

# 食品级不锈钢表面微弧氧化处理对耐磨与抗菌性能的影响

侯长安

金华市喜加达智能设备有限公司 浙江 金华 321000

**【摘要】**：食品级不锈钢因优异的耐蚀性与安全性，广泛用于食品加工设备，但其表面性能直接关乎食品安全与设备寿命。微弧氧化技术能在金属表面原位生成致密、结合牢固的陶瓷膜，显著提升表面性能。本研究通过理论分析，系统探讨了微弧氧化原理及工艺参数对氧化膜结构的调控机制，重点分析了其对耐磨与抗菌性能的影响规律。研究表明，微弧氧化通过调控氧化膜的厚度、致密性、物相组成及粗糙度，可显著增强食品级不锈钢的耐磨与抗菌能力。合理匹配工艺参数，不仅能实现耐磨与抗菌性能的协同优化，还能兼顾耐腐蚀性与生物安全性，满足严苛的食品加工需求。本研究提出的工艺优化思路，揭示了氧化膜结构与性能间的内在关联，为该技术产业化应用提供了理论支撑，对推动食品加工设备升级、保障食品安全具有重要意义。

**【关键词】**：食品级不锈钢；微弧氧化；表面改性；耐磨性能；抗菌性能；氧化膜；工艺优化

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.017

## 引言

在机电装备与食品加工融合背景下，食品级不锈钢作为搅拌机核心部件关键材料，面临高湿度等严苛环境。设备运行摩擦磨损易产生金属碎屑污染食品，细菌滋生会导致食品腐败并增加维护成本。因此，提升其表面耐磨与抗菌性能是行业关键课题。

现有电镀等技术存在局限性，微弧氧化技术作为绿色表面改性手段，能在不锈钢表面原位生成致密、结合牢固的陶瓷氧化膜，环保无污染，且氧化膜兼具高耐磨等性能，契合食品级材料改性需求。

然而，当前食品级不锈钢微弧氧化研究不足，多局限于工艺参数验证，缺乏系统理论分析和对特殊环境下性能演变规律的深入探讨，制约了产业化应用。在确保生物安全前提下，通过工艺调控实现耐磨与抗菌性能协同优化是关键问题。

基于此，本研究聚焦食品级不锈钢微弧氧化处理，探讨反应机制及工艺参数对膜层结构的调控规律，分析其对耐磨与抗菌性能的影响机制，构建“结构 - 性能”关联逻辑。研究旨在提出适配食品场景的工艺优化策略，为技术产业化提供理论支撑，推动食品加工设备升级。

## 1 食品级不锈钢的特性及表面改性需求

### 1.1 食品级不锈钢的核心特性

食品级不锈钢专为食品加工、储存及接触场景设计，要求无毒无味、耐蚀性强、机械与加工性能优良。应用最广的奥氏体不锈钢，因铬、镍等合金元素合理配比，有优异综合性能。耐腐蚀性是首要特性，靠表面致密铬氧化膜隔绝介质、防金属离子溶出。但天然膜在长期摩擦、碰撞及清洗消毒中易受损致耐蚀性下降。机械性能上，材料需有足够强度、硬度与韧性，满足加工工艺要求，且要符合国家食品安全标准，保障食品卫生安全。

