

基于应力波因子的金属材料表面塑性损伤检测

Nondestructive Evaluation of Surface
Plastic Damage for Metallic Material
Based on Stress Wave Factor

税国双, 黄 蓬

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

SHUI Guo-shuang, HUANG Peng

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong

University, Beijing 100044, China)

摘要: 提出了一种基于应力波因子的金属材料表面塑性损伤检测方法。将 AZ31 镁铝合金试件加载到不同的拉伸载荷后, 利用 Ritec SNAP 非线性超声测试系统激发和接收 Rayleigh 表面波, 通过实验测试在不同载荷作用下基于应力波因子的声学非线性系数与应力的关系。研究结果表明, 当加载应力接近材料的屈服极限时, 基于应力波因子的声学非线性系数随着应力的增加明显增大, 因此可以利用基于应力波因子的声学非线性系数对金属材料表面的塑性损伤进行非线性超声无损评价。

关键词: 表面塑性损伤; 应力波因子; 非线性超声; 非线性系数

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.11.012

中图分类号: O426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)11-0070-05

Abstract: A method for nonlinear ultrasonic evaluation of surface damage for metallic material is presented. Rayleigh waves are excited and acquired with Ritec SNAP nonlinear ultrasonic measurement system, the F_{sw} -based acoustic nonlinearity parameters (F_{sw} ANPs) are thus measured at different stress levels for AZ31 magnesium alloy plate specimens. The results show that there is a significant increase in the acoustic nonlinearity parameters with monotonic tensile loads when the stress is close to the yielding stress. The research suggests an effective nondestructive evaluation method to track the mechanical property for the surface of metallic material in a nonlinear ultrasonic way using stress wave factor.

Key words: surface plastic damage; stress wave factor (F_{sw}); nonlinear ultrasonic; nonlinearity parameter

大型复杂的板状结构广泛应用于航空、航天等领域。在环境的物理、化学作用下, 其表面性质会发生变化, 产生相应的损伤。当不能对板状结构表面性质进行直接的观测时, 很难对其表面进行准确的检测与评价。若采用超声体波的方法, 不但无法在时域上区分各个界面的回波信号, 而且由于结构表面损伤层的厚度、密度和弹性常数等参数的微小变化, 难以对回波信号产生有效的影响。Rayleigh 波是在半空间弹性介质中存在的一种由纵波和横波叠加产生的波。与利用体波进行超声检测相比, 利用 Rayleigh 表面波特别适合对大型复杂的板结构进行材料声学非线性系数的测

量。在测量过程中, 只用在结构的一侧进行超声波的激发和测量就可以了, 从而使测量过程简便易行。并且, Rayleigh 表面波还具有能量集中在结构表面、传播距离较远等非常利于测量的优势。

超声无损检测已成为一种发展历史较长的检测材料性能的技术手段, 并在工程实际中得到广泛的应用^[1]。近年来在无损检测领域, 非线性超声引起了人们的广泛关注^[2-6]。系列的实验研究和理论模型表明, 材料的早期力学性能退化与超声波的非线性效应密切相关^[7-11]。在早期力学性能退化阶段, 由于位错的存在, 当单一频率的超声波在金属材料内部传播时

会发生扭曲和畸变,从而导致高次谐波的产生。不同的材料损伤程度会引起位错组态的变化,而不同的位错组态将导致不同高次谐波的产生。因此,通过对这些高频谐波的检测,可以得到结构材料处于不同损伤程度的声学非线性系数,对材料和结构的早期力学性能退化作出有效的无损检测和评估。本工作基于 Ritec-SNAP 系统建立了非线性 Rayleigh 波测试系统,利用该系统测量了板状固体结构表面产生不同程度塑性损伤时相应的 Rayleigh 波基波和二次谐波的幅频特性,借鉴声-超声检测技术中应力波因子(Stress Wave Factor, F_{sw})的概念,建立了基于应力波因子的非线性系数与加载应力之间的关系。

