

微细电火花加工中放电参数对表面完整性的多目标优化

林一帆

厦门朴峰智能科技有限公司 福建厦门

【摘要】微细电火花加工中，放电参数对表面完整性具有显著影响，涉及表面粗糙度、残余应力及显微硬度等关键指标。通过多目标优化方法，系统分析峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔等参数对表面质量的影响规律，并建立放电参数与表面完整性指标的数学模型。研究揭示了参数间复杂的交互作用机制，结合遗传算法求解多目标优化问题，获得兼顾加工效率与表面质量的参数组合。优化结果为微细电火花加工工艺参数的合理选择提供了理论依据，有助于提升工件的综合性能。

【关键词】微细电火花加工；放电参数；表面完整性；多目标优化；响应面法

【收稿日期】2024年5月10日 **【出刊日期】**2024年12月20日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20240015

Multi-objective optimization of discharge parameters for surface integrity in micro EDM

Yifan Lin

Xiamen Pufeng Intelligent Technology Co., Ltd, Xiamen, Fujian

【Abstract】In micro-EDM, discharge parameters significantly influence surface integrity, including key indicators such as surface roughness, residual stress, and microhardness. By employing multi-objective optimization methods, the study systematically analyzes how peak current, pulse width, and pulse interval affect surface quality. It also establishes a mathematical model linking discharge parameters to surface integrity indicators. The research reveals the complex interaction mechanisms among these parameters and uses genetic algorithms to solve multi-objective optimization problems, resulting in parameter combinations that balance processing efficiency with surface quality. This optimization provides a theoretical basis for the rational selection of micro-EDM process parameters, which helps enhance the overall performance of the workpiece.

【Keywords】Micro EDM; Discharge parameters; Surface integrity; Multi-objective optimization; Response surface method

引言

微细电火花加工以其高精度、非接触特性，在精密制造领域占据重要地位。然而，加工过程中放电参数的选择直接影响工件表面完整性，进而影响其耐磨性、抗疲劳性能及使用寿命。当前，如何通过优化放电参数实现表面完整性的多目标协同提升，成为制约该技术发展的关键问题。为此，需深入分析放电参数对表面完整性的影响机制，并建立多目标优化模型，以指导工艺参数的合理选择，推动微细电火花加工技术向更高精度、更高效率方向发展。

1 放电参数对表面完整性的影响机制

微细电火花加工中，放电参数的选择直接决定了加工过程中的能量输入与分布，进而影响工件表

面完整性。峰值电流作为放电能量的核心参数，其大小直接决定了单脉冲能量密度。当峰值电流较小时，放电能量不足以使材料完全熔化，加工表面易形成不规则的微小凹坑，导致表面粗糙度较大。随着峰值电流的增大，单脉冲能量增加，材料熔化与气化程度加剧，表面粗糙度可能因熔融物的重新凝固而有所改善，但过大的峰值电流易导致表面材料过度熔化，形成较大的热影响区，甚至引发裂纹等缺陷，同时增加表面残余拉应力。

脉冲宽度是另一个关键参数，它决定了单次放电的持续时间。脉冲宽度的延长意味着放电能量在更长时间内作用于工件表面，导致热影响区范围扩大。在热影响区内，材料因高温作用发生相变、晶粒

长大等现象,进而降低表面显微硬度。过长的脉冲宽度还可能使电蚀产物无法及时排出,堆积在加工表面,进一步恶化表面质量^[1]。合理控制脉冲宽度对于平衡加工效率与表面质量至关重要。

脉冲间隔则反映了相邻两次放电之间的时间间隔。较短的脉冲间隔可提高加工效率,但易导致电蚀产物堆积和放电通道不稳定,增加表面粗糙度并引入残余应力。过长的脉冲间隔虽能保证放电通道的稳定,但会降低加工效率。脉冲间隔的选择需综合考虑加工效率与表面质量的需求^[2]。各参数间存在复杂的交互作用,需通过系统实验揭示其影响规律,为后续的多目标优化提供基础。

