

碟轮修整单层钎焊金刚石砂轮对磨削 SiC 的材料去除机理的影响

张 昆 苏宏华 徐 旺 黄 武 徐九华

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:碟轮修整方法可以实现对单层钎焊金刚石砂轮的精密修整,改善磨粒等高性,提高加工表面质量。为了探究此种修整方法对磨削 SiC 陶瓷的材料去除机理的影响,建立了砂轮修整量与单颗磨粒最大切厚之间影响关系的理论模型,并且进行了单层钎焊金刚石砂轮的碟轮修整实验,在修整过程中又进行了 SiC 陶瓷的磨削实验。从砂轮磨粒形貌及磨削表面形貌角度对磨削过程中的材料去除机理进行了研究。结果表明,碟轮修整单层钎焊金刚石砂轮增加了砂轮表面动态有效磨粒数,减小了单颗磨粒最大切厚,使 SiC 陶瓷的材料去除方式从修整前的脆性断裂转变为塑性变形,最终实现了 SiC 陶瓷的延性域磨削。

关键词:碟轮修整;单层钎焊金刚石砂轮;SiC 陶瓷;材料去除机理

中图分类号:V261.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)05-0732-06

Influence of Plate Wheel Dressing of Monolayer Brazed Diamond Wheel on Material Removal Mechanism in SiC Grinding

Zhang Kun, Su Honghua, Xu Wang, Huang Wu, Xu Jiuhua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Monolayer brazed diamond wheel can be precisely dressed by the plate wheel dressing method. The contour of grits is improved and the quality of the ground surface is enhanced. In order to investigate the influence of the dressing method on the material removal mechanism, a theoretical model about the influence of the dressing depth on the maximum undeformed chip thickness is proposed. Besides, a monolayer brazed diamond wheel is dressed through plate wheel dressing. During the dressing procedure, a serial of grinding experiments are carried out on SiC ceramics. The material removal mechanism of the ground surface on SiC ceramics is studied in terms of the morphologies of grits and the ground surfaces. The results show that the number of the dynamic effective grits on the diamond wheel is increased when dressing the monolayer brazed diamond wheel with the plate wheel, leading to the decrease of the maximum undeformed chip thickness. The material removal mode changes from brittle rupture to plastic deformation. The ductile-regime grinding of SiC ceramics is realized finally.

Key words: plate wheel dressing; monolayer brazed diamond wheel; SiC ceramics; material removal mechanism

基金项目:国家自然科学基金(51275231)资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj130119)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

通信作者:苏宏华,男,教授,博士生导师,E-mail:shh@nuaa.edu.cn。

SiC 作为一种常用的工程陶瓷,具有硬度高耐磨性好等优点,被广泛应用于航空航天,汽车,电子,光学等领域^[1-3]。磨削加工是这类材料最主要的机械加工方法。

单层钎焊金刚石砂轮具有磨粒出露度高,对磨粒把持力大,使用寿命长等优点^[4],是磨削工程陶瓷的有效工具。随着钎焊技术的不断成熟,在工程陶瓷磨削加工领域,单层钎焊金刚石砂轮有逐渐取代传统结合剂砂轮的趋势。然而由于在制造过程中磨粒粒径大小不一,磨粒排布方位不同以及砂轮基体的加工误差,造成了单层钎焊金刚石砂轮磨粒等高性不一致的缺陷^[5]。这样在磨削过程中只有少部分磨粒能够参与磨削,磨出的工件表面质量较差。尤其当加工 SiC 等脆硬材料时,表面/亚表面损伤较为严重,难以实现延性域磨削。

针对单层钎焊金刚石砂轮磨粒等高性不一致的缺陷,为实现 SiC 陶瓷的延性域磨削,需要对砂轮进行精密修整。对此,国内外学者进行过一系列的探索研究^[6-8]。其中,徐旺^[8]等人采用基于机械化学综合效应的碟轮修整方法对单层钎焊金刚石砂轮进行了修整。此修整方法中使用的修整工具是一个两侧钎焊有金刚石磨粒的 45 钢材质碟轮。在修整过程中,碟轮上的金刚石起机械修磨作用,45 钢材质的碟轮基体与砂轮上的金刚石磨粒发生化学反应,起到化学磨损作用。实验结果表明,碟轮修整法可以实现单层钎焊金刚石砂轮的精密修整。修整后的砂轮磨粒等高性得到显著改善;使用修整后的砂轮磨削 SiC 陶瓷,其表面质量得到很大提高。

