复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 35 卷 第 8 期 8 月 2018 年
Vol. 35 No. 8 Aug 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20170927.001

基于涡流成像的碳纤维增强树脂基复合材料细观结构可视化

程军*[1]，杨继全[1]，裘进浩[2]，季宏丽[2]，高木敏行[3]

（1. 南京师范大学 江苏省三维打印装备与制造重点实验室，南京 210042；2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室，南京 210016；3. 东北大学 流体科学研究所，仙台 980-8577）

摘　要： 对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)的细观结构成像方法进行了研究，利用涡流成像技术实现了CFRP层合板中纤维方向及纤维缺失、褶皱和空隙过大等缺陷的可视化。首先通过有限元仿真和电路理论分析了CFRP板中涡流的生成机制和分布特性，阐述了基于涡流法的CFRP细观结构成像机制。然后介绍了用于扫描成像的高频涡流检测(HF-ECT)实验系统并确定了涡流探头的形式及其参数。最后利用涡流成像技术分别对单层板、正交层合板和四方向斜交层合板进行了检测，绘制了涡流检测(ECT)信号的三维伪彩图并得到了清晰的纤维纹路分布。通过引入滤波去噪技术和二维快速傅里叶变换(2D-FFT)对图像进行进一步处理，提高了图像分辨率并完成了不同方向上纤维纹路的分离，从而实现对层合板每单向层中缺陷的精确定位。

关键词： 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)；无损检测；涡流成像；纹路分析；二维快速傅里叶变换(2D-FFT)

中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2018)08-2074-10

Visualization of meso-structure of carbon fiber reinforced polymer based on eddy current imaging

CHENG Jun*[1], YANG Jiquan[1], Qiu Jinhao[2], Ji Hongli[2], TAKAGI Toshiyuki[3]

(1. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan)

Abstract: The imaging of meso-structures within carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites was studied. The visualization of fiber orientations and defects such as missing bundles, wrinkle and gaps in CFRP laminates were realized by using eddy current imaging technique. Firstly, the mechanism and distribution of eddy currents in CFRP plates were analyzed by finite element simulation and circuit theory. The imaging mechanism of CFRP meso-structure based on eddy current method was also described. Then the high frequency eddy current testing (HF-ECT) experimental system for scanning imaging was introduced, and the form and parameters of the eddy current probe were determined. Finally, the eddy current imaging technique was used to detect the unidirectional plate, the orthogonal laminate plate and the four-directional angle-ply laminate plate. The three-dimensional pseudo-color images of the eddy current testing(ECT) signals were plotted and clear fiber textures were obtained. The images were further processed by introducing the filter denoising technique and the two-dimensional fast Fourier transform (2D-FFT) to improve the image resolution and complete the separation of the textures in different directions, so as to realize the accurate positioning of the defects in the unidirectional layer of the laminates.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); nondestructive testing; eddy current imaging; texture analysis; two-dimensional fast Fourier transform (2D-FFT)

收稿日期： 2017-07-12；**录用日期：** 2017-09-11；**网络出版时间：** 2017-09-27　09:41
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170927.001
基金项目： 国家自然科学基金(51605229)；江苏省高校自然科学基金(16KJB460016；17KJB510031)；中国博士后科学基金(2016M601844)
通讯作者： 程军，博士，讲师，硕士生导师，研究方向为复合材料无损检测与先进制造　E-mail：chengjun@njnu.edu.cn
引用格式： 程军，杨继全，裘进浩，等. 基于涡流成像的碳纤维增强树脂基复合材料细观结构可视化[J]. 复合材料学报，2018，35(8)：2074-2083.
CHENG J, YANG J Q, QIU J H, et al. Visualization of meso-structure of carbon fiber reinforced polymer based on eddy current imaging[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2074-2083 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)由碳纤维增强体和树脂聚合物两种材料复合而成，具有质量轻、力学性能优异等特点，目前在航空航天等多个领域已得到了广泛的应用[1-4]。随着应用范围的扩大，CFRP 构件的安全性及针对其开发可靠的缺陷检测方法变得十分重要。

与一般金属不同，CFRP 是一种异质多相体系，且表现为各向异性。虽然在宏观上可将其视为连续均匀的，但在细观尺度上(10^{-6}～10^{-3} m 量级)仍然应将纤维和树脂分开对待[5]。CFRP 的缺陷很大一部分是在制造过程中产生的。由于细观结构的复杂多相体系及工艺参数的不确定性，材料在制造时会出现纤维在树脂中分布不均的情况，严重的话可能造成诸如贫胶、富胶、褶皱、纤维束抽出、间隙过大和错位等缺陷[6-7]。这些微小缺陷会引起应力集中，对成型件的加工和使用性能带来严重影响[8]。因此迫切地需要开发针对 CFRP 的细观结构可视化方法，不但要观察到材料表面形貌特征，还能获得内部的纤维、树脂等成分的排布情况和缺陷信息。

基于以上原因，本文将研究利用电涡流成像来实现连续纤维 CFRP 的细观结构可视化。涡流检测(ECT)技术实现容易，无接触也不需耦合剂，自动化程度高[9]。它利用碳纤维的导电性和材料中纤维定向排布引起的电导率变化来提取涡流特征信号并成像，从图像的灰度对比能分辨出纤维方向、纹路和局部纤维错位、抽出和空隙过大等缺陷[9]。近些年来，国外一些研究机构和学者已经取得了不少关于碳纤维增强复合材料中纤维分布和纹路的检测结果，并开发了集成化的 ECT 系统[10-15]，但是总的来说主要还是集中于验证性的实验观察及研究怎样提高信号和图像的强度和分辨率上，对于电涡流细观结构成像的原理分析较少，也没有系统地得出纤维铺层、纤维束错位及微缺陷的量化信息。

为此，本文首先对电涡流法用于 CFRP 细观结构检测的机制进行了清晰的阐述；然后采用发射-接收式涡流探头得到单向和四方向铺层板的 C 扫描图像，并获取其内部结构信息；最终利用二维傅里叶变换(2D-FFT)，并结合图像滤波处理获得高对比度和纹路细化的涡流图像，从而能够准确可靠地实现 CFRP 板细观结构及缺陷的判断和定量分析。

