超声空化微磨粒协同抛光改性TC17钛合金的机理

啜世达[1,2] 叶林征[1,2*] 祝锡晶[1,2] 刘 瑶[1,2] 王润宇[1,2]
1.中北大学机械工程学院,太原,030051
2.半导体超精密加工技术与智能装备山西省重点实验室,太原,030051

摘要:针对航空发动机叶片TC17钛合金表面质量与力学性能的提升需求,提出了超声空化微磨粒协同抛光改性方法,构建了考虑微磨粒扰动的空泡演化和非均质成核速率预测数学模型,搭建了高速摄影及抛光改性试验平台,研究了超声频率对空化行为和改性效果的影响。结果表明,超声频率20 kHz下的空泡云聚集性和指向性最强,空泡溃灭冲击作用更显著,有效改性能量较40 kHz提高38.5%。相较于原始样品,改性后样品的表面粗糙度减小24.9%,显微硬度提高16.0%,残余压应力提高134.1%,表层金相组织宽度减小28.3%。研究揭示了超声空化微磨粒协同抛光改性机理。

关键词:超声空化;抛光改性;空泡动力学;微磨粒;TC17钛合金
中图分类号:TH162;TG178;TB559
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.012 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Mechanism of Ultrasonic Cavitation and Micro-Abrasive Particle Synergistic Polishing for Modification of TC17 Titanium Alloy

CHUAI Shida[1,2] YE Linzheng[1,2] ZHU Xijing[1,2] LIU Yao[1,2] WANG Runyu[1,2]
1.School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051
2.Shanxi Key Laboratory of Semiconductor Ultraprecision Machining Technology and Intelligent Equipment, Taiyuan, 030051

Abstract: To improve the surface quality and mechanical properties of TC17 titanium alloy for aero-engine blades, this paper proposes a synergistic polishing modification method using ultrasonic cavitation and micro-abrasive particles. A mathematical model for bubble evolution and heterogeneous nucleation rate prediction is established, incorporating the perturbation effects of micro-abrasives. A high-speed photography and polishing experimental platform is developed to investigate the effects of ultrasonic frequency on cavitation behavior and modification performance. The experimental results show that at an ultrasonic frequency of 20 kHz, the cavitation cloud exhibits the strongest aggregation and directionality, with a more pronounced collapse impact. Compared with that at 40 kHz, the effective modification energy at 20 kHz is increased by 38.5%. In comparison with the original sample, surface roughness is reduced by 24.9%, microhardness is increased by 16.0%, residual compressive stress is increased by 134.1%, and the width of surface microstructural features is refined by 28.3%. This study reveals the underlying mechanism of ultrasonic cavitation and micro-abrasive synergistic polishing modification.

Key words: ultrasonic cavitation; polishing modification; bubble dynamics; micro-abrasive particles; TC17 titanium alloy

0 引言

现代航空发动机对推重比、热效率和寿命提出高要求。作为发动机的关键构件,叶片的表面质量和力学性能直接影响发动机的运行效率与安全性。研究表明,疲劳是叶片失效的主要形式,所占比例超过50%[1],且表面粗糙度由10.16 μm降低到0.76 μm时,涡轮泵效率提高2.5%[2]。因此,实现叶片表面质量与力学性能的同步提升对航空发动机具有重要意义。

TC17钛合金因其高比强度、优良的高温性能和抗疲劳特性而广泛用于航空发动机的压气机盘和叶片等关键部件,是目前应用最广的高性能钛合金之一。传统的表面改性方法难以同时提高表面质量、强化力学性能[3-5]。超声空化的次级效应具有改变材料表面微纳结构的能力[6-9],能在改善零件表面状态的同时延长疲劳寿命[10]。SOYAMA等发现[11]空化喷丸后的表面质量优于其他喷丸方式。YE等[12]对AZ31B镁合金的超声

收稿日期:2025-11-20
基金项目:国家自然科学基金(52375470,52005455,51975540);中国航空发动机集团有限公司航空齿轮制造技术创新中心开放基金(AGMTIC-KFKT-202404);山西省专利转化专项计划(20250024)

