

DOI: 10.7652/xjtuxb202002004

换能器阵列型超声抛光机理及 声场仿真和实验研究

李道朋, 傅波, 庄文敏
(四川大学机械工程学院, 610065, 成都)

摘要: 为了提高工件表面抛光质量和抛光效率,对传统非接触式超声振动抛光进行了改进,将单个换能器换成换能器阵列,同时加入料筐的旋转运动,设计了实验样机。分析了超声抛光的材料去除机理,推导出单颗磨粒去除材料体积和磨粒振动速度的表达式。利用 COMSOL 对样机抛光槽内液体进行声场仿真,研究了换能器个数、换能器布置间距、换能器输入电压对抛光液声场分布的影响,优化了抛光槽底部换能器的布置方式,仿真结果显示,换能器个数为 4 个、布置间距为 55 mm 时,抛光槽中心区域声压分布更加均匀。实验探究了样机料筐转速、抛光时间、换能器输入电压对工件表面抛光质量的影响规律,确定了工件表面抛光效果最佳时的工艺参数组合,结果表明:料筐转速为 50 r/min、抛光时间为 80 min、换能器输入电压为 150 V 时,抛光效果最好,此时工件表面粗糙度减小量为 0.019 μm ,表面粗糙度变化率为 33.33%。

关键词: 换能器阵列;超声抛光;材料去除机理;声场仿真;表面抛光质量
中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0024-11

Ultrasonic Polishing Mechanism and Simulative and Experimental Sound Field Researches on Transducer Array

LI Daopeng, FU Bo, ZHUANG Wenmin
(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To improve polishing quality and efficiency of workpiece surface, the traditional non-contact ultrasonic vibration polishing is modified, and an experimental prototype is designed, where an array of transducers is used instead of single transducer and the rotating motion of the basket is considered. The material removal mechanism of ultrasonic polishing is analyzed, and the expression of material volume removal by single abrasive particle and the expression of abrasive vibration velocity are deduced. The sound field simulation of the liquid in polishing tank of the prototype is carried out by COMSOL. The influences of number of transducers, spacing of the transducers and input voltage of the transducer on the sound field distribution of the polishing fluid are discussed, and the arrangement of transducers at the bottom of the polishing tank is optimized. Simulation shows that the sound pressure distribution in the central area of the polishing tank is more uniform when four transducers with spacing of 55 mm are arranged in the developed experimental device. Experiment explores the influences of the basket rotation speed, polishing time, and input voltage of transducer on the workpiece surface polishing quality, and

determines the best combination of the process parameters for surface polishing. When the basket rotation speed reaches 50 r/min, the polishing time lasts 80 min and the input voltage of transducer gets 150 V, the optimum polishing result can be achieved. The surface roughness of the workpiece is reduced by 0.019 μm , and the change rate of surface roughness is 33.33%.

Keywords: transducer array; ultrasound polishing; material removal mechanism; sound field simulation; surface polishing quality

传统的机械抛光方法不能抛光处理孔及异形曲面等复杂表面零件^[1]。超声振动抛光作为一种有效的表面光整技术已广泛应用于现代加工制造行业,不仅在陶瓷、石墨等各种硬脆材料的表面光整加工中有着独特的优势,而且在加工韧性材料方面也有很好的效果^[2]。超声抛光是指利用超声工具头驱动磨料悬浮液中的磨粒连续冲击被加工表面,把工件需要去除的材料破碎成微小的颗粒而脱落,实现抛光的目的^[3]。

目前,对于超声振动抛光已有许多学者研究并取得了一定的成果。Huuki 等通过对铝、34-CrNi-Mo6 回火钢和 S355J2 结构钢 3 种金属旋转轴的超声振动抛光试验分析,验证了超声振动抛光不仅能够改善金属材料的表面质量,还能提高工件的表面硬度^[4]。Zarepour 等首次提出了利用单颗磨粒冲击碰撞模型来研究微细超声加工中的材料去除方式,指出磨粒动能和材料临界动能是估算材料去除率的关键^[5]。赵轩达等建立了单磨粒的力学模型,通过响应面实验对影响表面质量和加工效率的重要参数进行了研究,结果表明,超声频率对材料去除量和表面粗糙度变化率的影响最大^[6]。Hocheng 等研制了一套超声振动抛光系统,重点探究了模具钢抛光实验中磨粒尺寸和静态载荷对表面光洁度的影响,结果表明,对于特定尺寸的磨料,经过一定次数的抛光后可达到特定的表面光洁度,静态载荷越大,磨粒更有效地被激活,抛光效果更好^[2]。周忆等验证了含有磨粒的工作液在超声波作用下能够实现硬脆材料表面层的微细加工,加工工艺参数对材料去除率的影响呈现非线性,选取合适的参数可以实现高效率、高精度的研磨抛光^[7]。黄志刚等在少量假设和简化的前提下,对宏观的声压场和流场的空化效应、磨粒和工件的冲击碰撞过程进行了模拟计算^[8]。Venkatesh 等研究表明,工件振幅的变化对壁面剪切力有显著影响,对介质速度和压力影响很小,温度升高不会影响介质的稳定性^[9]。于兆勤等研制了流体二维振动抛光装置,并对其结构进行了优化设计,通过调整抛光槽底部和侧面换能器阵列

的排布及改变工件的装夹方式,使抛光槽内的声压分布更加均匀,改善了抛光效果^[10-12]。

在以往的研究中,超声抛光多以单换能器为主,工件在抛光过程中多为静止。为了改善工件表面抛光质量,提高抛光效率,本文在传统非接触式超声振动抛光的基础上加入料筐的旋转运动作为辅助,同时将抛光系统中的单个换能器换成换能器阵列。首先从材料去除机理的角度出发建立了单颗磨粒去除材料模型,然后结合多物理场仿真软件 COMSOL 优化了换能器阵列的布置参数,最后实验研究了样机料筐转速、抛光时间、换能器输入电压对工件表面抛光效果的影响规律,得到了最佳的工艺参数组合。