1 涡流细观结构成像

ECT 是基于载流线圈和导体间的电磁感应原理实现的。导体中的电导率变化会造成其中的电涡流密度和分布特性发生改变，最终引起空间电磁场及线圈阻抗和感应电动势的变化[16]。为了说明涡流法对于 CFRP 检测的可行性，首先要了解材料中涡流的基本情况，包括大小、分布和流通路径等。

1.1 CFRP 中的电涡流

为使问题简化以便于研究，本文仅分析单向 CFRP 板中的电涡流。前面已经提到单向 CFRP 板在宏观上可等效成连续各向异性材料。图 1 分别为采用 COMSOL Multiphysics 软件计算出的金属板(Inconel600，电导率 $\sigma=1\times10^{6}$ S/m)和各向异性 CFRP 板中的涡流密度强度图，激励线圈位于中心处，内外径分别是 1.2 mm 和 3.2 mm，匝数为 140，通入 20 mA 电流。图 1(b)中板的电导率张量(σ_L，σ_T，σ_{cp})=(20 000，20，10)S/m，σ_L、σ_T 和 σ_{cp}

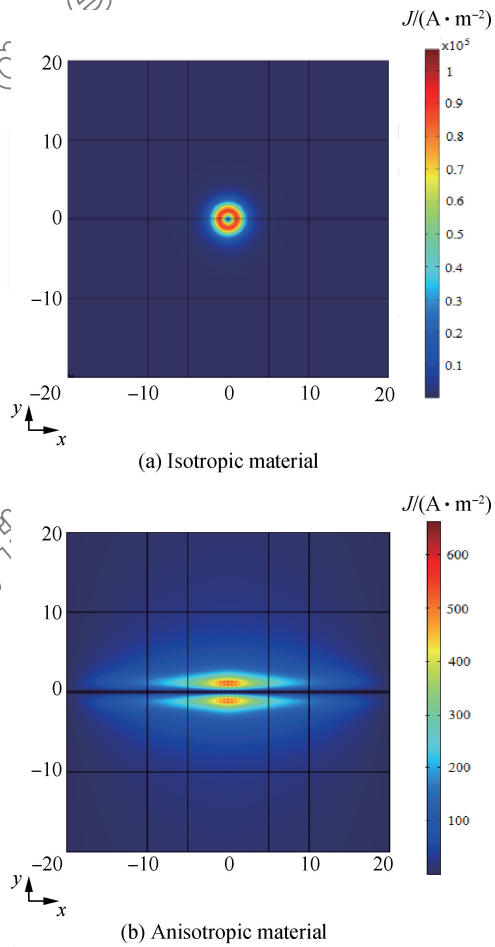
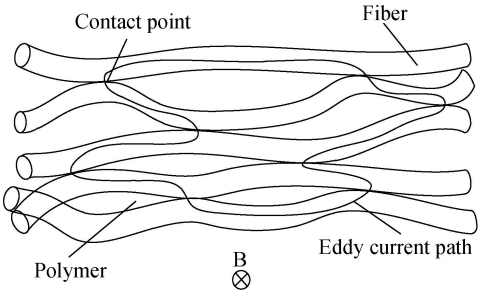


图 1 金属和碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)中涡流分布的仿真结果

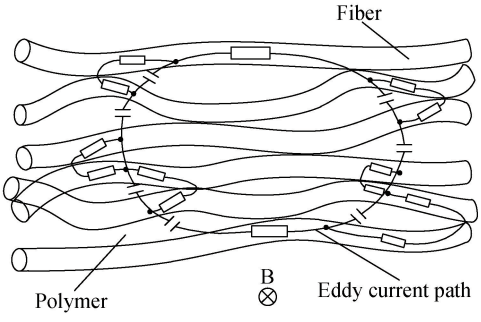
Fig. 1 Simulation result of eddy current distribution in metal and carbon fiber reinforced polymer(CFRP) material

分别表示沿纤维方向(图中 x 方向)、垂直纤维方向(y 方向)和厚度方向的等效电导率。可以看出，载流线圈确实可以在复合材料中产生相当大的涡流，但电流幅值比金属中小得多，这是由于两者的电导率差异造成的。与金属板中涡流以线圈为中心呈正圆形分布不同，单向 CFRP 板中涡流区域沿电导率较大的平行纤维方向被拉伸，而在垂直纤维方向被压缩，呈现为近似椭圆形，这是 CFRP 中涡流场的一个重要特性。

对于涡流在 CFRP 中的流通路径，应在细观尺度下考虑。图 2 为在垂直平面磁场作用下感应涡流在纤维和树脂间的流动情况。当观察单根碳纤维(纤维直径为 7 μm 左右)时，可以发现它不是直的而应该是弯曲的，涡流是在多根纤维之间而不是在单根纤维中流动。低频时(一般为<1 MHz)电流主要沿着纤维和纤维间的接触点形成通路，如图 2(a)所示。高频(>1 MHz)时纤维之间的容抗减小，电流不仅会通过纤维接触流动，还会通过电容耦合在树脂间流动，如 2(b)中所示，此时涡流通路从低频时的电阻性变成电阻-电容性[17]。



(a) Low frequency



(b) High frequency

图 2　电涡流在复合材料中的流通路径

Fig. 2　Circulation path of eddy current in composites

1.2　涡流细观成像原理

根据碳纤维在树脂中的分布形态和涡流的流动形式，比较容易解释涡流细观结构成像的实现原理。假设单向 CFRP 复材板中碳纤维以纤维束为单位定向排布，激励线圈在板中产生从中心处沿纤维方向扩散开的涡流，如图 3 所示。由于纤维在细观尺度上是弯曲的而不是直的，相邻纤维束之间的空隙宽度不可能完全一致，有疏密之分。空隙会造成局部纤维体积分数和电导率的改变，进而产生涡流通路的畸变，这些能被涡流探头感应到并反映在信号图像中，通过图像的灰度差呈现出来。

