

微纳米添加剂 α - Al_2O_3 在表面涂层领域的应用现状及市场前景

伏建康¹, 杨茂益¹, 冉长荣², 郭太雄², 张千峰^{1*}

¹安徽工业大学分子工程与应用化学研究所, 安徽 马鞍山

²攀钢集团研究院有限公司钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年2月20日; 录用日期: 2025年3月15日; 发布日期: 2025年3月25日

摘要

微纳米 α - Al_2O_3 是一种重要的功能材料, 因其优异的硬度、耐磨性、耐腐蚀性和高热稳定性, 在表面涂层领域得到了广泛应用。随着微纳米技术的发展, 微纳米级 α - Al_2O_3 作为添加剂在各涂层体系中的应用得到了深入研究, 显示出其能够显著改善涂层性能的潜力。微纳米 α - Al_2O_3 颗粒具有较大的比表面积和表面活性, 能够增强涂层的机械性能, 如硬度和耐磨性, 同时提高涂层的耐腐蚀性和耐高温性能。微纳米 α - Al_2O_3 也是一种极优良的改性材料, 其与有机硅烷、树脂等材料复合改性, 既能大幅提升转化膜的应用效果, 对其稳定性和耐候性也有较大的促进作用。在金属表面涂层、陶瓷涂层以及复合材料涂层中, 微纳米 α - Al_2O_3 添加剂被广泛用于提高涂层的使用寿命和稳定性。此外, 它在电子器件、航天航空和汽车工业等高新技术领域也展现了广阔的应用前景。未来, 随着表面技术的发展, 微纳米 α - Al_2O_3 无铬钝化领域的市场应用将大幅增长, 与其他功能性材料的协同作用和复合材料开发也将成为研究的重点。

关键词

纳米 α - Al_2O_3 , 无铬钝化涂层, 陶瓷膜, 表面硬度, 耐蚀性

Application Status and Market Prospect of Micro-Nano Additive α - Al_2O_3 in Surface Coating Field

Jiankang Fu¹, Maozhan Yang¹, Changrong Ran², Taixiong Guo², Qianfeng Zhang^{1*}

¹Institute of Molecular Engineering and Applied Chemistry, Anhui University of Technology, Ma'an Shan Anhui

²State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pan Gang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 伏建康, 杨茂益, 冉长荣, 郭太雄, 张千峰. 微纳米添加剂 α - Al_2O_3 在表面涂层领域的应用现状及市场前景[J]. 材料科学, 2025, 15(3): 468-475. DOI: 10.12677/ms.2025.153052

Received: Feb. 20th, 2025; accepted: Mar. 15th, 2025; published: Mar. 25th, 2025

Abstract

Micro-nano α -Al₂O₃ is an important functional material, because of its excellent hardness, wear resistance, corrosion resistance and high thermal stability, has been widely used in the field of surface coating. With the development of micro-nano technology, the application of micro-nano α -Al₂O₃ as an additive in various coating systems has been deeply studied, showing its potential to significantly improve coating properties. Micro-nano α -Al₂O₃ particles have a large specific surface area and surface activity, which can enhance the mechanical properties of the coating, such as hardness and wear resistance, while improving the corrosion resistance and high temperature resistance of the coating. Micro-nano α -Al₂O₃ is also an excellent modified material, and its composite modification with organosilane, resin and other materials can greatly improve the application effect of conversion film, and also has a greater role in promoting its stability and weather resistance. In metal surface coatings, ceramic coatings and composite coatings, micro-nano α -Al₂O₃ additives are widely used to improve the service life and stability of coatings. In addition, it also shows broad application prospects in high-tech fields such as electronic devices, aerospace and automotive industries. In the future, with the development of surface technology, the market application of micro-nano α -Al₂O₃ chromium-free passivation will grow significantly, and the synergy with other functional materials and the development of composite materials will also become the focus of research.

