第 48 卷第 1 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 1
2020 年 1 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　January，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190163

压电纤维复合材料极化响应电极结构优化

危　权，周　静，沈　杰，陈　文

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院，材料复合新技术国家重点实验室，武汉 430070；
2. 武汉理工大学，纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心，武汉 430074)

摘　要：采用有限元软件 COMSOL Mutilphysics 模拟仿真，从极化电场加载的角度分析了电极结构对压电纤维复合材料(MFC)中压电纤维极化电场分布的影响，发现电极间距增大和宽度减小，有利于增大纤维中均匀活性区域，提高有效电场的加载，从而获得高压电性，同时电极间距的调控效果更为明显。实验制备 MFC 并进行了铁电响应和压电性能表征，结果表明：适当增大叉指电极间距和减小叉指电极宽度，能有效提高 MFC 的极化响应程度进而改善了其压电性能，实验结果与模拟仿真一致。

关键词：压电纤维复合材料；叉指电极结构；有限元法；极化
中图分类号：TN384　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)01–0015–06
网络出版时间：2019–08–30



Optimization of Electrode Structure for Macro-fiber Composites Polarization Response

WEI Quan, *ZHOU Jing*, *SHEN Jie*, *CHEN Wen*

(1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Engineering Research Center of Nano-Geo Materials of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The effect of electrode structure on the polarization field distribution of piezoelectric ceramic fibers was investigated *via* the finite element simulation. It is indicated that increasing the electrode spacing and decreasing its width both are beneficial to extend the active electric zone in the fiber and enhance the effective polarization electric field, leading to enhanced piezoelectric properties. Furthermore, the electrode spacing can adjust the polarization more effectively rather than the width does. In addition, macro fiber composites (MFS) were fabricated and the corresponding ferroelectric and piezoelectric properties were characterizatied. The results show that it is an effective way to increase the polarization response of MFC and improve its piezoelectric performance by increasing the spacing and decreasing the width of inter-digital electrode appropriately. The experimental results are consistent with simulated data.

Keywords: macro fiber composites; inter-digital electrode structure; finite element method; polarization

压电纤维复合材料(MFC)是由单向排列的压电纤维插入环氧树脂基体并封装在叉指电极中的一种三明治结构功能复合材料[1]，其结构如图 1 所示。这些材料因具有突出的各向异性、较大的结构变形以及良好的柔韧性而在智能应用中得到了广泛的关注，例如振动主动控制[2]、结构健康监测[3]、能量收集[4]和传感[5]等领域。

MFC 是由多种材料复合而成，复合结构参数对

收稿日期：2019–03–08。　修订日期：2019–03–27。
基金项目：国家自然科学基金(51572205)；装备预研教育部联合基金(6141A02022262)；中央高校基本科研业务费专项资金(WUT：2017III035，2018III019)；纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心开放课题(NGM2019KF005)。
第一作者：危　权(1991—)，男，硕士研究生。
通信作者：沈　杰(1981—)，男，博士，副教授。

Received date: 2019–03–08.　**Revised date:** 2019–03–27.
First author: WEI Quan (1991–), male, Master candidate.
E-mail: 987698140@qq.com
Correspondent author: SHEN Jie (1981–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: shenjie@whut.edu.cn

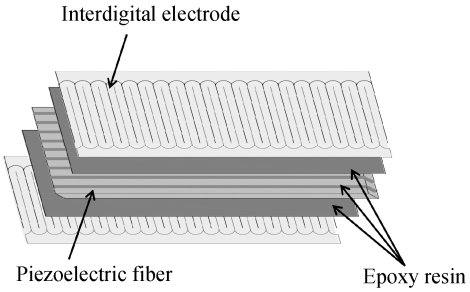


图 1 压电纤维复合材料的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of macro fiber composite structure

