

# 单颗磨粒切厚均匀化实现脆性材料延性域磨削技术

傅玉灿 张 贝 徐鸿钧 苏宏华

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:**脆性材料磨削加工中容易出现表面亚表面损伤等质量问题,而且加工效率较低,这已经成为脆性材料产品大规模商品化生产的瓶颈。本文提出了一种新的工艺构想,即采用磨粒有序排布的砂轮及其精细的修整工艺实现单颗磨粒切厚均匀化,使得每颗磨粒都处于脆性材料的延性加工状态,从而实现脆性材料的延性域磨削。基于此构想,制作了磨粒有序排布的单层钎焊超硬磨粒砂轮,并进行了一系列的修整和磨削试验,最后实现了氧化锆陶瓷的延性域磨削。实验证明该工艺方法可行,有效且可操作。

**关键词:**脆性材料;延性域磨削;单层钎焊砂轮;单颗磨粒切厚

中图分类号: TG74

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)05-0754-08

## Ductile Regime Grinding of Brittle Material with Unifying Undeformed Chip Thickness of Grain Cutting Edge

*Fu Yucan, Zhang Bei, Xu Hongjun, Su Honghua*

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

**Abstract:** In grinding of brittle materials, it is easy to produce quality problem such as surface/subsurface damage during machining and the machining efficiency is low. This can be a bottleneck of the commercial mass production of brittle materials. The paper proposes a new process principle, which uses the grinding tool with orderly distributed grains and precision dressing to unify the undeformed chip thickness. From this method, every grain can be made suitable for ductile cutting, then the ductile grinding can be realized. Accordingly, the paper produces monolayer brazed super abrasive grinding tools, and conducts a series of experiment including dressing and grinding. Finally, a ductile surface of Zirconia ceramic is achieved. The experiment proves that this process principle is liable, effective and operable.

**Key words:** brittle materials; ductile regime grinding; monolayer brazed grinding wheel; undeformed chip thickness of grain cutting edge

脆性材料具有很多优良特性,如低密度、高硬度、高强度以及耐高温、耐磨损、耐化学腐蚀等,广泛应用于航空、汽车、光学和半导体工业领域<sup>[1]</sup>。

脆性材料主要有氧化物、碳化物、氮化物、硼化物等种类。化学键主要由共价键和离子键组成,韧性低脆性大,材料制备工艺一般比较复杂,难以避免材料内部生成的缺陷,并且在加工过程中也会引

入多种表面亚表面损伤,造成了脆性材料零件在加工后出现的强度等力学性能以及其他光学、电磁学等性能的下降,也造成了脆性材料零件的使用性能和使用寿命的降低,这样就影响了脆性材料零件的可靠性。

为了提高脆性材料零件的加工质量,人们不得不采用更加耗时的研磨工艺,这使得脆性材料的加

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2009CB724403)资助项目。

修订日期:2012-08-08

通讯作者:傅玉灿,男,教授,博士生导师,E-mail: yucanfu@nuaa.edu.cn。

工成本几乎达到总成本的50%~80%。脆性材料的磨削技术越来越受到研究者的关注,如果脆性材料的磨削工艺能够实现脆性材料的高质量加工,那么磨削将会成为研磨的有潜力的替代工艺。

本文旨在尝试通过控制砂轮形貌,使得砂轮表面上的每一颗磨粒都在控制的用量条件下进行磨削。如果每颗磨粒的切厚都限定在脆性材料的延脆域转变的临界切厚值以下,那么每颗磨粒都会产生延性域的磨削效果,避免个别磨粒或者一部分磨粒因切厚过大而产生脆性破碎引起的表面或亚表面缺陷。为此,本文将会进行一系列的实验来验证这种通过单颗磨粒切厚均匀化方法实现脆性材料延性磨削的工艺方法。

## 1 工艺原理

### 1.1 粗粒度砂轮磨削脆性材料的启示

为了保证脆性材料零件的磨削表面亚表面质量,通常采用细粒度的砂轮进行磨削。这也就形成了一种认识,即粒度越细,所加工出来的脆性材料零件越能满足加工的要求<sup>[2]</sup>。然而,细粒度砂轮磨削将会出现下列问题:

(1) 细粒度砂轮的磨粒分布不均匀性会因混料时的团聚而增大,而且细粒度砂轮的磨粒间距偏小,容屑空间不足,磨粒出露不高,所以磨削时砂轮容易形成堵塞。

(2) 细粒度砂轮磨削时磨粒磨损相对较快,磨粒脱落偏多,为了保持砂轮的切削能力,必须增加修整的频率或者进行在线修整。

为了克服细粒度砂轮磨削时的困难,有些学者转向采用粗粒度砂轮来磨削脆性材料。赵清亮等<sup>[3]</sup>用91 μm 粒径的电镀金刚石砂轮磨削出的K9 玻璃表面粗糙度为Ra0.15 μm,范超幸<sup>[4]</sup>用91 μm 粒径的电镀金刚石砂轮磨削出的碳化硅表面粗糙度可达Ra0.7 μm。还有其他的实验<sup>[5-6]</sup>证明,脆性材料零件的表面质量不依赖于砂轮粒度的大小。

