

RTM/ 纺织复合材料孔隙率非线性超声方法研究<sup>\*</sup>

## Research on Nonlinear Ultrasonic Testing of Void Content in RTM/Textile Composites

南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 陆铭慧 林 娜

**[摘要]** 由于 RTM/ 纺织复合材料在物理性能上呈现显著的各向异性,给材料的缺陷检测和评价带来困难,提出了一种用于 RTM/ 纺织复合材料孔隙率的非线性超声检测方法。从非线性理论出发,运用非线性超声的二次谐波非线性系数进行 RTM/ 纺织复合材料孔隙率检测。分析结果表明,二次谐波非线性系数的改变与试块的孔隙率之间存在着良好的线性关系,有助于建立 RTM/ 纺织复合材料孔隙率的超声检测模型。

**关键词:** RTM/ 纺织复合材料 非线性超声 非线性系数 孔隙率

**[ABSTRACT]** Because RTM/textile composites is anisotropic in the physical performance, it is difficult to make defects detection and evaluation. A kind of nonlinear ultrasonic detection approach for evaluating the void content of the RTM/textile composites is put forward, nonlinear ultrasonic is proposed to test void content in RTM/textile composites. It is shown that a linear relationship holds between the second harmonic nonlinear coefficient and void content, which will aid the model development for void content detection in the RTM/textile composites.

**Keywords:** RTM/textile composites Nonlinear ultrasonic Nonlinear coefficient Void content

复合材料 RTM 低成本制造技术与纺织技术结合,可得到成本低、性能高、结构复杂的构件,这类构件在航空航天、汽车制造、体育器材等方面得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。其方法是,通过较低的压力将一定配比的低粘度树脂基体输送到放了预成型体的闭合模具中,使预成型在闭合模具中充分浸渍固化成型。RTM 成型过程易产生多种缺陷,孔隙是 RTM/ 纺织复合材料最常见的缺陷之一,孔隙的存在严重影响着构件的力学性能和整体完整性,不但降低了材料的剪切强度、弯曲强度、抗拉和抗压强度,对材料的疲劳寿命也有显著影响<sup>[2-4]</sup>。因此,亟需无损检测和评价手段对这种材料在生产和使用过程中进行检测和评价,以保证产品的生产质量和使用安全。目前孔隙含量的无损测量技术包括超声 C 扫描法、声衰减法等<sup>[5-7]</sup>。超声衰减法是依据线性声波在媒质中的散射

特性,从而引起声能的衰减和频率的畸变,通过测量衰减系数和提取频域特征来评价孔隙率。对于 RTM/ 纺织复合材料的微观结构和微缺陷特征,这种线性声学方法受到了限制。本文采用非线性超声检测,利用超声波对孔隙等微小缺陷相互作用表现出的非线性特征,对 RTM/ 纺织复合材料中的孔隙含量进行无损评价,并通过超声衰减法来进行对比试验。

## 1 非线性超声理论

非线性声学是指有限振幅声波(通常以平面波为代表)在介质中传播时发生的非线性现象,如波形畸变、谐波滋生、逾量衰减、声饱和及空化等,并随着介质性质的变化而变化。因此透过非线性声学,就有可能去探究介质的内在结构及有关性质,特别是在超声频段,由于其波长短,更能揭示其物质的细微结构,可以说非线性声学有其特有的优点<sup>[8]</sup>。传统超声无损检测,基于弹性波理论<sup>[9-11]</sup>,主要根据声时和声速,利用超声波传播中遇到缺陷时波的反射、散射等线性特征进行缺陷检测和评价,本质上反映的是缺陷和其周围介质的声阻抗差别。这对探寻材料内部较大的空洞和缺陷显得较为有效,但对微小缺陷和损伤极不敏感。而非线性超声检测是利用超声波在材料中传播时介质或微小缺陷与其相互作用的非线性响应信号进行材料性能的评估和微小缺陷的检测,本质上反映的是微小缺陷对材料非线性的影响,检测的特征参数并不受限于缺陷和损伤的大小。

