

复合材料 CT 检测的原理和应用

吴东流

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 介绍了复合材料 CT 检测、密度及微气孔含量三维测量的原理和方法,并利用在 PC 机上研制的软件,对断层扫描的图像数据进行三维重建、分析和测量,实验表明,CT 检测对复合材料内部缺陷的检测具有很好的分辨率,三维重建能够很好地显示密度的空间分布情况,CT 检测是目前最精确、有效的无损评价方法之一。

关键词 CT,无损检测,复合材料

The Method of Computer Tomography for Composite Materials

Wu Dongliu

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology Beijing 100076)

Abstract A method using Computer Tomography(CT) is introduced in the paper, to measure in three dimensions the physical density and porosity of composite materials. A software compatible with PC computer was developed to rebuild images in three dimensions for analyzing and measuring. It is indicated that CT method has a good resolution for composite inner defects inspect and can provide a clear density distribution by rebuilding of images. CT is considered one of the most accurate and effective NDT for composites.

Key words CT, NDT, Composite material

1 引言

计算机断层(CT)在复合材料研究中的应用已有十多年的历史,而这项工作的开展首先利用的是医用 CT 扫描装置,由于复合材料和非金属材料元素组成与人体相近,医用 CT 非常适合于复合材料和非金属材料内部非微观(相对于电子显微镜及金相分析)缺陷的检测及密度分布的测量,但医用 CT 不适合检测大尺寸、高密度(如金属件)的物体,为此 80 年代初,美国 ARACOR 公司率先研制出用于检测大型固体火箭发动机和小型精密铸件的工业 CT。

CT 的特点是:(1)高空间分辨率和密度分辨率(通常 $<0.5\%$);(2)高检测动态范围($1\sim 10^6$:从空气到金属材料)^[1];(3)成像的尺寸精度高,可实现直观的三维图像;(4)在有足够的穿透能量下,不受试

件几何结构的限制等。局限性表现为:检测效率低、检测成本高,双侧透射成像(相对于反射式 CT)、不适于平面薄板构件的检测以及大型构件的现场检测。基于 CT 的特点,其用途主要可归结为以下几方面:

- (1)非微观缺陷的检测(裂纹、夹杂、气孔、分层等缺陷检测);
- (2)密度分布的测量(材料均匀性、复合材料微气孔含量测量);
- (3)内部结构尺寸的精确测量(如发动机叶片壁厚测量);
- (4)装配结构和多余物检测;
- (5)三维成像与 CAD/CAM 等制造技术结合而形成的所谓反馈工程(RE)^[2]。

收稿日期:2000-04-06

吴东流,1964 年出生,高级工程师,主要从事复合材料无损检测研究工作

这些应用主要靠软件功能来实现,一般的 CT 扫描机并不具备所有适合于这些特殊要求的软件功能,为此我们研制了基于 PC 机上的三维重建分析测量软件,目的是用于对复合材料内部非微观缺陷的检测及密度分布的测量。图像数据来自于存储断层扫描图像数据(包括医用和工业扫描机)的软盘和数据流磁带,软件经过解压缩和转换将数据变成 PC 机兼容的格式。图像矩阵分别为 256 bit × 256 bit × 8 bit 和 512 bit × 512 bit × 16 bit,断层参数写于新文件开头。软件利用这些数据在 PC 机中进行三维重建,采用适当的功能对材料进行分析测量。

2 断层成像原理

能量为 E 的 X 射线束,以入射强度为 I_0 穿过厚度为 dx 的单质材料,由于材料对射线的吸收,使得射线强度衰减为 I 即:

$$I = I_0 e^{-\mu(x, Z, E) dx} \quad (1)$$

$$I_0 = c \frac{1}{r} i \cdot Z_l \cdot V^2$$

其中 X 射线线性吸收系数 μ 是材料物理密度、材料的复合原子序数 Z 、射线能量 E 的函数; i 为射线发生器电流, V 为加速电压, r 为焦点至材料的距离, Z_l 为靶材原子序数, c 为常数。

在 CT 重建理论中,卷积滤波反投影变换为目前最常用和最有效的二维断层重建方法之一,成像的原理是:平行束 X 射线穿过物体后,CT 扫描机探测器接受经衰减的强度信号 $I(l)$,它与物体在断层面(x, y 平面)上的射线线性吸收系数 $\mu(x, y)$ 的关系为(见图 1):