磨削质量的好坏不取决于砂轮粒度的粗细,而是取决于砂轮磨粒的单颗切厚,这一点从那些粗粒度砂轮在磨削脆性材料之前所必须进行的精细修整上就可以看出。粗磨粒必须经过调整才能获得与细磨粒一样的磨削效果,这说明粗磨粒在修整后的单颗磨粒切厚变得与细磨粒相差无几了。

粗粒度砂轮磨削脆性材料虽然可以实现部分的延性域,但这样的实验结果也只有很少的文献报道,在一般的工厂企业更是难以想象。即使从这些有限的文献中也能明显感觉到有些磨削结果对磨

床设备的依赖有多么强烈,这说明粗磨粒砂轮的磨削工艺是不成熟的,磨削效果也是不稳定的。有些实验用的砂轮磨粒浓度偏大,他们是依靠几乎是密集排布的磨粒浓度来提高动态磨粒数的,这种方法并不是以提高磨粒利用率为出发点的,也就是说必须增加很多的冗余磨粒才能实现更高质量的加工。

综上所述,为了实现粗磨粒砂轮更稳定有效的磨削,其单颗磨粒切厚必须均匀一致。因此,首先应该使磨粒有序排布,其次通过修整控制磨粒的等高能性,最后通过调整磨削用量,使得所有的或者绝大多数单颗磨粒切厚在脆性材料延脆域转变的临界切厚值以下,也只有这样才可以实现真正意义上的延性域磨削。

### 1.2 脆性材料的延性域磨削机理

Bifano<sup>[7]</sup>在他的博士论文里曾这样阐述,小切厚促使材料去除由脆性向延性转变可以从能量的角度分析。特别是在小切深加工的场合,从能量消耗上看塑性变形比脆性断裂更具有优先性。材料抗塑性变形的能力可表示为屈服强度 $\sigma_s$ ,一定体积 $V_p$ 的塑性变形能可以写成

$$E_p = \sigma_s V_p \quad (1)$$

材料的抗断裂能力可以表示为Griffith 裂纹扩展参数 $G$ ,断裂能是裂纹新生表面面积 $A_b$ 的函数,则

$$E_b = GA_b \quad (2)$$

设加工尺度为 $b$ ,则有理由断定 $V_p$ 和 $A_b$ 取决于 $b$ ,也就是

$$V_p \sim b^3, \quad A_b \sim b^2 \quad (3)$$

这样去除能的比值就可以写成

$$\frac{\text{塑性变形能}}{\text{断裂能}} \sim \frac{E_p}{E_b} \propto b \quad (4)$$

如果加工尺度减小,那么塑性流动就会变成能耗更少的材料去除方式。因此,延脆域转变的临界切厚是支配材料塑性和断裂的本身特性的因素。

Malkin 等<sup>[8]</sup>在他对陶瓷磨削机理的综述中曾这样阐述,脆性材料无论是单颗刻画实验还是磨削加工实验,都可以实现无损伤形式的延性加工,即在保证一定工艺和工具的前提下脆性材料可以实现像切削金属一样的加工效果。而实现脆性材料的延性域加工必须满足一定的接触载荷或者磨粒切厚的条件,即当磨粒施加载荷或者磨粒与工件的干涉深度小于一定值时延性域去除就会形成。

当然,脆性材料的延性域理论在磨削界也存在部分的争议,Zhang 等<sup>[9]</sup>曾经对脆性材料粉末域的加工机理做过严谨细致的描述。但无论哪一种磨削

机理都支持单颗磨粒的临界切厚条件,即存在一种临界切厚,如果每颗磨粒的实际切厚满足不大于这个临界切厚值,那么脆性材料磨削将不会因脆性破碎去除而形成不能接受的粗糙表面。

基于以上理论,在磨削过程中只有控制了单颗磨粒切厚,才能开发出有效的延性域加工工艺。

### 1.3 实现单颗磨粒切厚均匀化的方法

为了实现单颗磨粒切厚的均匀化,需要满足以下3个条件:

- (1) 砂轮表面磨粒的有序排布;
- (2) 超硬磨粒的修整;
- (3) 磨削用量的调整。

磨粒的有序排布技术是实现单颗磨粒切厚均匀化的首要关键技术,Aurich等<sup>[10]</sup>曾经做过单层电镀有序排布的砂轮。从他的文章里可以看出,磨粒排布并非易事。电镀砂轮因属于常温固结,所以存在有磨粒有序排布后粘胶残留和固结失效等问题。钎焊砂轮的高温钎焊工艺<sup>[11]</sup>克服了这样的缺点,同时可实现磨粒的有序排布<sup>[12]</sup>。本文依靠课题组的多年研究基础,采用自行研制的专利技术<sup>[13]</sup>实现了砂轮磨粒可靠的有序排布。

砂轮的磨粒修整并非一般意义上的砂轮修整,不是去除部分结合剂而使磨粒出露或者去除钝化的磨粒使新鲜的磨粒能够出露,磨粒修整的主要目的是调节磨粒的出露高度,使磨粒的等高性能够得到最大程度的改善,同时也必须保证磨粒不能因修整而出现严重的钝化。超硬磨料砂轮的修整目前仍是个技术难点,Ghosh,Chen<sup>[14-15]</sup>也曾做过相关的实验研究。本文依据他们的成功经验,自行研制了一种节块式的修整工具,可以简单快捷地完成修整工序。

