DOI: 10.3901/JME.2019.03.199

小直径青铜结合剂微粉砂轮的电火花 精密修整实验研究*

余剑武^{1,2} 何利华^{1,3} 尚振涛² 罗红^{1,4} 梁七华⁴

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082;

2. 湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心 长沙 410082;

3. 杭州电子科技大学机械工程学院 杭州 310018;

4. 苏州昌景数控设备有限公司 苏州 325000)

摘要: 青铜结合剂微粉金刚石砂轮常用于脆硬材料的超精密磨削加工,但其修整十分困难;采用内冲式弧面铜钨电极对 W10 青铜结合剂微粉金刚石砂轮进行了电火花修整试验研究;搭建试验平台并设计三种不同弧度的内冲式电极,采用超景深三维显微镜、精密粗糙度仪、CCD 激光位移传感器以及扫描电子显微镜,对修整后的砂轮进行了表面形貌检测、轮廓检测和磨削性能测试;检测结果表明 60°弧面电极的内冲效果最好,修整砂轮表面磨粒突出明显,数量较多且密集度高,金刚石磨粒保存完好;砂轮圆跳动误差值最小,可达 1.7 μm 、1.8 μm 、1.8 μm ;试验验证了采用 60°弧面电极修整砂轮的磨削性能最好,加工的试件表面粗糙度可达 $Ra2.273\text{ nm}$,已基本达到超精密镜面磨削的质量。

关键词: 电火花修整;弧面电极;微粉砂轮;圆跳动误差;表面微观形貌

中图分类号: TG661

Experimental Investigation on Precision Electrical Discharge Dressing of Small-diameter Bronze-bonded Fine Grain Grinding Wheel

YU Jianwu^{1,2} HE Lihua^{1,3} SHANG Zhentao² LUO Hong^{1,4} LIANG Qihua⁴

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082;

2. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082;

3. Faculty of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018;

4. Suzhou Changjing CNC Equipment Co., Ltd, Suzhou 325000)

Abstract: Fine grain bronze-bonded diamond grinding wheel is usually used in ultra-precision machining of hard and brittle materials, but it is difficult for dressing because of the high hardness of the diamond and the strong adhesion of bronze-bond. Inner-flushing curved electrodes are used in electrical discharge dressing of W10 fine grain bronze-bonded diamond grinding wheel. The experimental platform is set up and three different degrees of inner-flushing curved electrodes are designed. The Keyence VHX6000 3D microscope, roughness profile measurement instrument, CCD laser displacement sensor and meter and SEM are employed to investigate the surface micro topography, profile of dressed grinding wheel and grinding test. It is found that improvement of inner-flushing of 60°-curved electrode is best and the protrusion of diamond grains on surface of after dressing is clearly observed with uniformly distribution and unburned during electrical discharge dressing; the minimum circular runout error can reach 1.7 μm , 1.8 μm and 1.8 μm . It is also verified by grinding experiment that surface roughness by grinding wheel with 60°-curved electrode is $Ra2.273\text{ nm}$, which can reach the high quality level of ultra-precision mirror grinding.

Key words: electrical discharge dressing; curved electrode; fine grain grinding wheel; circular runout error; surface micro topography

* 国家科技重大专项(2012ZX04003-101)、湖南省自然科学基金(2015JJ2026)和苏州吴中区科技(WC201523)资助项目。20180212 收到初稿, 20180605 收到修改稿

0 前言

近年来随着精密机械和 3C 电子产业的飞速发展,超细晶粒硬质合金、氧化锆陶瓷、氮化硅陶瓷、光学玻璃等脆硬材料得到了推广和应用^[1-2]。获得脆硬材料的高精度表面往往使用磨削、研磨、抛光等加工手段^[3]。与精密磨削相比,研磨与抛光的加工效率相对较低,因此使用微粉超硬磨料砂轮的超精密磨削越来越受到关注。目前,使用金属结合剂微细超硬磨料砂轮加工硬脆材料可达到高精度的镜面成效,可减少后续研磨抛光的时间,大大提高了加工效率。

