

文章编号:1007-9629(2021)05-1018-06

# 水性微纳米薄层石墨防腐涂料的制备

王 姚<sup>1</sup>, 邓跃全<sup>1</sup>, 贾 彬<sup>2</sup>, 杨 威<sup>1</sup>, 李 果<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 微纳米颗粒应用研究科技国际合作实验室, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**提出了一种采用膨胀-分散-砂磨体系来制备水性微纳米薄层石墨材料的新方法,并成功应用于水性工业防腐涂料.采用冷场发射扫描电镜(FESEM)、原子力显微镜(AFM)及纳米粒度分析仪对制得的水性微纳米薄层石墨材料形貌结构、宽度、厚度及粒径进行了表征,并通过耐水、耐盐水试验,对水性微纳米薄层石墨防腐涂料的耐腐蚀性进行了评价.结果表明:所获得的水性微纳米薄层石墨材料厚度为5~27 nm,宽度为5~50  $\mu\text{m}$ ,平均粒径在17  $\mu\text{m}$ 左右;利用其制备的防腐涂料具有很好的耐水性,在浸水720 h后仍与原样板几乎无异,远超48 h的行业标准要求;防腐涂料的挥发性有机物(VOC)含量不大于10 g/L,远远小于行业标准中低于300 g/L的要求.

**关键词:**微纳米;薄层;石墨;水性防腐涂料

中图分类号:TU56

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.016

## Preparation of Waterborne Micro-nano Thin Layer Graphite Anti-corrosive Coating

WANG Yao<sup>1</sup>, DENG Yuequan<sup>1</sup>, JIA Bin<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, LI Guo<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang

621010, China; 2. Micro-Nanoparticle Application Research Technology International Cooperation Laboratory,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** A new method for the preparation of waterborne micro-nano thin layer graphite materials by expansion-dispersion-sanding was proposed and successfully applied to waterborne industrial anti-corrosive coating. The morphology, width, thickness and particle size of the prepared waterborne micro-nano thin layer graphite materials were characterized by field-emission scanning electron microscopy (FESEM), atomic force microscopy (AFM) and nano-particle size analyzer. The corrosion resistance of the waterborne micro-nano thin layer graphite anti-corrosive coating was evaluated by water and salt water resistance tests. The results show that the thickness and width of waterborne micro-nano thin layer graphite materials are 5 nm to 27 nm and 5  $\mu\text{m}$  to 50  $\mu\text{m}$  respectively, and the average particle diameter is about 17  $\mu\text{m}$ . The anti-corrosion property of coating prepared by waterborne micro-nano thin layer graphite materials is good, and the sample board is the same as the original board after soaking for 720 h, which far exceeds the standard requirement of 48 h. The volatile organic content (VOC) of the coating was less than 10 g/L, which is much lower than 300 g/L.

**Key words:** micro-nano; thin layer; graphite; waterborne anti-corrosive coating

石墨烯是一种新型石墨材料,自问世以来就备受瞩目.它是一种由碳原子紧密堆积构成的二维晶

收稿日期:2019-08-29; 修订日期:2019-10-18

基金项目:四川金和新型建材有限公司校企合作项目(18zh0382)

第一作者:王 姚(1995—),女,四川成都人,西南科技大学硕士生.E-mail: yaowang0112@126.com

通讯作者:邓跃全(1965—),男,四川绵阳人,西南科技大学教授,硕士生导师,硕士.E-mail: dengyuequan@126.com

体,碳原子之间以  $sp^2$  杂化轨道键合成蜂窝状的晶格,是目前世界上最薄,但硬度最强的纳米材料<sup>[1-3]</sup>;另外,其片状结构带来的良好屏蔽作用可以改善涂层的耐腐蚀性能<sup>[4-11]</sup>.目前石墨烯的制备方法有多种,如机械剥离法、氧化还原法、外延生长法、气相沉淀法等<sup>[12-15]</sup>,但成本都很高,市场价格为 7 000~20 000 元/kg,而且石墨的疏水性很强,不适用于水性体系,这些问题严重制约了其推广应用.

