

开发与应用

碳纤维在道路工程中自诊断及电热性能研究进展

刘鹏飞¹ 刘志胜²

(1.山西省交通科学研究院,太原 030006;2.山西交通控股集团有限公司科技部,太原 030006)

摘 要 为了系统掌握国内外碳纤维道路工程功能特性的研究现状,对碳纤维材料在道路工程中的应用情况进行了调研,分析了不同类型碳纤维材料的用途及功能特性,为碳纤维的推广应用提供理论依据。调研结果表明:荷载作用下,碳纤维及其复合材料的电阻率与应变呈现出良好的规律性,力-电机敏特性明显,可用于结构病害预警;在路面结构中,将碳纤维材料应用于地热系统,能有效地提高路面结构温度,起到良好的融雪化冰作用。

关键词 道路工程,碳纤维,诊断性能,电热性能,研究现状

Review on disease diagnosis and electrothermal performance
of carbon fiber in roadLiu Pengfei¹ Liu Zhisheng²(1.Shanxi Transportation Research Institute,Taiyuan 030006;2.Department of Science and
Technology,Shanxi Communications Holdings Group Co.,Ltd.,Taiyuan 030006)

Abstract In order to master the research status about functional features of carbon fiber for road engineering at home and abroad comprehensively, the application of carbon fiber materials in road engineering were investigated, the usage and functional features of carbon fibers and composites were analyzed, which provided the theoretical basis for the popularization and application of carbon fibers. The results showed that the resistivity and strain of carbon fiber and its composites had a good regularity under the action of load, which was called that force-motor sensitivity was significantly. So carbon fiber and its composites can be used for structural disease warning. In the pavement structure, the temperature of pavement structure can be improved by geothermal system of carbon fiber material, which played a good melting snow effect.

Key words road engineering, carbon fiber, disease diagnosis, electrothermal performance, research status

随着道路工程学科的发展,沥青路面取得了较为显著的成就。在高等级公路中,“万能”沥青路面的占有率已经超过 95%,但其仍存在承载力弱、耐久性差的缺点。尤其在环境特殊地区,道路工程承受着环境、荷载的双重作用,路面内部变化难以预测,高温车辙、低温开裂、层间脱落、拥包、松散等病害严重影响着路面的使用寿命^[1]。沥青路面的破坏大多属于疲劳破坏,在病害发生的初期、甚至中期,路面结构仍可发挥应有的功效,若能在破坏发生的初期、中期进行及时的养护,则可极大地提高路面的路用性能^[2]。

碳纤维是一种由片状石墨微晶等有机纤维沿固

定方向堆砌而成,并经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料,通常碳含量大于 95%,其兼具碳材料高强抗拉力和纤维柔软可加工性两大特征,被称为“新一代增强纤维”^[3]。与普通的纤维相比,碳纤维具有良好的导电、导热性能,且在有机溶剂、酸、碱中不溶不胀,耐蚀性突出;更重要的是它具有明显机敏特性,在应力变化的情况下,其电阻随之发生变化^[4]。目前,碳纤维的应用形式主要包括纳米碳纤维、碳纤维粉体、碳纤维带等。近年来,道路工程界多把碳纤维作为预警病害的智能材料,在碳纤维基体材料的结构将发生变化时,承担感知任务的材料将这种变化(如应力、应变、压力、位移、温度)传递到

基金项目:山西省青年科技研究基金(201701D221060);碳纤维沥青混凝土力-电机敏特性试验研究;山西省交通建设科技项目(16-2-07);沥青混凝土桥面铺装病害预警技术研究

作者简介:刘鹏飞(1986-),男,本科,工程师,研究方向为路面材料研发。

特定的结构中进行分析处理^[5]。为了尽快将碳纤维应用于道路工程病害监测,必须掌握碳纤维在道路工程的研究进展。为此,笔者对国内外碳纤维自诊断性能及电热性能的研究现状进行了调研,为碳纤维的推广应用奠定基础。

