

混合磨料柔性抛光工具加工碳化钨合金性能研究

赵嘉辰¹, 许永超¹, 何嘉峰¹, 陈丙三², 石洋¹, 王乾廷³

(1. 福建理工大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

3. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 使用 SiO₂、金刚石、SiO₂/金刚石混合磨料制备半固结柔性抛光盘对碳化钨合金抛光, 用去离子水作为抛光液避免污染。基于抛光盘柔性基体的力学特性, 探究了不同种类磨料对碳化钨试样的抛光性能, 分析了加工后的表面质量。结果表明: 使用 $w_{\text{SiO}_2}/w_{\text{金刚石}} = 2:3$ 的混合磨料抛光盘加工后, 试样表面粗糙度降至 0.007 μm , 降低了 96%, 表面深划痕和凹坑被有效去除, PV 值为 0.17 μm , 相较于使用单一 SiO₂、金刚石磨料抛光盘加工后的试样表面, PV 值分别降低了 81%、64%。

关键词: 钨合金; 柔性抛光; 半固结抛光盘; 表面形貌; 混合磨料

中图分类号: TH161; TG58 文献标志码: A 文章编号: 2097-3853(2025)04-0402-07

Study on performance of tungsten carbide alloy processed by mixed abrasive flexible polishing tools

ZHAO Jiachen¹, XU Yongchao¹, HE Jiafeng¹, CHEN Bingsan², SHI Yang¹, WANG Qianting³

(1. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Semi-solidified flexible polishing discs are prepared for polishing tungsten carbide alloys by using SiO₂, diamond, and SiO₂/diamond mixed abrasives, and deionized water is used as the polishing solution to avoid contamination. Based on the mechanical properties of the flexible substrate of polishing discs, the polishing performance of tungsten carbide specimens with different kinds of abrasives was investigated, and the surface quality after processing was analyzed. Results show that: after the use of a mixed abrasive disc polishing with $w_{\text{SiO}_2}/w_{\text{diamond}} = 2:3$, the surface roughness of the sample is reduced to 0.007 μm , and that is a reduction of 96%, the surface deep scratches and pits are effectively removed, and the PV value is 0.17 μm . Compared with the sample surface after the use of a single SiO₂ and diamond abrasive disc polishing, PV values are reduced by 81% and 64%, respectively.

Keywords: tungsten alloy; flexible polishing; semi-fixed polishing discs; surface morphology; mixed abrasives

在钨合金抛光过程中, 磨料是影响加工后工件表面质量的关键因素, 钨合金抛光方法所使用的磨料可分为游离磨料与固结磨料^[1-4]。史晓

琳^[5]使用游离 SiO₂ 磨料对钨合金进行 CMP (chemical mechanical polishing, CMP) 抛光试验。徐成宇等^[6]使用金刚石固结磨料抛光工具对钛

收稿日期: 2024-07-25

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52275413); 福建省自然科学基金资助项目(2023J01342); 福建省科技计划项目(2023T3060)

第一作者简介: 赵嘉辰(1997—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向: 硬脆性材料精密加工。

通信作者: 许永超(1986—), 男, 河南新乡人, 副教授, 博士, 研究方向: 高效精密加工技术与装备。

合金叶片进行抛光,加工后钛合金叶片正面平均粗糙度下降到 $0.225\ \mu\text{m}$,叶背的平均粗糙度下降至 $0.249\ \mu\text{m}$ 。林晓婷^[7]将金刚石磨料与羰基铁粉混合作为磁流变抛光液,对碳化钨进行磁流变抛光,抛光 90 min 后钨合金表面粗糙度达到了 25 nm。袁巨龙^[8]使用 Al_2O_3 磨料对钨合金刀片表面进行化学机械抛光,加工后刀片表面粗糙度由 $0.137\ \mu\text{m}$ 降至 $0.048\ \mu\text{m}$ 。游离磨料轨迹不固定以及固结磨料的出刃高度不均等问题都会对工件的表面质量造成影响,合适的抛光方法及优化磨料的使用尤为重要。