磨削用量的调整是最后决定磨削效果的直接影响工序。如果砂轮修整效果良好,采用合理的工序流程和最终工序的用量选择即可获得满意的脆性材料零件的加工表面质量。

## 2 实验方法

### 2.1 砂轮的制作

本文制作两个单层钎焊磨粒有序排布的砂轮。砂轮基体为45钢,磨粒分别选用粒径355~425 μm和160~180 μm的超硬磨料。钎料采用粒度200/230的Ag-Cu-Ti合金粉。砂轮钎焊在真空炉VAF-20中进行钎焊,最高温度为920℃,最高温度保温时间4 min。具体的磨粒排布方法如图1所示,首先在钢基体上钎焊一层钎料,再在钎料表面涂一层

胶,然后采用模板排布超硬磨料颗粒,取掉模板后,磨粒便被有序地粘接在带有钎料层的钢基体上,最后入炉再次钎焊,即可完成磨粒的有序固结。

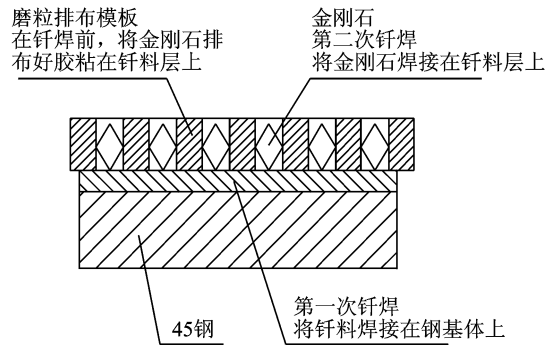


图1 磨粒排布固结工艺

### 2.2 砂轮磨粒的修整

单层钎焊超硬磨料砂轮的修整方法如图2所示,修整实验在HZ-Y150磨床上进行,砂轮匀速旋转运动(转速为0.72 m/s),修整节块磁吸在磨床工作台上做往复运动(进给速度10 m/min),并有一定的横向进给(进给速度1 mm/行程),待节块移出砂轮干涉范围后,砂轮向下微量进刀(进刀量5 μm)。

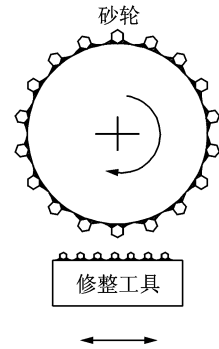


图2 单层钎焊砂轮的磨粒修整

为了保证修整的效率和效果,依次采用了3种粒度的金刚石修整工具,即40/50,80/100和140/170,修整工具的制作方法同砂轮一样,为单层钎焊有序排布的金刚石节块。这样修整初期主要是削除较大的磨粒高度不平量,改善磨粒的等高性,到修整的后期主要是改善磨粒顶端的微观锋刃,使其产生适中的微锋刃,以利于磨粒具有最佳的切削能力。

### 2.3 磨削工艺参数

磨削工艺在砂轮修整后机床原上进行。磨削材料为氧化锆陶瓷(图3),显微硬度HV1300,断裂韧性 $10.5\sim 13 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。磨削为普通往复磨,磨削用量条件可参看表1。

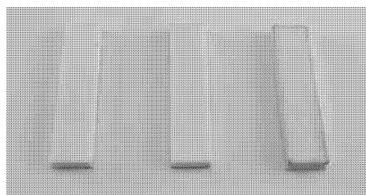


图3 氧化锆试件

表1 磨削用量条件

参数	数值
砂轮速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	24
工件速度/( $m \cdot min^{-1}$ )	0.5, 5, 10
切深/ $\mu m$	5
余量/mm	0.05
横向进给/(mm/行程)	1

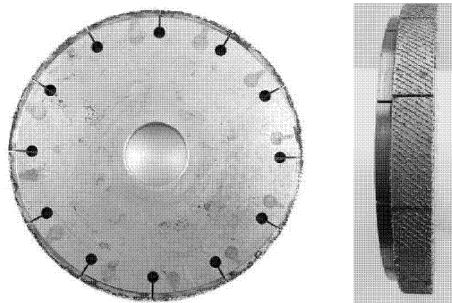


图4 砂轮A外观

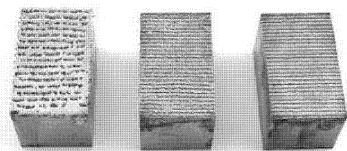


图5 修整工具

### 3 实验结果

#### 3.1 砂轮钎焊及修整效果

由2.1节的方法制作出的砂轮A、B。砂轮A磨粒粒径为 $355 \sim 425 \mu m$ ,磨粒间距为1 mm;砂轮B磨粒粒径为 $160 \sim 180 \mu m$ ,磨粒间距为1 mm。砂轮A的外观如图4所示。修整工具的磨粒排布和钎焊与砂轮的制作方法相同,其外观如图5所示。

