

文章编号:1671-8879(2019)06-0012-08

压电式发电路面的“路-器”力学响应数值模拟

侯月琴¹, 何 创², 纪小平³

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 广州市高速公路有限公司营运分公司, 广东 广州 511385; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为揭示压电式发电路面的应力集中现象, 确定满足路用要求的发电器力学强度要求, 首先, 采用 ABAQUS 软件建立路面与压电器的“路-器”耦合模型, 构建压电式发电路面与压电器的力学响应数值模拟技术; 其次, 模拟压电式发电路面在 100 kN 荷载作用下的拉应力、压应力、剪应力、拉应变、压应变与位移等力学响应, 探讨了压电器形状(长方体、圆筒与圆柱)与材料(PZT-4、PZT-5H)对应力集中的影响; 模拟不同材料与形状的压电器在不同埋置深度、平面位置以及荷载下的拉应力、压应力、剪应力、拉应变与压应变, 探讨压电器的力学响应规律; 最后, 基于压电器的力学响应以及温度、超载与压路机的影响, 提出了压电器的安全系数以及力学强度要求。研究表明: 压电式发电路面的各种力学响应均大于不埋设压电器路面时, 压电器埋入会导致路面出现应力集中, 拉应力集中系数高达 7.5 以上, 应力集中位置处于压电器周围; 压电器形状对应力集中存在显著影响, 长方体压电器引起的应力集中最弱, 圆筒与圆柱压电器则基本一致; 不同压电材料所引起的应力集中基本一致; 压电器形状对压电器力学响应的影响较为显著, 圆筒压电器的各项力学响应最高, 长方体压电器次之, 圆柱压电器最低。基于压电器的力学响应, 以及温度、超载与压路机的影响, 提出了压电器的安全系数以及强度要求。

关键词:道路工程; 沥青路面; 压电效应; 发电路面; 力学响应; 数值模拟

中图分类号: U416.22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.06.002

Mechanical responses of “road-device” of piezoelectric electricity generation pavement based on numerical simulation

HOU Yue-qin¹, HE Chuang², JI Xiao-ping³

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 2. Guangzhou Expressway Co., Ltd., Operation Branch, Guangzhou 511385, Guangdong, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reveal the stress concentration phenomenon of the piezoelectric electricity generation pavement and determine the mechanical strength requirement of the piezoelectric generator that meets the road requirement etc, the ABAQUS software was firstly used to establish the “road-device” coupling model of pavement and piezoelectric generator, and further to construct the numerical simulation technology of the mechanical response of pavement and piezoelectric device. And then, the mechanical response of piezoelectric electricity generation

收稿日期: 2019-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908460); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219516; 300102219520)

作者简介: 侯月琴(1981-), 女, 青海乐都人, 讲师, 工学博士, E-mail: houyueqin527@163.com。

pavement under 100 kN load was simulated, including tensile stress, compressive stress, shear stress, tensile strain, compressive strain and displacement etc. And the influences of the piezoelectric device shapes (cuboid, cylinder and cylindrical) and materials (PZT-4, PZT-5H) on the stress concentration were investigated. The mechanical response of piezoelectric devices with different shapes and materials embedded in different depths and plane positions were simulated, including the tensile stress, compressive stress, shear stress, tensile strain and compressive strain under different loads. And also, the variation of mechanical response of piezoelectric device was discussed. Finally, the safety factor and mechanical strength requirements of piezoelectric device were proposed, based on the mechanical response of piezoelectric device and the influence of temperature, overload and road roller. The results show that the various mechanical responses of the piezoelectric electricity generation pavement are greater than that of the pavement without piezoelectric device, indicating the piezoelectric device causes stress concentration on pavement, and the tensile stress concentration factor is as high as 7.5 or more, as well as the stress concentration is located around the piezoelectric device. The shape of piezoelectric transducer has a significant effect on stress concentration, and the stress concentration is the weakest when caused by the cuboid piezoelectric transducer, followed by the cylinder and cylindrical piezoelectric transducers. Moreover, the stress concentration caused by different piezoelectric materials is basically the same. The shape of piezoelectric transducer has a significant influence on the mechanical response of the piezoelectric device. The cylinder transducer reaches the highest mechanical response, successively followed by the cuboid transducer, and the cylindrical transducer is the lowest. Based on the mechanical response of the piezoelectric device and the influences of temperature, overloading and roller, the safety factor and strength requirements of the piezoelectric device are proposed. 11 tabs, 2 figs, 28 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; piezoelectric effect; electricity generation pavement; mechanical response; numerical simulation

