

文章编号: 1000-3851(2013)01-0119-06

# MgO 与 Li<sub>2</sub>O 摩尔比及烧结温度对结合剂及 cBN 磨具性能的影响

翟浩冲<sup>1, 2</sup>, 万 隆<sup>\*1</sup>, 王俊沙<sup>1</sup>, 王志起<sup>1</sup>, 胡伟达<sup>1</sup>, 宋冬冬<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 国家电网 许继集团有限公司, 许昌 461000)

**摘要:** 以 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷体系为基础, 制备了添加不同摩尔比 Li<sub>2</sub>O 和 MgO 的陶瓷结合剂及立方氮化硼(cBN)磨具。利用 X 衍射测试仪、线性热膨胀测试仪、扫描电镜等研究了 MgO:Li<sub>2</sub>O 摩尔比 ( $M$  值)和烧结温度对陶瓷结合剂及磨具性能的影响。结果表明:随着  $M$  值增加, 结合剂的软化点温度增加, 耐火度及化学稳定性均增强, 线性热膨胀系数先增加后降低。当  $M$  值为 0.67 时, 随着烧结温度的升高, 石英晶相的析出被抑制, 诱导析出 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相, 且含量逐渐增加, 尺寸先减小后增加; 当温度为 870 °C 时, Mg(Zn)-Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶粒尺寸最小, 约为 2 μm, 结合剂结构最为致密, 抗折强度达到最大值 136.28 MPa。随着烧结温度的提高, cBN 磨具气孔率和吸水率先降低后增加, 体积密度、硬度、抗折强度、磨耗比以及磨削效率先增加后降低; 当烧结温度为 890 °C, 磨耗比及磨削效率最高, 分别为 98.72% 和 1.3675 g·min<sup>-1</sup>。

**关键词:** 磨具; 陶瓷结合剂; 立方氮化硼; 抗折强度; 磨耗比

**中图分类号:** TG74 **文献标志码:** A

## Effect of MgO : Li<sub>2</sub>O molar ratio and sintering temperature on properties of vitrified bond and cBN grinding wheel

ZHAI Haochong<sup>1, 2</sup>, WAN Long<sup>\*1</sup>, WANG Junsha<sup>1</sup>, WANG Zhiqi<sup>1</sup>, HU Weida<sup>1</sup>, SONG Dongdong<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. XJ Group Corporation of State Grid, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The vitrified bonds with different molar ratios about MgO : Li<sub>2</sub>O ( $M$ ) and cBN wheels were prepared at the base of ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic system. X-diffraction analysis, SEM and thermal expansion coefficient tests were used to study the influence of  $M$  and sintering temperature on the properties of vitrified bonds and cBN wheels. The results show that with the  $M$  value increasing, the soften temperature, refractoriness and chemical stability of the bond increase, while the thermal expansion coefficient increases and then decreases. When the  $M$  value is 0.67, the increasing of the temperature restrains the quartz crystal separating. Meanwhile, the content of Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystalline phase increases, and the size decreases at first and then increases. Moreover, when the temperature reaches 870 °C, the grain size is the minimum about 2 μm, and the most compact microstructure is obtained. At the same time, the bending strength of the bond reaches the maximum value of 136.28 MPa. As the sintering temperature increasing, the porosity and water absorption of cBN wheel decrease at the beginning and then increase. However, its bulk density, hardness, bending strength, abrasion and grinding efficiency exhibit contrary trend. When the temperature is 890 °C, the abrasion and grinding efficiency reach the maximum values of 98.72% and 1.3675 g·min<sup>-1</sup> respectively.

