

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.01.011

金刚石抛光用镍钨合金镀层的电镀制备工艺

安志博, 金洙吉*, 姜冠楠, 王磊, 王洪超

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用脉冲电镀的方法快速制备耐磨损的超厚镍钨合金镀层, 用以摩擦化学抛光金刚石, 以实现金刚石的快速去除。采用正交实验研究了脉冲频率、平均电流密度、占空比对镀层组分、显微硬度、内应力和沉积速率的影响。最终在脉冲频率200 Hz、平均电流密度9 A/dm²和占空比0.8的条件下制备了显微硬度472.76 HV、内应力80.11 MPa、厚度为0.35 mm的镍钨合金镀层。经金刚石摩擦化学抛光实验验证, 制备的镍钨合金抛光盘具有优异的抛光性能, 相较于铸铁抛光盘, 镍钨合金抛光盘具有更高的金刚石去除率(0.71 μm/min)、更低的磨损量(0.16 g)和磨削比(94.25)。

关键词: 金刚石; 镍钨合金; 脉冲电镀; 摩擦化学抛光

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A

Electrodeposition process of nickel-tungsten alloy coating for polishing diamond

An Zhibo, Jin Zhuji*, Jiang Guannan, Wang Lei, Wang Hongchao

(Key Laboratory of Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The pulse electrodeposition was used to develop the wear-resistant thick nickel-tungsten alloy which is used to dynamic friction polish diamond to realize rapid removal. The effects of pulse frequency, average current density and duty cycle on tungsten content, micro-hardness, internal stress and deposition rate were studied by orthogonal experiment. Finally, the nickel-tungsten alloy coating with hardness of 472.76 HV, internal stress of 80.11 MPa and thickness of 0.35 mm were fabricated under the deposition conditions of the pulse frequency of 200 Hz, the average current density of 9 A/dm² and the duty cycle of 0.8. The dynamic friction polishing diamond experiments showed that the nickel-tungsten alloy polishing disc had excellent polishing performance. Comparing with cast iron polishing disc, the nickel-tungsten alloy polishing disc had higher diamond removal rate (0.71 μm/min), lower wear loss (0.16 g) and wear ratio (94.25).

Keywords: diamond; nickel-tungsten alloy; pulse electrodeposition; dynamic friction polishing

动摩擦抛光技术^[1-2] (Dynamic Friction Polishing, DFP), 又被称为摩擦化学抛光, 其加工原理为利用高溶碳能力的金属抛光盘以一定压力与金刚石

在大气环境下高速摩擦, 借助摩擦生成的热量使金刚石被加工表面达到石墨化温度(600~800 °C), 并在金刚石石墨化后通过化学和机械作用将金刚石表

收稿日期: 2022-03-16

修回日期: 2022-04-02

作者简介: 安志博(1997—), 男, 硕士研究生, email: 1393222693@qq.com

*通信作者: 金洙吉, email: kimg@dlut.edu.cn

面的非金刚石相去除。这种抛光是一种高效低成本的金金刚石去除方法。

抛光盘在摩擦化学抛光金刚石的过程中可以催化金刚石的石墨化反应,不同种类的抛光盘对金刚石的去除效果不同。抛光盘的制备可以采用烧结或铸造等方式制备^[3-4],但其加工效率较低,生产成本高。因此,如何实现高效制备抛光盘以实现金刚石的摩擦化学抛光亟待发展。常规电镀法可以在常温下以较低成本和相对简单的制备工艺在基材上制备高硬度的耐磨镀层,具有较高的应用价值^[5-6]。镍钨合金具有优秀的机械性能和热稳定性^[7],耐磨性较好^[8-9],广泛应用于各种摩擦表面的保护处理^[10-11]。且镍、钨元素对金刚石的石墨化具有催化作用^[12],因此可以通过电镀镍钨合金获得摩擦化学抛光盘用来抛光金刚石。

摩擦化学抛光金刚石过程使抛光盘的磨损深度较大,因此抛光盘镀层需要具有优秀的耐磨性能以及较大的镀层厚度以保证抛光盘具有足够的使役寿命。本文采用单向脉冲电镀镍钨合金镀层,探究脉冲参数对镀层性能的影响,选择合适的电镀参数快速制备超厚镍钨合金抛光盘镀层,并验证其对金刚石的抛光性能。

1 实验与设备

实验电镀抛光盘基材为纯铜,经精密车削后在 30 g/L 的 Na₂CO₃ 溶液中除油,然后在 3% 的稀 H₂SO₄ 中除去表面氧化层,电源为 SOYI-10020DM 型脉冲电源。镀液为硫酸盐体系的镍钨电镀液,溶液中的主盐为 350 g/L NiSO₄·6H₂O, 10 g/L Na₂WO₄·2H₂O, 10 g/L NiBr₂;络合剂为 50 g/L Na₃Cit·2H₂O。电镀过程中通过滴加稀 H₂SO₄ 或氨水保持溶液 pH 值为 3.0~4.0,保持溶液温度为 45~55 °C。

