文章编号:1674-2974(2024)04-0082-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024173

钨合金精密磨削砂轮磨损及对表面质量的影响机制

李干 ,康仁科 ,董志刚 ,王浩 ,王中旺 ,鲍岩 †
(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:为了满足钨合金零件的高精度和高完整性表面加工需求,实现钨合金磨削质量的控制和加工工艺的优化,通过分析砂轮磨粒种类和结合剂类型对砂轮磨损形式的关系,明确了超硬磨料砂轮在钨合金磨削加工中的优势.研究了磨粒粒度和磨削参数对钨合金磨削加工质量的影响规律,为制定合理的磨削工艺提供依据.通过磨削试验获得钨合金高精度和高完整性表面磨削加工工艺.研究结果表明,钨合金磨削过程中砂轮易磨损,超硬磨料砂轮更适合钨合金的磨削加工.金属结合剂金刚石砂轮在钨合金磨削加工的表面质量和加工精度方面表现出优越性.通过改进磨削参数,钨合金精密磨削后表面粗糙度可达 18.9 nm,实现了镜面磨削效果.

关键词:磨削加工;表面粗糙度;钨合金;砂轮磨损;磨削参数
中图分类号:TH162 **文献标志码**:A

Wheel Wear of Tungsten Heavy Alloy Precision Grinding and Its Influence Mechanism on Surface Quality

LI Gan, KANG Renke, DONG Zhigang, WANG Hao, WANG Zhongwang, BAO Yan†
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To meet the demand for high-precision and high-integrity surface machining of tungsten alloy parts, this paper carries out systematic research to achieve the control of tungsten alloy grinding quality and the optimization of the machining process. The impact of grinding wheel grit type and bond type on the form of grinding wheel wear was analyzed, and the advantages of super-hard abrasive in tungsten alloy grinding processing were clarified. The influence law of abrasive grain size and grinding parameters on the quality of tungsten alloy grinding processing was investigated, which provided a basis for the development of a reasonable grinding process. Finally, the high-precision and high-integrity surface grinding process of tungsten alloy was obtained through the grinding test. The results show that the grinding wheel of tungsten alloy is easy to wear during the grinding process, and the super-hard abrasive grinding wheel is more suitable for the grinding processing of tungsten alloy. Metal-bonded diamond wheels showed superiority in the comprehensive consideration of surface quality and machining accuracy of tungsten alloy grinding processing. By improving the grinding parameters, a surface roughness of 18.9 nm after precision grinding of tungsten alloy was realized, and a mirror grinding effect was achieved.

* **收稿日期**:2023-10-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52275411), National Natural Science Foundation of China (52275411); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT22ZD201),Fundamental Research Funds for the Central Universities(DUT22ZD201)
作者简介:李干(1997—),男,河南邓州人,大连理工大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: baoy@dlut.edu.cn

Key words: grinding machining; surface roughness; tungsten alloys; wheel wear; grinding parameters

钨合金是以钨为骨架,加入少量的Ni、Fe等合金元素,通过粉末冶金液相烧结的方法制备而成[1].钨合金由于具有一系列优良的物理力学性能[2],如密度高、强度高、延性好、韧性好、热膨胀系数小、吸收射线能力强、导热性及耐蚀性好等特点,在航天航空、国防军工等领域有着广泛的应用[3].特别在用于动能穿甲弹弹芯材料方面,其由于具有与贫铀合金相近的准静态力学性能以及无污染等优点而成为目前替代贫铀弹最理想的材料[4].钨合金具有优良的力学性能,这些性能使钨合金的应用日益广泛,但也对其可加工性带来了不利影响[5],限制了钨合金在工业生产中的应用.

在钨合金的生产应用过程中,往往要求产品具有较高的加工精度和表面质量,需要采用精密加工技术对工件毛坯进行加工.与钢和铝合金等材料相比,钨合金的加工难度很大.钨合金具有一定的硬脆性,在加工过程中容易发生脆性断裂,降低加工质量[6].普通车削难以满足钨合金的加工需求,一些学者采用超声椭圆切削法对钨合金进行加工,并获得了不错的表面质量[7-8].

磨削是提高材料表面质量的有效方法[9-10].与车削相比,磨削能获得更好的表面完整性和高形状精度,同时具有较高的加工效率[11].磨削工艺目前广泛用于生产高精度的光学磨具和硬脆材料的加工[12],如碳化钨[13]和硬质合金[14]等.磨削由于其较好的加工精度和加工效率,在精密磨具的生产中起着重要作用[15],越来越受到人们的重视[16].

在钨合金的磨削加工过程中,由于钨合金材料特性目前仍存在加工精度低、表面完整性差、加工载荷大等问题[17],表面质量和磨削加工精度难以满足使用需求.目前国内外对钨合金超精密加工的研究和探索较少,尚没有适合的超精密加工方法,严重制约了钨合金的应用[18].因此有必要对钨合金的磨削加工工艺特性进行研究,获得不同加工条件下钨合金高质量磨削表面形成规律,提高磨削加工精度和表面质量.这对于满足钨合金工业需求,促进钨合金的规模化应用具有重要意义.

