

# 整体叶盘套形电解加工绝缘套优化方法研究

王云森<sup>1</sup> 朱 栋<sup>1\*</sup> 焦尔豪<sup>1</sup> 王 欢<sup>2</sup> 张 超<sup>1,2</sup> 王若龙<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016

2. 北京动力机械研究所, 北京, 100074

**摘要:**减小套形电解加工过程中的绝缘套变形是提高套形电解加工稳定性和精度的重要措施。提出了一种绝缘套优化方法。以弦长20 mm、叶片高度23 mm、叶片厚度0.54 mm的薄壁叶片为例,建立了不同绝缘套结构的工具阴极模型,开展了流固耦合仿真研究,优化了绝缘套加强筋结构参数。相比于无加强筋结构的绝缘套,优化后绝缘套最大变形量从0.261 mm减至0.020 mm,同时加工区域流速分布较为均匀。开展了绝缘套加强筋宽度为0、1、2、4.5 mm的薄壁叶片套形电解加工试验,加工出薄壁叶片,相比于无加强筋结构的绝缘套,加强筋宽度为4.5 mm时,加工叶片的表面粗糙度 $Ra$ 从1.81  $\mu\text{m}$ 减至1.05  $\mu\text{m}$ ,验证了所提方法可有效减小绝缘套变形量,提高套形电解加工稳定性。

**关键词:**套形电解加工;薄壁叶片;绝缘套;流固耦合仿真;正交试验

中图分类号:V26

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Optimization Method of Insulating Sleeves in Electrochemical Trepanning for Disks

WANG Yunmiao<sup>1</sup> ZHU Dong<sup>1\*</sup> JIAO Erhao<sup>1</sup> WANG Huan<sup>2</sup> ZHANG Chao<sup>1,2</sup> WANG Ruolong<sup>1</sup>

1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing, 100074

**Abstract:** Reducing the deformations of the insulating sleeves during the ECT processes was an important method to improve the stability and accuracy of ECT. This paper proposed an optimization method for the insulating sleeves. With a thin-walled blade of chord length 20 mm, blade height 23 mm, and blade thickness 0.54 mm as an example, tool cathode models with different insulating sleeve structures were established, FSI simulations were conducted, and the structural parameters of the insulating sleeve reinforcement ribs were optimized. Compared with the insulating sleeves without reinforcement ribs, the maximum deformation of the optimized insulating sleeves is reduced from 0.261 mm to 0.020 mm, and the velocity distribution in the machining area becomes more uniform. ECT experiments were carried out on thin-walled blades with insulating sleeve reinforcement widths of 0 mm, 1 mm, 2 mm, and 4.5 mm respectively. The results show that, compared with the insulating sleeve without reinforcement ribs, the value of surface roughness of the machined blades with a reinforcement width of 4.5 mm is reduced from 1.81  $\mu\text{m}$  to 1.05  $\mu\text{m}$ . The method was verified to be effective in reducing the deformations of the insulating sleeve and improving the stability of ECT.

**Key words:** electrochemical trepanning (ECT); thin-walled blade; insulating sleeve; fluid-structure interaction (FSI) simulation; orthogonal experiment

### 0 引言

整体叶盘等整体构件是航空航天发动机压气机的核心零部件,叶片数量高达几十甚至上百个,具有叶片薄易变形、加工通道狭窄等特点<sup>[1-3]</sup>,采用传统机械加工方式存在刀具磨损严重、加工成本高等缺点<sup>[4]</sup>。电解加工是一种无接触加工方式,具有无工具阴极损耗、无残余应力、加工成本

低等优势<sup>[5]</sup>。目前国内外学者针对电解加工开展了大量研究。德国 Allgemeine Elektricitts-Gesellschaft公司使用SMH-1-C卧式电解加工机床加工出整体叶轮,提高了复杂型面和型腔的加工精度<sup>[6]</sup>;美国 General Electric公司使用数控电解加工技术,研制出用于F22战斗机的整体叶盘;德国 EMAG公司研制了多轴联动精密电解加工机床,加工出压气机叶片<sup>[7]</sup>;德国 MTU公司通过振动电解加工技术实现了整体叶盘的加工<sup>[8]</sup>。MINAZETDINOV<sup>[9]</sup>通过流体力学模型和解析解

收稿日期:2025-03-06

基金项目:国家自然科学基金(52275435)

研究了电流效率和电解液流动对加工过程的影响。BHATTACHARYYA 等<sup>[10]</sup>研究了工具振动对铜电化学加工性能的影响,减少了电解产物的积累,提高了电解加工表面质量。

套形电解加工是电解加工的一种方式,在航空航天领域常用于等截面叶片的加工或扭曲叶片的粗加工<sup>[11]</sup>,很多学者针对套形电解加工开展了大量研究。JIA 等<sup>[12]</sup>通过研究钛合金的电化学性能对电解液配方进行改进,改善了点蚀现象。TAO 等<sup>[13]</sup>采用多物理场耦合模型研究了电解液的电导率变化对套形电解加工过程的影响。秦天天<sup>[14]</sup>提出了一种空气绝缘辅助套形电解加工方式,通过在工件表面形成气膜,降低了杂散腐蚀对工件的影响。翟士民等<sup>[15]</sup>使用旋转套料电解加工的方式,实现了对狭小叶栅扭曲叶型通道的加工。朱荻团队<sup>[16-18]</sup>对套形电解加工开展了一系列的创新性研究,加工出扩压器叶片、内向分布的静子叶盘、整体叶盘等,提高了加工效率和精度。套形电解加工过程中存在绝缘套变形等问题,直接影响流场稳定性和叶片的加工精度。本文提出了一种绝缘套结构优化方法,并开展不同绝缘套结构的套形电解加工试验研究,验证该方法对提高套形电解加工稳定性的有效性。

