

引用格式: 张晓静, 陈小龙, 李永华, 等. 钨的电场与流场协同精整技术研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(9): 868-873.

ZHANG X J, CHEN X L, LI Y H, *et al.* Research on Synergistic Finishing Technology of Electric Field and Flow Field of Tungsten[J]. Materials China, 2025, 44(9): 868-873.

钨的电场与流场协同精整技术研究

张晓静¹, 陈小龙¹, 李永华¹, 常辉^{1,2}, 王红伟¹

(1. 南京尚吉增材制造研究院有限公司, 江苏 南京 210046)

(2. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 使用电场与流场协同精整(EFSF)技术对钨试样进行表面抛光。采用金相显微镜、表面粗糙度仪、千分尺、光泽度仪、显微硬度计分别表征了样品表面形貌、表面粗糙度、试样厚度、表面光泽度及表面硬度。结果表明: EFSF技术能够显著改善钨的表面品质, 使其表面粗糙度 Ra 可以达到 $0.154\ \mu\text{m}$, 光泽度达到223.1 GU, 获得较好的镜面加工效果。但是EFSF技术存在表面品质改善阈值, 当粗糙度降低到一定程度(如 $Ra < 0.3\ \mu\text{m}$)时, “粗糙度改善/材料损耗”性价比偏低。同时, EFSF技术可以获得低应力且表面硬度稳定的高品质加工表面, 当加工时间 $>10\ \text{min}$ 后, 表面硬度基本稳定在228.4 MPa。EFSF技术可以实现对钨的高镜面、低损伤、低应力表面抛光, 为钨的高品质、绿色表面精整处理提供了一种新选择。

关键词: 钨; 电场与流场协同精整技术; 表面形貌; 表面粗糙度; 试样厚度; 表面光泽度; 表面硬度

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)09-0868-06

Research on Synergistic Finishing Technology of Electric Field and Flow Field of Tungsten

ZHANG Xiaojing¹, CHEN Xiaolong¹, LI Yonghua¹, CHANG Hui^{1,2}, WANG Hongwei¹

(1. SHANGI Institute for Advanced Materials(Nanjing)Co., Ltd., Nanjing 210046, China)

(2. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Synergistic finishing technology of electric field and flow field (EFSF) was used to polish tungsten sample. Surface morphology, surface roughness, sample thickness, surface glossness and surface hardness were analyzed by metallographic microscope, surface roughness meter, micrometer, gloss meter and microhardness tester. The results show that EFSF technology can significantly improve the surface quality of tungsten. It can obtain a high-mirror surface with roughness of $0.154\ \mu\text{m}$ and glossness of 223.1 GU. However, EFSF technology has a surface quality improvement threshold. When the roughness is reduced to a certain level (such as $Ra < 0.3\ \mu\text{m}$), the cost-effectiveness of “roughness improvement/material loss” is relatively low. At the same time, EFSF technology can obtain a high-quality surface with low stress and stable surface hardness. After processing for >10 minutes, the hardness is basically stable at 228.4 MPa. So EFSF technology can achieve high-mirror, low-damage, low-stress polishing surface of tungsten. This paper provides a new option for high-quality and environmentally friendly surface finishing of tungsten.

Key words: tungsten; EFSF technology; surface morphology; surface roughness; sample thickness; surface glossness; surface hardness

收稿日期: 2024-04-12 修回日期: 2024-06-06

基金项目: 2023年南京市重大科技专项(综合类)(202309016)

第一作者: 张晓静, 女, 1988年生, 工程师

通讯作者: 陈小龙, 男, 1987年生, 工程师,

Email: chenxl@nj-sam.com

常辉, 男, 1969年生, 教授, 硕士生导师,

Email: ch2006@njtech.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404017

1 前言

钨具有密度大、硬度高、熔点高、导热性好、高温强度高以及化学稳定性好等特性^[1-4], 是制造高温喷嘴、隔热屏、防散射栅格、陀螺仪转子、医疗微创针、准直器、插塞等的理想材料, 广泛应用于国防军工、航空航天、核工业、生物医药、集成电路等领域^[3-6]。钨产品常见成型方式有轧制、烧结、切削、增材制造等^[1, 7-9], 所得毛坯

