



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102445155 A

(43) 申请公布日 2012. 05. 09

(21) 申请号 201110257754. 1

(22) 申请日 2011. 08. 26

(30) 优先权数据

12/869, 893 2010. 08. 27 US

(71) 申请人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 H·I·林格马赫 D·R·霍华德

B·E·奈特

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 柯广华 朱海煜

(51) Int. Cl.

G01B 11/06(2006. 01)

G01N 25/20(2006. 01)

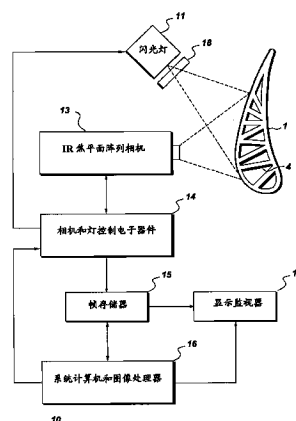
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 5 页

(54) 发明名称

用于评估涂层的热成像方法和设备

(57) 摘要

本发明名称为“用于评估涂层的热成像方法和设备”。提供一种设备,用于部分地使用能够在涂层表面生成热脉冲的闪光灯源以及能够捕获涂层表面的顺序图像帧的图像捕获和处理装置来确定衬底表面上的涂层的可变厚度,而每个顺序图像帧对应于经过时间并包括像素阵列,并且其中,阵列的各像素对应于涂层表面上的位置。还提供一种计算涂层厚度的方法。



1. 一种用于确定布置在衬底 (1) 上的涂层 (4) 的可变厚度的设备, 所述设备包括:
 闪光灯源 (11), 能够在所述涂层表面处生成热脉冲;
 光触发器, 耦合到所述闪光灯源, 并且能够发起所述闪光灯激发;
 晶体管, 耦合到所述闪光灯源, 并且能够熄灭所述热脉冲;
 反射滤光器 (18), 定位在所述闪光灯源 (11) 与所述涂层表面 (4) 之间, 能够防止来自所述闪光灯的剩余热加热所述涂层表面;

IR 图像捕获装置 (13), 定位成捕获所述涂层表面的顺序图像帧, 而每个顺序图像帧对应于经过时间并包括像素阵列, 并且其中, 所述阵列的各像素对应于所述涂层表面上的位置;

处理器 (16), 耦合到所述 IR 图像捕获装置, 能够执行下列步骤:
 控制所述光触发器和晶体管的操作;
 在发起所述闪光灯激发时及以后顺序地接收所述涂层表面的所述图像帧; 以及
 部分地使用所述顺序图像帧计算时间-温度响应, 来确定沿所述衬底 (1) 的多个点处的所述涂层的所述厚度。

2. 如权利要求 1 所述的设备, 其中, 所述反射滤光器直接涂敷在所述闪光灯源上, 并且能够反射 3 至 5 微米范围中的辐射。

3. 如权利要求 1 所述的设备, 其中, 所述处理器配置成从所述时间-温度响应来计算拐点值和 deltalog 。

4. 一种用于确定沿衬底表面的多个点处的涂层厚度的方法, 包括:
 使用闪光灯源在所述涂层表面处生成短持续时间热脉冲, 所述闪光灯源配备有反射滤光器以防止来自所述闪光灯的剩余热加热所述涂层表面;
 使用 IR 捕获装置来捕获所述涂层表面的顺序图像帧, 而每个顺序图像帧对应于经过时间并包括像素阵列, 并且其中, 所述阵列的各像素对应于所述涂层表面上的位置;
 使用处理器来处理所述顺序图像帧, 以存储所述顺序图像帧;
 确定沿所述衬底的所述涂层的所述厚度和热传导率包括: 对于所述像素阵列的两个或更多像素独立计算时间-温度响应曲线的所述顺序图像帧。

5. 如权利要求 4 所述的方法, 其中, 所述时间-温度响应曲线上的最大斜率的时间定义为拐点时间 ($t_{\text{inflection}}$), 并且其中, 所述时间-温度响应曲线的方程定义为:

$$T(t) = \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n e^{-n^2 \frac{\tau_c}{t}} \right) T_{1/2c}(t)$$

其中, $T_{1/2c}$ 是所述涂层对所述闪光脉冲的半空间响应, 定义为

$$T(t) \rightarrow T_{1/2c}(t) = \frac{1.1284 I}{2E_c \sqrt{t}} \quad t- > 0$$

和

$$T(t) \rightarrow T_{1/2s}(t) = \frac{1.1284 I}{2E_s \sqrt{t}} \quad t- > \infty ;$$

以及

R 是反射系数, 定义为

$$R = \frac{E_c - E_s}{E_c + E_s};$$

其中 E_c 是所述涂层吸热系数, 以及 E_s 是所述衬底吸热系数, 定义为:

$$E_c = \sqrt{K_c \rho c_c} \text{ 且 } E_s = \sqrt{K_s \rho c_s};$$

其中, K 是热传导率, ρ 是密度, 以及 c 是比热。

6. 如权利要求 5 所述的方法, 其中, 从所述时间-温度响应曲线以实验方式测量所述拐点时间 ($t_{\text{inflection}}$), 并且从所述涂层和衬底的材料性质来确定 R 。

7. 如权利要求 5 所述的方法, 其中, 确定涂层厚度中的变化包括:

计算所述像素阵列的两个或更多像素处的 L 的值, 其中 L 定义为

$$L = \sqrt{\alpha_c \tau_c}; \text{ 其中}$$

$$\alpha_c \text{ 定义为 } \alpha_c = \frac{K_c}{\rho c_c}; \text{ 以及}$$

τ_c 是所述涂层的特征时间, 定义为

$$q = \frac{\tau_c}{t_{\text{inflection}}}; \text{ 以及}$$

q 定义为

$$q \left[\frac{\sum_{n=1}^3 R^n n^4 e^{-n^2 q}}{\sum_{n=1}^3 R^n n^2 e^{-n^2 q}} \right] - 2q \left[\frac{\sum_{n=1}^3 R^n n^2 e^{-n^2 q}}{1 + 2 \sum_{n=1}^3 R^n e^{-n^2 q}} \right] - 1 = 0.$$