考虑涡流探头的尺寸(直径几毫米)和空间构成，探头输出信号体现的是一个面积域内纤维的整体排布，而不应该是单根纤维或纤维束(几十上百根纤维)的形态。另外涡流成像质量还与探头的扫查步长有关，步长越小，得到的纹路信息越多，图像分辨率也越高。

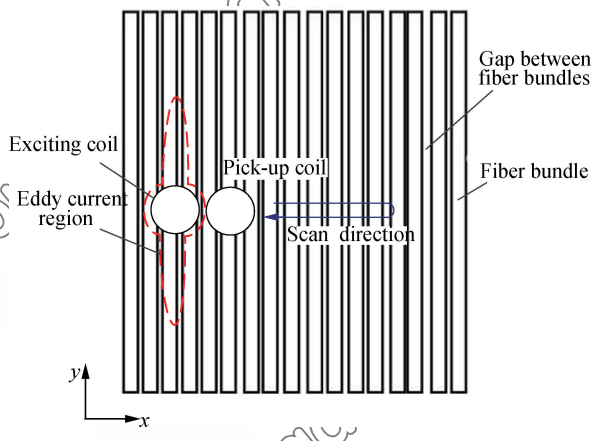


图 3　基于涡流检测(ECT)的 CFRP 细观结构检测原理示意图

Fig. 3　Schematic diagram of CFRP meso-structure detection principle based on eddy current testing(ECT)

2　ECT 成像实验系统

为了实现 CFRP 的细观结构可视化，建立了如图 4 所示的高频涡流实时检测成像实验系统。系统包含涡流探头、待测试样、下位机、位移平台、平台控制器和上位机等。下位机以高速 ARM 微控制器 STM32F407VGT6 芯片为控制核心，综合了信号发生、功率放大、可调增益放大、锁相放大、USB 传输及数据采集等功能模块，体积小，集成度高[18]。上位机采用虚拟仪器软件 LabVIEW 设计位移台电机控制和数据采集用户界面。系统的技术参数及它们的取值如表 1 所示。

由于发射-接收(T-R)型探头成像的点扩散函数形式对于小尺寸损伤的分辨精度较高，因此实验中选择这种探头进行复合材料的检测[19]。T-R 型探头包括激励线圈和接收线圈，两线圈参数相同，

http://fhclxb.buaa.edu.cn

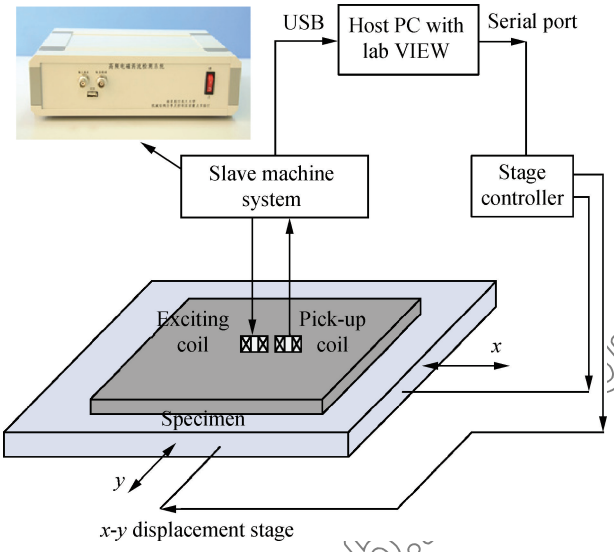


图 4　ECT 系统

Fig. 4　ECT system

表 1　ECT 系统技术参数

Table 1　Technical specifications of ECT system

Specification	Value
Frequency range/kHz	1－1 000
AC gain/dB	0－50(Adjust according to signal value)
Usable probe type	T-R probe, differential probe
Maximum scan area $(x*y)/\mathrm{mm}^2$	500×450
Maximum speed/mm/s	100
Sample rate/(Samples·s^{-1})	2000
Resolution$(x*y)/\mu\mathrm{m}$	50×50
Interface	USB, RS232
Others	Real-time display of impedance diagram and scan image

均为空心圆环线圈。内外径分别为 1.2 mm 和 3.2 mm，高为 0.8 mm，铜线直径为 0.05 mm，匝数为 140，两线圈中心距为 5 mm。

ECT 中线圈的感应电压 V 及电涡流在导体中的透入深度(趋肤深度)δ 与频率 f 之间的关系分别为

$$V=-\mathrm{j}\omega N\Phi \tag{1}$$

$$\delta=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{2}$$

式中：j 为虚数符号；角频率 $\omega=2\pi f$；N 和 Φ 表示线圈匝数和磁通量；μ 和 σ 表示导体的磁导率和电导率。根据上两式可知，频率越大，线圈感应电压就越大，趋肤深度越小。然而由于 CFRP 电导率很小，即使在高频下趋肤深度值仍然较大(一般采用沿纤维方向电导率 σ_{L} 计算趋肤深度)。因此为了兼顾线圈电压和趋肤深度，同时考虑探头的阻抗特性，本实验中将激励电流频率设置为 2 MHz，电流值则设为 20 mA。

通过二维位移平台控制器控制探头在试件表面 X-Y 方向往返运动，以此来达到扫描一块待测区域的目的。利用下位机采集扫描过程中的探头输出信号并传输到上位机中进行显示和存储，两个方向的空间采样步长均设为 0.25 mm。

