

# 基于复合结构抛光工具的铜衬底线性液动压 抛光加工

余虹蛟 文东辉\* 孔凡志 傅远韬

浙江工业大学机械工程学院,杭州,310023

**摘要:**为改善铜衬底表面形貌,提出复合结构抛光工具的设计方法。依据线性液动压原理以及材料去除模型,进行液动压力流场特性的数值模拟分析,验证模拟数据的准确性,厘清铜衬底线性液动压抛光加工工艺参数对表面形貌的影响规律。研究表明:复合结构比单一的螺旋结构、不等距槽宽结构、变厚度结构液动压力均值更大、标准差更小,复合结构综合了螺旋结构材料去除率高、不等距槽宽结构和变厚度结构抛光表面形貌均匀性好的优点;工艺参数为抛光时间45 min、抛光转速24 000 r/min、抛光间隙20  $\mu\text{m}$ 时,表面粗糙度参数 $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 分别优化为4.778 nm、6.086 nm、9.900 nm。

**关键词:**线性液动压抛光;复合结构;表面形貌;液动压力

**中图分类号:**TG580.692

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.004

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Linear Hydrodynamic Polishing of Copper Substrates Based on Composite Structure Polishing Tools

YU Hongjiao WEN Donghui\* KONG Fanzhi FU Yuantao

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023

**Abstract:** To improve the surface morphology of copper substrates, a design method was proposed for composite structure polishing tools. Based on the principle of linear hydrodynamic pressure and material removal model, numerical simulation analyses of hydrodynamic pressure flow field characteristics were carried out to verify the accuracy of simulation data and clarify the influences of processing parameters of copper substrate linear hydrodynamic pressure polishing on surface morphology. Results show that composite structures have a higher mean hydraulic pressure and smaller standard deviation than that of single spiral structures, non-uniform groove width structures, and variable thickness structures. Composite structures combine the advantages of high material removal rate of spiral structures, good surface morphology uniformity of non-uniform groove width structures, and variable thickness structures during polishing. The surface roughness parameters  $Sa$ ,  $Sq$ , and  $PV$  are optimized to 4.778 nm, 6.086 nm, and 9.900 nm, respectively, when the processing parameters are set as follows: polishing time of 45 min, polishing speed of 24 000 r/min, and polishing gap of 20  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** linear hydrodynamic polishing; composite structure; surface morphology; hydraulic pressure

### 0 引言

当今世界电子行业技术发展迅速,铜衬底薄膜元件因其优异的性能,在电子行业中有着广泛的应用,常被用于电力电子、机械制造以及高科技制造领域。在铜衬底上覆盖一层薄膜有利于降低元器件阻抗,减少信号损失;有利于减少元器件的能耗成本、增加使用寿命;有利于提高元器件传输速度、提高效率<sup>[1]</sup>。

衬底的表面形貌对薄膜生长有巨大影响,而影响衬底薄膜元件的性能。均匀平整的衬底表面形貌有利于提高薄膜的均匀性、减少薄膜生长时的结晶缺陷<sup>[2]</sup>。缺陷较少、形貌均匀的铜衬底薄膜元件的透过率更高,导电性能更加优异。但目前,如何高效稳定地获取优异的纳米级铜衬底表面形貌是待解决的重点问题<sup>[3]</sup>。

抛光是制备具有纳米级均匀平整表面形貌的铜衬底的主要方法。常见铜衬底抛光有电化学抛光、化学机械抛光以及磁流变抛光。RAHMAN等<sup>[4]</sup>设计了新型超声辅助电解抛光装置,通过对电解液中 $\text{CuCl}_2$ 和 $\text{HCl}$ 浓度进行系统优化,经新

收稿日期:2025-03-11

基金项目:浙江省自然科学基金(LZ17E050003);国家自然科学基金(52575548)

型超声辅助电解抛光装置抛光,铜表面粗糙度由 20.96  $\mu\text{m}$  降至 9.43  $\mu\text{m}$ 。ZHANG 等<sup>[5]</sup>同样借助超声辅助电解抛光装置,当射流角度为 60°时,超声波振动辅助的效果最显著,超声波功率达到 100 W 时,轮廓的变化达到最小,表明表面光滑度最佳,算术平均面粗糙度  $S_a$  为 22.5 nm。CHENG 等<sup>[6]</sup>提出了湿颗粒电解液电化学机械抛光,通过能量色散光谱和 X 射线光电子能谱分析,证明抛光加工后铜表面粗糙度为 21.83 nm。SUN 等<sup>[7]</sup>研究表明,在  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  浓度为 20~30 mmol/L 时,结合机械研磨和化学机械抛光对 Cu 表面进行加工处理,表面粗糙度显著降低至 8.7 nm。HASHMI 等<sup>[8]</sup>研制了磁抛光工具,并将其装配到立式铣床上对铜表面进行抛光,当工艺参数为磨粒尺寸 15  $\mu\text{m}$ 、磨料百分含量 20%、抛光转速 600 r/min 时,铜的绝对表面粗糙度达到最小值 30 nm。GHOSH 等<sup>[9]</sup>通过轮式磁流变抛光加工技术,证实当砂轮转速为 320 r/min、工作间隙为 2 mm、进给速度为 11 mm/min 时,  $S_a$  达到最小 15.5 nm。在铜衬底抛光中,电化学抛光能均匀溶解铜表面微凸起部分,提高铜的耐腐蚀性,但电化学抛光中铜材料损耗较大,操作不当会使表面形貌一致性变差,无法达到超精密抛光效果;化学机械抛光能够通过控制化学抛光剂、抛光压力等参数有效控制抛光速率,但化学机械抛光属于直接接触式抛光,易产生划痕等表面缺陷,对环境要求极高;磁流变抛光适用性广,但磁流变抛光的不易控制,抛光函数不稳定,无法通过数控加工提高抛光效率。

