

压电驱动器陶瓷材料温度特性研究及模型修正

刘楠¹, 刘振明¹, 龚鑫瑞¹, 黄新源¹, 熊春友²

(1.海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033; 2.陆军步兵学院 工程技术与应用系, 江西 南昌 330100)

摘要:在压电陶瓷热-电-力多场耦合加载试验台上,对压电驱动器的陶瓷材料在强电场(2 kV/mm)和变温度(30~150℃)下的性能进行了测试,分析了电滞回线、应变回线以及自由电容与介电损耗角正切值随着温度的变化关系,同时建立了考虑温度影响的陶瓷材料的位移特性数学模型,并验证了模型的准确性。结果表明:随着温度的升高,双极强电场下的电滞回线逐渐变得细长,同时剩余极化、最大极化和矫顽场均下降,且温度对剩余极化和矫顽场的影响比对最大极化 s 的影响更为强烈,应变回线呈现典型的蝶形曲线,负应变随温度的升高而逐渐下降至0.12%;在单极工作电场下,随温度升高,剩余极化变化较小,最大极化升高明显,增加了40%左右;材料的压电常数基本呈线性增加的趋势,自由电容与介电损耗角正切值不断增大,温度越高,增幅越大。

关键词:柴油机;压电陶瓷;电滞回线;应变回线;数学模型

中图分类号: TP183

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2019)05-1011-07

随着压电陶瓷(PZT)材料的广泛应用,压电式喷油器由于快速的动态响应特性,为柴油机灵活多变的高压力燃油喷射提供了可靠保证^[1-3]。作为压电式喷油器的核心部件,压电驱动器与电磁阀相比,具有驱动力大、响应速度快、功耗低等优势。然而在驱动器运行时,为增大工作行程,往往需要施加强电场进行驱动,同时受到环境温度和自生热的影响^[4],压电喷油器中的压电驱动器处于变温(-30~125℃)和强电场(>1.5 kV/mm)的热-电耦合工作场中,压电材料铁电畴的翻转与运动会较强的非线性和迟滞性,使压电驱动器的性能参数发生较大变化,给研究压电喷油器响应特性及补偿控制带来了困难^[5-6]。

Altieri等^[7]在不同工作温度(20~85℃)和充电电压(70~150 V)下进行压电陶瓷材料叠堆位移的试验测量,发现同一电压下工作温度的升高使得叠堆位移增加,且几乎呈线性关系, Li等^[8]在压电叠堆准静态条件下也得到了同样的结果。Raul等^[11]对不同工作温度、驱动电压和燃油压力下直驱式压电喷油器的喷油规律进行了试验研究,发现在不同驱动电压和喷射压力下工作温度对喷油器喷射速率

的影响差异十分显著,且随着喷油器工作温度的升高,可通过降低驱动电压以保持恒定的喷油速率。杜刚^[9]对制备的改性PMN-PZT陶瓷进行变温性能试验,发现温度升高使得电滞回线面积、矫顽场和内偏场均线性下降,同时温度诱导的宏畴-微畴转变对材料的铁电性具有显著影响,在宏畴-微畴转变过程的异常温度点附近材料介电损耗达到最大。因此,有必要深入研究压电陶瓷材料的铁电畴在复杂热-电工作场中的变化规律,为实现压电驱动器的精确位移控制提供依据。

在试验上,前人采取了许多手段检测压电材料中铁电畴的变化,如偏光显微镜法、电子显微镜法等。但这些试验手段对陶瓷样品和试验设备要求很高。相比之下,电滞回线(P-E回线)与应变回线(S-E)是陶瓷在外场下电畴翻转的外在表现,且易于观测和记录,因此被用来反映陶瓷材料畴结构的变化以及运动等微观结构变化^[10]。