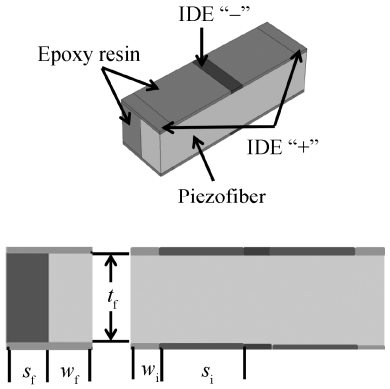
其应用性能起决定性影响，优化结构设计是提高其性能的重要手段。仿真模拟可以有效避免实验中制备、测试条件等不确定因素带来的影响，便于明确主要影响参数及其影响规律，因此成为了 MFC 领域优化结构设计的主要研究手段，研究者利用有限元等计算方法，对有机/无机相压/介电性能、排列结构、黏结层性能与体积分数等结构参数对 MFC 性能影响开展了大量研究[6–9]。以上研究均基于均一场模型，默认压电陶瓷纤维为压电/介电性能均一的结构单元，然而实际情况并非如此。

叉指电极是 MFC 的重要组成部分，采用叉指电极实现了对定向排列纤维加载电场，利用 d_{33} 压电响应模式产生较大应变。然而，由于叉指电极并非全面覆盖于介质表面，必然导致电场分布的不均匀。压电纤维压电性能是通过极化过程赋予的，叉指电极同时充当着 MFC 的极化电极和工作电极，其结构特征所造成的极化电场分布不均匀决定了 MFC 中的压电纤维不是性能均匀的整体，而设计电极结构可调控极化电场分布提高压电纤维的压电活性，从而优化 MFC 性能。目前，国内外研究者对叉指电极结构参数对 MFC 电场分布影响已开展了仿真模拟与实验研究，然而这些研究仅从材料使役过程出发，研究电极结构对驱动性能或电输出性能的影响[10–15]，默认前提仍是纤维具有均一的压电/介电性能，而从材料制备过程角度出发，对叉指电极结构对压电纤维极乃至 MFC 性能影响的研究尚未报道。

基于此，本工作克服以往 MFC 结构优化仅关注使役阶段的问题，从材料制备阶段的极化赋能角度出发，采用仿真模拟手段，分析预测电极结构参数对纤维内极化电场分布以及极化效果的影响，同时结合实验验证，优化 MFC 材料设计与性能。

1 MFC 的有限元模拟

分别变化电极间距和电极宽度建立图 2 所示的 MFC 等效体积元(Representative volume element，RVE)模型，相关结构参数如表 1 所示，采用 COMSOL Mutilphysics 多物理场仿真模拟软件模拟计算了叉指电极结构对 MFC 内部的电场分布影响。分析电极间距(s_i)和电极宽度(w_i)对压电纤维中心以及与电极接触表面电场分布的影响。



IDE is interdigitated electrode; s_f is fiber spacing; w_f is half width of piezofiber; w_i is electrode width; s_i is electrode spacing; t_f is composite piezofiber piece.

图 2 压电纤维复合材料的等效体积元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of representative volume element model of macro fiber composite

表 1 压电纤维复合材料等效体积元模型结构参数

Table 1 Structure parameter of representative volume element model of macro fiber composite mm

Model	Electrode spacing s_i	Electrode width w_i	Half width of piezofiber w_f	Half width of epoxy w_e	Composite piezofiber piece t_f
Electrode width model	0.50	0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30	0.35	0.35	0.30
Electrode spacing model	0.25, 0.50, 0.75, 1.00	0.10	0.35	0.35	0.30

模拟得到的 RVE 中电场强度分布如图 3 所示。从图 3 可以看出，纤维内电场分布可分为 3 个区域：电场活化区(Active zone)、电场死区(Dead zone)和过渡区(Transition zone)。电场活化区远离叉指电极，该区域电场强度最大且分布最均匀，是压电纤维极化有效区域。叉指电极正下方区域为电场死区，该区域电场强度非常小，无极化效果。2 个区域间由非均匀的过渡区连接，该区域虽有极化，但由于强度不高，均

