

非水分散体材料的制备与应用

王浩宇, 余文杰, 彭 坤, 樊庆春*

(武汉工程大学化工与制药学院, 绿色化工过程教育部重点实验室, 武汉 430205)

摘要: 非水分散体材料是由高聚物胶态粒子在特殊聚合稳定剂的保护下, 于非极性有机溶剂中形成的稳定分散体系, 具有低污染、节约能源的优良特性, 可望解决环保与资源矛盾和突破材料设计瓶颈。该体系以非极性脂肪烃类溶剂为分散介质, 具有优异的表面改性能力, 可广泛应用于各个领域。本文系统综述了非水分散体材料的稳定机理, 包括稳定剂的双亲结构设计和空间位阻的作用, 介绍合成法和转化法两种制备方法以及应用性能与领域, 展望了其未来发展前景。

关键词: 非水分散体; 稳定机理; 合成法; 转化法; 涂料

中图分类号: TQ630.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)02-0033-06

Preparation and Applications on Non-aqueous Dispersion Materials

WANG Hao-yu, YU Wen-jie, PENG Kun, FAN Qing-chun*

(Key Laboratory of Green Chemical Processes, Ministry of Education, College of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Wuhan University of Engineering, Wuhan 430205, China)

Abstract: Non-aqueous dispersion material is a stable dispersion system formed by polymer colloidal particles in non-polar organic solvents under the protection of special polymerization stabilizers. It has excellent characteristics of low pollution and energy saving. It is expected to solve the contradiction between environmental protection and resources and break through the bottleneck of material design. The system uses non-polar aliphatic hydrocarbon solvents as dispersion media and has excellent surface modification ability, which can be widely used in various fields. In this paper, the stability mechanism of non-aqueous dispersion materials is systematically reviewed, including the amphiphilic structure design of stabilizers and the role of steric hindrance. Two preparation methods, synthesis method and conversion method, as well as their application properties and fields are introduced, and their future development prospects are prospected.

Key words: non-aqueous dispersion; stability mechanism; synthesis method; conversion method; coating

0 引言

非水分散体是由聚合物胶态粒子(粒径 0.01~30 μm)在两亲性高分子稳定剂保护下,分散于非极性有机溶剂(如脂肪烃、烷烃混合物)中形成的热力学稳定体系,其区别于传统溶剂型/水性体系的关键在于分散

介质和稳定机制。非水分散体材料的分散介质一般为介电常数 $\epsilon < 5$ 的低极性溶剂(己烷、庚烷等),来减少烯烃和芳烃的使用^[1]。

20 世纪 70 年代,英国 ICI 化学公司在寻找一种低污染、可节约能源的材料时,用化学合成法成功制备了非水分散体材料^[2]。研究非水分散体的意义在于解决环保与性能矛盾和突破材料设计瓶颈。在环保方面以脂肪烃替代苯类溶剂,使涂料 VOC 排放 $< 150 \text{ g/L}$ (欧盟标准限值 350 g/L)。非水分散体高固低黏的性能优势巨大,70%固含量下黏度仅 $2\ 000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (溶剂型体系同等固含量下黏度 $> 5\ 000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)。在材料设计方

收稿日期: 2025-09-08

作者简介: 王浩宇(2001—),男,硕士在读,主要从事粉末涂料的研究工作。E-mail: 2454017137@qq.com。

*通信作者: 樊庆春(1974—),男,硕士,副教授,主要从事精细高分子化工科研与教学工作。E-mail: fanwangle@163.com。

面,非水分散体可通过稳定剂设计实现多功能可控,如温度、pH 响应。生物拓展里固体油分散体(S/O)用于口服药物递送,生物利用度上升 30%。

1 稳定机理

关于稳定机理,需要从两个层面展开。首先是结构化学层面,两亲性分子设计至关重要;其次是热力学层面,熵变排斥是核心。

1.1 稳定剂的双亲结构设计

VANDER WAARDEN 用炭黑焦炭粒子吸附含有长脂肪支链的芳香化合物,其能在液态烷烃中稳定地分散,由此初步阐明了非水型分散液的稳定机理。长脂肪支链的芳香族化合物能在液态烷烃或其他分散体系中对分散相胶态粒子起稳定作用^[3]。

