

水性炭黑色浆的制备及其应用研究进展

张家宁, 郭政叙*, 王 勇, 王光硕

河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年12月30日; 录用日期: 2026年1月23日; 发布日期: 2026年2月2日

摘要

水性炭黑色浆, 因其VOC含量低、安全无毒、成本较低等突出优点, 正在逐步替代传统溶剂型色浆, 广泛应用于涂料、油墨、塑料、纺织等领域。然而, 炭黑颗粒粒径小、比表面积大、表面能高, 导致粒子间范德华力强, 具有强烈的团聚倾向, 因此提高炭黑在水中的分散性和稳定性尤为重要。本文以提高炭黑在水中的分散效果与着色性能为侧重点, 详细阐述了水性炭黑色浆中各类关键助剂(分散剂、消泡剂、流平剂等)的功能原理与选择原则, 综述了炭黑表面改性研究与应用进展, 总结和展望了水性炭黑色浆的未来发展方向, 旨在为相关领域的研究与技术创新提供系统的借鉴与思路。

关键词

炭黑色浆, 水性涂料, 分散改性, 研究进展

Preparation of Water-Based Carbon Black Paste and Its Application Research Progress

Jianing Zhang, Zhengxu Guo*, Yong Wang, Guangshuo Wang

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: December 30, 2025; accepted: January 23, 2026; published: February 2, 2026

Abstract

Waterborne carbon black pigment concentrates (color pastes), with their outstanding advantages of low VOC content, safety, non-toxicity, and low cost, are gradually replacing traditional solvent-based color pastes. They are widely used in coatings, inks, plastics, textiles, and other fields. However, carbon black particles are small in size, have a large specific surface area and high surface energy, leading to strong inter-particle van der Waals forces and a pronounced tendency to agglomerate. Therefore, enhancing the dispersibility and stability of carbon black in water is particularly crucial. Fo-

*通讯作者。

cusing on improving the dispersion effectiveness and coloring performance of carbon black in water, this article elaborates on the functional principles and selection criteria of various key additives (such as dispersants, defoamers, leveling agents, etc.) in waterborne carbon black pastes. It also reviews the research and application progress in surface modification of carbon black. Furthermore, it summarizes and looks forward to the future development directions of waterborne carbon black pastes, aiming to provide a systematic reference and insights for research and technological innovation in related fields.

Keywords

Carbon Black Paste, Waterborne Coatings, Dispersion Modification, Research Progress

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

炭黑是一种黑色粉末状物质，由烃类经过严格可控的气相不完全燃烧或热解工艺制成，其主要成分是碳元素(通常占 90%~99% 以上)，常包含少量氧、氢和硫等元素[1]。生产方法主要有炉法、槽法、热裂法三种[2]。与传统溶剂型涂料相比，水性涂料最显著的优点在于其出色的环境友好性与更高的安全性。然而，由于配方中成分水的高表面张力，它在对树脂与颜料的润湿和分散能力上通常逊色于溶剂型体系[3]。炭黑的粒度越细，其对光的反射效果越差，表现为炭黑色浆的黑度越好。但由于炭黑粒径越小，其内聚能就越大，越容易团聚成炭黑大颗粒。同时，炭黑具有较大的吸油值，分散于色浆以后容易团聚重新变成大颗粒的炭黑，使得炭黑色浆的黑度降低。炭黑作为颜料使用时，一个重要的因素是在基质中实现均匀的微细分散。分散不良不仅会损害材料性能，更会直接影响炭黑的着色能力。因此，提高炭黑的分散性与分散稳定性，是其颜料应用成败的关键[4]-[7]。合成的炭黑色浆在各行各业均有应用，应用最广泛的是聚氨酯(PU)和聚氯乙烯(PVC)，另外在人造皮革、汽车内饰、汽车面漆和地板等方面也有重要应用。

2. 水性炭黑色浆制备

水性炭黑色浆的制备通常涉及三个关键步骤：分散炭黑颗粒、稳定悬浮液、调整性能。选择合适的分散剂对于炭黑色浆制备是非常关键的。分散剂在水中形成一层较薄的表面活性剂包裹炭黑颗粒，从而防止颗粒的凝聚和沉淀。缺乏有效的分散剂会导致颗粒的团聚和颗粒间的相互吸附，从而降低浆料的稳定性。同时，选择具有合适 pH 值和离子强度的水也对浆料的稳定性至关重要。

2.1. 分散方式

在水性炭黑分散过程中，通常需先引入分散剂以降低炭黑颗粒间的表面张力。随后，辅以高强度的机械分散手段，将炭黑的二次凝聚团解聚至接近一次粒径，实现其在水相中的稳定悬浮。理想的分散状态应确保炭黑粒子在无外力介入下，仍能长期保持高度分散与悬浮稳定性[8][9]。常用的分散剂为环芳结构，其含有的亲油性基团会附着在炭黑颗粒表面，而亲水基团则溶剂化进入水相介质中，从而降低固-液之间的界面张力，使凝聚的炭黑颗粒表面易于被水润湿。

在水性炭黑分散体系中，分散剂主要通过静电稳定与空间位阻稳定两种途径实现稳定分散。对于离子型分散剂，其通过在炭黑颗粒表面吸附并形成带电保护层，构成双层包围结构。颗粒和颗粒之间由于

带同种电荷而产生静电斥力，从而有效防止团聚，维持分散体系稳定[10]。非离子型分散剂主要依靠高分子链形成的空间位阻实现稳定作用。非离子型分散剂的分子结构中含有的锚固基团通过离子键、氢键及范德华力等作用牢固吸附于炭黑表面；同时，亲溶剂链段在介质中充分伸展，形成厚实的水化层。当吸附有分散剂的颗粒彼此接近时，伸展的溶剂化链相互重叠而产生空间排斥力，将颗粒相互推开，从而实现长期稳定的分散状态[11]。在加入分散剂后，一般通过机械方式使凝聚的炭黑再次分散，目前常用的机械方式有机械搅拌、超声震荡和球磨三种方式。郭鹏杰等[12]对不同分散方式的炭黑的自然沉降趋势进行比较发现超声搅拌的分散性呈现出最好的状态。但考虑到工业生产的实用性，球磨的方式更适用于工厂色浆的调配。

2.2. 助剂

2.2.1. 分散剂

分散剂的主要功能是通过降低颗粒之间的相互作用力来改善炭黑的分散性，这些相互作用力包括范德华力、静电力和其他物理化学力[13][14]。当炭黑颗粒在水中聚集时，会形成团聚体，导致其在应用过程中的性能下降。分散剂一般呈现“两亲性”（亲水亲油性）的分子结构特点。一方面，分散剂表面的亲油性基团会吸附在炭黑颗粒表面，形成一层分散剂分子单层膜，减少炭黑颗粒之间的吸引力，阻碍颗粒的聚集。这样，分散剂的亲水性部分吸附在水分子上，亲油性部分则吸附在炭黑颗粒上。这种双重吸附现象降低了炭黑颗粒之间的相互吸引力，稳定了分散体系，防止颗粒的聚集和融合。另一方面，在炭黑表面引入亲水性或特定功能官能团，使其表面变得更容易分散。这可通过简单的物理或化学方法实现，如表面润湿、修饰剂改性等。通过增加表面亲水性，可增加炭黑与液体基体之间的相互作用力，提高颗粒的分散性，以此提高炭黑之间的内斥力，使炭黑稳定在体系中，防止炭黑沉降絮凝[15]。

在水性炭黑浆料中，常用的分散剂主要包括：阴离子和阳离子分散剂、非离子分散剂和高分子分散剂。蒋桂友等[16]通过对桐油进行二次酯交换反应制备出桐油基醇，然后以桐油基醇、苯乙烯-马来酸酐共聚物、甲氧基聚乙二醇为主要原料合成了梳型聚合物分散剂，结果表明合成的分散剂有效提高了水性炭黑色浆的分散稳定性。

2.2.2. 消泡剂

水性色浆体系中若加入粘度较大的树脂、乳液、分散剂、增稠剂、流平剂、润湿剂等，会导致制备的色浆存在大量气泡。此外，在制备色浆和涂料工艺流程中受到冲击、气流等力的作用也会产生气泡。气泡的存在会阻碍颜料或填料的分散，影响涂料表面的平整度和光泽度，因此如何消除气泡显得尤为重要。在工业工艺中常用的消泡方法可分为物理消泡和化学消泡两种，在色浆生产工艺中通常以两种方式结合的技术进行消泡[17][18]。