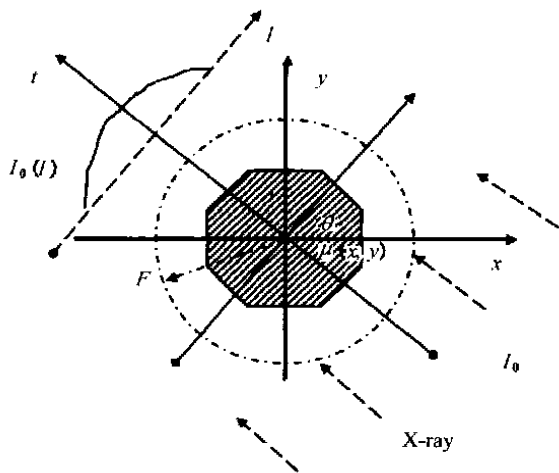


图 1 二维断层投影采样

Fig. 1 2-dimensional projection acquisition

$$\ln \left[\frac{I_0}{I(l)} \right] = \int_F \mu(l \cos \theta - t \sin \theta, l \sin \theta + t \cos \theta) dt \quad (2)$$

卷积滤波反投影变换重建后:

$$\mu(x, y) = \int_0 \left[\ln \left(\frac{I_0}{I(l)} \right) * q(l) \right] dl \quad (3)$$

$$\ln \left[\frac{I_0}{I(l)} \right] * q(l) = \int_{-F}^F \ln \left[\frac{I_0}{I(l-l)} \right] q(l-l) dl$$

其中 $q(l)$ 为滤波窗口函数。

(3) 式表明,由 CT 扫描机扫描的数据经重建后形成二维断层图像,图像像素值(CT 值 D)由材料的 X 射线线性吸收系数 μ 决定,但由于以下原因,CT 值并不能直接表示 μ : (1) 在实际检测过程中,射线波长往往分布在一定范围内(除 X 射线外),并非具有单一波长,当射线通过物体后,不同波长对应不同衰减(μ 是射线能量 E 的函数),从而产生射线硬化效应^[3]; (2) 射线接收器非线性增益; (3) 散射线对接收器信号的影响^[3]等。通过射线硬化校正、射线准直和散射线屏蔽、增加接收器线性等手段,可以尽量减小这些因素的影响。

通常(特别是医用 CT)习惯用 Hounsfield 密度单位 HD 来描述 CT 值:

$$HD = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} K \quad (4)$$

式中: μ_0 为参考材料的 X 射线线性吸收系数,通常选择水为参考吸收材料; K 为常数,取决于不同的断层扫描机^[4]。试验表明,在经过通过射线硬化处理后,CT 值与吸收系数 μ 基本呈线性关系,计算值与测量值非常接近(见图 2),测量值与计算值的最大偏差为 0.04 cm^{-1} 。

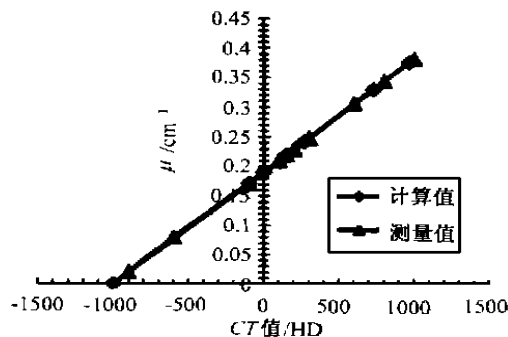


图 2 CT 值与线性吸收系数 μ

Fig. 2 CT value and linear attenuation coefficient μ

试验采用 GE—ND8000 CT 扫描机(140 kV),用 10 种不同线性吸收系数的材料(包括 Teflon、石墨、碳环氧、聚乙烯等)进行实际测量,并利用(4)式计算出相应的 CT 值($\mu_0 = 0.191 \text{ cm}^{-1}$ 、 $K = 1\ 000$)。

3 检测理论分析

μ 与三种光子和物质的相互作用过程有关:(1) 光电吸收 μ_T ;(2) Compton 散射 μ_C ;(3) 电子对效应 μ_E 。

$$\mu = \mu_T + \mu_C + \mu_E \quad (5)$$

当射线能量超过 0.1 MeV(100 kV),光电吸收的概率降低,高能射线很少产生光电吸收;射线能量在 0.1 MeV ~ 1 MeV(100 kV ~ 1 000 kV),Compton 散射是材料的主要衰减过程;射线能量超过 4 MeV(4 000 kV),电子对效应成为主要衰减过程(见图 3)^[5]。