### 1.2 食品级不锈钢的表面改性核心需求

针对食品加工环境，表面改性聚焦耐磨、抗菌、耐蚀及生物安全四大核心，耐磨与抗菌尤为关键。

提升耐磨性能可延长设备寿命。运行中的摩擦易致表面损伤、破坏氧化膜、加剧腐蚀，金属碎屑还会混入食品。因此，需通过改性提高表面硬度与耐磨性。

提升抗菌性能是保障食品安全的核心。设备表面残渣与水分离易滋生微生物，导致食品变质、产生毒素，代谢酸性物质会加速腐蚀。改性需赋予材料抑制微生物附着与滋生的能力。

同时，改性要兼顾耐腐蚀性与生物安全性。改性层需抵御介质侵蚀、防止脱落溶出，且不引入有毒物质，确保生物相容性。微弧氧化技术是满足食品级不锈钢改性需求的理想方案。

## 2 微弧氧化的基本原理与工艺特性

### 2.1 微弧氧化的核心反应原理

微弧氧化（微等离子体氧化）是利用高压脉冲电源在电解质溶液中引发微弧放电，使金属表面原位生成致密陶瓷膜的技术。其反应过程包含三个阶段：首先是阳极氧化阶段，不锈钢作为阳极在电场作用下形成初步的疏松氧化膜；随后进入核心的微弧放电阶段，当电压击穿氧化膜薄弱处时，产生高温高压的微等离子体区域，使基体金属熔融、氧化并与电解液离子反应，经熔融烧结形成致密结构；最后是陶瓷膜形成阶段，随着膜层增厚绝缘性提升，放电减弱，表面持续烧结稳定，最终形成与基体结合牢固、兼具高硬度、耐磨、耐蚀及生物相容性的陶瓷氧化膜。

### 2.2 微弧氧化的工艺参数及特性

工艺参数直接决定氧化膜的结构与性能。电解质溶液需绿色环保，常用含硅酸盐、磷酸盐的碱性溶液，其浓度直接影响膜的物相与致密性，过低导致生长缓慢，过高则引发剧烈放电致裂纹。脉冲电压是反应驱动力，需适中以确保稳定放电，过低无法成膜，过高则导致烧蚀损伤基体。脉冲频率影响放电均

匀性，频率不当会导致膜层不均或过热开裂；处理时间控制膜厚，过短效果不足，过长则内应力大易裂且成本增加。

微弧氧化技术优势显著：无需复杂前后处理，高效环保且电解液可循环；生成的陶瓷膜结合力强、不易脱落，无毒无味符合食品级安全标准；更重要的是，通过精准调控上述参数，可定制化优化氧化膜的耐磨与抗菌性能，完美适配食品加工设备的严苛需求。

### 3 微弧氧化膜的结构特征及调控机制

#### 3.1 微弧氧化膜的微观结构与物相组成

微弧氧化膜性能取决于微观结构，包括表面形貌、截面结构与物相组成。表面形貌是不均匀多孔结构，由放电通道形成与闭合导致。合理工艺参数可调控孔隙尺寸与分布，适度孔隙能提升抗菌性且不损害致密性与耐磨性，孔隙不适宜会影响耐腐蚀耐磨或抗菌功能。截面结构分三层：内层为致密结合层，确保膜基结合牢固并传递载荷；中层是主体层，厚度最大且结构致密，决定耐磨与抗菌性能；外层是疏松多孔层，用于负载抗菌剂。物相组成主要是金属氧化物。奥氏体不锈钢氧化膜含三氧化二铬、二氧化硅和磷酸钙。调整电解液成分与工艺可改变物相比例，实现性能定制化。

#### 3.2 工艺参数对氧化膜结构的调控机制

工艺参数通过影响放电强度、频率及反应进程调控膜层结构。电解质溶液决定物相与孔隙，添加不同成分有不同效果，浓度不当会影响膜层生长与结构。脉冲电压控制厚度与致密性，适宜电压使膜层均匀致密，电压不适宜会导致膜层问题。脉冲频率影响均匀性与孔隙分布，适宜频率可兼顾致密性与功能性孔隙。处理时间决定厚度与完整性，时间不当会使膜层出现缺陷或改变物相。因此，需综合调控参数，确保氧化膜结构完整、性能优异，满足食品级应用需求。