匀性差，因此极化获得压电性能不高。可见，应通过设计叉指电极结构，尽可能增大活化区范围及其电场强度来提高压电纤维的极化效果。

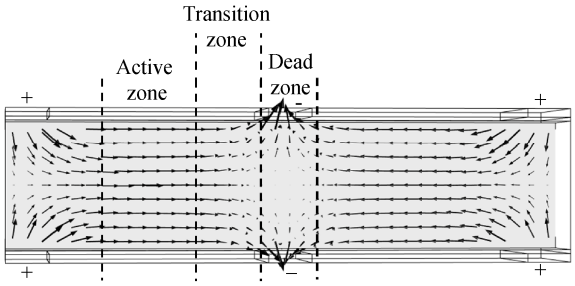
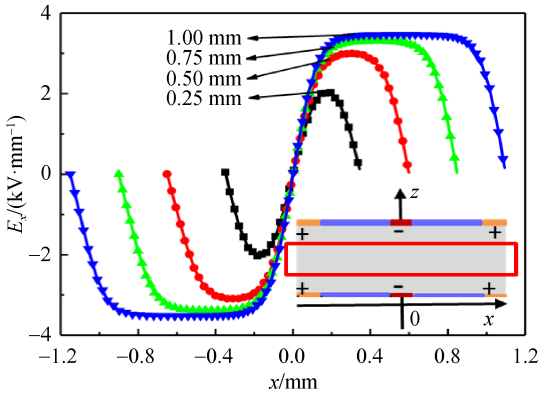


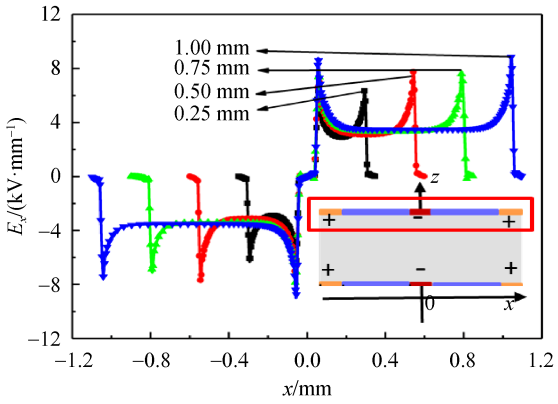
图 3　压电纤维内电场分布图

Fig. 3　Electric field distribution of piezoelectric fiber

图 4 为恒定电场(E=4 kV/mm)和电极宽度(w_i=0.10 mm)时，不同电极间距(s_i=0.25，0.50，0.75，1.00 mm)对纤维内部(图 4a，区域范围见内图所示）和电极接触表面(图 4b，区域范围见内图所示)电场分布的影响。从图 4a 可以看出，电极间距对压电纤维内部的电场分布影响显著，对于尺寸一定的纤维，其电场死区和过渡区的区域范围基本在–0.25~+0.25 mm 范围，随着电极间距增大超过过渡区域范围后(s_i≥0.75 mm 时)，最大电场强度增强到极值后不再变化，进一步增大电极间距可增大均匀活性区的范围。从图 4b 可以看出，电极间距的变化对表面电场分布影响不大，但电极边缘处由于曲率激增而导致的电场激增值随着电极间距的变大而增大。可见，对于压电纤维的电极间距需大于过渡电场范围，以获得有效的极化电场强度加载，进一步增大间距可增大均匀活性区范围，提高纤维整体极化效果，但存在电极边缘高压击穿的风险。



