

超声拉伸纳米复相陶瓷非局部力学试验研究

卞平艳, 赵 波

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要:提出了纳米复相陶瓷在超声振动条件下的单向拉伸实验方法,通过对超声振动拉伸下材料特性的实验研究,基于非局部理论,研究纳米复相陶瓷材料的断裂机制、微观组织和力学性能,获得超声频率对轴向拉伸应力的影响规律及非局部衰减率的变化规律。试验结果表明,试件在给定超声振动频率范围内拉伸时应力出现衰减现象,且随频率的增大更明显,对拉伸断口进行微观分析,结果表明,超声振动改变了材料的断裂方式和微观组织结构,增强了材料的韧性,说明在超声激励下更容易实现延性域加工。试验结果与非局部理论分析一致。

关键词:超声振动;非局部理论;弹性核函数;拉伸试验;纳米复相陶瓷

中图分类号:TB124

文献标识码:A

Experimental Research on Nonlocal Mechanical Behavior of Micro-nanocomposited Ceramics under Ultrasonic Tensile Test

BIAN Pingyan, ZHAO Bo

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The uniaxial tensile test method of micro-nanocomposited ceramics is put forward under ultrasonic excitation. Based on nonlocal theory, fracture mechanism, microstructure and mechanical properties of micro-nanocomposited ceramics are studied through the experimental study of material properties under ultrasonic vibration tensile test, and the effects of ultrasonic frequency on the axial tensile stress and nonlocal decay rate are obtained. The results of experiments show that tensile stress is attenuated when the tensile of the specimen is in the ultrasonic vibration frequency ranges and this attenuation phenomenon becomes more and more evident by the increase of the ultrasonic frequencies. Microscopical analysis of tensile fracture is conducted. It shows that ultrasonic vibration changes the fracture mode and microstructure and improves the toughness of the material, and it says that it is much easier to achieve ductile-mode machining under ultrasonic excitation. The results of experiments are in accordance with the analysis of nonlocal theory.

Key words: ultrasonic vibration; nonlocal theory; elastic kernel function; tensile test; micro-nanocomposited ceramics

0 引言

陶瓷材料在超声振动^[1-3]下表现出的力学行为的研究对于探索材料在特殊负荷环境下的力学行为具有重大意义。由于在超声振动下伴随着材料变化的全过程有各种行为效应如力学效应、电磁效应、化学效应和热学效应等,使问题的研究由单一领域转化为多学科、多领域、宏观和微观交织在一起,此时经典的连续介质力学理论已无法解释这些特殊现

象。Eringen等^[4-5]在考虑物质内部长程力基础上建立起了非局部弹性统一理论,它属于广义连续介质力学的范畴,试图在宏观和微观上建立起一座桥梁,形成一个多尺度的统一场论,用以弥补经典连续介质力学在有些方面的不足。本课题组已初步尝试将非局部理论应用于超声振动下陶瓷材料的微观特性和力学特性的研究^[6-7],并取得了一定的研究成果。本文将基于非局部理论针对超声振动下不同频

收稿日期:2012-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975080)

作者简介:卞平艳(1982-),女,河南济源人,讲师,博士,主要从事精密超精密加工及其表面技术的研究。E-mail:bianpy@hpu.edu.cn。赵波(1956-),男,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术、硬脆材料精密超精密与特种加工的研究。E-mail:zhaob@hpu.edu.cn。

率的拉伸实验进行研究。

1 超声振动作用下纳米复相陶瓷单轴拉伸的非局部本构关系

经典弹性理论以这样两个假定为基础,即假定所有平衡定律对物体的每个部分,不管它多么小都成立;假定物体在任一质点处的状态只受该点无限小领域的影响。第一个假定消除了载荷对物体的运动及物体状态的长程效应;第二个假定则忽略了长程的原子间相互作用效应。但所有物体都是由具有某种特征长度(子体的距离或大小)的诸子体(原子、分子、颗粒)所组成;外部载荷也具有特征长度或时间(波长、在其上有常值的或光滑的扰动区域、频率等)。物体的响应受(与外部荷载有关的)特征长度 l 和内部特征长度 a (如晶格参数,粒子距离)之比的影响。当 $l/a \rightarrow \infty$ 时,经典力学适用,因为此时为大量子体共同作用。然而,当 l/a 具有可比性时,物体组分的个别响应变为重要,局部性失效,此时要用到非局部理论^[8-9]。

