

强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮制备及磨削性能

石莹, 王学智, 于天彪, 王宛山

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨粒取向随机, 砂轮强度低的问题, 将强磁场引入砂轮制备工艺. 制备过程中添加了镀镍 CBN 磨粒, 研究发现, 适当磁场强度可以实现镀镍 CBN 磨粒的偏转; 另外, 适宜的磁场强度有利于提高陶瓷 CBN 复合材料的强度, 当磁感应强度为 6 T 时, 陶瓷 CBN 复合材料的抗折强度最高, 强度值达到 79.5 MPa. 通过开展磨削试验, 证实了强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮在磨削钛合金 TC4 时, 其磨削比能略低于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮的比能, 此项研究对提高陶瓷结合剂 CBN 砂轮性能以及探索新的制备工艺均有现实意义.

关 键 词: 强磁场; 陶瓷结合剂; CBN; 砂轮; 抗折强度

中图分类号: TG 741

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)12-1721-06

Preparation and Grinding Performance of High Magnetic Field Vitrified Bond CBN Grinding Wheel

SHI Ying, WANG Xue-zhi, YU Tian-biao, WANG Wan-shan

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: SHI Ying, E-mail: yshineu@126.com)

Abstract: In view of the random grain orientation and low strength of vitrified bond CBN wheel, a high magnetic field was introduced into the preparation process of grinding wheel. During the preparation process, the Ni-plating CBN abrasive grains were added. It was found that the appropriate magnetic field strength could achieve the deflection of the Ni-plating CBN. In addition, the appropriate magnetic field strength is conducive to improving the strength of vitrified CBN composite materials. When the magnetic field strength was 6 T, the bending strength of vitrified CBN composite materials was the highest, and the value reached 79.5 MPa. Finally, it is proved that the specific grinding energy of CBN grinding wheel with high magnetic field was slightly lower than that of ordinary vitrified bond grinding wheel when grinding titanium alloy TC4. This research may have important practical significance for improving the properties of CBN grinding wheel and exploring new preparation technology.

Key words: high magnetic field; vitrified bond; CBN; grinding wheel; bending strength

陶瓷结合剂 CBN 砂轮以其优越的磨削性能, 被广泛应用于精密加工领域. CBN 磨粒与普通磨粒相比, 具有更高的耐磨性、导热性及抗压强度, 同时陶瓷结合剂砂轮具有孔隙率可控、自修整性能好、加工效率高、化学性能稳定、热膨胀系数小、磨削工件精度高等优点^[1-2]. 在制备陶瓷结合剂 CBN 砂轮的过程中, 需要限制烧结温度, 这样才

能保证磨粒的完好性, 这使得陶瓷结合剂 CBN 砂轮的强度要比普通的高温陶瓷低一些, 另外在结合剂把持 CBN 磨粒方面也要比电镀和钎焊砂轮差一些, 因此提高陶瓷结合剂 CBN 砂轮强度一直是陶瓷结合剂 CBN 砂轮研究的重要方面.

目前国内外对砂轮制备研究主要集中在优化结合剂配方、磨粒涂覆隔热增韧、构建特征化组织

收稿日期: 2019-12-15

基金项目: 国家自然科学基金-辽宁省联合基金资助项目(U1508206); 河北省自然科学基金资助项目(F2019202243); 沈阳市科技计划项目(18006001).

作者简介: 石莹(1983-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生; 于天彪(1968-), 男, 吉林榆树人, 东北大学教授, 博士生导师; 王宛山(1946-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

结构三个方面. 在结合剂配方优化方面,多以添加金属^[3-5]、金属氧化物^[6]、稀土氧化物^[7-8]、纳米改性添加剂^[9-12]为主,通过调节添加物的种类和含量来改善陶瓷结合剂的组织性能. 在磨粒涂覆工艺方面,则是通过对磨粒进行涂覆处理,促使涂覆层与结合剂形成良好的结合,进而提高结合剂对磨粒的把持强度. 在砂轮组织结构控制方面,一般通过添加成孔剂来调节砂轮气孔的结构及比率. 在控制磨粒分布方面研究主要集中在磨粒的排布和均匀分布,其中对于磨粒排布的研究,目前主要是针对电镀^[13]和钎焊砂轮^[14]开展,受陶瓷结合剂砂轮制备方法和工艺的限制,陶瓷结合剂砂轮中磨粒取向随机,且容易出现磨粒聚集现象.