本文试验研究了压电驱动器陶瓷(PZT)材料在强电场(2 kV/mm)和变温度(30~150℃)下的电滞回线、应变回线以及自由电容 C_s 值与介电损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 的变化规律,探究环境温度对陶瓷材料铁

电畴运动的影响;同时在试验结果的基础上拟合得到材料压电常数和电容与温度的关系函数,建立了考虑温度影响的 PZT 材料位移数学模型,为下一步不同环境温度下压电驱动器数学模型的参数修正提供依据,以实现更优的压电驱动器动态位移追踪。

1 试验系统及方法

1.1 多场耦合试验系统

针对 PZT 试件(如图 1 所示,直径为 10 mm,厚度为 2 mm),在现有 PZT 性能参数测试设备的基础上,增加热场加载和测量系统,形成试验所用的 PZT 多场耦合加载试验平台。热场的加载方案是,将 PZT 试件浸泡在硅油中,用电热丝加热硅油,然后再由硅油传热至 PZT 试件。由于硅油传热性、保温性好,避免空气对流产生的温度分布不均,可有效保证温度的均匀性。为准确测量 PZT 试件的温度,采用温度贴片进行温度测量。具体试验平台示意图如图 2 所示,试验装置如图 3 所示。



图 1 PZT 试件样本图

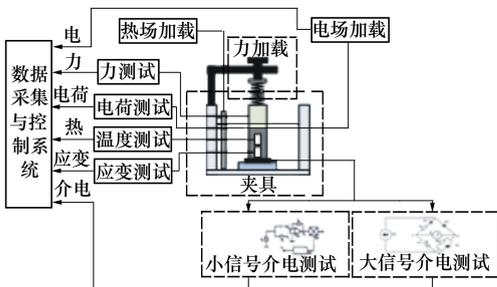


图 2 PZT 多场耦合加载试验平台原理图

1.2 性能测试方法与表征

1.2.1 电容量与介质损耗角正切值测试

电容量、介质损耗角正切值等电参数为压电驱动器的基本参数。电容量对于压电驱动器输出特性具有极大影响,压电驱动器电容量越大时,储能能力



图 3 PZT 多场耦合加载试验装置图

越强,驱动器输出的位移量越大^[11],但是其电容量过大,又会使充放电时间很长,驱动响应速度大幅度减小^[12]。介电损耗角正切值用来描述驱动器有功功率与无功功率的比例关系。

根据 GB3389-2008 中所介绍的压电陶瓷材料的测量方法,利用 Agilent 4263B LCR 电路电桥对 PZT 试件电参数的自由电容量 C_s 、损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 进行测试,测试设备如图 4 所示。



图 4 LCR 测试仪

1.2.2 压电性能测试

压电常数表征了压电陶瓷的电-机耦合能力。其数值增大,说明了耦合能力越强,更有利于它作为驱动器的快速响应。根据经典压电方程,在压电陶瓷的极化方向上作用一个力 T_3 ,则会在陶瓷的电极面上发生电位移

$$D_{33} = d_{33}T_3 \quad (1)$$

式中, d_{33} 为压电常数,角标 2 个数字分别表示电场极化方向和作用力的方向。

试验采用 ZJ-3 型准静态 d_{33} 测试仪进行压电常数 d_{33} 的测试,测试频率为 100 Hz,选取试件不同位置进行多次测试,并取平均值。

1.2.3 电滞回线测试

采用 Sawyer-Tower 回路来测试材料的极化翻转。图 5 是试验系统原理图。将 PZT 试件与标准电容并联,使得二者两端的电荷数保持一致,通过测量电容两端的电压就能够得到 PZT 试件的电荷数。试验中使用电滞回线测量仪 TF Analyzer 1000 测量 PZT 试件的电滞回线,测试频率为 10 Hz,从小到大调节外部电场电压,同时,采用激光干涉仪测量试件的应变,得到应变(S-E)回线。