3　结果与分析

3.1　单向 CFRP 板涡流成像

涡流成像方法采用伪彩色成像技术将信号同其空间位置联系起来，从而能够直观获取结构中缺陷的空间位置和范围。本节将利用涡流成像的方法得到连续 CFRP 板的纤维细观结构检测结果，主要是纤维的排列方式，并从中发现纤维缺失、错位和间隙过大等缺陷。复合材料中的纤维排列取决于制备过程中预浸料的铺设方向，采用预浸料层压工艺制备出的单向 CFRP 板如图 5 所示。板中相邻纤维束之间存在空隙，一般情况下空隙的尺寸很小，处于微米量级。在复合材料制备过程中由于操作人员的失误或者真空控制不当，可能会造成纤维间的空隙过大。图 6(a)是对单向板的扫描灰度图像，板厚 1 mm(8 层)，扫查面积为 50 mm×50 mm。图像中每个像素点的值 $A(x,y)$ 为 ECT 信号的幅值，表示为

$$A(x,\ y)=\sqrt{V_x^2+V_y^2} \tag{3}$$

式中，V_x 和 V_y 分别为经下位机锁相放大模块处理得到的电压实部和虚部。

图 6(a)是原始信号图经放大和中值滤波处理后生成的，滤波模板采用的是 3×3 像素的滑动窗

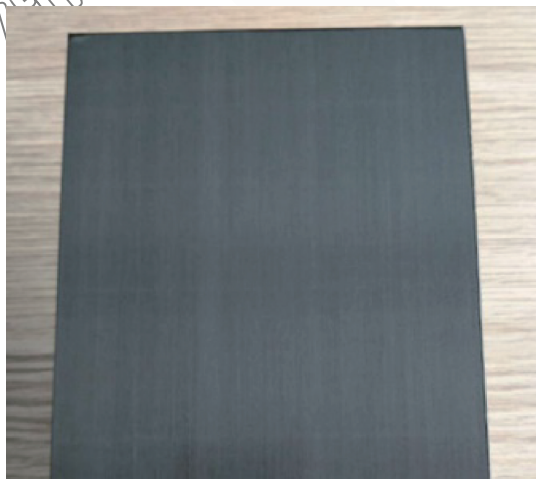


图 5　单向 CFRP 复材板

Fig. 5　Unidirectional CFRP composite plate

http://fhclxb.buaa.edu.cn

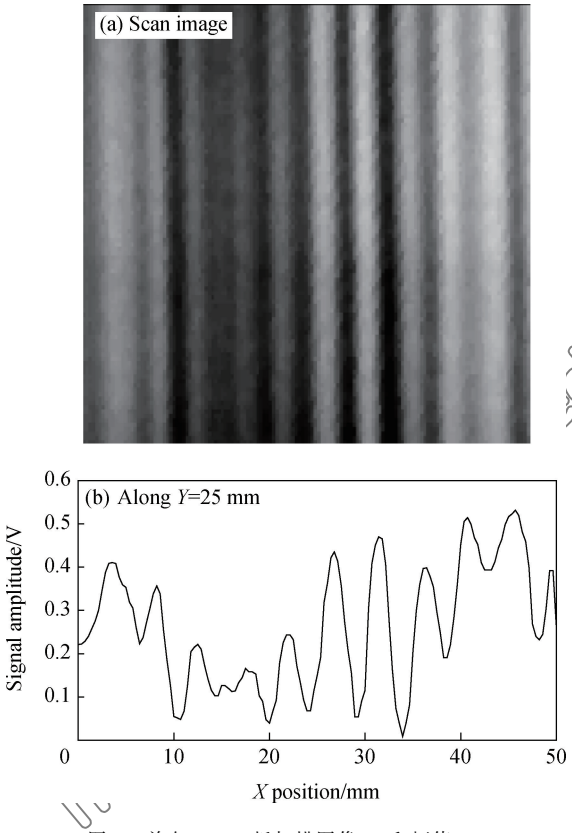


图 6　单向 CFRP 板扫描图像(a)和幅值(b)

Fig. 6　Scan image(a) and singnal amplitude(b) of the unidirectional CFRP plate

口，这样既可去除孤立噪声点又能保护图像细节和边缘，获得较好的图像复原效果。图6(b)是图 6(a)中 y 轴坐标为 25 mm 时 x 轴上经处理后的探头信号值。随着探头的运动扫查方向上的信号对应纤维和空隙的位置呈高低交替变化，反映在灰度图就是一条条明暗相间的条纹。通过信号波动曲线可得出纤维和空隙分布情况。根据 1.2 节的成像原理，灰度图中的条纹表示的并不是单根纤维束的形态，而是探头线圈覆盖区域内纤维的整体排布。

图 7 是经过聚焦处理后 CFRP 的涡流图像。具体处理方法是去除电压信号 V_x 和 V_y 的偏置，并对其幅值图进行带通滤波(通带范围为 3～40 像素)。去除信号偏置可以消除由探头晃动和被测件表面不平引入的趋势项，经过带通滤波可使隐藏在阴影中的细节信息显现出来，从而获得聚焦的图像。从图 7 可以明显地看出，经过聚焦处理后纤维纹路变得更细也更清晰，与板中纤维/纤维束的实际分布状态符合得更好。

3.2　多向 CFRP 板涡流成像

采用同样的方法和步骤，还可以对多向 CFRP

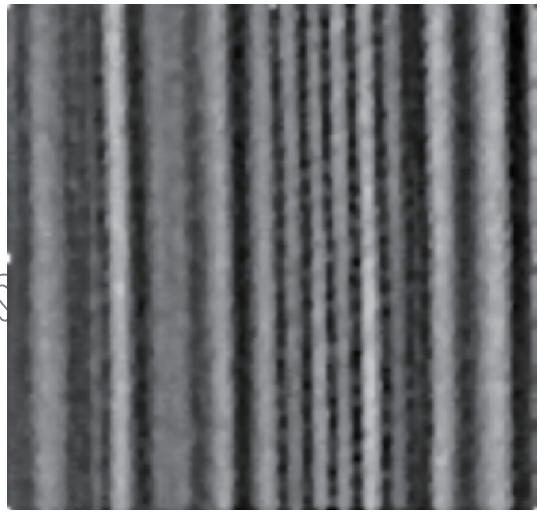


图 7　单向 CFRP 板的聚焦图像

Fig. 7　Focused image of unidirectional CFRP plate

层合板进行检测分析。为此制备了两种铺层的 CFRP 板用于细观结构成像。图 8 为正交层合板，铺层方向为$[0°_2/90°_2]_S$，板厚 1 mm。图 9(a)为斜交层合板，铺层方向为$[45°_2/0°_2/-45°_2/90°_2]_S$，板厚 2 mm，两块板都是完好的，其中没有加工裂纹和分层等宏观损伤。两块板的加工工艺不同，正交板是在实验室中通过手动铺层制作的，工艺水平不高，板中纤维分布很不平整。而斜交板是通过热压罐成型工艺制备，工艺水平较高，因此内部纤维排列得比较平整均匀。为了验证细观成像方法的有效性，在四方向板中人为地制造了一处 45°方向的纤维缺失缺陷，如图 9(b)所示。扫描时将缺陷区域包含其中，观察缺陷造成的图像灰度变化。