1 碳纤维带

碳纤维按照性能需求可加工成不同规格的碳纤维带、碳纤维布等。道路工程中所用的碳纤维带是由碳纤维长丝经编织而制成的柔软片材。在编织的过程中,将大量的碳纤维长丝沿主要方向平铺,用较少的短碳纤维将碳纤维长丝编织连接起来,构成以主方向受力的碳纤维布或碳纤维带。目前碳纤维主要应用于高科技领域(强度高、密度小)、汽车飞机制造领域(刹车系统热稳定性高)、体育休闲领域(不同方向强度、模量较高)、建筑物加固领域(公路隧道、桥梁结构补强)等。

1.1 力-电诊断性能

黄莉等^[6]将碳纤维带粘附到钢梁上进行了4点弯曲疲劳试验,对碳纤维带的频率响应、线性度、重复性、灵敏度等进行了系统研究。研究表明:在拉应力0~70MPa范围内,碳纤维带作为智能传感材料具有较好的力敏效应,平均灵敏度高达88,可以定性判断脉冲载荷的大小,结果如图1所示。

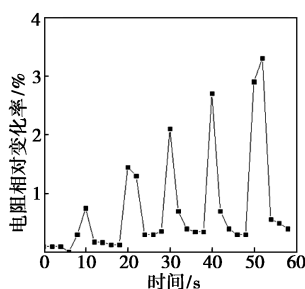


图1 电阻相对变化率与脉冲载荷幅值间的关系

何伟等^[7]将单向碳纤维带、正交碳纤维布、碳纤维毡作为增强材料制备了复合树脂材料,系统研究了拉伸条件下材料电阻率和应变之间的相关性。研究表明:随着应变的增加,电阻率呈现明显的增加趋势,单向碳纤维带、正交碳纤维布复合材料电阻率和应变之间存在突变点;而碳纤维毡的电阻率和应变基本成直线关系,更适合作为机密材料使用。

张小玉^[8]介绍了碳纤维智能层应变传感技术,分别对树脂、水泥作为基体的碳纤维复合材料的传感特性进行了研究,并建立了受力结构在全场应变监测的理论方法。结果表明:随着变形的增加,碳纤

维复合材料的电阻增加;当卸载时,电阻立即减小,表现出非常明显的变形-电阻敏感性。随着循环次数的增加,碳纤维复合材料的电阻整体出现下降的情况,并逐渐趋于稳定。同时,通电处理可使得碳纤维材料中的纤维建立更好的搭接关系,导电性能更稳定。碳纤维毡的传感灵敏度高于300,可以直接使用数字电表测量。

徐学春^[9]研究了荷载作用下碳纤维复合材料的电阻与力学性能的相关性,并采用有限元方法验证了荷载作用下碳纤维材料损伤失效预测的有效性,为材料损伤诊断提供了依据,结果如图2所示。结果表明:碳纤维复合材料的电阻、损伤程度随着拉伸应变、压缩应变、弯曲应力的增大而提高,并确定了电阻增幅阈值可作为判定拉伸、压缩状态下是否发生损伤的诊断依据。

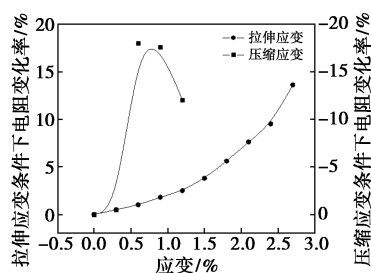


图2 电阻变化率与应变的关系

1.2 电热性能

袁玉卿等^[10]将碳纤维绳作为发热材料预埋到沥青混凝土中,用于路面加热融雪,研究了不同尺寸碳纤维绳对试件加热温度的影响,并分析了用电功率及用电量,结果如图3所示。研究表明:随着通电时间的延长,沥青混凝土的温度升高;碳纤维绳越短,沥青混凝土发热越快,5~10min后,试件温度与碳纤维绳温差逐渐缩小。断电后,沥青混凝土降温速度较为缓慢,40min后逐渐趋于稳定。实验过程中实测了碳纤维绳的电阻,计算了发热功率和单位面积发热功率,同时建立了试件内外温度差与通电时间关系。

