

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171204007

# 纳秒激光加工微凹坑对 YG3 表面浸润性的影响

杨奇彪<sup>1,2</sup>, 陈中培<sup>2</sup>, 陈 列<sup>2</sup>, 娄德元<sup>2</sup>, 刘 顿<sup>1,2</sup>, 班内特·彼得(英)<sup>2</sup>

(1. 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068)

**摘 要:** 研究硬质合金刀具表面浸润性对提高刀具寿命和工件加工表面质量有重要的意义。采用波长 1064 nm 纳秒脉冲激光在硬质合金 YG3 表面加工微凹坑阵列, 运用光学显微镜、光学轮廓仪和接触角测量仪分别测量微凹坑形貌和表面接触角, 研究不同激光功率、扫描次数和微凹坑间距对表面形貌和接触角的影响规律。建立微凹坑几何形貌模型, 基于 Wenzel 理论分析微凹坑形貌变化对表面接触角的影响机理。结果表明: 随着平均功率和扫描次数的提高, 微凹坑的直径和深度均增大; 随着间距的减小, 微凹坑分布密度增大。3 种条件下表面粗糙度率均增大, 表面接触角余弦值随粗糙度率的变化趋势基本一致且成正相关, 所以接触角随粗糙度率增加而降低。通过实际接触角与推导接触角的曲线拟合得到了接触角方程。

**关键词:** 激光加工; 硬质合金 YG3; 浸润性; 微凹坑

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)03-0001-08

## Effects of Nanosecond Laser-induced Micro-pits on Surface Wettability of YG3

YANG Qi-biao<sup>1,2</sup>, CHEN Zhong-pei<sup>2</sup>, CHEN Lie<sup>2</sup>, LOU De-yuan<sup>2</sup>, LIU Dun<sup>1,2</sup>, BENNETT Peter<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Mordern Manufacture Quality Engineering, Wuhan 430068; 2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068)

**Abstract:** It is of great significance to study the surface wettability of cemented carbide tools for the improvement of tool life and processing surface quality. Micro-pits arrays on the YG3 surface were fabricated by nanosecond pulsed laser with a wavelength of 1064 nm. The optical microscope, optical profiler and contact angle measurement were used to measure the surface morphology and contact angle. The influence of surface morphology on contact angle under different laser average power, scanning times and micro-pits spacing were investigated. Based on Wenzel's theory, the geometrical morphology model of micro-pits was established to analyze the influence mechanism of surface morphology on contact angle. Results show that the diameter and depth of micro-pits increase as the laser average power or scanning times increase. The micro-pits distribution density increases with decreasing micro-pits spacing. Under three conditions, all the surface roughness ratios increase. The cosine contact angle is positively related to the roughness ratio and the variation trends are basically consistent. As a result, the contact angle decreases with the increase of roughness ratio. The actual contact angle equation is fitted using the variation curves of actual contact angle versus derivation contact angle.

**Keywords:** laser processing; cemented carbide YG3; wettability; micro-pits

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-04-28

网络出版日期: 2018-05-09 09:10; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180509.0910.022.html>

通讯作者: 刘顿(1980—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 激光加工, 浸润性控制; E-mail: liudun98@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51505135); 国家科技支撑计划(2015BAF20B03); 湖北省教育厅项目(T201405)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (51505135), National Key Technology Support Program (2015BAF20B03) and Research Project of Hubei Provincial Department of Education (T201405)

引文格式: 杨奇彪, 陈中培, 陈列, 等. 纳秒激光加工微凹坑对 YG3 表面浸润性的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 1-8.

YANG Q B, CHEN Z P, CHEN L, et al. Effects of nanosecond laser-induced micro-pits on surface wettability of YG3[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 1-8.

## 0 引言

硬质合金刀具以其抗压强度高、硬度高、耐磨性好、抗冲击强、耐腐蚀等优良性能,广泛应用于难加工材料的高速切削加工<sup>[1-2]</sup>。为了解决摩擦力过大,加工温度高所造成的刀具磨损严重等问题,国内外学者先后在高速切削加工中采用了切削液浇注、低温冷风、电离空气等冷却润滑技术<sup>[3-5]</sup>。然而,高温高压状态下,切削区结合紧密,润滑介质很难进入刀屑界面内,大多情况下只能形成边界润滑状态。利用激光加工合金表面提高浸润性,有利于切削液渗入刀屑界面,改善切削区的润滑状况<sup>[6]</sup>。因此,研究激光加工刀具表面的浸润性机理对制备高性能刀具具有重要的实际意义。目前,表面微纳加工技术<sup>[7]</sup>主要有光刻技术、电火花加工、激光加工等。激光加工技术<sup>[8-10]</sup>因其速度快、精度高、功率密度大、非接触等优势,几乎可加工所有材料,广泛应用于材料表面微纳加工。