1　钨合金磨削工艺试验

1.1　试验材料

如图1所示,本研究使用的钨合金是由钨相和镍铁相组成的复合组织,微球形钨颗粒被相对柔软和坚韧的镍铁相包围.作为典型的两相硬脆材料,钨合金材料成分见表1,主要力学特性见表2.

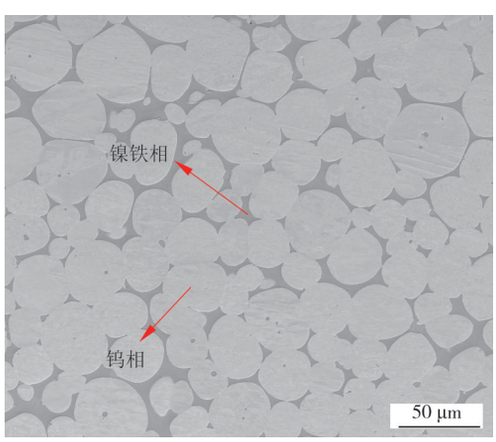


图1　钨合金表面微观组织形貌

Fig.1　Surface microstructure morphology of tungsten heavy alloy

表1　钨合金材料成分

Tab.1　Material composition of tungsten heavy alloy

w_W/%	w_{Ni}/%	w_{Fe}/%	其余
94.5~95.5	3.2~3.4	1.4~1.6	微量元素

表2　钨合金材料主要力学特性

Tab.2　Main mechanical properties of tungsten heavy alloy

断裂韧性/MPa	密度/(g·cm^{-3})	硬度/HRC	抗拉强度/MPa	晶粒尺寸/μm
10~16	18.3	42	≥800	30~50

由表1和表2可知,钨合金具有以下特性:耐磨性高,较稳定的化学性质,冲击韧性较低,低的热膨胀系数,硬度较高,密度较高,弹性模量大.这些性质导致钨合金在磨削加工中易发生破碎,使加工表面损伤严重,磨粒施加的高频交变载荷会加剧材料损伤.钨合金的特性造成钨合金在加工过程中材料去除困难,保证钨合金样件的高质量高表面完整性加工难度较大.基于上述问题,开展了钨合金磨削加工

工艺试验.

1.2 试验装置与工艺参数

钨合金磨削加工工艺试验在北京凝华机床NHM800上进行,钨合金磨削试验现场如图2所示,数控机床的主要性能参数如表3所示.

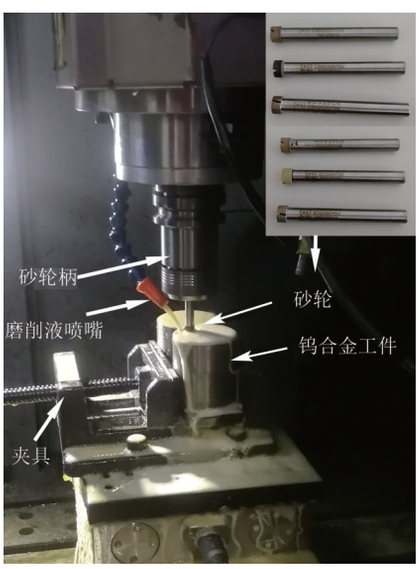


图2 钨合金磨削试验现场

Fig.2 Tungsten heavy alloy grinding test site

表3 NHM800机床的主要性能参数

Tab.3 Main performance parameters of NHM800 machine tool

参数	值
主轴转速/(r·min^{-1})	0~18 000
X、Y和Z轴行程/(mm×mm×mm)	600×700×350
主轴功率/kW	5.5
最大进给速度/(m·min^{-1})	8
定位精度/mm	±0.003
重复定位精度/mm	±0.002

为研究不同磨粒种类、结合剂类型、磨粒粒度和工艺参数对钨合金磨削加工工艺特性的影响,设计钨合金磨削工艺试验参数如表4所示.

每次磨削前对砂轮进行修整,确保砂轮锐度和跳动值.磨削过程中调整砂轮转速,使砂轮线速度一致.试验前、后采用日本Keyence VHX-100型超景深显微镜观测砂轮及工件形貌,采用英国泰勒Talysurf CLI2000型三维轮廓仪测量工件表面粗糙度,并用日本电子JEOL-6360型扫描电镜观察磨削后钨合金工件表面形貌.

表4 钨合金磨削加工试验参数

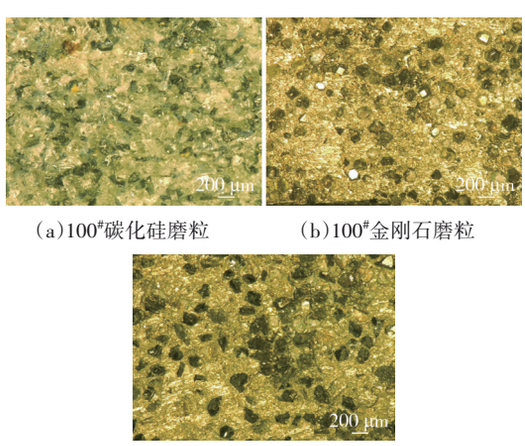
Tab.4 Experimental parameters of tungsten heavy alloy grinding machining

试验参数	变量范围
磨粒种类	碳化硅、金刚石、立方氮化硼
结合剂类型	金属、树脂、陶瓷、电镀、钎焊
磨粒粒度	100#、200#、500#、1000#
工艺参数	磨削速度、磨削深度、进给速度

2 结果与讨论

2.1 磨粒种类对钨合金磨削质量的影响

分别选取磨粒粒度为100#的碳化硅砂轮、金刚石砂轮和立方氮化硼(Cubic Boron Nitride,CBN)砂轮对钨合金进行磨削加工,磨粒粒径均为150 μm左右,如图3所示.选取加工参数为:砂轮线速度v_s=9.42 m/s,磨削深度a_p=10 μm,进给速度v_F=50 mm/min.