## 1 套形电解加工绝缘套设计方法介绍

### 1.1 套形电解工具阴极

套形电解加工是一种基于电化学阳极腐蚀原理去除材料的特种加工技术。在加工过程中工件连接电源正极,工具阴极连接电源负极,工具阴极不断进给将叶片周围材料去除,从而套出叶片形状完成加工。套形电解加工工具阴极由阴极体、绝缘套、阴极片三部分组成(图1),为了减少阴极体侧壁对已加工叶片的杂散腐蚀,在工具阴极内部设计了绝缘套结构。电解液从绝缘套和阴极体之间的间隙流入,顺着绝缘套四周侧壁流经绝缘套和阴极片之间的间隙流入加工区域,最终从加工区域四周流出。电解液以一定压力在工具阴极内部流动,会对工具阴极产生力的作用,使工具阴极发生变形(图2)。因绝缘套材料刚性较差,在电解液的冲击下变形较大,影响流场稳定性和套形电解加工精度,因此设计工具阴极时,最重要的就是要减小加工过程中绝缘套的变形量,同时控制加工区域低流速点占比。

在绝缘套周围设计加强筋结构,为绝缘套提

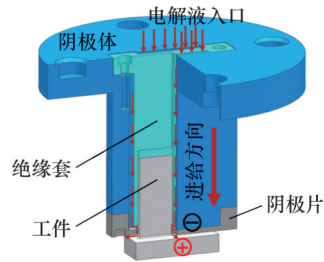


图1 套形电解加工工具阴极模型

Fig.1 Electrochemical trepanning tool cathode model

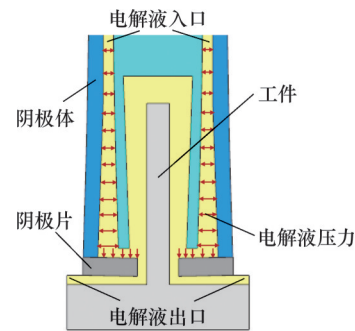


图2 工具阴极变形示意图

Fig.2 Schematic diagram of tool cathode deformation

供局部支撑,增加绝缘套的局部刚度,可以有效减小绝缘套底部的最大变形量(图3)。不同的加强筋结构对降低绝缘套最大变形量的影响不同,影响加强筋结构的参数有加强筋个数 $N$ 、加强筋宽度 $d$ 、加强筋位置 $S_1$ ,下文针对加强筋结构进行优化设计。

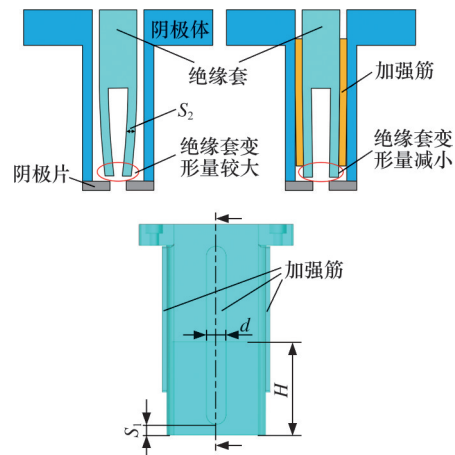


图3 加强筋对绝缘套变形的影响示意图

Fig.3 Schematic diagram of the effect of reinforcement ribs on the deformation of the insulating sleeve

### 1.2 绝缘套设计方法

在绝缘套设计过程中,根据加强筋参数(加强筋个数 $N$ 、加强筋宽度 $d$ 、加强筋位置 $S_1$ )设计正交表,建立相应的工具阴极模型,开展流固耦合仿真分析,得到绝缘套变形量和加工区域低流速点占比。若绝缘套变形量和加工区域低流速点占比不满足设计要求,则开展单因素仿真分析;调整加强

筋参数,继续开展流固耦合仿真,如此循环下去,直至满足设计要求。绝缘套的设计流程框图见图4。

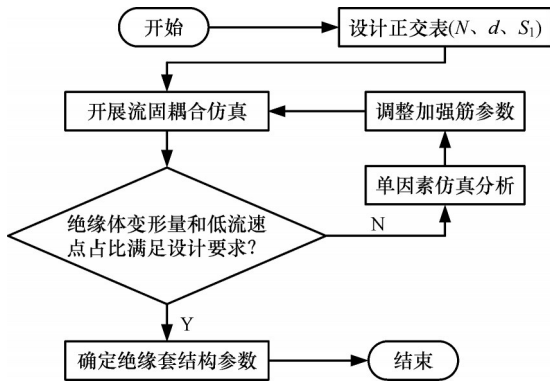


图4 绝缘套设计流程图

Fig.4 Flowchart of the insulating sleeve design process

## 2 绝缘体结构仿真和优化

针对通道宽度8 mm、弦长20 mm、叶片高度23 mm、叶片厚度0.54 mm的薄壁叶片,建立不同加强筋个数、加强筋宽度、加强筋位置的流场和工具阴极模型,开展流固耦合仿真,对比仿真结果,优化加强筋结构。

