

DOI: 10.11973/jxgccl201906014

压电材料在振动控制领域的研究进展与应用现状

姚晓成, 赵程, 曾涛

(上海材料研究所, 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

摘要: 结合振动主动控制和被动控制原理, 综述了应用于振动控制领域的单层压电陶瓷、多层叠堆压电陶瓷、压电纤维复合材料、0-3型压电复合材料等4种压电智能材料, 重点介绍了其结构特点、制备工艺, 以及在机械制造、航空航天和船舶航运等领域减振应用的研究进展, 指出了压电材料的未来研究方向。

关键词: 压电陶瓷; 多层叠堆; 压电纤维; 0-3型压电复合材料; 振动控制

中图分类号: TM282

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)06-0072-05

Research Progress and Application Status of Piezoelectric Materials for Vibration Control

YAO Xiaocheng, ZHAO Cheng, ZENG Tao

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation,

Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: On the basis of active and passive vibration control principles, four piezoelectric smart materials used in vibration control field, including single layer piezoelectric ceramics, multi-stacked piezoelectric ceramics, piezoelectric fiber composite and 0-3 type piezoelectric composite, are reviewed. The research progress of the structural characteristics, preparation process of the materials and their application for vibration attenuation in the fields of machinery manufacturing, aerospace and marine shipping are highlighted. The research direction in future of the piezoelectric materials is proposed.

Key words: piezoelectric ceramics; multi-stack; piezoelectric fiber; 0-3 piezoelectric composite; vibration control

0 引言

机械振动存在于处于工作状态的各种机器中, 如精密机床、飞行器、船舶等^[1-4]。强烈的振动会影响机械零件工作的准确性和稳定性, 严重时还会导致疲劳破坏而缩短结构的寿命或导致共振而损坏结构。振动产生的噪声更是对环境和人类健康产生了重大危害^[5]。因此, 削减不利的振动响应已然成为工业上亟待解决的问题。

工程界常用的振动控制方法是安装约束阻尼层

结构, 即在结构表面粘接黏弹性材料和弹性约束层, 通过黏弹性材料的剪切效应耗散结构振动能。该方法具有很高的可靠性, 但是不足之处也很明显: 约束阻尼层结构本身不具备智能性, 一旦实施完成, 系统的阻尼特性就很难进行调节, 因而不能适应外部环境的变化^[5]。因此, 研究人员提出了利用压电效应对结构振动进行控制的观点。

压电效应包括正压电效应和逆压电效应。当压电材料受到某方向的外力时, 其内部就会出现极化现象, 同时在其上下表面产生等量异号电荷, 且产生的电荷量与所施加的外力成正比; 当撤去外力后, 压电材料又恢复到最初不带电的状态, 这种现象称为正压电效应^[6]。反之, 若将压电材料置于电场中, 在电场作用下, 压电材料的内部正负电荷中心会产生相对位移, 从而使压电材料产生形变, 其形变大小与

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2019-05-31

基金项目: 上海市优秀技术带头人项目(17XD1420300)

作者简介: 姚晓成(1995—), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生

导师: 曾涛研究员

通信作者: 赵程

电场强度成正比,这种现象称为逆压电效应。利用压电材料的这种机电转换特性对振动响应进行控制,从消耗能量与否的角度可以分为主动控制和被动控制两种方式。振动主动控制以压电材料的逆压电效应为基础,根据所检测到的振动信号,应用一定的控制策略,经过实时计算进而驱动外部的压电作动器对控制目标施加一定的影响,最终达到抑制或消除振动的目的^[7]。被动控制则以正压电效应为基础,是一种无外加能源的控制:压电耗能装置附加在结构的适当部位,通过压电材料将机械能转变为电能,以实现吸收振动进而改变结构体系动力特性的目的^[8]。被动控制属于反馈控制,具有结构简单、易于实现等特点,但是控制的效果和适应性较差;主动控制具有控制效果好、环境适应能力强等特点,弥补了被动控制的不足^[9]。