近年来,国内外学者在刀具表面加工出不同形貌的微纳结构,验证了微纳结构能够有效提高表面浸润性,降低切削力。Kawasegi等<sup>[11]</sup>研究了微纳米沟槽表面刀具,结果表明在最小量润滑条件下减轻了粘刀情况,减少了切削力和摩擦力。Sugihara等<sup>[12]</sup>分析了微纳米沟槽表面刀具的抗粘刀机理,归因于微沟槽中存留切削液并减小刀屑界面实际接触面积。熊其玉<sup>[13]</sup>在45钢表面加工6种微织构研究表面浸润性,发现微织构表面浸润性均优于原始表面,其中矩形微凹坑表面浸润性最优。程帅<sup>[14]</sup>在材料表面加工微圆孔阵列控制表面浸润性,运用数值分析方法得出微孔几何参数是重要控制参数。为研究激光加工硬质合金表面浸润性与参数之间的关系,采用纳秒激光在YG3表面进行微凹坑加工试验,研究激光平均功率、扫描次数以及微凹坑间距变化对表面形貌和浸润性的影响规律,并分析浸润性机理。

## 1 材料及方法

### 1.1 样品制备

试验采用的硬质合金为YG3,其化学成分为 $\omega_{wc}=97\%, \omega_{wo}=3\%$ ,密度为 $14.9\sim 15.3\text{ g/cm}^3$ ,热导率为 $87\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,硬度(HRA)为91,抗弯强度

为 $1.2\text{ GPa}$ <sup>[15]</sup>,样品尺寸为 $60\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。试验前对样品进行预处理,采用 $38\text{ }\mu\text{m}$ (400目)的金刚石砂轮在磨床上打磨样品去除表面毛刺,用粒度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石喷雾喷涂在抛光机绒布上,抛光处理试样表面至表面粗糙度 $Ra=0.15\text{ }\mu\text{m}$ ,用超声波清洗后冷风吹干。

采用SPI公司G4 100W EP-Z型纳秒脉冲光纤激光加工系统(如图1所示),激光波长 $\lambda=1064\text{ nm}$ ,光斑直径 $Dia\approx 41\text{ }\mu\text{m}$ ,脉宽 $t_p=17\text{ ns}$ ,重复频率 $f=200\text{ kHz}$ ,为了避免YG3表面在激光加工过程中与空气发生化学反应,影响形貌和接触角测量结果,将YG3样品置入真空箱中,在纯度99.999%的氦气氛围条件下加工。

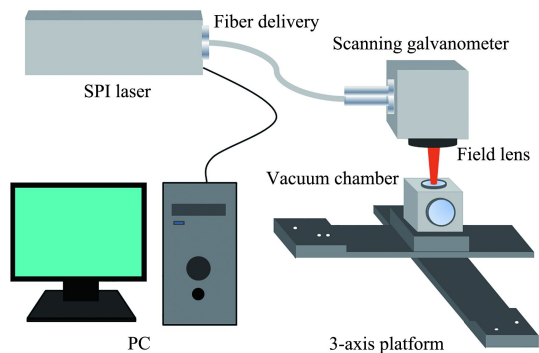


图1 纳秒脉冲激光加工系统的示意图

Fig.1 Sketch map of nanosecond pulsed laser processing system

为减少纳秒激光加工材料产生的热效应,首先测定YG3的损伤阈值,确定激光能够去除材料的最低临界功率,并以此指导设定合适的平均功率范围,减少飞溅物堆积和重铸等热效应。在加工速度 $v=15\text{ }000\text{ mm/s}$ 条件下,利用不同功率的光束依次加工样品表面,测量表面微凹坑直径 $D$ ,采用直径推算法<sup>[16]</sup>得到YG3的损伤阈值。

选用如图2所示的微凹坑阵列作为基本结构,运用不同激光功率 $P$ 、扫描次数 $t$ 以及微凹坑间距 $d$ 在样品表面加工一系列 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的微凹坑阵列区域,面积单元为 $d\times d$ 。

由于热效应产生的熔融飞溅物会形成微凸起,影响接触角测量和机理分析,所以样品加工后采用超声波清洗 $20\text{ min}$ 后冷风吹干,图3为激光加工并清洗后的样品微凹坑三维形貌( $P=8\text{ W}$ ,  $t=600$ ),可以看出经过清洗后孔型呈圆锥孔,表面几乎无飞溅堆积物。