磨削表面质量的提高必然是砂轮表面众多磨粒共同作用的结果,其中存在着材料去除方式的改变。然而,碟轮修整过程对材料去除方式的影响机理目前尚不明确,这为修整参数的优化以及修整过程的控制带来不便。

为了清楚反映出碟轮修整方法对材料去除方式的影响机理,本文建立了砂轮表面磨粒排布理想状态下的修整量对单颗磨粒最大切厚影响关系的理论模型。随后进行了单层钎焊金刚石砂轮的碟轮修整实验,并在修整过程中进行了 SiC 陶瓷的磨削实验。从砂轮磨粒形貌和磨削表面的形貌方面对材料去除机理进行了分析研究。

1 理论模型

材料去除方式由单颗磨粒最大切厚决定^[9],单

颗磨粒最大切厚是单颗磨粒实际切出的未变形切屑最大厚度。单颗磨粒最大切厚的计算是复杂的,国内外学者进行了丰富的研究,提出了多种计算方法^[10-11]。其中,Shaw 推荐的单颗磨粒最大切厚计算公式^[11]为

$$a_{g\max} = \left[\frac{4v_w}{v_s C_0 r \sqrt{\frac{a_p}{d_s}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: C_0 为砂轮表面单位面积上的有效刃数; v_w 为工作台进给速度; v_s 为砂轮线速度; r 为切屑宽度与厚度之比; a_p 为磨削切深; d_s 为砂轮直径。

从式(1)中可以看出,单颗磨粒最大切厚除了与磨削参数有关外,也受砂轮的性能参数的影响,主要体现在砂轮直径、单位面积上的有效刃数以及切屑宽度与厚度之比上。修整过程中砂轮直径的改变量十分微小,对比砂轮直径的大小来说是可以忽略的。由于磨削过程中切屑的宽度与厚度之比由磨粒磨削刃的形状决定,而已有的研究表明^[12],采用碟轮修整方法修整后的单层钎焊金刚石砂轮不会产生钝化。因此,从统计意义上可以认为在修整前后金刚石磨粒磨削刃形状未发生改变,其磨出的切屑宽度与厚度之比是不变的。这样,碟轮修整对单层钎焊金刚石砂轮单颗磨粒最大切厚的影响就集中体现在改变砂轮表面单位面积上有效刃数 C_0 上。由于有效刃数与有效磨粒数是同一概念^[13],故以有效磨粒数代替有效刃数。

将单层钎焊金刚石砂轮上有序排布的磨粒等效为如图 1 所示的理想化情况:周向相邻的磨粒之间的距离为 P ;轴向相邻的磨粒之间的距离为 λ ;磨粒排布的角度为 φ 。则单位面积上的磨粒数量为

$$C_n = \frac{1}{\lambda P \sin \varphi} \quad (2)$$

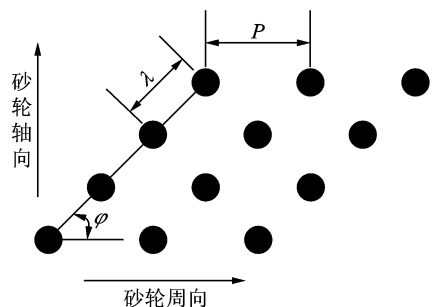


图 1 砂轮表面磨粒排布示意图

Fig. 1 Schematic of grit distribution on grinding wheel

若砂轮表面所有的磨粒等高性一致,则在磨削

工件时,这些磨粒均能参与到磨削过程中,均为动态有效磨粒,则单位面积上动态有效磨粒数 $C_0 = C_n$ 。但是由于磨粒粒径大小不一以及磨粒排布位向的不同,各磨粒顶端至砂轮基体表面的距离并不相同,如图2所示,取其最大值为 H_{\max} ,最小值为 H_{\min} 。磨削工件时,实际上只有部分磨粒能够参与到磨削过程中,单位面积上动态有效磨粒数 $C_0 < C_n$ 。由于磨粒排布时粒径及位向的选择是随机的,可认为磨粒顶端至砂轮基体表面距离 H 在区间 $[H_{\min}, H_{\max}]$ 上服从均匀分布。

