

X射线分层层析成像技术及在航空航天领域的应用*

傅 健^{1,2},张昌盛¹,朱国港¹,王丙阳³,袁生平⁴,江柏红⁵

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;

2. 北京航空航天大学北航江西研究院,南昌 330096;

3. 中国航空制造技术研究院,北京 100024;

4. 航天材料及工艺研究所,北京 100076;

5. 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

[摘要] X射线分层层析成像(Computed Laminography, CL)是一种先进的非接触式无损三维检测技术,能以高分辨率图像的形式直观地三维可视化板、壳产品内部结构与缺陷,弥补了传统计算机层析成像(Computed Tomography, CT)技术的不足。航空航天领域存在较多的诸如太阳能帆板、水平尾翼、发动机涡轮盘、叶片以及微电子芯片等板、壳类零部件。对其内部损伤与缺陷进行有效的无损检测与评价,是航空航天器飞行安全的重要保障。以航空航天板壳结构CL无损检测应用和笔者在此方面的工程实践为背景,简述了CL技术原理和特点,总结了其研究现状,分析了其关键技术和难点,并展望了其应用前景。

关键词: 板壳结构; 无损检测; X射线检测; 分层层析成像; 碳纤维增强复合材料

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.049



傅 健

教授、博导,长期从事X射线成像数理基础研究及仪器设备开发应用,获得教育部新世纪优秀人才、北京市科技新星等奖励。

X射线成像是5大常规无损检测方法之一。近年,随着X射线探测器技术和数字图像处理技术的进步,X射线数字成像技术开始得到普及应用。作为高端X射线数字成像技术的一种,计算机层析成像技术(Computed Tomography, CT)克服了传统数字透照成像存在的三维结构二维投影成像深度信息缺失问题,可实现产品内外型面与损伤、缺陷的高精度定性定量无损检测评价与三维建模分析,在高端装备制造业应用前景广阔。但受成像原理制约,CT

* 基金项目: 国家重大科技专项(2018ZX04018001); 国家自然科学基金项目(11574023); 国家自然科学基金委员会-中国科学院大科学装置联合基金(U1432101)。

技术难以对长宽厚度比较大的板、壳结构实施有效的检测。

从米级尺寸的卫星太阳能帆板、复合材料水平尾翼、鸭翼、垂尾、航空发动机风扇叶片,到中等尺寸的涡轮盘、片以及厘米级的微电子封装芯片,航空航天领域存在较多的板、壳类零部件。受材料技术、制造工艺及复杂极端工况的影响,这些零部件内部常存在裂纹、气孔、夹杂、异物等损伤和缺陷。因这类零部件失效导致事故时有发生,如何可靠检出这些损伤、缺陷,进一步提高航空航天器的可靠性与飞行安全,已成为航空航天领域亟待解决的重要问题。

随着X射线成像理论与硬件条件的进一步完善和提高,为克服CT

技术在板壳结构成像检测方面的不足,国际上发展了一种分层层析成像(Computed Laminography, CL)技术。它是一种先进的非接触式无损三维检测技术,既继承了CT高分辨率三维无损成像的优点,又克服了CT在异型结构检测方面的难题,能以高分辨率图像的形式直观地三维可视化板、壳产品内部结构与缺陷。

本文以航空航天领域板、壳结构零部件的无损检测需求为背景,结合笔者在此方面的工程实践,简述了CL成像原理和技术特点,总结了其研究现状,分析了其关键技术和难点,并展望了其应用前景。

X 射线计算机层析成像

X 射线计算机层析成像 CT 技术是 X 射线与物质相互作用物理学原理与数学逆问题求解理论的完美结合。自 20 世纪 70 年代 X 射线 CT 发明以来,医学领域已发展了 5 代。工业领域也逐步进入了以圆轨道锥束扫描为代表的三维 CT 成像时代,无论是成像效率还是分辨率,都有了巨大飞跃。虽然数理基础一致,但工业 CT 迥异于医学 CT,其面对的检测对象种类繁多,材料、结构千差万别,X 射线成像特性差异化显著,挑战巨大,定制化开发已成为一种常态。