研究表明脉冲电镀工艺可以有效减小镀层内应力、提高镀层耐磨性、降低镀层杂质含量、利于获得成分稳定的镀层。为了探究电镀参数对镀层性质(镀层组分含量、显微硬度、内应力与沉积速率)影响,笔者设计了三因素四水平的正交实验,方案如表 1 所示。其中,通过控制电镀时间以确保流过的电量均为 1.8×10⁴ C/dm²,使其理论电镀金属量相近。

采用 Oxford X-Max 型 EDS 测量镀层的元素组分;采用 MVS-1000Z 维氏硬度计测量镀层的显微硬度,所用载荷为 10 g,保持时间为 10 s,在镀层表面

表 1 正交实验参数

Tab.1 Orthogonal experimental parameters

水平	脉冲频率/Hz	平均电流密度/(A·dm ⁻²)	占空比
1	3.125	3	0.2
2	12.500	5	0.4
3	50.000	7	0.6
4	200.000	9	0.8

随机选取 5 个测量点测量镀层的硬度,并计算其平均值作为镀层的显微硬度,所用试片为直径 30 mm,厚 8 mm 的铜片。采用薄片阴极弯曲法^[13-14]测量镀层的内应力,其基本测量过程为采用一条狭长的金属薄片作为阴极,其中一面进行绝缘处理,另一位为施镀面。由于电镀过程中产生的应力,导致金属片弯曲,若金属片向绝缘面弯曲,则镀层内应力表现为压应力,反之则为拉应力。该测量方法的内应力计算公式为:

$$\sigma = \frac{1}{6} \times \frac{Et_s^2}{Rt_f} \tag{1}$$

式中:σ为镀层内应力,MPa;E为阴极薄片的弹性模量,GPa;t_s为阴极薄片的厚度,mm;R为阴极薄片的曲率半径,m;t_f为镀层的厚度,mm。

阴极薄片采用退火去除应力的纯铜片,其尺寸为 80 mm × 10 mm,其弹性模量为 108 GPa,厚度为 0.1 mm,通过测量镀层的厚度和阴极薄片的曲率半径可以计算出镀层的内应力。该方法可以快速评估镀层内应力值,多用于测量较薄镀层的应力,可以作为半定量的测量方法估算镀层内应力^[15]。

镀层的沉积速率采用称重法进行测量,相关计算公式如下:

$$v = 1000 \times \frac{\Delta m_f}{S \times t \times \rho_{dis}} \tag{2}$$

$$\rho_{dis} = \rho_{Ni} \times w_{Ni} + \rho_w \times w_w \tag{3}$$

式中:v为镀层沉积速率,μm/min;Δm_f为试片电镀前后质量变化,g;S为镀层表面积,800 mm²;t为电镀时间,min;ρ_{dis}为镀层密度,g/mm³;ρ_{Ni}为镍元素的密度,8.9×10³ g/mm³;w_{Ni}为镀层中镍元素的质量分数;ρ_w为钨元素的密度,19.4×10³ g/mm³;w_w为镀层中钨元素的质量分数。

金刚石的摩擦化学抛光实验采用实验室自行搭建的试验台进行实验,抛光试验原理图如图 1 所示,试验样件采用 3 mm × 3 mm × 1 mm 的 CVD 金刚石试片。抛光金刚石的表面形貌采用 Keyence 公司生

产的VHX-600E系列超景深显微镜进行观测,去除率与抛光盘磨损量采用称重法进行估算,样品质量变化采用天平为DV215CD系列的专业型分析天平进行测量,每个样品重复测试3次作为测试结果。磨削比为抛光盘与金刚石损失量的体积比。相关计算公式如下:

$$R_{\text{dia}} = \frac{1000 \times \Delta m}{t \times \rho_{\text{dia}} \times S_{\text{dia}}} \quad (4)$$

$$Gr = \frac{\Delta m \times \rho_{\text{dia}}}{\Delta M \times \rho_{\text{dis}}} \quad (5)$$

式中: R_{dia} 为金刚石的去除率, $\mu\text{m}/\text{min}$; Δm 为抛光前后金刚石的质量变化,g; t 为抛光时间,min; ρ_{dia} 为金刚石密度, $3.5 \times 10^3 \text{ g}/\text{mm}^3$; S_{dia} 为金刚石表面积, mm^2 ; Gr 为磨削比; ρ_{dis} 为镍钨合金镀层密度,根据镍钨合金组分计算得出, g/mm^3 ; ΔM 为抛光前后抛光盘的质量变化,g。