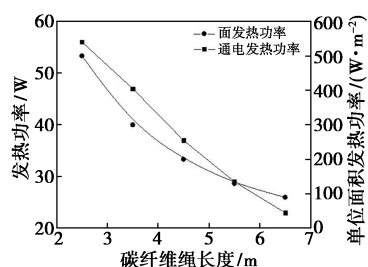


图3 不同长度碳纤维绳的发热功率

朱德举等^[11]将碳纤维带置入室内的地暖系统,将宽 50mm、间距 200mm 的碳纤维带放到水泥砂浆中替代电热板,研究了不同位置的温度变化。研究表明:碳纤维地热系统的平均升温速率可达 $1.83^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 竖直方向的温度变化梯度明显高于水平方向,碳纤维带电阻稳定性较好。同时,增设温控装置可明显降低能耗。

赵宏明^[12]将碳纤维线作为发热体置入沥青混凝土内部,研究其在桥面融雪化冰中的功效并对比了不同类型的碳纤维发热线、不同布置方案下的桥面升温性能。研究表明,发热线间距小于 100mm 的混凝土板表面温差小于 2°C , 满足融雪化冰板面温度均匀性要求,且发热线的保护层厚度在 20~60mm 间变动时,对混凝土板表面温度场分布影响较小。发热线间距为 100mm 的混凝土板可以满足 -25°C 的化雪要求。

为了确认碳纤维应用于沥青混凝土道路的融雪化冰的可行性,宋世德等^[13]对长期荷载作用下碳纤维/玻璃纤维格栅的热稳定性进行了研究。研究表明:当试件变形过大时,碳纤维由于受到骨料的挤压,电阻会出现明显的增大甚至断裂。同时,在碳纤维束受损的情况下,格栅增强沥青混凝土通电以后,仍可以形成较好的导电网络,能够有效地清除试件表面的积雪。

姜宝龙^[14]将格栅的经向材料设置为碳纤维,纬向材料设置为耐碱玻璃纤维,研究了格栅增强沥青混凝土加热的稳定性,评价了格栅增强沥青混凝土的融雪化冰效果。研究表明:当试件状态良好时,碳纤维格栅的电阻没有明显的变化;当试件出现较大变形时,碳纤维格栅的电阻明显增大,甚至被破坏。在碳纤维格栅受损的状况下,格栅增强沥青混凝土的加热效率仍处于较高水平,可有效地起到融雪化冰的作用。

王华军等^[15]通过在行车道路面上铺设两条宽度为 0.5m 的碳纤维-水泥乳化沥青砂浆路板,形成具有微波辐射下融冰化雪功能的加热带,研究了碳纤维用量、碳纤维表面处理工艺、碳纤维长度等因素与复合材料力学性能之间的关系。

祁显宽^[16]将格栅的经向材料设置为碳纤维和玻璃纤维的混合体,将纬向材料设置为玻璃纤维(如图 4 所示),测试了复合玻璃格栅的拉伸断裂强度,推导了复合格栅的电阻与幅宽、网孔与电阻和发热功率的关系,确定了不同功率下的碳纤维布置方案,最后建立了复合格栅融雪化冰路面模型。研究表

明:复合格栅的拉伸性能受纤维细度和涂层材料的影响,复合纤维格栅布设在沥青混凝土路面 5cm,可以保证加热过程中路面的温度能较快地升到 0°C 以上,且电热过程中电阻基本保持不变。同时,碳纤维-玻璃纤维格栅铺设到沥青混凝土路面中可以提高路面的动稳定度,提高路面的稳定性。

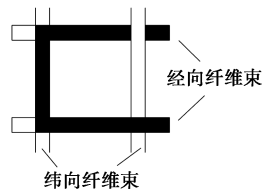


图 4 碳纤维格栅

李炎锋等^[17]研究了发热电缆路面融雪化冰机理,并采用有限元分析方法对路面温度变化进行研究,得到不同气候条件下道路表面及结构层内的温度分布及升温规律。研究表明,依据北京地区近 10 年的气温数据,铺装功率为 $250\sim 350\text{W}/\text{m}^2$ 的发热电缆可满足北京地区路面融雪化冰的要求。