钎焊状况如图6所示,超硬磨料钎焊后,钎料铺展均匀、无明显流淌,无磨粒包埋现象。磨粒晶型清晰出露良好,出露高度几乎达到80%~90%。

采用KEYENCE LK-G80 激光传感器测量砂轮修整前后的轮廓中的一段如图7,8所示。图7为

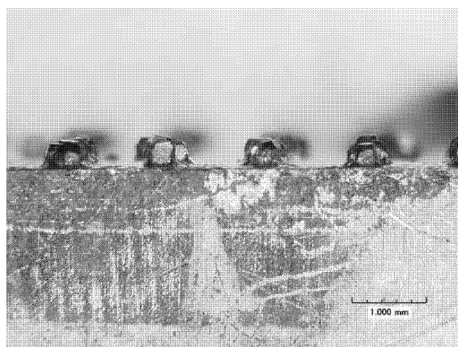
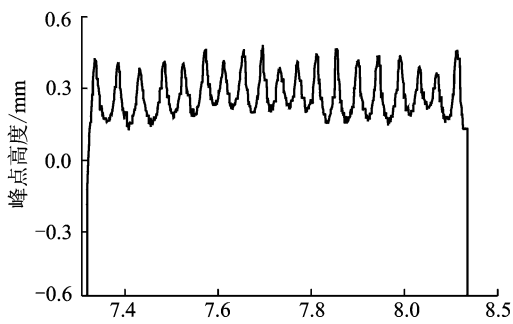
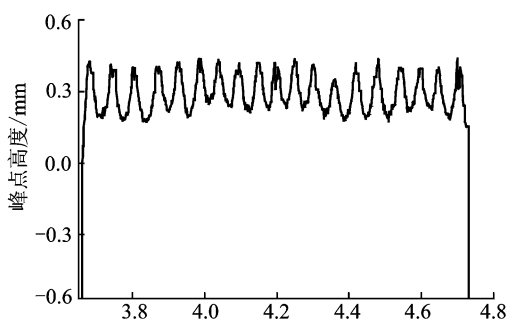