目前,青铜结合剂微粉金刚石砂轮的应用较为普遍,但其磨钝后的整形和修锐显得十分困难。传统的滚轮整形法主要依靠滚轮与砂轮之间的机械作用力来对砂轮进行修整,该方法对滚轮轴和砂轮主轴的刚度提出了较高的要求^[4]。随着特种加工的介入,更多学者提出了新的修整方法,比如电解修整法、激光修整法和电火花修整法等^[5-8],这些方法成功地解决了传统修整方法中“硬接触”的问题,并且在一定程度上得到了应用;而在这些方法中,电火花修整法具有操作方便,修整精度高,修整力小等优点,在应用中被广泛认可^[9]。近三十年来,许多学者对金属基超硬磨料砂轮的电火花修整开展了研究工作,SUZUKI 等^[10]用石墨和黄铜作为电极材料来修整砂轮,虽然两种电极材料的损耗较严重,但砂轮的成型效果好,修整精度高。谢晋等^[11]对金属结合剂金刚石砂轮采用气中电火花接触放电修锐的方法,主要分析无负荷电压和放电极性对脉冲放电电流、脉冲放电间隙、脉冲放电去除量、电极磨损比等的影响,产生较好的砂轮出刃形貌,改善磨削表面质量。陈明君等^[12]对小直径金属基球头金刚石砂轮进行了电火花精密修整方法研究,修整后的砂轮面形精度优于 $0.8\ \mu\text{m}$,磨粒突出效果良好。洪建军等^[13]则比较分析了压缩空气、水雾气、雾状乳化油等不同介质对砂轮修整过程的影响。王先逵等^[14]通过试验分析得出了较大放电参数可以得到较高的修整效率;同时也对青铜结合剂金刚石砂轮进行了修整,不仅在参数上做了研究,还在金刚石磨粒大小上作了对比^[15]。余剑武等^[16-18]对金属结合剂砂轮的修整开展了较为系统的研究,采用电火花修锐方法对青铜结合剂锯齿形 CBN 砂轮在平面磨床上进行修锐试验,对修锐前后的砂轮表面形貌进行观测,修锐后砂轮的有效磨粒数、磨粒凸出高度明显增加,修锐时间以 4~6 h 为宜,并且对电火花

修整用 CuW70 电极材料的损耗进行了研究。SANCHEZ 等^[19]对大粒度金属结合剂 CBN 砂轮进行了电火花修整研究,结果表明修整后砂轮有较好的磨粒凸出高度,磨削效果较好,在磨削中能避免砂轮磨粒脱落。EDUARDO 等^[20]则研究了金属结合剂砂轮的电火花在机修整,试验表明修整后砂轮的磨削力降低。蔡兰容等^[21]研究了超硬磨料砂轮的喷雾电火花修整工艺,得到了较好的砂轮表面形貌。从国内外文献查阅来看,大多数研究都是基于电极材料、放电介质、放电参数等工艺问题的研究。

本文从电火花修整青铜结合剂金刚石砂轮的微观原理为切入口,分析修整过程中的放电能量与温度之间的关系。设计并搭建电火花修整青铜结合剂金刚石砂轮的试验平台,并设计三种不同弧面度数的铜钨电极,使电火花油通过电极中的通孔进入放电间隙。试验结果分别利用超景深三维显微镜、CCD 激光位移传感器以及扫描电子显微镜进行测量和分析,研究弧面电极与微粉金刚石砂轮的精度之间的关系,并通过精密磨削验证砂轮的修整效果。

1 电火花修整的微观过程

1.1 修整原理

青铜结合剂金刚石砂轮主要由导电的青铜结合剂和非导电的金刚石磨粒组成,当电极与砂轮之间脉冲性火花放电时,砂轮中的青铜结合剂将发生电腐蚀现象,从而使金刚石磨粒出刃高度增加。

图 1 为电火花修整青铜结合剂金刚石砂轮的原理图,修整的微观过程为:电极作为负极,砂轮作为正极,在电极与砂轮之间通入流动的电火花油,并施加一个脉冲电压;当电极与砂轮相互靠近时,两者之间将形成一个电场;电极与砂轮中的青铜基之间产生脉冲电火花,电火花油将被击穿,发生电离,形成放电通道;在电场作用下,带电粒子在电场中高速运动撞击电极和砂轮中的青铜基,转变为

