

类石墨相氮化碳/环氧树脂复合材料 提高海洋混凝土结构防腐性能的研究

李金鑫¹ 赵 晶¹ 赵 燕¹ 张 育¹ 孟 雪¹ 晏 泓^{1,2*}

(1.太原理工大学材料科学与工程学院,太原 030024;

2.太原理工大学新材料界面科学与工程教育部重点实验室,太原 030024)

摘 要 类石墨相氮化碳($g-C_3N_4$)具有多片层结构,经剥离后可获得 $g-C_3N_4$ 纳米片,将其作为填料加入环氧树脂中制备了新型复合防腐涂层,旨在提高海洋混凝土内部钢筋的抗腐蚀能力。对不同方法制备的氮化碳进行 X 射线衍射和扫描电镜检测,并且对比了不同溶液剥离后不同含量的纳米相氮化碳环氧复合涂料与体相氮化碳环氧涂料、纯环氧涂料的耐腐蚀性能。结果表明:使用二甲基亚砜(DMSO)溶液超声 6h 剥离的氮化碳/环氧复合涂层自腐蚀电流最小,且当其添加量为 1% 的涂层具有最好的防腐蚀效果。

关键词 类石墨相氮化碳,环氧树脂,液相剥离法,耐腐蚀性能

中图分类号 TG174.46

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2021)05-0252-05

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.05.057

Study on improvement of corrosion resistance of marine concrete structure by $g-C_3N_4$ /EP composite

Li Jinxin¹ Zhao Jing¹ Zhao Yan¹ Zhang Yu¹ Meng Xue¹ Yan Hong^{1,2}

(1.College of Materials Science and Engineering,Taiyuan University of Technology,

Taiyuan 030024;2.Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials,

Ministry of Education,Taiyuan University of Technology,Taiyuan 030024)

Abstract The graphite-like C_3N_4 ($g-C_3N_4$) is of multiple lamellar structure,from which $g-C_3N_4$ nanosheets was obtained after being exfoliated.A novel composite anticorrosion coating composed of $g-C_3N_4$ nanosheets and epoxy resin (EP) was prepared,aimed at enhancing corrosion resistance of steel reinforcement in marine concrete.X-ray diffraction and scanning electron microscope were performed on $g-C_3N_4$ nanosheets obtained by different methods.Composite coatings with different contents of $g-C_3N_4$ nanosheet exfoliated using different solvents were compared with EP coating with bulk $g-C_3N_4$ and pure EP coating in terms of corrosion resistance.The results indicated that the EP composite coating with $g-C_3N_4$ nanosheets exfoliated in DMSO solution under ultrasound for 6h showed the lowest self-corrosion current,and the coating exhibited the optimum corrosion resistance with an addition of 1% $g-C_3N_4$ nanosheets.

Key words $g-C_3N_4$,epoxy resin,liquid exfoliation,corrosion resistance

海洋混凝土是指在海洋环境下服役的一种混凝土材料,其成本低、强度高,具有高的工作性、耐久性、高温稳定性以及一定的耐蚀性,故成为当今海洋建筑中的主要建筑材料。但是,海洋混凝土结构由于暴露在海洋环境中,不断承受各方面的侵蚀,其中

电化学腐蚀是自然界中最常见的侵蚀方式,当混凝土结构出现裂缝,钢筋包围在腐蚀液中,同时氯离子、溶解氧等腐蚀剂接着通过渗透、扩散等方式进入混凝土结构内部并聚集在钢筋表面,当侵入离子的浓度超过边界值后,钢筋开始生锈,致使外层的混凝土

收稿日期:2020-02-02;修回日期:2021-02-20

基金项目:国家自然科学基金(51703152);山西省自然科学基金项目(201701D121044)

作者简介:李金鑫(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为腐蚀与防护,E-mail:13393407909@163.com。

