

含弱界面层合梁的压电阻抗分析及参数研究

郑 骥, 严 蔚*, 职君静

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用有限元软件 ANSYS 进行模拟分析, 构建了含弱界面损伤的层合结构压电阻抗(EMI)模型. 分析中选用线弹簧模型对主体结构层间弱界面损伤进行构造, 并与其他学者的解析解以及实验结果进行了对比, 验证了考虑层间滑移或脱粘效应对层合结构进行模拟分析的有效性和准确性. 然后, 基于该模型对含弱界面的微型组合钢梁进行损伤研究. 研究表明, 所建立的三维有限元压电阻抗模型能够清晰地检测到损伤的出现和发展. 最后, 讨论了粘结剂等其他参数对该有限元模型的影响.

关键词: 三维有限元; 压电阻抗; 层合结构; 弱界面; 损伤识别

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 02-0043-05

随着科学水平的发展, 各领域对材料性能的要求越来越高, 层合结构在过去的几十年中得到了快速的发展并广泛应用于我们的现实生活中^[1-3]. 层合结构具有材质轻、结构形式简单、可塑性强等优点. 但层合结构在制造过程中常常受到制作工艺、环境因素等原因的影响, 导致其层间粘结在使用过程中容易产生劣化甚至完全丧失联接功能. 因此层合结构粘结界面成为最易发生损伤和破坏的区域. 对于层合结构弱界面损伤, 国内外学者进行了大量的科学研究, 并取得了许多实质性的成果^[4-5], 但其研究的主要成果大多是关于层间界面本构关系的建立, 从有限元角度对层合结构弱界面进行损伤识别鲜见报道.

近年来, 结构健康检测技术越来越受到人们的重视, 压电阻抗法是一种无损的结构健康检测技术, 已经在各个不同的领域中得到利用, 如机电设备、航空材料、民用设施等等. 利用正压电效应, 黏贴在被检测结构上的压电片能够激励结构发生共振, 同时利用逆压电效应将共振所得的机械阻抗传输到计算机中^[6-7]. 压电阻抗法能够检测出结构局部细小的损伤, 因其对损伤灵敏性较高, 特别适合用在层合结构界面损伤检测中.

有限元软件 ANSYS 特别适用于多物理场之间耦合分析^[8], 笔者拟采用 ANSYS 12.0 对考虑层间弱界面的层合结构与压电片进行耦合, 建立含界面损伤的三维有限元压电阻抗模型. 在建模过程中, 对层间的本构关系采用了线弹簧模型, 利用弹簧刚度 k 以及自由度的变化来模拟层间的损伤、自由度控制损伤类型. 层间损伤类型包括单向滑移、单向脱粘以及滑移脱粘同时考虑 3 种情况. 弹簧刚度可以用来模拟界面损伤程度. 为了验证使用线弹簧模型作为弱界面的合理性, 笔者将其与其他学者的实验和计算结果进行了对比分析, 同时还利用压电材料的机电耦合效应, 研究了层间滑移以及脱粘损伤对电导(压电阻抗的倒数)信号的影响, 并对层间不同损伤状态下的电导纳信号进行了研究, 分析了在高频激励下, 粘结剂厚度以及单元尺寸等参数对电导信号的影响.

1 含弱界面梁三维有限元模型

将压电片和含弱界面损伤的层合结构作为一个整体耦合系统加以考虑. 先对层合钢梁进行建模, 考察试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 5.2\text{ mm}$ (试件 1)和 $100\text{ mm} \times 19.6\text{ mm} \times 5.2\text{ mm}$ (试件 2)的两层

收稿日期: 2015-06-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY12E08005); 宁波大学重中之重学科项目(zj1216).

第一作者: 郑骥(1991-), 男, 浙江丽水人, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 结构工程. E-mail: 413952152@qq.com

*通信作者: 严蔚(1968-), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 结构健康监测. E-mail: yanwei@nbu.edu.cn