1)亲溶剂链段(如 C18 烷基):亲连续相的脂肪链与非极性介质相容,部分溶于溶剂中,另一部分不溶,固定在表面,形成动态保护层。亲溶剂链段伸向分散介质形成“分子刷”(如聚-12 羟基硬脂酸/PHS,聚月桂酸甲酯);

2)锚定链段(如极性基团):通过化学键/范德华力吸附于粒子表面(如聚甲基丙烯酸缩水甘油酯、聚丙烯酸酯)与聚合物表面形成强相互作用;

3)以上两个原因相互影响,构成双链段协同作用。

以聚(甲基丙烯酸甲酯-g-12 羟基硬脂酸)(PMMA-g-PHSA)为例,其稳定机理见图 1 所示^[4]。PMMA 段锚定于丙烯酸粒子表面,PHSA 长脂肪链(C18)在脂肪烃中充分伸展。

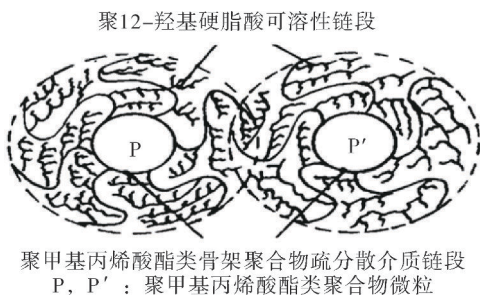


图 1 PMMA-g-PHSA 稳定机理示意

1.2 空间位阻的三重作用

熵排斥效应(主导机制)^[5]:分散剂分子的锚固基团吸附在颗粒表面,而溶剂化链段伸展成位阻层,阻碍碰撞与沉淀,如图 2 所示^[6]。长链稳定剂在粒子靠近时发生构象受限,当两个粒子接近至距离 $D < 2\delta$ (δ 为溶剂化层厚度)时,溶剂化链段相互压缩重叠导致构象熵降低 ($\Delta S < 0$),根据热力学公式: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$,即使 $\Delta H \approx 0$ (非极性体系),则 $\Delta G > 0$ (非自发过程), ΔG 也

会增大,形成排斥势垒,产生强排斥力(可达 10^{-10} N 量级)。

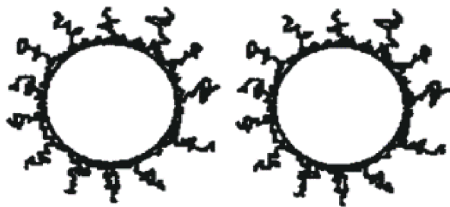


图 2 空间位阻稳定示意

渗透压效应:重叠区聚合物链段浓度升高→局部渗透压增大→溶剂分子向重叠区迁移→推离粒子。

弹性斥力:压缩导致链段弹性形变→储存弹性能→恢复原状时做功排斥。

最新研究进展中有双机理协同稳定(Space-Electro Hybrid):在介电常数 $\epsilon = 5 \sim 10$ 的溶剂(如丁酮)中,空间位阻与弱静电排斥协同作用^[7]。同时还有响应性稳定剂包括 pH 响应型和温度响应型。pH 响应型:聚丙烯酸-b-聚苯乙烯(PAA-b-PS)在酸性介质收缩锚定^[8]。温度响应型:聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAm)链段在 40 °C 收缩增强位阻层密度^[9]。

综上,非水分散体的稳定本质是熵驱动过程,通过精心设计两亲性高分子稳定剂,在粒子表面构建动态的溶剂化层,利用热力学排斥力抵抗范德华吸引力。该机制使非水分散体在高达 70% 固含量下仍保持稳定流动,成为环保型高性能涂料的核心技术基础。