图 1 电火花修整青铜结合剂金刚石砂轮原理图

热能,产生高温,使电极和青铜结合剂同时受热熔化甚至气化,体积瞬间猛增,发生热膨胀;抛出的电极和青铜结合剂蚀除物将发生凝聚并随电火花油流出;脉冲电压结束,带电粒子消除电离。可见电火花修整是一个集电场、电磁、热学、流体力学、材料电蚀于一体的复杂过程。

1.2 修整参数与能量分析

在电火花放电修整过程中,带电粒子在电场通道中运动,电极与砂轮之间将形成压降 u_c , 且压降 u_c 是时间的函数,那么

$$u_c|_{t=\tau_{on}} = d_n \nabla E_n(t) \quad (1)$$

式中, d_n 为电极和砂轮之间的间隙; ∇E_n 为放电通道中的电位梯度。

电极和砂轮之间的放电通道中的能量 w_c 为

$$w_c = d_n \int_0^{\tau_{on}} \nabla E_n(t) I(t) dt \quad (2)$$

式中, $I(t)$ 为放电电流。

砂轮中腐蚀坑的出现是由于电火花放电产生的高温热作用。火花放电是一个极其瞬间的过程,因此热能几乎全部来源于电能,那么放电通道中,与砂轮接触的单位面积 S 内和单位放电时间 t 内的热流密度 q 可描述为

$$q \cong \frac{w_c}{\int dS \int dt} \quad (3)$$

在放电通道与砂轮接触的表面上温度沿径向 z 分布可遵循高斯分布来描述

$$T(z,t) = \frac{2q\sqrt{\alpha t}}{a} \int_0^{\tau_{on}} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} dt \quad (4)$$

式中, a 为砂轮中金属结合剂的热导系数; α 为砂轮的热扩散率。

在放电过程中,保持一定的放电间隙,脉冲电源提供稳定的脉冲电压,那么放电能量只与两个因素有关:放电电流 $I(t)$ 和占空比(脉冲放电时间 τ_{on})。控制好放电电流值和占空比值,可有效达到控制砂轮中金属结合剂熔化温度。

2 试验条件和方法

2.1 试验准备

电火花修整 W10 青铜结合剂微粉金刚石砂轮的装置如图 2 所示。修整电源采用日本 FUJI 公司生产的 ED-911, 其输出脉冲电压为 60 V 和 90 V, 输出峰值电流为 10 A 和 20 A, 平均最大加工电流为 12 A, 占空比在 10%~70% 范围内可调。电极安装在四轴(水平运动轴 X 、 Y 、 Z 和旋转轴 R)电动伺服平台上。平台的运动精度可达 $1 \mu\text{m}$ 。利用旋转轴 R 将铜钨电极的倾斜至与水平方向的夹角为 30° , 同时利用水平轴将放电间隙控制在 $55 \sim 65 \mu\text{m}$ 范围内。砂轮安装在日本 NAKANISHI 公司生产的精密电主轴(型号 NR-3060S)上, 其转速范围为 $500 \sim 60\,000 \text{ r/min}$, 且旋转精度为 $1 \mu\text{m}$ 。本试验采用的砂轮为青铜结合剂微粉金刚石砂轮, 其规格参数如表 1 所示。