2 镍钨合金镀层的电镀参数选择

2.1 电镀正交实验结果

在相同的镀液成分与工艺参数下,改变电镀参数,合金镀层的电镀过程也会因此改变,其组分也会随之变化^[16]。

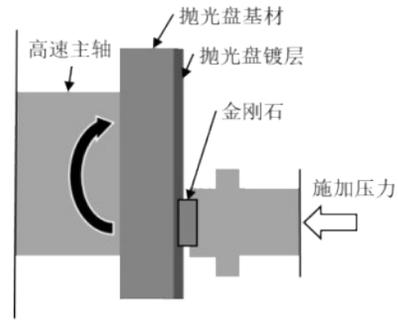


图1 摩擦化学抛光金刚石原理图

Fig.1 Schematic diagram of dynamic friction polishing diamond

本实验通过改变电镀参数来测量不同参数下镀层钨含量、显微硬度、内应力和沉积速率的大小,并最终根据镀层显微硬度与内应力评价电镀过程的电镀参数,以获得性能较好的抛光盘电镀参数。其测试结果如表2所示。

2.2 电镀参数对镀层组分的影响

根据EDS组分结果显示,合金镀层中只含有镍和钨两种元素,因此采用镀层中的钨含量代替镀层组分进行分析。图2为镀层中钨含量随电镀参数的变化曲线。随着脉冲频率的不断增大,单一脉冲周期内的导通时间和关断时间在不断缩短,镀层钨含

表2 正交实验结果

Tab.2 Orthogonal experimental results

编号	实验电镀参数				实验结果			
	脉冲频率/Hz	平均电流密度/ ($\text{A} \cdot \text{dm}^{-2}$)	占空比	电镀时间/s	钨含量/ (wt.%)	显微硬度/ HV	内应力/MPa	沉积速率/ ($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	200.000	3	0.2	6000	0.69	251.68	68.60	0.35
2	200.000	5	0.4	3600	0.60	322.92	50.11	0.57
3	200.000	7	0.6	2571	2.27	461.54	123.30	1.04
4	200.000	9	0.8	2000	1.23	472.76	80.11	1.52
5	50.000	5	0.2	3600	0.62	247.60	39.06	0.76
6	50.000	3	0.4	6000	0.44	341.14	75.10	0.45
7	50.000	9	0.6	2000	1.30	323.18	70.54	1.49
8	50.000	7	0.8	2571	2.43	357.15	73.40	1.16
9	12.500	7	0.2	2571	0.57	304.80	313.56	1.08
10	12.500	9	0.4	2000	1.06	308.98	88.12	1.47
11	12.500	3	0.6	6000	0.64	383.86	97.14	0.41
12	12.500	5	0.8	3600	0.43	423.86	76.13	0.78
13	3.125	9	0.2	2000	1.13	361.92	414.67	0.93
14	3.125	7	0.4	2571	0.70	303.84	304.28	1.01
15	3.125	5	0.6	3600	1.00	346.44	136.36	0.91
16	3.125	3	0.8	6000	1.48	500.76	171.86	0.56

量先减小后增大。当脉冲频率在 50 Hz 以上时, 钨含量维持在 1.2 wt.% 左右。

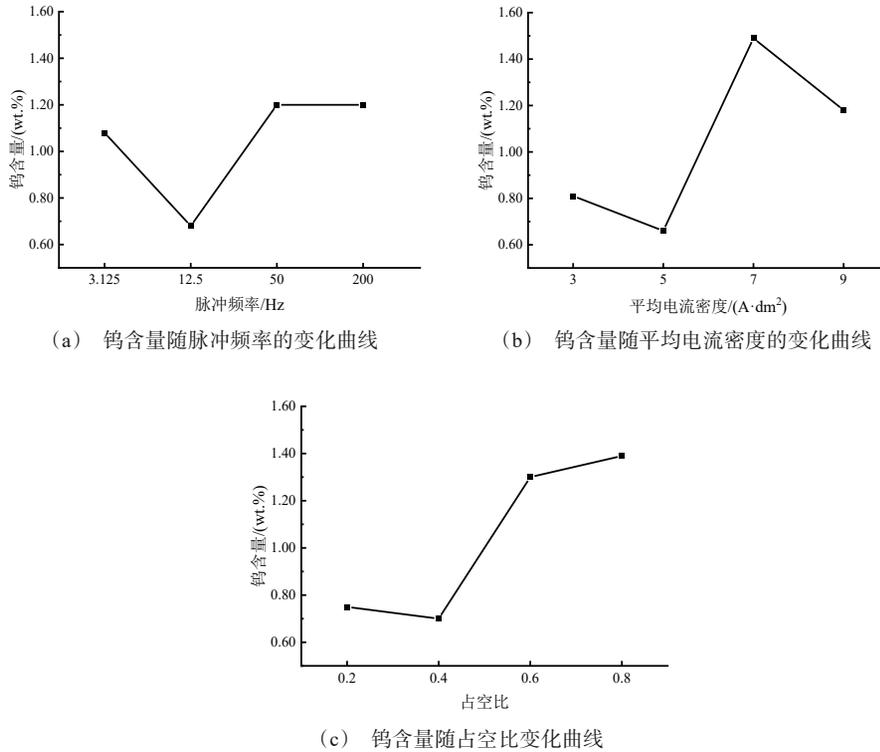


图2 电镀参数对镀层钨含量影响的变化曲线

Fig.2 Variation curves of the influence of electroplating parameters on the tungsten content of the coatings

