

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220519005

文章编号:1672-9331(2023)01-0040-08

引用格式:韩建博,朱福,陈文怡.石墨烯对沥青混合料改性机理研究综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):40-47.

Citation: HAN Jianbo, ZHU Fu, CHEN Wenyi. A review on the modification mechanism of graphene to asphalt mixture[J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech. (Nat. Sci.), 2023, 20(1): 40-47.

石墨烯对沥青混合料改性机理研究综述

韩建博, 朱福, 陈文怡

(吉林建筑大学 交通科学与工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要:【目的】明确碳纳米材料石墨烯在沥青混合料中的作用及研究现状。【方法】通过查阅国内外相关研究文献,对比分析各种石墨烯改性沥青混合料的微观与宏观试验结果和结论,系统归纳石墨烯在沥青混合料中的作用机理与效果。【结果】石墨烯或其衍生材料与沥青混合后被沥青插层和剥离,在内部形成致密的层状结构,有效延缓了沥青的老化,同时增加了沥青中C=C的含量,提高了沥青的表面自由能;石墨烯对沥青混合料的改性机理为隔离作用、化学键能、润滑作用及黏附作用;石墨烯改性沥青混合料的高温抗车辙、低温抗裂、水稳定、压实、抗老化及愈合等性能均显著提高。【结论】石墨烯能有效改善沥青混合料的路用性能,为今后道路工程的发展提供了新思路。降低石墨烯使用成本及石墨烯在沥青混合料中最佳掺量等方面的研究有待深入探讨。

关键词: 沥青混合料; 石墨烯; 作用机理; 路用性能

中图分类号: U416

文献标志码: A

0 引言

目前,沥青混合料是交通运输工程领域应用最为广泛的筑路材料之一,因其高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性及抗老化性等方面存在一定的不足,使沥青路面常常产生车辙、裂缝、松散及坑槽等病害。为了改善沥青混合料的路用性能,国内外已有大量学者开展了沥青混合料改性方法的研究^[1-3]。石墨烯及其衍生材料具有较多的优异特性,它们的出现为沥青混合料带来了崭新的生命力,也为交通运输工程领域的研究打开了新思路^[4-8]。本文通过总结国内外学者对石墨烯及其衍生材料改善沥青混合料路用性能的研究成果,分析石墨烯在沥青混合料中的作用机理与效果,以期对石墨烯改性沥青混合料的研究与应用提供参考。

1 石墨烯在沥青混合料中的作用机理

1.1 隔离作用

沥青路面在使用过程中,常年经受光照、降水及气温变化等自然因素的作用,在自然环境的侵蚀和外部荷载的作用下,沥青路面很容易产生车辙、开裂等病害,导致其使用寿命大大缩短。氧化石墨烯(graphene oxide, GO)为石墨烯的一种衍生材料,能够将部分热氧和水分进行隔离,其分子结构如图1所示。将GO加入沥青后,沥青对其进行插层和剥离,使其内部形成层状结构。同时,GO表面大量的含氧官能团与沥青质组分充分反应形成氢键,这使得形成的层状结构更加致密。这层致密的层状结构既可有效防止沥青中轻组分的挥发,也能防止部分氧气和水分的侵入,阻止内部混合料被进一步氧化,从而减缓老化对沥青混合料低温抗裂及抗水

收稿日期:2022-05-19;修回日期:2022-06-13;接受日期:2022-06-24

基金项目:吉林省教育厅科学技术研究规划项目(JJKH20180199KJ/JJKH20130053KJ)