油性防腐涂料虽然干燥性、耐水性能好,但会产生大量的挥发性有机溶剂,造成环境严重污染,在多个领域均被强制性禁止使用<sup>[16-20]</sup>.本文提出了一种采用膨胀-分散-砂磨体系来制备水性微纳米尺寸薄层石墨材料的新方法,通过设计改性助剂体系,制得分散性良好的水性微纳米薄层石墨,并成功应用于水性工业防腐涂料的制备.

## 1 试验

### 1.1 原料及试剂

可膨胀石墨(鳞片尺寸 0.2 mm,晶体粒径 0.1 mm),青岛隆源碳材料有限公司,其膨胀机理为:利用高温将石墨层间插层物(化合物)汽化,产生的膨胀力使石墨片层发生分离并致其体积膨胀.可膨胀石墨的热分析如图 1 所示(试验条件:25~1 000 °C,空气气氛).分析图 1 的 DSC 曲线可以发现:该曲线在 80~700 °C 区间有 1 个较宽的吸热峰,这主要是可膨胀石墨层间化合物在此过程中分解、汽化所致;膨胀从 200 °C 左右开始,至 450 °C 以上汽化的白色雾状气体消失,体积不再增大,说明膨胀在 450 °C 以上完成;450~700 °C 范围有吸热发生,分析认为是石墨与氧反应前的吸热过程;700 °C 以后,开始反应生成  $CO_2$ ,放出热量,导致 700~850 °C 区间内有 1 个放热峰.分析图 1 的 TGA 曲线可以发现:可膨胀石墨失重分为 2 个阶段,在 25~700 °C 区

间,石墨失重率约 30.2%,正好对应 DSC 曲线上的吸热峰位置;在 700~850 °C 区间,失去剩余的质量,与 DSC 曲线上的放热峰对应<sup>[21-22]</sup>.

消泡剂(XHD103),自贡市鑫海达化工有限公司;成膜助剂(醇酯-12),广州雅创贸易有限公司;多聚磷酸锌,威海宏业精细化工有限公司;羟乙基纤维素,广州市润宏化工有限公司;增稠剂(ZC804),广州市中万新材料有限公司;偶联剂(KH550),南京优普化工有限公司;分散剂(DS-172),天津赫普菲乐新材料有限公司;苯丙乳液,河南赛恩化工产品有限公司;防腐剂(KS-275),济南卡松化工有限公司;铁红粉(氧化铁红 130),广州展飞化工科技有限公司;石粉,四川雅安宝兴县宇涛实业有限责任公司;三聚磷酸铝,山东千贝化工有限公司;钢板,市售;亚硝酸钠,分析纯,市售.

### 1.2 仪器设备

SDT Q160 热分析仪,美国 TA 仪器公司;JJ-1 大功率电动搅拌器,常州澳华仪器有限公司;箱式电阻炉,沈阳市节能电炉厂;YL8022-C 单相双值电容异步电动机,天津市静海县陈兴电机厂;SDF400 分散砂磨机,莱州市成悦化工机械厂;JY20002 电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;GZQ 漆膜干燥时间试验器,上海瞰翔仪器设备有限公司;90PLUS 纳米粒度分析仪,美国 Brookhaven 公司;UItra55 高分辨冷场发射扫描电子显微镜(FESEM)分析系统,德国 Carl zeiss NTS GmbH;SPA-300HV 原子力显微镜(AFM),日本精工公司;AN-YW-200 盐雾试验设备,深圳市安规检测设备有限公司.

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 水性微纳米薄层石墨的制备

原料配比(质量分数,下同):水 70.0%、成膜助剂 2.0%、偶联剂 1.0%、分散剂 1.5%、可膨胀石墨 5.5%、羟乙基纤维素水溶液 20.0%;此外,加入适量消泡剂以完成消泡.