**Keywords:** grinding wheel; vitrified bond; cBN; bending strength; abrasive ratio

立方氮化硼(cBN)陶瓷磨具能够加工的材料 60); 高强度铸铁及冷硬铸铁; 有色金属及其合金, 尤其适应于铝硅合金; 非金属材料, 如玻璃、

如下<sup>[1]</sup>: 结构钢, 如合金钢以及淬火钢(HRC≤

收到初稿日期: 2012-01-07; 收到修改稿日期: 2012-03-14; 网络出版时间: 2012-10-11 17:21:26

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20121011.1721.004.html

基金项目: 湖南省科技厅(2011GK2066)

通讯作者: 万 隆, 教授, 博士生导师, 研究方向: 复合材料及超硬材料 E-mail: wanlong1799@163.com

铁氧体以及摩擦材料和陶瓷等,被广泛应用于航空航天、汽车工业、数控机床、矿山机械,轻纺工业等领域<sup>[2]</sup>。

cBN 陶瓷磨具是陶瓷结合剂与 cBN 磨料的复合烧结体,结合剂具有把持 cBN 磨料的作用,优异的磨具性能取决于结合剂性能<sup>[3]</sup>。近年来,国内外对 cBN 陶瓷磨具用结合剂的研究和开发已成为重点。万隆等<sup>[4]</sup>认为 ZnO 能够抑制石英晶相,诱导析出低膨胀晶相,从而改变陶瓷结合剂的性能和磨具的性能。宋鹏涛等<sup>[5]</sup>采用正交试验方法分析了 MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaCO<sub>3</sub> 和 ZnO 等碱金属氧化物尤其是 MgO 对结合剂熔融温度具有重要影响。侯永改等<sup>[6]</sup>研究表明 Na<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结合剂体系中加入 AlN 能够使陶瓷结合剂析晶,降低结合剂的线性热膨胀系数,提高烧结温度范围(30 ℃)。赵志伟等<sup>[7]</sup>认为纳米 ZnO 能够降低耐火度,提高流动性,添加纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的抗折强度最高为 36.51 MPa,磨具试样结构致密,气孔率最低。国外, Herman 等<sup>[8]</sup>认为 Na<sub>2</sub>O - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - CaO - MgO 体系的陶瓷磨具性能优于 K<sub>2</sub>O - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> 体系磨具,而且磨削后,前者的磨具自锐性好于后者。综上所述,Na<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系结合剂适宜于 cBN 陶瓷磨具,是研究的热点,且碱金属氧化物以及碱土金属氧化物对该体系陶瓷结合剂具有重要影响,但关于 MgO 与 Li<sub>2</sub>O 摩尔比(*M* 值)以及烧结温度对陶瓷结合剂 cBN 磨具性能影响缺乏系统性研究。

本文作者以 ZnO - Na<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷体系为基础,添加不同摩尔比 Li<sub>2</sub>O 和 MgO ( $M = n(\text{Li}_2\text{O}) : n(\text{MgO})$ ),探讨 *M* 值和烧结温度对陶瓷结合剂及 cBN 磨具性能的影响。实验结果对今后开发一系列高强度低熔点陶瓷结合剂和高性能 cBN 磨具具有一定的参考价值,有利于解决我国高附加值 cBN 磨具依靠进口的实际问题,从而减少我国外汇损失。

## 1 试验

### 1.1 实验过程

陶瓷结合剂的制备:所有成分均为分析纯,结合剂的配方如表 1 所示。通过配料、混料、过筛,高温(1300 ℃保温 2 h)熔融,冷却后球磨过筛(65 μm),制备得到陶瓷结合剂。

表 1 陶瓷结合剂的配方

<i>M</i>	Mass fraction/%						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	ZnO	Li <sub>2</sub> O	MgO
0.00	44	13	12	12	9	10	0
0.25	44	13	12	12	9	8	2
0.67	44	13	12	12	9	6	4
1.50	44	13	12	12	9	4	6
4.00	44	13	12	12	9	2	8

*M* - Molar ratio of MgO : Li<sub>2</sub>O

表 2 cBN 磨具配方

content	Vitrified bond	cBN 150 μm	Dextrin powder	Wetting agent
Mass fraction/%	23	77	2	Adequate

cBN 磨具的制备:选取 *M* 为 0.67 时陶瓷结合剂,按照表 2 进行配、混料,压制成型(22 MPa),干燥 24 h 后在马弗炉中以不同温度烧结成型,自然冷却后得到 cBN 陶瓷磨具(直径×孔径×高:30 mm×6 mm×4 mm)。

