

碳纤维发热电缆-玻纤格栅对沥青混凝土抗裂性能的影响*

Effect of Carbon Fiber Heating Cable-glass Fiber Grating on the Crack Resistance of Asphalt Concrete

赵亚军^{1,2}, 冀晨宇¹, 李桂祥¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038;
2. 河北工程大学 力学实验教学示范中心, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为研究内置碳纤维发热电缆-玻纤格栅沥青混凝土的抗裂性能, 对不同结构沥青混凝土进行半圆抗拉试验, 并用数值模拟的方法建立热力耦合作用下的路面结构, 分析升温性能和抗车辙能力。结果表明: 碳纤维发热电缆的开槽效应、分层作用和本身材质给混凝土带来的不利影响抵消了发热电缆的加筋作用, 使混凝土抗裂性能降低了 10% 左右; 发热电缆升温性能较好, 但在加热过程中使沥青路面变软, 路面抗车辙能力降低; 玻纤格栅较高的抗拉强度提高了混凝土的抗裂能力, 并且格栅的网格作用限制了集料移动, 提高了混凝土抗变形的能力。

关键词: 碳纤维发热电缆; 玻纤格栅; 数字图像相关技术; 半圆抗拉试验; 数值模拟

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 05-0087-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.015

ZHAO Yajun^{1,2}, JI Chenyu¹, LI Guixiang¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to study the crack resistance of asphalt concrete with carbon fiber heating cable and glass fiber grating, semi-circular tensile tests were carried out on asphalt concrete with different structures, and the pavement structure under thermal-mechanical coupling was established by numerical simulation, and the temperature rise performance and rutting resistance were analyzed. The results show that the grooving effect, delamination effect and the adverse effects of carbon fiber heating cable on concrete offset the reinforcement effect of heating cable, which reduces the crack resistance of concrete by about 10%. The heating cable has good heating performance, but it softens the asphalt pavement and reduces the rutting resistance of the pavement during heating. The higher tensile strength of glass fiber grating improves the crack resistance of concrete, and the grid function of the grating limits the movement of aggregate and improves the deformation resistance of concrete.

Keywords: carbon fiber heating cable; glass fiber grid; digital image correlation technique; semicircular - tensile test; numerical modeling

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51908178)。

作者简介: 赵亚军 (1979—), 男, 博士, 副教授。主要从事纤维增强材料方向的研究。

收稿日期: 2022-04-12

0 引言

碳纤维发热电缆是一种高效、节能的发热材料, 与沥青混合料协同工作性能较好, 近年来其用于路面除冰雪已成为国内外学者研究的热

材料科学

点^[1,3]。然而, 现有研究多数在于分析影响碳纤维发热电缆升温性能的因素^[4], 关于沥青路面中埋置碳纤维发热电缆后对路面力学性能影响的报道相对匮乏。玻纤格栅是一种新型土工材料, 具有延伸率低、强度高、抗变形能力大等优点, 在沥青路面中应用日益增多, 研究表明: 玻纤格栅可提高沥青路面疲劳寿命、抗车辙能力、抗裂性能等^[5-8]。

为提高碳纤维发热电缆的铺设效率与沥青路面的抗裂性能, 将玻纤格栅与碳纤维发热电缆组合应用, 通过半圆弯拉 (SCB) 试验, 利用数字图像相关技术, 对内置碳纤维发热电缆、碳纤维发热电缆-玻纤格栅组合结构的沥青混凝土试件进行抗拉试验, 并用 ABAQUS 模拟热耦合作用下的路面结构, 分析升温性能和抗车辙能力。

表 3 AC-13 沥青混合料级配
Table 3 AC-13 asphalt mixture grading

16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	<0.075 mm
100	95	76	53	37	26	19	14	10	6

1.2 试验测试方法

半圆试件制备方法如图 1 所示, 试件厚度 47.5 mm。为模拟结构实际存在的缺陷和损伤形成的裂缝, 底边中点预切口深度为 1 cm。碳纤维发热电缆或碳纤维发热电缆-玻纤格栅组合结构埋在 SCB 试件的中部。利用万能试验机加载试件, 加载速率 2 mm/min, 试验温度 25 ℃。采用 CCD 工业相机采集图像, 采集频率为 2 s/frame, 加载装置如图 2 所示。为方便后文叙述, 将仅埋设碳纤维发热电缆的试件命名为 CHC (Carbon fiber heating cable, CHC), 埋设碳纤维发热电缆-玻纤格栅组合结构的试件命名为 CHG (Carbon fiber heating cable-glass fiber grille, CHG)。