图2 砂轮修整试验装置示意图

表1 青铜结合剂微粉金刚石砂轮规格参数

型号	直径/ mm	厚度/ mm	杆径/ mm	杆长/ mm	粒度
8D×6T×5Y×30L DW10	8	7	5	30	W10

2.2 试验方法

为提高修整效率,同时避免尖角参与放电修整,本试验设计了三种不同弧面度数并带孔的铜钨电极,如图3所示,弧面电极增加了对砂轮的放电面

积;铜钨电极内加工了一个 $\varnothing 2$ mm小孔,主要用于电火花油强制冲液循环,提高放电间隙内电蚀产物的排屑能力,避免二次放电,提高修整精度。

图3 弧面铜钨电极的设计图与实物图

本试验采用铜钨电极接电源正极,砂轮接电源负极。对于不同弧度的电极进行试验时均采用同一修整参数,如表2所示。本试验在相同的试验环境下进行,考虑到本试验是砂轮的精修整研究,放电间隙较小,因此放电电流的选择不宜过大,相邻两次放电之间的间隙要足够长,以免烧伤砂轮表面的磨粒,因此占空比选择为50%。在整个修整试验过程中放电能量一致,且能量较低,防止产生过大的热能,从而避免金刚石石墨化,且热熔过大易造成较深的电腐蚀凹坑。本试验为了获得高精度的修整效果,使产生的放电痕迹更加微细,将每次的进给距离设置为 $1\text{ }\mu\text{m}$,直到没有明显电火花后再执行下一次的进给,这样可以减少持续放电的时间;砂轮的转速设置为 $1\,000\text{ r/min}$,这样砂轮与电极之间的电场在相对高速的情况下减弱,放电集中程度也会减小。砂轮修整前后,借助超景深三维显微镜(VHX-1000)、精密粗糙度仪(JB-4C)和高速、高精度CCD激光位移传感器(LK-G80)检测砂轮表面形貌、砂轮表面轴向轮廓以及圆跳动误差。

表2 电火花修整试验参数设置

工艺参数	峰值电压 /V	峰值电流 /A	占空比 (%)	砂轮转速 /(r/min)	冲液流速 /(m/s)
设置值	60	10	50	1 000	1.3

3 试验结果讨论

3.1 砂轮表面形貌

电火花修整前后的砂轮表面形貌如图4所示。修整前的砂轮表面磨粒裸露高度不明显,青铜结合剂颜色清晰;修整后的砂轮表面聚集了大量的积碳及其与熔融金属组成的混合物,所以砂轮表面看起

来较暗,但磨粒的裸露高度比较明显。由于微粉砂轮中的磨粒极其微细,其大小约为 $7\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,积碳及其熔融金属的混合物很容易覆盖磨粒,所以裸露出来的金刚石颗粒相对较少。但表面仍可观察到明显的热熔后呈冷凝形态的电蚀产物,电火花加工后的痕迹明显。

(a) 修整前

(b) 修整后

图4 金刚石微粉砂轮修整前后的表面微观形貌图

为了更好地观察磨粒的凸出情况,本方案增加对砂轮进行在线电解修锐的试验,由于覆盖层厚度有限,电解时间均设为 2 min ,均采用 60° 弧面电极作为电解电极。图5为电火花-电解复合修整后的青铜结合剂微粉金刚石砂轮的表面微观形貌图。当采用 60° 弧面电极电火花修整后辅以 60° 弧面电极电解修整(图5a),磨粒突出明显,数量较多且密集度高,金刚石磨粒保存完好;当采用 120° 弧面电极电火花修整后辅以 60° 弧面电极电解修整(图5b),磨粒突出仍然可见,但磨粒表面开始出现氧化现象;当采用 180° 弧面电极电火花修整后辅以 60° 弧面电极电解修整(图5c),金刚石磨粒出现严重氧化现象并附着于砂轮表面,而且青铜结合剂熔融飞溅到金刚石磨粒表面并附着。

3.2 砂轮表面粗糙度

普通砂轮表面形貌的评价指标主要有磨粒出刃高度、磨粒密度以及磨粒间距,由于砂轮中磨粒的随机性分布,其评价大都基于统计获得。微粉砂轮

的磨粒分布也具有随机性,但磨粒极其微细,其粒径只有几微米,出刃高度就更小。对于修整后微粉砂轮磨粒的评价,径向一般用圆跳动来评价,轴向的评价还没有一个统一标准。考虑到本研究中微粉金刚石粒径的大小,磨粒的实际出刃高度、磨粒分布密度等,以表面粗糙度形式来评价微粉砂轮轴向表面轮廓的修整效果。

(a) 60° 弧面电极电火花修整

(b) 120° 弧面电极电火花修整

(c) 180° 弧面电极电火花修整

图 5 电火花-电解复合修整后的砂轮表面微观形貌

图 6 为微粉砂轮轴向表面粗糙度的测量原理图,在微粉砂轮轴向的评定长度 l 内,既存在磨粒突出与陷入,又存在磨粒密集与疏松,还存在一定的孔隙率,因此将该三者同时考虑在内,计算出微粉砂轮轴向轮廓算术平均偏差 Ra ,以此来综合评价砂轮轴向表面轮廓,其表达式如下

