

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.08.009

## 内腔零件硬质阳极氧化仿真及优化

黄 锋, 李智勇, 宋 超, 李 文, 刘祉进, 肖 薇, 秦锦钧\*

(昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 江西 景德镇 333000)

**摘要:** 铝合金硬质阳极氧化是常用的表面处理工艺,该工艺通过形成氧化膜来增强铝合金的耐腐蚀性、硬度和耐磨性。然而,在处理具有复杂内腔和外形状的零件时,传统工艺方法往往难以满足工艺要求,而仿真技术将在此方面发挥至关重要的作用。本文采用了仿真计算结果来指导工艺参数的优化和工装设计,并进行了试制验证。结果表明,通过优化硬质阳极氧化工艺参数和工装设计,成功地解决了工件因膜厚不均而导致的“烧焦”问题,并大幅提升了膜层的质量和膜厚分布的均匀性。仿真结果的准确性高,为工艺优化提供了可靠的依据。

**关键词:** 硬质阳极氧化; 仿真技术; 均匀性

**中图分类号:** TG178

**文献标识码:** A

## Simulation and optimization of hard anodic oxidation of internal cavity parts

Huang Feng, Li Zhiyong, Song Chao, Li Wen, Liu Zhijin, Xiao Wei, Qin Jinjun\*

(Changhe Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333000, China)

**Abstract:** Aluminum alloy hard anodic oxidation is a commonly used surface treatment which can enhance the corrosion resistance, hardness, and wear resistance of aluminum alloys by forming an oxide film. However, when dealing with parts with complex internal cavities and external shapes, traditional processing methods may be difficult to meet the process requirements, and simulation technology will play a crucial role in this regard. In this paper, the results of simulation calculations were used to guide the optimization of process parameters and tooling design, trial production was conducted for verification. The results showed that the optimized hard anodic oxidation process parameters and tooling design successfully solved the problem of "burning" caused by uneven film thickness and significantly improved the quality of the film layer and the uniformity of film thickness distribution. The accuracy of the simulation results is high, providing a reliable basis for process optimization.

**Keywords:** hard anodic oxidation; simulation technology; uniformity

硬质阳极氧化作为一种广泛应用的铝合金表面处理技术,可增强铝合金的耐腐蚀性、硬度和耐磨性<sup>[1]</sup>。然而,当其应用于具有复杂内腔和外形的零

件时,这一工艺面临着诸多挑战,特别是阳极氧化过程中腔内和复杂表面的膜厚的不均匀性会对零件的性能产生不利影响。这一技术难题为产品加工过程

收稿日期: 2023-11-15

修回日期: 2024-03-20

作者简介: 黄锋(1987—),男,本科,工程师,研究方向为表面处理仿真及自动喷涂技术应用, email: 919688471@qq.com

\*通信作者: 秦锦钧, email: 1057595883@qq.com

带来了多方面的挑战,在挂具的设计方面,需要综合考虑容量限制、布局的优化以及导电点的精确位置,以确保电流能够均匀的传递至每个角落;在选择辅助工具时,从辅助阳极到辅助阴极,再到电场屏蔽,每一步都至关重要,它们对零件表面膜层的均匀性和质量有着直接影响<sup>[2]</sup>。

此外,设定合适的工艺参数也是一门精细的学问。槽体的总电流、电流密度的精确调控、电压的稳定等都需要精心平衡,以保证氧化过程的稳定性和可控性。然而,传统的依赖经验和试错的方法不仅效率低下,而且难保每次都能找到有效的解决方案。

为了应对这些挑战,昌河飞机工业(集团)有限责任公司摒弃了传统的工艺方法,积极引入了硬质阳极氧化仿真软件 AnodizingManager。通过对公司某具有复杂内腔和外形的零件进行仿真计算,成功解决了膜厚和高区烧焦等问题,为类似复杂零件的硬质阳极氧化工艺的改进提供了有力的支持<sup>[3]</sup>。这一创新性的应用不仅提高了产品质量,还为此领域的工艺优化和技术进步奠定了坚实基础。

## 1 阳极氧化仿真软件简介

AnodizingManager 是一款专业的硬质阳极氧化仿真软件,它能够根据真实的生产线和镀液条件对氧化过程进行模拟仿真。通过精确获取硬质阳极氧化槽的几何尺寸,并结合镀液的电化学性能和物理性能,该软件能够构建出一个高度逼真的生产线模型。用户只需将生产线尺寸、硬质阳极氧化的电化学性能参数、零部件三维模型以及工艺参数输入到软件中,软件便会运用先进的数值计算和方程求解技术,精确预测零部件表面膜厚的分布情况<sup>[4]</sup>。