由上所述,提出线性液动压抛光方法,抛光液在圆柱形抛光工具高速转动的牵引下形成的液动压力,在抛光工具与其接触的区域呈线状分布且分布均匀性高。该方法属于非接触式抛光,操作简单,可实现数控加工,对环境要求不高<sup>[10-11]</sup>。本文首先基于线性液动压抛光方法的基本原理建立材料去除模型,然后设计复合结构抛光工具,通过数值模拟分析结构设计的可行性、有效性,并探究铜衬底表面形貌的演变规律和工艺参数优化,为改善表面形貌提供参考。

## 1 线性液动压抛光的理论模型

### 1.1 基本原理

线性液动压抛光原理如图 1 所示,其加工基本原理<sup>[12]</sup>为:将工件与抛光工具均浸没于抛光液中,两者之间保持微米级间隙,抛光工具高速旋转带动抛光液中的纳米级磨粒进入间隙中,产生垂

直工件方向的液动压力,对工件表面实现材料去除。

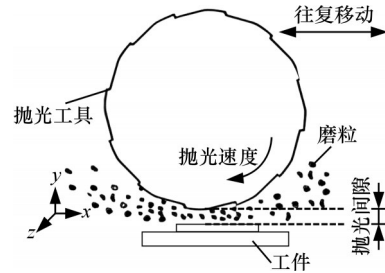


图 1 线性液动压抛光原理图

Fig.1 Schematic diagram of linear hydrodynamic polishing

### 1.2 材料去除模型<sup>[13]</sup>

Preston 方程是抛光加工材料去除的经验方程,在抛光加工领域得到了广泛应用,尤其是在光学元件和半导体制造中的抛光过程中<sup>[14]</sup>。Preston 方程在一定范围内,材料去除率与抛光压力和抛光相对速度成正比,而其他影响因素则通过比例常数来综合考虑。

但线性液动压抛光属于非接触式流体抛光,抛光相对速度  $V$  和抛光压力  $P$  都是随着工件表面位置坐标  $(x, y)$  和时间  $t$  而不断变化的。基于 Preston 方程的修正模型表达式为

$$\Delta R = k \int_0^t P V dt \quad (1)$$

式中:  $\Delta R$  为材料去除量;  $P$  为工件表面的抛光压力;  $V$  为抛光相对速度;  $k$  为 Preston 比例常数。

Reynolds 方程是描述流体在两个相对运动的平行板之间的流动行为的基本方程之一,是分析抛光液动压力的基础方程,其表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial (u_1 + u_2) \rho h}{\partial x} + 6 \frac{\partial (w_1 + w_2) \rho h}{\partial z} + 12\rho(v_1 - v_2) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $h$  为间隙;  $\mu$  为流体动力黏度;  $p$  为驱使液膜运动的液动压力;  $u_1, u_2, v_1, v_2, w_1, w_2$  分别为动液膜上下表面在  $x, y, z$  方向的速度。

针对线性液动压抛光作以下假设:①环境条件稳定,抛光液可视为不可压缩流体,流体密度  $\rho$  为常数;②抛光工具高速旋转且转速稳定,且忽略旋转精度误差、仪器振动等影响。

在抛光过程中  $u_1$  可代表抛光工具的边缘线速度,  $u_2$  可代表工件的移动速度。但由于线性液动压抛光的加工特性,抛光工具仅做定转速旋转运动和在  $x$  方向做往复直线运动,在  $y, z$  方向上静止,工件表面静止,故 Reynolds 方程可转化为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6u_1 \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

进一步,对 Reynolds 方程进行一次积分,代入流体动压方程的边界条件: $h = h_0, \partial p / \partial x = 0$ ,抛光间隙为  $h_0$ ,得到液动压力的表达式:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6u_1\mu \frac{h - h_0}{h^3} \quad (4)$$

动量方程为

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + F \quad (5)$$

式中: $\partial U / \partial t$ 为流体速度随时间的变化率; $U \cdot \nabla U$ 为流体速度的对流变化率; $-\nabla p$ 为流体的压力梯度力; $\mu \nabla^2 U$ 为流体的黏性力; $F$ 为流体的体积力。

根据式(5),对于一定的流体控制体,其动量对时间的变化率等于作用在该控制体上的外力之和,式(5)是分析抛光相对速度的基础方程。

在线性液动压加工中,假设环境条件稳定,抛光液可视为不可压缩流体,流体密度  $\rho$  为常数,且工件表面静止,抛光工具仅做高速旋转运动和在  $x$  方向做往复直线运动,在  $y, z$  方向上静止,即流体速度为  $x$  方向的分速度  $u_x$ ,动量方程可转化为

$$\rho \frac{du_x}{dt} = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

式中: $\rho \frac{du_x}{dt}$ 为惯性力; $\rho F_x$ 为体积力; $\frac{\partial p}{\partial x}$ 为压差力; $\mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right)$ 为黏性切应力; $F_x$ 为作用在单位体积流体上的力在  $x$  方向上的分力。

进一步,流体速度随至工件表面的距离  $y$  变化而变化,液动压力随  $x$  的变化而变化,且由于线性液动压抛光的加工特性,抛光工具工件间的间隙为微米级,流体被限制在两个接近的表面之间,这种情况下,惯性力和体积力的影响可以忽略,动量方程可转化为

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad (7)$$

进一步,对式(7)中的  $y$  进行两次积分,得到抛光相对速度不定式模型表达式:

$$\frac{1}{2} y^2 \frac{\partial p}{\partial x} + ay + b = \mu u_x \quad (8)$$

进一步,当流体靠近工件表面时,流体速度趋近于0,即  $y = 0$  时,  $u_x = 0$ ;在抛光工具边缘,抛光液流速为抛光工具边缘线速度,即  $y = h$  时,  $u_x = u_1$ ,  $u_1$  为抛光工具边缘线速度,  $h$  为间隙,  $y$  为到工件表面的距离。通过将这些边界条件代入抛光相对速度不定式模型,并联立式(4),得到抛光相对速度模型表达式:

$$u_x = 3u_1 \frac{(y^2 - hy)(h - h_0)}{h^3} + \frac{yu_1}{h} \quad (9)$$

根据建立抛光液动压力模型(式(4))和抛光

相对速度模型(式(9)),代入基于 Preston 方程的修正模型,得到线性液动压流场的材料去除模型表达式:

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= k \int_0^t \rho u_x dt \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= 6u_1\mu \frac{h - h_0}{h^3} \\ u_x &= 3u_1 \frac{(y^2 - hy)(h - h_0)}{h^3} + \frac{yu_1}{h} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由式(10)可知,在线性液动压抛光加工中,材料去除效果受到加工时间  $t$ 、抛光转速  $u_1$ 、抛光间隙  $h_0$  的影响。为获得更加卓越的表面形貌,需要分析研究上述因素对工件表面形貌的影响规律。

同时,材料去除模型由抛光相对速度模型和液动压力模型结合得到,而抛光相对速度模型的建立中也运用了液动压力模型,在相同条件下,液动压力越大,材料去除率越大,因此,液动压力对材料去除起到关键作用,可以通过探讨液动压力来分析材料去除效率。

## 2 结构与实验设计

### 2.1 抛光工具结构设计

#### 2.1.1 螺旋结构设计

螺旋结构将抛光工具槽型结构纵向的直列形式排布变为螺旋形式排布,如图2所示。

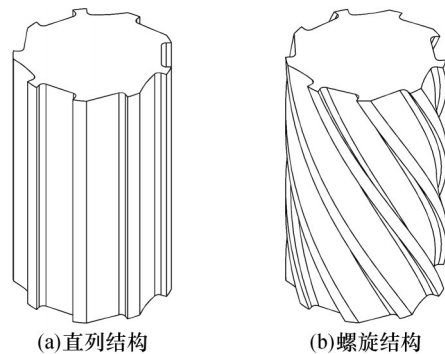


图2 直列和螺旋结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of inline and spiral structures

流体流经楔形区域将产生液动压力,即在槽型结构范围才会产生液动压力。相同尺寸的螺旋抛光工具相较于直列抛光工具楔形区域更多,产生的液动压力更多;同时,相较于直列结构槽型间隔条形分布,螺旋结构在抛光过程中更加连贯,产生的液动压力也更加连贯。螺旋结构产生的液动压力更多更连贯,在相同时间的抛光有效作用时间更长。因此,设置螺旋结构有利于提高抛光液动压力和材料去除效率。

#### 2.1.2 不等距槽宽结构设计

不等距槽宽结构是抛光工具沿圆周方向分布

多个单元结构,将槽宽等距的单元结构分别变为槽宽彼此微幅不等单元结构,单元结构公称尺寸相同,偏差由公差带控制,如图3所示。

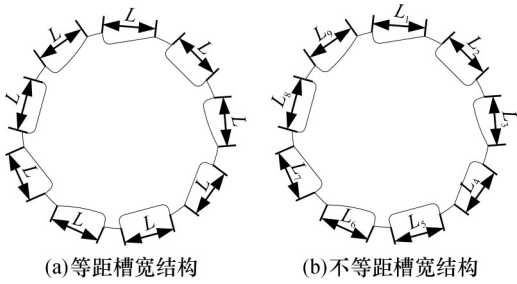


图3 等距槽宽和不等距槽宽结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of equidistant and non-equidistant slot width structures

等距槽宽抛光工具循环往复,单个抛光周期形成的液动压力是周期性规则的,循环往复产生的液动压力更容易形成周期性,易产生液动压力始终无法有效作用的区域。相较于等距槽宽抛光工具,不等距槽宽抛光工具由于槽宽不等距,单个抛光周期形成的液动压力是周期性不规则的,循环往复后的液动压力不易形成周期性,由此产生的液动压力会相较于等槽宽更加均匀。因此,设置变槽宽有利于提高表面形貌均匀性。

2.1.3 变厚度结构设计

变厚度结构是抛光工具沿轴向分布多个单元结构,将等高的层结构分别变为两类层高交替的变厚度结构,如图4所示。

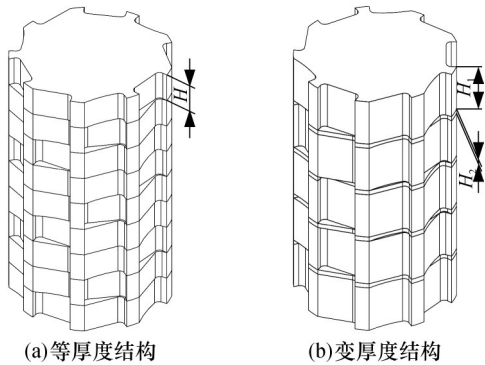


图4 等厚度和变厚度结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of single-layer and double-layer structures

前期研究发现,在圆周方向和轴线方向以数独形式排列3类槽型结构,形成动态交变循环载荷,当工件表面同时存在静应力和具有微小差异的液动压力时,会在其表面产生动态交替循环载荷的残余应力松弛效应,提高工件表面质量<sup>[15]</sup>。

但层与层之间的交互作用影响了两者连接处的液动压力,削弱了液动压力的均匀性。在原有的层与层之间增加较小厚度的层结构,在不影响

复合结构的作用下,缓冲层与层之间的交互作用,提高液动压力的均匀性。因此,设置变厚度结构有利于提高表面形貌均匀性。

2.2 实验设计

线性液动压抛光实验平台如图5所示。复合结构抛光工具实物如图6所示。选取浓度40%、粒径80 nm的纳米级胶态SiO<sub>2</sub>为抛光液,实验抛光工件采用T1紫铜,按图7所示实验流程进行抛光<sup>[16]</sup>。