### 1.2 性能测试

采用 NETZSCH - DIL402PC 线性热膨胀仪测定结合剂的线性热膨胀系数;采用 Siemens 公司 D5000 型 X 射线衍射仪对结合剂物相分析;利用阿基米德排水法测得磨具的体积密度以及气孔率;利用 SKZ - 500 型数显抗折试验机对磨具进行抗折强度测试;利用日本 FEI QUANTA - 200 型扫描电子显微镜观察结合剂以及磨具的显微结构;利用 MOD062 模具电磨(转速:30000 r/min,干磨)磨削铸铁(QT400)进行磨具磨耗比(*G*)以及磨削效率( $\eta$ )的测定与计算( $G = \frac{m_4 - m_2}{m_3 - m_1}$ ,  $\eta = \frac{m_4 - m_2}{3}$ )。其中: $m_1$  为磨具磨削前的质量(g); $m_2$  为工件磨削前的质量(g); $m_3$  为磨具磨削后的质量(g); $m_4$  为工件磨削后的质量(g)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 *M* 值对结合剂线性热膨胀系数的影响

图 1 为不同 *M* 值结合剂线性热膨胀系数曲线。可以看出,该结合剂体系的线性热膨胀系数曲线均符合玻璃的膨胀曲线,即线性热膨胀系数  $\alpha$  均随着温度的升高而增大,在低于玻璃化转变温度( $T_g$ )时线性热膨胀系数急剧增加,直至结合剂完全软化即软化温度( $T_f$ );引入 MgO 后,结合剂的线性热膨

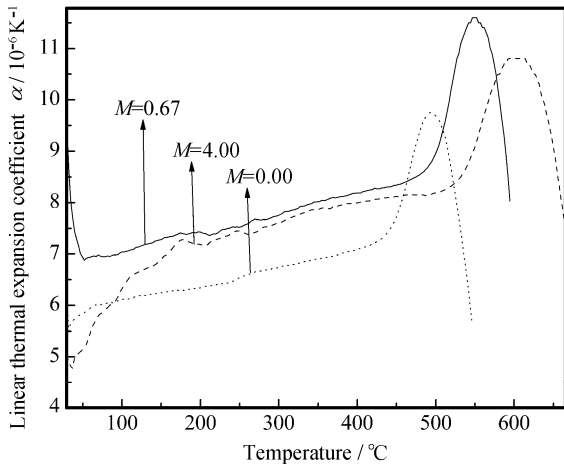


图1 不同  $M$  值 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷结合剂线性热膨胀曲线

Fig.1 Linear thermal expansion curves of vitrified bonds for ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with different  $M$

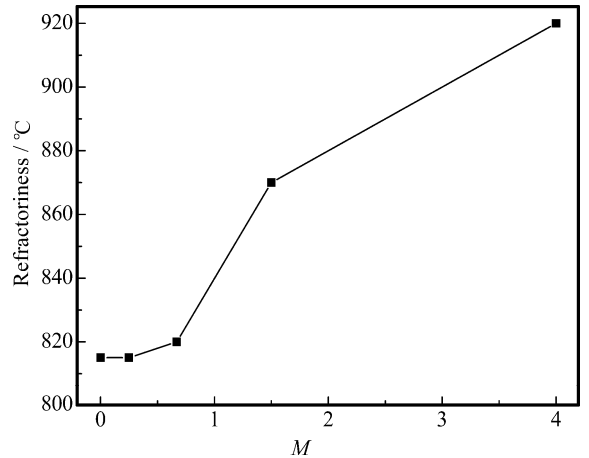


图2 不同  $M$  值 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷结合剂耐火度

Fig.2 Refractoriness curve of vitrified bonds for ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with different  $M$

胀系数、 $T_g$  和  $T_f$  均增大, 且随着  $M$  的增加, 线性热膨胀系数先增加后降低,  $T_g$  缓慢增加,  $T_f$  急剧增加。计算知, 0~500 °C 时结合剂在  $M=0.00$ , 0.67, 4.00 时的平均线性热膨胀系数分别为  $6.9029 \times 10^{-6}$ ,  $7.7247 \times 10^{-6}$ ,  $7.2552 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 分析原因可能是 MgO 取代 Li<sub>2</sub>O, 使其析出线性热膨胀系数较大的尖晶石, 结合剂的线性热膨胀系数随之增加。但是随着  $M$  值的增加, MgO 含量增加, 与结合剂中 ZnO 一起, 形成混合碱土-碱效应; 因此, 当结合剂中  $M$  值增加到一定程度时, 线性热膨胀系数又开始降低。