Keywords

Nano- α -Al₂O₃, Chromium-Containing Passivation, Chromium-Free Passivation, Surface Hardness, Corrosion Resistance

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

随着现代科技的迅速发展，特别是在航空航天、汽车、电子、能源等领域[1][2]，材料的性能要求日益提高，表面涂层技术作为提高材料性能的重要手段之一，已成为多种高端装备制造和产品优化的关键技术，尤其是在防腐蚀、耐磨损、抗氧化、抗高温等性能方面，表面涂层展现出了巨大的应用潜力[3]-[5]。表面涂层技术根据是否含铬元素将其划分为有铬钝化涂层和无铬钝化涂层。传统的有铬钝化涂层，凭借其出色的性能，一度成为业界首选。六价铬(Cr⁶⁺)作为有铬钝化涂层的核心成分，以其卓越的氧化还原能力和自愈合特性，能够大幅提升金属耐蚀性。然而，随着研究的不断深入，其蕴含的毒性与致癌性，对人体健康及生态环境有着巨大的隐患。随着相关法律法规的制定与完善，有铬钝化技术已逐渐受到严格的限制与禁止。无铬钝化涂层技术将在目前以及未来很长一段时期内成为环保型涂层领域的航向标，必定会得到科研人员的密切关注和深层次研究[6]-[8]。传统的无铬涂层材料虽然在一定程度上满足了材料的耐腐蚀需求，但随着使用环境的复杂化和对涂层性能要求的不断提升，无铬涂层效果已难以满足工业领域对表面材料的苛刻要求。因此，研究和开发新型功能性涂层材料，尤其是微纳米级别的添加剂，氧化铝、氧化硅、氧化锆等，已经成为当前材料科学领域的研究热点[9]-[12]，为了应对铬钝化在应用过程

中暴露出对人体和环境的潜在威胁, 去铬元素钝化技术成为了当前业内研究的热门方向。随着各国出台的环保法规日渐完备和日益严格, 铬钝化的市场占有率大幅下降, 这在一定程度上又推动了去铬钝化技术的发展[13]-[16]。

在众多新型添加剂中, 微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 以其卓越的物化性质和机械性能成为了表面钝化涂层体系中的一颗新星[17]-[20], 其原料铝在地壳中的含量在 8% 左右, 金属元素中其储藏量最高, 具有耐火、耐高温、硬度强、抗酸、碱腐蚀、耐磨擦等性能, 在航天、电子、汽车、化工等领域广泛应用。 Al_2O_3 的晶型按业界说法有 9 种左右, 不同的晶型结构就会有不同的物化性质, 因此虽同是微纳米 Al_2O_3 , 性质却各异。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 被认为是晶型最稳定的, 而其它则被当作是其中间过渡态。并且 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在煅烧过程中可以通过控制温度, 加入不同特色的添加剂、采用不同的研磨方式等就可产出不同形貌的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 这在某种程度上又大幅拓宽了其应用深度和广度。因而, 将 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 引用到表面涂层技术中, 这对其发展又会是一次技术革新和功能升级。本文将综述微纳米添加剂 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在表面涂层领域的应用现状, 分析其在不同工业领域中的应用实例, 并展望未来在更高性能涂层中的潜在市场前景。

2. 无铬涂层技术发展体系

早期的无铬钝化工艺主要是通过简单替代含铬化学品来达到钝化效果, 但稳定性、耐蚀性和耐候性较差。近年来, 随着材料化学和表面工程技术的进步, 无铬钝化技术取得了显著突破, 发展出了性能更优、应用范围更广的工艺技术, 已经逐步应用于航天、汽车、电子等多个领域[21]-[24]。

