度) 的研究中, DSCM 的全场测量具有更大的优势。

### 3.2 木材的断裂研究

断裂力学能够很好地揭示含裂纹结构体材料的工作性质。木材中有节疤、劈裂、孔洞等天然缺陷, 因此断裂力学在研究木材力学特性中占有重要的地位<sup>[22]</sup>。木材断裂是非常复杂的动态过程, 要经过裂纹的发生、扩展、稳定和失稳几个阶段。DSCM 在研究木材断裂上的优势是能够直观而清晰地描述木材复杂的断裂行为, 可以动态地再现整个断裂过程<sup>[23]</sup>。

Samarasinghe 和 Kulasiri<sup>[24]</sup>应用 DSCM 对橡胶



和木材的 RT 方向 I 型断裂模型和复合断裂模型进行研究, 发现 I 型断裂的初始裂纹对  $u$  方向和  $v$  方向的位移分布有很大的影响。由于滑移和内部剪切应力的原因, 有裂纹试件表面的变形分布在平行于管胞方向较无裂纹试件表面的变形分布复杂, 而垂直于管胞方向上变形场相对平滑。混合断裂研究结果表明, 初始裂纹角度对变形场的影响较大。DSCM 对分析具有裂纹的木材试件的断裂特性非常有效, 它能够很好地预测垂直于纹理方向上的位移, 并且可以捕捉平行于纹理方向位移的整个趋势。

王丽宇和鹿振友等<sup>[25,26]</sup>利用 DSCM 对木材裂纹的演化与增长的力学行为进行了实验研究。得出裂纹尖端的变形场分布, 并对含有 LT 型裂纹的木材断裂韧度进行测定。为了能够定量描述断裂过程中裂纹的发育及演化过程, 费本华等应用 DSCM 对木材裂纹断裂的发育过程进行了分形研究, 并对位移场进行分形处理, 发现分形维数在裂纹尖端处最小, 而在远离裂纹尖端的地方分形维数较大。

### 3.3 木材微观力学的研究

虽然宏观上木材是一种正交异性材料, 但由于其内部复杂的微结构, 其微观力学性质也相当复杂。木材微单元力学性质的有限元方法是一种有效的木材力学分析方法, 但是这种方法的有效性是建立在对木材微单元力学性质准确把握的基础上的。而对于木纤维和生物细胞单元体来说, 对其力学特性的深入了解是很困难的, 尤其使用传统的测试方法。Jernkvist 和 Thuvander 等基于 DSCM 和有限元方法, 提出了测量木材微单元力学常数的反演方法, 在一定程度上解决了上述难题。他们应用微拉伸仪对  $3.28\text{ mm} \times 25.0\text{ mm} \times 13.0\text{ mm}$  木材试样进行径向拉伸试验, 用 DSCM 测量了木材的径向、弦向和早晚材变形场, 然后应用有限元模型反演, 成功地计算出微单元的径向和弦向的弹性模量和剪切模量。

### 3.4 木质复合材料力学特性研究

木质复合材料包括以单板、纤维、刨花为原料制造的各种人造板和以木材或木纤维与塑料、金属、合成纤维等材料复合而成的复合材料<sup>[27]</sup>。木质复合材料具有复合材料固有的非均匀性和结构复杂性特征, 通常需用细观力学和宏观力学两种观点对其进行分析。细观力学承认复合材料的非均匀性, 并在分析中考虑它的效应; 宏观力学只承认复

合材料单层板的平均性能是唯一重要参数, 而忽略单层板内部的细观结构效应。这两种观点在考虑木质复合材料的某些问题时都可能存在一些问题, 而 DSCM 的全场和多尺度测量特性能准确把握木质复合材料的宏观力学特征, 同时又能对其细观力学特征进行深入了解。