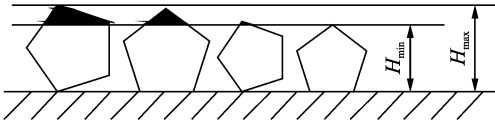


图2 未修整的砂轮表面磨粒高度示意图

Fig. 2 Schematic of grit heights on undressed grinding wheel

在碟轮修整过程中,磨粒尖端在机械化学综合作用下不断被去除。当砂轮径向被修整掉 x 高度时,初始高度处在区间 $[H_{\max} - x, H_{\max}]$ 里的磨粒高度是一致的,为 $H_{\max} - x$ 。磨削工件时,这些磨粒均为动态有效磨粒,则单位面积上这些磨粒的数量为

$$C_1(x) = \frac{x}{H_{\max} - H_{\min}} C_n \quad (3)$$

由于磨削过程中单颗磨粒最大切厚 $a_{g\max}$ 的存在,单位面积上动态有效磨粒数是大于 $C_1(x)$ 的,因为初始高度在区间 $[H_{\max} - x - a_{g\max}, H_{\max} - x]$ 里的磨粒理论上也可能参与到磨削过程中来,如图3所示。

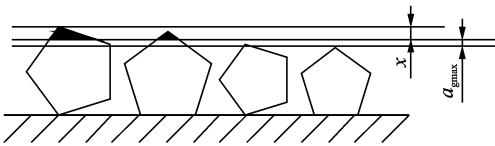


图3 修整后的砂轮表面磨粒高度示意图

Fig. 3 Schematic of grit heights on dressed grinding wheel

因为区间 $[H_{\max} - x - a_{g\max}, H_{\max} - x]$ 里的磨粒高度不同,所以磨削过程中此区间里的磨粒并不全是动态有效的。鉴于区间 $[H_{\max} - x - a_{g\max}, H_{\max} - x]$ 长度较小,其中的磨粒数量有限,静态磨粒数与动态磨粒数之间的差别对计算结果影响不大,此处以该区间里的静态磨粒数代替动态有效磨粒数。则在单位面积上,其数量为

$$C_2(x) = \frac{a_{g\max}}{H_{\max} - H_{\min}} C_n \quad (4)$$

则此时砂轮表面单位面积动态有效磨粒数为

$$C_0(x) = C_1(x) + C_2(x) = \frac{x + a_{g\max}}{H_{\max} - H_{\min}} C_n \quad (5)$$

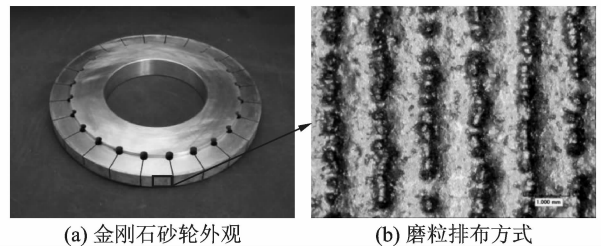
使用 $C_0(x)$ 替换式(1)里的 C_0 即可得此种理想模型下的单颗磨粒最大切厚

$$a_{g\max} = \left[\frac{4\lambda P v_w \sin\varphi (H_{\max} - H_{\min})}{(x + a_{g\max}) v_s r} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式(6)可以直观地反映出修整过程对单颗磨粒最大切厚的影响关系:当砂轮径向被修整量 x 增大时,单颗磨粒最大切厚减小(反证法)。采用碟轮修整法对单层钎焊金刚石砂轮进行修整时,随着修整的进行,砂轮磨粒的修整量 x 逐渐增大,单颗磨粒最大切厚逐渐减小,材料的去除方式逐渐由脆性断裂向塑性变形转变。当 x 足够大使得单颗磨粒最大切厚小于 SiC 陶瓷脆延性转变临界切厚时,就可以实现 SiC 陶瓷的延性域磨削。

2 实验条件与方法

实验选用的单层钎焊金刚石砂轮由真空下高温钎焊而成。磨粒选用 YK9 金刚石,粒径为 80/100#,采用单层有序排布。磨粒排布角度为 90° ,周向相邻磨粒的间距为 1 mm,砂轮直径为 260 mm,工作宽度为 18 mm。金刚石砂轮外观及磨粒排布方式如图4所示。



(a) 金刚石砂轮外观

(b) 磨粒排布方式

图4 单层钎焊金刚石砂轮

Fig. 4 Monolayer brazed diamond wheel

为了研究碟轮修整法对砂轮磨削工件材料去除方式的影响,本文采用碟轮修整方法对单层钎焊金刚石砂轮进行了精密修整,修整碟轮规格及修整参数与文献[8]所述相同,共进行了14次修整。为研究修整过程对 SiC 陶瓷的材料去除机理的影响,在修整开始之前及每次修整结束之后都进行了磨削 SiC 陶瓷实验,对磨粒形貌和工件表面形貌进行了观察,对材料去除机理进行了分析。实验所用