半固结磨料是一种新的加工方法,其使用的柔性结合剂能使磨粒在一定范围内运动又受到约束,磨粒保持一致的出刃高度,抛光后样品的表面质量较好。Chen Lin 等^[9]使用金刚石、 Al_2O_3 磨料制作软硬复合抛光工具抛光蓝宝石晶圆,相比于传统抛光盘,软硬复合抛光盘加工后晶圆面型精度提升了 54.1%。Hailang Wen 等^[10]使用 SG 技术制备了单一金刚石半固结抛光垫和金刚石/氧化铜混合磨料半固结抛光盘,加工初始粗糙度为 80 nm 的单晶金刚石衬底,加工后衬底表面粗糙度分别降至 9.23 nm 和 8.70 nm。目前尚未检索到有关钨合金半固结精密抛光加工性能研究的报道。本文分别使用 SiO_2 、金刚石、以及 SiO_2 /金刚石混合磨料,制备两种单一磨料柔性抛光盘以及磨料含量不同的 SiO_2 /金刚石混合磨料柔性抛光盘加工碳化钨试样。探究不同磨料的半固结抛光盘对碳化钨试样加工性能的影响。

1 实验部分

1.1 柔性抛光盘的制备与力学性能检测

实验所用抛光工具为自制半固结柔性抛光盘,分别使用平均粒径为 $3\ \mu\text{m}$ 的金刚石与 80 nm 的 SiO_2 作为磨料与型号为 2112 的热固性不饱和树脂混合,置于搅拌机中依次加入促进剂与固化剂充分搅拌均匀,使用自动刮膜机将搅拌后的混合溶液均匀涂敷在无纺布抛光盘上静置充分固化,制得半固结柔性抛光盘。金刚石与 SiO_2 磨料形貌如图 1 所示。本文制备两种单一磨料抛光盘及 3 种磨料含量不同的混合磨料抛光盘对碳化钨试样进行加工,抛光盘磨料的含量如表 1 所示。

使用邵氏硬度计与电子万能试验机检测所制备抛光盘的硬度和弹性模量。

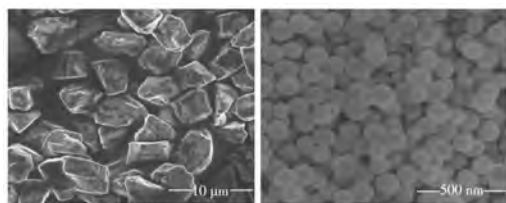


图 1 金刚石与 SiO_2 磨料微观形貌

Fig.1 Micro-morphology of diamond and SiO_2 abrasives

表 1 不同抛光盘磨料含量

Tab.1 Abrasive content of different polishing discs

磨料含量	SiO_2 磨料	金刚石 磨料	混合磨料 A	混合磨料 B	混合磨料 C
w_{SiO_2}	5	0	1	2	3
$w_{\text{金刚石}}$	0	5	4	3	2

1.2 碳化钨抛光实验

加工选用直径为 $(18 \pm 0.1)\ \text{mm}$,厚度为 $(3 \pm 0.05)\ \text{mm}$ 的圆片状碳化钨试样,使用 SiO_2 、金刚石、 SiO_2 /金刚石磨料制成的柔性半固结抛光盘、去离子水作为抛光液,在全自动压力抛光机上对碳化钨试样抛光。碳化钨试样与磨料的莫氏硬度如图 2 所示。抛光参数设置为:压力 1 kg,工件转速 50 r/min,抛光盘转速为 60 r/min,抛光时间设定为 90 min。在抛光前,碳化钨试样在去离子水和无水乙醇中进行多次超声波清洗,以去除表面的污染物,抛光后用去离子水和乙醇在超声下反复清洗试样并干燥。

