

【工程与技术】

# 微织构刀具切削航空用铝合金性能研究

刘绪超<sup>1</sup>, 刘 凤<sup>1</sup>, 姜芙林<sup>2</sup>, 杨发展<sup>2</sup>

(1. 潍坊职业学院 机电工程学院, 山东 潍坊 262737;  
2. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘 要:**针对 7075 铝合金切削过程中车刀表面摩擦磨损严重的问题, 利用脉冲激光在硬质合金(WC-Co, YG8)刀具的表面加工不同深径比的凹坑微织构, 并对激光加工微织构形貌及后续刀具切削铝合金性能等进行研究。在表面微织构加工中, 通过改变圆形微织构的直径和深度, 探索微织构在刀具表面存在的作用。通过切削实验对微织构刀具与传统刀具的切削力和工件表面加工质量进行对比发现, 微织构的介入对降低切削力、提高加工表面质量具有显著效果。在刀具表面微织构面积占有率为 15%, 织构与切削刃尺寸间距为 150  $\mu\text{m}$ , 阶梯状微织构刀具直径为 65  $\mu\text{m}$ 、深度为 15  $\mu\text{m}$  和直径为 30  $\mu\text{m}$ 、深度为 7  $\mu\text{m}$  组合时, 主切削力降低 11.2%, 工件表面质量提升 35.2%。

**关键词:**阶梯状微织构; 硬质合金刀具; 7075 铝合金; 激光加工; 切削力; 表面质量

**中图分类号:** TG 703 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2025.06.007

## 0 引言

7 系铝合金具有耐腐蚀性好、韧性高、加工后不易变形及抗氧化等优势, 在航天航空、燃气轮机等装备上的应用越来越广泛。但由于材料自身的特性, 导致其加工过程中切削温度高, 刀具寿命低, 加工表面质量差等问题, 严重影响了其推广和使用<sup>[1-4]</sup>。近年来, 国内外学者研究表明, 微织构具有减摩降磨效果, 将微织构应用在刀具上能够改善刀具的应力分布, 提升切削性能, 延长刀具使用寿命<sup>[5-7]</sup>。

Niketh 等进行了凹坑微织构刀具切削性能研究, 结果表明, 凹坑微织构能够减小刀-屑接触面积, 储存磨屑, 同时还能够起到微润滑的作用, 提高刀具的切削性能<sup>[8]</sup>。Kümmel 等通过激光加工的方法在硬质合金刀具前刀面上制备了凹坑微织构, 并进行干车削试验, 结果表明, 凹坑微织构有效地降低了刀具的磨损<sup>[9]</sup>。刘绪超等研究了微织构刀具对铝合金切屑的影响, 结果表明, 微织构刀具加工铝合金时, 刀-屑间摩擦应力下降明显, 锯齿状切屑和锯齿角度降幅显著<sup>[10]</sup>。鹿重阳等在硬质合金表面制备了三角沟槽织构, 并分析其减摩性能, 结果表明, 三角沟槽织构的面积占有率为 9.5% 时, 其表面的减摩抗磨效果最好<sup>[11]</sup>。Kawasegi 等分析了微织构刀具切削铝合金的试验结果, 微织构刀具的表面沟槽能够减小刀-屑实际接触面积, 进而达到降低切削力的目的<sup>[12]</sup>。何利华等采用激光加工方法, 分别制备沟槽微织构刀具与 V 型阵列微织构刀具, 研究了不同微织构对铣刀的负载和加工稳定性以及加工质量的影响, 发现 V 型阵列铣刀加

收稿日期: 2025-03-28

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME081); 潍坊市科学技术发展计划项目(2023GX039)

第一作者简介: 刘绪超(1992—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 硕士, 主要从事刀具表面织构的微细加工技术与切削机理研究。E-mail: liuxuchao\_1111@163.com

工的工件具有最佳的表面质量<sup>[13]</sup>。综上所述,刀具表面设计并制备微织构可起到减磨降磨效果,同时能够降低刀-屑间的摩擦因数和接触面积,提升切削性能。当前关于微织构的研究主要集中于单一类型与尺寸,未见探究同一类型不同深度和直径叠加的微织构对切削性能的影响。因此本文引入阶梯状微织构的概念,用不同尺寸的凹坑状微织构刀具切削铝合金材料,进行对比试验,分析阶梯状微织构对切削力数值和材料表面加工质量的影响。