制备方法:首先称取一定量的可膨胀石墨放于马弗炉中煅烧至 450~500 °C,直到无烟气冒出,完成膨胀,取出膨胀石墨粉;然后根据原料配比,依次将相应质量分数的膨胀石墨粉、成膜助剂、偶联剂、分散剂、消泡剂、羟乙基纤维素水溶液与水混合,边加边搅拌,高速分散至充分混匀,再用磨浆机磨制均匀,得到水性微纳米薄层石墨浆体.

#### 1.3.2 水性微纳米薄层石墨防腐涂料的制备

水性防腐涂料原料配比:水 15.0%、成膜助剂 0.7%、苯丙乳液 50.0%、铁红粉 7.0%、多聚磷酸锌

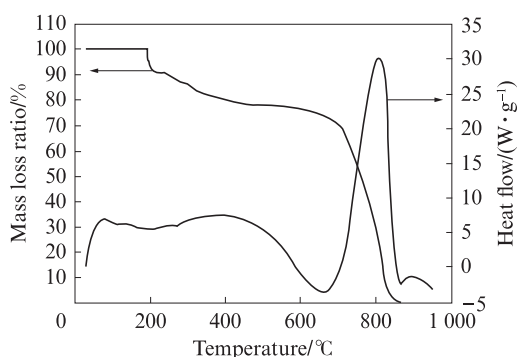


图 1 可膨胀石墨的 DSC-TGA 图

Fig. 1 DSC-TGA image of expandable graphite

3.0%、石粉 14.0%、亚硝酸钠 0.2%、三聚磷酸铝 5.0%、羟乙基纤维素水溶液 5.0%、增稠剂 0.1%~0.3%、防腐剂 0.1%；此外，加入适量消泡剂和适量分散剂以完成消泡和分散。

水性防腐涂料制备方法：首先加入水，然后依次加入分散剂、消泡剂、成膜助剂，待搅拌均匀后加入苯丙乳液，充分搅拌；再加入铁红粉、多聚磷酸锌、石粉、亚硝酸钠、三聚磷酸铝，高速分散后，加入羟乙基纤维素水溶液、增稠剂、防腐剂，搅拌均匀并砂磨 0.5 h 以上，用 0.125 mm 筛过滤，制得水性防腐涂料。

水性微纳米薄层石墨防腐涂料制备方法：将制备水性防腐涂料所需原料配比中的水替换成水性微纳米薄层石墨浆体，其余步骤不变，制得水性微纳米薄层石墨防腐涂料。

### 1.3.3 防腐涂层试块的制备

使用切割机切割出若干 10.0 cm×10.0 cm×0.4 cm 的铁片，用砂纸打磨至表面光滑后，用水反复清洗干净，置于烘箱中烘干后取出。将配制好的防腐涂料均匀涂刷在铁片上，施涂 1 道后自然晾干，用于检验干燥时间；施涂 2 道后自然晾干，用于耐水性检验；施涂 2 底 2 面后自然晾干，用于耐盐水性检验。每次施涂间隔 24 h（见 HG/T 4758—2014《水性丙烯酸树脂涂料》）。

### 1.3.4 涂膜性能测试

采用下列检测方法测定水性微纳米薄层石墨防腐涂料的性能，本次性能试验主要聚焦在涂膜的耐

水性和耐盐水性检测。

(1) 涂膜耐水性检验 按 GB/T 1733—1993《漆膜耐水性测定法》进行检验，按 GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》进行结果评定。在常温下，将铁片样板放入盛有蒸馏水或去离子水的水槽中，并使样板的 2/3 处在液面以下，浸泡至少 24 h 后从水槽中取出；用滤纸吸干铁片样板表面，观察并记录其是否有变色、失光、生锈、脱落、起泡等现象。

(2) 涂膜耐盐水性检验 按 GB/T 9274—1988《色漆和清漆 耐液体介质的测定》进行检验，按 GB/T 1766—2008 进行结果评定。将铁片样板浸入质量分数为 3% 的 NaCl 溶液中，并使铁片样板的 2/3 处于液面以下，同样浸泡至少 24 h 后取出；用滤纸擦拭样板表面除去残余的液体，观察并记录其是否出现变色、失光、生锈、脱落、起泡等现象。