钢梁^[9], 层与层之间通过胶水粘结而成, 粘贴于主体结构上的压电片作为传感/驱动器, 如图 1 所示. 我们选择 SOLID 5 为耦合场单元, 对压电片进行网格划分. 由于压电片为压电耦合材料, 故在 KEYOPT 自由度选项里选取 UX、UY、UZ、VOLT 4 个自由度. 使用 SOLID 45 对压电片与主体结构间粘结剂进行网格化分, 单元尺寸为 1 mm. 主体结构选用 SOLID 45 单元进行网格划分, 单元尺寸为 2 mm, 但在贴有压电片的梁段, 单元必须进行网格加密, 尺寸定为 1 mm, 在主体梁段和贴有压电片梁段之间添加过渡单元 SOLID 92, 为金字塔单元, 单元尺寸定为 1.5 mm. 层间本构关系选用线弹簧模型, 利用 COMBIN 14 单元对主体结构层间弱界面损伤进行构造, 在层合钢梁层间节点与节点之间添加弹簧单元, 通过自由度变化选择损伤类型, 通过弹簧刚度 k 来控制损伤程度的大小. 这里钢材以及压电片材料参数全部参照文献[9]. 结构的阻尼比为 0.01^[5]. 在有限元分析过程中, 单元尺寸的合适与否往往对我们最终的结果产生较大的影响. 图 2 表示主体梁结构单元尺寸大小对电导位号的影响. 从图 2 可知, 较大尺寸划分会造成模态波峰整体向右偏移, 偏移量随着激励频率的增大而变大, 当单元尺寸取到 2.0 mm 及以下时,

电导信号曲线并未发生明显的偏移, 故当主体梁单元选取 2.0 mm 为单元尺寸时, 所得结果已可满足我们损伤检测的要求.

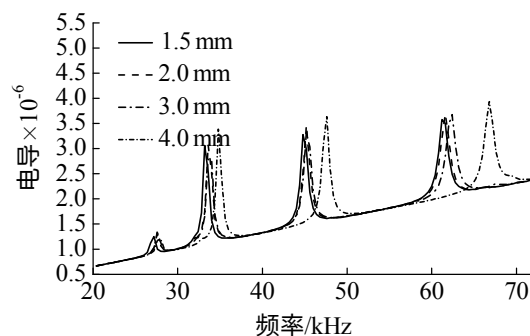
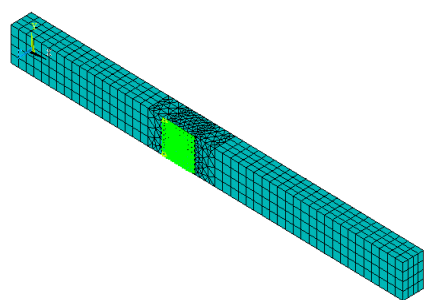


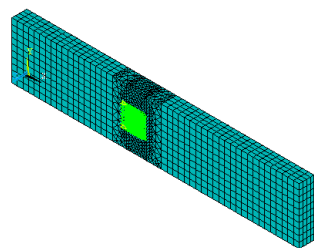
图 2 单元尺寸大小对电导信号的影响

2 对比研究

文献[9]通过实验和解析分析得到上述 2 种层合钢梁的电导信号曲线, 并求得了前几阶模态频率. 我们使用三维有限元方法对文献[9]中的 2 个试件构建了如图 1 所示的有限元模型, 该模型同时考虑层间滑移和脱粘 2 种状态. 由于文献[9]实验采用的是胶水刚性连接, 接近无界面损伤状态, 所以弹簧刚度 k 选取趋近于无穷大. 然后进行动态扫描, 得到压电阻抗信号曲线(图 3 和图 4). 利用有限



