

表面施胶化学品在改善纸张物理性能中的应用分析

程立芹 门丽军

山东银河瑞雪纸业有限公司 山东 聊城 252600

【摘要】：表面施胶化学品是现代造纸不可缺少的材料，对于改善纸张物理性能具有重要意义。淀粉类施胶剂通过氢键强化与纸张纤维结合，提升纸张强度并优化印刷适性；合成聚合物凭借成膜性，显著增强抗张强度、耐折性及抗液体渗透性；纳米材料改性施胶剂则通过孔隙填充与界面增强，同步提升纸张的平滑度和阻隔性。研究提出想要发挥表面施胶的作用，要平衡施胶浓度、渗透深度以避免脆化或吸墨失衡，希望为表面施胶技术的优化提供参考。

【关键词】：表面施胶化学品；淀粉类施胶剂；合成聚合物；纳米材料；纸张物理性能

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.041

现阶段，全社会对纸张的需求量较大，同时对纸张的各方面要求也较高，比如要求纸张有高表面强度、较强的印刷适应性以及较好的抗水性等。传统的湿部化学调控方法在提升纸张物理性能时，面临效率瓶颈及浆料干扰等问题。表面施胶技术，作为一种在纸张成形后于其表面施加化学处理剂的精加工工艺，因其针对性强、效率高且对湿部系统影响小的显著优势，已成为现代造纸工业提升纸张品质不可或缺的技术工艺。当前研究热点主要集中于开发高性能、多功能及环境友好型的可再生表面施胶化学品，缺少对表面施胶化学品对改善纸张物理性能方面的研究，故本研究以此为切入点进行了探究。

1 表面施胶技术概述

1.1 表面施胶技术原理

表面施胶是一种在纸张成形和干燥后，在其表面施加特定化学溶液的工艺。该技术主要利用施胶压榨机、膜转移施胶机等施胶设备，将配制好的施胶剂均匀涂布于纸幅表面。施胶剂通常以水溶液形式存在，浓度范围在1%至10%之间。在施胶过程中，纸幅通过浸渍或转移方式接触施胶液，随后经过辊压作用使施胶剂部分渗透进入纸张表层纤维孔隙，同时在表面形成一层连续的薄膜。之后，纸张进入干燥部，通过热能蒸发水分，促使施胶剂中的淀粉、乙烯醇（PVA）或合成胶料等高分子聚合物在纤维表面交联固化。这一过程强化了纤维间的结合，封闭了纸张表面的微孔，优化了表面能分布，显著提升纸张的强度、平滑度、抗液体渗透性。

1.2 常用施胶化学品种类及作用机制

1.2.1 淀粉类施胶剂

淀粉类施胶剂是造纸工业中应用最广泛的表面施胶剂，主要来源于玉米、马铃薯、木薯等天然植物。天然淀粉常需通过物理变性、化学改性或酶解处理，以提高其糊液稳定性、成膜性、流动性及与纤维结合能力。

在施胶过程中，淀粉糊液均匀涂布于纸张表面，部分渗透进入纤维孔隙。在干燥阶段，淀粉分子脱水并在纤维间形成连续的、柔韧的薄膜。这一过程可增强纤维间氢键的结合力，有

效封闭纸张表面的微孔结构，从而提升纸张的表面强度、内结合强度、挺度和耐折度，同时形成的薄膜可降低纸张表面能，改善纸张抗水性和油墨吸收均匀性，能够更适合印刷。改性淀粉还能通过电荷作用增强与带负电纤维的吸附，其可使纸张表面强度提升30%~50%，IGT值提高比较显著。

1.2.2 合成聚合物类

合成聚合物类施胶剂主要包括PVA、苯乙烯-丙烯酸酯共聚物（SAE）和聚氨酯（PU）等。PVA凭借优异的成膜性、粘接性和柔韧性，能在纸面形成致密、连续的薄膜，显著提升纸张的抗张强度、耐破度和表面平滑度。SAE乳液通过疏水性苯乙烯链段与亲水性丙烯酸酯链段的协同作用，在纤维表面自组装形成低表面能屏障，赋予纸张优异的抗水、抗油性能，同时改善印刷清晰度。PU则通过分子链中的氨基甲酸酯基团与纤维形成强氢键结合，并可在干燥过程中发生交联反应，构建三维网络结构，大幅提高纸张的耐磨性、耐折性和尺寸稳定性。