### 1.3.5 表征方法

采用热分析仪对石墨粉进行热重分析；采用高分辨冷场发射扫描电子显微镜 (FESEM)、原子力显微镜 (AFM) 来表征水性微纳米薄层石墨材料的形貌结构、厚度和宽度，并采用激光粒度分析仪对其粒径进行表征和分析。

## 2 结果和讨论

### 2.1 水性微纳米薄层石墨材料的表征与分析

对水性微纳米薄层石墨材料进行 FESEM、AFM 及粒度分析，结果如图 2~4 所示。

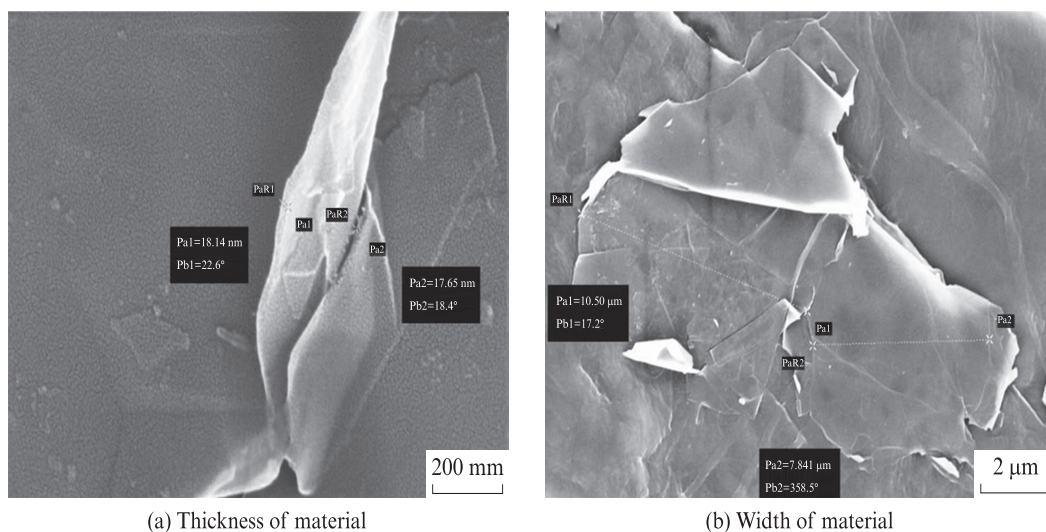


图 2 水性微纳米薄层石墨材料的 FESEM 图  
Fig. 2 FESEM image of waterborne micro-nano thin layer graphite material