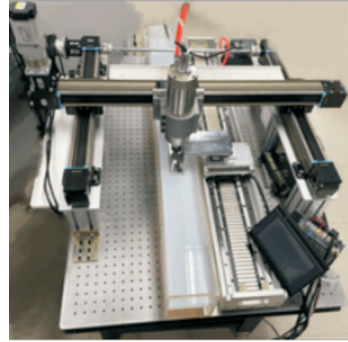


图5 抛光平台示意图

Fig.5 Schematic diagram of polishing platform

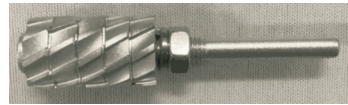


图6 复合结构抛光工具实物图

Fig.6 Physical picture of composite structure polishing tool

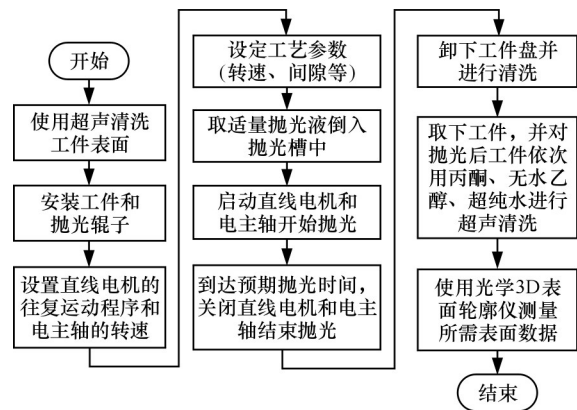


图7 实验流程图

Fig.7 Experimental flowchart

3 结果与讨论

3.1 不同结构抛光工具产生的流场特征

3.1.1 直列结构和螺旋结构

线性液动压抛光过程中的材料去除作用受液动压力的影响,液动压力强弱和均匀性对工件表面微观形貌产生直接影响。对相同尺寸结构的直列结构和螺旋结构进行数值模拟,抛光工具直径

均为 16 mm、槽宽 4 mm、高 27 mm、转速 15 000 r/min、抛光间隙 60 μm，两者在抛光中循环往复产生的液动压力特性云图见图 8。

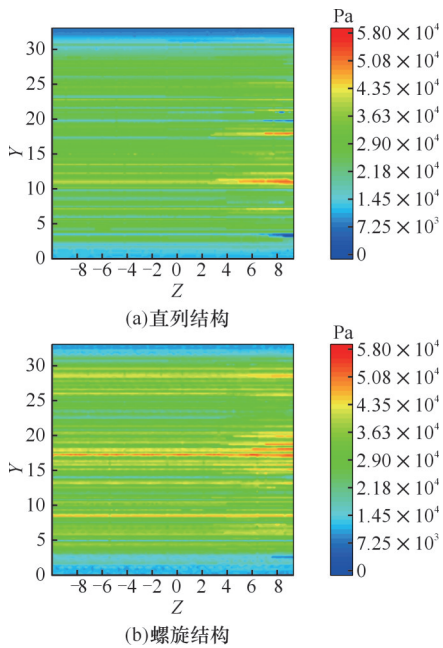


图8 直列、螺旋结构抛光工具液动压力云图  
Fig.8 Hydraulic pressure cloud map of inline and spiral structure polishing tools

由图8可知，在经过往复旋转后，螺旋结构和直列结构产生的液动压力均值在模拟表面呈平铺分布，在y和z方向不同位置点受到的平均液动压力数量级一致。结合表1可知，往复旋转的螺旋结构工具在模拟面上的均值 $p$ 为29 008.68 Pa，比直列结构往复旋转液动压力均值增长15.61%，两者标准差 $\sigma$ 相近。因此，往复旋转后螺旋结构相较于直列结构液动压力更大。

综上所述，相较于直列结构，相同尺寸的螺旋结构产生的液动压力更大，有利于提高材料去除率。

表1 直列、螺旋结构抛光工具液动压力模拟结果  
Tab.1 Simulation results of hydraulic pressure for inline and spiral structure polishing tools

	均值 $p$ /Pa	标准差 $\sigma$ /Pa
直列结构	25 091.65	8402.28
螺旋结构	29 008.68	8602.02

### 3.1.2 等距槽宽结构和不等距槽宽结构

对相同尺寸结构的等距槽宽结构和不等距槽宽结构进行数值模拟，抛光工具直径均为 16 mm、高 27 mm、转速 15 000 r/min、抛光间隙 60 μm，槽宽公称尺寸为 4 mm，不等距槽宽结构相邻槽之间存在 0.05 mm 差异，两者在抛光中循环往复产生的液动压力特性云图见图 9。

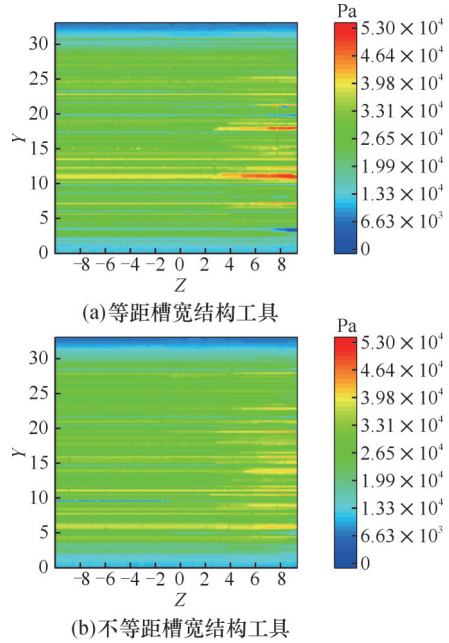


图9 等距槽宽、不等距槽宽结构抛光工具液动压力云图  
Fig.9 Hydraulic pressure cloud map of equidistant and non-equidistant slot width structure polishing tools

由图9可知，在经过往复旋转后，等距槽宽结构和不等距槽宽结构产生的液动压力在模拟表面呈平铺分布，在y和z方向不同位置点受到的平均液动压力处于同一水平。与等距槽宽结构相比而言，不等距槽宽结构产生的液动压力云图整体颜色更趋于一致，液动压力更均匀。同时，结合表2可知，往复旋转的不等距槽宽结构在模拟面上的均值 $p$ 与等距槽宽结构相近，但不等距槽宽结构的标准差 $\sigma$ 为7837.85 Pa，比等距槽宽结构工具标准差下降7.20%。

