

微磨粒对超声空化冲击波衰减作用研究

宫台, 祝锡晶*, 傅迎泽, 李婧

(中北大学 机械工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 研究超声加工过程中微磨粒对冲击波的影响。**方法** 建立功率超声振动加工下的空化泡动力学方程, 以及空化泡溃灭产生冲击波的数学模型, 进而建立冲击波在微磨粒与水混合介质中的传播模型。使用六阶 Runge-Kutta 方法对数学模型进行求解, 得到空化泡半径随时间的变化规律, 以及空泡内部压强随空化泡半径变化的规律。**结果** 当空泡半径被压缩至 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右时, 空泡内部压强可达 $1\text{ }000\text{ MPa}$ 。通过对距离空泡壁 $1.5R_0$ 处的冲击波压力进行求解发现, 冲击波的压力仅需 $0.07\text{ }\mu\text{s}$ 就可从初始的 $1\text{ }000\text{ MPa}$ 迅速衰减至 80 MPa 。通过比较纯水介质与混合介质 (SiO_2 微磨粒与水) 中冲击波传播速度的结果发现, 加入 SiO_2 微磨粒会使冲击波的最大速度由 $2\text{ }976\text{ m/s}$ 降至 $2\text{ }681\text{ m/s}$, 降低率约为 10% 。通过钛钽合金的功率超声振动加工实验验证了数值结果。对比分析了加入 SiO_2 微磨粒前后钛钽合金表面结构和三维表面形貌, 发现微磨粒的加入导致材料表面空化坑的投影面积下降了 12.5% 。**结论** 证实微磨粒对冲击波的传播起到了明显的衰减作用, 是对材料表面产生作用的主要因素。该研究在超声加工领域具有理论意义和工程价值。

关键词: 微磨粒; 冲击波; SiO_2 ; 超声空化; 空泡动力学; Runge-Kutta

中图分类号: TG663 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)03-0047-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.03.005

Attenuation Effect of Micro-abrasive Particles on Ultrasonic Cavitation Shock Waves

GONG Tai, ZHU Xijing*, FU Yingze, LI Jing

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The effect of cavitation shock waves during power ultrasonic vibration machining can be produced. The presence of micro-abrasive particles can enhance the machining efficiency and impact the propagation of shock waves. The work aims to investigate the mechanism of micro-abrasive particles on shock waves during power ultrasonic vibration machining. By utilizing the Gilmore-Akulichev equation, the bubble dynamic equation under power ultrasonic vibration machining and the mathematical model of shock waves generated by the collapse of bubble were established. Subsequently, a propagation model for shock waves in the mixed medium of micro-abrasive particles and water was developed. The mathematical model was solved by the sixth-order Runge-Kutta method, providing insights into the dynamic evolution of bubble radius and the internal

收稿日期: 2023-10-20; 修订日期: 2023-12-10

Received: 2023-10-20; **Revised:** 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51975540); 中北大学先进制造技术山西省重点实验室 2022 年度开放基金 (XJZZ202202); 山西省研究生教育创新项目 (2022Y577); 中北大学第 18 届研究生科技立项 (20221818)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975540); Postgraduate Education Innovation Project in Shanxi Province (2022Y577); The 18th Graduate Science and Technology Project of North University of China (20221818); 2022 Open Fund project of Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, North University of China (XJZZ202202)

引文格式: 宫台, 祝锡晶, 傅迎泽, 等. 微磨粒对超声空化冲击波衰减作用研究[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 47-52.

GONG Tai, ZHU Xijing, FU Yingze, et al. Attenuation Effect of Micro-abrasive Particles on Ultrasonic Cavitation Shock Waves[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 47-52.

