

压电能量收集器在沥青路面中的应用

余 嫻 程 润 臧冬冬 徐德根 刘 杰

江苏创为交通科技发展有限公司 江苏南京 210000

摘 要: 随着能源消耗与日俱增, 各种新能源技术开发成为国内外的研究热点问题, 压电能量收集器 (PEH) 在道路机械能收集和转化中的应用近年来引起了广泛的关注。压电材料是一种可以将机械振动能量转换为电能 (正压电效应) 的物质, 其初始源头是机械振动, 广泛存在于环境之中。同时压电材料具有能量密度高、转换无污染等优点, 是一种极具前景的新能源。本文研究了堆叠式压电能量收集器的内部结构和性能, 对该堆叠式压电能量收集器的封装进行了优化, 并对压电能量收集器进行了能量收集试验, 实验结果证明该封装能够适用于沥青路面工程中。

关键词: 压电能量收集器; 道路; 压电材料; 沥青路面

Application of piezoelectric energy collector in asphalt pavement

Man Yu, Run Cheng, Dongdong Zang, Degen Xu, Jie Liu

Jiangsu Chuangwei Transportation Technology Development Co. LTD, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract: With the increasing energy consumption, the development of various new energy technologies has become a hot research topic at home and abroad. The application of piezoelectric energy harvesters (PEH) in the collection and conversion of road mechanical energy has attracted widespread attention in recent years. Piezoelectric material is a substance that can convert mechanical vibration energy into electrical energy (positive piezoelectric effect). Its initial source is mechanical vibration, which is widely present in the environment. At the same time, piezoelectric materials have the advantages of high energy density and pollution-free conversion, which is a promising new energy source. This paper studies the internal structure and performance of the stacked piezoelectric energy harvester, optimizes the package of the stacked piezoelectric energy harvester, and conducts energy harvesting experiments on the piezoelectric energy harvester. The experimental results show that the package can It is suitable for asphalt pavement engineering.

Keywords: Piezoelectric energy harvester; Road; Piezoelectric material; Asphalt pavement

引言:

截止2020年底, 全国公路总里程突破430万公里, 其中沥青混凝土路面约120万公里^[1]。沥青混凝土路面具有耐疲劳性、高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等性能, 而且施工机械化程度高、进度快、质量好、维护简单, 因此, 沥青混凝土的应用越来越广泛^[2, 3]。沥青路面在使用期间经受交通荷载的反复作用, 长期处于应力应变交迭变化状态, 从而产生形变和振动^[4], 由沥青路面上的交通荷载产生的机械能量, 均以热能或振动能量的形式浪费和消散, 若能将这部分能量通过压电能量收集器 (PEH) 收集^[5-7], 并直接转化为电能, 则收集的电能可被用于偏远地区的传感器和无线节点供电, 这对逐年

严重的生态和环境问题具有重要意义^[8, 9]。此外, 能源的成功收集可以减少车辆对道路造成的损坏, 并确保可持续的交通基础设施系统^[10-12]。因此, 提高PEH系统的能力和效率, 对实现经济实用的机电能转化具有重要意义。

以往的研究主要集中在压电传感器上, 但忽略了封装对sPEH输出的影响^[13]。本研究旨在提出一种具有高电容的sPEH单元, 并设计一个匹配的封装, 以更好地提高道路应用中传感器的输出。采用层状极化法制备了一种具有高电容的堆叠传感器。在不同振幅和频率的模拟交通负荷下, 测试了一个包含多个堆叠压电元件的能量收集器。用雕刻机选择了8种制作性能好、耐腐蚀性好的不同材料进行封装, 对不同封装材料和覆盖厚度的sPEH

的能量输出进行了评估。同时分析沥青混凝土原材料的性能, 矿料级配设计思路, 提出埋入式压电沥青混凝土的材料组成设计和制备方法。最后, 通过测试所设计的集成储能电路的sPEH, 为电池供电24小时, 验证了该模型的可行性。

一、实验部分

1. 堆叠式压电换能器

一般来说, 当施加在压电传感器上的力与极振方向一致时, 机械能和电能之间的转换效率变大^[14-17]。因此, 本文试验的堆叠压电换能器的极化方向与路面传输的车辆载荷垂直方向一致, 适合道路应用。测试的堆叠压电传感器由正方形的多层PZT压电陶瓷组成。尽管单个陶瓷很薄, 但垂直极化, 与施加的载荷方向相同, 用于生产位于PZT陶瓷上下表面的电极, PZT陶瓷的相关参数见表1:

表1 PZT陶瓷参数

Table 1. Parameters of PZT Ceramic

密度 / ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7500
自由渗透率 /		1800
相对介导率 /		2500
压电应变常数 / d_{31}, d_{33}	$10^{-12} \text{m}^2/\text{V}$	190, 450
压电电压常数 / g_{31}, g_{33}	$10^{-3} \text{Vm}/\text{N}$	-9.5, 22
世界电力损失 /		2
居里温度密度 / T_C	$^{\circ}\text{C}$	340
机械质量因素 /		85

将边长为10mm × 10mm的方形压电陶瓷插入两片0.1mm厚的铜箔中作为电极, 形成压电单元。在压电元件的上下表面涂上环氧树脂, 对其进行粘合和绝缘。然后, 将40个压电单元在80℃下极化并压在一起, 以堆叠一个8mm厚的方形压电换能器。压电换能器的上下表面覆盖两块陶瓷板作为保护层。最后, 将传感器两侧的正极或负极(铜箔的凸起部分)焊接在一起, 并连接到两根平行导线上。叠层压电换能器的结构如图1所示:

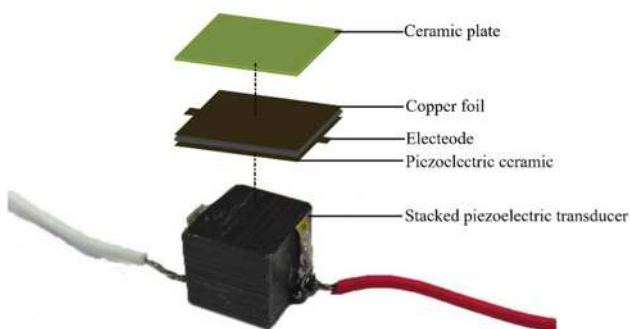


图1 堆叠式压电换能器的结构

Figure 1. Structure of Stacked Piezoelectric Transducer

2. 压电能量收集器

如图2所示, sPEH总共组装了6个传感器和一个封装。组装的换能器以2 × 3的结构排列在中间板的孔中, 用于限制换能器的水平位移。中间板的孔为14 mm × 10 mm, 与单个压电换能器的尺寸相匹配。穿过中间板和底板中的预设孔的电线并联连接换能器。上板覆盖在底板上并通过自锁槽和硅橡胶密封内部换能器。外形尺寸为140 mm × 95 mm的sPEH可沿运输路径嵌入道路路面。在这个包中, 传感器被通过包传输的交通负载压实, 并根据其自身的模量恢复。

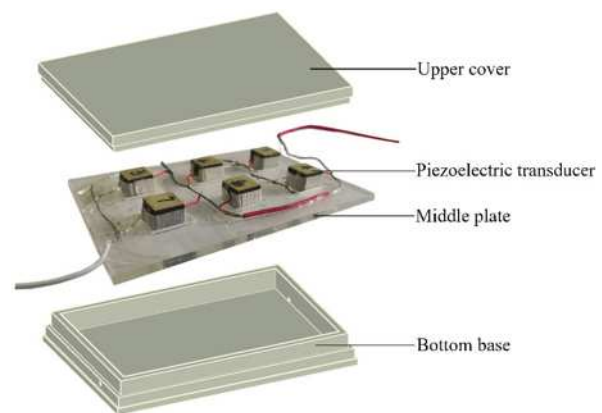


图2 sPEH的结构

Figure 2. Structure of the sPEH

考虑到材料的成本和制造, 选择了八种不同强度、模块和耐腐蚀性的封装类型, 以研究对sPEH输出效率的影响: 聚乙烯(PE)、聚碳酸酯(PC)、聚丙烯(PP)、聚丙烯含30%玻璃纤维(Fi-PP)、丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)、亚克力(PMMA)、电木板(EB)、铝合金(Al), 并将它们的特性参数列于表2中。

测试中还研究了与sPEH输出效率相关的另一个关键因素, 即封装盖板的厚度。由于路面传递的交通荷载随埋入深度的增加而衰减, 因此sPEH应尽可能靠近道路表面埋设, 以确保最大的输出效率^[18]。本文选择埋入深度在40mm深的沥青路面上面层内, 因此, 包裹的总厚度不超过28毫米, 而平整层的厚度不小于12毫米, 以使路面平整(图3)。由于封装中换能器的高度为8mm, 假设盖板和底板的厚度相同, 计算盖板的厚度不超过10mm。因此, 测试了厚度为3、5、6、8和10 mm的五个盖板。

3. 试验设备与过程

动静载荷试验装置如图4所示。通过电控伺服系统, 将放置在固定底座上的试样在预定幅值和频率的垂直应力下压缩, 模拟道路上重复的交通载荷。输出电压和电流分别由示波器XDS-ES和万用表FLUCK287C记录。电