(a) 试件 1



(b) 试件 2

图 1 层合钢梁有限元模型

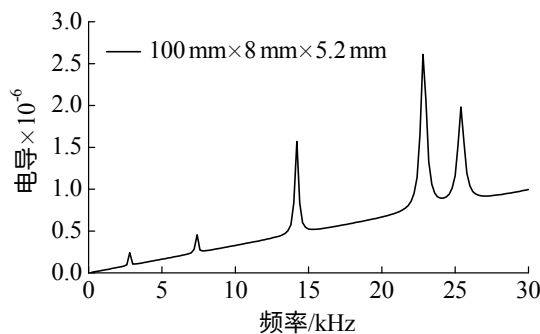


图 3 层合钢梁(试件 1)电导曲线

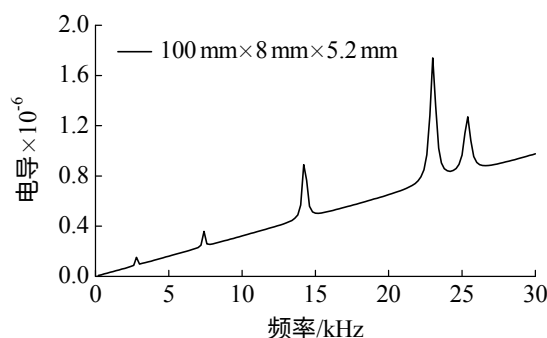


图 4 层合钢梁(试件 2)电导曲线

元软件直接对各模态波峰对应的共振频率进行提取, 最后得到试件 1 主模态为 2 761、7 365、14 198、22 846、25 405, 试件 2 主模态为 2 759、7 390、14 273、23 014、25 366, 对比结果见表 1 和表 2。从表 1 和表 2 可知, 解析解与实验数据差值最大达到 16.7%, 而利用有限元模型所得结果与实验数据差值最大仅 4.8%。这是由于文献[9]在解析解计算中未考虑压电片的耦合作用, 使得对于这种微小型结构造成较大的误差^[5]。由于本文考虑了压电片的耦合效应, 结构整体刚度增大, 使本文得到对应的模态频率大于文献[9]的解析解, 并与实验结果更接近。

表 1 试件 1 有限元与文献对比结果

阶数	文献[9]实验 结果/kHz	文献[9]计算结 果/kHz	本文结 果/kHz
1	2.812	2.847(-1.2%)	2.761(1.8%)
2	7.453	7.847(-5.2%)	7.365(1.1%)
3	13.905	15.383(-10.6%)	14.198(-2.1%)
4	20.650	—	—
5	21.787	25.430(-16.7%)	22.846(-4.8%)
6	26.157	26.035(0.5%)	25.405(2.8%)

注: 括号内为误差值; “—”为未测。下表同。

表 2 试件 2 有限元与文献对比结果

阶数	文献[9]实验 结果/kHz	文献[9]计算 结果/kHz	本文结 果/kHz
1	2.777	2.790(-0.5%)	2.759(0.6%)
2	7.435	7.689(-3.4%)	7.390(-1.5%)
3	13.925	15.074(-8.2%)	14.273(-2.4%)
4	21.825	—	—
5	22.163	24.918(-12.4%)	23.014(-3.8%)
6	26.100	25.944(0.6%)	25.366(2.8%)

3 界面损伤识别及参数研究

进一步对如图 5 微型组合钢梁^[10]进行有限元建模, 结构下部为一工字钢, 在其上部焊接一块钢板对其翼缘进行加固, 工字钢长度为 80 mm, 宽度为 10 mm, 高度为 10 mm, 腹板翼缘厚度都为 2 mm。加固钢板尺寸长度为 80 mm, 宽度为 10 mm, 高度为 2 mm。PZT 大小为 4 mm×4 mm×0.2 mm, PZT 与主结构连接使用的粘结剂厚度为 0.05 mm。由于制作工艺等原因常常造成焊接界面具有缺陷, 使

其成为最易发生损伤和破坏的区域。耦合场单元类型以及单元尺寸与上同, 使用 SOLID 45 对粘结剂进行网格化分, 单元尺寸为 1 mm。主体工字钢和加固钢板也选用 SOLID 45 单元进行网格划分, 贴有压电片梁段进行网格加密, 同时, 这里也采用了 SOLID 92 进行过渡单元网格划分。加固钢板与工字钢之间继续添加 COMBIN14 弹簧单元来对界面特性进行模拟。为充分发挥压电片—粘结剂—主结构的压电耦合效应, PZT 的位置选择尤为关键。经研究, PZT 黏贴在梁中段工字钢的腹板上较为合适, 即对于界面损伤更为敏感。钢材的弹性模量 E 为 209 GPa, 泊松比 ν 为 0.3, 密度 ρ 为 7 750 kg·m⁻³, 整体结构的阻尼比取 0.01^[5], PZT 以及粘结剂的材料参数参见文献[8]。以界面弹性系数 k 代表层合结构粘结状态, k 越小表示界面损伤越大, k 定义为 Force/Length, 量纲为 N·m⁻¹。我们分别考察滑移、脱粘以及滑移与脱粘同时考虑时 3 种不同的界面损伤状态。从构建的三维有限元压电阻抗模型可以提取不同界面损伤状态下的电导谱(图 6~8)。从图 6~8 可以看到, 压电阻抗信号发生明显偏移, 偏移的原因来自损伤的存在, 偏移的程度则取决于损伤的程度, 这说明 EMI 三维有限元方法可清晰地检测出层合结构界面滑移和脱粘损伤。