2 碳纤维导电沥青混凝土

导电沥青混凝土是一种新型、具有特种功能的混凝土,只调节导电相材料的含量就可以方便地调节导电混凝土的电阻率。工程建设要求导电沥青混凝土在满足工程强度的基础上,具有良好的导电性。其主要的性能指标包括强度、导电率或电阻率以及满足一些特殊性能要求的导热性、耐久性等。目前,导电混凝土技术在道路病害预警、融雪化冰等方面越来越被人们重视,尤其利用导电沥青混凝土对桥面铺装层病害进行预警,不但可以实时监测桥面路用性能,还能融化桥面冰雪,确保桥面道路畅通和行车安全。

2.1 路用性能

查旭东等^[18]将短切聚丙烯腈(PAN)纤维掺入苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青混合料中,制备了导电沥青混凝土 AC-13,研究了碳纤维掺量对路用性能的影响,相关规律如图 5 所示。从图 5 可见,与普通沥青混凝土相比,碳纤维沥青混

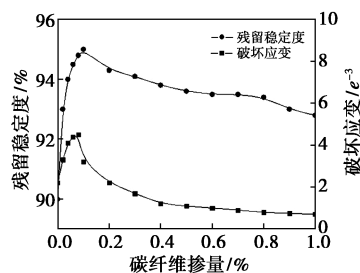


图 5 PAN 基碳纤维路用性能

凝土的路用性能均明显提高。研究还发现,碳纤维导电沥青混凝土的残留稳定度、破坏应变、动稳定度等都随碳纤维掺量的增加呈现相同的变化趋势,均在0~0.1%碳纤维掺量范围内呈递增趋势。

冯新军等^[19]研究了石墨和短切PAN纤维对沥青胶浆路用性能的影响。研究表明,石墨碳纤维沥青胶浆的软化点随着石墨和碳纤维掺量的增加均呈现增大的趋势,而延度呈现减小的趋势。在碳纤维沥青胶浆中加入石墨,随着石墨掺量的增加,抗车辙因子($G^*/\sin\delta$)呈现先下降后上升的趋势;而在石墨沥青胶浆中加入碳纤维, $G^*/\sin\delta$ 一直呈增大状态。石墨碳纤维沥青胶浆的弯曲劲度模量随着石墨和碳纤维掺量的增加都呈现增大的趋势,而蠕变速率呈现先增加后减小的趋势。

2.2 导电性能

姚占勇等^[20]以碳纤维和石墨作为导电材料,制备了导电沥青砂浆,分析了不同碳纤维掺量、石墨与碳纤维两相复合对沥青砂浆电阻率的影响,如图6所示。

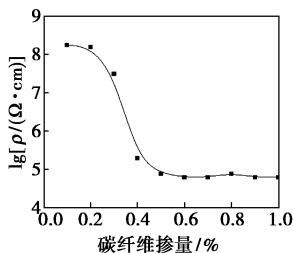


图6 碳纤维掺量对电阻率的影响

注: ρ 为电阻率。

从图6可以看出:随着碳纤维掺量的增加,沥青砂浆的电阻率逐渐减小,碳纤维掺量在0.2%~0.4%时,沥青砂浆的电阻率下降明显,电阻率为 $1.64 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$;而随着石墨掺量的增加,沥青砂浆的电阻率变化呈线性下降趋势。在碳纤维沥青砂浆中加入石墨,当石墨掺量为20%时,出现电阻率变化的拐点,电阻率为 $0.95 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

高宇星^[21]将碳纤维和石墨添加到沥青混合料中,制备了导电沥青混凝土AC-20。研究表明:碳纤维含量大于0.3%时,导电沥青混凝土电阻变化率增加;碳纤维含量0.6%为临界值,此时电阻率变化趋于平缓。提高碳纤维和石墨掺量后,沥青混凝土的电导率明显提高,此时碳纤维的掺量变化对电阻率的影响不大。在导电材料掺量较小的情况下,导电沥青混凝土试件的电阻率随沥青用量的提高而明显升高;而在导电材料掺量较高的情况下,沥青用量

