

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.008

玻璃/碳纤维增强聚合物基纳米复合材料 冲击力学特性分析研究*

张霞¹, 陈志华¹, 张立华², 冷鼎鑫³

(1. 青岛理工大学琴岛学院 机电工程系, 山东 青岛 266106; 2. 中国第一汽车股份有限公司技术中心
轿车部, 吉林 长春 130011; 3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:针对玻璃/碳纤维增强聚合物基纳米复合材料在冲击工程领域未普及使用的问题,为加快其应用速度,对该材料板件结构的冲击力学特性进行了研究,对比分析了锤头形状对其动力学响应的影响。基于复合材料强度和刚度理论,推导了玻璃/碳纤维增强聚酰胺/碳纳米管复合材料的正交各向异性的等效力学参数;利用非线性显式有限元方法建立了其板件结构的冲击力学模型,通过数值模拟其动态冲击过程,观察了其内部应力波的传播过程,测量了其动力学响应。研究结果表明:应力波从锤头与复合材料板的接触区域开始,逐渐向板件外边界传递。并且随着冲击过程的进行,板内应力峰值增大。与玻璃纤维增强相相比,碳纤维增强纳米复合材料板的刚度增强,冲击加速度峰值增大。

关键词:复合材料;有限元法;冲击力学特性

中图分类号:TH145.4;U465.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0546-05

Impact behaviors of glass/carbon fiber reinforced nano-polymer composites

ZHANG Xia¹, CHEN Zhi-hua¹, ZHANG Li-hua², LENG Ding-xin³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Technological University Qindao College, Qingdao 266106, China; 2. Department of Passenger Car, China Faw R&D Center, Changchun 130011, China;
3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming at accelerating the application of the fiber reinforced nano-polymer composite (FRNC) in the impact engineering, the dynamic behaviors of glass/carbon FRNCs were studied. The effects of impactors with different geometry on the impact performances of composite plate were discussed. According to the strength and stiffness theory of composites, the orthotropic material mechanical constants of glass/carbon fiber reinforced polyamide with carbon nanotube were calculated. The impact model was established by explicit finite element method. The dynamic deformation process were simulated numerically. The stress wave propagation process was observed, and the dynamic responses were measured. The results indicate that the stress initiates in the contact region of impactor and the composite plate, and propagates towards to the boundary of composite plate. The maximum stress increases during the impact process. The stiffness and impact acceleration peak of carbon fiber reinforced nano-polymer composite are both greater, compares with glass fiber.

Key words: Composites; finite element method; impact behaviors

0 引言

随着材料科学的不断进步,纤维增强聚合物基复合材料以比强度、比刚度高、可设计性强等优点,在航

空航天、汽车、船舶等应用材料中占有越来越大的比例^[1-3]。上世纪末迅速发展的纳米科学是当今复合材料的又一研究重点,尤以碳纳米管最具代表性,其在纳观尺度的力学性能明显优于普通纤维或金属材料^[4-5]。

收稿日期:2015-00-00

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(20153054);中国博士后科学基金资助项目(2015M582141)

作者简介:张霞(1959-),女,黑龙江哈尔滨人,本科,副教授,主要从事复合材料的数值模拟研究。E-mail: ZhangXia 688@126.com

有文献^[6]表明:如果使用碳纳米管对聚合物基体改性,再与纤维混合制备成的复合材料,与未加入纳米增强相的纤维复合材料相比,界面粘合性能显著提高,抗冲击性能增强。因此,对纤维增强碳纳米管改性聚合物基复合材料冲击力学特性的研究将可能带来轻质材料工程应用的又一次飞跃。