表2 封装材料的特性

Table 2. Properties of package materials

	Density	Temperature resistance	Bibulous rate	Impact strength	Elastic modulus	Tensile strength
	g/cm ³	℃	%	kJ/m ²	GPa	MPa
Al	2.72	150 - 300	<0.01	>100	70	>205
PE	0.941	79 - 121	<0.01	80 - 1067	1.5 - 2.0	21 - 38
PC	1.18	121	0.2 - 0.3	640 - 830	2.0 - 2.5	60 - 88
PP	0.90	88 - 116	0.03 - 0.04	10 - 100	2.72 - 3.4	35 - 40
Fi-PP	1.29	120	0.9	9	5	65 - 90
ABS	1.04	66 - 99	0.2 - 0.25	123 - 454	2.2	21 - 63
PMMA	1.18	65 - 95	0.2 - 0.4	14.7	3	50 - 77
EB	1.3 - 1.5	130 - 180	0.6 - 0.9	35	1.96 - 2.94	>300

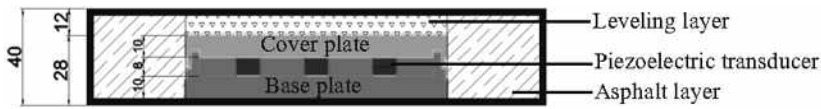


图3 预埋沥青断面示意图

Figure 3. Diagram of Pavement of road with Embedded sPEH

路中使用的电阻 (ZX84D) 为 3 kΩ。在道路的使用寿命内, 不同轴重的车辆以不同的速度行驶。根据中国有关交通运输的规定, 不同车辆对道路施加的应力在 0.26 MPa-0.7 MPa 之间变化^[19]。因此, 试验中施加的压力计算为 3.3 kN 至 8.9 kN, sPEH 面积为 140 mm × 954 mm。最终确定为 3 kN、6 kN 和 9 kN。另外, 考虑到皮卡车轴距为 3.38 m, 车辆行驶速度从 50 km/h 到 100 km/h 分布在道路上, 相应的加载频率范围为 1 Hz-10 Hz^[20]。在此测试中, 选择了三个加载频率值 (2、5 和 8 Hz)。

尤其是在负载较大时。例如, 当负载为 9 kN 且其频率为 8 Hz 时, PE 封装的输出电压为 4.5 V, 与 PC、PP 和 Fi PP 对应的 4.0 V 相比约增加 12.5%, 与 Al、PMMA 和 EB 对应的 3.5 V 相比增加 28.6%。当外加负载幅值减小时, PE 板与其他材料对应的输出电压差变小。在试验的垂直载荷下, sPEH 按照压电 33 模式运行, 该模式的应力方向与极化方向平行。结果表明, 在相同的载荷条件下, 尤其是在载荷幅值和频率较大的情况下, 用 PE 板制作的封装有利于内部 sPEH 的输出。

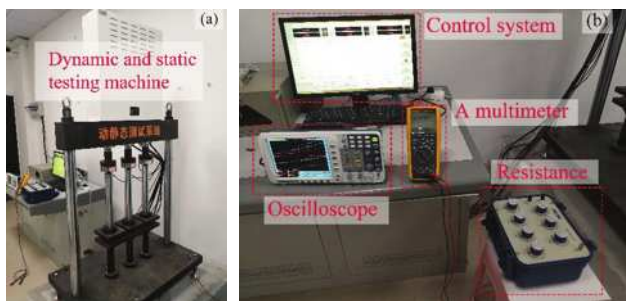


图4 (a) 动态和静态试验装置, (b) 控制和记录系统

Figure 4. (a) Dynamic and Static Testing Apparatus, (b) Control and Record System

二、结果与讨论

1. 封装材料的影响

图5显示, 不同封装材料中 sPEH 的所有输出, 包括电压、功率和电流, 均随外加负载的增加而增加。无论如何, 由 PE 板制成的封装中的 sPEH 总是输出最大值,

图6分别说明了输出电压与封装材料特性的关系。可以看出, 我们没有发现 sPEH 性能取决于封装材料的模量或密度的明显趋势。例如, 通过增强玻璃纤维 PP 改进的 Fi-PP 具有比玻璃纤维 PP 更好的性能。然而, 模量和密度最小的 PE 输出的电压最大。结果表明, sPEH 的输出可能与封装材料的强度、密度、模量等综合性而非单一属性有关, 这些属性可能会影响内部换能器的应力和变形水平。

sPEH 的理论输出电压可以根据以下公式计算^[21]

$$U = \frac{d_{33} F f n h R}{\sqrt{h^2 + f^2 A^2 (\epsilon_{33}^T)^2 R^2}} \quad (1)$$