通信作者:朱福(1981—)(ORCID:0000-0002-5914-7766),男,副教授,主要从事道路工程材料方面的研究。

E-mail: zhufu_1981@163.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

损害性能的影响^[9-11]。

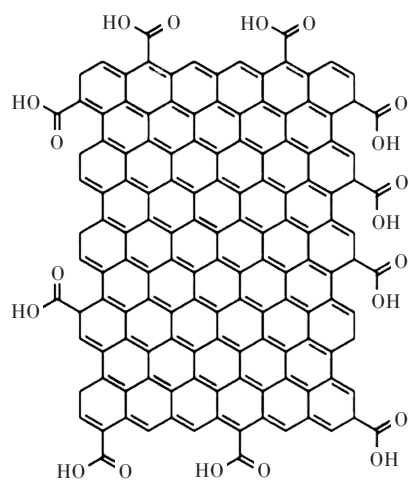


图1 GO的分子结构
Fig. 1 Molecular structure of GO

1.2 化学键能

除碳、氢、氧、氮、硫主要化学成分外,沥青还包含部分微量离子,如钒、镍、铝和硅等。离子之间的键能促使它们形成稳定的沥青大分子结构,且键能越高,结构越稳定。共轭双键C=C是沥青中含量较高的化学键之一,其键能相对较高。孟勇军等^[12]通过对不同掺量的GO改性沥青的傅里叶变换红外光谱对比分析,发现GO的加入使沥青中C=C含量增多。这是因为石墨烯与沥青中的组分相互作用后,使共轭双键C=C发生伸缩振动,产生了新的C=C,改性沥青中出现了新的波峰,从而增强了沥青混合料的宏观力学性能^[13]。

1.3 润滑作用

石墨烯是一种二维碳纳米材料,其体积小、表面效应好,拥有传统材料所不具备的独特的摩擦磨损性能。在热、电、光学等领域,已有许多研究将其作为固体或胶体润滑剂使用^[14]。对于沥青混合料,石墨烯也同样展现出优异的润滑作用。石墨烯具有大比表面积,更易于与沥青中的组分相

吸附,在沥青颗粒间形成润滑层,使沥青混合料颗粒之间的摩擦力降低,水分子也更难吸附在沥青颗粒表面。因此,石墨烯能够有效改善沥青混合料的和易性,大幅减缓水分子对沥青混合料的老化作用^[15-17]。

1.4 黏附作用

沥青与骨料之间的相互作用直接关系到沥青混合料的结构强度、高温稳定性和水稳定性等路用性能。沥青将骨料的表面润湿,产生黏附力,从而使沥青和骨料黏结在一起。GO掺入沥青混合料后,使混合料中液体和固体之间的接触角降低,沥青的色散分量和极性分量提高,表面自由能增强,从而有效改善了沥青对骨料的黏附作用^[18-19]。GO因其较大的比表面积使之更容易吸附沥青中的组分,GO的加入可以提高沥青与骨料之间的黏附力,减缓沥青混合料高温下的层滑移,显著改善沥青混合料的抗断裂性能^[20-21]。此外,GO在沥青中充分分散,且其表面含有丰富的含氧官能团,易与沥青中的组分发生反应形成氢键并产生范德华力,使沥青分子间相互吸引,从而将沥青中的轻质组分和胶质组分固定,增加了沥青混合料内部的交联密度和黏聚力,提高了沥青和骨料之间的抗剥离性^[22-23]。

2 石墨烯在沥青混合料中的作用效果

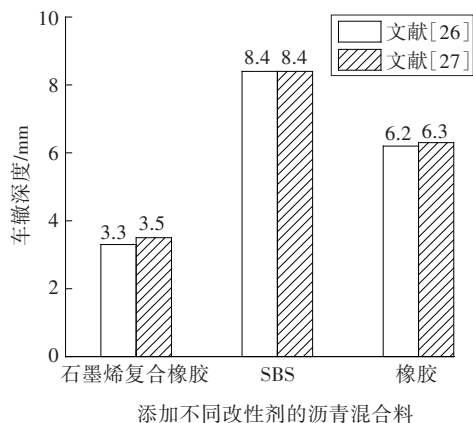
2.1 高温稳定性

高温稳定性是影响沥青混合料抵抗永久变形能力的重要性能之一。国内外已有大量学者研究了石墨烯及其衍生材料对沥青混合料高温稳定性的影响,本文对该方面研究成果进行了汇总,石墨烯改性沥青混合料动稳定度试验结果见表1,不同改性沥青混合料的车辙深度如图2所示。

