

镍磷合金镀层表面磁流变抛光效率实验

艾博^{1,2}, 薛常喜¹, 张斌智², 李经纬²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:分析了化学镀Ni-P合金沉积机理中最为重要的原子氢理论,简述了磁流变抛光过程中材料去除机理,并选取在磁流变抛光过程中主要的工艺参数进行正交实验。利用Zygo干涉仪等实验仪器检测实验件面形,计算出每个去除函数的峰值去除率。通过实验数据分析各因素对Ni-P合金镀层抛光效率的影响规律。实验结果表明各因素对Ni-P镀层抛光效率的影响关系:抛光粉浓度>抛光间隙>抛光轮转速>镀层厚度,通过实验并结合工程实际情况对各工艺参数进行了优化,为后续Ni-P合金镀层非球面表面抛光打下基础。

关键词:镍磷合金镀层;磁流变抛光;正交实验;抛光效率

中图分类号: TH706

文献标志码: A

文章编号: 1672-9870(2020)05-0078-05

Experiment on Magnetorheological Finishing Efficiency of Ni-P Alloy Coating

AI Bo^{1,2}, XUE Chang-xi¹, ZHANG Bin-zhi², LI Jing-wei²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: The most important atomic hydrogen theory in the deposition mechanism of electroless Ni-P alloy was analyzed. The material removal mechanism in magnetorheological finishing process was studied. The main process parameters in the magnetorheological finishing process were selected for orthogonal experiment. Using Zygo interferometer and other experimental instruments to detect the surface of the experimental part, the peak removal rate of each removal function was calculated. The influence of various factors on polishing efficiency of Ni-P alloy coatings was analyzed by experimental data. Experimental results show that the influence of various factors on the polishing efficiency of Ni-P coating: polishing powder concentration > polishing gap > polishing wheel speed > coating thickness. Through experiments and combining with the actual engineering situation, the process parameters were optimized to lay a foundation for the subsequent aspheric surface polishing of Ni-P alloy coating.

Key words: nickel-phosphorus alloy coating; magnetorheological finishing (MRF); orthogonal experiment; polishing efficiency

镍磷合金镀层(Ni-P镀层)具有许多晶态金属所不具备的独特性能,如高机械强度、高耐腐蚀性及优良的磁学、电学、力学等特性。1946年应

用化学镀方法首次制得Ni-P镀层以来,该镀层在工程和研究方面都已取得了很大进展^[1]。Ni-P镀层的可切削性很好,使用单点金刚石车削加

收稿日期: 2019-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11903035)

作者简介: 艾博(1990-),男,硕士研究生, E-mail: 522419780@qq.com

通讯作者: 薛常喜(1979-),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: xcx272479@sina.com

工即可获得纳米级表面。因此镍磷合金常用来对金属材料反射镜进行表面改性以获得优异的光学表面^[2]。但是由于车削加工的成形机理,会使Ni-P镀层加工表面残留螺旋状切削刀痕,增加了反射镜表面的散射现象,严重影响系统的光学性能^[3]。对车削后的Ni-P镀层表面进行抛光可以在提高表面质量的同时去除残留的刀痕^[4]。国内外针对Ni-P镀层抛光多采用接触式方法(如CCOS、应力盘、气囊抛光^[5]),易产生亚表面破坏层,如长春光机所的姜伟采用古典抛光法对镀层进行抛光,加工后的反射镜面形精度均方根值(RMS)为0.049 λ。而应用磁流变技术对Ni-P镀层进行抛光的相关研究甚少。磁流变抛光技术(MRF)加工过程稳定、抛光磨头不易磨损、易于计算机控制,可对复杂面形进行加工、材料去除效率高、能够获得高质量光学表面,几乎不产生亚表面破坏层^[6]。

实验以Ni-P镀层为研究对象,使用实验室针对镍磷合金研制的磁流变抛光液进行抛光,选取几个磁流变抛光过程中主要因素进行正交实验,分析这几个参数对Ni-P镀层磁流变抛光效率的影响规律,总结加工工艺并初步确定最佳工艺参数组合,为之后Ni-P镀层非球面表面抛光提供相关技术支持。

