

## 表面质量控制及检测

## 硬质合金刀具材料化学机械抛光机理研究

袁巨龙<sup>1,2,3</sup>, 毛美姣<sup>1,4</sup>, 李敏<sup>1,2,3</sup>, 刘舜<sup>4</sup>, 胡自化<sup>4</sup>, 吴锋<sup>4</sup>

(1.湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082; 2.湖南科技大学 难加工材料  
高效精密加工湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 3.浙江工业大学 特种装备制造与  
先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014; 4.湘潭大学 复杂轨迹加工工艺及  
装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** **目的** 研究硬质合金刀具材料化学机械抛光 (CMP) 机理, 为改善硬质合金刀具表面质量提供理论支持。**方法** 分析硬质合金刀具材料在酸性抛光液中的化学反应, 研究硬质合金刀具材料 CMP 的化学反应机理。基于接触力学理论计算抛光垫与工件的实际接触面积和单个磨粒的实际切削面积, 在运动学分析的基础上, 建立硬质合金刀具材料 CMP 的材料去除率模型, 通过实验验证材料去除率模型的有效性。**结果** 在酸性抛光液中, 硬质合金被氧化成  $\text{Co}_3\text{O}_4$ 。当工件、抛光垫、磨粒类型、工件安装位置确定时, 材料去除率与抛光载荷、磨粒浓度和抛光盘转速有关。常用硬质合金抛光条件下, 抛光 YG8 刀具的修正系数  $K_{\text{cm}}$  为 8.53, 抛光后刀具的最低表面粗糙度能达到 48 nm, 材料去除率为 62.381 nm/min, 材料去除率的理论值和实验值的最大相对误差为 13.25%, 消除了表面缺陷, 获得了较好的镜面效果。**结论** 建立的材料去除率模型具有一定的有效性, 对硬质合金刀具材料进行化学机械抛光能消除刀具的表面缺陷, 改善表面质量。

**关键词:** 硬质合金刀具; 化学机械抛光; 机理; 化学反应; 运动轨迹; 材料去除率

**中图分类号:** TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0260-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.037

Chemical and Mechanical Polishing Mechanism of  
Cemented Carbide Tool MaterialYUAN Ju-long<sup>1,2,3</sup>, MAO Mei-jiao<sup>1,4</sup>, LI Min<sup>1,2,3</sup>, LIU Shun<sup>4</sup>, HU Zi-hua<sup>4</sup>, WU Feng<sup>4</sup>

(1.National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2.Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining for Difficult-to-Cut Material, Hunan  
University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3.Key Laboratory of Special Purpose Equipment and  
Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;  
4.Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of  
Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the chemical and mechanical polishing (CMP) mechanism of cemented carbide tool ma-

收稿日期: 2018-10-25; 修订日期: 2018-12-25

**Received:** 2018-10-25; **Revised:** 2018-12-25

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51605163); 湖南省自然科学基金 (2017JJ4055); 湖南省科技厅科技计划重点研发项目 (2016GK2014, 2017GK2050)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605163), Hunan Natural Science Foundation (2017JJ4055) and the Key Research Program of Science and Technology Supported by Hunan Provincial Science & Technology Department (2016GK2014, 2017GK2050)

**作者简介:** 袁巨龙 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工技术及装备。

**Biography:** YUAN Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision/ultra-precision machining technology and equipment.

**通讯作者:** 李敏 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密与超精密加工技术及装备。邮箱: li-min-wax@hnust.edu.cn

**Corresponding author:** LI Min (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: precision/ultra-precision machining technology and equipment. E-mail: li-min-wax@hnust.edu.cn

terial, so as to provide theoretical support for improving the surface quality of cemented carbide tool. The chemical reaction of cemented carbide tool material in acid polishing solution was analyzed and the chemical reaction mechanism of cemented carbide tool material CMP was studied. The actual contact area between polishing pad and workpiece and the actual cutting area of a single abrasive particle were calculated based on contact mechanics theory, the material removal rate model of cemented carbide tool material CMP was established on the basis of kinematics analysis, and the effectiveness of the material removal rate model was verified by experiments. In acid polishing solution, cemented carbide tool was oxidized to  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . When the workpiece, polishing pad, abrasive particle type and installation position were determined, the material removal rate was related to polishing load, abrasive particle concentration and polishing disc speed. The correction coefficient  $K_{\text{cm}}$  was 8.53 for the YG8 tools CMP under common cemented carbide polishing conditions, and the lowest surface roughness of the polished tools could reach 48 nm. At this time, the material removal rate was 62.381 nm/min and the maximum relative error between the theoretical value and the experimental value of material removal rate was 13.25%. Thus, surface defects were eliminated and good mirror effect was obtained. The material removal rate model is effective certainly, and CMP of cemented carbide tool material can eliminate the surface defects of the tool and improve surface quality.