8. 如权利要求 4 所述的方法, 其中, 使用对所述顺序图像帧数据的高斯函数时间平滑来生成所述时间-温度响应曲线。

9. 如权利要求 8 所述的方法, 其中, 将成像滤光器应用于所述顺序图像帧数据, 所述成像滤光器包括空间平滑、初始和结束噪声抑制、负对比度抑制、对比度取阈值及其组合。

10. 如权利要求 4 所述的方法, 还包括: 显示沿所述衬底的所述涂层厚度的颜色编码图像或灰度级编码图像。

用于评估涂层的热成像方法和设备

技术领域

[0001] 按照某些实施例,本发明涉及用于确定对象表面上涂层厚度的热敏成像(thermographic)无损测试技术。

背景技术

[0002] 一般来说,红外(IR)瞬时热敏成像是一种通用无损测试技术,它依靠对通过对象的热传递的时间测量来提供与对象的结构和完整性有关的信息。通过对象的热流基本不受对象材料的微观结构和单晶取向的影响,因此,红外瞬时热敏成像分析本质上不受限,这为超声波测量而产生。另外,瞬时热敏成像分析方式没有明显受到被测对象的尺寸、轮廓或形状妨碍,并且此外还能够实现得比大多数常规超声波方法要快 9 至 99 倍,特别是当测试对象带有大表面积时。

[0003] 按常规,红外(IR)摄像机已用于在加热对象表面之后记录和存储其连续热图像(帧)。各视频图像由可定义为像素阵列的固定数量的像素组成,由此各像素表示图像阵列或帧中的小像元。各像素对应于被成像的对象表面上称作分辨单元的矩形区域。由于在各分辨单元处的温度与对应像素的强度直接有关,因此在对象表面上的各分辨单元处的温度变化能够根据像素对比度的变化来分析。

[0004] 瞬时热敏成像的一种已知当代应用是确定固体非金属合成物中的裂纹的大小和相对位置(深度)的能力;瞬时热敏成像的另一种应用是用于确定金属对象的厚度。也已经进行一些尝试来测量绝缘涂层的厚度。它们包括建模技术,其中可通过使涂层数据拟合模型并且将它与已知厚度标准进行比较来得到绝缘涂层厚度。然而,这些技术或者包括涂层厚度的逐点测量并因此花费时间且计算复杂,或者要求图像中存在涂层厚度标准,这也许是不可能的或者不可行的。绝缘涂层的厚度测量的另一个方面在于,随着涂层老化,涂层的热传导率改变并且影响涂层的厚度测量。

[0005] 已经实现使用热传导率作为确定涂层厚度的一个因数。该方法包括得到用于绝缘涂层和用于衬底的相应的时间-温度响应,其中绝缘涂层布置在衬底上。该方法还包括测量 $\delta \log$ 值,并且从用于涂层和用于衬底的相应的时间-温度响应来测量拐点值。下文中参照方程更详细地描述这些值。一个或多个涂层特性可使用 $\delta \log$ 值或拐点值来计算。使用两种涂层特性值的热传导率值和涂层厚度值则是可能的。

[0006] 但是,当计算在沿有涂层的部件的表面的特定点处进行时,该方法受到限制。分析沿大表面积或几何复杂部件的涂层厚度中的变化的能力受到限制。因此,需要一种能够在在大表面积或变化表面积上定量测量涂层的绝对厚度的技术。

发明内容

[0007] 按照本发明的一个方面,提供一种设备用于确定布置在衬底上的涂层的可变厚度。该设备包括能够在涂层表面处生成热脉冲的闪光灯源、耦合到闪光灯源并且能够发起闪光灯激发的光触发器、耦合到闪光灯源并且能够熄灭热脉冲的晶体管、以及定位在闪光

灯源与涂层表面之间能够防止来自闪光灯的剩余热加热涂层表面的反射滤光器。该设备还包括：捕获涂层表面的顺序图像帧的 IR 图像捕获，而每个顺序图像帧对应于经过时间并包括像素阵列，并且其中，阵列的各像素对应于涂层表面上的位置；以及处理器，用于控制灯的操作、在发起闪光灯激发时及以后顺序地接收涂层表面的图像帧、并且用于使用接收的数据计算沿衬底的多个点的涂层的厚度。

[0008] 按照本技术的另一个方面，提供一种用于确定沿衬底表面的多个点的涂层厚度的方法。该方法包括：使用配备有反射滤光器以防止来自闪光灯的剩余热加热涂层表面的闪光灯源在涂层表面处生成短持续时间热脉冲，并且使用 IR 捕获装置来捕获涂层表面的顺序图像帧，而各顺序图像帧对应于经过时间并包括像素阵列，并且其中，阵列的各像素对应于涂层表面上的位置。然后，从独立生成用于像素阵列的两个或更多像素的时间-温度响应曲线来计算涂层的厚度和热传导率。

附图说明

[0009] 当参照附图阅读以下详细描述时，本发明的这些及其它特征、方面和优点将变得更好理解，附图中相似符号贯穿附图都表示相似部件，在附图中：

[0010] 图 1 是按照本发明的一方面、用于确定和显示绝缘涂层的厚度和热传导率的示范红外瞬时热敏成像系统的图解表示。

[0011] 图 2 是示出按照本发明的一方面、用于确定绝缘涂层的厚度和热传导率的无损检验方法的示范步骤的流程图。

[0012] 图 3 是继续示出按照本发明的一方面、接着图 2 所示步骤的示范步骤的流程图。

[0013] 图 4 是衬底的涂层厚度变化的表示；A 是参考图像，而 B 是使用图 1 的系统得到的涂层图像。

[0014] 图 5 是图 4 中作为 $\log(\text{temp})$ 相对 $\log(\text{time})$ 曲线的导数的最小斜率点标识的像素位置处的、涂层的拐点响应的另一个仿真图形表示。

具体实施方式

[0015] 作为举例，本发明涉及用于通过使用高速红外 (IR) 瞬时热敏成像来确定和显示沿对象表面的涂层的实际厚度和热传导率值的无损测试方法和设备。分析在光学表面闪光和后续热脉冲生成之后的表面温度的时间响应，并且求出涂层厚度。副产物是涂层热传导率。