空化改性试验证实了空化作用在表面强化与晶粒细化上的有效性。由此可知，超声空化改性具备实现表面质量和力学性能协同提升的潜力。

CHUAI等[13]证实微磨粒能显著促进空化效应。FU等[14]发现较单一的超声空化，超声空化微磨粒协同作用可引发更显著的表面微纳结构变化。CHEN等[15]研究了超声空化作用下的气泡演化对微磨粒的影响，发现微磨粒在空化过程中能获得动能并冲击与切削材料表面，从而有效重构表面微纳结构。超声空化微磨粒协同改性技术满足航空发动机钛合金叶片的复杂表面改性需求，且具备加工无接触、适应复杂形貌、绿色环保等优势，因此在机理上具有研究价值，在应用层面也有广阔前景。

基于此，本文构建了空化气泡非均质成核速率预测模型，建立了考虑微磨粒扰动效应的空泡演变模型，搭建了超声空化微磨粒协同抛光改性试验平台，开展了空泡云高速摄影与TC17钛合金表面改性试验。

1 理论模型构建

超声空化强度和表面改性效果密切相关[16]。Rayleigh首先建立了理想不可压缩流体中的球形空腔塌缩模型，在此基础上，考虑气泡内部压力、表面张力和液体黏性等因素后，形成了经典的R-P方程。空泡演变可近似视为球形气泡壁面的径向运动过程，空泡动力学行为主要受声压激励、气泡内外压差、表面张力和液体黏性共同影响。基于压力功与周围液体径向运动动能之间的平衡关系，建立控制方程：

$$2\int_{R}^{R_0}\left[p_{\mathrm{A}}+p_0+\frac{2\sigma}{R_0}-\left(p_0+\frac{2\sigma}{R_0}-p_{\mathrm{V}}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3n}-p_{\mathrm{V}}\right]R^2\mathrm{d}R=\rho R^3\dot{R}^2 \tag{1}$$

式中：R_0为空泡初始半径，R_0=6 μm；R、$\dot{R}$分别为空泡的瞬时半径和壁面运动速度；p_{A}为随时间变化的扰动声压；p_0为液体静压，p_0=1.013×10^5 Pa；σ为表面张力，σ=0.076 N/m；n为空泡中气体多方指数，n=1；ρ为液体密度，ρ=1000 kg/m^3；p_{V}为饱和蒸汽压。

假设空泡周围液体不可压缩，空泡内部气体满足多方状态方程。在不考虑空泡整体迁移的条件下，综合考虑液体黏性、表面张力、声辐射阻尼、重力、浮力等因素的影响，建立泡壁仅发生径向运动的球形空泡动力学模型：

$$R\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2=\frac{1}{\rho}\left[\left(p_0+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3n}+p_{\mathrm{a}}\sin(2\pi ft)-p_0-\frac{2\sigma}{R}+\frac{F_g}{S_t}-\frac{F_b}{S_t}-\frac{4\mu\dot{R}}{R}\right]+\frac{R}{\rho c}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\left(p_0+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3n}+p_{\mathrm{a}}\sin(2\pi ft)\right] \tag{2}$$

式中：$\ddot{R}$为壁面运动加速度；μ为液体动力黏度，μ=0.001 kg/(m·s)；S_t为时间t时的气泡表面积；c为液体中的声速，c=1497 m/s；f为超声波频率；p_{a}为驱动声压幅值，p_{a}=1.3×10^5 Pa。

超声空化微磨粒流体内，空泡溃灭的次级效应导致微磨粒加速。移动的微磨粒会扰动流体压力场，从而影响单个空泡动态演变进程。为分析微磨粒运动引起的局部压力扰动对空泡演变的影响，在低雷诺数条件下可忽略流体惯性项，将Navier-Stokes方程简化为Stokes方程：

$$\nabla p=\mu\nabla^2\boldsymbol{u}+f_{\mathrm{body}} \tag{3}$$

式中：p为流体中的压力；$\boldsymbol{u}$为流体速度矢量；f_{body}为体积力项。

半径r_{p}的粒子在黏性流体中以速度v_{p}移动时，流体在距粒子中心l处的压力为

$$p_{l,\theta}=-\frac{3\mu r_{\mathrm{p}}v_{\mathrm{p}}\cos\theta}{2l^2}+p_\infty \tag{4}$$

