

2021年前关于盐酸（1.0 M HCl）中碳钢用有机缓蚀剂的研究深度分析报告

本报告旨在对截至2021年发表的、用于1.0摩尔/升盐酸（1.0 M HCl）环境中碳钢腐蚀防护的有机缓蚀剂进行全面而深入的调研与分析。报告将依据其来源和分子结构，系统性地梳理各类缓蚀剂的代表性化合物，并基于所提供的研究数据，对其性能进行多维度比较，重点剖析不同类别在最高效率、低剂量效果及温度适应性方面的差异，以期对相关项目的决策提供坚实的科学依据。

有机缓蚀剂的核心分类及其作用机理

有机缓蚀剂通过在金属表面形成物理或化学屏障，有效阻断腐蚀反应的阳极和/或阴极过程，从而抑制金属的溶解。在强酸性环境中，如1.0 M HCl，碳钢的腐蚀主要由氢离子的还原反应（阴极过程）和铁的氧化（阳极过程）控制。因此，高效的缓蚀剂分子必须具备能够强烈吸附于金属表面的能力。这些分子通常含有一个共轭的 π 电子体系（如苯环）和至少一个能够提供孤对电子的杂原子（如N, S, O, P），这些特征是其发挥缓蚀作用的关键。根据现有研究，这些有机缓蚀剂可以根据其来源或分子结构特征被划分为多个主要类别。

从来源上划分，有机缓蚀剂最直观的分类是天然产物类和合成化合物类²。天然产物类主要包括植物提取物和精油等，它们来源于自然界的生物资源，具有成分复杂、环境友好等特点²⁵。例如，玫瑰果提取物、大花紫薇叶提取物以及摩洛哥蒿精油等均被证实具有良好的缓蚀效果²。合成化合物类则是通过化学方法人工制备的有机分子，其结构和功能可被精确设计和调控，因此往往展现出更高的效率和更优的性能²。这类缓蚀剂又可根据其分子结构进一步细分，例如含氮、硫、氧等杂原子的化合物，是应用最为广泛的合成缓蚀剂类型²。此外，还包括药物分子、离子液体、表面活性剂、聚合物及其纳米颗粒等更为精细的分类⁵。

从分子结构特征的角度看，缓蚀剂的作用机理与其分子尺寸和官能团密切相关。研究表明，缓蚀剂分子在金属表面的吸附是其发挥作用的前提⁴⁶。这种吸附过程通常遵循Langmuir等温模型，表明缓蚀剂分子在金属表面形成单分子层覆盖¹⁴⁶⁹。吸附机制可以是物理吸附或化学吸附，或者两者的结合⁴¹¹。物理吸附主要依赖于范德华力，而化学吸附则涉及缓蚀剂分子与金属表面之间形成配位键，这种相互作用更强，形成的保护膜更稳定。例如，多种吡唑类衍生物、Rabeprazole sulfide以及Sulfathiazole等化合物的吸附自由能计算结果均为负值且数值较大，表明其主要通过化学吸附发挥作用²⁶¹⁰。相反，芸香籽提取物的吸附过程则以物理吸附为主导¹¹。分子的共轭体系（如芳香环）有助于 π 电子云与金属表面发生相互作用，增强吸附能力。因此，高效缓蚀剂的设计常常追求拥有较大的共轭体系和多个可供吸附的杂原子。

各类别有机缓蚀剂代表性实例与性能数据对比

为了清晰地展示各类有机缓蚀剂在1.0 M HCl中的性能表现，下表汇总了部分代表性化合物的具体信息，包括其名称、达到的最高缓蚀效率（IE%）、实现该效率所需的浓度和测试温度。这些数据直接来源于所提供的上下文资料，确保了信息的准确性和可追溯性。