近年来的研究表明,单一或多频谱的超声波穿过受损材料后,都会产生一定程度的非线性效应,如高阶谐波、旁频、延迟动力特性<sup>[12-17]</sup>等。非线性超声和线性超声的根本区别在于前者必须考虑介质运动方程、连续性方程和物态方程这 3 个声学基本方程中的非线性项。从本质上讲,运动方程和连续性方程的非线性项反映的是声波大振幅运动时波的非线性;物态方程反映的是由于声压而引起的介质密度变化或介质本身不均匀所造成的非线性,是介质非线性的表现。非线性超声无损检测关注的是介质非线性对超声响应的影响<sup>[8]</sup>。当使用大幅度的超声波检测时,超声波传播受介质-应变关系非线性的影响增强,超声非线性响应信号幅度变大,超声波将发生较明显的失真。假设介质中只有纵波,这里  $u = u(\alpha, t)$ ,  $v = \delta = 0$ ,  $u$ 、 $v$ 、 $\delta$  为 3 个位移分量,其一维非线性

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(61062010)、江西省自然科学基金(2010GZW0053)资助。

性波动方程表示为:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} = \beta_c \frac{\partial u}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2}, \quad (1)$$

式中,  $\beta_c$  为非线性系数,  $c$  为一维纵波的相速度, 它与材料的弹性模量  $E$  和密度  $\rho$  有关:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

若方程的初始条件为一列正选超声波在固体中传播:

$$u(\alpha, t) = A_1 \sin(k\alpha - \omega t), \quad (2)$$

式中,  $k = \frac{\omega}{c}$  为波数,  $\omega$  为角频率, 则可求得一维纵波波动方程的二级近似解为:

$$u = u^0 + u^1 = \{A_1 \sin(k\alpha - \omega t) - \frac{\beta_c (kA_1)^2}{8} \alpha \cos 2(k\alpha - \omega t)\}. \quad (3)$$

其中,  $u^i$  为  $i$  阶小量。由于声波在各向异性的 RTM/ 纺织复合材料中的传播特性非常复杂, 通常我们是研究晶格结构的对称性, 减少独立的弹性常数个数, 然后指定声波的波形和传播方向, 进一步简化, 最后得到与各向同性固体非线性波动方程相似的形式。本文直接引用横观各向同性固体中一维纵波非线性波动方程的解, 如式(3)所示, 其中  $A_1$  为基波幅值;  $\alpha$  为声波传播距离;  $A_2$  为二阶谐波幅值, 则:

$$A_2 = \frac{\beta_c (kA_1)^2}{8} \alpha, \quad (4)$$

$$\beta_c = 8 \frac{A_2}{k^2 A_1^2 \alpha}, \quad (5)$$

其中,  $\beta_c$  为非线性参数, 可见非线性系数和二阶谐波幅值与基波幅值的平方之比成线性关系, 即谐波幅值比的变化反应了非线性系数  $\beta_c$  的变化, 本试验中采用  $\beta \sim \frac{A_2}{A_1^2}$  作为试验研究对象。

## 2 试验方案

试验样品为 3 块的碳纤维 RTM/ 纺织复合材料板, 厚度为  $(4 \pm 0.05)$  mm, 面积大约为  $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。3 块样品均由厂家提供, 在试样制备过程中, 对树脂和纤维所组成的同一成分体系, 控制压力、温度、固化时间等工艺参数, 获得 3 组试样。试样 1 为合格的较低孔隙率试样, 试样 2 为含有一定孔隙率合格的试样, 试样 3 为不合格的含较多孔隙的试样。

### 2.1 非线性超声检测方法

针对 RTM/ 纺织复合材料缺陷的特征, 结合实验室现有研究条件, 采用有限幅度方法测量超声波与 RTM/ 纺织复合材料相互作用产生的基波和二次谐波作为试验系统测量的特征信号。依据式(5)得到评价材料非线性的超声非线性系数  $\beta_c$ 。检测试验采用穿透法、宽带

接收方式来测量基波和二次谐波的幅值。任意信号发生器经功率放大器产生单频脉冲串(准连续波)作为激励信号, 加在发射换能器上向检测对象激发出单频超声波, 位于检测对象另一端的宽带压电换能器接收传来的超声波, 然后对接收信号进行快速傅里叶变换(FFT), 得到基波和二次谐波的幅值。其原理图如图 1 所示。

