

DOI: 10.13957/j.cnki.tcxh.2019.06.019

刚玉砂轮用高强度低温烧结玻璃结合剂的研究

何勇涛¹, 肖卓豪¹, 李秀英¹, 肖晓东¹, 易晨浩², 孔令兵¹

(1. 景德镇陶瓷大学, 江西 景德镇 333403; 2. 江西冠亿研磨股份有限公司, 江西 奉新 330700)

摘要:以传统熔融冷却法制备 $K_2O-Na_2O-CaO-B_2O_3-SiO_2$ 玻璃, 探究不同 B_2O_3 添加量对玻璃热膨胀系数及抗折强度影响。在此基础上选择与刚玉热膨胀系数相匹配的玻璃作为刚玉砂轮用玻璃结合剂, 研究了不同烧结温度、保温时间对砂轮显微结构、物相、抗折强度以及孔隙率等的影响规律。实验结果表明, 玻璃强度随着 B_2O_3 含量的增加呈现“硼反常现象”, 当 B_2O_3 含量为 9wt.% 时, 可获得热膨胀系数与刚玉相匹配、抗折强度为 119.51 MPa 的玻璃。随着砂轮烧结温度的升高以及保温时间的延长, 砂轮抗折强度先升高后减小, 在 1000 °C 保温 4 h 后, 获得砂轮试样抗折强度高达 100.96 MPa。XRD 测试表明, 玻璃结合剂在砂轮烧结过程中以非晶态稳定存在, SEM 显示刚玉磨粒的剥落以磨料与结合剂的界面结合脱落为主。

关键词: 玻璃结合剂; B_2O_3 ; 烧结工艺; 刚玉砂轮

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2019)06-0819-07

High Strength Low Temperature Sintering Glass Binder for Corundum Grinding Wheel

HE Yongtao¹, XIAO Zhuohao¹, LI Xiuying¹, XIAO Xiaodong¹, YI Chenhao², KONG Lingbing¹

(1. Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Guanyi Abrasives Co., Ltd., Fengxin 330700, Jiangxi, China)

Abstract: $K_2O-Na_2O-CaO-B_2O_3-SiO_2$ glass was prepared by traditional melt cooling method, effects of different B_2O_3 content on thermal expansion and bending strength of glass were investigated. The glass with optimum composition is used as bonding agent for corundum grinding wheel. The effects of different sintering temperature and holding time of grinding wheel on micro-structure, phase composition, bending strength and porosity of grinding wheel were studied. The results show that the bending strength of glass presents “abnormal boron phenomenon” with the increase of B_2O_3 content. When the content of B_2O_3 is 9wt.%, a glass with flexural strength of 119.51 MPa and thermal expansion coefficient matching that of corundum can be obtained. With the increasing of the sintering temperature and holding time of the grinding wheel, the bending strength of the grinding wheel increases first and then decreases. After holding for 4 hours at 1000 °C, the bending strength of the grinding wheel specimen reaches 100.96 MPa. XRD test shows that glass binder exists stably in amorphous state during grinding wheel sintering. SEM shows that the exfoliation of corundum abrasive particles is mainly due to the interface separation between abrasive and binder.

Key words: glass binder; B_2O_3 ; sintering process; corundum grinding wheel

0 引言

砂轮作为工业的“牙齿”, 对机械的磨削加工至关重要。砂轮主要由磨粒、粘结剂和空隙三部分

构成, 磨粒一般为一些硬质颗粒如金刚石、CBN、刚玉、碳化硅等, 生产过程中对器件进行磨削加工时, 要求砂轮具有一定的容隙率, 以便排除器件的磨削碎屑、钝化脱落的磨粒, 并且实现加工

收稿日期: 2019-06-27。

修订日期: 2019-08-12。

基金项目: 国家自然科学基金(51762023, 51962013), 江西省自然科学基金(20192ACB20018), 江西省重点研发计划项目(20171BBE50006, 20192ACB80007, 20192ACB80004)。

通信联系人: 肖卓豪(1978-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2019-06-27.

Revised date: 2019-08-12.