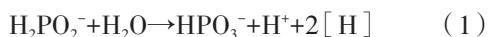
1 化学镀Ni-P合金机理及磁流变抛光原理分析

1.1 化学镀Ni-P合金原子氢理论

化学镀Ni-P合金沉积机理中G.Gutzeit所提出的原子氢理论^[7]普遍被人们所接受。它在不排斥反应过程中的氧化还原特征前提下,较好的解释了镍-磷的共沉积过程。

原子氢理论的反应过程如下^[8]:

还原剂 H_2PO_2^- 在加热及催化条件下发生水解反应释放出原子氢 $[\text{H}]$ 。

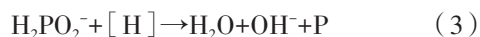


而初生态氢原子此时吸附在催化金属表面上使其活性化,镀液中的镍离子被还原,在催化

金属表面上沉积出金属镍。



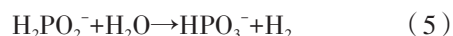
在催化金属表面的初生态原子氢使次亚磷酸根被还原成磷;同时,由于催化作用使次亚磷酸根分解,形成亚磷酸和分子态氢。



同时该理论还认为:在催化、加热条件下,次磷酸根离子也会发生自身的氧化还原反应导致磷的沉积。



镍磷化学镀过程中氢气的析出有两种途径:一种是次磷酸根离子水解产生的;另一种是原子氢相互结合过程中产生的。



上述所有的反应在Ni沉积的过程中均同时发生。由以上公式可知,化学镀Ni-P合金中磷的含量是在一定范围内变化的。而镀层中磷含量的多少将直接影响镀层性能。因此在实际施镀过程中必须严格控制上述反应,以获得符合光学加工相应性能的Ni-P镀层。

1.2 磁流变抛光原理分析

MRF(Magnetorheological Finishing)是将电磁学和流体力学的原理相结合,并将其运用在光学加工中的技术。它利用磁流变抛光液在磁场中的流变性进行抛光。如图1所示流动的磁流变抛光液由喷嘴喷到旋转的抛光轮上,被转动的抛光轮带入工件与抛光轮之间的工作区域。工作区存在高强度的梯度磁场,磁流变抛光液在磁场的作用下粘度、硬度显著增强,形成了具有一定形状的缎带凸起,通常被称为Bingham介质。这一凸起相当于一种“柔性抛光磨头”,当磨头通过工作区域时,工件表面会受到很大的剪切力,从而实现工件表面材料的去除。当磁流变抛光液随抛光轮继续旋转离开工作区域后又恢复了流体性。经由回收装置回收得到储存磁流变抛光液的搅拌桶内,重新参与循环。循环

装置外接有压力、温度等参数传感器对整个循环过程进行实时监控,保证磁流变抛光液的稳定性,进而保证去除效率的稳定性,以实现确定性抛光。

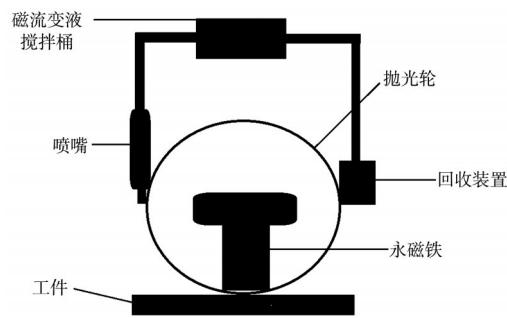


图1 磁流变抛光基本原理

2 Ni-P 镀层磁流变抛光效率实验

磁流变抛光过程中影响Ni-P镀层抛光效率的因素很多。选取几个重要的参数进行正交实验。实验主要考虑了四个因素,抛光轮的转速、磁流变抛光液中抛光粉的浓度、抛光轮与工件之间的抛光间隙、Ni-P镀层的镀层厚度。每个因素选取三个水平,如表1所示。