*通信作者 (Corresponding author)

pressure of the bubble. The results indicated that a bubble with an initial radius of 8 μm exhibited nonlinear oscillations under the effect of the ultrasonic field. After a series of oscillations, the change in radius gradually diminished over time, indicating a convergence towards equilibrium between the pressure inside the bubble and the surrounding environment. When the bubble radius decreased from 8 μm to 3 μm , the pressure on the bubble wall remained relatively stable. Upon compression approximate to 1 μm , the internal pressure of the bubble could reach 1 000 MPa, surpassing the ambient pressure. Consequently, the cavitation bubble rebounded outward, compressing the surrounding water and generating a shock wave that propagated radially. By solving the shock wave pressure at a distance of $1.5R_0$ from the cavitation wall, it was found that the shock wave pressure rapidly decreased from the initial 1 000 MPa to 80 MPa within a short time of 0.07 μs , covering a propagation distance of 17 μm . Comparing the shock wave propagation speed in a pure water medium with that in a mixed medium of SiO_2 micro-abrasive particles and water, it was discovered that the addition of SiO_2 micro-abrasive particles reduced the maximum speed of the shock wave from 2 976 m/s to 2 681 m/s, resulting in a reduction rate of 10%. Subsequently, power ultrasonic vibration processing experiments were conducted on Ti-Ta alloy to validate the aforementioned numerical results. Through a comparative analysis of the surface structure and three-dimensional surface morphology of the Ti-Ta alloy before and after the addition of SiO_2 micro-abrasive particles, it was observed that the number of cavitation pits decreased from 34 to 21. This indicated that the addition of SiO_2 micro-abrasive particles reduced the occurrence of cavitation pits. The software ImageJ was utilized to measure the projected area of cavitation pits with diameter greater than 1 μm on the Ti-Ta alloy surface. The results showed that the addition of SiO_2 micro-abrasive particles led to a decrease in the projected area of cavitation pits from 497.132 μm^2 to 434.84 μm^2 , corresponding to a reduction rate of 12.5%. This reduction rate was in line with the 10% calculated by the model, demonstrating consistency. The observed discrepancy mainly arose from the uneven distribution of SiO_2 micro-abrasive particles in the machining area during the machining due to factors such as gravity, resulting in varying obstacles to the shock wave. This study confirms that micro-abrasive particles effectively attenuate the propagation of shock waves and become a key factor affecting the material surface. The findings of this research hold both theoretical significance and practical value in the field of ultrasonic processing.

KEY WORDS: micro-abrasive particle; shock wave; SiO_2 ; ultrasonic cavitation; bubble dynamics; Runge-Kutta

超声空化冲击波是流体在超声场作用下产生的一种空化效应^[1]。当超声场引起的流体压力降至一定值时,流体会在可能成核的局部区域发生相变,产生空化泡^[2]。空化泡在超声场的作用下会经历振荡,最终在溃灭阶段产生不同强度的冲击波。Vassholz 等^[3]通过强激光聚焦在水中产生空化气泡,并用纳米聚焦 X-ray 自由电子激光脉冲对水中激光诱导的空化气泡进行锥束全息闪光成像,量化了空化泡回弹时周围冲击波的空压力,其分布在 4~20 GPa 之间。目前,虽然在超声空化或水力空化的研究中未发现空泡发光现象,但是在空泡溃灭阶段仍然会产生高达 GPa 量级的压强,如此高的压强在近壁面会对材料表面造成严重破坏。例如,船舶和水轮机的叶片长期在水中工作,会因空化效应而产生空蚀坑^[4-5],其中冲击波是造成叶片使用寿命降低的主要因素。李争彩等^[6]应用 Matlab 语言对影响超声空化的各种液体物理参数及声场参数等进行了数值模拟,结果表明,这些参数会明显影响空泡的演变行为,继而对空化效应产生影响。由于在超声场作用下产生的冲击波强度与空化泡的初始半径、外部施加的超声场等参数有关,因此科研人员通过调整超声场的参数将空化效应产生的冲击波加以控制,使空化效应向有利的方向发展,并应