0 引言

沥青路面在服役期内要经受上千万次行车荷载的反复作用,并产生一定程度的变形与振动。路面发生变形的过程也是行车荷载对路面做功的过程,因此会产生机械能,并最终热能形式散发到外界中^[1]。利用压电效应可以将交通荷载对路面所做的机械功转化为电能。将压电换能器埋入路面中,在行车荷载作用下与路面产生协同变形,其核心压电材料(如压电陶瓷 PZT)内部的正负电荷中心发生相对位移出现异号极化电荷,进而产生电势差(电压)。在换能器两端连接电路获取电能,可为道路沿线的信息板、反光路钮等充电,甚至能为沿线居民提供生活用电^[2]。最早将压电换能器埋入沥青路面试验始于 2008 年,以色列的一家公司研制出了路面压电能收集系统(IPEG),并铺筑了 10 m 的试验路,测试表明,当每车道货车交通量超过 500 veh/h 时,每公里每车道 IPEG 最多可收集到 250 kW 的电

能^[3]。然后,更多学者估算了采用压电换能器收集道路机械能的潜在优势,并认为其可作为一种新的电力供应战略^[4-6]。Song 等使用压电悬臂梁设计出了一种道路用能量收集装置,据估计当车道交通量为 600 veh/h 时,每公里每车道可收集到 2.95 kW 的电能^[7]。Lee 等利用压电元件制作了一种路面能量收集装置^[8]。Xiong 等认为压电换能器的转换效率与运行车辆轴重密切相关,轴重越大,作用于压电换能器的应力与应变就越大,输出的压电能也越大,一般来说压电能与应力成线性关系^[9]。Kokkinopoulos 等分析了压电换能器用于能量收集系统开发的优点,研究了将该技术应用于 Attiki Odos 公路交通电网的投资效益^[10]。赵鸿铎等率先通过有限元模拟与室内试验论证了压电换能器用于收集沥青路面压电能的可行性,估计一个直径为 32 mm 的压电器在 20 Hz 车辆负载下可以产生 1.2 mW 的电能^[11-13]。唐宁对埋入式压电沥青混凝土的制备与电压输出进行了研究,并利用有限元软件对压电元

件尺寸进行了优化,经仿真分析确定外径 18 mm、内径 10 mm、厚度 4 mm 的压电元件在施加 0.7 MPa 的瞬时压应力下可以产生 63.146 V 的电压^[14]。钟勇对沥青路面压电能进行了有限元模拟,研究表明,路用钹式换能器在车辆荷载频率范围内一个荷载周期最大输出电量为 1.43 mJ^[15]。谭忆秋等研究了 PZT/沥青压电复合材料的制备工艺、极化条件及 PZT 的体积分数对压电性能的影响,认为优化的制备工艺为成型压应力 10 MPa、成型时间为 3 min,最佳的极化条件是极化电场强度为 3 kV/mm、极化温度为 50 ℃^[16]。王朝辉等制备了一种堆叠式压电换能器收集沥青路面的压电能,研究表明,在 0.7 MPa 与 15 Hz 的一次性荷载作用下可产生 11.67 mW 的电能,在 MTS 液压伺服试验机上经 40 000 次荷载作用后能量收集效率仍保持稳定^[17]。

现有的理论和试验研究大多集中在压电换能器的材料、结构和形状,以提高输出能量的效率,少有研究压电换能器嵌入式路面的性能和结构响应,尤其是长期使用的可靠性和耐久性。随着压电式路面的发展,技术挑战亦随之而来。首先,压电换能器的埋入改变了路面结构性能,如何确保压电换能器与路面的相容性极为重要。考虑到路面结构中轮胎应力分布的特点,Sun 等建议压电器嵌入深度为 40 mm^[18]。Zhang 等指出路面轮载的应力分布主要集中于距路表 4 cm 深度内,因此认为埋置深度超过 4 cm 可保证压电传感器与沥青路面的协同性能^[19]。Zhao 等指出剪应力传感器与沥青路面之间的分离风险很高^[20]。其次,如何确定压电换能器结构的力学要求,并为优化设计提供基础参数。先进的压电元件设计使得压电器需要承担的荷载增大,对如 PZT 等易碎压电材料的耐久性提出了更高要求。有研究发现,尽管压电器的弧桥设计可以产生比梯形桥设计高 78 V 的输出^[21],但压电元件上的应力较高,弧桥压电器的使用寿命较短^[22-23]。除了优化结构设计,采用柔性压电薄膜代替刚性压电陶瓷是提高压电器使用寿命的又一重要途径。2017 年,Jung 等开发了一种使用聚偏氟乙烯(PVDF)的柔性能量收集系统模块,该模块在 8 km/h、2 450 N 的交通荷载作用下可产生高达 200 mW 的瞬时功率输出^[24]。