表1 抛光效率实验参数表

因素	A 镀层厚度/ μm	B 抛光粉浓度/%	C 抛光轮转速/(r/min)	D 抛光间隙/ mm
水平 1	40	5	120	1
水平 2	50	10	130	1.3
水平 3	60	15	140	1.5

实验选用自行研制的磁流变抛光液,铁磁颗粒浓度为30%,抛光粉为氧化铝颗粒。实验工件为 $\Phi 80\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的金属片,基底材料为Al6061,其成分如表2所示,可见其含有许多金属杂质且硬度较低,易产生划痕,铝的化学性质活泼易氧化,抛光性能差。因此工件表面进行改性,采用直接化学镀方法获得了致密的Ni-P合金镀层。

表2 Al6061化学成分表

元素	Al	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	Zn	其他
含量/%	97.8	0.96	0.46	0.39	0.25	0.09	0.02	0.03

实验装置如图2所示,MRF160磁流变抛光装置采用倒置式结构,抛光轮直径160 mm,采用

永磁型磁铁产生梯度磁场,有效作用区域内磁场强度大于2 500 Gs。使用配制好的磁流变抛光液在机床上对工件进行抛光。



图2 MRF160磁流变抛光装置实物图

实验为4因素3水平的正交实验,因此选择 $L_9(3^4)$ 正交表,具体实验方案如表3所示。

表3 抛光效率正交实验方案与结果

实验号	A 镀层厚度/ μm	B 抛光粉浓度/%	C 抛光轮转速/(r/min)	D 抛光间隙/ mm	抛光效率/($\mu\text{m}/\text{min}$)
a	1	1	1	1	0.482
b	1	2	2	2	0.744
c	1	3	3	3	1.130
d	2	1	2	3	0.430
e	2	2	3	1	0.916
f	2	3	1	2	1.102
g	3	1	3	2	0.424
h	3	2	1	3	0.528
i	3	3	2	1	1.148
I/3	0.785	0.445	0.704	0.849	
II/3	0.816	0.729	0.774	0.757	
III/3	0.700	1.127	0.823	0.696	
极差R	0.116	0.682	0.119	0.153	

按照正交表在三个实验件上进行实验,每个位置定点抛光30 s,共得到九个去除函数,使用Zygo干涉仪对实验件进行干涉检测,结果如图3所示。

磁流变抛光的去除函数与传统的圆对称类高斯去除函数分布不同,它呈D字形分布或者“子弹头”形分布,实验中评价抛光效率选用的是去除函数的峰值去除率。通过分析各组实验

的结果和极差 R 可以看出各个因素对指标的影响趋势, 对 Ni-P 镀层抛光效率影响最大的是抛光粉的浓度。为了进一步分析实验数据, 绘制因素指标图来观察两者的关系, 如图 4 所示。