近年来,利用压电材料进行结构振动控制的研究很多。为了给广大研究人员提供参考,作者对单层压电陶瓷^[10-11]、多层叠堆压电陶瓷、压电纤维复合材料和0-3型压电复合材料等4种振动控制材料进行了综述,重点介绍了这4种材料的结构特点、制备工艺及其在振动控制领域的研究进展,指出了其未来研究方向。

1 振动控制用压电材料

1.1 单层压电陶瓷

单层压电陶瓷(又称压电陶瓷片)是指经过直流高压电场极化处理后具有压电效应的铁电陶瓷,具有密度小、响应精度好、频响高和出力大等优点。压电陶瓷片的制备工艺一般包括粉体合成、陶瓷成型及烧结等3道工序,每道工序对陶瓷的最终质量都有着至关重要的影响^[12]。为制得粒径分布均匀且范围窄、粒径小、纯度高、烧结性能好的陶瓷粉体,PRAVEENKUMAR等^[13]以甲苯为溶剂,将 PbO 、 ZrO_2 、 TiO_2 和 La_2O_3 等粉体在高能行星球磨机中以 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速球磨30 h后,采用优化的传统固相反应法获得部分已转变成钙钛矿结构的锆钛酸铅(PLZT)纳米粉体,粉体粒径约25 nm;DERBY课题组^[14-15]采用喷墨打印成型技术,通过改变分散剂和溶剂组成制得了可用于喷墨打印的固含量(体积分数)高达40%的锆钛酸铅(PZT)陶瓷溶液,并且采用固含量(体积分数)为35%的PZT陶瓷溶液打印出了陶瓷坯体,其烧结后几乎达到完全致密(孔隙率小于1%),无模的成型工艺在降低成本、确保精度的同时还提高了生产效率;CHUA等^[16]

通过添加 MnO_2 、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 和 $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ 复合掺杂剂,不仅实现了性能优异PZT陶瓷的低温($1\ 050\text{ }^\circ\text{C}$)烧结,而且显著改善了PZT陶瓷的压电性能。

2013年,美国国家航空航天局(NASA)联合美国通用集团对布有压电陶瓷片的风扇叶片进行了仿真和试验研究,提出并演示了一种用于降低飞机发动机叶片振动的压电减振技术^[17]。结果显示,当叶片转速为 $5\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,叶片压电振动阻尼比基准阻尼增加了70%,实现了一定程度的振动抑制。2018年,美国国防高级研究计划局(DARPA)、波音公司和NASA进行了带有压电陶瓷片设计的智能旋翼试验^[18-20],在每个桨叶叶片上都安装了一个可偏转的压电驱动后缘襟翼^[21-22],驱动压电陶瓷抵消桨叶的部分振动载荷,从而实现对桨毂振动的控制。结果表明:叶片涡动相互作用引起的面内噪声降低近6 dB,振动轮毂负荷降低约80%;对于幅值高达 3° 的可控谐波剖面,尾缘襟翼偏转控制在小于 0.2° 均方根误差范围内,证实了智能旋翼可以有效地改善旋翼振动情况,并且在改善旋翼气动环境方面也有很好的效果。

1.2 多层叠堆压电陶瓷

现代飞行器对舒适性和易操控性的要求,使得飞行器必须实现机体的振动控制。单层压电陶瓷存在驱动电压高带来的驱动电源体积要求大等问题,使其不能满足飞行器对振动控制系统小型化的要求。

现有研究表明,通过将多片陶瓷级联制成多层叠堆压电陶瓷,即通过压电层和电极层的交错堆叠形成压电层串联、电极层并联的连接形式,能将产生相同位移时的驱动电压降低到单层压电陶瓷的1/10左右,这就能够有效降低驱动电源的复杂度,实现驱动电源的小型化。反之,也说明多层叠堆压电陶瓷能够在现有机载驱动器条件下,产生比单层压电陶瓷更大的位移,从而满足大振幅场合的减振需求。