目前全球市场上常见的无铬工艺技术, 主要有三类: 无机工艺、有机工艺、无机/有机复合工艺三大研究方向[25][26]: 无机工艺中, 有钼酸盐和钛酸盐钝化工艺, 钼酸盐中钼元素和铬同族, 毒性小但具备铬元素的耐蚀性能, 但转化膜成型受 pH 值, 温度等环境因素影响且自修复能力不如铬酸盐。钛酸盐中钛元素无毒无害, 将其引入钝化液中能大幅提高转化膜的致密性和耐蚀性。有机工艺中, 有植酸和树脂钝化工艺, 树脂会聚合交联, 生成致密的薄膜, 如丙烯酸树脂、环氧树脂等。植酸($\text{C}_6\text{H}_{18}\text{O}_{24}\text{P}_6$), 天然的有机磷酸大分子, 环己烷结构, 在金属表面有极优异的螯合效果, 生成的转化膜附着力好, 耐蚀效果优异。单一钝化效果在某一层面上可能优于铬钝化, 但整体效果仍有不足, 将有机/无机钝化二者结合有望起到取长补短的作用, 目前主要为三大类: 无机 + 有机树脂/有机硅烷/有机酸, 随着研究的深入, 复合转化膜在耐蚀性、附着力、耐候性等方面都有较大提升, 这不仅从环保角度, 还是从发展角度, 复合钝化的应用前景将会更加广阔。

3. 微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在涂层领域中的应用

3.1. 微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在环氧涂层中的应用

金属表面的缓蚀性能一直是防腐研究的重点, 钝化涂层作为一种传统和常用的防腐保护措施。环氧树脂是一种常见的有机涂料, 有良好的防腐效果、强附着力和降解稳定性, 但其致密性不足很难提供长久的防腐蚀保护[27][28]。微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的引入不仅能弥补其致密性的缺点, 同时也能对其防腐效果和膜层的机械性能做出大幅提升。

有研究表明[29]用 γ -氨基丙基三乙氧基硅烷(KH550)改性微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 负载在六方氮化硼表面分散于环氧树脂中合成新型复合涂层材料, 结果表明 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 负载颗粒在涂层中有良好的分散性且表现出了主动的缓蚀效果和长效防腐性。下图 1 为 f- Al_2O_3 , h-BN, PDA-BN 和 PDA-BN@f- Al_2O_3 的红外谱图, 对比于 f- Al_2O_3 的特征峰, PDA-BN@f- Al_2O_3 在 1625 cm^{-1} 、 1101 cm^{-1} 、 640 cm^{-1} 出现了不同的吸收峰, 这证明 KH550 成功接枝到了 Al_2O_3 纳米颗粒表面。

但观察谱图, 两试样在 3440 cm^{-1} 处均出现了明显的峰, 对应 Al_2O_3 粒子表面的羟基, 说明改性后的 Al_2O_3 表面并没有完全被 KH550 覆盖, 虽说试验研究的效果已经取得了明显的进展, 但在改性 Al_2O_3 的实验工作中其改性效果并不彻底, 后续进一步深入探究改性效果将有望对 Al_2O_3 在钝化涂层中的应用效果做出进一步的提升。

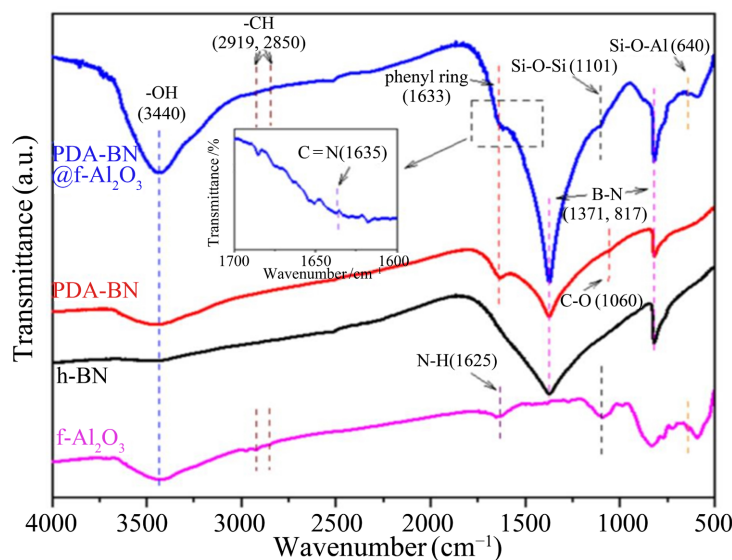


Figure 1. FT-IR spectra of f- Al_2O_3 , h-BN, PDA-BN and PDA-BN@f- Al_2O_3 hybrid [29]