**KEY WORDS:** cemented carbide tool; Chemical Mechanical Polishing; mechanism; chemical reaction; motion trajectory; material removal rates

硬质合金由于其具有高硬度和强度、高弹性模量、较小的热膨胀系数、良好的红硬性和耐磨性等优点, 目前已成为现代社会和新技术领域中非常重要的一种刀具材料<sup>[1-2]</sup>。但我国硬质合金刀具大部分均为中低端产品, 随着我国超高速切削加工、精密模具和工具超精密加工的发展, 对刀具质量和性能的要求日益苛刻<sup>[3]</sup>。为此, 在“十二五”和“十三五”国家科技发展规划中, 有关高性能刀具材料制备及其产品研发的重要课题, 已被列入项目申报指南和国家重点支持的高新技术领域目录, 同时也将高性能硬质合金刀具的制造列入国家优先发展的高新技术产业。加快提升国产硬质合金刀具的质量和性能, 拓展高端市场的占有率, 是我国刀具制造行业亟待攻关的热点问题。

提升硬质合金刀具质量和性能的重要手段之一是提高刀具表面质量<sup>[3]</sup>。CMP (化学机械抛光) 是一种重要的终加工方法, 能够降低工件表面粗糙度、去除表面损伤层, 获得光滑、低/无损伤表面<sup>[4-6]</sup>。有研究表明: 前刀面经过 CMP 抛光的硬质合金刀具, 其表面质量明显比磨削后的好, 且在进行切削性能实验时, 发现当切削参数相同时, 前刀面经过 CMP 抛光的硬质合金刀具的耐用度明显比磨削的高, 切削力和最大残余应力比磨削的低, 加工后的工件表面质量 (粗糙度、表面加工硬化) 明显优于磨削刀具, 表现出优越的切削性能<sup>[7-9]</sup>。但是, 由于 CMP 涉及的输入输出变量多, 且相互影响, 涉及到摩擦学、力学、材料学、化学、物理学等多个学科, 化学机械抛光机理非常复杂, 目前对 CMP 抛光硬质合金的机理研究较少, 且集中在工艺参数优化或以实验手段揭示各工艺参数对表面形貌和材料去除率的影响规律<sup>[10-11]</sup>, 因此对于实现高性能硬质合金刀具的生产制造来说, 研究 CMP 抛光硬质合金刀具材料的机理具有重要的理论和应用价值<sup>[4,6,12]</sup>。本文研究了硬质合金刀具材料 CMP

的化学反应机理和机械去除机理, 基于接触力学和运动学理论建立了硬质合金刀具材料 CMP 的材料去除率模型, 并以目前广泛应用于金属加工中的 YG8 硬质合金刀具为研究对象开展实验研究, 获得常用硬质合金抛光条件下的修正系数, 验证材料去除率模型的有效性, 为有效改善硬质合金刀具表面质量提供理论支持。

## 1 硬质合金刀具材料 CMP 抛光机理

### 1.1 抛光装置及加工原理

硬质合金刀具材料的 CMP 抛光装置如图 1 所示, 系统由抛光盘、夹具、抛光液供给装置、抛光垫组成。抛光垫与抛光盘粘接在一起, 夹具放置在抛光垫上, 用于固定工件, 并通过夹具给工件施加一定的载荷。当抛光盘旋转时, 抛光垫一起旋转, 夹具在摩擦力的作用下自转, 并带动工件一起旋转, 同时由抛光液供给装置自动向抛光垫上提供抛光液。抛光液由磨粒和抛光液组成。抛光液中的化学成分与工件发生化学反

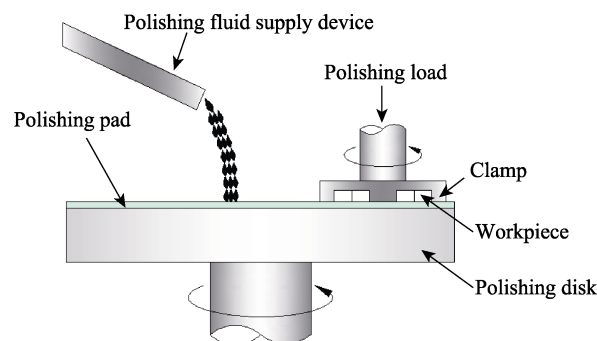


图 1 硬质合金刀具材料 CMP 装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of CMP equipment of cemented carbide tool material

应,生成易于去除的、硬度低于工件本身的软质层,抛光液中的磨粒对工件表面进行机械研磨,去除化学反应时所生成的软质层,露出工件材料的新生表面,从而再次发生化学反应。如此交替进行化学反应和研磨,最终实现被抛光工件表面平坦化。

## 1.2 化学反应机理

YG 类硬质合金的主要成分是硬质相 WC 和粘结相 Co, WC 晶粒为棱柱形,晶粒之间的邻接度高,按不规则的形状排列,粘结相 Co 填充在 WC 晶粒不连贯的边界处<sup>[13]</sup>。图 2a、c、e 为腐蚀前硬质合金刀具 YG8 的表面形貌及标记区域的波纹度,图 2b、d、

f 为双氧水浸泡 2 h 后被腐蚀的硬质合金刀具 YG8 的形貌及标记区域的波纹度。对照 a 和 b 可以看出硬质合金刀具与抛光液中的化学成分(本实验中的双氧水)发生了化学反应,表面出现了凹坑。对照图 2c 和 d、e 和 f,比较氧化前、后硬质合金刀具的三维形貌及标记区域(图 2a 和 b 中的红色直线区域)的波纹度,可以发现氧化前的表面明显比氧化后的平整。

为了找出硬质合金刀具氧化后的氧化物,采用理学 X 射线衍射仪 Ultima IV 对氧化后的刀具进行 XRD 分析,阳极靶为 Cu 靶,加速电压为 40 kV,加速电流为 40 mA。图 3 为双氧水浸泡后刀具的 XRD 衍射