图 8　CFRP 正交层合板扫描图像

Fig. 8　Scan image of Orthogonal CFRP laminate plate

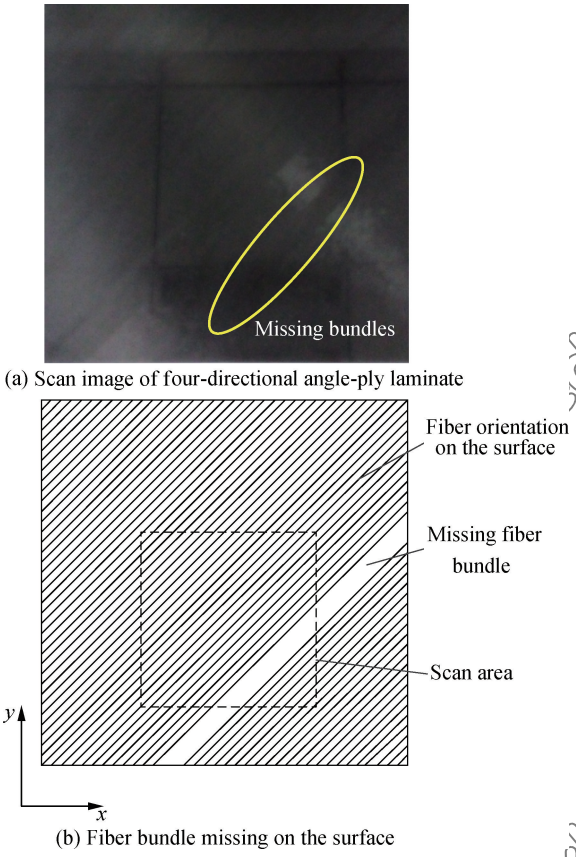


图 9　四方向 CFRP 斜交层合板扫描图像(a)和纤维缺失区域(b)

Fig. 9　Scan image(a) and fiber bundlemissing(b) four-directional CFRP laminate plate

涡流探头沿着水平方向(0°方向)对层合板进行扫查，板中纤维分布的成像结果如图 10 和图 11 所示，纤维纹路通过图像灰度差清晰地呈现出来。从图 10 可以分辨出两个纤维方向，分别是 0°和 90°方向。板中纤维纹路比较杂乱，可以观察到纤维起皱和间隙变大的现象。从图 11(a)则可以看出存在 4 个纤维方向，分别是±45°、0°和 90°，而且图像清晰度明显比图 10 中的高，纤维纹路也更加整齐。图11(b)是图 11(a)中 y 坐标为 15 mm 时 x 方向上的信号幅值。可以看出，在 x 轴上约38 mm 处，由于纤维缺失造成了较大的信号值波动。

3.3　2D-FFT 图像处理方法

利用涡流探头扫描成像可以得到层合板中纤维的纹路分布，但是这些纹路全部重叠在一起，每个方向的纤维缺失、间隙过大等缺陷也都在一张图上显示。层合板由多个单向层叠合在一起，每个纤维方向对应着板中特定的铺层。因此希望能通过信号处理的方法将不同方向的纤维纹路从一张图上分离出来，得到每个特定方向铺层的图像，这样对层合板分析就更具有针对性，也能更好地对每一层中的缺陷进行定位。

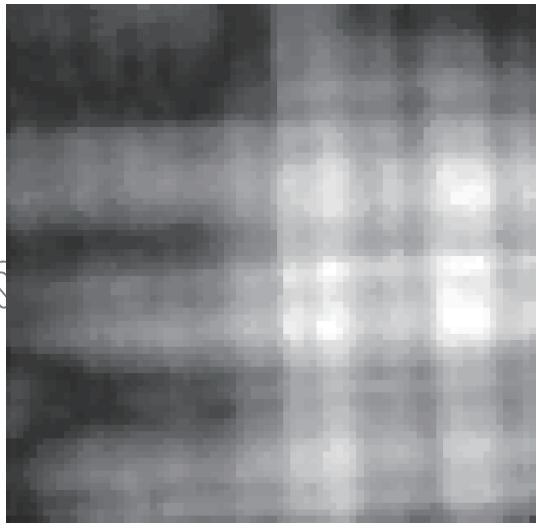


图 10　CFRP 正交板纹路成像图像

Fig. 10　Texture image of orthogonal CFRP plate

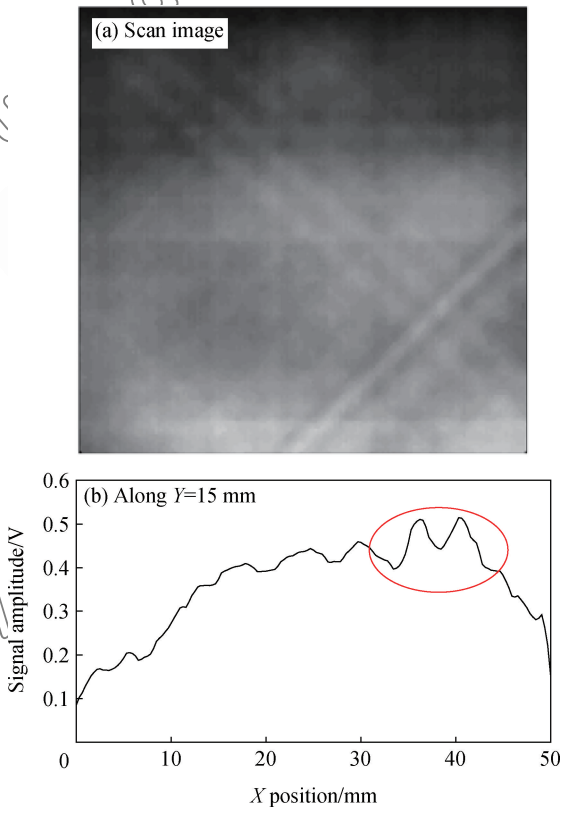


图 11　斜交 CFRP 板纹路扫描图像(a)和信号幅值(b)