本研究将采用非线性有限元方法数值模拟该复合材料板的动态冲击过程,讨论其冲击力学行为,为其结构设计提供重要的理论依据。

1 复合材料等效力学参数计算

首先,本研究确定碳纳米管改性聚合物基体材料的主要力学参数。基体材料选用聚酰胺,碳纳米管在复合材料中的体积百分比定为 10%。假设在理想加工条件下,碳纳米管均匀地分散在基体中,未出现卷曲和团聚等现象。因此,改性后的基体材料具有各向同性的材料属性。基于复合材料力学,可计算其主要力学参数^[7]:密度为 1 421 kg/m³,弹性模量和剪切模量分别为 105.7 GPa 和 26.5 GPa,泊松比为 0.31,拉伸强度、压缩强度及剪切强度分别为 14.2 GPa、14.8 GPa 和 1.1 GPa。

其次,计算纤维增强碳纳米管改性聚合物基复合材料的力学性能参数。基于复合材料强度和刚度理论,计算得到理想制造条件下复合材料正交各向异性的等效模量、泊松比及强度值^[8]。

现用 E 、 S 分别表示刚度和强度;下标 1、2 分别代表沿纤维方向和垂直于纤维方向; f 、 m 分别代表纤维和碳纳米管改性聚合物基体; c 、 t 分别表示压缩和拉伸; v 表示组分的体积百分含量; $e_r^{(+)}$ 为基体横向失效应变。

复合材料的主要力学参数为:

- (1) 沿纤维方向的等效杨氏模量 E_1 为:
- $$E_1 = E_f v_f + E_m v_m \tag{1}$$
- (2) 垂直于纤维方向的等效杨氏模量 E_1 为:
- $$\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m} \tag{2}$$
- (3) 等效剪切模量 E_{12} 为:
- $$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_f} + \frac{v_m}{G_m} \tag{3}$$
- (4) 主泊松比 μ_{12} 为:
- $$\mu_{12} = \mu_f v_f + \mu_m v_m \tag{4}$$
- (5) 沿纤维方向的拉伸强度 S_{1t} 为:
- $$S_{1t} = S_f v_f + E_m \varepsilon_f v_m \tag{5}$$
- (6) 沿纤维方向的压缩强度 S_{1c} 为:

$$S_{1c} = \frac{E_1 e_r^{(+)}}{\mu_{12}} \tag{6}$$

(7) 垂直于纤维方向的拉伸强度 S_{2t} 为:

$$S_{2t} = \frac{E_2 S_{mt}}{E_m F} \tag{7}$$

式中: F —应变集中系数。

F 为:

$$F = \frac{1}{\sqrt{\frac{4v_f}{\pi} \left[\frac{E_m}{E_f} - 1 \right]} + 1} \tag{8}$$

(8) 垂直于纤维方向的压缩强度 S_{2c} 为:

$$S_{2c} = \frac{E_2 S_{mc}}{E_m F} \tag{9}$$

(9) 剪切强度 S_{12} 为:

$$S_{12} = \frac{G_{12} S_{m12}}{G_m F_s} \tag{10}$$

类似地, F_s 为:

$$F_s = \frac{1}{\sqrt{\frac{4v_f}{\pi} \left[\frac{G_m}{G_f} - 1 \right]} + 1} \tag{11}$$

本研究分别以玻璃纤维和碳纤维为增强材料,其力学参数如参考文献[9]中所示,应用公式(1~11),可计算得到纤维体积百分比为 50%。

碳纳米管体积百分比为 10% 的玻璃/碳纤维增强碳纳米管改性聚酰胺基复合材料的主要力学参数如表 1 所示。

表 1 纤维增强单壁碳纳米管改性聚酰胺基复合材料的力学性能参数

主要力学性能	材料 1	材料 2
密度/(kg·m ⁻³)	1 985.5	1 560.5
沿纤维方向弹性模量/GPa	139.35	227.85
垂直纤维方向弹性模量/GPa	101.36	162.36
剪切模量/GPa	28.14	44.84
泊松比	0.265	0.255
沿纤维方向拉伸强度/GPa	12.7	9.9
沿纤维方向压缩强度/GPa	14.1	37.5
垂直纤维方向拉伸强度/GPa	2.8	2.5
垂直纤维方向压缩强度/GPa	14.4	11.4
剪切强度/GPa	1.06	0.84