综上,现有研究为路面压电能的收集与转化提供了参考,但并未对压电式发电沥青路面的压电器力学响应展开研究。压电器在行车荷载的作用下,能否与沥青路面良好地协同工作,是保证压电器正

常可靠持久工作的前提。本文基于数值模拟技术分析压电器的力学响应,并提出压电器的力学强度要求,以期合理设计与开发路用压电器提供参考。

1 “路-器”耦合模型及其力学响应的数值模拟技术

1.1 “路-器”耦合模型

选用中国常用的半刚性基层沥青路面结构,其参数见表 1。在保证计算精度并相对节约计算时间的情况下,选择 5.0 m(长)×5.0 m(宽)×6.0 m(高)的模型尺寸进行模拟^[25]。

表 1 路面结构参数

Tab. 1 Pavement structures parameters

路面结构	材料	厚度/cm	模量/MPa	泊松比
上面层	AC-13	4	1 500	0.30
中面层	AC-20	6	1 200	0.30
下面层	AC-25	8	1 000	0.30
基层	水泥稳定碎石	35	1 400	0.25
底基层	水泥稳定碎石	16	1 100	0.25
土基			35	0.35

选用 PZT-4、PZT-5H 两种压电材料。选择 3 种压电器形状:长、宽为 2 cm,高为 0.2 cm 的长方体;外径为 2.0 cm、内径为 1.0 cm、厚度为 0.2 cm 的圆筒;直径为 2.0 cm、厚度为 0.2 cm 的圆柱。由于 PZT 的 XY 平面是各向同性面,是各向同性与完全各向异性之间的介质,其弹性模量矩阵 \mathbf{c} 有 5 个独立弹性模量,分别为 $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}, c_{44}, c_{66}$ ^[26],本文取值见表 2, $c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$ 。 \mathbf{c} 可表示为

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (c_{11} - c_{12})/2 \end{bmatrix}$$

表 2 压电材料的弹性模量

Tab. 2 Elastic modulus of piezoelectric materials

$10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

压电材料	弹性模量					
	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{33}	c_{44}	c_{66}
PZT-4	12.60	7.78	7.43	11.5	2.56	2.41
PZT-5H	12.60	5.50	5.30	11.7	3.53	3.55

1.2 “路-器”力学响应的模拟技术

步骤 1,创建路面与压电器的几何模型,详见图 1(a),模型尺寸见第 1.1 节。

步骤 2,定义材料属性。

分别定义路面和压电器的材料属性。路面材料需要定义结构层厚度、模量与泊松比。压电器需要定义几何尺寸、模量与泊松比。

步骤 3, 拼接部件, 创建“路-器”耦合模型, 见图 1(b)。

定位并拼接路面与压电器部件; 在相互作用模块中, 需要创建约束, 取研究对象的面为主控表面, 与其相对的面为从属表面, 类型为绑定约束。

绑定约束, 相当于将 2 个接触面刚性连接, 绑定区域不发生相对运动和变形。绑定约束以简单的方式, 将表面永久的捆绑在一起, 且容易进行网格过渡。使用主-从公式定义基于表面的约束, 防止从属表面和主控表面分离或产生相对滑动。

步骤 4, 施加约束。

路面左右两侧和前后方向均为轴向约束, 底面固定, 顶面完全自由。

步骤 5, 网格划分。

路面与路基选取 C3D8R 单元进行网格划分。压电单元类型有 C3D4E、C3D6E、C3D8E、C3D20E。综合考虑计算精度与时间, 本文选择 8 节点线性单元 C3D8E 进行网格划分。