综上所述，相较于等距槽宽结构，相同尺寸和排布的不等距槽宽结构往复旋转后液动压力均匀性更好，有利于提高表面形貌均匀性。

表2 等距槽宽、不等距槽宽结构工具液动压力模拟结果  
Tab.2 Simulation results of hydraulic pressure for equidistant and non-equidistant slot width structure polishing tools

	均值 $p$ /Pa	标准差 $\sigma$ /Pa
等距槽宽结构	25 091.65	8402.28
不等距槽宽结构	25 721.78	7837.85

### 3.1.3 等厚度结构与变厚度结构

对相同尺寸结构的等厚度结构与变厚度结构进行数值模拟，圆柱抛光工具直径均为 16 mm、槽宽 4 mm、转速 15 000 r/min、抛光间隙 60 μm，等厚度为 3 mm，变厚度为 5 mm、0.5 mm，两者在抛光中循环往复产生的液动压力特性云图见图 10。

对比图10可知，在经过往复旋转后，等厚度

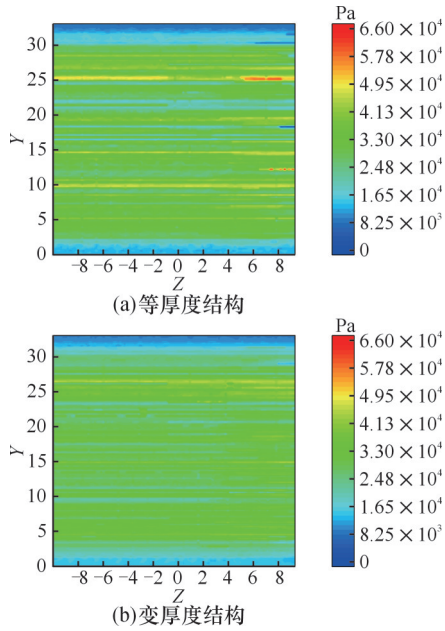


图 10 等厚度、变厚度结构抛光工具液动压力云图  
Fig.10 Hydraulic pressure cloud map of single-layer and double-layer structure polishing tools

结构和变厚度结构产生的液动压力均值在模拟表面呈平铺分布,在  $y, z$  方向不同位置点受到的平均液动压力数量级一致。但等厚度结构产生的液动压力相较于变厚度结构有更明显的条状分布,液动压力均匀性更差。结合表 3 所示,变厚度结构液动压力标准差  $\sigma$  为 7660.94 Pa,比等厚度结构标准差下降 22.85%,变厚度结构产生的液动压力更均匀。

综上所述,在工艺参数、排列和槽型结构相同的条件下,变厚度结构能够不影响复合结构的作用,相较于等厚度结构产生的液动压力更加均匀,有利于提高表面形貌均匀性。

表 3 等厚度、变厚度结构抛光工具液动压力模拟结果

Tab.3 Simulation results of hydraulic pressure for single-layer and double-layer structure polishing tools

	均值 $\bar{p}/\text{Pa}$	标准差 $\sigma/\text{Pa}$
等厚度结构	28 779.23	9410.68
变厚度结构	27 381.78	7660.94

### 3.1.4 复合结构

对复合结构同样进行模拟分析,抛光磨粒直径选择与实验抛光一致的 80 nm,  $\text{SiO}_2$  抛光液浓度为 40%, 旋转域整体转速为 15 000 r/min, 与单一的螺旋结构、不等距槽宽结构、变厚度结构进行比较,验证复合结构的可行性和有效性。

首先,结合图 11 可知,复合结构抛光工具产生的液动压力与单一螺旋结构、不等距槽宽结构、变厚度结构产生的液动压力均处于同一数量级;同时,复合结构抛光工具产生的液动压力明显大

于单一螺旋结构、不等距槽宽结构、变厚度结构产生的液动压力。由此说明,复合结构具有可行性。

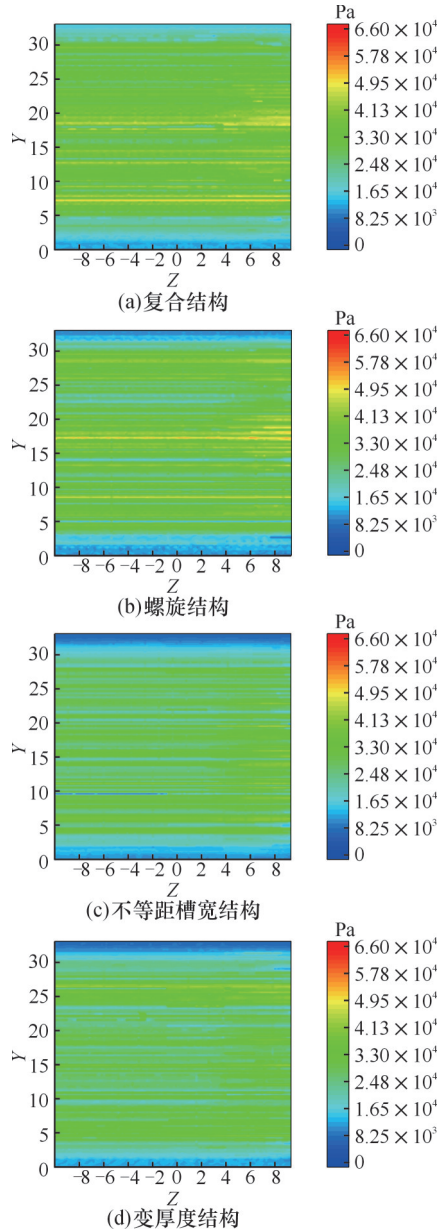


图 11 复合结构和单一结构抛光工具液动压力云图  
Fig.11 Hydraulic pressure cloud map of composite and single structure polishing tools

