

精密与超精密加工

钨合金超声辅助划擦试验及仿真研究

卢文涛, 刘金帛, 张园, 鲍岩, 董志刚, 康仁科*

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 揭示钨合金在超声辅助磨削加工下的材料去除行为。**方法** 通过超声辅助划擦试验与有限元仿真相结合的方式, 分析超声振动作用对材料表面形貌、截面轮廓、划擦力、温度、塑性应变及应变率的影响, 探究超声振动作用下的材料去除和表面创成机理。**结果** 钨合金在划擦过程中发生严重的塑性变形, 在划痕两侧出现由耕犁作用而形成的隆起现象。超声辅助划擦形成的划痕表面鳞刺更少且未出现犁沟现象, 且划痕深度相较于普通划擦增大 14.1%, 划痕宽度增大 39%。随着划擦深度的增加, 试验划擦力与仿真划擦力均线性增大, 且仿真值与试验值误差为 18.1%, 验证了有限元仿真模型的有效性。超声振动作用下的划擦力呈周期性变化特征, 使平均划擦力降低了 43.2%。此外, 仿真结果表明, 超声辅助划擦相较于普通划擦, 温度最高降低 50%, 表面塑性应变最高降低 20%, 超声冲击过程中材料的塑性应变率相较于普通划擦提高 1 个数量级, 分离过程中塑性应变率最大降低 2 个数量级。**结论** 超声振动作用可以有效降低划擦过程中的划擦力和划擦区域温度, 增大冲击过程中材料的瞬时应变率, 改善压头的切屑黏附现象, 从而抑制划擦表面鳞刺的生成和犁沟的形成, 改善表面质量。此外, 超声振动作用还可以有效提高材料去除率。

关键词: 钨合金; 单颗金刚石; 超声辅助划擦; 材料去除机理; 有限元仿真

中图分类号: TG580.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)06-0133-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.06.012

Simulation and Experimental Study on Ultrasonic Assisted Scratching of Tungsten Alloy

LU Wentao, LIU Jinbo, ZHANG Yuan, BAO Yan, DONG Zhigang, KANG Renke*

(Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

ABSTRACT: Ultrasonic assisted grinding technology has been utilized to overcome the challenges of severe tool wear and chip adhesion in conventional tungsten alloy grinding. However, the mechanism of material removal under ultrasonic vibration remains unclear. In this research, ultrasonic assisted scratching (UAS) experiment was conducted to investigate the effect of ultrasonic vibration on material surface morphology, cross-sectional profile, and scratching force. A coupled Eulerian-Lagrange (CEL) finite-element (FE) simulation model was established to analyze the changes in scratching force, material temperature, plastic strain, and strain rate during the vibration process. Both simulation and experimental methods revealed the mechanism of

收稿日期: 2023-03-17; 修订日期: 2023-07-29

Received: 2023-03-17; Revised: 2023-07-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3402300); 国家自然科学基金面上项目 (52275411); 中央高校基本科研业务费 (DUT22ZD201)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2022YFB3402300); General Program of National Natural Science Foundation of China (52275411); Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT22ZD201)

引文格式: 卢文涛, 刘金帛, 张园, 等. 钨合金超声辅助划擦试验及仿真研究[J]. 表面技术, 2024, 53(6): 133-143.

LU Wentao, LIU Jinbo, ZHANG Yuan, et al. Simulation and Experimental Study on Ultrasonic Assisted Scratching of Tungsten Alloy[J]. Surface Technology, 2024, 53(6): 133-143.

*通信作者 (Corresponding author)

material removal and surface creation under ultrasonic vibration action. Firstly, the surface morphology of the scratches was observed by Scanning Electron Microscope (SEM). The result showed that tungsten alloy suffered severe plastic deformation during the scratching process, forming an uplift phenomenon on both sides of the scratches by plowing action. The indenter tended to adhere to the chips during the conventional scratching (CS) process, which resulted in the formation of burrs and plowing groove in the scratching process. In contrast, the UAS surface showed fewer burrs and clear bottom edge, which proved that ultrasonic vibration action could reduce the chip adhesion phenomenon on the indenter. Therefore, the ultrasonic vibration action could effectively suppress the generation of burrs on the scratching surface and the formation of plowing groove at the bottom of the scratches. Posteriorly, the three-dimensional topography of the scratches and their cross-sectional profiles were analyzed by Laser Scan Confocal Microscopy (LSCM), and the result showed that the width of the scratches formed by UAS increased by 39% and the depth increased by 14.1% compared with CS, indicating that larger volume of material was removed by UAS. Subsequently, the changing trend of scratching force with scratching depth of the simulation model was consistent with the experimental results, and the error between the simulation value and the experimental value was 18.1%, which verified the availability of the FE simulation model. Compared with the CS, the scratching force of ultrasonic experiment was reduced by 43.2%. The simulated scratching force showed that the short contact and long separation between the indenter and the workpiece in the UAS process made the scratching force change periodically, which could reduce the average force of the scratching process. Finally, by extracting and analyzing the simulated physical field data of UAS at different time, it was found that the temperature of UAS was reduced by 50% and the surface plastic strain was reduced by 20% compared with the CS process, and the plastic strain rate of the material during ultrasonic impact was increased by one order of magnitude compared with the CS, while the separation process was reduced by two orders of magnitude at most. The aforementioned results indicate that ultrasonic vibration can effectively reduce the scratching force and temperature of the scratching area while also increasing the transient strain rate of the material during the impact process. This prevents chip adhesion to the indenter and inhibits the generation of burrs and plowing groove on the scratching surface, improving surface quality. Additionally, the ultrasonic vibration effect can effectively enhance the material removal rate.

KEY WORDS: tungsten alloy; single diamond; ultrasonic assisted scratching; material removal mechanism; finite element simulation

高密度钨合金 (Tungsten Heavy Alloys, WHAs) 具有密度大、强度高、熔点高、热膨胀系数小、耐腐蚀性好等优异的材料性能^[1-2], 因此广泛应用于光电材料等领域, 如陀螺仪转子、面向等离子体材料和光学磨具等^[3-4]。钨合金是由体心立方 (BCC) 结构的钨相与面心立方 (FCC) 结构的黏结相组成的两相材料, 钨相硬度大但延展性差, 而黏结相延展性优异但强度低^[5-6]。

目前, 高新科技领域中精密零部件对钨合金的需求不断增加, 同时对其表面加工质量提出了更高的要求^[7]。钨合金被认为是未来最有前景的面向等离子体材料, 但其表面质量直接影响氢、氦等高能粒子的滞留行为, 粗糙度高的表面会捕获更多的高能粒子, 导致起泡、硬化等辐照损伤, 缩短部件使用寿命^[8]。此外, 由于具有硬度高、耐磨性好等优点, 钨及其合金特别适用于非球面透镜模具材料, 纳米级的模具表面粗糙度可以直接获得精密的非球面光学零件, 提高生产效率并降低成本^[9]。因此, 为实现钨合金高表面质量与高效率加工, 需要选择合适的加工方式。

磨削是难加工材料及其零件的重要加工方式, 但

在传统磨削加工过程中, 钨合金的钨相硬度大, 易导致刀具磨损严重, 黏结相软黏易发生切屑黏附, 造成加工表面质量差、加工效率低等问题。陈冰等^[10]开展了钨合金单颗磨粒划擦及磨削试验, 探究其磨削加工去除机理, 结果表明钨合金的两相结构特性使其磨削表面存在塑性变形、卷起、裂纹和两相交融等脆塑性并存的特征。徐露等^[11]开展了钨合金磨削试验探究金刚石砂轮的磨损形式, 结果表明磨削过程中砂轮表面磨粒脱落缺失严重, 其主要的磨损形式为磨粒脱落、磨粒磨耗和磨粒破损。曾益等^[12]建立了钨合金多颗磨粒磨削有限元仿真模型, 研究了不同工艺参数对磨削力的影响, 结果表明磨削法向力显著高于切向力, 法向力大是砂轮磨损的主要因素。