## 4 微弧氧化处理对食品级不锈钢表面性能的影响机制与规律

微弧氧化技术原位生成陶瓷膜，显著提升食品级不锈钢耐磨与抗菌性能，两者受工艺参数协同调控，需遵循生物安全性原则。

#### 4.1 性能提升的协同作用机制

耐磨与抗菌性能提升依赖“硬度 - 致密性 - 功能性”协同机制。耐磨性方面，微弧氧化生成高硬度物相形成致密晶体抵抗摩擦，适度粗糙度降低磨损速率，强结合膜层防止磨粒侵入与膜层剥落；抗菌性方面，构建“物理阻隔 + 化学杀菌 + 结构调控”三重防线，致密膜层隔绝微生物，固有物相及负载离子杀菌，表面孔隙载药并减少细菌附着。两者存在关联，需通过参数调控平衡。

#### 4.2 关键工艺参数的影响规律

工艺参数改变膜层结构与物相组成，对两项性能有显著规律影响：电解质溶液是基础，添加硅酸盐提升耐磨，引入银、锌离子抗菌，磷酸盐利于生物相容性但硬度低，浓度需适中；脉冲电压呈“先升后降”趋势，适宜电压下性能佳，过高或过低均导致性能下降；脉冲频率需匹配电压，过低易附菌，过高无法载药，处理时间呈“先升后稳再降”规律，时间不当会使性能下降。

#### 4.3 生物安全性约束下的参数优化策略

追求高性能时，生物安全性是参数优化首要条件。一是控制物质溶出，抗菌剂负载量在安全阈值内，电解液不含重金属或有毒添加剂；二是保障结构完整性，避免膜层裂纹与脱落；三是平衡表面清洁性，在粗糙度与防残渣附着间找平衡点。在安全框架下匹配参数，可实现耐磨、抗菌与实用性统一。

## 5 食品级不锈钢微弧氧化工艺优化策略

#### 5.1 工艺优化的核心原则

工艺优化需遵循三大核心原则：一是协同优化原则，平衡耐磨与抗菌需求。例如，适度粗糙度利于耐磨但可能增加细菌附着，过多孔隙利于载药却降低致密性，需通过参数调控寻找最佳平衡点。二是生物安全性原则，这是食品级应用的首要红线。必须选用无毒环保电解液，严格控制银、锌等抗菌离子的溶出量，并确保膜层无裂纹脱落风险，防止碎片污染食品，符合国家安全标准。三是经济性原则，在提升性能的同时降低能耗与成本。优选可循环电解液，简化工艺流程，避免过高电压或过长耗时，确保技术易于产业化推广并适配各类设备。

#### 5.2 具体工艺优化思路

基于上述原则，提出以下三点具体优化策略：

第一，构建“耐磨 - 抗菌”协同的电解质体系。

优先选用碱性硅酸盐基电解液，利用硅酸盐生成高硬度二氧化硅以提升耐磨性；同时微量添加无毒的银离子或锌离子作为抗菌剂，严格把控添加量以防过量溶出。溶液浓度应控制在中等范围，既保证成膜速率与结构完整性，又避免因浓度波动导致的疏松或裂纹缺陷，从源头实现性能与安全的双重保障。

第二，实施电压与频率的动态匹配调控。

脉冲电压与频率需协同设定以维持放电稳定。电压应选在能击穿初始膜层但不引起剧烈烧蚀的区间；频率则随电压升高而适当增加，确保微弧放电连续均匀。这种匹配机制能促进氧化膜生长均一，形成尺寸适宜的孔隙结构：既满足抗菌剂负载空间，又保持足够的致密度以抵抗磨损，避免因参数失配导致的性能短板。

第三，优化处理时长并引入前后处理闭环。

处理时间应控制在膜层性能达到饱和且未产生内应力裂纹的“窗口期”，并根据电压高低动态调整（高压短时、低压长时）。同时，强化预处理（打磨清洗）以去除油污杂质，提升膜基结合力；增加后处理环节，采用环保封孔剂对表面进行封孔处理。这不仅能进一步消除表面微裂纹、提升致密性与耐磨性，还能固定抗菌离子，确保持长效抗菌与食品安全。