## 2.2 $M$ 值对结合剂耐火度的影响

图2为不同  $M$  值陶瓷结合剂的耐火度曲线。可以看出, 随着  $M$  值的增加, 结合剂的耐火度逐渐增加, 与图1热膨胀结果相符。一方面是因为 Li<sup>+</sup> 电场强度较 Mg<sup>2+</sup> 小, 单键能较 Mg<sup>2+</sup> 大, 且配位数大于 6, Li-O 的离子性强于 Mg-O 离子性, 其中, O<sup>2-</sup> 容易摆脱 Li<sup>+</sup> 束缚, 形成游离氧, 起断网作用, 而 Mg<sup>2+</sup> 给出游离氧的能力较弱 (Mg<sup>2+</sup> 的  $Z/r^2=2.9$ , Li<sup>+</sup> 的  $Z/r^2=1.65$ ,  $Z$  和  $r$  分别为原子序数和离子半径), 起积聚作用; 因此, 随着  $M$  值增加, MgO 增加, Li<sub>2</sub>O 减少, 断键作用减小, 积聚作用增加, 从而耐火度增加。另一方面与混合碱土-碱效应有关, 即随着  $M$  值的增加, Mg<sup>2+</sup> 增多, 增加的 Mg<sup>2+</sup> 与 Zn<sup>2+</sup> 均与阴离子形成相应的电偶极, 两种电偶极发生电动力学交互作用, 随着 Mg<sup>2+</sup> 浓度的增加, 交互作用加强, 增加扩散活化能, 降低质点间的振动, 提高耐火度。

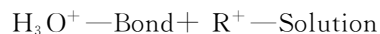
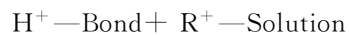
## 2.3 $M$ 值对结合剂化学稳定性的影响

结合剂水溶液 pH 反映化学稳定性, 不同  $M$  值陶瓷结合剂水溶液 pH 值见表 3。可知, 结合剂水

表3 不同  $M$  值 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷结合剂水溶液 pH 值

$M$	0.00	0.25	0.67	1.50	4.00
pH	9.67	9.13	8.86	8.73	8.17

溶液 pH 值随  $M$  值的增加而逐渐减小, 这是因为结合剂中的 R<sup>+</sup> (Li<sup>+</sup> 和 Na<sup>+</sup>) 会与水溶液中的 H<sup>+</sup> 离子或 H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> 进行离子交换, 其反应可由下式表示:



这种反应实际是结合剂中的碱金属氧化物的水解过程。当  $M > 0.67$  时, 结合剂水溶液呈弱碱性。原因可能是蒸馏水对结合剂具有一定的侵蚀作用。由于蒸馏水的存在, 结合剂中的碱金属离子 (Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>) 不断从结合剂中转入水溶液中, 随着侵蚀进行, 碱浓度越来越大, pH 值急剧上升, 结合剂化学稳定性变差。MgO 的引入能够改变侵蚀程度, 这是因为 Mg<sup>2+</sup> 半径较小, 能够填充在 Na<sup>+</sup> 的空隙中间, 形成混合碱-碱土效应, 抑制其扩散和释放; 同时结合剂中 Li<sup>+</sup> 浓度也逐渐降低, 扩散释放能力减弱, 降低了水溶液中 Li<sup>+</sup> 浓度; 随着  $M$  值的增加,

Mg<sup>2+</sup> 与结合剂中的 Zn<sup>2+</sup> 同样也会形成类似混合碱-碱土效应的混合碱土-碱土效应进一步抑制了碱离子的析出, 另外, 引入的 Mg<sup>2+</sup> 和结合剂中的玻璃相形成 MgSiO<sub>3</sub> 薄膜, 薄膜的厚度随 *M* 值的增加而变厚, 这种薄膜能够抑制 Na<sup>+</sup> 和 Li<sup>+</sup> 向水溶液中扩散, 因此, 结合剂的水溶液 pH 值随 *M* 值的增加而逐渐减小, 化学稳定性增强。