通讯作者:晏泓,博士,教授,主要从事防腐材料研究,E-mail:yanhong@tyut.edu.cn。

土开裂或剥落^[1]。

钢筋涂层保护是目前被广泛应用于保护内部钢筋受腐的重要手段。聚合物涂料是一类方便且具有广阔发展前景的抗腐蚀涂层。环氧树脂(EP)作为一种热固化树脂,具有良好的电绝缘性、耐热性、较好的附着力等优点,成为使用最为普遍的聚合物树脂之一,但其也存在一些缺点,由于高度交叉连接的结构,分子间存在间隙^[2],并且对裂纹的产生和扩展表现出较差的抵抗力。因此,研究人员尝试通过添加各种纳米材料来改善 EP 的性能。纳米颗粒可以显著地提高聚合物涂料的一系列性能^[3]。当今,一系列纳米复合材料已被引入海洋、石油和天然气等领域中抵抗腐蚀,诸如使用的纳米材料包括石墨烯^[4]、二氧化硅^[5]、蒙脱土^[6]等来填充 EP 涂层。

类石墨相氮化碳($g-C_3N_4$)是一种类石墨结构的非金属半导体材料^[7]。目前, $g-C_3N_4$ 剥离成的纳米片作为一种典型的层状二维材料,已被证实具有良好的热化学稳定性、可见光催化性能^[8],并且拥有庞大的比表面积和较多的活性位点,逐渐在成膜材料^[9]和耐磨涂料^[10]等方面得到应用,成为二维材料中的新秀。因此,使用 $g-C_3N_4$ 纳米片改性 EP 涂料,可有效地加强其综合性能,涂料中小尺寸纳米材料的存在有利于涂料中应力的传递,在耐腐蚀领域具有广阔的应用前景。然而目前用 $g-C_3N_4$ 作为防腐蚀填料的研究较少,笔者拟在此方面进行研究,制备类石墨相氮化碳/环氧树脂复合涂层来提高钢筋的耐腐蚀性。

1 实验部分

1.1 药品

环氧树脂 E44(EP)、胺固化剂,济南天茂化工有限公司;正丁醇、二甲苯、三聚氰胺($C_3H_6N_6$),天津鼎盛鑫化工有限公司;Q235 钢样品(20mm×10mm×2mm)从当地钢材市场获得,用砂纸(180目、400目、800目、1200目)打磨光滑,再用乙醇和丙酮各超声 15min 进行清洗,之后进行干燥。所有试剂均为分析级,未经进一步纯化使用。

1.2 体相氮化碳(体相 $g-C_3N_4$)的制备

称取 5g 三聚氰胺放置在加盖的陶瓷坩埚中,于 520℃ 下用马弗炉持续煅烧 4h,升温速率约为 12℃/min,得到体相 $g-C_3N_4$ 。待炉温自然降至 200℃ 以下取出放在研钵上碾碎并进行筛分,最后得到粒度小于 400 目的淡黄色粉体,产物质量为 1.6g,得到体相 $g-C_3N_4$ 。

1.3 剥离方法

1.3.1 浓硫酸溶剂剥离

称取 500mg 体相 $g-C_3N_4$ 粉末,加入 20mL 浓硫酸(H_2SO_4)中,磁力搅拌 2h,用去离子水洗涤至中性后,在 60℃ 下干燥一段时间,把收集到的粉末加入到 150mL 乙醇与水体积比为 3:1 的混合溶液中,冰浴下超声 6h 左右,静置 5min,用 10000r/min 离心 10min,在离心管壁上收集到的淡黄色粉末即 $g-C_3N_4$ 纳米片^[11],随后放置在烘箱中以 60℃ 干燥,得到纳米相 $g-C_3N_4$ (浓硫酸)。