Correspondent author: XIAO Zhuohao(1978-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: xiaozhuohao@126.com

过程中冷却液对磨削部位的冷却,而粘结剂则将磨粒粘结在一起,使砂轮具备一定的强度^[1-3]。砂轮强度作为判断砂轮使用性能的标准之一,和砂轮结合剂强度、磨粒与结合剂结合程度密切相关,因此,保证砂轮粘结剂和磨粒具有相匹配的热膨胀系数和制备高强度的砂轮结合剂为实现砂轮强度提升提供了可能^[4]。以传统陶瓷结合剂制备砂轮时,在加热过程当中由于砂轮内部氧化气氛不足,导致内部生料部分氧化不完全,容易出现“黑心”现象,同时,由于生料与磨粒机械混合,很难达到微观均匀,在烧结过程中,这种微观不均匀导致不同磨粒周围结合剂成分存在差异^[5],这种差异为高温下不同晶体的形成提供了可能,进而造成砂轮的性能不稳定。其次,传统的陶瓷结合剂砂轮在生产过程当中所需的烧成温度高、制备周期长,这与当前倡导的工业绿色化生产相违背,随着社会对节能环保要求不断加大以及行业对高性能砂轮的需求不断增加,亟需引入新技术来实现陶瓷结合剂砂轮烧成温度的降低和性能的提升。

玻璃作为非晶态物质,相对同组分的陶瓷而言,在较低的温度下会发生软化、流动,所以玻璃结合剂能够在较低温度下实现对磨粒的包裹^[6,7],这为实现砂轮的绿色化生产提供了条件;同时,玻璃是由高温均匀熔体急冷获得,其组分的均匀性也很好保证了砂轮性能的稳定。通过对玻璃成分中网络形成体、网络中间体、网络改性体含量进行调节,还可以间接调节玻璃结合剂热膨胀以及抗折强度,因此,通过对玻璃组分优化调节,可获得与磨粒热膨胀系数相匹配且高强度的玻璃。玻璃相对陶瓷的众多优势使得玻璃作为砂轮结合剂具有广阔的应用前景。本实验采用 $K_2O-Na_2O-CaO-B_2O_3-SiO_2$ 玻璃作为砂轮结合剂,该体系玻璃热膨胀系数在较大范围内可调且该体系玻璃抗折强度较高^[8-11],是低温高强度砂轮玻璃结合剂的有效选择之一。

1 实验

1.1 玻璃结合剂的制备

众所周知, H_3BO_3 作为助烧剂,能显著降低陶瓷烧成温度并降低玻璃粘度^[12],且利用硼反常现象可实现对玻璃性能的调节^[13]。参照已有实验^[7],通过调节 B_2O_3 在配方中的比例,使硼离子以不同配位形式存在玻璃网络结构中。适当 B_2O_3 添加可使 B^{3+} 以四配位形式存在,部分取代 $[SiO_4]$ 作为玻

璃网络形成体,从而提高玻璃强度,因此,一定的 B_2O_3 含量添加不仅可以降低玻璃的软化温度,同时可以提高玻璃的强度。具体配方如表 1 所示。

根据配方进行配料,将玻璃原料混合过筛,均匀混合的玻璃料放入氧化铝坩埚中并置入高温电炉进行熔制,熔制温度为 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔制 2 h 后得到均匀无气泡的高温玻璃液,将高温玻璃液倒入预热铁模中成型并在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火 1 h,将制得玻璃切块以便后期性能测试。

表 1 玻璃结合剂组成配方(wt.%)
Tab.1 The composition of the matrix glasses (wt.%)

wt.%	SiO_2	B_2O_3	$BaO + CaO$	$Na_2O + K_2O$	Al_2O_3	Σ
W1	72	7	3	12	6	100
W2	70	9	3	12	6	100
W3	68	11	3	12	6	100
W4	66	13	3	12	6	100
W5	64	15	3	12	6	100

1.2 结合剂性能测试

用玻璃切割机将玻璃切成 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 长方体,使用 DIL-402PC(Netzsch,德国)型热膨胀仪测试其从室温至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的平均热膨胀系数;切割成 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 长方体,采用美国 Instron 公司 5566 型材料试验机测定并计算得到样品的三点弯曲强度,每组样测试五根条以取平均强度值;另取部分玻璃进行研磨并过 500 目标标准筛,取部分过筛玻璃粉用模具压制成 $\phi 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的柱状,并在 EM301(Hesse,德国)型高温显微镜上进行高温软化性能测试。取部分过筛后的玻璃粉进行 XRD 测试对玻璃进行性能表征,采用德国 Bruker 公司生产的 D8-Advance 型 X 射线衍射仪测试样品的物相组成。