[0016] 图 1 是用于确定对象 1 的涂层厚度和热传导率的设备 10 的图解表示。更具体来说，图 1 的示范设备能够用于使用瞬时 IR 热敏成像来确定布置在对象表面上的涂层 4 的厚度和热传导率。对象可以是包括但不限于飞行器或涡轮部件的成品部件。在某些实施例中，成品部件可以是机翼、肋条或加强杆设计，其中测量涂层厚度是重要的质量控制，并且精确测量可能因类似肋条的结构或者近间距后壁或内部结构而受到阻碍。在一个示例中，涂层 4 是热障涂层 (TBC)，而在另一个示例中，涂层 4 是环境障涂层 (EBC)。

[0017] 如图 1 所示，闪光灯热脉冲源 11 用于快速加热被测量对象的表面。这在涂层表面处生成传播到涂层中的热脉冲。

[0018] 用于闪光灯热脉冲源 11 的一种适当排列将例如是一组四个或八个高速高输出

功率摄影闪光灯,每个都能够具有大约 4.8 千焦耳输出并且具有单独的电源(例如由 Speedotron 公司(芝加哥,伊利诺伊州)制造的闪光灯)。

[0019] 由于金属具有比非金属明显要快的热传导速率,所以用于金属中热流的特征时间比例如塑料或合成材料的特征时间要快许多。因此,在尝试使常规 IR 热敏成像技术(通常局限于非金属)适合金属时,需要施加的热的锐截止。为了得到它,在闪光灯 11 与感兴趣对象 1 之间使用 3-5 微米反射滤光器 18,以便防止使物体在曝光之后闪光灯冷却时暴露于剩余热。在某些实施例中,反射滤光器可作为透镜盖集成到闪光灯中。

[0020] 实际上,可使用一个或多个滤光器(例如,每个闪光灯一个)。这些滤光器用于防止典型地从闪光灯 X 中的过热金属元件的“余辉”生成的直接长波辐射 X 不断离开闪光灯并且照射(impinge)到目标上或者以其它方式反射回到焦平面阵列相机 13 中。来自闪光灯 11 的这种一次余辉辐射相互竞争,并且能够在早期热数据获取期间干扰来自目标对象的长波 IR 发射,因而混淆真正的目标生成 IR 辐射并且降低最终图像对比度和质量。因此,这些特殊滤光器的使用产生充分尖锐的热脉冲,以使金属中的较短热传播时间能够被检测。

[0021] 在图 1 中描绘的示例实施例中,反射滤光器 18 可由 Pyrex™、熔凝石英、BK7™、B270™ 或者其它光学材料组成,所述其它光学材料对可见光和 UV 光是透明的并且涂敷在带有红外反射涂层的闪光灯正面上,以将 3-5 微米范围内的所有辐射反射回到闪光灯中。在某些实施例中,光学玻璃和有涂层的滤光器可通过一般科学光学器件和光学玻璃制造商(例如,Oriel(斯特拉特福,康涅狄格州))来获取或专门制造。

[0022] 热脉冲照射的对象 1 的表面温度测量使用红外(IR)敏感成像系统来获取,该系统包括:诸如从 FLIR(波士顿,马萨诸塞州)可得到的 SC 系列相机的 IR 敏感焦平面阵列相机 13、控制电子器件 14、帧数据存储单元 15、控制计算机/图像处理器 16 和显示监视器 17。

[0023] 热数据的获取优选地在闪光灯激发时或者通过光触发、或者通过其它合适方式来发起。闪光灯激发经由控制电子器件 14 来控制,该控制电子器件 14 由运行于系统计算机和图像处理器 16 上的、例如由常规帧获取和闪光灯控制软件提供的常规视频帧获取软件来管理。

[0024] 熄灭还用于主动控制闪光的持续时间。在某些实施例中,熄灭可使用耦合到灯并由处理器控制的晶体管来实现。晶体管可包含在灯控制电子器件 14(图 1)中。晶体管可在激发之后预设时间处切断到闪光灯的电流,以产生短光脉冲。优选地,该短光脉冲持续时间小于 4 毫秒,并且更优选地是在 2-3 毫秒之间。切断时间可基于灯和电子系统的效率而改变。熄灭提供短受控光脉冲,它涉及涂层的热响应的更多控制并且因而涉及对跨过整个像素阵列的数据获取的增加的精度。

[0025] 按照本发明的方法,系统控制计算机/图像处理器 16 是专门编程的通用数字计算机,它除了数字图像处理和显示之外还能够具有外围设备控制和通信功能。系统处理器 16 控制用于相机和灯的电子器件 14(包括熄灭)和帧数据存储单元,以获取对象表面的预定数量的连续热图像帧,它们存储和记录在存储器 15 中供将来分析。

[0026] 在某些实施例中,在开始热成像过程之前,IR 阵列相机 13 可使用“全场”双图像校准来校准。在其它实施例中,可使用引起产生对于高对比度成像和获取改进热精度是重要的图像场的最大均匀性的任何校准技术。

[0027] 在成像过程期间获取的各图像帧由 $N \times N$ 个像素组成,各像素对应于对象表面上

的分辨单元,其中N典型为256、512或1024,取决于预期分辨率和精度。各像素占用存储存储器的大约两个字节,并且例如可由12位或更大的二进制数来表示。存储的图像帧采用增加的帧号值被顺序地标识,帧号值共同用于提供在由闪光灯11给予的热脉冲照射之后的预定周期的对象1的正面的温度对时间(T-t)特性的历史记录。在某些实施例中,对象表面上的像素的位置可使用二维或三维笛卡儿坐标系来登记或定位。

[0028] 在评估对象期间,在处理器16触发闪光灯(一个或多个)11的激发之后,从相机13获取图像数据帧,并且图像上的各分辨单元处的IR强度以数字方式记录并且存储在帧数据存储器15中。数据获取对于足以获取在对象材料的至少一个估计的“特征时间”的持续时间上有意义T-t历史的预定数量的顺序图像帧持续进行。获取的图像帧的总数可取决于预期的精度和图像分辨率而改变,并且能够高达每秒数千帧的数据获取。