AnodizingManager 为优化硬质阳极氧化过程提供了宝贵的资源。通过利用现实的生产线模型和输入关键数据,该软件提供了膜层厚度分布的准确预测。AnodizingManager 能够在设计阶段就对硬质阳极氧化过程进行彻底的检查,有利于优化产品结构、工艺设计以及对硬质阳极氧化结果和解决方案的性能的预测。与传统的“试错”方法不同,该软件减少了夹具设计和工艺参数优化所需的迭代次数。这不仅节省了资源,且大大减少了开发过程中的时间和成本,提高了硬质阳极氧化开发过程的效率,最终降低了成本,提高了硬质阳极氧化过程的整体有效性。

## 2 零件技术要求

某减摆器外筒零件局部(如图1黄色区域)采用硬质阳极氧化的方式进行表面处理,由于深腔及边缘效应的影响,现有的工艺处理的产品会出现腔底薄、边缘厚的膜层分布情况,因而无法满足零件局部镀层整体在  $40\sim 60\text{ }\mu\text{m}$  的技术要求。

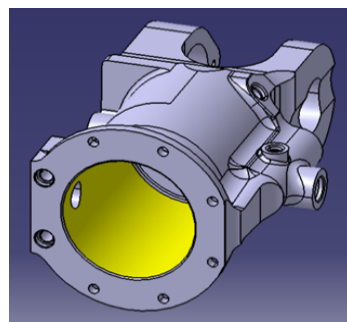


图1 减摆器外筒零件结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the outer barrel parts of the swing reducer

## 3 仿真解决方案

通过 AnodizingManager 仿真软件可以在设计初期全方位的考察和优化产品的结构设计、工艺设计,预测镀层分布区间、槽液性能等<sup>[5]</sup>。在进行方案优化的过程中,与传统的“经验设计→现场试制→纠错”的开发模式不同,AnodizingManager 仿真软件具有显著的优势,它可以通过软件模拟仿真整个硬质阳极氧化工艺过程,从而在设计阶段就发现和解决潜在的问题。这大大减少工装设计和工艺参数优化的迭代次数,不仅节约了资源消耗,还大大缩短了开发周期,为企业节省了大量的时间成本。

### 3.1 原始仿真计算

采用现有生产工艺及工装,对图1所示的减摆器外筒零件进行现有工艺仿真分析,其中黄色区域为氧化区域,其他位置无氧化层。使用 AnodizingManager 软件的 Meshing Optimizing 模块自动进行网格划分,得到的网格图如图2所示。

将完成网格划分的零件导入仿真软件中,再根据现场实际工装情况及工艺参数对该半封闭深孔类零件进行仿真分析,得到的膜厚  $d$  及电流密度  $J$  的分布如图3和图4所示(工艺参数:电流密度  $250\text{ A/m}^2$ , 氧化时间  $40\text{ min}$ )。

从膜厚分布结果可以看出,原始工艺方案存在以下问题:高电流密度区的零件(如图4所示)膜厚已达到 $90\text{ }\mu\text{m}$ ,具有烧焦的风险,而深腔底面区域才 $30\text{ }\mu\text{m}$ ,膜厚分布严重不均,为了解决以上问题,需要对工装方案进行优化。

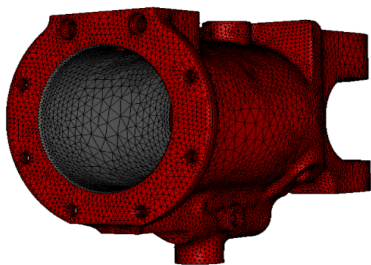


图2 减摆器外筒零件网格图

Fig.2 Grid diagram of the outer barrel parts of the swing reducer

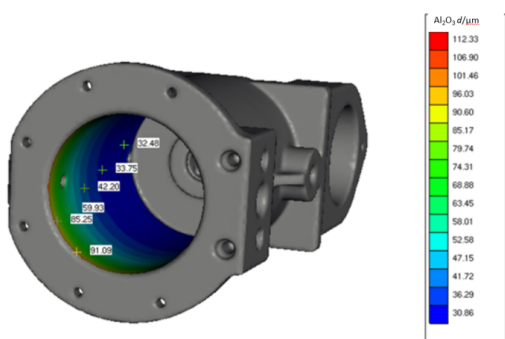


图3 半封闭深孔类零件现有工艺仿真膜厚图

Fig.3 Simulation film thickness diagram of the existing process for semi-enclosed deep hole parts