超声辅助磨削技术是将超声振动叠加到材料去除过程中的复合加工方法, 相较于普通磨削具有磨削力小、磨削温度低、刀具寿命长等优点^[13], 已经被证实是加工硬质材料的有效解决途径之一^[14]。Nik 等^[15]开展了 Ti6Al4V 超声辅助磨削试验, 结果表明超声振动作用使法向力和切向力分别降低 13.5% 和 14.2%。Wen 等^[16]进行了超声辅助磨削 12Cr2Ni4A 试验, 结

果表明引入超声振动可以使磨削温度降低 8%。Liu 等^[17]开展了 TC4 超声辅助磨削 CBN 砂轮磨损研究, 结果表明引入超声可以使砂轮磨损降低 25.2%。然而目前针对钨合金超声辅助磨削加工过程的材料去除行为尚未有公开报道。

为研究钨合金在超声振动作用下的材料去除行为, 需要明确材料在加工过程中的物理状态变化和微观力学行为。有限元仿真是获取加工过程中材料物理场变化的有效手段, 其中耦合欧拉-拉格朗日有限元仿真模型可以避免切削中大变形造成的单元失真问题, 有效地模拟金属切削过程中材料的变形行为^[18-19]。该模型在仿真过程中网格不发生变形, 材料在网格内流动, 且模型不需要应用材料分离准则, 仿真过程中材料的分离机制由塑性流动决定, 很大程度上消除了网格畸变对模拟结果的影响。

目前, 超声辅助磨削加工过程中有关钨合金去除特性的研究尚未有公开报道, 超声振动作用对于材料去除及表面创成机理尚不清楚, 而单颗磨粒划擦试验被认为是研究磨削过程中材料去除机理的有效方法^[20-21]。因此本文通过超声辅助划擦试验与有限元仿真相结合的方式, 探究钨合金在超声振动作用下的材料去除和表面创成机理, 为钨合金超声辅助磨削加工工艺参数选择及优化提供理论依据。

1 试验条件

图 1a 为试验所用的超声辅助划擦试验平台。超声辅助划擦试验在加工中心 (US70, DMG, 德国) 上进行, 外接自研超声振动系统, 为金刚石压头提供轴向的超声振动, 使用压电三向测力仪 (9139AA, Kistler, 瑞士) 在划擦试验过程中实时采集划擦力。试验样件为商用高密度钨合金 (95W-3.5Ni-1.5Fe, 质量分数), 工件尺寸为 25 mm×5 mm×3 mm。在进行划擦试验前, 使用 3000#树脂基 CBN 砂轮对工件表面进行平整化加工。图 1b 为试验所用的标准维氏金刚石压头, 图 1c 为金刚石压头尖端形状。

图 1d 为单颗金刚石压头超声辅助划擦过程示意图。普通划擦试验与超声辅助划擦试验交替进行, 试验参数如表 1 所示, 划擦深度设置为 10、20、30 μm 。普通划擦试验过程中, 压头沿 X 方向以 150 mm/s 速度进给; 超声辅助划擦试验过程中, 在 Z 方向施加振幅为 2 μm 、频率为 27 kHz 的超声振动, 其他参数与普通划擦试验保持一致。

试验后的划擦样件使用超声波清洗机清洗干净, 表面形貌数据由扫描电镜 (SU5000, HITACHI, 日本) 获取, 划痕三维形貌数据由激光共聚焦显微镜 (OLS4000, OLYMPUS, 日本) 获取。

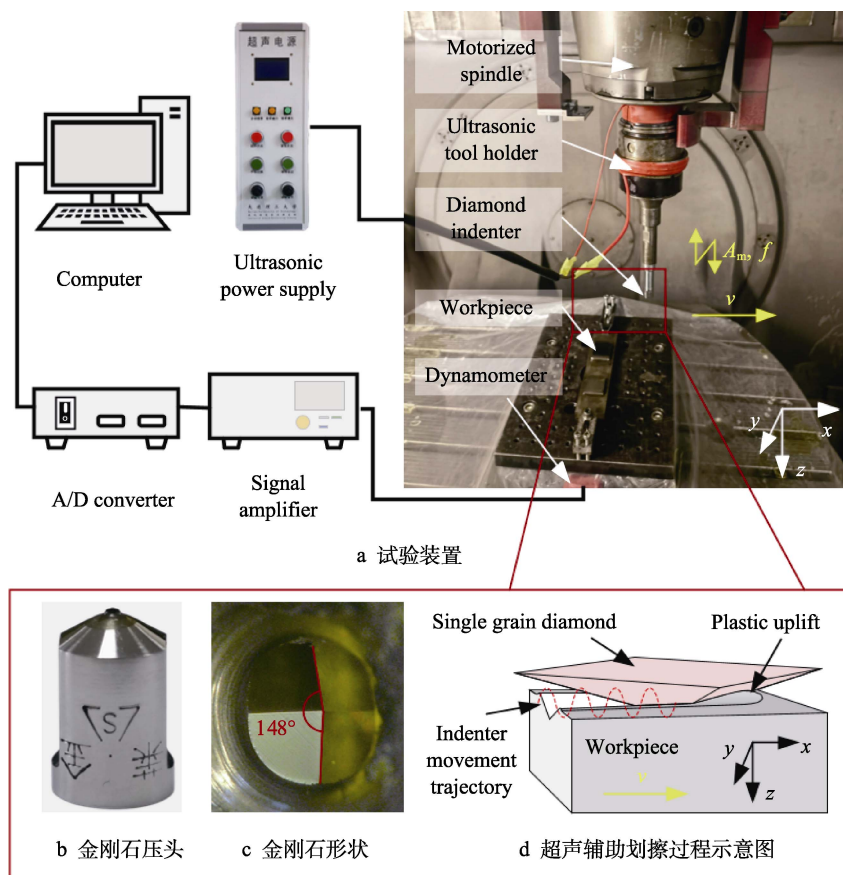


图 1 超声辅助划擦试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of UAS experiment system: a) experimental devices; b) diamond indenter; c) diamond shape; d) schematic diagram of UAS process

表 1 超声辅助划擦试验参数
Tab.1 Parameters of UAS experiment

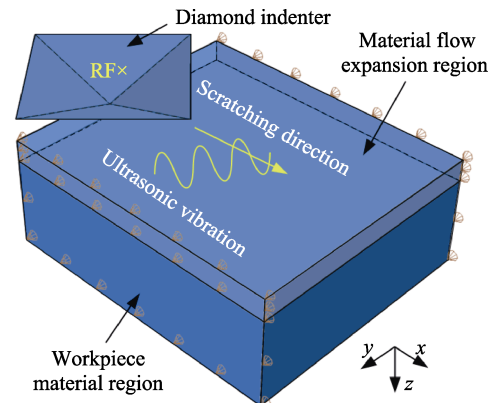
Parameters	Value
Speed $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	150
Depth $a_p/\mu\text{m}$	10, 20, 30
Frequency f/kHz	27
Amplitude $A_m/\mu\text{m}$	0, 2