图 1 所示为 X 射线 CT 系统的典型构成,包括硬件和软件两部分。物体在成像过程中被 X 射线锥束覆盖,程控旋转;在每个旋转角度,探测器采集三维物体的二维投影,形成投影序列;最后根据重建算法从采集的投影序列中重建出物体的灰度映射三维图像。

受成像原理制约,X 射线 CT 面向工程实际应用时面临的一个主要挑战即是板、壳类零部件的成像检测问题。图 2 所示,当对长宽厚度比大的板、壳结构进行 CT 扫描成像时,将产生如下两个突出问题。首先,

样品在不同旋转扫描角度下,透照厚度变化剧烈,散射和硬化等问题将导致成像失败或不可接受的成像质量;其次,如果样品尺寸过大超出成像视场,不仅会造成物体碰撞,也将破坏数据完备性,难以得到正确的成像结果。

X 射线分层层析成像

经典 X 射线分层成像法^[1]基于射线源、探测器和物体的相对运动。如图 3(a)所示,射线源和探测器同时沿圆周运动;或者如图 3(b)所示,沿相反方向平移。物体内部质点的

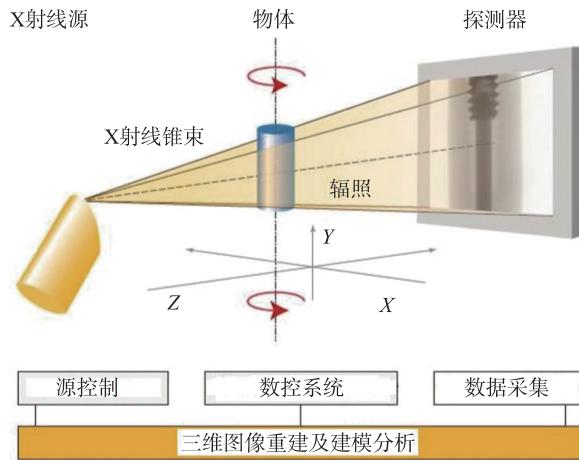


图1 X射线锥束CT成像系统

Fig.1 Configuration of a typical cone-beam X-ray CT system

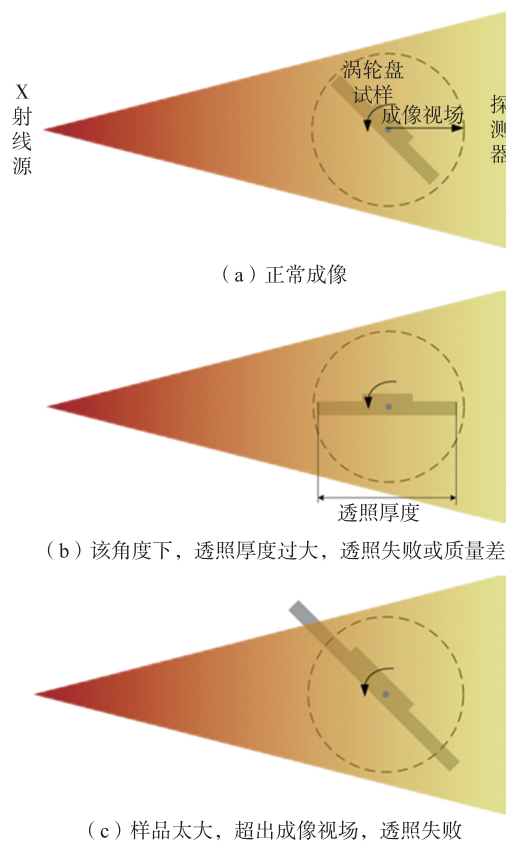


图2 CT检测板壳结构的局限性

Fig.2 Limits of plate-shell objects CT inspection

投影位置随着射线源和探测器的相对运动而变化,只有某个特定平面即焦平面上的质点,总是投影在探测器上同一位置,因此能清晰成像;而物体内部焦平面以外的部分则总是投影在不同位置,因此这些质点无法清晰成像,而是作为背景强度叠加在焦平面投影上。

经典分层层析成像存在如下有明显缺点:

- (1) 背景强度会减小成像分辨率;
- (2) 机械扫描系统复杂;

(3) 每次扫描只有一个特定深度的平面能清晰成像,其他平面则需要通过移动物体进行检测。

1995年,德国夫琅禾费无损检测技术研究所(IZFP)研发了CL成像技术^[2],使用可以数字化存储一系列不连续投影的数字探测器取代了老式探测器,克服了经典分层成像法需要多次分层、逐次成像的缺陷。