[0029] 帧数据存储器15可以是处理器16内部的常规数字存储器或者是由处理器16可访问的任何适当视频帧数据存储装置。向获取的每个连续热图像帧指配与实时通过对应的增加的帧号Z。然后采取一维热流分析方式来分析结果数据帧“栈”,如上所述。按照这种方式,本发明的方法利用了对于连续IR图像帧X的各图像像素的温度对时间(T-t)历史中证实的已知热不变性,这依靠标识“拐点”或峰值斜率时间(即,T-t数据曲线上的最大斜率的时间点)的位置。

[0030] 现在参照图2,提供示出用于使用本发明的热成像技术来进行瞬时IR热敏成像的示例处理步骤的流程图。这些步骤例如可通过使用已知常规编程技术对处理器16(图1)进行适当编程来实现。

[0031] 一开始,如框20处指示的,标识对象上的感兴趣区域,例如聚焦IR相机以捕获感兴趣区域,并且系统操作员选择或输入与用于检查对象的相关联的参数有关的信息。相关联的参数可包括例如材料的热扩散率系数。随后,如图2中的框20所指示的,系统控制计算机指令闪光灯电子器件激发闪光灯11,熄灭灯以产生短光脉冲,并且发起从焦平面阵列IR相机13的图像帧数据获取。数据获取在预定数量的顺序图像帧上继续进行,并且然后如21所指示的,在采用顺序帧号Z来标识每个获取的图像帧之后将图像序列或IR栈存储在帧存储器15(图1中示出)中,以创建IR图像栈。

[0032] 如图3中的步骤22所示,各IR栈记录各位置处的像素值。来自栈中的各图像相同位置的、提取的像素值可用于基于帧号来形成温度时间曲线(TT曲线),其中对于与对象表面上的感兴趣区域的分分辨单元位置对应的热图像中的各像素来标识一组T-t曲线数据。

[0033] 在某些实施例中,生成偏移Tt曲线23,其中偏移值为零。在这里,在这个步骤还能够进行可选的偏移和缩放(幅度)调整24,以帮助补偿任何有损效果、例如热噪声的效果。

[0034] 在某些实施例中,如24处指示的,还可执行对比度曲线数据的高斯函数时间平滑。在一优选实施例中,通过下列步骤使高斯平滑算法中使用的“时间窗口”作为时间的函数变化:使它与对应于对比度数据的图像帧号Z成比例。本质上,这种平滑“窗口”控制半最大值的高斯全宽度(即,“ $2-\sigma$ ”宽度)。使用所述的可变宽度帧号平滑比传统高斯平滑更为有利,因为它趋向于补偿材料中不断增加深度的热扩散的效果。优选地,对于这个步骤,使选择的数据点的平滑窗口的宽度与那个点的图像帧号的平方根成比例。除了描述的可变宽度帧号高斯时间平滑之外,多个软件实现的“成像滤光器”也可在这个阶段应用于对比度曲线数据,包括空间平滑、初始和结束噪声抑制、负对比度抑制和对比度取阈值。

[0035] 随后,如 25 处指示的,将温度对时间曲线转换成 $\log(\text{temperature})$ 对 $\log(\text{time})$ 曲线。 $\log(\text{temp})$ 相对 $\log(\text{time})$ 的导数则可在方程 (12) 中计算 26 和示出。这允许确定 27 在导数曲线的最小值 (或者 T-t 数据曲线上的最大斜率) 处的时间、又称作拐点时间。

[0036] 在某些其它实施例中,确定指示拐点的对比度曲线的数学导数。众所周知,曲线上的最大斜率点能够通过使用常规 3 连续点导数算法来确定,其中对沿曲线的三个相等间隔的连续数据点进行取样,并且使用它们来计算第二 (中间) 数据点处曲线的斜率。按照本发明,三个点可用于确定对比度曲线的导数,但是第一样本导数点和第三样本导数点的分隔 (即,导数基本间隔的宽度) 经由图像帧号与图像演进的实时相链接。具体来说,使沿对比度曲线的任何选择的点的导数基本间隔的宽度与 IR 图像帧号 Z 的平方根成比例。

[0037] 这样,甚至在高噪声等级中也使信噪比 (S/N) 特性为最大。S/N 比的这种改进产生于对较大间隔的“取样”,并且因而检测最大信号变化而不是采用固定宽度 3 点微分传统地得到的微分变化。由于在样本点分隔等于全高斯宽度时得到最大 S/N 比,所以最大可能 S/N 比始终通过使用本发明的帧号比例宽度方式来取得。

[0038] 为了从获得于系统 10 的测量数据来确定涂层的厚度值,某些计算由处理器 16 来承担,其使用了如步骤 27 中确定的拐点时间结合由反射系数 R 定义的涂层的扩散率以及涂层的密度 ρ 和比热 C_c 。

[0039] 由于涂层的密度和比热在老化时没有明显改变,所以这两个值之积能够被看作是常数,如方程 (1) 所示:

$$[0040] \quad \rho c_c = \text{constant} \quad (1)$$

[0041] 如参照图 1 解释的,热波穿透涂层,并且从涂层 / 衬底界面反射,其中反射系数或反射率值 R 由方程 (2) 给出:

$$[0042] \quad R = \frac{E_c - E_s}{E_c + E_s} \quad (2)$$

[0043] 其中, E_c 和 E_s 分别是由下式给出的涂层“吸热系数”和衬底“吸热系数”:

$$[0044] \quad E_c = \sqrt{K_c \rho c_c} \quad E_s = \sqrt{K_s \rho c_s} \quad (3)$$

[0045] 其中, K_c 是涂层的热传导率,以及 K_s 是衬底的热传导率。在一个示例中,用于测量的单位包括用于密度 (ρ) 的 g/cm^3 、用于比热 c 的 $\text{cal}/\text{g}^\circ\text{C}$ 以及用于热传导率的 $\text{cal}/\text{s-cm}^\circ\text{C}$ 。

[0046] 在涂层表面处的涂层 / 衬底系统的温度 - 时间响应在闪光之后可在数学上表达为:

$$[0047] \quad T(t) = \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n e^{-n^2 \frac{\tau_c}{t}} \right) T_{1/2c}(t) \quad (4)$$