2 非水分散体的制备

非水分散体的制备核心是在非极性有机介质中,通过稳定剂的作用,原位生成或引入聚合物颗粒并使其稳定分散。

其主要制备方法可分为两大类:合成法和转化法^[10-11],合成法包括分散聚合法和正相微乳液聚合法^[12],如图 3 所示。

2.1 转化法

转化法是先通过传统的水性乳液聚合得到聚合物乳液,然后通过添加表面活性剂和有机溶剂,使其从“油包水”体系转化为“水包油”体系,最终得到非水分散体。阳离子表面活性剂可以稳定乳液将其转化为非水分散体,比如季铵盐、伯胺、仲胺、叔胺等。步骤为:1)稀释水性乳液;2)将阳离子表面活性剂(如双十二烷基二甲基氯化铵)溶于有机溶剂;3)高速搅拌下混合至分相,收集树脂凝聚体;4)再分散于非极性溶剂中^[13]。转化法的优点是固含量高(>50%)、黏度低,可利用成熟的水性乳液技术,缺点是残留表面活性剂降低材料耐水性,限制了工业应用。

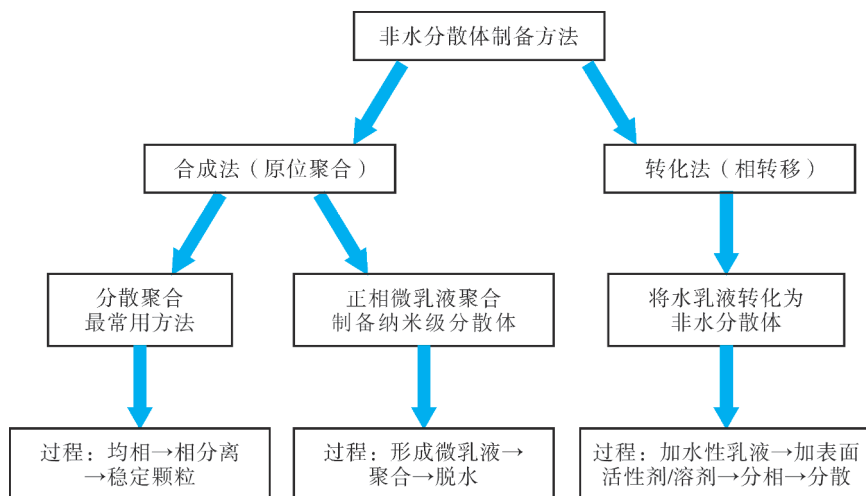


图3 非水分散体的制备方法

2.2 合成法制备非水分散体

合成法包括分散聚合法和正相微乳液聚合法,其中分散聚合法是制备非水分散体最常用的方法,正相微乳液聚合法是制备纳米级分散体的方法。

2.2.1 分散聚合法

分散聚合是一种沉淀聚合,其过程为:单体、稳定剂和引发剂最初都溶解在溶剂中,形成一个均相体系。随着聚合反应的进行,生成的聚合物链逐渐不溶于该溶剂,从体系中沉淀出来,并在稳定剂的作用下形成稳定胶态分散粒子。

分散稳定剂的作用是吸附或锚定在新生聚合物颗粒表面,提供空间位阻效应,防止颗粒团聚。分散稳定剂的种类较多,常用的有聚乙烯基吡咯烷酮(PVP)、羟丙基纤维素(HPC)、聚乙烯醇(PVA)。

这三种分散剂各有不同的应用。李国伟等^[14]通过分散聚合,采用原位沉积法在聚酰亚胺(PI)薄膜表面制备聚苯胺(PANI)膜。低分子量的PVP-K30和两亲性小分子稳定剂不能很好地稳定PANI成膜,稳定作用较差。高分子量的PVP-K90的稳定作用不仅依据亲水-疏水相互作用和表面能的减少,还可能与PVP的长链分子结构及与水与苯胺的特殊相互作用有关。李国伟的研究展示了高分子量PVP的特殊价值,不仅提供空间位阻,还能通过氢键与单体相互作用。这个发现突破了传统认知,说明稳定剂除了物理作用还可能具有化学协同效应。

