

0-3 型水泥基压电复合材料有限元分析与优化

诸雪青¹, 李秋义^{1, 2, 3}, 罗健林^{1, 2}, 张 帅¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;

3. 山东省混凝土结构耐久性工程技术中心, 山东 青岛 266033)

摘 要:用 ANSYS 有限元软件对纯压电陶瓷(PW)及 0-3 型水泥基压电复合材料(PCM0)依次进行静力、模态、谐响应及瞬态动力特性力-电耦合场分析,并以 PCM0 半径(R_c)和厚度(H_c)为变量对进行材料量优化设计。相比 PW,PCM0 垂直于极化方向的电位移增大 10.9%,使压电应变常数增大;响应频率减小,呈稳态响应特性;水泥掺入对 PCM0 迟滞效应影响可接受。PCM0 最优材料用量对应的 R_c 、 H_c 分为 5.1 mm、0.76 mm。

关键词:有限元分析;水泥基压电复合材料;静/动力特性分析;优化设计

中图分类号:TN384;TM25;TB332;TB115

文献标识码:A

FEM Analysis and Optimization of 0-3 Type Cement-based Piezoelectric Composite Material

ZHU Xueqing, LI Qiuyi, LUO Jianlin, ZHANG Shuai

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Collaborative Innovation

Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China;

3. Shandong Engineering Research Center for Concrete Structure Durability, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The piezoelectric coupling analysis of piezoelectric ceramics wafer(PW) and cement-based piezoelectric composite wafer(PCM0) on static analysis, modal analysis, harmonic analysis, and transient dynamic analysis was systematically studied by finite element numerical simulation, respectively. Furthermore, the material usage optimization of PCM0 was carried out with wafer radius(R_c) and density(H_c) as the design parameters. The results show that the maximum displacement vertical to polarization direction of PCM0 increases 10.9% compared with those of PW, indicating that the piezoelectric strain constant of PCM0 is increased; Its response frequency falls down and exhibits steady response characteristic. It can be acceptable for the impact on hysteresis effect of PCM0 with cement mixing. The optimal material usage for PCM0 wafer design is R_c of 5.1 mm, H_c of 0.76 mm, respectively.

Key words: FEM; cement-based piezoelectric composite; static/dynamic feature analysis; optimization design

0 引言

近年来,水泥基压电复合材料(PCM)引起了越来越多国内外学者的关注和研究^[1-8],李宗津^[2-3]、杨晓明^[8]等制备了不同类型的 PCM,研究了在 0.1~50 Hz 低频率(工程结构荷载常遇频率)范围内,利用该 PCM 作为混凝土结构中自感知驱动器的可行性。陈新^[1,4]、张玉军等^[5-6]制备了锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)微纳米粉末,将导电增强相掺杂到 0-3 型 PCM 中,实现了在室温中得以极化以及良好的电导率和压电性能。关新春等^[7]采用塑性聚合物法制备

了 PZT 纤维功能相,采用排列-浇注法制备了 1-3 型 PCM,研究了基于该 PCM 的能量收集效能可行性。这种与混凝土材料相容性好,频率响应较快,传感性能高,耐久性好,极化成本相对较低的 PCM,完全可用于工程结构中结构监测的智能传感器新选择。

在纯压电陶瓷及 PCM 力-电耦合场理论模拟及用作工程传感/驱动器件的可行性分析方面,许多学者也开展了相关的研究工作^[9-14]。姜德义^[9]、王社良^[10]等对某压电陶瓷进行了静态分析、谐响应分析、瞬态动力分析等。何学文等^[11]对 0-3 型 PZT-

收稿日期:2016-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208272,51378270,51578297);青岛市应用基础研究计划基金资助项目(青年专项)(14-2-4-48-jch);山东省高校优秀科研创新团队计划基金资助项目;国家 111 计划高等学校学科创新引智计划资助

作者简介:诸雪青(1976-),女,江西人,硕士生,主要从事先进混凝土与结构的研究。E-mail:pchxueqing@126.com。李秋义(1963-),男,黑龙江人,教授/博导,主要从事高性能混凝土结构耐久性 & 固体废弃物资源化的研究。E-mail:lqyyxn@163.com。