[0048] 其中, $T_{1/2c}$ 是涂层对闪光脉冲的“半空间”响应,由方程 (6) 给出, τ_c 是厚度 L 的涂层的“特征时间”,并且热扩散率 α_c 由下式给出:

$$[0049] \quad \tau_c = \frac{L^2}{\alpha_c} \quad (5)$$

[0050] 方程 (6) 和 (7) 中示出的半空间函数是在涂层或衬底的无穷“半空间”的表面处对热脉冲的“1/ 根时间 (one over root time)”温度响应。由方程 (4) 示出的响应函数将

t = 0 时由方程 (6) 示出的涂层半空间移动到 t = ∞ 时由方程 (7) 示出的衬底半空间。

$$[0051] \quad T(t) \rightarrow T_{1/2c}(t) = \frac{1.1284 I}{2E_c \sqrt{t}} \quad t \rightarrow 0 \quad (6)$$

$$[0052] \quad T(t) \rightarrow T_{1/2s}(t) = \frac{1.1284 I}{2E_s \sqrt{t}} \quad t \rightarrow \infty \quad (7)$$

[0053] 这可通过使用来自方程 (2) 的 R 的定义在 t → 0 和 t → ∞ 的极限中取方程 (4) 的无穷和来示出。

[0054] 在一个示例中, t = 0 附近的对数差定义为“deltalog”:

$$[0055] \quad \text{deltalog} = \log[T_{\text{coating}}(t=0)] - \log[T_{\text{substrate}}(t=0)]. \quad (8)$$

[0056] 从方程 (6) 和 (7), 根据 deltalogs 的涂层吸热系数对衬底吸热系数的比为:

$$[0057] \quad \frac{E_c}{E_s} = 10^{-\text{deltalog}}. \quad (9)$$

[0058] 反射率值也能够从 deltalogs 来定义:

$$[0059] \quad R = \frac{1 - 10^{\text{deltalog}}}{1 + 10^{\text{deltalog}}}. \quad (10)$$

[0060] 能够通过由方程 (4) 示出的 T-t 曲线进行微分, 并且将结果设置为零, 来从理论上得出时间上的拐点。然后, 对下面给出的方程 (12) 求解, 以通过使用变量“q”来找出最大斜率的时间点 (转折时间 (inflection time) “t_{inflection}”)。可注意到, “q”定义为:

$$[0061] \quad q \equiv \frac{\tau_c}{t_{\text{inflection}}} \text{ 或 } \tau_c = q t_{\text{inflection}} \quad (11)$$

[0062] 其中, τ_c 是涂层特征时间。

[0063] 求出“q”的方程表示为:

$$[0064] \quad q \left[\frac{\sum_{n=1}^3 R^n n^4 e^{-n^2 q}}{\sum_{n=1}^3 R^n n^2 e^{-n^2 q}} \right] - 2q \left[\frac{\sum_{n=1}^3 R^n n^2 e^{-n^2 q}}{1 + 2 \sum_{n=1}^3 R^n e^{-n^2 q}} \right] - 1 = 0 \quad (12)$$

[0065] 因此, 对方程 (12) 的输入是从方程 (10) 得到的 R 的值。又如图 3 中进一步示出的, R 可从涂层和衬底的材料性质来确定, 步骤 28, 并且按照方程 10 来计算。在某些实施例中, R 还可从获得自相同涂层和衬底组合以及闪光脉冲的先前实验数据来输入。然后可输入 R 的值, 以求出 q, 步骤 29。从方程 (12) 找出了变量 q 并且按照实验方式找出 T-t 曲线的拐点或转折时间 “t_{inflection}”, 转折时间则可在方程 (11) 中用于确定涂层特征时间 τ_c。

[0066] 涂层的热扩散率 α_c 定义为:

$$[0067] \quad \alpha_c \equiv \frac{K_c}{\rho c_c} \quad (13)$$

[0068] 从方程 (3) 的涂层吸热系数的定义中找到热传导率 K_c:

$$[0069] \quad K_c = \frac{E_c^2}{\rho c_c} \quad (14)$$

[0070] 由于 ρ c_c 从 (1) 已知并且 E_c 从方程 (9) 已知, 所以能够确定 α_c, 如通过方程 (13)

给出的。

[0071] 最后,步骤 30,涂层厚度 L 则从指示与所分析像素对应的分辨单元的位置处的对象的实际厚度的方程 (5) 来确定,如方程 15 所示:

$$[0072] \quad L = \sqrt{\alpha_c \tau_c} \quad (15)$$

[0073] 步骤 31,厚度值 L 可存储在处理器 16 的存储器中。然后选择下一个像素,如 31 指示的,并且对组成 IR 图像的各像素重复进行上面的步骤。

[0074] 对其它选择的像素重复该过程。在某些实施例中,存储的值可用于构建对象表面上的感兴趣区域的颜色映射图像或灰度级图像供显示或打印,各颜色或灰度阴影对应于具体厚度。除了上述步骤之外,为了精度和一致性,诸如扩散率常数、数据分析起始点和范围、时间平滑窗口大小范围、和颜色映射范围的多种参数值的输入和选择还通过系统控制计算机的适当常规编程来自动化。值得注意,由于这种方法“绝对”仅要求涉及的材料的热性质和描述的测量,所以不需要参考涂层标准。

[0075] 通过使用用于热数据获取和分析的上述步骤结合按照本发明的上述设备来进行瞬时热敏成像分析,甚至在可形成被测对象的一部分的近间距后壁或内部结构之间(例如,往往在涡轮机翼片中找到的类似肋条的结构(如图 1 和图 2 中描绘的))也能够精确地得到涂层厚度值,而使用传统热方法或超声方法,这种近定位的后壁结构通常产生失真数据,或者要求有损测试以获得精确测量。

[0076] 图 4 和图 5 示出使用图 1 中描述的设备的热敏成像分析的结果。采用 EBC 来喷涂陶瓷试样,以得到厚度大约为 0.02 英寸的涂层。有涂层的试样然后经受短持续时间闪光脉冲。图 4A 是使用该过程生成的参考图像,而图 4B 示出由生成图像中的不同灰度色调颜色指示的涂层厚度的变化。灰度色调对应于在图像右侧显示的图解比例尺厚度键码(key)中的相似颜色或阴影。如示出的,脱层(delamination)在左下方象限中发生;这往往是质量控制测试中的关键评估。选择试样上的单独像素点(图 4A),示为中心右侧的高亮的正方形,在这个区域的涂层厚度计算为 0.0212 英寸。选择的像素的拐点在图 5 中示为 $\log(\text{temp})$ 相对 $\log(\text{time})$ 曲线的导数的最小斜率点。使用这种方法,跨过整个部件精确地得到绝对涂层厚度值和变化。