也相应增加,但沥青用量对电阻率的影响不明显。

张园等^[22]将碳纤维、石墨、钢渣复合作为导电材料,制备了Sup-12.5导电沥青混凝土。研究表明:3种导电材料中石墨对沥青混凝土的电导率提升效果最优,钢渣较差;石墨与碳纤维复合使用仍然难以达到融雪化冰功效所需的导电率;石墨、碳纤维、钢渣三相复合时,可赋予沥青混凝土较好的电导率,电导率可达0.1S/m。

2.3 自诊断性能

Hashim^[23-24]将纳米碳纤维(CNF)添加到沥青混凝土中制备了导电沥青混合料,考察了沥青混凝土对荷载反应能力的影响,并将其定义为沥青混凝土的压阻特性,并系统讨论了荷载与应力-应变响应的关系、荷载与电阻率的变化关系。研究表明,两种类型的碳纤维导电沥青混凝土均显示了积极的压敏电阻响应,如图7所示。由于受温度的影响,应变发生后随即产生电压响应,且随着温度的升高,电压响应比应变发生的时间更为靠后。

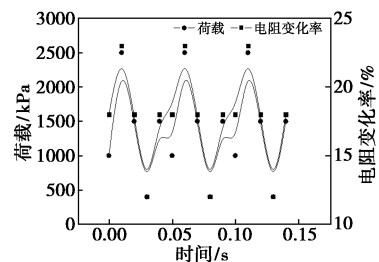


图7 荷载变化对电阻率的影响

姚占勇等^[20]将碳纤维和石墨作为导电材料,采用0.4%碳纤维、10%石墨掺量的导电沥青砂浆试件,通过单轴循环加载试验分析了导电沥青砂浆的压敏性。研究表明:加载循环过程中,沥青砂浆的电导率随荷载的增加而变大,随荷载的变小而变小;电导率的变化频率与循环荷载的加载频率保持一致,且电导率的峰值与荷载峰值刚好对应(如图8所示)。

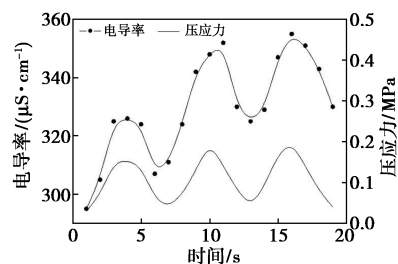


图8 电导率与压应力的变化曲线图

2.4 电热性能

冯新军等^[19]在研究碳纤维导电沥青混凝土路

用性能时,测试了其电热性能。研究表明:在初始时间段内,导电沥青混凝土试件内部温度和表层温度基本呈直线上升,内部升温速率为 $0.03 \sim 0.05^{\circ}\text{C}/\text{min}$,碳纤维掺量越大,升温融冰速度越快,具体如图 9 所示。

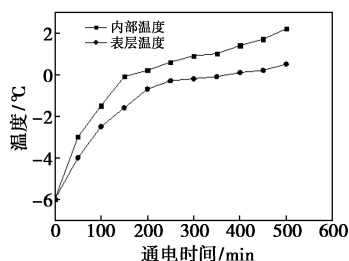


图 9 导电沥青混凝土试件加热升温曲线

匡希龙等^[25]将 4.5% 碳纤维和 20% 石墨加入沥青混凝土中制备了导电沥青混凝土,并将导电碳纤维沥青混凝土嵌入槽形的混凝土中,形成了一种具有加热功能的路面结构,用于路面融雪化冰。在充电时间段内,导电沥青混凝土试件表面平均升温速率约为 $2.3^{\circ}\text{C}/\text{h}$;在断电时间段内,导电沥青混凝土试件表面平均降温速率约为 $1.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

3 结语

对碳纤维材料在道路工程中的应用特征及技术性能进行了调查分析,从材料分类和功能特性方面总结了碳纤维的研究现状,主要结论如下:

(1)随着应变的增加,碳纤维带的电阻率呈现明显的增加趋势,且卸载时电阻立即减小,即表现出非常明显的变形-电阻敏感性,可以定性判断外界载荷的大小以及结构病害。同时,碳纤维带、碳纤维绳等可用于地热系统,起到明显的融雪化冰作用,并可提高路面结构的路用性能。