镀层中钨含量随平均电流密度的增大先减小后增大再减小,但在平均电流密度偏大时,钨含量要比平均电流密度偏小时更大。较大的电流密度意味着阴极具有更高的负电位,有利于金属钨在阴极上的还原。

随占空比的逐渐增大,镀层中钨含量也逐渐增大。占空比用于调整同一脉冲周期内的导通时间与脉冲周期的比例,占空比的增大意味着导通时间的延长与关断时间的缩短,这导致在较低占空比下单位周期内的沉积时间更长。在镀液中钨元素浓度较低的情况下,延长单位周期内的沉积时间可以获得钨含量更大的镀层。

表3为实验电镀参数对镀层中钨含量的影响分析,其中: $\bar{K1}$ 、 $\bar{K2}$ 和 $\bar{K3}$ 分别为脉冲频率、平均电流密度和占空比在四水平下钨含量的平均值, RK 为镀层钨含量在各因素下变化的极差。可见平均电流密度对镀层钨含量影响最大,占空比次之,脉冲频率影响最小。综合 16 组正交实验的结果,钨含量分布于

0.43 wt.%至 2.43 wt.%,属于低钨含量的镍钨镀层。

表3 电镀参数对镀层钨含量的影响

Tab.3 Effect of electrodeposition parameters on W content

水平	镀层钨含量/(wt.%)		
	$\bar{K1}$	$\bar{K2}$	$\bar{K3}$
1	1.08	0.81	0.75
2	0.68	0.66	0.70
3	1.20	1.49	1.30
4	1.20	1.18	1.39
RK	0.52	0.83	0.69

2.3 电镀参数对镀层显微硬度的影响

抛光盘镀层需要较好的耐磨性能,以保证长时间抛光过程中抛光盘的磨损量更低。对于摩擦化学抛光金刚石的抛光盘,其硬度越大,耐磨性能越好^[17]。

图3为镀层显微硬度随电镀参数的变化曲线。镀层显微硬度随脉冲频率的增大先减小后增大。这可能是由于在低频脉冲时电镀过程中析氢现象逐渐

加剧,导致镀层金属晶格产生畸变,对镀层有强化作用,使镀层显微硬度增大。而脉冲频率较大时,镀层显微硬度变大,可能是由于镀层中钨含量的提高增

强了合金镀层的固溶强化,导致镀层显微硬度增大^[18]。

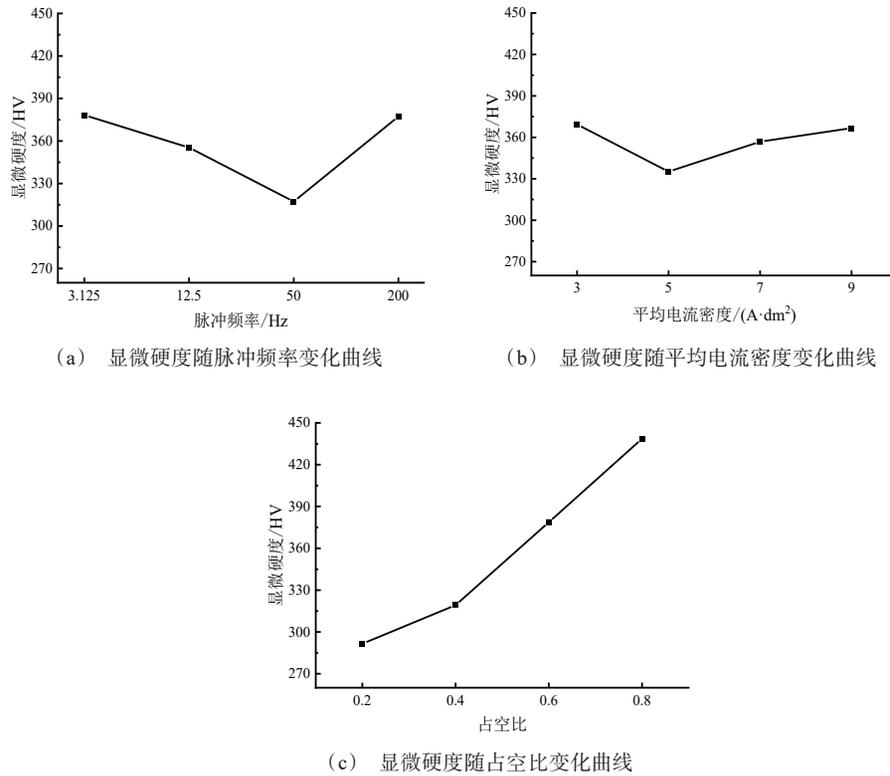


图3 电镀参数对镀层显微硬度影响的变化曲线

Fig.3 Variation curves of the influence of electroplating parameters on the microhardness of the coatings

