

doi:10.3788/gzxb20134208.0993

# 基于激光散斑的涂料干燥过程实时监测技术

王凤鹏, 李亮, 尹真, 郭金水, 曾明生

(赣南师范学院 物理与电子信息学院; 光电子材料与技术研究, 江西 赣州 341000)

**摘 要:**研究了利用激光散斑的动态特性对涂料的干燥过程进行监测的基本原理和激光散斑动态特性的实时描述算法,提出了差分-平均值算法.通过求取一定间隔两帧散斑图的差分图,利用差分图的灰度分布直方图来定性描述激光散斑动态特性的强弱,用差分图的灰度平均值定量地描述激光散斑的动态特性的变化.实验结果表明,利用激光散斑的动态特性可以实现对涂料干燥过程的无损、在线监测,该算法可以在监测过程中实时给出结果,具有运算时间短、对硬件要求低的特点.

**关键词:**涂料干燥过程;激光散斑;动态特性;差分-平均值;相关系数

中图分类号:TN29; TQ630

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)08-0993-4

## Monitoring Technology of Paint Drying Process Based on Laser Speckle

WANG Feng-peng, LI Liang, YIN Zhen, GUO Jin-shui, ZHEN Ming-sheng

(School of Physics and Electronic Information, Research Institute of Optoelectronic Materials and Technology, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** The basic principles based on dynamic characteristics of laser speckle for monitoring of the paint drying process was studied. The processing algorithms of real-time detection were analyzed. A difference-average algorithm of dynamic speckle was proposed. In this algorithm, gray distribution histogram of the difference image was used to qualitatively describe the strength of the dynamic characteristics of the laser speckle, and the average gray level of the difference image was used to quantitative describes the changes of speckle. Experimental results show that dynamic characteristics of speckle can be used to non-destructive and on-line monitor the paint drying process, and the difference-average algorithm can be given real-time results in the monitoring process with shorter computation time and lower hardware requirements.

**Key words:** Paint dying process; Laser speckle; Dynamic characteristic; Difference-average gray value; Correlation coefficient

## 0 引言

在各种涂料的生产过程中,需要对涂料的干燥时间进行测定.传统的人工测定方法包括:吹棉球法、小玻璃球法和触指法等.自动测定仪器一般采用划针式,通过观察划针在涂层上匀速移动留下的轨迹图来评价涂层干燥过程的各个阶段,从而测出干燥时间<sup>[1]</sup>.而在使用过程中,实际的干燥时间与涂料配比、环境温度、湿度等因素有关,而控制涂料的干燥速度是保证完美涂膜效果和高效率生产的关键

之一<sup>[2]</sup>.因此,在产品涂装过程中对涂料的干燥过程进行实时监测具有重要意义.而接触式检测法不能用于对涂装产品的无损、实时、在线检测.TAKESHI Y<sup>[3]</sup>等人提出利用 THz 电磁波反射理论的非接触式检测法,但其设备结构复杂且不适于实时在线检测.

近年来,激光散斑技术在非接触测量<sup>[4-5]</sup>、涂料干燥检测<sup>[6-7]</sup>、农产品检测<sup>[8-10]</sup>等方面得到广泛的应用.本文研究了利用动态激光散斑对涂料的干燥过程进行监测的技术,探索快速有效的动态激光散

基金项目:江西省青年科学基金(No. 20122BAB211017)和江西省光电子与通信重点实验室开放基金(No. 20111014)资助

第一作者:王凤鹏(1981-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光学检测、光电图像信号处理. Email: wangfengpeng@163.com

收稿日期:2012-12-18;录用日期:2013-02-21

斑处理算法,以达到实时在线检测的要求。

## 1 用激光散斑监测涂料干燥的基本原理

激光散斑是指当激光照射在相对粗糙(与光的波长相比)物体表面时形成的随机干涉图样。如图1所示,激光束照射被测样品(粗糙表面)后,散射的光经自由空间传播后在图像传感器(Charge Coupled Device, CCD)表面形成的散斑称为客观散斑。当粗糙物体表面随时间发生动态变化(如微小位移、粒子随机运动)时,则产生的散斑图也随时间动态变化,称为动态激光散斑<sup>[11]</sup>。