图 1. f- Al_2O_3 , h-BN, PDA-BN 和 PDA-BN@f- Al_2O_3 的红外光谱图[29]

Xin 等[30]利用聚乙烯亚胺改性纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 应用于环氧纳米复合涂层中, 通过傅里叶红外光谱分析表明, PEI 分子成功链接到纳米 Al_2O_3 表面且均匀分散于环氧涂层中, 通过耐腐蚀测试结果表明, 改性纳米 Al_2O_3 涂层电化学阻抗是纯环氧涂层的 10 倍以上, 耐蚀效果优良。图 2 分别为(a) 纳米 Al_2O_3 的 TEM 显微照片和(b)纳米- Al_2O_3 、PEI 和 PEI- Al_2O_3 的 FTIR 光谱, 虽然电镜图和红外谱图已经表明 PEI 分子成功接枝到纳米 Al_2O_3 表面, 但图 2 中表征峰仍明显表明 PEI 并没有完全接枝到其表面。

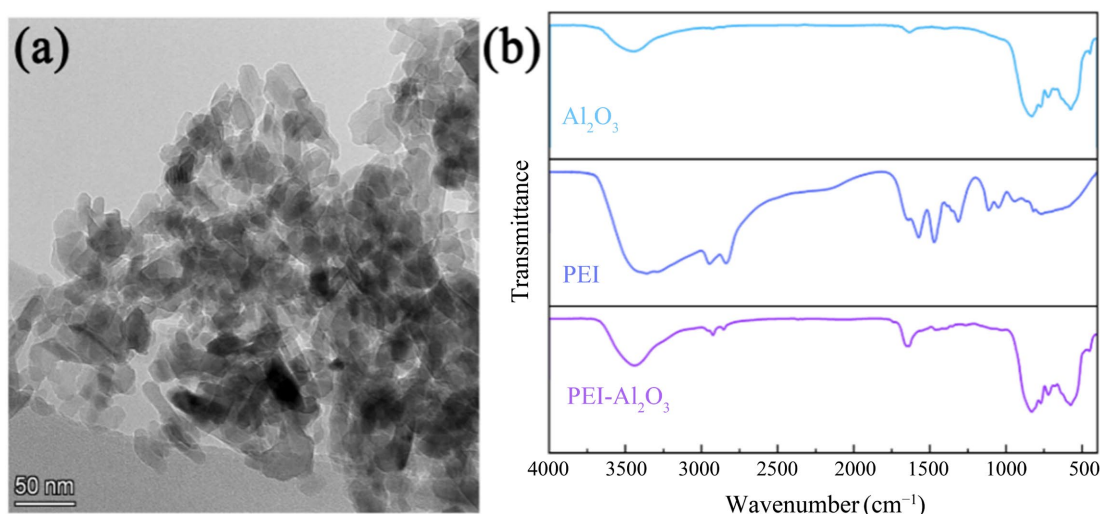


Figure 2. (a) TEM micrographs of nano- Al_2O_3 and (b) FTIR spectra of nano- Al_2O_3 , PEI and PEI- Al_2O_3 [30]

图 2. (a) 纳米 Al_2O_3 的 TEM 显微照片和(B) 纳米- Al_2O_3 、PEI 和 PEI- Al_2O_3 的 FTIR 光谱[30]

关于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在环氧树脂涂层中的应用研究实例中,通过对 Al_2O_3 进行接枝后引入到环氧树脂涂层改性其应用效果,改性后的环氧涂层在膜层耐蚀性方面均有大幅提升,但接枝的不完全对涂层的改性效果必然会造成影响,依然需要通过后续的深入研究来解决。

3.2. 微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基复合涂层应用

近年来纳米氧化铝基涂料与其他氧化物相比,其更易获得、优越的机械性能和摩擦性能,在多种金属及陶瓷材料表面形成结合牢固和致密的防护涂层,同时还具有高硬度高强度、耐腐蚀、耐磨损等优势而受到研究人员的欢迎和重视[31] [32]。