1 材料去除机理

传统非接触式超声振动抛光加工原理如图 1a 所示。在加工过程中,工件材料的去除方式主要有磨料对工件表面的冲击、悬浮液空化效应的作用、工

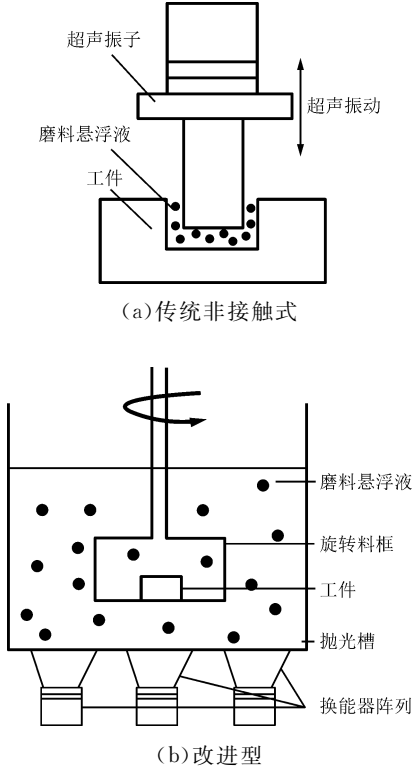


图 1 超声抛光加工原理图

件表面微裂纹的扩展剥落^[13]。

对传统抛光工艺进行改进之后的加工原理如图1b所示。换能器阵列扩大了超声波的辐射面积,同时改善抛光液中声场分布均匀性,可以有效提高抛光质量和抛光效率。由于加入了料筐的旋转运动,使磨粒在磨料悬浮液中分布更加均匀,磨粒与工件表面充分接触,提高了工件表面抛光质量;磨粒在做超声纵向振动的同时,工件绕着旋转轴以一定角速度做旋转运动,使得磨粒在冲击工件表面的同时进行耕犁和微切削,如图2所示。磨粒在两种运动综合作用下不断撕扯工件表面破碎的裂纹,从而加速材料去除的速率,提高抛光效率。

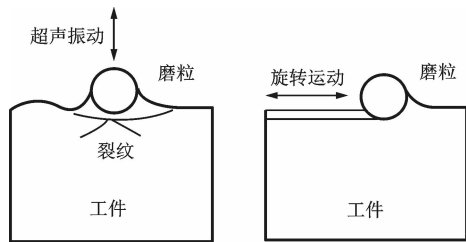


图2 冲击、耕犁和微切削示意图

无论是塑性金属材料还是玻璃等硬脆材料,材料的去除模式主要分为塑性变形模式和脆性断裂模式。脆性断裂模式材料去除量较大,容易产生较大的凹坑,影响工件表面质量。对于抛光工艺而言,应尽可能使材料去除模式处于塑性变形阶段,少出现甚至不出现脆性断裂面^[14],通过磨粒对工件表面的耕犁和塑性微切削来实现材料的去除,获得较好的抛光质量。

2 单颗磨粒去除材料模型

2.1 单颗磨粒去除材料的体积

超声振动抛光是一个复杂的过程,许多加工参数对材料的去除率有直接影响^[15]。借助单颗磨粒冲击工件表面去除材料的模型来分析超声场中游离磨料抛光的原理。为了便于推导,假设磨粒为球体,半径为 R ,以速度 v 垂直冲击工件表面,接触载荷为 F ,压入深度为 δ ,压痕半径(接触圆半径)为 r ,如图3所示。

根据接触力学中 Hertz 弹性接触理论的刚性球与平面弹性接触模型^[16]可知,在弹性变形过程中,不考虑摩擦,压入深度 δ 与接触载荷 F 的关系为

$$\delta = \left(\frac{9F^2}{16RE'^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: E' 为等效弹性模量,其表达式为

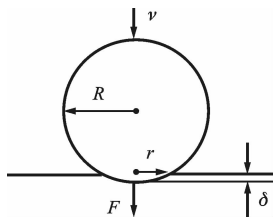


图3 单颗磨粒冲击工件表面示意图

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

其中 E_1 为磨粒的弹性模量, E_2 为工件的弹性模量, ν_1 为磨粒的泊松比, ν_2 为工件的泊松比。

压痕半径 r 与接触载荷 F 的关系为

$$r = \left(\frac{3RF}{4E'} \right)^{1/3} \quad (3)$$

联立式(1)(3),可得压痕半径 r 与压入深度 δ 的关系为

$$r = \sqrt{R\delta} \quad (4)$$

刚性球与工件平面的最大接触压力 P_m 为

$$P_m = \frac{3F}{2\pi r^2} = \frac{3F}{2\pi R\delta} \quad (5)$$

根据式(5)可知,在弹性变形过程中, P_m 会随着接触载荷 F 的增加而增加,当 P_m 达到临界值后,材料开始屈服,此时的压入深度 δ_s 称为临界压入深度。金宏平等利用 von Mises 屈服准则拟合得到材料开始发生屈服时的 P_m 与材料的屈服极限 σ_s 的关系为^[17]

$$P_m = C_v \sigma_s \quad (6)$$

式中: C_v 为拟合函数,表达式为

$$C_v = 0.542 \, 4\nu_2^2 + 0.879 \, 6\nu_2 + 1.300 \, 5 \quad (7)$$

在后续实验中选用的抛光工件为304不锈钢,其泊松比 $\nu_2 = 0.247$,结合式(6)(7),可得304不锈钢表面开始发生屈服的最大接触压力为

$$P_m = 1.55\sigma_s \quad (8)$$

在弹性变形阶段,两物体的接触响应主要由材料的弹性模量和泊松比主导,当工件材料开始发生屈服后,工件表面发生塑性变形,材料开始去除。材料发生屈服后,两物体的接触响应主要由材料的屈服极限主导。由于材料发生塑性变形的过程中两物体的接触压力基本保持不变^[15],根据动能定理可得

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^\delta P_m S d\delta \quad (9)$$

式中: m 为磨粒的质量, $m = 4\pi R^3 \rho / 3$, ρ 为磨粒密度; v 为磨粒振动速度; S 为磨粒与工件表面的接触面积。

联立式(4)(8)(9),可得到压入深度 δ 与磨粒速度 v 的关系

$$\delta = vR \sqrt{\frac{0.86\rho}{\sigma_s}} \quad (10)$$

则单颗磨粒去除材料的体积为

$$V = \pi R \delta^2 - \frac{\pi \delta^3}{3} \approx \frac{0.86\pi \rho v^2 R^3}{\sigma_s} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,单颗磨粒去除材料的体积与磨粒的速度、半径、密度以及工件的屈服极限有关。实验时,若工件材料、磨料的种类和磨粒尺寸确定后,磨粒的速度越大,工件表面的塑性变形量越大,材料的去除量也就越大。若磨粒速度大到使压入深度 δ 增大到一定值后,工件表面材料的去除模式从塑性变形模式转变成脆性断裂模式,工件表面容易形成较大的凹坑,影响工件表面抛光质量。因此,应尽量使磨粒的冲击速度控制在一定范围,通过塑性微切削的方式来实现工件表面的抛光,从而获得更加理想的表面质量。