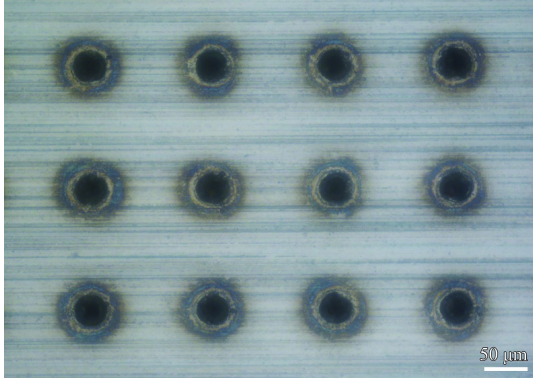
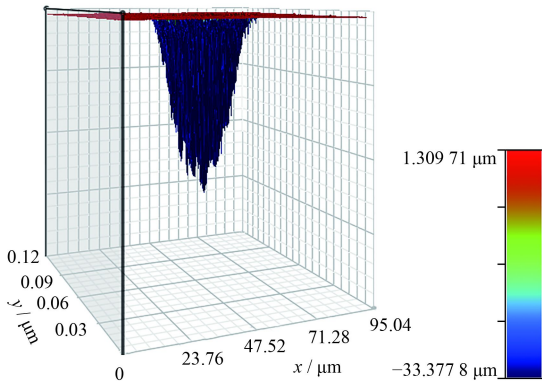


图2 微凹坑表面阵列结构

Fig.2 Micro-pits array structure on the surface

图3  $P=8$  W,  $t=600$  时的微凹坑三维形貌Fig.3 3D morphology of micro-pit under  $P=8$  W and  $t=600$ 

## 1.2 分析与表征

采用 Nikon M568E 显微镜观测阵列区域表面加工情况和微凹坑直径, 采用 Bruker 3400E 光学轮廓仪采集微凹坑三维形貌和深度, 同一加工参数下分别取 3 个微凹坑测量直径深度, 取其平均值作为测量结果。采用 MAIST Vision 公司 A-300 型接触角测量仪测定样品表面接触角, 采集数据时在阵列区域取 3 个不同位置, 量取 3  $\mu\text{L}$  水测量表面接触角, 取 3 处数据平均值作为最终结果, 以接触角来表征表面浸润性, 测得原始表面接触角  $\theta_1=88.3^\circ$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 测定 YG3 损伤阈值

材料损伤阈值指激光对材料造成永久性损伤的临界能量密度。由于使用的是长脉冲激光, 激光对 YG3 的损伤主要为热熔性损伤, 试验所测的损伤阈值即为熔化阈值, 损伤轮廓直径为微凹坑轮廓直径  $D$ 。直径推算法通过测量不同功率下的

损伤轮廓直径, 通过数据线性拟合得到方程推算出材料的损伤阈值<sup>[17]</sup>。

纳秒脉冲激光为高斯光, 激光能量分布成高斯分布。设  $\varphi_{th}$  为微凹坑边缘轮廓处的能量密度, 即损伤阈值,  $\varphi_{th}$  与轮廓直径  $D$  的关系如式 (1) 所示。

$$\varphi_{th} = \varphi_0 e^{-D^2/2\omega_0^2} \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  为光束束腰半径,  $\mu\text{m}$ ;  $\varphi_0$  为激光束中心能量密度,  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。激光束的中心能量密度  $\varphi_0$  与单脉冲能量  $E_p$  的关系如式 (2) 所示。

$$\varphi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2} \quad (2)$$

而激光单脉冲能量  $E_p$  与平均功率  $P$  之间的关系如式 (3) 所示。

$$E_p = \frac{P}{f} \quad (3)$$

式 (3) 中  $f$  为重复频率, Hz。将式 (3) 代入式 (2) 可得:

$$\varphi_0 = \frac{2P}{f \cdot \pi\omega_0^2} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1) 中, 整理可得:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left( \ln P + \ln \frac{2}{f \cdot \pi\omega_0^2 \varphi_{th}} \right) \quad (5)$$

式 (5) 是一条关于  $D^2 - \ln P$  的直线, 斜率  $k = 2\omega_0^2$ 。试验中激光平均功率范围为 4~21 W, 分别测量激光不同功率下的微凹坑轮廓直径。

试验得到的直径平方与平均功率对数的关系如图 4 所示。通过线性拟合, 得到方程为:

$$D^2 = 850 \ln P - 6689 \quad (6)$$

直径斜率  $k=850$ , 根据  $k = 2\omega_0^2$  得到束腰半径  $\omega_0 = 20.62 \mu\text{m}$ , 当损伤轮廓直径  $D$  为 0 时, 激光束中心能量密度  $\varphi_0 = \varphi_{th}$ , 根据式 (6) 可得临界平均功率  $P_0 = 2.62$  W, 根据式 (4) 计算得 YG3 损伤阈值  $\varphi_{th} = 1.96 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。

结果表明试验中 YG3 表面的损伤阈值  $\varphi_{th} = 1.96 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 临界功率  $P_0 = 2.62$  W, 故加工中平均功率取 3~5 倍  $P_0$ , 功率过大会产生严重的热效应, 考虑到保证 YG3 强度的前提, 应尽量避免选择此类参数。

