
强场激光表面钝化使不锈钢腐蚀速率下降4-5个数量级

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37403.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

强场激光表面钝化使不锈钢腐蚀速率下降4-5个数量级。 导读

近期，吉林大学徐淮良教授团队与合作者提出了一种强场激光表面金属抗腐蚀钝化策略，使不锈钢在酸、碱、盐等极端环境中的腐蚀速率下降了4-5个数量级，并维持超6500小时以上不变，实现了年均低至亚纳米的抗腐蚀不锈钢表面。该技术无需化学涂层和复杂加工后处理，为金属防腐提供了一种全新的技术路线，在航空航天、海洋工程等金属防腐领域具有广泛应用前景。

该成果以Significant reduction of corrosion of stainless steel by strong-field laser surface passivation为题发表在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》。

研究背景

不锈钢是一种重要的防腐金属材料，在建筑、化工、能源等领域被广泛应用。然而，在海洋、酸雨、工业排放等侵蚀性环境中，不锈钢在Cl⁻离子等的持续侵蚀下会发生钝化膜局部破裂，引发点蚀、缝隙腐蚀甚至穿孔失效等，进而引起不锈钢表面全面腐蚀。尽管人们经过数十年的努力，不断优化不锈钢组分和晶体结构，不锈钢的年均腐蚀速率仍达数十微米量级，严重威胁设备长期稳定运行，并给世界经济造成了巨大损失。为克服上述问题，人们发展了各种表面喷涂或电化学处理方法，这些方法虽然在一定程度上有效提升了不锈钢的抗腐蚀性能，但往往存在耐久性不足、涂层易剥落或环境适应性差等局限性。因此，发展无需附加涂层、结构稳定、适用于复杂环境的不锈钢防腐新技术，已成为金属材料防腐领域的研究热点。

近年来，人们发现利用激光加工技术调控不锈钢表面形貌结构，也可以提升不锈钢抗腐蚀性能。由于激光制备的不锈钢表面具有优异的稳定性和环境适应性，该技术引起了人们的广泛关注。然而，直到目前为止，通过传统激光加工技术制备的不锈钢的腐蚀速率仅能降低1-2个数量级；特别是传统激光加工技术需依赖近场聚焦，对样品的平整度有严格要求，难以胜任复杂构型和大幅面不锈钢金属部件的制备，限制了该技术在金属材料防腐领域的进一步应用。

研究亮点

本文提出了一种全新的强场激光表面钝化策略，在无需任何化学修饰的前提下，仅通过一步激光处理，即可在不锈钢表面同时构建出复合微纳结构、超疏水空气层与钝化层三位一体的多功能抗腐蚀屏障。该技术利用飞秒激光在介质中传输过程中的非线性成丝特性，在空气中形成了一个激

光强度达50-100 TW/cm²数量级的狭长、内部强度钳制的等离子体通道。此强激光通道（也称为光丝）长度可控，可从数厘米延长至数米，因此有效加工长度远超瑞利长度；同时该通道还具有较大的光斑尺寸。相比传统激光的紧聚焦加工方式，光丝强场加工对样品表面形貌不敏感，能够在远距离对复杂曲面结构进行快速大幅面非接触式加工，极大拓展了激光微纳结构加工的适应性和空间自由度。

该工作利用强场激光光丝对不锈钢表面进行表面形貌和成分调控以及低温加热处理，在盐（3.5 wt.% NaCl）、酸（pH=2, HCl）和碱（pH=12, NaOH）三种典型腐蚀溶液环境中，实现了高达4-5个数量级的不锈钢腐蚀性能提升，腐蚀速率年均最低至亚纳米（图1a），该腐蚀性能稳定维持超过6500小时（测量时间范围内）以上，且经多次电化学循环测试后，抗腐蚀效果依然保持不变（图1b）。此外，加工表面还具备良好的机械稳定性。