用于各种技术,如晶圆表面的清洗、固体表面制备和冲击波碎石术等^[7-9]。

功率超声振动加工是一种被广泛应用于金属材料加工领域,且兼具材料去除和材料表面强化的一种先进的复合加工方法。张存鹰等^[10]曾对国内超声振动辅助加工材料表面的一些方法进行了系统性综述,并预测超声振动表面加工技术对改善材料的表面微织构特性具有重要意义。为了了解高强度的冲击波压力对材料表面造成损伤的作用机理,从事空化效应的科研人员对此进行了大量研究工作^[11-12]。王文超等^[13]通过对功率超声加工空泡溃灭的冲击波特性进行分析,结果表明冲击波效应经过衰减后仍能对材料造成影响。目前一般采用功率超声振动加工方法来加工金属材料,为了加快金属表面材料的去除,通常会加入磨粒来提高其材料去除效率^[14-15]。此时理论上金属材料表面受到了磨粒和冲击波的多重作用,因此研究冲击波与磨粒之间的耦合关系至关重要。Fu 等^[16]研究发现,空化效应产生的冲击波会对磨削液中的微磨粒起到加速作用。Taverniers 等^[17]研究发现,激波传播通过粒子团会产生涡流,且随着颗粒体积分数的增大,对入射流的阻碍也增大。目前,功率超声加工过程中微磨粒对冲击波的衰减作用仍无明确统一的观

点来说明此问题。

文中在研究超声空化冲击波形成与传播过程的基础上, 提出加入微磨粒, 将其作为阻碍介质对超声空化冲击波的传播发挥衰减作用。通过对超声加工过程中产生的冲击波速度进行数值模拟发现, 加入微磨粒会导致冲击波速度降低。利用功率超声振动加工钛钽合金实验, 观察比较不加微磨粒与加入微磨粒的金属表面形貌。证实加入微磨粒在超声空化冲击波传播过程中具有加速衰减的作用, 这项工作不但有助于功率超声振动加工技术的改进, 增强其加工效果, 而且将为超声加工过程中磨粒参数的选择提供理论指导, 在功率超声振动加工领域具有理论意义及工程价值。

1 冲击波的产生与传播模型

1.1 超声场下空泡动力学方程

流体在超声场作用下会产生空化泡, 所形成的空化泡在超声场作用下会经历非线性振荡, 最终在溃灭阶段产生一个径向发射的冲击波。用图 1 来描述单个空化泡在钛钽合金附近自由界面产生冲击波的过程。

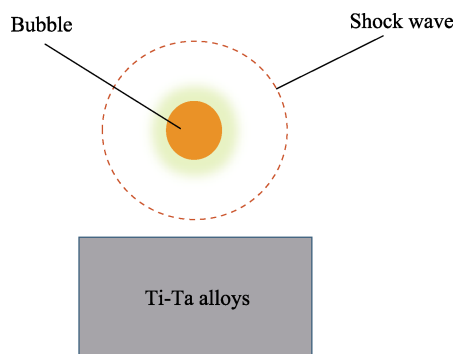


图 1 在可压缩流体中冲击波形成示意图

Fig.1 Schematic diagram of shock wave formation in compressible fluid

由于形成的初始冲击波速度远大于声速, 所以采用适用于高马赫数的 Gilmore 空泡动力学方程和液体 Tait 方程来描述气泡半径和气泡内的压力随时间的演化过程, 见式 (1) ~ (5)。这里假设: 空泡产生后是几何对球球形; 忽略温度的影响; 气泡内的气体是压力均匀的理想气体, 并考虑黏性和声辐射的能量耗散。

$$\dot{R}\ddot{R}\left(1-\frac{\dot{R}}{C}\right)+\frac{3}{2}\dot{R}^2\left(1-\frac{\dot{R}}{3C}\right)=H\left(1+\frac{\dot{R}}{C}\right)+\frac{R\dot{H}}{C}\left(1-\frac{\dot{R}}{C}\right) \quad (1)$$