2 表面完整性评价指标的量化分析

表面完整性是评价微细电火花加工质量的重要指标,主要包括表面粗糙度、残余应力及显微硬度三个方面。表面粗糙度直接反映了加工表面的微观不平度,是衡量加工质量最直观的指标之一。在微细电火花加工中,表面粗糙度受放电参数、工作液性质及电极材料等多种因素影响。通过三维轮廓仪等设备对加工表面进行量化分析,可发现表面粗糙度随峰值电流的增大而呈现先减小后增大的趋势,这主要归因于放电能量与材料熔化程度的动态平衡。残余应力是加工过程中因热应力、相变应力等作用而残留在工件表面的应力。在微细电火花加工中,残余应力以拉应力为主,其大小与脉冲宽度、峰值电流等参数密切相关。过大的残余拉应力易导致工件在使用过程中发生裂纹扩展甚至断裂,严重影响其使用寿命。

表面完整性各评价指标间存在着复杂且微妙的矛盾关系,这些关系相互交织、相互影响,使得在微细电火花加工中实现各指标的协同提升成为一项极具挑战性的任务。在追求降低表面粗糙度的过程中,往往需要调整放电参数,如增大峰值电流或延长脉冲宽度,但这些调整可能会带来意想不到的负面效应。增大峰值电流虽然能够使材料更好地熔化和气化,从而在一定程度上改善表面粗糙度,但同时也会增加表面的残余拉应力^[3]。这是因为过大的峰值电流会导致放电能量过于集中,使材料表面受到过度的热作用,进而在冷却过程中产生较大的热应力,最终以残余拉应力的形式残留在工件表面。过大的峰值电流还可能使表面材料过度熔化,导致热影响区扩大,进而降低表面显微硬度。

同样,当试图提高显微硬度时,可能会采取减小脉冲能量密度等措施,但这又可能以牺牲加工效率为代价。减小脉冲能量密度意味着每次放电所释放的能量减少,这虽然可以降低热影响区的范围,减少材料显微硬度的降低程度,但同时也会使加工速度变慢,因为需要更多的放电次数才能完成相同的加工量。而且,降低脉冲能量密度还可能影响加工表面的粗糙度,使其难以达到理想的水平。这些矛盾关系的存在,使得在实际加工过程中,很难找到一个放电参数组合能够同时满足所有表面完整性指标的最优要求^[4]。必须通过多目标优化方法,综合考虑各指标之间的相互关系和权重,采用合适的优化算法和模型,在多个目标之间进行权衡和折中,以实现各指标的协同提升,从而满足不同工况下对加工表面质量和使用性能的多样化需求。

3 多目标优化模型的构建与求解

为实现微细电火花加工中放电参数的多目标优化,需构建放电参数与表面完整性指标之间的数学模型。基于响应面法,设计一套全面且合理的实验方案。该方案需涵盖放电参数(如峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔等)的不同取值组合,以确保能够获取足够丰富且具有代表性的样本数据。在实验过程中,严格控制其他可能影响加工结果的因素,如工作液的性质、电极材料、加工环境等,保证实验条件的一致性和稳定性。通过实验获取样本数据后,利用最小二乘法对数据进行拟合,建立放电参数与表面粗糙度、残余应力及显微硬度之间的二次多项式模型。该模型不仅能够准确反映各参数对表面质量的影响规律,还能揭示参数间的交互作用机制。通过模型可以清晰地看到峰值电流与脉冲宽度如何共同作用影响表面粗糙度,以及它们与残余应力、显微硬度之间的复杂关系。

在模型构建过程中,充分考虑各参数的取值范围及实验误差对模型精度的影响至关重要。参数的取值范围应根据实际加工需求和设备性能进行合理设定,避免因参数取值不当导致模型失真。对实验误差进行详细分析,采用合适的统计方法评估误差对模型结果的影响程度。通过方差分析等方法对模型进行显著性检验,确保模型具有较高的预测精度和可靠性。方差分析可以判断模型中各项参数对表面完整性指标的影响是否显著,从而筛选出对结果有实质性影响的参数,剔除那些不显著或影响微弱的

参数项。为简化模型复杂度并提高求解效率,可采用逐步回归等方法对模型进行优化^[5]。逐步回归通过逐步引入或剔除参数,寻找对模型拟合效果贡献最大的参数组合,剔除不显著的参数项,使模型更加简洁且具有更好的解释性。经过优化后的模型能够在保证预测精度的减少计算量,提高求解速度。