(a) Inside of piezofiber

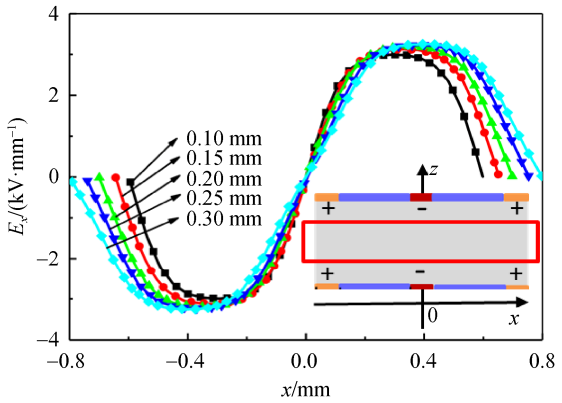


(b) Surface of piezofiber

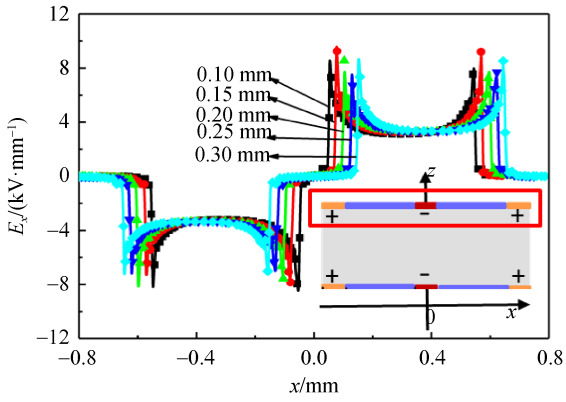
图 4　压电纤维中电场分布随电极间距变化模拟仿真

Fig. 4　Variation of the electric fields (E) of piezofiber with electrode spacing

图 5 为恒定电场(E=4 kV/mm)电极间距(s_i=0.50 mm)时，不同电极宽度(w_i=0.10，0.15，0.20，0.25，0.30 mm)对纤维内部(图 5a，区域范围见内图所示)和电极接触表面(图 5b，区域范围见内图所示)电场分布的影响。由图 5 可以看出，随着电极宽度增加，电场死区和过渡区的宽度略有增加，相比于图 4 结果，电极宽度对纤维内部电场分布和最大加载电压



(a) Inside of piezofiber



(b) Surface of piezofiber

图 5　压电纤维中电场分布随电极宽度变化模拟仿真

Fig. 5　Variation of electric fields of piezofiber with electrode width

的影响不大;表面电极边缘处电场激增的最大值随着电极宽度减小而增加，结合图 4，说明电极宽度与电极间距的比值与边缘电场最大强度成反比。

以上仿真模拟结果说明，电极间距是影响纤维内极化电场均匀高效加载的主要因素，电极间距越大，极化效果越好。电极宽度主要影响非均匀电场区域，宽度应尽可能窄，其对整体极化效果的影响相对电极间距较弱。增大电极间距和缩小电极宽度在改善极化效果的同时，都会增大电极边缘处曲率变化引起的激增电场强度，带来击穿危险。所以实际中应在材料抗击穿能力、极化设备最大电压能力和电极加工与装配精度 3 方面条件前提下，设计较宽的电极间距和窄电极宽度，以改善压电纤维极化效果，提高 MFC 压电性能。

2 实验

压电相是由山东淄博宇海电子陶瓷有限公司生产的 Mn 掺杂 PZT 体系压电陶瓷[16]；叉指电极由深圳芯晨科技有限公司提供，电极类型为：电极宽度为 0.10 mm 对应的电极间距分别为 0.25、0.50、0.75、1.00 mm 和电极间距为 0.50 mm 对应的电极宽度分别为 0.10 和 0.20 mm；环氧树脂采用杭州五会港胶粘剂有限公司生产的 E-44 双酚 A 型液态环氧树脂和 PU-650 组成的 AB 胶材料。

2.1 样品制备

采用切割–填充法分别制备不同电极间距和电极宽度的 MFC，具体步骤如下：

1) 压电复合纤维层的制备。用金刚石直线切割机在压电陶瓷块上相隔等间距切出一系列的凹槽，清洗干净后，将配制环氧树脂黏结剂注入陶瓷阵列中，抽真空固化。

2) 压电复合纤维层的封装。以上一步中配制的环氧树脂为黏结剂，用不同结构参数叉指电极封装压电复合纤维层，置于真空干燥箱中固化。待复合材料固化后引出电极，即得 MFC。