1.3 砂轮试样制备与性能测试

取过 500 目标标准筛的玻璃结合剂 40 g、过 120 目标标准筛的黄糊精粉 1.0 g,两者混合、搅拌过程中加水 20 mL,待混合均匀后再加 400#刚玉磨料 200 g,继续混合均匀后倒入直径 100 mm 模具中于 20 MPa 压力下成型。将成型后的砂轮坯体置于硅碳棒电炉中以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速度升温至一定温度并保温,随炉冷却后获得玻璃结合剂砂轮样品。对砂轮样进行强度和孔隙率进行测试,利用 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察砂轮样断面微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 玻璃热膨胀测试

材料在受热时会发生膨胀,若结合剂与刚玉的热膨胀系数相差较大,在砂轮制备过程中,会因膨胀系数不匹配导致其在冷却过程形成应力。当应力超过结合剂与刚玉的结合强度时,结合剂与刚玉磨料就会发生脱离,从而致使砂轮强度降低,对砂轮性能产生很大影响,所以一般要求砂轮生产过程中结合剂与磨料的热膨胀系数相匹配。图 1 是不同组分玻璃热膨胀测试结果,为比较玻璃结合剂与刚玉磨粒的结合程度,将刚玉热膨胀测试结果列入图中。由图 1 可知,在升温过程中 W2 和 W5 玻璃与刚玉热膨胀系数较为贴合。为获得理想砂轮产品,选择 W2 与 W5 玻璃组分作为砂轮结合剂配方。

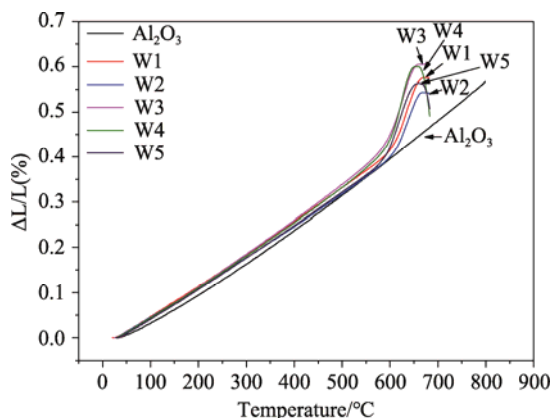


图 1 不同组成玻璃及刚玉的热膨胀曲线对比
Fig.1 Thermal expansion curves of different composition glass and corundum

2.2 玻璃结合剂抗折强度测试

对不同配方玻璃进行抗折强度测试,测试结果如图 2 所示,随着组分中 B_2O_3 含量的增加,玻璃结合剂抗折强度呈现先增加后减小的趋势,当 B_2O_3 的含量为 9% 时,玻璃(W2 基础玻璃)的抗折强度达到最大值 119.51 MPa,这与董晓峰等^[6]研究的结果相似,但随着 B_2O_3 含量的进一步增加,试样的抗折强度急剧下降,该现象可由“硼反常效应”^[14]解释,当少量的 B_2O_3 存在时, B^{3+} 抢夺玻璃结构中游离氧从二维 $[BO_3]$ 结构向三维 $[BO_4]$ 结构转变,从而使玻璃结构得到增强,网络结构连接程度的加大提高了玻璃的抗折强度,继续增加 B_2O_3 含量,体系中的游离氧被继续消耗,直至不够支持生成新的 $[BO_4]$ 四面体,体系中 $[BO_3]$ 三角体越来越多,破坏了玻璃网络结构^[14],从而导致玻

璃强度的急剧降低。

较高强度的砂轮粘结剂有利于提升砂轮强度,所以后期实验采用 W2 作为刚玉砂轮玻璃粘结剂。

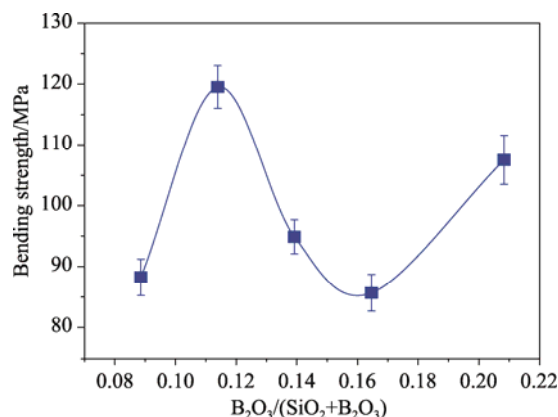


图 2 B_2O_3 含量对基础玻璃抗弯强度的影响
Fig.2 Effect of B_2O_3 content on bending strength of matrix glass