近年来,随着低温超导技术的发展,强磁场被应用到材料科学领域. 强磁场能够改变原子和分子之间的排列、匹配、迁移等^[15]. 目前采用强磁烧结技术来制备陶瓷结合剂 CBN 砂轮的相关研究比较少见,本文将强磁场烧结工艺引入陶瓷结合剂 CBN 砂轮制备中,在磁场力的作用下,优化磨粒取向,并借助强磁场来改善陶瓷结合剂对 CBN

磨粒的结合特性,提高砂轮的磨削性能. 为了验证制备工艺的有效性,对强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削力、磨削力比、磨削比能以及磨削后工件的表面形貌进行了分析,并与普通砂轮的磨削性能进行了对比,结果证实强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的综合性能更佳.

1 强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮制备

1.1 磁场作用下自由磨粒取向

CBN 磨粒属于不导磁材料,实验发现即使在强磁场的环境下 CBN 磨粒也难以被磁化,更难以表现出极性. 为了改善磨粒的导磁性,镀镍 CBN 磨粒被引入,并对静磁场下两种 CBN 磨粒的取向和分布情况进行了对比观测,结果如图 1 所示.

在磁场的作用下,镀镍 CBN 磨粒被磁化,并表现出极性,图 1b 中镀镍 CBN 磨粒表现出明显的取向,磨粒的长轴与磁场方向一致,并且磨粒首尾相连呈链式分布,这为制备取向优良的陶瓷结合剂 CBN 砂轮提供了可能性.

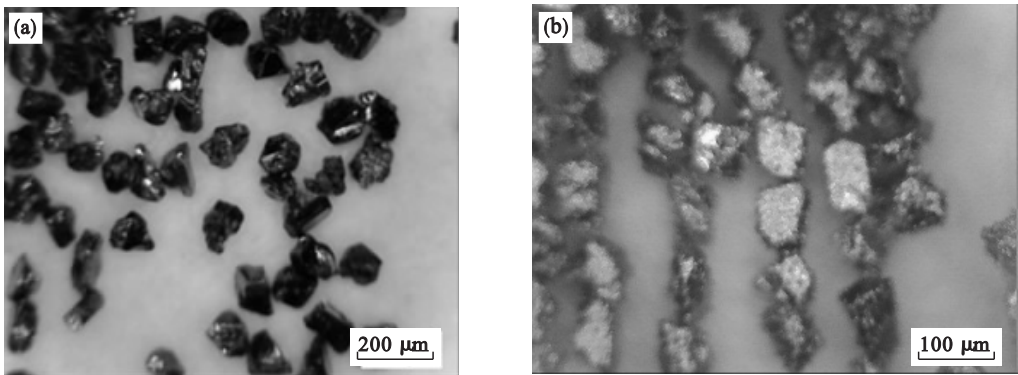


图 1 磁场作用下两种 CBN 磨粒的取向分布
Fig. 1 Orientation distribution of two kinds of CBN abrasive grains under magnetic field
(a)—普通 CBN 磨粒; (b)—镀镍 CBN 磨粒.

1.2 磨粒择优取向的陶瓷 CBN 砂条压制

自由磨粒在磁场的作用下,容易发生偏转和移动,但在制备陶瓷结合剂 CBN 砂轮的过程中,磨粒需要与结合剂粉末进行混合,然后再压制成形. 要实现磨粒取向的控制,最好能使 CBN 磨粒在成形前完成有效的移动和偏转,这就要求磨粒能够在陶瓷结合剂粉末的束缚下实现移动和偏转.