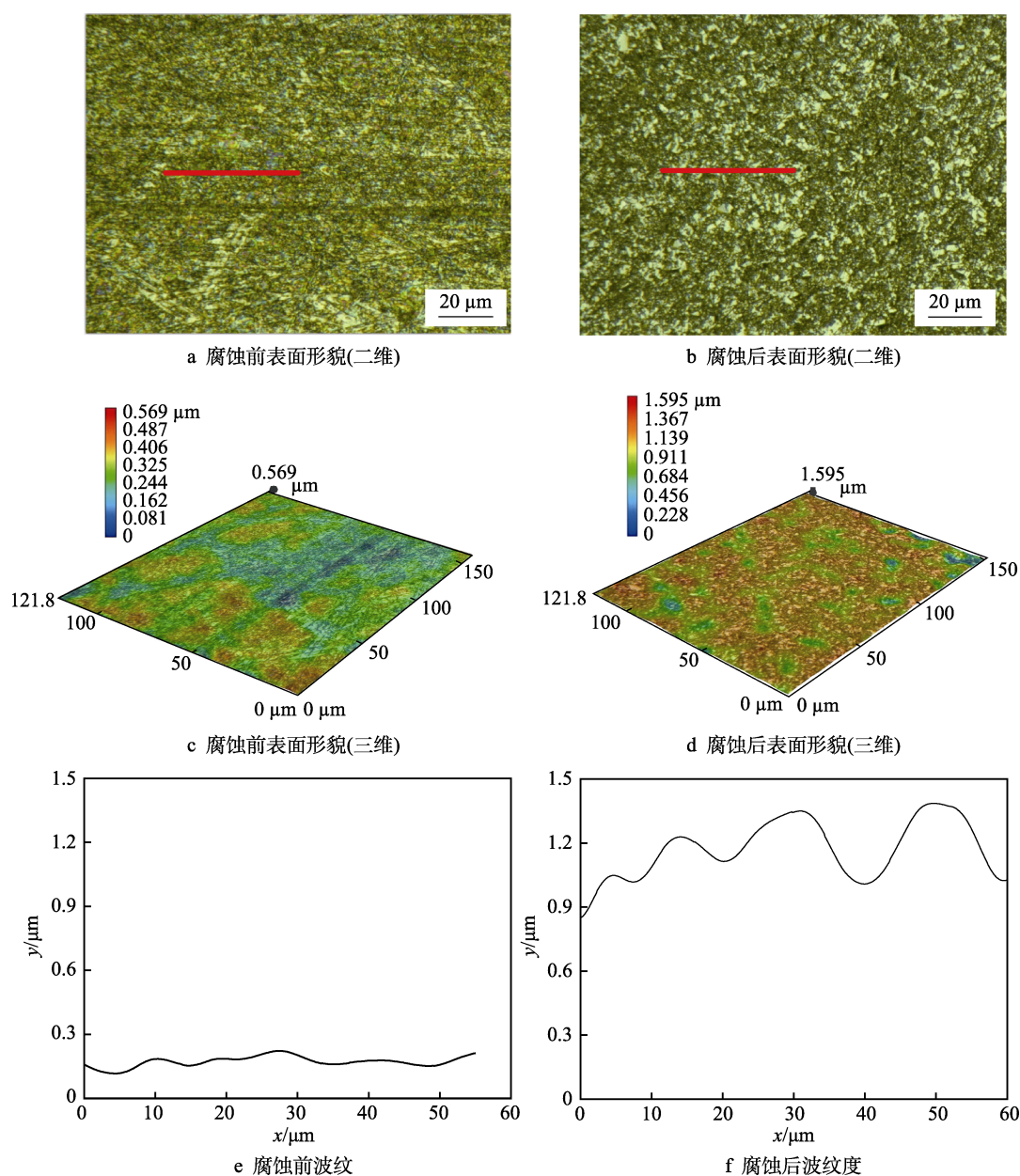


图 2 氧化前后硬质合金刀具的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of cemented carbide tool before and after oxidation: (a) surface morphology before corrosion (2D), (b) surface morphology after corrosion(2D), (c) surface morphology before corrosion(3D), (d) surface morphology after corrosion(3D), (e) corrugation before corrosion, (f) corrugation after corrosion

图谱, 从图中可以看出, 在酸性抛光液中, 粘结相 Co 水解成  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  进而被氧化成高价与氧原子结合形成成为易于溶解且易于机械去除的  $\text{Co}_3\text{O}_4$ 。从图 3 还发现刀具表面存在  $\text{WH}_x$  化合物, 其为硬质合金在氢气还原炉中烧结时生成的产物。硬质相 WC 的性质比较稳定, 在酸性条件下未发生明显的化学反应。Co 发生的化学反应为:

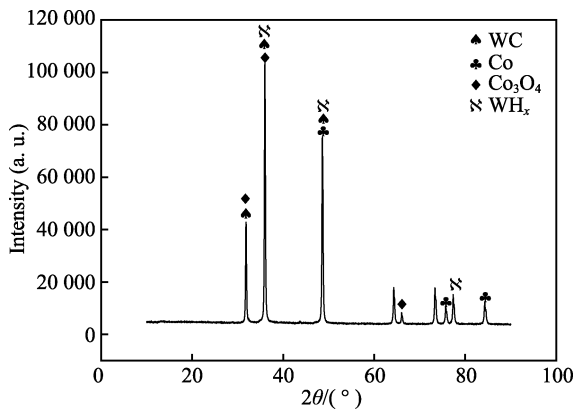
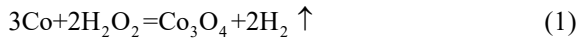