1 基于应力波因子的非线性系数

在利用 Rayleigh 波进行非线性超声测试中,接收到的 Rayleigh 波基波和二次谐波时域信号形式上可表示为:

$$F(t) = A_r(t) \sin(2\pi f_r t + \varphi_r) \quad (1)$$

其中, $r=1,2$, 分别表示基波和二次谐波; $A_r(t)$ 为调制时域波包; f_r 为基频或二倍频载波频率; φ_r 表示载波(即超声信号)从激发换能器传播到接收换能器后的相移。利用 Ritec SNAP 系统的信号处理功能,在对 $F(t)$ 进行有关分析处理后,向计算机输出两路存在 90° 相差的信号分量:

$$I_1 = C \cos \varphi_r \int_{t_1}^{t_2} A_r(t) dt, I_2 = C \sin \varphi_r \int_{t_1}^{t_2} A_r(t) dt \quad (2)$$

其中调制时域包络 $A_r(t)$ 位于积分时间上下限 t_1 和 t_2 范围之间(如图 1 所示), C 是与 Ritec SNAP 系统参数设置有关的一个常数,相位角 $\varphi_r = \arctan(I_2/I_1)$ 。

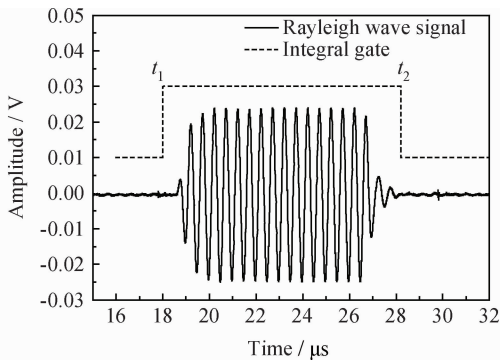


图 1 Rayleigh 波信号与积分时间上下限

Fig. 1 Rayleigh wave signal and the integral zone

从频谱分析的角度考虑, $\int_{t_1}^{t_2} A_r(t) dt$ 表示 $A_r(t)$ 中的直流成分,也就是载波信号 $\sin(2\pi f_r t + \varphi_r)$ ($f_r = f$,

$2f$) 的振幅 $\bar{A}_r(f_r)$, 所以有^[12]:

$$\bar{A}_r(f_r) = \int_{t_1}^{t_2} A_r(t) dt = \frac{1}{C} \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (3)$$

借鉴声-超声检测技术中应力波因子的概念,定义超声应力波因子为^[12, 13]:

$$F_{sw} = \int_{f_1}^{f_2} \bar{A}_r(f_r) df \quad (4)$$

由于损伤导致的固体材料性能退化会影响到基频和二倍频超声波的时域包络,因此 F_{sw} 的数值与固体材料的性能退化是密切相关的,可作为一个特征参量用来定征固体材料的性能退化。参照体波的声学非线性系数的定义方式^[2, 10],针对 Rayleigh 波定义一个基于超声应力波因子的非线性系数 β_R

$$\beta_R = \frac{F_{sw}(2f)}{[F_{sw}(f)]^2} \quad (5)$$

其中, $F_{sw}(f)$ 和 $F_{sw}(2f)$ 分别是基频和二倍频的超声应力波因子。

2 非线性超声实验装置

2.1 试件

选取了 AZ31 镁铝合金作为开展塑性损伤非线性超声无损评价的实验材料。镁铝合金是以镁为基体加入铝等其他元素组成的合金,其特点是密度小、比强度高、承受冲击载荷能力大、耐有机物和碱的腐蚀性能好。镁铝合金具备许多优越的性能,广泛用于便携式器械和轻量化汽车行业中。镁铝合金还是航空器、航天器和火箭导弹制造工业中使用的最轻金属结构材料,广泛应用于航空航天领域。AZ31 镁铝合金试件的几何尺寸和应力应变曲线分别如图 2 和图 3 所示。