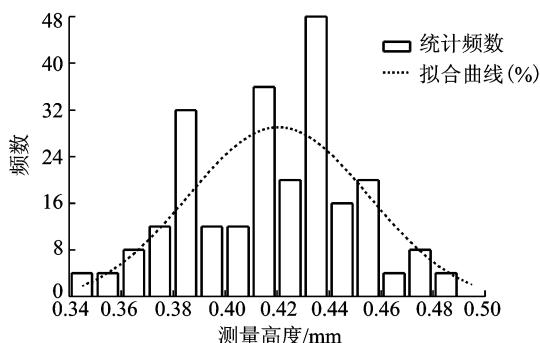
图6 粒度40/50超硬磨料的钎焊状况



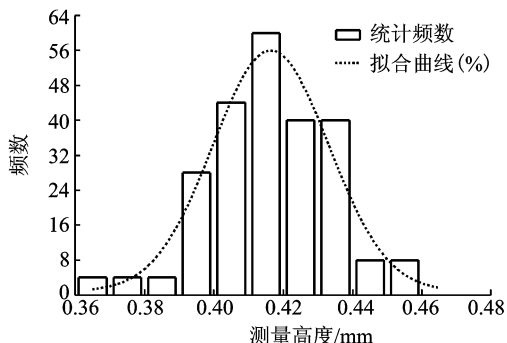
(a) 修整前轮廓



(b) 修整后轮廓



(c) 修整前轮廓峰点统计分布



(d) 修整后轮廓峰点统计分布

图7 砂轮A的激光测量轮廓以及轮廓峰点统计分布

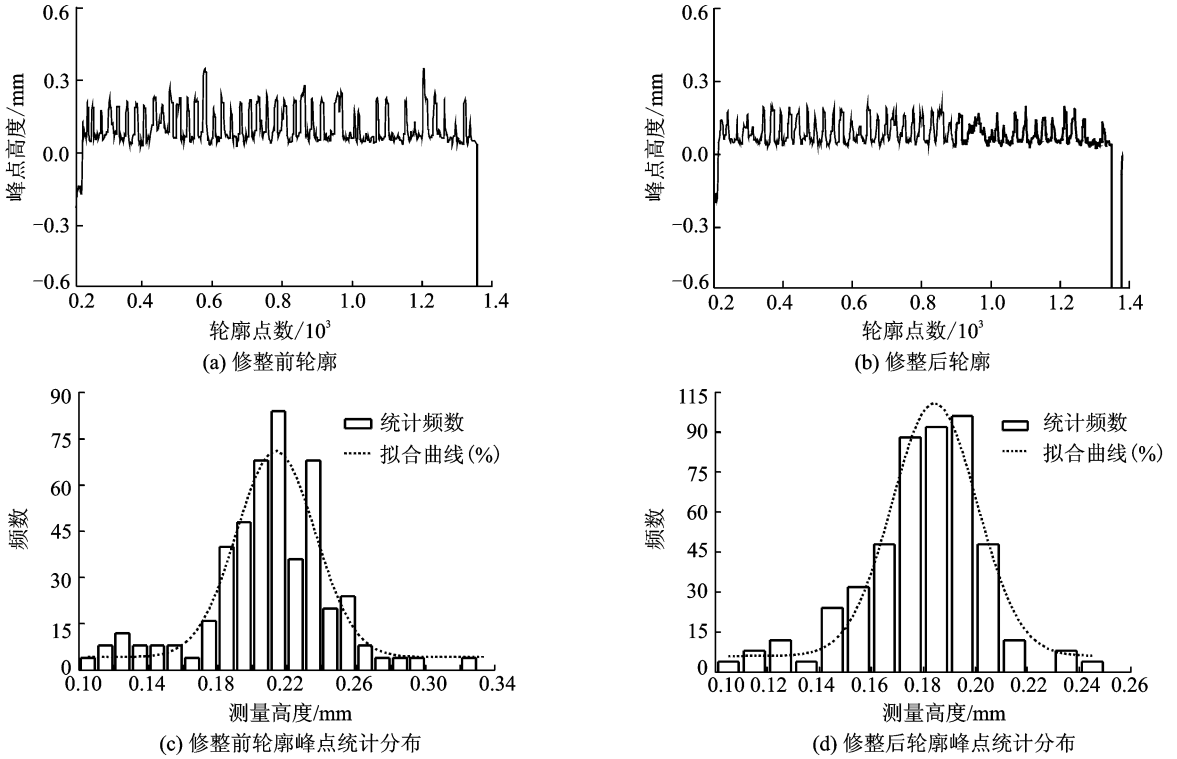


图8 砂轮B的激光测量轮廓以及轮廓峰点统计分布

砂轮A修整前后的轮廓对比以及轮廓峰点统计分布,图8为砂轮B修整前后的轮廓对比以及轮廓峰点统计分布。

从图7(a,b)和8(a,b)可以看出,砂轮在修整前磨粒的出露高度是不一致的,甚至有的相差很大,这样即使磨粒有序排布良好,也不能获得均匀一致的单颗磨粒切厚。修整即是削减某些磨粒过于突出的部分,使得砂轮轮廓的外包络线接近于圆形(图中的轮廓是铺展开的,理想的轮廓包络线是水平直线)。这样每颗磨粒承担的磨削任务基本均衡,不会出现个别磨粒的过大单颗磨粒切厚。从图7(c,d)和8(c,d)可以看出,修整使得轮廓峰点高度的统计分布更加集中了,砂轮A的高斯拟合曲线的标准差从修整前的0.069 57减小到修整后的0.033 39,砂轮B则从修整前的0.045 27减小到修整后的0.032 68,这说明磨粒等高性得到了明显的改善。

采用HK7700三维视频光学显微镜观察砂轮修整前后的表面形貌如图9,10所示。图9为砂轮A修整前后的表面形貌,图10为砂轮B修整前后的表面形貌。

从图9(a)和10(a)可以看出,磨粒排布基本整齐;从图9(b)和10(b)可以看出,超硬磨料均出露良好,无包埋现象,磨粒边刃锋利。从图9(c,d)和10(c,d)可以看出,在修整后磨粒的高度和切刃状

态都有了一定的调整。磨粒的切刃在修整过程中一般会经历碰撞、切削等过程,磨粒的最终表面最多的有两种形态,一种是图9(c)和10(c)所示的局部破碎,一种是图9(d)和10(d)所示的小面积损耗平台。磨粒的局部破碎是由于磨粒被切削时干涉深度过大产生了晶体内的较大脆性断裂,而磨粒的小面积平台则是不断的微量切削造成的结果。

### 3.2 磨削实验结果

磨削结果如图11所示。砂轮A磨削氧化锆的表面粗糙度范围为 $Ra0.20\sim0.42\ \mu\text{m}$ (图11(a)),砂轮B磨削氧化锆的表面粗糙度范围为 $Ra0.09\sim0.35\ \mu\text{m}$ (图11(b))。磨削表面粗糙度随着工件速度的增大而增大,磨削表面粗糙度测量值的不稳定性也随着工件速度的增大而增大(从图11中的曲线误差限上可以看出)。

工件速度的增大说明了所控制的单颗磨粒切厚值总体上向更大的方向移动,那么材料的去除模式可能会朝向脆性域的方向变化。表面粗糙度的不稳定则说明了材料表面的缺陷有增多的迹象,有个别的磨粒难以控制其单颗磨粒切厚而造成了脆性去除留下的较大凹坑,形成了相对较大的表面缺陷,这些缺陷一方面增大了表面粗糙度中的轮廓高度算术平均值,另一方面由于表面缺陷的多样性也使得测量值变得不稳定。