步骤 6, 施加荷载。

选择压力均布荷载, 施加范围为车辆轮胎接地面积, 接地形状简化为矩形。轴重为 100 kN 荷载的单轮接地尺寸为 227.4 mm×156.6 mm。

步骤 7, 计算并输出结果。

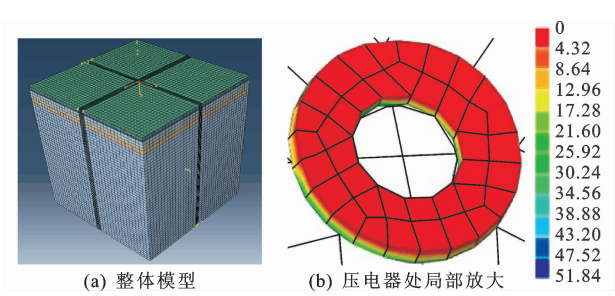


图 1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model

2 压电式发电沥青路面的应力集中现象分析

应力集中是物体中应力局部增高的现象, 多出现于尖角、孔洞、缺口、沟槽和有刚性约束处等。由于压电器与沥青路面的模量差, 加之受接触界面的影响, 导致沥青路面在压电器周围发生应力集中现象。图 2 为“路-器”耦合模型的剪应力分布云, 可以看出, 压电器周围出现应力集中。压电式发电沥青

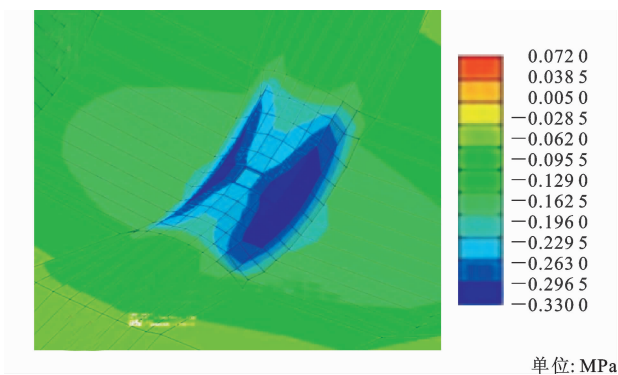


图 2 “路-器”耦合模型的剪应力分布云
Fig. 2 Distribution cloud of compressive stress in coupled model of “road-generator”

路面的应力集中可用应力集中系数 λ 表示

$$\lambda = \frac{\delta_1}{\delta_0} \quad (1)$$

式中: δ_0 为不埋设压电器路面的应力(应变); δ_1 为压电式发电沥青路面的应力(应变)。

2.1 压电器形状对应力集中的影响

将 PZT4 压电器埋置于上面层底轮隙中心, 模拟在 100 kN 荷载作用下的力学响应(拉应力、压应力、剪应力、拉应变、压应变与位移), 结果如表 3 所示。由表 3 可知: 压电式发电沥青路面的各种力学响应均大于不埋设压电器路面时, 说明压电器导致路面出现应力集中现象, 位置位于压电器周围; 压电器形状对应力集中的影响不一致, 如拉应力, 埋置长方体的应力集中系数为 7.51, 而埋设圆筒与圆柱的应力集中系数均为 10.02, 即长方体压电器引起的应力集中最弱, 圆筒与圆柱形压电器则基本一致。压应力、剪应力、拉应变指标也表现出相同规律。

表 3 埋设不同形状压电器的沥青路面力学响应

Tab. 3 Mechanical response of asphalt pavement with piezoelectric transducer in different shapes					
压电器形状	拉应力/ MPa	压应力/ MPa	剪应力/ MPa	拉应变/ 10^{-6}	压应变/ 10^{-6}
不埋设	0.047	0.070	0.092	20.50	80.80
长方体	0.351	0.619	0.233	178.30	275.10
圆筒	0.468	0.679	0.259	190.10	415.40
圆柱	0.468	0.679	0.262	191.60	415.50

发生于压电器周围的应力集中, 会导致路面与压电器界面首先发生滑动, 进而导致滑动面周围的路面材料发生脱落、松散等作用, 为水分进入提供通道并加速损害发展。若不及时处理, 这种局部的损害会逐渐扩展为面积较大的破坏, 压电器可能会被剥离路面。在实际使用时, 可采用环氧树脂对压电器进行封装, 既能保护压电器在拌和碾压过程中遭