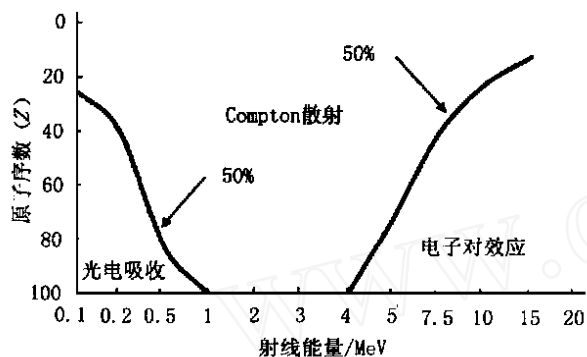


图 3 射线衰减过程

Fig. 3 Attenuation process of ray

质量吸收系数 $\mu_m = \mu / \rho$,取决于每个原子对光子作用总截面 σ_a ,由于每一个原子有 Z 个电子,为此可以用每个电子对光子作用截面 σ_e 来表示总截面 σ_a :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \left(\frac{N_A \cdot Z}{A} \right) \sigma_e \quad (6)$$

式中 N_A 为 Avogadro 常数; A 为材料的原子质量。

除了氢元素之外,对所有元素, $(N_A \cdot Z)/A$ 近似等于 $N_A/2$, μ_m 与 σ_e 成正比。

同样, σ_e 也与三种光子和物质的相互作用过程有关:

$$\sigma_e = \sigma_T + \sigma_C + \sigma_E \quad (7)$$

对于复合材料和非金属材料,原子序数较低,如碳和玻璃纤维增强复合材料、碳/碳材料、橡胶材料等,在扫描成像过程中通常使用的射线能量范围在

60 keV ~ 140 keV,此时 Compton 散射对总的吸收系数的贡献最大;其中 μ_T 所占比例平均小于 10%; μ_C 所占比例平均大于 80%;即使对于铝、镁、钛等轻金属材料,在 100 keV ~ 200 keV 范围内, μ_C 所占比例为 50% ~ 90%^[6]。

Compton 散射过程中,光子与物体中原子的外层电子(自由电子)发生弹性碰撞,光子的能量(波长)发生改变,并偏离原入射方向以散射角 θ 向某一方散射出去。

由于光子能量在散射后会发生变化,Compton 散射为非弹性散射过程,散射光子能量分布是散射角的函数,可以根据碰撞过程能量守恒和动量守恒方程,推导出散射光子能量分布和波长变化(见图 4):

$$E = \frac{E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2} \right) (1 - \cos \theta)} \quad (8)$$

其中 E 为散射光能量; E_0 为入射光能量; m_e 、 c 为电子静止质量和光速; θ 为散射角。

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (9)$$

其中 λ 为散射光子波长; $\lambda_0 = h / m_e c = 0.002\ 41 \text{ nm}$ 。

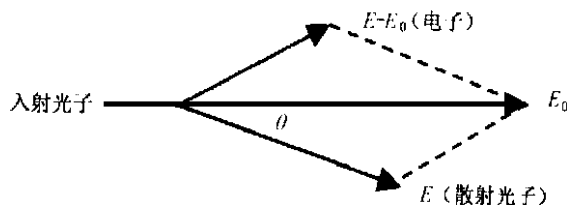


图 4 Compton 散射动量守恒

Fig. 4 Process of compton scattering

光与自由电子的微分散射截面(见图 5),可由经典电动力学理论给出:

$$\frac{d\sigma_e(\theta)}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{r_e}{\lambda} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{2} (1 - \cos \theta) \right) \quad (10)$$