结合表 4 可知,往复旋转后复合结构液动压力标准差  $\sigma$  相较于单一螺旋结构下降 24.64%,同时,复合结构工具往复旋转产生的液动压力均值  $\bar{p}$  比单一螺旋结构工具增大了 13.16%。由此说明,复合结构工具能产生更大的液动压力提高抛光效率,往复旋转产生的液动压力更均匀,相较于单一螺旋结构更优。

往复旋转后复合结构液动压力标准差  $\sigma$  相较于单一不等距槽宽结构工具下降 5.02%,同时,复合结构工具往复旋转产生的液动压力均值  $\bar{p}$  比单

表4 复合结构和单一结构抛光工具液动压力模拟结果

Tab.4 Simulation results of hydraulic pressure for composite and single structure polishing tools

	均值 $\rho$ /Pa	标准差 $\sigma$ /Pa
复合结构	32826.33	7463.33
螺旋结构	29008.68	8602.02
不等距槽宽结构	25721.78	7837.85
变厚度结构	27381.78	7660.941

一不等距槽宽结构工具增加大了27.62%。由此说明复合结构工具能产生更大的液动压力提高抛光效率,往复旋转产生的液动压力更均匀,相较于单一不等距槽宽结构更优。

由于复合结构的交互作用,复合结构工具液动压力标准差 $\sigma$ 略小于单一变厚度结构工具,同时,复合结构工具往复旋转的液动压力均值 $P$ 相较于单一变厚度结构增大了19.88%。由此说明复合结构工具能产生更大的液动压力提高抛光效率,相较于单一变厚度结构更优。

综上所述,相较于单一的螺旋结构、不等距槽宽结构和变厚度结构工具,复合结构工具具有更大的液动压力,更小的标准差。由此说明,复合结构具有有效性。

### 3.2 流场压力的测试验证

搭建液动压力测试系统,选用薄膜压力传感器,采集不同结构的抛光工具往复抛光产生的液动压力<sup>[17]</sup>,并与液动压力模拟数据进行对比。抛光磨粒直径选择与模拟抛光一致的80 nm, SiO<sub>2</sub>抛光液浓度为40%,抛光转速为15 000 r/min,抛光间隙为60  $\mu$ m。取测试结果中10 s内连续数据点,计算其平均数作为当前工况下测得的液动压力值,测试结果如图12所示。

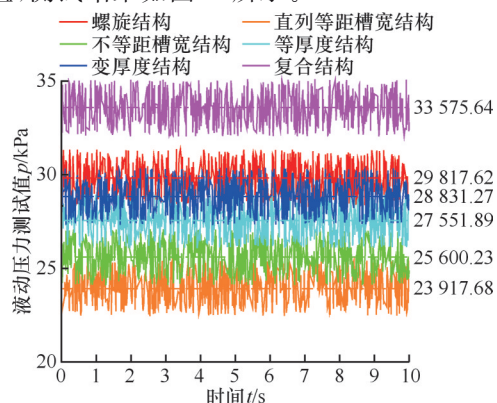


图12 不同结构抛光工具液动压力采集结果

Fig.12 Results of hydraulic pressure for polishing tools with different structures

往复抛光的液动压力模拟结果与测试结果对比如表5所示,两者之间存在差异,可能是由模拟模型假设条件与实际情况之间存在差异造成的,

模拟时简化了抛光工具,忽略了刀柄对液动压力的影响,从而导致模拟值与测试值之间存在差异。但两者均值误差最大为5.03%,模拟结果与测试结果数据接近,差异性较小,说明模拟值与测试值具有一致性,验证了模拟的正确性。

表5 液动压力模拟结果与测试结果对比

Tab.5 Comparison between hydraulic pressure simulation results and test results

抛光工具结构	模拟均值/Pa	测试均值/Pa	均值误差/%
螺旋结构	29 008.68	29 817.62	2.71
直列等距槽宽结构	25 091.65	23 917.68	4.91
不等距槽宽结构	25 721.78	25 600.23	0.47
等厚度结构	28 779.23	27 551.89	4.45
变厚度结构	27 381.78	28 831.27	5.03
复合结构	32 826.33	33 575.64	2.23

### 3.3 铜衬底表面形貌优化

#### 3.3.1 抛光时间对表面形貌的影响研究

设定抛光转速为15 000 r/min,抛光间隙为60  $\mu$ m,抛光时间从0起始,以15 min为间隔,直至表面形貌达到最佳。以图7所示的工艺路线进行抛光,表面形貌实验结果如图13所示。

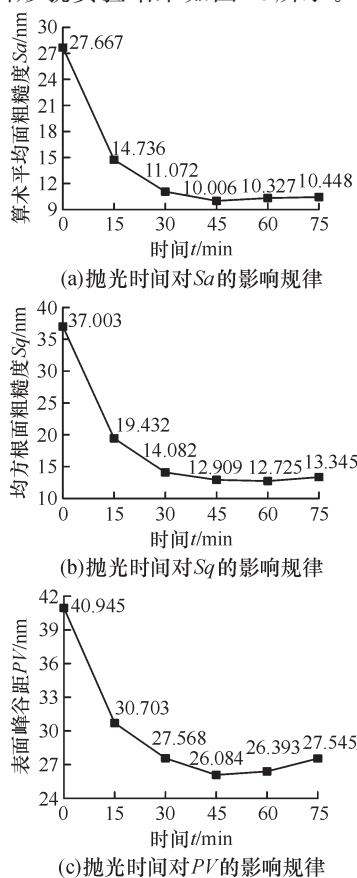


图13 抛光时间对表面形貌参数的影响

Fig.13 The influence of polishing time on surface morphology parameters

由图13可知,抛光时间对表面形貌参数的影响规律一致,算术平均面粗糙度 $S_a$ 、均方根面粗糙度 $S_q$ 、表面峰谷距 $PV$ 都先逐渐减小后增大,向

最佳值收敛的速度先快后慢,在0~15 min时收敛速度最快,15 min后趋近收敛的速度逐渐变慢。当抛光时间达到45 min时,铜衬底工件表面 $Sa$ 、 $PV$ 达到最小,分别为10.006 nm、26.084 nm,随后增大,而当抛光时间达到60 min时,铜衬底工件表面 $Sq$ 为12.725 nm达到最小,随后增大。