流固耦合仿真是流场动力学和结构力学之间的多物理场耦合,当电解液(流动的流体)与绝缘套(固体结构)相接触时,绝缘套会受到电解液力的作用,造成绝缘套变形。本文在进行流固耦合仿真时使用ANSYS软件的流场仿真(Fluent)和静力学仿真(Structural)两个模块,将流场仿真得到的压力传递给绝缘套,通过有限元分析绝缘套的变形量。

### 2.1 仿真模型的建立

#### 2.1.1 数学模型

套形电解加工通道狭窄,导致流场的流道复杂,流经路径方向变化较大,间隙较小,易产生突变和扰动,从而形成漩涡,同时流场特性差异大,易产生低流速区。液体流动的湍流模型选择RNG  $k-\epsilon$  模型,该模型通过引入附加项,考虑了漩涡的影响,提高了对复杂流动的处理能力,该模型满足Navier-Stokes方程<sup>[19]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: $x_i, x_j$ 为空间坐标; $\rho$ 为电解液密度; $k$ 为湍流动能; $\epsilon$ 为湍能耗散率; $u_i$ 为时均速度; $\mu_{\text{eff}}$ 为有效黏度; $G_k$ 为平均速度梯度引起的湍流动能的产生项; $C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} = 1.42$ ,  $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.68$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

流体模块计算结束后,将流体对工具阴极产生的压力传递给静力学模块进行有限元仿真,得到工具阴极的变形量。流固两相交界面满足平衡方程为

$$Ku = F \quad (3)$$

式中: $K$ 为刚度矩阵; $u$ 为位移向量; $F$ 为外力向量。

#### 2.1.2 物理模型

针对通道宽度8 mm、弦长20 mm、叶片高度23 mm、叶片厚度0.54 mm的薄壁叶片,开展绝缘套结构优化设计。为了全面准确地分析不同参数对绝缘套变形量和加工区域低流速点占比的影响,采用了正交分析方式,设3个因素,每个因素均采用五个水平(表1)。在绝缘套厚度为1.2 mm、绝缘套空腔高度 $H$ 为23 mm的基础上,根据正交因素及水平,建立了相应的25组不同加强筋个数、加强筋宽度、加强筋位置的流场和工具阴极模型(图5)。

表1 正交因素及水平

Tab.1 Orthogonal factors and levels

因素	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
加强筋个数	0	1	2	3	4
加强筋宽度/mm	0.50	1.25	2.00	2.75	3.50
加强筋位置/mm	0	5	10	15	20

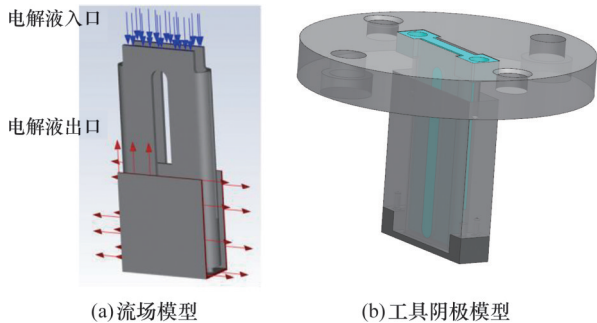


图5 流固耦合仿真模型

Fig.5 Fluid-structure interaction simulation model

设置电解液入口类型为压力入口,入口压力设置为1 MPa,套形电解加工电解液为开放式出口,设置出口边界类型为压力出口,出口压力为0。开展流场仿真,得到加工区域流速云图和流体对绝缘套的压力。将流体对绝缘套的压力导入固体场,通过有限元分析得到绝缘套的变形云图。

### 2.2 加强筋结构优化

套形电解加工叶片,叶型精度范围一般在 $\pm 0.05 \sim 0.2$  mm,结合加工零件要求,工具阴极变形减小一个数量级,故在对绝缘套优化时,将变形量控制在0.02 mm之内,同时兼顾加工区域流场稳定性。

用Fluent仿真时作以下假设:电解液运动黏

度为常数并且不可压缩;根据雷诺系数电解液流动状态分为层流和湍流,电解液流动状态为湍流时要满足下列方程:

$$u_i \geq 2300 \frac{\nu}{D_h} \quad (4)$$

式中: $u_i$ 为电解液进口流速; $D_h$ 为水力直径; $\nu$ 为运动黏度系数,取 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

为了对加工区域的流场均匀性进行分析,在云图截面内(图6)均匀选取 $10^4$ 个点,从Fluent仿真结果中将这此点的流速导出,统计云图截面内的低流速点(电解液流动不满足湍流状态,流速小于 $7.76 \text{ m/s}$ )占比即加工区域低流速点占比。

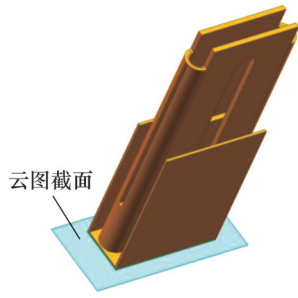


图6 流体模型  
Fig.6 Fluid model

2.2.1 正交试验设计法仿真分析

根据正交因素及水平个数设计三因素五水平正交表,开展流固耦合仿真,得到绝缘套的最大变形量和加工区域低流速点占比,绝缘套最大变形量出现在绝缘套底端中间位置(图7),低流速点出现在加工区域边缘位置(图8)。