SÁLEK等^[15]在连续添加二乙烯基苯的情况下,苯乙烯和二乙烯基苯在2-甲氧基乙醇/乙醇混合物中通过2-羟丙基纤维素稳定分散共聚制备了窄粒径分布的聚(苯乙烯-共二乙烯基苯)微球。这种制备方法核心突破在于“连续添加DVB”。传统工艺是一次性投

料,会导致早期交联过度引发团聚。通过蠕动泵缓慢滴加,将反应控制在成核期完成后再交联,是很好的思路。但是潜在的缺陷是HPC在高温下可能解吸附。

ZANG L M等^[16]在磷酸化聚乙烯醇(PPVA-ATP/PPy)存在下通过化学氧化聚合制备了具有纳米级棒状形态的凹凸棒石/聚吡咯(ATP/PPy)纳米复合材料。PPVA在这项工作中同时起掺杂剂和分散剂的作用。多功能稳定剂在非水分散体领域是重要方向。

具有两亲性的接枝或嵌段聚合物:这是研究最多的一类分散稳定剂。PAPWORTH S E^[17]在研究聚甲基丙烯酸甲酯PMMA的稳定非水分散体的条件时,空间稳定剂都是接枝到聚(甲基丙烯酸甲酯-g-甲基丙烯酸缩水甘油酯)骨架上的聚(12-羟基硬脂酸)(PHSA)的两亲性“梳状”分子,形成结构为嵌段/接枝共聚物PHSA-g-PMMA。锚定链段需与分散相极性匹配(如PMMA微粒宜用含酯基稳定剂)。研究发现,当稳定剂水平为单体浓度的5%时,形成的颗粒大小与单体浓度本身无关。从Papworth的研究来看,核心突破在于揭示了稳定剂浓度与粒径的独立性规律,当PHSA-g-PMMA用量达5%时,粒径不受单体浓度影响。5%的阈值相当于在分散体系中建立了热力学稳定的临界点。

分散聚合法的关键步骤为:1)体系配制—分散介质选择非极性或低极性溶剂(如正己烷、庚烷、白油、溶剂油)。单体通常为极性较高的单体,如甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯酸丁酯(BA)、苯乙烯(St)、丙烯腈(AN)等,它们可溶于介质但其聚合物不溶。分散稳定剂是核心组分,通常是两亲性的嵌段或接枝共聚物(如PHSA-g-PMMA)。引发剂选择油溶性引发剂,如偶氮二异丁腈(AIBN)、过氧化二苯甲酰(BPO);2)聚合反应—在氮气保护下,将混合物加热至引发剂分解温度

(如 60~80 ℃)。引发剂分解产生自由基,引发单体聚合。当聚合物链增长到一定长度后,因其不溶于溶剂而从体系中相分离出来,形成初始的微小核;3)颗粒稳定与生长—分散稳定剂迅速吸附到这些新生的聚合物核表面,阻止它们相互团聚。溶解在溶剂中的剩余单体扩散进入已形成的颗粒内部,继续聚合,使颗粒长大。这个过程持续进行,直至单体消耗完毕;4)后处理—反应结束后,冷却至室温,过滤除去可能产生的少量凝胶,即得到稳定的非水分散体。

2.2.2 正相微乳液聚合方法

正相微乳液聚合法过程与水相微乳液聚合类似,但介质为有机溶剂。正相微乳液聚合法主要步骤包括:1)形成微乳——将单体、水(或水溶性引发剂)、乳化剂(如 SDS)在有机溶剂中通过高速剪切或超声,形成热力学稳定的“正相微乳液”,即微小的水核被表面活性剂包裹,分散在油相中;2)聚合——引发聚合反应,反应在水核中进行;3)脱水后处理——反应完成后,通过蒸馏或其他方法去除体系中的水,得到表面活性剂稳定的、纳米级的聚合物粒子在有机溶剂中的分散体。