1.3.2 水/乙醇混合溶剂超声剥离

称取 500mg 体相 $g-C_3N_4$ 粉末,添加到 150mL 混合溶剂中,混合溶剂由 112.5mL 去离子水和 37.5mL 乙醇组成。将烧杯中混合物进行探头超声 6h,静置 5min,将上方悬浮液倒入离心管中,并在 10000r/min 下离心处理 10min。随后,用小药勺将离心管壁上的黄色附着物刮下,放置在烘箱中以 60℃ 干燥,得到纳米相 $g-C_3N_4$ (水/乙醇)。

1.3.3 二甲基亚砜(DMSO)溶剂超声剥离

称取 500mg 体相 $g-C_3N_4$ 粉末,添加到 225mL DMSO 溶剂中,随后在探头下超声 6h。静置一段时间后,取悬浮液以 10000r/min 离心 60min。将收集到的淡黄色物质在 60℃ 下干燥,得到纳米相 $g-C_3N_4$ (DMSO)。

1.4 涂层的制备

1.4.1 纯 EP 涂层的制备

取 1g EP 于 100mL 烧杯中,加入 0.23g 二甲苯,用玻璃棒持续搅拌 15min,待其均匀混合后再加入固化剂,磁力搅拌 10min,用于涂层制备。

1.4.2 EP 复合涂层的制备

取 EP 质量的 0.5%、1.0%、2.0% 的填料[体相 $g-C_3N_4$ 、 $g-C_3N_4$ (浓硫酸)、 $g-C_3N_4$ (水/乙醇)和 $g-C_3N_4$ (DMSO)],分别置于一定量的丙酮中超声分散 30min。随后加入 1g EP 以及 0.23g 二甲苯,继续超声 30min。最后加入固化剂,机械搅拌 20min。当烧杯中液体达到合适黏度后在碳钢表面进行刮涂,把涂好后的钢片真空干燥 24h。待涂层固化后便可进行一系列性能测试,所得样品分别标记为体相 $g-C_3N_4$ /EP 涂层、 $g-C_3N_4$ (浓硫酸)/EP 涂层、 $g-C_3N_4$ (水/乙醇)/EP 涂层和 $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层。

1.5 测试与表征

使用 X 射线衍射仪(XRD,DX-2700 型,丹东方圆仪器有限公司)表征 $g-C_3N_4$ 的晶体结构,扫描范

围为 $10\sim 70^\circ$, 扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$; 使用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-7900F 型, 日本电子光学公司) 观察 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的形貌及粒径; 使用电化学工作站 (CS350H 型, 武汉科思特有限公司) 测试复合涂层的耐腐蚀性能。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (浓硫酸)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇) 和 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO) 的 XRD 谱图见图 1, 通过 Jade 软件对数据进行分析, 整理得到各个物质的每个特征峰的位置及其所对应的晶面间距 d 。由图可见, 高温下煅烧得到的体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 有两个明显的衍射峰, 分别位于 12.94° 和 27.56° 处, 对应 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的 (100) 和 (002) 晶面, 其中 (002) 晶面对应的是 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的层间堆积结构并且层间距 d 为 0.324nm , 而 (100) 晶面对应七嗪环组成的层内结构^[12]。通过不同剥离手段得到的物质均有与体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 相接近的特征峰, 说明剥离过程并没有破坏 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 自身的分子结构, 这些剥离产物均呈类石墨相的层片状。但值得注意的是, 经过硫酸溶液处理后 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的 (100) 晶面消失了, 这是由于酸中离子在插层的同时还直接破坏了层内结构^[13], 并破坏了 (100) 晶面。此外, 相对于体相氮化碳, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (浓硫酸)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO) 的 (002) 晶面衍射峰位置均发生较小程度的偏移, 石墨相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的层间距离变化甚微, 说明各种剥离手段对层间距的影响不大。

与体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 相比, 其他剥离方法得到的 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 特征峰强度均发生不同程度的降低, 这是由于剥离后 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 厚度减少所导致的^[14]。因此, 这些物质的片层厚度由大到小依次为体相氮化碳 > DMSO 剥离产物 > 硫酸剥离产物 > 水和乙醇剥离产物。