5A/环氧树脂压电材料进行了 ANSYS 静态与模态分析,分析了压电振子各个参数对谐振频率及发电能力的影响。邓国红等^[12]对压电聚偏氟乙烯(PVDF)制成悬臂梁模拟压电驱动器和传感器进行了系统分析。张宗振等^[13]对 1-3 型 PCM 依次进行了静力分析、模态分析及瞬态动力分析,为 1-3 型 PCM 在土木工程中进行智能监测提供了可靠的理论依据。

事实上,0-3 型 PZT 与水泥粉体混溶的 PCM 具有机电耦合性佳,易通过掺量改变实现技术特性的微调节等优点,更适合作为嵌入式传感器或驱动器应用于工程结构智能监测领域。与此同时,有关 0-3 型 PCM 力-电耦合场理论模拟及结构特性优化的研究的报道较少。因此,本文尝试运用有限元软件对 PCM 的力-电场耦合进行仿真模拟,包括静力分析、模态分析、谐响应分析及瞬态动力分析,分析其压电特性和优良的逆压电驱动性能,并进行优化设计,最终为 0-3 型 PCM 在结构健康监测用嵌入式传感器及驱动器提供理论与技术支持。

1 水泥基压电复合材料矩阵参数的确定

本次所模拟的压电陶瓷属于软性 PZT 圆薄片,所需参数按 PZT-4 取值^[11],模拟尺寸为半径 $R_c = 0.005$ m、厚 $H_c = 0.001$ m,其密度为 $7\ 600$ kg/m³。对于 PCM,其压电性能由 PZT 粉体决定,且 PZT 粉体含量越高表现出的压电性能越好。假定粘接剂在煅烧成型时完全挥发,用于水泥水化用水完全转化为相应水泥水化产物结晶水,最终确定模拟的相同尺寸 0-3 型水泥基压电复合材料(PCM0)的体积配合比为:PZT 粉体 75%、水泥基体 25%。

利用并联模型公式计算 PCM0 压电常数 d_{33} ,即^[12]

$$d_{33} = \frac{V^1 d_{33}^1 s_{33}^2 + V^2 d_{33}^2 s_{33}^1}{V^1 S_{33}^2 + V^2 S_{33}^1} \quad (1)$$

式中: V^1 、 V^2 分别为组元 1(压电相)、2(水泥基)的体积分数; d_{33}^1 、 d_{33}^2 分别为组元 1(压电相)、2(水泥基)的压电常数; s_{33}^1 、 s_{33}^2 分别为组元 1(压电相)、2(水泥基)的弹性顺度常数。结果表明, $d_{33} = d_{33}^1$ ^[13]。

利用能量守恒定律简化得到了 PCM0 的介电常数 $\epsilon = V^1 \epsilon^1$,也可以根据复合材料串联模型公式^[14]得到 PCM0 的介电常数,即

$$\epsilon = V^1 \epsilon^1 + V^2 \epsilon^2 \quad (2)$$

式中 ϵ^1 、 ϵ^2 分别为压电相和水泥基的介电常数。因为水泥基的相对介电常数一般为 4~6,与压电陶瓷相比很小,可忽略,得到 PCM0 的介电常数:

$$\epsilon = V^1 \epsilon^1 \quad (3)$$

同理,PCM0 的弹性刚度系数也采用复合材料的串联模型公式,假设其与两者的弹性模量成正比,则有

$$c = \frac{c^1 V^1 E^1 + c^2 V^2 E^2}{V^1 E^1 + V^2 E^2} \quad (4)$$

式中: c^1 、 c^2 分别为压电相和水泥基的弹性刚度系数; E^1 、 E^2 分别为压电相和水泥基的弹性模量。 E^1 取为 7.65×10^{10} N/m², E^2 取为 2.5×10^{10} N/m²,与压电相的弹性模量相比不可忽略,但可忽略水泥基的刚度矩阵系数,因此,PCM0 的弹性刚度系数为

$$c = \frac{c^1 V^1 E^1}{V^1 E^1 + V^2 E^2} \quad (5)$$

最终得到的 PCM0 的密度为 $7\ 600$ kg/m³,ANSYS 模拟所需要输入的介电常数矩阵 ϵ 、压电应力常数矩阵 e 分别如表 1、2 所示。表 1 中的参数为夹持介电常数,表 2 中的编码顺序对应为 ANSYS 中的输入参数的顺序。

表 1 水泥基压电复合材料的 ϵ

$\epsilon_{11}/(10^{-9} \text{ F/m})$	$\epsilon_{22}/(10^{-9} \text{ F/m})$	$\epsilon_{33}/(10^{-9} \text{ F/m})$
4.85	4.85	4.22