2 划擦有限元仿真

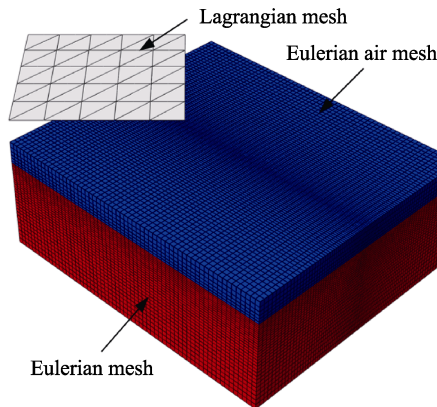
2.1 耦合欧拉-拉格朗日有限元模型

图 2a 为超声辅助划擦 CEL 有限元仿真模型示意图。金刚石压头和工件分别采用拉格朗日网格和欧拉网格，另外增加了材料流动拓展区域，不对其赋予材料属性，用于捕捉划擦过程中由塑性流动形成的材料隆起。仿真模型中的工件侧面以及底部被施加固定约束，金刚石压头施加刚体约束，仿真参数与试验一致。

有限元仿真模型中金刚石与工件之间采用通用接触，由库伦摩擦定律确定其相互作用关系，摩擦因数为 0.2^[22]。仿真过程中采用热-力耦合分析步，通过



a 模型示意图



b 模型网格划分

图 2 单颗金刚石划擦有限元仿真模型

Fig.2 FE simulation model of single diamond scratching:
a) schematic diagram of CEL model; b) FE mesh arrangement of this model

ABAQUS/Explicit 求解器实现。模型网格划分如图 2b 所示，工件材料采用 8 节点热力耦合线性欧拉单元 (EC3D8RT) 建模，并由减缩积分和沙漏控制。工件模型尺寸为 $560 \mu\text{m} \times 480 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ，其中欧拉材料区域高 $160 \mu\text{m}$ ，共 158 224 个网格单元；材料流动拓展区域高 $40 \mu\text{m}$ ，共 32 736 个网格单元；中间划擦区域进行网格细化，细化区域网格尺寸为 $3 \mu\text{m}$ ；金刚石压头模型高 $60 \mu\text{m}$ ，为标准维氏压头形状，共划分 94 个网格单元，采用 10 节点热力耦合二阶四面体单元 (C3D10MT) 建模，并由沙漏控制。

2.2 材料属性模型

使用 Johnson-Cook (J-C) 本构模型^[23]来模拟钨合金在划擦过程中的热力学行为，其形式简单、参数少、使用方便，在金属材料切削仿真中应用广泛。J-C 模型主要由应变强化、应变率强化及温度强化 3 部分组成，其表达式为：

$$\sigma = \left[A + B(\varepsilon^p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中： A 为材料初始屈服应力， B 为材料应变强化常数， C 为应变率敏感系数， n 为应变强化系数， m 为热软化系数， σ 为等效应力， ε^p 为等效塑性应变， $\dot{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_0^p$ 为参考塑性应变率， T 为当前材料温度， T_0 为室温， T_m 为材料熔点温度。

钨合金的 J-C 本构模型参数^[24]如表 2 所示。钨合金与金刚石压头的材料参数如表 3^[22]所示。

表 2 95W-3.5Ni-1.5Fe J-C 本构模型参数^[24]
Tab.2 Constitutive parameters of 95W-3.5Ni-1.5Fe^[24]

A/MPa	B/MPa	C	n	m	$\dot{\varepsilon}_0^p$	T_m	T_0
706	713	0.284	0.046	0.985	0.001	1 450	293

表 3 钨合金和金刚石材料属性
Tab.3 Physical properties of tungsten alloy and diamond

Property	95W-3.5Ni-1.5Fe ^[22]	Diamond ^[12]
Density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	17 500	3 520
Young's modulus/GPa	372	1 000
Poisson's ratio	0.28	0.07
Specific heat/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	134	516
Thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	60	1 256
Coefficient of thermal expansion/ K^{-1}	4.2×10^{-6}	

3 结果与讨论

3.1 划痕形貌分析

图 3 为不同划擦深度下钨合金划痕表面形貌。可以发现，普通划擦与超声辅助划擦的划痕两侧边缘均

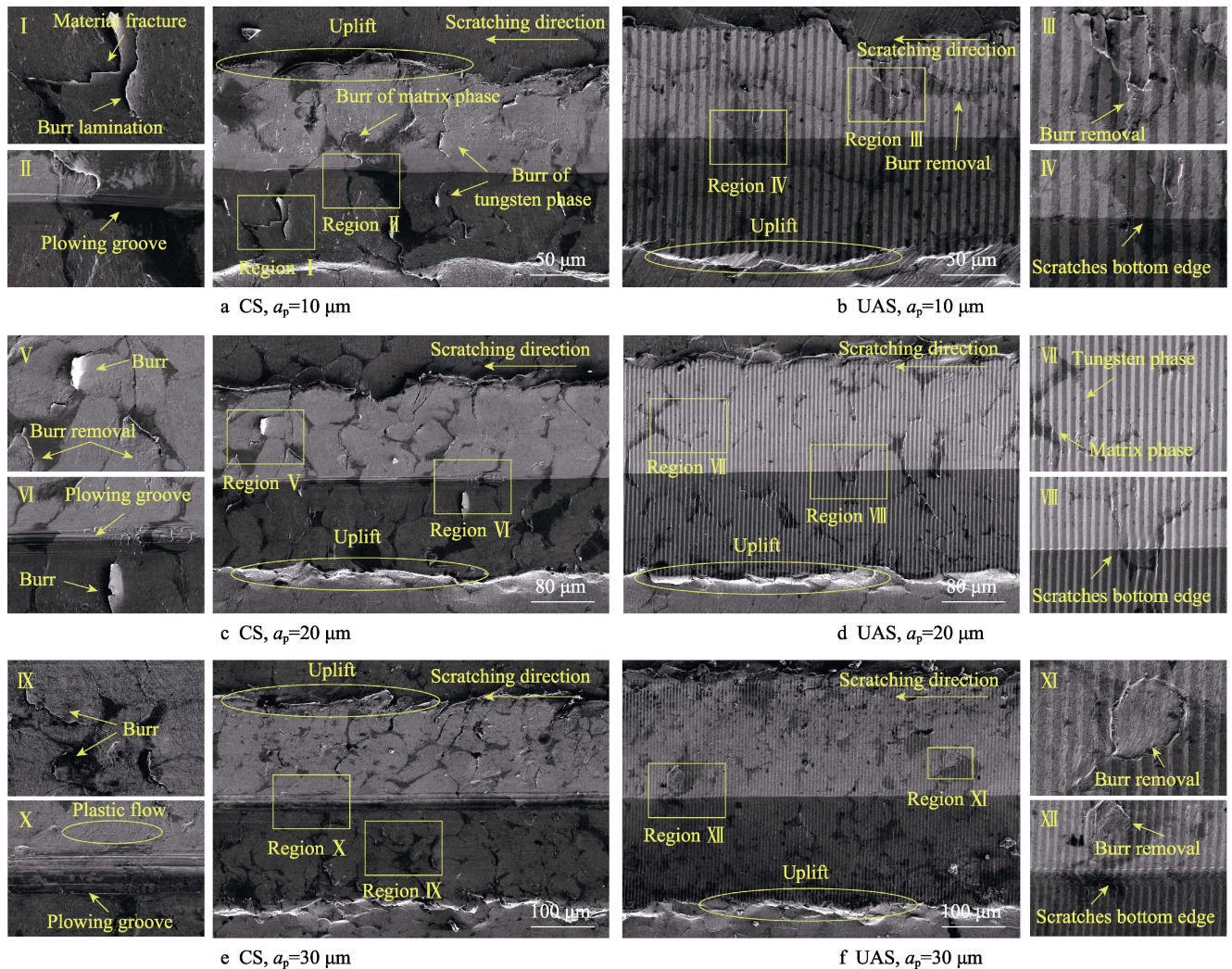


图 3 不同划擦深度下的划痕表面形貌
Fig.3 Surface morphology of scratches at different scratching depths