CL主要有3种数据获取扫描方式,即直线型、螺旋型和旋转型。扫描时间和重建图像质量是扫描重建

的两个关键因素。直线型扫描需要的时间短,但是由于其三维傅里叶空间包含信息较少而难以重建出清晰图像;螺旋型扫描能从三维傅里叶空间获得较多信息,但是需要的扫描时间长;而旋转扫描既能节省扫描时间又能改善重建图像质量,因此基于旋转扫描方式的CL工程应用较多。

CL成像基本原理与CT类似。来自X射线源的锥束X射线在各空间角度下,对被检测物体实施透照扫描,探测器记录对应位置的二维投影图像,形成获得一组由二维X射线图像构成的投影序列;然后,采用解析或迭代的图像重建算法,从投影序列中恢复出物体检测区的三维X射线衰减系数空间分布映射图像。

图4所示为旋转型X射线CL系统的典型结构。系统构成与经典

CT系统基本一致。二者的区别在于扫描机械系统,这也是CL优势所在。传统CT扫描中,系统旋转轴与Z轴成90°夹角,物体水平截面与Z轴平行;而在旋转型CL中,系统旋转轴与Z轴夹角小于90°,物体水平截面不再与Z轴平行。显然,从扫描结构上,CT可以看作是CL的一种特殊情况。

如图5所示,由于这一夹角小于90°,使得CL既避免了CT在检测板、壳结构时存在的透照厚度不均问题,又减小了透照厚度。当这一夹角设置为45°时,板、壳样品在周向旋转过程中,被X射线透照的厚度将保持一致,从而实现板、壳结构高质量三维层析成像检测。