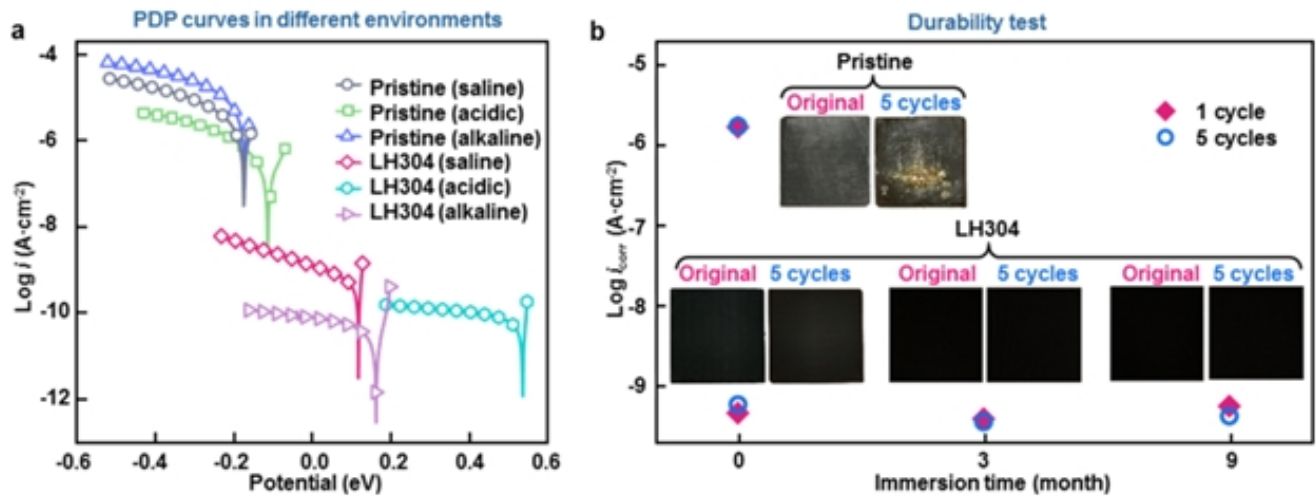


图1. (a) 未加工(Pristine)和加工后(LH304)的不锈钢304在盐、酸和碱溶液中的阴极极化曲线；(b) 3.5 wt. % NaCl水溶液中浸泡直至9个月 (>6500 h)的未加工和加工后不锈钢304在第一次(original)和第五次(5 cycles)极化曲线测量所得到的腐蚀电流密度和测量后的样品表面腐蚀形貌照片。

微观结构分析表明，该超强防腐能力主要源于芋头叶状超疏水微纳仿生结构（图2）与富Cr的微米量级厚度的Cr₂O₃/ Fe₂O₃/ Fe₃O₄复合钝化层（图3）的协同作用。前者可构建起一层物理隔离屏障，防止金属表面暴露于腐蚀性溶液中，减少金属表面点蚀的发生，后者则提升了表面电化学稳定性，降低了表面的电化学反应速率。实验表明，该策略在多种不同类型工程不锈钢材料上表现出极好的普适性，经强场激光表面钝化处理的304、316、420、201、430、2205等不锈钢材料均获得了相近的抗腐蚀性能提升。

