[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.003

# 纯铜研磨表面残余应力在液动压悬浮 抛光中的松弛规律

姜 涛<sup>1</sup>,谢 重<sup>1,2</sup>,应一帜<sup>1</sup>

(1. 台州职业技术学院 机电工程学院,浙江 台州 318000;
 2. 浙江工业大学 机械工程学院,浙江 杭州 310014)

摘 要:为了探究液动压悬浮抛光工件表面的应力松弛规律,课题组利用有限元法建立了液动压悬浮抛光过程中单/多 颗磨粒连续撞击工件的数值分析模型。在模型中引入了传统研抛加工后的工件表面粗糙度和残余应力参数值,分别探 讨了单/多颗磨粒连续撞击情况下抛光转速对机械研磨后铜质工件中残余应力松弛的影响;选取经过传统研抛和传统研 抛再液动压悬浮抛光的铜质工件试样,使用X射线衍射仪分别对铜质工件表面进行残余应力测试。测试结果验证了液 动压悬浮抛光过程中单/多颗磨粒连续撞击工件的数值分析模型的正确性,表明液动压悬浮抛光过程对研磨表面的残余 应力起到了良好松弛效果。该研究有益于在液动压悬浮抛光加工中改善工件表面应力状态。

关 键 词:液动压悬浮抛光;磨粒撞击;残余应力松弛;X射线衍射

中图分类号:TG115.22;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)05-0014-06

# **Relaxation Rule of Residual Stress on Grinded Surface of Pure Copper during Hydrodynamic Suspension Polishing**

JIANG Tao<sup>1</sup>, XIE Zhong<sup>1,2</sup>, YING Yizhi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou, Zhejiang 318000, China;
 2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the relaxation rule of residual stress on the surface of hydrodynamic suspension polishing (HSP), the numerical analysis model of single/multiple abrasive particle impacting on a metallic component was established by using finite element method. The parameters of surface roughness and residual stress after traditional polishing were introduced into the model and the effects of polishing speed on the residual stress relaxation in copper workpiece after mechanical lapping in the case of continuous impact of single/multiple particles were investigated respectively. The residual stress on the copper workpiece surface after traditional polishing and the HSP were tested by X-ray diffractometer. The results show that the accuracy of the parametric model of single/multiple particle impacting on a metallic component and the HSP process has a good relaxation effect on the residual stress of the grinded surface. This study is beneficial to improve the surface stress state of the workpiece in HSP process.

Keywords: hydrodynamic suspension polishing; particle impact; residual stress relaxation; XRD(X-Rays Diffraction)

基于现有技术制备出的纳米薄膜在微电路、光学 系统和生物学等领域得到了广泛的应用,具有良好的 电磁、光学和力学等特性。纳米薄膜的制备要以原子 级超光滑表面作为生长表面,且该生长表面的表面质 量对薄膜的制备起着决定性的作用,特别是生长表面上的残余应力的分布对薄膜的生长质量影响非常大。 所以,如何改善超光滑纳米薄膜生长表面的残余应力的分布状态具有重要意义<sup>[12]</sup>。

基金项目:浙江省高等教育"十三五"第一批教学改革研究项目(jg20180739)。

第一作者简介:姜涛(1983),男,浙江建德人,硕士研究生,讲师,主要研究方向为智能制造。E-mail:502834250@ qq. com

收稿日期:2021-04-15;修回日期:2021-07-13

液动压悬浮抛光是一种非接触式的超精密抛光方 法,不仅能有效改善铜质工件表面粗糙度和位错形态, 而且抛光过程中对工件表层残余应力的改善有着积极 作用。国内外很多学者采用不同的工艺研究了不同金 属材料表面残余应力的松弛规律,其中,胡永会等[34] 对7075 高强铝合金进行喷砂强化,采用 XRD 研究喷 砂表面在循环载荷作用下残余应力的松弛规律。王建 明等<sup>[5]</sup>研究了7075铝合金在疲劳载荷循环次数、应力 比、初始残余应力场等因素下对喷丸表面残余应力的 松弛规律。高玉魁<sup>[6]</sup>采用 XRD 研究了超高强度钢在 旋转弯曲疲劳过程中喷丸表面残余应力的松弛规律。 Mauduit 等<sup>[7]</sup>对 TRIP780 高强度钢进行喷丸强化,采 用 XRD 研究循环载荷下喷丸表面残余应力的松弛规 律。ISA 等<sup>[8]</sup> 对 A516 Gr70 钢进行喷丸强化,采用 XRD 研究循环载荷下喷丸表面残余应力的松弛规律, 发现随着喷丸强化的载荷增大,循环载荷下的应力松 弛效果更好。液动压悬浮抛光方法作为一种超光滑工 件表面的应力松弛手段,对机械研磨后的纯铜表面应 力松弛起到积极作用。

目前,对纯铜表面的应力松弛效应的相关研究相 对较少,课题组基于 ABAQUS 软件建立了液动压悬浮 抛光过程的有限元数值模型,模拟单/多颗磨粒连续撞 击铜质工件表面,研究磨粒运动参数对铜质工件表面 的残余应力松弛规律的影响。先选取传统研抛的工件 和传统研抛后再液动压悬浮抛光的工件,再使用 XRD 分别测试工件表层的残余应力,结果显示液动压悬浮 抛光对改善铜质工件表层残余应力状态有良好的效 果,验证了数值模拟的准确性。最终,获得液动压悬浮 抛光加工过程中工件表面的应力松弛状况,为进一步 改善液动压悬浮抛光加工工艺提供参考。

# 1 单/多颗磨粒撞击的有限元模拟

# 1.1 有限元模型建立

使用有限元软件 ABAQUS 建立单/多颗磨粒连续 撞击工件表面的三维数值模型,工件尺寸为 10 mm × 10 mm ×1 mm。数值模型仿真时,为提高运算速度,提 取的模型尺寸为 30 µm × 30 µm × 6 µm,磨粒直径为 7 µm。液动压悬浮抛光的铜质工件需要先进行机械研 磨粗加工,机械研磨抛光后铜质工件表面的粗糙度 *R*<sub>a</sub> 约为 50 nm,所以在建立三维模型时通过起伏的轮廓 表面来描述工件表面的粗糙度,起伏高度为 50 nm,如 图 1 所示。铜质工件的材料力学性能如表 1 所示。

液动压悬浮抛光中磨粒与工件的撞击近似水平, 取 $\theta = 0.03^{\circ[8-10]}$ ,通过该撞击角度换算出不同加工转 速 *n*下磨粒与工件表面撞击的分向速度,如表 2 所示。 其中 *V* 是磨粒撞击时在工件平面内的合速度,*V*<sub>z</sub>是磨 粒撞击时在 *Z* 方向的分速度。



图 1 单颗磨粒撞击工件的有限元模型 Figure 1 FEM of a single abrasive particle impacting workpiece

	Ŧ	Ŀ.	1	铜	质	Ľ	件	材	料	的	力	学	性	能	Ŀ
--	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Table 1 Mechanical properties of copper workpiece

弹性模量 E/GPa	泊松比μ	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	屈服强度 $\sigma_0$ /MPa
110	0.343	8 980	60

表2 不同转速下磨粒对应的 $V_x \approx V_z$ 值

Table 2 Corresponding  $V_x$  and  $V_z$  values of

abrasive particles at different speeds

$n/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	$V_{\chi}/(\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_Z/(\mathrm{mm}\cdot\mathrm{s}^{-1})$
200	1 047.198	0.548
400	2 094.395	1.097
600	3 140.000	1.644

#### 1.2 网格划分及初始条件

铜质工件的网格划分采用的是结构化网格,网格 单元类型是 Hex 型,网格单元数量是 90 000 个。磨粒 模拟成刚性球体,其网格划分采用的是非结构化网格, 网格单元类型是 Tet 型,网格单元数量是 16 852 个,铜 质工件底面使用旋转约束和位移约束。