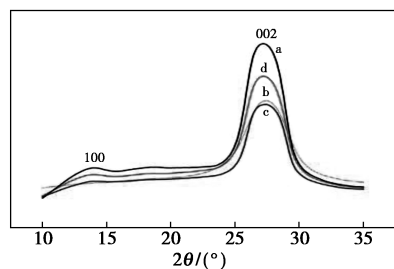


图 1 体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (a)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (浓硫酸) (b)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇) (c) 和 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO) (d) 的 XRD 谱图

2.2 SEM 分析

图 2 为体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (浓硫酸)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇) 和 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO) 的 SEM 图。由图可见, 体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 呈厚片状, 并由很多层组成, 这充分证明了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的层状结构^[15]。经过硫酸溶液处理并超声剥离后, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 呈现出聚集在一块的碎片状, 并无明显的层状堆积, 表明硫酸的侵蚀破坏了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的片层结构。而在 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇) 和 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO) 中, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 呈梯度的片状排列, 说明在水/乙醇和 DMSO 的超声剥离过程并没有破坏 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 层的片状结构, 仅是通过剥离的方式改变了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的厚度, 得到比原体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 更薄的 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 纳米片。以上结果与 XRD 结果较一致。

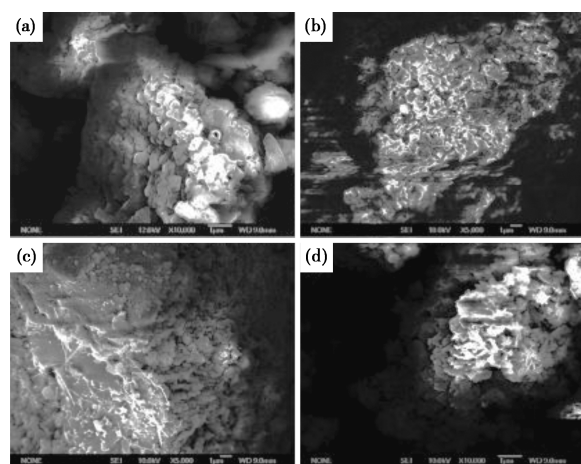


图 2 体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (a)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (浓硫酸) (b)、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇) (c) 和 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO) (d) 的 SEM 图

2.3 防腐性能分析

电化学测试在传统的三电极单元中进行, 分别为工作电极、对电极 (铂片电极) 和参考电极 (饱和甘汞电极)。在测量前, 封装后的碳钢片浸泡在质量分数为 3.5% 的 NaCl 电解质溶液中。使用电化学工作站进行测试, 可以得到各种涂层的动电位极化曲线图和电化学阻抗谱图。

极化曲线可以准确地测试涂层的耐腐蚀性能, 通常情况下腐蚀电流 I_{corr} 和腐蚀速率 V_{corr} 越小, 涂层的耐腐蚀性越好^[16]。不同剥离方法得到的 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 含量为 1% 时, 体相 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ /EP 涂层、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (浓硫酸)/EP 涂层、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (水/乙醇)/EP 涂层和 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (DMSO)/EP 涂层的极化曲线拟合结果见表 1。由表 1 可知, 相比无涂层保护的裸钢, 涂有纯 EP 的 Q235 碳钢的 I_{corr} 降了两个数量级, 而 V_{corr} 也降了 3 个数量级。此外, 复合涂层的 I_{corr} 和 V_{corr} 相对于纯 EP 涂层亦发生了显著的下降。加入纳米片

$g-C_3N_4$ 的涂层的腐蚀电流值均比加入体相 $g-C_3N_4$ 的涂层更低,表明使用剥离后 $g-C_3N_4$ 纳米片的确起到更好的隔绝效果^[17-18]。其中,添加硫酸剥离产物和混合溶液剥离产物的涂层的腐蚀程度相近,二者自腐蚀电流值比起添加体相 $g-C_3N_4$ 的涂层下降了 1 个数量级。而加入 DMSO 剥离产物的涂层防腐效果最好,其腐蚀电流为 $1.45 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, 腐蚀速率为 $6.63 \times 10^{-6} \text{ mm/a}$ 。

