

# 新型增强剂在提高纸张强度性能中的应用探讨

白 华 刘春晖 于 永

山东银河瑞雪纸业有限公司 山东 聊城 252600

**【摘要】**：传统纸张强度增强剂在使用效能、环保性以及成本上存在着一定的局限性，开发高效、可持续的新型增强剂成为造纸工业升级的关键。本文探讨了阳离子淀粉、纳米材料、聚合物及生物基四类新型增强剂在提升纸张强度性能中的应用。研究重点分析了四类新型增强剂的作用机制，并通过对比多项实证研究，详细评估了各类增强剂在抗张强度、撕裂度、耐破强度及耐折度四项关键指标上的具体表现与优化潜力，希望为造纸企业科学选用增强剂提供参考。

**【关键词】**：新型增强剂；纸张强度性能；阳离子淀粉；纳米材料；聚合物；生物基

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.055

纸张的强度性能，如抗张强度、耐破度和撕裂度等，是评价其使用价值的关键指标。这些指标直接决定了纸张在印刷、包装、书写等应用场景中的适用性和耐用性。传统造纸工艺中常使用淀粉、聚乙烯醇（PVA）、聚丙烯酰胺（PAM）等作为增强剂来提升纸页强度。纸张在抄造过程中，在浆料条件无法调整的情况下，最常见的提高强度的方法是添加增强剂。因此，开发和应用新型纸张增强剂成为当前造纸工业技术升级的重要方向之一。

## 1 增强剂对纸张强度性能的影响机制

增强剂主要通过改善纤维间的结合状态和强化纤维提升纸张的强度性能。首先，增强剂分子能够吸附在纤维表面，其分子链上的活性基团与纤维表面的羟基形成大量氢键结合，同时部分增强剂分子链也能在相邻纤维之间架桥连接。这种作用显著增加了纤维间的有效结合面积，从而直接提高了纸张的强度。其次，某些增强剂能够渗透进入纤维细胞壁内部，通过物理填充或与纤维素分子链发生相互作用，增强纤维自身的刚度力，有助于提高纸张的挺度和抗张强度。再者，增强剂可以改善纸料悬浮液中纤维的分散性，使纤维在纸页成形过程中分布更均匀，减少薄弱点，形成结构更均一的纸页，利于强度性能的整体提升。最后，部分增强剂在纤维间形成的聚合物膜或网络结构，在纸张受到外力作用时，能够有效传递和分散应力，延缓裂纹的扩展，进一步强化纸张。

## 2 新型增强剂在提高纸张强度性能中的应用

### 2.1 阳离子淀粉类增强剂

阳离子淀粉类增强剂是天然淀粉经过阳离子化改性得到的一类重要造纸增强剂。它们在水溶液中带有正电荷，这种阳离子特性使其对通常带负电荷的植物纤维和填料颗粒具有优异的静电吸附能力，能有效克服传统阴离子淀粉因电荷排斥导致的留着率低问题。吸附到纤维表面后，阳离子淀粉分子链上丰富的羟基可与纤维素分子的羟基形成大量氢键结合。同时，其较长的分子链能在相邻纤维间起到良好的“架桥连接”作用。这可以显著增强纤维间的结合强度和面积，从而有效提升纸张

的抗张强度、耐破度和挺度等强度性能。

阳离子淀粉原料来源广泛、可再生、生物可降解且成本相对较低，具有良好的环保性和经济性。它们与造纸系统中其他常用化学助剂的相容性通常较好，工艺适应性广泛，在中性和碱性造纸条件下均能有效发挥作用，广泛应用于文化用纸、包装纸板、生活用纸等多种纸种的生产中，是实现纸张增强同时兼顾可持续发展目标的优选方案之一。

### 2.2 纳米材料增强剂

纳米材料增强剂代表纸张增强技术的前沿方向，主要包括纳米纤维素、纳米黏土、纳米二氧化硅、碳纳米管以及石墨烯等。该增强剂的核心在于至少有一个维度处于纳米尺度，因而具有极高的比表面积和表面能。当应用于造纸时，纳米粒子能紧密地吸附在纤维表面或渗透进入纤维细胞壁的孔隙结构中，在分子水平上增强纤维自身的刚度和内聚力。更重要的是，纳米粒子能在相邻纤维之间形成极其密集且强韧的连接网络，其作用远超传统增强剂的氢键和架桥效应，部分材料，如CNF长径比和机械强度极高，能有效传递和分担应力。这种纳米尺度的强化作用使纸张在获得同等或更高抗张强度、耐破度和挺度的同时，有可能实现轻量化和高填料添加量。

纳米纤维素因其源于天然纤维素、可再生、可生物降解的特性，在追求高性能与可持续发展方面具有巨大潜力，已在高强度包装纸板、特种纸及复合材料领域展现出应用前景，但分散稳定性、成本和规模化生产仍是研究的重点突破。