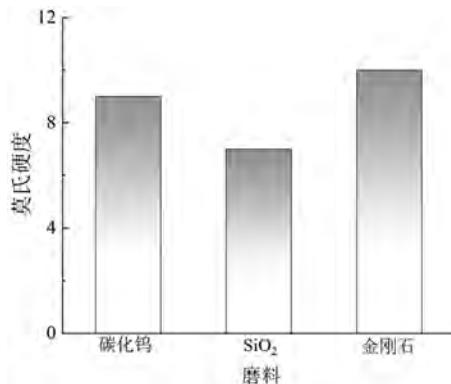


图 2 碳化钨试样与磨料的莫氏硬度

Fig.2 Mohs hardness of tungsten carbide specimens and abrasives

加工前后分别使用光学显微镜、白光干涉仪、扫描电镜检测工件的表面形貌,使用接触式表面

粗糙度仪测量试样的表面粗糙度,在每个碳化钨试样上选取 5 个不同位置,测量表面粗糙度并计算平均值,具体取样点如图 3 所示。

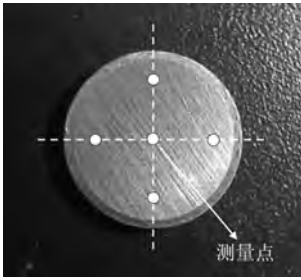


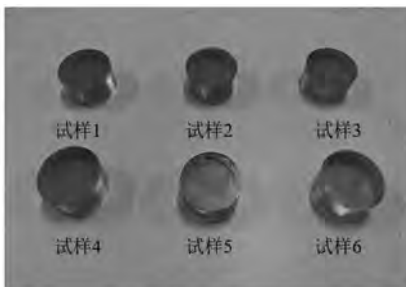
图 3 碳化钨试样表面粗糙度测量点

Fig.3 Surface roughness measurement points

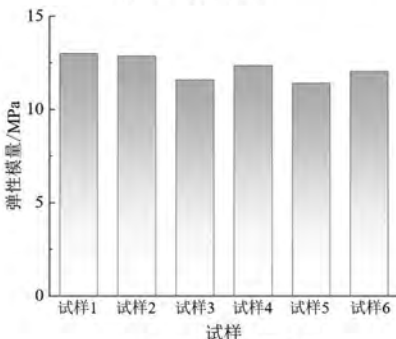
2 结果和分析

2.1 抛光盘力学性能

本文使用的结合剂弹性模量如图 4 所示,6 个相同标准的结合剂试样在电子万能试验机上进行压缩试验,测量结果取平均值,测量结果略有波动,整体平均弹性模量稳定在 12 MPa 左右。柔性结合剂制成的抛光盘其较低的弹性模量可使磨料在抛光压力作用下发生弹性退让,从而减小磨料对试样表面的刻入深度,加工后不会在工件表面造成较深的划痕,可以获得更好的表面质量。



(a) 弹性测试试样

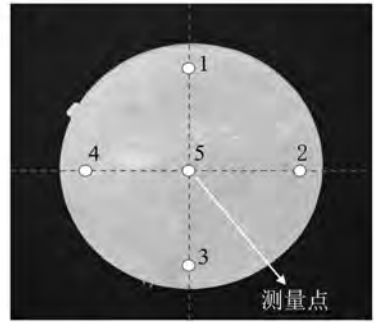


(b) 不同试样弹性模量

图 4 抛光盘的弹性模量

Fig.4 Modulus of elasticity of polishing discs

抛光盘的邵氏硬度值如图 5 所示。对抛光盘表面边缘及中心 5 个不同点位进行硬度测试,最终测得平均邵氏硬度为 42。抛光盘较低的邵氏硬度在加工时磨料发生弹性退让,从而磨料出刃高度达到一致,对试样表面加工的更加均匀,可以获得更优的表面粗糙度,有效降低表面损伤。



(a) 表面测量点

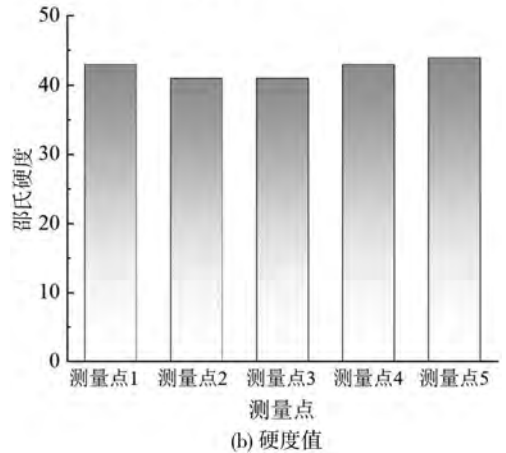


图 5 抛光盘的邵氏硬度

Fig.5 Shore hardness of polishing discs

2.2 不同磨料抛光盘加工碳化钨的性能表现

不同磨料抛光盘加工碳化钨试样的表面粗糙度如图 6 所示,光学显微镜下试样加工前后的表面形貌如图 7 所示。从图 7(a)中可以看到,加工前试样表面遍布划痕平整度差,部分划痕较深且表面存在细微孔洞和凹坑,表面粗糙度为 0.175 μm 。使用单一 SiO_2 磨料柔性抛光盘加工后试样表面如图 7(b)所示,划痕并未被有效去除,表面粗糙度下降至 0.141 μm ,相较加工前下降了 19.5%。