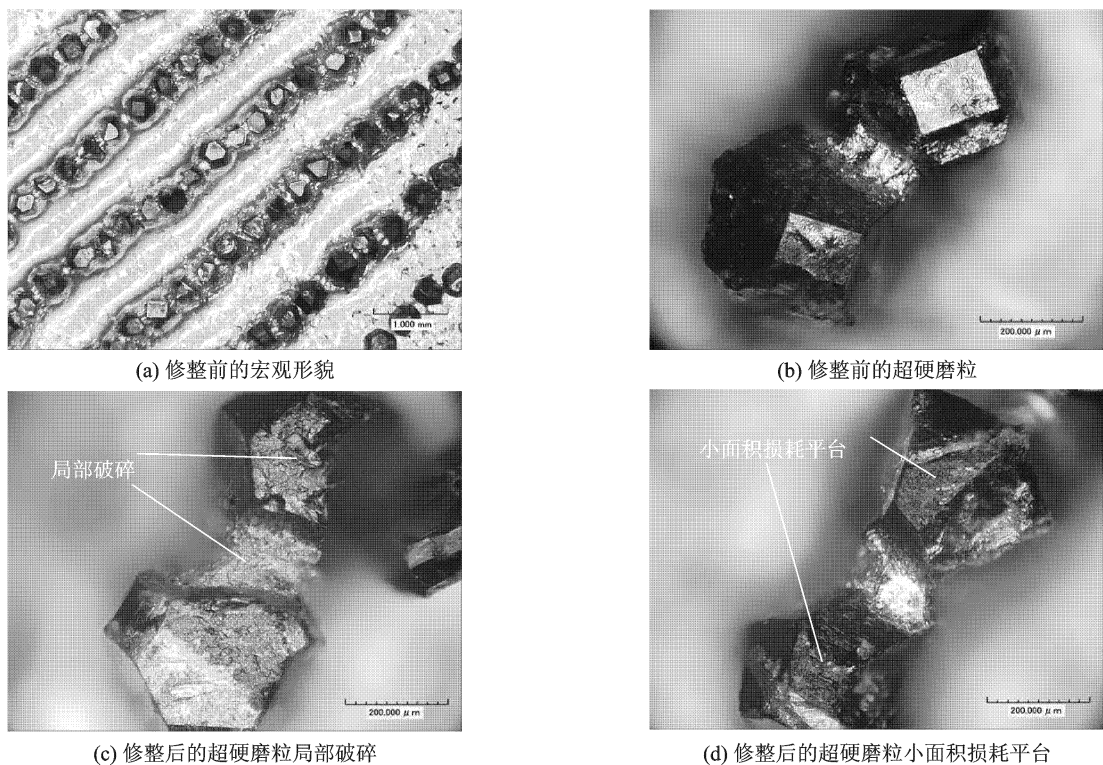


图9 砂轮A修整前后的表面形貌

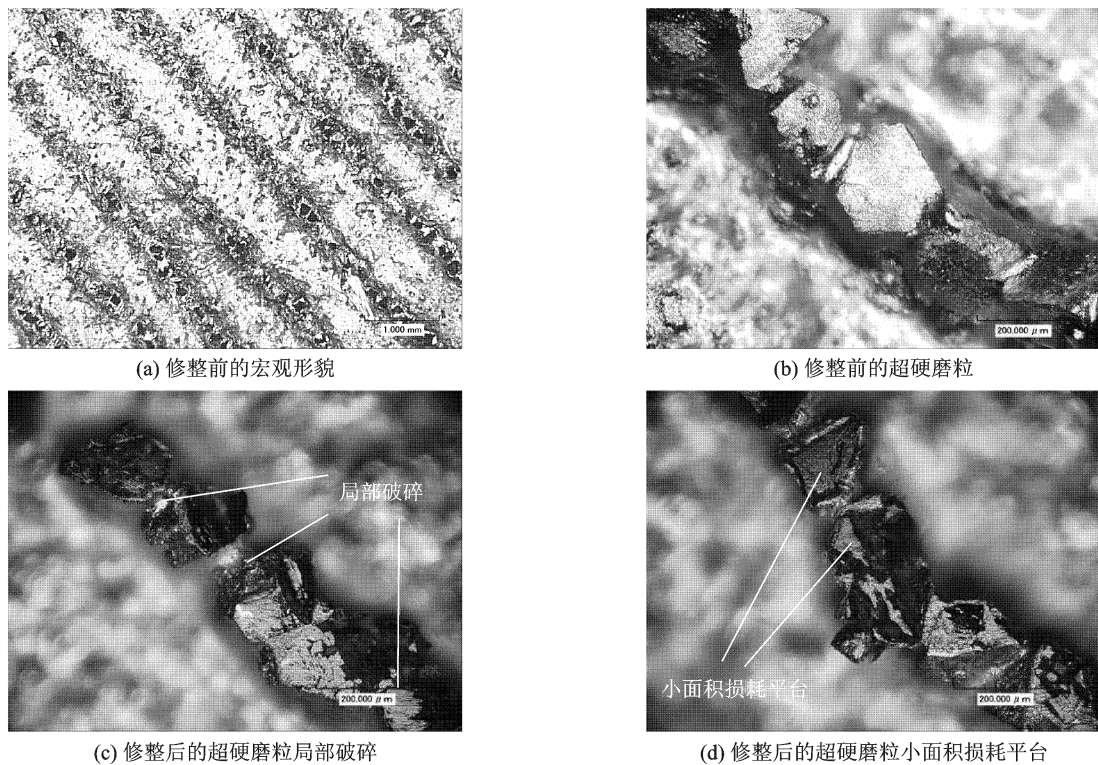


图10 砂轮B修整前后的表面形貌

图12,13为砂轮A,B磨削的氧化锆表面的微观形貌。所用的磨削用量中砂轮速度为24 m/s,切深为5 μm,图12(a,b)和13(a,b)是工件速度为0.5 m/min时的低倍和高倍放大,图12(c,d)和13(c,d)是工件速度为10 m/min时的低倍和高倍放大。