$$C=c_0\left(\frac{p+B}{p_0+B}\right)^{\frac{n-1}{2n}} \quad (2)$$

$$H=\frac{n(p_0+B)}{\rho_0(n-1)}\left[\left(\frac{p+B}{p_0+B}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right] \quad (3)$$

$$p=\left(p_0+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3k}-\frac{2\sigma}{R}-\frac{4\eta U}{R}+p_A \quad (4)$$

$$p_A=2\pi f\rho c_0 A \quad (5)$$

式中: C 为气泡壁处液体的声速; c_0 为常压下水中的声速; n 、 B 为 Tait 方程常数; ρ_0 为水的密度; σ 为空化泡的表面张力; k 为多方指数; η 为水在室温下的动态黏度; p 为气泡界面处的压强; R_0 为初始空化泡半径; p_A 为超声场的声压幅值; R 为随时间变化的气泡半径; \dot{R} 为随时间变化的气泡壁速度, 且 $\dot{R}=dR/dt$; \ddot{R} 为随时间变化的气泡壁的加速度; H 为流体在泡壁处压力与静水压力的焓差; f 为超声场的频率; A 为超声振幅。

1.2 超声场下冲击波的传播模型

冲击波产生后, 气泡周围压力的计算基于 Kirkwood-Bethe 的假设, 不变量 $G=R(H+U^2/2)$ 以 $C+U$ 的速度向外传播。把从空泡动力学方程中得到的空泡壁半径 R 随时间变化的函数 $R(t)$ 与 Акуличев 方程^[18] 结合起来, 计算气泡壁半径以外 r 处冲击波传播的压力 p , 将压力 p 作为时间和空间的函数来进行数值模拟, 见式 (6)。

$$p=(p_0+B)\left[\frac{2}{n+1}+\frac{n-1}{n+1}\left(1+\frac{n+1}{rc_0^2}G\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{2n}{n-1}}-B \quad (6)$$

2 模型求解

建立了空泡从成长到溃灭, 以及最终产生空化冲击波的传播过程的数学模型, 并进行求解。这里采用六阶 Runge-Kutta 方法对建立的微分方程进行求解, 在求解前需要给定初始条件, 如表 1 所示。

设定初始条件后, 通过软件 python 第 1 节建立的微分方程进行编程求解。空化泡半径随时间的变化曲线如图 2 所示, 可以看到, 初始半径为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的空化泡在给定超声场作用下呈非线性振荡, 且经历了一系列振荡。在 $0.7\text{ }\mu\text{s}$ 后, 半径随时间的变化幅度越来越小, 此时空化泡内的压强与周围环境压力逐渐趋于平衡状态。

表 1 计算时采用的相关参数

Tab.1 Relevant parameters adopted for calculation

Parameter	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	p_A/Pa	$R_0/\mu\text{m}$	f/kHz	$A/\mu\text{m}$	k	c_0	B	n
Value	1 000	72.538	1.046	1.48×10^6	8	20	8	4/3	1 483	314	7

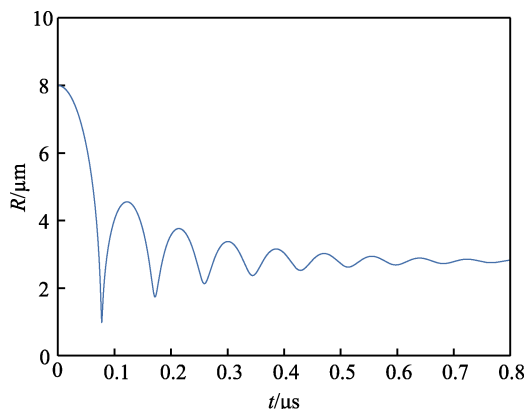


图2 空化泡半径随时间的变化曲线
Fig.2 Variation curve of bubble radius with time

空泡内部压强随空泡半径的变化曲线如图3所示。可以看出,在气泡半径 R_0 从8 μm 缩至3 μm 的过程中,气泡壁压力的变化很小,这一点验证了图2的结果,即气泡半径在3 μm 左右时逐渐与周围环境压力趋于平衡状态。气泡半径在超声场作用下,从3 μm 继续减小,可以看到空泡内部的压力迅速增大,直至在1 μm 左右时强度迅速增至1 000 MPa。由此可以预测,通过合理调整超声场的参数,可以得到更大的空泡内部压强。此时,空化泡的半径缩小至最小状态,开始进入回弹溃灭阶段。空泡内部压强远远大于空泡周围环境压强,空泡开始向外膨胀,并压缩周围的水,作为驱动力,产生了一个沿径向传播的冲击波。