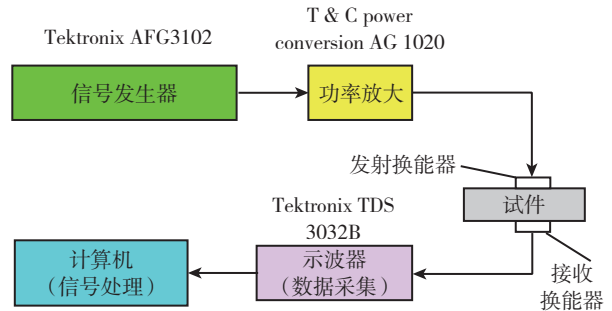


图1 非线性超声检测方法的结构框图  
Fig.1 Block diagram of nonlinear ultrasonic detection method

选用 2.25mPZTII 压电晶片换能器来发射检测信号, 取激励电压 300V, 20 个周期脉冲串来激励发射换能器, 中心频率为 5M 的宽频换能器接收信号。图 2 为接收换能器获得的波形时域信号, 图 3 为 FFT 变换后的频谱图, 二阶谐波比较明显。

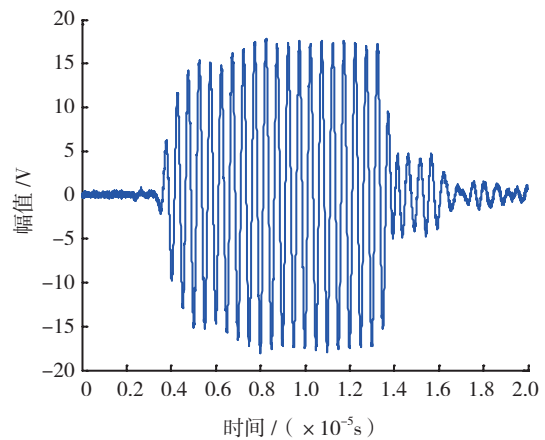


图2 时域波形信号  
Fig.2 Time-domain waveform signal

### 2.2 超声衰减法试验方法

本试验使用水浸法, 通过机械控制系统固定换能器, 利用示波器对接收信号进行采集, 测量得出复合板表面、底面回波的波幅, 并根据 4 式计算出换能器对应区域内孔隙率引起的衰减系数  $\gamma$ 。

$$\gamma = \frac{10}{l} \{ \lg(H_{\text{上}}/H_{\text{下}}) + \lg[(1-R^2)] \}, \quad (6)$$

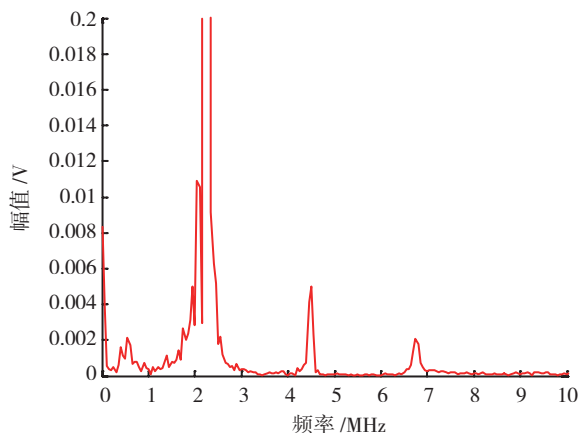


图3 二阶谐波频谱图  
Fig.3 Second harmonic spectrogram

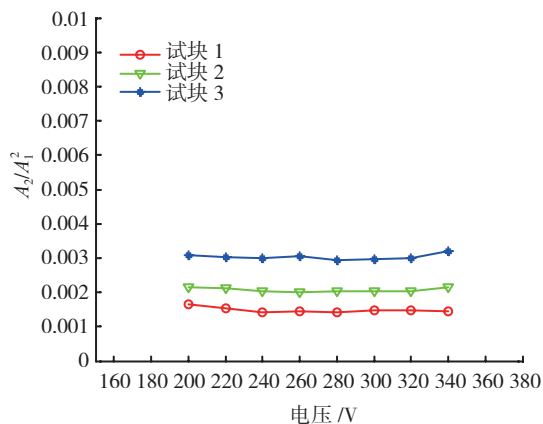


图4  $A_2/A_1^2$ 随电压变化的关系图  
Fig.4 Diagram of  $A_2/A_1^2$  and with voltage changes

式中： $t$  为试样的厚度； $R$  为试样上表面的反射系数； $H_{上}$  为试样上表面回波的波幅； $H_{下}$  为试验底面回波的波幅； $\gamma$  为复合材料中的衰减系数，单位为 dB/mm。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 非线性超声方法结果

根据非线性超声的基本理论，先验证该系统的线性，材料的超声非线性系数如式(5)所示，我们改变激励电压，测量接收换能器接收到的基波和二次谐波幅值，若二次谐波幅值与基波幅值平方的比成线性关系，则可以判定该系统的非线性对于检测目标的超声非线性影响较小，试验系统可满足使用条件。