Wei 等[33]设计了一种自润滑复合 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ 涂层,采用摩擦试验机对单组分 Al_2O_3 涂层和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ 涂层进行性能对比,结果表明复合涂层缺陷更少,摩擦系数更低,附着磨损更低。此外,摩擦试验后发现 γ 相 Al_2O_3 转变为 α 相 Al_2O_3 ,而涂层保持性能稳定的同时还减少了摩擦系数,提高其导热性能和力学性能。由此可见,相较于单一的氧化铝涂层,通过添加其它类型的材料制备的复合涂层,能够综合不同材料的性能对涂层进行整体的应用效果提升。

Wang 等[34]在等离子电解氧化制备氧化铝基涂层中引入铽作为添加剂旨在细化涂层的多孔结构和整体性能。结果表明对比单一氧化铝涂层,氧化铝-铽复合涂层有着更均匀和致密的表面结构,表现出了更优异的耐腐蚀性能。

3.3. 微纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷涂层材料领域中的应用

随着科技的发展,工业生产对 Al_2O_3 陶瓷材料的性能需求不断提升[35]-[38], Al_2O_3 陶瓷材料具有机械强度高、耐磨损性好、气孔率低、绝缘度高、介质损耗低等优良的性能,在航空、电子、石化、机械等领域有着极广阔的应用前景。

李等[39]以易烧结 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒为主体材料,制备高致密氧化铝陶瓷膜材料,研究不同烧结温度下对材料性能的影响。结果见表 1,随着温度的升高,样品性能参数先提升后降低,在 1650°C 时最佳。由此表明,添加剂 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒的引入不仅能提升陶瓷的耐高温性能,同时对其韧性和体积密度都有较大提升。

Table 1. Test results of samples at different sintering temperatures [39]

表 1. 样品不同烧结温度下的试验结果[39]

烧结温度/ $^\circ\text{C}$	体积密度/ $(\text{kg}\cdot\text{L}^{-1})$	径向收缩/%	抗弯强度/ MPa
1550	3.73	18.17~18.28	343
1650	3.87	18.32~18.41	397
1700	3.82	18.25~18.43	365

也有研究表明[40]-[42]氧化铝陶瓷质量取决于氧化铝粉末颗粒,通过 NH_4BF_4 制备粒径小于 500 nm 的近球形 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 经低温煅烧后得到了高密度氧化铝陶瓷。通过湿法预处理增大氧化铝陶瓷颗粒尺寸和显微应变,使得在不添加任何添加剂和加压烧结的条件下,在 1650°C 烧结 2 h ,陶瓷密度达到了 99.18% ,孔隙率为 0.017% ,维氏硬度为 27.54 GPa 。图 3 为不同烧结温度的氧化铝经湿法预处理后经 1600°C 煅烧后的电镜图,图中显示球形 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 经低温煅烧后的紧密堆积和高显微应变共同促进了氧化铝陶瓷的致密化,使其具有显著的硬度,高密度和微小孔隙率。