对均匀各向同性介质的小变形问题,非局部弹性理论的运动方程和几何方程与经典弹性理论完全一样,即

$$t_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (3)$$

式中: t_{ij} 为非局部应力张量; $u_{i,j}$ 、 f_i 、 ρ 分别为位移向量,体力和密度; e_{kk} 、 e_{ij} 为应变张量; σ_{ij} 为经典弹性力学中的柯西(Cauchy)应力张量; λ 、 μ 为经典力学理论中的拉梅(Lame)常数。

相对于经典弹性力学,非局部理论在本构方程中加入了材料微观结构的长程力学效应,即把广义 HOOKE(胡克)定律扩展成:

$$t_{ij} = \int_v [\lambda' e_{kk}(x') \delta_{ij} + 2\mu' e_{ij}(x')] dv(x') \quad (4)$$

式中: λ' 和 μ' 为非局部弹性模量; v 为物体域; δ_{ij} 为 Kronecker delta (克罗内克 δ)。

假设 λ' 和 μ' 对本构的影响一致,取

$$\lambda' = \lambda \cdot \alpha(|x' - x|, \epsilon) \quad (5)$$

$$\mu' = \mu \cdot \alpha(|x' - x|, \epsilon) \quad (6)$$

式中 α 为非局部弹性核函数。把式(5)、(6)代入式(4)可得非局部理论的本构方程为

$$t_{ij}(x) = \int_v \alpha(|x' - x|, \epsilon) \sigma_{ij}(x') dv(x') \quad (7)$$

式中 $\alpha(|x' - x|, \epsilon)$ 为非局部弹性核函数,为材料函数,是关于距离 $|x' - x|$ 和参数 ϵ 的函数,是一个衰减函数。其中 $r = |x' - x| = \left[\sum_{i=1}^3 (x'_i - x_i)^2 \right]^{1/2}$ 表示 x' 点对 x 点处影响的 Euclidean 距离(欧氏距离)。参数 ϵ 为表征材料微观结构长程力学效应的小参量,其定义依赖于特征长度比 l/a , l 在此取超声波的波长,通常取 $\epsilon = e_0 a/l$, e_0 为非局部尺寸参数,通常假设为恒定的适合于相应材料的参数^[10-11]。

针对本试验的研究问题,选定核函数^[12]:

$$\alpha(|x' - x|, \epsilon) = \frac{\epsilon^4}{2\pi(|x' - x|^2 + \epsilon^2)^3} \quad (8)$$

把式(8)代入式(7)中可得

$$t_{ij}(x) = \int_v \frac{\epsilon^4}{2\pi(|x' - x|^2 + \epsilon^2)^3} \sigma_{ij}(x') dv(x') \quad (9)$$

从式(8)、(9)可得如下两个结论:

1) 弹性核函数 $\alpha(|x' - x|, \epsilon)$ 在 $x' = x$ 处(在破坏点或应变软化点 x 处)取极大值,其曲线关于极轴对称,且在邻域内随着相对距离 $|x' - x|$ 的增加而衰减,在影响域 $\alpha(|x' - x|, \epsilon) \geq 0$ 内,在影响域外 $\alpha(|x' - x|, \epsilon) = 0$ 。

2) 附加超声振动,由于颗粒边缘的散射作用而使波能量衰减,存在波的散射现象^[13],加载的超声波波长与 a 越接近(即 l 与 $e_0 a$ 越接近),波散射现象就越明显,波速下降越快,造成相速的频散现象,应力衰减幅度将增大。此时,将普通拉伸状态下陶瓷材料的轴向拉应力定义为 σ_N ;而鉴于超声激励所造成的复杂效应,将超声激励下陶瓷材料的轴向拉应力定义为 σ_U 。在单轴应力状态下, σ_{11} 非 0, $\sigma_{ij} = 0$ (i, j 不同时为 1),利用式(7)可得^[14]

$$t_{11} = \sigma_{11} \int_v \alpha(|x' - x|, \epsilon) dv(x') \quad (10)$$

将拉应力测试结果代入式(10)可得

$$\int_v \alpha(|x' - x|, \epsilon) dv(x') = \sigma_U / \sigma_N = \kappa \quad (11)$$