多目标优化问题的求解是本研究的核心环节。采用遗传算法等智能优化算法对构建的数学模型进行求解。遗传算法模拟了自然选择和遗传学机理的生物进化过程,通过选择、交叉和变异等操作,在解空间中进行全局搜索。以表面粗糙度最小化、残余应力绝对值最小化及显微硬度最大化为目标函数,通过迭代搜索寻找 Pareto 最优解集^[6]。在求解过程中,需设置合理的算法参数如种群规模、迭代次数等。种群规模决定了搜索的广度,过小的种群规模可能导致搜索不充分,无法找到全局最优解;而过大的种群规模则会增加计算量,降低求解效率。

4 优化结果的验证与工艺适应性分析

为验证多目标优化结果的可靠性,需对优化得到的参数组合进行系统的实验验证。在实验过程中,我们严格遵循实验设计,采用与构建数学模型时相同的实验条件和测试方法,以确保实验数据的准确性和可比性。通过对比实验数据与模型预测值,我们发现两者之间具有较高的吻合度,这充分表明所构建的数学模型及求解方法具有较高的准确性和实用性。

进一步分析优化参数的工艺适应性,我们发现其在不同材料及加工条件下仍能保持较好的表面完整性提升效果。这一发现主要得益于多目标优化方法对放电参数与表面质量之间复杂关系的全面考虑。在优化过程中,我们充分考虑了各种参数之间的交互作用以及它们对表面质量的多方面影响,从而使优化参数具有更广泛的适用性^[7]。然而,值得注意的是,尽管优化参数具有较好的工艺适应性,但不同材料及加工条件下放电参数对表面质量的影响规律可能存在差异。

优化参数组合还展现出降低加工能耗与工具电极损耗的潜力。在微细电火花加工过程中,加工能耗和工具电极损耗是影响加工成本和生产效率的重要因素。通过合理控制放电参数,我们可以减少不必要的能量浪费和电极磨损,从而提高加工效率并降低生产成本^[8]。这对于推动微细电火花加工技术的工

业化应用具有重要意义。在实际生产中,采用优化参数组合不仅可以提高产品质量和性能,还可以降低生产成本和能耗,为企业带来显著的经济效益和社会效益。

5 结语

微细电火花加工中放电参数对表面完整性的多目标优化研究,为提升加工表面质量提供了有效途径。通过量化分析放电参数与表面完整性指标的关联性,构建多目标优化模型并求解最优参数组合,实现了表面粗糙度、残余应力及显微硬度的协同优化。未来研究可进一步拓展至复杂曲面加工及微结构制造领域,探索智能化参数优化方法,结合机器学习等技术实现加工过程的实时监测与动态调整,推动微细电火花加工技术向更高精度、更高效率、更高智能化方向发展。

参考文献

- [1] 齐旭东,杜连明,王蕾,等.镍基高温合金微细电火花加工实验研究[J].电加工与模具,2024,(06):8-12.
- [2] 李冀霞,罗金星,柳荣俊,等.微细电火花加工航空油嘴精密流量孔试验研究[J].电加工与模具,2024,(06):19-24+39.
- [3] 姜东升,刘庆玉,陈志恒,等.微细电火花加工中的放电能量分布研究[J].青岛理工大学学报,2024,45(04):139-145.
- [4] 胡博,贾建宇,宋国锋,等.同步差动进给双线电极微细电火花切割伺服控制系统设计[J].电加工与模具,2024,(04):20-26+39.
- [5] 莫远东,王雅芝,黄舒琦,等.基于集成正交实验与 CNN 方法的微细电火花微孔加工精度[J].工程科学与技术,2024,56(04):261-272.
- [6] 刘庆玉,王亚青,沙瑞,等.微细电火花加工的材料蚀除特性及极性效应研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,49(05):30-38.
- [7] 杨翔钧,张亚欧,郑倩,等.磁场辅助场致射流微细放电加工研究[J].电加工与模具,2024,(01):65-70.
- [8] 聂子龙,张晨馨,蒋毅,等.微细电火花铣削加工电极损耗补偿研究[J].电加工与模具,2023,(06):17-21.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS