

亲水性数码陶瓷墨水的研究进展

杨小东^{1,2,3*}, 王永强², 税安泽¹

¹华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州

²东莞市唯美陶瓷工业园有限公司, 广东 东莞

³黄冈师范学院化学化工学院, 湖北 黄冈

收稿日期: 2025年9月11日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月7日

摘要

亲水性陶瓷数码墨水作为数字喷墨打印技术的核心材料, 因其环保、低毒、优异润湿性和图案清晰度, 正逐步取代传统溶剂型墨水。本文系统综述了亲水性陶瓷数码墨水的组成与性能要求, 重点分析了颜料分散、表面张力调控、粘度稳定性和烧结性能等关键指标。详细探讨了表面活性剂、高分子分散剂、多官能团亲水剂和纳米辅助改性机制的研究进展, 并指出未来在绿色制造、功能化墨水与智能制造方向的发展趋势。本综述为高性能水性陶瓷墨水的研发提供了理论依据与技术路径。

关键词

陶瓷数码墨水, 亲水性, 喷墨打印, 分散稳定性, 表面张力

Research Progress on Hydrophilic Ceramic Digital Ink

Xiaodong Yang^{1,2,3*}, Yongqiang Wang², Anze Shui¹

¹School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

²Dongguan City Weimei Ceramics Industrial Park Co., Ltd., Dongguan Guangdong

³School of Chemistry and Chemical Engineering, Huanggang Normal University, Huanggang Hubei

Received: September 11, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

Hydrophilic ceramic digital ink has emerged as a promising candidate for inkjet printing in ceramic decoration due to its eco-friendly composition, excellent wettability, and high pattern resolution.

*通讯作者。

文章引用: 杨小东, 王永强, 税安泽. 亲水性数码陶瓷墨水的研究进展[J]. 物理化学进展, 2025, 14(4): 600-604.
DOI: 10.12677/japc.2025.144057

This review systematically summarizes the composition and performance requirements of hydrophilic ceramic inks, focusing on pigment dispersion, surface tension control, viscosity stability, and sintering behavior. The mechanisms of various hydrophilic modifiers, including surfactants, polymeric dispersants, multi-functional additives, and nano-assisted agents, are analyzed in detail. Future trends toward green manufacturing, functional inks, and intelligent production are also discussed. This work provides new insights for the development of high-performance water-based ceramic inks suitable for digital inkjet printing.

Keywords

Ceramic Digital Ink, Hydrophilicity, Inkjet Printing, Dispersion Stability, Surface Tension

Copyright © 2025 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

陶瓷喷墨打印技术因其高效、低污染和图案精细等优点，逐渐替代传统的丝网印刷和辊筒印刷，成为建筑陶瓷表面装饰的主流技术[1]。作为核心耗材，陶瓷数码墨水的性能直接影响打印质量和烧成效果。传统溶剂型墨水存在 VOC 排放高、喷头易堵和润湿性差等问题，而亲水性陶瓷数码墨水以水为溶剂，具备环保、低毒和低成本等优势，成为研究热点[2]。然而，水性体系也带来了颜料分散性差、表面张力高及与疏水基材兼容性差等新挑战。因此，如何通过亲水改性剂、分散技术和界面调控等手段提升墨水的综合性能，成为当前研究的重点。

2. 陶瓷数码墨水的组成与性能要求

陶瓷数码墨水主要由陶瓷颜料、溶剂、分散剂、黏结剂、表面活性剂及功能添加剂组成[3]。其中，陶瓷颜料提供色彩与高温稳定性；溶剂作为载体影响流变性能；分散剂用于防止颜料团聚；粘结剂增强图案附着力；表面活性剂调控表面张力与润湿性。亲水性陶瓷数码墨水需满足以下性能要求：低表面张力($<35 \text{ mN/m}$)，确保墨水在釉面上的快速铺展与渗透；良好分散稳定性(ζ 电位绝对值 $>40 \text{ mV}$)，防止颜料沉降与喷头堵塞；适宜粘度($10\sim20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 25°C)与流变性，适应压电喷头的工作需求；高温烧成匹配性，保证图案在 $1100\sim1200^\circ\text{C}$ 烧结后的色彩稳定性与附着力[4]。