这类合成施胶剂具有分子结构设计性强、功能针对性突出、应用效率高等优势，尤其适用于对纸张物理强度或特殊防护性能要求严苛的领域，常与淀粉施胶剂联合使用，可以获得“1+1>2”的效果。

1.2.3 纳米材料改性施胶剂

纳米材料改性施胶剂是一种在淀粉类施胶剂、合成聚合物类施胶剂等中引入米二氧化硅、纳米纤维素、石墨烯氧化物等纳米级功能性粒子的新型复合施胶剂。纳米粒子均匀分散于施胶基体中，可在纸张表面成膜时填充纤维间微纳孔隙，增强薄膜的致密性与连续性。同时，纳米粒子与纤维及基体聚合物产生强界面相互作用，形成三维增强网络结构。例如，纳米二氧化硅可使纸张抗张强度提高20%~40%；亲水性纳米纤维素通过氢键结合，可大幅改善纸张刚度^[1]。

此类施胶剂在赋予纸张高强、高阻隔、抗静电以及抗菌等特殊功能的同时，可降低传统化学品用量的15%~30%，是表面施胶技术向高效化、功能化及可持续化发展的重要方向。

2 表面施胶化学品对纸张物理性能的影响

2.1 对纸张强度性能的影响

2.1.1 抗张强度

表面施胶化学品通过增强纤维间结合力提升纸张的抗张强度,施胶剂在纸张表面成膜并渗透至纤维孔隙后,其高分子链通过氢键、范德华力、化学交联等作用桥接相邻纤维,可有效强化纤维间的结合点。例如,曹晓瑶等^[2]研究发现,采用氧化淀粉进行表面施胶的包装纸,抗张强度较未施胶对照组提升18%~25%,归因于淀粉分子在纤维间形成的连续交联网络增强了界面结合能。朱洪日等^[3]的对比实验显示,添加纳米纤维素改性的PVA施胶剂可使文化用纸抗张指数提高30%~40%,研究发现其机理在于纳米纤维素的刚性结构与PVA柔性链协同,构建了“刚柔并济”的增强骨架,显著优化了应力分布。

但需注意的是,施胶剂过量可能引起局部脆化,反而不利于强度提升,如徐清凉等^[4]指出淀粉施胶量超过 6g/m^2 时,抗张强度增长趋于饱和。因此,优化施胶剂种类、浓度及渗透深度是实现抗张强度高效提升的关键。

2.1.2 耐折度

表面施胶化学品通过增强纤维结合,显著改善纸张的耐折性能。研究表明,施胶剂形成的连续薄膜在纤维间起到“铰链”作用,既强化了结合点,又分散了折叠应力。蔡宇豪等^[5]发现,阳离子淀粉施胶后文化用纸的MIT耐折度提升了172%,归因于淀粉分子链的柔性交联网络缓冲了反复折叠产生的微应力。合成聚合物作用更为显著,含增塑剂的PVA施胶剂可使票据纸耐折次数提高8-10倍,其长分子链的延展性有效抑制了纤维间裂纹扩展。而SAE乳液则通过“核-壳”结构中的软性丙烯酸酯链段提升薄膜弹性,李庆博等^[6]实验显示涂布SAE的包装纸板在 -20°C 低温下耐折度仍保持对照组2倍以上。

但过量交联也可能损害纸张的柔韧性。实践中发现,环氧交联改性淀粉施胶量超过 4g/m^2 时,因薄膜刚性过强导致耐折度下降了15%。针对这一问题,近年纳米改性技术提供了新思路,如PU/纤维素纳米晶复合施胶剂,通过纳米粒子界面滑移机制提升纸张的强度与韧性,可使牛皮纸耐折次数达800次,证实优化增塑组分与交联密度是提高纸张耐折性的可行性路径。