CL技术的发展及应用

1932年,Plantés^[1]首次实现了

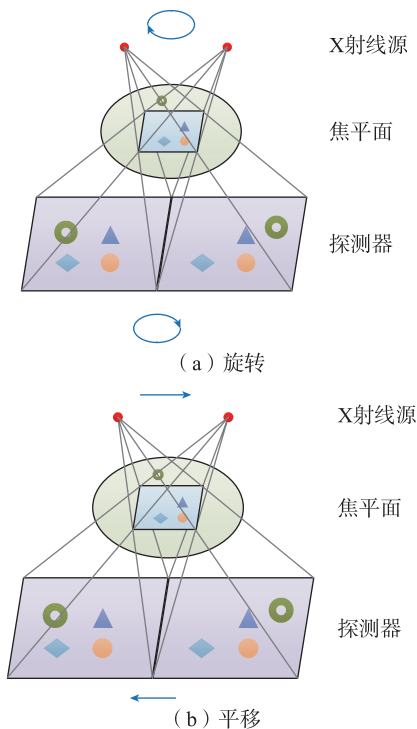


图3 经典分层层析成像原理

Fig.3 Principle of classical laminography

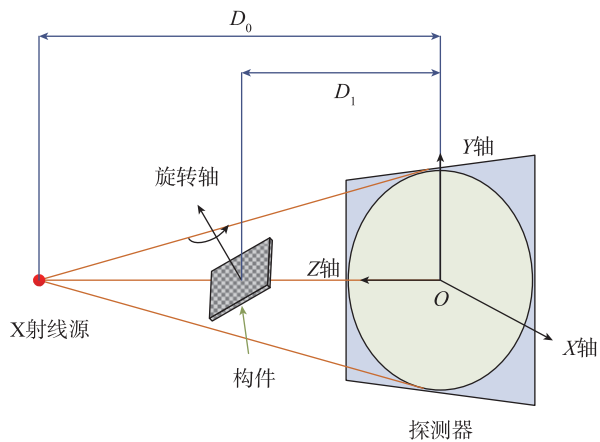


图4 CL旋转结构几何布局

Fig.4 Geometrical layout of rotational CL

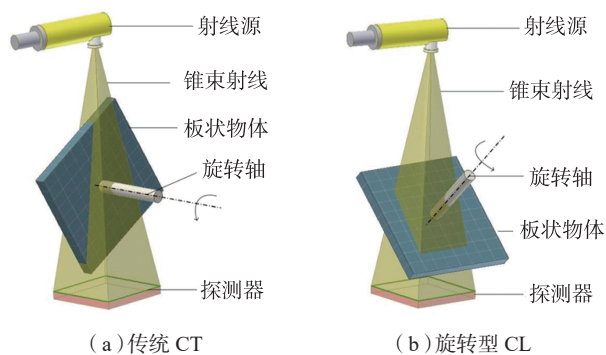


图5 CL检测板壳结构的优势

Fig.5 Features of plate-shell objects CL inspection

分层层析成像,可获得样品内部损伤缺陷的深度信息,但成像质量不高、过程复杂、效率低。60多年后,德国学者 Ewert、Zhou 以及 Feiste 等基于数字面阵 X 射线探测器各自独立实现了 CL 成像^[2-7],克服了传统分层层析成像的技术瓶颈,并在铝合金焊缝和微电子芯片 BGA 缺陷检测方面得到成功应用,极大释放了 CL 的工程应用潜力。此后,CL 在成像理论、系统及应用等方面得到大量研究。

下面是两个 CL 技术在航空航天领域的代表性应用实例。2012 年,德国 BAM 学者 Ewert 等^[8]报道开发了一套用于大型飞机碳纤维增强复合材料(CFRP)壁板的分层层析系统 TomoCAR,通过了空中客车公司的测试和认证,如图 6 所示。该 CFRP 板、壳结构尺寸达到了 3m×9m。TomoCAR 采用了直线扫描方式获得 T 型桁条检测区的投影数据,成功检测了 87 个连接部位,总长合计 14m,检出了裂纹等损伤缺陷。在 95% 的置信度情况下,裂纹可见性概率大于 90%。图 7 展示了检出的裂纹及其对应的显微镜图像。

2018 年,Wood 等^[9]报道开发了一套用于航空航天大型 CFRP 板、壳结构检测的机器人 CL 系统,如图 8 所示。它使用了六足平台、六轴机械臂等最新的机械扫描系统和 SIRT 迭代图像重建算法,可实现多种定制的扫描运动轨迹和高质量三维成像。图 9 展示了该系统原理性试验验证结果。检测对象为一块大小为 300mm×300mm×5mm 的 CFRP 结构,重约 0.7kg。单次成像检测区约为 40mm×40mm×5mm,单幅投影 X 射线积分时间约为 354ms。图 9 (a) 是该样品的传统 X 射线透照图像,深度信息丢失;图 9 (b) 是该样品某截面的 CL 图像,网格特征与内部结构清晰;图 9 (c) 是其对应的 CT 图像,显见网格特征缺失,边界模糊。显然,CL 成像检

测效果最佳。

CL 技术工程实践

笔者所在课题组,长期从事 X 射线成像理论与仪器设备开发应用。近年,结合航空航天无损检测相关需求,与国内、外同行紧密合作,在 CL 领域开展了一些研究工作,取得了一定进展。课题组先后实现了基于圆轨迹扫描和直线轨迹扫描的 CL 成像^[10-11],并提出了非对称扫描成像方式^[12]和迭代重建算法^[13],扩大了成像视场,提高了成像分辨率,在航空航天领域复合材料壁板结构的无损检测中得到初步应用。

图 10 是课题组为航天某单位开

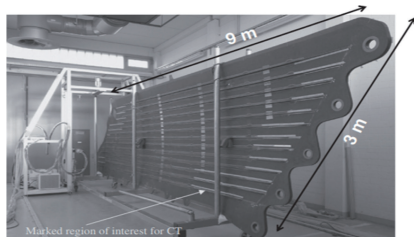


图6 大型飞机CFRP壁板TomoCAR检测系统
Fig.6 TomoCAR system for CFRP components

发的大型复合材料壁板 CL 扫描成像检测系统的构成框图。X 射线机与探测器构成的扫描锥束与被检测板壳结构之间做相对旋转运动,探测器采集的二维投影图像序列经迭代重建后,形成被检测工件的三维 CL 图像。在该系统中,X 射线机和面阵探测器同步旋转,工件保持不动,可检工件尺寸达到 2m×2m×50mm,成像分辨率达到 50μm。可检出损伤缺陷类型包括层间脱粘、夹杂、孔洞、疏松等。