对液动压悬浮抛光加工过程进行数值模拟时,不 仅考虑机械研磨在铜质工件表面产生的粗糙度,同时 要考虑机械研磨在工件表层形成的残余应力的分布状 况。结合金明骏等<sup>[11]</sup>对传统机械研磨抛光加工后工 件表面残余应力分布的研究,以及后文中残余应力的 测试结果和残余应力深度的计算结果,类比出研抛后 铜质工件表面在一定厚度内的残余应力分布,如图 2 所示。利用 ABAQUS 中施加初始应力的用户子程序 SIGINI,将该应力作为初始应力施加到工件模型中,如 图 3 所示;为提高运算速度,假设磨粒从近壁面位置开 始撞击铜质工件表面。



图 2 不同深度内 X 方向的初始残余应力 Figure 2 Initial residual stress in X direction at different depths



图 3 施加预应力后的有限元模型 Figure 3 FEM of applying prestress

#### 1.3 有限元计算结果

#### 1.3.1 单颗磨粒撞击

数值模拟3种抛光转速下单颗磨粒对铜质工件表 面的连续撞击,从而改善工件表层的应力状态。如图 4所示的截面应力云图,是单颗磨粒对工件同一位置 连续撞击达到10次后的效果图。

单颗磨粒连续撞击铜质工件表面后,极大地减小 了撞击点工件表层的压应力,随着转速的增加工件表 层的压应力减小的效果越明显。同时,从截面应力云 图可以看出,磨粒撞击后对工件表面的内部的应力影 响很小。所以,液动压悬浮抛光在工件表层具备实现 微量切削的条件,从而能获得低应力的超光滑表面。 图 5 所示为抛光转速 600 r/min 下工件不同厚度内的 应力分布。

图 6 所示为不同转速下单磨粒连续撞击的铜质工件表面的应力松弛曲线。从图中可清晰看出,在单颗磨粒连续撞击次数达到 10 次左右时,工件表面撞击点位置的残余压应力不再减小而达到一个稳定值,转速越高该稳定值的绝对值越小,即工件表层的压应力减





abrasive particle impacting workpiece



图 5 600 r/min 转速下工件不同厚度内的应力分布 Figure 5 Stress distribution in the depth of workpiece at 600 r/min

小的效果越明显。同时,前几次的磨粒撞击对撞击点的残余压应力变化很大,特别是首次撞击的影响最大。 1.3.2 多颗磨粒撞击

磨粒流在液动压悬浮抛光流场中以近似水平的角





度有序地撞击工件表面,通过研究磨粒流与工件表面 撞击形成的应力改善区的应力变化来描述铜质工件表 面在液动压悬浮抛光中的应力松弛规律。图7所示为 多颗磨粒撞击的有限元模型,以行距和列距都为 0.001 mm向X方向和Y方向各阵列4个,共16颗磨 粒,其他所有参数与单颗磨粒的撞击模型相同。



图 7 多颗磨粒撞击工件的有限元模型 Figure 7 FEM of multiple abrasive particles impacting workpiece

对多颗磨粒撞击进行数值模拟后,获得如图 8 所 示的铜质工件表面的应力云图。多颗磨粒连续撞击工 件表面形成的应力影响区随着抛光转速的增加而增 大,磨粒撞击的应力影响区域的应力值趋于均匀化,但 随着转速的提高撞击区域的边界位置的应力波动较 大。选取应力云图中间均匀区域的深色方框内的 16 个单元作为应力分析对象,在每次撞击结束后, ABAQUS 会输出该 16 个网格单元上的应力值并且求 应力平均值,由此得到多颗磨粒在连续撞击过程中工 件表面的应力松弛曲线,如图 9 所示。该应力松弛过 程基本与单颗磨粒撞击情况一致,但松弛效果要比单 颗磨粒撞击的更明显,因此多颗磨粒撞击能更完整地 反映抛光加工过程中的应力松弛过程。









# 2 工件表面残余应力测试

#### 2.1 测试准备

该测试实验设备是 LXRD 大功率 X 射线应力仪, X 射线方位角的范围是 ±45°,选用铜靶 Cu K-Alpha, 波长  $\lambda$  = 0.154 2 nm,采用同倾固定  $\psi$  法。 选取的试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 1 mm,试样 I、II 为传统研抛的工件,试样 II、IV 为传统研抛后再 液动压悬浮抛光的工件,分别对 4 个试样表面的 X, Y 方向的表面应力进行测试。如图 10 所示,定义了铜质 工件初始的 X 方向和 Y 方向,其中残余应力测试点 D 在工件表面的中心位置。