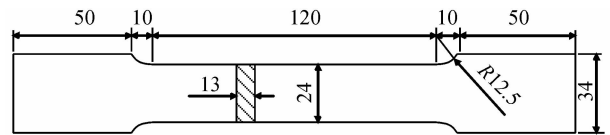


图 2 AZ31 镁铝合金试件的几何尺寸

Fig. 2 Dimension of AZ31 magnesium-aluminum alloy specimen

2.2 实验装置

利用 Rayleigh 波进行金属材料表面塑性损伤测试的实验装置如图 4 所示。利用 Ritec SNAP-0.25-7-G2 非线性超声测试系统主机产生 16 个周期、频率为 2MHz 的正弦脉冲串超声信号,该信号经过 50Ω 的阻抗匹配、衰减器和低通滤波器后,激励粘接在有机玻璃斜楔上的铌酸锂(LiNbO_3)晶片换能器,从而在试件表面激发 Rayleigh 波。在另一端,同样利用铌酸锂晶片

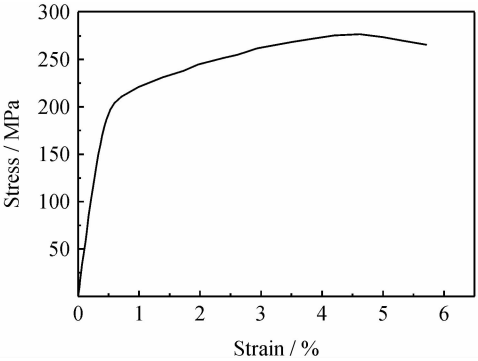


图 3 AZ31 镁铝合金的应力应变曲线

Fig. 3 The stress as a function of strain for AZ31 magnesium-aluminum alloy

换能器和倾角相同的有机玻璃斜楔接收 Rayleigh 波，接收超声信号的铌酸锂晶片换能器中心频率为 4 MHz。

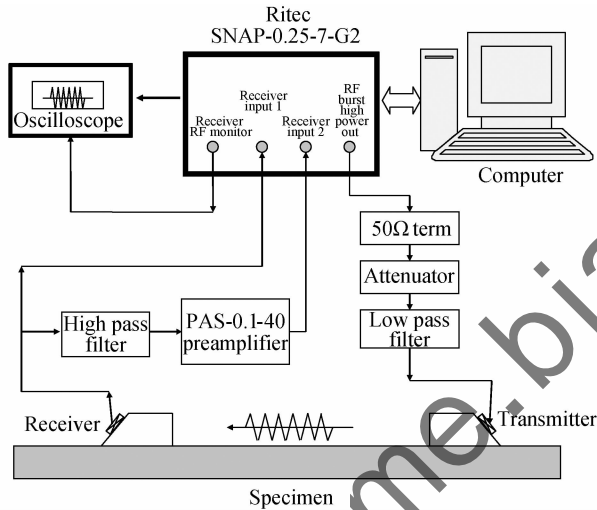


图 4 非线性超声实验装置

Fig. 4 Experimental setup of nonlinear ultrasonic measurement system

由于接收到的 Rayleigh 波信号中，二次及以上的高次谐波一般都很微弱，所以将接收到的超声信号的一路直接接入非线性超声测试系统的主机 Input 1 端，另一路信号经高通滤波、前置放大后接入非线性超声测试系统的主机 Input 2 端。将主机接收到的两路信号选取不同的增益，对接收信号中的低频、高频信号成分进行不同程度的放大，从而便于探测接收信号中微弱的高次谐波成分。

2.3 Rayleigh 波的激发

在实际应用中，可以利用多种不同的方法激发 Rayleigh 波，常见的有斜楔法和叉指换能器法。利用斜楔法激发 Rayleigh 波的原理为：超声换能器激发的

纵波通过斜楔入射至半无限大的固体介质表面，根据 Snell 定理

$$c_1 \sin \varphi_2 = c_2 \sin \varphi_1 \tag{6}$$

其中， c_1 为斜楔材料的纵波波速， c_2 为试件材料的 Rayleigh 波波速， φ_1 和 φ_2 分别为入射角和折射角，如图 5 所示。在试件中激发 Rayleigh 波的条件是 $\varphi_2 = 90^\circ$ ，因此，斜楔中的纵波入射角为：

$$\sin \varphi_1 = \frac{c_1}{c_2} \sin 90^\circ = \frac{c_1}{c_2} \tag{7}$$

由于固体介质的 Rayleigh 波波速比纵波波速小，所以产生 Rayleigh 波的必要条件是试件材料的纵波速率要比斜楔材料的纵波速率大，才能保证 $\sin \varphi_R \leq 1$ ，从而有效地在试件中激发出 Rayleigh 波。一般采用有机玻璃作为斜楔的材料，其纵波波速为 $c_w = 2670\text{m/s}$ 。于是根据斜楔和试件材料中的 Rayleigh 波波速，就可以确定斜楔的倾角 φ 。根据本工作实验中所选的材料，可以确定斜楔中纵波相应的入射角为 65° 。