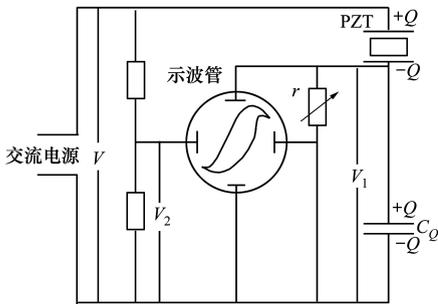


图 5 Sawyer-Tower 测试的原理图

2 试验结果分析

2.1 双极电场下的 PZT 性能随温度的变化

图 6 所示为 PZT 材料在 2 kV/mm 电场下温度

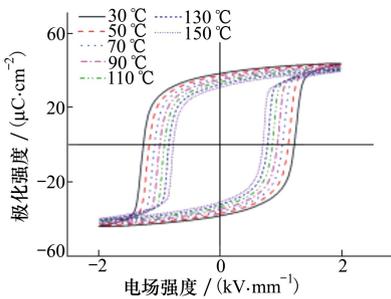


图 6 变温 P-E 回线

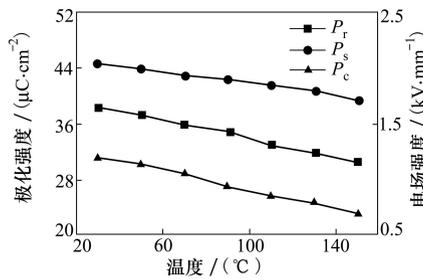


图 7 P_r, P_s 和 E_c 随温度的变化

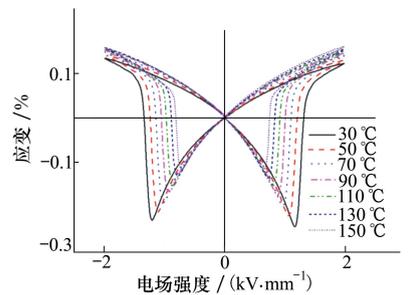


图 8 变温 S-E 回线

从 30°C 升高至 150°C 时的 P-E 曲线。温度为 30°C 时,P-E 回线呈现为典型的方形回线。随着温度的升高,回线逐渐变得细长,同时 P_r, P_s 和 E_c 均下降。如图 7 所示为剩余极化 P_r 、最大极化 P_s 、矫顽场 E_c 随温度的变化。当温度从 30°C 升到 150°C 时, P_r, P_s 和 E_c 分别下降了 20.8%,11.5% 和 41.7%。这表明温度对 P_r 和 E_c 的影响比对 P_s 的影响更为强烈,同时,三者随温度升高呈线性的变化规律。

可通过 PZT 材料电畴的翻转来解释极化随温度变化的现象。随着温度升高,畴的热能下降,且激活能随之降低,畴壁的运动能力增强,因而矫顽场 E_c 下降。与此同时,随着温度升高,畴的翻转和可逆翻转都得到加强^[13],高温条件下可逆翻转的影响更为明显,使得剩余极化 P_r 呈现下降的趋势。此外,温度升高导致电滞回线的包络面积减小,表明畴壁翻转过程消耗能量的降低,也说明了畴壁运动能力的增强。

图 8 给出了不同温度下的双极应变回线(S-E)。与 P-E 回线相对应,在 20 kV/cm 电场下温度从 30°C 至 150°C 过程中,S-E 回线呈现典型的蝶形曲线,与正常铁电体类似,而负应变(即:零场应变与最低应变的差值)随温度的升高而逐渐下降至 0.12%,如图 9 所示。

