

文章编号:1671-8879(2019)01-0053-08

夹层式压电换能器开路电压影响因素

曹阳森¹, 沙爱民^{1,2}, 蔡若楠¹, 刘状壮¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室 710064)

摘要:为探明压电换能器开路电压随各影响因素的变化规律,从而为提高压电路面能量收集效果提供理论依据,采用压电陶瓷晶片 PZT-5H 及聚氨酯基板制备了夹层式压电换能器。通过室内振动加载试验,研究压电换能器开路电压在不同荷载水平、荷载频率、压电陶瓷晶片并联数量下的变化规律。在此基础上,制备了小尺寸压电路面结构模型,并通过移动加载试验分析面层类型和面层温度对埋置在结构内部的压电换能器开路电压的影响。结果表明:开路电压与荷载水平和荷载频率正相关,但开路电压增长速度随荷载水平和荷载频率的提高逐渐变缓,荷载水平直接影响压电陶瓷晶片应力大小,当施加荷载为 5 kN,加载频率为 4 Hz 时,压电换能器开路电压稳定在 9.44 V;开路电压随压电换能器中压电陶瓷晶片并联个数增加而减小,压电陶瓷晶片个数增加,单个压电陶瓷晶片承受荷载变小,当并联个数由 1 个增加到 3 个时,开路电压下降了 26.6%;不同类型的沥青混合料力学性能不同,AC-13 面层下开路电压较 AC-10 和 OGFC-13 大,AC-13 面层与压电换能器匹配效果较好;温度不仅影响沥青混合料的结构性能还影响压电陶瓷晶片工作性能,温度升高,沥青混合料结构性能变差,压电陶瓷晶片工作性能降低,开路电压降低。

关键词:道路工程;压电换能器;荷载试验;开路电压

中图分类号:U414.1 **文献标志码:**A

Influence factors of open-circuit voltage on sandwich piezoelectric transducer

CAO Yang-sen¹, SHA Ai-min^{1,2}, CAI Ruo-nan¹, LIU Zhuang-zhuang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to determine the variation rule of the open-circuit voltage of piezoelectric transducers with various influence factors, and to provide a theoretical basis for improving the effect of energy collection of piezoelectric pavement, sandwich piezoelectric transducers were fabricated by using PZT-5H piezoelectric ceramic wafers and polyurethane boards. By means of laboratory vibration loading tests, the variation in the open-circuit voltage of piezoelectric transducers under different loads, load frequencies, and parallel number of piezoelectric ceramic wafers were studied. On this basis, small-size piezoelectric pavement structure models were prepared, and the influence of surface type and surface temperature on the open-circuit voltage of the piezoelectric transducer embedded in the structure was analyzed by the moving loading test. The results show that the open-circuit voltage is positively correlated with the load and load

收稿日期:2018-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB16006300)

作者简介:曹阳森(1993-),男,河北保定人,E-mail:yscao@chd.edu.cn.

通讯作者:沙爱民(1964-),男,安徽宣城人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:ams@chd.edu.cn.

frequency, but the growth rate of the open-circuit voltage gradually decreases with an increase in the load and load frequency. The load directly affects the stress of the piezoelectric ceramic wafer. When the applied load is 5 kN and the loading frequency is 4 Hz, the open-circuit voltage of piezoelectric transducer is stable at 9.44 V. The open-circuit voltage decreases with an increase in the number of parallel piezoelectric ceramic wafers in the piezoelectric transducer. The number of piezoelectric ceramic wafers increases, and the load of a single piezoelectric ceramic wafer decreases. When the number increases from 1 to 3, the open-circuit voltage drops by 26.6%. Different types of asphalt mixtures have different mechanical properties. The open-circuit voltage under the AC-13 surface layer is higher than that under the AC-10 and OGFC-13 surface layer, and the matching effect between the AC-13 surface layer and the piezoelectric transducer is better. Temperature affects not only the structure performance of the asphalt mixture but also the performance of the piezoelectric ceramic wafer. With an increase in temperature, the structural performance of the asphalt mixture worsens, the working performance of the piezoelectric ceramic wafer decreases, and the open-circuit voltage decreases. 2 tabs, 9 figs, 22 refs.