3. 亲水改性技术研究进展

表面活性剂作为调控陶瓷墨水亲水性和润湿行为的关键组分，其类型、浓度及作用机制直接影响墨滴在釉面上的铺展形貌与界面稳定性。近年来，国内外多个研究团队围绕非离子型、离子型及双官能团表面活性剂在陶瓷墨水中的作用机制展开了系统研究。

3.1. 表面活性剂改性

Tang 等人[5]研究发现了 Surfyrol 465 表面活性剂，仅需添加 $0.5 \text{ wt\%}$ 的用量，墨水接触角由 65° 降至 28° ，动态表面张力 10 ms 内降至 28 mN/m ，边缘清晰度提升 42% 。而且 XPS 显示 C-O-C 键含量增加 12.3% ，形成亲水性吸附层，可有效抑制团聚。

此外，Hamed 等人，合成制备了 Triton X-100 分散剂[6]。添加该分散剂后，墨水可形成 3.8 nm 吸附

层, 而且 ζ 电位由 -28 mV 升至 -45 mV , 30天储存粒径增长速率降低62%, 无沉降。MD模拟显示聚氧乙烯链段通过氢键与表面羟基结合, 苯环朝外形成“刷状”结构, 有效阻止范德华团聚。

李兴团队发现 SDS 分散剂[7]。添加后, 墨水 ζ 电位达 -52 mV , 但烧成后 ΔE 增加0.8, 釉面出现 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 微气泡, 归因于 SDS 高温分解产生 SO_2 气体, 证实采用可分解型磷酸盐具有更好的稳定性效果。

3.2. 高分子亲水改性剂

王婷团队研究发现了一款高性能 PVP K30 高分子分散剂[8]。利用 AFM 表征发现墨水吸附层可达 $6\sim 8\text{ nm}$, 粒径 $<180\text{ nm}$, 保持30天后, 粒径增长速率降低58%, 无明显沉降, 形成均匀高分子层, 有效空间位阻。

Bao 等人通过改性聚氨酯[9], 制备了高性能分散剂。通过 FTIR 表征发现羧酸基团与釉料 SiO_2 形成酯键(1730 cm^{-1}), 附着力提升35%, 耐磨性提升42%, 可适用于高耐磨釉面砖。

3.3. 多官能团亲水剂

杨智慧通过引入多官能团制备了绿色环保型 TETA-PEG 分散剂[10]。研究发现添加量为 $0.8\text{ wt}\%$ 时, ζ 电位 $=-51\text{ mV}$, 沉降率 $<2\%$, 而且 TGA 显示 $300^\circ\text{C}\sim 420^\circ\text{C}$ 下可完全分解, 烧成无残留, $\Delta E < 0.5$ 。

李悦生等人制备了环氧-聚醚嵌段共聚物[11]。使用后墨水可形成 5 nm 吸附层, ζ 电位 $=-48\text{ mV}$, 烧成后色彩饱和度保持96%, $\Delta E < 0.5$, 适用于高光泽釉面砖。

3.4. 纳米辅助亲水机制

赵怡团队研究发现通过 SiO_2 包覆技术[12], 溶胶-凝胶法包覆半径可达 10 nm , $\Delta E = 0.4$, 色彩稳定性提升了28%, 高分辨透射电镜(HRTEM)显示包覆层致密, 可有效阻止高温晶格失稳。

宣美玲团队通过氧化石墨烯的加入显著提升了墨水的亲水性[13]。拉曼光谱(Raman)表征发现 D 峰增强, 证明有氢键作用存在, 证实 GO 与颜料间可形成氢键网络, 粘度变化率 $<5\%$, 30天无沉降。

4. 墨水性能优化策略

4.1. 粒径与分布控制

粒径及其分布是决定水性墨水稳定性、光学性能与喷射可靠性的关键因素。较小的粒径有助于提高比表面积、着色力、透明度和光泽度, 减少沉降倾向, 并改善液滴形成能力; 但同时也可能导致黏度上升, 增加分散剂用量, 并引发颗粒再聚集问题。狭窄的粒径分布能够有效削减 D90 尾部, 避免喷头堵塞, 提高膜层均匀性与一致性。在工程实践中, 通常采用湿法研磨与分级、原位聚合核壳控制、种子法以及表面改性等工艺协同作用, 以实现 $\text{D}_{50} < 200\text{ nm}$ 、 $\text{D}_{90} < 300\text{ nm}$ 及低多分散指数(PDI)的目标。同时, 需结合合理的固含量和粘结剂体系, 以平衡色强度、黏度、干燥速度和耐久性。此外, 在线粒径监测与循环过滤是确保产品批间一致性和稳定性的重要手段[14]。