遇破坏,还可加强与路面的界面黏结强度,防止界面滑动。

2.2 压电器材料对应力集中的影响

表 4 为埋设不同压电材料长方体的沥青路面力学响应计算结果,并与不埋设压电器的力学响应进行对比。由表 4 可知,2 种材料所引起的应力集中基本一致。

表 4 不同压电器材料的沥青路面力学响应

Tab. 4 Mechanical response of asphalt pavement with piezoelectric transducer in different materials

压电器材料	拉应力/ MPa	压应力/ MPa	剪应力/ MPa	拉应变/ 10 ⁻⁶	压应变/ 10 ⁻⁶
不埋设	0.047	0.070	0.092	20.50	80.80
PZT-4	0.351	0.619	0.233	178.30	275.10
PZT-5H	0.350	0.619	0.233	178.70	275.20

3 压电器的力学响应及力学强度要求

3.1 压电器的力学响应结果

按照所建立的方法计算不同的压电器材料与形状,埋置深度与平面位置,以及轴载下的力学响应。

3.1.1 压电器材料及形状的影响

采用 PZT-4、PZT-5H 两种材料,3 种形状下将压电器埋置于上面层底部轮隙中心,模拟行车轴载为 100 kN 下的力学响应,结果如表 5 所示。由表 5 可知:当压电材料相同时,长方体压电器的拉应力、压应力、剪应力、拉应变和压应变均最大;除剪应力外,圆柱压电器的拉应力、压应力、拉应变和压应变均最小;压电材料对压电器力学响应的影响规律不明显。

表 5 不同材料的各形状压电器力学响应

Tab. 5 Mechanical responses of piezoelectric transducers in different materials and shapes

形状	材料	拉应力/ MPa	压应力/ MPa	剪应力/ MPa	拉应变/ 10 ⁻⁶	压应变/ 10 ⁻⁶
长方体	PZT-4	2.882	1.183	1.928	40.45	30.43
	PZT-5H	2.968	1.365	1.953	31.38	23.07
圆筒	PZT-4	2.642	0.734	0.789	38.30	19.20
	PZT-5H	2.924	0.868	0.992	31.82	14.65
圆柱	PZT-4	0.722	0.488	0.799	9.44	10.62
	PZT-5H	0.787	0.601	0.803	6.71	7.66

3.1.2 埋设深度的影响

选用 PZT-4 压电材料,压电器埋置于轮隙中心,变化压电器顶面铺设深度,模拟在 100 kN 下的力学响应,结果如表 6 所示。由表 6 可知:随着

压电器埋置深度的增加,圆柱压电器拉应力一直减小,各种压电器的压应力与压应变逐渐减小;拉应变先增大后减小,在埋设深度为 6 cm 达到峰值;剪应力先增大后减小,在埋深 4~8 cm 处出现峰值。

表 6 不同埋深的各形状压电器力学响应

Tab. 6 Mechanical responses of piezoelectric transducers in different buried depths and shapes

形状	埋深/ cm	拉应力/ MPa	压应力/ MPa	剪应力/ MPa	拉应变/ 10 ⁻⁶	压应变/ 10 ⁻⁶
长方体	0	2.922	1.304	1.302	21.84	31.32
	2	2.505	1.307	1.958	32.16	31.31
	4	2.882	1.183	1.928	40.45	30.43
	6	2.863	1.069	1.553	44.34	26.15
	8	2.466	1.064	1.428	42.91	25.14
	10	2.068	1.059	1.302	41.48	24.13
	12	2.040	0.920	1.295	38.07	21.30
	14	2.011	0.780	1.287	34.65	18.46
	16	2.011	0.780	1.287	34.65	18.46
圆筒	0	2.908	1.090	1.416	30.85	24.60
	2	2.775	0.914	1.602	34.58	21.90
	4	2.642	0.738	1.789	38.30	19.20
	6	3.237	0.632	2.078	74.42	19.58
	8	3.777	0.831	1.082	56.02	17.98
	10	2.976	0.549	1.202	70.99	18.85
	12	2.994	0.550	0.964	42.92	19.25
	14	3.012	0.550	0.725	14.85	19.64
	16	3.012	0.550	0.725	14.85	19.64
圆柱	0	1.917	1.814	3.216	41.49	28.56
	2	1.253	1.700	2.500	28.00	22.00
	4	0.722	1.488	0.799	9.44	10.62
	6	0.687	1.131	0.982	17.52	12.78
	8	0.651	0.773	1.166	25.60	14.94
	10	0.600	0.700	0.500	24.00	11.00
	12	0.580	0.610	0.414	22.41	9.11
	14	0.559	0.520	0.328	20.81	7.22
	16	0.559	0.520	0.328	20.81	7.22