为了实现磨粒取向的择优控制,进行了相应的实验研究,施加恒定的磁场,当磁场强度过低时,在结合剂粉末的束缚下,磨粒很难实现偏转或者移动,随着磁场强度的增大,磨粒会出现聚集,不能形成有效的链式分布和取向择优. 基于此,考

虑通过施加交变磁场,使磨粒出现小幅的振动,进而在陶瓷结合束缚状态下,使镀镍 CBN 磨粒偏转和移动. 为了验证交变磁场对磨粒取向控制的有效性,分别对松散状态下的镀镍 CBN 磨粒取向分布以及压制成形后的陶瓷 CBN 砂条的断面进行了测试,测试结果如图 2 所示.

图 2 显示,陶瓷 CBN 砂条在压制前后,磨粒均形成了良好的取向,磨粒的长轴与磁场方向一致. 在控制磨粒取向的实验过程中,利用电压控制器和电磁体产生了交变磁场,可通过调节控制器的旋钮来改变供电电压,当控制器电压过小时,镀镍 CBN 磨粒将不会发生偏转和移动;随着控制器

电压的增大,磁场强度增大,镀镍 CBN 磨粒所受的磁场力也随之增大,当控制器的旋钮调节到 40 时(控制器电压为 88 V),可观测到镀镍 CBN 磨粒在松散的结合剂粉末中振动,并逐渐形成良好

的取向,同时磨粒形成磁链式排布;随着控制器电压进一步升高,CBN 磨粒移动的趋势增强,磨粒开始向两极聚集.

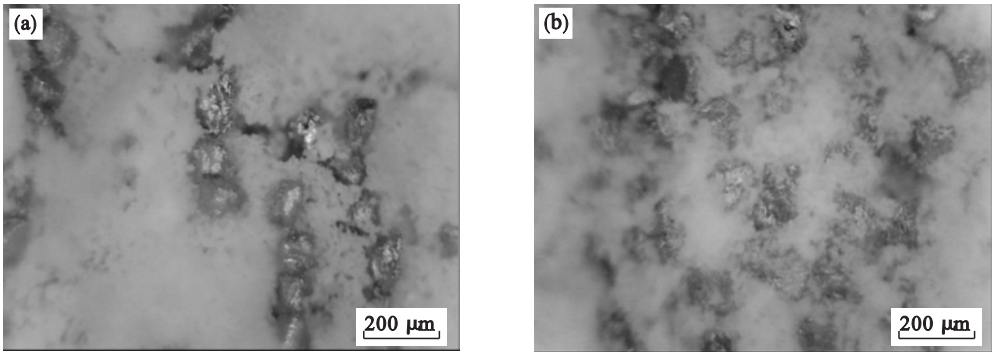


图 2 交变磁场作用下镀镍 CBN 磨粒取向分布
Fig. 2 Orientation distribution of nickle plating CBN grains under pulsed magnetic field
(a)—松散状态下磨粒取向分布;(b)—压制成形后的 CBN 砂条断面.

1.3 强磁场环境下陶瓷 CBN 砂条烧结

陶瓷 CBN 砂条在压制成形后,需要进行强磁场烧结,烧结实验在超导强磁场高温加热炉中完成. 所用超导强磁场装置为 JMTD - 12T100,中心最大磁感应强度为 12 T,可通过设定不同的磁感应强度,完成不同强磁场下的陶瓷 CBN 复合材料的烧结.