式(11)把非局部理论下的应力衰减程度分析与核函数衰减性质之间建立了函数关系。其中 $\kappa < 1$, 作为非局部核函数的积分值,定义为作用域加权平均或衰减率,其值也可由超声激励波频散现象中超声波在陶瓷试件中的相速的变化来确定^[13,15],同时也是实验确定核函数小参量 ϵ 的定值条件。

2 超声激励拉伸实验

2.1 超声波拉伸实验装置

本文设计研制了一套用于研究陶瓷材料在超高频振动下单向拉伸性能的实验装置,这套装置由超声波发生器、超声波换能器、变幅杆及超声波振动系统与工件的连接装置 4 个部分组成,如图 1 所示。超声振动系统功率大小为 75 W,本实验采用纵向振动激励模式,由图可知整个实验装置的组成及其装夹情况,变幅杆与换能器间用螺栓连接,变幅杆中螺纹的中心线与端面间垂直度要求控制在 0.1 mm 内。组装时,为了整体谐振时减小能量损失,这 2 个被连接表面应先涂硅油,然后再拧紧螺栓。

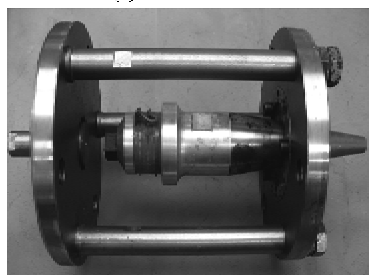
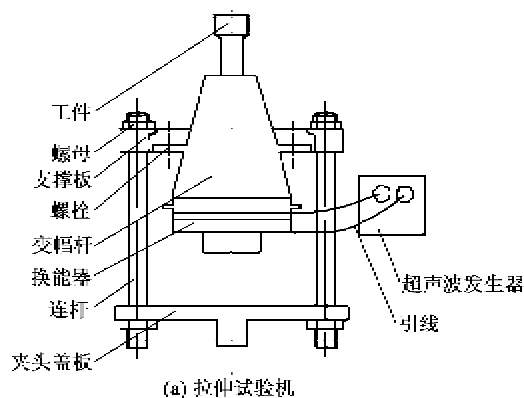


图 1 超声激励单轴拉伸试验装置

2.2 试件的制备和实验方法

在拉伸试验中,采用 ZL-10 型万能拉伸试验机,所用试件材料为 ZTA($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2(25\%)$) 纳米复相陶瓷,是在最高烧结温度 1640 °C 下,经等静压工艺烧结而成。陶瓷棒料的长度根据不同频率的超声波的半波长进行设计,如图 2 所示。试件以较低的工件速度和较小的砂轮切深进行加工,可获得较低的表面粗糙度。试件磨削时参数:工件速度 3~5 m/min,砂轮切深 0.005~0.010 mm,砂轮速度为 18 m/s。本试验的不同之处是细端不是用来夹持而是与变幅杆相连,细端中间距变幅杆小端为超声波

半个波长,以保证细段中间为超声波波峰所在位置。试件的表面粗糙度值控制在不超过 0.5 μm ,整个试件加工及形状如图 2 所示。图中, f 为超声波频率, L 为试件总长。

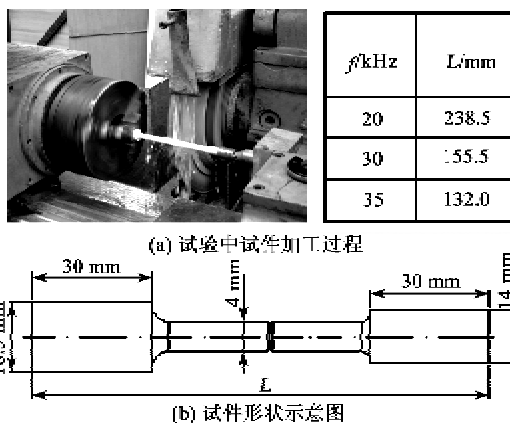


图 2 纳米复相陶瓷试件加工过程和形状示意图

3 基于非局部理论的实验结果分析

图 3 为在不同超声频率下,抗拉强度随时间的测试曲线。图中的 4 条拉伸曲线在不同的超声频率影响下,拉伸强度各不相同。对应不同频率抗拉强度分别为 281.7 MPa、218.5 MPa、200.3 MPa、183.1 MPa,在所给实验频率范围内,强度随所加载的超声振动频率的升高而逐渐降低,在 35 kHz 附件时抗拉强度最小。