3.1.3 埋设平面位置的影响

选用 PZT-4 压电材料,铺设深度为 4 cm,模拟 100 kN 下的力学响应,结果如表 7 所示。由表 7 可知:压电材料埋设轮迹内侧时,拉应力最大;埋设轮迹时,压应力、剪应力、拉应变较大;埋设轮迹中心时,压应变最大。

3.1.4 轴载的影响

选用 PZT-4 压电材料,压电器埋置于上面层底部轮隙中心,分别模拟在 100、160、220、280 kN 轴载下的力学响应。荷载轴重、接地面积和接地压力采用下式计算^[26],结果见表 8。

$$A=0.008P+152\pm70$$

(2)

式中: A 为轮胎接地面积; P 为轮载(N); ± 70 为保证率达到 90% 的离差范围。

表 7 不同平面位置的各形状压电器力学响应
Tab. 7 Mechanical responses of piezoelectric transducers
at different plane positions and shapes

形状	位置	拉应力/ MPa	压应力/ MPa	剪应力/ MPa	拉应变/ 10 ⁻⁶	压应变/ 10 ⁻⁶
长方体	轮隙中心	2.882	1.183	1.928	40.45	30.43
	轮迹内侧	4.869	2.109	3.458	69.96	48.47
	轮迹中心	1.361	3.057	1.246	34.79	72.46
	轮迹外侧	4.710	2.701	4.333	71.74	57.03
圆筒	轮隙中心	2.642	0.738	0.789	38.30	19.20
	轮迹内侧	5.993	8.262	1.020	77.03	55.48
	轮迹中心	4.830	5.655	9.622	76.83	76.80
	轮迹外侧	5.035	4.800	8.415	114.50	64.98
圆柱	轮隙中心	0.722	0.488	0.799	9.44	10.62
	轮迹内侧	2.221	1.796	2.325	31.84	21.30
	轮迹中心	3.508	2.110	4.500	35.04	56.31
	轮迹外侧	1.813	1.289	2.603	12.20	19.08

表 8 荷载参数
Tab. 8 Load parameters

参数	轴载/kN	轮载/kN	接地面积/cm ²	接地压强/MPa
参数值	100	25	356.1	0.70
	160	40	420.7	0.95
	220	55	469.5	1.17
	280	70	512.1	1.37

不同轴载作用下的压电器力学响应结果如表 9 所示。由表 9 可知,压电器的拉应力、压应力、剪应力、拉应变、压应变和竖向位移均随轴载增大而增大,力学响应与轴载成线性关系。

表 9 不同轴载作用下的各形状压电器力学响应
Tab. 9 Mechanical responses of piezoelectric transducer
under different loads and shapes

形状	轴载/ kN	拉应力/ MPa	压应力/ MPa	剪应力/ MPa	拉应变/ 10 ⁻⁶	压应变/ 10 ⁻⁶
长方体	100	2.882	1.183	1.928	40.45	30.43
	160	3.909	1.599	2.609	54.97	41.13
	220	4.815	1.969	3.213	67.70	50.66
	280	5.638	2.305	3.702	79.27	59.31
圆筒	100	2.642	0.738	0.789	38.30	19.20
	160	3.586	1.001	1.071	51.98	26.06
	220	4.416	1.233	1.319	64.01	32.09
	280	5.171	1.444	1.545	74.95	37.57
圆柱	100	0.722	0.488	0.799	9.44	10.62
	160	1.223	0.663	1.084	16.90	14.42
	220	1.663	0.816	1.335	23.46	17.76
	280	2.064	0.956	1.563	29.43	20.79

3.2 压电器的力学强度要求

3.2.1 压电器力学响应的最大值

根据上述结果可得到压电器在标准轴载 100 kN 作用下的各种力学响应的最大值,结果如表 10 所示。

表 10 标准轴载 100 kN 作用下压电器的最大力学响应
Tab. 10 Maximum mechanical responses of piezoelectric
transducer under standard axle load MPa