图 11 (a) 展示了该系统以卷尺为对象实施的原理验证成像结果,证明了其有效性;图 11 (b) 展示了该系统对一块木板试样销钉连接区进行 CL 成像的结果(逐层显示),木板

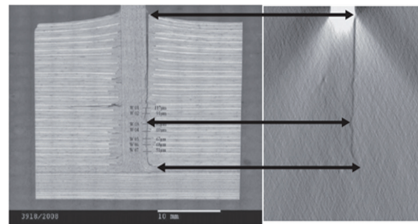


图7 桁条裂纹CL图像及其显微镜图像
Fig.7 CL and microscopic images of a stringer crack

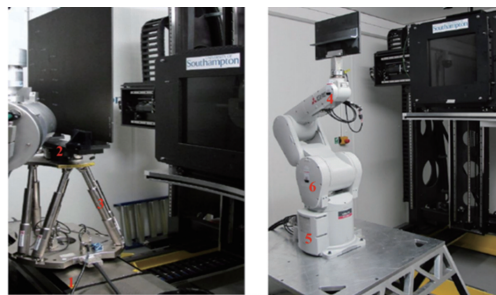
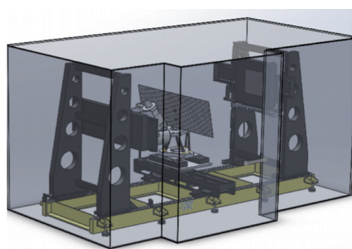
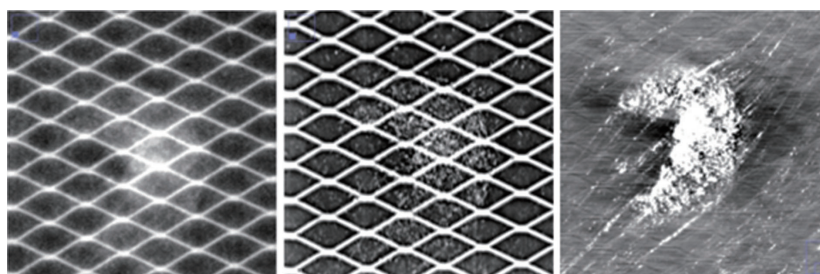


图8 CFRP壁板机器人CL成像检测系统
Fig.8 Robot CL system for CFRP plates



(a)传统 X 射线 (b)CL (c)CT

图9 CFRP壁板CL检测结果
Fig.9 CL images of CFRP plates

纹理及销钉在空间中的三维连接情况清晰可辨。为定量分析该系统的检测能力,一张 X 射线胶片被裁剪成多个不同几何形状的试样,并放置于一本 12mm 厚的书中。图 12 展示了该系统对这本书局部区域的 CL 成像结果(逐层显示)。图 13 是该系统检测某复材试样局部区域获得的 CL 图像,显见裂纹、气孔、夹杂等内部缺陷,体现出良好的内部缺陷检测能力。

近期,课题组与德国慕尼黑工业大学和北京同步辐射装置 4W1A 成像站合作,将 CL 技术扩展到 X 射线相位衬度成像领域,开发了基于光栅的 X 射线差分相衬 CL 和基于同步辐射 X 射线的衍射增强相衬 CL 成像系统^[14-15],成功获得了 CFRP 材料试样的吸收、相位和暗场三种成像衬度下的层析图像,多尺度多维度表征了碳纤维编织结构以及孔隙、夹杂、

脱粘等缺陷,在航空航天新材料的研发中展现出良好的应用前景。

展望

以 CFRP 为代表的新一代高强轻质复合材料已在飞机、卫星等航空航天器上得到越来越广泛应用,复合材料板、壳结构日渐增多,其无损检测与评价需求不断增长,CL 技术应用前景广阔。为更好满足应用需求,CL 技术在航空航天领域的大规模应用还需要在成像理论和工程技术等方面进一步取得突破,特别是要解决好如下两个问题:

(1)层间特征混叠问题。相较于 CT 精确成像,CL 是一种近似成像方法。扫描轨迹的特殊性,既带来了可检测板、壳结构的优势,但也造成投影数据的缺失,数学上不满足逆问题求解的完备性条件。未来可能