Figure 10 X and Y direction of copper workpiece

## 2.2 测试结果分析

2.2.1 X射线透射深度分析

X 射线的透射深度一般为数十微米以内,在透射 深度内,工件表面的应力随厚度的变化而改变,这是一种二维的表层应力分布状态,工件表面垂直方向上的 应力为零<sup>[12]</sup>。X 射线的透射深度公式为

$$\tau = \frac{\cos \left(90^{\circ} - \theta_{\psi X}\right) \cdot \cos \psi}{2\mu_m \cdot \rho} \ln \left(\frac{I_0}{I}\right)_{\circ} \qquad (1)$$

式中: $\psi$ 为衍射晶面方位角, $\theta_{\phi X}$ 为该方位角对应的衍 射角的一半, $\mu_m$ 是质量衰减系数, $\rho$ 是被测材料密度,  $I_0$ 为入射线强度,I为衍射线强度,取 $I_0/I = e_0$ 

由于 Cu K-Alpha 的能量为 8.04 keV,根据张帅 等<sup>[13]</sup>的 Cu 质量衰减系数曲线分布,可查得  $\mu_m \approx 90$  cm<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>。同时,铜质工件的衍射角 2 $\theta_{\psi X}$  = 144.68°,  $\rho$  = 8.98 g/cm<sup>3</sup>,因此可计算出 Cu K-Alpha 射线在不同 方位角下的透射深度,如表 3 所示。

表3 不同方位角下的透射深度

Tab	le 3	3 ]	Fransmission	depth	at	different	azimuth	angle
-----	------	-----	--------------	-------	----	-----------	---------	-------

<b>ψ</b> ∕(°)	$ au/\mu m$	ψ/(°)	$ au/\mu m$
7.34	5.847	- 23.03	5.425
0.00	5.895	- 35.32	4.810
- 12.29	5.760	- 42.66	4.335
- 17.66	5.617		

可以看出,X 射线在不同方位角下的透射深度不同,为本文前面数值模拟中的工件表面的应力层深度

提供参考值。X 射线测量应力一般是用特性 X 射线 穿透深度相应的一种加权平均值来评定材料表面的应 力,由此,本文前面的数值模拟中的工件应力层深度取 值为6μm。

2.2.2 工件表面应力分析

如图 11 所示为 XRD 测试获得的 2θ<sub>ψx</sub> - sin<sup>2</sup> ψ 拟 合曲线,一个点测试过程中会有 2 个测量值,该 2 个测 量值为图中 2 条直线的斜率。可以通过 2 条直线的靠 近程度来判断该点测得的残余应力值是否准确,2 条 直线距离靠得越近则测得的残余应力值越准确。图 11 中显示的残余应力值分别为 - 64.9 ± 10.3 MPa 和 - 23.4 ± 13.9 MPa,因此液动压悬浮抛光加工对铜质 工件表面的残余应力具有比较良好的松弛效果。



two processing methods

4 个试样沿 X,Y 方向测得的残余应力值结果如表 4 所示。显然,试样 I 和试样 II 沿 X,Y 方向的残余应 力值大小接近,符合传统研抛加工对工件表面应力状 态的影响方式;试样 III 和试样 Ⅳ 对工件表面 X,Y 方向 的应力值有差别,说明液动压悬浮抛光对 X,Y 方向的 应力松弛效果不尽相同。另一方面,通过测得传统研 抛加工后的工件表面残余应力值,为本文前面数值模 拟中的工件表面提供初始应力分布状态,从而能够更 加真实地模拟出液动压悬浮抛光加工对工件表面的应 力松弛规律。