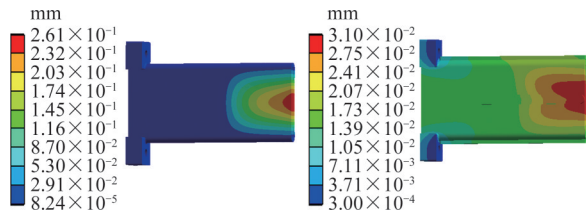


图7 正交试验绝缘套最大、最小变形云图

Fig.7 Contour maps of maximum and minimum deformation of the insulating sleeve of the orthogonal experiment

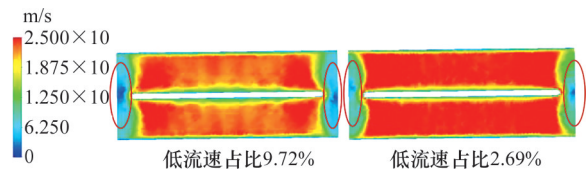


图8 正交试验云图截面内的流速云图

Fig.8 Velocity contour maps within the cross-section of the orthogonal experiment

优化加强筋参数时,需要同时考虑绝缘套最大变形量和加工区域低流速点占比,因两者数值差距较大,为了更准确地分析正交仿真结果,以绝

缘套最大变形量和目标变形量( $0.02 \text{ mm}$ )的比值为评价指标一、加工区域低流速点占比和目标低流速点占比( $3\%$ )的比值为评价指标二,评价指标一和评价指标二各占 $50\%$ 的权重作为综合评价指标 $k$ ,即评价指标一和评价指标二的平均值(表2)。

表2 三因素五水平正交表及仿真结果汇总

Tab.2 Three-factor, five-level orthogonal table and summary of simulation results

编号	加强筋个数	加强筋宽度/mm	加强筋位置/mm	绝缘套变形量/mm	低流速点占比/%	综合评价指标
1	0	0.50	0	0.261	2.69	6.97
2	0	1.25	10	0.261	2.69	6.96
3	0	2.00	20	0.119	3.10	3.49
4	0	2.75	5	0.261	2.69	7.24
5	0	3.50	15	0.261	2.69	5.45
6	1	0.50	20	0.301	2.49	6.98
7	1	1.25	5	0.246	2.18	6.51
8	1	2.00	15	0.260	2.76	6.61
9	1	2.75	0	0.177	3.03	6.67
10	1	3.50	10	0.240	2.99	2.85
11	2	0.50	15	0.280	2.68	6.96
12	2	1.25	0	0.207	2.32	7.95
13	2	2.00	10	0.254	2.88	6.82
14	2	2.75	20	0.249	2.27	4.57
15	2	3.50	5	0.119	3.10	7.11
16	3	0.50	10	0.248	2.85	6.99
17	3	1.25	20	0.271	2.75	6.49
18	3	2.00	5	0.230	3.65	5.55
19	3	2.75	15	0.251	3.75	6.90
20	3	3.50	0	0.122	9.10	6.58
21	4	0.50	5	0.247	2.46	6.96
22	4	1.25	15	0.264	3.07	4.93
23	4	2.00	0	0.081	4.90	7.44
24	4	2.75	10	0.179	5.76	6.36
25	4	3.50	20	0.231	6.64	6.88

分析正交仿真结果得到综合评价指标的极差值(表3)。

1)加强筋个数为0、1、2、3、4时的综合评价指标平均值 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 、 $k_5$ 分别为6.97、6.57、5.98、

表3 综合评价指标极差分析

Tab.3 Range analysis of comprehensive evaluation indicator

	加强筋个数	加强筋宽度/mm	加强筋位置/mm
$k_1$	6.97	7.12	4.97
$k_2$	6.57	6.67	5.98
$k_3$	5.98	5.99	6.48
$k_4$	6.35	6.17	7.08
$k_5$	5.77	5.68	7.13
R	1.20	1.44	2.16

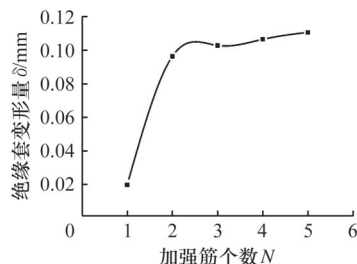
6.35、5.77；加强筋宽度为0.5、1.25、2、2.75、3.5 mm时的综合评价指标平均值分别为7.12、6.67、5.99、6.17、5.68。随着加强筋个数增加或加强筋宽度增加，综合评价指标没有明确的线性变化规律，因为综合评价指标由绝缘套变形量和加工区域低流速点占比共同决定，加强筋个数或者加强筋宽度变化对绝缘套变形量和加工区域低流速点占比的影响是相反的，因此，根据正交仿真结果无法准确地确定最优加强筋个数和加强筋宽度。

2)加强筋位置为0、5、10、15、20 mm时的综合评价指标平均值分别为4.97、5.98、6.48、7.08、7.13。随着加强筋位置的增加，综合评价指标变差，因此，最优加强筋位置为0，即加强筋末端与绝缘套底端平齐。