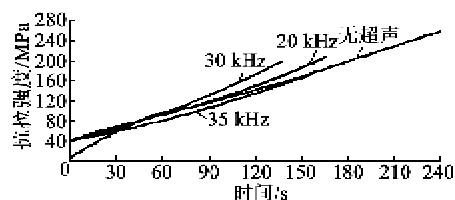


图 3 抗拉强度随时间的测试曲线

这种规律现象可由超声激励下的非局部材料本构关系来刻画,抗拉强度随所加载的超声激励频率的升高而逐渐降低,在此次实验中可得不同超声频率下衰减率 $\kappa=0.650\sim0.776$ 。考虑不同超声频率下非局部弹性核函数与长程作用域的关系,得出非局部 κ 的变化规律,这主要是由于随着频率的增大,波长减小,颗粒散射导致的超声衰减和相速度的频散加剧,在应力计算过程中考虑由此导致的较高频率下的外部超声与内部粒径间的长程力作用增加,使本构关系中的非局部衰减核函数及非局部应力的衰减更明显,致使能量降低,接受到的信号幅值明显减小,试验表明在给定频率范围内 35 kHz 附近抗

拉强度最小,该试验现象表明超声振动辅助拉伸是一个复杂的系统过程,其干扰因素较多,从试验现象可推断在给定频率范围内,35 kHz 情况下系统协调性能达到最佳。

图 4 为利用日本 Jsm5610-LV 型扫描电镜进行试件断裂面的微观组织照片。

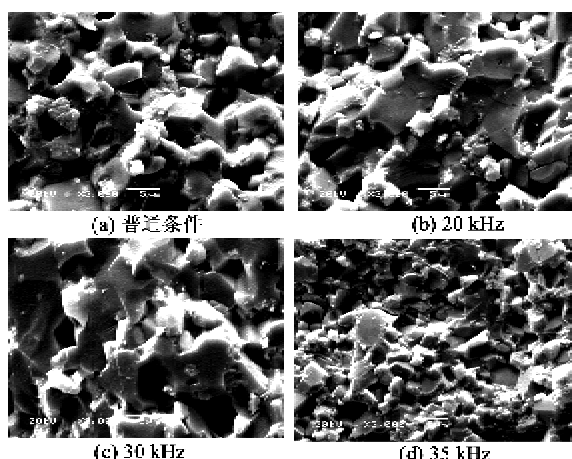


图 4 普通和超声拉伸下试件断口形貌电镜照片

从图 4(a)、(b)及对断口的宏观观察可看出,超声拉伸条件下的断口截面观察不到收缩,断口更光滑,断裂表面找不到明显的疲劳裂纹起始源。由图 4(a)可知,普通拉伸下陶瓷断口的完整晶粒较多,多面体感较强, Al_2O_3 (灰色晶粒)形状较光滑和完整,说明该条件下陶瓷主要发生的是沿晶断裂。断面凹凸不平呈蜂窝状,并沿着相邻晶体间的边界发生断裂,裂纹的扩展路线随机地、曲折地沿晶面断开, ZrO_2 (白色晶粒)与 Al_2O_3 (灰色晶粒)晶界较完整。由图 4(b)可知,在超声拉伸下的试件断口被撕裂棱、韧窝(微孔的一半)覆盖着,在断口上能观测到晶粒断面,在大量的晶粒上有裂纹出现,说明陶瓷发生了穿晶/沿晶混合断裂。在图 4(b)~(d)中均可发现超声拉伸下试件断口表面齐平,裂纹扩展路径较平直。这充分说明超声激励对于陶瓷材料的去除是有利的,本课题组前期的磨削试验^[1,2,16]表明穿晶断裂特征不仅提高了材料的去除率,还可提高磨削表面粗糙度,使磨削表面表现出良好的表面完整性。从图 4(b)~(d)中还可看出,随着超声激励频率的增大,断口的空隙逐渐增多,平整度也得到很大的改善,在 35 kHz 附近时,断面最齐整,由非局部理论得知随着频率的增大,波长减小,外部超声波和内部粒径间的长程力作用增强,颗粒散射作用导致的超声波衰减和相速的频散现象越发明显,由实验现象