其中 $r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$; r_e 为常数(电子的经典半径)。

式(8) ~ 式(10)表明:Compton 散射与具体材料无关, σ_e 、 r_e 为常数,散射光子随着散射角的增加,

光子能量减少,波长增加。

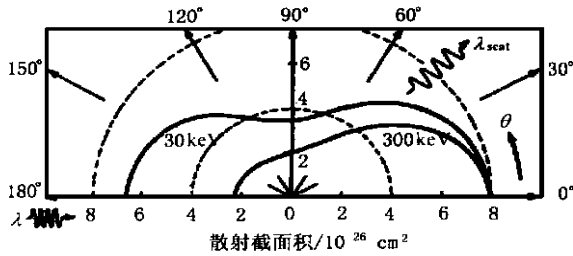


图5 Compton 微分散射截面

Fig. 5 Compton differential scatter cross section

由式(4)~式(7),得出:对于原子序数较低的复合材料和非金属材料,铝、镁、钛等轻金属材料,射线线性吸收系数 μ 与材料物理密度 D 成正比;CT值代表材料物理密度:

$$\mu, D \propto \mu; \quad D \quad (11)$$

复合材料的纤维体积分数 V_f 、孔隙的体积分数 V_v 是影响复合材料性能的重要参数,由于 CT 扫描的密度分辨率高(可以达到 $<0.2\%$)^[11],可精确测量材料的纤维体积分数和孔隙的体积分数,这也是其重要应用之一。

$$\begin{cases} V_v = 1 - \frac{c}{c_0} = 1 - \frac{D_c}{D_{c0}} \\ V_f = \frac{c - (1 - V_v)m}{f - m} \end{cases} \quad (12)$$

式中 c_0 为复合材料标准试样的密度, c 为复合材料实际测量密度; D_{c0} 为复合材料标准试样的 CT 值, D_c 为复合材料实际测量 CT 值; f 、 m 分别为纤维和树脂的质量密度。

4 三维重建

三维重建的目的是为了更好地实现检测的特殊要求:(1)便于缺陷空间形状、特定密度组分的观察;(2)可以实现任意截面密度和内部结构尺寸的精确测量,是实现 RE 检测的前提;(3)提高检测效率。

有两种方式构造三维重建数据模式:(1)断层插值构造三维数据体,插值方法直接影响三维数据的可靠性和尺寸精度,有效的插值方法可以很好地消除层与层间的几何畸变和不连续性,通常扫描宽度和扫描间隔越小、扫描层数越多,数据越接近实际;(2)锥形束三维重建,这虽然是一种快速高效的方法,但由于锥形束所引起的数据畸变,限制了方法的
宇航材料工艺 2001年 第1期

实际应用,只有在锥形角被限制在很小范围内,数据才可以使用^[7]。两种方法所用的手段不同,但得到的结果是相同的。

三维投影显示:在三维模式下的像素值: $D = f(x, y, z)$;任意一个方向的三维投影可由矩阵 (X) 到矩阵 (X') 的平移和旋转给出。平移从 $O(0, 0, 0)$ 到 $A(X_A, Y_A, Z_A)$,旋转矢量为 $V(V_1, V_2, V_3)$,见图6。

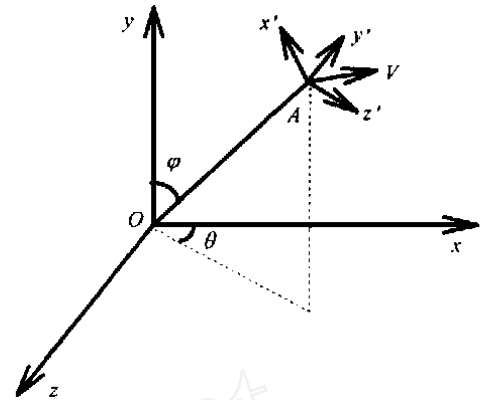


图6 柱坐标下相关角 θ 、 ϕ 及矢量 V 的关系

Fig. 6 Relation between θ , ϕ and V

$$X' = X \cdot R_T, \quad X = [x, y, z, l]; \quad X' = [x', y', z', l']$$

$$R_T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & 1 \end{bmatrix}$$

R_T 由旋转矩阵、平移矩阵 T 和其逆矩阵 T^{-1} 给出:

$$R_T = T^{-1} \cdot R^* \cdot T$$

其中:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_A & y_A & z_A & 1 \end{bmatrix}$$

R^* 由 5 个 3×3 矩阵产生。

$$R^* = R_z^{-1} R_y^{-1} R_V R_y R_z$$

$$R_V = \begin{bmatrix} \cos & \sin & 0 \\ -\sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中: α 为 R_V 矩阵产生的绕矢量 V 旋转的角