由图 2 可见：水性微纳米薄层石墨片层近似透明，说明其较薄，基本被分开，其厚度范围为 5~27 nm。其

中图 2(a) 的石墨片层厚度约 18 nm，宽度为 5~50 μm；图 2(b) 的石墨片层宽度为 7~10 μm。



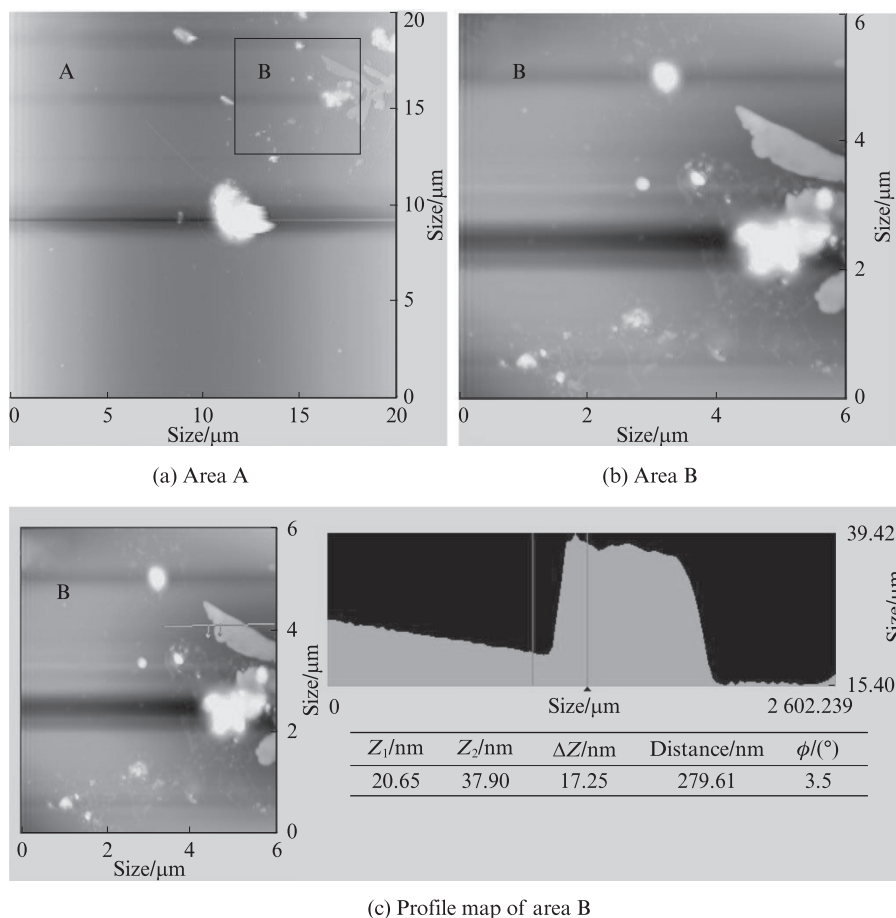


图3 水性微纳米薄层石墨材料的AFM图

Fig.3 AFM image of waterborne micro-nano thin layer graphite material

图3(a)、(b)为不同扫描区域的水性微纳米薄层石墨材料AFM图.由图可见:扫描区域内石墨层被分开呈片状,表面较平整.图3(c)为水性微纳米薄层石墨材料AFM扫描的剖面分析图,所选观察区域为 $6\mu m \times 6\mu m$ ,其中右图为该观察区域中所选横线位置样品的剖面分析图,图中横坐标代表观察区域平面(X,Y)内横线位置样品剖面的水平长度,纵坐标代表轮廓线的竖直高度(Z),纵坐标 $Z_1$ 代表第1条纹与轮廓线交点的竖直高度,图中为20.65 nm;纵坐标 $Z_2$ 代表第2条纹与轮廓线交点的竖直高度,图中为37.90 nm; $\Delta Z$ 为轮廓线竖直方向的高度差,即所测石墨片层的厚度.由图3(c)可见,所测石墨片层厚度约17 nm,这与FESEM分析结果相符.

图4是水性微纳米薄层石墨材料的激光粒度分布曲线.由图4可见:石墨材料呈单峰分布,峰型不对称,粒度范围较宽,为 $5\sim 60\mu m$ ,平均粒径在 $17\mu m$ 左右,中值粒径 $D_{50}$ 约 $20\mu m$ ,这意味着有50%体积分数的石墨材料粒径小于 $20\mu m$ .

总体看来,所制备的水性微纳米薄层石墨材料平均厚度约20 nm,平均宽度约 $20\mu m$ ,是一种优异的微

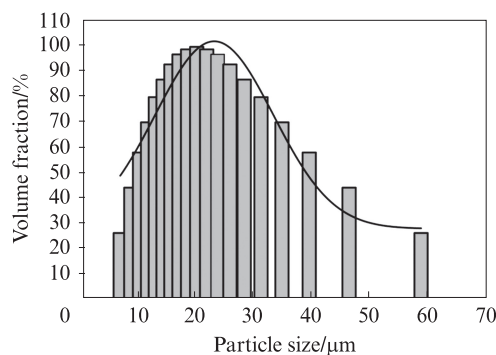


图4 水性微纳米薄层石墨的激光粒度分析

Fig.4 Laser particle size analysis of waterborne micro-nano thin layer graphite material

纳米薄层石墨材料,作为阻隔材料,具有突出的屏蔽性能.