SiC 陶瓷的规格为 $50\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,性能参数如表 1 所示。为了消除工作台及装夹带来的误差,每次磨削实验都以相同的参数重复进行 10 次,对最终获得的平面进行观测,磨削参数如表 2 所示。采用切入式磨削方式及水基冷却液。实验中磨粒形貌进行观察时,为了避免砂轮重复拆装带来的误差,采用了复形技术。使用硅橡胶印模材料对砂轮表面形貌进行复形,实验结束后使用三维视频显微镜(DM-KH7700)对印模材料上的磨粒形貌进行观察。修整实验与磨削实验均在 PROFIMAT MT408 型高速平面精密磨床上进行,其主轴功率可达 45 kW ,最高转速为 $8\ 000\text{ r/min}$,径向跳动小于 $1\ \mu\text{m}$ 。

表 1 SiC 陶瓷材料性能

Tab. 1 Material properties of SiC ceramics

参 数	数 值
硬度/GPa	28
弹性模量/MPa	4.1×10^5
断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	3.2

表 2 磨削参数

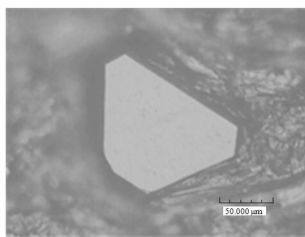
Tab. 2 Grinding parameters

参 数	数 值
砂轮速度/(m·s ⁻¹)	80
工件进给速度/(m·min ⁻¹)	0.03
磨削切深/ μm	5
累计磨削深度/ μm	50

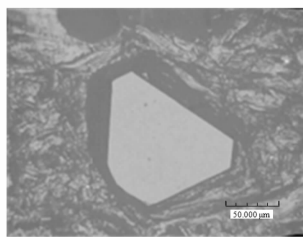
3 实验结果分析

修整结束后对硅橡胶印模材料上复印的磨粒形貌进行观察发现,修整后的砂轮上磨粒形貌主要有两类:完整的磨粒和磨耗的磨粒。图 5 所示为一个完整的磨粒形貌,这个磨粒由于出露高度较低,整个修整过程中都没有被修整到,因而其形貌一直保持不变的。图 6 所示为一个磨耗的磨粒在修整过程中的形貌变化。从图中可以看到,砂轮未修整时,该磨粒保持完整。修整 7 次后,磨粒的左半部分出现了一个磨耗平台。此后磨耗平台逐渐增大,至修整结束时,磨耗平台的面积几乎占据了磨粒表面的一半。这个磨粒由于高度较大,在修整过程中随着砂轮径向进给不断增大,其被修整掉的高度也逐渐增大。

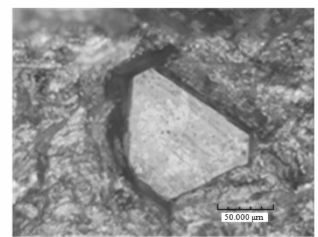
经过统计发现,随着修整次数的增加,砂轮上磨耗的磨粒数量逐渐增多,而完整的磨粒数量逐渐减少。这是因为随着出露过高的磨粒逐渐被修整变低,越来越多的磨粒被修整到,因而越来越多的磨粒出现了磨耗平台。这些磨粒因为被磨耗而处于同一高度水平。砂轮被修整量越大,处于同一高度的磨粒数量就越多,砂轮表面动态有效磨粒数量就得到增加,这与式(3)所描述的现象是一致的。这样,由式(6)可知,使用此砂轮磨削工件时,随着砂轮修整量逐渐增大,单颗磨粒最大切厚将逐渐减小,材料的去除机理也将逐渐改变。



(a) 未修整时



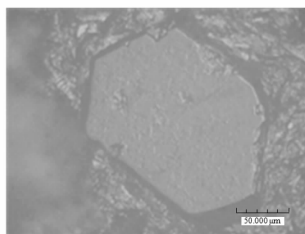
(b) 修整7次后



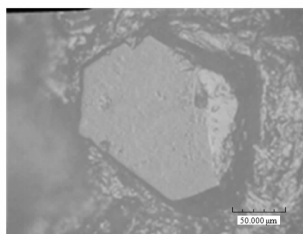
(c) 修整14次后

图 5 完整的磨粒形貌变化

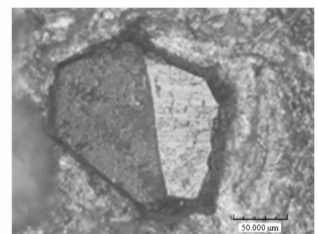
Fig. 5 Changing morphologies of intact grit