3) MFC 的极化。将所制得 MFC 在室温下以 3 kV/mm 电场，经 15 min 极化。

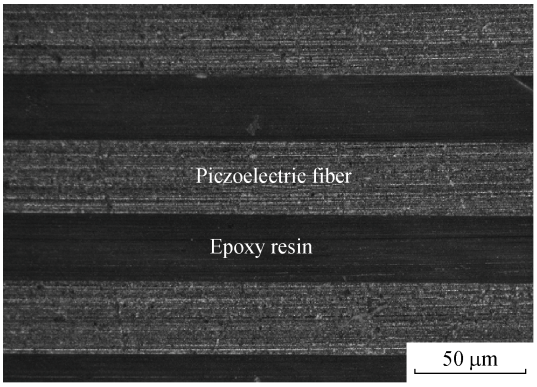
2.2 结构与性能表征

采用日本 Nikon 公司生产的 Eclipse Lv150n 型金相显微镜观察压电纤维与聚合物基体之间以及压电复合纤维层与叉指电极之间的界面结合状态。采用美国 Radiant 公司生产的 Precision Workstation 测量 MFC 的电滞回线，并搭配 MTI-2000 型光纤位移传感器测试 MFC 的纵向应变。

3 结果与讨论

3.1 显微结构分析

图 6a 是压电纤维层上表面显微结构照片，从图 6a 可以看出，压电纤维与环氧树脂基体排列紧密，未观察到明显的间隙或孔洞，且压电纤维的宽度以及纤维之间的间距均匀分布。图 6b 是 MFC 平行于纤维方向的横截面侧视图，由图 6b 可以看出，压电复合纤维层与叉指电极之间接触紧密。复合纤维层与叉指电极之间的黏结层很薄，这大大降低了黏结层对纤维的电学分压，此外，上下叉指电极处于完全对称状态。综上所述，压电纤维复合材料制备良好，确保了所制备的压电纤维复合材料能真实反映出结构对性能的影响。



(a) Surface of the fiber layer



(b) Cross-section

图 6 MFC 微观结构照片

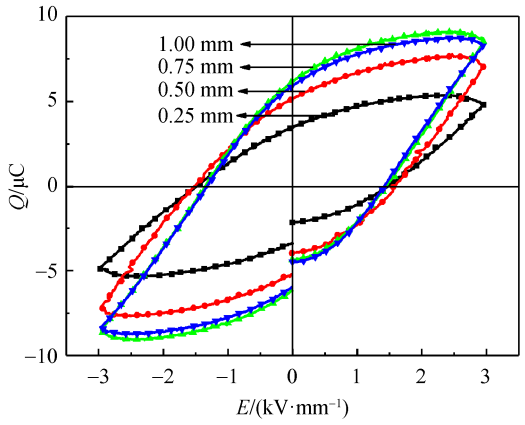
Fig. 6 Microstructure images of the macro-fiber composites (MFC)

3.2 铁电响应研究

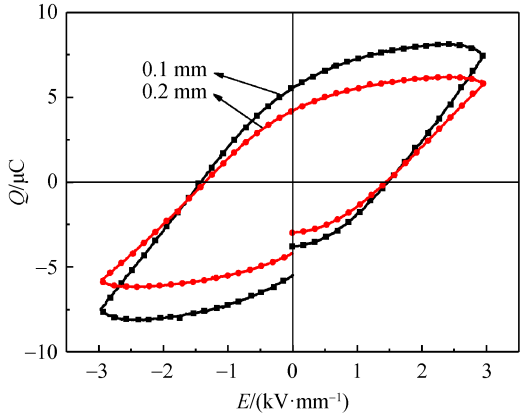
电滞回线可以反映铁电材料对外电场变化的极化响应，对铁电材料施加一定的电场，使其内部电畴翻转，当外加电场撤去后，电畴不能完全恢复。表现出电滞回线，压电材料中被极化同取向的电畴在宏观上体现出压电性。因此从电滞回线可表征出材料的极化效果，同种材料的剩余极化强度越大，电滞回线越饱和，极化效果越好。