图 3 XRD 衍射图

Fig.3 XRD diffraction pattern

当对刀具表面进行 CMP 时, 抛光液中的化学成分与刀具表面发生化学反应, 生成的  $\text{Co}_3\text{O}_4$  易于溶解于抛光液中, 且易于被机械去除, 剩下的基体 WC 在没有粘结剂 Co 的作用下, 易于被磨粒和抛光垫凸峰去除, 然后露出新的工件表面。新的工作表面又再次与抛光液发生化学反应, 使得工件表面在化学氧化与机械去除的交替过程中变得平整光滑<sup>[4,7]</sup>。

### 1.3 机械去除机理

CMP 抛光工件时, 抛光液位于刀具与抛光垫之间。磨粒的一部分位于抛光垫凹槽中, 与工件表面不接触; 另一部分位于抛光垫的微凸峰上, 在抛光载荷的作用下, 磨粒嵌入抛光垫和工件表面, 使抛光垫和工件表面发生变形, 其中抛光垫发生弹性变形, 工件发生塑性变形, 由于刀具与抛光垫之间存在相对运动, 导致磨粒刮擦刀具表面, 去除工件表面材料。假设在抛光载荷  $F$  作用下微凸峰高的概率密度函数  $\phi(z)$  服从高斯分布, 预计抛光垫与工件表面发生接触的微凸峰的数量为  $N_p = \eta_p A_0 / 2$ , 其中,  $A_0$  为工件表面积,  $\eta_p$  为抛光垫微凸峰峰点密度, 单个微凸峰的变

形量  $\delta = \sqrt[3]{\frac{9F_e^2}{16R_p E_{dy}^2}}$ , 其中  $F_e$  为单个微凸峰上的载荷,

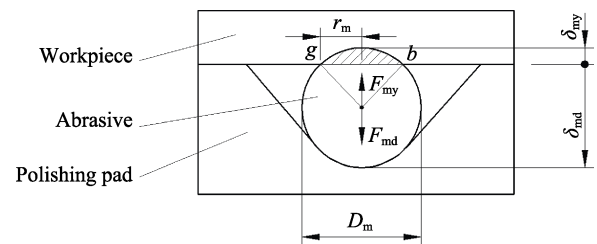
$F_e = F / N_p$ ,  $R_p$  为抛光垫微凸峰半径,  $E_{dy}$  为抛光垫和工件的综合弹性模量, 可按  $E_{dy} = E_d E_y / [E_d(1-\nu_y^2) + E_y(1-\nu_d^2)]$  进行计算,  $E_y$ 、 $E_d$  为工件和抛光垫的杨氏模量,  $\nu_y$ 、 $\nu_d$  为工件和抛光垫的泊松比<sup>[14]</sup>, 则抛光垫

与工件的实际接触面积  $A_1$  可以用式 (2) 进行计算。

$$A_1 = \pi \sqrt[3]{\frac{9R_p^2 F^2 \eta_p A_0}{32E_{dy}}} \quad (2)$$

结合硬质合金刀具材料 CMP 实际情况, 建立单个磨粒与工件表面及抛光垫表面的接触模型, 如图 4 所示<sup>[15-16]</sup>。假设磨粒为理想球形, 不考虑磨粒变形, 抛光垫变形量  $\delta_{md}$  与工件变形量  $\delta_{my}$  之和等于磨粒直径  $D_m$ , 磨粒与抛光垫之间的弹性接触力  $F_{md} = 4E_{md} \left( \frac{D_m}{2} \right)^{1/2} \frac{\delta_{md}^{3/2}}{3}$ , 工件与磨粒之间的塑性接触力  $F_{my} = 2\pi H_y r_m \delta_{my}$ , 其中  $E_{md}$  表示抛光垫与磨粒的综合杨氏模量, 按  $E_{md} = \frac{E_d E_m}{E_m(1-\nu_d^2) + E_d(1-\nu_m^2)}$  计算,  $E_m$ 、 $\nu_m$  为磨粒的杨氏模量和泊松比,  $H_y$  为工件表面材料硬度<sup>[14]</sup>。根据力平衡条件  $F_{md} = F_{my}$  得到单个磨粒的实际切削面积  $A_{sm}$  (即图中阴影部分的面积) 为:

$$A_{sm} \approx D_m^2 \left( \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 H_y^2}{2E_{md}}} + 1 \right)^{-3/2} \quad (3)$$

图 4 磨粒、工件及抛光垫表面的接触模型<sup>[17]</sup>Fig.4 Contact model among abrasive grain, workpiece and polishing pad surface<sup>[17]</sup>

利用 Nanopoli-100 型抛光机抛光工件, 如图 5 所示, 其中  $O$  为抛光垫中心,  $O_1$  和  $O_2$  为夹具中心,  $O_3$  为工件中心。抛光垫上安装有 2 个夹具, 每个夹具上均匀对称放置三个工件 (图 5a)。磨粒在离心力的作用下, 均匀分布在抛光垫的圆周上, 如图 5b 所示, 磨粒跟随抛光垫一起旋转, 同时在离心力的作用下沿径向移动。为了清晰地分析与表达, 工件按放大比例绘制 (图 5c)。抛光垫绕  $O$  点以角速度  $\omega_d$  旋转, 夹具在摩擦力的作用下分别绕  $O_1$  和  $O_2$  以  $\omega_y$  的角速度自转。假设在某一时刻磨粒在  $P$  点与工件接触, 该磨粒划过工件后由抛光液带走, 磨粒与工件接触的时间  $t_1 = 2\theta / \omega_y$ 。在同一时间, 有多个磨粒与工件接触, 当上一个磨粒在  $P$  点与工件接触时, 经过  $\Delta t$  后, 磨粒间隔为  $\Delta d$  的下一个磨粒运动到  $P$  点,  $\Delta t = \frac{\Delta d}{\omega_d R}$ 。