从图12,13的低倍放大可以看出,砂轮B的磨削表面略优于砂轮A。随着工件速度的增大,表面缺陷有明显增多的现象。从图12,13的高倍放大可以看出,磨削表面基本上由连续的磨痕纹理和其间夹杂的破碎坑点组成,即使是质量最好的表面如图

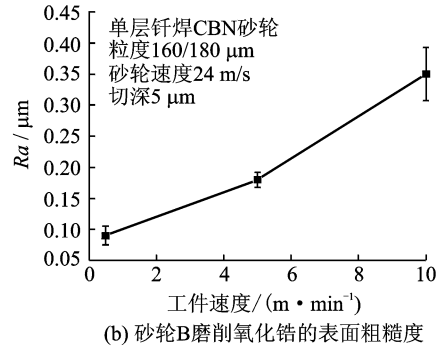
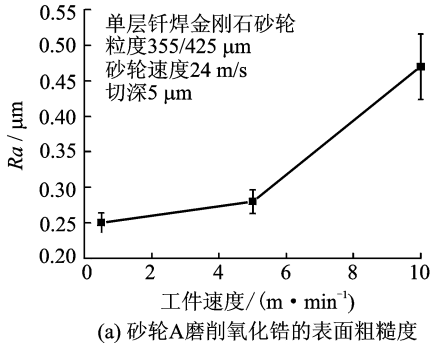


图 11 磨削氧化锆表面粗糙度

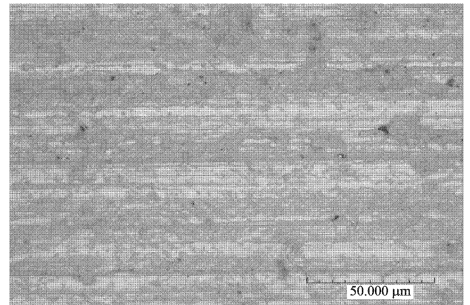
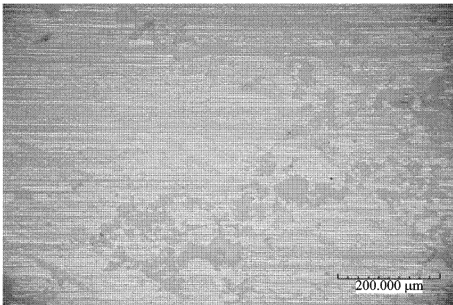
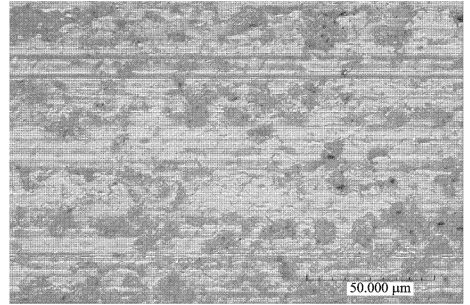
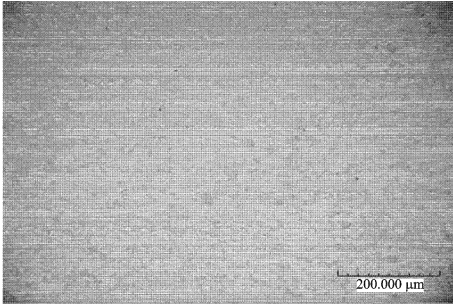


图 12 砂轮A磨削的氧化锆表面微观形貌(砂轮速度24 m/s,切深5 μm)

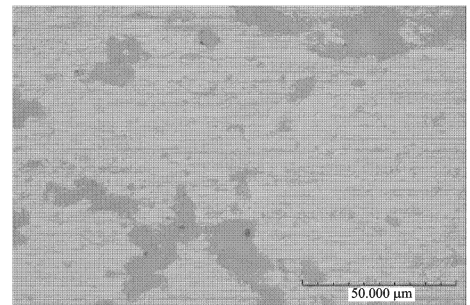
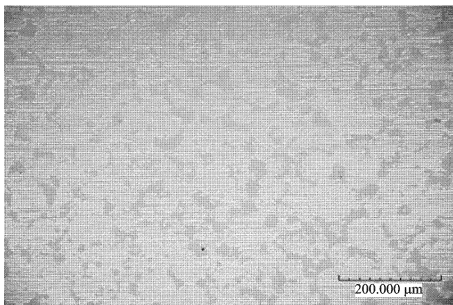
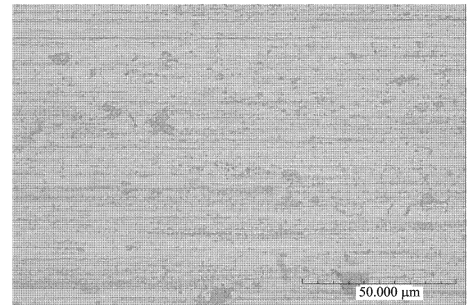
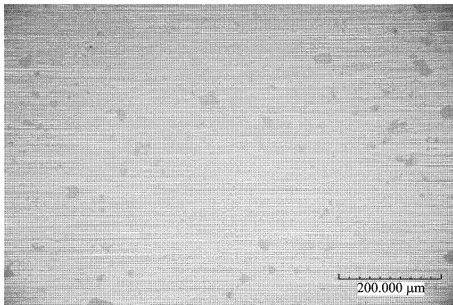