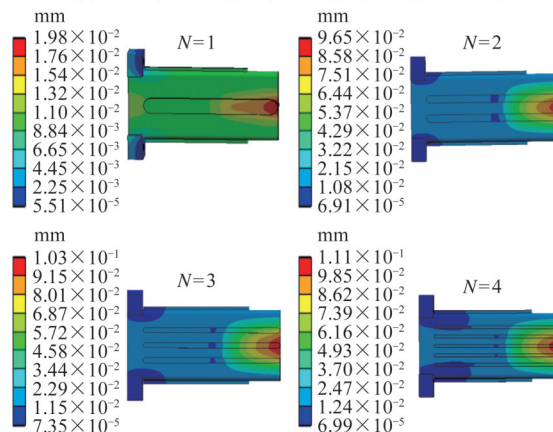
经过上述正交仿真分析，确定最优加强筋位置为0 mm，但仍无法确定最优的加强筋个数和加强筋宽度，因此，开展加强筋个数和加强筋宽度的单因素仿真研究，进一步确定加强筋的最优结构参数。

### 2.2.2 单因素仿真分析

1)加强筋个数单因素仿真分析。加强筋宽度会影响电解液的进液面积，加强筋宽度越大，电解液进液面积越小，影响电解液的流场均匀性。最优加强筋宽度会影响加强筋个数的确定，因此，需先对加强筋个数进行优化。进行绝缘套结构设计时，为了兼顾加工区域流场均匀性，在保证进液面积不变的情况下对加强筋个数进行优化。建立了加强筋位置为0 mm，加强筋个数分别为1、2、3、4、5(对应的加强筋宽度为5、2.5、5/3、1.25、1 mm)的工具阴极模型，开展流固耦合仿真，得到绝缘套变形量情况(图9)。由仿真结果可知，加强筋个数分别为1、2、3、4、5时，对应的低流速点占比分别为3.05%、2.33%、2.69%、2.84%、2.60%，在0.72%之内波动，保证了加工区域流场均匀性。在加强筋总宽度不变的情况下，加强筋个数分别为1、2、3、4、5时，对应的绝缘套最大变形量分别为0.0198、0.0965、0.103、0.107、0.111 mm。随着加强筋个数增加，单条加强筋宽度减小，并且加强筋位置分散，对减小绝缘套最大变形量效果削弱，绝缘套最大变形量增加。当加强筋个数为1时，单条加强筋宽度最大，加强筋对减小绝缘套最大变形量效果最显著，当加强筋个数为2~5时，加强筋个数对减小绝缘套最大变形量效果变化不明显。随着加强筋个数的增加，单条加强筋的宽度



(a)绝缘套最大变形量随加强筋数量的变化曲线



(b)绝缘套变形云图

图9 加强筋数量对绝缘套最大变形量的影响

Fig.9 Effect of the number of reinforcement ribs on the maximum deformation of the insulating sleeve

减幅降低，绝缘套最大变形量变化不大。因此，确定最优加强筋个数为1。

2)加强筋宽度单因素仿真分析。上文确定最优的加强筋的位置为0，最优的加强筋个数为1，对加强筋宽度进行优化。为了确定最优加强筋宽度，建立了加强筋位置为0，加强筋个数为1，加强筋宽度为0、1.0、2.0、3.5、4.0、4.5、5.0 mm的工具阴极模型，开展流固耦合仿真，得到不同加强筋宽度下的绝缘套最大变形量(图10)。

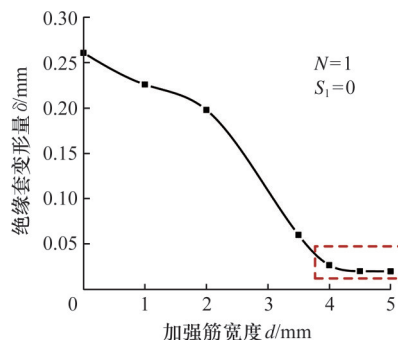


图10 绝缘套最大变形量和加强筋宽度的关系

Fig.10 Relationship between the maximum deformation of the insulating sleeve and the width of the reinforcement ribs

由仿真结果可知，当加强筋宽度为0、1.0、2.0、3.5、4.0、4.5、5.0 mm时，对应的绝缘套最大变形量分别为0.261、0.226、0.198、0.0600、0.0266、

0.020、0.0198 mm。

1)随着加强筋宽度从0 mm增加到4.5 mm,绝缘套最大变形量不断减小,绝缘套最大变形量从0.261 mm减小到0.020 mm。

2)当加强筋宽度  $d < 4$  mm 时,随着加强筋宽度增加,绝缘套最大变形量减小较快,加强筋宽度对绝缘套最大变形量的影响较大;当加强筋宽度  $d > 4$  mm 时,随着加强筋宽度增加,绝缘套最大变形量趋于稳定,因为加强筋宽度  $d > 4$  mm 时,绝缘套最大变形量接近 0.02 mm,已经很小了,再降低就不明显了。

3)当加强筋宽度  $d = 4.5$  mm 时,绝缘套最大变形量为 0.020 mm,满足设计要求,因此,确定加强筋宽度为 4.5 mm。

通过绝缘套设计方法,针对弦长 20 mm、叶片高度 23 mm、叶片厚度 0.54 mm 的薄壁叶片,对绝缘套加强筋结构进行优化,确定最优加强筋结构参数为加强筋位置为 0 mm,加强筋个数为 1,加强筋宽度为 4.5 mm,此时绝缘套最大变形量为 0.020 mm,满足设计要求。在优化过程中,加强筋宽度变化对绝缘套最大变形量影响范围较大,因此,选择不同加强筋宽度的绝缘套结构,验证绝缘套优化方法的有效性。