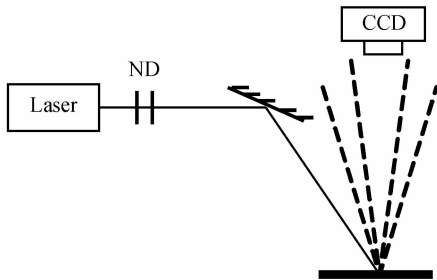


图1 激光散斑实验光路

Fig. 1 Setup of laser speckle experiment

从物理性质来看,涂料的干燥过程是由液体向固体的转变过程<sup>[2]</sup>。涂料干燥前都具有一种液体的流动性和一定的粘性,此时,涂层中粒子的间隙较大,存在巨烈的布朗运动,不同粒子散射光的复振幅随机变化,从而形成的散斑图也将出现不规则运动。干燥过程中,随着溶剂的蒸发,涂料的固体成分含量逐渐增加,粒子相互接近融合在一起,涂层干燥后将形成一层固体涂膜,形成静止的散斑图。因此通过CCD摄像头记录激光散斑的动态变化可实现对涂料干燥过程的监测。

## 2 激光散斑动态变化实时描述算法

### 2.1 相关系数法

ICHIROU Y<sup>[11]</sup>等人提出了利用相关系数描述散斑图动态变化特性的方法。用 $I(x, y, t)$ 表示动态激光散斑图在 $t$ 时刻坐标位置 $(x, y)$ 点的灰度值,则间隔 $\Delta t$ 拍摄的两幅散斑图的互相函数表示为

$$r(x', y', t) = \left[ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I(x, y, t) I(x+x', y+y', t+\Delta t) \right] / \left[ (M-x')(N-y') \langle I \rangle^2 \right] \quad (1)$$

式中 $M, N$ 为散斑图的列、行数,即CCD的像素列、行数, $\langle I \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I(x, y, t)$ 表示散斑图的光强统计平均。 $r(x', y', t)$ 的峰值(即相关系数)表示两幅散斑图的相似程度,因此可用相关系数

$$R(t) = \max(r(x', y', t)) \quad (2)$$

来表示激光散斑的在 $t$ 时刻的动态特性。

在 $\Delta t$ 相同的情况下,激光散斑动态变化越大,相关系数越接近于0,反之,动态变化越小,则相关系数越接近于1。该方法可以实时给出激光散斑的动态特性,但图像相关运算通常通过傅里叶变换来实现,运算速度较慢,不利于用硬件实现。

### 2.2 差分-平均值法

本文提出了一种新的激光散斑动态特性实时描述算法。用 $I(x, y, t)$ 表示动态激光散斑图在 $t$ 时刻坐标位置 $(x, y)$ 点的灰度值,将间隔 $\Delta t$ 拍摄的两幅散斑图对应像素点求绝对差,得到 $t$ 时刻的散斑差分图

$$C(x, y, t) = |I(x, y, t) - I(x, y, t + \Delta t)| \quad (3)$$

当激光散斑的动态变化越大,则差分图的灰度值越大,反之则差分图的灰度值越小。因此,可以用灰度直方分布图来定性描述激光散斑的动态变化特性。也可以用差分图的灰度平均值来表示 $t$ 时刻的散斑动态变化,即

$$D(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N C(x, y, t)}{MN} \quad (4)$$

式中, $M, N$ 为散斑图的列、行数,即CCD的像素列、行数。在 $\Delta t$ 相同的情况下, $D$ 值越大,说明散斑图的动态变化越大,反之说明散斑图的动态变化越小。当 $D$ 值较小且不随时间剧烈变化时,说明散斑图趋于稳定。

## 3 实验研究及结果

本文选用灌装自动喷漆作为涂料样品,环境温度 $26^\circ\text{C}$ 。采用如图1所示的实验光路图,其中激光波长为 $632.8\text{ nm}$ , CCD像素数为 $320 \times 240$ ,即 $M=320, N=240$ , CCD到样品的距离为 $15\text{ cm}$ 。为防止油漆定向流动,喷漆后的样品水平放置。实验时,将油漆喷于铝板上 $10\text{ s}$ 后每隔 $\Delta t=0.05\text{ s}$ 记录一张散斑图。每隔 $10\text{ s}$ 用触指法检测油漆的真实干燥情况,触指法检测的结果为:油漆喷于铝板 $90\text{ s}$ 时已达到表面干燥状态, $110\text{ s}$ 时已达到内部实际干燥状态。