用 DSCM 对胶合板静弯中的轴向位移场研究发现, 其中性轴不同于实木木梁那样固定不动, 而是会随着荷载的增加而变化, 胶合板的中性轴在加载的过程中始终在轴线部位, 而且最大的拉应力和压应力在大小和方向上没有对称性。用 DSCM 对定向刨花板静弯研究发现最大应变发生在刨花板中最大单体刨花部位, 其垂直于荷载方向的变形场分布是非对称的, 没有明显的中性轴, 受压部位延伸到中线以下, 导致这种现象的部分原因是由于个体刨花具有局部效应。总之, 在小试件情况下, 木材的抗弯特性符合梁单元理论, 而木质复合材料却不都是完全符合传统的梁单元理论, 如胶合板的抗弯特性与梁单元相近, 定向刨花却明显具有复合材料的组合特性<sup>[28]</sup>。

在木质复合材料胶合工艺上要保证最大剪切力是作用在材料而不是作用在胶层, 而 DSCM 能够很直观地观测到最大剪切力是在材料上还是在胶层上, 从而可以根据 DSCM 剪切变形场来评价产品的好坏, 然后对工艺进行改进, 提高产品质量。

以上的研究结果展示了 DSCM 在木质复合材料研究和应用领域的广阔前景, DSCM 的测量结果对木质复合材料以及建筑结构材料的设计等具有重要意义。可以通过 DSCM 来确定梁单元中性轴的位置, 然后根据复合材料理论, 分别对结构胶合梁上缘的受压部位和下缘的受拉部位配备不同强度的材料; 可以根据 DSCM 变形场起伏大小对胶合板的对称性进行定量评价和设计 (对称的原则要求胶合板中心平面两侧对应单板层的树种, 厚度, 含水率, 纤维方向, 制造方法都相同, 这样可使胶合板中心层两边材性一致, 不产生应力, 不翘曲变形。如果胶合板对称较差, 在抗弯过程中变形场的起伏会很大)。总之, 可以应用 DSCM 对木质复合材料的设计制定一种高效、准确、科学的方法。

## 4 结语

DSCM 提出至今 20 多年来, 已经在实验力学领域取得了相当的成功, 显示出了强大的潜力。文

章介绍了 DSCM 方法的基本原理和特点, 并重点总结了 DSCM 在木材科学领域中的应用。相对于传统的测试方法, DSCM 在深入认识木材的力学性质以及指导木材科学领域中的一些新问题具有重要的意义。

我国 DSCM 的研究在方法的发展上同国际水平相当, 但是具体到木材科学领域的应用上, 就与国外有不小的差距。因此应该进一步总结 DSCM 的优点及中国木材科学发展的特点, 指出仍存在的问题, 才能达到和超过国际水平, 更好地为中国木材科学服务。在今后研究中应该加强 DSCM 测试方法在木材科学领域中的转化, 并且根据木材的特殊材料特性, 形成一套完整的适合木材学科的 DSCM 理论体系和测试系统, 在注重 DSCM 对木材基本力学和木材物理特性方面研究外, 应该加强 DSCM 对木材加工和木质复合材料设计的指导作用。