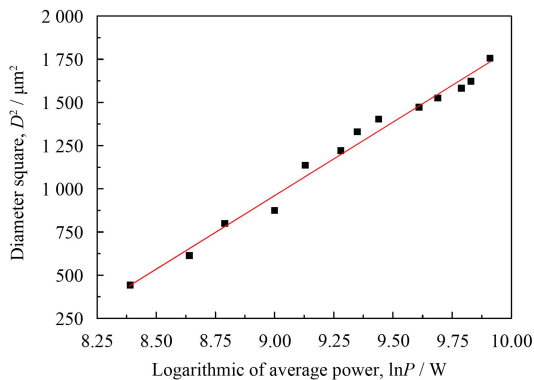


图4 不同平均功率对数下损伤直径平方的变化

Fig.4 Variation of diameter square with logarithmic of average power

## 2.2 平均功率对表面形貌和接触角的影响

图5为不同平均功率下微凹坑深度直径的变化趋势，微凹坑间距 $d=80\mu m$ ，扫描次数 $t=600$ ，激光平均功率 $P$ 分别取6、8、10、12、14和16W。可以看出随着激光平均功率的增大，微凹坑的直径略微增大后稳定于 $43\mu m$ 左右，微凹坑深度增大比较明显，功率超过12W后深度增大速率趋势变缓，这是由于光斑能量密度呈高斯分布，功率较小时光斑边缘部分能量密度小于损伤阈值，不能熔化材料，所以微凹坑直径较小，当功率增大时，光斑区域内能量密度大于损伤阈值的面积增大，所以微凹坑直径逐渐变大；由于功率上升，光斑中心能量密度增大，微凹坑的深度不断加深，深孔内加工点逐渐远离焦平面，同时锥形孔粗糙斜壁吸收大量能量，所以深度增大趋势逐渐变缓。当功率大于12W时，微凹坑圆度因热影响变大而变差，此时能量密度 $\varphi=8.98 J/cm^2$ 。

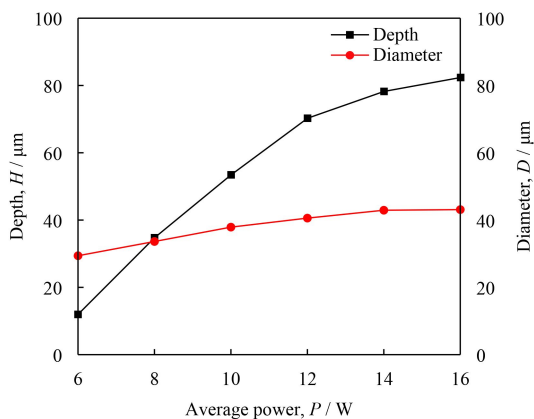


图5 不同平均功率下微凹坑深度和直径的变化

Fig.5 Variations of micro-pits depth and diameter with average power

图6为不同平均功率下表面接触角的变化趋势，可以看出平均功率变大有利于提高表面浸润性。随着功率增大，表面接触角逐渐降低，下降趋势逐渐变缓，这是因为随着微坑直径深度变大，固液接触面积增大，有利于液滴的躺平，所以表面接触角随功率增大而降低；当功率较高时，微凹坑的直径 $D$ 增大后稳定于 $43\mu m$ ， $\Delta D/\Delta t$ 变小趋近于0，而深度增大速率 $\Delta H/\Delta t$ 逐渐变小，微凹坑固液接触面积变化速率变小，所以表面接触角下降趋势变小。

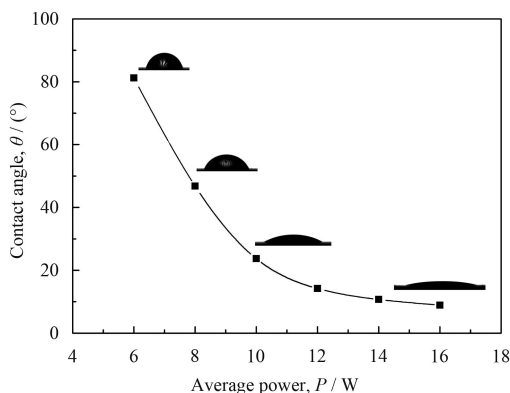


图6 不同平均功率下表面接触角的变化

Fig.6 Variation of surface contact angle with average power

## 2.3 扫描次数对表面形貌和接触角的影响

图7为不同扫描次数下微凹坑直径深度的变化规律，平均功率 $P=10W$ ，微凹坑间隔 $d=80\mu m$ ，扫描次数 $t$ 分别取100、200、400、600、800、1000、1200和1400次。随着扫描次数的增加，微凹坑直径从 $35\mu m$ 略微增大趋于 $38\mu m$ ，变化不明显；微凹坑直径增大且趋势逐渐变缓。这是由于相同功率下光斑能量密度分布一致，理论上凹坑直径相同，但多脉冲加工势必会造成热量堆积，对微凹坑边缘产生烧蚀作用，因此微凹坑直径会略微增大。激光每次扫描都会去除一定厚度的材料，随着次数增大，孔深加深，当扫描次数较少时，每次去除的材料厚度基本相同，当孔深变大时，孔壁吸收能量和焦点偏移会减小功率密度，同时部分熔融物质由于孔深过大无法喷出在孔内重铸，深度增大趋势逐渐变缓。