2.2 磨粒的速度

磨粒在悬浮液中的运动速度是影响抛光效果的重要参数。在声学理论中,声场中某一点的声压^[18]为

$$P = \rho c v \quad (12)$$

式中: ρ 为介质密度; c 为介质中的声速; v 为介质质点的振动速度。

磨粒的振动速度^[7]为

$$v = \frac{P_0 e^{-\alpha h}}{\rho c} \quad (13)$$

式中: P_0 为初始声压; α 为衰减系数; h 为超声波传播距离。

液体初始声压与抛光槽底面接触的换能器有关。换能器输出端的振动位移为

$$y = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (14)$$

式中: A 为换能器输出端振幅; f 为换能器谐振频率; φ 为初相位。

联立式(12)(14),得液体底面的初始声压为

$$P_0 = 2\pi f A \rho c \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (15)$$

联立式(13)(15),得磨粒的振动速度为

$$v = \frac{2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi)}{e^{\alpha h}} \quad (16)$$

根据式(16)可知,磨粒的振动速度与换能器的谐振频率、换能器的输出端振幅以及换能器输出端面与磨粒的距离有关。在后续实验中,若设计的换能器谐振频率一定,并且换能器输出端面与工件的距离一定时,可以通过控制换能器的输出端振幅来控制磨粒的运动速度。换能器输出端的振幅随着超声电源输出功率的增加而增大,而换能器的实际功

率随着输入电压的增大而增大,因此可以通过控制换能器的输入电压来控制换能器的输出端振幅,进而控制磨粒的运动速度,以塑性微切削的方式去除材料,最终获得理想的抛光效果。

3 基于 COMSOL 的声场仿真

游离磨料对工件表面进行抛光是超声波在液体中的传播引起的抛光液空化效应和磨粒振动共同作用的结果,两者都与抛光槽中液体的声压大小和声压分布有关。声压的大小可以直接反映抛光液中磨粒运动速度的大小,而声场的均匀程度直接影响抛光效果的好坏。通过对抛光槽内液体进行声场仿真,分析换能器个数、换能器布置间距、换能器输入电压对声场分布的影响,分析时换能器的谐振频率均设定为 28 kHz。根据声场分析的结果,选取较优的换能器布置方式以及工件在抛光液中所处的位置。

3.1 换能器个数对声场分布的影响

分别对底面安装 1 至 4 个换能器的抛光槽内声场进行分析,换能器输入电压均为 25 V。对于多个换能器,换能器围绕抛光槽中心轴线均匀布置,并且换能器中心轴线与抛光槽中心轴线的距离 l 均为 50 mm,如图 4 所示。

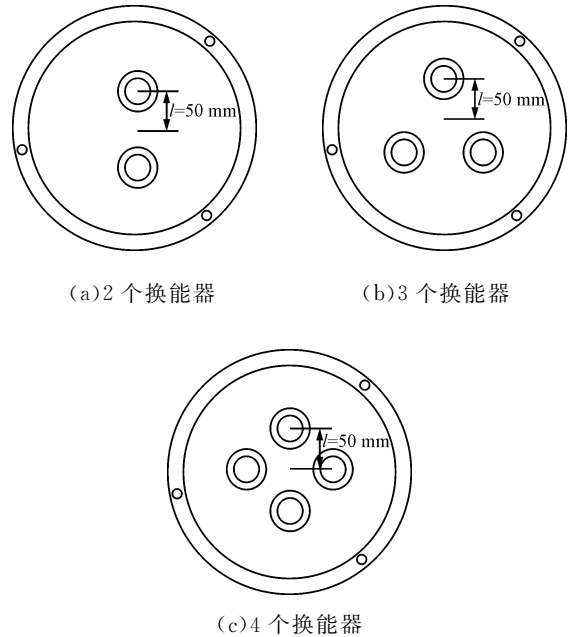
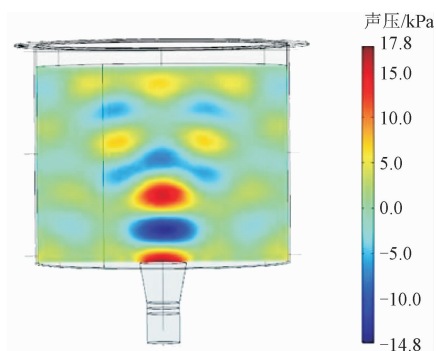


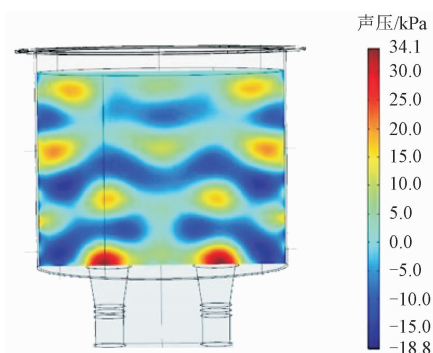
图4 换能器在抛光槽底部布置示意图

为了更加直观地看到抛光槽内液体声压分布情况,将抛光槽沿中心平面剖开,观察 $X=0$ 处的 $Y-Z$ 平面切片声压,如图 5 所示。

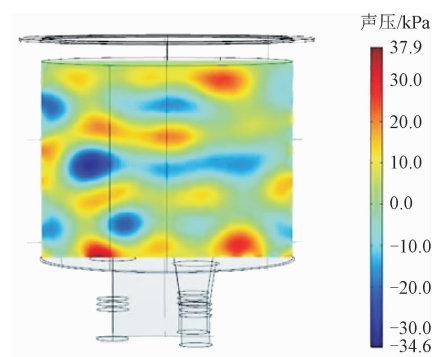
由图 5 可知,抛光槽内是一个正负压交替变化



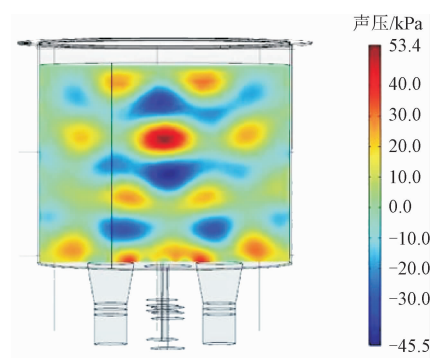
(a) 1 个换能器



(b) 2 个换能器



(c) 3 个换能器



(d) 4 个换能器

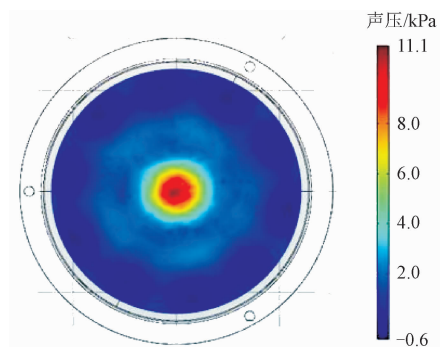
图5 抛光槽内 Y-Z 平面声压分布

现为正压,反之则呈现为负压。随着底面安装换能器个数的增加,抛光槽内整体声压分布变得越来越复杂,声压幅值也随之增加。随着换能器个数的增加,换能器的间距变小,导致抛光槽底板上换能器靠近抛光槽中心轴线的边缘区域能量集中,使底板在该位置的变形大于换能器输出端面的变形,从而使该位置的声压大于换能器输出端面的声压。