Key words: road engineering; piezoelectric transducer; loading test; open-circuit voltage

0 引言

作为功能型路面,压电路面在承担交通功能的同时,可将道路环境中的振动能量转化为电能。将这部分潜在的能量收集并转化,既可缓解能源需求紧张的局面,又能减少化石能源开发对环境造成的污染^[1-4]。压电换能器的性能直接影响着压电路面的能量收集效果^[5]。开路电压是压电换能器能量收集效果的宏观体现,开路电压越大,压电换能器转化的振动能量越多,开展开路电压影响因素的研究对压电路面的发展有重要作用。

压电陶瓷晶片作为换能元件已有 50 年之久^[6]。近年来,压电陶瓷晶片开始被应用于道路能量收集领域,国内外对压电路面的研究已取得不少成果。采用 PZT-5H 为压电相,以沥青为基体,可以制备出路用 PZT/沥青压电复合材料^[7]。通过对比堆栈式(Multilayer)、桥式(Bridge)、拱式(THUNDER)、铍式(Cymbal)、月牙式(Moonie)和纤维复合式(MFC)等 6 种压电换能器的换能效率和输出能量,发现桥式和铍式压电换能器适于沥青混凝土路面能量收集^[8]。Zhao 等通过有限元软件优化了铍式压电换能器的结构尺寸,铍式压电换能器能量输出虽高,但在铍形端帽与压电陶瓷晶片接触区易产生应力集中,导致压电材料产生脆性断裂^[9]。堆栈式压电换能器能量输出较大,重载交通下由 63 片压电陶瓷晶片组成的 X-A×3 型压电换能器能量输出为 1.8 W^[10]。1 个包含 48 个压电悬臂单元的能量采

集器,在交通量为 600 veh/h 条件下能量输出可达 736 mW^[11]。堆栈式和悬臂式换能器能量收集效果较为显著,但其组成单元过多,工艺复杂。压电换能器保护措施不仅提高压电陶瓷晶片的耐久性,还可提高压电换能器的压电性能,研究表明,刚性铜片与柔性橡胶垫组合结构具有较优的保护效果^[12]。将聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜应用于道路环境,利用材料的压电热释电效应可同时对振动能和热能进行收集,研究表明,压电效应和热释电效应无交互作用,压电热释电效应收集的能量与 2 种效应单一作用时收集的能量之和相同^[13]。Chen 等基于轮载试验的归一化能量收集效率模型指出了压电元件尺寸及埋设位置对能量收集效果的影响规律;通过傅里叶变换得到解析机电模型,描述了基于双层弹性梁模型下混凝土路面厚度、地基干湿类型对压电换能器输出电能的影响^[14-15]。Guo 等提出了一种由沥青混合料、导电沥青混合料、压电换能器组成的新型道路能量收集系统,建立的三自由度机电耦合模型表明,低模量导电沥青混凝土可提高压电能量收集效果^[16]。

上述成果分别在材料、结构、模型等方面对压电路面进行了研究,一定程度上推进了压电路面技术的发展,但对压电换能器在不同荷载工况下能量输出规律的研究尚不充分,未考虑压电换能器中压电陶瓷晶片个数对其能量输出影响,同时忽略了作为压电换能器载体的沥青混合料对压电换能器能量输出影响。因此,本文在研究荷载工况对压电换能器

能量输出的影响的基础上,进一步探索了并联个数、面层类型和面层温度对其影响。

压电换能器通过外接电路可将收集的电能供负载使用。若外接电路负载保持不变,压电换能器能量输出与开路电压存在平方关系。本文试图通过观察开路电压随各影响因素变化情况,剖析产生变化的本质,以期为提高压电能量输出提供参考。

1 压电效应

压电材料存在正压电效应和逆压电效应^[17],根据 2 种效应,压电材料的压电方程如下

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \epsilon_{mk}^T E_k \quad (2)$$

式中: i, j 分别为压电陶瓷晶片的 6 个受力方向, i, j 取 1~6; m, k 分别为压电陶瓷晶片 3 个轴向方向, $m, k=1, 2, 3$; S_i 为应变张量; T_i, T_j 均为应力张量; s_{ij}^E 为压电材料柔度系数张量; E_k, E_m 均为外电场张量; D_m 为电位移张量; d_{mi} 为压电应变常数张量; ϵ_{mk}^T 为介电常数张量。

当行车荷载作用于压电换能器时,压电换能器产生应变,表面产生异号电荷,将车辆行驶中的部分机械能转化为电能。正压电效应有 2 种模式:①压电材料极化方向与机械振动方向一致的 3-3 模式;②电压陶瓷极化方向与机械振动方向垂直的 3-1 模式。有研究表明 3-3 模式较 3-1 模式在道路能量收集方面更有效^[18-19]。当式(2)中 E_k 为 0 时,压电陶瓷晶片应力响应为 T_i ,其正压电效应矩阵的表达式为

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

表 1 PZT-5H 性能参数

Tab. 1 Performance parameters of PZT-5H

参数	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\epsilon_{33}^T/(10^{-8} \text{C} \cdot \text{m}^{-1})$	$d_{31}/(10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$d_{33}/(10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$d_{15}/(10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1})$
参数值	7 500	3.98	186	670	660
参数	$s_{11}/(10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$s_{12}/(10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$s_{13}/(10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$s_{33}/(10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$s_{44}/(10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$
参数值	16.23	-10.87	-1.87	7.86	23.7