Fig. 11　Texture image(a) and signal amplitude(b) of angle-ply CFRP plates

利用图像的 2D-FFT 和频域滤波的方法可实现对不同方向纤维纹路的分离。2D-FFT 的作用是将

http://thclxb.bh.edu.cn

空间域上的二维图像转变为频域中的复函数，根据频域上图像灰度的变化找到与纤维方向相关的特征点。虽然代表不同纤维方向的特征点在空间域上具有周期性特征，但是在空间域上分离这些成分基本上是不可能的，这就需要将图像转换到频域上进行处理。2D-FFT 和 2D-FFT 反变换(2D-IFFT)的数学表达式如下[20]：

$$F(u,v)=\frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi(ux/M+vy/N)}=\frac{1}{M}\sum_{x=0}^{M-1}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi xu/M}\left(\frac{1}{N}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi yv/N}\right) \tag{4}$$

$$f(x,y)=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}F(u,v)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{5}$$

式中：$f(x,y)$表示空间域上的图像函数；u 和 v 是频域上函数的坐标。对 2D-FFT 计算时，将其转变为一维 FFT 来求解，先对图像每一行进行一维傅里叶变换，再对每列进行一维傅里叶变换。对图像进行 2D-FFT 计算后，其在频域上是一个复函数，包括实部 real 和虚部 imag。将 2D-FFT 的结果表示成图像的形式，图像中每个像素点的值取为复数的绝对值$|F(u,v)|$：

$$|F(u,v)|=\sqrt{(\mathrm{real})^2+(\mathrm{imag})^2} \tag{6}$$

图 13 列出了一些简单的纤维排列图像和它们所对应的 2D-FFT 结果图。其中 4 张图像中的黑线分别指向 0°、90°、45°和－45°，用来模拟复材板中纤维的排列。频域图上的白色圆点组成的直线对应的就是空间域上的黑线，这些白点就是与纤维方向相关的特征点。随着空间域上直线方向的不同，频域图上对应的特征线的方向也不一样，观察两者的方向角，发现始终是垂直的关系，角度相差 90°。根据这一关系通过计算特征线的方向角就可以得到纤维的排列方向，如果板中存在铺层方向错位的情况也能在频谱图中清楚地看出来。

整个图像处理过程可用如下的流程图表示[21]：

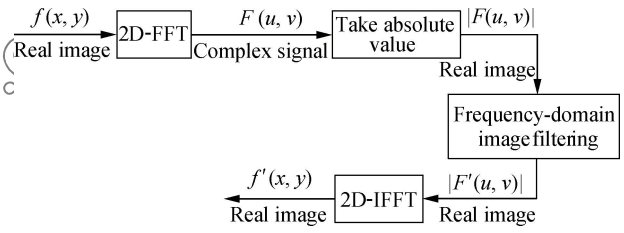


图 12　纤维纹路分解流程

Fig. 12　Flow chart of fiber texture decomposition

图 14 是对正交层合板的纹路分离结果，将原图进行 2D-FFT 后在频域图上得到两条相交成 90°的白色直线，两条白线对应的就是原图中纤维的灰度纹路。将频域图分别进行 90°方向和 0°方向滤波，将图上其他区域涂黑，只保留频谱上 0°方向纹路和 90°方向纹路对应的白线，涂黑的时候要注意尽量不保留其他方向上的特征线，否则进行 2D-IFFT 后图像中仍然会残留其他方向纤维的纹路。可以看出 0°方向和 90°方向纤维的纹路已经通过这种方法被成功分离开，图像清晰。观察两张图，可对层合板中的缺陷进行独立的分析，准确判断出在哪一个方向上出现了纤维缺失和空隙过大等缺陷。以 90°方向来说，由于图上出现了清晰的一条暗粗条纹，推断此处可能存在褶皱或纤维缺失。