图 7a 和图 7b 分别为不同电极间距和电极宽度 MFC 在同一外加电场下的电滞回线。从图 7a 可以看出，在相同电场条件下，随着电极间距的增大，

MFC的剩余极化电荷(MFC中的电极面积无法定义)逐渐增大，0.75 和 1.00 mm 电极间距的 MFC 的电滞回线基本一致。这说明，随着电极间距增大外电场对材料的极化越来越充分，在 0.75 和 1.00 mm 样品中趋于饱和。从仿真模拟结果可知，电荷间距较大的 MFC 中纤维内电场强度越大，当电极间距为 0.75 和 1.00 mm 时纤维内电场均达到最大，铁电体极化效果与加载的有效电场相关，实验结果与仿真模拟预测完全一致。从图 7b 可以看出，较窄叉指电极宽度的 MFC 的电滞回线更饱和，剩余极化电荷越大，说明较窄的叉指电极更有利于 MFC 的极化，同样与模拟仿真结果一致。



(a) Effect of electrode spacing



(b) Effect of electrode width

Q is remanent polarization.

图 7　MFC 的电滞回线

Fig. 7　Hysteresis loops of MFC

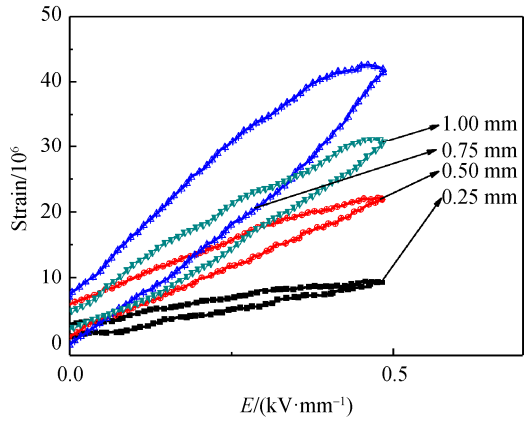
3.3　压电性能研究

压电应变常数是表征压电材料压电性能的一个重要参数，通常利用正压电效应，采用静态法、动态法和准静态法等表征。由于 MFC 的柔性无法对其轴向施加应力，上述方法均无法使用，因此利用逆压电效应，采用 *E*–*S* 法测试其等效压电常数。即对 MFC 施加较低的单极交流电场，测试其纵向应变，然后利用公式(1)计算其等效压电应变常数：