需要针对特定对象,结合先验知识和机器学习理论,开展 CL 精确重建算法的研究。

(2)高精度扫描轨迹工程实现问题。航空航天板、壳结构多为米级以上大型部件,如果采用工件旋转的扫描方式,扫描系统将较为庞大,且其夹持也将成为一大难题;如果工件保持不动,如何实现射线源与探测器的高精度同步旋转,也将是一大挑战。

超声扫描是当前航空航天领域应用较多的无损检测技术。进一步开展 CL 成像与超声扫描的定量对比分析,有助于其在航空航天领域的推广应用。同时,这也是一项比较细致的工作,需要系统、严谨地开展相关研究才能获得具有参考价值的结论。定性比较 CL 成像与超声扫描,其检测成本、效率、实施条件、缺陷的识别等应用方面的特点,与传统 CT 技术与超声扫描的对比类似。CL 检测结果分辨率更高,结果表达更为直观,易于观测评估,但也存在成本较高,实时性不够,难以检测虽紧密贴合但粘接强度微弱的非体积型缺陷等不足。

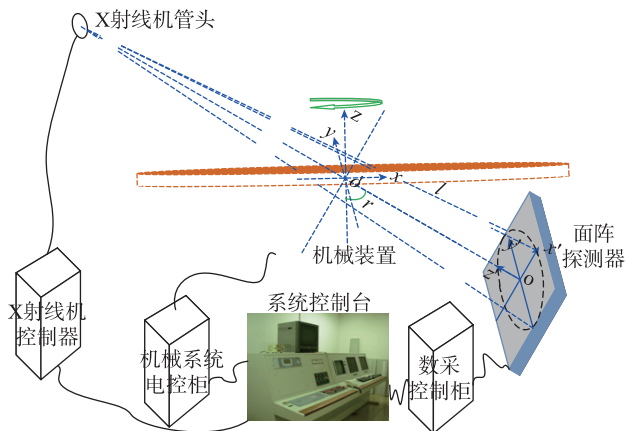
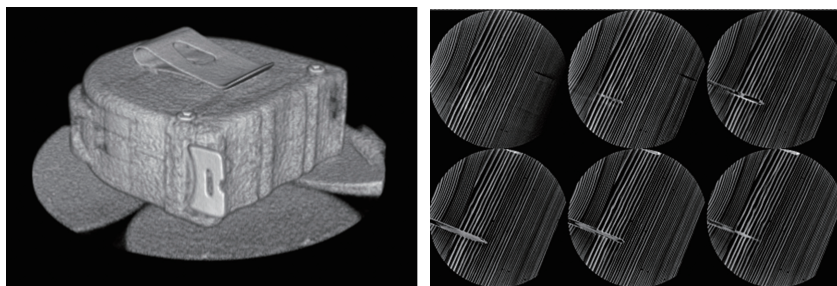


图10 复合材料板、壳结构CL成像系统

Fig.10 CL system framework for composite shell-plate object



(a)卷尺

(b)木板

图11 卷尺及木板试样CL成像结果

Fig.11 CL images of a tape and a wooden plate

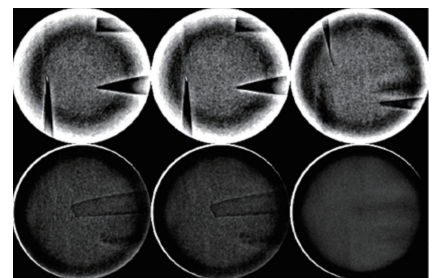


图12 插入胶片的书的CL成像结果

Fig.12 CL images of a book with films inside

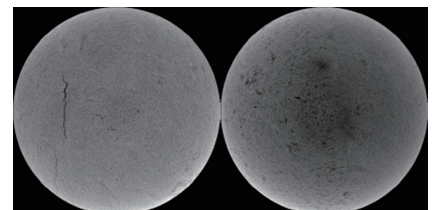


图13 某复材试样局部区域CL图像

Fig.13 CL images of a local region of a composite sample

未来, CL 成像应与超声、红外、电磁、声发射等无损检测技术高度融合, 相互配合, 充分发挥各技术的优势, 取长补短, 形成较为完备的无损检测与评价技术体系, 为开发面向特定航空航天构件的检测技术提供支持。

参考文献

[1] DES PLANTES B G Z. Eine neue methode zur differenzierung in der röntgenographie[J]. Acta Radiologica, 1932, 13: 182-191.