表 1 添加物含量 1%时,体相 $g-C_3N_4$ /EP 涂层、 $g-C_3N_4$ (浓硫酸)/EP 涂层、 $g-C_3N_4$ (水/乙醇)/EP 涂层和 $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层的极化曲线拟合结果

试样	腐蚀电流 $I_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	腐蚀电位 E_{corr}/V	腐蚀速率 $V_{\text{corr}}/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
碳钢	1.64×10^{-4}	-0.48	1.93
纯 EP 涂层	3.49×10^{-6}	0.11	1.60×10^{-3}
体相 $g-C_3N_4$ /EP 涂层	1.65×10^{-7}	-0.25	7.53×10^{-5}
$g-C_3N_4$ (浓硫酸)/EP 涂层	2.49×10^{-8}	-0.32	1.14×10^{-5}
$g-C_3N_4$ (水/乙醇)/EP 涂层	2.72×10^{-8}	-0.29	1.24×10^{-5}
$g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层	1.45×10^{-8}	-0.02	6.63×10^{-6}

图 3 为碳钢及不同涂层(添加物含量 1%)保护下碳钢的电化学阻抗谱 Nyquist 图,其中涂层所对应的圆弧半径越大,也就是极化电阻越大,耐腐蚀效果越好^[19-20]。由图可见,与纯碳钢相和纯 EP 涂层相比,加入体相 $g-C_3N_4$ 的碳钢片的阻抗值更高,说明已经起到一定的防腐效果^[21]。而当添加纳米颗粒后,各涂层的阻抗值均又发生不同程度的提高,这与极化曲线拟合后得到的结论吻合。其中, $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层拥有最大的阻抗值以及最低的自腐蚀电流,说明其抗腐蚀性能最为优异。

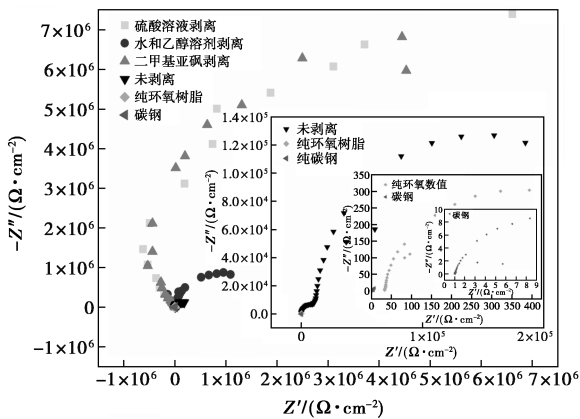


图 3 碳钢及不同涂层(添加物含量 1%)保护下碳钢的电化学阻抗谱 Nyquist 图(插图为局部放大图)

为了进一步探讨 $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层的耐腐蚀性,测试了不同含量的 $g-C_3N_4$ (DMSO)(0.5%、1.0%、2.0%)对 $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层保护下碳钢极化曲线的影响,拟合结果见表 2。由表 2 可见,3 种不同添加量的涂层其腐蚀电位均高于裸钢,说明涂层更难以发生腐蚀,并且自腐蚀电流值也发生了不同程度的降低。当添加量为 1%时, $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层的自腐蚀电流和腐蚀速率最小,分别为 $1.45 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 和 $6.63 \times 10^{-6} \text{ mm/a}$,即具有相对更好的防腐蚀性能,其次为添加量为 2%和 0.5%的涂层。