喷漆后 $t=11\text{ s}$ 时刻,利用差分算法处理时间间隔 $\Delta t=0.5\text{ s}$ 的两幅散斑图,得到散斑差分图如图2(a),  $t=90\text{ s}$ 时的散斑差分图如图2(b),它们的灰度分布直方图如图3所示。对比图2和图3可以发现,在 $t=11\text{ s}$ 时,油漆尚未干燥,激光散斑的动态特性明显,其差分图的灰度值分布较分散,平均灰度值为 $12.34$ 。在 $t=90\text{ s}$ 时,油漆表面已经干燥,激光散斑的动态特性很弱,其差分图的灰度值分布集中于0附近,平均灰度值为 $2.54$ 。

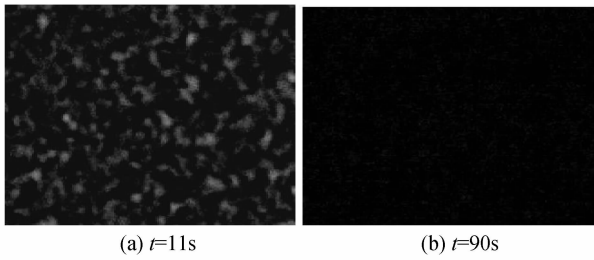


图 2 散斑差分图  
Fig. 2 Difference image

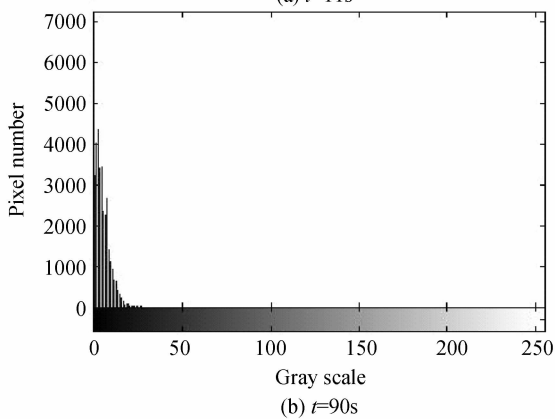
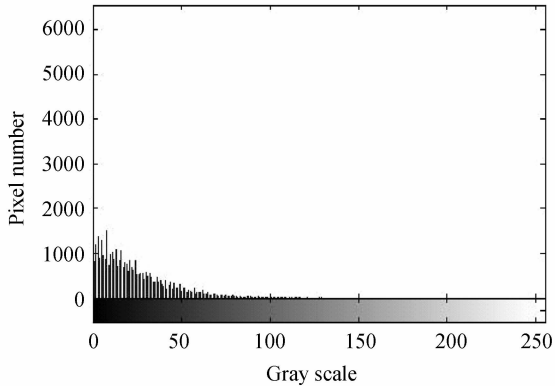


图 3 灰度分布直方图  
Fig. 3 Histogram of difference image

在油漆干燥过程中,取时间间隔  $\Delta t = 0.5 \text{ s}$  计算一幅差分图,由式(3)、(4)计算得到的散斑动态特性曲线如图 4(a). 采用同样的时间间隔,利用相关系数法,由式(1)、(2)处理的结果如图 4(b). 从图 4

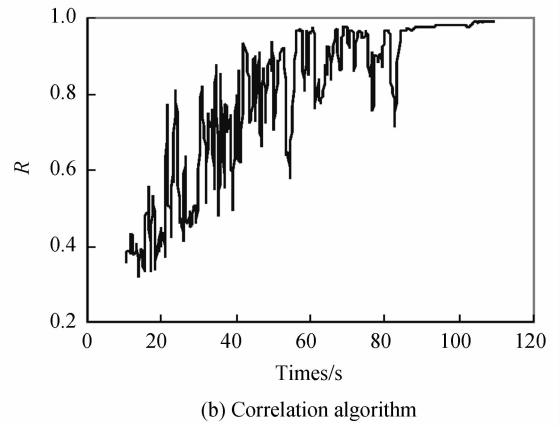
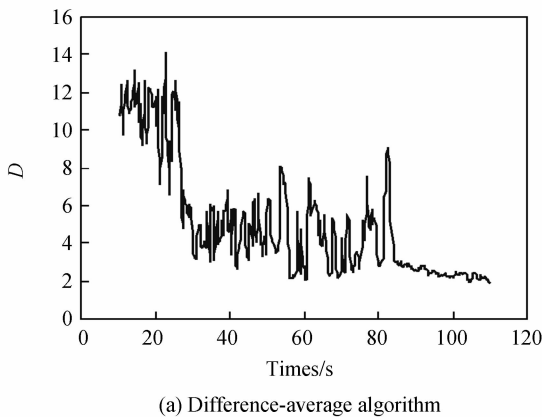