[2] ZHOU J. Entwicklung eines röntgen-computer laminographie-verfahrens für die materialprüfung[D]. Saarbrücken: University of Saarbrücken, 1995.

[3] EWERT U, ROBBEL J, BELLON C, et al. Digital laminography[C]//1994 International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications. DGZfP Berichtsband, 1994.

[4] FEISTE K, STEGEMANN D, REIMCHE W et al. Three dimensional analysis of growing casting defects [C]//1994 International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications. DGZfP Berichtsband, 1994.

[5] ZHOU J, MAISL M, REITER H. et al. Computed laminography for materials testing[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68: 3500.

[6] GONDROM S, SCHROPFER S. Digital computed laminography and tomosynthesis functional principles and industrial applications[J]. Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, 1999, 7(2): 75-81.

[7] GONDROM S, ZHOU J, MAISL M, et al. X-ray computed laminography: an approach of computed tomography for applications with limited access[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 190(1-2): 141-147.

[8] EWERT U, REDMER B, RÄDEL C. et al. Mobile computed tomography for inspection of large stationary components in nuclear and aerospace industries[J]. Materials transactions, 2012, 53(2): 308-310.

[9] WOOD C, O' BRIEN N, DENYSOV A, et al. Computed laminography of CFRP using an X-ray cone beam and robotic sample manipulator systems [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(7): 1384-1393.

[10] 傅健, 江柏红, 周星余. 一种探测器偏置的大视野锥束 X 射线倾斜扫描三维数字成像方法: ZL200910091282[P]. 2012-05-30.

FU Jian, JIANG Baihong, ZHOU Xingyu. A large field of view tilted cone beam

X-ray scanning 3D digital imaging method: ZL200910091282[P]. 2012-05-30.

[11] 傅健, 江柏红, 李斌, 等. 一种倾斜多锥束直线轨迹 CT 成像方法: ZL201010295636[P]. 2012-09-19.

FU Jian, JIANG Baihong, LI Bin, et al. A multi-cone beams linear trajectory CT imaging method: ZL201010295636[P]. 2012-09-19.

[12] FU J, JIANG B, LI B. Large field of view computed laminography with the asymmetric rotational scanning geometry[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(8): 2261-2271.

[13] FU J, HU X, ZHAO H. New iterative reconstruction technique for large field of view digital tomosynthesis [J]. Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 2014, 4(3): 404-409.

[14] FU J, BIERNATH T, WILLNER M, et al. Conebeam differential phase-contrast laminography with x-ray tube source[J]. EPL(Europhysics Letters), 2014, 106(6): 68002.

[15] FU J, SHI X, YUAN Q, et al. Multi-contrast diffraction enhanced computed laminography at Beijing synchrotron radiation facility[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2018, 410(27): 7221-7228.

通讯作者: 傅健, E-mail: fujian706@buaa.edu.cn.

Development and Application of X-ray Computed Laminography for Aerospace

FU Jian^{1,2}, ZHANG Changsheng¹, ZHU Guogang¹, WANG Bingyang³, YUAN Shengping⁴, JIANG Baihong⁵

- (1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Jiangxi Research Institute, Beihang University, Nanchang 330096, China;
3. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
4. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China;
5. Research Institute of Aerospace Special Materials & Technology, Beijing 100074, China)

[ABSTRACT] X-ray computed laminography (CL) is an advanced non-contact nondestructive three-dimensional testing method. It can visualize the internal structure and defects of plate-shell products with high-resolution images and overcome the shortcomings of the traditional computed tomography (CT) technique. In the field of aerospace, there are many plate-shell components such as solar panels, tails, engine turbine discs, blades and microelectronic chips. Effective nondestructive testing and evaluation of internal damage and defects is an important guarantee for flight safety of aerospace vehicles. Based on the applications of nondestructive testing for aerospace plate and shell structures and the author's engineering practice in this field, this paper briefly describes the principle and characteristics of CL, summarizes its research progresses, analyses its key techniques and difficulties, and looks forward to its promising future.

Keywords: Plate-shell components; Nondestructive testing; X-ray radiography; Computed laminography; Carbon fiber reinforced composites

(责编 海山)