2.3 玻璃结合剂特征温度测试

为确定最佳的砂轮烧结温度,对 W2 配方玻璃进行高温显微镜观察,测试样在空气气氛下以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率从室温升温至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,并在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 10 min,根据高温显微镜测试结果分析玻璃的软化温度、球化温度和半球化温度。

图 3 为 W2 玻璃特征温度测试结果,图 3(a)为室温下测试的圆柱形侧面投影。图 3(b)为 $792\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测试圆柱侧面投影,由图片可以看出,玻璃边角开始出现钝化,此时玻璃开始软化。进一步升高温度,玻璃软化程度加剧,图 3(c)为 $898\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时球化样品投影照片。图 3(d)为 $1099\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时半球化样品投影照片,此时玻璃出现明显的流动。

2.4 不同烧成温度对砂轮强度与孔隙率的影响

依据特征温度点可知,玻璃结合剂在 $792\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始软化,为实现玻璃结合剂对刚玉磨粒的均匀包裹,需在软化温度以上对砂轮进行烧结,烧结温度作为影响砂轮强度的重要参数之一,决定了砂轮性能的好坏,烧结温度过低,玻璃结合剂不能充分软化,且对磨粒的把持力不够,较多的孔隙率也极大地降低了砂轮强度,烧结温度过高,玻璃结合剂流动性较强,包裹的磨粒再次裸露出来,砂轮的均质包裹无法实现。同时,玻璃结合剂的液相流动将包裹住砂轮内部气孔,小气孔无法汇集排除,且包裹的气孔在受力时发生破裂,进一步降低了砂轮的强度。因此探究合适的烧结温度对制备高强度砂轮至关重要。

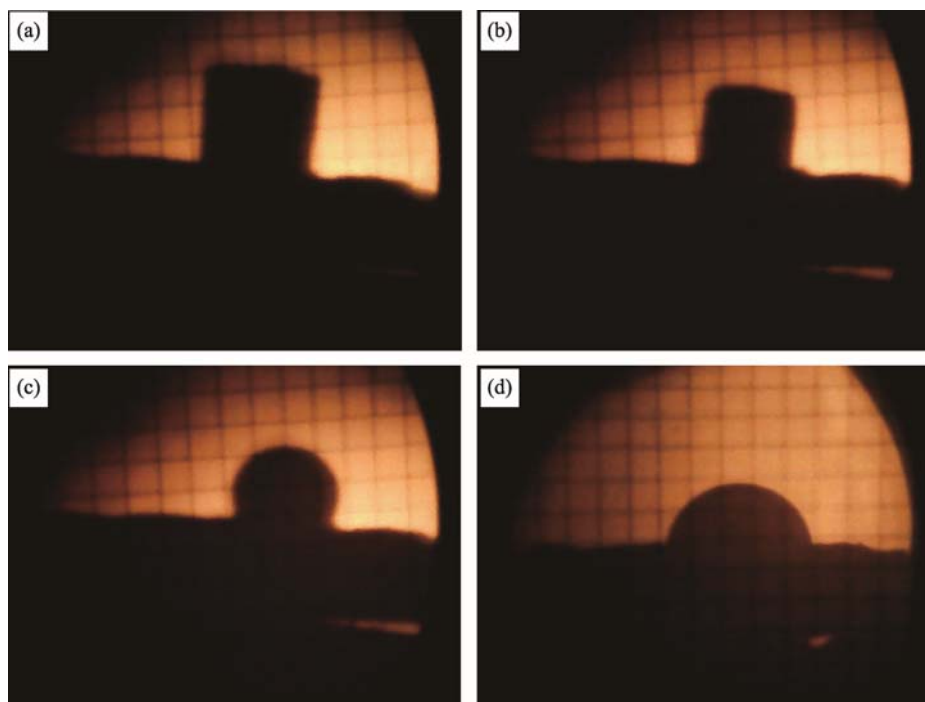


图3 基础玻璃 W2 的特征温度: (a) 14 °C; (b) 792 °C; (c) 898 °C; (d) 1099 °C

Fig.3 Characteristic temperatures of matrix W2 glass (a) 14 °C; (b) 792 °C; (c) 898 °C; (d) 1099 °C

