

“微缺陷诱发的非线性应力波分岔特性及其应用研究”成果登记公示信息

成果名称:	微缺陷诱发的非线性应力波分岔特性及其应用研究
完成单位:	东莞理工学院, 太原科技大学
完成人员:	张伟伟, 郑明方, 武静, 林荣, 张兵, 彭云, 赵子龙, 田锦邦, 张柱
研究起止日期:	2019-01-01 至 2022-12-31
成果应用行业:	制造业
社会经济目标:	基础设施以及城市和农村规划
学科分类:	
评价单位:	国家自然科学基金委 (数学物理科学部)
评价日期:	2023-03-30
成果简介:	<p>一、课题来源与背景:</p> <p>1.1 课题来源 国家科技计划 (国家自然科学基金)</p> <p>1.2 课题背景 上世纪 50 年代, 研究人员发现材料微观缺陷与应力波透过材料传播的非线性效应密切相关。基于这一原理, 研究人员发展了非线性超声检测技术应用于材料或结构的早期损伤检测。然而, 长期以来, 相关研究成果多集中中实验研究方面, 利用高次谐波或混频特征验证材料损伤演化与非线性参数之间的关系, 鲜有文献对非线性应力波的发生机理进行研究。为此, 申请人将非线性超声视为是一种非线性动力学系统, 提出利用非线性系统的分岔特性用于解释非线性超声的高次谐波和调制特征, 同时深入研究非线性应力传播的传播规律, 并为非线性超声检测提供实验方案, 对非线性超声检测的激励频率和激励幅值进行深入研究。</p> <p>二、研究目的与意义:</p> <p>本项目的研究目标包括理论目标和实验目标, 理论方面预期达到以下两个目标: (1) 利用非线性系统分岔理论解释非线性超声检测中的高次谐波和非线性调制波现象; (2) 利用分岔条件, 建立应力波激发参数 (如应力波幅值 A、频率 f、测试距离 x) 选取理论, 提高检测灵敏度和检测效率。实验研究目标为: 检验和完善理论研究成果, 发展高温合金材料的微观缺陷“非线性超声检测方案”。</p> <p>本项目的研究意义主要体现在以下方面: (1) 通过推导并求解非线性应力波的传播方程, 利用非线性系统的分岔特性解释材料微观缺陷诱发非线性超声高次谐波和非线性调制波的数学、力学本质; (2) 以非线性理论中 Lyapunov 指数、庞加莱截面、结合相平面指标刻画非线性特征, 为非线性超声检测的损伤指标选取提供了广阔的思路。(3) 借助于非线性系统对参数敏感性理论, 研究输入应力波的频率、幅值、时长、波形等参数的选择问题, 提高非线性超声的检测效率和灵敏度。</p>

三、主要论点与论据:

本项目的论点与论据包括:

(1) 经过利用有限元法对细粘弹性杆中一维应力波的求解,并分析激励参数与系统分岔之间的关系发现:非线性系统倍周期分岔与系统所处周期态的周期数紧密相关,如对于只有单一吸引子的周期一状态,系统响应只有奇数次谐波。改变激励信号幅值,系统进入双吸引子周期一时,系统响应出现完整的整数次谐波。此外,亚谐波的出现表明系统进入了倍周期分岔,特别地,当系统处于周期二时,应力波对应出现 $1/2$ 亚谐波,当系统出现周期四状态时,对应出现 $1/4$ 亚谐波,以此类推。

(2) 发展了求解材料动态启裂点的半解析法,将试验测得的动荷载的时间历程一并作为已知参数输入近似理论模型,与数值求解方法中计算其裂纹尖端动应力强度因子拟合程度良好,表明该方法对材料启裂时刻与启裂韧度确定的研究具有一定的指导意义。对聚乙烯材料,开展了非线性应力波在聚乙烯材料中传播非线性研究,损伤通过拉伸使其内部产生塑性变形作为微观损伤并进行非线性超声检测,验证了激励频率为共振频率两倍时,可激发 $1/2$ 亚谐波的结论。

(3) 通过实验研究发现了钢轨中传播的应力波的非线性特征,并开展了基于三次谐波、二次谐波的钢轨接头螺孔裂纹识别、轨底裂纹识别。研究表明,小波包分解和 HHT 分解可用于分析钢轨螺孔缺陷、轨底缺陷的信号检测,所构造的损伤指标对缺陷有较高的灵敏度。

(4) 依据处于临界状态(周期跳跃、混沌相变临界状态)的非线性系统对参数变化的敏感性,提出了弱超声导波信号的识别方法,利用 Lyapunov 指数、Lyapunov 维数、庞加莱截面等构造了非线性识别指标,实现了微小缺陷导致的强噪声下弱缺陷回波信号识别问题,所提出的双混沌检测方法,可以同时识别缺陷回波的幅值和波到时刻,相应地可实现缺陷的定位和大小评估。

四、创见与创新:

(1) 利用非线性应力波传播的倍周期分岔解释非线性超声中的高次谐波现象。通过求解非线性波动方程,建立数学模型用以解释高次谐波的产生机理,在此基础上提出新的损伤指标。

(2) 将材料损伤参数作为非线性系统参数,应力波激发参数作为系统扰动参数,利用 Lyapunov 指数、分数维、结合相空间等指标研究非线性应力波的分岔条件,利用该优选应力波激发参数,提高检测效率和灵敏度。

五、社会经济效益,存在的问题:

通过及时发现并修复生产过程中的问题,非线性检测缺陷可能会减少生产成本。这可以通过比较引入非线性检测前后的生产成本来评估。据市场研究机构估计,2020 年中国管道检测设备市场规模达到 2.8 亿元人民币,预计到 2025 年将达到 5 亿元人民币以上。管道属于高值资产,长输管道成本每公里约为 500-600 万元,成本高、修建难度大。一旦管道出现问题,通常需要整管道替换。若实现结构前期微损伤的检测,可以采用局部修补措施,在节省管道维护成本的前提下大大延长管道的使

用寿命。相关数据可能包括废品数量的减少、能源消耗的减少等。

六、历年获奖情况:

本项目经过 4 年的深入研究, 出版著作 2 部, 发表学术论文 16 篇, 其中 SCI、EI 收录 10 篇, 申请发明专利 6 项, 已授权 4 项。项目负责人于 2018 年获山西省“三晋英才”荣誉称号。