出现由耕犁作用而形成的隆起, 并且在划痕表面出现鳞刺现象; 相较于超声辅助划擦, 普通划擦划痕表面出现的鳞刺数量明显较多, 并且钨相与黏结相均出现鳞刺及边缘卷起现象; 超声辅助划擦划痕表面呈现出规律的锯齿状振动纹路, 在表面出现少量鳞刺现象, 划痕表面上钨相与黏结相交界线明显。从普通划擦表面区域 I 的鳞刺放大图 (图 3a) 可以发现, 相较于超声辅助划擦形成的鳞刺 (图 3b), 普通划擦所形成的鳞刺体积更大, 并且在鳞刺边缘出现材料断裂以及多个鳞刺层积在一起的现象; 而超声辅助划擦表面出现的鳞刺体积较小, 此外在划痕表面发现了鳞刺脱落现象。从超声辅助划擦表面区域 IV 放大图可以发现, 超声辅助划擦形成的划擦底部棱线清晰, 划痕侧壁交界线分明。相较于超声辅助划擦, 普通划擦所形成的划痕底部出现犁沟现象, 无法分辨出侧壁的交界线。随着划擦深度的增加, 普通划擦底部的犁沟现象更加严重, 而超声辅助划擦可以明显抑制犁沟现象以及表面鳞刺的形成。

由于超声振动作用, 普通划擦与超声辅助划擦形

成划痕表现出不同的形貌特征。划擦试验所使用的压头切削负前角较大, 普通划擦过程中材料受到严重的挤压变形, 且压头与材料之间强烈摩擦, 使得划擦区域产生大量热量, 温度迅速升高。此时, 切屑受到压头挤压并处于较高的温度下, 在压头表面发生了黏屑现象并形成积屑瘤。随着划擦时间的增加, 停留在压头上的切屑会继续黏附新的聚集层, 层积到一定高度后便被积屑瘤切顶, 一部分随切屑排出, 另一部分黏结在划痕表面从而形成鳞刺^[25-26]。如此往复, 在划痕表面不断形成鳞刺。在普通划擦过程中, 切屑容易黏附在压头前端形成积屑瘤代替压头进行划擦, 从而在划痕底部形成犁沟。超声辅助划擦过程中, 切屑在压头的冲击作用下更容易超过材料断裂强度, 使其以碎屑形式排出, 从而使生成的热量大部分以切屑的形式带走; 振动过程中, 压头与材料断续接触, 使划擦区域产生的热量与空气及基体材料换热更充分, 从而使超声划擦区域温度低于普通划擦, 材料热软化效应减弱。因此超声辅助划擦过程中压头表面不易黏附切屑, 划擦表面出现的鳞刺较少, 鳞刺在超声振动作用

下易超过材料断裂强度以碎屑形式排出。此外,超声划痕底部清晰的棱线可以表明压头前端未出现明显的积屑现象。以上结果进一步说明,超声振动作用可以减小压头上的切屑黏附现象。

3.2 划痕轮廓分析

图4为不同划擦深度下的划痕轮廓。可以发现,在表面出现由压头划擦所形成的“V”字型划痕,并且在划痕两侧边缘出现连续的隆起现象,表明在划擦过程中材料受到压头挤压产生塑性流动;相较于普通划擦,超声辅助划擦所形成的划痕表面呈现出锯齿状的振动纹路。图5为划痕(图4)的截面轮廓。可以发现,超声辅助划擦形成的划痕深度、宽度以及隆起高度相较于普通划擦均有所增大。划擦深度为10 μm时,普通划擦形成的划痕深度、宽度和两侧隆起高度分别为9.8、100、4.9 μm,而超声辅助划擦形成的划痕深度、宽度和两侧隆起高度分别为11.2、139、7.1 μm,分别增加14.1%、39%和45.2%。以上结果表明,超声辅助划擦过程中有更多的材料被去除,说明在相同的划擦参数下,超声辅助划擦可以提高材料的去除率。

由图5数据可知,相较于普通划擦,超声辅助划擦在相同的划擦参数下可以增大划痕深度与宽度,这与划擦过程中压头与材料间相互作用形成的划痕轮廓有关。图6为压头超声振动过程示意图,红线为压头的余弦运动轨迹,Δh为超声振动所形成的锯齿状

形貌齿峰相较于普通划擦形成的表面所增加的深度,Δh的大小与超声振动频率 f 、振幅 A_m 以及划擦速度 v 有关。取图中AD两点间的一个超声振动周期内的压头振动过程进行分析。压头从余弦曲线的A点运动到其前棱与余弦运动轨迹曲线相切(B点)时,压头与材料间不再相互作用,继续向上运动两者分离;同理,压头运动到C点时,压头后棱与材料不再相互作用。一个振动周期内,压头的前棱与后棱在超声振动作用下先后对材料进行挤压,使材料表面形成锯齿状形貌。

AD一个振动周期内压头运动曲线方程为:

$$z = A_m \cos\left(\frac{2\pi f}{v} x\right) \quad (2)$$

标准维氏压头前棱与后棱之间的夹角 $\theta = 148^\circ$,当压头运动到B点时,前棱斜率与运动曲线B点斜率相等。由式(3)计算可得,压头由A点运动到B点的X方向的距离 $x_{AB} = 0.11 \mu\text{m}$,则由B点运动到振动周期中点之间的X方向的距离 $L = 2.65 \mu\text{m}$,计算式见式(4)。

$$-\frac{2\pi f}{v} A_m \sin\left(\frac{2\pi f}{v} x_{AB}\right) = -\tan\left(\frac{180-\theta}{2}\right) \quad (3)$$

$$L = \frac{v}{2f} - x_{AB} \quad (4)$$

故在 $v = 150 \text{ mm/s}$ 、 $f = 27 \text{ kHz}$ 、 $A_m = 2 \mu\text{m}$ 参数下,超声辅助划擦所形成的锯齿状形貌峰点相较于普通划擦所形成的划痕深度增加 $\Delta h = 1.22 \mu\text{m}$,计算式见式(5)。