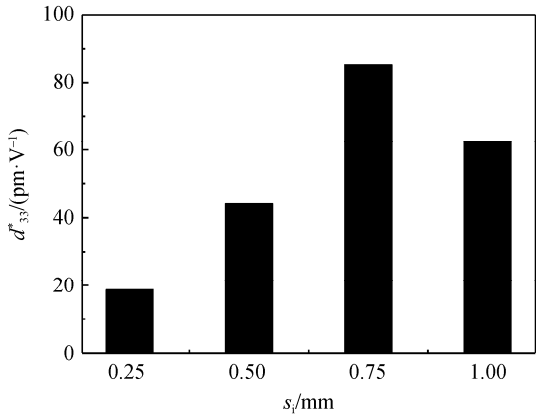
$$d^*_{33}=S_3/E_3 \tag{1}$$

式中：S_3 为 MFC 的纵向应变，E_3 表示沿纤维方向的电场强度，d^*_{33} 表示 MFC 的等效压电应变常数。

对极化后的 MFC 在 0.5 kV/mm 的单极交流电场下测试其纵向应变曲线，如图 8a 所示，将其换算成等效压电常数 d^*_{33}，结果如图 8b 所示。从图 8b 可见，在相同极化条件获得的 MFC 材料的压电性能随着电极间距的增大而增大，间距为 0.75 mm 的 MFC 具有最高的等效压电应变常数，这与计算模拟预测和电滞回线测试结果一致。当电极间距进一步增大为 1.00 mm 时，其最大应变值和等效压电应变常数略有下降，极化效果相同的情况下，1.00 mm 间距 MFC 的最小单元较 0.75 mm 间距 MFC 大，受到的无压电活性聚合物层夹持阻力变大，从而降低了整体的压电性。



(a) Longitudinal strain



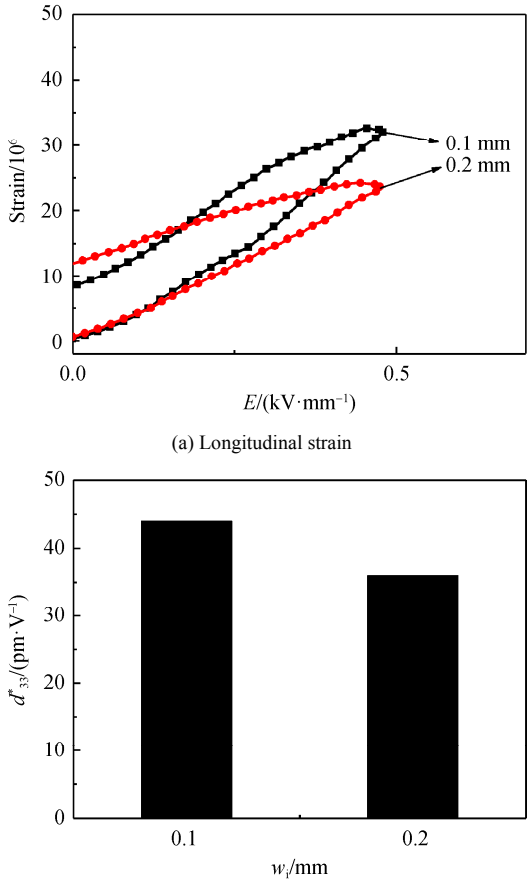
(b) Equivalent piezoelectric constant

图 8　MFC 纵向应变和等效压电常数 d^*_{33} 随电极间距变化

Fig. 8　Variation of the longitudinal strain and equivalent piezoelectric constant of MFC with electrode spacing

不同电极宽度 MFC 在恒定单极电场条件下

的纵向应变测试结果如图 9a 所示，将其换算成等效压电常数 d^*_{33}，结果如图 9b 所示。从图 9 可以看出，电极宽度为 0.10 mm 的 MFC 在 0.5 kV/mm 的单极交流电场下最大应变量为 22×10^{-6}，相应的 d^*_{33}=44 pm/V，而电极宽度为 0.20 mm 的 MFC 产生的应变为 18×10^{-6}，相应的 d^*_{33}=36 pm/V。随着电极宽度的增加，MFC 的压电性能有所下降，这与仿真模拟和电滞回线测试结果吻合。



(a) Longitudinal strain

(b) Equivalent piezoelectric constant

图 9　MFC 纵向应变和等效压电常数 d^*_{33} 随电极宽度变化

Fig. 9　Variation of the longitudinal strain and equivalent piezoelectric constant (d^*_{33}) of MFC with electrode width

4　结论

通过模拟仿真和实验研究了叉指电极间距和宽度对 MFC 中压电纤维极化以及 MFC 压电性能的影响。发现电极间距的增大和宽度变小，均可增大均匀活性电场区域，改善极化效果，其中电极间距的影响更为显著，实验结果与模拟仿真预测一致，在模拟仿真结果预测下，电极间距为 0.75 mm 时获得了具有最大等效压电系数的 MFC。研究结果表明，从提高电场有效加载改善极化效果的角度出发，应在避免电极边缘电场激增导致击穿的前提下，依据加工精度能力和极化电压能力，尽可能增大 MFC 电极间距和减小电极尺寸，以获得更好的极化效果。

参考文献：

[1] BOWEN C R, NELSON L J, STEVENS R. Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites[J]. J Electroceram, 2006, 16(4): 263–269.