表4 工件试样的残余应力值

 Table 4
 Residual stress value of workpiece sample

试样编号	$\sigma_{\chi}$ /MPa	$\sigma_{\scriptscriptstyle Y}$ /MPa
I	$-64.9 \pm 10.3$	$-64.4 \pm 9.8$
П	$-63.2 \pm 6.8$	$-62.0 \pm 6.7$
Ш	$-23.4 \pm 13.9$	$-27.1 \pm 9.5$
IV	$-21.1 \pm 10.2$	$-25.2 \pm 14.6$

# 3 结语

课题组采用有限元法建立液动压悬浮抛光过程中 单/多颗磨粒连续撞击工件的数值模型,在模型中引入 了传统研抛加工后的工件表面粗糙度和残余应力参数 值,分析单/多颗磨粒连续撞击过程中铜质工件表面残 余应力松弛状况,得到了以下结论:

 1)多颗磨粒撞击的模型更能全面地反映液动压 悬浮抛光过程中的应力松弛效应,工件表面的应力松 弛效果随着抛光转速增加而提高,且随着磨粒连续撞 击的次数增加铜质工件表面的应力会减小到一个稳定 值,前几次的磨粒撞击对撞击点的残余压应力变化很 大,特别是首次撞击的影响最大。

2) 液动压悬浮抛光加工的工件应力层影响深度 小,对工件表面的应力松弛明显,对工件内部的应力松 弛影响较小,抛光工件应力松弛后工件表面压应力趋 于均匀化。

3)液动压悬浮抛光流场中磨粒与铜质工件的撞击角度微小且受转速和抛光液浓度的影响小,在加入预应力的仿真模型中,以接近水平方向的力撞击工件对铜质工件表面的应力松弛效果有良好的稳定性,同时,也避免了大角度的磨粒撞击增大工件表面压应力

的情况出现。

## 参考文献:

- [1] 徐钉,文东辉,朴钟宇.液动压悬浮抛光盘的设计及抛光液动压分 布研究[J].润滑与密封,2015,40(7):56-59.
- [2] 文东辉,周海锋,徐钉,等.超光滑表面加工技术研究进展[J].机 电工程,2015,32(5):579-584.
- [3] 胡永会,吴运新,郭俊康.7075 铝合金喷砂表面残余应力在疲劳 过程中的松弛规律[J].热加工工艺,2010,39(18):24-27.
- [4] 胡永会,吴运新,郭俊康.7075 铝合金循环载荷下残余应力松弛 的实验研究[J].中国材料进展,2010,29(6):50-54.
- [5] 王建明,刘兴睿,吕鹤婷.循环载荷下喷丸残余应力松弛特性的数 值仿真[J].华南理工大学学报,2016,44(11):71-77.
- [6] 高玉魁.超高强度钢喷丸表面残余应力在疲劳过程中的松弛规律 [J].材料热处理学报,2007,28(增刊1):102-105.
- [7] MAUDUIT C, KUBLER R, BARRALLIER L, et al. Analysis of residual stress relaxation under mechanical cyclic loading of shotpeened TRIP780 steel [C]//Materials Research Proceedings of Residual Stresses 2016: ICRS-10. Sydney, Australia: Materials Research Forum LLC., 2016;85 – 90.
- [8] ISA M R,ZAROOG O S,ALI F S. Relationship between compressive residual stress relaxation and microhardness reduction after cyclic loads on shotpeened ASTM A516 grade 70 steel[J]. Key Engineering Materials,2018,765:232 - 236.
- [9] 谢重. 液动压悬浮抛光表面的应力松弛效应研究[D]. 杭州:浙江 工业大学,2017:32.
- [10] QI H, XIE Z, HONG T, et al. CFD modeling of a novel hydrodynamic suspension polishing process for ultra-smooth surface with low residual stress [J]. Powder Technology, 2017, 317:320 – 328.
- [11] 金明骏. 石英晶片研磨/抛光加工有限元仿真分析与试验研究
   [D]. 长春:吉林大学,2016:41.
- [12] 徐国平,尹志民,黄继武,等.X射线衍射测试 PDC表面残余应力的实验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2007,161(5):40-43.
- [13] 张帅,吴冲,吴金杰,等.用 HXCF 测量物质 X 射线质量衰减系数
   [J]. 计量学报,2016,37(增刊1):79-82.