表1 石墨烯改性沥青混合料动稳定度试验结果^[9,12,24-25]

Table 1 Test results of dynamic stability of graphene-modified asphalt mixture^[9,12,24-25]

石墨烯改性沥青混合料	动稳定度 $S_{DS}/(\text{次}\cdot\text{mm}^{-1})$	对照组沥青混合料	动稳定度 $S_{DS}/(\text{次}\cdot\text{mm}^{-1})$
0.05% 石墨烯+橡胶沥青	15 882	橡胶改性沥青混合料	5 522
0.04% 石墨烯+橡胶沥青	7 482	橡胶改性沥青混合料	5 522
0.05%GO+70#基质沥青	5 754	70#基质沥青混合料	2 689
0.20%GO+SBS 改性沥青	7 796	SBS 改性沥青混合料	3 976
0.05%GO+70#基质沥青	5 903	70#基质沥青混合料	2 909

图2 沥青混合料的车辙深度^[26-27]Fig. 2 Rut depth of asphalt mixture^[26-27]

由表1与图2可知,不同掺量的石墨烯改性沥青混合料高温稳定性存在差异,石墨烯的加入普遍提高了沥青混合料的高温抗车辙能力。在相同条件下,经20 000次碾压,石墨烯复合改性沥青混合料的车辙深度明显降低。

石墨烯与橡胶对沥青混合料复合改性的效果最为显著。这是因为橡胶粉与沥青混合后形成网络结构,并与沥青产生微弱的化学反应;石墨烯的加入,降低了沥青与骨料间的接触角,提高了沥青表面自由能,增强了沥青与骨料之间的黏附性,同时石墨烯表面大量的含氧官能团与沥青中的组分充分反应,形成氢键并产生范德华力,增大了沥青混合料的密实度。研究表明:在石墨烯与橡胶粉的共同作用下,沥青内部结构更加稳定,黏附性更强,沥青混合料的高温稳定性得到显著改善。

2.2 低温抗裂性

沥青混合料的低温抗裂性是我国北方地区路面设计必须考虑的重要性能之一。由于传统石墨烯存在成本高、与沥青相容效果较差等问题,王观竹等^[28]使用聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)对传统石墨烯进行修饰,并与SBS改性剂一起对沥青混合料复合改性,在-10℃下对改性沥青混合料进行低温弯曲试验,结果表明石墨烯与SBS复合改性沥青混合料的低温抗裂性能最优。这是因为使用PVP修饰后的石墨烯在沥青中分散更加均匀,与沥青中的组分充分反应形成氢键并产生范德华力,从而提高了沥青混合料整体强度、稳定

性及低温抗裂性能。

石墨烯纳米微片(graphene nanoplatelets, GNPs)制备方法简便且成本较低,同时GNPs具有优异的力学性能。EISA等^[21]采用GNPs对沥青混合料进行改性,将改性沥青混合料从20℃开始冷却,冷却速率为10℃/h,发现改性沥青混合料的破坏温度降低了2℃;当温度达到-20℃时,GNPs改性沥青混合料的低温破坏应力达到最大。这是由于石墨烯优异的机械性能提高了沥青混合料的抗拉强度,从而改善了其低温抗裂性能。

GO为石墨烯的一种衍生材料,其表面具有大量的含氧官能团,更易与沥青相容,从而达到较好的改性效果。ADNAN等^[13,20]使用GO对沥青混合料进行改性,并通过断裂韧性 K_{IC} 和J积分来表征沥青混合料的低温抗裂性能。在-20℃下,加入2%(按沥青质量计)的GO可以使沥青混合料的 K_{IC} 值和J积分得到显著提高,随着GO掺量的增加, K_{IC} 值的增长率也越来越大;在温度较高的条件下,改善效果更加明显。加入GO能显著提高沥青混合料的低温抗裂性能,这是由于GO本身具有优异的机械性能和韧性,GO在沥青中均匀分散后,与沥青中的组分充分结合,从而提高了沥青混合料的整体韧性。