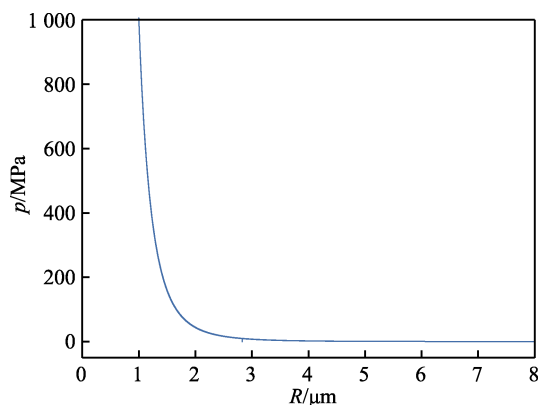


图3 空化泡内压强随空泡半径的变化曲线
Fig.3 Variation curve of pressure inside a bubble with bubble radius

在图3的基础上对冲击波的传播过程进行模拟,如图4所示。由于冲击波沿径向传播时会压缩周围流体,从而在空泡周围迅速产生一个压力场,并且在这个压力场中每个位置的压强 p 都是关于距离气泡中心 d 和时间 t 的函数。选取距离初始空泡壁 $r=1.5R_0$ 处冲击波的压强变化进行数值模拟,结果如图4所示。可以看到,冲击波压强在0.07 μs 处达到最高值(80 MPa),此结果符合对图2、图3的分析。气泡半径为3 μm 处产生的冲击波传播至测量点,通过计算得到空化冲

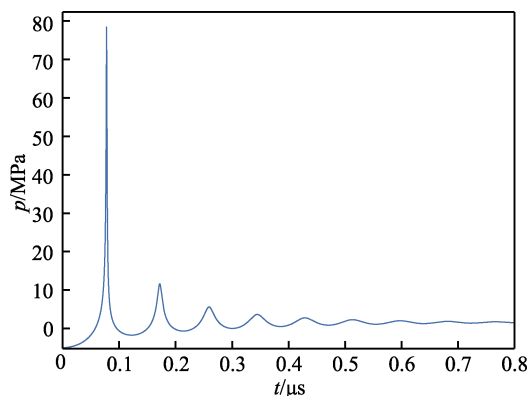


图4 冲击波压强随时间的变化曲线
Fig.4 Variation curve of shock wave pressure with time

击波的传播距离为17 μm ,冲击波的压强从初始的1 000 MPa迅速衰减至80 MPa。说明空化冲击波从形成到传播的过程中,其速度衰减得非常快。

3 微磨粒对冲击波传播的影响

目前,在功率振动加工金属材料的过程中,通常会在水中加入微磨粒,以提高金属材料表面的去除效率。一般选择碳化硅、二氧化硅、金刚石等为微磨粒。前面对冲击波在水中从形成到传播的过程进行了数值模拟,得出在水中冲击波产生后会迅速衰减的结论。这里采用Petel等^[19]建立的数学模型来研究冲击波在微磨粒与水的混合流体中的传播规律。选择微磨粒为 SiO_2 ,微磨粒的粒径为3 μm ,且在水中的质量分数为10%,数学模型见式(7)。

$$u_M = x \cdot u_{\text{SiO}_2} + (1-x)v_w \quad (7)$$

式中: x 为二氧化硅的质量分数;下标M、 SiO_2 、w分别表示混合物、二氧化硅和水。

这里假定纯水和磨粒的初始速度均为0。在冲击波产生后,冲击波速度的一部分转化为磨粒速度,一部分转化为水的速度。结合式(1),通过数值模拟,可以得到冲击波速度在未加入微磨粒和加入微磨粒的流体中随时间的传播变化曲线,如图5所示。其中,蓝色曲线为纯水环境下冲击波速度随时间的变化曲线,橙色曲线为加入微磨粒后冲击波速度随时间的变化曲线。