(a) 未修整时



(b) 修整7次后



(c) 修整14次后

图 6 磨耗的磨粒形貌变化

Fig. 6 Changing morphologies of wearing grits

图7所示的是使用未修整的砂轮磨出的工件表面形貌。从图7(a)所示的整体形貌图中可以看出工件表面的磨削沟槽十分明显,且深浅不一。这说明只有少部分的磨粒参与了磨削过程,也反映出未修整的砂轮磨粒等高性不一致问题。从图7(b)所示的局部放大图中可以看出,工件表面纹理十分粗糙,有很多裂纹存在。此外,工件表面密布着因材料脆性剥落而产生的凹坑。很明显,脆性断裂是主要的材料去除方式。未修整的砂轮表面磨粒等高性不一致,磨削工件时,单位面积上动态有效磨粒数较少,导致磨削过程中单颗磨粒最大切厚较大,超过了SiC陶瓷的脆延性转变临界切厚,因此,材料的去除方式主要是脆性断裂。

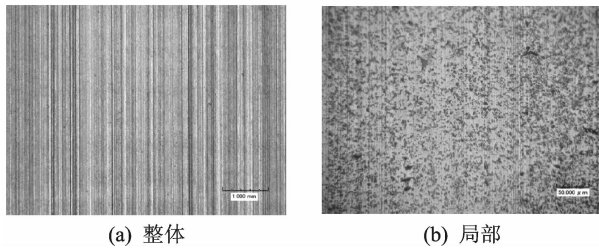


图7 砂轮未修整时SiC表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of SiC ceramics when grinding wheel is undressed

图8所示为砂轮修整7次后磨削SiC陶瓷获得的表面形貌图。从图8(a)所示的整体形貌中可以看出,工件表面依旧有很多磨痕,但是比起修整前,磨痕变得更加密集而且深度变得更浅。从图8(b)所示的局部放大图中已经看不到宏观裂纹,虽然工件表面仍然有一些材料脆性剥落留下的凹坑,但是其数量已经显著减少。此外,工件部分表面出现了连续的塑性变形区。这说明脆性断裂与塑性变形同时是磨削SiC陶瓷的材料去除方式。由于修整过程改善了磨粒等高性,使能够参与磨削的磨粒数量大大增加,磨粒的重复切削次数增加,因此磨痕变得更密更浅。经过7次修整后,砂轮磨粒被

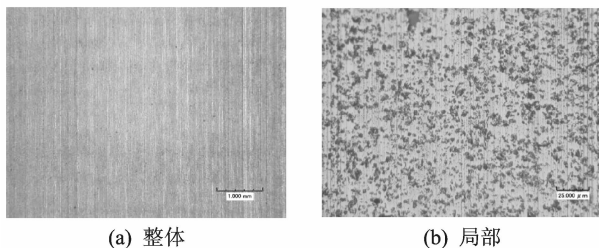


图8 砂轮修整7次后SiC表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of SiC ceramics when grinding wheel is dressed seven times

修整掉一定的高度,因此砂轮表面单位面积动态有效磨粒数增加,单颗磨粒最大切厚减小。因而材料去除方式才会由脆性断裂逐渐向塑性变形转变,这与式(6)所描述的规律是一致的。

由于在实际修整过程中,被修整的磨粒磨损状态不尽相同,其修整后的高度难以达到理论上的完全一致,所以磨削过程中砂轮表面动态有效磨粒的高度是存在差异的,这些磨粒的单颗磨粒最大切厚并不完全相同,导致部分磨粒最大切厚大于SiC的脆延性转变临界切厚,呈现的是脆性断裂的材料去除方式;部分磨粒最大切厚小于SiC的脆延性转变临界切厚,呈现的是塑性变形的材料去除方式。所以才会出现脆性断裂与塑性变形同时存在的现象。