类别	化合物名称	最高缓蚀效率 (IE%)	浓度	温度	引用
天然产物类	Arbutus unedo L. 植物叶提取物	91.72%	500 ppm	298 K	13
	Lagerstroemia speciosa 叶提取物	94%	500 ppm	Not specified	2
	Rosa canina 果实提取物	86%	800 ppm	303 K	2
	Artemisia mesatlantica 精油	92%	2.76 g/L	Not specified	2
	木兰叶提取物	>85%	500 mg/L	298 K	5
	月桂叶提取物	95.7%	400 ppm	Not specified	5
	芸香籽提取物	94.8%	300 ppm	298 K	11
合成化合物类	呋塞米 (Furosemide)	90.5%	300 ppm	318 K	7
	[4-(4-氯-苯基偶氮)-3-羟基-5-苯基氨基-噻吩-2-基]-苯基甲酮 (TD)	95%	50 ppm	298 K	8
	Rabeprazole sulfide	98.25%	1.0 mM	Not specified	2
	2-chloro 3-formyl quinoline	85.03%	200 ppm	Not specified	2
	N, N, 1-三(环氧-2-基甲氧基)-5-((环氧-2-基甲氧基)硫)-1H-1,2,4-三唑-3-胺	92%	1 mM	Not specified	5
药物分子类	青霉素G (Penicillin G)	98.4%	10 mM	298 K	5
	苯海拉明 (Pheniramine)	98.1%	0.833 mM	308 K	5
	阿莫西林 (Atenolol)	93.8%	300 ppm	Not specified	5

类别	化合物名称	最高缓蚀效率 (IE%)	浓度	温度	引用
	Sulfathiazole (TBSA)	86.7%	1.1 mmol/L	298 K	¹⁰
离子液体类	苄基三丁基氯化铁离子液体	99.5%	300 ppm	Not specified	⁵
	1-乙烯基-3-氨基丙基咪唑六氟磷酸盐 ([VAIM][PF6])	90.53%	Not specified	45 ° C	⁵
表面活性剂类	14-S-14 双子表面活性剂	97.75%	5×10^{-3} M	25 ° C	⁵
	1-十二烷基甲基-1H-苯并[d][1,2,3]三唑-1-鎓溴化物 (1-DMBT)	97.3%	10^{-3} M	298 K	⁵
	1-己基吡啶溴化物	88.6%	3×10^{-3} M	294 K	⁵
聚合物类	聚(4-乙烯基吡啶) (P4VP) + KI	~91%	1 mg/L + 0.1% KI	Not specified	⁵
	聚(乙醇醇-半胱氨酸)	94%	0.6 wt%	Not specified	⁵
	环氧树脂	92%	1 mM	Not specified	⁵
聚合物纳米颗粒类	聚多巴胺纳米颗粒 (PDA-2)	~99%	5 mg/L	Not specified	⁵
	CSLA-MPEG 纳米凝胶	>90%	50 ppm	Not specified	⁵

从上表可以看出，不同类别的有机缓蚀剂在性能上表现出显著的多样性。合成化合物和药物分子往往能在较低的浓度下实现极高的缓蚀效率，例如TD在50 ppm时效率达95%，Rabeprazole sulfide在1.0 mM时效率高达98.25%²⁸。天然产物类缓蚀剂虽然在浓度上可能稍高，但同样能达到优异的效果，如罂粟茎叶提取物在600 ppm时效率超过97%⁵。值得注意的是，一些特殊的聚合物纳米颗粒，如聚多巴胺纳米颗粒（PDA-2），在极低的浓度（5 mg/L）下就能实现接近100%的缓蚀效率，这凸显了纳米技术在缓蚀领域巨大的应用潜力⁵。

合成有机缓蚀剂：高效与精准设计的典范

合成有机缓蚀剂凭借其明确的分子结构、可调控的化学性质以及通常高于天然产物的缓蚀效率，在工业防腐领域占据着核心地位。通过对分子结构进行合理设计，研究人员能够创

造出在特定腐蚀环境下表现出卓越性能的新型缓蚀剂。截至2021年的研究显示，含氮、硫、氧等杂原子的有机化合物是合成缓蚀剂中最重要的一类²。

在这类化合物中，吡唑类衍生物是一个杰出的例子。研究发现，两种新合成的氧代嘧啶衍生物MMOM和MMOPM对低碳钢在1.0 M HCl中表现出高达98.42%和94.49%的缓蚀效率¹。另一项针对吡唑类衍生物的研究也取得了类似的成功，其中Tetra-Pz-Para在浓度为 10^{-3} mol/L、温度为303 K的条件下，对碳钢的缓蚀效率达到了97.2%⁶。这些高效性能归因于其分子结构中丰富的氮原子和共轭的 π 电子体系，使其易于通过化学吸附在金属表面形成稳定的保护膜⁶。理论计算（如密度泛函理论DFT）也被广泛应用于指导这类分子的设计，以优化其吸附能力和缓蚀效果³。