从数值模拟结果可以看出,在纯水中冲击波速度在0.7 μs 处的最大值为2 976 m/s;加入微磨粒后,冲击波速度在相同测量点的最大速度降至2 681 m/s,下降率约为10%。整体上,冲击波在流体中的传播速度都随着微磨粒的加入变得更小。这是因为冲击波通过微磨粒时会产生散射、涡流现象,从而导致冲击波在传播过程中发生衰减,这与Petel等^[19]的结论吻合。在功率超声振动加工过程中,微磨粒在工具头的高频振动作用下会在液体中进行无规则运动。同时,

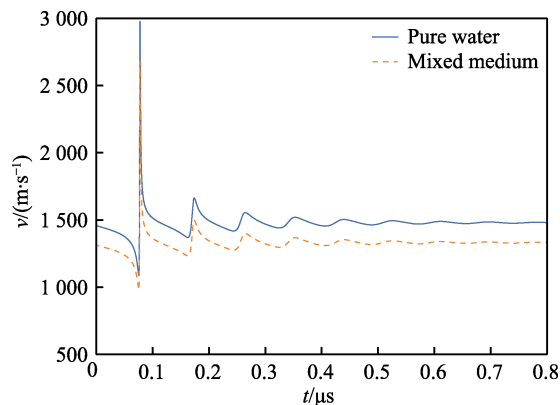


图 5 加入微磨粒前后冲击波速度随时间的变化曲线
Fig.5 Variation curve of shock wave velocity with time before and after addition of micro-abrasive particles

Fu 等^[16]发现,微磨粒受到冲击波和微射流的作用,会产生加速效果。当磨粒加速碰撞在金属材料上,在金属材料的反作用力下部分微磨粒会迎着冲击波反弹回去,各种复杂因素导致部分微磨粒的初始速度方向与冲击波传播方向相反,使得冲击波的加速发生衰减。

4 功率超声振动加工实验

4.1 实验条件

为了验证微磨粒对超声空化冲击波的衰减作用,进行了功率超声振动加工钛钽合金实验。超声波发生器产生的高频电流通过压电换能器转换为工具头的高频机械振动,当这种振动作用于材料与工具头之间的介质时,该区域会产生超声空化冲击波效应,并作用于钛钽合金表面。采用共聚焦显微镜对加工后钛钽合金表面的形貌进行观察和测量,最终对比验证微磨粒对冲击波的衰减效果是否与仿真结果吻合。实验装置主要包括超声波发生器、换能器、变幅杆、工具头和工件,选取钛钽合金为被加工工件,微磨粒选用球形 SiO₂。具体实验装置如图 6 所示。

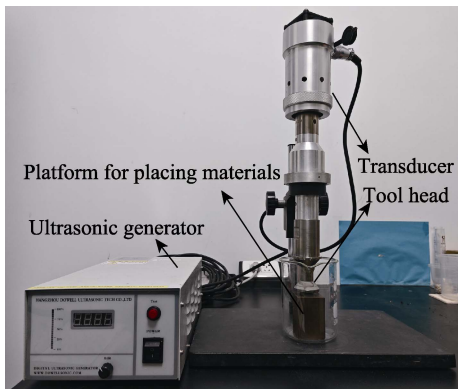


图 6 功率超声振动加工实验装置
Fig.6 Experimental device for power ultrasonic vibration processing

