

文章编号 1004-924X(2016)增-0477-07

## 金属结合剂金刚石砂轮的高压磨料水射流修锐技术

郑立功<sup>1</sup>,姚鹏<sup>2\*</sup>,张志宇<sup>1</sup>,薛栋林<sup>1</sup>,张振中<sup>2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,  
中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;  
2. 山东大学机械工程学院先进射流工程技术研究中心,山东 济南 250061)

**摘要:**为了解决金属结合剂金刚石砂轮在铰磨大口径反应烧结碳化硅反射镜过程中砂轮难修整与磨削力大的问题,对高压磨料水射流砂轮修锐技术进行了研究。通过对比修锐前后砂轮表面的微观形貌,分析了砂轮磨损机理与磨料水射流砂轮修锐机理,并采用砂轮表面地貌的三维粗糙度高度参数  $S_p$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$  和  $S_{ku}$  定量地分析和综合评价了修锐前后砂轮表面的磨粒突出高度和有效磨粒数。实验结果表明高压磨料水射流可以实现未使用和已磨钝的金属结合剂金刚石砂轮的修锐,使砂轮表面具有更多有效磨粒数以及更大的磨粒突出高度,有利于降低法向和切向磨削力。当喷嘴的进给速度为 0.5~16 m/min 时,进给速度对砂轮表面地貌三维表面粗糙度的影响趋势不显著。本研究确定了采用该方法修锐金属结合剂金刚石砂轮的有效性。

**关键词:**高压磨料水射流;金属结合剂金刚石砂轮;修锐;碳化硅反射镜;三维表面粗糙度  
**中图分类号:**TG580.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0477

## High-pressure abrasive water jet dressing of metal bonded diamond grinding wheel

ZHENG Li-gong<sup>1</sup>, YAO Peng<sup>2\*</sup>, ZHANG Zhi-yu<sup>1</sup>, XUE Dong-lin<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-zhong<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Center for Advanced Jet Engineering Technologies, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China*)  
*\* Corresponding author, E-mail: yaopeng@sdu.edu.cn*

**Abstract:** To solve the problem that dressing of metal bonded diamond grinding wheels during the grinding process for a large aperture aspherical RB-SiC mirror, high pressure abrasive water jet dressing was investigated. The unused, worn and dressed grinding wheel topographies were observed and compared to analyze the wear and dressing mechanism. 3D surface roughness amplitude parameters of these topographies, which include  $S_p$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$ , and  $S_{ku}$ , were analyzed and comprehensive evaluated. The experiment results show that abrasive grains of the unused or the worn grinding wheel are

收稿日期:2016-05-03;修订日期:2016-06-10.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51305237);中科院光学系统先进制造技术重点实验室开放基金资助项目

increased and well protruded from binder after dressing, which will lead to a decrease of normal and tangential grinding force. The feed rate of nozzle have no significant effect on the 3D surface roughness of grinding wheel as the feed rate is between 0.5 to 16 m/min. The results verified the feasibility of high pressure abrasive water-jet in-process dressing of metal bond diamond grinding wheel.

**Key words:** high-pressure abrasive water jet; metal bond diamond grinding wheel; dressing; RB-SiC mirror; three-dimensional surface roughness

## 1 引言

太空望远镜的大口径反应烧结碳化硅反射镜的高效精密加工一直是学术研究和工程应用领域的热点和难点<sup>[1-2]</sup>,为实现具有纳米级形状精度反射镜的超精密加工,通常采用铣磨、研磨、抛光、镀膜和离子束等加工工艺<sup>[3]</sup>。其中,作为粗加工工序,铣磨加工可以实现反射镜形状误差的快速收敛。但由于反应烧结碳化硅材料的硬度高,且大口径反射镜材料去除量大,铣磨加工过程中,常用的树脂结合剂金刚石砂轮的磨损过快、半径磨耗量大,不易控制加工表面的形状精度。相比树脂结合剂金刚石砂轮,金属结合剂金刚石砂轮由于结合剂的强度和硬度高,磨削硬脆材料时的磨损速度慢,更易保证加工精度。但金属结合剂砂轮自锐性较差,若不采用有效的在线或在位砂轮修锐方法,会导致在磨削过程中砂轮磨钝磨削力急剧增加,严重情况下可能造成反射镜镜坯的破损,造成巨大的经济损失<sup>[4]</sup>。