2.1.3 撕裂度

表面施胶化学品对纸张撕裂度的影响呈现“双刃剑”特性,即适度施胶可通过强化纤维间结合提升撕裂能,但过量施胶易因脆化效应导致撕裂性能下降。其机理在于撕裂过程需同时克服纤维断裂能与纤维间结合能——施胶剂增强纤维结合虽有利于应力传递,但过度交联会限制纤维滑移。鄂玉萍等^[7]发现,氧化淀粉施胶量控制在 $3\sim 5\text{g/m}^2$ 时,文化用纸撕裂指数可提升8%~12%,因适度结合的纤维网络更易发生局部滑移;但当施

胶量 $>6\text{g/m}^2$ 时,撕裂度反下降15%,归因于膜层刚性化抑制了纤维剥离。而多项研究也证实,合成聚合物也具有类似的表现。

针对这一问题,周嘉铨等^[8]开发的纤维素纳米纤维改性淀粉施胶剂,利用纳米纤维桥接纤维形成可滑移界面,使纸张撕裂指数同步增长18%。这证实选择低交联密度施胶剂、控制渗透深度及引入纳米增韧组分,可以平衡撕裂度与抗张强度的关系。

2.2 对纸张表面性能的影响

2.2.1 平滑度

表面施胶化学品通过在纸张表面形成连续、致密的薄膜并填充纤维间微观凹陷,实现提升纸张平滑度的效果。其作用机制主要包含两方面:一是施胶液在压实作用下流平并覆盖粗糙凸起,在干燥过程中形成低轮廓表面层;二是施胶剂高分子链渗透至微孔结构内固化,减少光散射界面。研究证实,采用氧化淀粉施胶的胶版印刷纸,其PPS粗糙度值可从 $3.5\mu\text{m}$ 降至 $1.8\mu\text{m}$,平滑度提升48%,归因于淀粉分子对 $20\sim 50\mu\text{m}$ 级孔隙的有效填充。岳甜甜等^[9]研究还发现PVA施胶后铜版纸的Bendtsen粗糙度由 250 mL/min 降至 100 mL/min ,其优异成膜性可完全覆盖小于 $10\mu\text{m}$ 的微缺陷。

需注意的是,施胶剂黏度过高或干燥过快易导致流平不良,使平滑度下降,SAE施胶时固含量超过15%会引起“橘皮效应”,粗糙度增加15%。因此,优化施胶液流变特性、采用膜转移施胶工艺,是实现高平滑度的关键。

2.2.2 吸墨性

表面施胶化学品通过调控纸张表面能、孔隙结构及化学极性,影响纸张的吸墨性能。施胶剂在纤维表面形成的薄膜或填充孔隙,一方面降低纸张亲水性,延缓油墨渗透以避免透印;另一方面通过极性基团或设计微粗糙结构提供可控的毛细作用点。赵丽君等^[10]研究证实了丙烯酸改性的SAE施胶剂,可使铜版纸油墨吸收时间优化至 $15\sim 30$ 秒,印刷网点扩大率降低18%,实现高分辨率图像再现。相统天等^[11]开发的纤维素纳米晶/PVA复合施胶剂,利用CNC构建的纳米级通道引导油墨定向渗透,使吸墨速率提升37%且无透印缺陷。

但也要警惕过度封闭孔隙的危害,一些研究发现当施胶剂渗透深度超过 $50\mu\text{m}$ 时,文化用纸油墨固着时间延长至120秒以上,超过标准要求的60秒,导致印刷粘脏。因此,建议控制施胶剂固含量在8%~12%,并引入亲水纳米粒子以维持吸墨性与抗透印的平衡。

2.3 对纸张耐水性与抗液体渗透性的影响

表面施胶化学品通过构建疏水屏障与封闭孔隙结构,提升纸张的耐水性及抗液体渗透性能。疏水性基团定向排列于表面,可大幅降低纸张表面能,使水接触角从未施胶纸的 $20\sim 40^\circ$