表面往往存在印痕、裂纹、凹坑、凸点等表面缺陷，需要经过抛光等表面处理后才能实际应用。但由于钨硬脆性大，对磨削刀具损伤大，磨削加工时产品表面易出现亚表面裂纹、脆性断裂及应力残留等，导致加工后产品表面品质不佳^[9, 10]，因此常规打磨、机加工等机械磨削方式抛光钨时往往存在加工速度慢、品质差及成本高的问题。同时，钨耐蚀性好，单纯化学抛光很难加工钨，化学机械抛光和电化学抛光虽然可以用于加工钨^[2, 5]，但均无法避免使用强酸强碱等毒害性化学物质，环保性差^[11-13]。开发

一种适用于钨的高品质绿色抛光技术的工程实用价值高。

电场与流场协同精整 (synergistic finishing technology of electric field and flow field, EFSF) 技术是南京尚吉增材制造研究院有限公司开发的一种电场和流场协同作用的复合抛光技术。在工作过程中，工作槽装载特定电解液并连接电源负极，工件连接电源正极并浸没在溶液中，通过调节加工工艺在工件表面产生高能粒子团并利用其爆破的瞬时能量冲击产品表面，从而实现产品表面平整化，工作原理如图 1 所示。

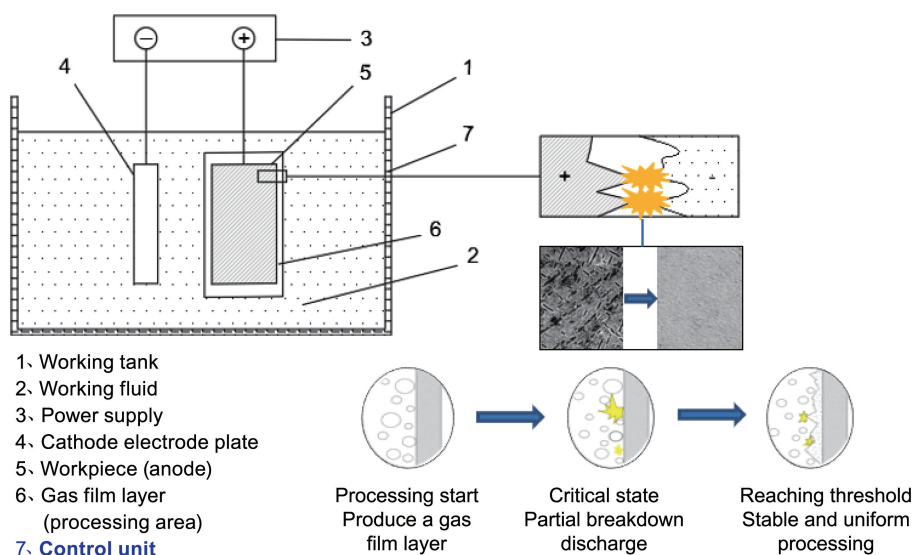


图 1 电场与流场协同精整技术工作原理

Fig. 1 Principle of synergistic finishing technology of electric field and flow field

从工作原理看，EFSF 技术具有如下特点：① 绿色环保。EFSF 技术加工能量主要来源于工作电场和流场，而非化学物质的腐蚀作用，因此其电解液可为中性盐溶液，环保性好。② 表面品质好。同样得益于加工能量来源的独特性，EFSF 技术无需传统打磨、机加工等刚性磨削方式所需的硬质磨削工具，属于“以柔克刚”加工方式，故其加工表面也不存在因刚性磨削造成的加工损伤、残余应力等缺陷，表面完整度高，应力低甚至无应力，表面品质好。③ 适用产品结构范围广。因高能离子团是紧贴工件表面产生的，故 EFSF 技术仿形性好，可以实现对复杂结构产品的各向同时加工，属于全包围式的均匀加工技术，因此其适用产品结构范围很广，不像化学机械抛光仅适用于平坦表面或简单曲面，同时也不像电化学抛光为保证异形结构加工均匀性而必须要求匹配的阴极结构设计。④ 操作便利。不同于化学机械抛光、电化学抛光对样品加工前表面状态(如粗糙度、洁净度等)均有严格要求，EFSF 对加工样品表面状态无特殊要求，无除油除杂等复杂前处理需要，且理论上样品表面粗糙度