[2] BELLOLI A, NIEDERBERGER D, PIETRZKO S, et al. Structural vibration control *via* R-L shunted active fiber composites[J]. J Intel Mat Syst Str, 2007(3): 275–287.

[3] BRUNNER A J, BIRCHMEIER M, MELNYKOWYCZ M M. Piezoelectric fiber composites as sensor elements for structural health monitoring and adaptive material systems[J]. J Intel Mat Syst Str, 2009, 20(9): 1045–1055.

[4] HYUN J S, CHOI Y T, WERELEY N M. Analysis of energy harvesting devices using macro-fiber composite materials[J]. J Intel Mat Syst Str, 2010, 21: 647–658.

[5] LIN X J, CHEN G L, LI J N. Investigation of acoustic emission source localization performance on the plate structure using piezoelectric fiber composites[J]. Sens Actuat A-Phys, 2018, 282: 9–16.

[6] WILLIAMS R B, INMAN D J, SCHULTZ M R. Nonlinear tensile and shear behavior of macro fiber composite actuators[J]. J Compos Mater 2004, 38(2): 855–869.

[7] BECKERT W. Modelling piezoelectric modules with interdigitated electrode structures[J]. Comp Mater Sci, 2003, 26: 36–45.

[8] SREENIVASA P S, AROCKIARAJAN A. Effect of interphase and thermal environment on the effective properties of macro-fiber composites (MFC)[J]. Compos Part B-Eng, 2015, 75(9): 327–335.

[9] PANDEY A, AROCKIARAJAN A. Actuation performance of macro-fiber composite (MFC): Modeling and experimental studies[J]. Sens Actuat A-Phys, 2016, 248(7): 114–129.

[10] 刘永刚, 沈星, 赵东标, 等. 压电纤维复合材料的静电场分析[J]. 人工晶体学报, 2007, 36 (3): 596–600.
LIU Yonggang, SHEN Xing, ZHAO Dongbiao, et al. J Synth Cryst (in Chinese), 2007, 36 (3): 596–600.

[11] YUAN X, ZHU S, LI X F, et al. Mechanical performance of piezoelectric fiber composites and electroelastic field concentration near the electrode edges[J]. Mater Design, 2017, 128(4): 71–79.

[12] 赵国旗, 韩伟, 骆英. 叉指式压电纤维复合材料驱动器的结构优化[J]. 陶瓷学报, 2013, 34 (4): 467–472.
ZHAO Guoqi, HAN Wei, LUO Ying. J Ceram (in Chinese), 2013, 34 (4): 467–472.

[13] LIN X J, HUANG S F, ZHOU K C, et al. The influence of structural parameters on the actuation performance of piezoelectric fiber composites[J]. Mater Design, 2016, 107(6): 123–129

[14] 谢焰, 周静, 沈杰, 等. 纤维厚度和叉指电极间距对MFC电输出性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (12): 4193–4197.
XIE Yan, ZHOU Jing, SHEN Jie, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36 (12): 4193–4197.

[15] JEMAI A. Modeling and parametric analysis of a unimorph piezocomposite energy harvester with interdigitated electrodes[J]. Compos Struct, 2016, 135 (9): 176–190.

[16] 徐磊, 周静, 唐耀波, 等. PMnS-PZN-PZT压电纤维的制备与铁电性能[J]. 硅酸盐学报, 2010, 28(8): 1411–1414.
XU Lei, ZHOU Jing, TANG Yaobo, et al. J Chin Ceram Soc, 2010, 28(8): 1411–1414.