使用PVP修饰后的石墨烯更易与沥青相容,相容后也易于在沥青中分散均匀,且与沥青充分反应;GNPs较石墨烯具有更大的比表面积,与沥青之间的吸附力更强,从而使沥青混合料整体稳定性提高;GO本身具有大量的含氧官能团,易与沥青组分发生反应形成氢键。三种石墨烯衍生材料均能有效改善沥青混合料的低温抗裂性能,针对不同的使用环境,应选择不同的石墨烯或其衍生材料。GO的大比表面积及其表面丰富的含氧官能团使沥青混合料的路用性能得到了显著改善,但优质的GO成本较高。相比之下,GNPs具有制备方法简单、造价较低等优点。

2.3 水稳定性

沥青混合料的水稳定性直接影响沥青与骨料之间的黏附性。国内外大量学者通过加入石墨烯或其衍生材料对沥青混合料进行改性,以提升沥青混合料的水稳定性。石墨烯对沥青混合料水稳

定性的影响见表2。

表2 石墨烯对沥青混合料水稳定性的影响^[9,12,25]

Table 2 Influence of graphene on water stability of asphalt mixture^[9,12,25]

沥青混合料类型	残留稳定度 $R_{MS0}/\%$	冻融劈裂抗拉 强度比 $R_{TSR}/\%$
0.05% 石墨烯+橡胶沥青	92.50	88.90
橡胶改性沥青混合料	89.90	87.30
0.05%GO+70#基质沥青	91.41	88.94
70#基质沥青混合料	85.92	82.07
0.20%GO+SBS 改性沥青	93.27	92.55
SBS 改性沥青混合料	87.31	88.37
0.05%GO+70#基质沥青	97.84	95.16
70#基质沥青混合料	97.31	81.85

由表2可知,石墨烯和GO均可提高沥青混合料的 R_{MS0} 和 R_{TSR} 。其中,GO的改性效果较为显著,这是因为GO表面附有较多的含氧官能团,使其在沥青中的分散性更好,反应更加充分且形成较多的氢键,从而使沥青混合料内部获得更高的交联密度和黏聚力。同时,GO具有较大的比表面积,更易与沥青中的组分相吸附,使沥青与骨料间的黏附性能增强。提高沥青的黏附性和沥青混合料间的黏聚力是石墨烯改善沥青混合料水稳定性的两个主要机理。

2.4 压实性能

压实性能是影响沥青混合料和易性的关键指标^[29]。曹青霞等^[15]通过分析压实特征曲线获取压实能量指数 I_{CEI} 、交通密实指数 I_{TDI} 和压实拟合曲线斜率 K_1 、 K_2 等指标,评价沥青混合料的压实性能,发现与橡胶-SBS复合改性沥青混合料相比,石墨烯复合橡胶改性沥青混合料在不同压实度下的 I_{CEI} 降低,95%压实度下的 I_{TDI} 增大, K_1 增大, K_2 降低,这表明石墨烯的加入降低了混合料的压实功,同时提高了混合料抵抗交通荷载的能力。与沥青相容后的石墨烯在流动的沥青颗粒间形成了一层“润滑膜”,减小了沥青颗粒间的摩擦力,提高了其表面自由能,从而增强了沥青混合料的压实性能。温度越高,沥青的流动性越大,石墨烯对沥青混合料压实性能的改善效果越好,在170℃时改善效果达到最佳。

此外,采用GNPs对沥青混合料进行改性,能使达到目标空隙率所需的压实回转次数减少20%~40%;在相同的压实回转次数下,添加GNPs也可有效降低沥青混合料的空隙率^[30-31]。图3所示为GNPs的微观图像,相比于传统石墨烯,GNPs具有较大的比表面积,更易与沥青中的组分相吸附,这在沥青颗粒间形成润滑层的同时,又提高了沥青内部结构的黏聚力,使沥青混合料获得更好的压实性能及和易性,同时增强沥青混合料的抗断裂性能。