越高，EFSF 去除效率越高，表面品质改善效果越明显。再结合前述特点可知，EFSF 技术无前处理、环保处理及特殊阴极设计需求。因此基于 EFSF 技术的原理，可以便捷地设计出集成化自动化加工装备，且该装备操作简单，使用便利。

鉴于以上特点，若能 EFSF 技术引入到钨表面抛光中，就可以解决硬脆材料刚性磨削加工难的问题，不仅能获得高品质加工表面，同时也能继承 EFSF 技术环保性好、适用产品结构范围广、操作便利等优势。但目前尚未见到将 EFSF 技术用于抛光钨的相关报道。本文利用 EFSF 技术对钨进行表面抛光，对比分析加工前后钨试样的表面形貌、表面粗糙度、试样厚度、表面光泽度及表面硬度变化，以期钨的高品质绿色表面抛光提供一种新方法。

2 实验

2.1 实验材料

实验使用河北展墨金属材料有限公司生产的 100 mm×

100 mm×2 mm 商用纯钨板, 纯度≥99.950%, 表面粗糙度 R_a 约为 1.229 μm , 钨板的化学成分如表 1 所示。将实验钨板线切割成尺寸为 20 mm×10 mm×2 mm 的试样, 并用酒精和超声波清洗干净。实验电解液为南京尚吉增材制造研究院有限公司特制的水溶性盐溶液, pH 值接近 7, 绿色环保。

2.2 实验仪器和方法

抛光设备为南京尚吉增材制造研究院有限公司生产的 SFM20D-T 型 EFSF 自动抛光设备, 不锈钢加工槽为阴极, 钨试样作为阳极与设备正极连接, 并浸没在特制环保抛光液中。抛光液温度为 80 $^{\circ}\text{C}$, 抛光电压为 300 V,

抛光电流为 200 A, 抛光时间分别为 5, 10, 15, 20, 25 和 30 min。EFSF 抛光后对试样进行纯水超声波清洗, 并用气枪吹干试样表面。

采用 CX40M 型金相显微镜表征试样的表面形貌特征, 采用 TR210 手持式表面粗糙度仪测量试样表面粗糙度, 采用千分尺测量试样厚度, 采用 HG60 型光泽度仪测量试样表面光泽度(测量角度为 60 $^{\circ}$), 采用 Touch Vicker-1000A 型单点自动显微硬度计测量试样表面硬度(金刚石四棱锥体夹角为 136 $^{\circ}$, 试验力为 0.01 kg)。为减小数据测量偏差对测试结果的影响, 所有数据均为测量 5 次结果的平均值。

表 1 钨板的化学成分

Table 1 Chemical compositions of tungsten sheet ($w/\%$)

Element	W	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Mo	Ni	N	C
Composition	≥99.950	0.003	0.005	0.002	0.002	0.003	0.006	0.003	0.003	0.004

3 结果与讨论

3.1 表面形貌

图 2 为抛光时间分别为 0, 5, 20 和 30 min 的钨试样表面照片。由图 2 可知, 未加工前, 试样表面整体覆盖一层灰黑色的氧化层, 存在非常明显的切割研磨纹路、划伤、裂纹等缺陷。经过 5 min EFSF 加工后, 钨试样表面灰黑色氧化层被去除干净, 切割研磨纹路明显淡化, 同时表面光亮度明显增加, 已能够映照出完整的标识, 但图像清晰度不高。随着加工时间延长, 表面缺陷进一步淡化、消失, 镜面效果逐渐加强。当加工时间延长至 30 min 时, 已经呈现出较好的镜面效果。