得知非局部 κ 在 35 kHz 附近时最小,非局部效应最好,此时波散射作用最强烈,外部超声和内部粒径间的长程力作用最强,超声激励 35 kHz 下所施加的拉应力较小,即以较少的外力可获得陶瓷材料的断裂,再次验证了高频超声的附加有利于 ZTA 陶瓷材料的高效去除,且在给定实验频率范围内 35 kHz 附近时效果最好。

图 5 为利用德国生产的 D8ADVANCE 型 X 线衍射仪进行试件断面相结构分析的结果。

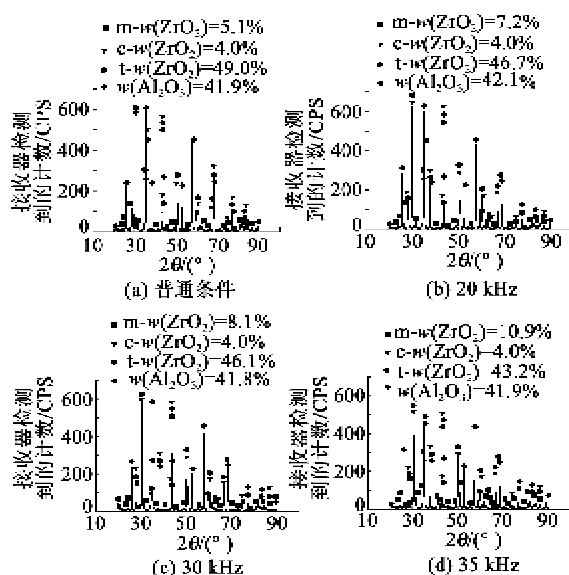


图 5 ZTA 陶瓷试件断面相结构

由图 5 可知,ZTA 陶瓷在不同频率的拉伸过程中都发生了不同程度的马氏体相变。ZTA 纳米复相陶瓷在普通拉伸情况下的断裂面中包含了质量分数为 41.9% 的 Al_2O_3 、质量分数为 49.0% 的 t(四方相)- ZrO_2 、质量分数为 4% 的 c(立方相)- ZrO_2 和质量分数为 5.1% 的 m(单斜相)- ZrO_2 。当材料承受超声激励作用时,陶瓷材料在裂纹尖端应力场的作用下,弥散于基体中的 t- ZrO_2 粒子在马氏体相变过程中将产生 3%~5% 的体积膨胀,拉应力会诱导 t 相 ZrO_2 颗粒向 m 相 ZrO_2 颗粒转变,在基体中产生应力诱发相变导致的弥散分布的微裂纹,在主裂纹尖端扩展过程中会导致穿晶裂纹的二次偏折、分叉(裂纹改变方向),阻碍裂纹扩展,提高裂纹扩展的能量消耗,增加了裂纹扩展路径和难度,使断裂表面能得到增加,穿晶断裂具有明显的韧性增量,使相变层产生相当高的残余压应力,起到增韧的作用,从而提高试件的断裂韧性和强度。

此外,除了形成新的断裂表面需要吸收能量,相变时的体积效应(3%~5%的体积膨胀)也吸收能量,这种组织转变消耗了外加应力,而这种相变粒子的体积膨胀对裂纹产生压应力,阻碍裂纹扩展。基质晶粒内部将产生大量的微裂纹和次界面,而微裂纹本身的扩展也起着分散主裂纹尖端能量的作用,又使晶粒发生分化,出现局部薄弱环节,致使晶界受阻的裂纹得以进入晶内,从而抑制了主裂纹的快速扩展,提高了材料的塑性。这说明超声激励作用在很大程度上改善了陶瓷材料的力学性能,在应力诱导下可发生 $t \rightarrow m$ 相变从而吸收应变,有较好的塑性力学性能。