其中 U 是输出电压, d_{33} 是压电系数, F 是施加的压力, f 是激励频率, n 是并联换能器的数量, h 是换能器厚度, A 是换能器面积, ϵ_{33}^T 是介电常数。R 是外部电阻, 公式 (1) 中的参数值在表 3 中给出。

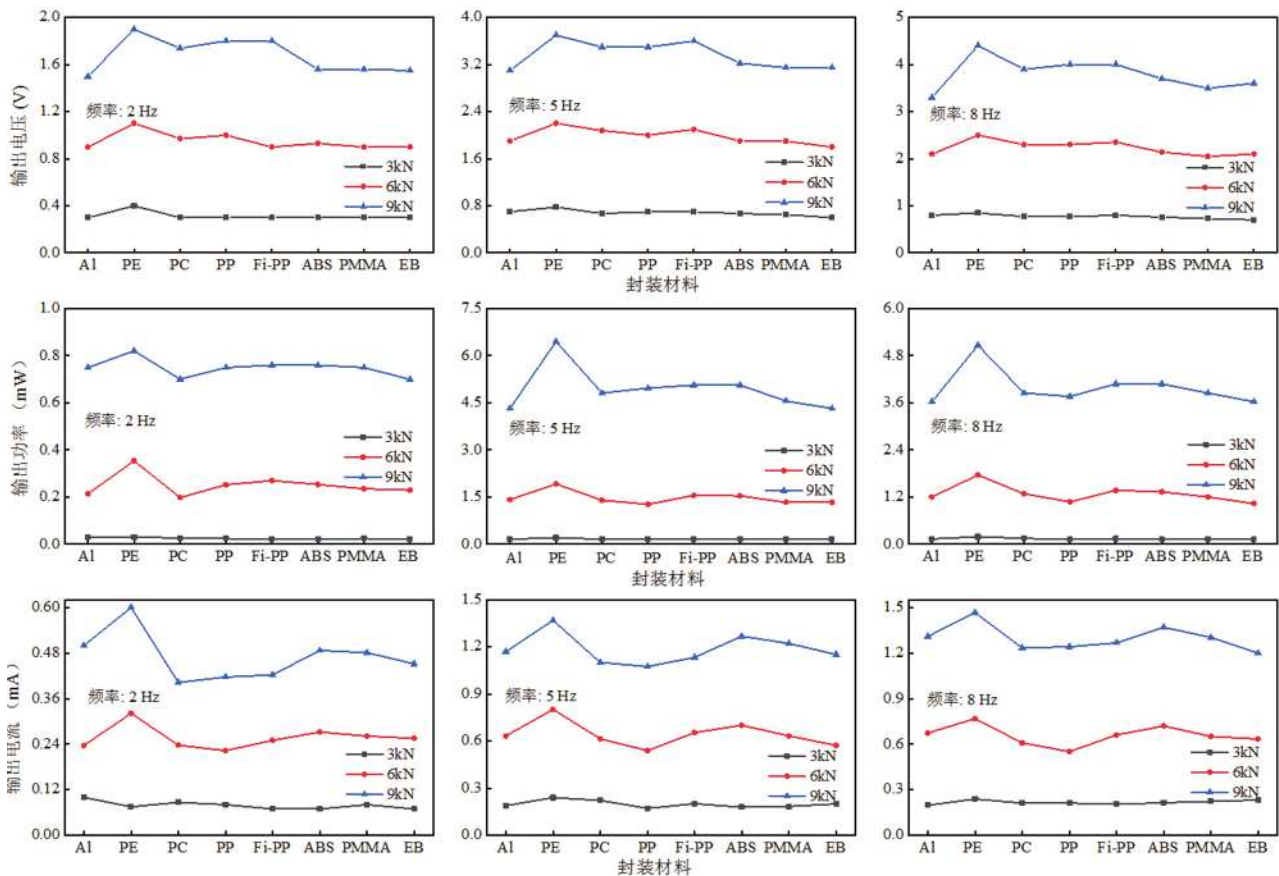


图5 不同封装材料下输出电压、功率和电流

Figure 5. Output Voltage, Power and Current Corresponding to Different Package Materials as Different Load