对于金属结合剂金刚石砂轮的修整,由于使用接触式的机械修整法,金刚石砂轮的磨耗量较大,目前多采用特种加工的方法,主要包括在线电解修整法(ELID)<sup>[5]</sup>、电火花修整法<sup>[6]</sup>和复合修整法<sup>[7]</sup>等。在线电解修整法(ELID)较适合超精密磨削中使用的细粒度砂轮的修锐;电火花修整法整形精度高,既可整形又可修锐,但由于放电过程产生的高温容易导致表层金刚石磨粒石墨化,使砂轮丧失磨削能力;复合修整法有电解电火花复合修整法、机械化学复合修整法等,修整效果较好,但系统较复杂、不易实现在线修整,且对于粗粒度金刚石砂轮的修整效率低。因此,金属结合剂金刚石砂轮的修整问题仍然没有得到很好的解决。

高压磨料水射流加工是一种冷态的高效加工方法,不会对被加工工件造成热损伤;加工过程中

喷头与工件无接触,射流对工件的作用力小,可避免工件机械损伤。俄罗斯和日本学者<sup>[8]</sup>曾利用高压纯水射流的清洗作用对堵塞的砂轮进行修锐,获得了显著效果。山东大学<sup>[9]</sup>曾尝试使用高压磨料水射流对树脂结合剂金刚石砂轮进行修锐,修锐后的砂轮不仅可以保持形状,还可以是磨粒在砂轮表面处于良好突出状态。

本文使用高压磨料水射流加工方法对金属结合剂金刚石砂轮进行修锐,观察砂轮磨损和修锐后砂轮微观表面地貌,分析磨损机理与高压磨料水射流修锐机理,并采用砂轮表面的三维粗糙度的高度参数分析和评价修锐后的砂轮表面地貌,以确定采用该方法在线修锐金属结合剂金刚石砂轮的有效性。



图 1 超高压水射流增压泵

Fig. 1 Ultra-high pressure water jet pump

## 2 试验装置与加工参数

砂轮修锐试验使用了后混式超高压磨料水射流加工系统,该系统主要由超高压水射流增压器、运动系统和供砂系统组成,如图 1 所示。试验使用美国福禄公司的超高压水射流增压器,增压器最高压力为 413 MPa,连续工作最高压力

380 MPa。如图 2 所示,ABB 公司的六轴机器人臂为该加工系统的运动机构。其 X、Y、Z 三轴的工作行程分别为 1 000 mm、1 000 mm 和 500 mm。其重复定位精度为 $\pm 0.06$  mm,机器人的有效负载为 16 kg,其轴 1、轴 2、轴 3 的最大速度可达  $150^\circ/\text{s}$ ,轴 4、轴 5 的最大速度可达  $360^\circ/\text{s}$ ,轴 6 的最大速度可达  $450^\circ/\text{s}$ ,利用该机器人可在工作空间内实现空间自由曲面的磨料水射流加工。与机器人相配的供砂系统,其最大储沙量为 200 L,磨料流量的供料量为  $0\sim 1\,000$  g/min。

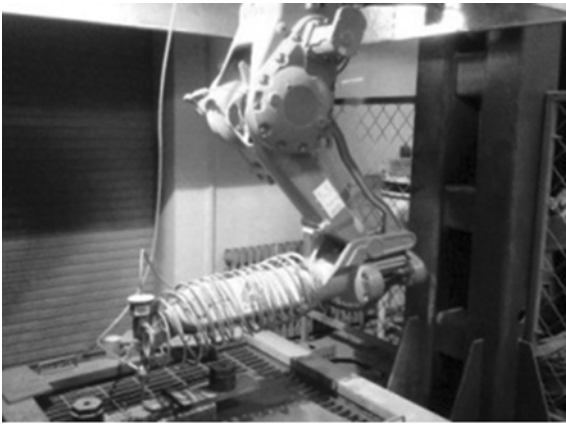


图 2 六轴机器人磨料水射流切割系统

Fig. 2 Six axis robotic abrasive water jet cutting system

试验使用喷嘴套件,水喷嘴内径为  $\Phi 0.264$  mm,混砂管内径为  $\Phi 0.76$  mm。磨料使用粒度为 100 目的石榴石水刀砂,石榴石的主要性能参数如表 1 所示。高压磨料水射流砂轮修整的对象为直径 100 mm,厚度为 15 mm 的 D126 盘形金属结合剂金刚石砂轮,如图 3 所示。砂轮的一个边由于磨削 RB-SiC 反射镜表面而发生磨损,另一边未使用,试验分别对两种砂轮表面进行修整和对比。