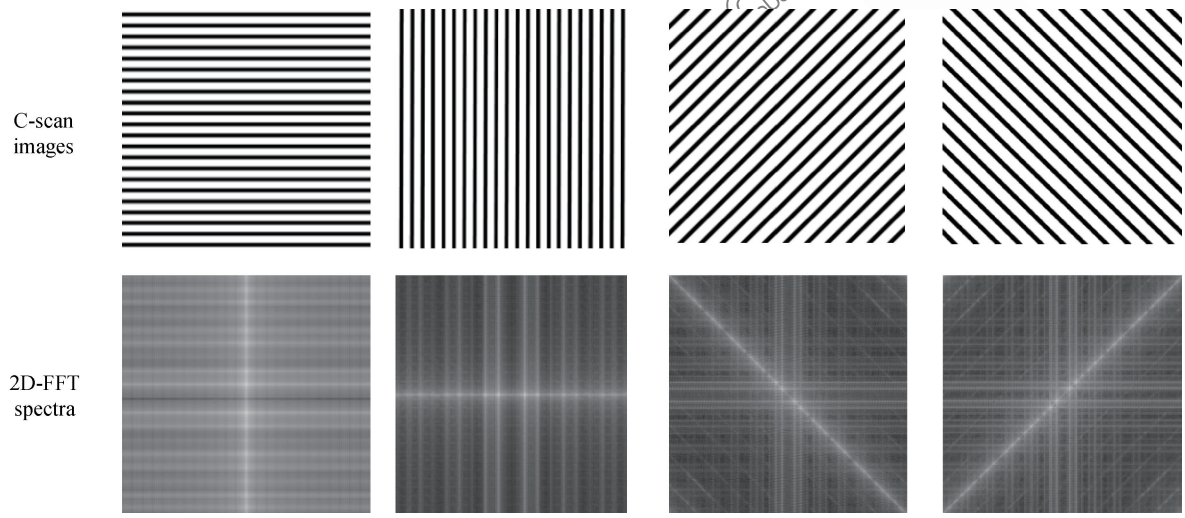


图 13　纤维排列图像的二维快速傅里叶变换(2D-FFT)变换图

Fig. 13　Two-dimensional fast Fouriem transform (2D-FFT) spectra of fiber texture

http://fhclxb.buaa.edu.cn

采用基于 2D-FFT 的纹路分析方法，对图 11(a)中的四向层合板图像进行处理。四向层合板图像的频谱图上一共出现了 4 条白色线，对应的是 4 个纤维方向，如图 15 所示。对频谱图进行滤波，分别保留与 4 个方向纤维纹路相关的特征线。再对滤波后的频域图进行 2D-IFFT，就得到了分别只有±45°、0°和 90°方向纤维纹路的灰度图。根据图中所示，45°方向上由于纤维缺失产生了明显的信号灰度变化。与其他位置相比，－45°方向图中间区域上信号值有较大的波动，判断可能是由于此处纤维的轻微起皱引起的，0°和 90°方向的纤维分布得比较均匀，没有明显的缺陷。

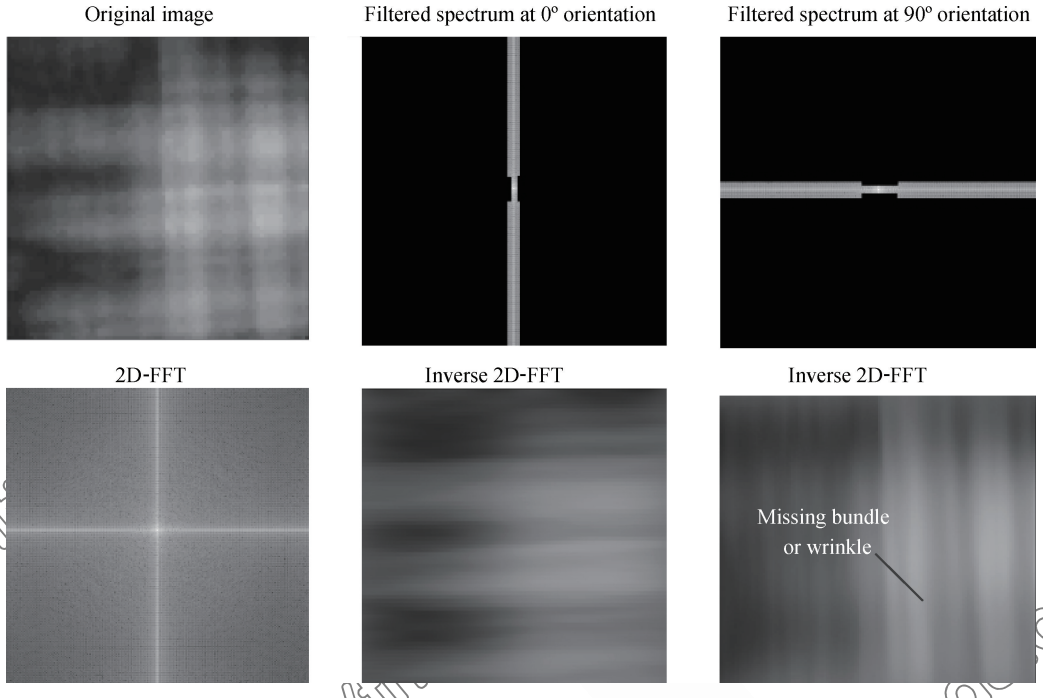


图 14　正交 CFRP 层合板的纹路分解结果

Fig. 14　Decomposition result of orthogonal CFRP plate

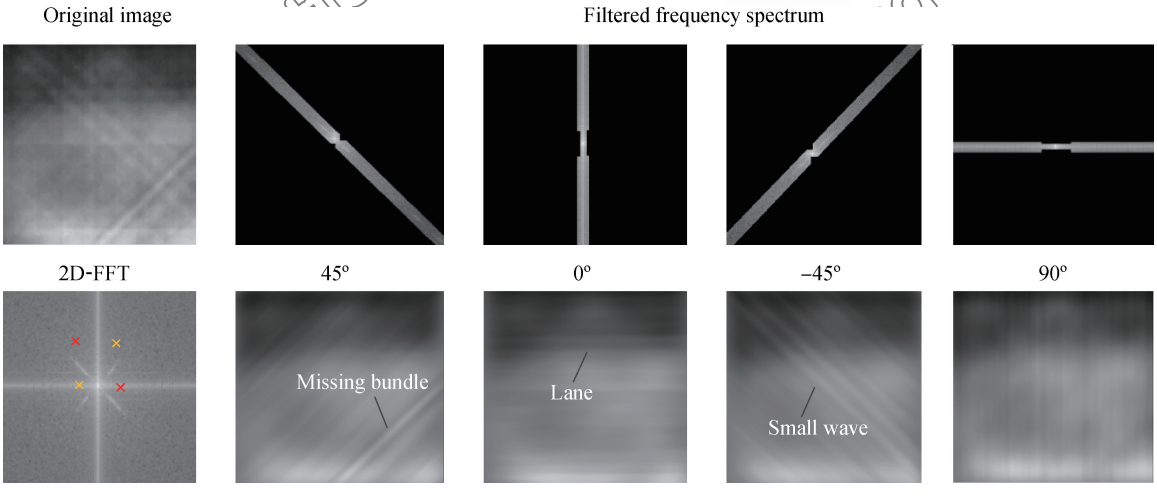


图 15　四向斜交 CFRP 层合板的纹路分解结果

Fig. 15　Decomposition result of four-directional angle-ply CFRP plate

4　结　论

(1) 由于碳纤维具有弱导电性，因此可以采用涡流法对其复合材料进行检测。涡流检测(ECT)系统简单，无接触也不需耦合剂，自动化程度高，在碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)检测方面具有良好的应用前景。CFRP 是一种复杂的多相体系