表 2 混合料级配

Tab. 2 Mixture gradation

面层类型	不同筛孔尺寸(mm)的通过率						矿粉掺量	油石比掺量
	(0, 1.18)	[1.18, 2.36)	[2.36, 4.75)	[4.75, 9.5)	[9.5, 13.2)	[13.2, 16)		
OGFC-13	10.9	2.3	6.1	56.2	20.0	3.5	3	4.9
AC-13	25.0	8.0	13.0	29.0	19.0	6.0	3	5.0
AC-10	26.0	9.0	14.0	48.5	2.5		3	5.7

2.2 压电换能器封装制作

Bridge 和 Cymbal 常用于道路能量收集,然而 2

$$[T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6]^T \quad (3)$$

式中: D_1, D_2, D_3 分别为 1、2、3 方向的电位移,在数值上等于极化表面的电荷密度。

对于较薄的压电材料,其电位移主要是 3 方向的电位移,1 和 2 方向的电位移可忽略,因此式(2)可简化为

$$D_3 = d_{33} T_3 \quad (4)$$

此时,极化表面的电荷量可采用下式计算

$$Q_3 = D_3 A \quad (5)$$

式中: Q_3 为压电陶瓷晶片极化表面电荷量; A 为压电陶瓷晶片沿极化方向的投影面积。

因此,压电陶瓷晶片的开路电压 U 可采用下式计算

$$U = \frac{Q_3}{C} = \frac{d_{33} T_3 t}{\epsilon_0 \epsilon_r^T} \quad (6)$$

式中: C 为压电陶瓷晶片电容; t 为压电材料厚度; ϵ_0 为介电常数; ϵ_r^T 为相对介电常数。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

压电应变常数张量 d 和压电电压常数张量 g 是影响压电能量收集的 2 个重要参数^[20-21],在选择压电陶瓷晶片时,优先选择具有较高的压电应变常数张量 d 和压电电压常数张量 g 的压电材料。PZT-5H 压电应变常数张量 d 和压电电压常数张量 g 明显高于其他 PZT 材料。因此,本文选用 PZT-5H 为压电材料,表 1 为 PZT-5H 的部分性能参数,其中 ρ 为材料密度。试验集料为玄武岩,沥青为基质 90[#]。制备的 3 种沥青混合料级配见表 2。

种结构通常在金属帽与压电陶瓷晶片黏结处产生应力集中,不利于换能器的长期使用^[22]。因此,为避

免压电陶瓷晶片与保护措施的刚性接触,本文试验中将压电陶瓷晶片封装在2层聚氨酯板内部,以聚氨酯板作为保护措施制备了压电换能器。

图1为压电换能器结构模型。核心部件压电陶瓷晶片尺寸为30 mm(长)×40 mm(宽)×0.5 mm(厚),压电陶瓷晶片负极材料为黄铜薄板,尺寸略大于压电陶瓷晶片,材料厚度为0.2 mm。压电换能器基板和顶板材料均为聚氨酯,基板尺寸为300 mm(长)×300 mm(宽)×18 mm(厚)。上层聚氨酯顶板可以保护压电材料,下层聚氨酯基板在保护压电材料的同时又能增加压电换能器的变形空间。其制备过程如下所述。