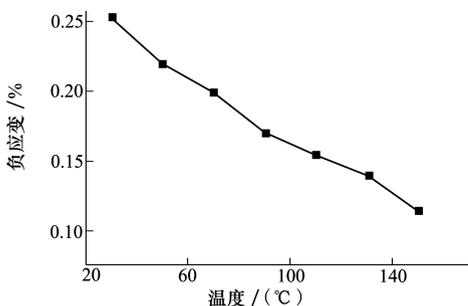


图 9 负应变随温度的变化

2.2 单极电场下的 PZT 性能随温度的变化

由于压电驱动器通常在在单极电场下工作,因此,本文分析了单极电场下电滞回线和应变回线随温度的变化规律,结果如图 10 和图 11 所示。在 20 kV/cm 电场下,随温度升高,剩余极化 P_r 变化较小,最大极化 P_s 增加明显,温度从 30°C 到 150°C, P_s 增加了 40% 左右,最大应变增加了 26%,应变的增强是温度升高带来的畴翻转增强导致的^[13]。

在较高温度下,畴的翻转使得材料压电性能提

升。如图 12 为压电常数 d_{33} 随温度的变化关系, 随温度升高, 材料的压电常数基本呈线性增加的趋势, 当温度从 30℃ 升到 150℃ 时, 压电常数增加了约 26%。但当温度过高时, 材料会发生退极化现

象^[14], 压电常数会急剧下降, 这会严重影响了 PZT 材料在高温环境下的应用。由于本研究中压电陶瓷应用于喷油器中, 环境温度不超过 150℃, 因此未考虑高温条件下材料性能的变化。

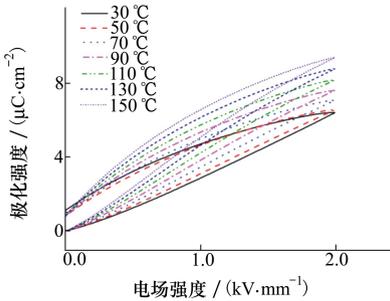


图 10 变温单极 P-E 回线

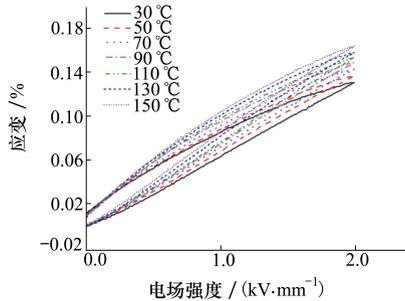


图 11 变温单极 S-E 回线

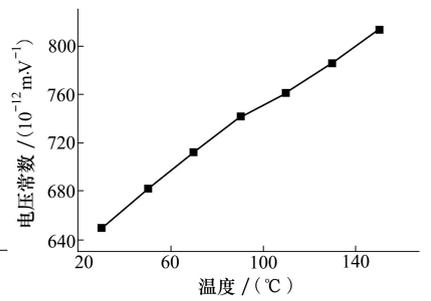


图 12 压电常数随温度的变化

温度会影响到 PZT 材料铁电畴的活性, 在较高温度下, 畴的热能降低并且畴壁激活能也下降, 因而电畴容易翻转, 进一步导致导致压电材料电参数发生变化。研究表明, PZT 材料介电损耗主要是由于电畴翻转引起的^[15]。如图 13 为材料自由电容 C_s 与介电损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 随着温度的变化。随着温度的上升, 自由电容 C_s 值与介电损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 不断增大, 而且, 温度越高, 增幅越大, 这说明了温度升高导致了材料压电性能提升, 但电容的增加也使得充、放电速率降低。

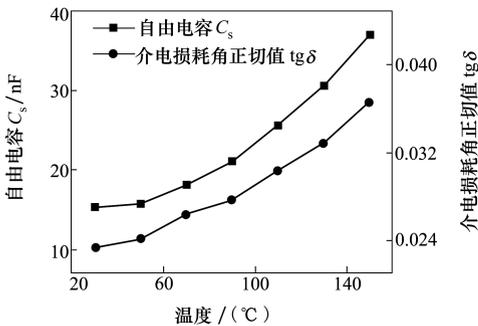


图 13 C_s 和 $\text{tg}\delta$ 随温度的变化

2.3 温度影响下的 PZT 数学模型修正

在试验结果的基础上, 对 PZT 材料的位移数学模型中与温度相关的压电常数和电容进行修正, 得到温度影响下的 PZT 位移模型。由于压电材料的逆压电效应, 在试件电极面施加驱动电压时, 试件就能够进行位移和力的输出。根据经典压电方程, 当 PZT 材料通电时, 得到