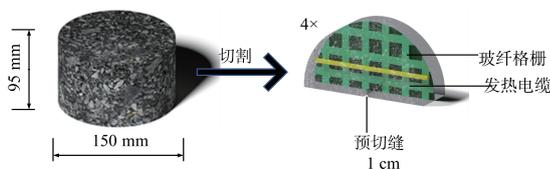


图 1 半圆试件制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of semicircular specimen

1 试验

1.1 材料

试验中采用山东泰安某工程材料厂家生产的 EGA50-50 玻纤格栅, 玻纤格栅技术指标见表 1; 选用常用的 AC-13 型级配作为试验级配, 沥青技术指标见表 2, 级配组成见表 3, 计算得到最佳油石比为 4.5%; 碳纤维发热电缆长度为 9.2 m/根, 直径 5.2 mm, 输入功率 20 W/m, 外包材料为聚四氟乙烯+聚氯乙烯+聚乙烯。

表 1 玻纤格栅技术指标
Table 1 Technical specifications of glass fibre grating

网格尺寸/mm	断裂强度/ (kN · m ⁻¹)		伸长率/%		幅宽/m
	经向	纬向	经向	纬向	
25.4×25.4	≥50	≥50	≤4	≤4	1.0~6.0

表 2 沥青技术指标表
Table 2 Technical specifications of asphalt

延度	软化点	针入度	密度
168.5	47.6	71.2	1.018

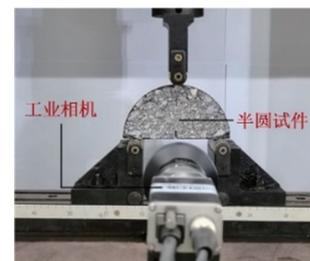


图 2 半圆抗拉试验
Fig. 2 Semicircular tensile test

2 试验结果分析与讨论

2.1 横向抗拉应变云图

图 3 为不同结构沥青混凝土在达到最大承载力时的横向应变云图。由图 3 可知, 达到最大承载力时, 三种结构沥青混凝土最大应变值皆位于裂缝尖端处。其中, 基质沥青混凝土最大应变为 0.05, CHC 结构最大应变为 0.04, CHG 结构最大应变为 0.035。并且 CHG 结构应力集中的范围较小。