(1)表面预处理。用砂纸打磨黄铜电极焊接区域,使表面粗糙便于焊接;用丙酮溶液擦拭压电陶瓷晶片极面和黄铜电极,清除表面污渍。

(2)导线焊接。为防止局部压电陶瓷晶片在焊接过程中因高温引起的退极化,选用低熔点焊丝;焊点表面应平滑,厚度均匀,防止尖锐焊点破坏压电陶瓷晶片。

(3)绝缘处理。在压电陶瓷晶片和黄铜电极表面均匀涂覆绝缘胶,防止环境水分进入电极板。

(4)基板安装。将黄铜电极板粘贴在下层聚氨酯基板,待粘贴牢固后封装上层聚氨酯盖板,防止压电陶瓷晶片与集料直接接触。

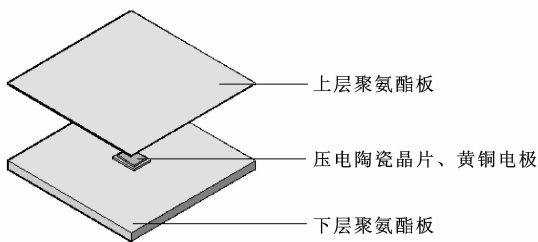


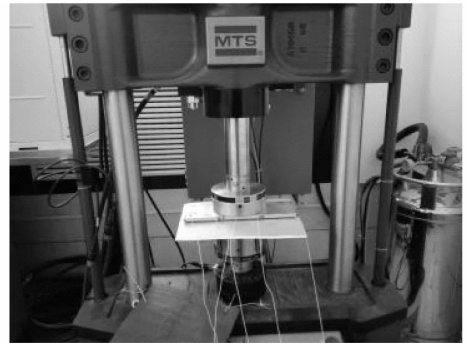
图1 夹层式压电换能器结构模型

Fig.1 Structural model of sandwich piezoelectric transducer

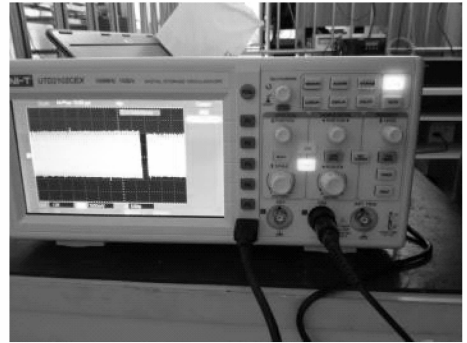
2.3 试验方案

通过振动荷载试验,研究压电换能器开路电压在不同荷载水平、荷载频率、压电陶瓷晶片并联个数下的变化规律,加载设备为MTS Landmark(MTS 810)。进一步通过移动荷载试验研究面层类型和面层温度对压电换能器开路电压的影响,加载设备为沥青混合料车辙试验机(HLR-2)。图2、图3分别为振动加载试验和移动加载试验,各试验方案如下所述。

(1)荷载 P 影响。设置5个荷载水平,分别为3、3.5、4、4.5、5 kN;用含单个压电陶瓷晶片的压电



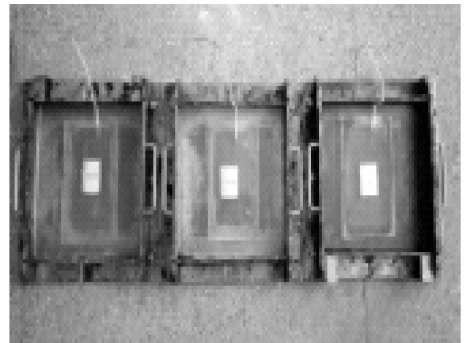
(a) 振动加载



(b) 数据采集

图2 振动加载试验

Fig.2 Vibration loading test



(a) 试件制备



(b) 移动加载

图3 移动加载试验

Fig.3 Moving loading test

换能器研究荷载水平对开路电压的影响。

(2)频率 f 影响。车速对压电换能器开路电压的影响可等效为加载频率对开路电压的影响,车速

越快,前后轴通过压电换能器的时间越短,加载频率越快。设置 5 个频率等级,分别为 2、4、6、8、10 Hz,用含单个压电陶瓷晶片的压电换能器研究荷载频率对开路电压的影响。

(3) 并联个数影响。在压电换能器中,分别设置 3 种压电陶瓷晶片(1、2、3 个)并联,并对 3 种压电换能器进行加载,研究 1 kN 荷载作用下其并联个数对开路电压的影响。

(4) 面层类型影响。为了模拟路面混合料类型的影响,选择 3 种混合料类型,分别为 AC-10、AC-13 和 OGFC-13,制作车辙板试件(长、宽、高分别为 30、30、5 cm);车辙板试件结构为 1.8 cm 聚氨酯底板+PZT 压电陶瓷晶片+0.2 cm 聚氨酯顶板+3 cm 沥青混凝土层。

(5) 面层温度影响。沥青路面温度分别设定为 20 °C、30 °C、40 °C、50 °C,压电陶瓷晶片在标准轴载下进行加载试验,研究面层温度对换能器开路电压的影响。

3 结果与分析

3.1 荷载水平对开路电压的影响

以含单个压电陶瓷晶片的压电换能器为试验材料,设置 5 个荷载等级研究开路电压在不同轴载下的响应规律。将 6 个压电陶瓷晶片并排布置,可模拟单轴双轮式轴载,范围为 72~120 kN。用示波器测量压电换能器开路电压,图 4 为不同荷载下的压电换能器开路电压测试结果,其中,开路电压峰峰值是开路电压幅值的 2 倍。