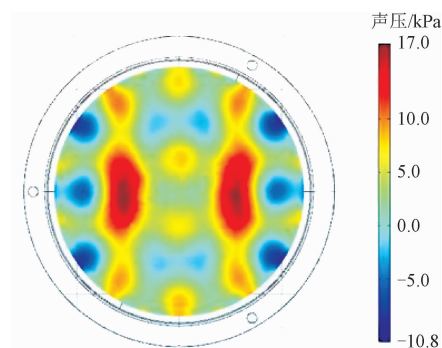
实际抛光过程中,工件位于液面的某一高度,即某 X-Z 平面上。X-Z 平面上的声场均匀程度直接影响工件表面的抛光质量。为了更加清楚地了解不同换能器个数对抛光槽内 X-Z 平面上声场均匀性的影响,取不同个数换能器在离底面一个波长处的正压平面进行观察,即 $Y=53\text{ mm}$ 处的 X-Z 平面,如图 6 所示。

为了更加形象、直观观察该平面上的声压分布,导出面上的数据利用 MATLAB 绘制相应的声压三维立体图,如图 7 所示。

由图 7 可知,槽壁边缘出现多个波峰,这与硬声场边界的特点相符。随着底面换能器个数的增加,中心区域出现的波峰个数也在增加,当底面换能器个数为 4 个时,X-Z 平面上中心区域波峰个数最多且相对之间更加平坦,更有利于在工件表面获得均匀平滑的抛光效果,因此底面安装换能器个数选定为 4 个。

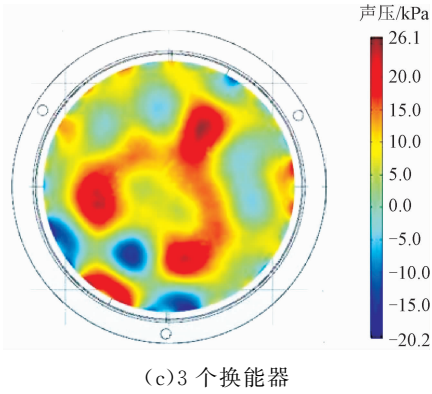


(a) 1 个换能器

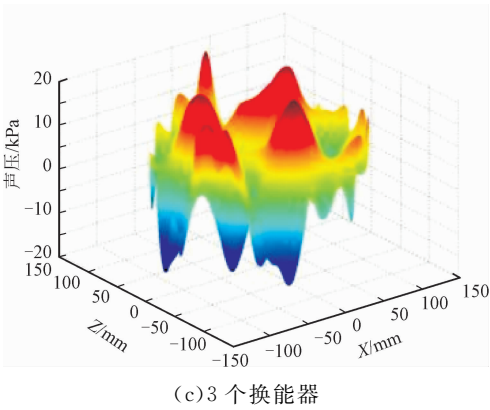


(b) 2 个换能器

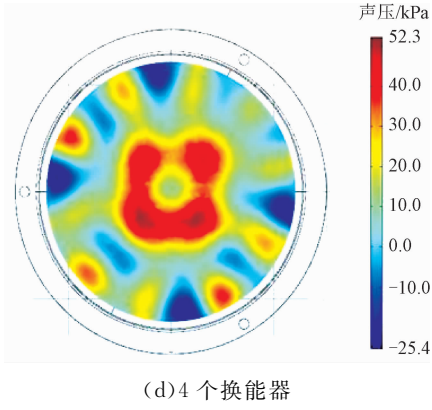
的声场,当声波扰动使某一区域的液体分子间距缩小时,该区域的声压大于原本的液体静压强,此时呈