图 4 油漆干燥过程中的散斑动态特性曲线  
Fig. 4 Dynamic characteristic curve of speckle in the paint drying process

可以看出,油漆干燥前,由于激光散斑的无规则运动,差分图的平均灰度值较大且随时间剧烈变化,而相关系数较小且随时间剧烈变化.当差分图的平均灰度值稳定在 2.5 以下,而相关系数稳定在 0.97 以上,说明散斑图达到静止状态,即油漆表面已形成固体膜.对比分析图 4 可以发现,在大部分情况下,差分平均值与相关系数刚好相反,即差分平均值较大时相关系数较小.两种算法的监测结果是一样的,在开始监测 85s 后铝板上的油漆达到表面干燥状态.

取时间间隔  $\Delta t$  分别为 1 s 和 1.5 s 情况下处理实验数据,得到结果如图 5、6. 比较图 4~图 6 可以

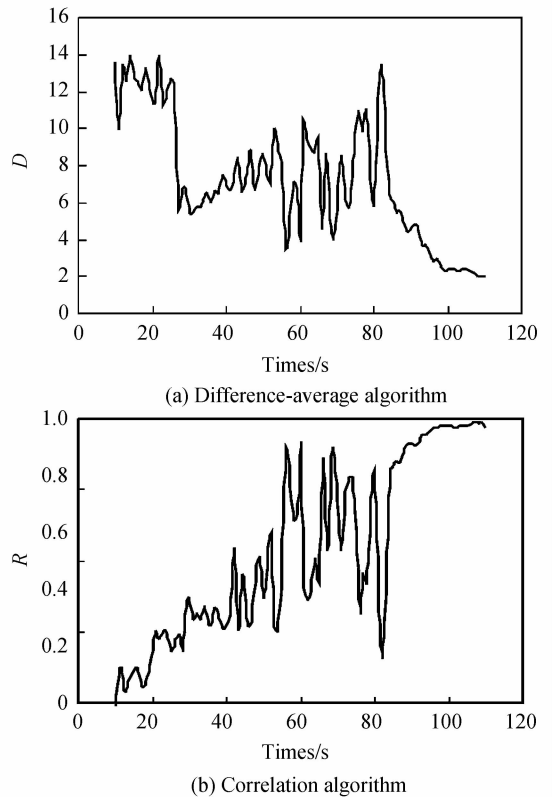


图 5  $\Delta t = 1 \text{ s}$  散斑动态特性曲线  
Fig. 5 Dynamic characteristic curve when  $\Delta t = 1 \text{ s}$

发现,在 85 s 前油漆处于表面干燥阶段,散斑动态特性参量均存在剧烈变化.在喷漆后 85~100 s 之间,油漆处于内部实际干燥过程中,此时激光散斑运动较慢,在图 4 中,采样时间间隔  $\Delta t$  较小,动态特性参量已达到稳定值,而在图 5、图 6 中, $\Delta t$  较大,动态特性参量还存在缓慢的变化(差分平均值缓慢减小,而相关系数缓慢增大).在 100 s 后油漆达到内部实际干燥状态,散斑动态特性参量均达到稳定状态,与  $\Delta t$  的取值无关.由此可见,若只需检测表面干燥,则

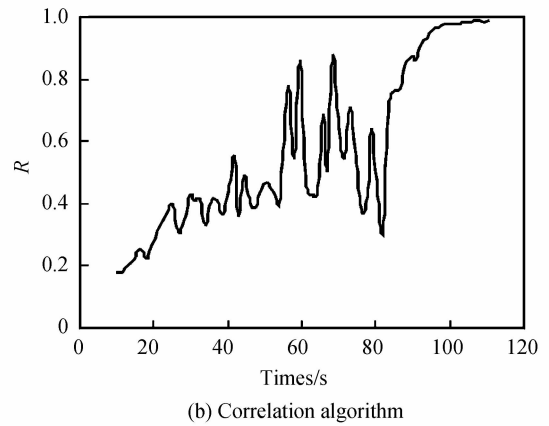
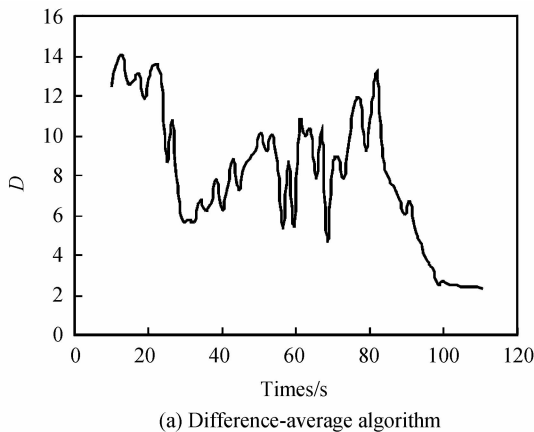