式中：θ为微磨粒运动方向与微磨粒中心到空泡连线之间的夹角；p_∞为无穷远处的压力。

为分析微磨粒运动诱导的局部压力扰动对空泡演变的影响，本文重点考察微磨粒运动方向上的最大压力扰动，因此cosθ取1。参考已有研究并结合本文所用微磨粒粒径及超声空化作用条件，微磨粒运动速度取20～70 m/s[14]。超声作用下，微磨粒可作为空泡非均质成核位点，降低空泡成核能垒，促进空泡生成。微磨粒诱导的成核行为可通过经典非均质成核理论模型描述：

$$v_{\mathrm{n}}=v_{\mathrm{s}}S_{\mathrm{a}}Zj\exp\left(-\frac{\Delta G}{K_bT}\right) \tag{5}$$

式中：v_{n}为单位体积的悬浮液在单位时间内产生的空泡成核数量；v_{s}为单位表面积上的成核位点密度；Z为Zeldovich因子；j为分子附着到核的速率；K_b为玻尔兹曼常数；T为绝对温度；ΔG为控制表面成核的能垒；S_{a}为1 L体积内微磨粒可提供的有效表面积。

基于微磨粒表面性质均一、成核概率均匀分布的假设，v_{s}不变。对于非均质成核，微磨粒表面可作为固-液异质界面，为气泡生成提供成核位点，从而降低气泡成核所需克服的能垒。因此，非均质成核的临界功为

$$\Delta G=\frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta p)^2}f(\theta) \tag{6}$$

$$f(\theta)=(2-3\cos\theta+\cos^3\theta)/4 \tag{7}$$

式中：Δp为成核时的压力差，即超声波导致的局部压力降和液体的饱和蒸汽压的差值；$f(\theta)$为非均质成核修正因子[17]，用于表征微磨粒表面接触角对气泡成核临界功的影响；θ为气泡在微磨粒表面的静态接触角。

$f(\theta)$减小了临界自由能，降低了成核所需的能量。接触角θ越小，微磨粒表面促成核的效率

越高。实际的超声空化微磨粒体系中，成核位点数量不仅取决于单个颗粒的表面性质，还与体系中微磨粒的总表面积密切相关。微磨粒的粒径分布可通过激光粒度仪测得。因此，修正成核模型中的总表面积（1 L溶液为参考体积）为

$$S_a=\frac{S_r C_m \rho_w \rho_{SiC}}{1000[(1-C_m)\rho_{SiC}+C_m\rho_w]} \tag{8}$$

式中：C_m为SiC微磨粒质量分数；ρ_w、ρ_{SiC}分别为水和SiC微磨粒的密度；S_r为单位质量微磨粒提供的有效成核表面积（比表面积）。

试验所用SiC微磨粒的理化性质及表面特性差异可忽略不计。在假设磨粒成核行为具有统计一致性的前提下，将与接触角、成核能垒相关的项合并为系数α，则成核速率与单位体积悬浮液中微磨粒有效表面积之间的关系可简化为

$$\frac{v_n}{v_s}=\frac{\alpha S_r C_m \rho_w \rho_{SiC}}{1000[(1-C_m)\rho_{SiC}+C_m\rho_w]} \tag{9}$$

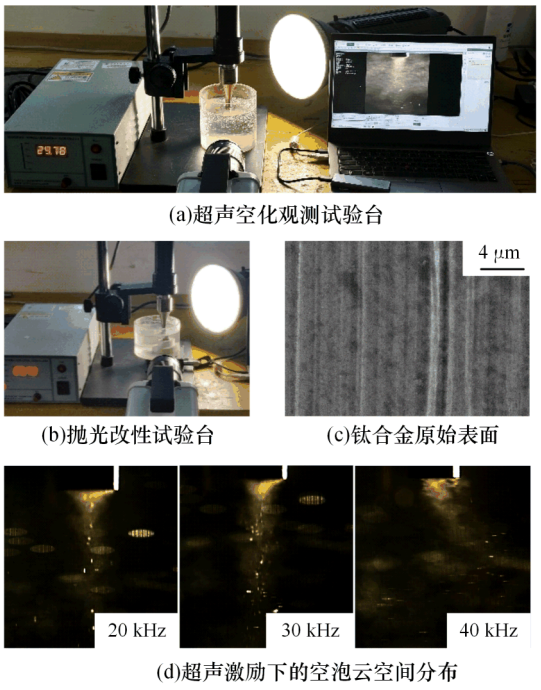
采用非均质成核速率v_n与位点特定成核速率v_s的比值评估微磨粒对空化效应的影响程度。