表 1 磨料材料的主要性能参数

Tab. 1 Main parameters of abrasive

材料	化学成分/%	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	莫氏硬度
石榴石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 18~26 FeO 25~32 SiO <sub>2</sub> 35~40	3.95	7~8

试验使用 3D 激光共聚焦显微镜 VK-X200K



图 3 被修锐的金属结合剂金刚石砂轮

Fig. 3 The dressed metal bonded diamond grinding wheel

测量被修锐的砂轮表面。对于实验结果的测量,使用  $200\times$  的放大倍率观察修锐痕迹的轮廓形貌和被修锐区域砂轮地貌,计算去除面积,测量三维表面粗糙度高度参数。并在  $1000\times$  和  $3000\times$  的放大倍率下,观察磨粒的微观形貌,了解修锐机理。

高压磨料水射流加工的工艺参数包括射流压力、靶距、磨料流量、倾斜角度和进给速度等,这些参数都会对修锐后的砂轮表面地貌和修锐的材料去除率的产生影响<sup>[9-10]</sup>。为研究磨料水射流修锐金属结合剂金刚石砂轮的有效性,本试验固定了除进给速度以外的其他工艺参数,仅改变进给速度,具体加工参数见表 2。

表 2 磨料水射流砂轮修锐工艺参数

Tab. 2 Process parameters of abrasive water jet dressing grinding wheels

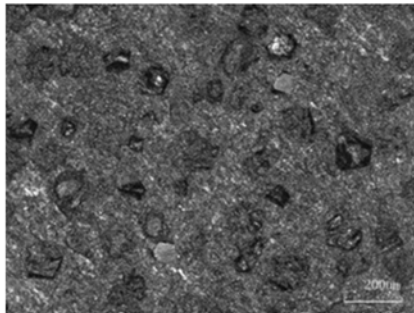
工艺参数	射流压力 /MPa	靶距 /mm	磨料流量 /(g/min)	倾斜角度 /(°)	进给速度 /(m/min)
取值	60	4	200	90	0.5, 1, 4, 16

### 3 试验结果与分析

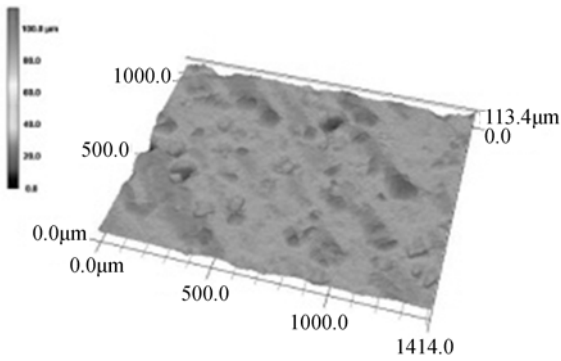
#### 3.1 砂轮表面地貌的微观形貌观察

图 4(a)所示为未使用过的新砂轮表面的光学显微镜照片,从照片中可以看出有大量的金刚石磨粒突出在砂轮表面上。采用更高倍率的镜头对砂轮表面进行观察,如图 5(a)和(b)所示,这些金刚石晶型完整,损伤较少。通常,如图 4(b)所示,由于受砂轮成形的模具表面质量的影响,在砂

轮表面能观察到明显的纹理方向。



(a)

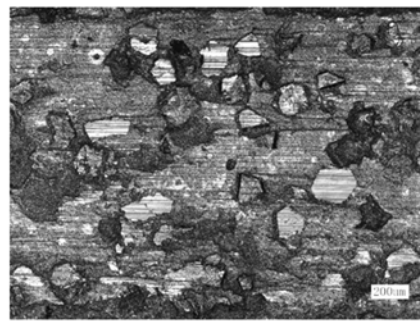


(b)

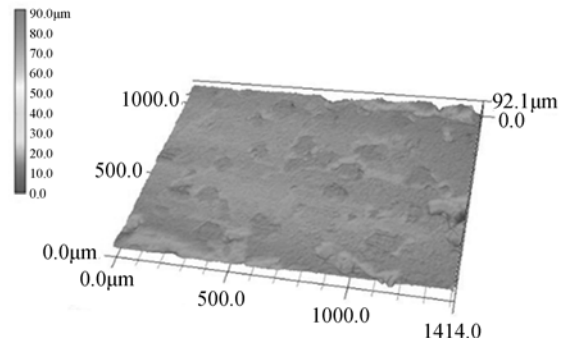
图 4 新砂轮表面(200×)