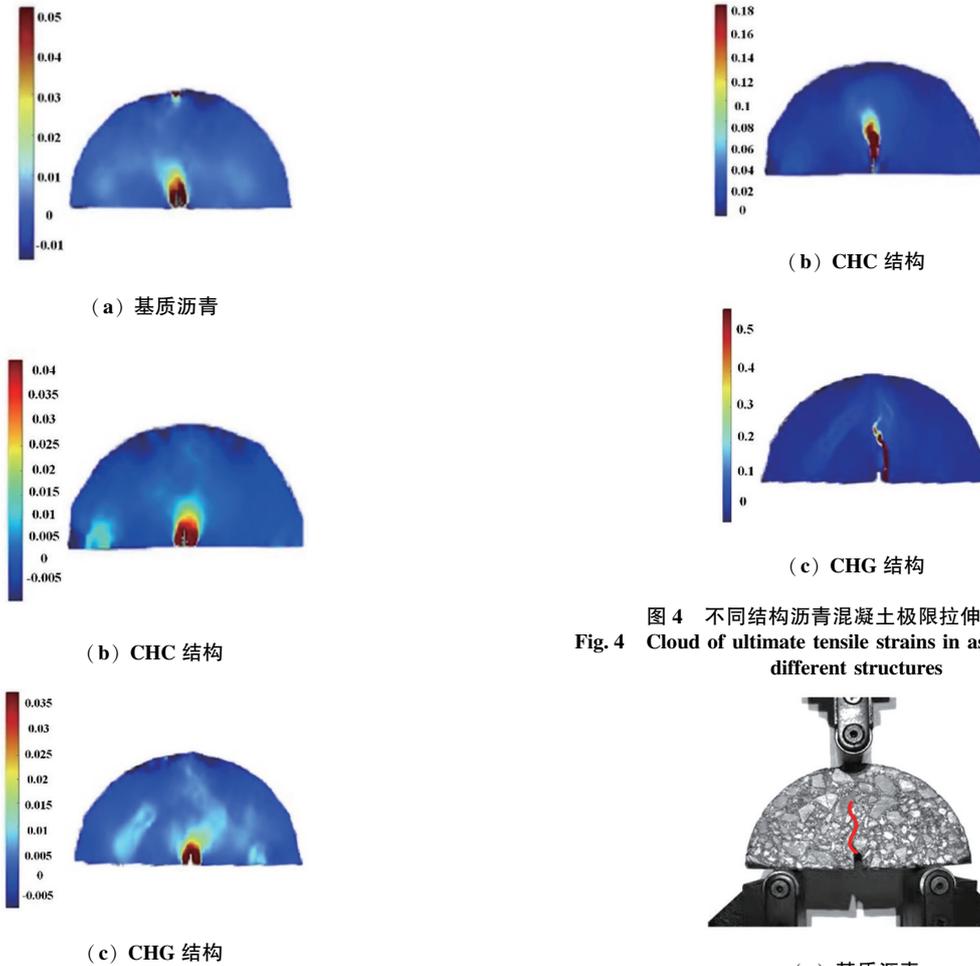
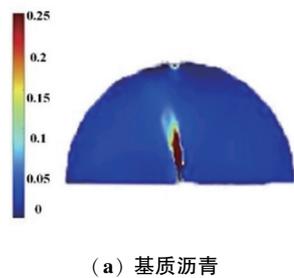


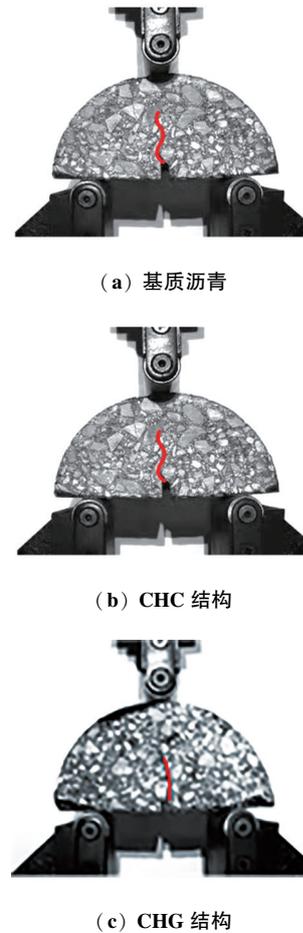
图 3 不同结构沥青混凝土横向应变云图
Fig. 3 Transverse strain clouds for different structures of asphalt concrete

图 4 为不同结构沥青混凝土横向极限拉伸应变云图。由图 4 可知，基质沥青混凝土极限拉伸应变为 0.25，CHC 结构极限拉伸应变为 0.18，CHG 结构极限拉伸应变为 0.5。结合半圆灰度图像（图 5），三种结构裂纹面的扩展路径均近似呈贯穿型直线上升。



(a) 基质沥青

图 4 不同结构沥青混凝土极限拉伸应变云图
Fig. 4 Cloud of ultimate tensile strains in asphalt concrete of different structures



(c) CHG 结构

图 5 不同结构沥青混凝土破坏灰度图像
Fig. 5 Grayscale images of asphalt concrete damage of different structures

材料科学

2.2 荷载-CMOD 曲线分析

采用数字图像相关技术对 CMOD 进行实时测试,结果如图 6 所示。分析可知,荷载-CMOD 曲线大致可以分为以下 3 个阶段:裂缝不扩展阶段(OA)、裂缝稳定扩展阶段(AB)和裂缝失稳扩展阶段(BC)。OA 段发生在加载初期,该阶段荷载较小,曲线变化趋势接近直线,3 种不同结构的沥青混凝土 CMOD 基本重合,此时荷载主要由沥青基体承担。到达拐点 A 点后,随着荷载不断增大,曲线曲率开始降低,荷载与 CMOD 之间的关系由线性转变为非线性,试件刚度逐渐下降。在此期间,在相同力的情况下,CHG 结构 CMOD 最大,基质沥青次之,CHC 结构 CMOD 最小。