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (5)$$

图 6 微粉砂轮轴向表面粗糙度的测量原理图

图 7 为砂轮不同弧面电极修整的微粉砂轮轴向粗糙度。修整前砂轮表面粗糙度平均值为 $0.849 \mu\text{m}$,偏差范围为 $0.12 \mu\text{m}$;而经 60° 弧面铜钨电极修整后的表面粗糙度平均值为 $1.117 \mu\text{m}$,偏差范围为 $0.16 \mu\text{m}$;经 120° 弧面铜钨电极修整后的砂轮表面粗糙度平均值为 $1.239 \mu\text{m}$,偏差范围为 $0.18 \mu\text{m}$;经 180° 弧面铜钨电极修整后的砂轮表面粗糙度平均值为 $1.325 \mu\text{m}$,偏差范围为 $0.25 \mu\text{m}$ 。随着电极弧度的增大,砂轮表面轴向的粗糙度开始逐渐增大,其偏差也开始增大,这可能是由于放电弧面积增大,工作液的流速变慢,其排屑能力减弱,带电碳颗粒来不及消电离或随介质流出间隙,很容易造成拉弧放电,使得砂轮表面电蚀凹坑变大,磨粒的出刃高度增大。

图 7 不同弧面电极修整下的砂轮轴向粗糙度

为保证砂轮表面保留较多磨粒,修整后的砂轮表面应相对平坦,即修整后表面粗糙度的偏差范围值应相对较小。

3.3 砂轮径向圆跳动

不同弧面度数的电极修整的砂轮不同,分别标记为砂轮 A、砂轮 B 和砂轮 C。采用 CCD 激光位移传感器对砂轮修整前的圆周跳动误差进行定时检测,其结果如图 8 所示,砂轮 A 修整前的圆跳动误差为 $122.8 \mu\text{m}$,砂轮 B 为 $187.6 \mu\text{m}$,砂轮 C 为 $167.8 \mu\text{m}$,分别如图 8a1、图 8b1 和图 8c1 所示。修整中每隔 15 min 进行一次测量,直到圆跳动误

差值相近为止。试验结果如图 8a2、图 8b2 和图 8c2 所示。90 min 后, 测量砂轮 A 不同位置的圆跳动误差值为 $1.7\ \mu\text{m}$ 、 $1.8\ \mu\text{m}$ 、 $1.8\ \mu\text{m}$; 75 min 后, 测量砂轮 B 不同位置的圆跳动误差值为 $2.1\ \mu\text{m}$ 、 2.0

μm 、 $2.2\ \mu\text{m}$; 60 min 后, 测量砂轮 C 不同位置的圆跳动误差值为 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $2.4\ \mu\text{m}$ 、 $2.6\ \mu\text{m}$ 。均取得较好的径向轮廓精度, 60° 弧面电极的修整效果最好。

图 8 不同弧面电极修整砂轮前后的圆跳动误差曲线图

4 修整后微粉砂轮的磨削性能

评价电火花修整后砂轮的好坏一般需要进行磨削性能测试, 并测量试件的表面粗糙度。为进一步

检测不同弧面电极修整后微粉砂轮的磨削性能, 本试验采用装置为日本 NACHI 制造的超精密加工机床 ASP005P。

修整后砂轮的磨削性能试验原理及装置如图 9 所示。本试验选用碳化钨 J05 作为磨削试件, 试件

尺寸为 $\phi 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 圆柱体,并将其安装在工件主轴上。修整后的 W10 青铜结合剂金刚石微粉砂轮则安装在砂轮主轴上,通过 B 轴的旋转可以实现砂轮轴与工件轴成 90° 布置。加工时,砂轮轴线与工件轴线控制在同一个平面内。

磨削过程分粗磨和精磨两步完成,工件主轴转速设置为 300 r/min ;砂轮沿 X 轴运动,同时沿 Z 轴方向进给,砂轮主轴的空气供给为 0.4 MPa 。粗磨时,砂轮的进给速度为 5 mm/min ,进给量为 0.005 mm/次 ,磨削 20 次;精磨时,砂轮的进给速度为 $1 \sim 2 \text{ mm/min}$,进给量为 0.001 mm/次 ,磨削 30 次,整个加工时间约为 3.5 h 。