使用单一金刚石磨料柔性抛光盘加工试样时,加工前试样的表面粗糙度为 0.167 μm ,加工后表面粗糙度下降到 0.015 μm ,较加工前下降了 91%。加工后的试样表面如图 7(c)所示,试样表面平整度有明显改善,但表面仍留有些许较细微划痕。

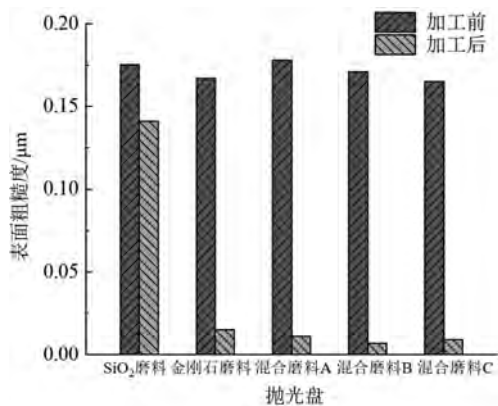


图 6 不同磨料抛光盘加工试样前后表面粗糙度

Fig.6 Surface roughness of specimens before and after processing with different abrasive polishing discs

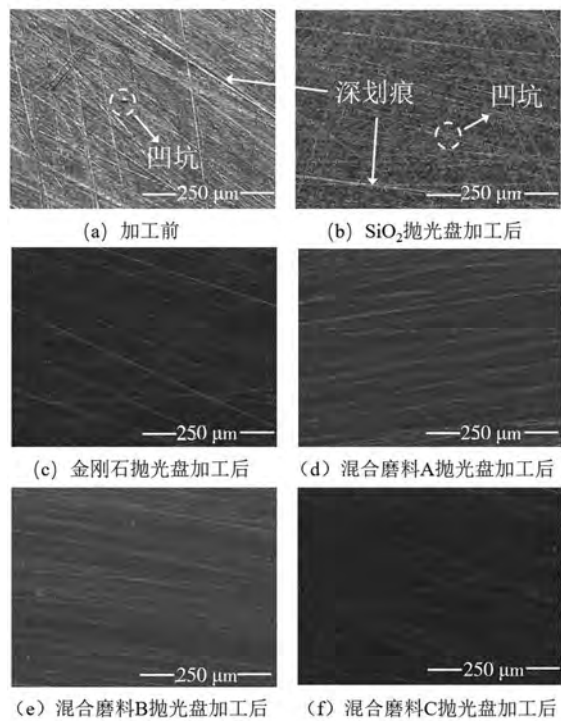


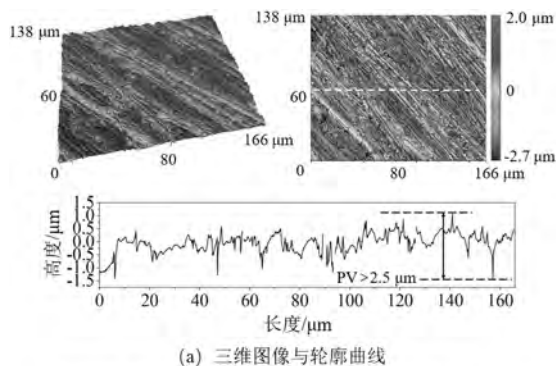
图 7 加工前后碳化钨的表面形貌

Fig.7 Surface morphology of tungsten carbide before and after processing

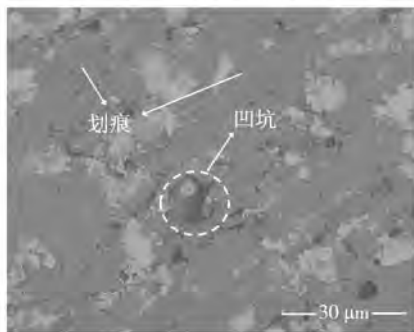
使用不同混合比例的 SiO₂/金刚石混合磨料抛光盘加工碳化钨,加工后的表面形貌如图 7(d) - (f)所示。混合磨料 A 抛光盘加工碳化钨试样的表面形貌如图 7(d)所示,加工后表面粗糙度为 0.011 μm,较加工前下降了 93%。混合磨料 B 抛光盘加工后试样表面形貌如图 7(e)所示,表面粗糙度降至 0.007 μm,相比加工前下降了 96%。混合磨料 C 抛光盘加工后的试样表面形貌如图 7