图 6  $\Delta t=1.5$  s 散斑动态特性曲线

Fig. 6 Dynamic characteristic curve when  $\Delta t=1.5$  s  
 $\Delta t$  应取小于 0.5 s,若需要检测内部实际干燥,则  $\Delta t$  应取大于 1 s.

实验所用计算机 CPU 为双核 2.1 G,内存 2 G,采用 Matlab7.10.0 编程,利用 tic 和 toc 计算算法所需时间.表 1 为用两种算法处理不同数量的激光散斑所需运算时间,从表 1 中可以看出,在相同条件下,本文提出的差分-平均值算法所需的时间仅为相关系数法的 1/10 左右.

表 1 两种算法处理不同数量激光散斑所需的运算时间

Number of laser speckle pattern	675	450	337	270	180	135	108	90
Difference-average algorithm	0.265	0.204	0.168	0.135	0.117	0.094	0.085	0.073
Correlation algorithm	3.298	2.249	1.695	1.366	0.935	0.725	0.571	0.515

## 4 结论

利用客观激光散斑的动态特性可以监测涂料的干燥过程、测量涂料的干燥时间,在采样间隔时间较小时可用于检测油漆的表面干燥,取较大的采样间隔可用于检测油漆内部的实际干燥情况.本文提出的差分-平均值算法只需要拍摄两幅散斑图就能得出结果,可以实现实时在线检测,可以通过差分图的灰度分布直方图来定性描述散斑的动态特性,通过差分图的平均灰度值来定量描述散斑的动态特性,与相关系数法相比,具有算法简单、运算时间短的特点.

### 参考文献

[1] 虞莹莹. 涂料工业用检验方法与仪器大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 40-42.  
 [2] XI Xiang. Discussion on the drying rate and related factors of water-borne woodenware coatings[J]. *China Coatings*, 2011, **26**(7): 58-63.  
 奚祥. 水性木器涂料的干燥速度与相关因素讨论[J]. *中国涂料*, 2011, **26**(7): 58-62.  
 [3] TAKESHI Y, TAKASHI Y, KENICHI S, *et al.* Terahertz paint meter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(32): 6849-6856.  
 [4] ZHAO Yan-peng, YANG Jun, ZHAO Lei, *et al.* Measuring the thickness of phase objects by laser speckle method [J].

*Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(4): 449-452.  
 赵延鹏, 杨军, 赵磊, 等. 用激光散斑法测量位相物体厚度[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(4): 449-452.  
 [5] FENG Wei-wei, LIU Mei-juan, WANG Xue-qin, *et al.* Feature extraction and recognition of laser speckle for special material surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 186-188.  
 冯巍巍, 刘美娟, 王学勤, 等. 特种材料表面激光散斑特征提取和识别研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **36**(2): 186~188.  
 [6] ICHIROU Y, MASAYUKI Y, TAKASI I, *et al.* Monitoring of paint drying process by digital speckle correlation [J]. *Optical review*, 2007, **14**(6): 362-364.  
 [7] LI Xin-zhong, DAI Qin, WANG Xi-jun, *et al.* Dynamic speckle method for Studying the drying process of magnetic fluid film[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(8): 959-962.  
 李新忠, 岱钦, 王希军, 等. 用动态散斑法研究磁流体薄膜的干燥过程[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(8): 959-962.  
 [8] PAJUELO M, BALDWIN G, RABAL H, *et al.* Bio-speckle assessment of bruising in fruits [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **40**(1-2): 13-24.  
 [9] SENDRA G H, ARIZAGA R, RABAL H, *et al.* Decomposition of biospeckle images in temporary spectral bands [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(13): 1641-1643.  
 [10] ROMERO G C, MARTINEZ C C, ALANIS E E, *et al.* Bio-speckle activity applied to the assessment of tomato fruit ripening [J]. *Biosystems engineering*, 2009, **103**(5): 116-119.  
 [11] JOSEPH W G. Speckle phenomena in optics: theory and application[M]. Roberts & Company, 2006: 1-8.