在 800-1200 °C 之间取 5 个温度点(温度间隔 100 °C), 分别在五个温度点保温 1 h, 测量不同温度下烧结后砂轮的抗折强度与孔隙率。测试结果如表 2 所示。为直观观察砂轮性能与烧结温度的关系, 将砂轮性能测试结果如图 4。

表 2 不同烧成温度条件下砂轮的强度及孔隙率
Tab.2 Bending strength and porosity of grinding wheel samples sintered at different temperatures

Temperature/°C	Holding time/h	Strength /MPa	Porosity/%
800	1	48.32	20.9
900	1	78.29	10.0
1000	1	90.65	8.8
1100	1	76.65	6.8
1200	1	66.86	13.2

由图 4 可知, 随着烧结温度的升高, 砂轮抗折强度先增加后减小, 在 1000 °C 保温 1 h 后, 砂轮得到最高抗折强度为 90.65 MPa, 而在 800 °C 烧结的砂轮抗折强度仅为 48.32 MPa, 随着烧结温度从 800 °C 提升至 1000 °C, 砂轮强度提升近 1 倍, 但是继续升高烧结温度, 砂轮抗折强度逐渐减小, 在 1200 °C 烧结时, 砂轮试样强度反而降低至 66.86 MPa。

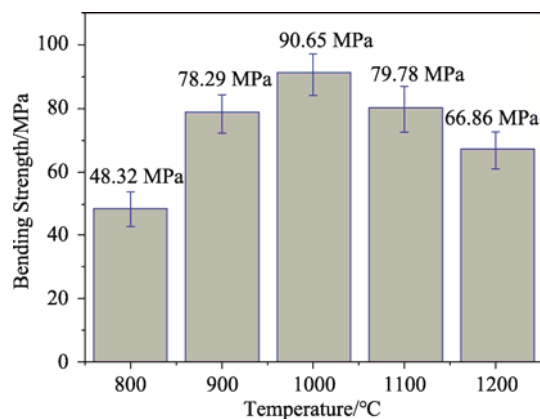


图 4 不同烧结温度下砂轮的强度

Fig.4 Bending strength of grinding wheels sintered at different temperatures

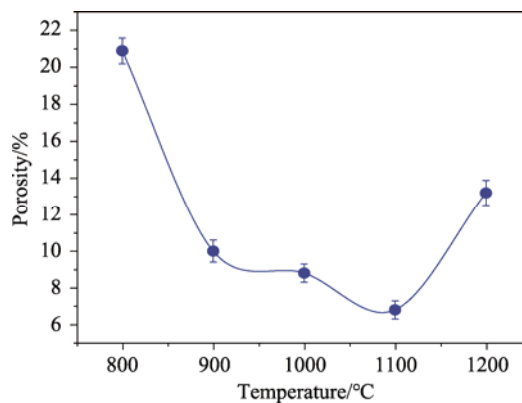


图 5 不同烧结温度下所制备砂轮的孔隙率

Fig.5 Porosity of grinding wheels sintered at different temperatures

图 5 为砂轮试样在不同温度烧结后孔隙率测试结果。随着烧结温度的升高，砂轮孔隙率呈现先减小后增大的趋势。在对工件进行加工时，砂轮高速磨削产生大量热，一定的孔隙率有利于冷却液对工件的冷却，将孔隙率控制在适宜范围内有助于提升砂轮产品的强度。

由图 5 可以看出，砂轮在 800 °C 烧结时，砂轮孔隙率为 21.4%，随着烧结温度的升高，砂轮试样致密化程度加大，砂轮孔隙率逐渐减小，在 1000 °C 烧结试样孔隙率为 8.8%，显著减小的孔隙率是砂轮强度提升的重要因素之一，继续升高烧结温度至 1200 °C，砂轮出现过烧，液相的玻璃结合剂包裹内部气孔，且气孔在高温下发生膨胀，内部气孔无法通过颈部迁移汇集排除，加大了砂轮的孔隙率，砂轮受力时，气孔的存在降低了砂轮的强度。