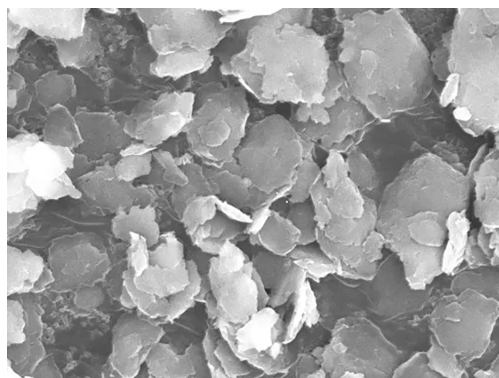


图3 GNPs的微观图像

Fig. 3 Microscopic images of GNPs

2.5 抗老化性能

沥青混合料的抗老化性能直接影响到沥青路面的使用寿命。刘克非等^[10]研究了不同掺量的GO改性沥青混合料在老化前后的残留稳定度 R_{MS0} 和冻融劈裂抗拉强度比 R_{TSR} ,结果发现老化基质沥青的 R_{MS0} 和 R_{TSR} 分别降低了3.5%和4.2%,而GO改性沥青混合料的分别升高了7.9%和2.2%。这是因为GO被沥青插层和剥离后形成致密的层状结构,阻止了沥青中轻质组分的挥发,阻隔了部分氧气和水分对混合料的侵蚀,降低了沥青被氧化过程中反应物的浓度,从而减缓了沥青的老化。

在老化过程中,沥青中很多基团发生氧化反应,使沥青的化学结构发生改变。赵之杰^[11]采用傅里叶变换红外光谱仪测试了老化前后沥青中的官能团,并对紫外光(ultraviolet, UV)老化前后沥青的碳基指数 $I_{C=O}$ 和亚砷基指数 $I_{S=O}$ 进行测试。结果发现与基质沥青相比,老化后的GO改性沥青 $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 的增长趋势不明显,这表明GO的加入抑

制了碳基和亚砷基的生成,且改性剂掺量越高,抑制碳基和亚砷基生成的效果越好。GO在其中充分发挥了隔离作用,将一部分热氧和紫外线阻隔在外,抑制了沥青内部的氧化反应,显著改善了沥青混合料的抗老化性能。

2.6 愈合性能

沥青材料在高温下表现出较好的流动性,可填充沥青路面中因行车荷载等外界因素形成的裂缝和空隙,这表明沥青路面本身具有一定的自愈合性能,但其自愈能力较弱。WANG等^[32]使用剥落石墨纳米微片(exfoliated graphite nanoplatelet, xGNP)对沥青混合料进行改性。将断裂的不同掺量的xGNP改性沥青混合料放入微波炉中加热,进行断裂微波愈合循环试验,测试其恢复时的峰值荷载,以评估xGNP改性沥青混合料的微波愈合性能。结果发现:随着循环次数的增加及裂缝的累积,微波辐射并不能使断裂的沥青混合料完全愈合,愈合率呈下降趋势^[33],但xGNP含量较多的沥青混合料表现出较优异的愈合性能。这是因为石墨烯材料中共轭 $\pi-\pi$ 键的偶极畸变在高频微波辐射下会产生热量,且石墨烯材料对微波能量具有较好的吸收效果,在微波辐射条件下,石墨烯改性沥青混合料温度上升较快,沥青流动性增强,及时填充了混合料中的裂缝和空隙^[34]。当温度降至室温时,石墨烯因其大比表面积使之易于吸附沥青中的组分,增强了沥青与骨料之间的黏附作用,使沥青混合料更密实,从而达到沥青混合料自我修复的效果。

3 结论

1) 石墨烯被沥青插层和剥离后,形成较为稳定的层状结构,有效减缓了外界自然因素对沥青路面的老化侵蚀,再配合石墨烯对沥青混合料的润滑作用,石墨烯的掺入可以有效降低沥青混合料的老化程度,延长路面使用寿命。