Fig. 4 New grinding wheel surface(Magnification of 200)

磨粒,结合剂也与工件表面发生剧烈的摩擦,会使磨削过程中法向力和切向力增大,并消耗更多磨削能。从图 7(b)中可以发现磨削过程中由于磨削力导致金刚石磨粒受挤压破碎,以及明显的由于结合剂与工件摩擦导致的结合剂部分的磨损。砂轮表面的凹坑为磨粒脱落所产生。因此,砂轮的磨损机理为砂轮表面金刚石磨粒的磨钝、破碎与脱落,以及结合剂的磨钝。



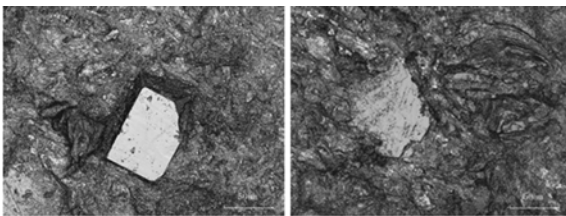
(a)



(b)

图 6 已磨损的砂轮表面地貌(200×)

Fig. 6 Worn grinding wheel surface topography (Magnification of 200)



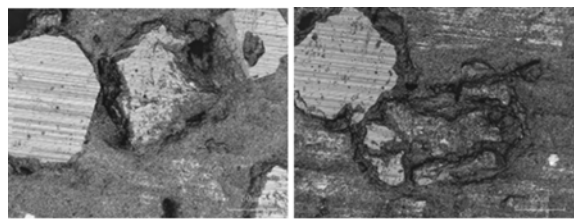
(a)

(b)

图 5 新砂轮表面的磨粒(1 000×)

Fig. 5 Abrasive grains of new grinding wheel surface (Magnification of 1 000)

磨削碳化硅后的金属结合剂金刚石砂轮表面的光学显微镜照片如图 6(a)所示,砂轮表面的金刚石磨粒与结合剂都发生了剧烈的磨损。进一步放大观察磨粒,如图 7(a)所示,沿着砂轮旋转方向的金刚石磨粒表面的划痕可以说明磨削过程中碳化硅材料对金刚石磨粒剧烈的硬质颗粒磨损作用。处于砂轮表面且突出高度较高的金刚石磨粒明显被磨平,磨粒突出结合剂的高度仅有 2~5 μm(图 6(b)),因此导致磨削过程中不仅金刚石



(a)

(b)

图 7 已磨损砂轮表面的磨粒(1 000×)

Fig. 7 Abrasive grains of worn surface of grinding wheel (Magnification of 1 000)

图 8 所示为高压磨料水射流修锐后的砂轮表

面地貌,从图中可以发现明显有磨粒突出在砂轮的表面,从 3 维表面地貌(图 8(b))可以看出,与 4 (b)和 6(b)相比,水射流修锐后的磨粒有较大的突出高度。高压磨料水射流修锐砂轮时,磨料高速冲击砂轮表面,对结合剂进行冲蚀,去除磨损砂轮表面一定深度的结合剂以及部分磨钝的磨粒,使新的磨粒突出砂轮表面。如图 9(a),通过高倍率的观察发现,这些突出在砂轮表面的金刚石磨粒的晶型保持完好,没有发生明显的破损,说明水射流中的磨料并没有造成金刚石磨粒的损伤。如图 9(b),对结合剂的观察发现,在结合剂表面有明显的具有一定方向性的大量划痕,而图 7(b)和 9(b)中均未观察到这类划痕的存在,证明了高压磨料水射流砂轮修锐过程中,高压水携带的石榴石磨料对砂轮表面的结合剂产生微切削作用。