### 2.2 水性微纳米薄层石墨防腐涂料性能分析

以HG/T 4758—2014中II型(常温自干型单组分涂料)面漆指标为参照,分析水性微纳米薄层石墨防腐涂料的各项性能,结果如表1所示.由表1可知,2种水性防腐涂料在容器中的状态良好,其施工性、漆膜外观、闪锈抑制性和耐盐水性等都符合HG/T 4758—2014行业标准的要求,突出的优点为:(1)加

有薄层石墨材料的水性防腐涂料具有优异的耐水性,在浸水720 h以上时,铁片样板仍然保持完好,远超48 h的行业标准要求,表明这种薄层石墨材料具

有极好的防水作用;(2)2种水性防腐涂料中的挥发性有机物(VOC)含量均不大于10 g/L,远远小于低于300 g/L的行业标准要求,水性环保。

表1 水性微纳米薄层石墨防腐涂料的性能

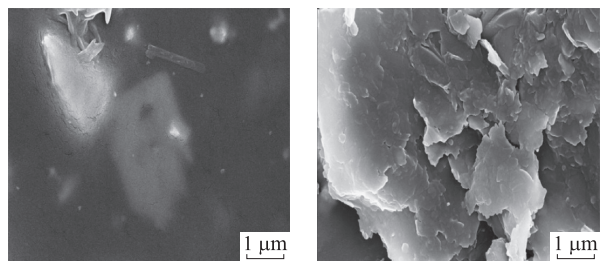
Table 1 Properties of waterborne micro-nano thin layer graphite anti-corrosive coating

Project	Index (HG/T 4758—2014)	Waterborne anti-corrosive coating	Waterborne micro-nano thin layer graphite anti-corrosive coating
State in the container	After mixing, there is no hard lump and is uniform	After mixing, there is no hard lump and is uniform	After mixing, there is no hard lump and is uniform
Volatile organic content (VOC)/(g·L <sup>-1</sup> )	≤300	≤10	≤10
Constructability	Barrier-free	Barrier-free	Barrier-free
Flash rust inhibition	Normal	Normal	Normal
Appearance	Normal	Normal	Normal
Water resistance	No blistering, no shedding, and slight discoloration (24 h)	Blistering, no shedding, discoloration (>48 h)	No blistering, no shedding and no discoloration (>720 h)
Salt water resistance (3%NaCl)	No blistering, no rusting, and slight discoloration(96 h)	No abnormality	No abnormality
Salt spray resistance		No blistering, no rusting, no cracking and no peeling(96 h)	No blistering, no rusting, no cracking and no peeling(96 h)

### 2.3 机理分析

图5为水性防腐涂料和水性微纳米薄层石墨防腐涂料的FESEM图。

由图5(a)可见,涂膜中有角状的钛白粉和重钙粉颗粒,直径约10 μm。由图5(b)可清晰观察到大量的片状石墨叠存于涂膜中,叠放层数多,连接紧密,这是由于具有纳米尺寸的石墨片状薄层能在固体加入量较小的情况下(本涂料加入的微纳米薄层石墨材料固含量为0.83%)产生巨大的表面积,能平铺形成多层阻隔结构,腐蚀物必须经过漫长的路径才能到达铁片表面,因而减小了产生腐蚀的概率,增强了涂料的防水和防腐蚀性能。



(a) Waterborne anti-corrosive coating (b) Waterborne micro-nano thin layer graphite anti-corrosive coating

图5 2种水性防腐涂料的FESEM图

Fig. 5 FESEM images of waterborne anti-corrosive coating and waterborne micro-nano thin layer graphite anti-corrosive coating

为了定量分析上述效果,假设一般粉体如重钙颗粒为球状,在直径 $d=10\ \mu\text{m}$ 情况下,其表面积 $S_1=4\pi r^2=4\times 3.14\times 5^2=314\ \mu\text{m}^2$ ; 体积 $V_1=$