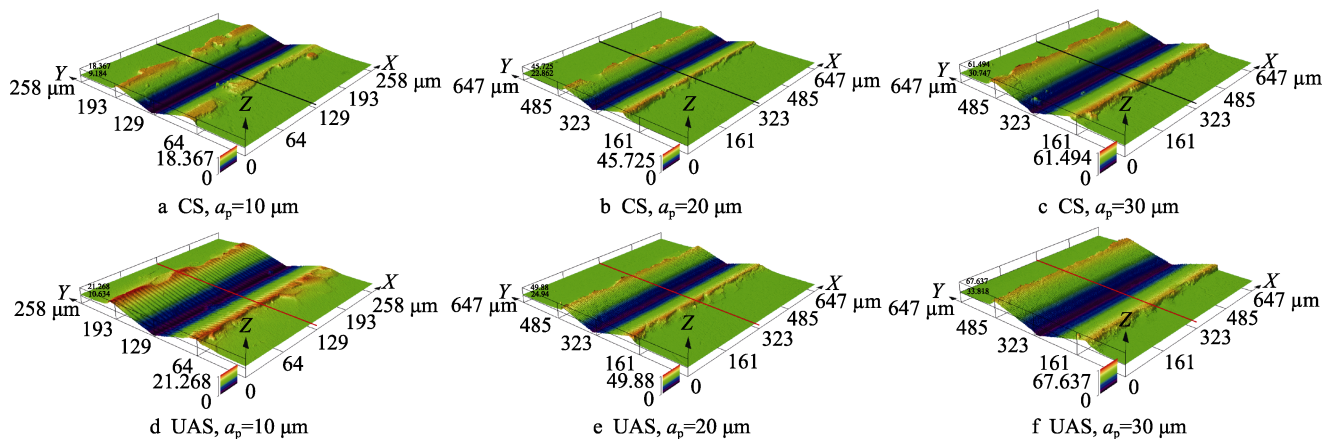


图4 不同划擦深度下的划痕轮廓

Fig.4 Profile of scratches at different scratching depths

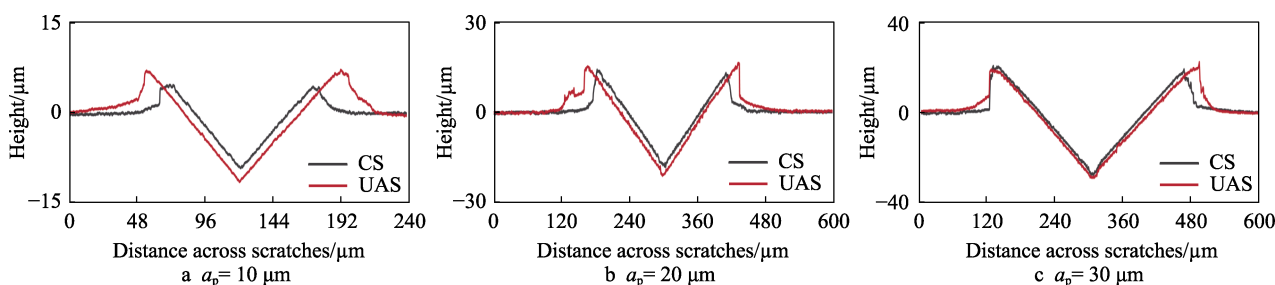


图5 图4中划痕截面轮廓

Fig.5 Cross-sectional profile of the scratches in Fig.4

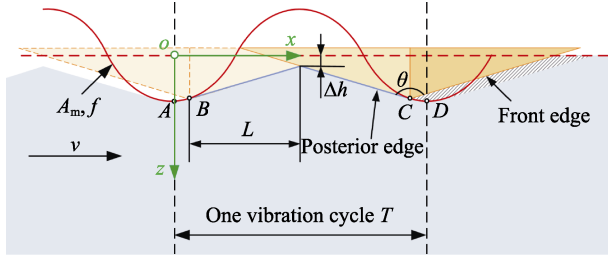


图 6 压头超声振动过程示意图
Fig.6 Schematic diagram of ultrasonic vibration process of indenter

$$\Delta h = A_m \cos\left(\frac{2\pi f}{v} x_{AB}\right) - L \tan\left(\frac{180-\theta}{2}\right) \quad (5)$$

在划擦深度为 10 μm 时, 超声辅助划擦形成的划痕平均深度相较于普通划擦增加 1.4 μm, 与计算结果相符合。在相同的划擦速度和超声振幅参数下, 计算可得, 当超声频率大于 10.3 kHz 时, 超声辅助划擦所形成的锯齿状形貌齿峰处的深度低于普通划擦; 当超声频率低于 10.3 kHz 时, 超声辅助划擦形成的形貌齿峰处的深度高于普通划擦。

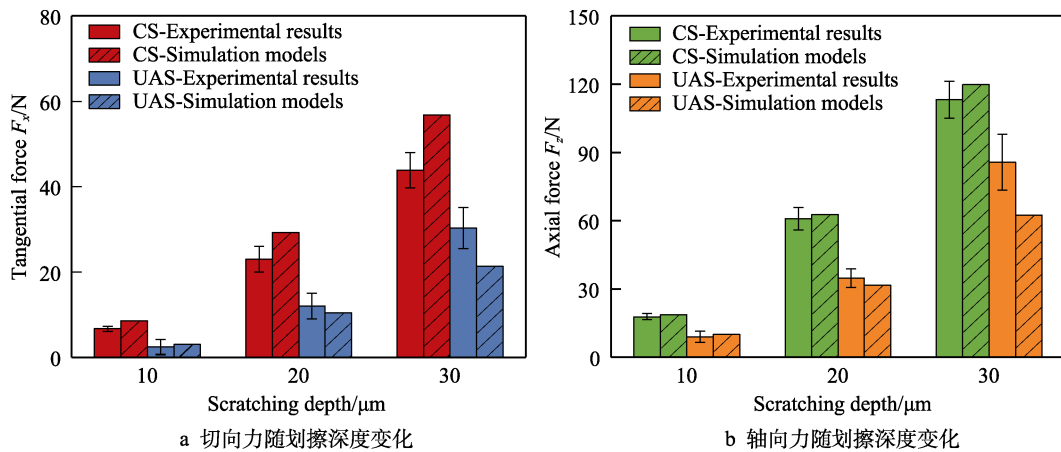


图 7 划擦力随划擦深度的变化

Fig.7 Change of scratching force with scratching depth: a) tangential force; b) axial force

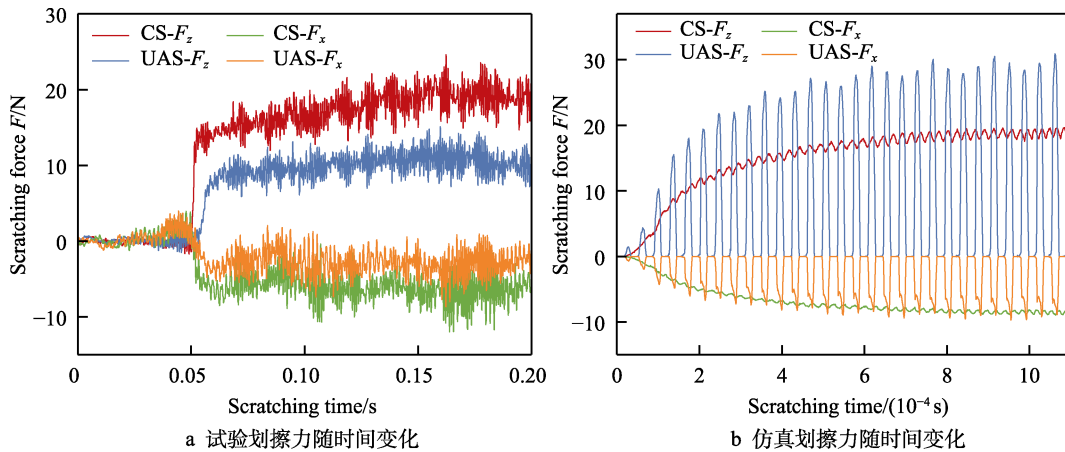


图 8 划擦力随时间的变化 ($a_p = 10 \mu\text{m}$)

Fig.8 Scratching force with time ($a_p = 10 \mu\text{m}$): a) experiment; b) FE simulation model

3.3 划擦力分析

试验与仿真过程中的划擦力随划擦深度的变化如图 7 所示。可以发现, 随着划擦深度的增加, 试验与有限元仿真过程中的切向力和轴向力均增大, 仿真划擦力随深度的变化趋势与试验结果一致, 仿真划擦力对比试验值的平均误差为 18.1%, 表明所建立的 CEL 有限元仿真模型具有有效性。此外, 可以发现超声辅助划擦过程中的划擦力相较于普通划擦显著降低, 划擦深度为 10 μm 时, 普通划擦过程中的切向力和轴向力分别为 6.7 N 和 17.8 N, 而超声辅助划擦过程中的切向力和轴向力分别为 2.4 N 和 9.1 N, 分别减小 63.8% 和 49.3%; 划擦深度为 20、30 μm 时, 超声划擦力同样出现显著降低, 平均降幅为 43.2%。