## 6 微弧氧化技术的应用前景与发展趋势

### 6.1 微弧氧化技术的应用场景

微弧氧化技术在食品级不锈钢领域的应用前景广阔，主要覆盖三大场景：

一是加工设备。应用于搅拌机叶片、切片机刀具等核心部件，显著提升表面硬度与耐磨性，抵抗原料摩擦；同时利用其抗菌特性抑制微生物滋生，降低清洗频率与维护成本。

二是输送与储存系统。用于输送管道内壁及储存罐，增强耐腐蚀性以防止金属离子溶出，并阻断细菌在管壁或罐壁的附着，确保食品流转与储存过程中的安全新鲜。

三是直接接触器具。适用于餐具及医药化工设备，在满足高生物安全性前提下，提供优异的耐磨与抗菌防护，拓展至对卫生要求极高的医疗器械领域。

### 6.2 微弧氧化技术的发展趋势

未来该技术将向精准化、绿色化、多功能化及产业化方向演进：

精准化改性是核心。通过建立工艺参数与膜层性能的映射模型，结合实时监测技术，实现针对不同设备工况的定制化调控，确保耐磨、抗菌等指标的精准匹配。

绿色化发展是必然。重点研发无毒环保电解液，推动溶液循环利用以减少排放，并与其他绿色技术复合，构建低能耗、低污染的清洁生产体系。

多功能化协同是方向。除基础耐磨抗菌外，通过添加特殊助剂赋予膜层防结垢、自清洁等新功能，开发长效缓释抗菌膜，满足多元化需求。

产业化升级是目标。通过简化流程、开发高效节能设备及制定行业标准，降低生产成本，规范产品质量，推动微弧氧化技术在食品加工装备中的大规模普及与应用。

## 7 结论

本研究系统探讨微弧氧化对食品级不锈钢耐磨与抗菌性能的影响机制及工艺优化策略，得出核心结论如下：第一，微弧氧化技术经阳极氧化、微弧放电及成膜三阶段，在不锈钢表面原位生成致密且结合牢固的陶瓷膜。该膜层有独特三层截面结构与多孔形貌，主要物相为三氧化二铬、二氧化硅等，其微观结构与成分决定材料表面性能，能满足食品加工设备综合需求。第二，工艺参数显著调控氧化膜结构特征。微弧氧化通过提升表面硬度等提高耐磨性，利用多种机制增强抗菌性。各参数对性能影响规律明确，需协同调控实现耐磨与抗菌平衡，确保生物安全性。第三，提出基于“协同优化、生物安全、经济实用”原则的工艺优化策略，通过构建环保电解质体系等实现氧化膜多功能性能协同提升。该技术前景广阔，将向精准化等方向发展。本研究为食品级不锈钢表面改性提供理论支撑与应用指导。未来需深入研究工艺参数与性能定量关联，开发精准调控技术与复合改性体系，推动技术在食品装备领域应用与升级。

## 参考文献：

- [1] 汤亮,孟瑞静,吴昊,等. 316L 不锈钢表面抗菌双疏 Ag/PFOA 复合涂层的制备及其性能[J]. 腐蚀与防护,2024,45(2):69-74.
- [2] 郑家圣,黄天阳,田林海,等. 不锈钢表面含 Cu 功能梯度复合改性层的制备及抗菌性能[J]. 金属热处理,2023,48(2):263-269.
- [3] 任杰,张利,刘承志,等. S30815 耐热不锈钢基材和焊接接头的高温氧化行为[J]. 材料工程,2025,53(5):214-225.
- [4] 刘凤莲. 商用厨具产品用不锈钢性能对比研究[J]. 中国标准化,2022(21):221-224.
- [5] 张爱雷. 食品级不锈钢餐饮具辨别与安全使用[J]. 科技与企业,2014(17):378-378.