### 2.4 烧结温度对结合剂物相组成及结构的影响

图 3 和图 4 为 *M*=0.67 时陶瓷结合剂不同温度下的物相以及显微组织照片。

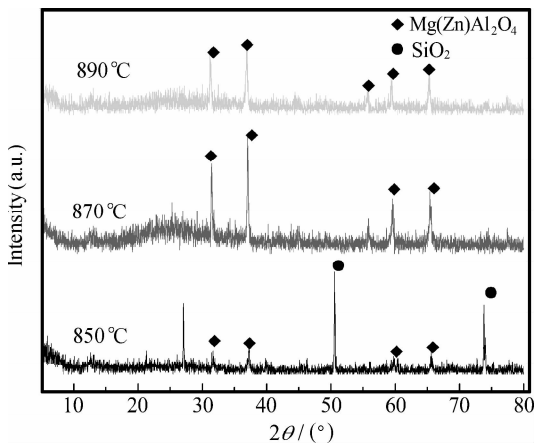


图 3 不同温度下 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷结合剂 (*M*=0.67) X 衍射谱图

Fig. 3 XRD patterns of vitrified bonds for

ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*M*=0.67) at different temperatures

从图 3 可以看出, 850 °C 结合剂中存在石英晶相和 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相, 主晶相为石英晶相; 当温度为 870 °C 时, 主晶相为 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 存在少量杂质石英晶相; 当温度达到 890 °C 时结合剂中只含有 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相。原因是: 随着温度的升高, 结合剂逐渐融化, 黏度降低, SiO<sub>2</sub> 晶相逐渐溶解, 直至完全消失, 此时结合剂熔体的黏度急剧降低, 提高了质点的扩散速率, 促进了颗粒的重排和传质, 利于结晶; 另外由于电场强度较大的 Mg<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 易产生积聚, 使得短程有序增加, 增加了析晶倾向, 因此易于同结合剂中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 充分接触并反应生成 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相; 并且随着温度的升高, 反应活性增加, 生成的 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相数量增加。从图 4 可以看出, 烧结温度为 830 °C 时, 结合剂中晶粒形貌不完整, 说明结晶不充分, 残余大量的玻璃相即 SiO<sub>2</sub> 晶相; 随着温度的升高, 晶体形貌逐渐规则, 数量增加且颗粒细化; 当温度升高至 870 °C 时, 结合剂显微结构致密, 晶粒较小, 约为 2 μm, 大小均匀分布排列紧密, 形状规则, 多为立方体结构, 经 XRD 证实, 该晶体为 Mg(Zn)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相; 温度为 920 °C 时, 晶体粗化, 粒径约为 6 μm, 且颗粒圆形化似烧蚀, 颗粒排列疏松, 结构不致密。

### 2.5 烧结温度对结合剂强度的影响

图 5 为不同烧结温度下陶瓷结合剂 (*M*=0.67) 试样的抗折强度。可以看出, 随着温度的增加, 结合剂的抗折强度先增加后减小, 在 870 °C 时, 出现极大值 136.28 MPa。温度较低时, 结合剂没有完全烧结, 结构疏松, 且析出的晶相也较少, 故强度较低; 随着温度升高, 结合剂逐渐融化, 烧结开始致密化, 结合剂会析出细小的晶体, 而细小晶粒受到外力发生塑性变形可分散在更多的晶粒内, 塑性变形较均匀, 应力集中较小, 晶粒越细, 晶界面积越大, 晶界越曲折, 越不利于裂纹的扩展, 进而弥散强化, 使强度升高; 但温度过高时, 晶粒异常长大成粗晶, 又使强度降低。从 XRD 和 SEM 图中可知, 结合剂在 870 °C 时出现晶体, 且晶粒分布均匀, 形状为正方体或球形, 能够使结合剂中微裂纹弯曲或钝化, 提高微裂纹的断裂表面能(根据 Griffith 公式:  $\sigma = \sqrt{\frac{2Er}{\pi a}}$ , 其中:  $\sigma$  为断裂应力;  $E$  为弹性模量;  $r$  为断裂表面能;  $a$  为裂纹临界长度)利于提高强度, 强度达到最大值。