$\frac{4}{3}\pi r^3=\frac{4}{3}\times 3.14\times 5^3=523\ \mu\text{m}^3$ ;厚度约20 nm、长为20 μm的微纳米薄层石墨片体积 $V_2=20\times 20\times 10^{-3}=8\ \mu\text{m}^3$ 。

粉体颗粒与石墨片体积比: $\frac{V_1}{V_2}=\frac{523}{8}\approx 65$ 。

相同体积的微纳米薄层石墨片表面积(忽略侧面积) $S_2=20\times 20\times 2\times 65=5.2\times 10^4\ \mu\text{m}^2$ ,则: $\frac{S_2}{S_1}=\frac{5.2\times 10^4}{314}\approx 166$ 。

由此可见,本文所制备的微纳米薄层石墨材料表面积比一般粉体颗粒表面积大100倍以上,从而大大增加了涂膜的叠放层数,增强了其致密性,效果非常好。

### 3 结论

(1)水性微纳米薄层石墨材料的厚度范围为5~27 nm,宽度范围为5~50 μm,平均粒径在17 μm左右,中值粒径 $D_{50}$ 约20 μm。

(2)所制备的水性微纳米薄层石墨防腐涂料的各项性能都符合HG/T 4758—2014《水性丙烯酸树脂涂料》行业标准的要求,其中耐水性能特别突出,在浸水720 h以上时,铁片样板仍然完好,挥发性有机物(VOC)含量不大于10 g/L,远远小于低于300 g/L的行业标准要求,水性环保。