图9所示的是使用修整14次后的砂轮磨出的工件表面形貌。从图9(a)所示的整体图中可以看出,工件表面十分光滑,甚至出现了镜面效果。由于表面不同区域的反射性能不同,因而显示出不同的颜色。从图9(b)所示的局部放大图中几乎看不到裂纹的存在,表面纹理变得更加均匀,材料剥落而产生的凹坑数量比图8也明显减少。大片连续的塑性去除区域出现在工件表面上,塑性变形已经成为材料去除的主要方式。这说明修整14次后,砂轮的修整量已经足够大,导致磨削过程中的单颗磨粒最大切厚足够小,已经小于SiC陶瓷的脆延性转变临界切厚,因此塑性变形成为了材料去除的主要方式,SiC陶瓷的延性域磨削因此得以实现。

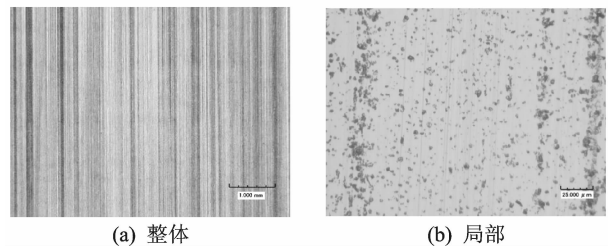


图9 砂轮修整14次后SiC表面形貌

Fig. 9 Surface morphology of SiC ceramics when grinding wheel is dressed 14 times

4 结 论

(1) 碟轮修整单层钎焊金刚石砂轮,主要通过改变砂轮表面单位面积动态有效磨削刃数来改变单颗磨粒最大切厚,进而影响磨削工件的材料去除方式。

(2) 随着修整的进行,砂轮磨粒的修整量逐渐增大,单颗磨粒最大切厚逐渐减小,工件材料去除

方式逐渐由脆性断裂向塑性变形转变。

(3) 修整前的砂轮磨削 SiC 陶瓷,其表面纹理粗糙,布满裂纹及凹坑,脆性断裂是主要的材料去除方式;当砂轮修整后,SiC 陶瓷表面很光滑,出现了镜面效果,塑性变形成为主要的材料去除方式,实现了 SiC 陶瓷的延性域磨削。

参考文献:

- [1] 陈明和,傅桂龙,张中元,等. SiC 陶瓷在航天器高温结构件研制中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(2):132-136.
Chen Minghe, Fu Guilong, Zhang Zhongyuan, et al. Application of SiC ceramics to manufacture of spacecraft combustion chamber[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 32(2):132-136.
- [2] 柴威,邓乾发,王羽寅,等. 碳化硅陶瓷的应用现状[J]. 轻工机械, 2012, 30(4):117-120.
Chai Wei, Deng Qianfa, Wang Yuyin, et al. Application status of SiC ceramics[J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(4):117-120.
- [3] 金志浩,高积强. 工程陶瓷材料[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2000.
Jin Zhihao, Gao Jiqiang. Engineering ceramic materials[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.
- [4] Chattopadhyay A K, Hintermann H E. On performance of brazed single-layer CBN wheel[J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 313-317.
- [5] Su Honghua, Fu Yucan, Xu Jiuhua, et al. Dressing of monolayer brazed diamond wheel for grinding Li-Ti ferrite[J]. Advanced Materials Research, 2010, 126/127/128: 995-1000.
- [6] Ghosh A, Chattopadhyay A K. Experimental investigation on performance of touch-dressed single-layer brazed cBN wheels[J]. International journal of Machine Tool & Manufacture, 2007, 47(7/8): 1206-1213.
- [7] Dold C, Transchel R., Rabiey M, et al. A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picoseconds laser sources[J]. Annals of the CIRP, 2011, 60(1): 363-366.
- [8] 徐旺,苏宏华,徐九华,等. 碟轮修整单层钎焊金刚石砂轮的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(1): 38-41.
Xu Wang, Su Honghua, Xu Jiuhua, et al. Experimental research on dressing of monolayer brazed diamond grinding wheel with plate wheel[J]. Diamond & Abrasive Engineering, 2012, 32(1): 38-41.
- [9] Shimada S, Ikawa N, Inamura T, et al. Brittle-ductile transition phenomena in microindentation and micro-machining[J]. Annals of the CIRP, 1995, 44(1): 523-526.
- [10] 任敬心,华安定. 磨削原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
Ren Jingxin, Hua Anding. Principle of grinding[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- [11] 诸兴华. 磨削原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
Zhu Xinghua. Principle of grinding [M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [12] 戴逢明. 粗磨粒金刚石砂轮的修整试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
Dai Fengming. The experimental research on dressing of coarse diamond grinding wheel [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014.
- [13] 李伯民,赵波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
Li Bomini, Zhao Bo. Modern grinding technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.