在半径为  $R$  的圆周上有许多相距  $\Delta d$  的磨粒同时与工件接触, 在  $\Delta t$  时间内, 磨粒在抛光垫上的运动轨迹连接在一起, 构成的曲线即为上一个磨粒在时间  $t_1$  内



划过工件的轨迹。从与工件接触开始,经过时间 $t_1$ 后,位于 $R$ 圆周上的所有的点划过工件的轨迹长度均相

同,可简化为分析 $R$ 圆周上且位于 $X$ 轴上的点 $P'$ 在工件上的运动轨迹。

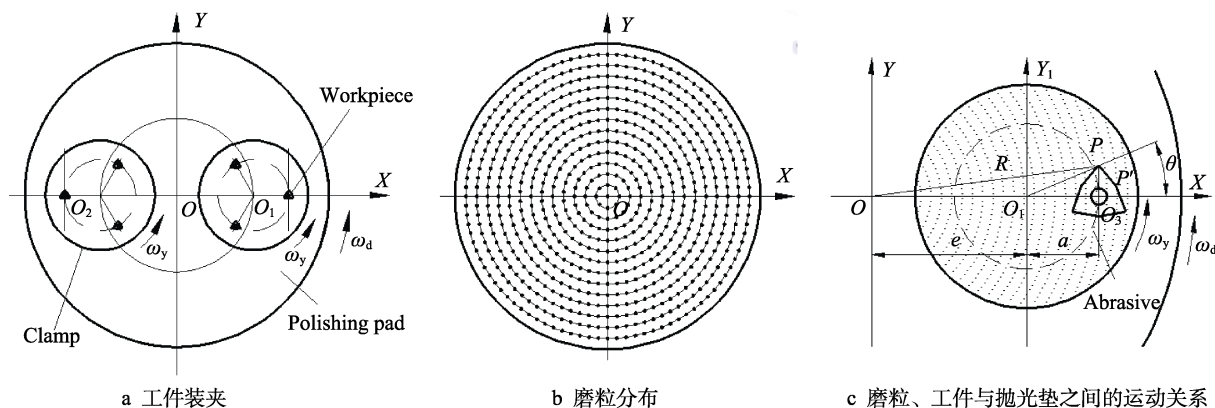


图5 利用 Nanopoli-100 型抛光机抛光工件的示意图

Fig.5 Diagram of workpiece polished by Nanopoli-100 polishing machine: (a) workpiece clamping, (b) abrasive distribution, (c) motion relationship among abrasive, workpiece and polishing pad

工件跟随夹具一起自转,假设某一时刻磨粒在 $P'$ 点与工件接触, $P'$ 点随着抛光垫以角速度 $\omega_d$ 旋转, $a$ 为夹具与工件的中心距,则 $P'$ 在 $XO_1Y_1$ 坐标系中的运动方程为:

$$\begin{cases} x_{P'} = R \cos \omega_d t - e \\ y_{P'} = R \sin \omega_d t \end{cases} \quad (4)$$

夹具以角速度 $\omega_y$ 旋转,在 $t$ 时刻夹具绕 $O_1$ 转过角度 $\varphi$ , $\varphi = \omega_y t$ ,此时 $P'$ 点在工件表面的运动方程为:

$$\begin{cases} x_{P'}' = x_{P'} \cos \varphi - y_{P'} \sin \varphi = R \cos(\omega_d t + \omega_y t) - e \cos \omega_y t \\ y_{P'}' = x_{P'} \sin \varphi + y_{P'} \cos \varphi = R \sin(\omega_d t + \omega_y t) - e \sin \omega_y t \end{cases} \quad (5)$$

该磨粒在工件表面运动轨迹的长度为 $L_i = \int_0^{t_i} \sqrt{dx_{P'}'^2 + dy_{P'}'^2}$ ,该积分无解析解,进行简化计算可得算式<sup>[18]</sup>:

$$L_i = \left\{ R(\omega_d + \omega_y) + e\omega_y - \frac{Re\omega_d^2(\omega_d + \omega_y)\theta^2}{24\omega_y[e\omega_y + R(\omega_d + \omega_y)]} \right\} \frac{2\theta}{\omega_y} \quad (6)$$

由公式(6)可以看出,磨粒在工件表面运动轨迹的长度与该磨粒到抛光垫中心的距离 $R$ 有关,考虑到硬质合金刀具的外形,当刀具按图5c所示固定在夹具上时,刀具关于过 $O_3$ 点垂直于 $X$ 轴的直线对称,且磨粒在抛光垫上均匀分布,因此,为了简化计算可以选取平均值 $R = e + a$ 。假设磨粒均匀分布在抛光垫表面,单位面积的磨粒数为 $N_s$ , $C_m$ 为抛光液磨粒浓度(质量分数), $\rho_f$ 为抛光液密度, $\rho_m$ 为磨粒密度,则有 $N_s = \frac{6\rho_f C_m}{\pi\rho_m D_m^2}$ ,抛光垫上参与去除工件材料的有

效磨粒数为 $N_m = N_s A_l = \frac{6\rho_f C_m}{\pi\rho_m D_m^2} \sqrt{\frac{9R_p^2 F^2 \eta_p A_0}{32E_{dy}}}$ 。在抛光时间 $t_p$ 内参与材料去除的有效磨粒在工件表面划过的轨迹长度总和可以按式(7)进行计算:

$$L_m = \frac{6\rho_f C_m}{\rho_m D_m^2} \sqrt{\frac{9R_p^2 F^2 \eta_p A_0}{32E_{dy}}} \left\{ (e+a)(\omega_d + \omega_y) + e\omega_y - \frac{(e+a)e\omega_d^2(\omega_d + \omega_y)\theta^2}{24\omega_y[e\omega_y + (e+a)(\omega_d + \omega_y)]} \right\} t_p \quad (7)$$