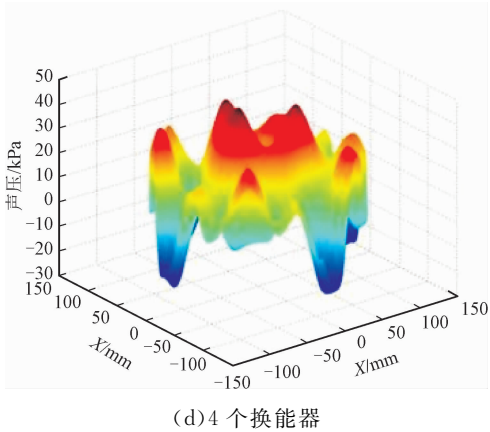
(c)3 个换能器



(c)3 个换能器



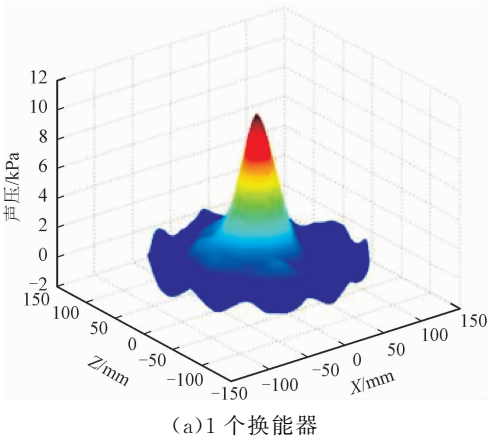
(d)4 个换能器



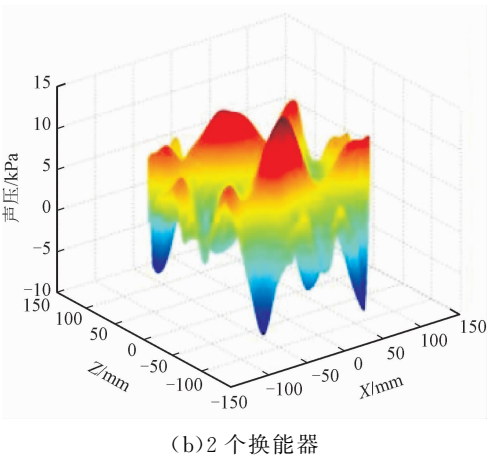
(d)4 个换能器

图 6 Y=53 mm 处的 X-Z 平面声压分布

图 7 Y=53 mm 处的 X-Z 平面三维声压图



(a)1 个换能器

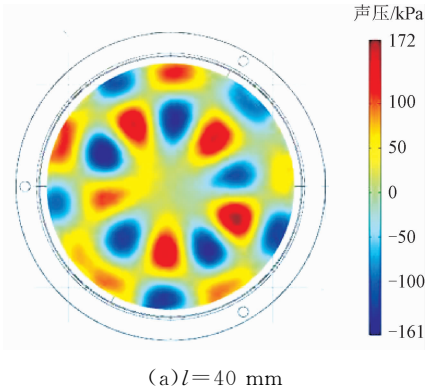


(b)2 个换能器

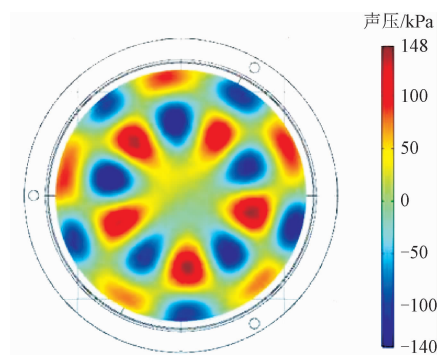
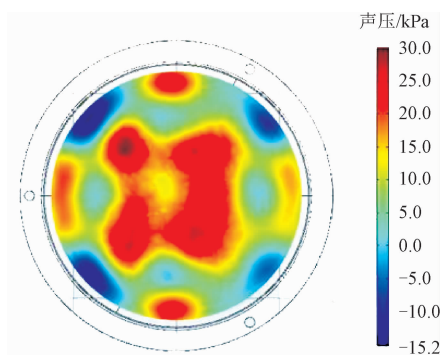
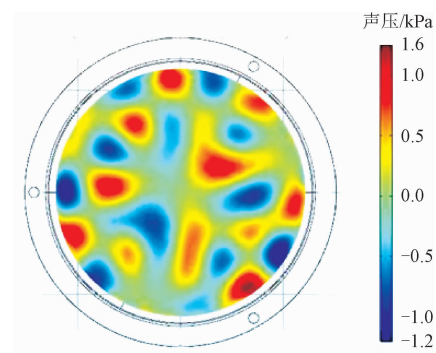
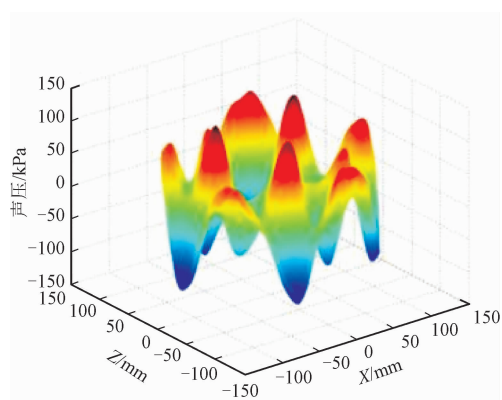
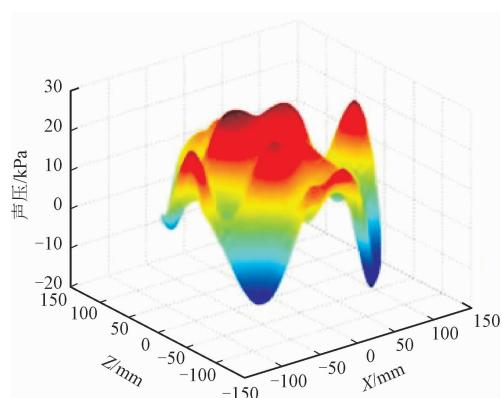
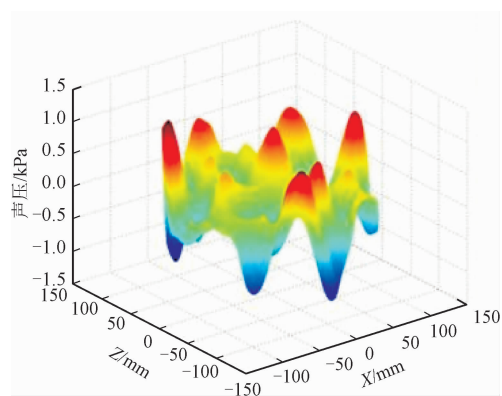
3.2 换能器布置间距对声场分布的影响

前面对于底面安装 4 个换能器的分析是在换能器中心轴线与抛光槽中心轴线的距离 $l=50\text{ mm}$ 的情况下进行的,声场的均匀程度并未达到最优,中心仍存在低压区,抛光效果相对较差。分别对 $l=40, 45, 55, 60\text{ mm}$ 进行分析,各个布置间距对应的 $Y=53\text{ mm}$ 处的 X-Z 平面切片如图 8 所示。同样导出面上的数据利用 MATLAB 绘制相应的声压三维立体图,如图 9 所示。

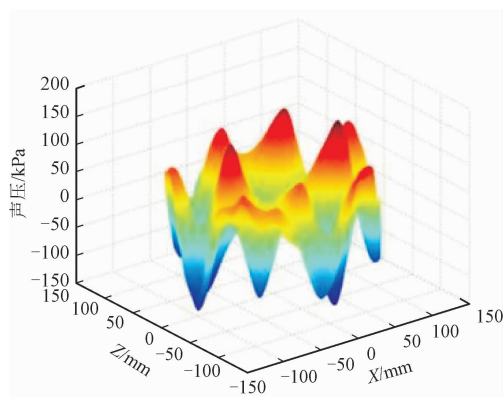
结合图 6d、7d、8、9 可以看出,当 $l<50\text{ mm}$ 时,4 个换能器间的相互影响较大,声波在中心区域相



(a) $l=40\text{ mm}$

(b) $l=45$ mm(c) $l=55$ mm(d) $l=60$ mm图8 $Y=53$ mm 处的 X-Z 平面声压分布(b) $l=45$ mm(c) $l=55$ mm(d) $l=60$ mm图9 $Y=53$ mm 处的 X-Z 平面三维声压图

互干涉叠加形成多个波峰,虽然声压幅值较大,但是声压分布极不均衡,不利于获得较好的抛光效果。当 $l=60$ mm 时,声波在槽壁边缘和中心区域形成多个波峰,槽壁边缘的声压大于中心区域。这是由于换能器靠近槽壁,声波到达槽壁的声压初始值较大,经过槽壁反射后叠加形成的驻波声压值也就越大,虽然声压幅值较大,但是声压分布依然极不均衡。当 $l=50,55$ mm 时,4 个换能器间的相互影响较小,中心区域声压分布比较均匀,声压幅值较小。