水性涂料用消泡剂通常具有较低的表面张力，其关键成分在发泡介质中呈不溶状态，以极细微粒的形式均匀分散其中，并表现出在液体界面选择性富集的特性。当体系内产生气泡或气泡刚生成时，消泡剂能迅速作用于泡沫液膜，在膜表面形成一单分子层，取代原起泡剂所构成的吸附层，从而破坏泡沫的稳定性，最终实现消泡与抑泡的作用[19]。同时，消泡剂能降低泡沫表面的表面张力，当消泡剂分子进入泡沫表面时，会干扰泡沫的表面结构破坏泡沫的液膜结构，从而破坏泡沫的稳定性，使其破裂。常见的化学消泡剂可分为聚醚型（耐高温/强酸碱，抑泡持久但相容性较差）、有机硅型（消泡快、广泛适用于油水性体系，易缩孔需控量）、非硅型（环保无硅残留，相容性好，但效率较低）和硅醚混合型（兼具硅的快速消泡与醚的持久抑泡但成本较高）[20]。每种类型的消泡剂的其结构各不相同，作用机理根据也各有差异，应用时应根据具体使用环境选择不同类型的消泡剂。李春静[21]通过复配制备出性能较好的聚醚改性硅油消泡剂产品。与进口同类消泡剂进行比较，制备的消泡剂表现出优异的消泡性能和抑泡性能，同时具

有良好的水分散性和稳定性，在水性色浆领域提供了新思路。

2.2.3. 流平剂

流平剂在粉末涂料的制备过程中也发挥着不可替代的作用，其作用机理主要通过改善涂料的流动性和表面张力来提升涂层的平整度与外观质量。

在粉末涂料固化过程中，流平剂能够起到降低熔融体系的黏度和增强涂料的流动性的作用，使涂层更均匀地铺展于基材表面，从而减少橘皮、波纹等表面缺陷[22]。同时，它通过调节涂料与基材之间的表面张力差异，增强润湿性，有效避免缩孔、针孔等问题，确保涂层均匀覆盖。此外，流平剂还能填补微观不平整区域(如颗粒间隙)，提升涂层的光泽度和触感，并稳定成膜过程，抑制固化中因溶剂挥发或反应副产物引起的表面扰动。常见类型包括丙烯酸类(性价比高但耐温性有限)、有机硅类(高效但需控制用量)和氟碳类(高性能但成本较高)。实际应用中需注意添加量优化(通常 0.5%~2%)、与其他助剂的协同作用，以及环保要求(如无 VOC)，以充分发挥其功能，同时避免负面影响。朱永闯[23]等在氮气保护氛围中，将双端含氢硅油、侧链氢聚硅氧烷与多种烯丙基聚醚化合物，在铂催化剂催化下，通过一锅法进行硅氢加成聚合反应，制得多聚醚改性的有机硅流平剂。该方法操作工艺简便，易于实现规模化生产。此外，将制备的流平剂应用于水性涂料中表现出出色的流平性、相容性、重涂性和耐冷热性等综合性能，并能够进一步提高水性涂料的外观和手感。

2.3. 炭黑表面改性

除加入各种分散剂使炭黑直接分散在水性体系的方法之外，还可以通过在炭黑表面接枝水溶性聚合物，赋予炭黑亲水性[24]-[26]。林明穗等[27]将丙烯酸甲酯/甲基丙烯酸羟乙酯接枝在炭黑表面，得到的炭黑在水性体系中具有良好的分散稳定性。王耀明等[28]通过将有机官能团共价键合到炭黑表面，炭黑的表面能显著降低，增强了其与有机聚合物的相容性的同时提高了改性后的炭黑在聚丙烯有机溶剂中的分散稳定性。同时，可以利用氧化剂对炭黑进行化学氧化改性，主要包括液相和气相氧化法两种。气相氧化通常采用臭氧对炭黑进行氧化处理，尹献林等[29]在用臭氧氧化炭黑后，炭黑的表面基团明显增多，pH 显著降低，水溶性有明显提高。液相氧化一般采用具有强氧化性的溶液，如高锰酸钾、硝酸、双氧水和重氮盐等。杨昕宇等[30]通过硝酸氧化法对炭黑表面进行改性，制备出一种具有优异自分散性能的纳米炭黑色浆。研究表明，硝酸氧化可显著提升炭黑表面的含氧官能团(如羧基、羟基和羟基)数量，其表面含氧量较原始炭黑提高了近 6 倍，从而实现了炭黑颗粒在色浆中的均匀稳定分散。韩真等[31]采用过硫酸铵在水相中对炭黑进行表面氧化改性，系统考察了炭黑种类、氧化剂用量、反应时间与温度等因素对改性效果的影响。研究发现，过硫酸铵氧化可显著增加炭黑表面亲水性官能团的数目，所得改性炭黑的水分散液静置一年后仍无明显沉降，展现出优异的分散稳定性。