镀层显微硬度随电流密度的增大先减小后增大,变化幅度相对较小。镀层显微硬度增大的原因可能是受到钨含量增大的影响,但同时占空比的改变对电镀过程产生了其它影响,如影响晶粒间杂质与空位的含量、晶粒尺寸与镀层致密性等^[19],最终导致镀层显微硬度与占空比呈正相关。

表4为实验电镀参数对镀层显微硬度的影响分析,其中: $\overline{M1}$ 、 $\overline{M2}$ 和 $\overline{M3}$ 分别为脉冲频率、平均电流密度和占空比在四水平下镀层显微硬度的平均值, RM 为显微硬度在各因素下变化的极差。根据极差分析,占空比对镀层显微硬度影响最大,脉冲频率次之,平均电流密度的影响最小。

2.4 电镀参数对镀层内应力的影响

由于加工过程抛光盘与金刚石剧烈摩擦,硬度低于金刚石的抛光盘磨损较大,因此镀层还需要具有较大的厚度以保证其具有较长的服役时间。当镀

表4 电镀参数对镀层显微硬度的影响

Tab.4 Effect of electrodeposition parameters on microhardness

水平	镀层显微硬度/HV		
	$\overline{M1}$	$\overline{M2}$	$\overline{M3}$
1	377.23	369.36	291.50
2	317.27	335.21	319.22
3	355.38	356.83	378.76
4	378.24	366.71	438.63
RM	60.97	34.15	147.13

层内应力较大时,随镀层的厚度逐渐增大,会出现因内应力积累而导致金属镀层变形甚至开裂的现象,导致镀层失效^[20],因此需要镀层具有较小的内应力。

图4为镀层内应力随电镀参数的变化曲线。随脉冲频率的逐渐增大,镀层内应力逐渐减小。在脉冲频率50 Hz以上时,镀层内应力变化较小,而当脉

冲频率继续减小时,镀层内应力显著增大。这是由于随脉冲频率逐渐减小,连续的导通时间延长,阴极附近析出的氢无法及时脱附,而与金属离子共同沉积在阴极,形成不稳定的氢氧化物,在电镀过程中或镀后会逐渐分解,在镀层中留下空穴,导致镀层形成更大的拉应力^[21-22]。

镀层内应力随平均电流密度的增大先减小后增

大再减小,而总体呈上升趋势。基于能量过剩理论,在过高电位下沉积的金属镀层内储存着一定的内能,相当于沉积表面上的高温,在冷却过程中镀层的收缩会使镀层产生拉应力^[13]。

随镀层占空比的增大,镀层内应力在不断减小,这是由于占空比增大,瞬时电流密度减小,使镀层内应力减小。

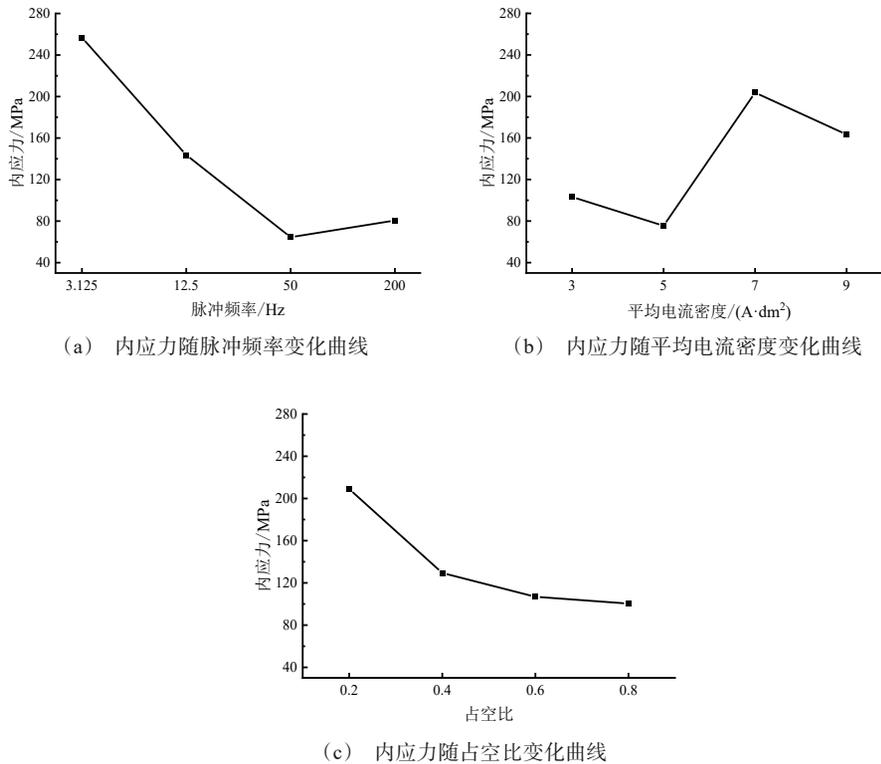


图4 电镀参数对镀层内应力影响的变化曲线

Fig.4 Variation curves of the influence of electroplating parameters on internal stress of the coatings