2.5 不同保温时间对砂轮性能影响

对砂轮最佳烧结温度的探究结果表明，烧结温度为 1000 °C 时的砂轮试样强度最高，为进一步提升砂轮强度，在该温度下探究不同保温时间对砂轮结构及性能影响。砂轮在 1000 °C 分别保温 0.5 h、1 h、2 h、4 h、8 h 后性能测试结果如表 3 所示，将抗折强度测试结果、孔隙率测试结果分别作图 6、图 7。

表 3 不同保温时间条件下砂轮的强度及孔隙率
Tab.3 Strength and porosity of grinding wheel samples sintered at 1000 °C for different holding time

Sintering temperature /°C	Holding time/h	Bending strength/MPa	Porosity/%
1000	0.5	78.59	9.6
1000	1.0	90.65	8.6
1000	2.0	94.37	7.6
1000	4.0	100.96	7.1
1000	8.0	94.63	8.6

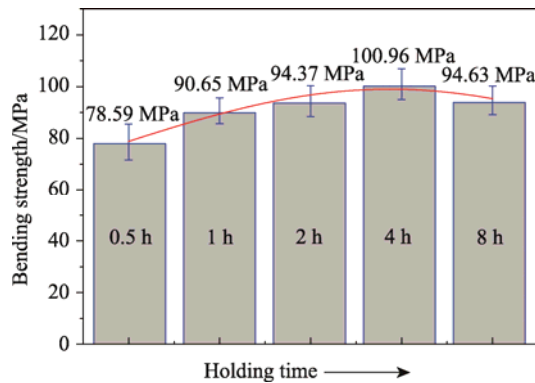


图 6 1000 °C 保温不同时间所制备砂轮样品的强度
Fig.6 Bending strength of grinding wheel samples sintered at 1000 °C for different holding time

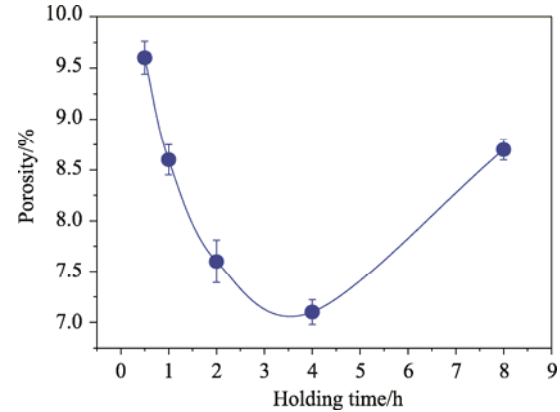


图 7 1000 °C 保温不同时间所制备砂轮样品的孔隙率
Fig.7 Porosity of grinding wheel samples sintered at 1000 °C for different holding time

由图 6 可知，砂轮强度随着保温时间的延长先增加后减小，砂轮样品在 1000 °C 保温 4 h 后，抗折强度达到 100.96 MPa，继续延长保温时间，砂轮强度出现一定减小，说明适当延长保温时间有利于提升砂轮强度。砂轮强度的变化规律可以用孔隙率变化规律来解释，由图 7 可知，延长保温时间，砂轮孔隙率先减小后增大，孔隙率的降低直接造成砂轮强度的变化，保温 8 h 后砂轮内部玻璃相流动程度加大，包裹的气孔无法排除导致孔隙率加大。结合强度和孔隙率测试结果可知，砂轮最佳保温时间为 4 h。

2.6 砂轮结合剂 XRD 分析

为研究砂轮结合剂在砂轮烧结过程中物相变化，对 W2 配方玻璃结合剂进行 XRD 测试，图 8 为砂轮结合剂在不同温度下的 XRD 衍射图谱，玻璃结合剂在 800-1200 °C 温度范围内保温一定时间的 XRD 衍射图谱为标准的馒头峰型，表明玻璃结合剂在升温过程中为非晶态，稳定的玻璃结合

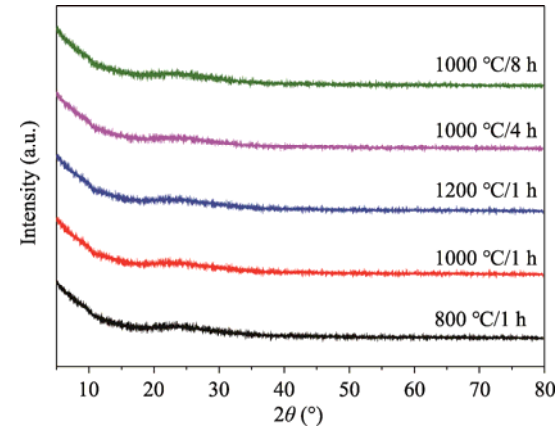


图 8 不同温度下玻璃结合剂 XRD 衍射图谱
Fig.8 XRD spectra of glass binders sintered at different temperatures