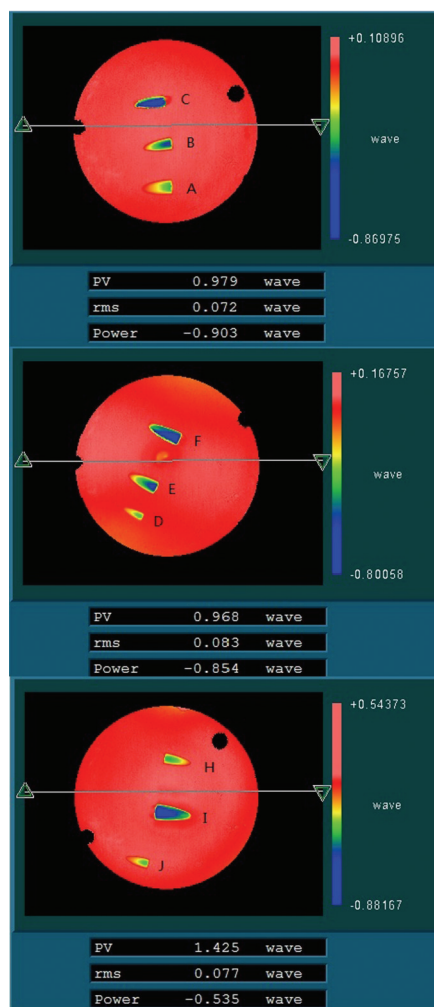


图3 实验件干涉检测结果

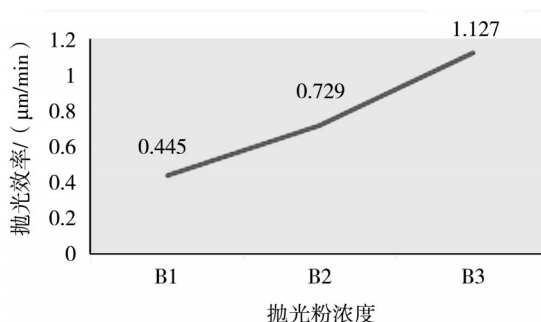


图4 抛光粉浓度与抛光效率关系

从图4可以看到随着抛光粉浓度的增加, 抛光效率也在不断的增加, 二者近似呈线性增长。传统的机械磨削理论可以很好地解释这一现象, 当磁流变液中的抛光粉浓度上升, 工件表面

单位面积内参与抛光的抛光粉颗粒也在不断上升, 对材料表面施加的正压力也在不断上升, 因而提高了抛光效率。但随着抛光粉浓度进一步增大, 抛光效率不仅不会升高反而会下降, 这是因为抛光过程是一个十分复杂的过程, 多种方式共同作用, 抛光粉过多时将阻碍镀层表面的化学作用反而影响抛光效率, 在其他的实验中也验证了这一现象。因而在实际工程应用中应选取适当的抛光粉浓度, 浓度过小抛光效率不够影响工程进度, 而浓度过大不仅造成浪费现象, 甚至会适得其反^[9]。

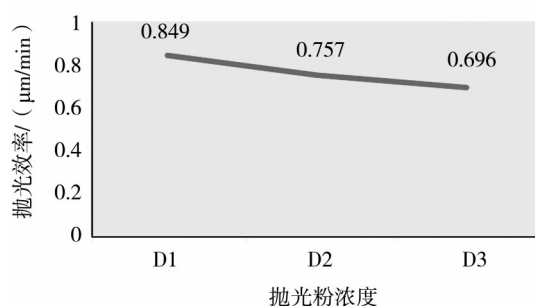


图5 抛光间隙与抛光效率关系

对 Ni-P 镀层抛光效率影响次之的是抛光间隙。抛光间隙定义为抛光轮最低端与工件表面之间的距离。从图5可以看到随着抛光间隙的不断增大, 抛光效率在不断降低。磁流变抛光过程中所形成的缎带凸起大小受磁场强度与抛光轮直径影响, MRF160 磁流变抛光装置选用永磁型磁铁因而磁场强度恒定, 可以认为所形成的缎带凸起大小恒定。因而当抛光间隙增大时缎带凸起与工件表面的作用面积在减小, 抛光区域内的抛光粉颗粒也在减小, 抛光效率降低。从图3可以明显看到每个去除函数的形状大小不一致。因而选择合适的抛光间隙也尤为重要, 抛光间隙越小抛光轮离工件表面越近, 在一定的范围内将影响整个循环系统的流动性, 这对加工是非常不利的。一般选取 1.3 mm 的抛光间隙兼顾整个加工过程。

从图6可以看到抛光轮转速与抛光效率之间呈线性增长趋势。由磁流变抛光原理可知, 工件表面实现材料去除主要是受到剪切力的作

用,当抛光轮与工件之间的速度提升时工件表面所受到的剪切力在增大,材料去除量增大,抛光效率上升。在实际的工程应用中抛光轮的转速不会设置的很高,很多因素会限制抛光轮的转速,如电机的功率、系统的散热等。还有一个重要原因是一旦抛光轮的转速过快,磁流变液供给量一定的情况下单位时间内回收量会增加,这对回收装置造成很大压力,甚至出现磁流变液回收不及时堵塞液现象。通过实验可以得到抛光轮转速设置在 140 r/min 时即可获得不错的抛光效率。