表5为实验电镀参数对镀层内应力的影响分析,其中: $\bar{N1}$ 、 $\bar{N2}$ 和 $\bar{N3}$ 分别为脉冲频率、平均电流密度和占空比在四水平下镀层内应力的平均值, RN 为镀层内应力在各因素下变化的极差。依据极差分析,脉冲频率对镀层内应力影响最大,平均电流密度次之,占空比的影响最小。

2.5 电镀参数对沉积速率的影响

在镀层由于内应力过大而失效前,镀层的厚度主要受电镀时间和沉积速率影响。为使抛光盘具有更长的使役寿命,需要抛光盘镀层具有较大厚度。因此为提高制备效率,需要尽可能高的沉积速率。

图5为沉积速率随电镀参数的变化情况。随平

表5 电镀参数对镀层内应力的影响

Tab.5 Effect of electrodeposition parameters on internal stress

水平	镀层内应力/MPa		
	$\bar{N1}$	$\bar{N2}$	$\bar{N3}$
1	80.53	103.17	208.97
2	64.52	75.42	129.40
3	143.74	203.63	106.83
4	256.79	163.36	100.38
RN	192.27	128.21	108.59

均电流密度的逐渐增大,镀层的沉积速率也不断升高,这是由于平均电流密度的增大使得单位时间内

流经的电荷量增大,因此镀层的沉积速率也随之升高。且实验结果表明,脉冲频率和占空比对沉积速

率影响较小。

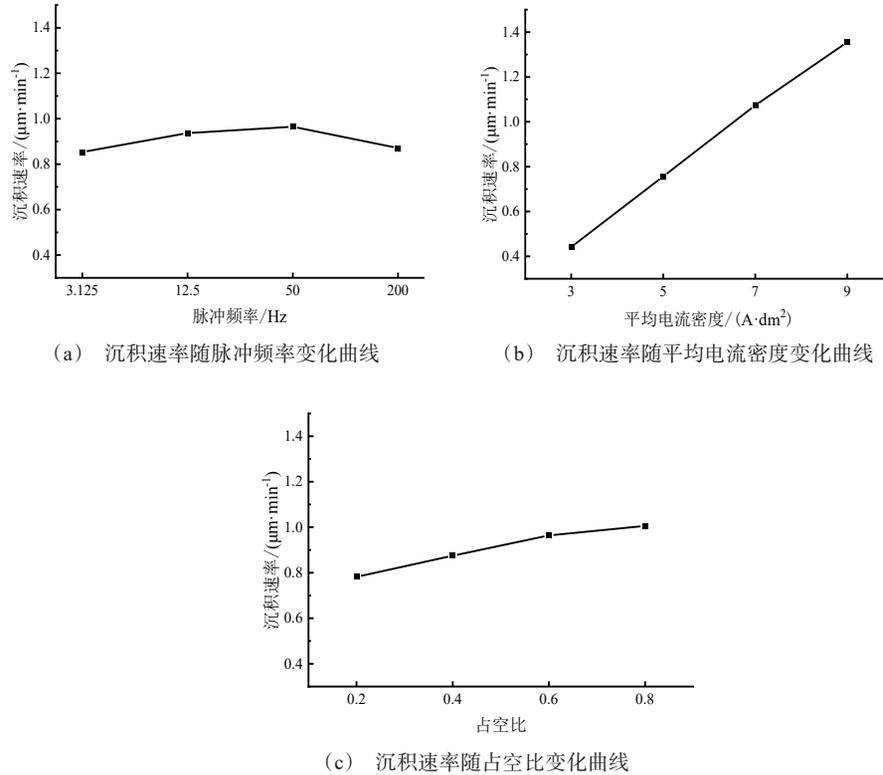


图5 电镀参数对沉积速率影响的变化曲线

Fig.5 Variation curves of the influence of electroplating parameters on the deposition rate

表6为实验电镀参数对镀层沉积速率的影响分析,其中: $\bar{L1}$ 、 $\bar{L2}$ 和 $\bar{L3}$ 分别为脉冲频率、平均电流密度和占空比在四水平下镀层沉积速率的平均值, RL 为各因素下沉积速率平均值的极差。可以看出,沉积速率主要受平均电流密度的影响。