2　试验

如图1a所示，超声空化试验平台包括带有频率追踪的超声波发生器、换能器、变幅杆及高速摄影系统。高速摄影系统由PHOTRON高速摄影机、FF 100 F2.8 CA-Dreamer Macro 2× 全画幅微距镜头、LED-150T聚光灯组成，试验过程中帧率设定为6400 帧/s。在此基础上，建立了超声空化改性试验平台（图1b），增设精度0.01 μm的光学升降平台及专用夹具，实现样品的高精度定位与改性控制。改性前的TC17钛合金表面存在起伏特征，如图1c所示。

开展了TC17钛合金的超声空化微磨粒改性试验。超声波功率定为600 W，辐照时间定为20 min，靶距定为0.25 mm，微磨粒粒径、质量分数分别为13.4 μm和0.5 %，选用20 kHz、30 kHz和40 kHz的超声频率对TC17钛合金进行表面改性，如图1d所示。采用LEXT OLS5000激光共聚焦显微镜、SCTMC-DHV-1000显微硬度仪、DS-21L立式X射线应力仪测量TC17钛合金原始样品的表面粗糙度、显微硬度和残余应力。

原始样品表面粗糙度为2.01 μm，显微硬度为375.9 HV，残余应力为－249.3 MPa，为后续改性效果评估提供基准。在试验部分中，微磨粒粒径13.4 μm与质量分数0.5% 均不变，仅考察超声频率变化对协同改性效果的影响。



(a)超声空化观测试验台

(b)抛光改性试验台　(c)钛合金原始表面

(d)超声激励下的空泡云空间分布

图1　超声空化试验台、试验材料和空化云空间分布状态

Fig. 1　Ultrasonic cavitation test benches, original surface of TC17 titanium alloy, and spatial distributions of cavitation clouds

3　结果和讨论

3.1　空泡演变与非均质成核

对空泡演变数学模型进行数值求解，结果如图2所示。空泡演变过程中，膨胀阶段可视为能量积累阶段，空泡膨胀半径与最终塌陷释放的能量密切相关。无微磨粒时，超声频率20 kHz、30 kHz和40 kHz激励的最大空泡半径分别为51.36 μm、37.96 μm和31.48 μm。随着超声频率升高，空泡膨胀时间缩短，最大膨胀半径逐渐减小，说明低频超声更利于空泡充分膨胀和能量积累。超声空化微磨粒流体中，超声频率20 kHz、30 kHz和40 kHz激励的最大空泡半径分别为47.98 μm、36.19 μm和29.59 μm。考虑微磨粒压

