

镍基高温合金 GH4169 电解加工残余应力研究

陆嘉文¹, 朱栋¹, 王福平², 任明珠¹, 庞曰群¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国航发动力股份有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对镍基高温合金 GH4169 材料开展电解加工试验, 确定试件在不同电流密度下的材料溶解速度; 开展不同深度下的电解加工试验, 每溶解 10 μm 左右的深度, 测量残余应力, 确定 GH4169 磨削件的残余应力层深度约为 50 μm 。为了避免磨削应力层对结果的影响, 确定电解加工深度约为 180 μm , 开展不同电流密度的电解加工试验。检测分析表明, 不同电流密度下的试件表面残余应力 σ_r 从 -405 MPa ~ -778 MPa 下降到 -65 MPa ~ 103 MPa。

关键词: GH4169; 电解加工; 残余应力; X 射线衍射

中图分类号: TG132.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)06-0014-03

Research on Residual Stress of GH4169 ECM

LU Jiawen¹, ZHU Dong¹, WANG Fuping², REN Mingzhu¹, PANG Yuequn¹

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

Nanjing 210016, China; 2. AECC Aviation Power Co., Ltd, Xi'an 710021, China)

Abstract: As for nickel-based superalloy GH4169 material, electrochemical machining tests were conducted to determine the material dissolution rate of the specimen under different current densities. Electrochemical machining tests at different depths were applied, the residual stress for each dissolution depth of about 10 μm was measured, and the depth of the residual stress layer of the GH4169 grinding parts was determined around 50 μm . In order to avoid the influence of the grinding stress layer over the results, the electrochemical machining depth was determined to be about 180 μm , and electrochemical machining experiments with different current densities were carried out. The test analysis shows that the residual stress σ_r on the surface of the specimen decreases from -405 MPa to -778 MPa to -65 MPa ~ 103 MPa in different current densities.

Keywords: GH4169; electrochemical machining; residual stress; X-ray diffraction

0 引言

镍基高温合金 GH4169 在高温下具有良好的综合性能, 在航空发动机耐热零部件中具有重要的应用^[1]。表面残余应力的大小与发动机核心部件的疲劳寿命密切相关, 是发动机核心部件的一项重要指标^[2]。近年来, 国内外学者对残余应力在镍基高温合金中的分布有广泛的研究, 对铣削^[3]、磨削^[4-5]、激光^[6]、电解复合磁力研磨^[7]等加工工艺所产生的残余应力都开展了相关研究。

X 射线衍射法由于其无损性、操作便捷、速度快、准确度高, 被广泛应用于残余应力的测量^[8-9]。X 射线衍射法结合电解加工方法测量金属深度方向的残余应力在国内外早有研究。SAHIN F 等设计了一种用剥层法测量永磁体零件残余应力的电化学加工装置^[10]。商执亿设计了一套电解加工腐蚀实验装置, 满足高速钢残余应力测量的需要^[11]。杜吉星等通过电化学剥层装置, 对铣削铝合金板表层进行残余应力的测量^[12]。

残余应力是加工表面的一个重要参数, 其大小受加工参数影响。而电解加工中, 电流密度对试件表面质量影响较大^[13-14], 因此分析电流密度对残余应力的影响对实际电解加工中电流密度的选取有一定的参考价值。本文针对 GH4169 磨削试件, 采用自主搭建的电解加工实验平台, 开展电解加工实验, 控制表层微量去除, 利用 X 射线残余应力分析仪测量不同深度以及不同加工电流密度下的 GH4169 试件, 研究电流密度对残余应力的影响。

1 试验及检测装置

1.1 试验装置

电解加工是一种阳极溶解的加工方式, 溶解速度与电流密度大小有关。

试验在自主搭建的电解加工系统中开展(图 1), 夹具采用环氧树脂材料, 具有良好的绝缘性和刚性, 工具阴极与工件阳极之间能保持 0.5 mm 的初始加工间隙。电源

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91860135); 国家科技重大专项(2017-VII-0004-0097); 南航研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj20190510)

第一作者简介: 陆嘉文(1995—), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向为电解加工技术。

采用 6 kW 的直流稳流电源,实验平台可控制加工过程中的压力、流量、温度和电解液纯度的稳定性。

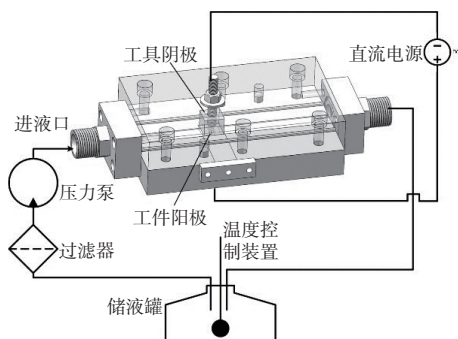


图1 电解加工试验装置示意图

试件选用 GH4169 材料,测定材料的密度为 8.11 g/cm^3 ,试件上表面进行磨削处理,电解表面尺寸为 $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,高度 10 mm (图2)。试件上表面与固定块流道面齐平,保证加工过程中产物的及时排出。

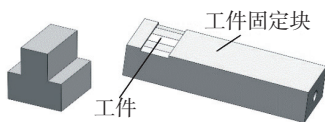


图2 GH4169 磨削件及其安装定位块

1.2 检测装置

试验采用日本某公司的 μ -X360 型 X 射线残余应力分析仪(图3)。X 射线残余应力分析仪是基于布拉格方程的测量分析仪器,其参数设置与材料有关。本文采用的试件材料为 GH4169,选取镍合金模块。测量时用工装夹具安装试件,确保每次测量的位置相同。

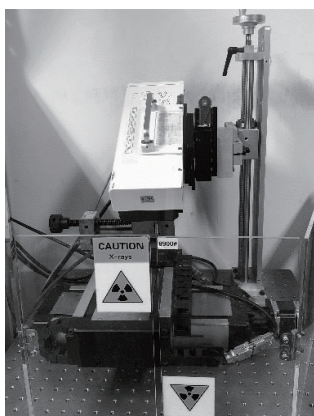


图3 μ -X360 型 X 射线残余应力分析仪

2 试验与分析

电流密度是电解加工的主要加工参数之一,故本文开展不同电流密度下电解加工试验,分析不同参数对试件表

面残余应力的影响。

开展不同电流密度下的电解加工试验,需要考虑两方面因素(图4):1)排除磨削表层残余应力的影响。由于 GH4169 毛坯试件采用磨削制造,故表层存在磨削残余应力层。开展电解加工后的残余应力测定,材料去除深度必须高于该应力层的深度。因此,需要开展实验测定磨削应力层的深度。2)不同电流密度下的电解加工深度一致。加工深度取决于材料溶解速度和加工时间,当不同电流密度下的材料溶解速度确定时,可通过控制加工时间来保证加工深度相同。因此,需要开展实验测定不同电流密度下的材料溶解速度。

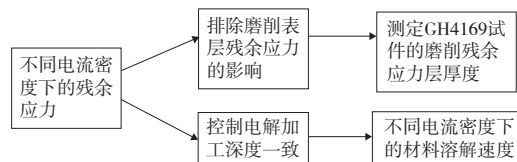


图4 电解加工试验策略

2.1 不同电流密度材料溶解速度测定

针对镍基高温合金材料,开展相同加工时间下不同电流密度的电解加工试验,确定不同条件下的阳极溶解速度。

试验所采用的电解液选用质量分数为 20% 的硝酸钠溶液,电解液初始温度为 27°C 。考虑到电源的功率问题,电流密度选取区间为 $2.5 \sim 95 \text{ A/cm}^2$,通电时间取 40 s 。

加工前表面为磨削平面,忽略电解加工中沿流程的温升、气泡等因素的影响,假设电解加工后的试件加工面为面积不变的平面,故可以采用加工前后的质量差来换算加工深度:

$$h = \frac{\Delta m}{\rho S} \times 1000.$$

其中: h 为加工深度, μm ; Δm 为加工前后的质量差, g ; ρ 为材料密度; S 为电解加工平面的截面积,取 0.5 cm^2 。

在加工时间相同的情况下,开展了电流密度为 $2.5 \sim 95 \text{ A/cm}^2$ (步长为 5 A/cm^2) 的电解加工试验,测得了试件加工前后的质量差 Δm ,通过深度换算公式得到试件的加工深度(图5)。深度随电流密度的增加而增长,当加工时间为 40 s ,电流密度为 95 A/cm^2 时,加工深度为 $883.1 \mu\text{m}$ 。

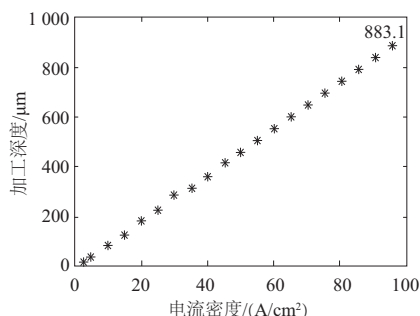


图5 相同时间、不同电流密度下工件的加工深度

在相同加工时间下,材料溶解速度与加工深度成正比。通过计算,得到 $10 \sim 80 \text{ A/cm}^2$ 的材料溶解速度(表

1)。在加工深度确定的情况下,通过不同电流密度下的材料溶解速度,可得到相应的加工时间。

表 1 不同电流密度下工件的材料溶解速度

电流密度/(A/cm ²)	10	20	30	40
材料溶解速度/(μm/s)	2.23	4.62	7.22	9.15
电流密度/(A/cm ²)	50	60	70	80
材料溶解速度/(μm/s)	11.52	13.87	16.27	18.71

2.2 GH4169 磨削试件残余应力层深度测定

GH4169 磨削试件存在磨削残余应力层,确定应力层深度对研究不同电流密度下的残余应力至关重要。

磨削试件的应力层深度一般在几十到几百 μm 之间。为了确定试件残余应力层深度,采用表层微量去除的方法获得试件沿深度方向的残余应力值。针对同一试件,每次电解加工 10 μm 左右的深度,测量试件加工面的残余应力值。在 20 A/cm² 电流密度下电解加工的试件表面质量较好,选用 20 A/cm² 作为试验的电流密度值。由 20 A/cm² 时的材料溶解速度,可以得到试件溶解 10 μm 深度所用时间约为 2 s。当试件溶解后的残余应力值稳定于较小绝对值范围内后,适当增加溶解深度。共进行了 6 次 2 s、3 次 4 s 和 2 次 6 s 的电解加工试验,总加工时长为 36 s。通过对电解加工后的试件进行测量计算,得到每次试验后试件的总溶解深度(表 2)。

表 2 同一试件不同总加工时间的总溶解深度

加工次数	总加工时间/s	总溶解深度/μm
1	2	10.60
2	4	22.19
3	6	33.04
4	8	44.13
5	10	54.73
6	12	66.07
7	16	85.06
8	20	104.81
9	24	124.29
10	30	153.39
11	36	182.74

用 X 射线残余应力分析仪对每次加工后的试件进行测量(图 6),随着加工深度的增加,残余应力 σ_x 逐渐减小,然后稳定在较小绝对值范围内,应力分布符合 GH4169 磨削件残余应力分布规律。当加工深度 > 50 μm 时,残余应力 σ_x 基本稳定,应力层深度约为 50 μm。

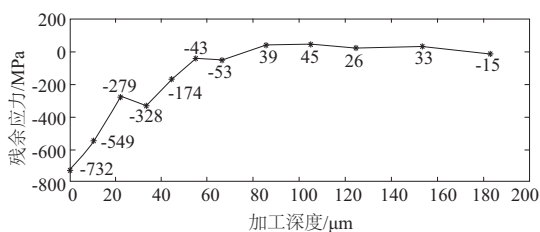


图 6 同一工件不同加工深度下的残余应力

2.3 电流密度对残余应力的影响

为消除 GH4169 磨削试件表层残余应力的影响,控制电解加工深度远大于残余应力层深度,取溶解深度为 180 μm 左右。通过不同电流密度下的材料溶解速度,确定 10~80 A/cm² 下的加工时间为 80 s、40 s、26.7 s、20 s、16 s、13.3 s、11.4 s 和 10 s,控制电解加工深度一致。对电解加工试验后的试件进行测量计算,得到试件的实际溶解深度(表 3),溶解深度有效控制在 180~190 μm 范围内。

表 3 不同电流密度的溶解深度

电流密度/(A/cm ²)	10	20	30	40
溶解深度/μm	182.2	184.7	185.4	187.2
电流密度/(A/cm ²)	50	60	70	80
溶解深度/μm	187.7	186.4	189.9	189.9

通过 X 射线残余应力分析仪对不同电流密度下电解加工前后试件的残余应力 σ_x 进行测量(图 7),各工件的初始残余应力 σ_x 在 [-405, -778] MPa 区间范围内,表面存在较大残余压应力。在不同电流密度下电解加工后,表面残余应力 σ_x 范围减小到 [-65, 103] MPa,残余压应力数值大大减小。不同电流密度下电解加工试件的残余应力 σ_x 波动较小,可认为电解加工不引入附加残余应力。

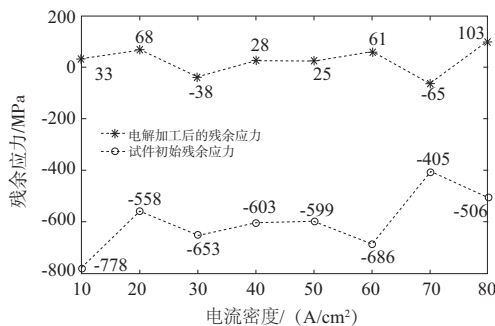


图 7 不同电流密度相同深度加工前后残余应力对比

3 结语

本文针对镍基高温合金 GH4169 开展不同电流密度和溶解深度的电解加工试验。根据试验和检测结果,可以得到以下结论:

- 1) 使用的 GH4169 磨削件的残余应力层深度为 50 μm 左右。
- 2) 开展不同电流密度下、材料溶解深度约为 180 μm 的电解加工试验,试件残余应力 σ_x 从磨削表面的 [-405, -778] MPa 下降到电解加工后的 [-65, 103] MPa,残余应力 σ_x 数值减小;不同电流密度下加工试件表面残余应力 σ_x 数值波动较小,可认为电解加工不引入附加残余应力。

参考文献:

- [1] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册 第 7 卷[M]. 2 版. 北京:中国标准出版社,2002.
- [2] 王聪梅. 航空发动机典型零件机械加工[M]. 北京:航空工业出版社,2014:207.

(下转第 20 页)

关,与长径比一样,随着偏心率的增加导致油膜压力迅速攀升,油膜的气穴效应逐渐显现出来。正压区域也随之逐步扩大,油膜形成位置随相位的超前现象越来越明显,油膜最大正压的形成位置也越来越靠近间隙最小处。这说明随着偏心率的增加,发散区域的滑油逐步聚集流入到收敛区域,最小间隙处的滑油挤压效应越来越明显,而其他周向位置处则表现出弱挤压。

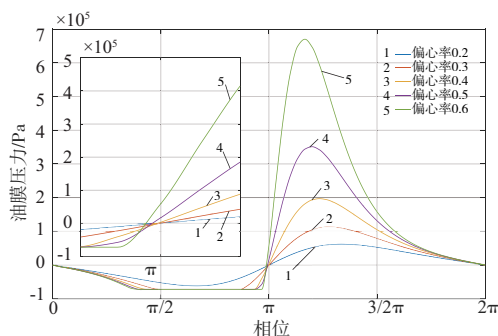


图6 不同动偏心率下SFD轴向中心的油膜压力分布

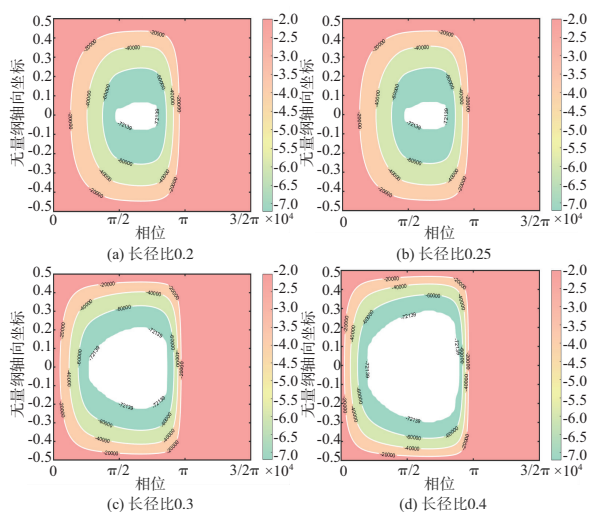


图7 不同动偏心率下SFD轴向中心的油膜气穴区域分布

3 结语

本文通过数值计算和实验的方法,获取了SFD在质量守恒边界下的油膜分布特性和动力学系数,结果表明:

1) 气穴的存在对油膜的形成在相位上具有超前的作用,它使得正压区得到了扩展,当油膜压力达到气穴压力时不再降低,而是保持为气穴压力。同时气穴还对油膜切向力具有一定程度的提高,这使得油膜阻尼也得到了提升,有利于转子系统在工作过程中的振幅抑制。

2) 质量守恒边界与阻尼器的实际工作状态最为接近,它不仅提供了油膜的破裂条件,而且在油膜形成处也满足质量流量连续条件,能较好地阻尼器在运转过程中的气穴以及油膜承载力反映出来。本文改进的算法进一步提高了气穴油膜的压力分布精度。

参考文献:

- [1] 杨金福,刘占生,解永波,等. 关于 Reynolds 方程求解的动态边界条件研究[J]. 黑龙江电力,2004,26(5):346-349,351.
- [2] 刘占生,张敏,徐方程,等. 基于两端开口的有限长挤压油膜阻尼器的试验研究[J]. 振动与冲击,2012,31(18):137-142.
- [3] 周海仑. 含浮环式挤压油膜阻尼器的转子系统动力特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [4] 张康. 含浮环式挤压油膜阻尼器结构与动力特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [5] 吴承伟,郑林庆. 关于雷诺方程气穴边界条件的若干问题[J]. 润滑与密封,1988,13(2):10-14.
- [6] 苏荻,王小静,张直明. 动载工况下滑动轴承油膜边界历史迁移问题[J]. 机械工程学报,2006,42(4):8-12.
- [7] 杨莹. 螺旋油楔滑动轴承空穴特性的理论与实验研究[D]. 济南:山东大学,2010.
- [8] JAKOBSSON B. The finite journal bearing, considering vaporization[J]. Transactions of Chalmers University of Technology, 1957, 190: 1-116.
- [9] ELROD H G. A cavitation algorithm[J]. Journal of Lubrication Technology, 1981, 103(3):350-354.

收稿日期:2020-11-10

(上接第16页)

- [3] 李锋,李亚胜,刘维伟,等. GH4169 高速铣削加工残余应力分布规律试验[J]. 表面技术,2016,45(12):199-203.
- [4] 高世民,全芳. GH4169 材料磨削后数控抛光表面残余应力分析[J]. 航空制造技术,2017,60(7):97-100.
- [5] 韩俊峰,梁军华,李健,等. GH4169 高温合金试件成形磨削表面残余应力研究[J]. 装备制造技术,2020(3):137-138,142.
- [6] 吕沃耘. 激光冲击强化对 GH4169 加工表面完整性和疲劳寿命的影响[D]. 济南:山东大学,2019.
- [7] 谭悦,陈燕. 电解复合磁力研磨 GH4169 管内表面的光整研究[J]. 电镀与精饰,2020,42(1):27-32.
- [8] 张定铨,何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [9] 刘金艳. X 射线残余应力的测量技术与应用研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
- [10] SAHIN F, KAFKAS F, KARATAS C. An electrochemical

machining device for residual stresses measurement in PM parts by layer removal method[J]. Materials Science Forum, 2011, 672:117-120.

- [11] 商执亿. 电解腐蚀在高速钢残余应力测量中的应用[J]. 工具技术,2015,49(7):104-106.
- [12] 杜吉星,杨吟飞,朱金鹏,等. 面向应力剥层测量的铝合金电解工艺研究[J]. 工具技术,2019,53(7):50-55.
- [13] YANG Y J, ZHU D, LU J W. Surface morphology analysis of 1Cr 11 Ni 2 W 2 MoV steel subjected to electrochemical machining in NaNO₃ solution [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(4):043504.
- [14] JIANG T, ZHU D, LEI G P. Electrochemical trepanning with an auxiliary electrode [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5):183-194.

收稿日期:2020-11-11