(f)所示,表面粗糙度下降至 0.009 μm,较加工前下降了 95%。由上述结果可知,使用混合磨料 B 抛光盘加工后的表面粗糙度达到最低,表面划痕和凹陷也被有效去除。

使用白光干涉仪及扫描电镜检测加工前的碳化钨试样表面,检测结果如图 8 所示。由图 8(a)中三维图像和轮廓曲线可知,加工前的试样表面平整度差且粗糙度较高,检测区域最高峰值为 2.0 μm,最低峰值为 -2.7 μm,表面轮廓曲线 PV 值大于 2.5 μm。图 8(b)的扫描电镜结果显示未加工的碳化钨表面遍布划痕及凹坑,且存在高低不平的表面凸起。



(a) 三维图像与轮廓曲线



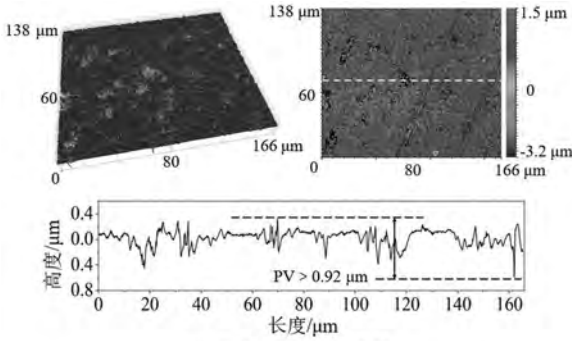
(b) SEM扫描图像

图 8 碳化钨试样加工前表面形貌

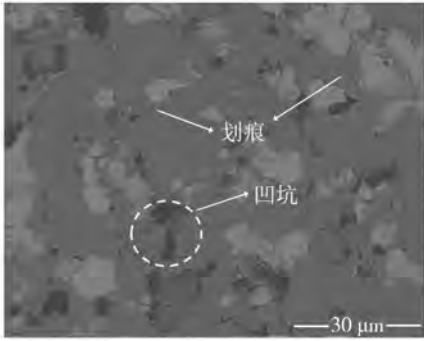
Fig.8 Surface morphology of tungsten carbide specimen before processing

单一 SiO₂ 磨料抛光盘加工后试样表面三维图像及表面形貌如图 9 所示。由图 9(a)可知,加工后的表面平整度仍然较差,表面最高峰值为 1.5 μm,最低峰值为 -3.2 μm,表面轮廓曲线 PV 值大于 0.92 μm。加工后试样表面的 SEM 结果如图 9(b)所示,加工后试样表面较细微的划痕被去除,但仍有较多的深划痕和凹坑残留,这是由于 SiO₂ 磨料的莫氏硬度为 7,远低于莫氏硬度为 9 的碳化钨,对试样表面的材料去除能力较弱,无法

有效去除划痕和凹坑。



(a) 三维图像与轮廓曲线

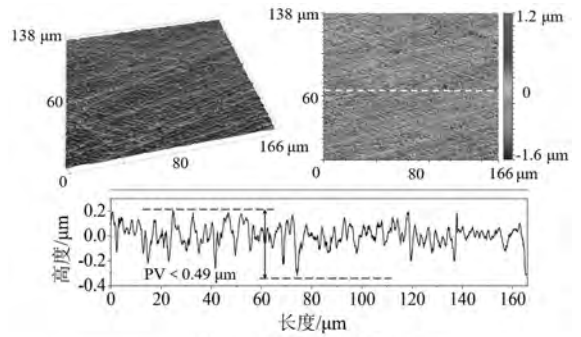


(b) SEM扫描图像

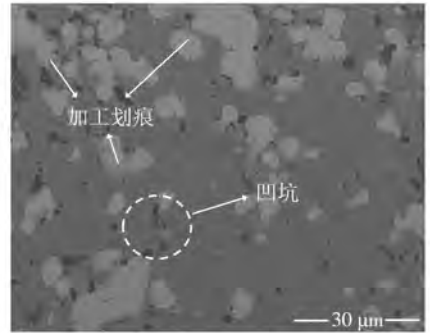
图 9 使用 SiO₂ 磨料抛光盘加工碳化钨后表面形貌
Fig.9 Surface morphology of tungsten carbide after processing with SiO₂ abrasive polishing disc