图 8 为典型参数下试验与仿真过程中划擦力随时间的变化 ($a_p = 10 \mu\text{m}$)。图 8a 为划擦试验过程中划擦力随时间的变化, 可以明显看出超声辅助划擦力始终低于普通划擦。由于测力仪的物理采样频率低于超声振动频率, 因此通过有限元仿真模型获得的划擦力结果来研究超声振动过程中力的瞬时变化。图 8b

为通过仿真模型获得的划擦力随时间的变化,可以发现划擦力呈现出周期性的变化特征,这是由于压头与工件断续接触,在压头与工件分离后,划擦力基本为零。此外,还可以发现超声辅助划擦过程中,压头对材料表面产生了冲击作用,使冲击瞬间的划擦力大于普通划擦;在其余时间,压头与工件分离,划擦力基本为零,最终使超声划擦平均力小于普通划擦过程。

3.4 划擦温度、应变和应变率

有限元仿真可以获得试验中难以测量的物理场数据。为明确划擦过程中材料温度、应变及应变率等状态变化,提取典型参数($a_p = 10 \mu\text{m}$)下的普通划擦与超声辅助划擦仿真过程中温度场(TEMP)、塑性应变场(PEEQ)以及塑性应变率场(PEEQR)等数据进行分析。

超声辅助划擦过程中压头做周期性振动,不同运动状态的压头对工件的作用结果不同,因此选取压头处于正弦运动轨迹的5个特征时刻,如图9所示。5个特征时刻的压头运动状态分别为:①正弦运动中点处且压头继续向上运动;②正弦运动波峰处;③正弦运动中点处且压头继续向下运动;④正弦运动波谷处;⑤下个振动周期的开始处,压头运动状态同①。

图10为普通划擦与超声辅助划擦仿真过程中的

温度场分布云图。可以发现,普通划擦过程中温度峰值为 326.0°C ,在划擦区域以及材料前端隆起处的温度较高,这是由于在划擦过程中材料受到压头的挤压作用而向前端及两侧流动,产生严重塑性变形的同时生成大量热量,且材料与压头表面摩擦也使得接触面温度升高。超声辅助划擦过程中的5个时刻的峰值温度分别为 253.0 、 192.4 、 331.2 、 367.1 、 231.9°C ,不同时刻的峰值温度有较大变化,且温度影响区域相较于普通划擦有所增大。①到②过程中,压头向上抬起与材料分离,热量向材料内部与空气传递,并且切屑排出会带走大量的热量,使得②点温度最低。②到④过程中,压头向下运动与材料接触,在超声冲击作用下,材料瞬时发生严重变形,短时间内在表面产生大量热量,且压头与材料的接触面积增大使得摩擦产生的热量增多,使得③到④过程中峰值温度高于普通划擦。④到⑤过程中,压头与材料逐渐分离,热量得以传递与交换,温度逐渐降低。超声辅助划擦过程中仅③到④过程中峰值温度相较于普通划擦升高13%,其他过程温度均低于普通划擦,且最大降低50%。

图11为普通划擦与超声辅助划擦仿真过程中等效塑性应变率场分布云图。可以发现,普通划擦过程中材料塑性应变率的峰值为 $2.57 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$,由于划擦区域材料受到压头的挤压使接触面及前端隆起处的应变率较高。超声辅助划擦过程中塑性应变率分别为

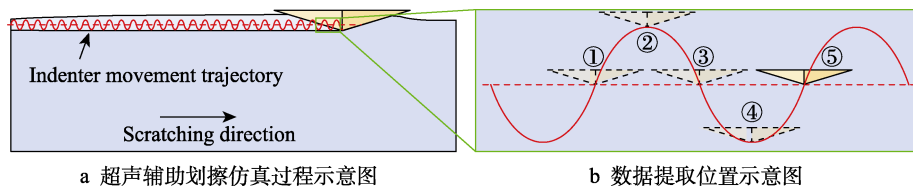


图9 超声辅助划擦过程中数据提取时刻示意图

Fig.9 Schematic diagram of data extraction moment for UAS process

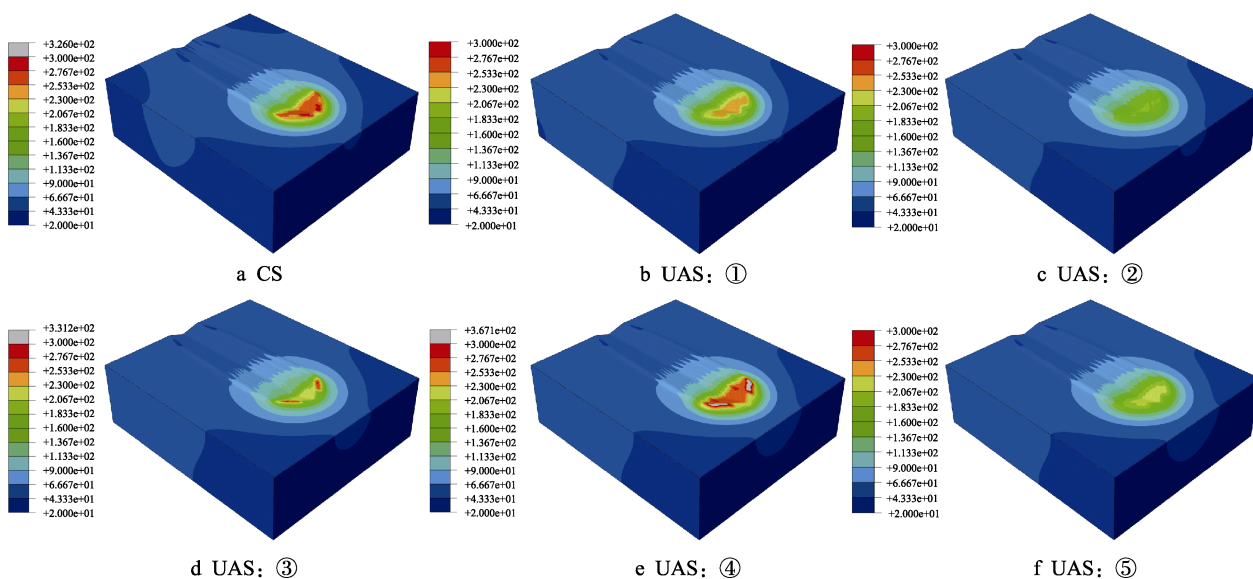


图10 普通划擦与超声辅助划擦温度场分布对比

Fig.10 Comparison of temperature field distribution between CS and UAS

6.312×10^3 、 4.475×10^3 、 5.575×10^5 、 5.817×10^6 、 $1.834 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, 在划擦区域及材料前端隆起处应变率较高。在③到④过程(图 10d~e)中, 塑性应变率大于普通划擦, 增大 1 个数量级, 这是由于压头在超声作用下冲击材料, 使其在短时间内发生严重塑性变形; 其他阶段压头与材料分离, 超声辅助划擦的塑性应变率相较于普通划擦减小 2 个数量级。

图 12 为普通划擦与超声辅助划擦仿真过程中等效塑性应变场分布云图。可以发现, 普通划擦过程中等效塑性应变峰值为 6.541, 在材料两侧隆起、划痕侧壁和底部有较严重的塑性应变。这是由于在划擦过

程中材料受到压头的挤压与剪切作用, 一部分材料发生塑性流动形成隆起, 一部分材料被挤压拉长黏附在侧壁与底部。超声辅助划擦过程中等效塑性应变峰值分别为 5.240、5.240、5.241、5.316、5.351, 可见超声辅助划擦过程中材料塑性应变均小于普通划擦过程, 最高降低 20%。在超声辅助划擦的划痕底部出现不连续的塑性变形较大区域, 这是由于在超声振动作用下, 材料受到压头的冲击作用, 底部材料受到挤压发生较大的塑性变形; 冲击过程中材料塑性应变率较大, 更容易发生断裂失效, 使得划痕表面材料发生的塑性应变较小。