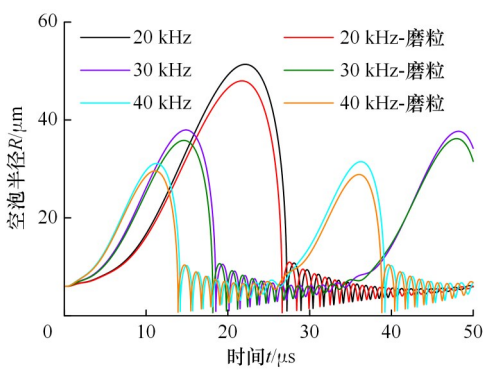


图2　空化气泡动态演变图

Fig. 2　Dynamic evolution of cavitation bubbles

力扰动的空泡动力学模型求解结果表明，微磨粒运动引发的局部压力扰动抑制了空泡动态膨胀，削弱了单个空泡在溃灭时的能量释放。

为分析超声空化微磨粒流体内的成核行为，对改进后的非均质成核数学模型进行求解，结果如图3所示。计算结果表明，空泡非均质成核速率与微磨粒比表面积正相关，随着微磨粒质量分数的增大，成核速率呈现先快速升高、后逐渐趋于平缓的变化趋势。说明微磨粒可通过提供固-液异质界面增加有效成核位点，从而促进空泡生成并提高空泡数密度。微磨粒质量分数进一步增大时，成核位点的有效贡献逐渐减弱，成核速率表现出一定的饱和特征。由此可知，微磨粒不仅能够调控空泡非均质成核行为，还可通过改变空泡数密度及单泡动力学演化过程，进一步影响超声空化微磨粒协同抛光改性的表面质量。

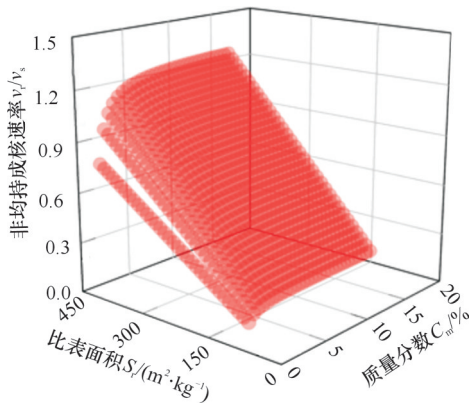


图3 空泡非均质成核速率

Fig. 3 Heterogeneous nucleation rate of bubbles

3.2 表面质量与微观形貌分析

超声空化微磨粒协同改性后，使用SEM3200扫描电子显微镜观察试样表面（图4），发现材料表面出现典型的微切削与微耕犁。空泡溃灭产生的微射流和冲击波加速微磨粒运动，高速运动的微磨粒对表面进行微切削、微耕犁，TC17钛合金表面产生局部微塑性变形，形成均匀分布的微观形貌。这些微观形貌不仅反映表面材料去除与重构的耦合过程，也为表面粗糙度减小、组织细化和残余应力调控提供依据。

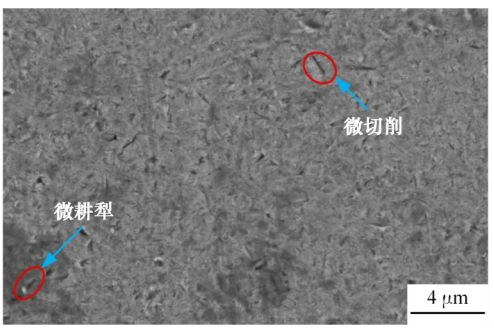


图4 超声空化微磨粒协同改性后表面形貌

Fig. 4 Surface morphology after ultrasonic cavitation and micro-abrasive synergistic modification

为揭示超声空化微磨粒协同抛光改性对表面形貌的影响，对抛光改性（超声频率20 kHz和40 kHz）后的TC17钛合金表面微观结构进行定量分析。利用Image软件测量试样表面，随机选取30个特征点的长度与宽度，结果如图5所示。超声频率20 kHz下，表面特征的长度、宽度的均值分别为0.74 μm和0.24 μm；超声频率40 kHz下，长度、宽度的均值分别为0.61 μm和0.21 μm。

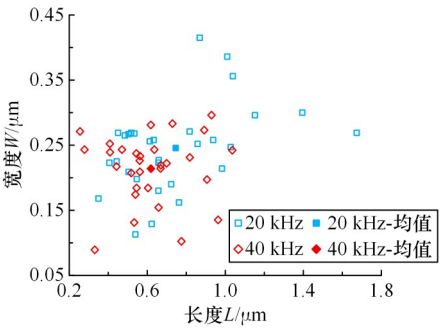


图5 表面微观结构定量结果

Fig. 5 Quantitative results of surface microstructure

超声频率20 kHz、40 kHz下特征点的长宽比L/W分别为3.08和2.90，整体接近3。采用能量指标$E=LW$表征表面有效冲击能量，20 kHz、40 kHz的表面有效冲击能量分别为0.18和0.13。这表明气泡塌陷驱动磨粒的冲击效应在超声频率为低频时更强，形成的表面特征（微切削、微耕犁）更大，冲击能量更高。