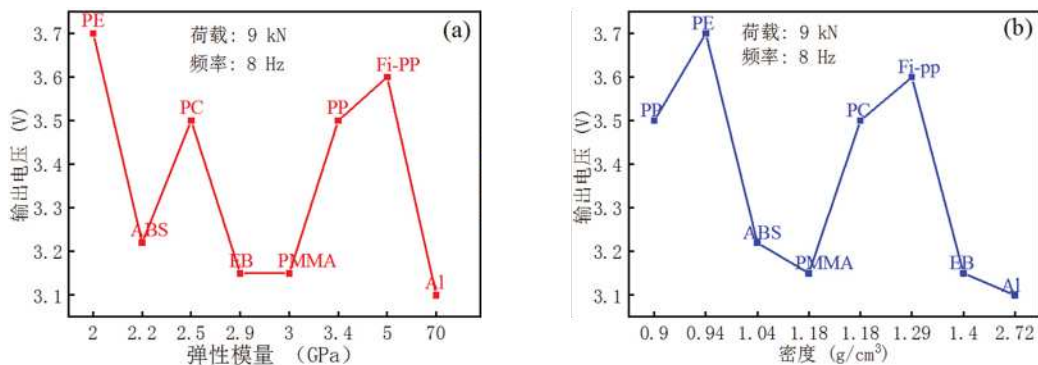


图6 压电能量收集器封装的输出电压与不同的材料属性: (a) 模量; (b) 密度

Figure 6. Output Voltage of sPEH Packaged Versus Different Material Properties: (a) Modulus; (b) density

表3 相关参数的值

Table 3. Values of Related ParamEters

d_{33}	ϵ_{33}^T	F	F	N	H	R	A
m^2/V	-	(N)	(Hz)	-	(m)	(Ω)	(m^2)
450×10^{-12}	1800	3000	8	6	8×10^{-3}	3×10^3	6×10^{-4}
		6000					
		9000					

2. 封装厚度的影响

基于上述结果, 选择PE板作为最佳封装材料, 研究封装盖板的最佳厚度。如图7所示, 在相同频率或负载下, 输出电压和功率在盖板厚度为3 mm时达到峰值, 随着盖板厚度的增加而略有下降。测试过程中3mm厚的盖子的较大变形有助于sPEH的更大输出。然而, 如果盖子太薄, 盖子的强度和刚度不足以承受交通负载并保护内部换能器。因此, 3毫米被指定为覆盖的最小值。

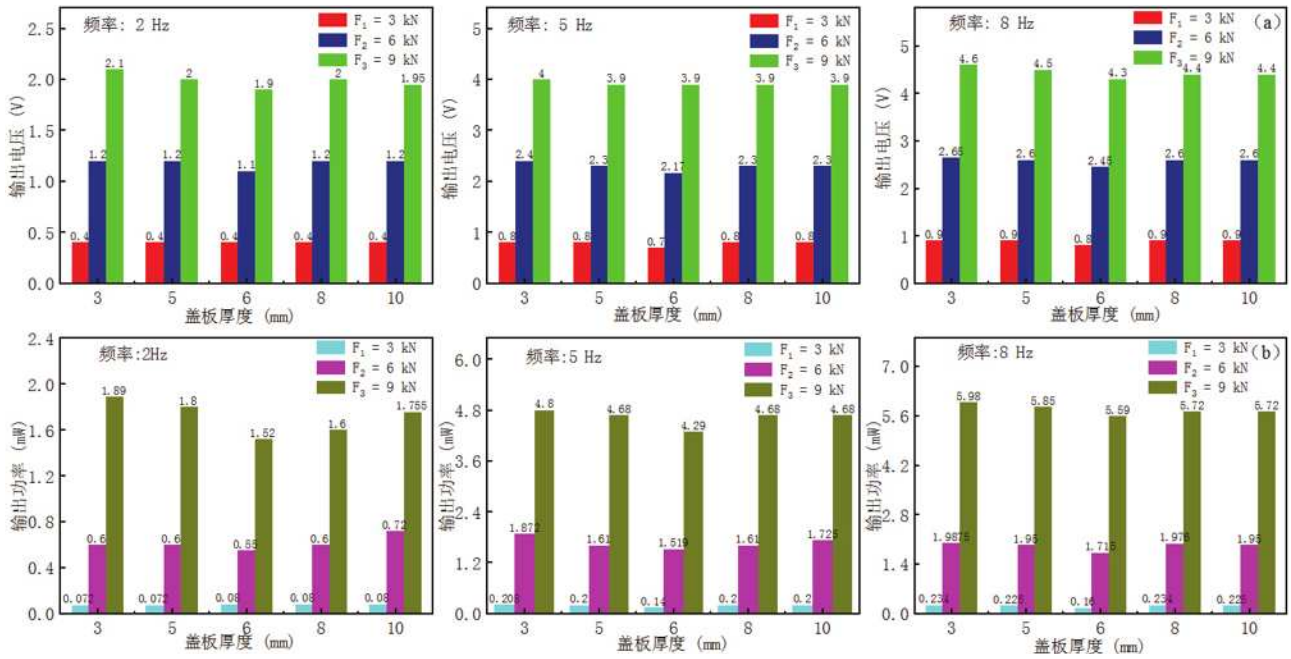


图7 不同厚度下的PE板封装中压电能量收集器的输出电压和输出功率: (a) 不同荷载; (b) 不同频率
Figure 7. Output Voltage of sPEH in PE Package with Different Thicknesses Under: (a) different pressure; (b) different frequencies