图8为不同扫描次数下表面接触角的变化规律，随着扫描次数的增加，表面接触角呈下降趋势，扫描600次以后，表面接触角下降趋于平缓并最终降低至 $9^\circ$ 左右。这是因为随着扫描次数

$t$  增加, 微凹坑直径几乎不变,  $\Delta D/\Delta t=0$ , 深度变化速率  $\Delta H/\Delta t$  变小, 微凹坑表面实际接触面积变化速率减小, 所以表面接触角下降趋势逐渐变缓。

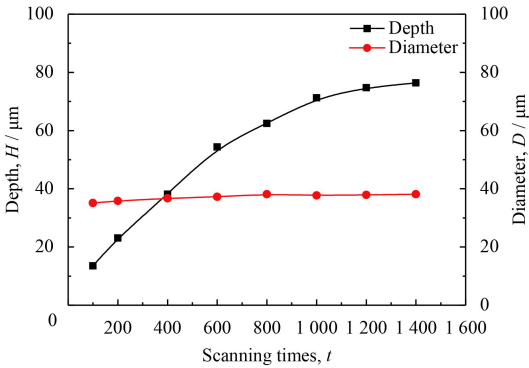


图7 不同扫描次数下微凸坑直径和深度的变化

Fig.7 Variations of micro-pits depth and diameter with scanning times

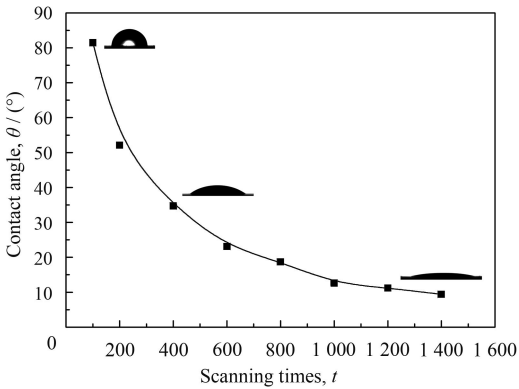


图8 不同扫描次数下表面接触角的变化

Fig.8 Variation of contact angle with scanning times

## 2.4 微凹坑间距对表面形貌和接触角的影响

图9为不同微凹坑间距下表面接触角的变化规律, 激光平均功率  $P=10$  W, 扫描次数  $t=600$ , 微凹坑间隔  $d$  分别为 60、80、100、120、140、160、180、200、250 和 300  $\mu\text{m}$ , 因平均功率和扫描次数固定, 所以微凹坑直径和深度相同。可以看出随着间距  $d$  的减小, 表面接触角从初始表面接触角  $\theta_i$  开始下降, 并且速度逐渐增大。这是因为当微凹坑间距较大时, 微凹坑表面近似于原始表面, 所以接触角接近于  $\theta_i$ , 微凹坑分布密度  $k$  为微凹坑表观面积  $\pi D^2/4$  与单元面积  $d^2$  的比值, 即  $k=\pi D^2/4d^2$ ,  $\Delta k/\Delta d=\pi D^2/2d^3$ , 随着间距  $d$  减小, 微凹坑半径  $r$  不变, 微凹坑分布密度  $k$  呈指数上升趋势, 即微凹坑面积与单元面积比值呈指数上

升, 由于微凹坑大小均一致, 所以固液接触面积也呈指数上升, 所以接触角随间距减小呈下降趋势且下降速率逐渐增大。

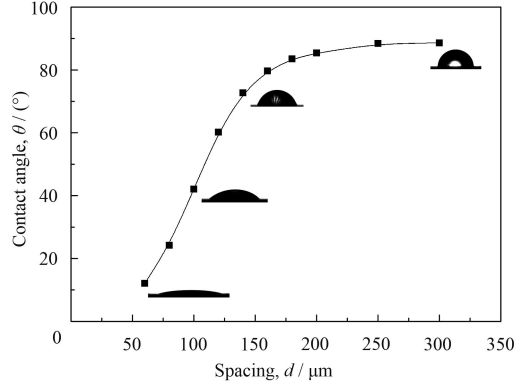


图9 不同微凹坑间距下表面接触角的变化

Fig.9 Variation of contact angle with micro-pits spacing distance

## 2.5 形貌参数对表面接触角的影响机理

根据经典固液界面接触角 Wenzel 全湿模型理论, 假设材料表面为理想的平整、光滑表面, 由 Young 方程得到固液接角  $\theta_i$ :

$$\cos \theta_i = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (7)$$

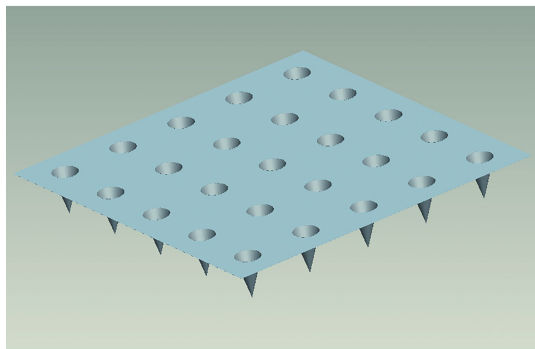
式中  $\gamma_{sv}$ ——固气界面表面张力;  $\gamma_{sl}$ ——固液界面表面张力;  $\gamma_{lv}$ ——液气界面表面张力。