(a) 原理图

(b) 装置图

图 9 修整后砂轮的磨削性能试验原理及装置图

图 10 为不同弧面电极修整砂轮磨削后工件表面微观形貌及表面粗糙度。如图 10a 所示,尽管的磨削划痕可以分辨出来,但工件表面微观形貌较为平坦,未出现明显的沟壑与隆起,这就是因为参与磨削的金刚石磨粒分布较为均匀,使得工件表面的痕迹与缺陷得到较为彻底地清除,得到较高的表面

加工质量, R_a 仅为 2.273 nm , RMS 为 2.964 nm ;图 10b 所示的磨削痕迹清晰可见且形状规则,磨削纹路之间为细小的缝隙,该形貌是典型的磨削加工形貌,虽然从表面粗糙度值($Ra5.7 \text{ nm}$)来看,已经达到了超精密加工的要求,但是从形貌来看较大的沟壑和隆起往往存在表面缺陷,增加了低频误差,使得表面质量降低;如图 10c 所示,磨削痕迹清晰可见,但形状较为不规则,表面微观形貌的沟壑和隆起之间的间隙变得稀疏,且同一沟壑或隆起中的波峰或波谷也变得参差不齐,极大地增加了表面缺陷,加大了低频误差,降低了工件表面质量, R_a 为 7.843 nm , RMS 为 9.968 nm 。因此,在超精密磨削加工中,应尽可能降低磨削痕迹,减少表面微观形貌中的沟壑与隆起,提高工件表面加工质量,而采用 60° 弧面电极修整后的砂轮已基本可以达到超精密镜面磨削的质量。

(a) 使用 60° 弧面铜钨电极修整后的砂轮磨削 (b) 使用 120° 弧面铜钨电极修整后的砂轮磨削 (c) 使用 180° 弧面铜钨电极修整后的砂轮磨削

图 10 不同弧面电极修整砂轮磨削的工件表面微观形貌

5 结论

(1) 60°弧面电极修整的砂轮表面磨粒突出明显, 数量较多且密集度高, 金刚石磨粒保存完好, 其表面形貌最佳; 随着电极弧面度数的增加, 金刚石出现氧化现象, 且熔融结合剂易附着在砂轮表面。

(2) 修整后砂轮的轴向轮廓和径向轮廓都随修整电极弧度的增大开始逐渐增大, 其偏差也开始增大。采用 60°弧面电极修整砂轮的圆跳动误差值最小, 可达 1.7 μm 、1.8 μm 、1.8 μm , 其修整效果最好。