图4、图5分别为3个试块在激励频率为2.25MHz，

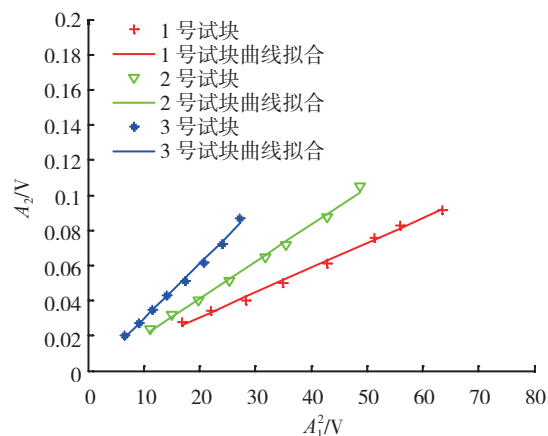


图5 基波幅值平方和二阶谐波幅值关系图  
Fig.5 Diagram of square of fundamental amplitude and second harmonic amplitude

表1 相对非线性系数 ( $A_2/A_1^2$ )

测试区	试块 1			试块 2			试块 3		
	$A_1^2/V$	$A_2/10^{-3}V$	$\beta/10^{-3}$	$A_1^2/V$	$A_2/10^{-3}V$	$\beta/10^{-3}$	$A_1^2/V$	$A_2/10^{-3}V$	$\beta/10^{-3}$
1	48.804	63.152	1.294	34.398	70.550	2.051	13.846	43.629	3.151
2	48.245	64.407	1.335	34.651	91.409	2.638	13.574	63.282	4.662
3	49.072	71.056	1.448	35.014	82.108	2.345	13.210	43.474	3.291
4	45.524	65.372	1.436	35.216	73.707	2.093	12.548	55.613	4.432
5	47.146	62.638	1.301	34.117	72.635	2.129	12.915	59.732	4.625
6	48.647	65.284	1.342	34.652	93.248	2.691	13.569	59.663	4.397
7	47.384	60.557	1.278	33.764	89.745	2.658	14.258	64.703	4.538
8	49.693	68.875	1.386	33.986	76.027	2.237	13.726	59.969	4.369
9	48.027	65.365	1.361	34.597	87.842	2.539	13.249	59.104	4.461
10	46.871	63.604	1.357	34.278	91.557	2.671	13.371	62.135	4.647
平均			1.354			2.405			4.457

激励信号为 20 个周期脉冲串,同一电压下重复测量 3 次并各自取其平均值作图。激励电压幅值从 200V 到 340V 线性均匀增加时,系统测量的二次谐波幅值与基波幅值平方成正比,从图 5 中可以看出,二次谐波幅值与基波幅值平方具有较好的线性关系。由此可以判定该系统基本可以满足试验条件。

采用上述超声非线性试验系统进行检测,激励电压 300V,20 个周期脉冲串来激励发射换能器,分别对 3 个试块进行数据采集。测试过程中,每块试样取 10 个不同的区域进行测试,每个区域取 3 次测试结果的平均值作为该区域的测试结果。结果如表 1 所示。

### 3.2 超声衰减法测试结果

表 2 为超声衰减法测量结果。

表2 衰减系数 $\gamma$ 测量值 (dB·mm<sup>-1</sup>)

区域	试块		
	1	2	3
1	0.4471	0.5168	0.6159
2	0.4507	0.5072	0.6245
3	0.4511	0.5254	0.5867
4	0.4678	0.4881	0.6336
5	0.4932	0.5396	0.5458
6	0.4812	0.5164	0.5970
7	0.4593	0.5243	0.6342
8	0.4869	0.4984	0.6114
9	0.4754	0.5445	0.6248
10	0.4881	0.5296	0.6589
平均	0.4742	0.5190	0.6133

从表 1、2 中可以观察到,利用非线性方法,测试出的每个试块非线性系数有较明确的区别,而用衰减法测试的结果,每个试块之间的衰减系数有一定的数据重叠,不能很好的区分孔隙率含量合格与不合格之间的差异。图 6、图 7 为两种方法测量结果与对应的 3 块不同孔隙含量试块之间变化图。

从表 1、2 和图 6、7 可以看出两种测试方法都能在一定程度上表征孔隙含量多少,但对比图 6、图 7 发现,对 RTM/ 纺织符合材料孔隙率的敏感程度相比较,非线性系数相对于超声衰减系数的变化量要更加强烈。