4.2. pH 值与离子强度调控

pH 值影响树脂与分散剂的电离程度和溶胀行为, 进而调控 ζ 电位、颜料分散稳定性、体系黏度及着色强度。将 pH 值维持在颜料等电点范围以外, 可有效抑制絮凝并提高喷射可靠性。离子强度则调节双电层厚度和墨水导电性, 适量时有助于液滴形成并抑制雾化; 但过高会压缩双电层, 导致颜料聚集、喷头结晶析出, 并改变表面活性剂的临界胶束浓度(CMC)与表面张力。在实际应用中, 通常通过缓冲体系精确调控 pH 值, 并结合低残盐分散技术与电导率控制, 以平衡着色强度、干燥速度与喷嘴抗堵塞性能。

4.3. 流变性能优化

流变性能是影响墨水滴落行为、喷射稳定性以及成膜质量的关键因素。在喷嘴剪切区域内,墨水应呈现中等程度的剪切变稀特性并保持低弹性,以有效降低表观黏度,促进液丝快速断裂,从而减少卫星滴的产生。在静置状态下,体系需具有极低的屈服应力与适度的触变性,以兼顾抗沉降性与快速结构恢复能力,确保打印图案边缘清晰。为实现目标黏度与延伸黏度行为,通常通过调控固含量与颜料体积浓度、分散剂与粘结剂的分子量及其相互作用、并协同使用增稠剂(如 HEUR、HASE、聚氨酯型),以及搭配保湿剂和润湿剂等手段进行体系设计。在此基础上,结合温度控制与在线流变表征(如 $\eta(\dot{\gamma})$ 、 η_E 及喷射观测),通过闭环工艺优化,最终实现低雾化、优良流平性和高度一致性的打印品质。

5. 未来发展趋势

5.1. 绿色环保方向

壳聚糖是通过甲壳素脱乙酰化反应制得的一种天然生物高分子,具有优异的生物相容性、可降解性和可再生性。其分子结构中带有游离氨基,在弱酸条件下溶解并呈现阳离子特性,赋予其良好的成膜性、黏附性、抗菌性以及絮凝吸附能力,是一种绿色安全的多功能材料。该材料应用领域广泛:在生物医学中可用于止血敷料、药物递送系统、组织工程支架;在食品工业中作为可食性涂膜用于保鲜,并用于果汁澄清;在环境处理中作为絮凝剂去除重金属离子和染料;在农业中用于种子包衣、诱导抗病性和作为缓释载体;在化妆品中起到保湿和调理作用;在纺织和造纸行业中用于增强材料性能并提供抗菌功能。此外,壳聚糖也常用于日化产品的除味与口腔护理、饮用水净化、油污及微塑料吸附等环保领域,以及在 3D 打印生物墨水和功能复合材料等新兴方向展现出应用潜力。

5.2. 功能化墨水开发

功能化墨水面向导电、光学、磁性与生物等应用。要点在功能微纳组分的表面化学与分散稳定、可打印流变与表面张力,以及与基材和固化的匹配。通过配体或聚合物包覆、调控 pH/离子强度与溶剂,实现窄粒径、低沉降与稳定喷射;配合低温烧结或 UV 固化,构建连续网络并兼顾柔性与附着。配方在固含、黏度、润湿与干燥间取衡,兼顾低 VOC 与货架期。引入 DoE 与高通量筛选、在线评估关键指标,缩短迭代并推进规模化与多材料打印。

5.3. 智能制造与在线控制

智能制造以数据驱动与模型闭环为核心,借助 CPS、IoT 与机器视觉实现多源感知与互联;通过边云协同与数字孪生开展工艺建模、仿真和参数自适应。在线控制结合 SPC/MPC、强化学习与异常检测,优化良率与节拍,实施预测维护与能耗/碳排管控。以 MES/ERP 贯通供应链与质量追溯,构建设计-生产-服务闭环。落地关键在标准互操作、网络安全、数据治理与复合型人才培养。