由图 4 可知:开路电压随着荷载水平的增加而增加,当荷载频率为 4 Hz 时,开路电压随荷载水平基本呈直线增加,荷载从 3 增长到 5 kN 时,开路电压从 3.52 增到 9.44 V;随着荷载水平增加,压电换能器中压电陶瓷晶片应力增加,其两端电荷量也增加,进而使得开路电压增加。开路电压随荷载变化趋势与理论相同。理论分析中,压电陶瓷晶片两端电压与荷载水平成正比,比例系数是与陶瓷材料参数相关的常数,然而实测开路电压的增长速度大于施加荷载的增长速度,如开路电压从 3.52 增到 9.44 V,开路电压增加了 168%,但荷载只增加了 67%。分析原因是荷载的增长使压电换能器与聚氨酯底板接触更紧密,荷载传递效果越好。荷载增大,压电换能器开路电压增长变缓,部分曲线在 4.5 kN 时变缓明显。压电陶瓷晶片存在应力疲劳现象,设计压电换能器时应明确压电陶瓷晶片自身属性,重

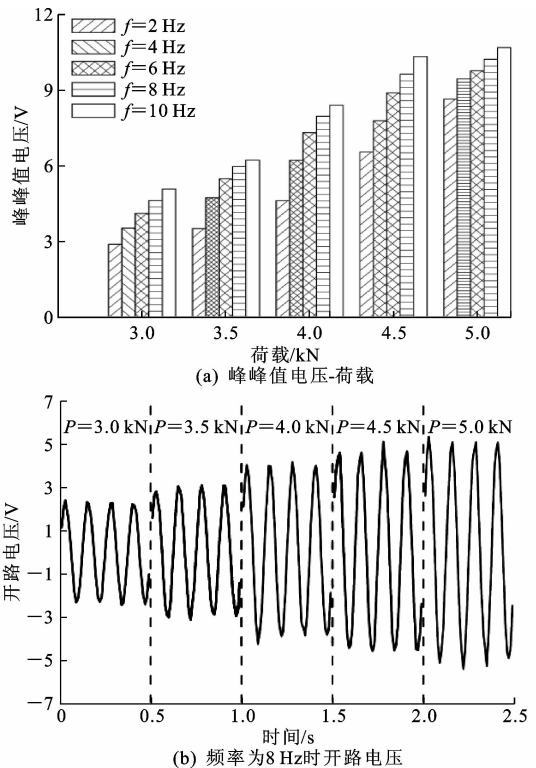


图 4 不同荷载下开路电压

Fig. 4 Open-circuit voltage under different loads

载交通路段可增加压电换能效果,但超重轴载一方面使得压电效果增加不明显,另一方面使得压电材料失效概率增大。为提高压电换能器能量收集效率,应合理选择铺设路段,若将 6 个压电陶瓷晶片封装制成压电换能器,则其较优轴载为 108 kN,略大于标准轴载 BZZ-100。

3.2 荷载频率对开路电压的影响

车速对压电换能器开路电压的影响,可以等效为加载频率对开路电压的影响。加载时间为汽车前轴与后轴分别经过压电换能器的时间间隔,车速增加意味着加载频率变快。以轴距 3 m 为例,当行驶速度 80 km/h,车辆前后轴荷载作用频率为 7.4 Hz。本文试验设置 5 个加载频率 2、4、6、8、10 Hz,分别对应行驶速度 22、43、65、86、108 km/h。

图 5 为不同加载频率下开路电压变化情况。开路电压随加载频率增加而增加,当荷载为 3 kN,荷载频率从 2 增加到 10 Hz 时,开路电压从 2.88 增加到 5.07 V。MTS 加载压头对压电换能器施加荷载是瞬时的,应力周期短,与实际行车荷载加载方式相近,即车速增加,行车荷载对路面的冲击系数增加。荷载频率增加,MTS 加载压头对压电换能器冲击系数增加,导致压电换能器表面应力增加,进而开路电压增加。

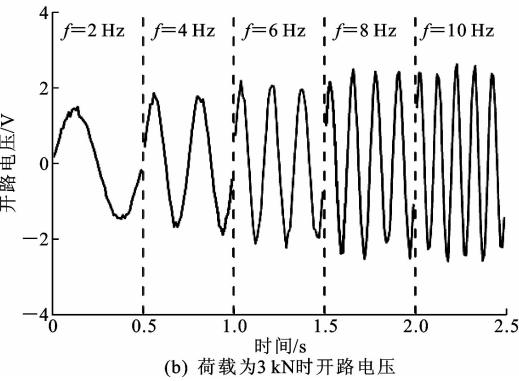
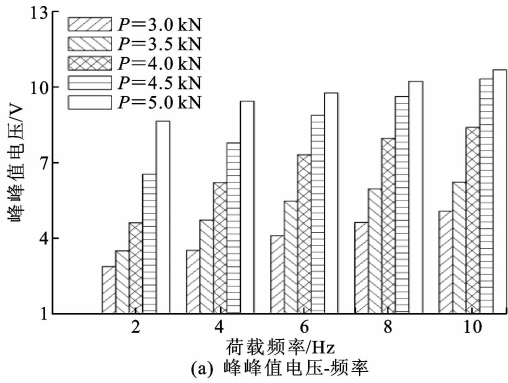


