

电解铣磨加工 GH4169 电场仿真与试验研究

王系众,李寒松,付书星,岳小康,刘洋
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:提出了一种带有锥形凹坑的电解铣磨加工 GH4169 磨轮。电场仿真与加工试验研究的结果表明:采用锥形凹坑磨轮,可使加工沟槽底面不同位置受到的腐蚀更加均匀,改善加工沟槽底面的平整性。

关键词:电解铣磨;锥形凹坑;GH4169;平整性

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0128-03

Electric-field Simulation and Experimental Investigation of Electrochemical Milling-grinding of GH4169 Superalloy

WANG Xizhong, LI Hansong, FU Shuxing, YUE Xiaokang, LIU Yang
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, a tool with conical pit for electrochemical milling-grinding of GH4169 superalloy is proposed. The performance of the slot processed by this tool is investigated based on electric field simulation and experimental research. The results show that the distribution of corrosion on the bottom of the slot is more homogenized and the flatness of the machined slot bottom is improved.

Keywords: electrochemical milling-grinding; conical pit; GH4169; flatness

0 引言

GH4169 合金作为镍基高温合金的一种,因其优良的力学性能、高温性能和耐腐蚀性,常被用于航空航天制造业^[1-2]。但由于其较高的强度和刚度、低导热性和加工硬化,采用传统机械加工时,会产生较大的切削力、较高的加工温度,导致刀具寿命短、加工效率低,因此 GH4169 是典型的难加工材料。电化学加工^[3]通过电化学腐蚀反应去除材料,具有无切削力、无刀具磨损、无热影响等特点,是实现难加工材料高效去除的有效方法。电解铣磨^[4-5]是一种将电解加工和机械磨削结合起来的复合加工。电解铣磨以磨轮作为工具阴极,在加工过程中,材料在电解腐蚀和机械磨削的双重作用下被去除。LI H^[6]等研究了磨粒大小、电压、电解液压力和温度等参数对电解铣磨加工效率的影响,使用直径为 6 mm、切深为 3 mm 的棒状磨轮加工 GH4169,在 180#金刚石磨粒、25 V、35 ℃、0.5 MPa 的条件下,最大进给速度为 2.4 mm/min,材料去除率达到了 355 mg/min。

上述文献中的方法,在加工电压较高时,磨轮对工件已加工表面会造成严重的杂散腐蚀,导致过切量增加,降低了加工精度。同时,磨轮底面会对已加工沟槽的底面造成二次腐蚀,使得沟槽底面呈中间下凹的形状,这是由于

沟槽底面不同位置受到的二次腐蚀的程度不同。如图 1 所示,当磨轮从虚线位置进到实线位置时,参考线上不同位置受到的电解时间不同。 A_0 、 B_0 两点被电解的时间与其对应的线段 A_1 - A_2 、 B_1 - B_2 的长度成正比。因此沟槽底面线段 A_1 - A_2 处受到的电解腐蚀程度最为严重,过切量最大,导致加工出的沟槽形成了中间下凹的形状。

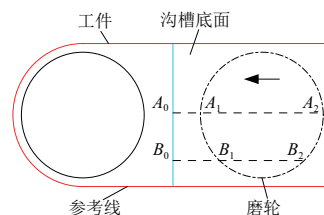


图 1 电解铣磨加工沟槽示意图

为了抑制沟槽底面中部下凹,本文提出了一种电解铣磨锥形凹坑磨轮,通过弱化磨轮底面电场来均化加工沟槽底面上的过切量,提高沟槽底面的平整性。通过电场仿真和试验研究,进行了加工前后效果的对比分析,并使用改进后的磨轮加工出了薄壁特征结构。

1 研究方法

利用 COMSOL 有限元软件对加工过程中磨轮与工件间的电流密度做仿真分析,改进前后的电解铣磨磨轮基体

基金项目:国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111)

第一作者简介:王系众(1994—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为电解加工。

的结构如图 2 所示。

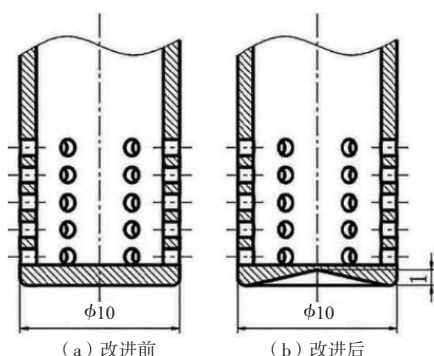


图 2 改进前后磨轮基体结构图

为简化模型和计算过程,忽略了磨粒层以及出液孔,并作出如下假设:

- 1) 加工区域电解液内的电场是无源电场;
- 2) 电场参数仅是空间位置函数与时间无关;
- 3) 加工区域内电解液各向同性且电导率为定值。

根据电场理论,加工区域内电场分布符合拉普拉斯方程:

$$\Delta^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

模型边界条件为:

$$\varphi|_{\Gamma_{1,2}} = U \quad (\text{阳极边界}) \quad (2)$$

$$\varphi|_{\Gamma_{3,4,5,6}} = 0 \quad (\text{阴极边界}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{\Gamma_{7,8,9}} = 0 \quad (\text{其他边界}) \quad (4)$$

其中 n 为边界法向。

图 3 为电场模型结构示意图。

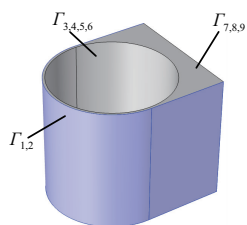


图 3 电场模型结构示意图

1.1 参数设置

仿真分析中,电场模型的各项参数设置如表 1 所示。

表 1 电场仿真参数

参数	数值
电压/V	30
极间间隙/mm	0.2
电导率/(S·m ⁻¹)	10
磨轮基体外径/mm	10

1.2 结果分析

图 4 所示为改进前后加工过程中沟槽底面的电流密

度仿真结果。改进前,沟槽底面的电流密度较大且分布均匀。这是由于沟槽底面与磨轮底部的间距较小,其间的电场强度大。改进后,磨轮底部的锥形凹坑增加了其底面与沟槽底面的间距,减弱了加工间隙内的电场。因此,沟槽底面上发生的二次腐蚀减弱,过切量也减小。其次,由于锥形凹坑的形状,加工间隙沿磨轮边缘向中心方向逐渐减小,使得间隙内的电流密度也沿此方向逐渐减小。沟槽底面上,电流密度最小的区域为磨轮底面边沿;电流密度最大的区域为磨轮底面中心。这与改进前刀具造成沟槽底面的下凹形状相反,即下凹最严重的区域其间电流密度最弱,下凹最轻微处的区域其间电流密度最强。因此,与改进前相比,改进后的电解铣磨锥形凹坑磨轮可使所加工沟槽底面的不同区域受到的二次腐蚀更加均匀,提高了沟槽底面的平整性。

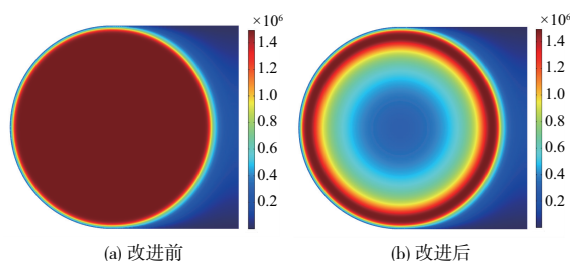


图 4 改进前后沟槽底部电流密度对比

2 实验对比

2.1 实验设置

通过试验对改进后磨轮对加工沟槽底面平整性的提高进行验证。所使用电解铣磨磨轮见图 5。其外径为 10.2 mm,内径为 8 mm,侧壁上均匀分布着 6 列共 30 个出液孔。电解铣磨加工原理如图 6 所示。加工过程中,工件与电源正极相连,磨轮与电源阴极连接。电解液从磨轮内部高速喷出充满加工间隙,连通工件与磨轮并构成回路。数控系统控制磨轮高速旋转和进给运动,对工件进行加工。实验所用电解铣磨加工系统与 NIU S 等人^[7]在研究中使用的系统一致。



图 5 改进前后磨轮实物图

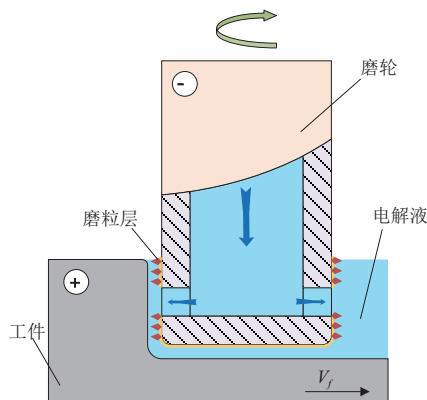


图 6 电解铣磨加工原理示意图

试验所用的加工电压分别为 20 V、25 V 和 30 V,其他加工参数如表 2 所示。

表 2 电解铣磨加工参数

加工参数	数值
电解液浓度	10wt% NaNO_3
电解液温度/ $^{\circ}\text{C}$	30
电解液压力/MPa	0.6
加工长度/mm	25
切深/mm	10

2.2 实验结果

实验首先测量了改进前刀具在各电压下的最大进给速度,结果如表 3 所示。

表 3 最大进给速度

电压/V	最大进给速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
20	1.9
25	2.1
30	2.3

分别使用改进前和改进后的磨轮,在测定的最大进给速度下,在 GH4169 工件表面上加工沟槽。为便于观察加工效果,使用电火花线切割将沟槽从距加工入口 15 mm 处切开,对沟槽的横截面进行观察,结果见图 7。

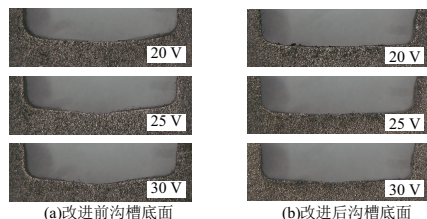


图 7 改进前后加工沟槽形状对比

由图 7 可看出,改进后,沟槽底面中部的下凹得到了明显改善。为了更精确地验证锥坑结构对沟槽底面平整性的改善效果,采用三坐标测量机 (ZEISS CONTURA) 在图示截面处测量了均匀分布的 100 个测量点的槽深,随后计算了加工槽深过切量以及槽深的标准差,结果如图 8 与图 9 所示。由结果可知,使用锥形凹坑磨轮加工沟槽,可

减弱二次腐蚀作用,减小槽深的过切量,同时使得沟槽各部位受腐蚀的量更加均匀,其槽深标准差更小,沟槽底面的平整性更好。

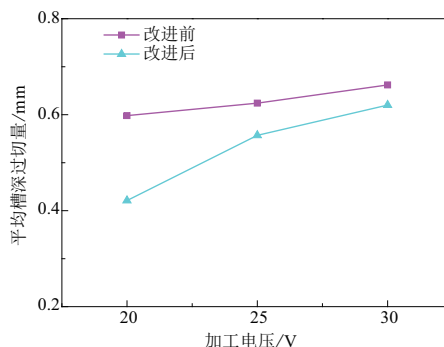


图 8 改进前后平均槽深过切量对比

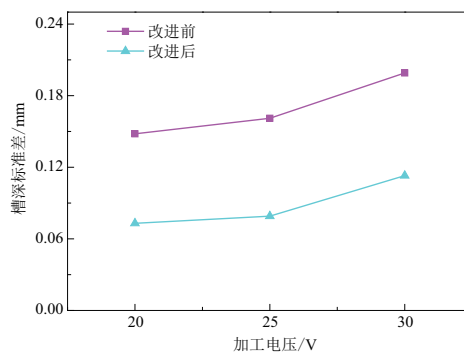


图 9 改进前后槽深标准差对比

使用改进后的电解铣磨锥形凹坑磨轮,加工薄壁结构样件。为了获得较高的加工效率,加工电压为 30 V,其他加工参数与表 2 一致。加工轨迹和结果如图 10 所示。经测量样件中薄壁结构平均厚度为 2.316 mm。

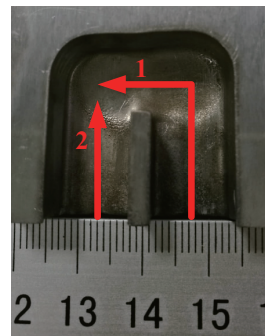


图 10 薄壁结构样件

3 结语

提出一种电解铣磨锥形凹坑磨轮,通过电场仿真与对比实验,得出以下结论:

- 1) 锥形凹坑结构使得加工沟槽底面不同位置受到的二次腐蚀更加均匀。
- 2) 与改进前相比,锥形凹坑磨轮加工的沟槽过切量更小,槽深标准差更小,平整性更好。

(下转第 133 页)

3 加载试验

3.1 试验要求

基于上述分析,对翻转装置开展加载翻转试验,并与理论计算结果进行验证。

根据有限元理论计算应力分布,试验测点位置如图5所示。

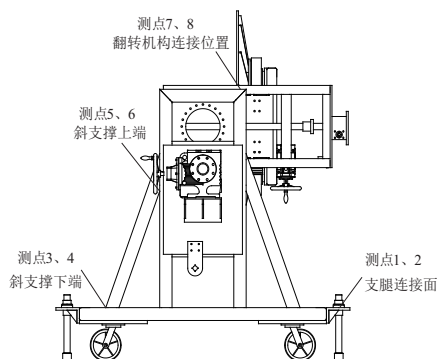


图5 加载测点示意图

a) 试验要求

1) 在翻转装置的支撑面上安装配重,以开展加载翻转试验(注:在加载试验前先进行空载试验以验证翻转过程平稳顺畅);

2) 在图5所示位置布设传感器(精度 $\pm 5\%$,采样频率100 Hz);

3) 操作岗位人员设有试验现场指挥1人、操作岗2人、多媒体记录岗1人及技安岗1人;

4) 试验次数为3次。

试验现场及试验结果见图6及表3。

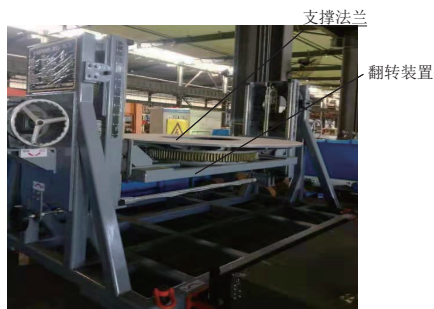


图6 试验现场

表3 试验结果汇总表

名称	测点位置	计算应力值/MPa	实测应力值/MPa
翻转装置	1、2	110.5	117.8
	3、4	97.2	92.6
	5、6	37.4	29.3
	7、8	45.3	53.4

b) 试验主要过程与方法

1) 通过左右两侧操作人员同步匀速地旋转手轮,使翻转组件带动负载进行 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的翻转,待翻转到位后观察产品状态,确认无异常后再翻转归位,如此反复3次。

2) 在翻转过程中,通过在指定位置所贴应变片,记录数据并进行多媒体记录。

3.2 试验结果对比分析

由于传感器自身测量误差、真实试验条件与仿真模型存在少许出入,可认为试验所得数据与理论仿真一致,即所设计的翻转装置结构形式满足实际使用要求。

4 结语

通过对通用翻转装置在翻转过程中所受载荷进行动力学仿真分析,定量计算其在极限工况下的最大转矩值,得出经优化减重后的翻转机构能够满足实际使用工况,最后通过实物加载与翻转试验进一步验证了机构设计的合理性。

实际上通过与在产品连接的法兰处增加转接板,可按要求实现新状态卫星-适配器组合体的翻转功能,若超出翻转力矩范围,可采取额外增加配重的方式加以实现,但应在其防倾覆范围内。

参考文献:

- [1] 王冲. 起竖翻转装置的结构设计与研究[D]. 燕山:燕山大学,2016(5):3-5.
- [2] 杜聿静,王雷. 国内外翻转机发展现状概述[J]. 中国机械,2013(7):202-203.
- [3] 侯健. 某自动补弹系统翻转机构的优化设计[J]. 火力与指挥控制,2013(7):158.
- [4] 李海宁,丁志强. 基于ADAMS的太阳能电池片翻转机构的设计仿真与分析[J]. 装备制造技术,2016(7):261.

收稿日期:2019-11-15

(上接第130页)

参考文献:

- [1] 齐欢. INCONEL 718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程,2012(8):92-100.
- [2] 杜金辉,吕旭东,邓群,等. GH4169合金研制进展[J]. 中国材料进展,2012,31(12):11,12-20.
- [3] 章宇航,房晓龙,曲宁松. GH202材料电解铣削加工特性研究[J]. 电加工与模具,2019(3):47-53.
- [4] 张庆良,汪浩,曲宁松,等. GH4169电解磨削加工试验研究[J]. 电加工与模具,2016(4):21-25.

[5] 叶而康. GH4169合金电解磨削加工试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.

[6] LI H, NIU S, ZHANG Q, et al. Investigation of material removal in inner-jet electrochemical grinding of GH4169 alloy[J]. Scientific Reports,2017,7(1):3482.

[7] NIU S, QU N, LI H. Investigation of electrochemical mill-grinding using abrasive tools with bottom insulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,97:1371-1382.

收稿日期:2019-09-27