单一金刚石磨料抛光盘加工后试样的三维图像与表面形貌如图 10 所示。由图 10(a)可知,经金刚石磨料抛光盘加工后试样的表面起伏有明显下降,表面最高峰值降低至 1.2 μm,最低峰值为 -1.6 μm,表面轮廓曲线 PV 值小于 0.49 μm。图 10(b)的 SEM 结果显示,试样表面凹坑经过磨抛后明显变小,但仍能观察到划痕存在。上述结果表明,金刚石磨料能够显著去除试样的表面材料提升平整度,但金刚石磨料的硬度高且粒径较大,容易在工件表面造成划痕损伤。

使用混合磨料 A 抛光盘加工碳化钨后的三维图像与表面形貌如图 11 所示。由图 11(a)可知,抛光后试样表面最高峰值为 1.2 μm,最低峰值为 -1.5 μm,表面轮廓 PV 值小于 0.32 μm。由图 11(b)可知,混合磨料抛光盘加工后,试样表面明显的划痕基本消除,凹坑也被磨抛平整,但仍有细微的划痕残留,这主要是由于抛光盘中金刚石磨料占比为 80%,SiO₂ 磨料的比例较低,试样表面材料的磨抛还以大粒径、高硬度的金刚石磨料划擦去除为主,对试样表面造成了加工划痕损伤。

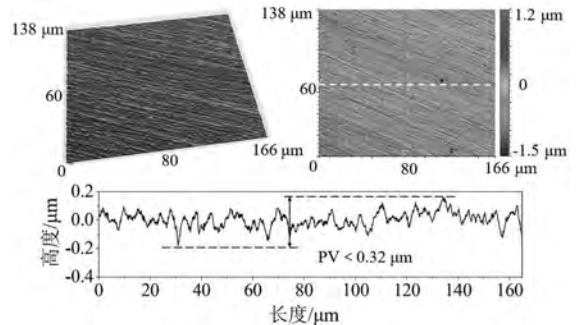


(a) 三维图像与轮廓曲线

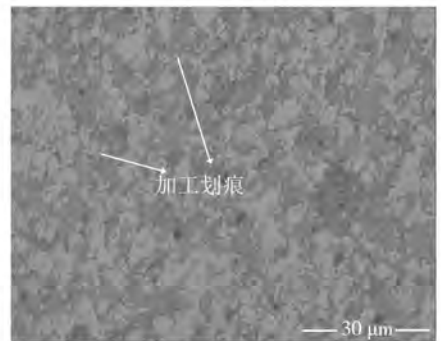


(b) SEM扫描图像

图 10 使用金刚石磨料抛光盘加工碳化钨后的表面形貌
Fig.10 Surface morphology of tungsten carbide after processing with diamond abrasive polishing disk



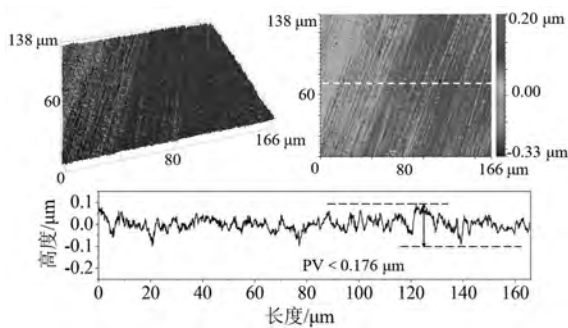
(a) 三维图像与轮廓曲线



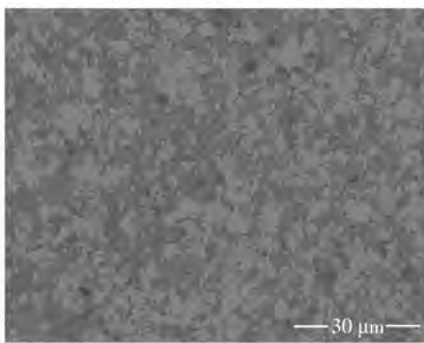
(b) SEM扫描图像

图 11 混合磨料 A 抛光盘加工碳化钨后的表面形貌
Fig.11 Surface morphology of tungsten carbide after processing with mixed abrasive polishing disk A