(3)水性微纳米薄层石墨材料叠存于涂膜中,紧密连接,其表面积比一般粉体颗粒表面积大100倍以上,是一种很好的阻隔材料,大大增强了涂膜的致密性。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张文毓. 石墨烯在涂料领域中的应用进展[J]. 上海涂料, 2019, 57(1): 37-40.  
ZHANG Wenyu. Application progress of graphene in the field of coatings[J]. Shanghai Coatings, 2019, 57(1): 37-40. (in Chinese)
- [ 2 ] 王清海, 王秀娟, 方健君, 等. 石墨烯在涂料中的应用[J]. 涂料技术与文摘, 2016(9): 14-16.  
WANG Qinghai, WANG Xiujuan, FANG Jianjun, et al. Application of graphene in coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2016(9): 14-16. (in Chinese)
- [ 3 ] 乔峰, 朱海涛. 石墨烯制备、表征及应用研究最新进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(10): 15-17.  
QIAO Feng, ZHU Haitao. New progress in preparation, characterization and application of graphene[J]. New Chemical Materials, 2010, 38(10): 15-17. (in Chinese)
- [ 4 ] 陈建华, 李文戈, 赵远涛, 等. 石墨烯在防腐防污涂料中的应用进展[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 89-97.  
CHEN Jianhua, LI Wenge, ZHAO Yuantao, et al. Application of graphene in anti-corrosive and anti-fouling Coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 89-97. (in Chinese)
- [ 5 ] MAHMOUDI M, RAEISSI K, KARIMZADEH F, et al. A study on corrosion behavior of graphene oxide coating produced on stainless steel by electrophoretic deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 372: 327-342.
- [ 6 ] KIM H, ABDALA A A, MACOSKO C W. Graphene/polymer nanocomposites[J]. Macromolecules, 2015, 43(16): 6515-6530.
- [ 7 ] 蓝席建, 周福根, 冯伟东. 石墨烯导电海洋重防腐涂层的研制[J]. 上海涂料, 2014, 52(12): 17-20.  
LAN Xijian, ZHOU Fugen, FENG Weidong. Development of graphene conductive marine heavy anti-corrosion coatings[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(12): 17-20. (in Chinese)
- [ 8 ] 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.  
HUANG Kun, ZENG Xianguang, PEI Songfeng, et al. Research on anticorrosive performance of graphene/epoxy composite conductive coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, 45(1): 17-20. (in Chinese)
- [ 9 ] CHANG C H, HUANG T C, PENG C W, et al. Novel anticorrosion coatings prepared from polyaniline/graphene composites[J]. Carbon, 2012, 50(14): 5044-5051.
- [ 10 ] YUYH, LINYY, LINCH, et al. High-performance polystyrene/graphene-based nanocomposites with excellent anti-corrosion properties[J]. Polymer Chemistry, 2013, 5(2): 535-550.
- [ 11 ] LIU S, GU L, ZHAO H, et al. Corrosion resistance of graphene-reinforced waterborne epoxy coatings[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 32: 425-431.
- [ 12 ] PAN B L, XU G Q, ZHANG B W, et al. Preparation and tribological properties of polyamide 11/graphene coatings[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2012, 51(11): 1163-1166.
- [ 13 ] YANG W, CHEN G, SHI Z, et al. Epitaxial growth of single-domain graphene on hexagonal boron nitride[J]. Nature Materials, 2013, 12(9): 792-797.
- [ 14 ] 姜威, 陆佳. 浅谈石墨烯的制备及应用[J]. 化学工程师, 2019, 33(5): 78-80.  
JIANG Wei, LU Jia. Progress in preparation and application of graphene[J]. Chemical Engineer, 2019, 33(5): 78-80. (in Chinese)
- [ 15 ] 陈泽宇, 闫娜, 王再红. 石墨烯制备方法的分析探讨[J]. 蓄电池, 2019, 56(3): 110-113, 119.  
CHEN Zeyu, YAN Na, WANG Zaihong. Analysis and study on the preparation method of graphene[J]. Chinese LABAT Man, 2019, 56(3): 110-113, 119. (in Chinese)
- [ 16 ] ZHONG F, HE Y, WANG P Q, et al. Self-assembled graphene oxide-graphene hybrids for enhancing the corrosion resistance of waterborne epoxy coating[J]. Applied Surface Science, 2019, 488: 801-812.
- [ 17 ] 季东, 赵红冉, 丁纪恒, 等. 石墨烯水分散液: 增强水性环氧涂料的耐蚀性[J]. 功能材料, 2019, 50(4): 4130-4135.  
JI Dong, ZHAO Hongran, DING Jiheng, et al. Graphene water dispersion: Enhancing the corrosion resistance of waterborne epoxy coatings[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(4): 4130-4135. (in Chinese)
- [ 18 ] 邹静. 氧化石墨烯改性水性环氧防腐涂料的制备及性能研究[J]. 化学工程师, 2019, 33(2): 1-4.  
ZOU Jing. Preparation and properties of graphene oxide modified waterborne epoxy anticorrosive coatings[J]. Chemical Engineer, 2019, 33(2): 1-4. (in Chinese)
- [ 19 ] 刘海波. 水性石墨烯防腐涂料的制备与机理[J]. 云南化工, 2018, 45(7): 74-75.  
LIU Haibo. Preparation and mechanism of waterborne graphene anticorrosive coatings[J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(7): 74-75. (in Chinese)
- [ 20 ] 张艳, 戴雷, 黄友元, 等. 石墨烯水性复合防腐涂料的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 42-49.  
ZHANG Yan, DAI Lei, HUANG Youyuan, et al. Research on graphene-based waterborne composite anticorrosive coatings[J]. Surface Technology, 2017, 46(10): 42-49. (in Chinese)
- [ 21 ] 叶飞. 可膨胀石墨膨胀模型及其反应动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
YE Fei. Study on the expansion model and reaction kinetics of expandable graphite[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [ 22 ] 陈文亮, 滕东晓, 马元, 等. 膨胀石墨材料的研究进展及其综述[J]. 科技创新导报, 2019, 16(6): 111-114.  
CHEN Wenliang, TENG Dongxiao, MA Yuan, et al. Review of research progress and application of expanded graphite materials[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(6): 111-114. (in Chinese)