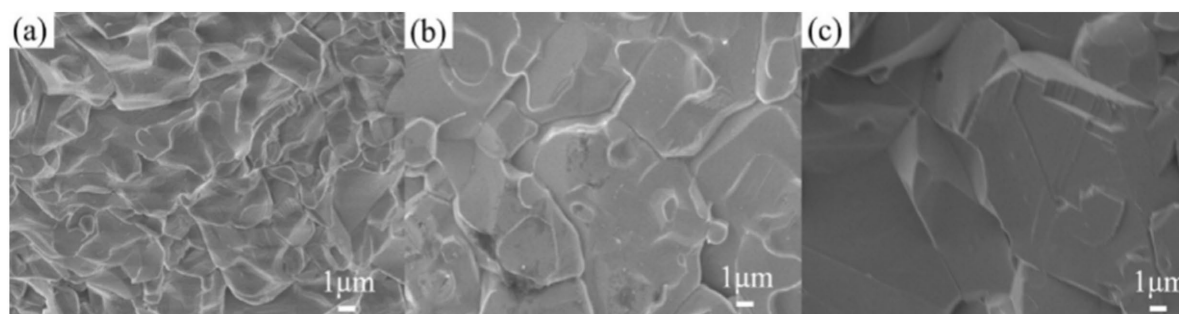


Figure 3. SEM images of fractured surfaces of alumina ceramics sintered at 1600°C for 2 h using alumina calcined at (a) 1000°C, (b) 1100°C, (c) 1200°C with the wet pretreatment [40]

图 3. 使用在(a) 1000°C、(B) 1100°C 和(c) 1200°C 下煅烧的氧化铝进行湿法预处理在 1600°C 下烧结 2 小时的氧化铝陶瓷断裂表面的 SEM 图像[40]

4. 结语

在表面涂层工艺技术中，微纳米 α - Al_2O_3 的引入展示了其作为环保、高效添加剂的巨大发展潜力。随着环保法规日益严格，传统铬酸盐钝化技术的局限性逐渐显现，尤其是铬离子的毒性和对生态环境和人体健康的危害，使得无铬钝化涂层技术成为当今金属表面处理领域的研究热点。此背景下， α - Al_2O_3 凭借优异的物理-化学稳定性、高硬度、耐高温及耐腐蚀等特性展现了其极强的性能提升效果。同时， α - Al_2O_3 的引入不仅推动了涂层工艺的创新，也为传统涂层性能的不足提供了有效的补充。此外，随着纳米技术和表面改性技术的不断进步， α - Al_2O_3 的应用前景更加广阔，其与有机物或其他无机材料的复合应用，将进一步提升钝化膜的综合性能，拓展其在高端工业领域，特别是汽车、航空、电子等行业中的应用空间。

参考文献

- [1] 智鹏飞. 金属材料的腐蚀与防腐技术研究[J]. 山西冶金, 2023, 46(2): 63-64, 81.
- [2] 胡丽华, 张玉楠, 常炜, 等. 2507 双相不锈钢在南海深水环境中的点蚀和缝隙腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(6): 33-37.
- [3] 奚军生, 袁景追, 喻岚, 等. 钝化液中金属杂质对镀锌层三价铬钝化的影响[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(6): 117-122.
- [4] 张玉, 李世凯, 李涛, 等. 热浸镀锌表面钝化技术的研究进展[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(10): 97-100.
- [5] Yang, X.K., Fan, Y.Y., Jiang, Y.H. and Li, Z.L. (2010) Study on Chromium-Free Color Passivation for Zinc Coating Treated with Silicate. *Advanced Materials Research*, **154**, 1301-1304. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.154-155.1301>
- [6] 王若彤, 焦洋, 张胜寒, 等. 镀锌钢无铬钝化技术研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(4): 69-71.
- [7] Li, Q., Lu, H., Cui, J., An, M. and Li, D.Y. (2017) Improve the Performance of Cr-Free Passivation Film through Nanoelectrodeposition for Replacement of Toxic Cr^{6+} Passivation in Electroplating Process. *Surface and Coatings Technology*, **324**, 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.081>
- [8] 李会芬, 邹忠利, 李春龙. 镀锌层表面无铬钝化工艺的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 137-143, 168.
- [9] Haiyang, F., Bo, G., Yingwei, Z. and Pengfei, X. (2020) Effects of Silanes on the Structure and Properties of Chromium-Free Passivation. *Science of Advanced Materials*, **12**, 1012-1018. <https://doi.org/10.1166/sam.2020.3750>
- [10] 苏更林. 各显神通的精细氧化铝[J]. 百科知识, 2023(26): 22-25.
- [11] 胡博强, 侯焕焕, 王建立. 氧化铝晶型变化[J]. 广州化工, 2024, 52(1): 30-32.
- [12] Kozyrev, N.V. (2024) Thermodynamic Properties and Equation of State for α -Alumina. *International Journal of Thermophysics*, **45**, Article No. 37. <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03337-z>
- [13] Hu, Y.Z., Luo, L.L., Shen, H.H., Hu, S.L., Tan, Z.Y. and Long, X.G. (2022) Interfacial Properties of Multilayer Graphene and α -Alumina: Experiments and Simulations. *Ceramics International*, **48**, 12056-12064. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.064>