$$\begin{cases} D_3 = \epsilon_{33}E_3 + d_{33}T_3 \\ S_3 = d_{33}E_3 + \frac{1}{Y_{33}}T_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, 角标 2 个数字分别表示电场极化方向和作用力的方向; S_3 为压电陶瓷片产生的应变; T_3 为应力; E_3 为电场强度; ϵ_{33} 为压电陶瓷介电常数; d_{33} 为压电常数; Y_{33} 为压电陶瓷弹性模量; D_3 为陶瓷片的电位移, $D_3 = q/nA$, 其中, q 为 PZT 试件的总电荷, 由(2)式可得到

$$q = nA\epsilon_{33}E_3 + nAd_{33}T_3 = nA\epsilon_{33}\frac{v}{d} + nAd_{33}T_3 \quad (3)$$

式中, v 为压电陶瓷两端施加电压, d 为样品厚度, A 为陶瓷片电极面的面积。

根据下式计算材料的介电常数

$$\epsilon_{33} = C_s d / A \quad (4)$$

式中, C_s 为陶瓷片的等效电容。因此, PZT 试件总电荷数为

$$q = nC_s v + nAd_{33}T_3 \quad (5)$$

由(2)式和(5)式得到

$$S_3 = \frac{1}{nA} \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}} q + (1 - k^2) \frac{1}{Y_{33}} T_3 \quad (6)$$

即

$$T_3 = \frac{Y_{33}}{1 - k^2} \left(S_3 - \frac{1}{nA} \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}} q \right) \quad (7)$$

式中, k^2 为机电耦合系数, 通过下式计算

$$k^2 = Y_{33} d_{33}^2 / \epsilon_{33} \quad (8)$$

由 PZT 材料位移产生的应变 S_3 为

$$S_3 = K_1 x \quad (9)$$

式中, $K_1 = 1/nd$ 。由应力产生的力 F_a

$$F_a = AT_3 \quad (10)$$

基于 Matlab/Simulink 软件对数学模型求解,对计算方程进行模块化和参数设置,得到压电陶瓷位移特性数学模型如图 14 所示。

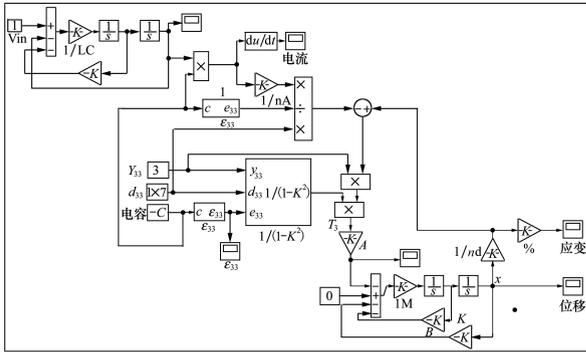


图 14 PZT 材料位移特性数学模型

在前文的研究中,压电常数 d_{33} 随温度升高呈现线性的变化,基于图 12 试验结果,拟合得到压电常数 d_{33} 与温度的线性关系式

$$d_{33} = 1.34T + 614 \quad (11)$$

由图 13 可知,材料的电容和温度呈现出类似于抛物线的关系,因此假设电容与温度的函数表达式是

$$C_s = aT^5 + bT^4 + cT^3 + eT^2 + fT + g \quad (12)$$

式中, a, b, c, e, f, g 为函数辨识参数。基于试验结果拟合的方法得到 a, b, c, e, f, g , 因此,电容的关系式为

$$C_s = 0.001 4T^2 - 0.062 4T + 15.744 \quad (13)$$

将考虑温度影响的 PZT 材料压电常数 d_{33} 与电容 C_s 的公式(11)与(13)代入压电方程,可得到考虑温度影响的 PZT 试件位移数学模型,图 15 所示为不同温度 2 kV/mm 强电场下压电材料应变量的计算值与试验值对比,表明数学模型能够较好地反映出温度对材料位移特性的影响,为下一步建立压电驱动器热-电-力耦合的非线性迟滞数学模型提供依据。