(3) 采用 60°弧面电极修整砂轮磨削的试件表面粗糙度可达 $Ra\ 2.273\ \text{nm}$, 已基本达到超精密镜面磨削的质量。

(4) 经分析, 采用内冲式弧面电极修整砂轮时, 内冲的工作液流量和弧面面积对修整效果有较大的影响, 要有较好的匹配性, 需要进一步进行研究。

参 考 文 献

- [1] 荆君涛, 冯平法, 魏士亮, 等. Si_3N_4 陶瓷旋转超声磨削加工的表面摩擦特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3200-3210.
JING Juntao, FENG Pingfa, WEI Shiliang, et al. Surface friction characteristics of Si_3N_4 ceramics machined by rotary ultrasonic grinding [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(11): 3200-3210.
- [2] 王伟, 姚鹏, 王军, 等. 石英玻璃的热辅助高效塑性域干磨削[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 83-93.
WANG Wei, YAO Peng, WANG Jun, et al. Heat-assisted high efficiency ductile dry grinding of fused silica [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 83-93.
- [3] 刘振宇, 罗霄, 邓伟杰, 等. 大口径非球面的组合加工[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2791-2797.
LIU Zhenyu, LUO Xiao, DENG Weijie, et al. Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2791-2797.
- [4] 张红霞, 陈志同, 陈五一. 金刚石滚轮修整效果与修整机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 816-820.
ZHANG Hongxia, CHEN Zhitong, CHEN Wuyi. Dressing performance and dressing mechanism of diamond roller [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 816-820.
- [5] OHMORI H, NAKAGAWA T. Mirror surface grinding of silicon wafers with electrolytic in-process dressing [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1990, 39(1): 329-332.
- [6] BABU N R, RADHAKRISHNAN V, MURTI Y V G S. Investigations on laser dressing of grinding wheels—part I: Preliminary study [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1989, 111(3): 244-252.
- [7] BABU N R, RADHAKRISHNAN V. Investigations on laser dressing of grinding wheels—Part II: Grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1989, 111(3): 253-261.
- [8] DING Wenfeng, LI Haonan, ZHANG Liangchi, et al. Diamond wheel dressing: A comprehensive review [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2017, 139: 121006.
- [9] 余剑武, 何利华, 黄帅, 等. 电火花修整超硬磨料砂轮技术发展现状[J]. 中国机械工程, 2015, 26(16): 2254-2262.
YU Jianwu, HE Lihua, HUANG Shuai, et al. State-of-the-art electrical discharge dressing technology of superabrasive grinding wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(16): 2254-2262.
- [10] SUZUKI K, UEMATSU T, NAKAGAWA T. On-machine trueing/dressing of metal bond grinding wheels by electro-discharge machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1987, 36(1): 115-118.
- [11] 谢晋, 汤勇, 田牧纯. 金刚石砂轮金属结合剂的气中单脉冲电火花放电去除机理[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 93-98.
XIE Jin, TANG Yong, TAMAKI J. Mechanism on dry impulse discharge removal of metal bond of diamond grinding wheel [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 93-98.
- [12] 陈明君, 李子昂, 梁迎春, 等. 小直径金属基球头金刚石砂轮电火花修整技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 180-185.
CHEN Mingjun, LI Ziang, LIANG Yingchun, et al. Electrical discharge dressing technique of metal-bonded ball-headed diamond wheel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 180-185.
- [13] 洪建军, 蔡兰蓉, 胡德金. 不同介质中电火花修整金属基金刚石砂轮的研究[J]. 电加工与模具, 2008(6): 27-30.
HONG Jianjun, CAI Lanrong, HU Dejin. An experimental compare on discharge mediums used for electrical discharge machining (EDM) of metal-bonded diamond grinding wheel [J]. Electromachining & Mould, 2008(6): 27-30.
- [14] WANG X K, YING B G, LIU W G. EDM dressing of fine grain super abrasive grinding wheel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62(4): 299-302.

- [15] 王先逵, 应宝阁, 刘为刚. 金刚石微粉砂轮电火花修锐微观研究[J]. 制造技术与机床, 1995, (12): 13-16.
WANG Xiankui, YING Baoge, LIU Weigang. Micro research on electrical discharge dressing of diamond grinding wheels[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1995, (12): 13-16.
- [16] 余剑武, 段文, 曹运新, 等. 电火花修锐对 120#金属基 CBN 砂轮表面形貌的影响 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(1): 44-47.
YU Jianwu, DUAN Wen, CAO Yunxin, et al. Effect of electro-discharge dressing on surface topography of metal-bonded CBN grinding wheel [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(1): 44-47.
- [17] HE Lihua, YU Jianwu, DUAN Wen, et al. Copper-tungsten electrode wear process and carbon layer characterisation in EDM [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1): 1759-1768.
- [18] 余剑武, 段文, 何利华, 等. CuW70 铜钨电极损耗试验研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(7): 1016-1018.
YU Jianwu, DUAN Wen, HE Lihua, et al. Experimental investigation of Cu W70 copper-tungsten electrode wear [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(7): 1016-1018.
- [19] SANCHEZ J A., ORTEGA N, de LACALLE L N, et al. Analysis of the electro discharge dressing (EDD) process of large-grit size CBN grinding wheels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(7-8): 688-694.
- [20] EDUARDO W, SASCHA J, FRIEDRICH K, et al. On-machine wire electrical discharge dressing (WEDD) of metal-bonded grinding wheels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9-12): 1001-1007.
- [21] CAI Lanrong, HU Dejin, JIA Yan. Mist-jetting electrical discharge dressing technology for superabrasive grinding wheels [J]. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2008, 13(6): 712-716.

作者简介: 余剑武, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种加工技术, 数字化设计与制造技术, 先进材料复杂曲面精密加工技术及数控装备。

E-mail: yokenbu@yahoo.com

何利华(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为特种加工技术, 超硬磨料砂轮数控精密修整技术与装备。

E-mail: helihua0617@yahoo.com