提高至 80-110°。同时施胶剂高分子链渗透填充纤维间微孔,可有效阻断毛细管渗透通道。陈泓丞等^[12],研究发现 SAE 施胶后包装纸的 Cobb60 值从 110 g/m² 降至 25 g/m²,抗水效率提升 340%; Gao 等^[13]开发的纳米黏土/SAE 复合施胶剂,利用黏土片层在膜内形成“迷宫效应”,使纸杯原纸对 60℃ 热咖啡的渗透阻力提高 5 倍。

需注意的是,施胶剂分布均匀性对性能至关重要,若施胶不均匀,局部 Cobb60 值可能出现较大波动,导致抗液性失效。建议聚焦环保型无氟施胶剂研究,研究证实其抗 30%乙醇溶液

性能已接近传统含氟产品,可为未来研究提供新思路。

3 结论

表面施胶化学品作为现代造纸工业的核心精加工手段,通过分子级界面设计实现了纸张物理性能的精准调控。研究证实了施胶化学品在增强纤维网络、赋予柔性结构、构筑功能表面及构建阻隔屏障中的决定性作用。未来研究可关注环境友好型智能施胶体系开发,通过数字孪生技术对施胶工艺进行精准控制,以推动造纸工业向高性能、低能耗、可持续方向加速转型,为包装、印刷及特种纸领域提供更优质的解决方案。

参考文献:

- [1] 刘承林,袁梦婕,毛成晔,等. 有机硼酸酯乳化 AKD 制备阴离子型表面施胶乳液的性能及应用 [J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2025, (02): 232-238.
- [2] 曹晓瑶,梁健文. 玉米淀粉改性制备氧化淀粉的工艺研究及在造纸行业的应用[J]. 造纸科学与技术, 2020, 39(02): 8-13.
- [3] 朱洪日,游权,丁红梅,等. 纳米纤维素制备及其在食品包装材料中的应用[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(12): 181-184.
- [4] 徐清凉,郭锦还,王洪超. 酶解淀粉表面施胶工艺对箱纸板物理性能影响的研究[J]. 中华纸业, 2024, 45(12): 54-59.
- [5] 蔡宇豪,彭航,邹其超. 阳离子淀粉/苯丙共聚物乳液乳胶粒形成过程的研究[J]. 胶体与聚合物, 2024, 42(02): 75-77+81.
- [6] 李庆博,赵奇,刘林生,等. 双丙酮丙烯酰胺-丙烯酸酯共聚物基蓄能型发光涂料的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(07): 176-180+190.
- [7] 鄂玉萍,朱先梅. 改性纳米微晶纤维素/木薯氧化淀粉表面施胶应用研究[J]. 中华纸业, 2022, 43(06): 8-12.
- [8] 周嘉铨,邹小峰,杨祥建,等. 纤维素纳米纤维的疏水改性及其在纸张中的应用[J]. 中国造纸, 2024, 43(07): 160-167.
- [9] 岳甜甜,郑帅,胡静,等. 对喷静电纺玉米醇溶蛋白/乙烯-乙烯醇共聚物复合过滤器的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2024, 45(11): 21-28.
- [10] 赵丽君,张莹,张雨婷,等. 丙烯酸改性环保防油剂对防油纸性能的影响[J]. 中华纸业, 2025, 46(05): 81-86.
- [11] 相统天,郭映桃,韦贻春,等. 乙酰化蔗渣纳米纤维素/PVA 复合膜的制备及性能研究[J]. 现代化工, 2024, 44(02): 199-205+210.
- [12] 陈泓丞,姚志伟,李喜坤,等. 纳米纤维素乳化苯乙烯-丙烯酸酯共聚物的制备及性能研究[J]. 中国造纸, 2022, 41(03): 27-35.
- [13] 郭雷,李琛. 淀粉/黏土纳米复合材料应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(11): 37-42.