多层叠堆压电陶瓷的制备工艺包括图案印刷、排胶及烧结三大部分。国内采用的传统工艺大都是利用黏结剂将单片压电陶瓷黏结而成。由于采用传统制备工艺制作 $200\text{ }\mu\text{m}$ 及以下厚度的单片压电陶瓷难度较大,因而传统制备工艺无法满足器件小型化、集成化的要求。近年来,利用陶瓷素坯流延制备工艺以及流延陶瓷坯膜和内电极一次共烧技术^[23]制备得到了 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚单片压电陶瓷,可实现低电压驱动且高位移输出;而利用设计好图案的网板,采

用单座叠层印刷机通过错位或者旋转印刷等方式,在每层膜片上印刷电极浆料以实现正负极性,通过套印或者控制电极材料中陶瓷粉体的添加量,可以解决多层叠堆压电陶瓷尤其是厚度超过 1 cm 后的叠堆平整度差的难题。

在压电陶瓷片基础上研制的多层叠堆压电陶瓷结构简单,可提供较大的驱动力,同时多层结构可在一定程度上减小驱动电压、提高位移输出量,可应用于振幅较大的减振场合。陈万华等^[24]为实时控制带有模型尾支杆支撑系统在吹风过程中的振动特性,以多层叠堆压电陶瓷为减振元件设计了尾支杆一体化结构,采用神经网络 PID^[25]实时控制方法进行振动控制试验,结果表明利用该控制系统可实时控制不同风速下的激励振动,控制后的均方根振动幅值降低了 55% 以上。这说明多层叠堆压电陶瓷对振幅较大振动的控制效果显著。

1.3 压电纤维复合材料

虽然压电陶瓷在振动控制方面取得了较好的效果,但是韧性小、脆性大的特点使得其应用范围受到限制。随着机械结构的复杂化和多样化,柔性成为压电材料的重要考量指标之一。压电纤维复合材料^[26]是指将压电纤维和树脂基体按一定比例、一定空间分布及连通方式复合在一起的一种压电材料,其组成包括压电陶瓷纤维层、交叉指型电极和聚合物基体三个部分,兼具有压电陶瓷和压电聚合物的优点^[27]。压电纤维复合材料可以黏结在各种类型的结构中或嵌入到复合结构中,在外加电压作用下弯曲或扭曲结构以产生或抵消振动,无外加电压时则可作为应变计来感知变形、噪声和振动。与传统压电陶瓷相比,树脂基体的保护作用使得复合材料在较大程度上克服了压电陶瓷在韧性方面的缺陷,从而具有极好的柔韧性和压电特性^[28]。

压电纤维的性能在很大程度上影响着复合材料的性能。美国先进材料公司通过纺丝法制备出直径 15~250 μm 的 PZT-5A 压电纤维,压电常数为 375 $\text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$,同时还制备出了各种不同内外径的中空纤维和截面为腰果状的纤维;该方法可以用于工业化的连续生产,特别适合制备直径比较小的纤维,不过其工艺较为复杂,对设备要求高。李坤等^[29]应用溶胶-凝胶法制备了直径约 25 μm 的铌酸铅-锆钛酸铅(PZN-PZT)凝胶纤维,通过添加体积分数约 63% 的 PZN-PZT 纤维制备了压电纤维复合材料,其压电常数为 403 $\text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$,机电耦合系数

为 0.65;溶胶-凝胶法工艺简单,但是由于溶胶中陶瓷固含量低,所得纤维的致密性不好,并且拉丝过程中纤维形状难以控制。NASA Langley 研究中心采用 25~75 μm 厚的刀片对 125~225 μm 厚的 PZT 陶瓷板进行了机械切割,得到宽度约 200 μm 、长度 8~9 cm 的致密 PZT 陶瓷纤维^[30]。机械切割法得到的压电纤维的宽度最小达到 75 μm ,与其他方法相比,压电纤维的致密性能更好、尺寸更均匀。但是机械切割法对机械加工技术要求很高,难以大规模推广应用,并且原材料浪费严重。