表面粗糙度是评价零件表面质量的关键指标。超声频率20、30与40 kHz下，改性后的TC17钛合金表面粗糙度分别降至1.51 μm、1.72 μm和1.93 μm，分别减小24.9%、14.4%与4.0%（初始样品的表面粗糙度为2.01 μm），如图6所示。以表面粗糙度改善幅度作为改性效率的指标。改性时间、超声功率和微磨粒参数相同时，超声频率20 kHz的粗糙度减小0.50 μm，40 kHz的粗糙度减小0.09 μm。由此可知，低频超声激励下的空化作用更集中，微磨粒对表面粗糙峰的微切削和微耕犁作用更充分，具有更显著的表面平整化效果。

3.3 力学性能与金相组织演化

显微硬度（HV）是评估改性对材料表层力学强化效果的重要指标。超声频率20 kHz、30 kHz与40 kHz改性后的平均显微硬度分别为436.2 HV、424.8 HV与410.4 HV，显微硬度的增幅分别为

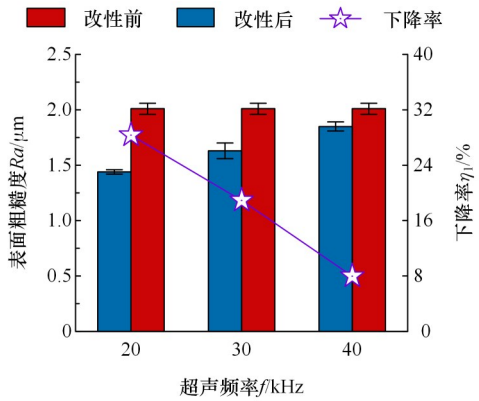


图6　表面粗糙度变化

Fig. 6　Surface roughness variation

16.0%、13.0%与9.2%(原始样品375.9 HV)，如图7所示。同样，低频超声空化微磨粒协同抛光改性更能提高显微硬度。

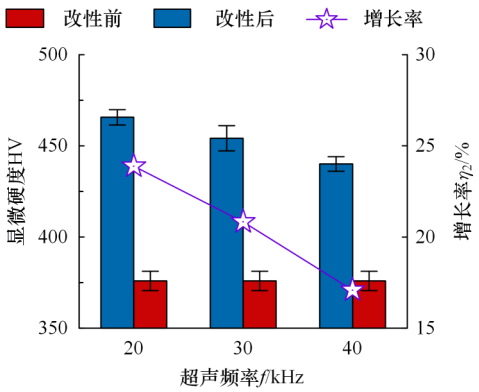
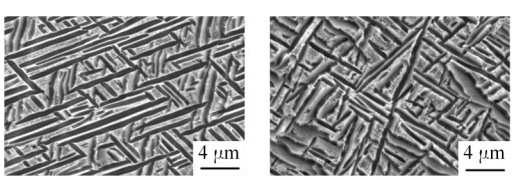


图7　表面显微硬度变化

Fig. 7　Surface microhardness variation

根据霍尔-佩奇关系可知，显微硬度的增大源于金相显微组织细化。为量化改性对显微组织的影响，对TC17原始样品与20 kHz改性样品进行金相观测，如图8所示。对两个样品分别测量100个随机测点的组织宽度，结果如图9所示。统计分析表明：原始样品的组织宽度集中在0.4～0.6 μm，均值为0.46 μm；20 kHz改性样品的组织宽度集中在0.3～0.4 μm，均值降至0.33 μm，均值减小28.3%且分布更集中。细化效应说明空化塌陷诱发的微射流与磨粒冲击不仅去除了表面粗糙峰，还在表层引发强烈的应变，实现组织的均匀化与细化。