此时理想界面的固液接触角  $\theta_i$  为材料表面的本征接触角, Wenzel 将实际表面的固液表观接触角与理想表面固液本征接触角的差异归结为实际表面粗糙度的存在, 认为实际表面的凹凸不平引起固液真实接触面积增大, 固液和固气界面能增加, 从而导致固液接触角变化。由此 Wenzel 认为液体完全浸润微凹坑表面并提出了方程式<sup>[18]</sup>, 当液滴达到平衡时, 表观接触角  $\theta^c$  和 Young 本征接触角  $\theta_i$  的关系为:

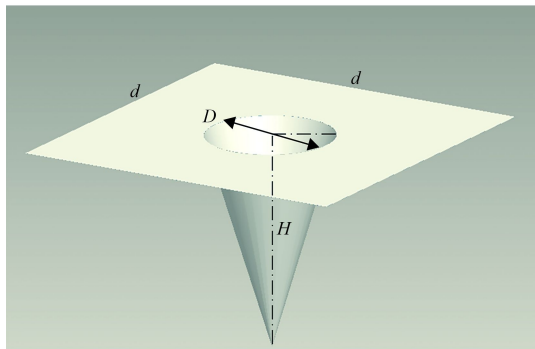
$$\cos \theta^c = r \cos \theta_i \quad (8)$$

式中  $r$  为 Wenzel 粗糙度率,  $r$  = 固液真实接触面积/固液表观接触面积。针对试验中激光处理过的表面, 本征接触角  $\theta_i$  均保持不变, 即为 YG3 原始表面接触角。

参考图3微凹坑三维形貌, 可以看出微凹坑近似为圆锥孔。如图10(a)所示建立微凹坑表面模型。取单个微凹坑模型(图10(b)), 以微凹坑间隔  $d \times d$  为单元面积。在单位面积内, 固液表观接触



(a) Geometrical morphology model of YG3 surface



(b) Geometrical morphology model of single micro-pit

图 10 微凹坑形貌的几何模型

Fig.10 Geometrical morphologies model of micro-pits

面积为  $S_1 = d^2$ , 固液真实接触面积为  $S_2$ , 圆锥孔壁面积为  $S_3 = \frac{1}{4}\pi D \sqrt{D^2 + 4H^2}$ , 圆锥孔底圆面积为  $S_4 = \frac{1}{4}\pi D^2$ , 根据  $S_2 = S_1 - S_4 + S_3$ , 可得:

$$r = \frac{S_2}{S_1} = 1 + \frac{\pi D(\sqrt{D^2 + 4H^2} - D)}{4d^2} \quad (9)$$

由于  $\cos\theta_i$  固定不变, 为了验证  $\cos\theta$  和粗糙度率  $r$  之间的关系。将试验 2.3、2.4 和 2.5 中不同功率、扫描次数和微凹坑间距下的微凹坑直径  $D$ , 孔深  $H$ , 间距  $d$  代入式 (9), 计算出对应的粗糙度率  $r$  并与实际接触角余弦值  $\cos\theta$  进行比较, 分析变化规律。图 11~13 分别为不同功率、扫描次数和微凹坑间距下粗糙度率  $r$  与  $\cos\theta$  的变化曲线。可以看出 3 种条件下, 粗糙度率  $r$  与实际接触角余弦值  $\cos\theta$  增长趋势基本一致。证明了表面接触角余弦值的变化与微凹坑的表面粗糙度率成正相关。增大平均功率、扫描次数和减小微凹坑间距改变了微凹坑的形貌, 增大了固液实际接触面积, 表面粗糙度率上升, 由于试验中接触角小于  $90^\circ$ , 所以接触角余弦值上升, 表面接触角随之降低。试验中表面接触角余弦值和粗糙度率变化趋