图5 不同频率下开路电压

Fig. 5 Open-circuit voltage at different frequencies

此外,压电陶瓷晶片的介电性质由材料极化引起,即某些偶极子定向排列。在加载卸载的过程中,压电材料的内部电场方向随荷载的变化不断改变,导致偶极子也随即反转。由于材料内部存在阻力,外荷载施加频率加快,压电材料内部电场反转也加快,偶极子反转速度跟不上电场反转速度,介质材料产生损耗,介电常数降低,开路电压增加。因此,为提高压电路面的能量转化,将压电换能器布设在高速路段优于低速路段(如城市道路和收费站进出口)。不同类型的车辆轴距不同,重载车辆轴距偏大,荷载频率较低,若以提升车速的方式增加压电能量输出效果有限,可减小压电换能器间距以提高换能效果。

3.3 压电陶瓷晶片并联个数对开路电压的影响

$n(n=ab, a、b$ 分别为压电陶瓷晶片列数和排数)个压电陶瓷晶片矩阵式排列,如图6所示。在轴向力 F 作用下,并联连接状态下单个压电陶瓷晶片极面电荷为 $d_{33}F/n$,单个压电陶瓷晶片等效电容为 $\epsilon_0\epsilon_r^T A/t$,由式(7)、式(8)可得单个压电陶瓷晶片开路电压 U 和转化电能 E 。 n 个压电陶瓷晶片并联总的储能 E_n 可采用下式计算

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{dFt}{n\epsilon_0\epsilon_r^T A} \quad (7)$$

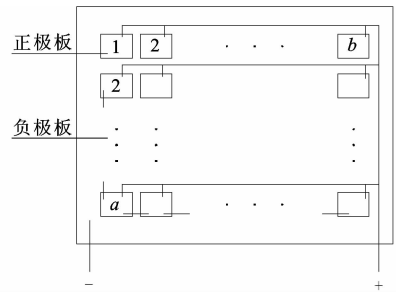


图6 n 个压电陶瓷晶片并联

Fig. 6 n piezoelectric ceramic wafers in parallel

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{d_{33}^2 F^2 t}{2n^2 \epsilon_0 \epsilon_r^T A} \quad (8)$$

$$E_n = \frac{nQ^2}{2C} = \frac{d_{33}^2 F^2 t}{2n\epsilon_0 \epsilon_r^T A} \quad (9)$$

为研究并联个数对开路电压的影响,取压电陶瓷晶片并联个数分别为1、2、3的压电换能器,控制荷载维持1 kN时,所测压电换能器开路电压如图7所示。

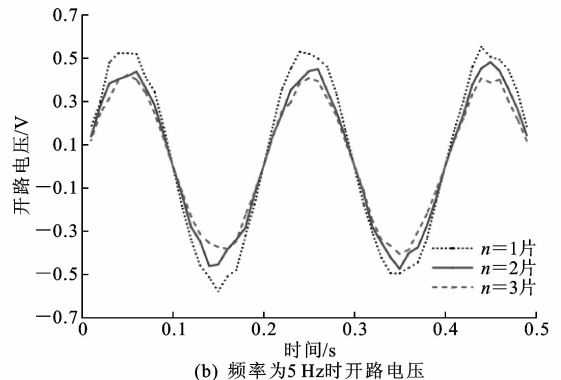
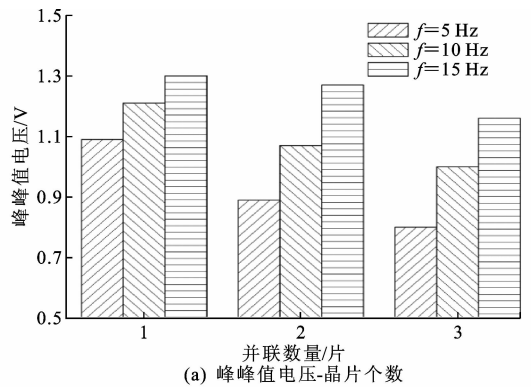


图7 不同压电陶瓷晶片个数下开路电压

Fig. 7 Open-circuit voltage under different piezoelectric ceramics

随着压电陶瓷晶片并联个数的增多,开路电压逐渐减小。在5 Hz时,2个压电陶瓷晶片并联开路电压为0.89 V,为单个压电陶瓷晶片开路电压的81.7%,3个压电陶瓷晶片并联时的开路电压比单个时下降了26.6%。理论上,压电陶瓷晶片并联等于单个压电陶瓷晶片时的开路电压。单个压电换能