(a)原始样品　(b)改性后样品

图8　表层金相组织

Fig. 8　Surface metallographic structure

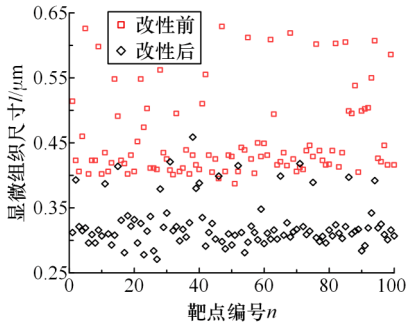


图9　表层金相组织定量分析结果

Fig. 9　Quantitative analysis results of the surface metallographic structure

残余压应力是延长疲劳寿命的关键有利参数，超声频率20、30、40 kHz改性后，样品的残余应力(压应力)分别为－583.5、－554.2、－530.1 MPa，最大增幅为134.1%(原始样品的残余应力为－249.3 MPa)，如图10所示。压应力的显著增大源于超声空化微磨粒抛光改性在表层引入大规模微塑性变形，产生体积缩应变与箍应力效应，压应力可抑制微裂纹的萌生与扩展，有利于延长疲劳寿命。

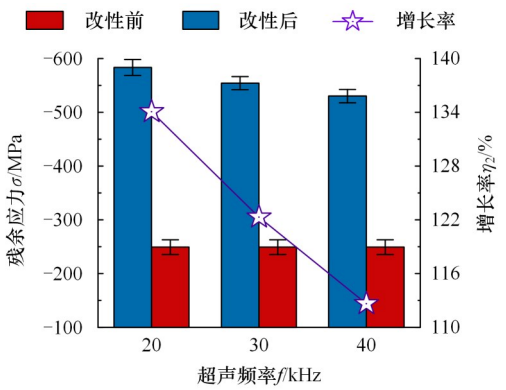


图10　残余应力变化

Fig. 10　Residual stress variation

综上所述，超声空化微磨粒协同抛光改性具有显著的频率依赖性，且低频(20 kHz)的改性效果更优。空泡动力学分析表明，低频超声激励触发的气泡溃灭释放出更高的冲击能量，局部塑性变形区更大，促进了晶粒细化、显微硬度与压应力的增大。微磨粒在高速射流与冲击波的驱动下形成微切削与微耕犁，促进表层组织细化与力学性能提升。高速摄影观测结果与空泡动力学求解和表明改性试验结果具有较好一致性。由图1d可知，20 kHz下空泡云聚集性和指向性最强，空化作用区域相对集中，30 kHz时空泡云空间聚集性减弱，40 kHz时空化区域发生明显漂移，并呈现圆锥扇面式扩散特征，指向性显著降低。超声频率变化会改变空泡云的空间分布和能量集中程

度，进而影响空泡溃灭冲击能量的有效作用方式。对于超声空化微磨粒协同体系，空泡溃灭产生的微射流和冲击波可驱动微磨粒瞬时加速，使微磨粒对材料表面产生冲击、微切削和微耕犁作用。低频超声激励下，空泡云具有更强的聚集性和指向性，可提高微磨粒冲击作用的空间集中度和有效作用概率，从而促进表面粗糙峰去除、表层微塑性变形和组织细化。由此可知，低频超声更易形成能量集中、方向性强且作用稳定的空化微磨粒协同效应，有利于实现TC17钛合金表面质量与力学性能的协同提升。

4 结论

1)构建了考虑微磨粒扰动效应的空泡演化模型和非均质成核速率预测模型。微磨粒可通过提供异质成核位点提高空泡非均质成核速率，同时引入局部压力扰动，抑制单个空泡的膨胀行为，从而调控空化过程中的空泡数密度和能量释放特征。

2)高速摄影试验结果表明，超声频率对空泡云空间分布具有显著影响。20 kHz下空泡云聚集性和指向性最强，空化作用区域相对集中；随着频率升高，空泡云逐渐发散，40 kHz下呈现圆锥扇面式扩散形态，指向性和能量集中性明显减弱。

3)超声空化微磨粒协同抛光改性在TC17钛合金表面形成微切削和微耕犁作用，提高表面质量、诱导表层组织细化和残余压应力积累。20 kHz下表面有效改性能量较40 kHz提高38.5%。相较于原始样品，20 kHz改性样品的表面粗糙度降低24.9%，显微硬度提高16.0%，残余压应力增大134.1%，表层金相组织宽度均值减小28.3%。

4)在20～40 kHz范围内，降低超声频率有利于增强空泡云聚集性，提高微磨粒冲击作用的空间集中度和有效作用概率，从而提高超声空化微磨粒协同抛光改性效果。超声频率是影响空化行为、微磨粒作用及表面改性效果的关键工艺参数。

参考文献：

[1] GUPTA A, BENNETT C J, SUN Wei. Fatigue Response of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Bracket: an Experimental Study [J]. Procedia Structural Integrity, 2021, 31: 15-21.