## 1 微织构的制备

### 1.1 试验材料

硬质合金(WC-Co, YG8)刀具主要成分是硬质相碳化钨(WC)和黏结剂钴(Co),具有良好的耐磨性、使用强度和冲击韧性。试验材料选用 7075-T6 铝合金。7075 铝合金的 Cu、Mg、Zn 含量分别为 1.2%~2.0%、2.1%~2.9%、5.1%~6.1%,密度为  $2.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,硬度为 150 HBW,抗拉强度为 524 MPa。

### 1.2 加工磨损区域

切削试验采用添加润滑液连续切削,刀具几何参数如下:前角为  $10^\circ$ ,后角为  $5^\circ$ ,刃倾角为  $0^\circ$ ,主偏角为  $45^\circ$ 。加工参数如下:进给量为  $0.1 \text{ mm/r}$ ,切削深度为  $0.2 \text{ mm}$ ,车削时间为 15 min。该切削条件下刀具磨损状况见图 1,前刀面  $A_1$  和主后刀面  $B_1$  磨损较严重,主后刀面  $D$  点与副后刀面  $E$  点出现严重粘刀现象。

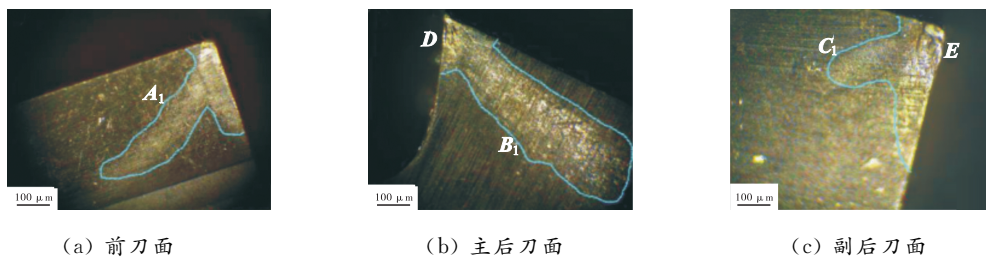


图 1 刀具磨损图

### 1.3 激光加工微织构工艺优化

不同激光加工工艺对微织构形貌影响较大,微织构表面的裂纹数量和尺寸,凹坑数量和碗口热影响区面积大小等对刀-屑间的摩擦和润滑均有影响<sup>[14]</sup>。其中,碗口热影响区是指在激光加工时,能量以高斯变化趋势,从中间向周围逐渐衰减,会使所加工盲孔或微孔上端口处呈现一定锥度的碗口状。碗口锥度是斜面与工件水平面的夹角,锥度角越大,越有利于储存切削液,刀具前刀面更容易形成润滑油膜。为获得最优的微织构表面形貌,本文首先利用激光为硬质合金片做  $300^\circ\text{C}$  预热处理,空气冷却至室温;然后采用频率为 20 Hz、脉冲数为 20 个、功率为 90 W、光斑直径为  $50 \mu\text{m}$  的激光进行加工,并以频率为 20 KHz、振幅为  $67 \mu\text{m}$  的四档超声振动辅助加工,传统工艺(采用频率为 20 Hz、脉冲数为 20 个、功率为 90 W、光斑直径为  $50 \mu\text{m}$  的激光,直接制备微织构)与优化工艺加工形貌对比见图 2。

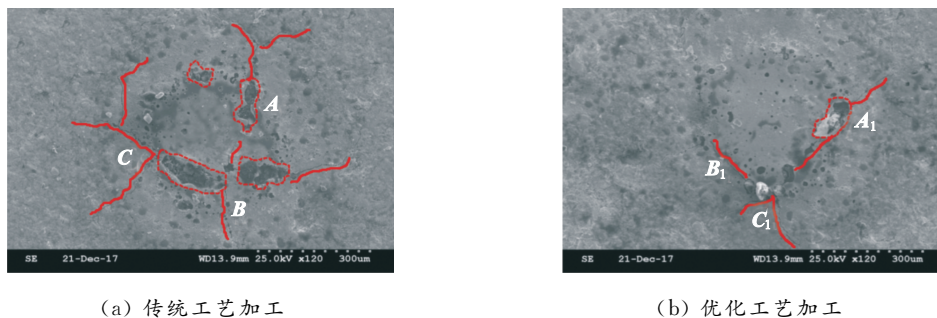


图 2 不同工艺加工形貌对比图

主要凹坑由 4 个[图 2(a)中 A]减少为 1 个[图 2(b)A<sub>1</sub>],凹坑数量降幅为 75%;微裂纹由 8 条[图 2

(a)中  $B$ ]降低为 5 条[图 2(b)中  $B_1$ ],微裂纹数量降幅为 37.5%;树杈形裂纹由 3 个[图 2(a)中  $C$ ]减少为 1 个[图 2(b)中  $C_1$ ],降幅为 66.7%;织构形貌明显改善。