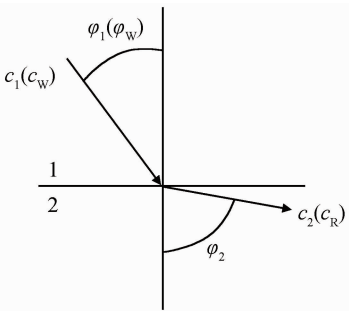


图 5 Snell 定理示意图

Fig. 5 Snell law for angle beam analysis

在设计激发 Rayleigh 波的斜楔时，虽然斜楔的倾角 φ 是非常重要且需要主要考虑的参数，但最后确定斜楔的其他尺寸时，还需要考虑下列因素。由于铌酸锂压电晶片在斜楔中所激发的不是理想的平面纵波，其中只有主瓣的入射角满足激发 Rayleigh 波的条件，因此由于旁瓣的入射角不满足 Rayleigh 波的激发条件，将导致在试件中激发体波，这就会减少试件中所激发 Rayleigh 波的能量。为此，在确定斜楔的形状、尺寸时，应尽量将斜楔中纵波的传播距离缩短。

3 实验方法与实验结果

在实验过程中，首先利用电子万能试验机将 AZ31 镁铝合金试件加载到特定的应力后，将试件从电子万能试验机上卸下，然后利用图 4 中的实验装置激发并接收 Rayleigh 波。设置基频信号的增益为 32

dB, 积分幅度转换率为 $110\text{V}/(\text{V} \cdot \text{ms})$; 倍频信号的增益为 46 dB, 积分幅度转换率为 $196\text{V}/(\text{V} \cdot \text{ms})$ 。分别对基频、倍频信号进行扫频测量, 可得载波信号基频振幅 $\bar{A}_1(f)$ 、倍频振幅 $\bar{A}_2(2f)$ 与频率的关系, 分别如图 6(a), (b) 所示。完成上述测试后, 再将试件拉伸

到大于前一次加载的应力, 并再次对从电子万能试验机上卸下的试件进行同样的非线性超声测试, 再次得到试件在本次应力作用后载波信号基频振幅 $\bar{A}_1(f)$ 、倍频振幅 $\bar{A}_2(2f)$ 与频率的关系。重复上述步骤, 直到试件出现颈缩现象, 发生强度失效为止。

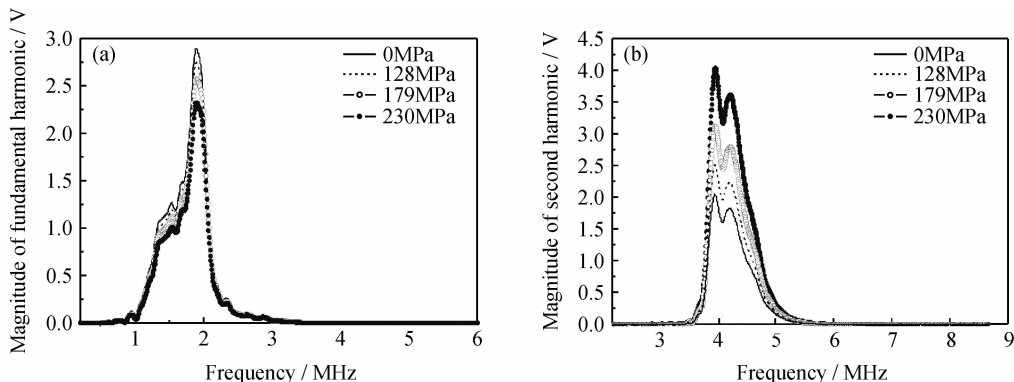


图 6 载波信号基频(a)和倍频(b)振幅与频率的关系

Fig. 6 Magnitude of carrier signal as functions of frequency for fundamental(a) and second(b) harmonics