材料 1—玻璃纤维增强碳纳米管改性聚酰胺基复合材料;
材料 2—碳纤维增强碳纳米管改性聚酰胺基复合材料

2 有限元数值模拟

本研究采用 LS-DYNA 非线性显式有限元软件,通过数值模拟单壁碳纳米管增强复合材料板在冲击载荷

下的变形过程,参照 Karakuzu 等^[10]对玻璃纤维/环氧树脂板的冲击试验数据,建立有限元模型。

复合材料板的几何尺寸为 $76.2\text{ mm} \times 76.2\text{ mm} \times 0.36\text{ mm}$,由于其厚度与其长度和宽度的比值均小于 0.1,属于典型的薄板结构,因此可使用 SHELL163 壳单元进行网格划分,板件的厚度以实常数定义,网格尺寸为 $0.9\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$,其材料模型选用基于 Chang-Chang 失效准则的 *MAT_Enhanced_Composite_Damage^[11],材料参数如表 1 所示。笔者根据实验的边界条件^[12],对复合材料板的外边界节点施加铰约束(即限制平动自由度,释放转动自由度)。

冲击物用直径 12.7 mm ,质量 5 kg 的钢质半球形物体来模拟,材料模型为 *MAT_Rigid(弹性模量为 210 GPa ,密度为 7800 kg/m^3 ,泊松比为 0.3),本研究使用 SOLID164 实体单元进行网格划分,并以 MASS 单元对冲头进行质量配重,其边界条件为释放沿着冲击方向的平动自由度,其余 5 个自由度均为零。分别对冲击物施以不同的初始速度(2 m/s , 2.8 m/s , 3.5 m/s),研究不同冲击能量(10 J , 20 J , 30 J)对复合材料板动力学响应的影响。本研究选取复合材料板为目标面,冲击物为接触面,定义面-面接触,有限元模型如图 1 所示。

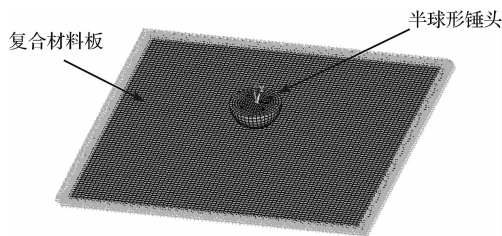


图 1 纤维增强聚合物基纳米复合材料板受半球形锤头冲击的有限元模型

此外,为对比冲击锤头形状对复合材料板冲击行为的影响,本研究还计算了平头锤头的冲击过程。平头锤头的几何尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。

3 试验结果及分析

当半球形冲击锤头的初始冲击速度为 2 m/s 时,复合材料板的 Von Mises 应力分布结果如图 2 所示。

从图 2 中可知,应力波从冲击锤头与复合材料中心的接触区域开始,沿板件表面向周围区域扩散。由于锤头为半球体,所以其与复合材料板的初始接触为点-面接触。随着冲击过程的进行,接触区域不断扩大,逐渐过渡为面-面接触,且峰值应力不断增大。这与复合材料板的冲击实验结果一致^[13]。