### 3.3 金相对比图

超声测试结束后,对 3 个试样进行金相试样观察,

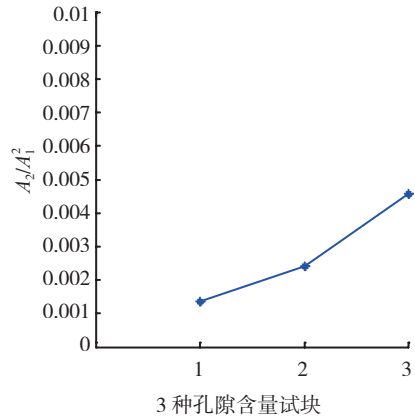


图6  $A_2/A_1^2$ 随孔隙率变化图

Fig.6  $A_2/A_1^2$  With the change of porosity figure

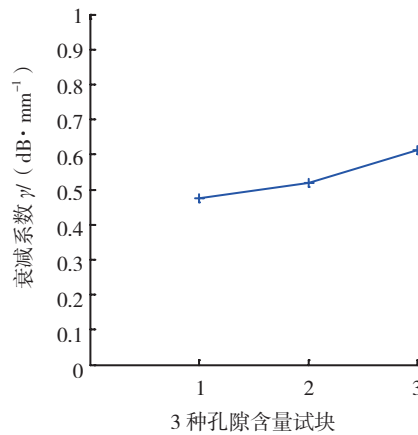


图7 衰减系数 $\gamma$ 随孔隙率变化图

Fig.7 Attenuation coefficient  $\gamma$  with change of porosity figure

其结果如图 8 所示。各取 3 个试样非线性系数相对平均处,沿着复合材料垂直纤维方向的横截面进行打磨及观测所得图像。依次为孔隙率相对较低的试块 1,孔隙率相对中间的试块 2,孔隙率相对较高的试块 3。可观测到 3 个试块的金相结果与超声非线性评价结果吻合。

## 4 结束语

采用设计的非线性超声检测系统,对 RTM/ 纺织复合材料中的孔隙缺陷的非线性评价方法进行了研究。研究表明:二次谐波非线性系数的改变与试块的孔隙率之间存在着良好的线性关系,能够用于 RTM/ 纺织复合材料孔隙率的超声评价。由于搭建的测试系统中具有不可控的非线性因素,为准确定量研究材料的非线性特征,下一步的工作就是研究系统非线性的影响并完善测量系统,制备各种孔隙含量的试块,力求得出不同孔隙含量的 RTM/ 纺织复合材料与二次谐波系数之间的变化规律,实现对其孔隙含量的定量评价。

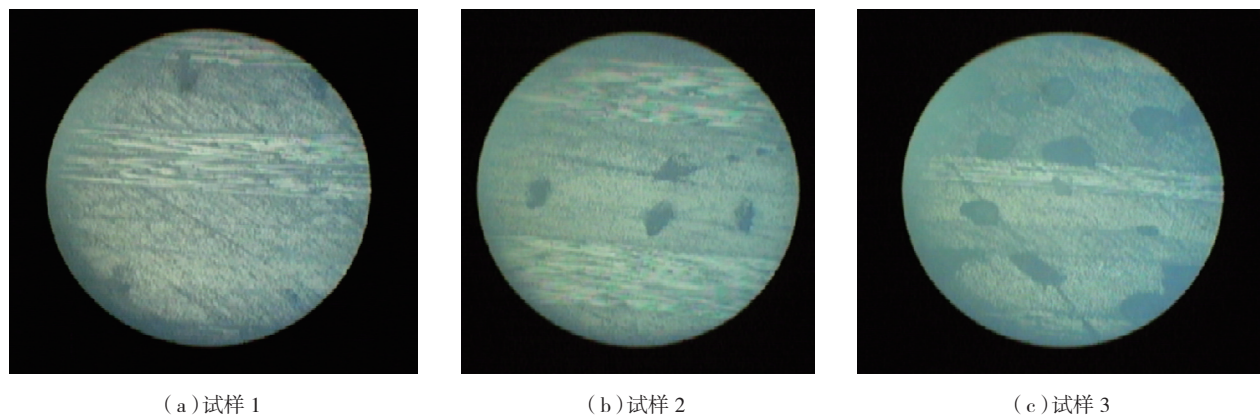


图8 3个不同孔隙率试样金相对比图  
Fig.8 Metallographic comparison chart of three different porosity sample