与压电陶瓷片相比,压电纤维复合材料因具有轻薄、可进行大幅度弯曲和扭转、易于粘贴到包括曲面在内的多种工作表面上、工作温度高达 450 $^{\circ}\text{C}$ 等优点,尤其适合应用于航天器刚柔耦合结构中。美国弗吉尼亚理工大学智能材料系统中心与加州理工大学喷气推进实验室联合开展了用压电纤维复合材料(MFC)控制可展开、可固化桁架结构振动状态的研究^[31-32],4 片 MFC 驱动器内嵌于复合物基底部位,采用“正位置反馈”(Positive Position Feedback, PPF)闭环控制系统获得了优异的振动控制效果,桁架结构的第一阶弯曲模态振动响应的最大衰减可达 92.8%,其中速度和加速度信号的 PPF 控制系统只需较小的电压就能获得很好的振动控制效果。

1.4 0-3 型压电复合材料

对于一些结构复杂、环境敏感度要求较高的系统,采用压电陶瓷片等振动主动控制方案的效果没有达到预期,需要用无源化的振动被动控制系统加以辅助。0-3 型压电复合材料是振动被动控制系统的代表材料,该复合材料由压电陶瓷增强相与热塑性聚合物基体相组合而成^[33],兼具有陶瓷和聚合物材料的优点,如压电系数高、韧性及延展性好、便于成型、密度低、声阻抗易于匹配、适用环境广等。在 0-3 型压电复合材料中,压电陶瓷相以 0 维方式自连,聚合物相以 3 维方式自连,互不相连的压电陶瓷颗粒分散在 3 维自连的聚合物基体中。目前,有关 0-3 型 PZT/环氧树脂压电复合材料性能的研究较多^[34]。EGUSA 等^[35]制备了由 PZT 陶瓷粉末和环氧树脂制成的压电复合材料涂层,发现复合材料的极化行为与基体和压电增强相之间的电导率密切相关。NHUAPENG 等^[36]制备了 0-3 型混合 1-3 型 PZT/环氧树脂压电复合材料,其压电常数 d_{33} 可以达到 25.3 $\text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$,机电耦合系数达到 0.54,并且具有与人体组织相近的阻抗。张洪涛等^[37]则研究了

0-3 型 PZT/环氧树脂复合材料的制备工艺及性能。

0-3 型压电复合材料中含有的导电相可以将外部作用的机械振动能量通过材料内部压电相及自身体积电阻转化成热量进行耗散,从而产生耗散机械能量、抑制振动的压电阻尼效应,因此在振动控制领域具有极高的应用价值^[38]。秦岩等^[39]将添加了压电陶瓷颗粒的压电复合材料应用于船舶承力轴承的减振中,取得了明显的减振效果。TANIMOTO^[40]和 KIM 等^[41]制备了层间含压电陶瓷颗粒增强相的碳纤维复合材料,结果表明该材料在保留原有碳纤维复合材料力学性能的基础上,阻尼性能得到了明显提高,这扩展了 0-3 型压电复合材料作为阻尼材料的应用范围。

2 振动控制用压电材料的研究方向

压电材料凭借其独有的机电转换特性以及具有的工作频率宽、响应快和性能稳定等优势在振动控制领域得到广泛应用。然而,目前大规模使用的压电材料仍主要为铅基压电陶瓷,该陶瓷在制备过程中会产生较大污染。此外,成型模具的开发和较高的烧结温度是目前压电陶瓷制造成本居高不下的原因。因此,振动控制用压电材料的研究方向应主要集中在以下几个方面。

(1) 复杂结构压电陶瓷的快速成型。快速成型技术不需模具,能直接制造出形状复杂的陶瓷器件,从而大大提高压电陶瓷的生产效率。

(2) 铅基压电陶瓷的低温烧结技术。目前,铅基陶瓷的低温烧结技术还不能彻底解决铅挥发问题,应进一步优化其组分及烧结工艺,在保证材料优异性能的同时降低烧结温度,从而减少铅的挥发,有利于环境保护。

(3) 发展性能优异的无铅系列压电陶瓷。深入研究无铅系列压电陶瓷,通过选择适合的掺杂材料,提升陶瓷性能,从而实现对铅基陶瓷的替代。

(4) 多层叠堆压电陶瓷的可靠性研究。压电陶瓷在持续振动下产生电荷,任何微小缺陷(微裂纹、分层)或者是微裂纹在压电器件运动时的扩展都会对压电式电源的寿命产生很大的影响。微裂纹、分层等缺陷对多层叠堆压电陶瓷压电性能的影响机制研究是该陶瓷可靠性研究的关键。