度。旋转矩阵 R_y 、 R_z 和它们的逆矩阵 R_y^{-1} 、 R_z^{-1} 由矢量 V 在柱坐标下给出:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos & 0 & -\sin \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin & 0 & \cos \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos & \sin & 0 \\ -\sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = f(x, y, z) \cdot T_s(V_{HDS}, V_{HDE})$$

式中: $T_s(V_{HDS}, V_{HDE})$ 为阈值函数, 它允许在任何 CT 值范围内进行三维重建。

二维断层检测, 扫描宽度和扫描间隔使得断层

具有不连续性, 受扫描方向的限制, 断层只能在一个方向上平行排列; 通过三维成像, 可以观察缺陷空间形状、特定密度组分的空间分布, 实现了对任意截面密度和内部结构尺寸的测量, 解决了二维断层成像的扫描断层方向和断层不连续性对检测的限制。

5 应用实例

图 7 为碳/环氧板矩形缺口拉伸试样 (88 mm × 33 mm × 6 mm), 在拉伸实验后, 试样损伤情况的 CT 断层扫描检测结果, 在 6 mm 厚度范围内, 每隔 0.5 mm 重建一层, 共重建 12 层 (No. 1 ~ No. 12); 经分析测量软件处理后, 可以看到矩形缺口周围由于应力损伤所造成的微小密度变化分布 (不同的灰度代表不同的密度)。