2) 石墨烯自身丰富的含氧官能团与沥青中的组分充分反应,使影响沥青混合料力学性能的C=C共轭双键的含量提高,从而使沥青路面获得较强的力学性能。

3) 石墨烯具有较大的比表面积,这使其更易与沥青组分相吸附,增强了沥青与骨料之间的黏附性能,从而提高了沥青混合料内部的黏聚力,改善了沥青混合料各项路用性能。

4 展望

1) 利用石墨烯优异的导电性与导热性提高路面除冰融雪能力的研究现已开展。未来可考虑以石墨烯的导电性为基础,开展铺设“智能道路”的有关研究,并将其与智能汽车等技术相结合。

2) 大量研究表明:石墨烯可以有效改善沥青混合料的路用性能,但石墨烯价格昂贵,因此在降低石墨烯的使用成本方面的研究有待进一步深入。

3) 对不同的沥青混合料改性应使用不同掺量的石墨烯,掺量合适与否对沥青混合料性能有巨大影响,但鲜有相关方面的深入研究。后续可采用多种沥青混合料进行对比试验,为各类沥青混合料找到合适的石墨烯掺量。

〔参考文献〕

- [1] WANG W Z, SHEN A Q, HE Z M, et al. Evaluation of the adhesion property and moisture stability of rubber modified asphalt mixture incorporating waste steel slag [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(2): 296-318. DOI: 10.1080/01694243.2022.2031461.
- [2] GUO Z X, WANG L, FENG L, et al. Research on fatigue performance of composite crumb rubber modified asphalt mixture under freeze thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2022, 323: 126603. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126603.
- [3] 谢兴华, 苑显鹏, 王杰, 彭润土/SBS复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(4): 40-44. XIE Xinghua, YUAN Xianpeng, WANG Jie. Study on road performance of bentonite/SBS composite modified asphalt mixture [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2021, 47(4): 40-44.
- [4] CUI Y B, KUNDALWAL S I, KUMAR S. Gas barrier performance of graphene/polymer nanocomposites [J]. Carbon, 2016, 98: 313-333. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.11.018.
- [5] KUILLA T, BHADRA S, YAO D H, et al. Recent