## 2 阶梯状微织构刀具切削性能试验

### 2.1 阶梯状微织构刀具制备

采用上述激光加工工艺方案,在图 1 刀具主要磨损区依次制备面积占有率为 15%,织构与切削刃尺寸间距为  $150\ \mu\text{m}$ ,直径和深度为  $55\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ (MWT-1), $65\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ (MWT-2), $75\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ (MWT-3), $85\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ (MWT-4), $95\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ (MWT-5), $105\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$ (MWT-6), $115\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ (MWT-7)的大凹坑微织构与直径和深度为  $30\ \mu\text{m}$ 、 $7\ \mu\text{m}$ 的小凹坑微织构,此两种微织构构成阶梯状微织构硬质合金刀具。图 3 中,a 型凹坑直径为  $65\ \mu\text{m}$ ,深度为  $15\ \mu\text{m}$ ;b 型凹坑直径为  $30\ \mu\text{m}$ ,深度为  $7\ \mu\text{m}$ 。本次试验控制 b 型凹坑尺寸,改变 a 型凹坑尺寸,探究 a 型凹坑的变化对切削性能的影响。

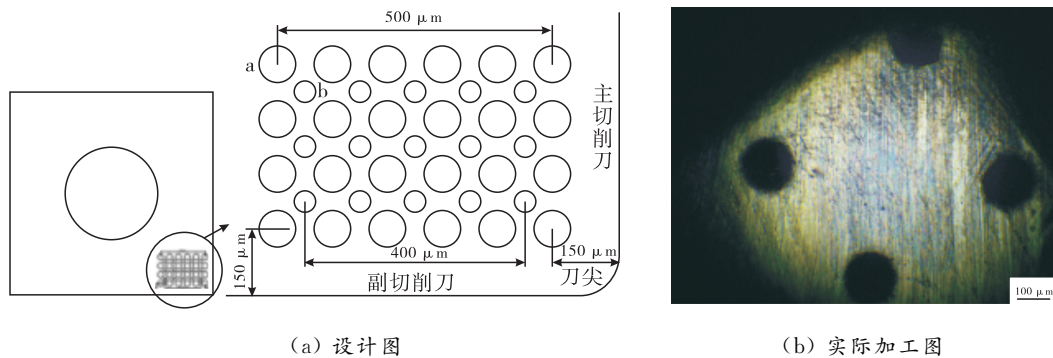


图 3 阶梯状微织构刀具分布图

### 2.2 切削试验

在 CA6140 型车床上进行传统无结构刀具(HAC-A)、标记阶梯状微织构刀具(MWT-1、MWT-2、MWT-3、MWT-4、MWT-5、MWT-6、MWT-7)车削试验,其中,传统无织构刀具 HAC-A 采用干式和湿式两种连续切削方式。刀具几何参数、加工参数中的进给量和切削深度与 1.2 部分一致,主轴转速为  $800\ \text{r}/\text{min}$ ,稳定车削时间为  $5\ \text{min}$ 。

### 2.3 切削力的测试与分析

选取加工平稳时间段采集切削力数据,分别将不同深径比的阶梯状微织构刀具和传统刀具(HAC-A)切削力数据进行比较。图 4 为加工过程中采集的主切削力柱状图。同种刀具(HAC-A)不同切削条件下主切削力存在明显差异,切削液的介入使主切削力由  $85.6\ \text{N}$  下降到  $75.2\ \text{N}$ ,降幅  $12.1\%$ 。MWT-5 刀具主切削力为  $138.3\ \text{N}$ ,与 HAC-A(湿)刀具相比增加了  $83.9\%$ ;MWT-1 刀具的切削力为  $87.5\ \text{N}$ ,与 HAC-A(湿)刀具相比增加了  $16.4\%$ 。MWT-2 刀具主切削力最小,与 HAC-A(湿)刀具相比,主切削力降低了  $11.2\%$ 。