工件CMP抛光材料去除率指单位时间内工件

表面厚度的减少量,材料去除率 $R_{MR} = \frac{L_m A_{sm}}{A_0 t_p}$ ,考虑到在CMP中,化学作用对材料去除率的影响很大,且在以上推导中基于一些假设条件,为了较准确地预测工件化学机械抛光时的材料去除率,加入修正系数 $K_{cm}$ ,将公式(3)和(7)代入并化简得到材料去除率为:

$$R_{MR} = \frac{L_m A_{sm}}{A_0 t_p} = K_1 K_{cm} C_m F^{2/3} \left\{ (e+a)\omega_d + (2e+a)\omega_y - \frac{(e+a)e\omega_d^2(\omega_d + \omega_y)\theta^2}{24\omega_y[(2e+a)\omega_y + (e+a)\omega_d]} \right\} \quad (8)$$

其中, $K_1$ 是与抛光垫、工件、抛光液特性有关的

常数, $K_1 = \frac{12\pi\rho_f \times 10^{-6}}{\rho_m} \left( \sqrt{\frac{9\pi^2 H_y^2}{2E_{md}}} + 1 \right)^{-3/2} \left( \frac{9R_p^2 \eta_p}{32E_{dy} A_0^2} \right)^{1/3}$ ,

$K_{cm}$ 是修正系数,通过实验数据拟合得到。公式(8)虽然是基于YG8刀具推导,但是其适用于所有工件外形对称的硬质合金刀具。

## 2 实验

### 2.1 常用工艺参数下的修正系数 $K_{cm}$

修正系数 $K_{cm}$ 与磨粒、抛光液和抛光垫的特性等因素有关,目前硬质合金刀具CMP时常选用聚氨酯抛光垫,磨粒为 $Al_2O_3$ ,氧化剂为 $H_2O_2$ ,本实验拟获取该工艺参数下的修正系数 $K_{cm}$ 。工件选用株洲钻

石切削刀具股份有限公司生产的 YG8 刀具，在 Nanopoli-100 型抛光机上，25 ℃ 的环境温度中进行实验，抛光时间  $t_p$  为 45 min。选取抛光盘速度  $n_d$ （ $n_d = 30\omega_d/\pi$ ）、抛光载荷  $F_t$  和浓度  $C_m$  三个工艺参数

设计三因素两水平实验方案，摩擦力带动夹具旋转，夹具速度  $n_y = 30\omega_y/\pi$  现场测量得到。通过计算得到  $E_{dy} = 27.47$  MPa， $K_1 = 1.2685 \times 10^{-9}$ ， $\theta = 0.1358$  rad，。其他基本参数如表 1 所示。

表 1 基本参数  
Tab.1 Basic parameters

Tool				Polishing pad					
$E_y/\text{MPa}$	$H_y/\text{MPa}$	$v_y$	$A_0/\text{mm}^2$	Type	$E_d/\text{MPa}$	$v_d$	$\sigma_p/\mu\text{m}$	$\eta_p/\text{mm}^{-2}$	$R_p/\mu\text{m}$
$590 \times 10^3$	$1.64 \times 10^3$	0.32	144.43	JZMP0402	25	0.3	9.4	550	40
Abrasive particle				Polishing solution					
Type	$C_m$	$E_m/\text{MPa}$	$v_m$	$\rho_m/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_l/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Constituent components	$e/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12.5%	$310 \times 10^3$	0.27	3.98	1.125	$\text{H}_2\text{O}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$	75	35	

材料去除率的实验值  $R_{\text{MReX}} = \frac{(M_0 - M_1) \times 10^9}{\rho_y A_0 t_p}$ ，其中  $M_0$  和  $M_1$  是抛光前后刀具的质量， $\rho_y$  为硬质合金刀具的密度， $\rho_y = 14.7$  g/cm。  $R_{\text{MRth}}$  按照公式（8）计算，修正系数  $K_{\text{cm}} = R_{\text{MReX}} / R_{\text{MRth}}$ 。工件初始表面粗糙度  $Ra$  为 137 nm，磨粒直径为 2  $\mu\text{m}$ ，实验数据及结果如表 2 所示，对 8 个修正系数求取平均值得到修正系数  $K_{\text{cm}} = 8.53$ 。

表 2 三因素两水平抛光实验方案及结果  
Tab.2 Polishing experiment scheme and result of three factors and two levels

No.	$n_d / (\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$F/\text{N}$	$C_m/\%$	$R_{\text{MReX}}/(\text{nm}\cdot\text{min}^{-1})$	$R_{\text{MRth}}/(\text{nm}\cdot\text{min}^{-1})$	$K_{\text{cm}}$
1	50	14	10	36.634	3.985	9.19
2	70	14	10	37.035	4.150	8.93
3	50	28	10	52.334	6.326	8.27
4	70	28	10	61.331	6.587	9.31
5	50	14	12.5	43.358	4.981	8.70
6	70	14	12.5	45.685	5.187	8.81
7	50	28	12.5	55.394	7.907	7.01
8	70	28	12.5	66.241	8.234	8.05