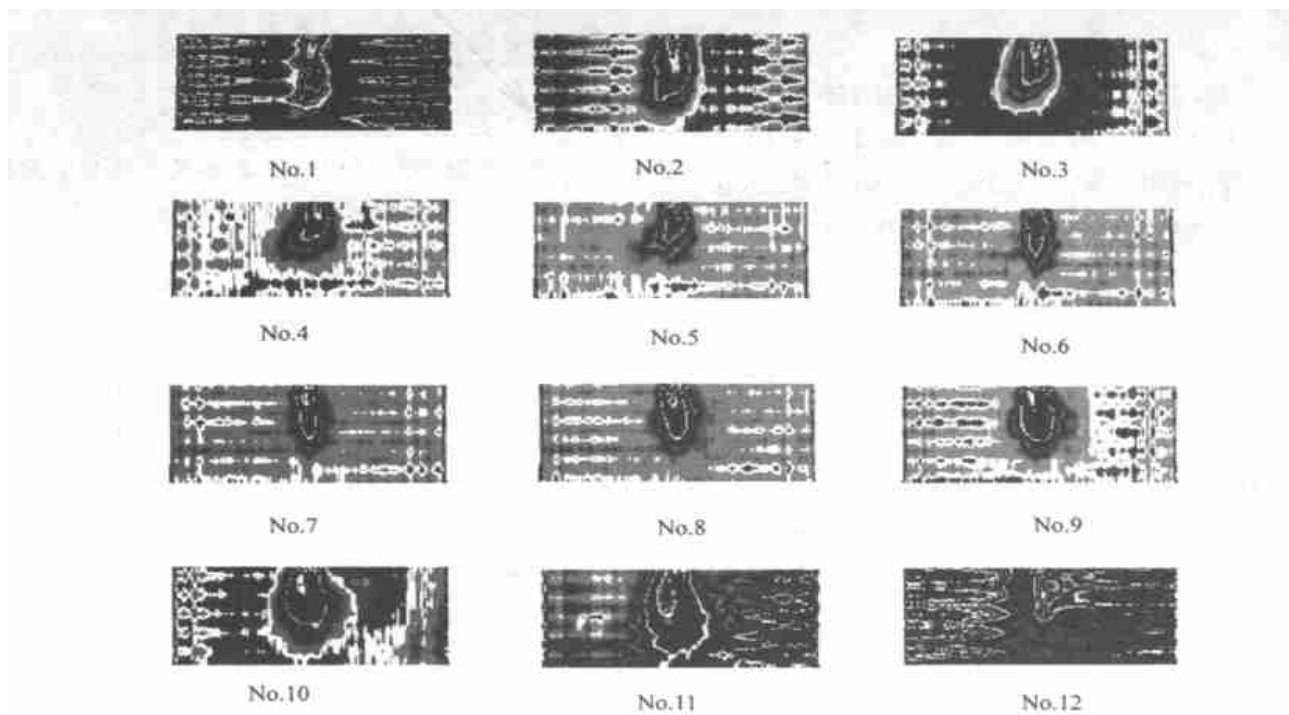


图 7 碳/环氧板矩形缺口拉伸试样的三维重建结果

Fig. 7 3D rebuild of C/E tensile specimen with rectangular notch

图 8 显示圆盘状 Al_2O_3 压铸金属基复合材料 CT 扫描及三维重建结果, CT 扫描方向与圆盘面平行, 共扫描了 5 层 (No. 1 ~ No. 5, 图中只列出 No. 2 ~ No. 4)。从图中可以看出有 5 个疏松区域及密度分布曲线; 通过三维重建显示 (No. C1 和 No. P1, 重建位置在图中左下角标出), 可以非常直观地确定这些

疏松区域在厚度方向的形状和密度分布。

图 9 显示的试样由铝合金、陶瓷和橡胶构成, 形状为锥台形, CT 扫描给出了这种复合构件的断层图像, 共扫描 10 层 (No. 1 ~ No. 10, 图中只列出 No. 1 ~ No. 3、No. 8 ~ No. 10), 三维重建分别给出了铝和陶瓷的空间结构及分布情况。