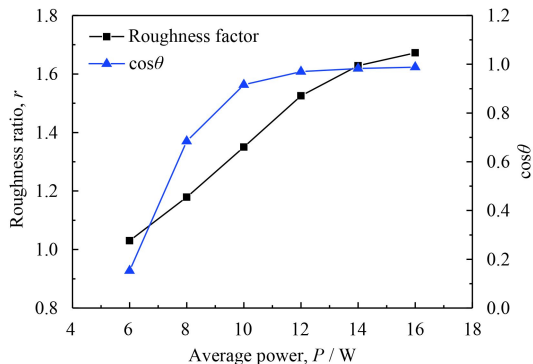


图 11 不同平均功率下粗糙度率和接触角余弦值的变化

Fig.11 Variations of roughness ratio and cosine contact angle with average power

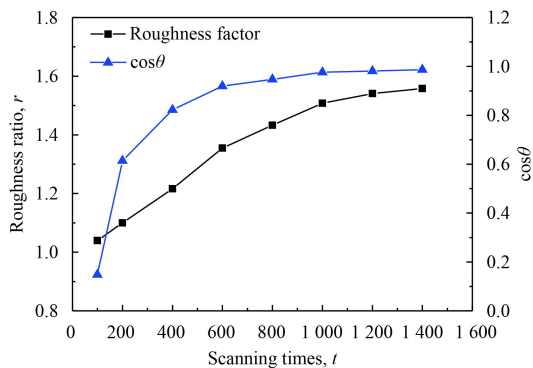


图 12 不同扫描次数下粗糙度率和接触角余弦值的变化

Fig.12 Variations of roughness ratio and cosine contact angle with scanning times

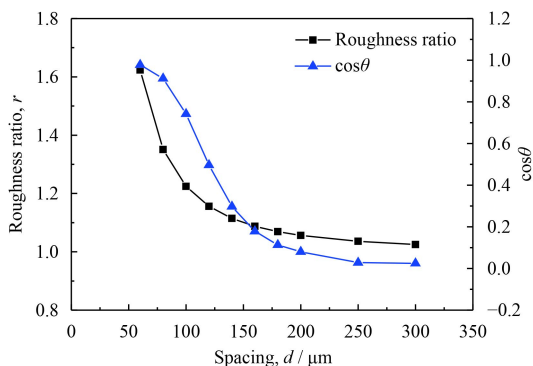


图 13 不同微坑间距下粗糙度率和接触角余弦值的变化

Fig.13 Variations of roughness ratio and cosine contact angle with micro-pits spacing

势基本一致, 符合 Wenzel 理论。

但是利用 Wenzel 方程 (式 (8)) 推算的接触角并不严格符合实际的接触角, 这是由于激光光斑能量呈高斯分布, 不同孔径处能量密度不同, 同时激光打孔发生复杂的物理过程, 涉及了金属对激光吸收、金属的熔化、气化、蒸发以及液态金属

的喷射等,导致孔壁粗糙不平,孔内存在尖状突起<sup>[19]</sup>。因此模型中近似模拟微凹坑为圆锥孔,与实际情况存在误差。为了推导出符合实际情况的接触角方程,如图14所示建立实际接触角余弦值 $\cos\theta$ 与Wenzel方程推导接触角余弦值 $\cos\theta'$ 的曲线关系,其中曲线A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>为分别改变功率、扫描次数和微凹坑间距得到的微凹坑表面 $\cos\theta$ 随 $\cos\theta'$ 的变化关系。可以看出3条曲线基本一致,将A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>拟合曲线,可以看出实际表面接触角与粗糙度率满足:

$$\cos\theta = -601.55 \exp(-209.21 r \cos\theta_i) + 1.03 \quad (10)$$

$$r = 1 + \frac{\pi D(\sqrt{D^2 + 4H^2} - D)}{4d^2} \quad (11)$$

式(11)为符合实际情况的表面接触角方程,建立了表面接触角与粗糙度率之间的函数关系,通过测量激光加工后的微凹坑形貌参数(直径 $D$ 、深度 $H$ 和微凹坑间距 $d$ )可以近似估算出实际接触角大小。

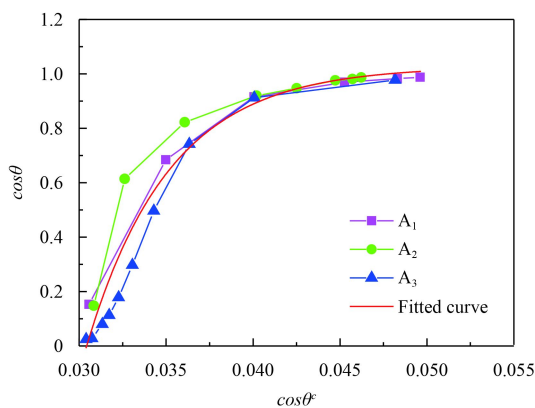


图14 实际接触角余弦值与推导接触角余弦值的关系

Fig.14 Actual cosine contact angle versus derivation cosine contact angle

### 3 结论

(1) 试验中硬质合金YG3损伤阈值 $\varphi_0 1.82 \text{ J/cm}^2$ ,当功率密度大于 $8.98 \text{ J/cm}^2$ ,热效应较明显,微凹坑圆度变差。