表 2 $g-C_3N_4$ (DMSO)含量(0.5%、1.0%、2.0%)对 $g-C_3N_4$ (DMSO)/EP 涂层保护下碳钢极化曲线影响的拟合结果

涂层中剥离物含量	腐蚀电流 $I_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	腐蚀电位 E_{corr}/V	腐蚀速率 $V_{\text{corr}}/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
碳钢(0%)	1.64×10^{-4}	-0.48	1.93
0.5%	6.32×10^{-7}	0.05	2.89×10^{-4}
1%	1.45×10^{-8}	-0.02	6.63×10^{-6}
2%	3.70×10^{-8}	0.01	1.69×10^{-5}

3 结论

在 520℃ 下煅烧得到的体相 $g-C_3N_4$ 的层间距为 0.324nm,在后续的剥离过程中,除了硫酸剥离法以外,利用热氧化刻蚀法以及其他溶剂下超声剥离的 $g-C_3N_4$ 均保留着良好的层片状结构,并且片层厚度降低。通过对比 1%添加量下不同剥离产物的防腐蚀效果,发现使用 DMSO 超声 6h 后的纳米相 $g-C_3N_4$ 并将其分散在 EP 中时,涂层拥有最佳的阻隔性能。再对比 3 种不同的添加量发现当 DMSO 剥离得到的 $g-C_3N_4$ 的含量为 1%,复合涂层对 Q235 碳钢的抗腐蚀程度最大,可用于海洋混凝土内部钢筋的防护。

参考文献

- [1] 李国赞.海工钢筋混凝土的腐蚀与防护[J].工程技术(文摘编),2016(6):277.
- [2] Ramezanzadeh B, Niroumandrad S, Ahmadi A, et al. Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino functionalized graphene oxide[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 283-304.
- [3] Meng F, Liu L, Tian W, et al. The influence of the chemically bonded interface between fillers and binder on the failure behaviour of an epoxy coating under marine alternating hydrostatic pressure[J]. Corrosion Science, 2015, 101: 139-154.

- [4] 黄坤,曾宪光,裴嵩峰,等.石墨烯/环氧复合导电涂层的防腐性能研究[J].涂料工业,2015,45(1):17-20.
- [5] Conradi M, Kocijan A, Zorko M, et al. Damage resistance and anticorrosion properties of nanosilica-filled epoxy-resin composite coatings[J]. Progress in Organic Coatings: An International Review Journal, 2015, 80: 20-26.
- [6] 李玉峰,祝洪雷,高晓辉,等.水分散性聚苯胺/环氧树脂乳液防腐涂层研究[J].热固性树脂,2010,25(3):35-37.
- [7] Ong W J. Graphitic carbon nitride($g-C_3N_4$)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation: are we a step closer to achieving sustainability? [J]. Chemical Reviews, 2016, 116(12): 7159-7329.
- [8] Niu P, Li L, Liu G, et al. Graphene-like carbon nitride nanosheets for improved photocatalytic activities [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(22): 4763-4770.
- [9] Wang Y, Liu L, Xue J, et al. Enhanced water flux through graphitic carbon nitride nanosheets membrane by incorporating polyacrylic acid[J]. AIChE Journal, 2018, 64(6): 2181-2188.
- [10] Duan C, Yuan D, Yang Z, et al. High wear-resistant performance of thermosetting polyimide reinforced by graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) under high temperature[J]. Composites Part A, 2018, 113: 200-208.
- [11] 马占强,郭坤,宋鹏,等. $g-C_3N_4$ 纳米片的制备及光催化抗菌性能研究[J].现代化工,2017,37(11):97-101.
- [12] Ma T Y, Tang Y, Dai S, et al. Proton-functionalized two-dimensional graphitic carbon nitride nanosheet: an excellent metal-/label-free biosensing platform [J]. Small, 2014, 10(12): 2382-2389.
- [13] Zhang X, Wang H, Wang H, et al. Single-layered graphitic- C_3N_4 quantum dots for two-photon fluorescence imaging of cellular nucleus [J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2014, 26(26): 4438-4443.
- [14] Tian J, Liu Q, Ge C, et al. Ultrathin graphitic carbon nitride nanosheets: a low-cost, green, and highly efficient electrocatalyst toward the reduction of hydrogen peroxide and its glucose biosensing application[J]. Nanoscale, 2013, 5(19): 8921-8924.
- [15] Wang Y, Wang X, Markus A. Polymeric graphitic carbon nitride as a heterogeneous organocatalyst: from photochemistry to multipurpose catalysis to sustainable chemistry[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2012, 51(1): 68-89.
- [16] Kumar Arun, Ghosh P K, Yadav K L, et al. Thermo-mechanical and anti-corrosive properties of MWCNT/epoxy nanocomposite fabricated by innovative dispersion technique[J]. Composites, Part B. Engineering, 2017, 113: 291-299.
- [17] Liu D, Zhao W, Liu S, et al. Comparative tribological and corrosion resistance properties of epoxy composite coatings reinforced with functionalized fullerene C60 and graphene[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 286: 354-364.
- [18] Liu S, Gu L, Zhao H, et al. Corrosion resistance of graphene-reinforced waterborne epoxy coatings[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(5): 41-47.
- [19] Shao Y, Jia C, Meng G, et al. The role of a zinc phosphate pigment in the corrosion of scratched epoxy-coated steel[J]. Corrosion Science, 2009, 51(2): 371-379.
- [20] Zhang D, Qian H, Wang L, et al. Comparison of barrier properties for a superhydrophobic epoxy coating under different simulated corrosion environments [J]. Corrosion Science, 2016, 103: 230-241.
- [21] Tao Y, Yanan C, Zeshan L, et al. Enhancement of the corrosion resistance of epoxy coating by highly stable 3,4,9,10-perylene tetracarboxylic acid functionalized graphene[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 357: 475-482.