### 3 薄壁叶片套形电解加工实验

#### 3.1 实验准备

为了验证绝缘套优化对提高薄壁叶片加工稳定性的有效性,制造了加强筋宽度为 0、1、2、4.5 mm 的绝缘套结构。套形电解加工装置如图 11 所示,包括电解液循环系统、电源、工装夹具等。试验加工参数见表 4。

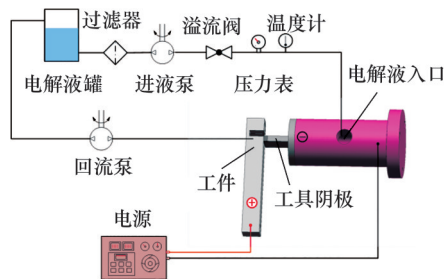


图 11 薄壁叶片套形电解加工装置示意图

Fig.11 Schematic diagram of the electrochemical trepanning device for thin-walled blades

#### 3.2 试验结果分析

##### 3.2.1 加工稳定性分析

开展了加强筋个数为 1,加强筋位置为 0 mm,加强筋宽度分别为 0、2.0、4.5 mm 的套形电解加工对比试验,电流数据如图 12 所示。套形电

表 4 薄壁叶片套形电解加工参数

Tab.4 Electrochemical trepanning parameters for thin-walled blades

电解液	20% NaNO <sub>3</sub> 水溶液
电解液温度/°C	30
进给速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	2.1
初始加工间隙/mm	0.5
电解液入口压力/MPa	1
电解液出口压力/MPa	0
加工电压/V	20

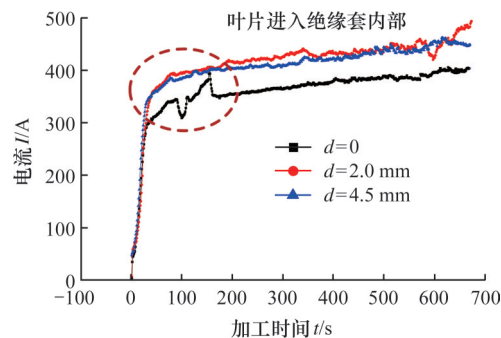


图 12 加强筋宽度 0、2、4.5 mm 时的加工电流

Fig.12 Machining current for reinforcement rib widths of 0 , 2, 4.5 mm

解加工结果表明:

1)使用无加强筋结构的绝缘套进行试验时,叶片进入绝缘套空间位置电流发生明显波动,加工不稳定。加工叶片上方出现明显的弯曲现象,说明无加强筋结构的绝缘套变形量较大,阻碍了叶片进入绝缘套空腔,相应的绝缘套底端中间位置发生了破坏(图 13),和仿真最大变形量位置一致(图 9)。

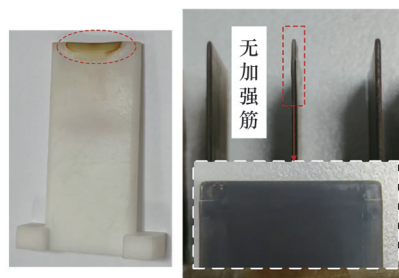


图 13 无加强筋绝缘套和加工叶片

Fig.13 Insulating sleeves without reinforcement ribs and machined blade

2)使用加强筋宽度为 2.0 mm 的绝缘套结构时,加工到后期电流出现明显的波动情况,说明该绝缘套长时间在高压电解液的作用下会导致加工不稳定。

3)使用加强筋宽度为 4.5 mm 的绝缘套结构时,加工电流稳定。验证了绝缘套结构优化对提高套形电解加工稳定性的有效性。

3.2.2 加工精度检测

1)轮廓精度检测。使用三坐标测量仪对使用加强筋宽度为0、2、4.5 mm的绝缘套结构,加工的薄壁叶片轮廓进行检测(图14),叶片最大偏差位置在叶片顶部。加强筋宽度为0、2.0、4.5 mm时,绝缘套最大变形量为0.261、0.198、0.020 mm,加工叶片的最大偏差分别为0.209、0.126、0.120 mm。