[0077] 虽然本文仅示出和描述了本发明的某些特征,但本领域技术人员会想到多种修改和改变。因此要理解,所附权利要求书意在涵盖落入本发明的真实精神之内的所有这类修改和改变。配件表

[0078] 1 对象

[0079] 4 涂层

[0080] 10 设备(一般)

[0081] 11 闪光灯

[0082] 13 IR 阵列相机

[0083] 14 控制电子器件

[0084] 15 存储器

[0085] 16 处理器

[0086] 17 显示监视器

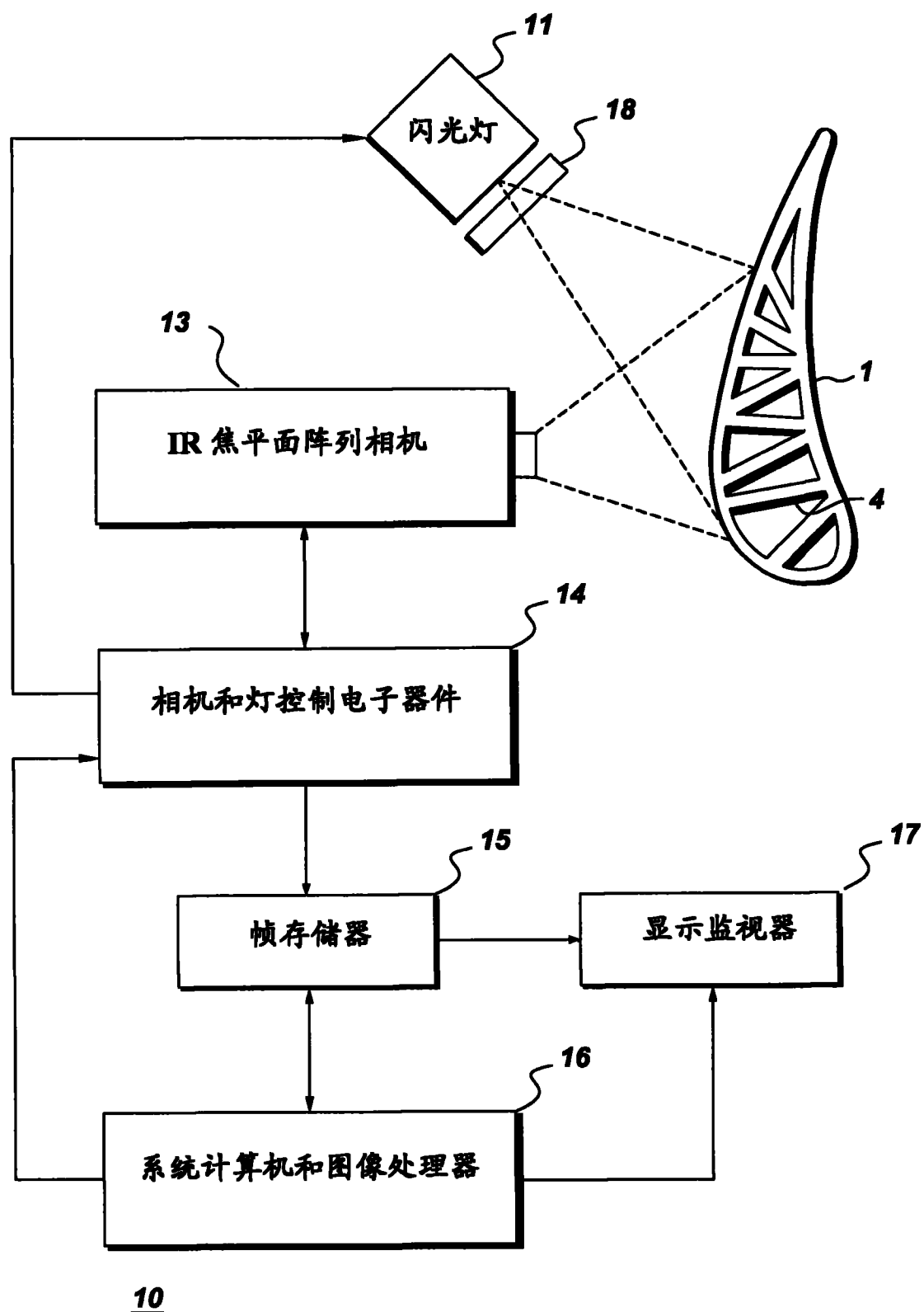


图 1

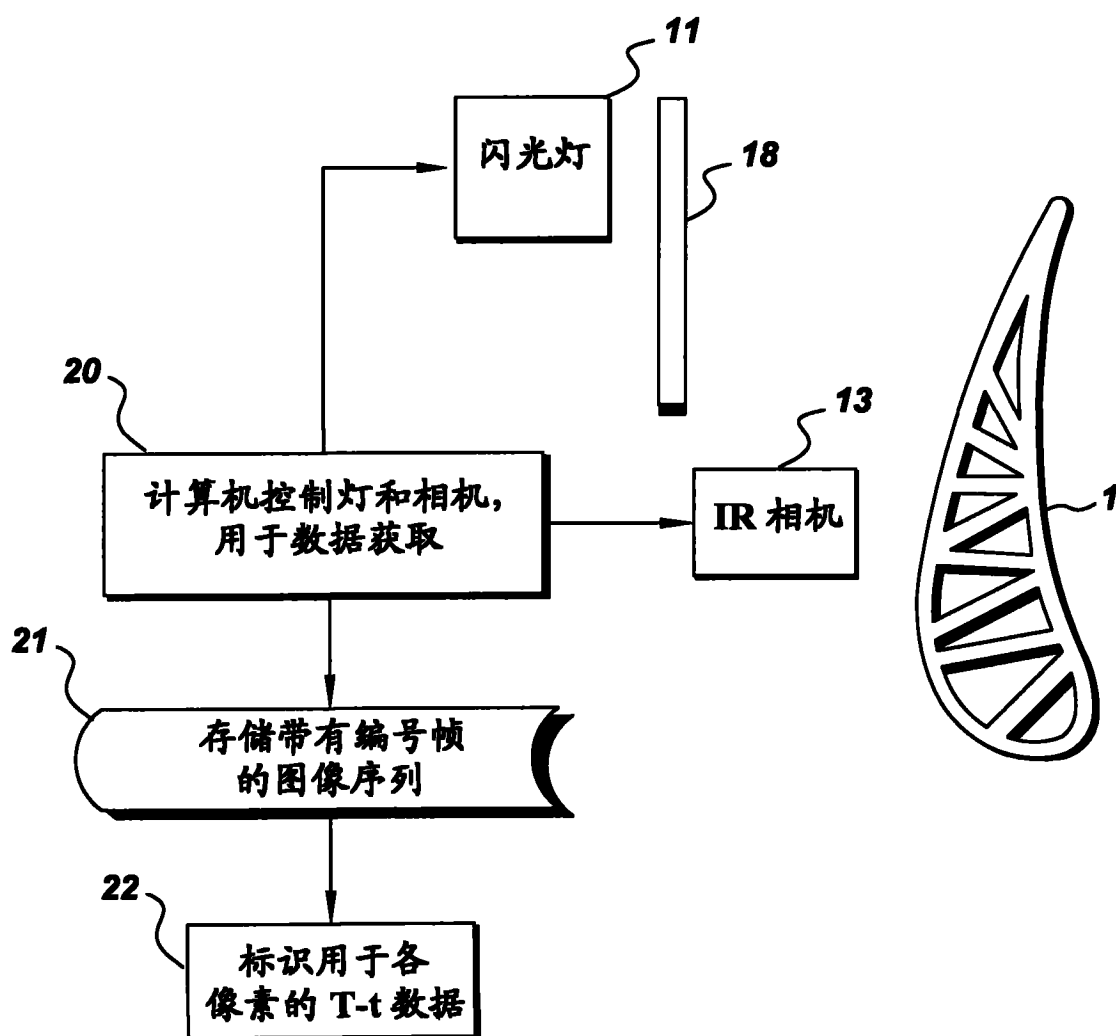