(上接第 251 页)

可快速提升路面功能。同时,所用材料全部为水性环保材料,可最大限度减少施工过程中对环境 and 施工人员造成的危害。

4 结论

(1)通过对水性环氧树脂改性乳化沥青的附着力、硬度、柔韧性、耐冲击性、耐水性和耐热性等物理性能进行实验比较,根据抗滑复合封层材料的具体性能要求,确定使用的水性环氧树脂改性乳化沥青中水性环氧树脂最佳添加量为 30%。

(2)当水性环氧树脂的添加量为 30%时,改性乳化沥青的硬度、附着力、剥离强度、拉拔强度、低温柔韧性都得到了大幅提高,耐热性和抗冻性也有明显改善。

(3)通过 DSC 和 TG 分析进一步表明,经过水性环氧树脂改性后的乳化沥青的耐热性有了明显的

提高。

参考文献

- [1] 蔡丽娜,穆建青,谢邦柱.非离子型水性环氧树脂制备及其改性乳化沥青性能研究[J].石油沥青,2018,32(3):28-31,35.
- [2] 王玉杰.水性环氧树脂改性乳化沥青的应用研究综述[J].江西建材,2016(16):181,184.
- [3] 曾德亮.水性环氧树脂改性乳化沥青在雾封层养护中的应用[J].公路,2015,60(2):212-215.
- [4] 刘宁,钟海燕,杨志鹏,李强,王永维.水性环氧树脂改性乳化沥青混凝土性能研究[J].现代交通技术,2017,14(4):1-4.
- [5] 何远航,张荣辉.水性环氧树脂改性乳化沥青在公路养护中的应用[J].新型建筑材料,2007(5):37-40.
- [6] 种庚子.水性环氧树脂改性乳化沥青在公路养护中的应用[J].华东公路,2017(5):61-63.
- [7] 吕建伟,毕伟林,任斌斌,沙博文,杨妍,孙华阳.水性环氧树脂掺量对 SBR 改性乳化沥青及其混合料的影响[J].石油沥青,2018,32(2):5-9.
- [8] 何远航.水性环氧树脂改性乳化沥青及其微表处路用性能研究[D].广州:广东工业大学,2008.