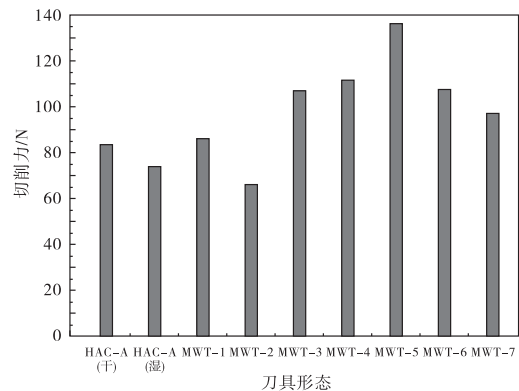


图 4 主切削力柱状图

HAC-A 刀具添加切削液,会在刀具前刀面形成断续的润滑油膜,一定程度上避免了刀-屑之间波峰-波峰(A 点)、波峰-波谷(B 点)之间的直接接触,为混合摩擦状态,如图 5(a)、(b)所示。不适宜的微坑尺寸,一方面无法促进前刀面形成致密润滑油膜,另一方面阻碍切屑运动,使前刀面刀-屑间摩擦因数增大,致使切削力出现不同程度的增大。阶梯状微织构可储存润滑

液,同时使润滑液梯度析出,在前刀面形成一定厚度和完整的吸附性润滑油膜,刀-屑之间由干摩擦转化为边界摩擦,进一步达到理想的流体摩擦状态,如图 5(c)、(d)所示。同时,第二主要变形区终滑移面后移,剪切角增大,相对滑移减小,切削变形降低,最终达到润滑减摩、降低切削力的显著效果。

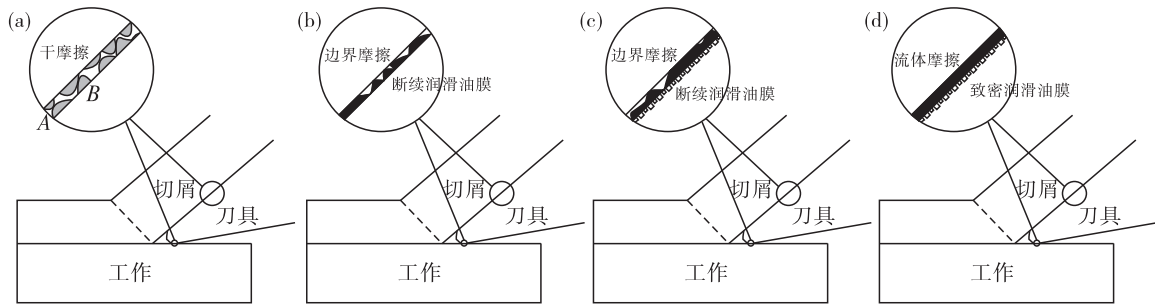


图 5 刀-屑接触状态示意图

### 2.4 表面粗糙度的测试与分析

表面光洁度和表面粗糙度的优劣是衡量加工质量的重要指标。为得到最优的微坑织构尺寸,对加工后铝合金表面质量进行测量和比较,本研究用算术平均偏差  $Ra$  来评价铝合金工件表面粗糙程度。

加工过程添加切削液有利于提升加工表面质量,提高加工稳定性。由图 6 可知,相较于 HAC-A(干)刀具, HAC-A(湿)刀具加工条件下的  $Ra$  由  $5.108 \mu\text{m}$  下降到  $3.474 \mu\text{m}$ ,工件表面质量提高了 32.0%。MWT-1 刀具加工工件表面  $Ra$  为  $10.065 \mu\text{m}$ ,相较于 HAC-A(湿)刀具增加了 189.7%。MWT-3 刀具加工工件表面出现明显的倒刺现象,表面质量差,  $Ra$  为  $12.372 \mu\text{m}$ ,与 HAC-A(湿)相比增幅达 256.1%。在 MWT-4 刀具加工条件下表面质量出现拐点,加工表面质量得到改善,  $Ra$  由  $12.372 \mu\text{m}$  逐步降低到 MWT-7 刀具的  $5.742 \mu\text{m}$ ,最大降幅达到 53.6%。MWT-2 刀具加工条件下,加工表面质量最优,加工表面  $Ra$  为  $2.251 \mu\text{m}$ ,相较于 HAC-A(湿)刀具加工条件工件表面质量提高了 35.2%,相较于 HAC-A(干)刀具加工条件提高了 55.9%,表面质量显著改善。