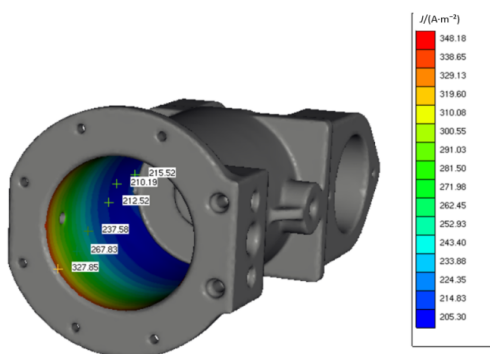


图4 半封闭深孔类零件现有工艺仿真电流密度云图

Fig.4 Simulated current density cloud map of the existing process for semi-enclosed deep hole parts

### 3.2 仿真优化

表面处理工艺过程中,为达到膜厚的均匀性分布或者满足技术要求,对于形状复杂的零件需要增加工装设计,比如遮蔽、辅助阴/阳极、电流窃取等,

目前传统的表面处理工艺开发模式下,比较依靠现场工程师的经验,同时需要在现场进行多轮“试制→纠错→验证”的流程,这给生产带来的极大的人力和物力浪费,且效果还不一定能达到技术规定的要求范围<sup>[6]</sup>。AnodizingManager硬质阳极氧化仿真软件可让这一漫长过程在软件端进行,在软件中进行工艺参数调整、零件排布的优化以及精确化工装设计。

针对本项目,为了满足整体膜厚为 $40\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ 的技术要求,利用AnodizingManager硬质阳极氧化仿真进行了数十轮的迭代,结合工装加工可行性、零件上挂的方便性以及现场生产过程中的槽液流动等因素,最终确定最佳的工装设计方案和工艺参数<sup>[7]</sup>。结合原始方案仿真结果以及现场零件横向摆放会导致积液、气孔等问题,将零件排布方式和导电点进行优化<sup>[8]</sup>,并专门设计了辅助阴极。由于零件氧化部位是圆柱形,我们将辅助阴极也设计成与其相似的圆柱形。通过仿真软件的精确计算,我们确定了辅助阴极的直径大小及其与零件的相对位置,从而得到如图5所示的辅助阴极工装。同时,对工艺参数亦进行了调整,将电流密度设定为 $250\text{ A/m}^2$ ,硬质阳极氧化时间为 $50\text{ min}$ ,将零件进行虚拟装挂和排布,并进行仿真计算。

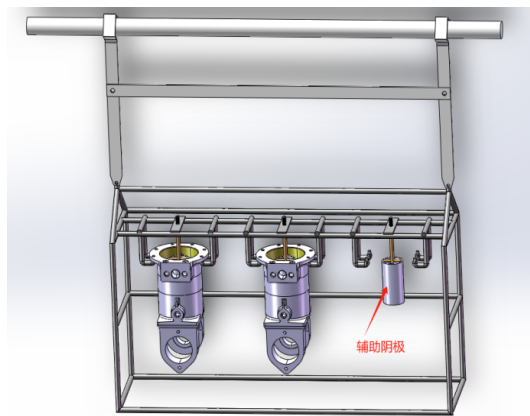


图5 新增辅助阴极的优化方案示意图

Fig.5 Schematic diagram of the optimization plan for adding an auxiliary cathode

优化方案在增加象形阴极的情况下,可以有效改善零件腔底薄、边缘厚等膜厚差异过大的问题,同时还能保证氧化区域各个位置膜厚在 $40\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ 之间,使所有零件膜厚更集中在一个区域,仿真结果如图6的膜厚图以及图7的电流密度云图所示。可以看到,整体零件膜厚分布更均匀,满足技术要求,可