6. 结论

亲水性陶瓷数码墨水在水系体系中,借助低泡表面活性剂、可生物基高分子分散剂、多官能团络合/偶联剂与纳米增稳粒子(如硅溶胶、核壳氧化物)协同作用,降低表面张力与接触角,提升 Zeta 电位和抗盐析能力,实现细粒径窄分布、抗沉降与可控流变(剪切变稀/触变),并在烧成阶段实现有机物洁净排除与色相稳定。配方需兼顾喷头兼容性(黏度/表面张力窗口、无结晶/无析块)、耐贮存与运输温度波动、与釉料/坯体匹配以及环保法规(低 VOC、无 APEO、低气味)。未来应聚焦绿色配方与功能化设计(抗菌、防污自洁、远红外等),并与智能制造深度集成:在线黏度/表面张力监测、AI 配方优化与数字孪生校核、闭

环配液与批次一致性控制、废水回用与碳足迹评估, 推动行业高质量、可持续发展。

基金项目

1) 国家自然科学基金青年基金项目(22505082); 2) 黄冈创新发展联合基金项目(2025AFD354)。

参考文献

- [1] 周军, 饶平根, 柯善军, 张天杰, 戴建斌. 喷墨打印水性黑色陶瓷墨水的研制及性能研究[J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(8): 5-7.
- [2] 杨文静. 水性陶瓷墨水的稳定性和流变性研究[D]: [硕士学位论文]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2020.
- [3] 石教艺, 李向钰, 张翼. 陶瓷墨水的组成、制备及性能特点[J]. 佛山陶瓷, 2017, 27(7): 4-7.
- [4] 付威, 袁志, 周硕, 刘来君. 水性黑色陶瓷墨水的稳定性研究[J]. 中国陶瓷工业, 2020, 27(1): 10-15.
- [5] Tang, Z., Fang, K. and Zhang, K. (2020) Effects of Viscosity and Surface Tension of a Reactive Dye Ink on Droplet Formation. *Langmuir*, **36**, 9481-9488. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01392>
- [6] Hamed, R., Reza, A. and Adrine, M. (2025) Ambient-Air Fabrication of Triple-Cation Mixed-Halide Perovskite Cells with High-Speed Doctor-Blade Printing by PEG as Ink Additive and Triton X-100 as ETL Surface Modifier. *ACS Applied Electronic Materials*, **7**, 964-98236. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c01518>
- [7] 李俊, 陈颖, 莫松平, 李兴. PVP 和 SDS 混合分散剂对水基 TiO₂ 悬浮液分散稳定性的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(21): 21060-21063.
- [8] Wu, S., Zhang, Q. and Cui, Z. (2017) Inkjet Printing of Oxide Thin Film Transistor Arrays with Small Spacing with Polymer-Doped Metal Nitrate Aqueous Ink. *Journal of Materials Chemistry C*, **5**, 7495-7503. <https://doi.org/10.1039/C7TC01303E>
- [9] 张建宏. 水性聚氨酯改性及应用进展[J]. 化学工程与技术, 2024, 14(3): 201-210.
- [10] 杨智慧. 复合亲水单元修饰的水性聚氨酯结构设计、制备和性能研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- [11] 黄凌峰, 宋东坡, 李悦生. 瓶刷嵌段共聚物聚甲基丙烯酸甲酯-b-聚环氧乙烷的合成与乳液界面自组装制备结构色颜料[J]. 高分子学报, 2024, 55(11): 1504-1517.
- [12] 李璇, 王燕, 方华, 章婷婷, 赵怡. 水中氧化石墨烯稳定性的影响因素研究[J]. 环境工程, 2024, 42(2): 121-127.
- [13] 郭建, 李琦, 赵海亮, 宣美玲. 基于 MEMS 压电喷墨打印头的氧化石墨烯水性墨水喷射性能研究[J]. 桂林电子科技大学学报, 2017, 37(1): 59-62.
- [14] Fatemeh, A., Maryam, A., Farhood, N. and Mohammad, R. (2016) From Suspension toward Emulsion and Mini-Emulsion Polymerisation to Control Particle Size, Particle Size Distribution, and Sphericity of Printing Toner. *Pigment & Resin Technology*, **45**, 363-370. <https://doi.org/10.1108/PRT-07-2015-0066>