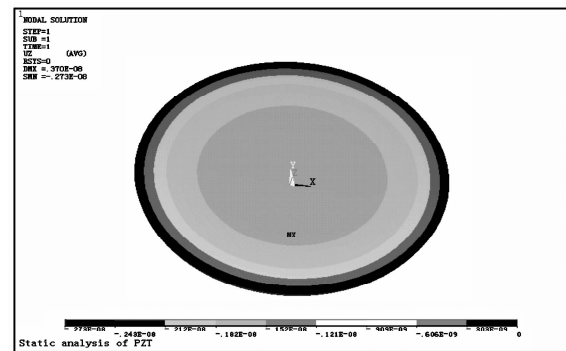
表 2 水泥基压电复合材料的 e

电场 E 方向	T_x	T_y	T_z
E_x	$e_{11}(0)$	$e_{12}(0)$	$e_{13}(-5.2)$
E_y	$e_{21}(0)$	$e_{22}(0)$	$e_{23}(-5.2)$
E_z	$e_{31}(0)$	$e_{32}(0)$	$e_{33}(15.1)$
E_{xy}	$e_{61}(0)$	$e_{62}(0)$	$e_{63}(0)$
E_{yz}	$e_{41}(0)$	$e_{42}(12.7)$	$e_{43}(0)$
E_{xz}	$e_{51}(12.7)$	$e_{52}(0)$	$e_{53}(0)$

2 水泥基压电复合材料 ANSYS 分析

2.1 静力分析

分别提取压电陶瓷和 PCM0 的 z 向(垂直于极化方向)位移图和应力图,如图 1、2 所示。



(a) 压电陶瓷

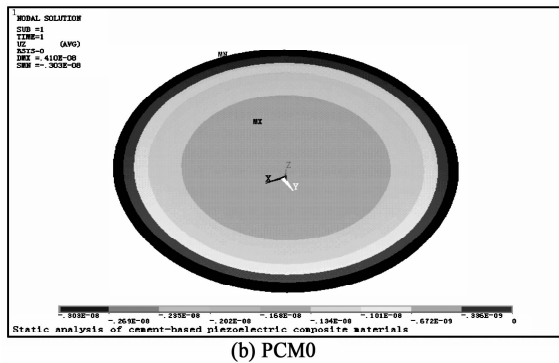


图 1 材料沿极化方向位移图

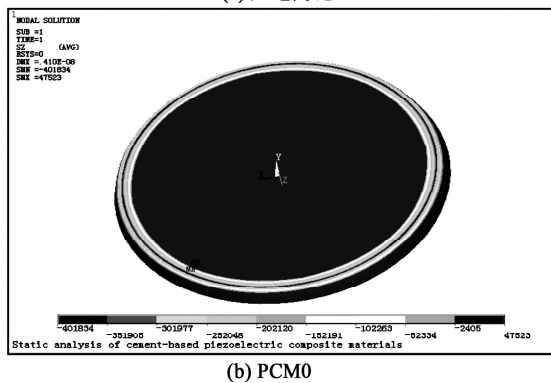
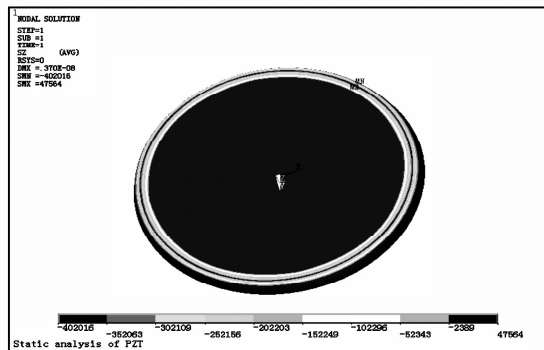


图 2 材料沿极化方向应力图

由图 1 可知,压电陶瓷上表面 z 向位移变化趋势与 PCM0 相同,上表面位移从边缘向里逐渐减小,而下表面位移同样为 0。且 PCM0 边缘处 z 向最大位移绝对值为 3.03 nm,形心处位移绝对值为 1.68 nm,位移减小 80.4%,PCM0 的 z 向最大位移比压电陶瓷增大了 10.9%,说明 PCM0 的 d_{33} 比压电陶瓷大,逆压电效应有所提高。