(a)100#碳化硅磨粒 (b)100#金刚石磨粒

(c)100#CBN磨粒

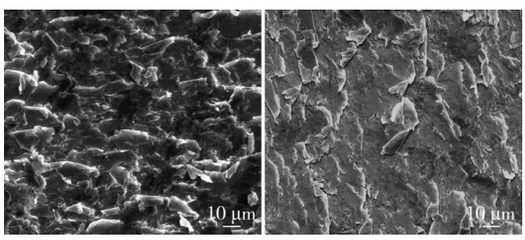
图3 不同磨粒种类磨削前工件表面微观形貌

Fig.3 Surface microscopic morphology of workpiece before grinding with different types of abrasive particles

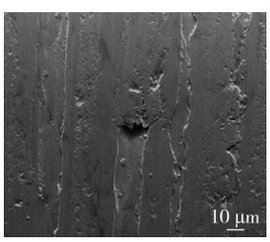
不同磨粒种类磨削后工件表面形貌如图4所示.碳化硅砂轮磨削后工件表面大部分为脆性断裂去除,且表面质量较差;金刚石砂轮加工后工件表面除脆性断裂以外还存在大量翻折成屑,呈现一定的塑性加工特性;CBN砂轮加工质量较好,仅有少量耕犁状沟槽.

不同磨粒种类磨削后工件表面磨损形貌如图5所示.由图5(a)可知,碳化硅砂轮加工得到的钨合金表面质量较差,且加工过程中碳化硅砂轮磨损较为严重.碳化硅砂轮磨损以结合剂磨损为主,结合剂的大量磨损导致砂轮轮廓发生变化,且由于砂轮的磨损导致磨屑和砂轮碎屑一同被冷却液带走,因此对工件轮廓度和表面粗糙度影响很大.金刚石磨粒磨损形貌如图5(b)所示,由于金刚石磨粒较为坚硬,因此磨削后金刚石磨粒得以大量保留,且多以磨耗磨

损为主.金刚石砂轮磨损较小,并在砂轮表面观察到工件材料的黏附.通过对比图3(c)和图5(c)可以发现,由于CBN磨粒较为锋利,且钨合金材料硬度较高,因此磨削后CBN磨粒以磨粒破碎和磨耗磨损为主,但磨损较金刚石磨粒严重.大量CBN磨粒在磨削过程中被磨平,并在工件表面留下耕犁状痕迹.对于钨合金等难加工材料,考虑到砂轮的磨损适合选取硬度较高的超硬磨料砂轮进行加工.



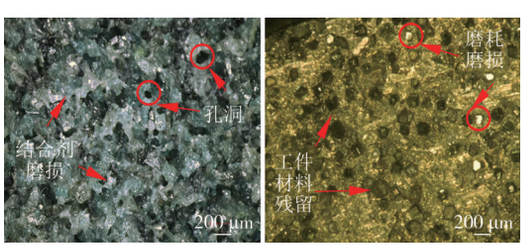
(a)100#碳化硅磨粒　　(b)100#金刚石磨粒



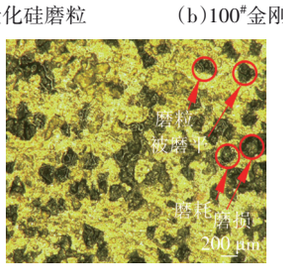
(c)100#CBN磨粒

图4　不同磨粒种类磨削后工件表面形貌

Fig.4　Surface morphology of workpiece after grinding with different types of abrasive particles



(a)100#碳化硅磨粒　　(b)100#金刚石磨粒



(c)100#CBN磨粒

图5　不同磨粒种类磨削后工件表面磨损形貌

Fig.5　Surface wear morphology of workpiece after grinding with different types of abrasive particles

不同磨粒种类磨削后钨合金表面粗糙度如图6所示.由图6可知,金刚石砂轮和CBN砂轮对钨合金的磨削效果显著优于碳化硅砂轮,且碳化硅砂轮在钨合金的磨削过程中磨损较大,因此选取金刚石和CBN砂轮进行后续试验.