且表现为电各向异性，相邻纤维束之间的空隙会造成局部的纤维体积分数发生变化。局部电导率的变化能被涡流探头感应到，从而产生信号输出并反映在扫描图像中。

（2）基于 ECT 原理，提出了一种 CFRP 细观结构成像的方法，包括纤维方向、纹路及局部纤维错位、抽出和空隙过大等缺陷。通过合理选择涡流探头和检测系统参数，结合 2D-FFT 变换和频域滤波等图像处理方法，可实现对 CFRP 板细观结构及缺陷的判断和定量分析。特别地，采用这种方法还能实现对层合板不同方向纤维纹路的分离，从而更好地对每一单向层中的缺陷进行定位。

参考文献：

[1] ROBERTS T. Rapid growth forecast for carbon fibre market[J]. Reinforced Plastics，2007，51(2)：10-13.

[2] 邢丽英，包建文，礼嵩明，等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报，2016，33(7)：1327-1338.
XING Liying，BAO Jianwen，LI Songming，et al. Developmennt status and facing challenge of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2016，33(7)：1327-1338 (in Chinese).

[3] 赵玉飞，袁剑民，费又庆. 碳纤维网络增强环氧树脂基复合材料的制备与表征[J]. 复合材料学报，2015，32(6)：1611-1617.
ZHAO Yufei，YUAN Jianmin，FEI Youqing. Fabrication and characterization of carbon fiber network reinforced epoxy matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2015，32(6)：1611-1617 (in Chinese).

[4] 沈真. 碳纤维增强复合材料在飞机结构中的应用[J]. 高科技纤维与应用，2010，35(4)：1-4.
SHEN Zhen. Application of carbon fiber composites in aircraft structures[J]. Hi-Tech Fiber & Application，2010，35(4)：1-4 (in Chinese).

[5] 沈观林，胡更开，刘彬. 复合材料力学[M]. 第二版. 北京：清华大学出版社，2006：10-14.
SHEN Guanlin，HU Gengkai，LIU Bin. Mechanics of composite materials[M]. Second Edition. Beijing：Tsinghua University Press，2006：10-14 (in Chinese).

[6] 宁志华，刘人怀，刘焕林. 含纤维断裂复合材料热阻变化的细观建模[J]. 复合材料学报，2017，34(1)：112-120.
NING Zhihua，LIU Renhuai，LIU Huanlin. Micro-modeling of thermal resistance change in fibers reinforced composites with fiber breakage[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2017，34(1)：112-120 (in Chinese).

[7] 陆铭慧，王俊东，张毅萍，等. RTM 碳纤维增强复合材料宏观缺陷超声表征及分析[J]. 玻璃钢/复合材料，2017(4)：70-74.
LU Minghui，WANG Jundong，ZHANG Yiping，et al. Ultrasonic characterization and analysis of macro defects in RTM carbon fiber composites[J]. FRP/CM，2017(4)：70-74 (in Chinese).

[8] 丁安心，李书欣，倪爱清，等. 热固性树脂基复合材料固化变形和残余应力数值模拟研究综述[J]. 复合材料学报，2017，34(3)：471-485.
DING Anxin，LI Shuxin，NI Aiqing，et al. A review of numerical simulation of cure-induced distortions and residual stresses in thermoset composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2017，34(3)：471-485 (in Chinese).

[9] 任吉林，林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京：科学出版社，2008.
REN Jilin，LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing：Science Press，2008 (in Chinese).

[10] MOOK G，LANGE R，KOESER O. Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents[J]. Composites Science & Technology，2001，61(6)：865-873.

[11] SCHULZE M H，HEUER H，KÜTTNER M. High-resolution eddy current sensor system[C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering，Bellingham/Wash.：Smart Sensors，Actuators，and MEMS IV，SPIE Proceedings Series，2009，16(5)：791-797.

[12] CHENG J，QIU J，TAKAGI T，et al. Numerical analysis of correlation between fibre orientation and eddy current testing signals of carbon-fibre reinforced polymer composites[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics，2012，39(1)：251-259.

[13] HEUER H，SCHULZE M H. Eddy current testing of carbon fiber materials by high resolution directional sensors[C]//Smart Materials，Structures & NDT in Aerospace Conference，Montreal Hamilton：Canadian Institute for NDE，2011：1-10.

[14] CHENG J，JI H，QIU J，et al. Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method[J]. NDT & E International，2014，68：1-12.

[15] MIZUKAMI K，MIZUTANI Y，KIMURA K，et al. Visualization and size estimation of fiber waviness in multidirectional

http://fhclxb.buaa.edu.cn

CFRP laminates using eddy current imaging[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2016, 90: 261-270.

[16] CHENG J, QIU J, XU X, et al. Research advances in eddy current testing for maintenance of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 51(3): 261-284.

[17] CHENG J, JI H, QIU J, et al. Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals [J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49(1): 77-83.

[18] 郭太平，裘进浩，程军，等. 高频电磁涡流检测系统及实验研究[J]. 国外电子测量技术，2015(11): 4-9.
GUO T, QIU J, CHENG J, et al. High frequency electromagnetic eddy current testing system and experimental investegation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015(11): 4-9 (in Chinese).

[19] CHENG J, QIU J, JI H, et al. Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 110: 141-152.

[20] HEUER H, SCHULZE M, POOCH M, et al. Review on quality assurance along the CFRP value chain-non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 77: 494-501.

[21] SCHULZE M H, HEUER H. Textural analyses of carbon fiber materials by 2D-FFT of complex images obtained by high frequency eddy current imaging (HF-ECI)[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers-SPIE-, Bellingham/Wash. Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security. San Diego: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 12-15.

http://fhclxb.buaa.edu.cn