使用混合磨料 B 抛光盘加工碳化钨后的三维图像与表面形貌如图 12 所示。由图 12(a)可知,随着混合磨料中 SiO_2 磨料比例的增加,加工后试样表面平整度有明显的提升,试样表面最高峰值降低至 $0.20 \mu\text{m}$,最低峰值为 $-0.33 \mu\text{m}$,PV 值小于 $0.176 \mu\text{m}$ 。图 12(b)的扫描电镜图像显示,加工后的试样表面无明显划痕与缺陷存在。由上述结果可知,B 抛光盘中 SiO_2 与金刚石磨料的比例分别为 40%、60%,可以去除试样表面材料,同时减少加工过程中金刚石磨料对试样表面划擦所造成的划痕损伤,获得更好的表面质量。



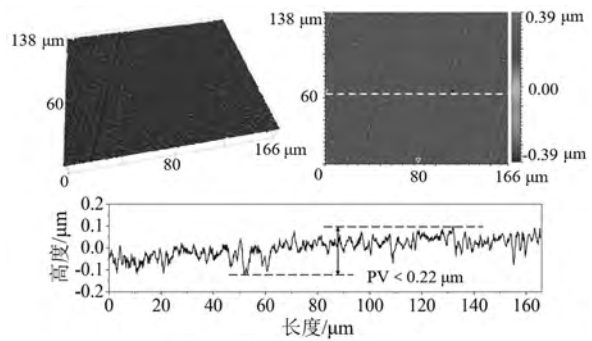
(a) 三维图像与轮廓曲线



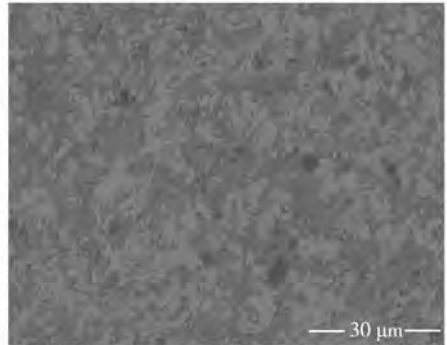
(b) SEM扫描图像

图 12 混合磨料 B 抛光盘加工碳化钨后的表面形貌
Fig.12 Surface morphology of tungsten carbide after processing with mixed abrasive polishing disk B

使用混合磨料 C 抛光盘加工后试样表面的三维图像及表面形貌如图 13 所示。由图 13(a)可知,加工后试样表面最高峰为 $0.39 \mu\text{m}$,最低峰为 $-0.39 \mu\text{m}$,表面轮廓曲线 PV 值小于 $0.22 \mu\text{m}$ 。由图 13(b)可知,加工后试样的表面并无划痕与缺陷存在。综合分析可知,提高混合磨料中 SiO_2 磨料的比例至 60%,加工后试样表面质量并没有进一步提升。



(a) 三维图像与轮廓曲线



(b) SEM扫描图像

图 13 混合磨料 C 抛光盘加工碳化钨后的表面形貌
Fig.13 Surface morphology of tungsten carbide after processing with mixed abrasive polishing disk C

3 结论

1) 采用 SiO_2 磨料抛光盘对碳化钨试样进行抛光加工,结果显示表面粗糙度相较于原始状态降低了 19.5%。受限于 SiO_2 的粒径和硬度,加工后试样表面形貌的改善效果并不明显。

2) 使用金刚石磨料抛光盘加工碳化钨试样,表面粗糙度显著下降了 91%,且轮廓曲线的 PV 值也呈现出明显的降低趋势。这一结果表明,金刚石磨料相较于 SiO_2 磨料在抛光碳化钨合金材料时具有显著优势,其更高的硬度和粒径使得表面平整度得到了明显提升,但仍有划痕和凹坑残留。