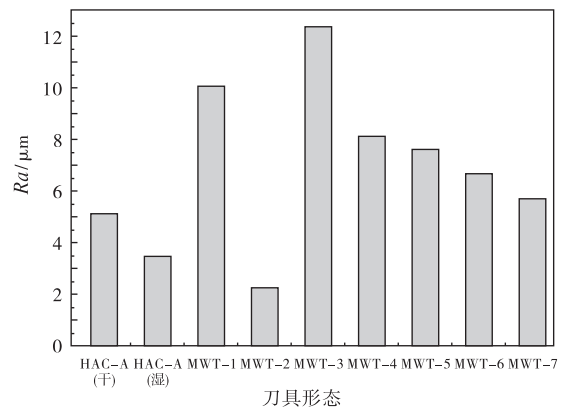


图 6 不同刀具形态下工件表面的  $Ra$  值

切削液的加入,除在前刀面形成致密润滑油膜外,部分细小切屑和磨粒切屑被切削液带走,避免了前刀面磨粒磨损引起的刀具震动,使加工过程更加稳定,表面质量提升。MWT-1 和 MWT-3 刀具加工过程中,切削力增大,切屑和工件变形严重,形成锯齿屑,容易在刀具 A 点发生刀-屑镶嵌现象,增大切削过程的振动。同时,铝合金材质较软,刀-屑镶嵌导致刀具 B 点发生堆积粘焊形成凸包,导致工件表面倒刺现象严重,如图 7 所示。研究表明,阶梯状微织构能提升储存细小碎屑的能力,从而避免刀-屑镶嵌现象的发生,缓解了切屑底层流动滞缓现象,滞留层得到改善,降低了加工过程中刀具振动,提高了加工稳定性。

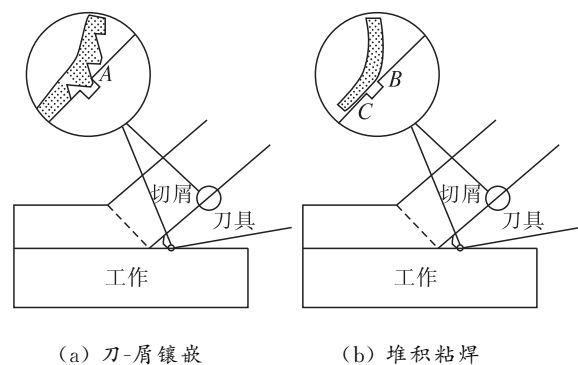


图 7 刀-屑滞留层堆积粘焊示意图

### 3 结论

研究了不同尺寸的阶梯状微织构硬质合金刀具切削 7075-T6 铝合金时的切削力和工件表面质量。结果表明:适宜的直径和深度的微织构对硬质合金刀具切削铝合金加工性能有至关重要的影响。

(1) 将硬质合金做 300 °C 预热处理,空冷至室温,采用频率为 20 kHz、振幅为 67  $\mu\text{m}$  的超声振动辅助激光加工的工艺方案,使微织构凹坑数量降低 75%,微裂纹数量降低 37.5%,树杈形裂纹降低 66.7%。

(2) 刀具表面微织构面积占有率为 15%,织构与切削刃尺寸间距为 150  $\mu\text{m}$ ,阶梯状微织构的直径为 65  $\mu\text{m}$ 、深度为 15  $\mu\text{m}$  和直径为 30  $\mu\text{m}$ 、深度为 7  $\mu\text{m}$  叠加时,主切削力最低,相较于 HAC-A(湿)刀具,主切削力降低 11.2%。直径大于 65  $\mu\text{m}$ 、深度大于 15  $\mu\text{m}$  时,刀具主切削力明显增加,与 HAC-A(湿)刀具比较最大增幅达到 83.9%,最小为 16.4%。