#### 参考文献

- [1] Groom L H, Zink A G. Techniques in experimental mechanics applicable to forest products research [C]. Proceedings of the Experimental Mechanics Plenary Session at the Forest Products Research Society Annual Meeting Portland, 1994
- [2] Sutton M A, Walters W J, Peters W H, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method [J]. Image and Vision Computing, 1983,1(3): 133~139
- [3] Loferski J R, Davalos J F, Yadama V. A laboratory built clip on strain gauge transducer for testing wood [J]. Forest Products Journal, 1989,39(9): 45~48
- [4] He Z H, Sutton M A, Ranson W F, et al. Two dimensional fluid - velocity measurements by use of digital speckle correlation techniques [J]. Experimental Mechanics, 1984,24(2): 117~121
- [5] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A, et al. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics [J]. Experimental Mechanics, 1985,25(3): 232~244
- [6] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981,14:1270~1273
- [7] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982,21(3): 427~431
- [8] 马少鹏. 数字散斑相关方法在岩石破坏测量中的应用[D]. 北京:清华大学. 2003
- [9] Jin Guanchang, Wu Zhen, Bao Nikeng, et al. Digital speckle correlation method with compensation technique for strain field measurements [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003,39(4):457~464
- [10] 马少鹏,金观昌,潘一山. 岩石材料基于天然散斑场的变形观测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002,21(6):792~796
- [11] 章毓晋. 图像工程(上) [M], 北京:清华大学出版社,2000
- [12] Agrawal C P. Full-field deformation measurements in wood using digital image processing [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989
- [13] Choi D. Failure initiation and propagation in wood in relation to its structure [D]. State University of New York, 1990
- [14] Choi D, Thorpe J L, Hanna R B. Image analysis to measure strain in wood and paper[J]. Wood Science & Technology, 1991,25: 251~262
- [15] 费本华,张东升. 木材断裂裂纹及应力场的分形研究 [J]. 木材工业, 2003,17(3):7~12
- [16] Choi D, Thorpe J L, Côté W A, et al. Quantification of compression failure propagation in wood using digital image pattern recognition [J]. Forest Prod J, 1996,46(10): 87~93
- [17] Zink A G, Davidson R W, Hanna R B. Strain measurement in wood using a digital image correlation technique [J]. Wood and Fiber Science, 1995,27(4): 346~359
- [18] 徐曼琼,金观昌,鹿振友. 数字散斑面内相关法测量木材抗压弹性模量[J]. 林业科学, 2003,39(2):174~176
- [19] Samarasinghe S, Kulasiri G D. Displacement fields of wood in tension based on image processing: Part 1. Tension parallel-and perpendicular-to-grain and comparisons with isotropic behaviour [J]. Silva Fennica, 2000,34(3): 251~259
- [20] Jernkvist L O, Thuvander F. Stiffness variation across growth rings in picea abies[J]. Holzforschung, 2001, 55:309~2317
- [21] 成俊卿. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社, 1985
- [22] 任海青,江泽慧,邵卓平. 人工林杉木、马尾松木材的断裂韧性[J]. 木材工业, 2001,15(1):13~20
- [23] Durig B, Zhang F, McNeill S R, et al. A study of mixed mode fracture by Photoelasticity and digital image analysis [J]. Optics and Laser Engineering, 1991,14: 26~34

- [24] Samarasinghe S, Kulasiri G D. Displacement fields of wood in tension based on image processing: Part 2. Crack-tip displacements in mode-I and mixed-mode fracture [J]. *Silva Fennica*, 2000, 34(3): 261~274
- [25] 王丽宇, 鹿振友, 赵东, 等. 白桦材 LT 型裂纹的演化与增长行为的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(2): 60~61
- [26] Samarasinghe, S, Kulasiri, G D. Investigation of stress intensity factors of wood using image processing and orthotropic fracture theory [C]. *Proceedings of the 12th Engineering Mechanics Conference (ASCE)*, La Jolla, San Deigo, USA, 1998
- [27] 江泽慧. 中国林业工程 [M]. 济南: 济南出版社, 2002
- [28] Mott L, Schaler S M, Groom L H. A technique to measure strain distributions in single wood pulp fibers [J]. *Wood and Fiber Science*, 1996, 28(4): 429~437

## Application and Prospect of Digital Speckle Correlation Method on Wood Science

Jiang Zehui<sup>1</sup>, Fei Benhua<sup>1</sup>, Zhang Dongsheng<sup>1</sup>, Ma Shaopeng<sup>2</sup>

(1. *Research institute of wood industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China.*

2. *Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

[Abstract] With the development of the technologies on modern photoelectron and computer technologies and the improvement on theory of digital image processing, Digital Speckle Correlation Method (DSCM) is rapidly emerging as a powerful research tool for experimental mechanics techniques. In this paper, the essential principle of DSCM is introduced and the applications of DSCM to wood science and technology, including the latest results of the test on general mechanical properties, fracture properties, micro-structural mechanical properties and the mechanical properties of wood and wood composite materials, are reviewed. Considering the characteristics of wood materials, some suggestions are proposed on the application of DSCM to wood science and technology.

[Key words] digital speckle correlation method (DSCM); wood science and technology; deformation measurement

## 更 正

《中国工程科学》2003 年第 5 卷第 10 期封 2 下方图片说明应为“机械与运载工程学部”，特此更正。