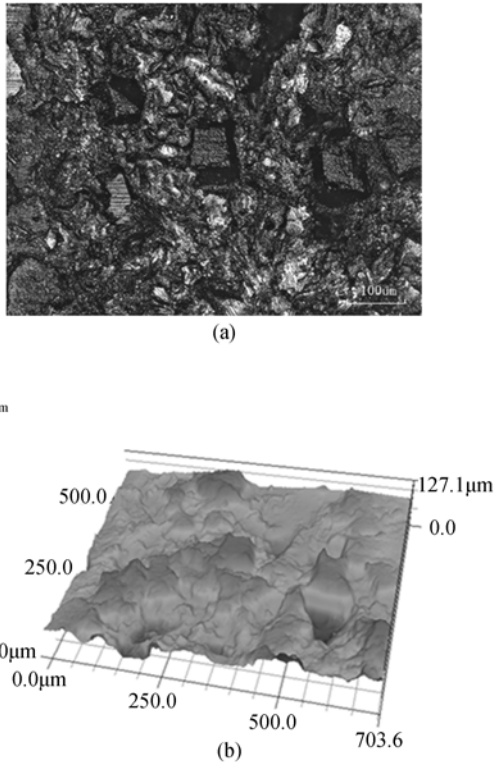


图 8 磨料水射流修锐后的砂轮表面地貌(400×)

Fig. 8 Grinding wheel surface topography after abrasive water-jet dressing (Magnification of 400)

### 3.2 砂轮表面地貌的三维粗糙度高度参数评价

除了对砂轮表面地貌进行微观的观察外,采用了三维表面粗糙度的高度参数定量评价高压磨料水射流砂轮修锐后的表面地貌,从而判断砂轮处于修锐还是磨钝状态,评价砂轮修锐效果。

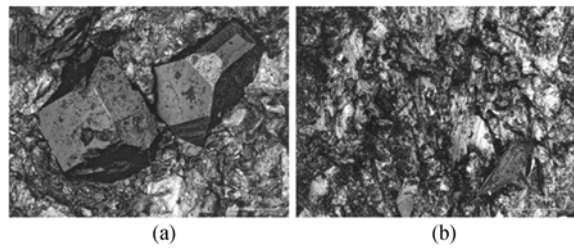
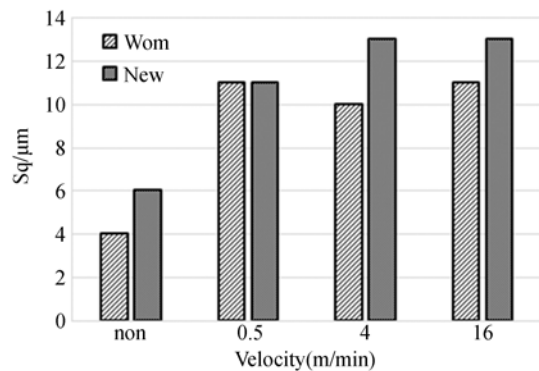


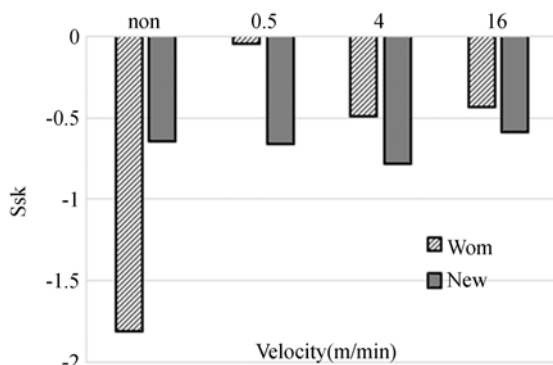
图 9 高压磨料水射流修锐后砂轮表面的磨粒(a)(1 000×)与结合剂(b)(3 000×)

Fig. 9 Grains of grinding wheel surface after high pressure abrasive water-jet dressing (a) (Magnification of 1 000) and bond (b) (Magnification of 1 000)

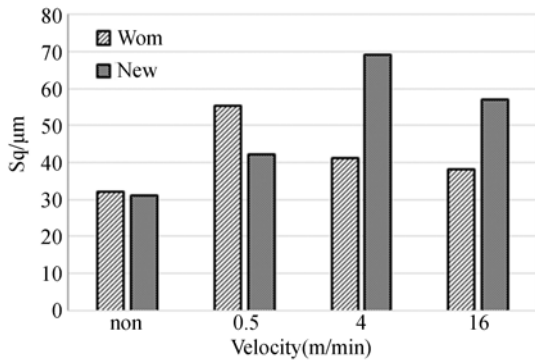
图 10 所示为以不同的切割头进给速度对新砂轮表面和磨损砂轮表面进行高压磨料水射流砂轮修锐前后,表面地貌的三维粗糙度的 4 个高度参数。如图 10(a)所示,在未修锐前,磨钝砂轮表面的  $S_q$  明显小于新砂轮表面,说明磨钝砂轮的表面更光滑;两种砂轮表面修锐后的  $S_q$  都明显增加,砂轮表面变得更粗糙。在相同的修锐参数下,