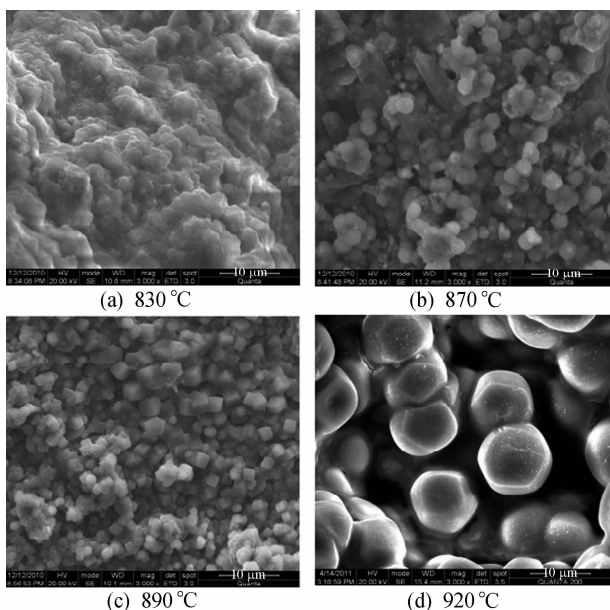


图 4 不同烧结温度 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷结合剂 (*M*=0.67) 断面显微组织照片

Fig. 4 Microscopic structures of vitrified bonds for

ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*M*=0.67) at different temperatures

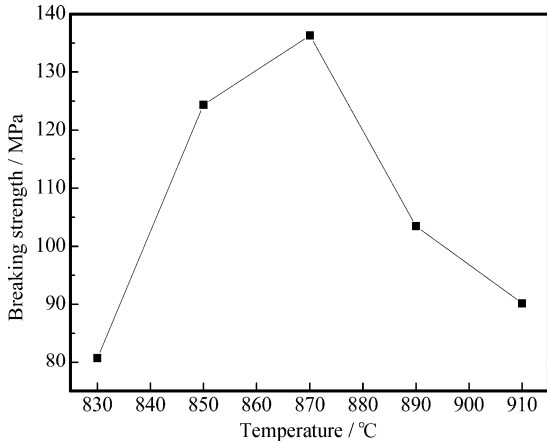


图 5 不同烧结温度下 ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷结合剂(M=0.67)试样抗折强度

Fig. 5 Bending strength of bonds for ZnO-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M=0.67) at different sintering temperatures

## 2.6 磨具性能分析

图 6 为不同烧结温度下 cBN 磨具断面显微结构照片。可以看出, 烧结温度对 cBN 磨具的显微结构具有重要影响。当烧结温度为 850 °C 时, 磨具中气孔较多, 孔径较大, 结构疏松, 大气孔连接形成裂纹, 部分 cBN 裸露, 没有结合剂包覆; 当烧结温度为 870 °C 时, 磨具较为致密, 气孔数量以及孔径减少, 部分区域结合剂桥上仍存在较大的气孔; 当烧结温度为 890 °C 时, 显微结构更加致密, 气孔较小, 数量较少且分布均匀, 结合剂完全包裹磨料; 当烧结温度为 920 °C 时, 磨具显微结构与 890 °C 时相比较为疏松, 结合剂明显玻璃化, 气孔数量较多, 孔径较大, cBN 周围存在较大空隙。原因是: 烧结温度较低时, 结合剂没有完全融化, 流动性差, 不能将压制后残留空气排出, 结合剂不能填充在磨料之间, 没有形成结合剂桥或结合剂桥很薄; 随着温度的升高, 结合剂的熔化程度增大, 流动性增强, 能够完全填充在磨料周围, 减少了气孔以及孔径, 使结构更加致密; 但当温度过高时, 结合剂完全熔融, 形成的液相较多, 流动性过大, 结合剂中由于存在一些挥发分, 易于形成气泡冷却后残留在磨具中, 形成气孔, 另外, 温度过高, 反应活化能增加, 且结合剂中的碱金属离子自由移动能力增大, 增大与 cBN 磨料的接触面积, 使两者之间的反应程度增加, 产生较多的气体, 使磨料颗粒周围的结合剂被一些气孔所代替。另外还可以看出, 随着烧结温度的增加, 结合剂桥上的气孔数量先减少后增加, 孔径先变小后变大, 这与结合剂的物相