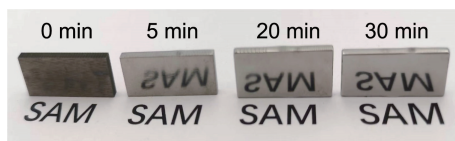


图 2 不同时间抛光后钨试样的表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of tungsten samples polished with different time

图 3 为抛光时间分别为 0, 5, 20 和 30 min 的钨试样的 SEM 照片。由图可知, 未加工前, 钨试样表面的划痕又深又长, 坑洞、裂纹密布, 缺陷非常严重。随着加工时间延长, 表面划痕逐渐被削平, 坑洞、裂纹逐渐缩小、消失, 表面逐渐变平坦, 与图 2 中的表面形貌特征变化趋势一致。

图 4 为钨试样的 100 倍显微照片的剖面曲线。可见, 随着加工时间延长, 试样表面裂纹层逐渐变浅, 表面

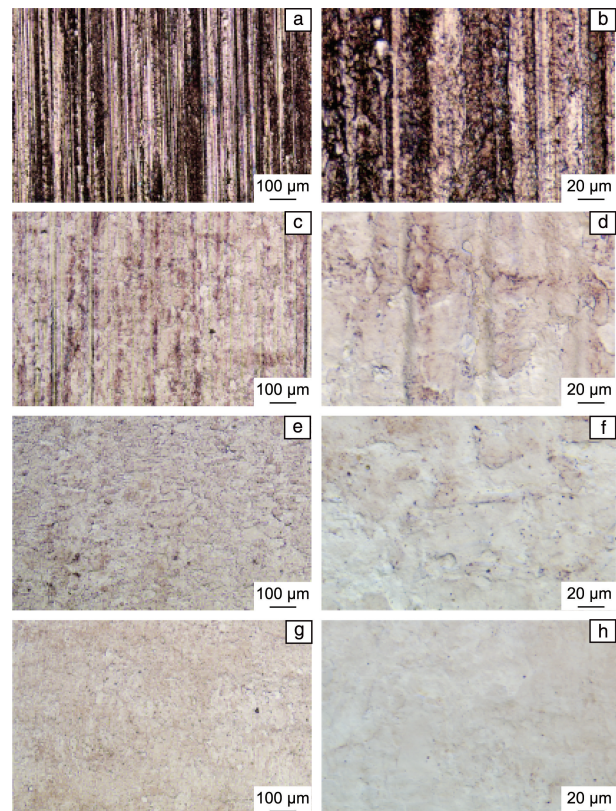


图 3 不同时间抛光后钨试样的微观形貌: (a, b) 0 min, (c, d) 5 min, (e, f) 20 min, (g, h) 30 min

Fig. 3 Micromorphology of tungsten samples polished with different time: (a, b) 0 min, (c, d) 5 min, (e, f) 20 min, (g, h) 30 min