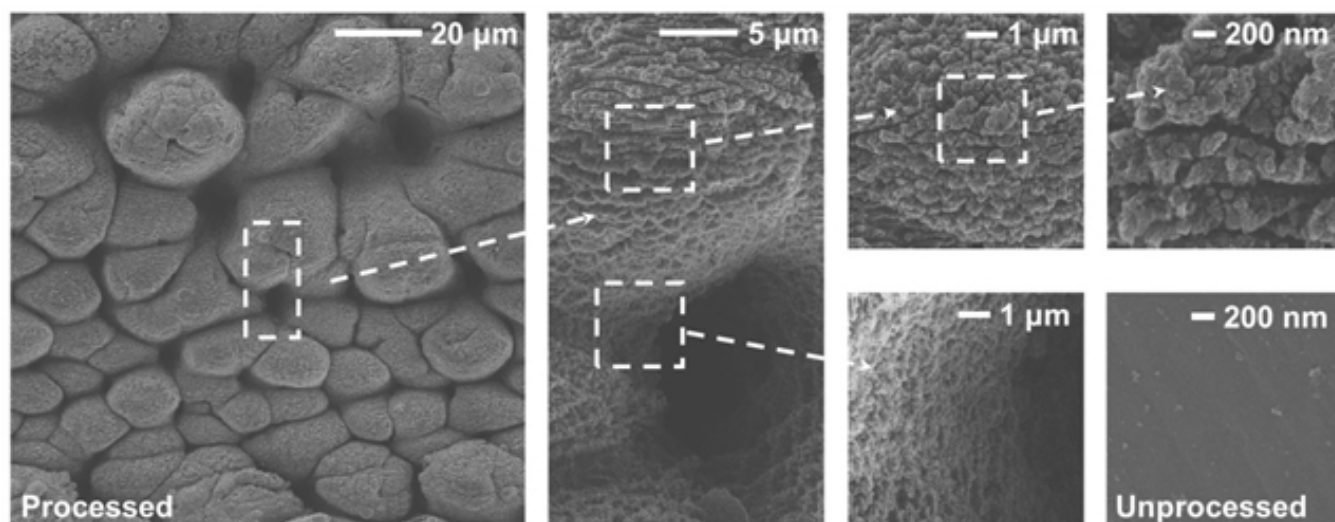


图2. 不锈钢304在加工后不同放大倍数下的表面微纳结构氮离子显微镜图片。

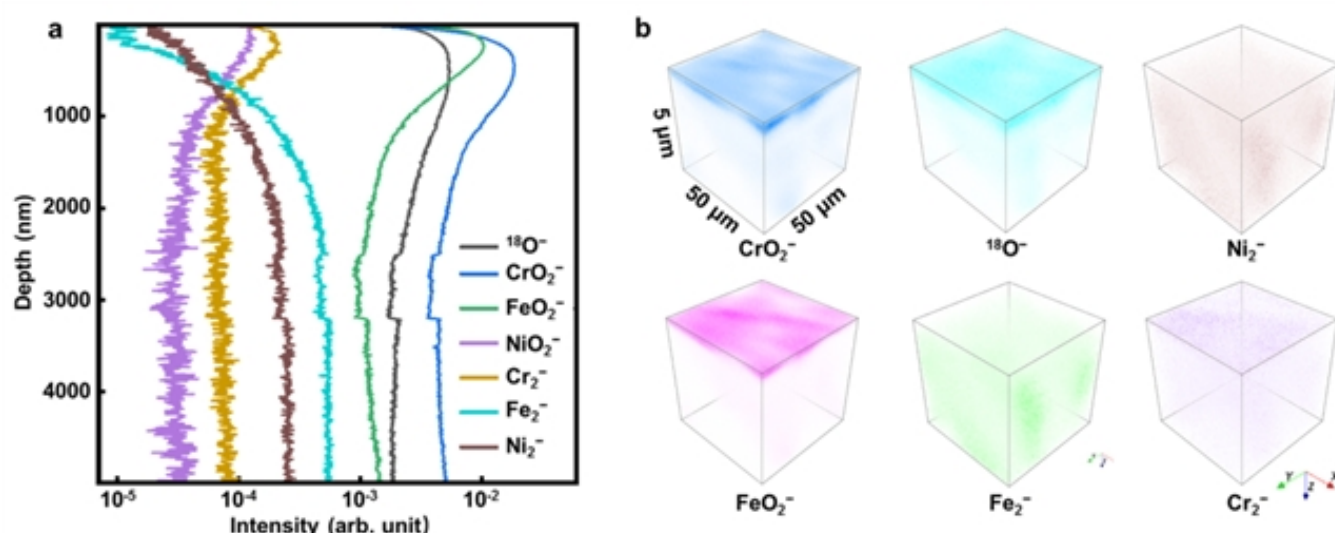


图3. 加工后样品表面的 (a) 飞行时间二次离子质谱和 (b) 元素空间分布。

总结与展望

本研究提出了一种一步成形的强场激光钝化不锈钢表面加工策略，成数量级地提升了不锈钢在酸、碱、盐等腐蚀环境下的抗腐蚀性能，并展现出适用于多种不锈钢防腐性能的高普适性特点。不同于传统激光微纳加工对聚焦条件和样品表面形貌的严格要求，强场激光光丝依赖非线性传输形成远程高强度通道，具有远超瑞利长度的加工深宽比。因此，该技术可在无需紧聚焦的情况下进行快速、大幅面表面处理，显著提升了工程应用中的加工效率与可扩展性，为在不规则金属表面构筑功能结构提供了新的解决思路。未来，该技术有望拓展至更多金属体系如Ti合金、铝和铜等，在海洋工程、航空航天、能源装备等对腐蚀防护有较高要求的领域中发挥重要作用。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01952-5>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：徐淮良等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发