3. 总结与展望

水性炭黑色浆作为环境友好型颜料，凭借其低 VOC 排放、成本优势及广泛的应用潜力，已成为涂料、汽车内饰、人造皮革等领域的重要材料。然而，炭黑颗粒因粒径小、比表面积大、内聚力强，极易团聚导致分散性差和稳定性不足，成为制约其性能提升的核心问题。近年来，通过优化分散工艺、开发高效助剂及创新表面改性技术，研究者们在改善炭黑色浆性能方面取得了显著进展。机械分散(如球磨、超声)结合高效分散剂(如阴/阳离子型、高分子梳型聚合物)的应用，有效降低了颗粒间的范德华力与静电引力，形成稳定的双电层或空间位阻屏障，抑制了团聚现象。与此同时，功能助剂的协同应用(如聚醚改性硅油消泡剂、多聚醚改性有机硅流平剂)进一步优化了色浆的制备工艺，提升了涂层的平整度与光泽度。炭黑表面改性技术(如化学氧化、聚合物接枝)通过增强其亲水性或引入功能性基团，显著提高了炭黑在水

性体系中的自分散能力，而双相炭黑、重氮盐改性炭黑等新型材料的开发，则为解决分散后二次团聚问题提供了新思路。目前，水性炭黑色浆已成功应用于聚氨酯(PU)人造皮革、PVC 地板及汽车面漆等领域，展现出优异的着色均匀性和环境适应性。

水性炭黑色浆的研究尽管已有诸多进展，但是其产业化仍面临多重挑战。未来，需进一步聚焦环保与高效技术的融合：开发基于生物基原料(如天然多糖、蛋白质)的绿色助剂，减少对含硅或氟类化学品的依赖，并结合智能响应材料(如 pH/温度敏感型分散剂)实现功能与环保性的平衡。在表面改性领域，传统氧化或接枝工艺的能耗高、步骤繁琐问题亟待突破，可探索光催化氧化、等离子体处理等绿色技术，构建更稳定的炭黑-水界面结构。生产工艺的智能化升级亦是重要方向，例如通过人工智能优化分散参数(球磨时间、转速)，结合在线监测系统实时调控浆料稳定性，以提升生产效率和产品一致性。此外，微流控分散技术等连续化、低能耗工艺的开发，将推动工业化生产的规模化与可持续化。使水性炭黑色浆有更高效的生产效率和更广阔的应用范围。