起伏减小, 整个表面趋于平坦, 亦佐证了钨试样表面品质随着加工时间延长而逐渐变好的趋势。

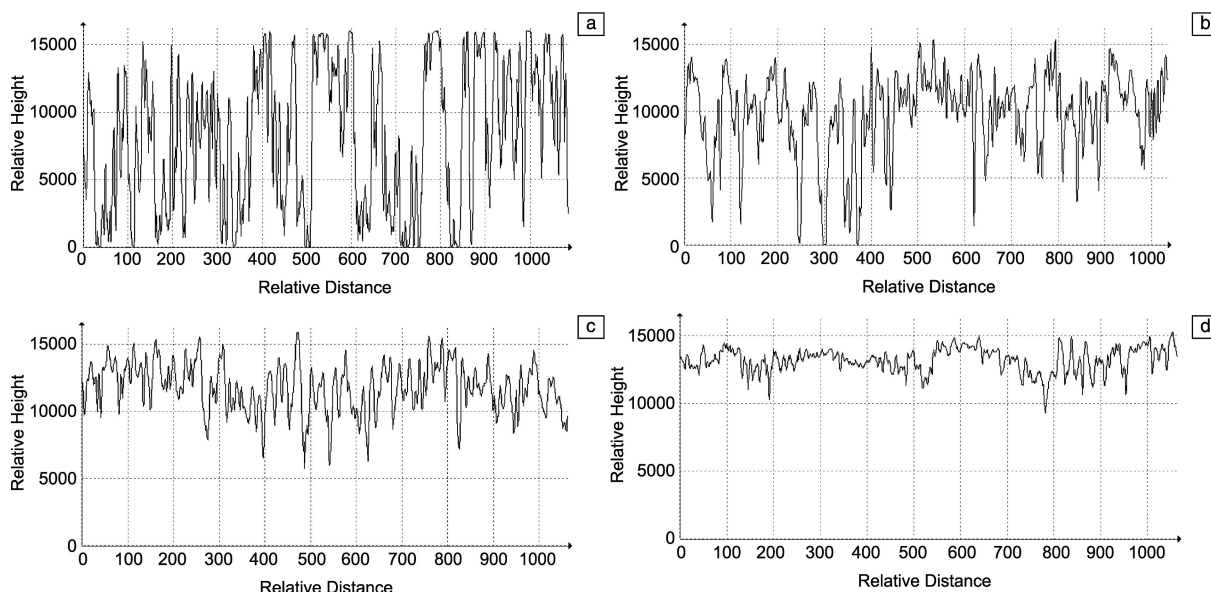


图 4 100 倍显微镜下不同时间抛光后钨试样的剖面曲线：(a)0 min, (b)5 min, (c)20 min, (d)30 min

Fig. 4 Profile curves of tungsten samples polished with different time under 100× microscope: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 20 min, (d) 30 min

3.2 表面粗糙度

图 5 为不同抛光时间下钨试样的表面粗糙度。由图可知，随着加工时间延长，钨试样表面粗糙度下降，且下降趋势逐渐变缓。钨试样原始表面 R_a 为 $1.229 \mu\text{m}$ ，经过 5 min 的 EFSF 加工后快速降低至 $0.663 \mu\text{m}$ ，下降幅度达 46%，即 EFSF 加工早期表现出粗糙度快速下降的特征。

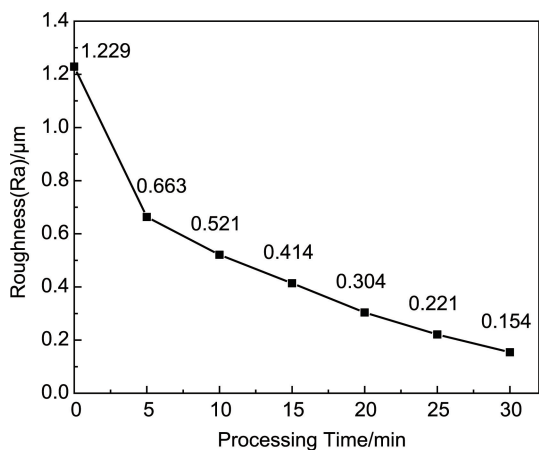


图 5 不同时间抛光后钨试样的表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of tungsten samples polished with different time

EFSF 技术本质上是一种电场与流场协同作用下的气团爆破整平技术，试样尖端和凹点同时受到气团爆破力冲击而逐渐被剥离整平。但试样尖端微区的电场强度大，流场运动阻碍少，气团爆破更密集，故试样尖端比凹点整平速度更快，也正是尖端和凹点的剥离去除速度差异使得产品表面趋于平整。也即 EFSF 加工具有明显尖端效应特征，且尖端越尖锐“削峰”速度越快。由于原始试样