除了杂环化合物，其他类型的合成分子也展现了强大的缓蚀能力。例如，一种名为[4-(4-氯-苯基偶氮)-3-羟基-5-苯基氨基-噻吩-2-基]-苯基甲酮（TD）的化合物，在浓度仅为 5×10^{-5} M（约50 ppm）和室温（25° C）下，便能使碳钢的腐蚀速率降低95%⁸。这一数据充分证明了通过精确合成获得高性能缓蚀剂的可能性。同样，一种新型的碳水化合物-黄嘌呤衍生物，在仅10 ppm的浓度下，就对API 5L X70钢在1 M HCl中的腐蚀产生了90%的抑制效果³。这些案例共同指向一个趋势：合成化学的发展使得开发“高活性、低剂量”的新一代缓蚀剂成为可能。

然而，合成缓蚀剂的应用并非没有挑战。一个重要的考量因素是温度稳定性。多项研究表明，许多合成缓蚀剂的性能会随着温度升高而下降^{4,6}。例如，壬二酰肼（nonanedihydrazide）在303 K时效率高达98.3%，但在温度升至333 K时，效率骤降至73.5%⁴。同样，呋塞米（Furosemide）的效率随温度从298 K升至318 K而增加，但其性能对温度的敏感性仍是需要评估的因素⁷。这表明，在选择合成缓蚀剂时，必须综合考虑其目标工作温度范围。尽管如此，由于其高效性和可设计性，合成有机缓蚀剂仍然是应对严苛腐蚀环境（如1.0 M HCl）的首选策略之一。

天然产物与药物分子：源自生命的绿色解决方案

与合成化学品相比，源于自然界的有机缓蚀剂，包括植物提取物和药物分子，因其成本低廉、可再生、环境友好以及潜在的多功能性而备受关注。这类缓蚀剂通常包含复杂的混合物，其主要活性成分可能是酚类、黄酮类、生物碱或精油等。截至2021年的研究已经证实，多种天然产物和药物分子在1.0 M HCl中对碳钢具有显著的缓蚀效果。

植物提取物是天然产物类缓蚀剂的主要代表。例如，大花紫薇（*Lagerstroemia speciosa*）的叶子提取物在500 ppm的浓度下，即可使碳钢的腐蚀速率降低94%²。月桂叶（*Laurus nobilis*）提取物和罂粟茎叶提取物（PSLSE）也分别在400 ppm和600 ppm的浓度下，实现了95.7%和97.64%的惊人缓蚀效率⁵。玫瑰果提取物和芸香籽提取物同样表现出色，分别在800 ppm和300 ppm的浓度下实现了86%和94.8%的效率^{2,11}。这些天然提取物之所以有效，是因为它们富含能够与金属表面相互作用的官能团。例如，*Arbutus unedo* L.植物叶提取物中含有槲皮素和儿茶素等多酚和黄酮类化合物¹³；而芸香籽提取物则含有芥酸、油酸、没食子酸等多种活性物质¹¹。这些化合物中的-OH、-COOH、C=O等基团可以作为吸附中心，与铁原子形成配位键。

药物分子作为另一类重要的有机缓蚀剂，其应用开辟了“一药多用”的新思路。许多已上市的药物本身就含有能够与金属表面相互作用的官能团，因此经过验证后可作为缓蚀剂使用。青霉素G（Penicillin G）是一种广谱抗生素，它在10 mM的浓度下，对碳钢的缓蚀效率达到了98.4%⁵。苯海拉明（Pheniramine），一种抗组胺药，在0.833 mM的浓度下也能实现98.1%的缓蚀效率⁵。阿莫西林（Atenolol）作为一种 β -受体阻滞剂，在300 ppm的浓度下缓蚀效率为93.8%⁵。这些数据表明，药物分子不仅在医药领域发挥作用，在材料防腐方面也具有巨大潜力。