3. 密封效果

测试了保护嵌入道路下的sPEH不受环境影响的包装的封装和密封效果。将整个sPEH包括封装和内部换能器浸入50 cm深的水中96小时, 然后取出进行装载。如图8所示, 浸泡前后sPEH的输出非常接近, 输出随频率的相应变化趋势也非常相似。在水中96小时后, sPEH仍保持正常的压电性能。拆下包装盖后, 内部换能器上没有水渍。本文采用工业电子设备IPX7防水标准(GB 10485-89)作为道路压电能量采集装置的密封标准。推断包装的密封效果满足sPEH和道路环境的要求。

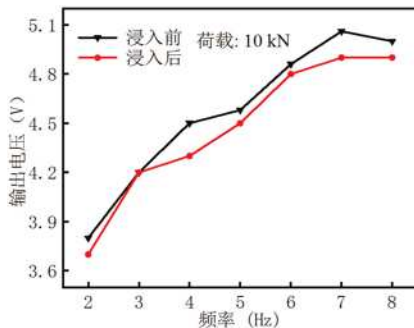


图8 压电能量收集器浸入前和浸后输出电压
Figure. 8 Output Voltage Before and After Immersion of sPEH

4. 抗压强度

埋入在路面中的压电换能器将面临复杂的荷载条件,

尤其是路面施工机械在施工过程中的高压和低频荷载冲击。因此, 可靠的结构强度是压电传感器实际应用的前提。压电换能器的抗压强度使用通用测试机进行测试,

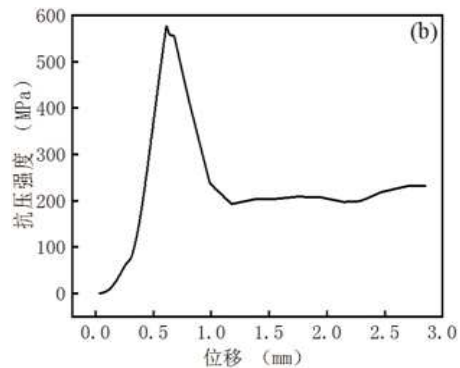


图9 (a) 抗压强度测试机; (b) 压电换能器的抗压强度曲线
Figure 9. (a) Compressive strength tester; (b) Compressive strength of piezoelectric transducer

加载速度为500 N/s。测试结果见图9 (b), 根据试验结果, 本文所用堆叠式压电换能器的抗压强度为576 MPa, 对应的加载力为57.6 kN。由于所使用的压电换能器PZT-51是脆性材料, 脆性材料没有屈服阶段, 直接破碎。根据交通运输部的规定: 轮胎接地应力应小于0.7 MPa, 换算荷载约为15.75 kN, 因此在竖向荷载模式下, 它的抗压强度远超路面实际荷载, 足以满足发电路面的建设和运行要求。

5. 沥青路面现场试验

为了能进一步确定压电能量收集器在路面现场的发电特性, 同时也为了验证所设计的路用压电能量收集器封装盒在实际沥青路面环境中工作的可靠性。选取某公路SMA-13沥青路面1 km为试验铺筑路段, 将压电能量收集器铺设于试验路段中, 通过沥青路面现场试验分析了压电能量收集装置在中型车辆不同车速下的输出性能。

(1) SMA-13沥青路面摊铺

混合料摊铺包含摊铺前准备、摊铺温度、摊铺速度和宽度四方面内容。其中, 摊铺前准备工作, 需要先做好沉降稳定检验、高程测量等验收工作, 用高压水枪清理干净施工区域, 避免出现泥土、碎石、垃圾等杂物, 随后喷洒足够的粘层油”。同时, 做好摊铺机械检查工作, 尽可能使用更加先进的摊铺机, 在摊铺混合料时会更加均匀、平整, 而且摊铺厚度、高程、纵横坡等就能满足设计要求。众多工程实例表明, ABG423型号摊铺机性能最佳, 带有5级振级的夯锤, 能够显著提升路面初始压实度。本工程采用的摊铺机便是ABG423型号摊铺机, 在开始施工前, 应当调整好相应标定, 包括料门开度和高度、链板送料器速度、螺旋布料器转速等, 确保混合料能够顺利运送至螺旋布料器中, 并保证摊铺机运行过程中混合料拌和充分, 分布均匀(图10)。