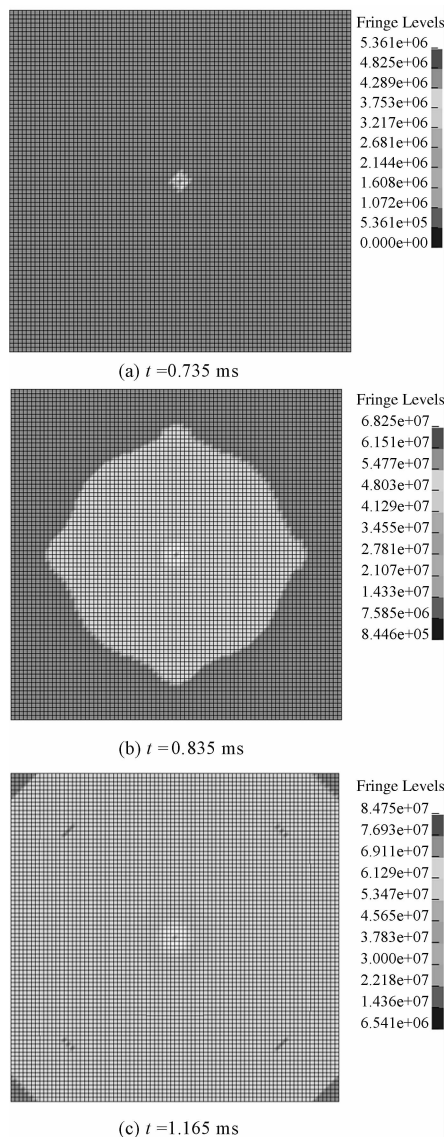


图 2 复合材料板受半球形锤头冲击的 Von Mises 应力分布(单位:Pa)

平头冲击锤头以初始冲击速度 2 m/s 冲击复合材料板时,板内应力波的传播过程。对比情况如图 3 所示。

由图 3 可知,与半球形锤头不同,平头锤头冲击复合材料板的初始接触区域为锤头在板内的投影。且在锤头与复合材料板相接触的 4 个接触点处呈现明显的应力集中现象,这是由于锤头的形状所导致的。也是该原因导致了平头冲击冲击复合材料板的 Von Mises 应力峰值比半球形锤头冲击过程中的应力峰值大。

综合对比图 2 与图 3 可知,不论锤头的形状如何,随着冲击过程的进行,复合材料板内的 Von Mises 应力峰值均呈现逐渐升高的趋势。

在不同初始冲击速度下,半球形锤头冲击玻璃/碳纤维增强复合材料板的加速度时域曲线。对比情况如图 4 所示。

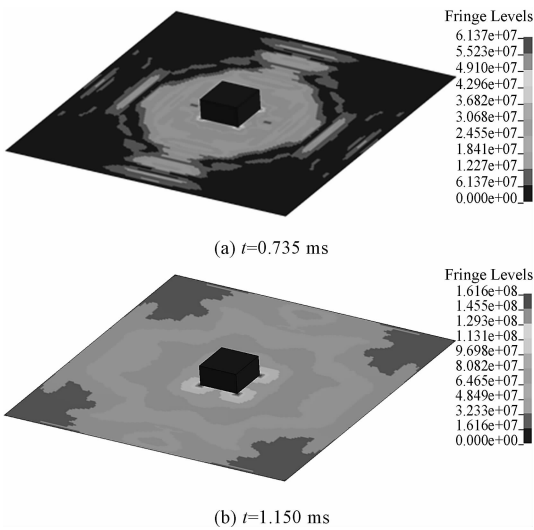


图3 复合材料板受平头锤头冲击的
Von Mises 应力分布(单位:Pa)