在陶瓷 CBN 复合材料烧制的过程中,将压制好的陶瓷 CBN 样条放入不锈钢坩埚中,并置于超导强磁炉的炉腔当中,设置好烧结的磁场强度,待励磁结束后,启动加热系统,按照设定好的升温曲线进行烧结. 烧结结束后,待温度降至 200 ℃ 以下时,进行降磁操作,待磁场强度降至 0,炉温低于 100 ℃ 时,即可将陶瓷 CBN 复合材料的样条取出,按照此步骤,并设定不同的磁场强度,完成不同磁场强度下陶瓷 CBN 复合材料的烧结. 为了进一步分析磁场强度对陶瓷 CBN 复合材料性能的影响,对在不同磁场强度下烧结的陶瓷 CBN 复合材料进行了三点弯曲试验,得到了试样的断裂载荷,通过式(1)计算了陶瓷 CBN 复合材料的抗折强度,其结果如图 3 所示. 利用扫描电镜对陶瓷 CBN 复合材料的断口进行了观测,断口形貌如图 4 所示.

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \frac{PL}{bh^2} \times 10^{-6} \tag{1}$$

式中: P 为试样断裂载荷(N); L 为支架两支点间的距离(mm); b 为试样横截面宽(mm); h 为试样高度(mm).

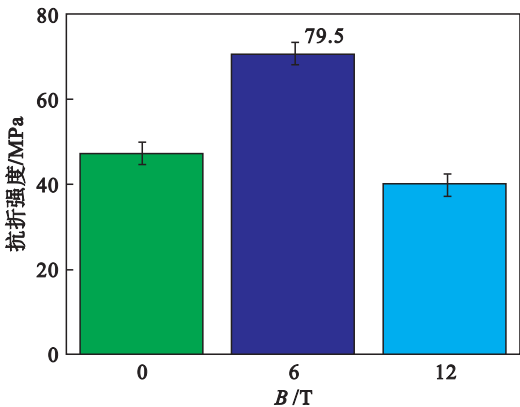


图 3 磁场强度对陶瓷 CBN 复合材料抗折强度的影响
Fig. 3 Effects of magnetic field strength on bending strength of vitrified CBN composites

图 3 显示,磁场强度对陶瓷 CBN 复合材料的抗折强度有显著的影响,当磁感应强度小于 6 T 时,陶瓷 CBN 复合材料的抗折强度随着磁场强度的增大而增大. 在磁场的作用下,镀镍 CBN 磨粒的镍层被磁化,在烧结的过程中镍层持续受磁场力作用,镍层逐渐向陶瓷结合剂迁移,磁场的出现使得陶瓷结合剂对镍层的把持力增强,进而提高了陶瓷 CBN 复合材料的强度. 随着磁场强度进一步增大,磁场力对镍层的作用持续加强,镍层向陶瓷结合剂迁移的趋势进一步增强,使镍层与 CBN 磨粒之间出现脱壳现象,从而使陶瓷 CBN 复合材料的强度降低. 从图 4 陶瓷 CBN 复合材料的断口形貌可以看出,当磁感应强度为 6 T 时,陶瓷 CBN 复合材料的断裂发生在陶瓷结合剂与镍层的结合处,CBN 磨粒被镍层严密包裹住;当磁感应强度为 12 T 时,陶瓷 CBN 复合材料的断口出现了变

化,断裂发生在镍层与 CBN 之间,CBN 磨粒裸露在外.研究发现磁感应强度为 6 T 时,陶瓷 CBN

复合材料的弯曲强度达到了 79.5 MPa.