- advances in graphene based polymer composites[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(11): 1350–1375. DOI:10.1016/j.progpolymsci.2010.07.005.
- [6] REN Y X, HAO P W. Modification mechanism and enhanced low-temperature performance of asphalt mixtures with graphene-modified phase-change microcapsules[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126301. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2021. 126301.
- [7] LI S, XU W Y, ZHANG F F, et al. Effect of graphene oxide on the low-temperature crack resistance of polyurethane-SBS-modified asphalt and asphalt mixtures[J]. Polymers, 2022, 14(3): 453. DOI: 10.3390/ polym14030453.
- [8] 邓展伟. 老化作用下石墨烯复合改性高黏沥青及混合料的性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2021. DOI: 10. 26976/d.cnki.gchau.2021.001451.
- DENG Zhanwei. Study on properties of graphene composite modification of highly viscid asphalts and mixtures under aging[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.001451.
- [9] 李超. 氧化石墨烯(GO)-竹纤维复合改性沥青及 OGFC 沥青混合料性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. DOI:10.27662/d.cnki.gznlc.2021.000293.
- LI Chao. Research on performance of graphene oxide (GO)-bamboo fiber composite modified asphalt and OGFC asphalt mixture[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021. DOI: 10. 27662/d.cnki.gznlc.2021.000293.
- [10] 刘克非, 朱俊材, 吴超凡, 等. 氧化石墨烯改性沥青及其混合料老化性能试验研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 225–230.
- LIU Kefei, ZHU Juncai, WU Chaofan, et al. Experimental study on aging resistance of graphene oxide modified asphalt and its mixture[J]. Highway, 2020, 65(2): 225–230.
- [11] 赵之杰. GO 及 LDHs 改性沥青及其混合料耐老化性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017. DOI: CNKI: CDMD:1.1019.809155.
- ZHAO Zhijie. Research on the anti-aging performance of asphalt and its mixture modified by GO and LDHs[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. DOI: CNKI:CDMD:1.1019.809155.
- [12] 孟勇军, 张瑞杰, 刘直荣, 等. 石墨烯对橡胶粉改性沥青混合料路用性能影响研究[J]. 公路, 2021, 66(5): 7–11.
- MENG Yongjun, ZHANG Ruijie, LIU Zhirong, et al. Research on the effect of graphene on pavement performance of rubber powder modified asphalt mixture [J]. Highway, 2021, 66(5): 7–11.
- [13] ADNAN A M, LUO X, LYU C, et al. Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119261. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119261.
- [14] BERMAN D, ERDEMIR A, SUMANT A V. Graphene: a new emerging lubricant[J]. Materials Today, 2014, 17(1): 31–42. DOI:10.1016/j.mattod.2013.12.003.
- [15] 曹青霞, 张富奎, 赵发章, 等. 石墨烯复合橡胶改性沥青混合料压实特性[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 3023–3031. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.09.044.
- CAO Qingxia, ZHANG Fukui, ZHAO Fazhang, et al. Compaction characteristics of graphene rubber composite modified asphalt mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9): 3023–3031. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.09.044.
- [16] ZHU J C, ZHANG K, LIU K F, et al. Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118404. DOI:10.1016/j.conbuildmat. 2020.118404.
- [17] 董懿, 张艳岗, 刘勇, 等. 化学法石墨烯分散液的制备及其摩擦学性能的研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(8): 1295–1298. DOI: 10.13433/j. cnki. 1003-8728. 20200025.
- DONG Yi, ZHANG Yangang, LIU Yong, et al. Preparation and tribological properties of chemical graphene distillation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(8): 1295–1298. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20200025.
- [18] ZHU J C, ZHANG K, LIU K F, et al. Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118404. DOI:10.1016/j.conbuildmat. 2020.118404.
- [19] 刘克非, 朱俊材, 张雪飞, 等. 氧化石墨烯改性沥青性能评价及其 OGFC 混合料路用性能[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2020, 40(1): 40–48. DOI:10.19721/j.cnki. 1671-8879.2020.01.004.
- LIU Kefei, ZHU Juncai, ZHANG Xuefei, et al. Performance evaluation of graphene oxide modified asphalt and pavement performance of OGFC mixtures [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 40–48. DOI: 10.19721/j. cnki. 1671-8879.2020.01.004.
- [20] ADNAN A M, LYU C F, LUO X, et al. Fracture properties and potential of asphalt mixtures containing graphene oxide at low and intermediate temperatures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022: 1–17. DOI:10.1080/10298436.2021.2020268.
- [21] EISA M S, MOHAMADY A, BASIOUNY M E, et al. Laboratory evaluation of mechanical properties of