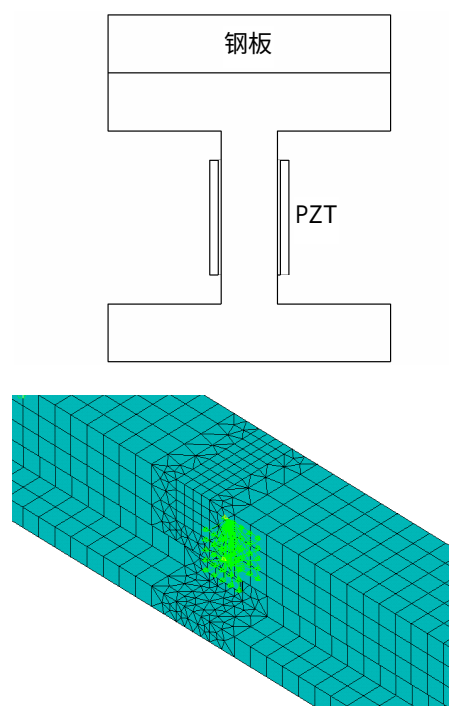


图 5 微型层合钢梁示意图以及有限元模型

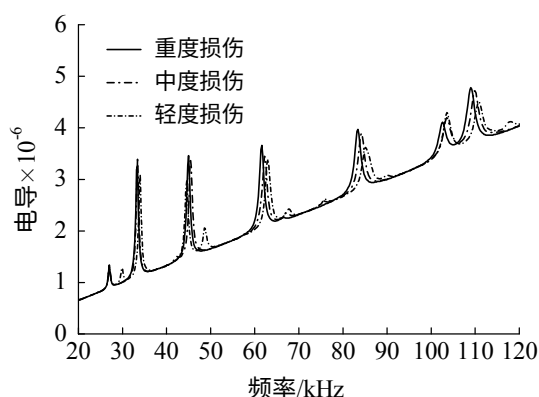


图6 滑移损伤的电导信号

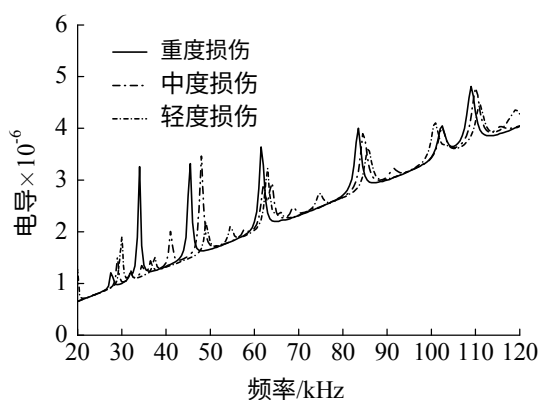


图7 脱粘损伤的电导信号

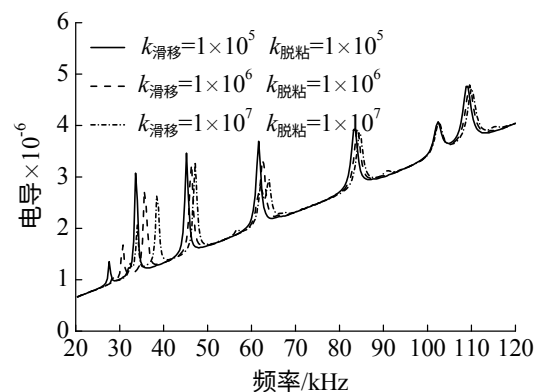


图8 同时考虑滑移脱粘损伤的电导信号

在压电片—粘结剂—被检测结构这一个整体系统中,压电片的变形对主体结构的影响是通过压电片与主体结构间的粘结剂传递剪应力来完成的.层间剪应力与粘结剂的厚度密切相关^[11].考虑到EMI工作频率大多是在高频状态,粘结剂的材料性质和厚度对压电阻抗信号的影响显得尤为明显,粘结剂假设为一层各向同性材料,材料参数同上.分别考虑粘结剂厚度0.02 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm 4种情况,计算结果如图9所示.从图9可

知,粘结剂厚度对电导曲线有明显的影响,随着粘结剂厚度的增加,电导曲线整体向上平移,未出现明显水平偏移,这与李万春等^[11]的研究结果相一致.