器开路电压随压电陶瓷晶片并联个数增多而减小,并联个数越多,单个压电陶瓷晶片承受荷载越小。由式(9)可得,压电陶瓷晶片并联个数的增多使压电换能器能量转换效果降低。在对压电换能器中压电陶瓷晶片个数进行设计时,堆栈式压电换能器中压电陶瓷晶片排列数量在满足承载要求的情况下,压电陶瓷晶片个数越少,压电换能器换能效果越明显,成本越低。

3.4 面层类型对开路电压的影响

为进一步研究压电换能器在路面结构内部的压电响应,制备 AC-13、AC-10 和 OGFC-13 三种面层类型车辙板试件。将 300 mm(长)×300 mm(宽)×20 mm(高)的压电换能器置于 3 cm 厚车辙板下方,在标准轴载下对组合结构进行碾压,模拟 3 cm 面层下的压电输出。

不同面层下的开路电压如图 8 所示。由图 8 可知,压电换能器在 AC-13 面层下开路电压最大,其次是 OGFC-13,在 AC-10 面层下的开路电压最小。根据连续密级配原理设计的 AC-10 和 AC-13 是典型的悬浮密实结构。不同的是,前者的公称粒径比后者小,而细集料的含量远大于后者。在荷载传递方面,粗集料比细集料更有优势。因此,AC-13 面层下的开路电压大于 AC-10 面层下的开路电压。OGFC-13 是一种典型的按连续开级配设计的骨架结构,这种沥青混合料的粗集料相互接触,彼此嵌锁和挤压,细集料较少,不足以填充骨架之间的空隙。AC-13 与 OGFC-13 相比,虽然其最大公称粒径相同,但大空隙率的沥青混合料与压电换能器接触面积小,应力传递不充分,AC-13 面层下压电陶瓷晶片受力大于 OGFC-13。因此,AC-13 面层下的开路电压大于 OGFC-13 面层下的开路电压。不同沥青混合料类型传力性能不同,对于埋入式压电换能器而言,传力性能优越的面层类型有利于提高压电能量收集效果。

3.5 面层温度对开路电压的影响

如图 9 所示,压电换能器的开路电压随温度升高而降低。温度 T 从 20 °C 升至 50 °C 时,AC-10 面层下压电换能器开路电压降低了 17%,AC-13 面层降低 12.1%,OGFC-13 面层降低了 15.3%。沥青混合料是温敏性材料,温度升高,沥青的黏度降低,沥青混合料的结构强度也降低。沥青混合料的传力性能受结构强度的影响,结构强度降低,传力性能变差。另外,压电材料工作性能受温度影响,温度升高,工作性能变差,介电常数升高,当温度高于居里