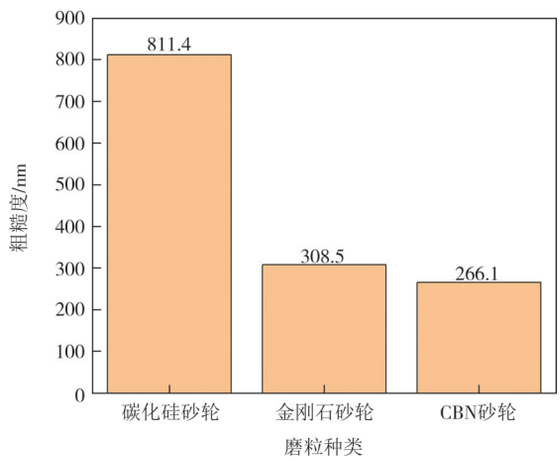


图6　不同磨粒种类磨削后钨合金表面粗糙度

Fig.6　Surface roughness of tungsten heavy alloy after grinding with different types of abrasive particles

2.2　结合剂类型对钨合金磨削质量的影响

分别选取200# CBN砂轮和金刚石砂轮对应的金属、树脂和陶瓷结合剂进行试验,针对钨合金加工过程中砂轮磨损严重的问题,同时选取磨粒把持力较强的电镀砂轮和钎焊砂轮进行试验.磨削试验过程中选取相同加工参数:砂轮线速度v_s=16.02 m/s,磨削深度a_p=5 μm,进给速度v_F=10 mm/min.不同结合剂类型砂轮磨削后钨合金表面粗糙度如图7所示.

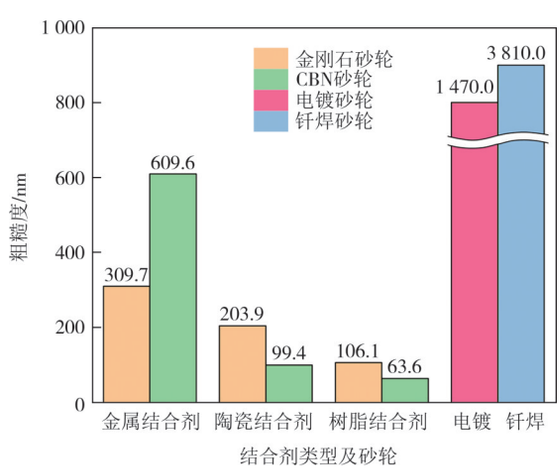
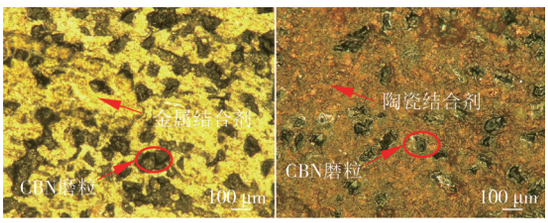


图7　不同结合剂类型砂轮磨削后钨合金表面粗糙度

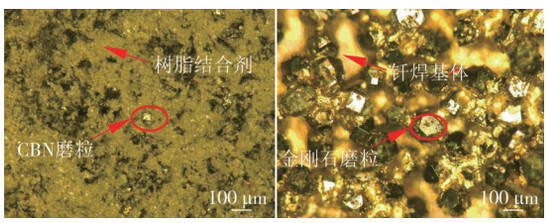
Fig.7　Surface roughness of tungsten heavy alloy after grinding with different types of bond wheels

由图7可知,无论是CBN砂轮还是金刚石砂轮,树脂结合剂砂轮加工效果最好,其次是陶瓷结合剂砂轮,金属结合剂砂轮加工效果最差.同时观测磨削前、后砂轮表面形貌,以确定砂轮磨损情况,分别如

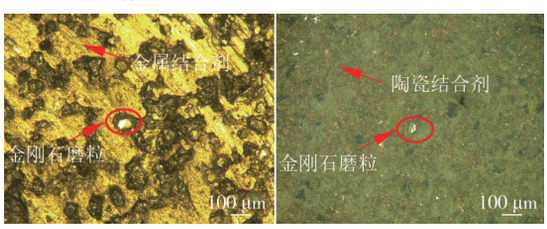
图8和图9所示.