形状	拉应力	压应力	剪应力
长方体	4.869	3.057	4.333
圆筒	5.993	8.262	9.622
圆柱	3.508	2.110	4.500

3.2.2 安全系数 k

针对环境温度、超载、压路机等的影响,需要考虑压电器的安全系数。以长方体压电器抗拉强度为例进行分析。在施工期,需要考虑振动压路机振动力的影响。研究表明,主流 12~15 t 双钢轮振动压路机的激振力可达 400 kN^[27],而且压电器的拉应力随轴载近似成线性关系,可确定安全系数为 400 kN/100 kN=4.0。

运营期间,首先是要考虑超载的影响。据调查,超载严重的双轴轴重可达 600 kN^[29],因此超载安全系数为 600 kN/2/100 kN=3.0。其次是要考虑路面温度的影响。沥青混合料的模量随着环境温度的变化而变化,如式(3)所示^[27],沥青路面与压电器的力学响应亦随之改变。结合表 1 中 20 ℃ 的模量,由式(3)可计算得到 60 ℃ 的沥青混合料模量。根据所建立路-器力学响应的模拟技术,可得到温度 60 ℃、荷载 100 kN 时的压电器拉应力为 7.592 MPa,即温度安全系数为 7.592 MPa/2.882 MPa=2.64。综合考虑超载与温度安全系数,则运营期的安全系数取为 7.9。

$$\frac{E_T}{E_C}=1.0-1.5\lg \frac{T}{C}$$

(3)

式中: E_T 为温度等于 T 时的模量; E_C 为温度等于 C 时的模量,一般 C 取 20 ℃,具体取值见表 1。

施工期的安全系数为 4.0,运营期的安全系数为 7.9,2 个阶段并不叠加,因此取数值大的作为压电器安全系数;同时,通过计算分析得出,抗压强度与抗剪强度安全系数亦为 7.9。综上,本文压电器的安全系数取为 7.9。

3.2.3 压电器的力学强度要求

根据压电器的力学响应最大值及安全系数取 k ,提出路用压电器的强度要求,结果如表 11 所示,要求压电陶瓷材料的强度不低于表 11 中数值,否则

压电器会发生破坏。压电陶瓷弹性变形与塑性变形的拐点(即压电陶瓷的屈服强度),其强度值可达 32 MPa^[14,30]。由此可知,当采用圆筒压电器时,抗压强度不得低于 65.3 MPa,已超过压电陶瓷的屈服强度(32 MPa),说明在超载高温条件下圆筒压电器会发生破坏;圆筒压电器各项强度要求最高,长方体压电器次之,圆柱压电器最低,因此建议选用圆柱压电器。

表 11 路用压电器的强度指标

Tab. 11 Strength indexes of road piezoelectric transducer applied in pavement			
MPa			
形状	抗拉强度	抗压强度	抗剪强度
长方体	38.5	24.2	34.2
圆筒	47.3	65.3	76.0
圆柱	27.7	16.7	35.6

4 结 语

(1)基于 ABAQUS 建立沥青路面与压电器的“路-器”耦合模型,构建压电式发电路面的力学响应数值模拟技术,模拟分析压电式发电沥青路面的应力集中现象,以及压电器的力学响应。

(2)压电式发电沥青路面的各种力学响应均大于不埋设压电器沥青路面时,说明压电器的埋入会导致路面出现应力集中,应力集中位置位于压电器周围,长方体压电器引起的应力集中最弱,不同压电材料所引起的应力集中基本一致。

(3)不同形状压电器具有不同的力学响应值,圆筒压电器各项力学响应最高,长方体压电器次之,圆柱压电器最低;从力学指标出发,建议选用圆柱压电器。

(4)基于压电器的力学响应以及温度、超载与压路机的影响,提出了压电器的安全系数以及力学强度要求。

(5)下一步将对不同的压电器结构(多层、拱形、桥形、钹形等)展开模拟研究,从力学响应与能量转换性能 2 个方面出发,推荐最优的结构形式。

参考文献:

References:

[1] PRIYA S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers[J]. Journal of Electroceramics,2007,19(1):167-184.