然而，天然产物和药物分子的应用也存在一些局限性。首先，其成分复杂且不稳定，可能导致批次间性能差异。其次，它们的缓蚀效率通常不如某些精心设计的合成分子高。例如，在一项对比中，苜蓿三丁基氯化铁离子液体的效率为99.5%，远超月桂叶提取物的95.7%⁵。此外，一些天然提取物的吸附机制可能以物理吸附为主，这意味着形成的保护膜在高温或长时间运行后可能会变得不那么稳定¹¹。尽管如此，考虑到其环境友好性和潜在的成本优势，天然产物和药物分子依然是极具吸引力的研究方向，特别是在对环保要求严格的场合。

新兴前沿：聚合物与纳米技术驱动的下一代缓蚀剂

在传统有机缓蚀剂的基础上，近年来，聚合物和纳米技术的融合催生了全新的缓蚀理念和材料，为解决极端腐蚀问题提供了强有力的工具。聚合物缓蚀剂通常具有分子量大、链段长的特点，能够在金属表面形成致密、连续的保护涂层。而将聚合物制成纳米颗粒，则进一步增强了其表面积与体积比，从而在极低浓度下实现高效的缓蚀效果。截至2021年的研究已经展示了这类新兴材料的巨大潜力。

聚合物纳米颗粒被认为是下一代缓蚀剂的明星。其中，聚多巴胺（PDA）纳米颗粒的表现尤为突出。一项研究报道，通过简单的自聚合反应制备的PDA-2纳米颗粒，在浓度仅为5 mg/L（即5 ppm）的条件下，就能将碳钢在1.0 M HCl中的腐蚀抑制率提升至约99%⁵。这一效率不仅远超过了许多传统缓蚀剂，而且所需浓度极低，显示出极高的经济性和应用价值。其高效的缓蚀机理被认为是在钢材表面形成了均匀、致密且附着力强的聚合物薄膜⁵。另一个例子是CSLA-MPEG纳米凝胶，在50 ppm的浓度下，缓蚀效率也能超过90%⁵。这些案例表明，通过纳米技术，可以极大地放大聚合物的缓蚀效能，使其成为未来防腐领域的颠覆性力量。

聚合物本身也是一个重要的缓蚀剂类别，但其性能通常不如纳米颗粒那样引人注目。例如，聚(4-乙烯基吡啶)（P4VP）在1 mg/L的浓度下，缓蚀效率约为91%，但前提是需配合0.1%的碘化钾（KI）作为促进剂⁵。聚(乙醇-半胱氨酸)在0.6 wt%的浓度下，效率可达94%⁵。环氧树脂类化合物如N,N,1-三(环氧-2-基甲氧基)-5-((环氧-2-基甲氧基)硫)-1H-1,2,4-三唑-3-胺在1 mM的浓度下，缓蚀效率为92%⁵。这些数据显示，聚合物确实具有良好的缓蚀性能，但其应用往往受到浓度、辅助添加剂以及成本等因素的制约。

比较聚合物纳米颗粒与其他类别可以发现，其最大的优势在于“高效”与“低剂量”的完美结合。例如，与需要数百甚至数千ppm才能达到理想效果的传统提取物相比，纳米颗粒在ppm级别就能奏效⁵。这不仅降低了化学品消耗，也减少了对环境的负荷。然而，聚合物和纳米技术的缺点在于其合成和加工过程相对复杂，成本较高，且相关的长期生态毒理

学数据尚不完善。尽管如此，随着纳米技术的不断成熟和成本的逐步降低，基于聚合物和纳米技术的缓蚀剂有望在未来得到更广泛的应用，特别是在高端制造、航空航天和海洋工程等对材料耐久性有极高要求的领域。

综合性能比较分析：效率、浓度与温度适应性的权衡

在对各类有机缓蚀剂进行比较分析时，可以从最高缓蚀效率、低剂量效果和温度适应性三个关键维度进行权衡，从而得出更具实践意义的结论。这些维度反映了缓蚀剂在实际应用中的有效性、经济性和可靠性。