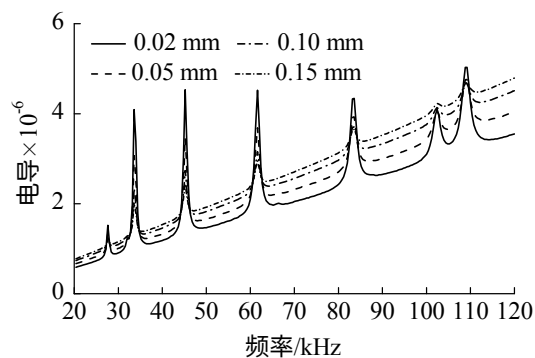


图9 粘结剂厚度对电导信号的影响

4 结论

采用三有限元技术构建了含弱界面层合梁的压电阻抗模型,分析中采用线弹簧模型构造主体结构层间弱界面损伤状态.与采用其他方法得到的理论值和实验结果比较,验证了本文模型的有效性和准确性.随后的损伤识别及参数研究考察了层合钢梁不同界面损伤对压电阻抗信号的影响,分析了压电片与主体结构间粘结层厚度对电导谱的作用.研究表明层合结构界面的粘结特性会严重影响输出的压电阻抗信号,界面的弱化会引起结构刚度的减小,降低相应的共振频率,从而引起频率峰值点的明显变化,说明本文构建的压电阻抗模型可以有效地识别层合结构界面损伤的产生与发展.压电传感/驱动器与主体结构的弱粘结也会造成压电阻抗谱的变化,但与结构界面损伤引起的信号变化有很大的区别,不会引起频率峰值点的显著偏移.利用这一特性,可以很容易区分这2种界面特性对压电阻抗信号的影响.

参考文献:

- [1] 杨斌,章继峰,周利民. 玻璃纤维—碳纤维混杂增强PCBT 复合材料层合板的制备及低速冲击性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2):435-443.
- [2] 陈永备,高靖,江帆,等. 复合材料桅杆层合板刚强度分析研究[J]. 船舶工程, 2012, 34(6):7-9; 43.
- [3] LIN Y, GIGLIOTTI M, LAFARIE-FRENOT M C, et al. Experimental study to assess the effect of carbon nanotube addition on the through-thickness electrical

- conductivity of CFRP laminates for aircraft applications [J]. *Composites Part B (Engineering)*, 2015, 76:31-37.
- [4] KAPURIA S, DHANESH N. Three-dimensional extended kantorovich solution for accurate prediction of interlaminar stresses in composite laminated panels with interfacial imperfections[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015, 141(4):401-414.
- [5] YAN W, CAI J B, CHEN W Q. An electro-mechanical impedance model of a cracked composite beam with adhesively bonded piezoelectric patches[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(2):287-307.
- [6] PARK G, INMAN D J. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences)*, 2007, 365:373-392.
- [7] 王伟, 严蔚, 李万春. 基于高频压电阻抗谱的钢框架损伤识别研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2013, 26(2): 78-82.
- [8] 蔡金标, 陈勇, 严蔚. 基于三维有限元分析的压电阻抗模型及其应用[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(12): 2342-2347.
- [9] GIURGIUTIU V Z. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2002, 124:116-125.
- [10] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 工字形截面受弯钢梁负载下焊接加固试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(1): 1-10.
- [11] 李万春, 严蔚, 王骥. 含损伤梁的三维有限元压电阻抗模型及参数研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(12):45-48.

Analysis on Electro-mechanical Impedance for a Laminated Beam with Imperfect Interfaces and Parameter Configuration

ZHENG Ji, YAN Wei*, ZHI Jun-jing

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The Electro-mechanical impedance (EMI) model is established by employing the finite element software ANSYS. Firstly, the linear spring law is utilized to describe the interfacial properties between the layers of the host structures. Comparison with the existing experimental and numerical results is made to reinforce the presented analysis, in which both the interfacial debonding and sliding effects are taken into account. Secondly, the proposed model is employed to indentify the interfacial damages for a laminated beam. The results show that the presented method can detect the appearance and development of the interfacial damages. Finally, the effects of various parameters on the EMI model are highlighted, which include the bonding layer between the piezoelectric patches and the host beam.

Key words: three dimensional finite element; EMI; laminated structure; imperfect interface; damage detection

(责任编辑 史小丽)