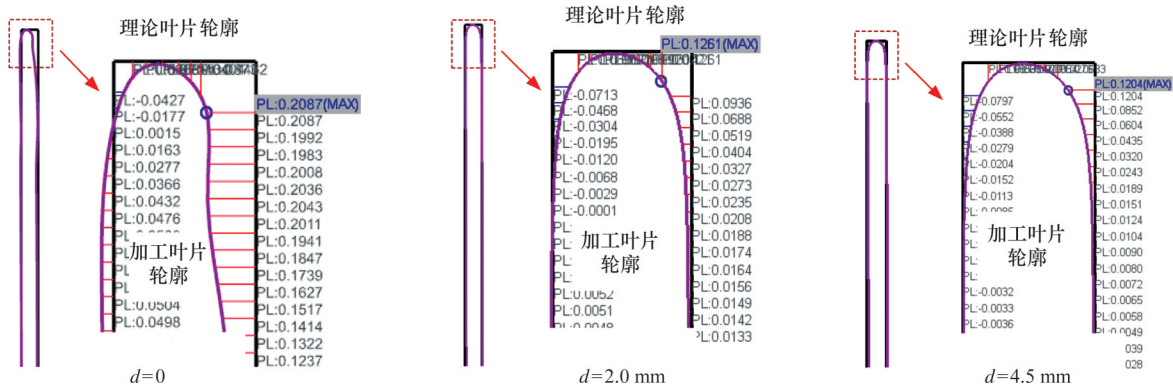


图14 不同加强筋绝缘套加工叶片的轮廓

Fig.14 Contour of the blade machined with different reinforcement rib widths

2)表面粗糙度检测。使用Taylor Hobson 表面粗糙度轮廓检测仪对使用加强筋宽度为4.5、2、1、0 mm的绝缘套结构加工的叶片进行检测(表5)。加强筋宽度为0、1、2、4.5 mm时,加工叶片的表面粗糙度分别为1.81、1.57、1.26、1.05  $\mu\text{m}$ 。随着加强筋宽度从0增至4.5 mm,加工叶片的表面粗糙度从1.81  $\mu\text{m}$ 降至1.05  $\mu\text{m}$ 。由于绝缘套最大变形量减小,提高了流场稳定性,加工区域电解液电导率和电流密度能够保持稳定,故可以获得良好的叶片表面粗糙度。图15结果验证了绝缘套设计方法对提高套形电解加工稳定性的有效性。

表5 不同加强筋宽度下加工叶片粗糙度

Tab.5 Surface roughness of blades machined with different reinforcement rib widths

加强筋宽度 $d/\text{mm}$	粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
0	1.81
1	1.57
2	1.26
4.5	1.05

4 结论

1)本文针对套形电解加工绝缘套变形问题,提出了绝缘套优化方法,采用正交分析方式,明确不同加强筋参数(加强筋个数、加强筋宽度、加强筋位置)对绝缘套变形量和加工区域低流速点占比的影响规律;开展单因素仿真研究,确定最优的绝缘套加强筋结构参数。

mm。绝缘套最大变形量过大,加工时会导致绝缘套底部被破坏,引起加工叶片的偏差较大;加工时绝缘套无破损时,绝缘套最大变形量减小,对加工叶片的轮廓精度的影响较小。验证了绝缘套设计方法可以避免加工时绝缘套被破坏,以及提高套形电解加工稳定性的有效性。

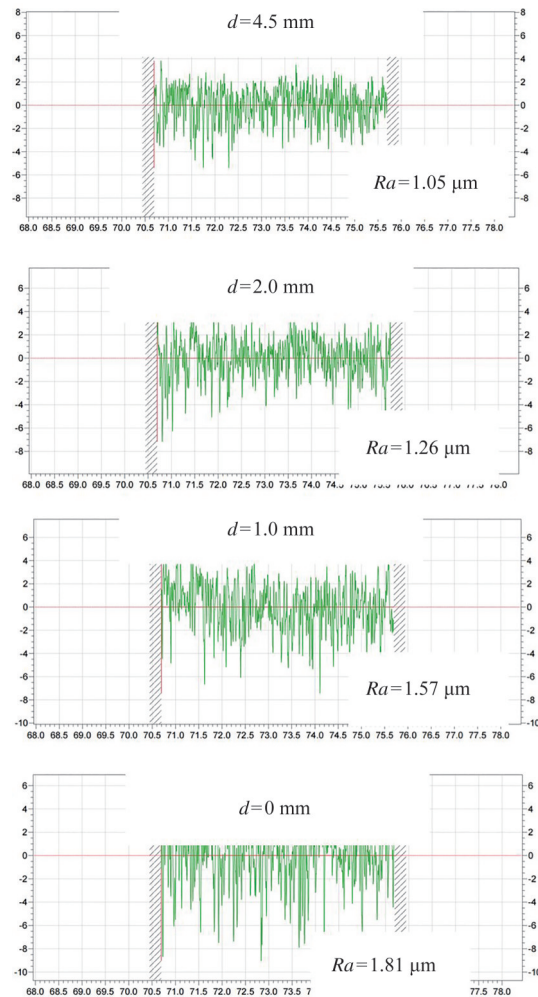


图15 不同加强筋宽度下加工叶片粗糙度检测  
Fig.15 Surface roughness inspection of blades machined with different reinforcement rib widths

2)针对叶片弦长 20 mm、叶片高度 23 mm、叶片厚度 0.54 mm 的薄壁叶片完成了绝缘套结构优化,确定最优加强筋结构参数为加强筋位置为 0 mm,加强筋个数为 1,加强筋宽度为 4.5 mm,相较于加强筋宽度为 0 mm 的绝缘套结构,优化后绝缘套最大变形量从 0.261 mm 减至 0.020 mm,同时保证了稳定的流场。

3)采用不同加强筋宽度的绝缘套结构开展了套形电解加工对比试验,结果表明,优化后的绝缘套结构,加工过程最稳定,电流波动情况最小。同时,采用优化后的绝缘套结构获得的薄壁叶片表面质量相对最优,验证了绝缘套设计方法对提高套形电解加工稳定性的有效性。