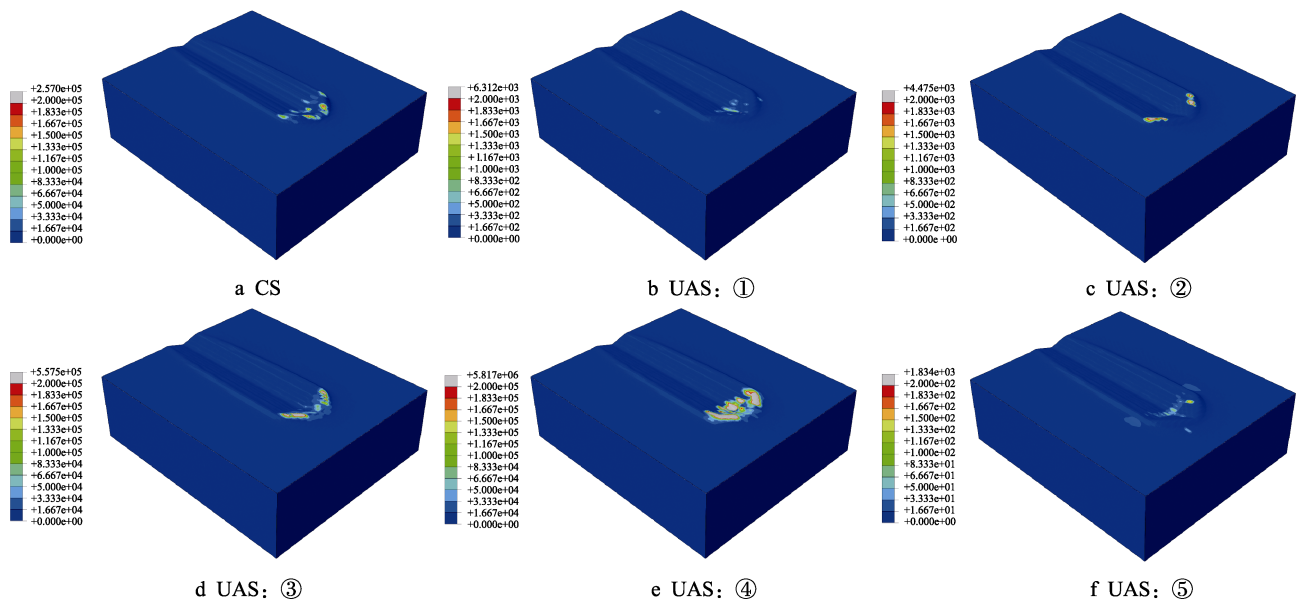


图 11 普通划擦与超声辅助划擦等效塑性应变率场分布对比

Fig.11 Comparison of the equivalent plastic strain rate field distribution between CS and UAS

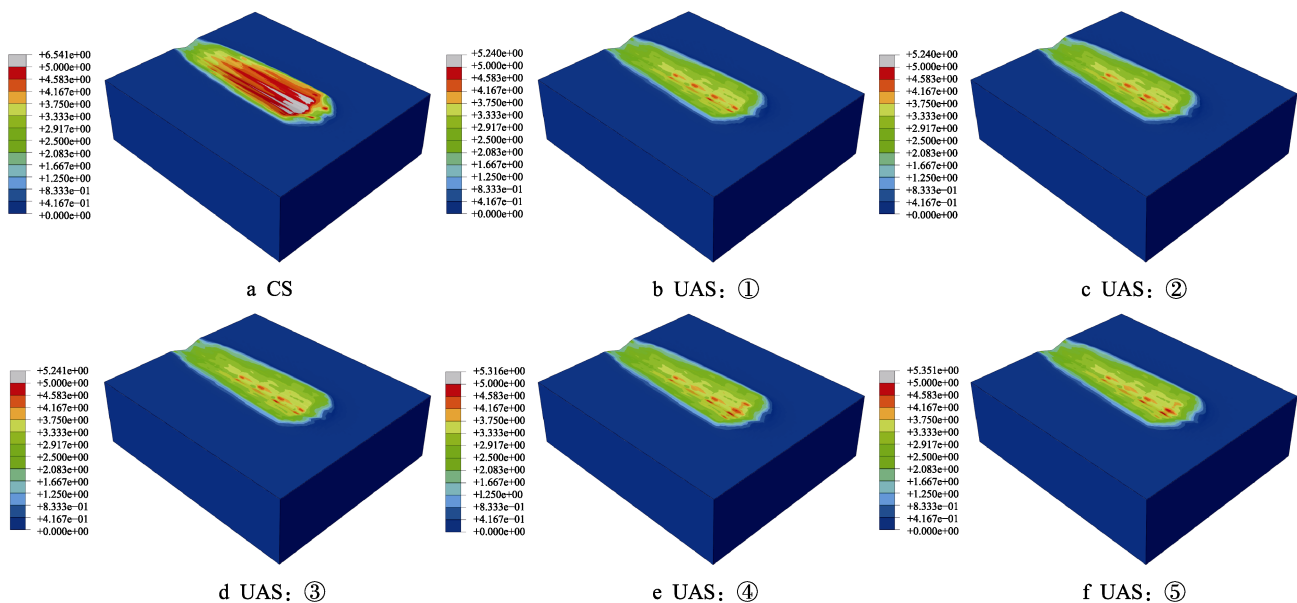


图 12 普通划擦与超声辅助划擦等效塑性应变场分布对比

Fig.12 Comparison of equivalent plastic strain field distribution between CS and UAS

4 结论

1) 超声振动作用可以减少压头切屑黏附, 抑制鳞刺生成。普通划擦过程中压头容易黏附切屑, 在划擦表面形成鳞刺并在划痕底部出现犁沟现象; 压头在超声作用下不易黏附碎屑, 所形成的划痕表面出现的鳞刺更少, 划痕底部棱线更加清晰。

2) 超声振动作用可以提高材料去除率。试验结果表明, 相较于普通划擦, 超声辅助划擦所形成的划痕宽度增加 39%, 深度增加 14.1%, 所去除的材料体积更大。存在划痕深度增加的临界超声频率, 当超声频率高于 10.3 kHz 时, 可以增加划擦深度。本文超声频率为 27 kHz, 超声辅助划擦相较于普通划擦形成的划痕深度至少增大 1.22 μm 。

3) 超声振动作用可以有效降低划擦过程中的平均划擦力。随着划擦深度增加, 试验与仿真的切向力和轴向力均线性增大, 且仿真划擦力与试验值平均误差为 18.1%, 表明建立的超声辅助划擦 CEL 有限元仿真模型具有有效性。超声试验划擦力相较于普通划擦力降低了 43.2%, 仿真划擦力表明压头与材料之间“短接触长分离”的特征, 使划擦力呈周期性变化, 可以减小划擦平均力。

4) 超声作用可以降低划擦区域温度。超声辅助划擦过程中温度与压头的运动状态有关, 仅在压头冲击过程中温度高于普通划擦, 增加 13%, 在其他阶段温度均小于普通划擦过程, 最大降低 50%。超声辅助划擦的温度影响区域更大, 表明振动过程会有更多的热量向材料基体传递。

5) 相较于普通划擦, 超声辅助划擦形成的划痕表面材料产生的塑性应变小, 最高降低 20%。超声冲击过程中材料的塑性应变率相较于普通划擦提高 1 个数量级, 更容易使材料超过断裂强度而被去除; 分离过程的塑性应变率最大降低 2 个数量级。