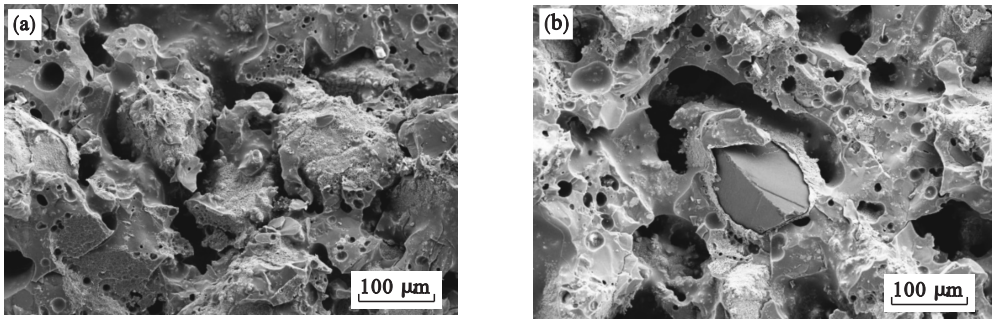


图 4 陶瓷镀镍 CBN 复合材料断口形貌
Fig. 4 Fracture morphology of vitrified Ni-plating CBN composites
(a)— $B=6\text{ T}$; (b)— $B=12\text{ T}$.

2 磨削性能研究

为了验证强磁场制备陶瓷 CBN 砂轮的有效性,本文以钛合金 TC4 为加工对象开展磨削试验,对不同磨削参数下的磨削力、磨削比能和磨削表面质量进行了测试分析,并与普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮进行对比,完成对强磁场条件下的陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削性能的评价.两种砂轮的不同之处在于,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨粒取向进行了优化,同时采用了强磁场烧结工艺改善了陶瓷 CBN 复合材料的性能.采用多用工具磨床进行磨削试验,通过改变磨削加工参数完成多组磨削试验,并对其磨削力、磨削力比和磨削比能进行测试和计算,完成对强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削性能的考察,磨削试验平台如图 5 所示,磨削试验条件及加工参数如表 1 所示.

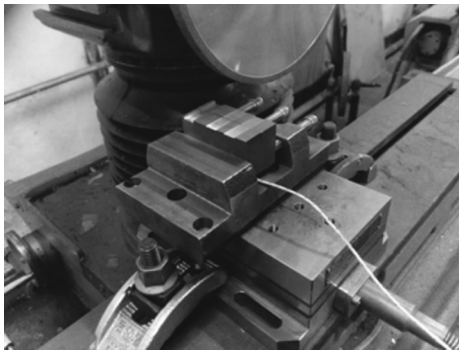


图 5 磨削试验平台
Fig. 5 Grinding experimental platform

2.1 磨削力及磨削力比的对比

磨削过程是磨粒在被加工工件表面进行划擦、耕犁和切削形成的过程,较高的磨削力会对砂

表 1 磨削试验条件及加工参数
Table 1 Grinding experimental conditions and machining parameters

内容	条件/型号/参数
磨削条件	顺磨(干磨削) P 200×6×32 CBN N56 120 VJ100
试件	钛合金 TC4, 60 mm×15 mm×30 mm
磨削速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	30
进给速度 $v_w/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	1, 2, 3, 4, 5
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	10, 20, 30, 40, 50, 100, 200

轮的使用寿命和工件表面的完整性产生不利影响^[16].为了研究强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削性能,利用多用工具磨床,通过搭建实验平台,将砂轮线速度设定为 30 m/s,对不同切深和不同进给速度下的强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮和普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削力进行了测定,结果如图 6 所示.

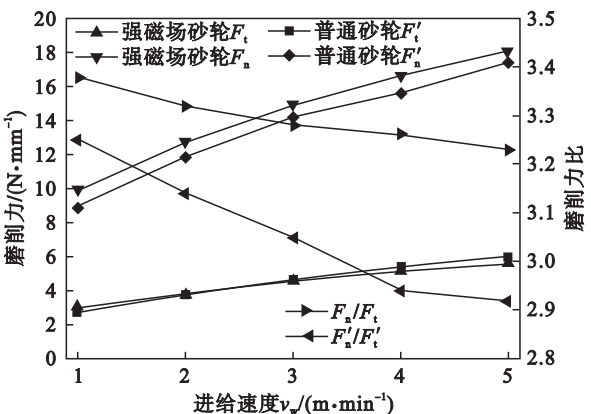


图 6 两种砂轮的磨削力和磨削力比
Fig. 6 Grinding force and grinding force ratio of two kinds of grinding wheels