由图 2 可知,PCM0 z 向最大应力在边缘位置,为 0.41 MPa,依次向里应力逐渐减小,大部分区域产生的应力较小,为 0.048 MPa;与压电陶瓷相比,最大应力提高 2.5%,最小应力几乎相同,则最大出力值可提高 2.5%,为 32.8 N,平均出力值不变,为 4 N。

2.2 模态分析

为了得到 PCM0 的谐振频率和反谐振频率,选取频率范围 10~400 kHz,分别在短路状态下(下表面接地、上表面短路)和开路状态下(下表面接地、删除上表面电压)求解厚度极化方向的固有频率和振型,并与压电陶瓷做比较。图 3 为 PCM0 某谐振振型与反谐振振型图。

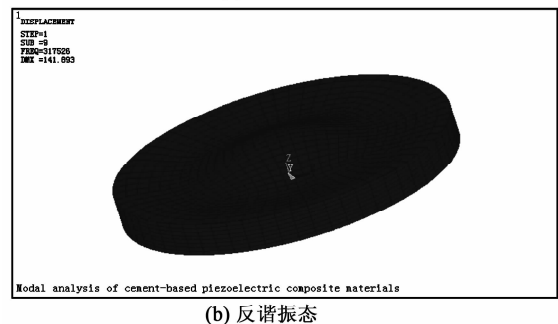
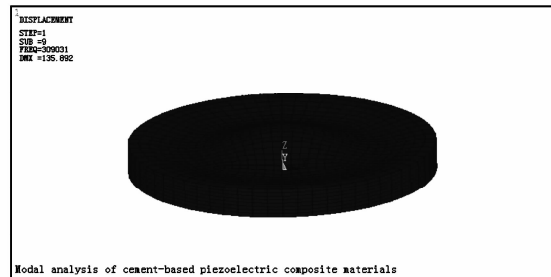


图 3 PCM0 材料振型图

我们可得出,短路状态下压电陶瓷的谐振频率为 325.27 kHz,开路状态下压电陶瓷的反谐振频率为 334.21 kHz。短路状态下 PCM0 的谐振频率为 309.03 kHz,开路状态下 PCM0 的反谐振频率为 317.53 kHz。相比于纯压电陶瓷,其谐振频率和反谐振频率都有所减小,且两者都存在重频现象,没有正交性。

2.3 谐响应分析

定义下表面电压为 0,上表面电压为 10 V,谐波频率范围为 300~500 kHz,对压电陶瓷和 PCM0 的位移和应力结果进行比较分析。

图 4 为材料沿极化向位移随频率变化图。由图可知,两者变化规律相似,先是缓慢增加,又急速上升到极值,然后快速减小,最后保持平稳。不同的是压电陶瓷 z 向和 y 向位移均在 420 kHz 达到位移极值,水泥基压电复合材料 z 、 y 向位移在 400 kHz 处达到极值, z 向极值为 7 nm,相应压电陶瓷减小 22.2%, y 向极值为 17 nm,相应压电陶瓷减小

19.0%。因为压电陶瓷片长度较短,其响应频率较高,响应频率范围较大。

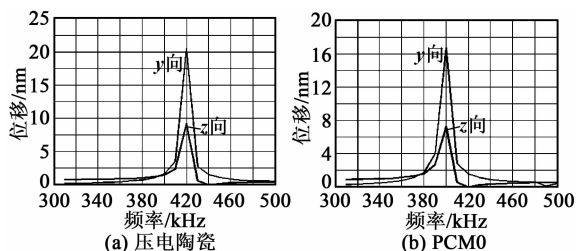


图4 材料沿极化向位移随频率变化图

图5为材料沿 z 极化向应力随频率变化图。由图可知,压电陶瓷在420 kHz达到应力极值,而PCM0在400 kHz达到应力极值,且相比压电陶瓷,应力极值减小26.9%。