3 非水分散体的应用

非水分散材料自问世以来对其研究已经历了近 40 年,以其自身的环保性、工艺适应性、应用广泛性在涂料、文物保护、农业化学品和药物输送等领域有着广泛的用途。

3.1 应用于涂料行业

非水分散体在涂料工业中具有核心优势^[18-20],如表 1 所列。

表 1 非水分散体涂料优势

性能指标	传统溶剂 型涂料	非水分散 体涂料	提升效果
固含量/%	30~40	60~70	减少溶剂用量 50%以上
施工黏度(70%固 含)/(mPa·s)	>5 000	800~2 000	喷涂流动性提升 3 倍
VOC 排放/(g·L ⁻¹)	400~600	<150	符合欧盟 2024 环保新规
成膜硬度	2H	3H~4H	耐磨性提高 40%
干燥时间(25 ℃) /min	45	15~20	生产效率提升 60%

非水分散体固体含量高、黏度低,聚合物粒子呈“硬球模型”,粒子间自由溶剂充足,即使固含量 70% 仍保持牛顿流体行为^[21]。在分散相的制备中,聚氨酯改性非水分散体(引入脉键)可增强涂膜氢键网络,提升机械强度^[22]。

非水分散体可以作为高固体含量涂料的基础。通过非水分散和水性乳液聚合技术制备的粒径均匀的丙

烯酸聚合物,具有类似于聚氯乙烯中存在的微晶域的热可逆交联,从而提高了塑料溶胶稳定性。

非水分散体中最为重要的一种是反应性微凝胶。微凝胶具有轻度网状结构,经聚合反应后处理,引入—COOH/—OH 等基团实现交联,成为反应性微凝胶。微凝胶颗粒可用于溶剂型和水性涂料,添加 1%~5% 的微凝胶可抑制颜料沉降,改善流挂性(膜厚提升 30%)^[23]。高度交联、不溶胀的微凝胶是有机涂料中的良好黏合剂,尤其是在高固含量涂料配方中。此外,微凝胶还影响了薄膜性能的流变性和拉伸强度。高度膨胀的微凝胶也作为流变改性剂掺入涂料中,它们可以表现出假塑性行为,即具有较高的低剪切黏度和较低的高剪切黏度。因此,涂料可以长期储存,颜料不会沉降到底部,直接喷涂而不会变薄。微凝胶也用作油漆中的填料,以改善油漆的成膜性能。此外,它们还可以增强固化漆膜并改善其机械性能以及耐候性和抗冲击性。

非水分散体涂料可增强耐候性,具有紫外屏蔽机制。在非水分散体粒子表面接枝纳米 TiO₂ (粒径 20 nm),通过“核-壳”结构反射 UV,结果显示 UV-A 屏蔽率 95%^[24],而普通涂料只有 70%,并且 QUV 老化 3 000 h 保光率大于 90%^[25]。

汽车涂料领域中,底漆使用环氧非水分散体涂料(固含 68%)配合磷酸锌颜料可耐盐雾试验 1 000 h 无起泡^[26]。面漆使用丙烯酸非水分散体金属漆,铝粉定向排列 $\Delta L < 1.5$ (传统工艺 $\Delta L > 2.0$)。清漆使用有机硅改性非水分散体,耐刮擦性提升 50%使洗车划痕减少^[27]。

塑料涂料可改善附着力。PP 基材中使用非水分散体树脂接枝马来酸酐(接枝率 1.2%),附着力达 5B^[28]。PC/ABS 中添加聚氨酯微凝胶(粒径 0.3 μm),耐冲击性可大于 50 cm^[29]。