[2] 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 harvesting from highway[J]. China Journal of Highway and Transport,2012,25(6):1-8.

[3] INNOWATTECH. Innowattech's solution-the innowattechpiezo electric generator (IPEGTM) [EB/OL]. (2010-09-10) [2019-07-03]. <http://www.innowattech.co.il/index.aspx>.

[4] MOURE A,RODRIGUEZ M A I,RUEDA S H, et al. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting[J]. Energy Conversion & Management,2016,112:246-253.

[5] ROSHANI H,DESSOUKY S,MONTOYA A,et al. Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses; A feasibility study[J]. Applied Energy,2016,182:210-218.

[6] CHEN Y,ZHANG H,ZHANG Y,et al. Mechanical energy harvesting from road pavements under vehicular load using embedded piezoelectric elements[J]. Journal of Applied Mechanics,2016,83(8):081001.

[7] 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.

[8] LEE J J,RYU S K,MOON H Y,et al. A fundamental study for design of electric energy harvesting device using PZT on the road[J]. Journal of the Korean Society of Road Engineers,2011,13(4):159-166.

[9] XIONG H,WANG L. Piezoelectric energy harvester for public roadway:On-site installation and evaluation [J]. Applied Energy,2016,174:101-107.

[10] KOKKINOPOULOS A,VOKAS G,PAPAGEORGAS P. Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators-the potential for the Attiki Odos traffic grid [J]. Energy Procedia, 2014, 50: 1070-1085.

[11] 赵鸿铎,梁颖慧,凌建明. 基于压电效应的路面能量收集技术[J]. 上海交通大学学报,2011,45(增 1):62-66.

ZHAO Hong-duo, LIANG Ying-hui, LING Jian-ming. Study on harvesting energy from pavement based on piezoelectric effects[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University,2011,45(S1):62-66.

[12] ZHAO H D, 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.

[13] ZHAO H D,TAO Y J,NIU Y L,et al. Harvesting

- energy from asphalt pavement by piezoelectric generator [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2014, 29(5): 933-937.
- [14] 唐宁. 埋入式压电沥青混凝土的制备及其电学输出研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- TANG Ning. Research on the preparation and electrical output of piezoelectric-embedded asphalt concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [15] 钟勇. 用于路面机械能量回收的压电换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- ZHONG Yong. Research on piezoelectric transducer for harvesting mechanical energy from asphalt pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [16] 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.
- [17] WANG C H, WANG S, LI Q J, et al. Fabrication and performance of a power generation device based on stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 163: 196-207.
- [18] SUN C H, SHANG G Q, ZHANG Y K, et al. Designing piezoelectric harvesting unit from road vibration [J]. Advanced Materials Research, 2013, 712: 1368-1371.
- [19] ZHANG Z W, XIANG H J, SHI Z F. Modeling on piezoelectric energy harvesting from pavements under traffic loads [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(4): 567-578.
- [20] ZHAO H, QIN L, LING J. Synergistic performance of piezoelectric transducers and asphalt pavement [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(4): 381-387.
- [21] YAO L, ZHAO H D, DONG Z Y, et al. Laboratory testing of piezoelectric bridge transducers for asphalt pavement energy harvesting [J]. Key Engineering Materials, 2012, 492: 172-175.
- [22] LI C. Road performance of common piezoelectric transducer for asphalt pavement energy harvesting [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 744: 1491-1494.
- [23] XIONG H. Piezoelectric energy harvesting for public roadways [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2014.
- [24] JUNG I, SHIN Y H, KIM S, et al. Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications [J]. Applied Energy, 2017, 197: 222-229.
- [25] 姚学东. 重载道路结构层受力分析及层间结合状况评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- YAO Xue-dong. Stress analysis of heavy-load road structural layer and evaluation of the bonding condition between interlayer [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [26] JI X P, ZHENG N X, NIU S S, et al. Development of a rutting prediction model for asphalt pavements with the use of an accelerated loading facility [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(1): 15-31.
- [27] 王超. 振动压路机无级调幅系统的优化与仿真[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- WANG Chao. Optimization and simulation of stepless amplitude modulation system for vibratory roller [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [28] 臧曦. 压电装置的机电转换性能有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- ZANG Xi. Finite element analysis for mechanical and electrical conversion performance of the piezoelectric device [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.