### 参考文献

- [1] 肖红波,王钧,杨小利. RTM 成型三维编织复合材料的应用. 国外建材科技, 2006(27):8-9.
- [2] 李萍. RTM 制品缺陷分析与表征 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [3] 冯武. RTM 工艺缺陷形成机理与控制方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [4] 益小苏,杜善义,张立同. 先进复合材料技术研究与进展. 北京: 国防工业出版社, 2006, 124-126.
- [5] Croxford A J. Nonlinear ultrasonic characterization using the noncollinear method. Review QNDE, 2010, 30: 330.
- [6] Paolo D P, Mohammed A S, David R H. Classification and quantification of initial porosity in a CMC laminat. Composites:Part A, 2004, 35:223-230.
- [7] Birt E A, Smith R A. A review of NDE methods for porosity measurement in fibre-reinforced polymer composites. Insight, 2004, 6 (11): 681-686.
- [8] Solodov I, Wackerl J, Pfeleiderer K, et al. Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location. Applied Physics Letters, 2004, 84: 5386.
- [9] Buck O. Material characterization and flaw detection by acoustic NDE. Journal of the Minerals, Met-als&Materials Society, 1992, 44: 17-23.
- [10] Rokhli S I, Matikas T E. Ultrasonic characterization of surfaces and interfaces. Material Research Society Bulletin, 1996, 21(10): 18-29.
- [11] Keral S I. Strain induced elastic anisotropy measured with ultrasonic waves. J Appl Mech, ASME, 1990, 57:930-936.
- [12] Guyer R A, Johnson P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. Physics Today, 1999(4):30-60.
- [13] Cantrell J H. Fundamentals and application of nonlinear ultrasonic nondestructive evaluation. Florida: CRC press LLC, 2003.
- [14] Zheng Y P, Solodov I Y. Nonlinear acoustic applications for material characterization: a review. Canadian Journal of Physics, 1999, 77: 927-967.
- [15] Hirsekorn S. Nonlinear transfer of ultrasound by adhesive joints—a theoretical description. Ultrasonic, 2001, 39: 57-68.
- [16] 钱祖文. 非线性声学. 北京: 科学出版社, 2009.
- [17] 敦怡,师小红,徐章遂. 基于二次谐波技术的固体发动机界面粘结质量的超声无损评. 固体火箭技术, 2008, 31(2):198-200.

(责编 深蓝)

(上接第 88 页)

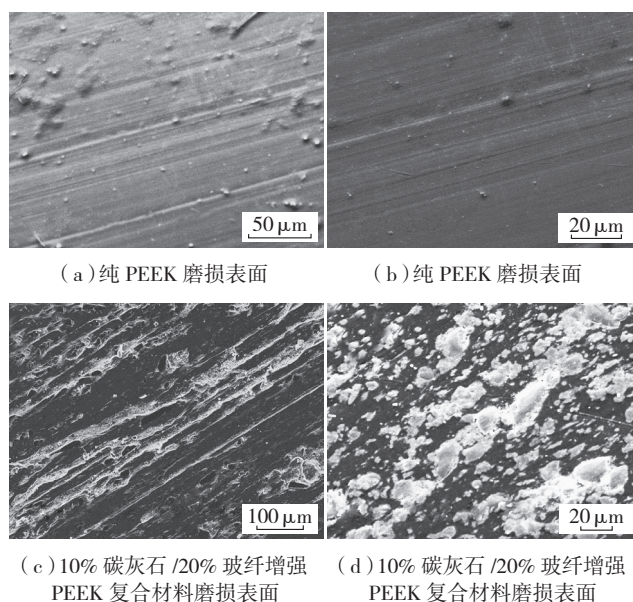


图10 PEEK及其复合材料摩擦实验的磨损表面  
扫描电镜照片

Fig.10 Scanning electron micrographs of abrasion surfaces

blend. Polymer, 1997, 38: 3501.

- [2] Cao J K, Su W C, Wu Z W, et al. Synthesis and properties of poly(ether ether ketone)-poly (ether sulfone) block copolymers. Polymer, 1994, 35: 3549.
- [3] Tabor D. Advances in polymer friction and wear. Plenum Press, 1974, 5: 5.
- [4] Lee I H. Advances in polymer friction and wear. Plenum Press, 1974, 5: 31.
- [5] 古娜. 聚四氟乙烯复合材料摩擦磨损性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009:36-56.
- [6] 张欣涛. 含二氮杂萘酮结构聚醚酮共混及填充改性 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008:72-80.

(责编 深蓝)