图 13 砂轮B磨削的氧化锆表面微观形貌(砂轮速度24 m/s,切深5 μm)

13(b)所示,其表面粗糙度可达 $Ra0.09\ \mu\text{m}$ ,也可以看出表面上的破碎坑点是不可避免的。工件速度的增大,增加了部分磨粒进入脆性域的可能,这也和表面粗糙度的分析一致,而表面上的破碎坑点说明了材料去除还存在一定程度的脆性域加工。但是无论如何,已经较好地使绝大多数磨粒的单颗切厚保持在有限的范围之内,从而形成以延性域为主的加工模式。

## 4 结 论

本文根据延性域的磨削机理,采用磨粒排布、精密修整以及磨削用量的选择等步骤来均匀化单颗磨粒切厚,在一定程度上实现脆性材料的延性域磨削。具体结论如下:

(1)本文利用单层钎焊砂轮的优势,依靠本课题组多年的研究基础,采用了改进的钎焊工艺,使得磨粒出露良好。利用模板对磨粒进行排布,控制磨粒间距,结果证明排布整齐可靠。

(2)本文采用节块接触修整的方法成功有效地修整了单层钎焊超硬磨料砂轮,该方法简单、方便、效率高、可操作性强。修整后砂轮磨粒的等高性得到了极大的改善,磨粒在修整后大部分出现了局部破碎和小面积的损耗平台。

(3)单层钎焊砂轮经磨粒有序排布和精密修整达到了均匀化单颗磨粒切厚的目的,可磨削出具有较高质量的氧化锆表面。粒径 $355\sim 425\ \mu\text{m}$ 的单层钎焊砂轮在砂轮速度 $24\ \text{m/s}$ ,切深 $5\ \mu\text{m}$ ,工件速度 $0.5\ \text{m/min}$ 的用量条件下可以获得表面粗糙度 $Ra0.20\ \mu\text{m}$ 的加工表面;粒径 $160\sim 180\ \mu\text{m}$ 的单层钎焊砂轮在相同用量条件下可以得出表面粗糙度 $Ra0.09\ \mu\text{m}$ 的加工表面。表面粗糙度及其不稳定性随着工件速度的增大而增大。磨削表面由细密连续的磨痕纹理和少量的破碎坑点组成,随着工件速度的增大坑点等表面缺陷相应地增多。

### 参考文献:

[1] Chou Guanming. New ceramics[M]. Beijing: Press of Ordnance Industry,1993:24-40.  
 [2] Namba Y, Yamada Y, Tsuboi A, et al. Surface structure of Mn-Zn ferrite single crystals ground by an ultra-precision surface grinder with various diamond wheels [J]. Annals of the CIRP,1992, 41(1): 347-352.  
 [3] 赵清亮,于光. 应用超硬大磨粒金刚石砂轮实现BK7

光学玻璃的超精密磨削[J]. 机械工程学报,2006, 42(10): 95-101.

Zhao Qingliang, Yu Guang. Ultra-precision grind of BK7 optical glass using coarse-grained electroplated diamond wheel [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(10):95-101.

- [4] 范超幸. 碳化硅的金刚石高效精密磨削机理和实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.  
 [5] Grimme D, Rickens K, Zhao Q, et al. Dressing of coarse-grained diamond wheels for ductile machining of brittle materials [C]// Proc of the 11th International Conference on Precision Engineering. Tokyo, Japan:[s. n.], 2007: 305-307.  
 [6] Heinzel C, Rickens K. Engineered wheels for grinding of optical glass [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58: 315-318.  
 [7] Bifano T G. Ductile-regime grinding of brittle materials [D]. North Carolina: North Carolina State University, 1988.  
 [8] Malkin S, Hwang T W. Grinding mechanisms for ceramics [J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(2): 569-580.  
 [9] Zhang B, Howes T D. Material-removal mechanisms in grinding ceramics [J]. Annals of the CIRP, 1994,43(1):305-308.  
 [10] Aurich J C, Braun O, Warnecke G. Development of a superabrasive grinding wheel with defined grain structure using kinematic simulation [J]. Annals of the CIRP, 2003, 52(1): 275-280.  
 [11] 肖冰,徐鸿钧,武志斌,等. Ni-Cr 合金真空单层钎焊金刚石砂轮[J]. 焊接学报,2001, 22(2):23-26.  
 Xiao Bing, Xu Hongjun, Wu Zhibin, et al. Furnace brazing of diamond grinding wheel with Ni-Cr alloy under vacuum atmosphere [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001,22(2):23-26.  
 [12] 何梦佳. 有序排布钎焊单层金刚石工具研究[D]. 广州:广东工业大学,2007.  
 [13] 徐鸿钧,傅玉灿,肖冰,等. 具有优化地貌的单层钎焊金刚石固结磨料工具的工艺方法[P]. 中国:CN 1528565A,2004-09.  
 [14] Ghosh A, Chattopadhyay A K. Experimental investigation on performance of touch-dressed single-layer brazed CBN wheels [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 1206-1213.  
 [15] Chen X, Rowe W B, Cai R. Precision grinding using CBN wheels [J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2002, 42(5): 585-593.