图 6 显示,两种砂轮的切向磨削力非常接近,

随着进给速度的增大,单位磨削力随之增大;另外,在进给速度约为 2.5 m/min 时,两种砂轮的切向磨削力变化曲线出现了交叉;在进给速度低于 2.5 m/min 时,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的切向磨削力要略高于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮,这是因为强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮经取向优化后,磨削时有效磨粒数要多一些;在进给速度超过 2.5 m/min 时,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的切向磨削力反而低于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮,这是因为,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮具有优越的磨粒取向,切削刃角锋利,这时强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的优越性开始显露.在法向磨削力和磨削力比方面,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮均高于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮.

2.2 磨削比能对比

为了全面分析强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削比能,分析了最大未变形切削厚度对磨削比能的影响,结果如图 7 所示.最大未变形切屑厚度 a_{gmax} 是影响磨削力及磨削比能的重要参数,单颗磨粒最大未变形切屑厚度 a_{gmax} 可以按照切削层平均体积确定.

$$\bar{a}_{gmax} = \frac{2}{\left(\frac{l_c}{L}\right)} \cdot \left(\frac{v_w a_p}{v_s}\right) = \frac{2L}{\sqrt{d_s}} \cdot \frac{v_w \sqrt{a_p}}{v_s} \quad (2)$$

式中: L 为有效磨粒间距 (123.96 μm); l_c 为接触弧长; d_s 为砂轮直径 (200 mm); a_p 为磨削深度; v_w 为工件进给速度; v_s 为磨削速度.

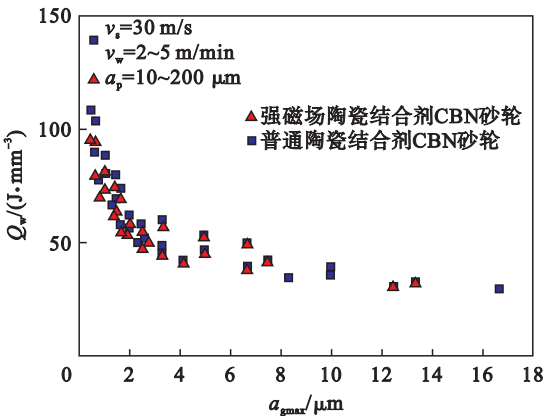


图 7 磨削比能对比

Fig. 7 Comparison of specific energy of grinding

图 7 表明,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削比能要略低于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮,最大未变形切削厚度越小,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的优越性越好.随着最大未变形切削厚度的增大,磨削比能逐渐下降,两种砂轮在磨削比能上的差别逐渐减小,最终稳定在 30 J/mm³ 左右.另外,

可以发现,最大未变形切削厚度与砂轮的磨削比能并非一一对应,磨削加工参数不同时,即使最大未变形切削厚度相同,磨削比能也未必相同.

2.3 磨削表面形貌对比

为了进一步研究强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削性能,分别对两种砂轮磨削后的表面形貌进行了对比分析.磨削加工参数设定为 $v_s = 30 \text{ m/s}$, $v_w = 2 \text{ m/min}$, $a_p = 10 \mu\text{m}$,磨削后的工件的表面形貌如表 2 所示.

表 2 工件磨削表面形貌
Table 2 Grinding surface topography

砂轮状态	新修整	磨损后
强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮		
普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮		

在砂轮新修整后,两种砂轮磨削工件的表面形貌相近,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削情况略好于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮;当砂轮磨损后,两种砂轮的磨削性能都有所下降,磨削工件的表面形貌的平整度和光滑度下降,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削的钛合金表面纹理依然清晰,普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削的钛合金表面则出现了多条黏着磨损区.

3 结 论

1) 合适的磁场强度能够有效控制镀镍 CBN 磨粒的取向,并使之呈磁链式分布.