2.2 实验与分析

为了验证材料去除率模型的正确性，在适用参数范围内随机选取工艺参数进行实验，工件初始的表面粗糙度  $Ra$  为 137 nm，磨粒直径为 2  $\mu\text{m}$ ，磨粒浓度（质量分数）为 10%，实验设备、环境和基本参数以及理论值  $R_{\text{MRth}}$  与实验值  $R_{\text{MReX}}$  的计算均与 2.1 节中的相同。理论值  $R_{\text{MRth}}$  与实验值  $R_{\text{MReX}}$  的相对误差  $D_{\text{av}} = \frac{|R_{\text{MRth}} - R_{\text{MReX}}|}{R_{\text{MReX}}} \times 100\%$ 。

表 3 为工艺参数与实验结果，可以看出，抛光后

刀具的最低表面粗糙度能达到 48 nm，此时的材料去除率为 62.381 nm/min。材料去除率的理论值和实验值的最大相对误差为 13.25%，说明所建立硬质合金刀具前刀面 CMP 的材料去除率模型具有一定的有效性。

表 3 工艺参数与实验结果  
Tab.3 Process parameters and experiment results

No.	$n_d / (\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$F_t/\text{N}$	$C_m/\%$	$Ra/\text{nm}$	$R_{\text{MRth}}/(\text{nm}\cdot\text{min}^{-1})$	$R_{\text{MReX}}/(\text{nm}\cdot\text{min}^{-1})$	$D_{\text{av}}/\%$
1	40	28	10	78	54.190	47.85	13.25
2	50	28	10	65	54.0459	49.455	9.28
3	60	28	10	58	55.6226	52.334	6.28
4	70	28	10	64	56.2774	61.331	8.24
5	60	28	7.5	80	41.717	47.1	11.43
6	60	28	12.5	48	69.5283	62.381	11.46
7	60	35	15	56	83.4339	78.091	6.84
8	60	14	10	82	34.0009	36.634	7.19
9	60	21	10	50	44.5537	48.67	8.46
10	60	28	10	68	68.2483	64.685	5.51

如图 6 所示，当抛光盘转速升高时，单位时间内参与材料去除的有效磨粒数量增加，材料去除率随着抛光盘转速的上升而增大；磨粒浓度越大，单位体积的磨粒数越多，参与材料去除的有效磨粒数量也越多，材料去除率越大，材料去除率与磨粒浓度是线性关系；载荷增大时，抛光垫微凸峰的变形量大，抛光垫与工件表面的实际接触面积大，则实际参与材料去除的有效磨粒数增加，材料去除率大，材料去除率与载荷的 2/3 次方成正比。

使用超景深显微镜观察抛光前后的表面形貌，如图 7 所示，抛光前的表面比较粗糙，存在大量表面划痕缺陷。经过 CMP 抛光后，发现表面变得光滑、平整，消除了几乎所有表面缺陷，提高了表面光洁度，明显改善了工件表面质量。

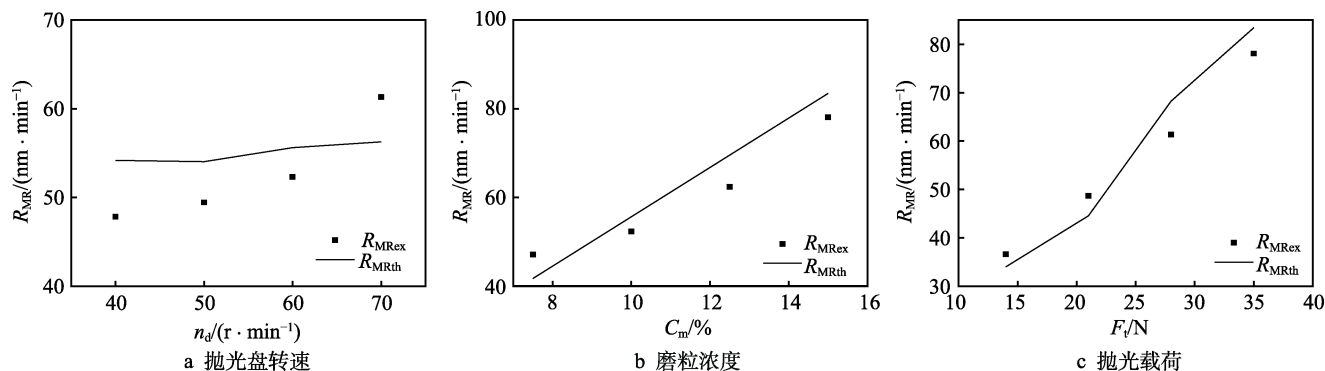


图6 工艺参数对材料去除率的影响

Fig.6 Influence of process parameters on material removal rate:  
(a) rotating speed of polishing disc, (b) abrasive particle concentration, (c) polishing load

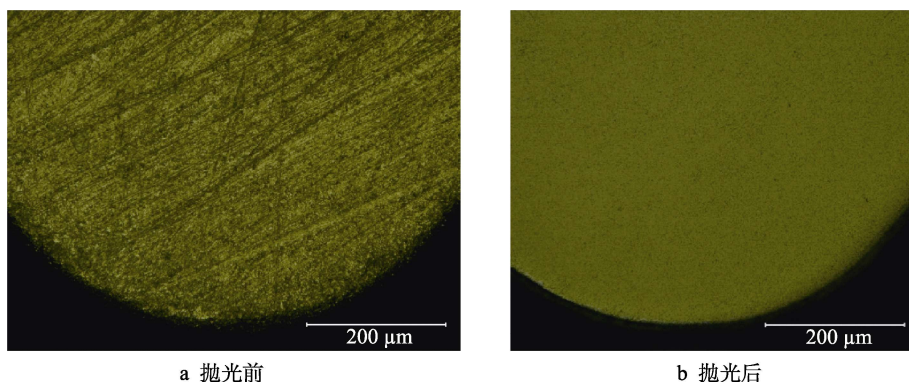


图7 硬质合金刀具的表面微观形貌

Fig.7 Surface topography of cemented carbide tool: (a) before polishing, (b) after polishing