以进行现场试制。

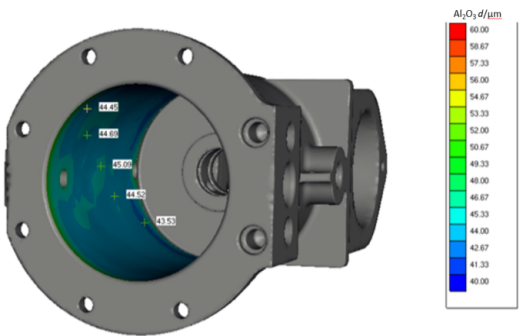


图 6 优化后薄壁类零件的仿真膜厚图  
Fig.6 Simulation film thickness diagram of optimized thin-walled parts

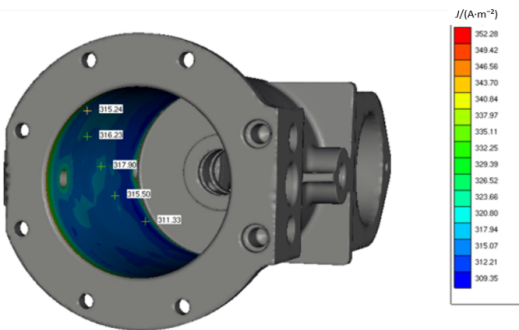


图 7 优化后薄壁类零件的仿真电流密度云图  
Fig.7 Simulated current density cloud map of optimized thin-walled parts

3.3 首次现场试制

根据 AnodizingManager 优化方案进行工装制作,提供工装制作详图,并协调车间排产时间后进行现场试制,同时对比仿真计算结果,试制时间为 2023 年 09 月 18 日,试制地点为昌河飞机工业(集团)有限责任公司氧化车间,工艺参数如表 1 所示。

表 1 初次试镀工艺参数

工艺参数	参数取值
零件数量/pcs	3
输入电流/A	6.4
氧化时间/min	50
电压/V	17.1
槽液温度/℃	-9.7

现场根据表 1 的参数进行试制,通过膜厚仪测得膜厚未达到规定范围,于是对工艺参数进行调整,如表 2 所示,时间增加 30 min,电流值由 6.4 A 改为 10 A,膜厚实测数据如表 3 所示。

表 2 试制参数记录

Tab.2 Record of trial-production parameters

工艺参数	参数取值
输入电流/A	10
氧化时间/min	80
电压/V	52.3
槽液温度/℃	-10

表 3 膜厚实测数据

Tab.3 Measured data of film thickness

测量点	端部膜厚/μm	中部膜厚/μm	下部膜厚/μm
1	40.4	39.2	38.3
2	44.3	40.3	40.1
3	37.8	38.9	35.8
4	42.1	37.6	42.4
平均值	41.2	39.0	39.2

3.4 分析与优化

对表 3 的膜厚实测数据进行分析,发现膜厚分布在 35~45 μm 极小的区间内,说明膜层整体分布很均匀,但所需氧化时间较长。分析原因是工装下端结构吸收了大量电流,如图 8 蓝色部分。

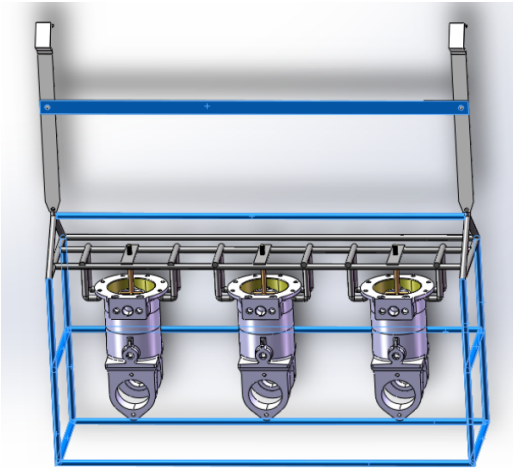


图 8 工装问题点示意图

Fig.8 Schematic diagram of tooling problem points

结合发现的问题对工件挂装方式进行改进,由之前一挂 3 个零件改为 1 个零件,使工装更加灵活轻巧,得出的改进方案如图 9 所示。

根据 AnodizingManager 优化方案及首次试制结果,对工装进行制作,此次结果由氧化车间生产员工全程完成试制过程,同时对比仿真计算结果。本次试制时间为 2023 年 09 月 26 日,试制地点为昌河飞机工业(集团)有限责任公司氧化车间,工艺参数