表面粗糙度最大，尖端最多最尖锐，“削峰”速度最快，同时凸点与凹点去除速度差最大，故 EFSF 加工早期粗糙度下降最快。而后随着加工时间延长，虽然尖端效应仍然存在，但因原始尖端已被削低、磨圆，尖锐度明显下降，故“削峰”速度放缓，尖端和凹点去除速度差值变小，故表面粗糙度下降速度变慢。当加工时间从 25 延长到 30 min 时， R_a 从 0.221 降低至 $0.154 \mu\text{m}$ ，粗糙度改善较小，这是因为 EFSF 加工 25 min 的试样表面平整度已非常高 (R_a 为 $0.221 \mu\text{m}$)，尖端效应很弱，此时试样表面凸点与凹点的去除速度差非常小，平整化作用弱，故此时表面粗糙度改善极小。

3.3 试样厚度

图 6 为不同抛光时间下钨试样的厚度变化结果。由图可知，钨试样厚度随着加工时间延长而逐渐下降。与表面粗糙度变化趋势类似，EFSF 加工早期 (0~5 min) 试样厚度也表现出快速下降的特征，平均去除速率达到 $4.6 \mu\text{m}/\text{min}$ 。这也主要得益于原始尖锐尖端的快速“削峰”，使得试样表面轮廓被快速向下推移。而后 (5~30 min)，试样厚度下降趋势接近线性，平均去除速率约 $2.36 \mu\text{m}/\text{min}$ ，这与表面粗糙度随着加工时间延长而下降趋势渐缓的变化特征不同。这是因为两者考察重点不同，表面粗糙度是表面上各点偏距绝对值的算术平均值，表征的是表面轮廓的凹凸特征；而厚度变化则表征的是气团爆破冲击造成的材料剥离损耗量大小。试样表面轮廓中的凹点位置由于本身钝化特征明显，“削峰”作用弱，钝化度变化极小，甚至不变，故随着加工过程进行其气团爆破频率基本恒定，单位时间内造成的材料去除量基

本恒定,所以凹点向下推移的速度基本恒定。而原始尖端在经过加工早期快速“削峰”之后明显钝化,气爆频率明显降低,故其材料剥离去除量也明显减少,尖端向下推移的速度明显变慢。当尖端向下推移的速度降低至接近凹点向下推移速度时,整个表面轮廓开始近均匀地向下推移,故加工一段时间后,试样厚度会以近恒定速度减小,因此随着加工时间延长,试样厚度表现出近线性下降特征。

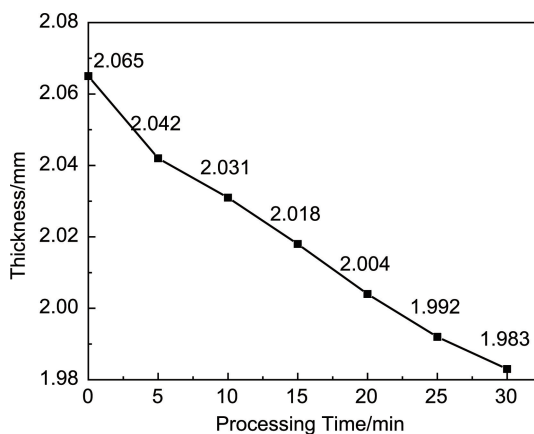


图 6 不同时间抛光后钨试样的厚度

Fig. 6 Thickness of tungsten samples polished with different time

结合试样表面粗糙度变化曲线和厚度变化曲线可知,钨试样经过一段时间 EFSF 加工后,虽然厚度会不断减小,材料不断被损耗,但粗糙度改善速度逐渐变慢,无限延长加工时间,会造成材料损耗和加工成本持续升高,但不能持续改善产品表面品质。因此 EFSF 加工钨存在表面粗糙度极限值,当产品表面粗糙度达到这个改善阈值时(如 $Ra < 0.3 \mu\text{m}$),继续加工,则粗糙度改善速度变得极慢,此时“表面粗糙度改善/材料损耗”性价比会逐渐降低。实际工程应用时,需要综合考量表面品质、材料损耗及加工成本等因素,才能获得最优工艺方案。