参考文献:

- [1] DAS J, APPA RAO G, PABI S K. Microstructure and Mechanical Properties of Tungsten Heavy Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(29/30): 7841-7847.
- [2] GERMAN R M. Sintered Tungsten Heavy Alloys: Review of Microstructure, Strength, Densification, and Distortion[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 108: 105940.
- [3] LUO R M, HUANG D W, YANG M C, et al. Penetrating Performance and “Self-Sharpening” Behavior of Fine-Grained Tungsten Heavy Alloy Rod Penetrators[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 675: 262-270.
- [4] 康仁科, 宋鑫, 董志刚, 等. 钨合金超声椭圆振动切削表面完整性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 321-328.
- [5] KANG R K, SONG X, DONG Z G, et al. Study on Surface Integrity of Tungsten Alloy Processed by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting[J]. Surface Technology, 2021, 50(11): 321-328.
- [6] LAI X W, WANG Z J, QIN N. Comparative Studies of the Constitutive Models for Tungsten Heavy Alloy (95W-3.5Ni-1.5Fe) at High Strain Rates[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(7): 3636-3650.
- [7] TANG J J, LIANG Z F, ZHANG Y W. A Two-Phase Constitutive Model with Damage for Tungsten Heavy Alloy[J]. The International Journal of Multiphysics, 2021, 15(2): 211-234.
- [8] 许良, 王林, 陈泓谕, 等. 钨及其合金超精密抛光研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 24-36.
- [9] XU L, WANG L, CHEN H Y, et al. Research Progress in Ultra-Precision Polishing of Tungsten and Its Alloys[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 24-36.
- [10] 陈泓谕, 袁巨龙, 吕冰海, 等. 核聚变堆用钨表面超精密抛光的研究现状与趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 11-21.
- [11] CHEN H Y, YUAN J L, LYU B H, et al. Research Status and Trend of Ultra-Precision Polishing on Tungsten Surface for Fusion Reactors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21): 11-21.
- [12] 唐贤炬. 碳化钨光学模具的超声研磨装置的研发及其加工特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [13] TANG X J. Developing of Ultrasonic Abrasive Device for WC Optical Mold and Processing Properties Study[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [14] 陈冰, 李顺顺, 刘国跃, 等. 钨合金的磨削加工去除机理研究[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 304-318.
- [15] CHEN B, LI S S, LIU G Y, et al. Research on the Removal Mechanism of Grinding Tungsten Alloy[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 304-318.
- [16] 徐露. 钨合金旋转超声磨削中金刚石工具磨损机理[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [17] XU L. Wear Mechanism of Diamond Tool in Rotary Ultrasonic Grinding of Tungsten Alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [18] 曾益. 钨合金微观力学行为与去除机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [19] ZENG Y. Micromechanical Behavior and Removal Mechanism of Tungsten Alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [20] 丁文锋, 曹洋, 赵彪, 等. 超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的现状与展望[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 244-269.
- [21] DING W F, CAO Y, ZHAO B, et al. Research Status and Future Prospects of Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding Technology and Equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 244-269.

- [14] 袁松梅, 邵梦博, 李麒麟, 等. 碳化钛颗粒增强钢基复合材料超声振动辅助划痕仿真及试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 246-257.
- YUAN S M, SHAO M B, LI Q L, et al. An Simulation and Experimental Study on Ultrasonic Vibration-Assisted Scratching of Titanium Carbide Particle-Reinforced Steel Matrix Composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 246-257.
- [15] NIK M G, MOVAHHEDI M R, AKBARI J. Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 353-358.
- [16] WEN J, TANG J, ZHOU W. Study on Formation Mechanism and Regularity of Residual Stress in Ultrasonic Vibration Grinding of High Strength Alloy Steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 608-622.
- [17] LIU J L, LIU Z P, YAN Y Y, et al. Study on the CBN Wheel Wear Mechanism of Longitudinal-Torsional Ultrasonic-Assisted Grinding Applied to TC4 Titanium Alloy[J]. Micromachines, 2022, 13(9): 1480.
- [18] SUN Z T, SHUANG F, MA W. Investigations of Vibration Cutting Mechanisms of Ti6Al4V Alloy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 510-530.
- [19] 庄可佳, 高金强, 翁剑, 等. 钛合金切削中切屑形态与残余应力的仿真与试验研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3): 1-10.
- ZHUANG K J, GAO J Q, WENG J, et al. Simulation and Experimental Research on Chip Morphology and Residual Stress in Titanium Alloy Cutting[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(3): 1-10.
- [20] ZHENG F F, KANG R K, DONG Z G, et al. A Theoretical and Experimental Investigation on Ultrasonic Assisted Grinding from the Single-Grain Aspect[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 667-675.
- [21] ZHENG W, WANG Y J, ZHOU M, et al. Material Deformation and Removal Mechanism of SiCp/Al Composites in Ultrasonic Vibration Assisted Scratch Test[J]. Ceramics International, 2018, 44(13): 15133-15144.
- [22] SAGAR C K, PRIYADARSHINI A, GUPTA A K, et al. Determination of Johnson Cook Material Model Constants and Their Influence on Machining Simulations of Tungsten Heavy Alloy[C]//Proceedings of ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Pittsburgh: [s. n.], 2019.
- [23] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [24] YANG Z Q, WANG Z J, QIN N. Experimental and Numerical Investigation of Model I Dynamic Fracture Toughness of 95W-3.5Ni-1.5Fe Alloy Using the Semi-Circular Bend Specimens[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 258: 108053.
- [25] 周泽华. 犁沟、鳞刺、积屑瘤及它们之间的关系[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1989, 17(2): 1-12.
- ZHOU Z H. Plowing-Groove, Scale, Built-up Edge and Their Relationship[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 1989, 17(2): 1-12.
- [26] 李俊涛. 浅析金属切削加工中鳞刺的形成原因及抑制措施[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(2): 152-153.
- LI J T. Analysis on Causes and Suppression Measures to Burr in Metal Cutting Process[J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28(2): 152-153.

(上接第 122 页)

- [29] SALHI A, TIGHADOUINI S, EL-MASSAOUDI M, et al. Keto-Enol Heterocycles as New Compounds of Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in 1 M HCL: Weight Loss, Electrochemical and Quantum Chemical Investigation[J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 248: 340-349.
- [30] GUI J, DEVINE T M. The Influence of Sulfate Ions on the Surface Enhanced Raman Spectra of Passive Films Formed on Iron[J]. Corrosion Science, 1994, 36(3): 441-462.
- [31] ARJUNAN V, SAKILADEVI S, RANI T, et al. FTIR, FT-Raman, FT-NMR, UV-Visible and Quantum Chemical Investigations of 2-Amino-4-Methylbenzothiazole[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2012, 88: 220-231.
- [32] QIANG Y J, ZHANG S T, GUO L, et al. Experimental and Theoretical Studies of Four Allyl Imidazolium-Based Ionic Liquids as Green Inhibitors for Copper Corrosion in Sulfuric Acid[J]. Corrosion Science, 2017, 119: 68-78.
- [33] KOVAČEVIĆ N, KOKALJ A. Analysis of Molecular Electronic Structure of Imidazole and Benzimidazole-Based Inhibitors: A Simple Recipe for Qualitative Estimation of Chemical Hardness[J]. Corrosion Science, 2011, 53(3): 909-921.
- [34] SINGH P, SRIVASTAVA V, QURAISHI M A. Novel Quinoline Derivatives as Green Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Acidic Medium: Electrochemical, SEM, AFM, and XPS Studies[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 216: 164-173.