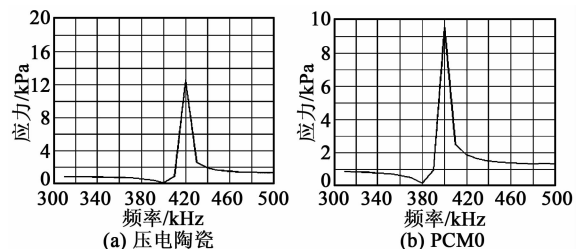


图5 材料沿 z 极化向应力随频率变化图

2.4 瞬态动力分析

在上表面施加电压为0,下表面施加10 V的正弦电压,定义时间0.2 s、设置积分步长为50步,观察 z 向位移和应力随时间的变化规律,分别如图6、7所示。

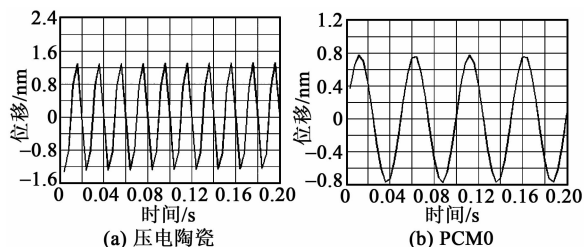


图6 材料沿 z 极化向位移随时间变化图

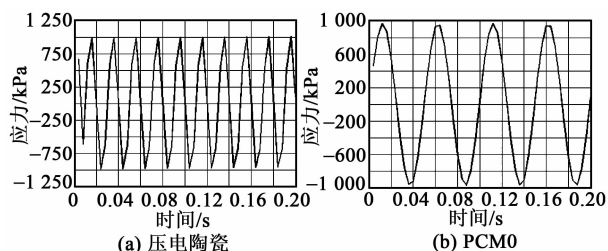


图7 材料沿 z 极化向应力随时间变化图

压电陶瓷存在迟滞效应,其与电压的加载过程、大小及频率,材料及其制造过程的不同有关。由图

6、7可知,通过分析压电陶瓷与PCM0位移及应力随时间的变化规律,发现PCM0同样存在迟滞效应,即位移、应力与电压相比随时间的曲线略有延迟,但同样发现只存在于开始阶段,虽然波形不是平缓变化,在应用于混凝土结构的智能监测中,这样的迟滞效应是可忽略其影响的。

3 水泥基压电复合材料优化设计

本次优化设计的设计变量是PCM0的半径 R_c 和厚度 H_c ,本次模拟确定 R_c 和 H_c 的上、下限分别为 $0.005 \text{ m} \leq R_c \leq 0.015 \text{ m}$, $0.0005 \text{ m} \leq H_c \leq 0.005 \text{ m}$;本次优化设计的状态变量为最大等效应力 S_{MAX} 和最大位移 D_{MAX} 。其上、下限分别为 $10 \text{ MPa} \leq S_{\text{MAX}} \leq 25 \text{ MPa}$, $0.7 \times 10^{-8} \text{ m} \leq D_{\text{MAX}} \leq 1.2 \times 10^{-8} \text{ m}$;本次优化设计的目标函数为PCM0的体积 V_{TOT} 。图8为PCM0的 V_{TOT} 随迭代次数变化曲线规律。

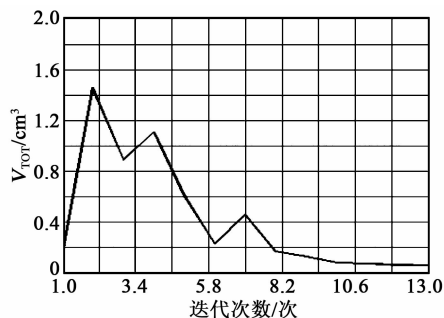


图8 PCM0材料用量 V_{TOT} 随迭代次数变化图

由图8可知,PCM0优化设计共进行了13次迭代循环,前7次迭代过程 V_{TOT} 值较大,波动较大,从第8次迭代一直到最后,数值波动不大,平缓变化。第13步出现最优方案,结果为 $R_c = 0.00507 \text{ m}$, $H_c = 0.000762 \text{ m}$, $V_{\text{TOT}} = 0.62 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ 。提取此状态下的等效应力云图可得 $S_{\text{MAX}} = 0.25 \times 10^8 \text{ Pa}$,出现在上表面边缘位置。

4 结论

1) PCM0的 z 向位移、应力变化规律与压电陶瓷相似,即在上表面边缘处产生最大值,依次向里减小。其 z 向最大位移提高10.9%, y 向最大位移提高12.1%,说明PCM0的 d_{33} 有所增大。

2) 与压电陶瓷相比,PCM0的 z 向位移、应力响应频率有所减小,均在400 kHz达到响应极值,但其响应频率范围无变化,也同样表现出了稳态响应的特性。

(下转第88页)