图10 SMA-13沥青混合料摊铺

Figure 10. SMA-13 Asphalt Mixture Paving

(2) 压电路面压实控制

混合料压实质量控制包含压路原则、压实机械、压实步骤、压实标准等内容。其中, 压实原则指, 在混合料压实过程中遵循“慢压、紧跟、高频低幅”的原则,

指压实机必须保持匀速均衡碾压速度, 逐渐缓慢改变碾压方向, 禁止随意转弯, 转变方向; SMA压实有效时间较短, 因此必须确保压路机紧紧跟随在摊铺机后面, 确保在碾压温度内进行, 有效规避因低温碾压造成的石料棱角磨损和石料压碎等问题。本工程在压实过程中需要将初压、复压、终压温度控制在大雨等于150℃, 120℃, 110℃, 保证压实温度。

压实机械, SMA沥青含量和黏性都较高, 选用轮胎型压路机很容易出现“泵吸”现象, 并轮胎也会造成沥青玛蹄脂上浮, 进而造成泛油现象, 是混合料表面出现缺陷, 因此, 本工程采用钢轮振动压实机, 在初压、复压、终压时分别采用前进时静压后退时振动碾压、振动碾压两遍、静压两遍的方式, 确保压实质量符合要求。

如图11所示, 压实步骤, 包含初压、复压和终压三个步骤, 将静压时碾压速度分别控制在2-3km/h, 2.5-5km/h, 2.5-4km/h, 振动碾压时碾压速度分别控制在2-4km/h, 4-5km/h在使用压路机压实时, 需要遵循从外侧向中心的顺序, 确保两个相邻碾压带的重叠范围为三分之一至四分之一的轮宽。并且, 将碾压时温度控制在一定范围内, 当气温下降至10℃以下时, 立即停止施工; 当碾压压实度达到一定标准后, 立即停止碾压, 避免出现过度碾压现象; 在碾压结束后, 倘若SMA没有完全冷却, 避免在路面上放置任何器械, 也严禁将油料、矿料等杂物洒落在其上, 避免路面出现坑槽。



图11 路面压实

Figure 11. pavement compaction

(3) 车速对输出电压的影响

出于行车安全及道路长度的考虑, 试验中车辆以20、30、40 km/h的速度测量输出电压, 当车速为20、30、40 km/h时, 所计算的作用频率约为1.6、2.5、3.3 Hz。在40 km/h的速度下, 单个压电能量收集器的最大电压为8.35 V, 最大功率为23.24 mW, 电流为2.78 mA。表4列出了室内试验与室外现场试验在接近同等加载条件下的数据对比, 数据表明, 路面现场输出电压测值大于室内试验测值, 说明本文所设计的经封装整合压电能量收集装置已达到预想发电性能效果。图12、13、14示出了在各种行车