图 2

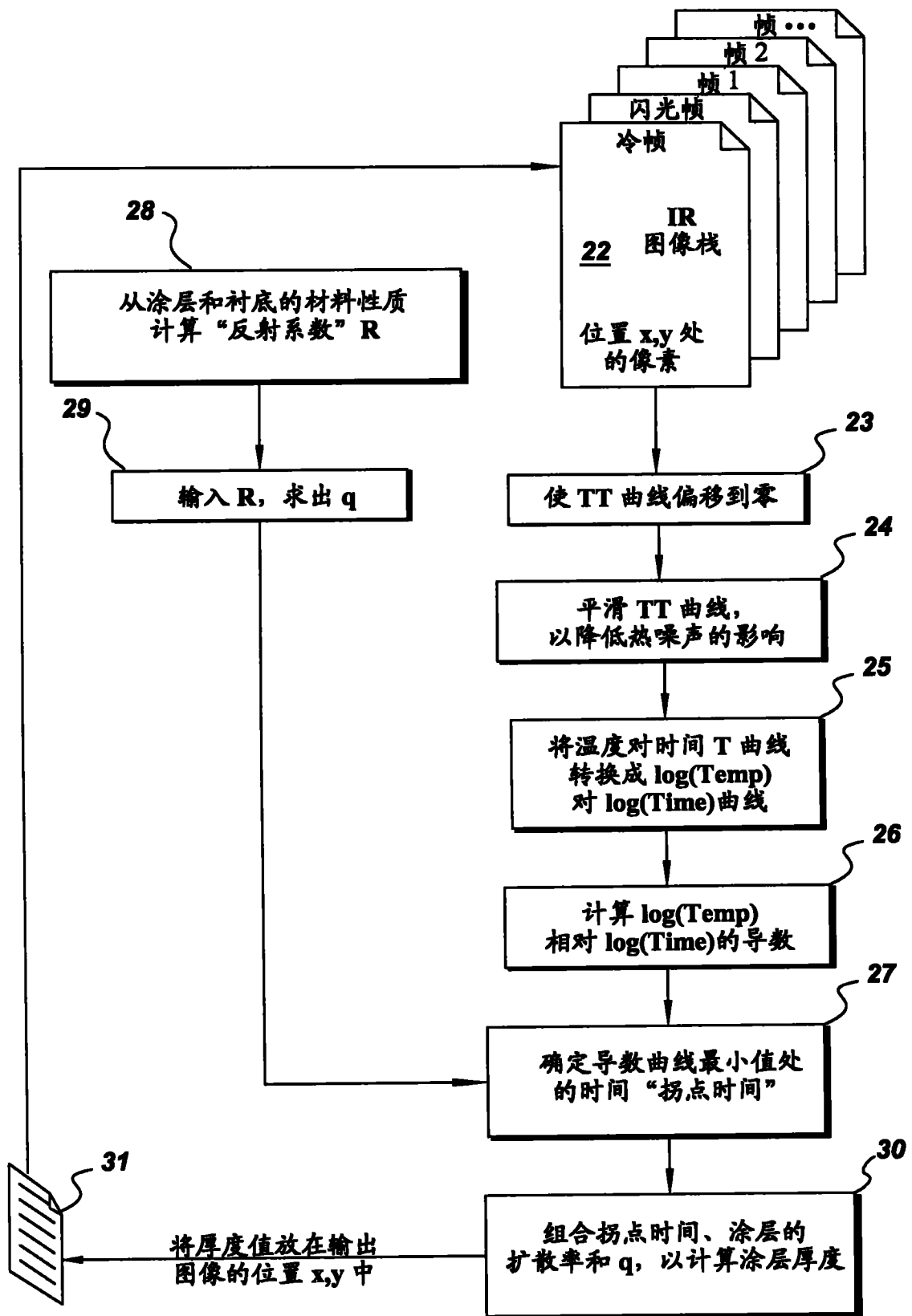


图 3

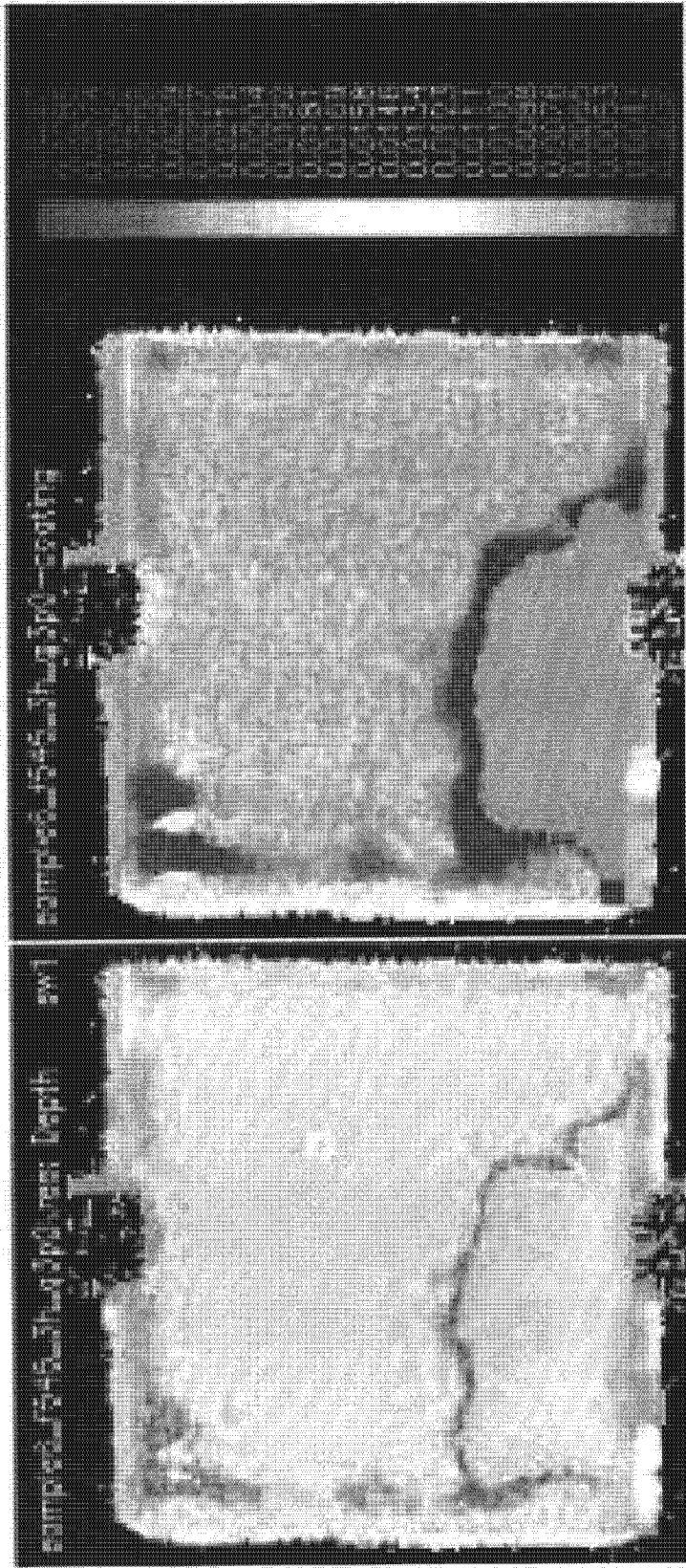


图 4B

图 4A

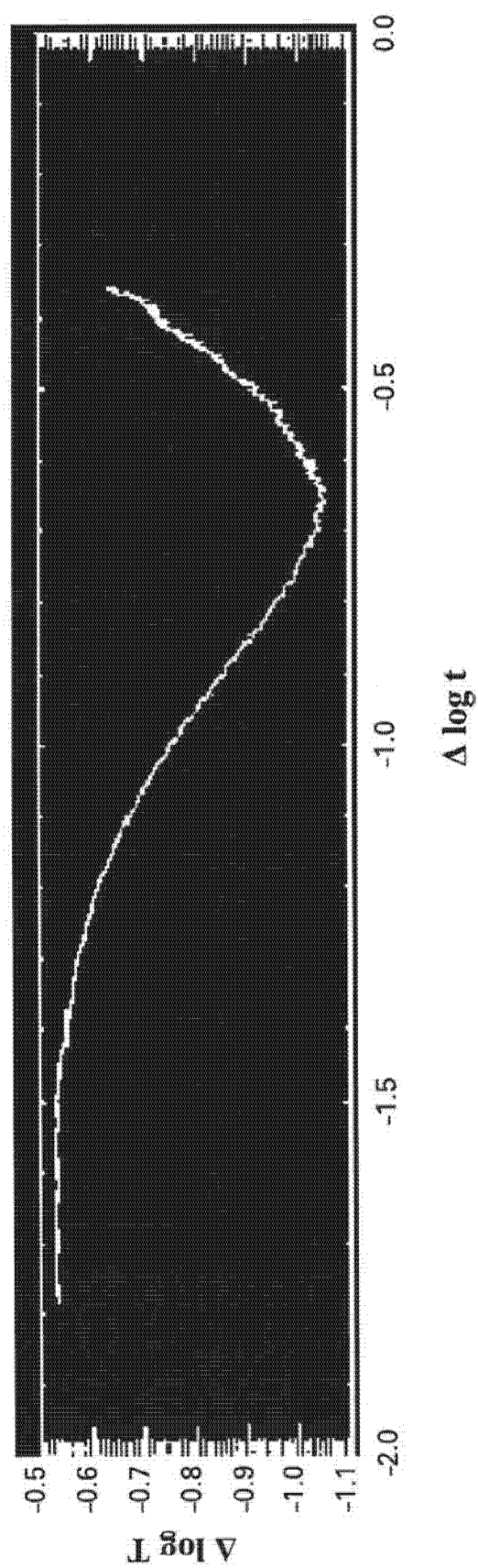


图 5