(a) $l=40$ mm

与 $l=50\text{ mm}$ 相比, $l=55\text{ mm}$ 时红色正压区面积更大,并且中心区域的波峰相对之间更加平坦,声压分布更加均匀,更有利于提高工件表面抛光质量。综合以上分析结果,选定 $l=55\text{ mm}$ 。

3.3 换能器输入电压对声场分布的影响

由图 8c 可知,当换能器的输入电压为 25 V、 $l=55\text{ mm}$ 时, $Y=53\text{ mm}$ 处的 X - Z 平面上的声压幅值为 30 kPa。将换能器输入电压分别增加到 50 V 和 100 V, $Y=53\text{ mm}$ 处的 X - Z 平面切片声压分布见图 10。

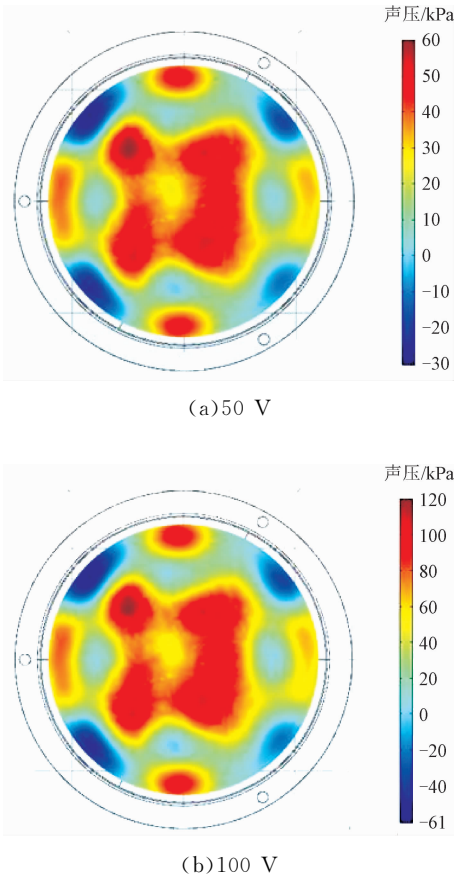


图 10 $Y=53\text{ mm}$ 处的 X - Z 平面声压分布

结合图 8c、10 可以看出,换能器输入电压不同时同一 X - Z 平面上的声压分布均匀程度大致相同,声压幅值随着换能器输入电压的增大而增大,并且呈线性关系。当输入电压为 100 V 时, $Y=53\text{ mm}$ 处的 X - Z 平面声压为 120 kPa。

使液体产生空化的最小压强称为该液体的空化阈值^[19],对于水来说,产生空化效应的最低声强为 0.3 W/cm^2 ^[20],声强与声压的关系为

$$I = \frac{P_o^2}{2\rho c} = \frac{P^2}{\rho c}$$

(17)

式中: I 为声强; P_o 为声压幅值。

将输入电压为 100 V 时 $Y=53\text{ mm}$ 处的 X - Z 平面上的声压幅值代入式(17),可得此时的声强为 0.48 W/cm^2 ,大于水中产生空化效应的最小声强,因此能够发生稳态空化效应。在后续实验中换能器的输入电压从 100 V 开始,以进一步研究换能器输入电压对抛光效果的影响。

综合对抛光槽内液体声场的仿真结果,确定后续实验中抛光槽底面安装换能器的个数为 4 个,换能器中心轴线与抛光槽中心轴线的距离 l 为 55 mm,工件放置在与抛光槽底面的距离约为一个波长的平面上,即工件位于 $Y=53\text{ mm}$ 的 X - Z 平面附近。当料筐和工件放入抛光液中时,由于工件的特性阻抗远远大于抛光液,即工件下表面为硬声场边界,声波传播至工件下表面后会发生全反射,此时工件下表面上的合成声压是入射波声压的两倍,工件正下方区域的声场为入射声波与反射声波叠加形成的驻波,为提高工件下表面的抛光质量,应尽可能使工件下表面处为两列波叠加后的合成波的波腹位置^[18,21]。

4 实 验

搭建实验平台,研究抛光过程中料筐转速、抛光时间、换能器输入电压 3 个工艺参数对工件表面抛光效果的影响规律,进而找到工件表面抛光质量最佳时所对应的工艺参数组合,为换能器阵列型超声辅助游离磨料抛光的工艺研究提供一定的指导意义。

4.1 实验平台

换能器阵列型超声抛光样机整体实物如图 11 所示。实验器材主要包括 WG-1000W 型超声电源、PC 机、换能器(谐振频率为 28 kHz)、抛光槽、槽体支撑架、料筐、联轴器、M6200-502 型电机(额定功率为 200 W)、电机支撑架、US-52 型电机调速器(额定功率为 200 W)、磨料悬浮液、304 不锈钢板、TR200 粗糙度测量仪、BMC500 系列电子显微镜等。抛光



图 11 样机整体实物图

槽为圆柱形槽体,内径为 230 mm,高度为 200 mm,壁厚为 1.5 mm。磨料为氧化铝微粉,粒度为 W10,磨料质量浓度为 80 g/L。实验所选工件为小型 304 不锈钢板,尺寸为 40 mm×30 mm×5 mm,工件样本表面经过砂纸研磨处理后再进行抛光实验。

4.2 实验测试及结果分析

分别测试样机料筐转速 n 、抛光时间 t 、换能器输入电压 U 3 组工艺参数对工件表面抛光质量的影响规律,每组实验分别选用 3 块初始表面粗糙度相同的工件,用 TR200 粗糙度测量仪对抛光前后工件的表面粗糙度进行测量。3 组实验参数及测量结果见表 1。表 1 中工件表面粗糙度变化量 ΔR_a 和表面粗糙度变化率 κ 的计算公式分别表示如下