(2)碳纤维可明显的提高沥青混凝土的路用性能和沥青混凝土的导电性能,并存在明显的导电“阈值”。同时,碳纤维导电沥青混凝土电导率的变化特征与荷载的施加特征保持一致,具有明显的压阻机敏特性。此外,碳纤维导电沥青混凝土具有较好的电热功能,可起到融雪化冰的作用。

参考文献

- [1] 刘志胜.刚柔复合式路面沥青面层动态应变试验研究[J].重庆交通大学报:自然科学版,2016,35(2):31-34.
- [2] 王子敬.沥青混合料介电常数影响因素研究[J].重庆交通大学报:自然科学版,2016,35(2):45-49.
- [3] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等.碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J].复合材料学报,2015(2):301-316.

- [4] 郭云霞,刘杰,梁节英.电化学改性 PAN 基碳纤维表面及其机理探析[J].无机材料学报,2009(4):853-858.
- [5] 罗益锋,罗晰旻.近期碳纤维及其复合材料的新发展[J].高科技纤维与应用,2014(1):1-9;18.
- [6] 黄莉,龚学进,孙明清,等.连续碳纤维带树脂基复合材料的传感性能实验研究[J].功能材料,2010,41(8):1402-1405.
- [7] 何伟,王钧,王翔,等.具有应变诊断功能的碳纤维机敏复合材料研究[J].功能材料,2007,38(增刊):578-580.
- [8] 张小玉.碳纤维智能层的特性及其场域检测[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [9] 徐学春.碳纤维复合材料载荷下损伤自诊断基础研究及有限元分析[D].南昌:南昌航空大学,2012.
- [10] 袁玉卿,张永健,蔚旭灿.沥青混凝土预埋碳纤维绳发热升温试验[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(1):49-55.
- [11] 朱德举,马拓,刘武华.碳纤维带电热技术的试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(5):131-136.
- [12] 赵宏明.布置碳纤维发热线的混凝土路面及桥面融雪化冰试验研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [13] 宋世德,周卫杰.格栅增强沥青混凝土电热性能数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2016(8):1515-1521.
- [14] 姜宝龙.碳纤维/玻璃纤维格栅增强沥青混凝土加热电阻稳定性研究[D].大连:大连理工大学,2012.9.
- [15] 王华军,赵军,陈志豪,等.太阳能-地热道路融雪系统路面传热特性的数值研究[J].太阳能学报,2007,28(6):608-611.
- [16] 祁显宽.碳纤维-玻璃纤维格栅的性能及其在融雪化冰路面中的应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [17] 李炎锋,武海琴,王贯明等.发热电缆用于路面融雪化冰的实验研究[J].北京工业大学学报,2006,43(5):131-136.
- [18] 查旭东,陈勇强,程景.短切 PAN 基碳纤维导电沥青混合料性能试验研究[J].功能材料,2012,43(7):872-876.
- [19] 冯新军,杨振华.石墨碳纤维导电沥青胶浆路用性能研究[J].建材世界,2014,35(6):17-21.
- [20] 姚占勇,韩杰,商庆森.碳纤维石墨导电沥青砂浆压敏性能研究[J].山东大学学报:工学版,2013,43(1):80-85.
- [21] 高宇星.碳纤维石墨导电沥青混凝土的制备与电热效应研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [22] 张园.多相复合导电沥青混凝土的制备与性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [23] Hashim R R, Mohammad J K. Piezoresistive response of conductive hot mix asphalt mixtures modified with carbon nanofibers[J]. Construction and Building Materials, 2016 (106): 618-631.
- [24] Hashim R R. Impact of carbon nanofibers on the mechanistic and piezoresistive characteristics of asphalt binders and hot mix asphalt mixtures[D]. Louisiana: University of Louisiana at Lafayette, Summer 2012.
- [25] 匡希龙,刘俊.嵌入式导电沥青混凝土路面结构热效应特性研究[J].公路工程,2015,40(2):147-150.

收稿日期:2017-03-28

修稿日期:2018-03-29