[2] FU Youzhi, GAO Hang, WANG Xuanping, et al. Machining the Integral Impeller and Blisk of Aero-Engines: a Review of Surface Finishing and Strengthening Technologies [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 528-543.

[3] 杨自豪，范增华，张翔，等. 钛合金管内表面的化学辅助磁性剪切增稠抛光实验研究[J]. 中国机械工程，2025，36(12)：2846-2853.
YANG Zihao, FAN Zenghua, ZHANG Xiang, et al. Research on Chemical-assisted Magnetorheological Shear Thickening Polishing of Titanium Alloy Tube Inner Surfaces [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(12): 2846-2853.

[4] 尹衍恒，赵朕，李庆，等. 连续激光抛光钛合金表面的磨损性能研究[J]. 表面技术，2025，54(1)：218-227.
YIN Yanheng, ZHAO Zhen, LI Qing, et al. Investigation of Wear Properties of Titanium Alloy Surfaces Polished with Continuous Laser [J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 218-227.

[5] 潘玉良，蔡晋，孟庆勋，等. TC17合金超声喷丸强化应力场与形貌分析[J]. 航空精密制造技术，2025，61(4)：4-8.
PAN Yuliang, CAI Jin, MENG Qingxun, et al. Stress Field and Morphology Analysis of TC17 Alloy Ultrasonic Shot Peening Strengthening [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2025, 61(4): 4-8.

[6] 叶林征，祝锡晶，王建青. 近壁声空泡溃灭微射流冲击流固耦合模型及蚀坑反演分析[J]. 爆炸与冲击，2019，39(6)：21-32.
YE Linzheng, ZHU Xijing, WANG Jianqing. Fluid-solid Coupling Model of Micro-jet Impact from Acoustic Cavitation Bubble Collapses near a Wall and Pit Inversion Analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 21-32.

[7] 李祚麻，祝锡晶，郭千瑜，等. 超声珩磨光整加工技术研究综述[J]. 电加工与模具，2025(4)：1-12.
LI Zuoxiu, ZHU Xijing, GUO Qianyu, et al. A Comprehensive Review of Ultrasonic Honing Finishing Technology [J]. Electromachining & Mould, 2025(4): 1-12.

[8] 孙毅，祝利豪，毛亚郎，等. 近球壁射流空泡溃灭对微细颗粒破碎效果的影响[J]. 中国机械工程，2020，31(24)：2910-2917.
SUN Yi, ZHU Lihao, MAO Yalang, et al. Effects of Bubble Collapse of Near-ball Wall Jet Flows on Crushing Effectiveness of Fine Particles [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(24): 2910-2917.

[9] 叶林征，祝锡晶. 功率超声珩磨磨削区空泡溃灭微射流冲击特性及试验研究[J]. 机械工程学报，2020，56(12)：115.
YE Linzheng, ZHU Xijing. Impact Characteristics and Experimental Study of Micro-jet with Cavitation Collapse in Grinding Area of Power Ultrasonic Honing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(12): 115.

[10] 罗健鑫，王彦菊，崔敏超，等. 空化水喷丸表面改性技术研究进展综述[J]. 航空制造技术，2024，67(9)：51-61.
LUO Jianxin, WANG Yanju, CUI Minchao, et al. A Research Review on Surface Modification with Water Cavitation Peening [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(9): 51-61.

[11] SOYAMA H, KORSUNSKY A M. A Critical Comparative Review of Cavitation Peening and Other Surface Peening Methods [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 305: 117586.

[12] YE Linzheng, ZHU Xijing, HE Yan, et al. Surface Strengthening and Grain Refinement of AZ31B Magnesium Alloy by Ultrasonic Cavitation Modification [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 508-517.

（下转第1650页）