速度下对应的输出电压, 在车速增加的同时, 输出电压也伴随着增大, 且车速越大, 输出电压的增长幅度越大。

表4 室内与室外路面现场的数据对比

Table 4. Comparison of Field Data of Indoor and Outdoor Pavement

试验组	频率 (Hz)	荷载 (kN)	输出电压最大值 (V)
室内	4	6	4.1
室外路面现场	3.3 (40 km/h)	6.88	8.35

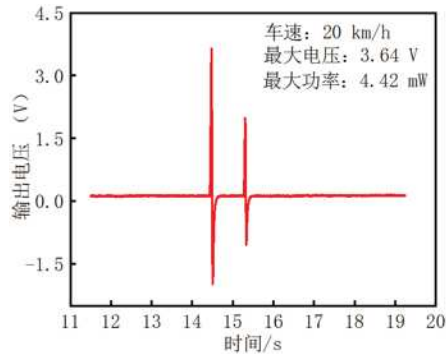


图12 车速 20 km/h 下的瞬时电压

Figure 12. Instantaneous Voltage at 20 km/h

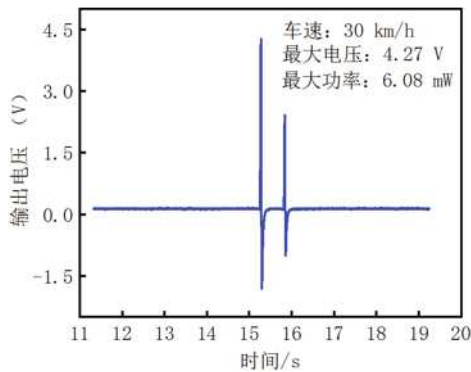


图13 车速 30 km/h 下的瞬时电压

Figure 13. Instantaneous Voltage at 30 km/h

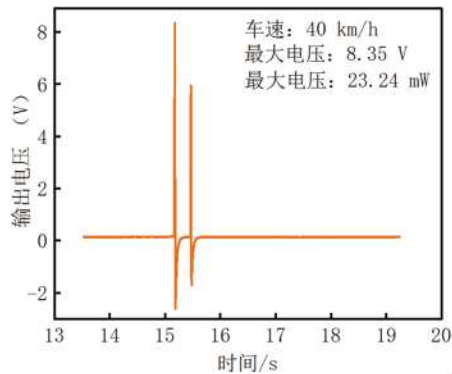


图14 车速 40km/h 下的瞬时电压

Figure 14. Instantaneous Voltage at 40 km/h

三、结论

我们提出了基于叠层压电换能器的机械振动能量的优化sPEH收集方法, 对匹配的封装进行了优化, 以提高sPEH的能量收集效率, 同时保护sPEH免受环境影响。试验结果表明, 在循环荷载下, sPEH根据桩基压电换能器的模量和阻抗经历了压缩和恢复的循环过程, 提供了持久的输出功率和有限的位移, 满足沥青路面刚度和密实度要求。封装的较薄PE盖板使sPEH的输出功率提高到109.85 mW, 电流达到21.97 mA, 在24小时内为锂电池充电, 可用于为传感器供电。试验结果还表明, 所提出的封装的防水和抗压强度足以保护内部换能器免受环境侵蚀和道路应用中交通荷载的挤压破坏。此外对于单个压电能量收集器来说, 其内部仅安置六个压电换能器, 整体封装盒的尺寸又较小, 因此路面实际应用中, 可将多个压电能量收集器并联连接以提高输出。

参考文献:

- [1]WANG Linbing, 王含笑, 赵千, 杨海露, 赵鸿铎, HUANG Baoshan. 智能路面发展与展望[J]. 中国公路学报, 2019, s32 (04): 50-72.
- [2]张文宏. 沥青混凝土路面特性评价及表面平整度的控制要点[J]. 山西建筑, 2020, 46 (8): 2.
- [3]王峻. 试析高速公路沥青混凝土路面施工技术要点[J]. 城市建筑, 2014 (26): 1.
- [4]李福. 振动能量收集系统的研究与实现[D]. 中国石油大学(华东), 2013.
- [5]徐春辉. 压电式低频振动能量采集系统的研究[D]. 西安电子科技大学, 2014.
- [6]Gedeon, Dominik, Rupitsch, et al. Finite element based system simulation for piezoelectric vibration energy harvesting devices[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2018, 29(7):1333-1347.
- [7]Pei J, Zhou B and Lyu L. e-Road: The largest energy supply of the future[J]. Applied Energy, 2019, 241:174 - 183.
- [8]Pei, J., Zhou, B., Lyu, L., 2019. e-Road: The largest energy supply of the future? Applied Energy 241, 174-183.
- [9]张允, 王战江, 蒋淑兰, 王茜. 振动能量收集技术的研究现状与展望[J]. 机械科学与技术, 2019, 38 (07): 985-1018.
- [10]Ding G, Zhao X, Sun F, et al. Effect of subgrade on piezoelectric energy harvesting under traffic loads[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(8):661 - 674.

- [11]Ding, G., Zhao, X., Wang, J., Xu, C., 2018. Vibration energy harvesting from roads under traffic loads. *Road Materials and Pavement Design* 21, 780-799.
- [12]Liu, P., Zhao, Q., Yang, H., Wang, D., Oeser, M., Wang, L., Tan, Y., 2019. Numerical Study on Influence of Piezoelectric Energy Harvester on Asphalt Pavement Structural Responses. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31.
- [13]Chen, C., Sharafi, A., Sun, J.-Q. A high density piezoelectric energy harvesting device from highway traffic - Design analysis and laboratory validation. *Applied Energy*, 2020, 269.
- [14]熊琦.PVDF压电薄膜的力学性能和压电效应实验研究[D].华中科技大学, 2018.
- [15]王孚雷.基于压电效应的集成式压力传感系统研究[D].山东大学, 2020.
- [16]崔小斌.基于压电效应的能量收集装置实验及原理研究[D].南京航空航天大学, 2016.
- [17]高书宁.多层压电陶瓷及其在压电驱动器中的应用[D].清华大学, 2018.
- [18]Sun, C., Du, J., Wang, H., Shang, G., 2013. Properties Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters from Pavement Vibration. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 215104.
- [19]Zhao, H., Ling, J., Yu, J., 2012. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. *Journal- Ceramic Society Japan* 120(1404), 317-323.
- [20]Liu, Z., Ding, G., Wang, J., Cai, G., Qin, X., Shi, K., 2020. Fabrication and performance of Tile transducers for piezoelectric energy harvesting. *AIP Advances* 10.
- [21]Wang, C., Zhao, J., Li, Q., Li, Y., 2018a. Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement. *Applied Energy* 229, 18-30.