- [14] 吴慧斌, 徐冰, 谭志清. 金属表面无铬钝化工艺研究进展[J]. 广州化工, 2019, 47(23): 31-32, 79.
- [15] 田丰, 赵婧, 邱龙时, 等. 镀锌钢板钼酸盐钝化膜防腐性能研究[J]. 世界有色金属, 2019(15): 134-136.
- [16] 秦振华, 李红玲. 6061 铝合金表面氟钛酸盐转化新工艺[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(7): 742-745.
- [17] 曹志强, 陈昱锟, 蓝丽, 等. α -氧化铝的结构、性质及应用前景[J]. 大众科技, 2023, 25(3): 62-65.
- [18] 杨卫亚, 王刚, 凌凤香, 等. 三维贯穿结构大孔氧化铝的制备与性质表征[J]. 石油化工, 2019, 48(7): 661-665.
- [19] 杨占刚, 陈孟贤, 王晓峰, 等. 凝露环境中纳米氧化铝改性环氧树脂电气特性研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(12): 36-44.
- [20] 伏建康, 马常帅, 冉长荣, 等. 微纳米 α -Al₂O₃ 改性丙烯酸树脂-有机硅烷复合钝化对不锈钢硬度及耐蚀性的影响[J]. 材料保护, 2024, 57(5): 76-82.
- [21] 王涛, 朱印, 杨承伟, 等. PDMS 及纳米二氧化硅改性聚氨酯防腐涂层的性能研究[J]. 聚酯工业, 2024, 37(6): 56-59.
- [22] 张旭阳, 王秀芳, 万德田, 等. 氧化铝-氧化锆预应力陶瓷的抗钙镁铝硅酸盐腐蚀性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(12): 3815-3823.
- [23] 颜蜀雋, 谭雅莉, 庞忠荣, 等. 六方氮化硼负载纳米氧化铝复合填料的制备及改性环氧涂层的防腐性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 301-306.
- [24] Liu, J., Tian, B., Lu, N., Liu, Z., Zhang, Z., Shi, M., *et al.* (2024) Study on Aluminium Oxide Doping Modification of Indium Oxide and Thermoelectric Properties. *Ceramics International*, **50**, 52027-52035. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.202>
- [25] 刘仁辉, 刘斌斌, 喻玺, 等. 黄铜表面植酸钝化膜耐蚀性及其成膜机理[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 197-202.
- [26] He, W., Liu, Y., Jia, Y., Zhao, Y. and Le, H. (2024) Corrosion Resistance and Long-Term Antibacterial Performance of ZnO-Al₂O₃ Nanocomposite Coatings on Aluminum Alloy. *Composites Communications*, **51**, Article ID: 102110. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.102110>
- [27] Zeng, X., Mao, H., Liu, Q., Li, F., Lan, X., Wang, F., *et al.* (2024) Synthesis of Decorated Polyborosiloxane for Enhancing the Flame Retardancy and Mechanical Property of Epoxy Resin. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, **30**, 98-108. <https://doi.org/10.1080/1023666x.2024.2425720>
- [28] Li, R., Jiang, R., Tang, Q., Yu, J. and Song, D. (2024) Effect of Diatomite on the Mechanical and Electrical Properties of Polyurethane/Epoxy Resin Composites. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, **64**, 382-395. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2408341>
- [29] 颜蜀雋, 谭雅莉, 庞忠荣, 等. 六方氮化硼负载纳米氧化铝复合填料的制备及改性环氧涂层的缓蚀性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 301-306.
- [30] Liang, X., Hua, C., Zhang, M., Zheng, Y., Song, S., Cai, M., *et al.* (2023) Preparation of Anticorrosive Epoxy Nanocomposite Coating Modified by Polyethyleneimine Nano-Alumina. *Coatings*, **13**, Article 561. <https://doi.org/10.3390/coatings13030561>
- [31] Wei, Y., Zhu, Z., Zhang, J., Xue, Y., Zhao, X., Zhang, J., *et al.* (2025) Preparation and Tribological Properties Study of a Novel Self-Lubricating Alumina-Based Composite Coating. *Tribology International*, **203**, Article ID: 110414. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110414>
- [32] Rocha, F.S., Bousser, E., Azzi, M., Khelfaoui, F., Vernhes, L., Patience, G.S., *et al.* (2024) Alumina Coatings on Ni-Based Superalloys: The Impact of Annealing on Heavy Oil Fouling. *Surface and Coatings Technology*, **493**, Article ID: 131266. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131266>
- [33] Wei, Y., Zhu, Z., Zhang, J., Xue, Y., Zhao, X., Zhang, J., *et al.* (2025) Preparation and Tribological Properties Study of a Novel Self-Lubricating Alumina-Based Composite Coating. *Tribology International*, **203**, Article ID: 110414. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110414>
- [34] Wang, Z., Li, H., Kou, R., Yang, X., Wang, S. and Huang, J. (2024) Terbium-Reinforced Alumina Coating Produced by Plasma Electrolytic Oxidation and a New Strategy for *In-Situ* Corrosion Monitoring. *Surface and Coatings Technology*, **489**, Article ID: 131085. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131085>
- [35] Bhandari, S., Hanzel, O., Kermani, M., Sglavo, V.M., Biesuz, M. and Franchin, G. (2025) Rapid Debinding and Sintering of Alumina Ceramics Fabricated by Direct Ink Writing. *Journal of the European Ceramic Society*, **45**, Article ID: 117144. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117144>
- [36] Zhang, X., Hu, J., Li, S., Wang, P., Yang, G., Yuan, Z., *et al.* (2024) Preparation and Electrical Properties of V-Sm-Y-O Pigments for Black Alumina Ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **35**, Article No. 2277. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-14038-6>