非水分散体涂料前沿研究方向有生物基非水分散体,使用腰果酚替代苯乙烯,可再生碳含量 > 50%,已实现了固含 62% 的工业样品^[30]。自修复涂料中,微胶囊化 DCPD 单体嵌入非水分散体膜,划痕后释放单体聚合修复,效率可达 85%以上^[31]。

巴斯夫研究的非水分散体系列涂料已产业化应用。在宝马莱比锡工厂的应用数据中涂装线速度提升至 8 m/min,原来只有 5 m/min;同时 VOC 排放降至 12 g/m²,欧盟限值 35 g/m²;综合成本降低 18%,溶剂回收率可达 95%以上^[32]。

非水分散体涂料现也存在一定的问题,如稳定剂成本过高,PHSA 类定制稳定剂价格达 800 元/kg。低温成膜性也较差,5 ℃以下出现裂纹,需添加聚醚改性硅氧烷进行改善。

通过不断技术创新,非水分散体涂料未来有可能

替代传统溶剂型体系,成为高性能环保涂装的标杆解决方案。未来需进一步突破生物基稳定剂合成及超低温施工等技术瓶颈。

3.2 其他领域的应用

应用于文物保护。很大一部分的土体遗址文物保存在自然的生态环境中,容易受到天气、雨水、生物等的干扰,而化学材料加固渗透是对遗址和环境影响比较轻微的方法^[33]。丙烯酸树脂非水分散体渗透深度达5~8 cm,耐水性提升>3倍,渗透能力强并且不改变土体的色泽^[34]。非水分散体材料的优势在于溶剂为有机溶剂,挥发快,避免水敏性遗址二次损伤^[35-36]。周双林等^[37-38]在非水分散体加固材料、环氧树脂、聚氨酯和有机硅材料中筛选出对潮湿土遗址起保护作用的材料,发现非水分散体材料的效果要明显好于其他材料。

应用于药物输送。反应性微凝胶在酶的载体和临床诊断中也有新的应用。油中固体分散体可作为有机介质中进行酶催化的工具,这种在非水介质中含有蛋白质的油基分散体具有应用于其他领域的巨大潜力,其中最成功的之一是它被改编为药物递送系统。固体油分散体(S/O)载药系统中酶活性保留率>90%,透皮吸收效率提高2倍。TAHARA Y等^[39]介绍了制备这种分散体的新工艺和特点。此外,还讨论了将油中固体分散体用于创新口服和皮肤给药系统的最新研究。

4 结语

非水分散体材料正从传统涂料领域向生物医药、新能源、电子封装等高精尖领域跨越。非水分散体材料性能优异,应用前景广阔。高固低黏的特性使其能应用于航空航天超厚涂层和3D打印光固化树脂中,精准的界面控制能力能在靶向药物递送(抗癌药载体)、细胞仿生界面发挥作用,同时具有可设计流变性,前景领域包括固态电池电极浆料、光子晶体墨水。未来将向绿色化、智能化、融合化聚焦发展。

参考文献:

- [1] 丁帮勇,穆颖,丁道宁.非水分散体聚羟基丙烯酸树脂的制备[J].上海涂料,2010(11):24-27.
- [2] 谢和声.国外非水型分散液涂料的发展概况[J].涂料工业,1979(4):49-56.
- [3] BARRETT K E J.Dispersion polymerization in organic media[J].Journal of Applied Polymer Science,1975,19:11-20.
- [4] 黎前跃,王长松,余鼎声.梳形非水分散聚合稳定剂的研究[J].沈阳化工学院学报,1998(2):2-8.
- [5] NAPPER D H.Steric stabilization [J].Journal of Colloid and Interface Science,1977(2):390-407.
- [6] 马文有,田宗军,曹茂盛,等.纳米颗粒分散技术研究进展—分散方法与机理[J].中国粉体技术,2002(3):28-31.
- [7] HASHMI S M, FIROOZABADI A. Controlling Nonpolar colloidal asphaltene aggregation by electrostatic repulsion [J]. Energy Fuels,2012,26(7): 4438-4444.
- [8] Covestro A G.Scratch-resistant silicone-modified coatings: EP 3124546B1[P].2019-03-20.
- [9] MÜLLER A H E, et al. Tailoring poly (2-oxazoline)-based polymeric ionic liquids as thermoresponsive molecular brushes and programmable dispersants for silver nanoparticles [J]. Macromolecules, 2020, 53(14): 5572-5582.37
- [10] 周双林,原思训,郭宝发.几种常温自交联丙烯酸树脂非水分散体的制备[J].北京大学学报(自然科学版),2001(6): 869-874.
- [11] YARDLEY R P J,F. Manufacture of polymeric compositions: US3674838[P].1971-04-06.
- [12] 姜琬,聂莉星,府寿宽.纳米级反应性聚合物微凝胶的制备方法:CN1132849C[P].2003-12-31.
- [13] 丁帮勇,穆颖,袁兴,等.非水分散体树脂技术的现状及应用[J].涂料工业,2011(4):5-9.
- [14] 李国伟,孙雪丽,温时宝,等.苯胺分散聚合中稳定剂 PVP-K90 的稳定机理[J].功能高分子学报,2010(4):378-383.
- [15] SÁLEK P, KORECKÁ L, HORÁK D, et al. Immunomagnetic sulfonated hypercrosslinked polystyrene microspheres for electrochemical detection of proteins [J].Journal of Materials Chemistry,2011(38):14783-14792.
- [16] ZANG L M, QIU J H, SAKAI E, et al. In situ preparation of polypyrrole nanorod composite in the presence of phosphorylated polyvinyl alcohol [J].Advances in Polymer Technology, 2015(3):215-221.
- [17] PAPWORTH S E.Non-aqueous dispersions of poly(methyl methacrylate)[D].London: Imperial College London,1994.
- [18] ACHAM N C.Non-aqueous dispersions as a basis for high-solids coatings[Z].Brussels: European Coatings Research,1996.
- [19] BASF SE.Waterborne coating compositions with low VOC content: EP3205692B1[P].2020-04-15.
- [20] 中国涂料工业协会.2022年中国涂料行业年度报告[M].北京:化学工业出版社,2022.
- [21] BONHAM J A, FAERS M A, VAN DUIJNEVELDT J S. Non-aqueous microgel particles: synthesis, properties and applications[J].Soft Matter,2014(47):9391-9401.
- [22] 汪长春,包启宇.丙烯酸酯涂料[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [23] ISHIKURA S, TAKAHASHI M. Flow and film properties of coatings containing microgels [J]. Progress in Organic Coatings,