### 2.3 聚合物类增强剂

聚合物类增强剂是种类繁多、应用广泛的一类纸张增强剂，主要包括合成聚合物和改性天然聚合物。这类增强剂通常具有较高的分子量和特定的官能团结构，主要依赖聚合物长分子链在纤维间的“架桥连接”作用提高纸张的强度。带电荷的聚合物能通过静电引力高效吸附在带负电的纤维上，增加纤维间的结合点数量和强度。同时，聚合物长链可跨越相邻纤维，形成牢固的网络结构，有效传递和分散应力，从而大幅提升纸张的抗张强度、耐破度和表面强度。

这类增强剂通常添加量少、效率高、适用 pH 范围广，易于在湿部或表面施胶工段添加，广泛应用于文化用纸、包装纸板、特种纸及生活用纸的生产中。选择时往往要考虑分子量、电荷密度、离子类型、工艺相容性及成本效益。

## 2.4 生物基增强剂

生物基增强剂指主要来源于可再生生物质资源，经过物理、化学或生物改性加工而成的一类环境友好型纸张增强剂。这类增强剂能够为纸张提供有效强度提升的同时，最大限度降低环境负荷。常见的种类包括深度改性的淀粉衍生物、壳聚糖、季铵化或羧甲基化衍生物、植物胶体、微生物多糖、木质素基增强剂等。这类增强剂通常具有良好的生物降解性，增强机理与传统或合成聚合物增强剂类似，主要依靠分子链上的活性基团与纤维素纤维形成氢键、静电吸附或架桥连接，从而增强纤维间结合力和内聚力，提升纸张的抗张强度、耐破度和挺度。部分生物基增强剂，如壳聚糖还可能赋予纸张一定的抗菌性能。

虽然生物基增强剂在增强效率和使用成本上具有局限性，但其凭借其可持续性、再生性以及较高的改进空间，正成为造纸工业应对环保法规要求的关键技术选项之一，尤其在高附加值环保纸种、食品接触包装纸领域具有广阔前景。

## 3 新型增强剂在提高纸张强度性能中的表现

### 3.1 抗张强度

抗张强度是衡量纸张抵抗轴向拉伸断裂能力的关键指标，对纸张使用性能至关重要。了解和掌握不同增强剂在提高纸张强度性能中的表现能够为造纸企业提供更科学的选择方案。一项研究针对阳离子淀粉、纳米纤维素 CNF、聚合物 PAE 树脂、生物基壳聚糖衍生物在同等添加量下对纸张抗张强度的提升效果进行了比较研究。实验结果显示，阳离子淀粉类增强剂表现出稳定的增强效果，抗张强度提升幅度约在 20%~25% 范围，生物基壳聚糖衍生物提升幅度略高于阳离子淀粉为约 22%~27%，聚合物类 PAE 树脂展现出非常优异的性能，抗张强度提升幅度高达 30%~35%，表现最为突出的是纳米纤维素 CNF，在同等添加量下，其对抗张强度的提升幅度达到了惊人的 33%~39% 甚至更高<sup>[1]</sup>。CNF 的巨大比表面积使其能深入渗透纤维壁并形成极其致密、高强度的三维纳米网络，极大地强化了纤维本身和纤维间的结合力，从而在抗张强度提升上实现了最佳效果。因此，在单纯考虑提高纸张抗张强度的前提下，CNF 可作为首选方案。

### 3.2 撕裂度

撕裂度衡量纸张抵抗撕裂力扩展的能力，其提升机制相比抗张强度更为复杂，需要平衡纤维间结合力与纤维长度/强度之间的关系。宋英琪<sup>[2]</sup>研究提出，传统的强效增强剂如聚合物类 PAE 树脂，在显著提高纤维间结合力的同时，会导致撕裂度下

降，这是因为过强的结合限制了纤维在撕裂过程中沿裂纹的拔出。纳米纤维素增强剂的表现较为复杂，一些研究发现高添加量下 CNF 形成的致密网络会像强结合型聚合物一样降低撕裂度。但田德良等<sup>[3]</sup>研究提出，CNF 能够通过显著强化单根纤维和增加纤维间摩擦，实现撕裂度的适度提升，尤其在长纤维浆料中效果更明显。生物基增强剂作用较为温和，对纤维间结合力的提升不如 PAE 剧烈，因此对撕裂度的负面影响较小。值得注意的是，一些专门设计的、具有长链结构和适度结合强度的聚合物或经过特殊处理的纳米材料，在特定研究中显示出良好的抗撕裂度潜力。以上说明，在提升撕裂度方面，效果相对更优的为能够强化纤维自身而不过度增加纤维间“刚性”的增强剂，例如 CNF、特定壳聚糖衍生物，其比强结合型聚合物和阳离子淀粉综合表现更好。