(a)修锐前后砂轮表面地貌高度分布的均方根粗糙度  
(a)RMS roughness of the grinding wheel surface topography before and after dressing

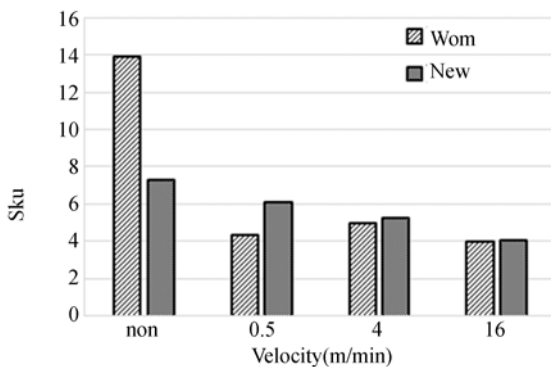


(c)修锐前后砂轮表面地貌高度分布的偏度  
(c)Skewness of the grinding wheel surface topography before and after dressing



(b) 修锐前后砂轮表面地貌高度分布的最大峰值

(b) Maximum peak height of the grinding wheel surface topography before and after dressing



(d) 砂轮修锐前后表面地貌高度分布的峰度

(d) Kurtosis of the grinding wheel surface topography before and after dressing

图 10 进给速度对表面粗糙度高度参数的影响

Fig. 10 Effect of feeding rate on surface roughness altitude parameters

新砂轮表面经过修锐后的  $S_q$  略大于磨损砂轮表面的  $S_q$ , 因此原始表面的状态对修锐后砂轮表面地貌也有影响。当喷嘴的进给速度从 0.5~16 m/min 内变化时, 喷嘴的进给速度对表面粗糙度的影响并没有明显的趋势。

如图 10(b) 所示, 未修锐的新砂轮和磨损砂轮表面的  $S_p$  结果较接近, 主要是由于这里的最大峰值指磨粒突出高度值与均值的差, 两个表面的均值不处于同一高度, 因此并不能直接反映磨粒突出高度情况; 但经过修锐后, 两种砂轮表面的  $S_p$  值都明显增大。由于磨粒的最大突出高度受到磨粒尺寸与分布的随机性影响, 两种初始砂轮表面状态经过修锐后的磨粒最大突出高度有较大的变化, 喷嘴的进给速度对表面粗糙度的影响也没有明显的趋势。

图 10(c) 为砂轮表面地貌高度分布的偏度

$S_{sk}$ , 本次试验获得的各种条件下的砂轮表面的  $S_{sk}$  均小于零, 呈左偏分布, 高度分布的均值 < 中位数 < 众数, 磨损表面的  $S_{sk}$  绝对值远大于新砂轮表面和修锐后的砂轮表面, 说明磨损表面的高度分布为明显的低谷结构占优的分布, 即磨粒脱落严重, 砂轮表面的有效磨粒数少; 新砂轮和修锐后的砂轮表面高度分布的  $S_{sk}$  绝对值均较小。因此, 可以以  $S_{sk}$  值来判断砂轮表面的磨粒脱落现象是否严重, 是评价砂轮表面有效磨粒数的重要指标。

图 10(d) 为砂轮表面地貌高度分布的峰度  $S_{ku}$ , 所有的砂轮表面的  $S_{ku}$  均大于 3, 即偏离正态分布。磨损砂轮表面的  $S_{ku}$  的远大于新砂轮表面, 说明磨损砂轮表面的高度分布更集中在众数附近, 新砂轮与经过修锐后, 由于表面的磨粒突出状态明显改善,  $S_{ku}$  显著降低, 向正态分布的方向移动; 修锐后的砂轮表面磨粒突出状态比新砂轮有进一步的改善。因此,  $S_{sk}$  值也是判断砂轮表面的磨钝磨损现象是否严重, 砂轮是否已经修锐的重要指标。