### 3 结语

1) 在酸性抛光液中, 硬质合金中的粘结相 Co 被氧化成易于溶解和易于机械去除的  $Co_3O_4$ , 基体 WC 在没有粘结剂 Co 的作用下, 易于被磨粒和抛光垫凸峰去除, 使工件表面在化学氧化与机械去除的交替过程中变得平整光滑。

2) 基于接触力学和运动学理论建立了外形对称的硬质合金刀具材料 CMP 的材料去除率模型, 该模型表明在 CMP 过程中, 当工件、抛光垫、磨粒类型、工件安装位置确定时, 材料去除率与抛光载荷的  $2/3$  次方成正比, 与磨粒浓度成正比, 随抛光盘转速升高而增大, 且随着速度的升高, 材料去除率的增大速率更快。

3) 通过实验获得了硬质合金抛光常用工艺条件 ( $H_2O_2$  氧化剂、 $Al_2O_3$  磨粒和聚氨脂抛光垫) 下抛光 YG8 刀具的修正系数  $K_{cm}=8.53$ 。在 Nanopoli-100 型抛光机上对 YG8 前刀面进行 CMP 抛光实验, 发现抛光后最低表面粗糙度能达到 48 nm, 此时的材料去除率为 62.381 nm/min, 消除了几乎所有表面缺陷, 改善了工件表面质量。材料去除率理论值和实验值的最大相对误差为 13.25%, 表明建立的硬质合金刀具材料 CMP 的材料去除率模型具有一定的有效性。

### 参考文献:

- [1] ZHANG W, LIU X, CHEN Z, et al. Latest development of WC-Co cemented carbide[J]. Chinese journal of rare metals, 2015, 39: 178-186.
- [2] UHLMANN E, REIMERS W, BYRNE F, et al. Analysis of tool wear and residual stress of CVD diamond coated cemented carbide tools in the machining of aluminum silicon alloys[J]. Production engineering, 2010, 4(2-3): 203-209.
- [3] 陈明, 安庆龙, 刘志强. 高速切削技术基础与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [4] CHEN Ming, AN Qing-long, LIU Zhi-qiang. Foundation and application of high speed cutting technology[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012.
- [5] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- [6] YUAN Ju-long, ZHANG Fei-hu, DAI Yi-fan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [7] LI M, LYU B H, YUAN J L, et al. Evolution and equivalent control law of surface roughness in shear-thickening polishing[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2016, 108: 113-126.
- [8] 李敏, 袁巨龙, 吴喆, 等. 复杂曲面零件超精密加工方

- 法的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015(5): 178-191.
- LI Min, YUAN Ju-long, WU Zhe, et al. Progress in ultra-precision machining methods of complex curved parts[J]. Journal of mechanical engineering, 2015(5): 178-191.
- [7] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海, 等.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的剪切增稠抛光[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 193-200.
- LI Min, YUAN Ju-long, LYU Bing-hai, et al. Shear-thickening polishing of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(9): 193-200.
- [8] 潘旻. CMP 抛光硬质合金刀片的切削性能试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- PAN Yang. Experimental study on the cutting performance of CMP polished cemented carbide blade[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [9] LI M, LYU B H, YUAN J L, et al. Shear-thickening polishing method[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2015, 94: 88-99.
- [10] 毛美姣, 吴锋, 胡自化. 抛光垫特性对硬质合金刀片 CMP 加工效果的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 270-276.
- MAO Mei-jiao, WU Feng, HU Zi-hua. Effects of polishing pad characteristics on CMP (chemical mechanical polishing) result of cemented carbide tool[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 270-276.
- [11] 彭姣. 硬质合金刀片 CMP 抛光机理及工艺参数决策研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- PENG Jiao. Study on the polishing mechanism and process parameter decision of CMP polished cemented carbide blade[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [12] FORSBERG M. Effect of process parameters on material removal rate in chemical mechanical polishing of Si(100) [J]. Microelectronic engineering, 2005, 77(3): 319-326.
- [13] 李宁, 龙坚战, 周永贵, 等. 超细 WC-Co 硬质合金的组织与性能特征[J]. 硬质合金, 2005, 22(2): 107-111.
- LI Ning, LONG Jian-zhan, ZHOU Yong-gui, et al. Structure and performance features of ultra-fine WC-Co cemented carbides[J]. Cemented carbide, 2005, 22(2): 107-111.
- [14] 布尚 B. 摩擦学导论[M]. 葛世荣译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- BHUSHAN B. Introduction to tribology[M]. GE Shi-rong translated. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [15] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surface [J]. Proceedings of the royal society of London, 1996, 295(1442): 300-319.
- [16] ZHAO D, HE Y, WANG T, et al. Effect of kinematic parameters and their coupling relationships on global uniformity of chemical-mechanical polishing[J]. IEEE transactions on semiconductor manufacturing, 2012, 25(3): 502-510.
- [17] ZHAO Y, CHANG L. A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers[J]. Wear, 2002, 252(3): 220-226.
- [18] 苏建修. IC 制造中硅片化学机械抛光材料去除机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- SU Jian-xiu. Study on material removal mechanism of wafer chemical mechanical polishing in IC manufacturing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.