如表4所示,膜厚实测数据如表5所示。

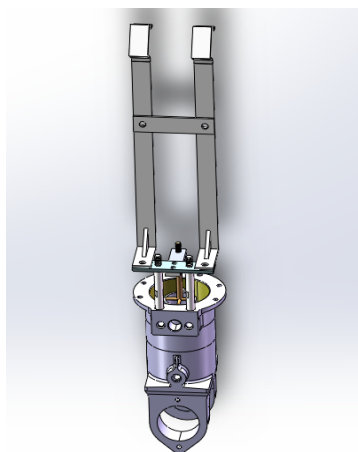


图9 改进后工装示意图

Fig.9 Schematic diagram of the improved tooling

表4 试镀工艺参数

Tab.4 Process parameters of plating trial

工艺参数	参数取值
零件数量/pes	1
输入电流/A	6.4
氧化时间/min	50
电压/V	17.1
槽液温度/°C	-9.7

表5 膜厚实测数据

Tab.5 Measured data of film thickness

测量点	端部膜厚/ $\mu\text{m}$	中部膜厚/ $\mu\text{m}$	下部膜厚/ $\mu\text{m}$
1	50.4	49.2	48.3
2	52.3	48.3	49.1
3	49.8	50.9	52.8
4	48.1	51.6	53.4
平均值	50.2	50.0	50.9

经过对表5中的膜厚实测数据进行深入分析,我们发现零件整体的膜厚分布完全符合 $40\sim 60\ \mu\text{m}$ 的技术要求区间,这意味着零件的局部镀层整体厚度也稳定地落在了这一厚度区间内。因此,该结果证明实施的方案切实可行,能够有效地满足零件膜厚分布的技术要求。

#### 4 仿真优化效果总结

某减摆器外筒零件为内腔面氧化(图纸要求内腔膜厚 $40\sim 60\ \mu\text{m}$ ),由于内腔电场分布弱,采用传统的主阴极氧化方式并按照工艺要求的氧化参数进行零件表面氧化,无法达到图纸所要求的内腔镀层

厚度,传统的试错方式无法有效解决零件内腔氧化问题<sup>[9]</sup>。针对硬质阳极氧化工艺的优化,我们采用计算机仿真技术来模拟和分析各个环节,包括工装和零件在镀槽中的排布、槽液参数、槽体模型以及工艺参数等。通过将实际参数输入到仿真模型中,模拟出整个工艺过程,从而获取到有效的数据。通过分析膜厚、电流密度、结构数据,快速找到了优化点,对工装进行优化设计,新增了辅助阴极,并且通过仿真验证确定最优方案,有效地改善了产品质量<sup>[10]</sup>。

#### 5 结语

本文采用AnodizingManager仿真软件对减摆器外筒零件的硬质阳极氧化工艺进行了深入研究,通过研究发现了工艺存在的两个主要问题:膜厚分布不均及潜在烧焦风险。为解决以上问题,采取了收集现场数据,建立数据库,利用软件进行仿真分析,并通过多轮优化和试制验证的方法,找到了最佳的工艺参数和工装设计方案,不仅解决了烧焦问题,同时还使氧化层分布更加均匀,验证了仿真分析的准确性。研究结果为实际生产提供了一个更可靠、更高效的工艺方案。

#### 参考文献

- [1] 全伟. 铝合金表面微弧氧化陶瓷膜制备工艺试验设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [2] 徐存荣. 一种铸铝合金工件的硬质阳极氧化处理方法: 中国, CN201310286301.0[P]. 2024-02-29.
- [3] 董晓荣, 黄娟, 马利民. 腔体类零件的硬质阳极氧化[J]. 表面技术, 2008, 37(5): 85-88.
- [4] 刘忆, 刘凤霞. 工业纯铝硬质阳极氧化的工艺研究[J]. 表面技术, 2006, 35(6): 35-36, 47.
- [5] 徐胜利. 基于拓扑优化的结构刚度和渗流多功能材料设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [6] 刘翠红. 复杂结构零件充液成形工艺数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [7] 王艳芝. 铝及其合金阳极氧化技术研究的进展[J]. 材料保护, 2001, 34(9): 22-23.
- [8] 宋广成, 王闻天. 油罐内壁用防静电涂料导电原材料的选择与影响因素[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(8): 78-81.
- [9] 程立龙, 洪军, 胡育松. 一种利用电场分布提高镀层膜厚均匀性的电镀装置: 中国, CN202310782627.6[P]. 2024-03-23.
- [10] 刘国亮, 吴昊, 李军威. 电镀仿真技术在机械加工公差分配中的应用[J]. 新技术新工艺, 2020(1): 36-39.