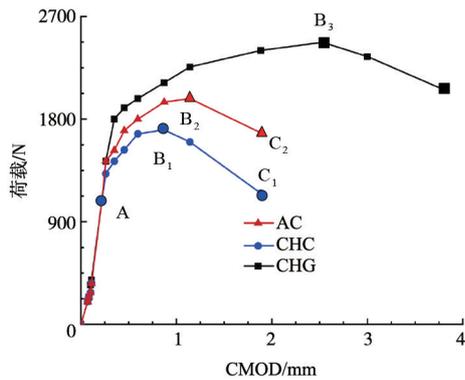


图 6 不同结构沥青混凝土 CMOD
Fig. 6 CMOD for asphalt concrete of different structures

对于 CHG 结构,此时的荷载由沥青基体和组合结构共同承担,二者的加筋作用提高了沥青混凝土抵抗开裂的能力。而对于 CHC 结构,发热电缆的加筋作用无法完全弥补埋设电缆时带来的缺陷,将加速裂缝扩展。随着荷载进一步增大,CMOD 也逐渐增加,直至达到峰值荷载,荷载-CMOD 曲线出现第二个拐点 B,此时 CHG 结构的 CMOD 明显高于基质沥青和 CHC 结构。在此之后,裂缝进入失稳扩展阶段,荷载开始下降,CMOD 变化明显加快。与其余两种结构相比,CHG 结构的混凝土曲线下降段较为平缓,且具有更高的峰后持荷能力。说明组合结构不仅有效提高了沥青混凝土的延性,在试件开裂后,还能使沥青混凝土保持较高的承载力。

CHC 结构和 CHG 结构的破坏情况如图 7 所

示,CHG 结构的玻纤格栅横向纤维束被拉断。两种结构的碳纤维发热电缆均被拔出,并且发热电缆外皮皮质软,强度低,最终导致脱落。

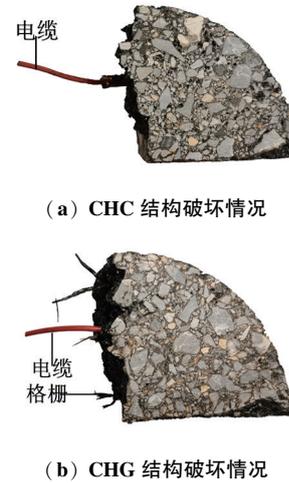


图 7 CHC、CHG 结构沥青混凝土破坏情况
Fig. 7 Damage to CHC and CHG structural asphalt concrete

2.3 断裂能、断裂韧性

断裂能和断裂韧性是从不同角度衡量材料抵抗裂纹扩展能力的指标,具有重要理论和实际意义。

单位面积中形成断裂区需要消耗的能量值为断裂能,图 8 中 CHG 结构的荷载-挠度曲线与坐标轴围成的阴影部分面积就是断裂能的大小^[9]。

弹塑性条件下,当应力强度因子 K 增大到某一临界值 K_{IC} 时,裂缝会发生失稳扩展, K_{IC} 称为断裂韧度^[10]。

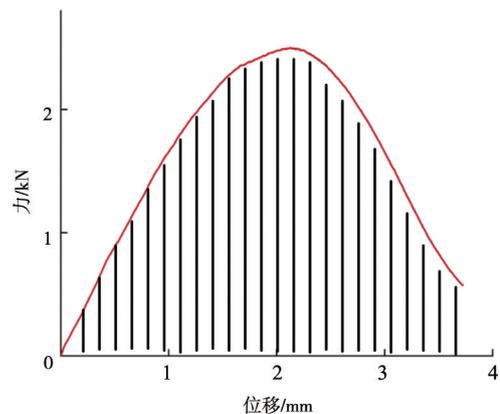


图 8 CHG 结构的力-位移曲线
Fig. 8 Force-displacement curves for CHG structures

$$K_{IC} = \sigma_{\max} \left(\frac{a}{w} \right) \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = -4.9965 + 155.58\left(\frac{a}{w}\right) - 799.94\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 2141.9\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 2709.1\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 1398.6\left(\frac{a}{w}\right)^5 \quad (2)$$

式中： K_{IC} 为试件的断裂韧性， $\text{N}/\text{mm}^{1.5}$ ； σ_{\max} 为试件最大抗拉强度， N/mm^2 ； w 为试件宽度， mm 。

断裂能、断裂韧性变化规律见表 4。

表 4 不同组合结构的断裂能、断裂韧性及其增益比
Table 4 Fracture energy, fracture toughness and their gain ratios for different combinations of structures

结构类型	断裂能 G_f/J	断裂能增益比	断裂韧度 $K_{IC}/(\text{N}/\text{mm}^{1.5})$	断裂韧性增益比
基质沥青	4354.34	1	15.26	1
CHC 结构	3941.24	—	13.28	—
CHG 结构	5289	1.21	17.61	1.15

从表 4 可得，加入玻纤格栅后，沥青混凝土断裂能和断裂韧性显著提高，其中断裂能提高的最为明显，增益比达到 1.21。而 CHC 结构的断裂能和断裂韧性与基质沥青相比，降低了 10% 左右。

2.4 不同结构沥青混凝土断裂机理分析

对于 CHC 结构，在加载前期发热电缆对沥青混凝土起到加筋作用，可在一定程度上削弱应力集中。但是加入发热电缆类似于实际工程的“开槽效应”。随着荷载不断增大，发热电缆本身的材质和“开槽效应”给混凝土带来的不利影响逐渐占据主导地位，降低了混凝土的延性，抵消了发热电缆的加筋作用给沥青混凝土带来的断裂消耗能量的提高。

对于 CHG 结构，高强度的玻纤格栅与上部电缆共同对沥青混凝土起到加筋增韧作用，这种加筋作用在抵抗裂缝发展过程时需要消耗大量能量，因此，断裂能得到提升。随着加载力不断增大，玻纤格栅提高了试样横向拉伸强度，使得破坏拉伸应变显著增大，有效提高沥青混凝土的破坏延性，抑制裂缝开裂，增大了失稳断裂韧度。并且格栅网格相互间格栅条可以分散所受到的拉应力，降低一部分应力集中。

加入发热电缆不仅具有“开槽效应”，还将沥青混凝土整体分为上、下两层。这种分层作用降低了沥青混凝土上下面层的接触面积，降低沥青混凝土的整体稳定性，进一步减弱混凝土的抗裂性能。碳纤维发热电缆-玻纤格栅组合结构虽然同样具有分层作用，但是玻纤格栅表面粗糙程度大，增加了网格和集料之间的包裹力，让集料充分嵌入网孔中，形成机械嵌锁（如图 9），限制集料运动，有效约束混凝土变形，提高结合面处沥青混合料的稳定性。荷载施加过程中，部分荷载做的功将被格栅网格的嵌锁作用所吸收，因此增大了混凝土断裂过程中消耗的总能量，提高沥青混凝土抗裂性能，抑制裂缝发展。

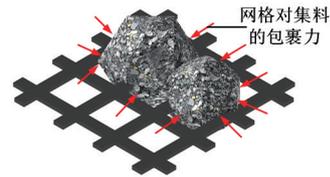


图 9 格栅网格对集料的作用机理
Fig. 9 Mechanism of the action of the grid on the aggregates

3 路面结构数值模拟

3.1 有限元建模

采用 ABAQUS 有限元分析软件，建立路面结构的数值模型，如图 10 所示。模拟在加热过程中路面的温度场变化情况和车辙变化情况。

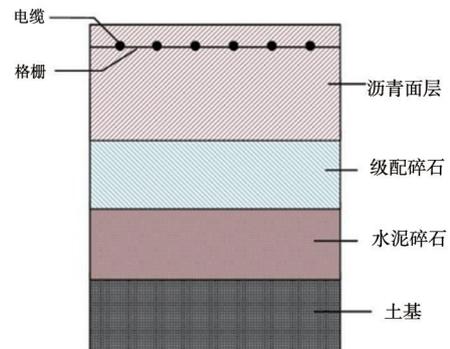


图 10 路面结构剖面图
Fig. 10 Section of pavement structure

建模方法如下：

(1) 分析分为两步。第一步为温度-位移耦合分析步，主要考虑碳纤维发热电缆升温作用；第

材料科学

二步为粘性分析步，主要考虑车辆荷载的作用。玻纤格栅仅考虑力学性能，不考虑传热性能。材料热力学参数和力学参数见表 5~表 6。其中，沥青面层为黏弹性，采用 Prony 级数表示^[11]。基层和土基只考虑弹性性质，不受温度影响。

表 5 材料热力学参数

Table 5 The rmodynamic parameters of materials

材料	厚度 /m	密度 / (kg/m ³)	导热系数 / (W/m ² ·℃)	比热 / (J/kg·℃)	弹性模量 /MPa	泊松比
面层	0.27	2300	2.05	1168	0℃	1400
					20℃	800
级配碎石	0.20	1800	1.39	921.1	1100	0.20
水泥碎石	0.20	2077	1.1	810	1200	0.25
土基	0.20	1700	1.3	860	100	0.40
发热电缆	—	2000	19.2	800	500	0.25
玻纤格栅	—	2200	—	—	36000	0.40

表 6 沥青混合料力学参数

Table 6 Mechanical parameters of asphalt mixture

g_i	k_i	τ_i
0.300	0	0.03
0.166	0	0.06
0.100	0	6.34
0.098	0	50.71
0.070	0	239.90
0.034	0	600.50

(2) 路面整体初始温度和环境温度均为 -5℃, 风速为 3 m/s, 铺装功率为 300 W/m²。

(3) 将双圆均布荷载 $P=100$ kN 简化成 2 个尺寸为 18.6 cm×19.2 cm 的矩形，中心间距为 31.4 cm，轮胎接地压力 p 为 0.7 MPa^[12,13]。

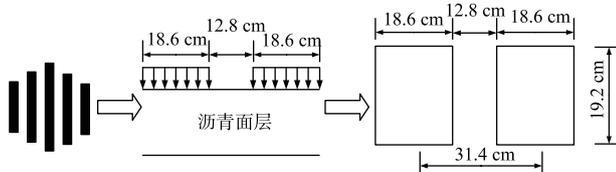


图 11 车辆荷载简化

Fig. 11 Simplification of vehicle load

采取“以静代动”的方法，第二步时长设置为荷载累计作用时间，荷载单次作用时间为：

$$t_0 = \frac{0.36P}{nvpBv} \quad (3)$$

式中： B 为轮胎接地宽度； n_w 为轴的轮数； v 为行驶速度。

在本文中荷载作用时间和加热时间均为 36000 s。

3.2 数值模拟结果对比

图 12 为路面温度分布云图。由图 12 可知，路面温度分布均匀，且加热效果较好，路面温度达到 4℃ 左右。

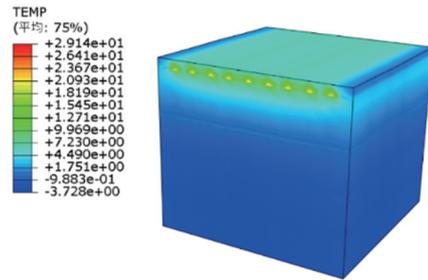
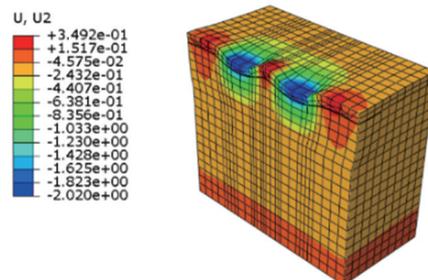


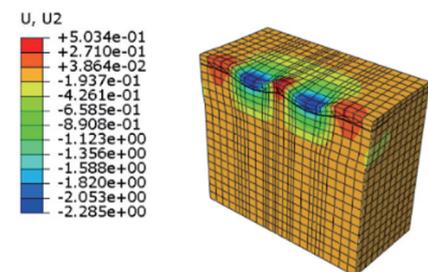
图 12 路面结构温度场

Fig. 12 Temperature field of pavement structure

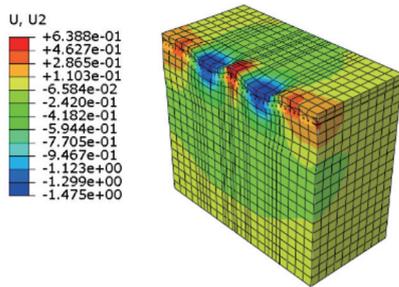
图 13 为电缆加热过程中车辆荷载对路面的车辙影响对比。



(a) 未升温的路面车辙



(b) CHC 结构车辙



(c) CHG 结构车辙

图 13 车辙深度对比图

Fig. 13 Comparison of rut depth

由图 13 可知，在相同环境条件下，未升温的路面车辙深度为 2.2 mm，CHC 结构的车辙深度为 2.285 mm，CHG 结构的车辙深度为 1.475 mm。

沥青是一种黏弹性材料，受温度影响较大。当温度较低时，路面刚度较大，温度升高后，路面刚度逐渐降低。虽然碳纤维发热电缆提高了路面的融雪性能，但是在加热过程中使得沥青路面刚度降低，路面变软，车辙深度增加。而玻纤格栅的嵌锁作用抑制了塑性变形的累积，提高了沥青混合料结合面处的稳定性，进一步提高了沥青路面的抗车辙能力，使得车辙深度即使在路面升温的情况下也可以小于未升温的情况；同时，这种嵌锁作用也可以分散由加载轮带来的荷载应力。

4 结论

(1) 碳纤维发热电缆的加筋作用可以削弱应力集中。但在加载后期本身的材质和“开槽效应”、“分层作用”给混凝土带来的不利影响逐渐占据主导地位，使沥青混凝土抗裂性能降低了约 10% 左右。加入玻纤格栅后弥补了发热电缆带来的缺陷，与电缆共同对混凝土起到加筋作用，提高了混凝土的延性和拉应力，增强了抗裂性能。

(2) 加入碳纤维发热电缆后，对路面的升温性能较好，路面温度在 4℃ 左右。但由于沥青受温度影响较大，在电缆加热过程中使得沥青刚度降低，路面变软，抗车辙能力降低。

(3) 玻纤格栅网格的嵌锁作用可以限制集料

运动，有效约束混凝土变形，增强了沥青的抗裂性能和抗车辙能力。

参考文献

- [1] AG M, OZGUR G, SEVKAT E. Electrical resistance heating for deicing and snow melting applications: experimental study [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160 (APR.): 128-138.
- [2] SU X, LAI Y, LIU Y, etc. Research of deicing and melting snow on airport asphalt pavement by carbon fiber heating wire [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020 (2020): 1-6.
- [3] 李春鸣, 许巍, 李光元, 等. 连续式碳纤维自发热机场道面融雪化冰试验研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2015 (9): 64-69.
- [4] 袁玉卿, 张业, 郭斌. 预埋碳纤维发热线沥青混凝土融雪试验研究 [J]. 中国科技论文, 2019, 14 (6): 637-641.
- [5] 唐威远, 邹凯, 唐瞻鹏. 玻纤格栅对旧水泥路面拓宽拼接的力学影响分析及应用 [J]. 中外公路, 2018, 38 (6): 44-47.
- [6] 莫石秀, 孔令云. 土工材料及其加铺位置对沥青混合料抗裂性能影响研究 [J]. 公路交通技术, 2016, 32 (4): 39-42+48.
- [7] 汪日灯, 应巩邦, 李向航. 玻纤格栅位置对机场沥青加铺层性能的影响 [J]. 中国科技论文, 2020, 15 (12): 1371-1376.
- [8] GAO B, WANG M, HAO Z H. Bending behavior of glass fiber grid reinforced guss asphalt [J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 744-746: 754-757.
- [9] 薛启超, 张井财, 何建, 等. 玄武岩纤维混凝土断裂性能实验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37 (8): 1027-1033.
- [10] 宋卫民, 徐子浩, 吴昊, 等. 一种沥青混凝土中低温断裂性能统一评价方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (7): 2386-2393.
- [11] 刘强. 不同干湿状态下沥青混合料细观水损规律分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [12] 陈磊磊, 陈道燮, 陈超录, 等. 基于沥青路面结构力学行为的车辙深度控制标准 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20 (6): 62-70.
- [13] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用 [M]. 东南大学出版社, 2008.