另外从试验结果还可看出,随着频率的增大,马氏体相变率增大,在 35 kHz 条件下所获得的 $t \rightarrow m$ 相变率要高于其他频率下的相变率,由相变增韧机理^[17],从试验中可看出 ZTA 纳米复相陶瓷材料的 $t \rightarrow m$ 相变率越大,陶瓷材料的塑性性能越强,说明在超声激励下更容易实现延性域加工。

在超声激励下,陶瓷材料的断裂已不是简单的脆性断裂,在失效前发生一定的塑性变形,裂纹需更多的能量得以扩展,其尖端变钝、其前端形成的空隙随着超声激励频率的增大而增大,使塑性变形增大。

4 结束语

基于非局部理论,通过对纳米复相陶瓷材料在超声振动条件下拉伸特性的实验研究,得出并解释了超声振动对纳米复相陶瓷的断裂机制、微观组织和力学性能的影响规律。由试验结果得出陶瓷材料在超声下更易从脆性断裂向塑性断裂转化,更易实现延性域加工。

参考文献:

- [1] 马辉,赵波,谢萍. 纳米复相陶瓷超声磨削频率与表面质量关系的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(12): 1763-1766.
MA Hui, ZHAO Bo, XIE Ping. Research on the relation between ultrasonic grinding frequencies and surface quality for Al_2O_3 - ZrO_2 nano-composite ceramics [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(12): 1763-1766.
- [2] BIAN P Y, ZHAO B, LI Y. Study on the edge quality control in grinding engineering ceramics[J]. Key Engineering Materials, 2011, 455: 682-685.
- [3] ZHAO Bo, ZHAO Mingli, GAO Guofu. Research on surface roughness and micro-topography of nano- ZrO_2 pPlate in two-dimensional ultrasonic grinding [J]. Advanced Materials Research, 2008, 53/54: 243-247.
- [4] ERINGEN A C. Nonlocal polar elastic continua[J]. International Journal of Engineering Science, 1972, 10(1): 1-16.
- [5] ERINGEN A C, EDELEN D G B. On nonlocal elasticity[J]. International Journal of Engineering Science, 1972, 10(3): 233-248.
- [6] 马辉,赵波,谢萍,等. 基于非局部理论的超声振动下陶瓷裂纹扩展机理研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1498-1502.
MA Hui, ZHAO Bo, XIE Ping, et al. Study on ceramic grinding crack propagation mechanism under ultrasonic action by using nonlocal theory[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(12): 1498-1502.
- [7] 谢萍,赵波. 基于非局部理论的超声作用下纳米复相陶瓷材料疲劳试验研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(5): 612-615.
XIE Ping, ZHAO Bo. A Study of the fatigue life of nano-composite ceramics based on nonlocal theory under ultrasonic vibration [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(5): 612-615.
- [8] ERINGEN A C. Linear theory of nonlocal elasticity and dispersion of plane waves[J]. International Journal of Engineering Science, 1972, 10(5): 425-435.
- [9] ERINGEN A C. Nonlocal micropolar field theory[M]. New York: Continuum Physics, Academic Press, 1976.
- [10] NARENDAR S, GOPALAKRISHNAN S. Nonlocal scale effects on ultrasonic wave characteristics of nano-rods[J]. Physica E, 2010, 42: 1601-1604.
- [11] NARENDAR S, MAHAPATRA D R, GOPALAKRISHNAN S. Investigation of the effect of nonlocal scale on ultrasonic wave dispersion characteristics of a monolayer graphene[J]. Physica E, 2010, 49: 734-742.
- [12] 程品三. 脆性断裂的非局部力学理论[J]. 力学学报, 1992, 24(3): 329-338.
CHENG Pinsan. Nonlocal mechanics theory of brittle fracture[J]. Journal of Mechanics, 1992, 24(3): 329-338.
- [13] ICEWICZ, BERT L. A relationship between wave dispersion and fracture strength for a composite material (nonlocal theory, nondestructive testing) [D]. Corvallis: Oregon State University, 1984.

(下转第 128 页)