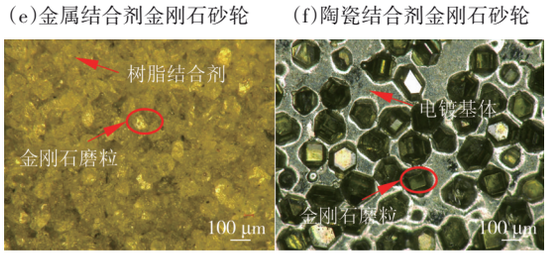
(a)金属结合剂CBN砂轮 (b)陶瓷结合剂CBN砂轮



(c)树脂结合剂CBN砂轮 (d)钎焊金刚石砂轮



(e)金属结合剂金刚石砂轮 (f)陶瓷结合剂金刚石砂轮

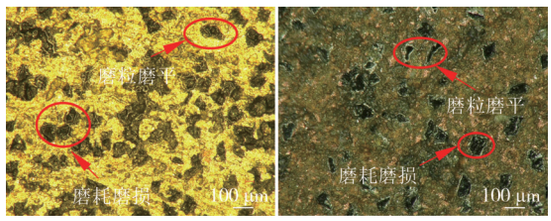


(g)树脂结合剂金刚石砂轮 (h)电镀金刚石砂轮

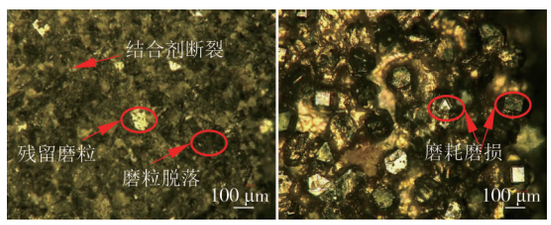
图8 不同结合剂砂轮磨削前表面形貌

Fig.8 Surface morphology before grinding with different bond grinding wheels

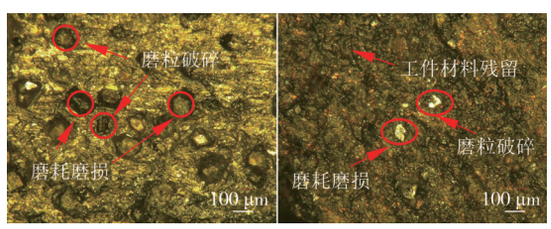
由图8(a)~(c)和图9(a)~(c)可知,CBN磨粒较金刚石磨粒更为尖锐,因此CBN磨粒的磨损形式以破碎磨损为主.金属结合剂对磨粒把持力较强,因此金属结合剂表面的CBN磨粒随着和工件的相互作用而不断破碎、磨损,并逐渐磨平失去磨削能力,使得最终工件表面粗糙度不如金属结合剂金刚石砂轮,如图7所示.陶瓷结合剂砂轮磨损类型与金属结合剂类似,以CBN磨粒的破碎磨损为主,但陶瓷结合剂多孔的特性使得砂轮磨损程度低于金属结合剂,而加工后工件表面质量也较好.树脂结合剂砂轮对磨粒的把持力较弱,同时也使得砂轮的自锐能力较强:当磨粒-基体不断受到磨削力的冲击时结合剂容易先发生断裂,使得CBN磨粒发生较大磨损前就和结合剂一同脱落,因此表面观察到的CBN磨粒相对完



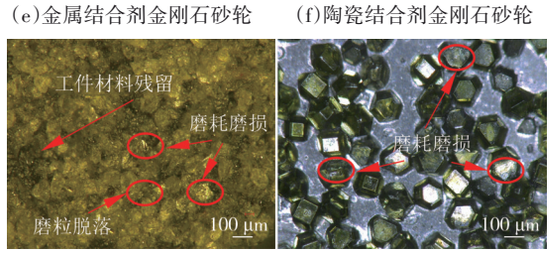
(a)金属结合剂CBN砂轮 (b)陶瓷结合剂CBN砂轮



(c)树脂结合剂CBN砂轮 (d)钎焊金刚石砂轮



(e)金属结合剂金刚石砂轮 (f)陶瓷结合剂金刚石砂轮



(g)树脂结合剂金刚石砂轮 (h)电镀金刚石砂轮

图9 不同结合剂砂轮磨削后表面形貌

Fig.9 Surface morphology after grinding with different bond grinding wheels

整,在磨削加工中能一直保持稳定的磨削能力.

通过对比图8(e)~(g)和图9(e)~(g)可以发现,金刚石磨粒的磨损形式多以磨耗磨损为主.树脂结合剂金刚石砂轮磨损形式以结合剂的快速磨损和磨粒的大量脱落为主,残留的金刚石磨粒基本保持完整,虽然磨粒不断脱落,但随着新磨粒的不断露出,树脂结合剂砂轮仍能保持良好的磨削加工能力,因此树脂结合剂砂轮的自锐性远优于其余砂轮,但树脂砂轮的磨损速率也较大.金属结合剂基体对金刚石磨粒的保持力较大,因此金属结合剂砂轮的磨损多以磨粒的磨耗磨损和破碎磨损为主,随着磨粒磨损的不断出现,金属结合剂砂轮的磨削能力不断下降,从而导致工件表面质量降低.陶瓷结合剂磨损形式则介于两者之间,由于陶瓷结合剂表面空穴较多,增强了砂轮基体的容屑能力,改善了工件与磨粒之

间的加工和冷却环境,因此有效降低了砂轮磨损程度,并使得工件加工质量得到一定的提高.

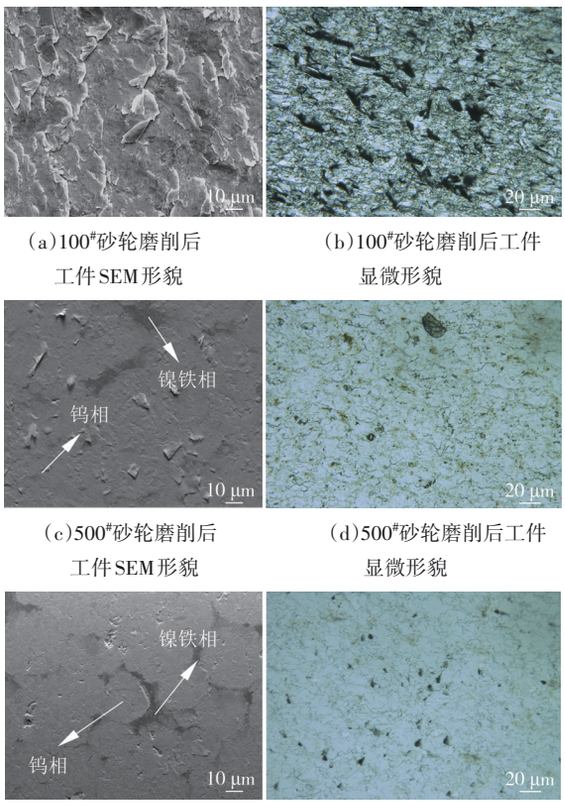
钎焊金刚石砂轮磨削前、后对比如图 8(d)和图 9(d)所示,虽然磨粒保持能力更强,砂轮耐磨性更强,但是砂轮表面磨粒出刃高度差异较大,工件磨削加工表面质量较差.电镀金刚石砂轮磨削前、后对比如图 8(h)和图 9(h)所示,可以发现电镀金刚石砂轮在保证了砂轮耐磨性的同时,砂轮表面金刚石磨粒分布较广,磨粒数量较多,并且磨粒出刃高度分布比钎焊砂轮更为均匀,因此电镀金刚石砂轮磨削质量优于钎焊金刚石砂轮,如图 7 所示.但是由于制造工艺的要求,钎焊砂轮和电镀砂轮粒度无法进一步提高,且砂轮修整不便,砂轮的安装精度直接决定了工件的磨削质量和加工精度.