#### 参考文献:

- [1] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbomachinery Component Manufacture by Application of Electrochemical, Electro-physical and Photonic Processes [J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 703-726.
- [2] SRINIVAS G, RAGHUNANDANA K, SATISH SHENOY B. Recent Developments in Turbomachinery Component Materials and Manufacturing Challenges for Aero Engine Applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 314(1): 012012.
- [3] BEWLAY B P, WEIMER M, KELLY T, et al. The Science, Technology, and Implementation of TiAl Alloys in Commercial Aircraft Engines[J]. MRS Online Proceedings Library, 2013, 1516(1): 49-58.
- [4] 刘嘉. 提高整体叶盘型面电解加工精度的若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
LIU Jia. Research on Key Technologies to Improve the Electrochemical Machining Accuracy of Aero-engine Blisk [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [5] 朱荻, 刘嘉, 王登勇, 等. 脉动态电解加工[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 1-14.  
ZHU Di, LIU Jia, WANG Dengyong, et al. Pulse Dynamic Electrochemical Machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 1-14.
- [6] 王刚, 赵万生. 涡轮制造技术的现状和发展[J]. 航空工程与维修, 2000(4): 41-43.  
WANG Gang, ZHAO Wansheng. Present Situation and Development of Turbine Manufacturing Technology [J]. Aviation Engineering & Maintenance, 2000(4): 41-43.
- [7] 姜云龙. 埃马克电化学公司关于整体叶盘精密电解加工工艺综述——面向未来的技术[C]//2014年全国电化学加工技术研讨会. 合肥, 2014: 37-43.  
JIANG Yunlong. EMCG ECM GmbH—A PECM Cost-saving Approach to Blisk Manufacturing [C]//2014 Chinese Electrochemical Processing Technology Symposium. Hefei, 2014: 37-43.
- [8] 江晨, 杨波, 吴从焰, 等. 电解加工在航空航天领域的应用研究[J]. 机械制造, 2020, 58(2): 63-66.  
JIANG Chen, YANG Bo, WU Congyan, et al. Study on Application of Electrolytic Machining in Aviation and Aerospace Field[J]. Machinery, 2020, 58(2): 63-66.
- [9] MINAZETDINOV N M. A Hydrodynamic Interpretation of a Problem in the Theory of the Dimensional Electrochemical Machining of Metals[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2009, 73(1): 41-47.
- [10] BHATTACHARYYA B, MALAPATI M, MUNDA J, et al. Influence of Tool Vibration on Machining Performance in Electrochemical Micro-machining of Copper[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 335-342.
- [11] 田继安, 华玉其, 李国宏. 小间隙脉冲电流电解加工工艺试验研究[J]. 电加工, 1985(1): 2-6.  
TIAN Ji'an, HUA Yuqi, LI Guohong. Experimental Study on Small Gap Pulse Current Electrochemical Machining Process[J]. Electromachining & Mould, 1985(1): 2-6.
- [12] JIA Jianli, XU Jiang, PANG Y, et al. Research on Pitting Control Technology of Titanium Alloy Cascade Trepanning Electrochemical Machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(5): 2781-2796.
- [13] TAO Jin, XU Jinkai, REN Wanfei, et al. Research on Multi-physics Field Coupling Dynamic Process in Forward Flow Electrochemical Trepanning Blades [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(10): 103501.
- [14] 秦天天. 空气绝缘辅助套料电解加工关键技术研究[D]. 淮阴: 淮阴工学院, 2024.  
QIN Tiantian. Research on Key Technologies of Air Insulation Assisted Nesting Electrochemical Machining [D]. Huaiyin: Huaiyin Institute of Technology, 2024.
- [15] 翟士民, 张明岐, 黄明涛, 等. 整体叶盘狭小叶栅通道电解旋转套料加工[J]. 电加工与模具, 2020(6): 48-51.  
ZHAI Shimin, ZHANG Mingqi, HUANG Mingtao, et al. Electrochemical Rotating Nesting Machining for the Narrow Cascade Channel of Blisk [J]. Electromachining & Mould, 2020(6): 48-51.
- [16] ZHU Dong, GU Zhouzhi, XUE Tingyu, et al. Simulation and Experimental Investigation on a Dynamic Lateral Flow Mode in Trepanning Electrochemical Machining [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1624-1630.
- [17] JIAO Erhao, ZHU Dong, ZHANG Chao, et al. Research on the Characteristics of Multiphysics Coupling Fields in the Electrochemical Trepanning of an Inward Facing Blisk [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 93: 60-74.
- [18] 李正寅, 朱栋, 张晓博. 扩压器套料电解加工绝缘套结构刚度优化研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 378-386.  
LI Zhengyin, ZHU Dong, ZHANG Xiaobo. Study on Structural Stiffness Optimization of Insulating Sleeve for Electrochemical Trepanning of Diffuser [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 378-386.
- [19] LEI Gaopan, ZHU Dong, LI Jiabao. Optimization of Flow Field in Electrochemical Trepanning of Integral Cascades (Ti<sub>5</sub>Al<sub>4</sub>V) [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(10): 354-364.

(编辑 陈勇)

作者简介:王云森,女,2000年生,硕士研究生。研究方向为电化学加工。朱栋(通信作者),男,1982年生,教授、博士研究生导师。研究方向为电化学特种加工。E-mail:zhudong@nuaa.edu.cn。

#### 本文引用格式:

王云森,朱栋,焦尔豪,等. 整体叶盘套形电解加工绝缘套优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2026, 37(2): 398-405.  
WANG Yunmiao, ZHU Dong, JIAO Erhao, et al. Optimization Method of Insulating Sleeves in Electrochemical Trepanning for Disks [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 398-405.