2.6 抛光盘制备参数的选择

为验证镀层抛光金刚石的可行性,选择合适的

电镀参数制备抛光盘镀层。首先由于摩擦化学抛光对抛光盘的磨损量较大,抛光盘需要具有较好的耐磨性,以确保抛光盘镀层具有较长的使役寿命,因此要求抛光盘的硬度尽可能大;其次抛光盘需要具有一定厚度,因此需要镀层内应力较低,以确保抛光盘在镀厚过程中不出现裂纹或剥落;最后在此基础上要求其沉积速率应尽可能大。根据镀层性质的变化趋势,选择了如表7所示的抛光盘电镀参数。

表6 电镀参数对沉积速率的影响

Tab.6 Effect of electrodeposition parameters on deposition rate

水平	沉积速率/($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)		
	$\bar{L1}$	$\bar{L2}$	$\bar{L3}$
1	0.85	0.44	0.78
2	0.94	0.76	0.87
3	0.96	1.07	0.96
4	0.87	1.35	1.01
RL	0.11	0.91	0.23

表7 抛光盘制备参数与性质

Tab.7 Preparation parameters and properties of polishing disc

参数	电镀抛光盘	铸铁抛光盘
脉冲频率/Hz	200	/
平均电流密度/($\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$)	9	/
占空比	0.8	/
镀层厚度/mm	0.35	/
显微硬度/HV	472.76	305.67

为验证抛光盘沿厚度方向成分是否均匀,进行了沿厚度方向钨含量的测试,测试结果如图6所示,电镀抛光盘钨含量在1.32 wt.%上下浮动,不同厚度下的镀层中钨含量均在1.00 wt.%以上,抛光盘镀层组分相对均匀,钨含量不随电镀时间的延长而逐渐衰减,因此可以通过脉冲电镀制备大厚度的镍钨合金镀层。

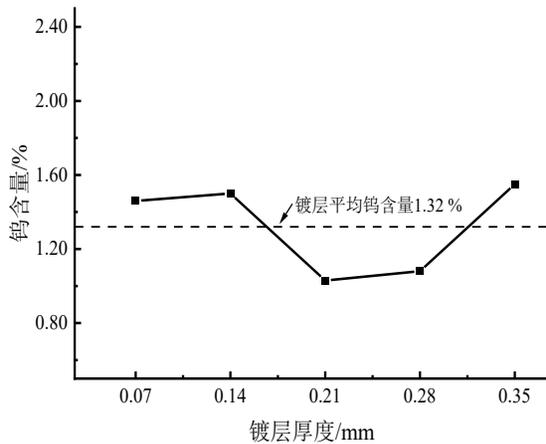


图6 镀层钨含量沿镀层厚度方向变化曲线

Fig.6 Variation curve of tungsten content with coating thickness

3 抛光盘对金刚石抛光效果的验证

3.1 摩擦化学抛光参数的选择

金刚石摩擦化学抛光盘设计为圆环状,外径54 mm,内径38 mm,抛光前对合金表面进行精车以确保表面平整。抛光盘转速为4200 r/min(线速度约10 m/s);金刚石的压力为45 N,压强约为5 MPa,抛光时间约30 min。

3.2 抛光盘抛光金刚石的磨损验证

抛光过程中,随着压力的加载和转速的提高,金刚石与抛光盘产生剧烈摩擦,二者的摩擦界面处汇聚了巨大的摩擦热,导致界面温度急剧升高。在压力和转速达到预设值后,当摩擦界面升温与周围环境达到一定的传热平衡后,出现轻微红热现象。

图7分别为采用铸铁与电镀抛光盘摩擦化学抛光后的金刚石与抛光盘表面形貌。

铸铁盘抛光后金刚石表面划痕细密,而电镀盘抛光后金刚石表面有明显“点蚀”痕迹,即伴随划痕产生的微破损区域,根据实验经验,这是典型的由在过渡金属催化下的金刚石表面碳原子产生了热化学

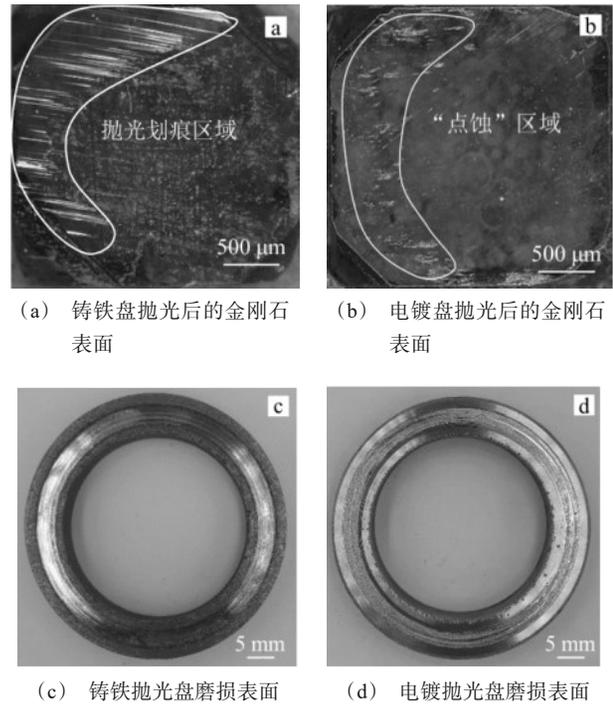


图7 抛光后金刚石与抛光盘表面

Fig.7 Surface of polished diamond and polishing disc

反应去除所形成的^[12]。

表8为不同抛光盘抛光金刚石的去除率与合金盘的磨损量和磨削比。实验结果表明,在实验参数下,电镀抛光盘对金刚石的去除率要高于铸铁抛光盘对金刚石的去除率,电镀抛光盘的磨损量和磨削比均低于铸铁抛光盘。