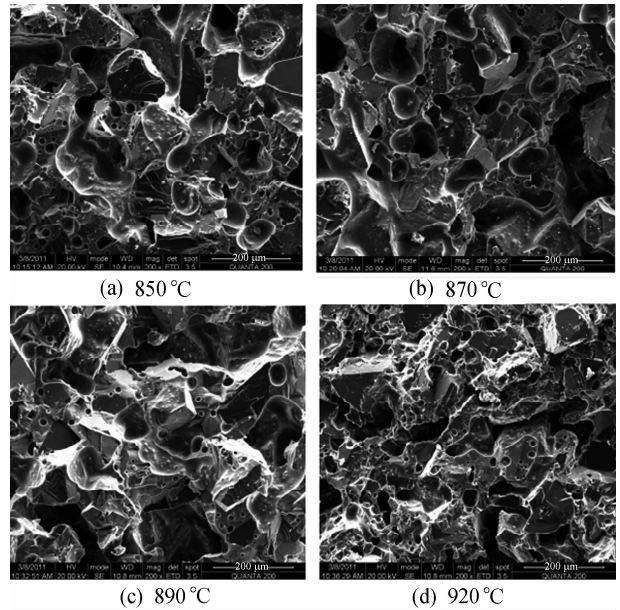


图 6 不同烧结温度磨具断面显微结构照片

Fig. 6 Microscopic structures of grinding tool samples at different temperatures

组成以及显微结构随温度的变化有关。从图 5 可知, 结合剂显微结构随温度的增加, 晶相含量先增加后减少, 玻璃相含量则相反, 而玻璃相能够溶解气体, 就会使结合剂的显微结构先致密后疏松, 即气孔数量先减少后增加, 在磨具中就表现为结合剂桥上的气孔数量先变少后变多, 孔径先变小后变大。

表 4 为不同烧结温度下 cBN 磨具性能指标。可以看出, 磨具的气孔率和吸水率随烧结温度的增加呈现 V 字型变化, 当烧结温度为 890 °C 时, 气孔率和吸水率达到极小值, 分别为 19.92% 和 9.97%; 磨具的体积密度、硬度及抗折强度随烧结温度的增加则呈现倒 V 字型变化, 当烧结温度为 890 °C 时, 体积密度、硬度以及抗折强度达到极大值, 分别为 2.22 g·cm<sup>-3</sup>、86.7 和 100.29 MPa; 磨具的磨耗比和磨削效率均随着烧结温度的提高先提高后降低, 当烧结温度为 890 °C 时, 磨耗比以及磨削效率均达到最大值, 分别为 98.72% 和 1.3675 g·min<sup>-1</sup>。物质的性能是由物质的显微结构所决定, 磨具的性能变化是其显微结构变化的外在表现。磨具的磨耗比及磨削效率是由结合剂对磨料的把持力强弱来决定, 与硬度的变化一致, 硬度越高, 把持力越强, cBN 磨料在磨削过程中越不易脱落, 磨耗比越大, 效率越高; 硬度越低, 结合剂对 cBN 的把持力越

表 4 不同烧结温度下 cBN 陶瓷磨具性能指标

Table 4 Properties of vitrified tools at different sintering temperatures

Sintering temperature/°C	Porosity/%	Water absorption/%	Volume density/(g · cm <sup>-3</sup> )	HRB	Bending strength/MPa	Abrasiveness/%	Efficiency/(g · min <sup>-1</sup> )
830	30.25	20.12	2.06	60.3	60.37	44.13	0.9137
850	26.34	18.27	2.18	72.6	73.32	58.98	0.9924
870	20.50	10.13	2.21	80.2	91.84	80.57	1.3473
890	19.92	9.97	2.22	86.7	100.29	98.72	1.3675
910	21.01	16.00	2.19	71.5	89.19	68.41	0.9531
930	28.89	19.78	2.09	63.3	60.65	46.49	0.9426