综上所述,树脂结合剂砂轮在磨削中磨损主要是由磨粒脱落导致的,因此难以保证工件的面型精度;对磨粒的把持力上钎焊砂轮最高,其次分别为电镀砂轮、金属结合剂砂轮和陶瓷结合剂砂轮,树脂结合剂砂轮最易磨损.究其原因,金刚石钎焊砂轮大大增强了砂轮基板对磨粒的把持力,磨削过程中磨粒脱落较少,砂轮磨损较少;磨粒出刃高度大幅度提高,以存储更多的磨屑,使得磨粒更为锋利,同时也存在砂轮圆周上分布磨粒等高性不好的问题,磨削后工件表面和 CBN 磨粒工件表面类似,也存在大量耕犁状痕迹,造成磨削后工件表面粗糙度较差,需要在减小砂轮磨粒的同时改善磨粒分布高度状态以改善工件表面磨削质量.

2.3　磨粒粒度对钨合金磨削质量的影响

在上述试验基础上,为保证钨合金工件加工精度,选取金属结合剂金刚石砂轮,同时通过提高磨粒粒度的方法改善钨合金工件的表面质量.为研究磨粒粒度对钨合金磨削质量影响,分别选取 100#、500#、1000#金属结合剂金刚石砂轮对钨合金进行磨削加工,对应磨粒粒经分别为 152.0 μm,76.0 μm,30.4 μm 和 15.2 μm.磨削参数为:砂轮线速度 v_s=24.03 m/s,磨削深度 a_p=3 μm,进给速度 v_F=5 mm/min.不同磨粒粒度磨削后钨合金表面形貌和表面粗糙度分别如图 10 和图 11 所示.

由图 10 可知,当砂轮粒度为 100#时,钨合金表面呈现大量的脆性断裂和翻折成屑;随着砂轮粒度的增加,钨合金表面的脆性断裂现象减少,呈现少量的翻折成屑现象,并且能观察到明显的钨相和镍铁相;当磨粒粒度进一步提高到 1000#时,钨合金表面整体呈现塑性去除现象,表面质量整体较好.因此采用 500#以上粒度的金属结合剂金刚石砂轮对钨合金进行磨削加工,可以得到较好的表面粗糙度.



(a)100#砂轮磨削后工件SEM形貌　(b)100#砂轮磨削后工件显微形貌

(c)500#砂轮磨削后工件SEM形貌　(d)500#砂轮磨削后工件显微形貌

(e)1000#砂轮磨削后工件SEM形貌　(f)1000#砂轮磨削后工件显微形貌

图 10　不同磨粒粒度磨削后钨合金表面形貌

Fig.10　Surface morphology of tungsten heavy alloys after grinding with different abrasive sizes

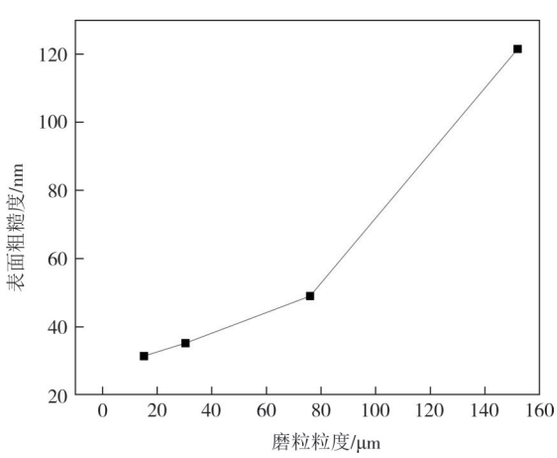
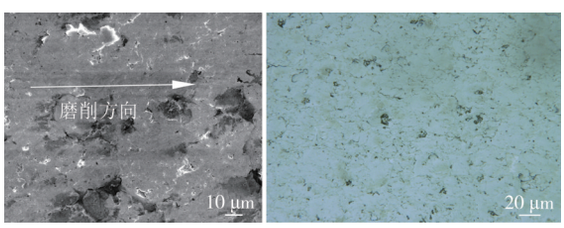