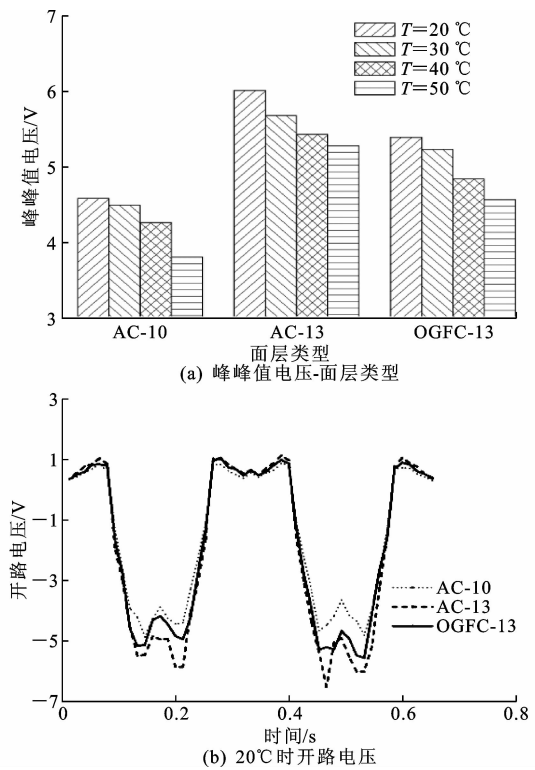


图 8 不同面层下开路电压

Fig. 8 Open-circuit voltage under different pavement types

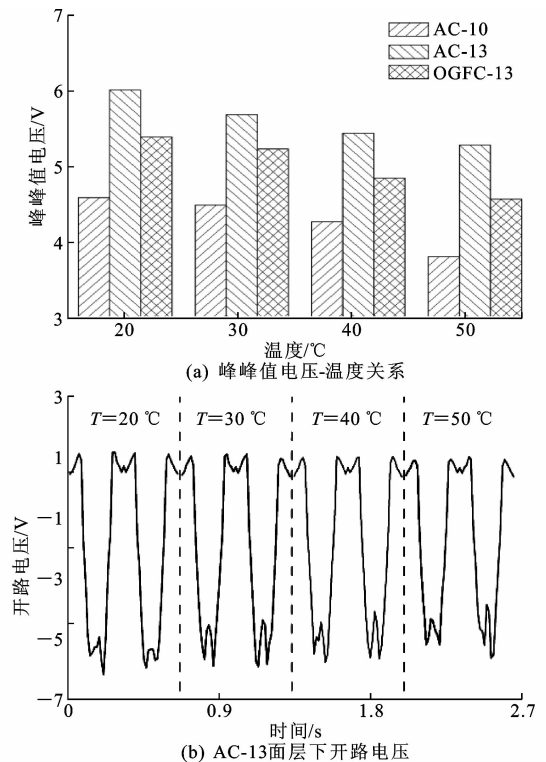


图 9 不同温度下开路电压

Fig. 9 Open-circuit voltage at different temperatures

温度时,压电材料失去压电效应。温度升高,压电换能器受力减小,同时介电常数增加,导致开路电压减

小,压电换能器的能量转换效果降低。压电材料属性受温度影响,在进行压电换能器设计时,压电换能器封装材料不但要起到保护压电材料的作用,还需满足隔热要求,防止高温环境削弱压电换能器能量收集效果。

4 结 语

(1)荷载水平直接影响压电换能器的受力,荷载增加导致压电陶瓷晶片应力直线上升;荷载频率升高导致荷载的冲击效应增强,压电陶瓷晶片承受荷载增加;并联个数减小,单个压电陶瓷晶片承受荷载增加;压电陶瓷晶片温度升高导致路面面层结构性变差,传力性能变弱,压电陶瓷晶片应力减小。提高压电陶瓷晶片应力水平,可有效提高压电换能器能量收集效果。

(2)压电材料压电参数的变化影响压电路面能量收集效率。压电换能器中压电陶瓷晶片并联个数增加导致等效电容增加,从而导致开路电压降低;面层温度和荷载频率可能引起压电陶瓷晶片介电参数变化,进而影响压电换能器开路电压变化。

(3)面层作为压电换能器的载体,面层材料对压电效果的影响不能忽略,本文3种面层中,AC-13面层与压电换能器组合效果较优。

(4)实际沥青路面的混合料种类较多,组合形式多样,不同面层类型及组合形式对压电效果的影响需进一步探讨。此外,多因素交互作用下压电换能器开路电压的变化规律,以及压电换能器对路面使用性能的影响同样不可忽略,需进一步研究。

参考文献:

References:

[1] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003 to 2006) [J]. *Smart Materials & Structures*, 2007, 16(3): 1-21.

[2] WANG H, JASIM A, CHEN X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—A comprehensive review[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1083-1094.

[3] GUO L, LU Q. Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 761-773.

[4] DUARTE F, FERREIRA A. Energy harvesting on road pavements: State of the art[J]. *Proceedings of*

the Institution of Civil Engineers, 2016, 169: 79-90.

[5] ZHAO H, LING J, YU J. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2012, 120(1404): 317-323.

[6] 张传忠. 压电材料的发展及应用[J]. *压电与声光*, 1993, 15(3): 64-70.

ZHANG Chuan-zhong. Development of piezoelectric materials and their applications[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1993, 15(3): 64-70.

[7] 谭忆秋, 钟勇, 吕建福, 等. 路面用PZT/沥青压电复合材料的制备及性能[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(6): 975-980.

TAN Yi-qiu, ZHONG Yong, LU Jian-fu, et al. Preparation and properties of PZT/asphalt-based piezoelectric composites used on pavement [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(6): 975-980.

[8] 黄如宝, 牛衍亮, 赵鸿铎, 等. 道路压电能量收集技术途径与研究展望[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(6): 1-8.

HUANG Ru-bao, NIU Yan-liang, ZHAO Hong-duo, et al. Technical approach and research prospect of piezoelectric energy harvest from highway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(6): 1-8.

[9] ZHAO H, YU J, LING J. Finite element analysis of cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 118(1382): 909-915.

[10] PAPAGIANNAKIS A T, MONTOYA A, DESSOUKY S, et al. Development and evaluation of piezoelectric prototypes for roadway energy harvesting[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2017, 143(5): 04017034.

[11] SONG Y, YANG C H, HONG S K, et al. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(29): 12563-12568.

[12] 王朝辉, 陈森, 李彦伟, 等. 智能发电路面压电换能器保护措施设计及能量输出[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(5): 41-49.

WANG Chao-hui, CHEN Sen, LI Yan-wei, et al. Design of piezoelectric elements' protection measures and energy output of intelligent power pavement [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(5): 41-49.

[13] TAO J, HU J. Energy harvesting from pavement via polyvinylidene fluoride: Hybrid piezo-pyroelectric effects[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2016, 17(7): 502-511.