根据式(4)关于超声应力波因子的定义, 将载波信号基频振幅 $\bar{A}_1(f)$ 、倍频振幅 $\bar{A}_2(2f)$ 对频率积分, 则可以得到试件在加载至不同的应力值后, 接收到的 Rayleigh 波基频、倍频超声应力波因子 $F_{\text{SW}}(f)$ 、 $F_{\text{SW}}(2f)$ 与应力的关系。根据式(5)对基于超声应力波因子的非线性系数 β_R 的定义, 记试件未经应力加载时的非线性系数为 β_{R0} , 对试件加载不同应力后的相对非线性系数 β_R 除以 β_{R0} 进行无量纲化, 最终可得 AZ31 镁铝合金试件的无量纲化非线性系数 β_R/β_{R0} 与应力间的关系 (如图 7 所示)。图 7 显示, 在应力大约小于 100MPa 的阶段, 基于应力波因子的非线性系数变化相当微小; 当应力超过 100MPa 后, 非线性系数随应力的增加而缓慢增加, 特别是当应力大于 150MPa 以后, 非线性系数有着相当明显的变化; 当应力超过屈服极限 178MPa 以后, 非线性系数随应力的变化更加明显;

应力达到强度极限时非线性系数达到最大。上述非线性超声测试结果与 AZ31 镁铝合金试件在拉伸载荷作用下的力学性能直接相关。在对 AZ31 镁铝合金试件的标准拉伸实验中, 当应力达到 150MPa 以后, 试件开始出现残余塑性变形; 当应力达到屈服极限以后, 应变显著增加。这说明利用 Rayleigh 波测试得到的超声非线性系数可以表征金属材料表面在拉伸作用下导致的塑性损伤。

4 结论

(1) 通过实验测试得到了基于应力波因子的非线性系数与加载应力之间的关系, 从而提出了一种利用基于应力波因子的声学非线性系数对金属材料表面损伤进行非线性超声无损评价的方法。

(2) 在应力大约小于 100MPa 的阶段, 基于应力波因子的非线性系数变化相当微小。

(3) 当应力超过 100MPa 后, 非线性系数随应力的增加而缓慢增加, 特别是当应力大于 150MPa 以后, 非线性系数有着相当明显的变化。

(4) 当应力超过屈服极限 178MPa 以后, 非线性系数随应力的变化更加明显; 应力达到强度极限时非线性系数达到最大。

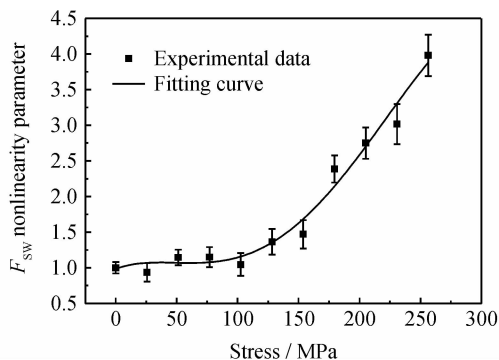


图 7 基于应力波因子的非线性系数与应力间的关系

Fig. 7 F_{SW} -based nonlinearity parameter as a function of stress

参考文献

- [1] 何方成, 王铮, 史丽军. 复合材料制件拐角部位超声检测技术[J]. 材料工程, 2011, (7): 80—84.