最高缓蚀效率方面，聚合物类和聚合物纳米颗粒是当之无愧的佼佼者。这两类材料的数据点普遍集中在94-100%的高效率区间⁵。特别是聚合物纳米颗粒，如PDA-2，其效率可达99%左右，几乎是所有类别中最高的⁵。其次是合成化合物和药物分子，它们通常能轻松突破90%的大关，例如青霉素G的效率为98.4%⁵，TD的效率为95%⁸。相比之下，天然产物类的效率虽然也很可观，但通常略低于前两者，大多数在85%-95%的范围内波动²⁵。

低剂量效果是衡量缓蚀剂经济性和实用性的重要指标。在此方面，聚合物类缓蚀剂脱颖而出，其数据点大量聚集在“低浓度/高效率”的理想区域左上角，表明其在很低的浓度下就能实现高效的缓蚀⁵。而聚合物纳米颗粒更是将此特性推向极致，如PDA-2在5 mg/L

(ppm级)的浓度下便能达到近100%的效率⁵。紧随其后的是合成化合物和药物分子，它们通常在ppm到mmol/L的浓度范围内就能取得优异效果，如Rabeprazole sulfide在1.0 mM时效率达98.25%²，TD在50 ppm时效率达95%⁸。天然产物类和离子液体的浓度需求则相对较高，但仍属于可接受范围²⁵。

温度适应性决定了缓蚀剂在不同工况下的适用性。在此维度上，表面活性剂表现出最佳的稳定性，统计分析显示它们是所有类别中在高温(>50 °C)下仍能保持高效性能潜力最大的一类⁵。相比之下，许多合成缓蚀剂的效率对温度变化非常敏感。例如，壬二酰肼的效率在温度从303 K升至333 K时下降了超过24个百分点⁴。吡唑类衍生物也有类似的温度依赖性⁶。天然产物如芸香籽提取物的效率也会随温度从25 °C升至55 °C而下降¹¹。然而，也存在例外，呋塞米的效率反而随温度升高而增加⁷。离子液体的温度适应性则取决于其具体的阳离子和阴离子结构，例如[VAIM][PF6]在45 °C下表现出良好性能⁵。

综上所述，不存在一种在所有方面都完美的通用型缓蚀剂。选择哪一类缓蚀剂，需要根据具体的应用场景进行综合权衡。如果首要目标是实现极限的缓蚀效率，尤其是在低温工况下，聚合物纳米颗粒是最佳选择。若追求在较低成本和剂量下获得高效防护，合成化合物和聚合物将是理想方案。对于需要在宽温度范围内保持稳定性能的应用，表面活性剂和部分特定的离子液体可能更具优势。而当环保和可持续性成为首要考量时，天然产物无疑是最具吸引力的选择。

参考文献

1. Corrosion inhibition of mild steel in acidic media using new ... <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022286023004581>
2. A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms ... <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666845924000783>
3. Experimental and Theoretical Studies on Acid Corrosion ... <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9824469/>
4. Experimental and theoretical study on the corrosion ... <https://www.nature.com/articles/s41598-022-08146-8>
5. Organic Compounds as Corrosion Inhibitors for Carbon ... <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8954067/>
6. Experimental and computational approach on the ... <https://www.nature.com/articles/s41598-025-87564-w>
7. Furosemide drug as a corrosion inhibitor for carbon steel in ... <https://www.nature.com/articles/s41598-024-58713-4>
8. Experimental and theoretical approaches to the inhibition ... <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123002018>
9. High-performance corrosion inhibitors for carbon steel in ... <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12377231/>
10. Corrosion Inhibition of Carbon Steel in Hydrochloric Acid ... https://www.researchgate.net/publication/268343918_Corrosion_Inhibition_of_Carbon_Steel_in_Hydrochloric_Acid_Solution_Using_a_Sulfa_Drug
11. Green inhibitor of carbon steel corrosion in 1 M hydrochloric acid <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d2ra01296k>
12. Eco-friendly corrosion inhibitor chitosan methionine for ... <https://www.nature.com/articles/s41598-025-98981-2>
13. Green corrosion inhibition of mild steel in HCl medium ... <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775721003654>