弱, 加工时, 磨料提前脱落, 磨耗比及磨削效率低; 若温度过高, cBN 可能六方化, 硬度及抗压强度降低, 磨削过程中容易破碎, 起不到磨削作用, 磨耗比及效率降低。

### 3 结 论

(1) 随着  $M$  值的增加, 结合剂软化温度、耐火度增加; 结合剂水溶液的 pH 值逐渐减小, 化学稳定性增加, 线性热膨胀系数先增加后降低。

(2) 当  $M=0.67$  时, 不同烧结温度下结合剂中均析出  $Mg(Zn)Al_2O_4$  晶相和石英晶相。随着温度的增加,  $Mg(Zn)Al_2O_4$  晶相含量增加, 形貌逐渐规则, 晶粒尺寸先减小后增加, 而石英晶相逐渐消失; 结合剂的抗折强度先增加后降低; 当温度为 870 °C 时结合剂显微结构致密, 晶粒尺寸最小为 2  $\mu\text{m}$ , 形状最为规则, 多为立方体结构, 抗折强度达到最大, 为 136.28 MPa。

(3) 当结合剂  $M=0.67$  且磨具配方一定时, 烧结温度对磨具性能有重要影响: 气孔率以及吸水率随温度的增加呈现 V 字型变化即先减少后增加, 体积密度、硬度以及抗折强度, 磨耗比以及磨削效率随温度的增加则呈现倒 V 字型变化; 当烧结温度为 890 °C 时, 磨具的各项性能达到最佳, 即气孔率和吸水率最小, 分别为 19.92% 和 9.97%, 体积密度、硬度以及抗折强度最大, 分别为 2.22  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、86.7 和 100.29 MPa, 磨耗比以及磨削效率分别为 98.72% 和 1.3675  $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 参考文献:

- [1] Brinksmeier E, Mutlugunes Y, Klocke F, et al. Ultra-precision grinding [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 652-671.
- [2] Azizi Abdolhamid, Rezaei Seyed Mehdi, Rahimi Abdolreza. Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and grinding performance [J]. J Adv Manuf Technol, 2010, 47(4): 1053-1063.
- [3] 李志宏, 袁启明, 杨正方. 陶瓷结合立方氮化硼磨削工具材料制备研究 [J]. 复合材料学报, 2003, 20(5): 39-43.  
Li Zhihong, Yuan Qiming, Yang Zhengfang. Study on manufacturing technology of vitrified bond cBN grinding tools [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(5): 39-43.
- [4] 万 隆, 翟浩冲, 刘小磐, 等. ZnO/Na<sub>2</sub>O(mol) 对 cBN 陶瓷砂轮性能的影响 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(9): 64-69.  
Wan long, Zhai Haochong, Liu Xiaopan, et al. Effect of ZnO/Na<sub>2</sub>O(mol) on properties of cBN vitrified bond grinding wheel [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(9): 64-69.
- [5] 宋鹏涛, 薛群伟, 陈延伟. 添加剂对 cBN 高速磨削工具用陶瓷结合剂熔融温度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(6): 1134-1137.  
Song Pengtao, Xue Qunhu, Chen Yanwei. Influence of additives on vitrified bond melting temperature of cBN high speed grinding tool [J]. Bulletin of the Chinese Creamyic Society, 2009, 28(6): 1134-1137.
- [6] 侯永改, 张 颂, 邹文俊, 等. 纳米 AlN 对低温陶瓷结合剂性能的影响 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 170(2): 57-60.  
Hou Yonggai, Zhang Song, Zou Wenjun, et al. Effect of nano-AlN on performances of low temperature vitrified bond [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 170(2): 57-60.
- [7] 赵志伟, 王春华, 关春龙, 等. 纳米氧化物对 cBN 磨具陶瓷结合剂性能的影响 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 173(5): 59-63.  
Zhao Zhiwei, Wang Chunhua, Guan Chunlong, et al. Effect of nano-oxides on properties of vitrified bond for cBN abrasive tools [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 173(5): 59-63.
- [8] Herman Daniela, Okupski Tomasz, Walkowiak Wieslaw. Wear resistance glass-ceramics with a gahnite phase obtained in MgO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(4): 485-492.