参考文献

- [1] 王曾辉, 高晋生. 碳素材料[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1991: 449-516.
- [2] Hauser, P.J. and Tabba, A.H. (2001) Improving the Environmental and Economic Aspects of Cotton Dyeing Using a Cationised Cotton. *Coloration Technology*, **117**, 282-288. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2001.tb00076.x>
- [3] 姚煌, 王荣芳, 许昭展, 谢唯, 许奕祥, 阮德亮, 陆盛邦. 水性炭黑色浆的生产研磨工艺对水性涂料配方产业化的影响[J]. 中国涂料, 2024, 39(7): 31-38.
- [4] 袁志军, 袁志辉, 顾乾柳, 陈德志, 苏俊华, 李宗起. 炭黑的亲水改性及其在水性介质中的分散稳定性研究[J]. 碳素技术, 2025, 44(6): 78-81, 91.
- [5] 黄梁. 分散剂对炭黑色浆性能的影响及其在合成革涂层中的应用[J]. 西部皮革, 2025, 47(22): 33-37.
- [6] Brykala, M. and Rogowski, M. (2016) Preparation of Microspheres of Carbon Black Dispersion in Uranyl-Ascorbate Gels as Precursors for Uranium Carbide. *Progress in Nuclear Energy*, **89**, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.015>
- [7] Zhao, W., Liu, Z., Yang, S., Xu, N., Li, X., Luo, G., et al. (2023) Mechanism of the Effect of Esterified Modified Polystyrene-Maleic Anhydride on the Dispersion and Stability of Carbon Black in Colour Paste. *Progress in Organic Coatings*, **183**, Article ID: 107745. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107745>
- [8] Nsib, F., Ayed, N. and Chevalier, Y. (2006) Selection of Dispersants for the Dispersion of Carbon Black in Organic Medium. *Progress in Organic Coatings*, **55**, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.11.006>
- [9] 裴迅, 郭鹏杰, 姚利. 不同锆珠配比对球磨炭黑粒度的影响研究[J]. 盐业与化工, 2019, 48(8): 23-26.
- [10] 赵伟. 分散剂改性炭黑色浆制备及中性墨水分散稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2025.
- [11] 李修田. 炭黑表面改性及其在 PA66 原液着色中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [12] 郭鹏杰, 裴迅, 姚利. 分散方式对水性炭黑色浆分散效果的影响及应用[J]. 天津化工, 2020, 34(4): 9-11.
- [13] 周勇, 吴晋晋, 黎军, 宋军伟, 相秉志, 王辉. 聚羧酸减水剂与纳米材料分散剂对导电炭黑的分散效果与机理的影响研究[J]. 碳素技术, 2025, 44(6): 60-69.
- [14] 袁志辉, 苏俊华, 袁志军, 顾乾柳. 炭黑的表面改性及其在色浆领域的应用研究进展[J]. 天津化工, 2025, 39(5): 14-18, 36.
- [15] Jaberi Mofrad, F., Ostad Movahed, S. and Ahmadpour, A. (2024) Surface Modification of Commercial Carbon Black by Silane Coupling Agents for Improving Dispersibility in Rubber Compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, e55155. <https://doi.org/10.1002/app.55155>
- [16] 蒋桂友, 葛毅, 李阳, 杨焰, 廖有为. 桐油改性苯乙烯-马来酸酐共聚物的制备及其对水性炭黑色浆的分散性研究[J]. 涂料工业, 2022, 52(4): 24-30, 36.
- [17] 郭政叙, 张家宁, 王光硕. 水性色浆的制备及其分散研究进展[J]. 当代化工研究, 2025(20): 30-32.
- [18] 张舜, 韩薇. 水性色浆制备过程中的控泡解决方案[J]. 涂料工业, 2018, 48(5): 61-65.
- [19] 周丽琼. 水性汽车涂料面漆用水性炭黑浆的制备[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.

- [20] 王小荣, 王丹, 秋文龙, 马旭芳. 消泡剂的研究进展及其消泡机理[J]. 化学工程师, 2024, 38(9): 67-70.
- [21] 李春静. 聚醚改性硅油消泡剂的复配[J]. 上海化工, 2021, 46(4): 17-20.
- [22] 文佳军, 唐林通. 粉末涂料专用流平剂对其理化性能的影响研究[J]. 涂层与防护, 2018, 39(10): 9-14.
- [23] 朱永闯, 黄兰. 多聚醚改性有机硅流平剂制备及性能研究[J]. 广东化工, 2022, 49(23): 24-26, 61.
- [24] Atif, M., Haider, H.Z., Bongiovanni, R., Fayyaz, M., Razzaq, T. and Gul, S. (2022) Physisorption and Chemisorption Trends in Surface Modification of Carbon Black. *Surfaces and Interfaces*, **31**, Article ID: 102080. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102080>
- [25] 刘守军, 冯博洪, 贺晨霞, 刁红亮, 张瑞东. 聚乙烯吡咯烷酮对炭黑分散体流变性的影响[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(2): 138-141.
- [26] Zhou, J., Huang, G., Man, J., Yang, Y., Jing, J., Miao, H., et al. (2025) Modular and Tailorable Triblock Copolymer Dispersants for Robust Aqueous Dispersion of High-Surface-Area Carbon Black. *Journal of Applied Polymer Science*, **143**, e57970. <https://doi.org/10.1002/app.57970>
- [27] 林明穗, 高珊珊, 高杭州, 苏志忠. 甲基丙烯酸羟乙酯/丙烯酸甲酯接枝聚合炭黑的制备研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(6): 202-204.
- [28] Wang, Y., Liu, G., Liu, Y., Zhang, Y., Chang, G. and Li, R. (2025) Facile Grafting Method Achieves Unprecedented Dispersion Stability of Carbon Black in PP Fiber. *Polymer Testing*, **143**, Article ID: 108698. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108698>
- [29] 尹献林, 王海英. 臭氧氧化炭黑表面改性的研究[J]. 河北化工, 2006, 29(8): 17-19.
- [30] 杨昕宇, 王兆伦, 潘明初, 梁晓娟, 刘海涛, 向卫东. 自分散纳米炭黑色浆的制备和研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(6): 1276-1281.
- [31] 韩真, 刘莲英, 杨万泰. 炭黑表面氧化改性及其水分散性研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 78-84.