综上所述,电镀抛光盘相对铸铁抛光盘具有更好的金刚石摩擦化学抛光性能。

表8 不同抛光盘抛光金刚石的磨损参数

Tab.8 Wear parameters of polished diamond with different polishing discs

磨损参数	铸铁抛光盘	电镀抛光盘
金刚石去除率/($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.39	0.71
抛光盘磨损量/g	0.48	0.16
磨削比	628.15	94.25

4 结论

(1)采用脉冲频率为200 Hz、平均电流密度为9 A/dm²、占空比为0.8的电镀参数可以获得显微硬度达472.76 HV、内应力80.11 MPa的镍钨合金镀层,在该参数下,制备了厚度达0.35 mm成分均匀的镍

钨合金抛光盘;

(2)在抛光盘线速度约10 m/s、金刚石压力5 MPa下,电镀抛光盘对金刚石的去除率高于铸铁抛光盘,为0.71 $\mu\text{m}/\text{min}$;且电镀抛光盘的磨损量与磨削比均低于铸铁抛光盘,其磨损量为0.16 g,磨削比94.25。

参考文献

- [1] Suzuki K, Iwai M. High efficiency polishing of PCD with rotating metal disc[J]. Proceedings of ISAAT, 2001, 2001: 231-238.
- [2] Chen Y, Zhang L C, Arsecularatne J A, et al. Polishing of polycrystalline diamond by the technique of dynamic friction, part 1: Prediction of the interface temperature rise[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(6): 580-587.
- [3] 苑泽伟, 金洙吉. 利用化学和机械协同作用的CVD金刚石抛光机理与技术[J]. 机械工程学报, 2014(10): 182.
- [4] 林佳志, 金洙吉, 史双佶, 等. 金刚石抛光用钨合金的热压烧结[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 682-689.
- [5] 张雪辉, 林晨光, 崔舜, 等. 钨及其合金涂层的研究现状[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 365-372.
- [6] 何跃林. 功能性超厚镍铁合金电镀工艺的研究[J]. 电镀与涂饰, 2002(2): 1-3.
- [7] Allahyarzadeh M H, Aliofkhaezrai M, Rezvanian A R, et al. Ni-W electrodeposited coatings: Characterization, properties and applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 978-1010.
- [8] Haseeb A S M A, Albers U, Bade K. Friction and wear characteristics of electrodeposited nanocrystalline nickel-tungsten alloy films[J]. Wear, 2008, 264(1-2): 106-112.
- [9] 陈颢, 羊建高, 李金辉, 等. 电沉积晶态钨基合金镀层组织及磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(4): 553-558.
- [10] 王建丽, 李光强, 朱诚意, 等. 表面改性技术在连铸结晶器上的应用进展[J]. 电镀与涂饰, 2005(12): 58-62.
- [11] 韩成府, 许培鑫, 马伟伟, 等. H13钢激光熔覆Ni60A/WC复合涂层的硬度及耐磨性研究[J]. 材料保护, 2021, 54(12): 90-96.
- [12] 史双佶. 金刚石摩擦化学抛光用抛光盘制备及抛光机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [13] 李延伟, 黄晓曦, 杨哲龙, 等. 镀镍层内应力及其测量方法[J]. 电镀与环保, 2011, 31(1): 4-7.
- [14] 李云峰. 电镀层的内应力[J]. 电镀与精饰, 1982(2): 18-25.
- [15] 刘学武. 高频脉冲电镀镍钴合金内应力、形貌和结构及耐磨性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [16] 刘爽. 镍钨合金电沉积工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [17] 孔军. 高速摩擦抛光金刚石用抛光盘的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [18] 李林超, 胡会利, 刘爽. 硫酸盐体系电沉积镍钨合金工艺研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 85-90.
- [19] Vamsi M V N, Wasekar N P, Sundararajan G. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of pulse electrodeposited Ni-W alloy coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 319: 403-414.
- [20] 陈钧武, 何士桓, 等. 电铸原理与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [21] Mizushima I, Tang P T, Hansen H N, et al. Residual stress in Ni-W electrodeposits[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(27): 6128-6134.
- [22] Ziebell T D, Schuh C A. Residual stress in electrodeposited nanocrystalline nickel-tungsten coatings[J]. Journal of Materials Research, 2012, 27(9): 1271-1284.