### 3.3 耐破强度

耐破强度表征纸张抵抗垂直于其表面均匀施加压力直至破裂的能力，对包装纸和纸板尤其关键。梁晏搏等<sup>[4]</sup>系统评估了 CNF 添加对纸张性能的影响，发现添加低至 1%~3% 的 CNF 即可显著提升耐破指数，增幅可达 30%~50% 甚至更高，将其归因于 CNF 形成的致密三维网络极大强化了纤维间结合和整体结构均一性。张新东等<sup>[5]</sup>研究发现阳离子聚丙烯酰胺（CPAM）和聚酰胺多胺-环氧氯丙烷树脂（PAE）能有效提高耐破度，PAE 树脂因其共价交联特性，在提升干湿耐破强度方面效果尤为突出，增幅通常在 20%~40% 范围。许晓光等<sup>[6]</sup>人发明了一种纳米黏土复合增强剂，这种特定改性纳米黏土与纤维结合良好吗，能提升 15% 左右的纸张的挺度（相对淀粉增强剂），但增幅低于高效聚合物和 CNF。一些研究还评估了生物基壳聚糖季铵盐对再生纸浆的增强效果，证实其能有效提升耐破强度，增幅约 15%~25%<sup>[7]</sup>。综合比较这些代表性研究，CNF 在同等或较低添加量下，展现出对耐破强度最为显著的提升幅度，其独特的纳米尺度强化和结构均一化作用使其在提升耐破强度方面具有最优异的性能表现。而聚合物类 PAE 树脂在兼顾干湿耐破强度的场景下也是强有力的选择。

### 3.4 耐折度

耐折度衡量纸张在反复折叠直至断裂时的耐久性，对钞票纸、地图纸、标签纸等需要频繁弯折的纸种至关重要。该性能的提升高度依赖于在增强纤维间结合力的同时，维持纸张纤维网络的柔韧性和弹性。一些研究发现，阳离子淀粉对耐折度的影响并不大，且过量添加可能导致纸张变脆，耐折度下降。但低添加量 CNF (<2%) 能通过强化纤维结合提升耐折度，但高添加量下形成的刚性网络会显著降低耐折性能。在聚合物类增强剂方面，PAE 因其形成的交联网络具有一定韧性，能有效提升干态耐折度，同比 CNF 高 5%~10%，是聚合物中效果较优者。此外，张琦等人<sup>[8]</sup>评估了生物基壳聚糖季铵盐对耐折度的贡献，发现其能提供 10% 左右的增强效果，同时保持良好的纸

张柔韧性。而阳离子化瓜尔胶,因其长链结构在增强结合的同时赋予更好的柔韧性,在特定研究中观察到耐折度提升可达25%~35%<sup>[9]</sup>。这说明,优化添加量的 CNF、具有良好韧性的特定聚合物以及部分长链结构的生物基增强剂展现出较好的综合效果,其中生物基的阳离子化瓜尔胶在耐折度提升幅度较大,可作为兼顾增强效果与柔韧性的优选方案之一。

#### 4 结语

结果表明,在纸张抗张强度与耐破强度方面,CNF 凭借其

纳米尺度渗透与三维网络强化作用,展现出最优异的提升幅度,而聚合物 PAE 树脂在兼顾干湿强度时亦表现突出。在撕裂度提升方面,优化 CNF 及特定生物基增强剂综合效果更佳。在耐折度方面,生物基阳离子瓜尔胶和低添加量 CNF 或韧性 PAE 表现优越。综合而言,CNF 在抗张、耐破等强度提升上最具潜力,而生物基增强剂在平衡撕裂度、耐折度及可持续性方面优势显著。实际应用需根据目标纸种强度需求、成本及环保要求,针对性选择工艺方法。

#### 参考文献:

- [1] 张燕,鲁传虎,沈晓飞,等.提升纸张强度的近期研究进展[J].纤维素科学与技术,2019,27(04):57-66.
- [2] 宋英琪,沈一丁,刘勇兵,等.低有机氯含量 PAE 基纸张湿强剂的制备及性能评价[J].化工进展,2022,41(10):5558-5566.
- [3] 田德良,修慧娟,梁晏搏.烘焙纸 PVA-MMT-CNF 复合涂层的构筑及其疏水防油性能研究[J/OL].陕西科技大学学报,1-8[2025-06-20].
- [4] 梁晏搏,修慧娟,温亚兵,等.CNF-CMC 梯度网络结构固定有机颜料对纸纱原纸着色效果的影响[J].陕西科技大学学报,2024,42(01):6-11.
- [5] 张新东,轩少云.高稳定性乙二醛化聚丙烯酰胺的合成及在纸张增强中的应用研究[J].造纸化学品,2023,35(01):13-17.
- [6] 许晓光,杨毓洁,刘杨,等.疏水改性纳米纤维素/聚乳酸复合材料改善纸张透湿性能的研究[J].包装工程,2025,46(09):19-26.
- [7] 王雯璐,景宜,包康.壳聚糖季铵盐基丙烯酸酯无氟防油剂的合成与防水防油纸的构建[J].精细化工,2025,42(05):1146-1160.
- [8] 张琦,景宜,包康,等.壳聚糖季铵盐交联酰胺共聚物的制备及应用[J].精细化工,2022,39(11):2355-2363.
- [9] 林亚辉,王玉珑,杨瑞,等.阳离子改性 PVA/瓜尔胶复合增强剂的制备及其应用性能研究[J].中华纸业,2025,46(01):26-30.