- modified asphalt and mixture using graphene platelets (GNPs)[J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(19): 5599. DOI: 10.3390/ma14195599.
- [22] ADNAN A M, LUO X, LYU C, et al. Physical properties of graphene-oxide modified asphalt and performance analysis of its mixtures using response surface methodology[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(5): 1378–1392. DOI: 10.1080/10298436.2020.1804061.
- [23] LIU K F, ZHANG K, SHI X M. Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 880–889. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.171.
- [24] 郭贺源. 石墨烯橡胶复合改性沥青及沥青混合料性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019. DOI: 10.27034/d.cnki.ggxu.2019.000409.
- GUO Heyuan. Study on performance of graphene rubber composite modified asphalt and asphalt mixture[D]. Nanning: Guangxi University, 2019. DOI: 10.27034/d.cnki.ggxu.2019.000409.
- [25] ZHU J C, ZHANG K, LIU K F, et al. Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 217: 273–282. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.054.
- [26] 王树杰. 石墨烯复合橡胶改性沥青混合料路用性能研究[J]. *石油沥青*, 2021, 35(5): 46–49, 66.
- WANG Shujie. Study on the road performance of graphene composite rubber modified asphalt mixture[J]. *Petroleum Asphalt*, 2021, 35(5): 46–49, 66.
- [27] 邹虎, 李强. 石墨烯复合橡胶改性沥青及其混合料路用性能研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(10): 46–56. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.10.005.
- ZOU Hu, LI Qiang. Study on road performance of graphene composite rubber modified asphalt and its mixture[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(10): 46–56. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.10.005.
- [28] 王观竹, 冯海满. PVP修饰石墨烯/SBS复合改性沥青与混合料性能研究[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(11): 267–273. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.11.055.
- WANG Guanzhu, FENG Haiman. Study on performance of PVP modified graphene composite SBS modified asphalt and mixture[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(11): 267–273. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.11.055.
- [29] DUBOIS V, ROCHE C D L, BURBAN O. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(6): 885–897. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.004.
- [30] LE J L, MARASTEANU M O, TUROS M. Mechanical and compaction properties of graphite nanoplatelet-modified asphalt binders and mixtures[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2020, 21(7): 1799–1814. DOI: 10.1080/14680629.2019.1567376.
- [31] LE J L, MARASTEANU M, TUROS M. Graphene nanoplatelet (GNP) reinforced asphalt mixtures: a novel multifunctional pavement material[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2016. <https://trid.trb.org/view/1422672>.
- [32] WANG Z G, DAI Q L, GUO S C. Microwave-healing performance of modified asphalt mixtures with flake graphite and exfoliated graphite nanoplatelet[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 865–875. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.210.
- [33] GULISANO F, CRUCHO J, GALLEGU J, et al. Microwave healing performance of asphalt mixture containing electric arc furnace (EAF) slag and graphene nanoplatelets (GNPs) [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10: 1428. DOI: 10.3390/app10041428.
- [34] PATEL M. Microwave enabled synthesis of carbon based materials with controlled structures: applications from multifunctional drug delivery to metal free catalysis[D]. New Brunswick: Rutgers University-Graduate School-Newark, 2016. DOI: 10.7282/T31838VT.

A review on the modification mechanism of graphene to asphalt mixture

HAN Jianbo, ZHU Fu, CHEN Wenyi

(School of Transportation Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to review the research status of the role of carbon nanomaterial graphene in asphalt mixtures. [Methods] Various microscopic and macroscopic test results and conclusions were compared and analyzed by referring to the relevant literature on graphene-modified asphalt mixtures at home and abroad. Then the mechanism and effect of graphene in asphalt mixture were systematically summarized. [Findings] Graphene or its derivative material is intercalated and stripped by asphalt after mixing with asphalt to form a dense layered structure inside, which effectively delayed the aging of asphalt, meanwhile, the formed dense layered structure increased the content of C=C in asphalt, and improved the surface free energy of asphalt. The mechanisms of its modified asphalt mixture were isolation, chemical bond energy, lubrication and adhesion. The properties of graphene-modified asphalt mixture such as high temperature rutting resistance, low temperature cracking resistance, water stability, compaction, anti-aging and healing were significantly enhanced. [Conclusions] Graphene has an obvious improvement effect on the road performance of asphalt mixture, which provided a new idea for developing subsequent road engineering. The research on reducing the use cost of graphene and the optimum content of graphene in asphalt mixture needs further discussion.

Key words: asphalt mixtures; graphene; mechanism of action; road performance

Manuscript received: 2022-05-19; **revised:** 2022-06-13; **accepted:** 2022-06-24

Foundation item: Project (JJKH20180199KJ, JJKH20130053KJ) supported by Science and Technology Research Planning Project of Jilin Education Department

Corresponding author: ZHU Fu (1981—) (ORCID: 0000-0002-5914-7766), male, associate professor, research interest: road engineering materials. E-mail: zhufu_1981@163.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)