- 1988(4):377-382.
- [24] AKZO NOBEL N V.UV-resistant coating system:WO2018189207A1[P].2018-10-11..
- [25] WANG C L, SHENG X X, XIE D L, et al. High-performance TiO₂/polyacrylate nanocomposites with enhanced thermal and excellent UV-shielding properties[J].Progress in Organic Coatings,2016,101:185-193.
- [26] KANSAI PAINT Co., Ltd.无铬环氧防腐底漆组合物及制备方法:JP2020-058912A[P].2020-04-09.
- [27] AGC.Stimuli-responsive stabilizers for non-aqueous dispersions[EB/OL].2022-07-28.[2026-01-21].https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022156789A1&cid=P21-LN3711-70513.
- [28] 三棵树涂料股份有限公司.聚丙烯用高附着着力涂料:CN112708232A[P].2021-04-27.
- [29] KIM D, PARK S, LEE J.Toughening of plastic coatings via polyurethane microgels[J].Polymer,2020,202:122736.
- [30] GARCÍA J M, JONES G O, MARTIN R W.Cashew nut oil as a sustainable monomer for high-solids coatings [J]. Green Chemistry,2022(3):1021-1035.
- [31] WHITE S R, MOORE J S, SOTTOS N R.Self-healing polymers and composites[J].Nature,2023(7952):259-265.
- [32] BASF.Sustainability report 2022 [Z].Ludwigshafen:BASF SE, 2022:34-35.
- [33] 吴艺,姜兵,贾彬.丙烯酸非水分散体对邛崃遗址土的加固试验研究[J].四川建筑科学研究, 2014(5):69-72.
- [34] 周双林,刘连强,赵战护,等.丙烯酸树脂非水分散体加固剂在泥河湾古象足痕迹提取中的应用[J].文物保护与考古科学,2006(3):57-59.
- [35] 王嘉堃,周双林.土遗址加固的非水分散体材料渗透性能研究[J].石窟与土遗址保护研究,2022(2):93-101.
- [36] 范岩.土遗址保护材料的应用与效果研究——评《土遗址保护材料探索——非水分散体材料研制及土遗址加固研究》[J].材料保护,2020(9):156-157.
- [37] 周双林,杨颖亮,原思训.潮湿土遗址加固保护材料的初步筛选[J].文物科技研究,2004(00):64-69.
- [38] 周双林,原思训.有机硅改性丙烯酸树脂非水分散体的制备及在土遗址保护中的试用[J].文物保护与考古科学,2004(4):50-52.
- [39] TAHARA Y, KAMIYA N, GOTO M. Solid-in-oil dispersion: A novel core technology for drug delivery systems[J]. International Journal of Pharmaceutics,2012(1-2):249-257. ◆

(上接第 10 页)

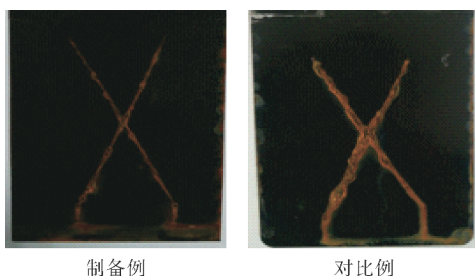


图 5 1500 h 耐盐雾测试

以上结果说明经过改性的氧化石墨烯在电泳涂料中发挥了“一材多能”的关键作用。极致的长效防腐性能:改性氧化石墨烯在漆膜中平行于基材排列,形成一层致密、曲折的物理屏障,有效延长水、氧气、Cl⁻等腐蚀介质的扩散路径,极大地延缓了它们到达金属基材的时间。显著的力学性能:改性氧化石墨烯具有极高的比强度和模量,其均匀分散的片层能与树脂形成强烈的界面相互作用(共价键、氢键等),起到类似“钢筋”的增强作用,显著提高漆膜的耐磨性、抗石击性能。同时,改性后的氧化石墨烯与电泳漆环氧树脂具有极好的化学相容性,能长期稳定地分散在电泳漆槽液中,不发生沉降和团聚,保证了生产的连续性和漆膜质量的稳定性。

3 结语

石墨烯经过 Hummers 方法生成氧化石墨烯,然后和对苯二胺进行反应,实现氧化石墨烯的功能化,然后和阴极电泳涂料进行复配,通过对槽液及涂膜性能进行验证,经过改性后的石墨烯能很好地分散在阴极电泳涂料中,能显著提高电泳漆膜的力学性能及耐腐蚀性能,发挥了“一材多能”的关键作用。对石墨烯进行针对性改性是将其巨大潜力转化为实际应用价值的关键一步。通过改性,石墨烯从一种难以驾驭的纳米材料,变身成为电泳涂料领域的“性能倍增器”,特别是在追求极致防腐和工艺创新的高端工业领域,正发挥着不可替代的作用。

参考文献:

- [1] 孙曼灵.环氧树脂应用原理与技术[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 闫福安,官仕龙,张良均,等.涂料树脂合成及应用[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [3] 宋华,王锡春.国内外阴极电泳涂料的进展[J].涂料工业,1994(6):33-37.
- [4] 顾林,丁纪恒,余海斌.石墨烯用于金属腐蚀防护的研究[J].化学进展,2016(5):737-743. ◆