(2) 分别提高平均功率和扫描次数,减小微凹坑间距,运用Wenzel模型理论证实了形貌参数变化提高了表面粗糙度率,且微凹坑表面接触角与表面粗糙度率成正相关。

(3) 在Wenzel方程的基础上通过拟合实际接

触角与推导接触角之间的曲线,得到符合实际情况的接触角方程,根据微凹坑的形貌可以推测实际表面接触角的大小。

### 参考文献

- [1] WANG Z G, RAHMAN M, WONG Y S. Tool wear characteristics of binder less CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys[J]. Wear, 2005, 258: 752-758.
- [2] 张卫兵, 刘向中, 陈振华, 等. WC-Co 硬质合金最新进展[J]. 稀有金属, 2015, 39(2): 178-186.  
ZHANG W B, LIU X Z, CHEN Z H, et al. Latest development of WC-Co cemented carbide[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(2): 178-186 (in Chinese).
- [3] YAMAZAKI T, MIKI K, SATO U, et al. Cooling air cutting of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2003, 53(10): 416-420.
- [4] CAKIR O, KIYAK M, ALTAN E. Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 35-41.
- [5] 李新龙, 何宁, 李亮. 绿色切削中的 MQL 技术[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(2): 24-27.  
LI X L, HE N, LI L. MQL technology in the green cutting[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2005, 41(2): 24-27 (in Chinese).
- [6] 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 170-179.  
HAO X Q, SONG X L, LI L. Development and perspective of surface texturing tools[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 170-179 (in Chinese).
- [7] 苏永生, 李亮, 何宁, 等. 激光加工硬质合金刀具表面微织构的试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 66-72.  
SU Y S, LI L, HE N, et al. Experimental research on laser machining of surface micro-textures of carbide cutting tool[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 66-72 (in Chinese).
- [8] 谢永, 田良, 薛伟, 等. 激光微织构对 WC 硬质合金刀具表面影响[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 412-413.  
XIE Y, TIAN L, XUE W, et al. Research the effect of laser micro texture on the surface of WC cemented carbide tool[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 412-413 (in Chinese).
- [9] 龙江游, 范培迅, 龚鼎为, 等. 超快激光制备具有特殊浸润性的仿生表面[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 4-7.  
LONG J Y, FAN P X, GONG D W, et al. Ultrafast laser fabricated bio-inspired surfaces with special wettability[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 4-7 (in Chinese).
- [10] 纪亮, 张晓兵, 张伟, 等. DD6 镍基合金的纳秒及皮秒激光烧蚀和制孔研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 551-556.  
JI L, ZHANG X B, ZHANG W, et al. Laser-induced abla-

- tion and laser drilling of DD6 nickel-based single-crystal alloy by nanosecond and picosecond lasers[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 551-556 (in Chinese).
- [11] 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.
- [12] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface-improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 425-429.
- [13] 熊其玉, 董磊, 焦云龙, 等. 应用激光蚀刻不同微织构表面的润湿性[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 304-313.
- XIONG Q Y, DONG L, JIAO Y L, et al. Wettability of surfaces with different surface microstructures textured by laser[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20): 304-313 (in Chinese).
- [14] 程帅, 董云开, 张向军. 规则粗糙固体表面液体浸润性对表观接触角影响的研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(7): 822-827.
- CHENG S, DONG Y K, ZHANG X J. Study of the influence of apparent contact angle on regular rough surface considering liquid wetting properties[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(7): 822-827 (in Chinese).
- [15] 陆剑中, 孙佳宁. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 29-33.
- LU J Z, SUN J N. Metal cutting theory and cutting tools[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 29-33 (in Chinese).
- [16] STENZEL E, GOGOLL S, SILS J, et al. Laser damage of alkaline-earth fluorides at 248 nm and the influence of polishing grades[J]. Applied Surface Science, 1997: 162-167.
- [17] KUANG Z, WALTER P, LIU D, et al. Ultrashort pulse laser patterning of indium tin oxide thin films on glass by uniform diffractive beam patterns[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 7601-7602.
- [18] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [19] 褚庆臣, 虞钢, 卢国权, 等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 83-88.
- ZHU Q C, YU G, LU G Q, et al. Two dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 83-88 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)

• 本刊讯 •

## 2018 年中国（国际）光整加工技术及表面工程学术会议将在贵阳召开

中国（国际）光整加工技术及表面工程学术会议（International Conference on Surface Finishing Technology and Surface Engineering, ICSFT）是由中国机械工程学会生产工程分会光整加工专业委员会主办的系列学术会议之一，每两年举办一次。2018 年中国（国际）光整加工技术及表面工程学术会议暨 2018 年高性能零件光整加工技术产学研论坛定于 2018 年 7 月 19—22 日在贵州省贵阳市召开。

会议目的在于全方位多渠道交流精密光整加工技术（研磨、抛光、超精密加工、自由磨粒加工、去毛刺等）和表面工程（机械零件表面强化与改性）技术领域中的新理论、新技术、新方法、新装备及应用等方面的研究成果与进展，促进相互了解、合作与技术交叉，推动我国光整加工及表面工程理论、技术和应用的发展。

会议的主题为面向军民融合的高效绿色光整加工技术及应用。大会将特别邀请国内外知名专家教授和企业家作光整加工技术领域专题学术报告和国内外相关技术最新发展与应用讲座，同期还将召开“2018 年高性能零件光整加工技术产学研论坛”。

(本刊编辑部 供稿)