- HE Fang-cheng, WANG Zheng, SHI Li-jun. Ultrasonic testing technique for the inspection of defects in the corner of composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, (7): 80—84.
- [2] 税国双, 汪越胜, 曲建民. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价[J]. *力学进展*, 2005, (1): 52—68.
- SHUI Guo-shuang, WANG Yue-sheng, QU Jian-min. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound[J]. *Advances in Mechanics*, 2005(1): 52—68.
- [3] 邓明晰, PRICE D C, SCOTT D A. 兰姆波非线性效应的实验观察[J]. *声学学报*, 2005, (1): 37—46.
- DENG Ming-xi, PRICE D C, SCOTT D A. Experimental observations of nonlinear effects of Lamb waves[J]. *Acta Acustica*, 2005, (1): 37—46.
- [4] NAGY P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization[J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(1—5): 375—381.
- [5] CANTRELL J H, YOST W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, (23): 487—490.
- [6] SHUI G S, KIM J Y, QU J, et al. A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves [J]. *NDT & E International*, 2008, 41(5): 326—329.
- [7] 吴斌, 颜丙生, 何存富, 等. AZ31 镁合金早期力学性能退化非线性超声检测[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(1): 87—92.
- WU Bin, YAN Bing-sheng, HE Cun-fu, et al. AZ31 magnesium early mechanical performance degradation nondestructive testing using nonlinear ultrasonic[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(1): 87—92.
- [8] PRUELL C, KIM J Y, QU J, et al. A nonlinear-guided wave technique for evaluating plasticity-driven material damage in a metal plate[J]. *NDT & E International*, 2009, 42(3): 199—203.
- [9] BABY S, NAGARAJA K B, OMPRAKASH C M, et al. Creep damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(8): 818—821.
- [10] KIM J Y, JACOBS L J, QU J, et al. Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120, (3): 1266—1273.
- [11] LIU M H, KIM J Y, JACOBS L, et al. Experimental study of nonlinear Rayleigh wave propagation in shot-peened aluminum plates-feasibility of measuring residual stress[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(1): 67—74.
- [12] 邓明晰. 复合结构界面粘接强度的声-超声评价研究[J]. *应用声学*, 2005, 24(5): 292—299.
- DENG Ming-xi. Nondestructive evaluation of adhesive strength of composite structures using an acousto-ultrasonic approach[J]. *Applied Acoustics*, 2005, 24(5): 292—299.
- [13] 张谦琳, 胡建恺. 复合材料的超声检测新技术 I. 声-超声技术 [J]. *应用声学*, 1995, 14(4): 38—42.
- ZHANG Qian-lin, HU Jian-kai. New techniques of ultrasonic testing on composite materials I. The acousto-ultrasonic technique [J]. *Applied Acoustics*, 1995, 14(4): 38—42.
- 基金项目: 国家自然科学基金项目(11172034); 中央高校基本科研业务费支持项目(2011JBM263)
- 收稿日期: 2012-05-08; 修订日期: 2013-07-27
- 作者简介: 税国双(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体中的波传播理论及应用, 非线性超声检测, 联系地址: 北京交通大学土建学院(100044), E-mail: gsshui@bjtu.edu.cn
- ent-enhanced damage models[J]. *Int J Numer Meth Eng*, 2000, 49(6): 811—832.
- [35] MA L, ZHOU J Q, ZHU R T, et al. Effects of strain gradient on the mechanical behaviors of nanocrystalline materials[J]. *Mater Sci Eng A*, 2009, 507(1—2): 42—49.
- 基金项目: 国家自然科学基金(10872087); 霍英东青年教师基金(101005); 湖北省优秀中青年人才项目(Q20111501)
- 收稿日期: 2012-06-20; 修订日期: 2013-04-10
- 作者简介: 周剑秋(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进材料的力学性能, 联系地址: 湖北省武汉市武汉工程大学流芳校区特 1 号(430073), E-mail: yzjqcc@sohu.com.

(上接第 69 页)

- [31] ROMANOV A E, KOLESNIKOVA B A L, OVID'KO I A, et al. Disclinations in nanocrystalline materials: Manifestation of the relay mechanism of plastic deformation[J]. *Mater Sci Eng A*, 2009, 503(1—2): 62—67.
- [32] BOWER A F, WINIGER E. A two-dimensional finite element method for simulating the constitutive response and microstructure of polycrystals during high temperature plastic deformation [J]. *J Mech Phys Solids*, 2004, 52(6): 1289—1317.
- [33] FEDOROV A A, GUTKIN M Y, OVID'KO I A. Transformations of grain boundary dislocation pile-ups in nano-and polycrystalline materials[J]. *Acta Mater*, 2003, 51(4): 887—898.
- [34] ASKES H, PAMIN J, DE BORST R. Dispersion analysis and element-free Galerkin solutions of second-and fourth-order gradi-