3) $w_{\text{SiO}_2}/w_{\text{金刚石}} = 2:3$ 混合磨料抛光盘的加工效果最优,有效地降低表面粗糙度 96%。与单一 SiO_2 、金刚石磨料抛光盘相比,混合磨料抛光盘在加工中表现出更好的抛光性能,加工后获得了更平整、划痕更少的碳化钨表面。磨料中硬度高且粒径大的金刚石磨料能够有效地去除材料表面的深坑和显著划痕,而小粒径硬度较低的 SiO_2 磨

料对试样表面磨抛的更加细微,从而显著提升材料表面的平整度。

参考文献:

- [1] DAI Y F, WANG J H, TANG Z W, et al. The sub-nanometer finishing surface evolution of tungsten carbide in shear thickening polishing and the effect of the impurities[J]. Precision Engineering, 2024, 88: 997-1010.
- [2] KOCICH R. Design and optimization of induction heating for tungsten heavy alloy prior to rotary swaging[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 93: 105353.
- [3] QIN C J, HU Z H, TANG A M, et al. An efficient material removal rate prediction model for cemented carbide inserts chemical mechanical polishing[J]. Wear, 2020, 452: 203293.
- [4] 李航兵. 钨合金超精密切削及其刀具磨损抑制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [5] 史晓琳. 钨合金研磨抛光表面形貌形成机理及工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [6] 徐成宇, 张万一, 张天鸿, 等. 固结磨料小工具头修形抛光钛合金叶片试验研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(9): 1606-1612.
- [7] 林晓婷. 碳化钨材料的电化学辅助机械抛光加工机理及工艺研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2022.
- [8] 袁巨龙, 毛镁姣, 李敏, 等. 基于响应曲面法的 YG8 硬质合金刀片化学机械抛光工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2018, 29(19): 2290-2297.
- [9] XU Y C, LIN C, WANG Q T, et al. A novel polishing process with rigid-flexible composite structure plate for sapphire wafer polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(2): 659-668.
- [10] WEN H L, LU J, XU S, et al. Mechanical chemical polishing of large-size single-crystal diamond substrates with a sol-gel polishing tool[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 210-219.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 394 页)

参考文献:

- [1] 于飞, 潘元潮, 张德胜, 等. 鲍鱼海参浅海筏式吊养试验[J]. 水产养殖, 2015, 36(2): 1-2.
- [2] LARGO D B, DIOLA A G, MARABABOL M S. Development of an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system for tropical marine species in southern Cebu, Central Philippines[J]. Aquaculture Reports, 2016, 3: 67-76.
- [3] 董双林, 董云伟, 黄六一, 等. 迈向远海的中国水产养殖: 机遇、挑战和发展策略[J]. 水产学报, 2023, 47(3): 3-13.
- [4] 张墨言, 陈雪, 谢庆超, 等. 微酸性电解水暂养的杂色鲍存活率及品质变化[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(11): 157-162.
- [5] 唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 等. 中国水产养殖种类组成、不投饵率和营养级[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 729-758.
- [6] ACHMAD H, CHAKLADER M R, FOTEDAR R, et al. From waste to feed: microbial fermented abalone waste improves the digestibility, gut health, and immunity in marron, *Cherax cainii*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2023, 137: 108748.
- [7] 葛伟宏, 王兴强, 苏家齐, 等. 大亚湾深水网箱养殖海域表层沉积物碳、氮、磷分布特征及污染评估[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, 32(4): 51-59.
- [8] 黄小华, 庞国良, 袁太平, 等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121-131.
- [9] 秦松, 田涛, 杨军, 等. 养殖海带、裙带菜根部附着力初步研究[J]. 水产科学, 2019, 38(1): 34-39.
- [10] 张飞, 王昕怡, 何芬芳, 等. 东山湾海带养殖区沉积物中细菌群落结构变化[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(15): 59-61.
- [11] 赵秀. 大型海藻龙须菜生长和凋落过程中细菌群落演替特征[D]. 广州: 暨南大学, 2022.
- [12] KAUR G, GILL S S, RATTAN M. Artificial neural network and genetic algorithm based hybrid intelligence for performance optimization of novel inverted funnel shaped fin shaped field effect transistor with gate stack high- k dielectric[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2020, 15(11): 1385-1394.
- [13] LIN W H, XIAO Q Z, YU F, et al. Development of a low-density SNP genotyping panel by a novel technology mGPS and its application in germplasm identification of abalone[J]. Aquaculture, 2023, 565: 739089.

(责任编辑: 方素华)