$$\Delta R_a = R_{a,f} - R_{a,b} \tag{18}$$

$$\kappa = \frac{R_{a,f} - R_{a,b}}{R_{a,f}} \tag{19}$$

式中: R_{a_f} 为抛光前工件表面粗糙度; R_{a_b} 为抛光后工件表面粗糙度。

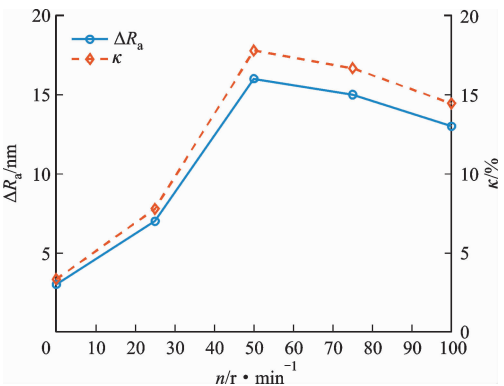
表 1 3 组实验参数及测量结果表

分组	$n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$t/$ min	$U/$ V	$R_{a,f}/$ μm	$\Delta R_a/$ μm	$\kappa/$ %
第 1 组	0	20	100	0.090	0.003	3.33
	25	20	100	0.090	0.007	7.78
	50	20	100	0.090	0.016	17.78
	75	20	100	0.090	0.015	16.67
	100	20	100	0.090	0.013	14.44
第 2 组	50	20	100	0.074	0.007	9.46
	50	40	100	0.074	0.010	13.51
	50	60	100	0.074	0.012	16.22
	50	80	100	0.074	0.013	17.57
	50	100	100	0.074	0.012	16.22
第 3 组	50	80	100	0.057	0.009	15.79
	50	80	125	0.057	0.012	21.05
	50	80	150	0.057	0.019	33.33
	50	80	175	0.057	0.013	22.81
	50	80	200	0.057	0.008	14.04

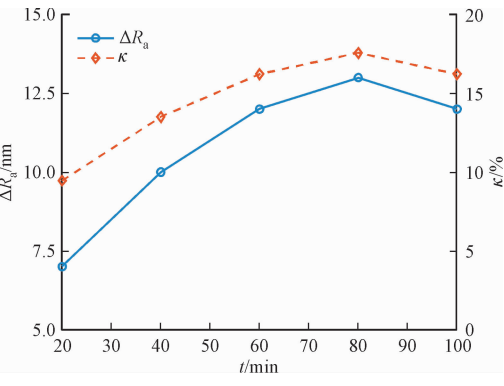
为了更加清晰地观察工件表面粗糙度变化量 ΔR_a 和表面粗糙度变化率 κ 随 n 、 t 、 U 的变化趋势,绘制相应的折线图,如图 12 所示。

通过分析表 1 和观察图 12 可以得出以下结论。

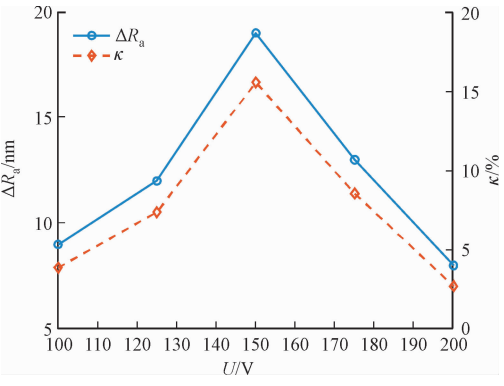
(1)随着料筐转速的增加, ΔR_a 和 κ 先增大后减小,说明料筐转速太慢会导致磨料悬浮不够充分,抛光效果不明显。料筐转速过快则会使悬浮液流速变



(a) ΔR_a 和 κ 随 n 的变化趋势



(b) ΔR_a 和 κ 随 t 的变化趋势



(c) ΔR_a 和 κ 随 U 的变化趋势

图 12 ΔR_a 和 κ 随 n 、 t 、 U 的变化趋势图

快,对液体的空化效应有一定的削弱作用,导致抛光效果相对变差。

(2)随着抛光时间的增加, ΔR_a 和 κ 先增大后减小,说明工件表面粗糙度先减小后增大。随着抛光时间的增加, ΔR_a 和 κ 随时间的变化率有所减小,说明工件表面越光滑,抛光效果越不明显,抛光时间过长甚至会会对已加工好的精度较高的表面造成损伤。

(3)随着输入电压的升高, ΔR_a 和 κ 先增大后减小,说明输入电压太低会导致磨粒能量不足,磨粒速度很小,抛光效果不明显,此时材料去除模式为塑性

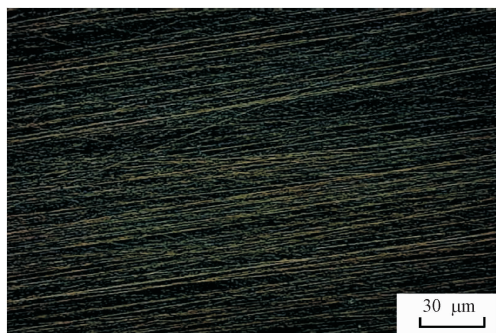
变形模式。输入电压太高则会使磨粒能量过盈,磨粒速度过大,材料的去除模式由塑性变形模式转变为脆性断裂模式,材料去除量较大,工件表面抛光质量不高。

(4)抛光效果最佳的工艺参数组合:料筐转速为 50 r/min,抛光时间为 80 min,换能器输入电压为 150 V。该工艺参数组合条件下 ΔR_a 和 κ 均为所有实验组中的最大值, ΔR_a 和 κ 分别为 0.019 μm 、33.33%。

通过电子显微镜观察最佳工艺参数组合条件下工件抛光前后表面的微观形貌,如图 13 所示,发现材料表面细微的粗糙面尖点被去除,同时材料表面的细微划痕明显减少。



(a)抛光前



(b)抛光后

图 13 工件表面抛光前后微观形貌

5 结 论

(1)单颗磨粒去除材料的体积与磨粒的速度、半径、密度呈正相关关系,与工件的屈服极限呈负相关关系;磨粒的振动速度与换能器的谐振频率、输出端振幅成正比关系,与换能器输出端面至磨粒的距离呈负相关关系。

(2)当抛光槽底面安装换能器个数为 4 个、换能器中心轴线与抛光槽中心轴线的距离为 55 mm 时,抛光槽中心区域声压分布更加均匀。抛光槽内同一

高度平面液体声压幅值随着换能器输入电压的增大而增大,并且呈线性关系。

(3)抛光效果最佳的工艺参数组合为:料筐转速 50 r/min,抛光时间 80 min,换能器输入电压 150 V。最佳工艺参数组合条件下工件抛光后表面粗糙度减小了 0.019 μm ,表面粗糙度变化率为 33.33%。

(4)超声辅助磨料抛光能够去除工件表面细微的粗糙面尖点,并能够在一定程度上消除工件表面的细微划痕,实现纳米级的材料去除。

参考文献:

- [1] 万宏强,韩佩瑛,葛帅,等. 工件表面超声振动抛光方法发展概况 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38 (2): 94-100.
WAN Hongqiang, HAN Peiying, GE Shuai, et al. Development of ultrasonic vibration polishing method on workpiece surface [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(2): 94-100.
- [2] HOCHENG H, KUO K L. Fundamental study of ultrasonic polishing of mold steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42 (1): 7-13.
- [3] 李仁闯. 应用超声振动辅助装置对玉石表面研磨抛光的试验研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2017: 8-16.
- [4] HUUKI J, HORNBORG M, JUNTUNEN J. Influence of ultrasonic burnishing technique on surface quality and change in the dimensions of metal shafts [J]. Journal of Engineering, 2014, 2014: 1-8.
- [5] ZAREPOUR H, YEO S H. Single abrasive particle impingements as a benchmark to determine material removal modes in micro ultrasonic machining [J]. Wear, 2012, 288: 1-8.
- [6] 赵轩达,祝锡晶,庞昊斐. 超声辅助磨料流加工的材料去除机理及参数研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (6): 163-167.
ZHAO Xuanda, ZHU Xijing, PANG Haofei. Research on material removal mechanism and parameters of ultrasonic assisted abrasive flow machining [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(6): 163-167.
- [7] 周忆,梁德沛. 超声研磨硬脆材料的去除模型研究 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(8): 664-666.
ZHOU Yi, LIANG Depei. Study on the theoretic model of ultrasonic polishing [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(8): 664-666.
- [8] 黄志刚. 基于数值仿真的流体振动抛光机理研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2007: 131-134.
- [9] GUDIPADU V, SHARMA A K, SINGH N. Simula-

- tion of media behaviour in vibration assisted abrasive flow machining [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, 51: 1-13.
- [10] 于兆勤, 杨忠高, 黄志刚, 等. 流体二维振动超光滑表面加工技术 [J]. *制造技术与机床*, 2007(5): 90-92.
- YU Zhaoqin, YANG Zhonggao, HUANG Zhigang, et al. Study on ultra-smooth surface polishing based on liquid two-dimension vibration [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2007(5): 90-92.
- [11] 杨忠高. 流体二维振动超光滑表面加工振动场分析与实验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2005: 13-19.
- [12] 黄小舟. 流体二维振动抛光超声场分析及实验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2007: 39-45.
- [13] 舒晨. 非接触式超声磨粒研抛装置设计及工艺研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014: 8-12.
- [14] 程灏波. 流体辅助微纳抛光原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 154-161.
- [15] 赵明. 超声抛光机理研究及其变幅杆设计 [D]. 苏州: 苏州大学, 2012: 28-29.
- [16] JOHSON K L. 接触力学 [M]. 徐秉业, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992: 105-106.
- [17] 金宏平, 陈建国. 刚性球与平面弹性接触的临界参数计算 [J]. *机械传动*, 2013, 37(3): 49-51, 82.
- JIN Hongping, CHEN Jianguo. Calculation of the critical parameters for the elastic contact of rigid sphere and plane [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2013, 37(3): 49-51, 82.
- [18] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 2版. 南京: 南京大学出版社, 2001: 183-188.
- [19] 曹凤国. 超声加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 9-10.
- [20] 王铮敏. 超声波在植物有效成分提取中的应用 [J]. *三明高等专科学校学报*, 2002, 19(4): 45-53.
- WANG Zhengmin. Applications of ultrasonic extraction in effective constitution of plants [J]. *Journal of Sanming College*, 2002, 19(4): 45-53.
- [21] 常敬忠, 翟文杰. 超声辅助抛光流场规律 CFD 仿真分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(7): 23-29.
- CHANG Jingzhong, ZHAI Wenjie. CFD analysis of flow field of ultrasonic-assisted polishing [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(7): 23-29.

[本刊相关文献链接]

- 梅堂杰, 郭俊德, 仝哲, 等. 滑动模式对含表面修饰 MoS_2 纳米片润滑油摩擦学性能的影响. 2019, 53(2): 24-31. [doi:10.7652/xjtuxb201902004]
- 张西金, 方宗德, 郭芳, 等. 混合弹流润滑修形斜齿轮齿面摩擦功率损耗. 2019, 53(1): 11-17. [doi:10.7652/xjtuxb201901002]
- 董国忠, 张辉, 李月, 等. 混合弹流润滑系统的建模与摩擦学特性研究. 2018, 52(1): 107-114. [doi:10.7652/xjtuxb201801016]
- 张鹏鹏, 赵伟刚, 董光能. 铜基石墨密封材料的摩擦磨损性能研究. 2017, 51(9): 92-97. [doi:10.7652/xjtuxb201709013]
- 高玉飞, 陈阳, 葛培琪. SiC 单晶线锯切片微裂纹损伤深度的有限元分析. 2016, 50(12): 45-50. [doi:10.7652/xjtuxb201612008]
- 谭力新, 刘亚雄, 陈若梦, 等. 个性化聚醚醚酮颅骨植入物多点柔性注塑工艺. 2016, 50(8): 130-136. [doi:10.7652/xjtuxb201608021]
- 雷默涵, 姜歌东, 梅雪松, 等. 高速球轴承微接触弹流摩擦及生热分析. 2016, 50(4): 81-88. [doi:10.7652/xjtuxb201604013]
- 白浩, 王伊卿, 董霞, 等. Ti6Al4V 钛合金脉冲激光抛光微裂纹产生机理与尺寸特征研究. 2015, 49(12): 117-123. [doi:10.7652/xjtuxb201512019]
- 曲兴田, 王宏一, 樊成, 等. 等重叠率螺旋线的非球面抛光轨迹规划. 2015, 49(6): 126-131. [doi:10.7652/xjtuxb201506020]
- 郑卜祥, 姜歌东, 王文君, 等. 超快脉冲激光对钛合金的烧蚀特性与作用机理. 2014, 48(12): 21-28. [doi:10.7652/xjtuxb201412004]
- 朱爱斌, 路新春, 张浩, 等. 铜化学机械抛光材料去除机理的准连续介质法研究. 2011, 45(12): 111-116. [doi:10.7652/xjtuxb201112020]
- 李辉光, 刘恒, 虞烈. 粗糙机械结合面的接触刚度研究. 2011, 45(6): 69-74. [doi:10.7652/xjtuxb201106013]
- 肖琪聘, 吕振林, 张珊珊, 等. 不同压力下 Ti3SiC2 陶瓷的干摩擦磨损性能研究. 2011, 45(2): 121-124. [doi:10.7652/xjtuxb201102025]
- 郑秋亚, 刘三阳, 周天孝. DLR-F6 翼身组合体跨声速阻力计算. 2010, 44(9): 115-121. [doi:10.7652/xjtuxb201009023]

(编辑 杜秀杰)