4.2 实验参数选择

功率超声振动加工实验选取长度为 30 mm、宽度为 10 mm、厚度为 5 mm 的钛钽合金板,1 500 W 超声波发生器,超声频率为 20 kHz,测试工具头的振幅为 8 μm。工具头为半径 15 mm 的圆盘,工具头与钛钽合金板之间的距离为 3 mm。对比实验采用的加工介质分别为纯水及混合介质(纯水与微磨粒),其中选取 SiO₂ 微磨粒的直径为 5 μm,混合介质中微磨粒的质量分数为 10%。

4.3 实验验证

首先在纯水介质中进行功率超声振动加工钛钽合金实验,加工时间为 10 min。通过共聚焦显微镜观察加工后的钛钽合金表面,结果如图 7 所示。从图 7 可以看,材料表面出现了很多形状不规则、大小不一,且在材料表面随机分布的黑色凹坑,这些凹坑就是水在超声场作用下产生的空化效应作用于材料表面所致,可见空化效应对材料表面的破坏作用非常明显。由于空化冲击载荷与空化坑的投影面积呈正相关,即冲击载荷越大,空化坑的投影面积越大,所以需要使用软件对加工后的钛钽合金表面进行分析,得到的三维表面形貌如图 8 所示。通过开源软件 ImageJ 对凹坑的投影面积进行测量,选取直径大于 1 μm 的空化坑,并用红线圈出,所测量的 34 个空化坑的总投影面积为 497.132 μm²。

对比实验在加入一定含量微磨粒的水中进行,在相同参数下重新进行功率超声振动加工实验,结果如图 9、图 10 所示。通过测量,得到材料表面的 21 个空化坑的投影面积为 434.84 μm²。

通过对比 2 组实验结果可以清楚地看到,在加入微磨粒后,钛钽合金表面的黑色坑洞数量明显减少,取而代之的是产生了很多圆形、较浅的坑洞,这些圆形坑洞由 SiO₂ 磨粒作用于钛钽合金表面所致。由此

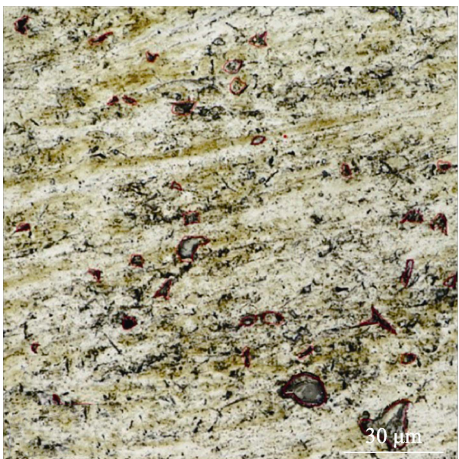


图 7 未加入微磨粒时的钛钽合金表面
Fig.7 Ti-Ta alloy surface without the addition of micro-abrasive particles

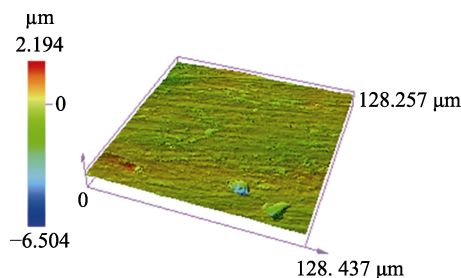


图8 未加入微磨粒时钛钽合金的
三维表面形貌

Fig.8 Three-dimensional surface morphology
of Ti-Ta alloy without the addition of
micro-abrasive particles



图9 加入微磨粒后的钛钽合金表面
Fig.9 Ti-Ta alloy surface after
addition of micro-abrasives

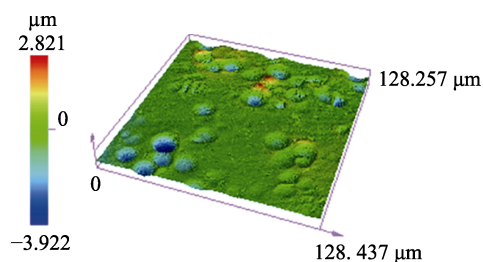


图10 加入微磨粒后钛钽合金的三维表面形貌
Fig.10 Three-dimensional surface morphology of
Ti-Ta alloy after addition of micro-abrasives