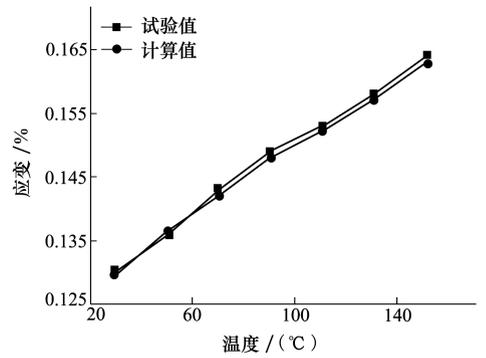


图 15 不同温度下 PZT 应变量的计算值与试验值对比

3 结论

- 1) 双极强电场下,温度在 30℃ 时,压电陶瓷 P-E 回线为典型的方形回线,类似正常铁电体。随着温度的升高,回线逐渐变得细长,同时 P_r, P_s 和 E_c 均下降,且温度对 P_r 和 E_c 的影响比对 P_s 的影响更为强烈,与 P-E 回线相对应,S-E 回线呈现典型的蝶形曲线,而负应变随温度的升高而逐渐下降至 0.12%。
- 2) 在单极工作电场下,随温度升高,剩余极化 P_r 变化较小,最大极化 P_s 升高明显,温度从 30℃ 到 150℃, P_s 增加了 40% 左右,最大应变增加了 30%; 材料的压电常数基本呈线性增加的趋势,当温度从 30℃ 升到 150℃ 时,压电常数增加了约 26%。
- 3) 随温度升高,自由电容 C_s 值与介电损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 不断增大,而且,温度越高,增幅越大,表明了压电性能的提升和充、放电速率的降低。
- 4) 建立了 PZT 材料位移数学模型,对模型中受温度影响的材料压电常数 d_{33} 与电容 C_s 进行修正,并验证了模型的准确性,为下一步压电驱动器热-电-力耦合的非线性迟滞数学模型中关于温度的参数修正提供数据支撑。

参考文献:

[1] SUH H K, PARK S W, LEE C S. Effect of Piezo-Driven Injection System on the Macroscopic and Microscopic Atomization Characteristics of Diesel Fuel Spray[J]. Fuel, 2007, 86: 2833-2845

[2] WENDELIN K, CHRISTIAN B, GRIT K, et al. New Piezo Injection System for Increased Efficiency of Diesel Engines[J]. MTZ Worldwide, 2016, 77(10):46-49

[3] JINSU K, JUWAN K, SEOKCHEOL J, et al. Effects of Different Piezo-Acting Mechanism on Two-Stage Fuel Injection and CI