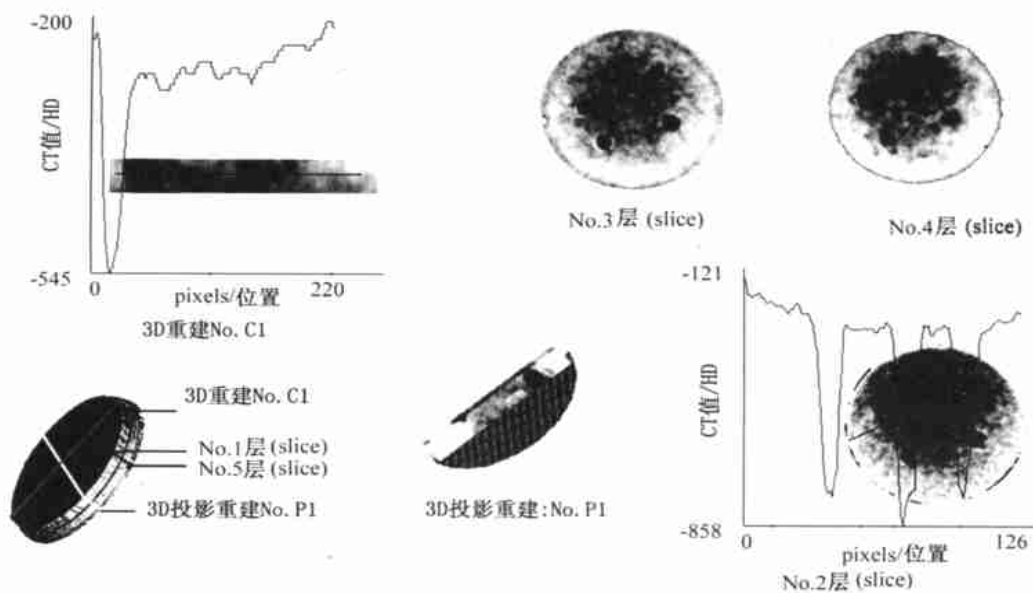


图8 Al_2O_3 压铸金属基复合材料 CT 检测结果

Fig. 8 3D rebuild of Al_2O_3 ceramic preform reinforced MMC

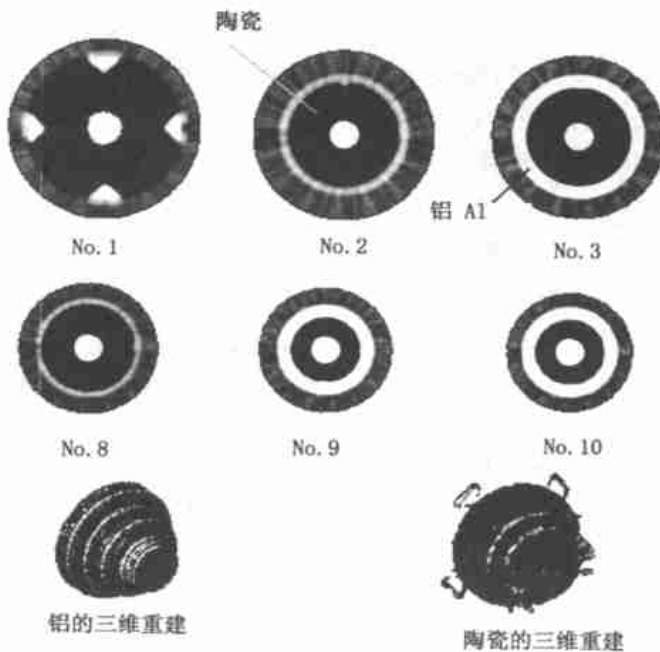


图9 铝、陶瓷、橡胶复合构件的 CT 检测结果

Fig. 9 3D rebuild of Al ceramic and rubber composite structure

6 结论

(1) CT对复合材料缺陷的检测具有很高的分辨率和尺寸测量精度,是目前最为精确、可靠的无损评价手段之一。

(2) CT检测的物理内涵是给出被扫描物体断层内,射线线性吸收系数的二维空间分布;对于复合材料和一些非金属材料,CT值表征了材料的物理密度,通过对密度分布的测量,为研究复合材料密度均匀性、微气孔体积分数,提供了方便、有效的手段。

(3) 三维成像检测,可以观察缺陷空间形状、特定密度组分的空间分布,实现了对任意截面密度和内部结构尺寸的测量,解决了二维断层成像的扫描断层方向和断层不连续性对检测的限制,是一种非常重要的计算机辅助评价手段。

(4) 透射式断层检测的局限性主要表现为检测成本高,检测效率相对较低,双侧透射成像(相对于反射式CT)不适于平面薄板构件以及大型构件的现场检测。

致谢 本文所用软件是作者1993年在法国CNAM学院完成的,参加此项工作的还有C. Bathias教授和F. Potter先生,特此致谢。

参考文献

- 1 Armistead A. CT:Quantitative 3-D inspection. *Advanced materials & processes inc. Metal Progress*,1988;133(3):42~48
- 2 Cloaudia V, Kropas-Hughes, Trent Neel S. Basic of computed tomography. *Materials Evaluation*. 2000; 58(5):633
- 3 ASTM Standard E1441 - 93. *Standard Guide for Computed Tomography(CT) Imaging*,1993
- 4 Sivers E A. Performance of X-ray computed tomographic imaging system. *Materials Evaluation*. 1990;48(6):706~712
- 5 Bryant E. 美国无损检测学会. 美国无损检测手册(射线卷). 1992:329
- 6 Bryant E. 美国无损检测学会. 美国无损检测手册(射线卷). 1992:1 031~1 042
- 7 Jan M L, Chen C Y, Yeh C K, Yeh T R, Wang M T. 3D image reconstruction using cone beam tomography. *NDT & E International*, 1994;27(2):83~87

(上接第41页)

5 结论

(1) 喷射沉积制备的2618铝合金组织均匀,为极细小的等轴晶粒,适合半固态成形。

(2) 喷射沉积制备的2618铝合金坯料在二次加热过程中,仍保持等轴晶粒,并经20 min加热后,晶粒没有明显长大。喷射沉积制备的2618铝合金可以满足目前条件下的半固态触变成形的要求。

(3) 通过电阻炉加热、半固态挤压铸造的方法成功地试制了摩托车某零件。

参考文献

- 1 Flemings M C. Rheological behaviour of Sn - 15pct Pb in the crystallization range. *Metallurgical Transactions A*, 1991;22A(5):957~981
- 2 Midson S P. In: The commercial status of semi-solid casting in the USA eds. Kirkwood D H and Kapranos P, the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Compositions, the University

of Sheffield, England, 1996, UK: The Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996: 251~255

- 3 Kyonka C. In: Status of semi-solid metalworking at alumax eds. Kirkwood D H and Kapranos P, the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Compositions, the University of Sheffield, England, 1996, UK: The Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996: 256~259

- 4 Moschini R. In: Manufacture of automotive components by semi-liquid forming process. *Proceedings of the 2nd International Conference of the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Cambridge, 1992: 149~158

- 5 苏华钦,朱鸣芳,高志强. 半固态铸造的现状与发展前景. *特种铸造及有色合金*, 1998(5): 1~6

- 6 王祝堂. 铝合金零件的半固态模锻. *铝加工*, 1995; 18(2): 50~55

- 7 毛卫民,赵爱民,钟雪友. 半固态金属成形应用的新进展与前景展望. *特种铸造及有色合金*, 1998;(6):33~36