(5) 压电复合材料的配方优化。压电复合材料中各相成分和比例的不同^[36]以及联通方式的不同均会在很大程度上影响材料的性能。选用何种成分

并实现最佳匹配,采用何种复合方式以实现最高效率是未来重要的研究内容。

3 结束语

压电材料具有独特的机电转换特性,只需匹配适宜的控制策略就能在振动控制领域发挥巨大作用。单层压电陶瓷、多层叠堆压电陶瓷、压电纤维复合材料和 0-3 型压电复合材料等 4 种振动控制用压电材料,依据各自不同的特点在相应的振动场合得到了广泛应用。不过,振动形式的复杂多样性在一定程度上制约了压电材料的减振效果。为了获得更好的减振效果,灵活性好、可靠性高、适应性强的压电材料的研制受到了越来越多学者的重视。此外,基于模型的反馈性控制策略在应对复杂的非线性振动系统时会受到极大的限制,而神经网络等具备动态调节能力的控制策略在非线形振动系统的辨识与控制方面具有极大的潜力,是未来研究的主要发向。

参考文献:

- [1] 黄文虎,王心清,张景绘,等.航天柔性结构振动控制的若干新进展[J].力学进展,1997, 27(1): 5-18.
- [2] 江冰,李兴丹,吴代华. Smart 结构及其应用[J]. 力学进展, 1994, 24(3): 353-361.
- [3] 董聪,夏人伟.智能结构设计与控制中的若干核心技术问题[J].力学进展,1996, 26(2):166-178.
- [4] 张启先,张玉茹.我国机械学研究的新进展与展望[J].机械工程学报,1996, 32(4):1-4.
- [5] 贺江平,钟发春.基于压电效应的减振技术和阻尼材料[J].振动与冲击,2005, 24(4):9-13.
- [6] 胡丰. 压电式振动能量采集技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2017.
- [7] 刘姝,李中涛,秦廷,等. 压电陶瓷智能材料的风机叶片振动主动控制研究[J]. 大电机技术, 2015(4): 59-64.
- [8] 汤琳. 浅议结构振动被动控制[J].城市建设理论研究(电子版),2011(21).
- [9] 杜洋. 浅谈压电材料在振动主动控制中的应用[J]. 科技创新与应用, 2017(1): 23-23.
- [10] TAKENAKA T, OKUDA T, TAKEGAHARA K. Lead-free piezoelectric ceramics based on $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3\text{-NaNbO}_3$ [J]. Ferroelectrics, 1997, 196(1): 175-178.
- [11] JAFFE B, COOK W R, JAFFE H. Piezoelectric ceramics [M]. London: Academic Press, 1971.
- [12] 包秀兰,陈燕. 锆钛酸铅压电陶瓷的制备工艺研究[J]. 陶瓷学报,2019, 40(2):153-158.
- [13] PRAVEENKUMAR B, KUMAR HH, KHARAT D K, et al. Investigation and characterization of La-doped PZT nanocrystalline ceramic prepared by mechanical activation