图 11　不同磨粒粒度磨削后钨合金表面粗糙度

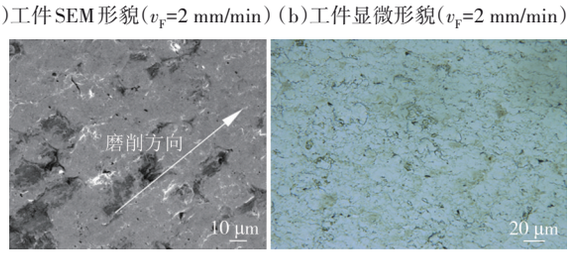
Fig.11　Surface roughness of tungsten heavy alloy after grinding with different abrasive sizes

2.4 工艺参数对钨合金磨削质量的影响

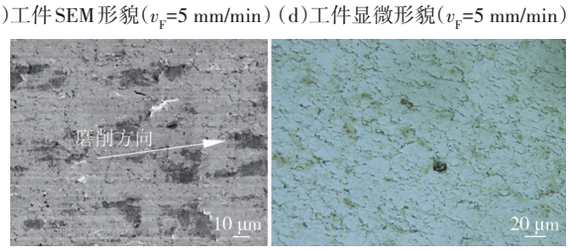
在上述试验过程中,发现钨合金表面粗糙度值随磨削速度增大而减小,随磨削深度增大而增大,但在常规磨削范围内影响有限,而进给速度可调节范围较大,因此对工件表面质量影响较大,在此主要研究进给速度对钨合金表面粗糙度的影响.选取1000#金属结合剂金刚石砂轮对钨合金进行磨削加工,对应磨削参数:砂轮线速度v_s=24.03 m/s,磨削深度a_p=5 μm,控制进给速度v_F分别为2 mm/min、5 mm/min和10 mm/min. 不同进给速度下磨削后钨合金表面形貌和表面粗糙度分别如图12和图13所示.



(a)工件SEM形貌(v_F=2 mm/min) (b)工件显微形貌(v_F=2 mm/min)



(c)工件SEM形貌(v_F=5 mm/min) (d)工件显微形貌(v_F=5 mm/min)



(e)工件SEM形貌(v_F=10 mm/min) (f)工件显微形貌(v_F=10 mm/min)

图12 不同进给速度下磨削后钨合金表面形貌

Fig.12 Surface morphology of tungsten heavy alloy after grinding at different feed rates

如图12中白色箭头所示,钨合金加工表面随着进给速度的增加沿磨削方向呈现明显的塑性拉长现象. 当进给速度为2 mm/min时,钨合金表面晶粒较为完整,几乎观察不到变形现象;当进给速度增加到5 mm/min时,钨合金晶粒呈椭圆状变形现象;当进给速度为10 mm/min时,钨合金晶粒呈现明显的拉长变形现象.因此进给速度对钨合金磨削表面形貌影响较大.如图13所示,钨合金表面质量随进给速度减小而提高,当进给速度低于5 mm/min时可以取得较好的磨削效果. 钨合金样件最终磨削效果如图14所示,表面粗糙度可达18.9 nm,呈现明显的镜面效果.

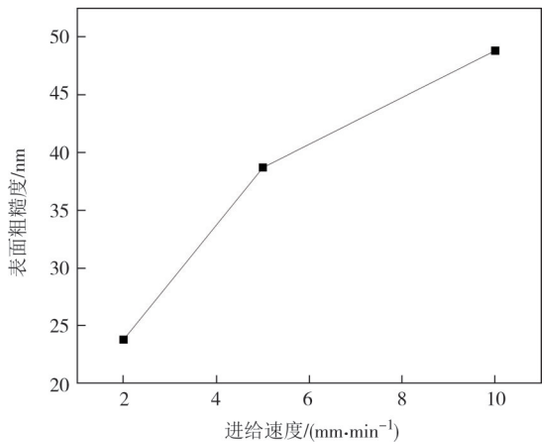
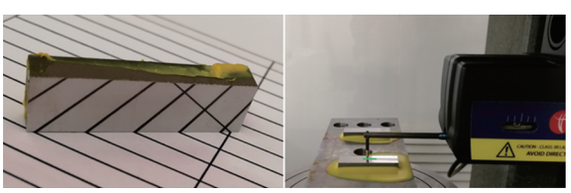
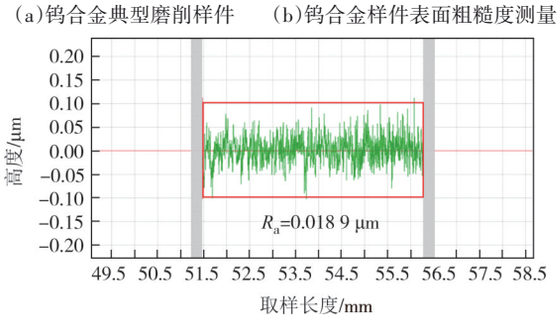


图13 不同进给速度下磨削后钨合金表面粗糙度

Fig.13 Surface roughness of tungsten heavy alloy after grinding at different feed rates



(a)钨合金典型磨削样件 (b)钨合金样件表面粗糙度测量



(c)钨合金样件表面粗糙度测量结果

图14 钨合金样件最终磨削效果

Fig.14 The final grinding effect of tungsten heavy alloy sample

3 结 论

针对钨合金磨削加工中砂轮磨损大、磨削质量差的难题,分别研究了砂轮磨粒种类、结合剂类型、磨粒粒度、工艺参数对钨合金磨削加工质量的影响,主要结论如下:

1)钨合金属于硬脆材料,常规砂轮加工质量差,砂轮易磨损,宜选用金刚石、CBN等超硬磨料砂轮进行加工,以保证工件表面质量和加工精度.