-
- [37] Yang, Z., Liu, G., Qi, T., Zhou, Q., Peng, Z., Shen, L., *et al.* (2024) Structural Defect and Activated Alumina of Spheric α -Al₂O₃ Improving Alumina Ceramics Density from the Industrial Coarse Gibbsite. *Ceramics International*, **50**, 54643-54653. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.322>
- [38] Tang, M., Zhu, W., Shen, Y., Zou, H., Han, Y. and Ran, X. (2024) Elimination Mechanism of Voids Caused by Density Differences in High Crystallinity Alumina/Alumina Joints Bonded with Dysprosium Aluminum Silicate Glass Ceramic Filler. *Ceramics International*, **50**, 45880-45890. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.429>
- [39] 李伟华, 王成斌, 王旭东, 等. 高致密度氧化铝陶瓷的制备及影响因素研究[J]. 河南化工, 2024, 41(3): 17-19, 32.
- [40] Yang, Z., Liu, G., Qi, T., *et al.* (2024) Structural Defect and Activated Alumina of Spheric α -Al₂O₃ Improving Alumina Ceramics Density from the Industrial Coarse Gibbsite. *Ceramics International*, **50**, 54643-54653.
- [41] Yang, Z., Liu, G., Qi, T., Zhou, Q., Peng, Z., Shen, L., *et al.* (2024) Structural Defect and Activated Alumina of Spheric α -Al₂O₃ Improving Alumina Ceramics Density from the Industrial Coarse Gibbsite. *Ceramics International*, **50**, 54643-54653. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.322>
- [42] Huang, M., Zhang, C., Yang, H., Hou, F. and Ding, N. (2024) Foam Forming of Highly Porous Alumina Ceramic Paper and Its Enhancement of Mechanical and Thermal Insulation Properties in Aerogel Composites. *Ceramics International*, **50**, 54575-54585. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.316>