- route[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 112(1): 31-34.
- [14] WINDLE J, DERBY B. Ink jet printing of PZT aqueous ceramic suspensions[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1999, 18(2): 87-90.
- [15] WANG T M, DERBY B. Ink-jet printing and sintering of PZT[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(8): 2053-2058.
- [16] CHUA B W, LU L, LAI M O, et al. Investigation of complex additives on the microstructure and properties of low-temperature sintered PZT using the Taguchi method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 386(1/2): 303-310.
- [17] MIN J B, DUFFY K P, CHOI B B, et al. Numerical modeling methodology and experimental study for piezoelectric vibration damping control of rotating composite fan blades[J]. *Computers & Structures*, 2013, 128: 230-242.
- [18] STRAUB F K, ANAND V R, BIRCHETTE T S, et al. Wind tunnel test of the SMART active flap rotor[C]//American Helicopter Society 65th Annual Forum and Technology Display. Grapevine, TX: American Helicopter Society, Inc., 2009; 20090036811.
- [19] HALL S R, ANAND V R, STRAUB F K, et al. Active flap control of the SMART rotor for vibration reduction[C]//American Helicopter Society 65th Annual Forum and Technology Display. Grapevine, TX: American Helicopter Society, Inc., 2009; 20090036805.
- [20] STRAUB F K, ANAND V R, LAU B H, et al. Wind tunnel test of the SMART active flap rotor[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2018, 63(1): 1-16.
- [21] LEMNIOS A Z, DUNN F K. Theoretical study of multicyclic control of a controllable twist rotor[R/OL]. (1976-04-01) [2019-03-02]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780025142.pdf>.
- [22] LEMNIOS A Z, HOWES H E, NETTLES W E. Full scale wind tunnel tests of a controllable twist rotor[C]//32nd Annual National Forum. Washington, DC: American Helicopter Society, Inc., 1976; 1064-1.
- [23] 李国荣, 陈大任, 沈卫, 等. 多层片式 PZT 系压电陶瓷微位移器位移特性研究[J]. *功能材料*, 1998(增刊 1): 491-493.
- [24] 陈万华, 王元兴, 沈星, 等. 压电叠堆主动减振的神经网络 PID 实时控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(4): 587-593.
- [25] FANG M C, ZHUO Y Z, LEE Z Y. The application of the self-tuning neural network PID controller on the ship roll reduction in random waves[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(7): 529-538.
- [26] WILKIE K W, BRYANT R G, FOX R L, et al. Method of fabricating a piezoelectric composite apparatus: US6629341B2[P]. 2003-09-03.
- [27] 杜善义. 智能材料系统和结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [28] 易果. 压电纤维复合材料在舰艇基本结构振动主动控制上的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [29] 李坤, 李金华, 李锦春, 等. PLZT 陶瓷纤维/环氧树脂 1-3 复合材料的制备和性能研究[J]. *无机材料学报*, 2004, 19(2): 361-366.
- [30] WILKIE W K, BRYANT R G, HIGH J W, et al. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications [C]//Smart structures and materials 2000: Industrial and commercial applications of smart structures technologies.[S. l.]: International Society for Optics and Photonics, 2000, 3991: 323-335.
- [31] PAPPAS R S, GIERSCHE L R, QUAGLIAROLI J M. Photogrammetry of a 5 m inflatable space antenna with consumer-grade digital cameras [J]. *Experimental Techniques*, 2001, 25(4): 21-29.
- [32] TARAZAGA P A, INMAN D J, WILKIE W K. Control of a space rigidizable inflatable boom using macro-fiber composite actuators[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2007, 13(7): 935-950.
- [33] TSUNOOKA T, SAITO S, YAMAMOTO T, et al. Piezoelectric composite material; US4917810[P]. 1990-4-17.
- [34] 张鸿名. 0-3 型 PZT/环氧压电复合材料性能预报及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [35] EGUSA S, IWASAWA N. Poling characteristics of PZT/epoxy piezoelectric paints[J]. *Ferroelectrics*, 1993, 145(1): 45-60.
- [36] NHUAPENG W, TUNKASIRI T. Properties of 0-3 lead zirconate titanate-polymer composites prepared in a centrifuge [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, 85(3): 700-702.
- [37] 张洪涛, 李波, 姚宝殿. PZT/环氧树脂 0-3 型压电复合材料性能的研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(3): 48-51.
- [38] NEWNHAM R E, SKINNER D P, CROSS L E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites [J]. *Materials Research Bulletin*, 1978, 13(5): 525-536.
- [39] 秦岩, 黄志雄, 吴赞, 等. 压电阻尼复合材料在船舶承力轴承减振中的应用研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(9): 1-4.
- [40] TANIMOTO T. A new vibration damping CFRP material with interlayers of dispersed piezoelectric ceramic particles [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(2): 213-221.
- [41] KIM S Y, TANIMOTO T, UCHINO K, et al. Effects of PZT particle-enhanced ply interfaces on the vibration damping behavior of CFRP composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(10): 1477-1482.