3.4 表面光泽度

图 7 为不同抛光时间下钨试样的表面光泽度变化结果。由图可知,随着加工时间延长,钨试样表面光泽度逐渐升高,且随着加工时间延长表面光泽度升高速率变慢。未加工前,钨试样表面光泽度仅 9.5 GU,加工 5 min 后迅速升高至 145.9 GU,而后逐渐升高,30 min 后光泽度最高,达到 223.1 GU。对比表面粗糙度变化曲线可知,两者变化趋势一致,这是因为光泽度表征的是材料表面对光的镜面反射能力,随着表面高度起伏均方差在小于波长的范围内增大,表面光泽度迅速降低^[14],反之亦反。可见,表面光泽度与产品表面品质直接相关,表面光泽度的变化亦可以佐证产品表面品质的提高。

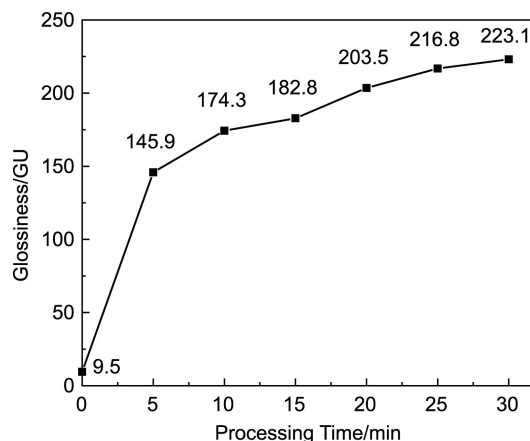


图 7 不同时间抛光后钨试样的表面光泽度

Fig. 7 Surface glossiness of tungsten samples polished with different time

3.5 表面硬度

图 8 为不同抛光时间下钨试样表面的显微维氏硬度。从图中可以看出,随着加工时间延长,钨试样表面维氏硬度先下降后趋于稳定。钨试样原始表面硬度 296.6 MPa,加工 5 min 后迅速降低至 243.6 MPa,随后稳定在 228.4 MPa 左右。EFSF 技术的加工“刀具”是紧贴工件表面的微区气团,微区气团爆破产生的巨大冲击力可有效剥离工件表层材料,从而消除试样表层因线切割、打磨、机加工等刚性加工方式造成的裂纹、位错、变形等表面缺陷,使试样表面因加工缺陷导致的残余应力被释放,加工硬化效果被消除,进而造成钨试样表面硬度随着加工过程进行而降低的现象。原始试样表面粗糙度最大、加工硬化最严重,加之 EFSF 加工早期去除速率最快,故 EFSF 加工早期试样表面硬度下降速率也最快。而后随着加工时间延长,试样表面缺陷进一步被消除,残余应力也进一步被释放,加工硬化效果逐渐消失。加工时间

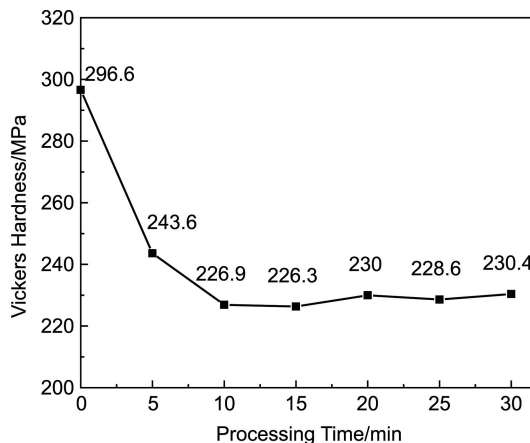


图 8 不同时间抛光后钨试样的表面维氏硬度

Fig. 8 Surface Vickers hardness of tungsten samples polished with different time

>10 min 后, 试样表面材料去除深度超过 17 μm , 表面粗糙度降低约 57.6%, 达到 0.521 μm 以下, 此时试样表面原始加工损伤层已基本被消除, 原始残余应力也基本被消除, 试样表面硬度得到还原。此后再继续加工, 表面硬度则基本保持稳定。这说明 EFSF 抛光钨可以获得低应力且表面硬度稳定的高品质加工表面。