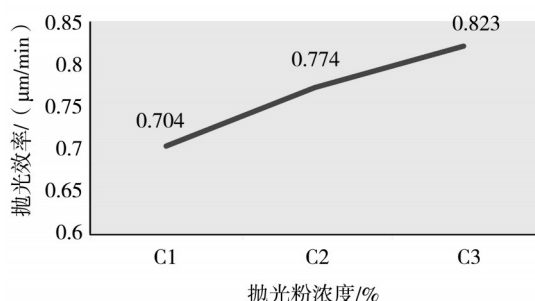


图6 抛光轮转速与抛光效率关系

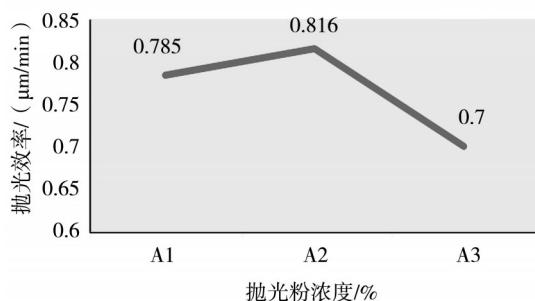


图7 镀层厚度与抛光效率关系

Ni-P 镀层厚度对抛光效率的影响最小。一般来讲对反射镜表面进行改性都要考虑到镀层后续的加工问题,镀层不能太薄。如果镀层太薄会出现反射镜还没加工到设计指标膜层便被磨透而露出材料基底的现象。而镀层镀得过厚,工艺上就会有难度出现,无法保证镀层的稳定性。从图7可以得出镀层厚度在 50 μm 时去除效率较好,这一厚度在化学镀 Ni-P 合金的工艺中也比较成熟。

3 结论

通过对化学镀 Ni-P 合金沉积机理及磁流变

抛光原理分析,使用实验室自行研制的磁流变抛光液在 MRF160 磁流变抛光装置上进行四因素三水平的正交实验,得到各因素对 Ni-P 镀层抛光效率的影响关系:抛光粉浓度>抛光间隙>抛光轮转速>镀层厚度。并通过实验数据绘制了因素指标图结合工程实际情况得到了最优的实验参数组合。Ni-P 镀层在镀层厚度为 50 μm,磁流变抛光粉浓度为 15%,抛光轮转速为 140 r/min,抛光间隙为 1.3 mm 时,能得到较高的去除效率。为后续 Ni-P 合金镀层非球面表面磁流变抛光的相关研究打下基础。

参考文献

- [1] 熊铁娜. 镍磷合金及其纳米复合镀层的研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2010.
- [2] 谭双龙, 王灵杰, 张新, 等. 可见光级铝合金反射镜一体化设计与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 5-9.
- [3] 马放, 付秀华, 贾宗合, 等. 红外跟踪系统中非球面硅透镜加工技术研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 784-787.
- [4] Risse S, Gebhardt A, Damm C, et al. Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors[C]. Proceedings of SPIE, 2008.
- [5] 韩侗睿, 付秀华, 贾宗合, 等. 基于硫系玻璃非球面抛光工艺研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(6): 60-64.
- [6] Shorey A B, Kwong K M, Johnson K M, et al. Nanoin-dentation hardness of particles used in magnetorheological finishing (MRF) [J]. Appl Opt, 2000, 39(28): 5194-5204.
- [7] Gilmozzi R, Spyromilio J. The european extremely large telescope (E-ELT) [J]. Messenger, 2007, 42(2): 53-53.
- [8] Nwosu O, Davidson A M, Hindle C S. Catalytic nickel deposition from aqueous solution [J]. Plating surface finishing, 1959(46): 1158-1164.
- [9] 彭小强. 确定性磁流变抛光的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.