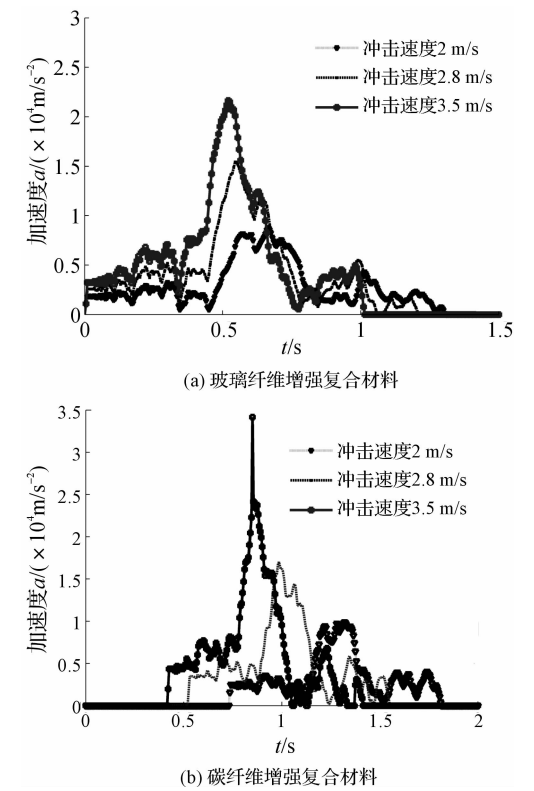


图4 复合材料板的加速度-时间曲线

从图4中可以观察到,复合材料板内的加速度呈现“先增加后减少”的趋势,这是由冲击过程的不同阶段决定的。在低速冲击下,复合材料板的时程响应可分为压缩和回弹2个阶段。在压缩阶段,随着冲头逐渐压缩复合材料板,加速度不断增大至峰值。在回弹阶段,冲头反方向运动并逐渐与复合材料板脱离接触。因此,冲击加速度逐渐减小至零。

另外,从图4中还可以看出,随着锤头冲击初速度的增加,复合材料板内的加速度峰值不断增大,并且响

应时间缩短。其原因为:冲击初速度越大,代表输入到复合材料板的初始冲击能量越高。基于能量守恒可知,输入能量越高,锤头与复合材料板间的碰撞接触力越大,冲击加速度越大。

不同纤维增强相的碳纳米管改性聚合物基复合材料的力学性能的对比如表2所示。

表2 不同材料组分聚合物基复合材料的力学性能对比

材料 编号	沿纤维方 向/GPa	垂直纤维 方向/GPa	冲击加速度峰值/ $10^4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$		
			冲击加速度峰值/ $10^4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$		
			$(v_0=2\text{ m/s})$	$(v_0=2.8\text{ m/s})$	$(v_0=3.5\text{ m/s})$
1	139.35	101.36	0.83	1.56	2.17
2	227.85	162.36	0.89	1.7	3.43

1—玻璃纤维增强单壁碳纳米管改性聚酰胺基复合材料,
2—碳纤维增强单壁碳纳米管改性聚酰胺基复合材料

由表2可知,在冲击速度相同的条件下,碳纤维与玻璃纤维相比,其增强复合材料在沿纤维方向及垂直纤维方向上的杨氏模量均较大,且冲击加速度峰值较大。这是由于在输入冲击能量相同的情况下,结构的刚度越大,冲击加速度峰值越大。

4 结束语

应用复合材料力学,本研究计算了纤维增强碳纳米管改性聚酰胺基复合材料的主要力学参数,建立了该材料板件结构在冲击载荷下的有限元模型,研究了不同冲击能量对其力学响应的影响。得到如下结论:

- (1)玻璃/碳纤维增强聚合物基纳米复合材料板在冲击力作用下,应力波从冲击中心区域沿板件的表面向其它区域传播,且应力峰值不断升高。
- (2)冲击加速度随时间的变化过程可分为冲击压缩和回弹两个阶段。随着冲击速度的增加,板件内的加速度峰值增大。
- (3)在冲击能量相同的条件下,碳纤维与玻璃纤维相比,其增强碳纳米管改性复合材料的刚度大,冲击加速度峰值大。

参考文献(References):

[1] 崔西亮,田 彪,王永国. 碳纤维复合材料钻孔加工的缺陷分析[J]. 机电工程,2013,30(2):182-184.

[2] 黄秀秀,胡小平,于保华. 蜂窝复合材料超声切割力建模及工艺参数选择研究[J]. 机电工程,2015,32(1):32-36.

[3] 徐 中,田 松. 热处理 PIT/IPN 压电复合材料由制备及性能研究[J]. 机电工程技术,2015,44(9):37-40,183.

[4] KLAUS F, ABDULHAKIM A A. Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications [J]. Applied Composite Materials,2013,20(2):107-128.