用高压磨料水射流修锐后的砂轮磨削碳化硅反射镜时, 由于相同砂轮半径切入深度下, 磨削区砂轮与工件的实际接触表面积明显降低, 因此可显著降低法向磨削力, 防止工件因磨削力过大而破损; 同时, 由于修锐后的砂轮加工工件时, 可以避免结合剂材料与砂轮的剧烈磨损, 因此可以降低切向磨削力、比磨削能和磨削区温度, 从而降低磨削能耗。

## 4 结 论

本文应用高压磨料水射流对金属结合剂金刚石砂轮进行了修锐, 并利用砂轮表面的三维粗糙度的多个高度参数定量分析修锐后的砂轮表面地貌, 得出以下结论。

(1) 高压磨料水射流可以实现未使用和已磨钝的金属结合剂金刚石砂轮的修锐, 使砂轮表面的磨粒具有更大的突出高度, 有利于降低磨削力。

(2) 砂轮表面地貌的三维粗糙度高度参数  $S_p$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$  可用于综合评价砂轮的磨损和修锐状态。此定量综合方法可以为砂轮磨损状态的在线监控提供依据。

(3) 当喷嘴的进给速度为 0.5~16 m/min

时,进给速度对砂轮表面地貌三维表面粗糙度高度参数的影响规律不显著。

为实现大口径碳化硅反射镜铣磨加工的在线磨料水射流砂轮修锐,还需进一步根据铣磨机床

主轴结构和机床工作空间研制具有摆动喷嘴的高压磨料水射流砂轮在线修锐装置,研究砂轮在线修锐参数对砂轮表面地貌、磨削力和工件表面质量的影响。

### 参考文献:

- [1] 殷龙海,王孝坤,李龙响,等. 大口径 SiC 离轴非球面的高效磨削加工[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2497-2505.  
YIN L H, WANG X K, LI L X, *et al.*. Fast grinding of large SiC off-axis aspheric surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2497-2505. (in Chinese)
- [2] 王旭. 使用优化的固着磨料磨盘全口径加工碳化硅反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2123-2131.  
WANG X. Fabrication of SiC mirror in full aperture with optimized fixed abrasive polishing pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2123-2131. (in Chinese)
- [3] 董斌超,张舸. 超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2185-2191.  
DONG B CH, ZH G. Fabrication and properties of ultra-lightweight SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2185-2191. (in Chinese)
- [4] 任敬心,华定安,等. 磨削原理[M]. 北京:电子工业出版社,2011.  
REN J X, HUA D A, *et al.*. *Grinding principle* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry of China, 2011. (in Chinese)
- [5] GUAN J L, CHEN L, ZH X H, *et al.*. Cylindrical Precision Machining Process Based on ELID Grinding Technology[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 8: 004.
- [6] 陈海深,张喜平. 金属结合剂金刚石成型砂轮电火花修整方法研究[J]. 工具技术, 2015, 49(6): 25-29.  
CHEN H SH, ZHANG X P. Study on EDM dressing method of metal bond matrix diamond grinding wheel[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(6): 25-29. (in Chinese)
- [7] 杨志波,杨瑞云,李斌,等. 金刚石砂轮激光-超声振动复合修整试验研究[J]. 河南科技学院学报:自然科学版, 2016, 44(1): 46-50.  
YANG ZH B, YANG R Y, LI B, *et al.*. Experimental research on truing of diamond wheels with laser-heating and ultrasonic vibration assistance[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(1): 46-50. (in Chinese)
- [8] HIRAO M, IZAWA M, IGUCHI N, *et al.*. Waterjet In-process Dressing (1st Report) [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1998, 64: 1335-1339.
- [9] YAO P, WANG W, HUANG CH ZH, *et al.*. High Efficiency Abrasive Waterjet Dressing of Diamond Grinding Wheel [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1017: 243-248.
- [10] AXINTE D A, STEPANIAN J P, KONG M C, *et al.*. Abrasive waterjet turning—An efficient method to profile and dress grinding wheels[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2009, 49(3-4): 351-356.

### 作者简介:



郑立功(1969—),男,吉林省长春人,博士,研究员,1992年于吉林工业大学获工学学士学位,2003年于长春光机所获理学博士学位。主要从事非球面加工及检验技术研究。Email: zhenglg@ciomp. ac. cn



姚鹏(1979—),男,辽宁大连人,博士,副教授。2005年于东北大学获得硕士学位,2011年于日本东北大学获得博士学位。主要研究领域为磨削与超精密加工技术、多能场复合加工技术。E-mail: yaopeng@sdu. edu. cn