2)钨合金平面磨削中金刚石砂轮磨削效果优于CBN砂轮,且树脂结合剂砂轮加工效果最好,其次是陶瓷结合剂,金属结合剂砂轮效果最差.

3)研究了钨合金磨削加工中不同磨粒、不同结

合剂砂轮的磨损形式,结果表明耐磨性上钎焊砂轮最高,其次分别为电镀砂轮、金属结合剂砂轮和陶瓷结合剂砂轮,树脂结合剂砂轮最易磨损.综合考虑钨合金磨削加工的表面质量和加工精度,金属结合剂金刚石砂轮是最佳选择.

4)砂轮磨粒越小,钨合金加工表面质量越好,工件进给速度对钨合金表面质量影响较为显著.选取1000#金属结合剂金刚石砂轮,进给速度为2 mm/min时,钨合金表面粗糙度可达18.9 nm,实现了镜面磨削效果.

参考文献

[1] 刘波. 基于93W-4.9Ni-2.1Fe新型高密度钨合金的制备技术与性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
LIU B. Research on preparation and properties of novel high density tungsten alloys based on 93W-4.9Ni-2.1Fe [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

[2] 马运柱, 刘文胜, 贺平华, 等. 元素Co对93W-4.9Ni-2.1Fe合金微观组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(10):1804-1808.
MA Y Z, LIU W S, HE P H, et al. Effect of minor Co on microstructure and properties of 93W-4.9Ni-2.1Fe alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37 (10) : 1804-1808. (in Chinese)

[3] LI G, BAO Y, WANG H, et al. An online monitoring methodology for grinding state identification based on real-time signal of CNC grinding machine [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200: 110540.

[4] 龚星, 范景莲, 刘涛, 等. 细晶93W-4.9Ni-2.1Fe合金动态压缩下绝热剪切带的形成及其特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2010,39(8): 1390-1394.
GONG X, FAN J L, LIU T, et al. Formation and characteristics of adiabatic shear band in fine-grained 93W-4.9Ni-2.1Fe alloy under dynamic compression [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8):1390-1394. (in Chinese)

[5] PAN Y N, KANG R K, DONG Z G, et al. On-line prediction of ultrasonic elliptical vibration cutting surface roughness of tungsten heavy alloy based on deep learning [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(3):675-685.

[6] YIN S, DONG Z G, BAO Y, et al. Development and optimization of ultrasonic elliptical vibration cutting device based on single excitation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(8): 081005.

[7] LI G, LIU J B, PAN Y N, et al. Cutting chatter in ultrasonic elliptical vibration cutting and its influence on surface roughness and tool wear[J]. Metals, 2023, 13(6):1078.

[8] 王群,陈振华,丁彰雄,等.镍基碳化钨喷焊涂层组织与磨损性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(4): 57-60.
WANG Q, CHEN Z H, DING Z X, et al. Microstructure and wear performance of WC reinforced Ni-based spraying-welding coating [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(4):57-60. (in Chinese)

[9] 黄向明,刘涛,曾滔,等. 磨削参数对硬质合金刀片圆弧表面锯齿的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(4): 160-167.
HUANG X M, LIU T, ZENG T, et al. Effect of grinding parameters on saw tooth of arc surface of cemented carbide blades [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(4): 160-167. (in Chinese)

[10] 郭力, 霍可可, 郭君涛. 基于EMD的金刚石砂轮磨损状态声发射监测[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019, 46(2):58-66.
GUO L, HUO K K, GUO J T. Acoustic emission intelligent monitoring of diamond grinding wheel wear based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2019,46(2):58-66. (in Chinese)

[11] YAO L X, LIU Z Q, SONG Q H, et al. Prediction modelling of cutting force in rotary ultrasonic end grinding 2.5D woven SiO_{2f}/SiO_2 ceramic matrix composite[J]. Composite Structures, 2023, 304:116448.

[12] HE J H, BARAHIMI V, FARAHNAKIAN M, et al. A new monitor model to detect damages in surface and subsurface during cup grinding process of BK7 optical glass: a new optimization model for energy damage [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 144(5):1949-1957.

[13] BADGER J, DRAZUMERIC R, KRAJNIK P. Grinding of cermets with cup-wheels [J]. Materials Science Forum, 2016, 874: 115-123.

[14] FUJIWARA T, TSUKAMOTO S, OHASHI K, et al. Study on grinding force distribution on cup type electroplated diamond wheel in face grinding of cemented carbide [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1017:9-14.

[15] DONG Z C, CHENG H B. Developing a trend prediction model of subsurface damage for fixed-abrasive grinding of optics by cup wheels[J]. Applied Optics, 2016, 55(32):9305-9313.

[16] ZHANG X F, LIN B. Research on the analytical thermal model in surface grinding by cup wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1):1-13.

[17] 周忠正. 钨合金电解磨削加工工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
ZHOU Z Z. Study on electrolytic grinding technology of tungsten alloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)

[18] WANG H, KANG R K, BAO Y, et al. Microstructure evolution mechanism of tungsten induced by ultrasonic elliptical vibration cutting at atomic/nano scale [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 253:108397.