可知,在加入 SiO_2 磨粒后,冲击波对钛钽合金表面的作用明显减小,空化坑的投影面积从 $497.132 \mu\text{m}^2$ 降至 $434.84 \mu\text{m}^2$,下降率约为 12.5%,这与模型计算得到的 10% 基本一致,误差主要来源于加工过程中磨粒因重力等因素无法在加工区域均匀分布,导致对冲击波的阻碍作用不同。结果表明,冲击波在含有微磨粒的水中传播时,在微磨粒的阻碍作用下冲击波发生了明显的衰减现象,作用在钛钽合金表面的冲击载荷随之减小。这与 Taverniers 等^[17]的研究结果吻合,并且通过观察可以看出, SiO_2 微磨粒对钛钽合金表面的冲击作用更加明显。

5 结论

1) 建立了超声场作用下空化冲击波产生与传播过程的数学模型,通过对微分方程的数值模拟可知,在超声场作用下初始半径为 $8 \mu\text{m}$ 的空化泡会经历一系列振荡,在 $0.7 \mu\text{s}$ 后空化泡内的压强与周围环境压力将趋于平衡。冲击波会在空化泡振荡压缩周围流体时产生,在半径为 $1 \mu\text{m}$ 左右时,压强可达 $1\,000 \text{ MPa}$ 。

2) 通过对距离气泡壁 $r=1.5R_0$ 处冲击波压力的变化进行数值模拟发现,冲击波产生后衰减速度加快。当传播范围为 $0\sim 17 \mu\text{m}$ 时,冲击波压力从初始的 $1\,000 \text{ MPa}$ 迅速衰减至 80 MPa ,此过程仅需 $0.7 \mu\text{s}$ 即完成。

3) 通过变量为有无微磨粒的功率超声振动加工钛钽合金实验,观察了表面变化情况,并对三维表面形貌进行了对比分析。结果表明,空化坑的投影面积从 $497.132 \mu\text{m}^2$ 降至 $434.84 \mu\text{m}^2$,下降率为 12.5%。证明微磨粒的加入会对冲击波的传播起到阻碍作用,使得冲击波发生明显的衰减现象。随着微磨粒的加入,微磨粒对材料形貌的改变逐渐起到主导作用。

参考文献:

- [1] KHAVARI M, PRIYADARSHI A, HURRELL A, et al. Characterization of Shock Waves in Power Ultrasound[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 915: R3.
- [2] TAN K L, YEO S H. Bubble Dynamics and Cavitation Intensity in Milli-Scale Channels under an Ultrasonic Horn[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58: 104666.
- [3] VASSHOLZ M, HOEPPE H P, HAGEMANN J, et al. Pump-Probe X-Ray Holographic Imaging of Laser-Induced Cavitation Bubbles with Femtosecond FEL Pulses[J]. Nature Communications, 2021, 12: 3468.
- [4] KHARE R, PRASAD V. Prediction of Cavitation and Its Mitigation Techniques in Hydraulic Turbines-a Review[J]. Ocean Engineering, 2021, 221: 108512.
- [5] AYLI E. Cavitation in Hydraulic Turbines[J]. International Journal of Heat and Technology, 2019, 37(1): 334-344.
- [6] 李争彩, 林书玉. 超声空化影响因素的数值模拟研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 38-42.
- [7] LI Z C, LIN S Y. Numerical Simulation of the Factors Influencing Ultrasonic Cavitation[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2008, 36(1): 38-42.
- [7] GARG M, JOHNSON H, LEE S M, et al. Role of Hounsfield Unit in Predicting Outcomes of Shock Wave Lithotripsy for Renal Calculi: Outcomes of a Systematic Review[J]. Current Urology Reports, 2023, 24(4): 173-185.

(下转第 87 页)