(3) 刀具表面微织构面积占有率为 15%,织构与切削刃尺寸间距为 150  $\mu\text{m}$ ,阶梯状微织构为直径为 65  $\mu\text{m}$ 、深度为 15  $\mu\text{m}$  和直径为 30  $\mu\text{m}$ 、深度为 7  $\mu\text{m}$  叠加时,加工表面质量最优,相较于 HAC-A(湿)刀具,表面质量提高 35.2%;相较于 HAC-A(干)刀具,提高 55.9%。直径大于 65  $\mu\text{m}$ 、深度大于 15  $\mu\text{m}$  时,表面质量下降明显,相较于 HAC-A(湿)刀具,最大降幅达到 256.1%。

### 参考文献:

- [1] RIBEIRO M V, MOREIRA M R V, FERREIRA J R. Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining[J]. Journal of materials processing technology, 2003, 143/144: 458-463.
- [2] CUI C X, HU B M, ZHAO L C, et al. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. Materials and design, 2011, 32(3): 1684-1691.
- [3] ZHOU L, LUO G Z. Research and development of titanium in China[J]. Materials science and engineering A, 1998, 243: 294-298.
- [4] CHE-HARON C H, JAWAID A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4%V[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 166: 188-192.
- [5] 戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2353-2359.
- [6] YUE T M, CHAN T W, MAN H C, et al. Analysis of ultrasonic-aided laser drilling using finite element method[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 169-172.
- [7] LI D, CHEN X X, GUO C H, et al. Micro surface texturing of alumina ceramic with nanosecond laser[J]. Procedia engineering, 2017, 174: 370-376.
- [8] NIKETH S, SAMUEL G L. Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition[J]. Journal of manufacturing processes, 2018, 32: 254-268.
- [9] KÜMMEL J, BRAUN D, GIBMEIER J, et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 215: 62-70.
- [10] 刘绪超, 杨发展, 张娜, 等. 基于 Workbench 的微织构刀具对铝合金切屑影响[J]. 机床与液压, 2019, 47(16): 12-16.
- [11] 鹿重阳, 杨学锋, 王守仁, 等. 三角沟槽形织构化硬质合金工作表面动压润滑及减摩特性[J]. 摩擦学报, 2018, 38(5): 537-546.
- [12] KAWASEGI N, SUGIMORI H, MORIMOTO H, et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior[J]. Precision engineering, 2009, 33(3): 248-254.
- [13] 何利华, 潘建峰, 倪敬, 等. 压铸铝合金用铣刀表面微织构及切削特性研究[J]. 上海交通大学学报,

2021,55(6):750-756.

- [14] 刘绪超,杨发展,罗佳,等. 刀具表面微织构激光加工方法研究与分析[J]. 工具技术,2019,53(1):74-77.

### Performance study of micro-textured cutting tools for machining aluminum alloys in aerospace applications

LIU Xuchao<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, JIANG Fulin<sup>2</sup>, YANG Fazhan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,  
Weifang Vocational College, Weifang 262737, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering,  
Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** To address the severe friction and wear issues on the cutting tool surface during the machining of 7075 aluminum alloy, micro-textures with varying depth-to-diameter ratios were fabricated on the surface of cemented carbide (WC-Co, YG8) tools using pulsed laser. The morphology of the laser-processed micro-textures and their subsequent cutting performance with aluminum alloy were investigated. In the micro-texturing process, the effects of micro-textures on the tool surface were explored by adjusting the diameter and depth of circular micro-textures. Comparative cutting experiments revealed that the presence of micro-textures significantly reduced cutting forces and improved workpiece surface quality. When the micro-texture area coverage on the tool surface reached 15%, with a spacing of 150  $\mu\text{m}$  between the textures and the cutting edge, and when the stepped micro-textured tool dimensions were a combination of 65  $\mu\text{m}$  diameter by 15  $\mu\text{m}$  depth and 30  $\mu\text{m}$  diameter by 7  $\mu\text{m}$  depth, the main cutting force decreased by 11.2%, and the workpiece surface quality improved by 35.2%.

**Keywords:** echelon micro-texture; carbide cutting tool; 7075 aluminum alloy; laser processing; cutting force; surface quality

(责任编辑:王新亮)

- 引用格式 刘绪超,刘凤,姜芙林,等. 微织构刀具切削航空用铝合金性能研究[J]. 山东航空学院学报,2025,42(6):55-60.  
LIU X C, LIU F, JIANG F L, et al. Performance study of micro-textured cutting tools for machining aluminum alloys in aerospace applications[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(6): 55-60.