- Combustion in a CRDi Engine[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(12): 5727-5737
- [4] ZHENG J, TAKAHASHI S, YOSHIKAWA S, et al. Heat Generation in Multilayer Piezoelectric Actuators[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 79(12): 3193-3198
- [5] RAUL Payri, JAIME Gimeno, CARMEN Mata, et al. Rate of Injection Measurements of a Direct-Acting Piezoelectric Injector for Different Operating Temperatures[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 154: 387-393
- [6] 孟育博, 张幽彤, 王志明, 等. 压电喷油器压电执行器热-电-机械耦合迟滞特性的试验研究[J]. *吉林大学学报*, 2018, 48(2): 480-485
MENG Yubo, ZHANG Youtong, WANG Zhiming, et al. Experimental Investigation of Coupled Hysteretic Thermo-Electro-Mechanical of Piezoelectric Actuators for Fuel Injector[J]. *Journal of Jilin University*, 2018, 48(2): 480-485 (in Chinese)
- [7] ALTIERI L, TONOLI A. Piezoelectric Injectors for Automotive Applications: Modeling and Experimental Validation of Hysteretic Behavior and Temperature Effects[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control*, 2012, 135: 11005
- [8] LI F X, RAJAPAKSE R, MUMFORD D, et al. Quasi-Static Thermo-Electro-Mechanical Behavior of Piezoelectric Stack Actuators[J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17: 015049
- [9] 杜刚. 压电陶瓷在变温强场下铁电畴翻转的研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2013
DU Gang. Temperature and Field Dependence of the Ferroelectric Domain Reversal Behaviors in Piezoelectric Ceramics[D]. Shanghai, University of Chinese Academy of Sciences, 2013 (in Chinese)
- [10] 王永晔, 杨德清, 汪跃群. 电滞回线在压电材料研究中的应用[J]. *声学与电子工程*, 2007(2): 33-37
WANG Yongye, YANG Deqing, WANG Yuequn. Application of Hysteresis Loop in Piezoelectric Materials Research[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2007(2): 33-37 (in Chinese)
- [11] RAUL P, JAIME G, CARMEN M, et al. Rate of Injection Measurements of a Direct-Acting Piezoelectric Injector for Different Operating Temperatures[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 154: 387-393
- [12] BYOUNGGUL O, SEUNGSUK O, KANGYOON L, et al. Development of an Injector Driver for Piezo-Actuated Common Rail Injectors[C]//14th Asia Pacific Automotive Engineering Conference, Hollywood, California, USA, 2007: 28117-28126
- [13] JAFFE B, GOOK W R, JAFFE H. *Piezoelectric Ceramic*[M]. London, Academic, 1971
- [14] 孟育博. 压电喷油器压电执行器特性分析与优化设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2018
MENG Yubo. Characteristics Analysis and Optimization Design of Piezoelectric Actuator for Piezoelectric Fuel Injector[D]. Jinan, Shandong University, 2018 (in Chinese)
- [15] UCHION K, HIROSE S. Loss Mechanisms in Piezoelectrics: How to Measure Different Losses Separately[J]. *IEEE Trans on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2002, 48(1): 307-321

Study on Temperature Characteristics of Ceramic Materials for Piezoelectric Actuators and Model Modification

LIU Nan¹, LIU Zhenming¹, GONG Xinrui¹, HUANG Xinyuan¹, XIONG Chunyou²

(1.College of Power Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2.Department of Engineering Technology and Application, Army Infantry College of PLA, Nanchang 330100, China)

Abstract: The performance of piezoelectric actuator ceramics under strong electric field(20 kV/cm) and variable temperature (30~150 °C) were tested on a piezoelectric ceramic thermo-electro-mechanical multi-field loading test bench. The variation of hysteresis loop, strain loop, free capacitor and dielectric loss tangent with temperature was analyzed. A mathematical model of displacement characteristics of ceramic materials considering temperature effect is established, and the accuracy of the model is verified. The results show that the hysteresis loops become slender with the increasing of temperature, while the residual polarization, maximum polarization and coercive field decrease. The effect of the temperature on the residual polarization and coercive field is stronger than that on maximum polarization. The strain loop presents a typical butterfly curve, and the negative strain decreases gradually to 0.12% with the increasing of temperature. In the unipolar electric field, the residual polarization varies slightly with the increasing of temperature, and the maximum polarization increases about 40%. The piezoelectric constant of the material increases linearly. The free capacitor and dielectric loss tangent increases continuously. The higher the temperature, the greater the increase.

Keywords: diesel engine; piezo ceramic; hysteresis loop; strain loop; mathematical model