首先,45 min时2个形貌参数达到最佳,比60 min时多1个;其次, $Sa$ 在45~60 min之间增长3.21%, $PV$ 增长1.18%,而 $Sq$ 仅减小1.43%,不足以弥补 $Sa$ 、 $PV$ 的损失,出现过抛现象,综上所述,最佳抛光时间为45 min。

### 3.3.2 抛光转速对表面形貌的影响研究

设定抛光时间为最佳抛光时间45 min,抛光间隙为60  $\mu\text{m}$ ,抛光转速从12 000 r/min起始,以3000 r/min为间隔,直至电主轴可达最高转速24 000 r/min。以图7所示的工艺路线进行抛光,表面形貌数据如图14所示。

由图14可知,抛光转速对表面形貌参数的影

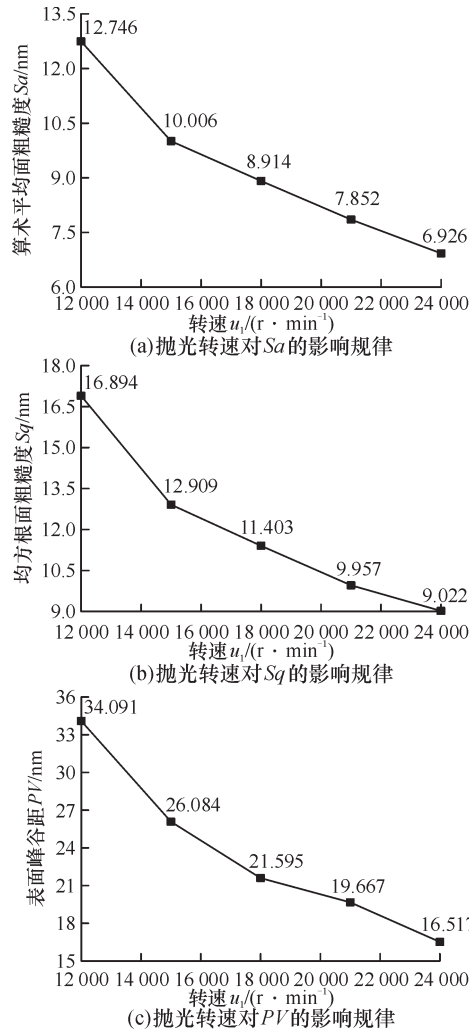


图14 抛光转速对表面形貌参数的影响

Fig.14 The influence of polishing speed on surface morphology parameters

响规律一致, $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 都随着抛光转速的增加而逐渐减小。当抛光转速达到24 000 r/min时,铜衬底工件表面 $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 均达到最小,分别为6.926 nm、9.022 nm、16.517 nm。抛光转速为24 000 r/min时,表面形貌参数曲线仍存在较大斜率, $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 都仍处于优化阶段。但本实验工况下,24 000 r/min为电主轴最高转速。因此,最佳抛光转速为24 000 r/min。

### 3.3.3 抛光间隙对表面形貌的影响研究

设定抛光时间为最佳抛光时间45 min,抛光转速为最佳抛光转速24 000 r/min,抛光间隙从本实验工况下可进行抛光的20  $\mu\text{m}$ 起始,以20  $\mu\text{m}$ 为间隔直至100  $\mu\text{m}$ 。以图7所示的工艺路线进行抛光,表面形貌数据如图15所示。

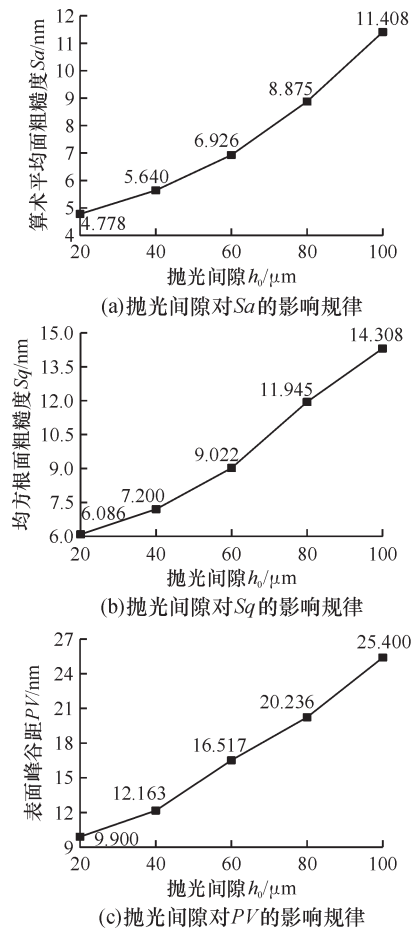


图15 抛光间隙对表面形貌参数的影响

Fig.15 The influence of polishing gap on surface morphology parameters

由图15可知,抛光间隙对表面形貌参数的影响规律一致, $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 都随着抛光间隙的增大而逐渐增大。当抛光间隙达到20  $\mu\text{m}$ 时,铜衬底工件表面 $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 均达到最小,分别为4.778 nm、6.086 nm、9.900 nm。抛光间隙为20  $\mu\text{m}$ 时,表面形貌参数 $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$ 曲线仍存在

较大斜率,  $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$  都处于优化阶段。但本实验工况下, 若抛光间隙在  $20\ \mu\text{m}$  以下, 极易出现抛光工具与铜衬底抛光工件的直接接触, 造成表面损伤。因此, 最佳抛光间隙为  $20\ \mu\text{m}$ 。