4 结 论

使用电场与流场协同精整 (synergistic finishing technology of electric field and flow field, EFSF) 技术对钨试样进行了表面抛光, 研究了 EFSF 加工对试样表面形貌、表面粗糙度、试样尺寸、表面光泽度及表面硬度的影响, 并分析其影响机理。

(1) EFSF 技术能够显著改善钨的表面品质, 钨试样表面粗糙度可达到 0.154 μm , 光泽度达到 223.1 GU, 获得较好的镜面加工效果。但是 EFSF 技术存在表面品质改善阈值, 当粗糙度降低到一定程度 (如 $Ra < 0.3 \mu\text{m}$) 时, “粗糙度改善/材料损耗” 性价比偏低。

(2) EFSF 技术可以获得低应力且表面硬度稳定的高品质加工表面, 当加工时间 >10 min 后, 钨试样表面硬度基本稳定在 228.4 MPa。

(3) EFSF 技术可以实现对钨的高镜面、低损伤、低应力的高品质表面抛光, 同时与常规钨抛光技术相比, 在环保性、适用结构范围、操作便利性等方面优势突出。本文为钨的高品质绿色抛光提供了一种新方法。

参考文献 References

- [1] 刘震, 尤畅, 刘世昌, 等. 铸造[J], 2023, 72(7): 781-793.
LIU Z, YOU C, LIU S C, *et al.* Foundry[J], 2023, 72(7): 781-793.
- [2] 许良, 王林, 陈泓谕, 等. 表面技术[J], 2022, 51(4): 24-36.
XU L, WANG L, CHEN H Y, *et al.* Surface Technology[J], 2022, 51(4): 24-36.
- [3] MU Y, HAN R C, SAMPURNO Y, *et al.* ECS Journal of Solid State Science and Technology[J], 2016, 5(6): 345-348.
- [4] 刘文胜, 龙路平, 马云柱. 粉末冶金技术[J], 2012, 30(3): 223-228.
LIU W S, LONG L P, MA Y Z. Powder Metallurgy Technology[J], 2012, 30(3): 223-228.
- [5] 张雪响, 刘奉妍. 有色金属材料与工程[J], 2022, 43(1): 18-26.
ZHANG X X, LIU F Y. Nonferrous Metal Materials and Engineering[J], 2022, 43(1): 18-26.
- [6] DENG H, HUANG R, LIU K, *et al.* Electrochemistry Communications[J], 2017, 82: 80-84.
- [7] 王广达, 熊宁, 钟铭. 粉末冶金技术[J], 2023, 41(4): 315-321.
WANG G D, XIONG N, ZHONG M. Powder Metallurgy Technology[J], 2023, 41(4): 315-321.
- [8] 孙文, 章晓波. 稀有金属与硬质合金[J], 2014, 42(2): 36-40+53.
SUN W, ZHANG X B. Rare Metals and Cemented Carbides[J], 2014, 42(2): 36-40+53.
- [9] 叶毅, 叶伟昌. 世界制造技术与装备市场[J], 2006, 4: 89-90.
YE Y, YE W C. World Manufacturing Engineering & Market[J], 2006, 4: 89-90.
- [10] 李金元, 金洙吉. 航空制造技术[J], 2017, 60(6): 55-59.
LI J Y, JIN Z J. Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2017, 60(6): 55-59.
- [11] SEO Y J, KIM N H, LEE W S. Materials Letters[J], 2006, 60(9/10): 1192-1197.
- [12] PODDAR M K, JALALZAI P, SAHIR S, *et al.* Applied Surface Science[J], 2020, 537: 147862.
- [13] JU B F, CHEN Y L, FU M M, *et al.* Sensors and Actuators A: Physical[J], 2009, 155(1): 136-144.
- [14] 袁忠才, 张青蓉, 朱启明. 光电技术应用[J], 2023, 38(6): 67-70+94.
YUAN Z C, ZHANG Q R, ZHU Q M. Electro-Optic Technology Application[J], 2023, 38(6): 67-70+94.