- [5] 宋海洋. 单壁碳纳米管力学性质的分子动力学模拟[J]. 西安邮电学院学报, 2008, 13(1): 149-152.
- [6] WANG Y, SUN C, SUN X, et al. 2-D nano-scale finite element analysis of a polymer field [J]. **Composites Science and Technology**, 2003, 63(11): 1581-1590.
- [7] 冷鼎鑫. 冲击载荷下几种典型汽车新材料与结构力学行为[D]. 北京: 北京航空航天大学材料学院, 2015.
- [8] Ronald F. Gibson. Principles of composite material mechanics [M]. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [9] 贺 福. 碳纤维及石墨纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [10] KARAKUZU R, ERBIL E, AKTAS M. Impact characteristics of glass/epoxy composite plates: an experimental and numerical study [J]. **Composite Part B: Engineering**, 2010, 41(5): 388-395.
- [11] CHANG F, CHANG K. Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure[J]. **Journal of Composite Materials**, 1987, 21(9): 809-833.
- [12] 万 钺, 金 平, 谭晓明, 等. 基于 ABAQUS 的复合材料低速冲击损伤分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 38-42.
- [13] 朱东俊, 葛 亮, 刘 莹. 基于 ABAQUS 的复合材料板冲击特性分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(2): 21-25.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

张 霞, 陈志华, 张立华, 等. 玻璃/碳纤维增强聚合物基纳米复合材料冲击力学特性分析研究[J]. 机电工程, 2016, 33(5): 546-550.

ZHANG Xia, CHEN Zhi-hua, ZHANG Li-hua, et al. Impact behaviors of glass/carbon fiber reinforced nano-polymer composites[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(5): 546-550.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 545 页)

3 结束语

(1) 本研究介绍了局部均值分解的方法, 并利用非平稳齿轮箱正常信号和齿轮磨损故障信号作为具体实例, 详细介绍了对 LMD 分解后的第一级 PF 分量进行包络分析的研究思路, 并利用该思路对比分析了其包络谱特征频率的物理意义, 针对上述两种信号完成了齿轮箱磨损故障的识别。

(2) 针对齿轮局部损伤信号, 利用该思路做了验证分析, 验证了该方法用于齿轮箱故障诊断方面的可行性, 并基本完成了齿轮磨损故障和局部损伤故障的识别。

综上所述, 本研究提出的方法对于识别齿轮箱的故障是可行的, 但实测数据效果不是特别好(边频带不明显), 还需要进一步改进。

参考文献 (References):

- [1] 赵纯领, 高洪滨, 杜向华. 基于振动信号的齿轮箱故障诊断[J]. 机电工程技术, 2014, 43(6): 90-92.
- [2] 刘祖菁, 贾民平, 许飞云. 基于 EMD 和 Hilbert 解调的齿轮箱故障诊断[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1297-1300.
- [3] RADCLIFF G A. Condition monitoring of rolling element bearings using the enveloping technique [M]. London: Machine Condition Monitoring, Mechanical Engineering Publication Ltd, 1990.
- [4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 1998, 454(1971): 903-995.
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum 1 [J]. **Annual review of fluid mechanics**, 1999, 31(1): 417-457.
- [6] 沈国际, 陶利民, 陈仲生. 多频信号经验模态分解的理论研究及应用[J]. 振动工程学报, 2005, 18(1): 91-94.
- [7] 陈 忠, 郑时雄. 基于经验模式分解 (EMD) 的齿轮箱齿轮故障诊断技术研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 229-232.
- [8] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. **Journal of the Royal Society Interface**, 2005, 2(5): 443-454.
- [9] 程军圣, 张 亢, 杨 宇, 等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 13-16.
- [10] JUNHONG Z, YU L. Bearing fault diagnosis based on improved LMD [C]//Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on. Chang Chun: IEEE, 2011: 2544-2547.
- [11] 程军圣, 于德介, 杨 宇. 基于 SVM 和 EMD 包络谱的滚动轴承故障诊断方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(9): 131-136.
- [12] 张梅军, 黄 杰, 柴 凯, 等. 机械转子动静碰摩故障的 EMD 分解 Hilbert 包络谱分析[J]. 机械, 2013, 40(12): 6-9.
- [13] 孙 伟, 熊邦书, 黄建萍, 等. 小波包降噪与 LMD 相结合的滚动轴承故障诊断方法. [J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 153-156.

[编辑: 李 辉]