2) 强磁场能够促使导磁性材料镍的迁移,可以有效提高镍层与陶瓷结合剂的结合强度,但是磁场强度过大会使镍层与 CBN 磨粒出现脱壳现象.

3) 当进给速度较小时,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的有效磨粒数多于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮,切向磨削力稍大于普通陶瓷 CBN 砂轮,随着进给速度的增大,在进给速度达到

2.5 m/min 时,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的优越性开始显露.

4)磨削加工参数相同时,强磁场陶瓷结合剂 CBN 砂轮的磨削比能略低于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮的比能,磨损后的磨削性能优于普通陶瓷结合剂 CBN 砂轮.

参考文献:

- [1] 李志宏,朱玉梅.陶瓷结合剂 cBN 砂轮的制备及应用[J].超硬材料工程,2018,30(1):47-52.
(Li Zhi-hong, Zhu Yu-mei. Preparation and application of vitrified bond CBN grinding wheel[J]. *Superhard Material Engineering*, 2018, 30(1): 47-52.)
- [2] Sato B K, Rodriguez R L, Talon A G, et al. Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 156: 2167-2182.
- [3] Li Q, Li Z H, Tan H Y, et al. Comparison of Cu and Zn on properties of vitrified diamond composites[J]. *Diamond & Related Materials*, 2016, 66: 217-222.
- [4] He F, Zhang W T, Zhou Q, et al. Effect of aluminum addition on microstructure and properties of $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ vitrified bond [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2016, 31(6): 1267-1271.
- [5] Han P, Li W, Peng J, et al. Influence of Sn and Bi additions on the structures and wear properties of Cu-Sn-P-Ce cBN tools[J]. *Journal of Superhard Materials*, 2018, 40(1): 47-51.
- [6] Han J, He F, Wang L L, et al. Effect of WO_3 on the structure and properties of low sintering temperature and high strength vitrified bonds[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 679: 54-58.
- [7] Feng D D, Li Z H, Zhu Y M, et al. Synergistic effects of CeO_2 and Y_2O_3 on the properties of glass-diamond composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 727:

757-762.

- [8] Cui L, Hao X J, Hu X L, et al. Effects of Y_2O_3 addition on structure and properties of LZAS vitrified bond for CBN grinding tools application[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(8): 9916-9922.
- [9] Hou Y G, Qiao G Y, Shang Y, et al. Effects of nano-AlN and sintering atmosphere on microstructure and properties of vitrified bond[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(4): 756-762.
- [10] Shi Y, Wang Z H, Xu S Z, et al. Study on the grindability of nano-vitrified bond CBN grinding wheel for nickel-based alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 100(5/6/7/8): 1913-1921.
- [11] Chen F X, Zheng H J, Zhao Z W, et al. Effect of $\text{V}_8\text{C}_7\text{-Cr}_3\text{C}_2$, nanocomposite on microstructure and properties of vitrified bond cBN grinding tools prepared by microwave heating method[J]. *Materials Letters*, 2018, 219: 41-44.
- [12] Loginov P, Mishnaevsky L Jr, Levashov E, et al. Diamond and cBN hybrid and nano modified cutting tools with enhanced performance; Development, testing and modelling [J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 310-319.
- [13] Lyu Y S, Yu H Y, Wang J, et al. Study on the grinding temperature of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91: 895-906.
- [14] Ding W F, Linke B, Zhu Y J, et al. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1): 109-134.
- [15] 陈东风,曹志强,杨森,等.强磁场在材料科学中的应用现状及理论分析[J].钢铁研究,2007,35(3):58-62.
(Chen Dong-feng, Cao Zhi-qiang, Yang Miao, et al. Application situation and theoretical analysis of high magnetic field in material science [J]. *Research on Iron and Steel*, 2007, 35(3): 58-62.)
- [16] Yu H Y, Zhang W L, Lyu Y S, et al. Research on grinding forces of a bionic engineered grinding wheel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 48: 185-190.