如图16所示, 随着工艺参数优化, 表面未加工前存在“凸峰”和划痕, 表面形貌参数  $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$  分别为  $27.667\ \text{nm}$ 、 $37.003\ \text{nm}$ 、 $40.945\ \text{nm}$ , 而经过最佳工艺参数(抛光时间  $45\ \text{min}$ 、抛光转速  $24\ 000\ \text{r/min}$ 、抛光间隙  $20\ \mu\text{m}$ )的线性液动压抛光加工后,  $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$  分别为  $4.778\ \text{nm}$ 、 $6.086\ \text{nm}$ 、 $9.900\ \text{nm}$ , 表面平坦, 均匀性得到极大提高。

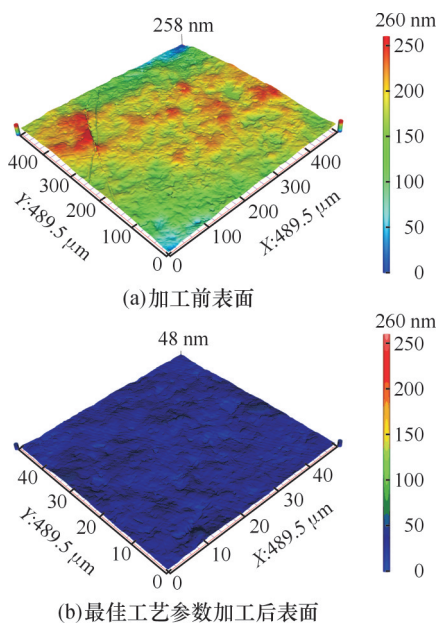


图16 抛光加工前后表面

Fig.16 Surface before and after polishing processing

#### 4 结论

(1) 结合抛光原理, 基于材料去除模型所需的液动压力和相对速度建立数学模型。在液动压抛光中, 加工时间、抛光转速和抛光间隙影响材料去除效果, 其中液动压力起关键作用。

(2) 设计了螺旋结构、不等距槽宽结构和变厚度结构的复合抛光工具。模拟结果表明: 复合结构液动压力均值更大、标准差更小, 复合结构具有有效性和可行性。

(3) 铜衬底的表面形貌参数  $Sa$ 、 $Sq$  和  $PV$  随着抛光时间的增加先减小后增大, 随抛光转速的增大、抛光间隙的减小而逐渐减小。在现有条件下, 最佳工艺参数为: 抛光时间  $45\ \text{min}$ 、抛光转速  $24\ 000\ \text{r/min}$ 、抛光间隙  $20\ \mu\text{m}$ , 此工艺参数下的表面形貌参数  $Sa$ 、 $Sq$ 、 $PV$  分别为  $4.778\ \text{nm}$ 、 $6.086\ \text{nm}$ 、 $9.900\ \text{nm}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 米绪军, 姜花芬, 解浩峰, 等. 我国先进铜基材料发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 96-103.  
MI Xujun, LOU Huaifen, XIE Haofeng, et al. Development Strategy for Advanced Copper-based Materials in China[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 96-103.
- [2] 王勇, 马玉平, 孙方宏, 等. 光滑硬质合金衬底渗硼预处理对CVD金刚石薄膜性能的影响[J]. 中国机械工程, 2006, 17(5): 545-548.  
WANG Yong, MA Yuping, SUN Fanghong, et al. Influence on the Performance of CVD Diamond Films by Boronizing on Smooth Cobalt-cemented Tungsten Carbide [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(5): 545-548.
- [3] 王宇迪, 王鹤峰, 杨尚余, 等. 纳米压痕技术及其在薄膜/涂层体系中的应用[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 138-159.  
WANG Yudi, WANG Hefeng, YANG Shangyu, et al. Nanoindentation Technique and Its Application in Film/Coating System [J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 138-159.
- [4] RAHMAN M H, MCCARROLL A, SIDDAIAH A, et al. Ultrasonic Assisted Electropolishing to Reduce the Surface Roughness of Laser Powder Bed Fusion Based Additively Manufactured Copper Heat Exchanger Components [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134(9/10): 4297-4314.
- [5] ZHANG Xinqian, WANG Jinhui, CHEN Jiaqi, et al. Material Removal and Surface Modification of Copper under Ultrasonic-assisted Electrochemical Polishing [J]. Processes, 2024, 12(6): 1046.
- [6] CHENG Jirui, KANG Renke, DONG Zhigang, et al. A New Polishing Method for Complex Structural Parts: Moist Particle Electrolyte Electrochemical Mechanical Polishing (MPE-ECMP) [J]. Electrochemistry Communications, 2023, 150: 107475.
- [7] SUN Mao, JIANG Liang, WU Yuan, et al. Effect of Potassium Persulfate on Chemical Mechanical Planarization of Cu/Ni Microstructures for MEMS [J]. Microelectronic Engineering, 2023, 275: 111979.
- [8] HASHMI A W, MALI H S, MEENA A, et al. Experimental Investigation on Magnetorheological Finishing Process Parameters [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 48: 1892-1898.
- [9] GHOSH G, SIDPARA A, BANDYOPADHYAY P P. Experimental and Theoretical Investigation into Surface Roughness and Residual Stress in Magnetorheological Finishing of OFHC Copper [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116899.
- [10] 涂作昆, 蔡姚杰, 许鑫祺, 等. 线性液动压抛光波纹度加工特性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 336-345.  
GAN Zuokun, CAI Yaojie, XU Xinqi, et al. Processing Characteristics of Linear Hydrodynamic Polishing Waviness [J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 336-345.
- [11] 谢重, 文东辉, 成志超, 等. 线性液动压抛光流场的循环交变压力衍生机制[J]. 中国机械工程, 2023, 34(19): 2288-2295.  
XIE Zhong, WEN Donghui, CHENG Zhichao, et al. Derivation Mechanism of Cyclic Alternating Dynamic Pressures in Linear Hydrodynamic Polishing Flow Fields [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19): 2288-2295.
- [12] 文东辉, 许鑫祺, 郑子军. 线性液动压抛光流场的剪切特性研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2203-2210.

(下转第563页)