剂在砂轮制备中能够实现均质流动, 这将有利于砂轮的性能稳定。

2.7 砂轮 SEM 分析

图 9(a)、(b)、(c)分别为砂轮在 800 °C、1000 °C、1200 °C保温 1 h 后的断面扫描电镜图, 由扫描电镜图可知, 玻璃结合剂均匀包裹刚玉磨粒, 气孔分布较为均匀, 随着温度的升高, 砂轮内部气孔尺寸先减小后增大, 1000 °C 烧结的砂轮气孔尺寸最小, 此时砂轮结构较为致密, 同时空隙率呈现相同的趋势, 这与抗折强度测试、孔隙率测试相符合。图 9(d)为 800 °C 保温 1 h 后的砂轮样品中结合剂与刚玉结合部位 SEM 图, 图片显示为刚玉磨粒剥落留下的玻璃相凹槽, 由此可知, 砂轮在对

工件进行加工时, 磨粒钝化、剥落是沿着磨粒界面进行。在 1000 °C 保温 4 h 后获得砂轮强度最高, 说明此工艺处理下, 刚玉磨粒与玻璃结合剂结合最为紧密。

2.8 成品砂轮制备

以基础玻璃 W2 作为砂轮结合剂, 400 目刚玉作为磨料, 按照实验部分制备砂轮样条方法, 1000 °C 保温 4 h 制备了系列不同用途的砂轮产品, 图 10 为以所研制的结合剂在江西冠亿研磨股份有限公司生产的低温烧结砂轮产品, 其中图 10(a)为低温磨量规砂轮, 图 10(b)为低温磨导轨砂轮。所制备的砂轮表面没有明显的裂纹、空洞、黑心、色差等缺陷, 各方面性能指标均达到行业标准。

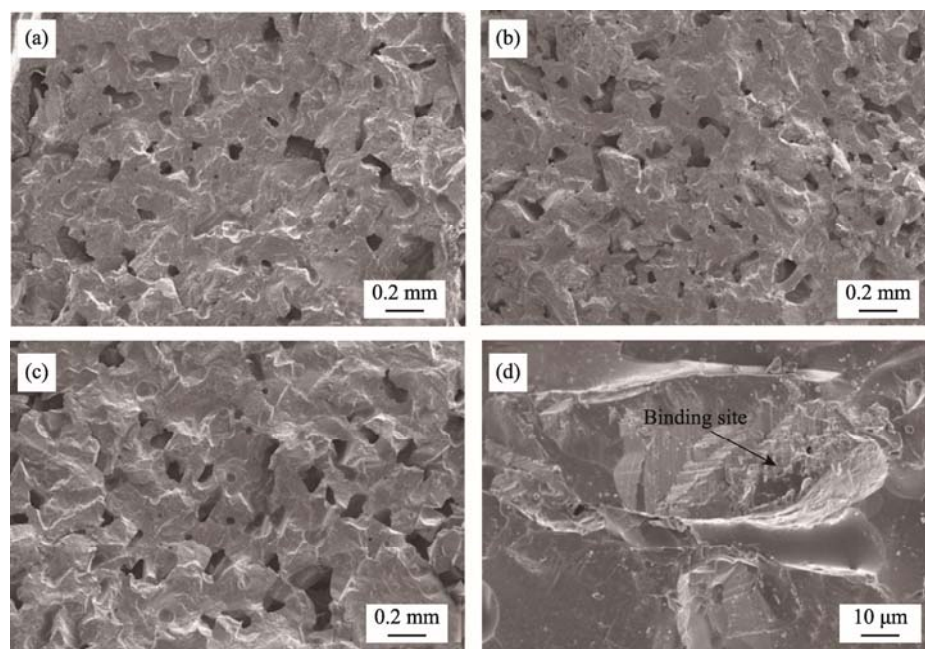


图 9 砂轮样条断面 SEM: (a) 800 °C; (b) 1000 °C; (c) 1200 °C; (d) 800 °C
Fig.9 SEM images of grinding wheel cross section (a) 800 °C; (b) 1000 °C; (c) 1200 °C; (d) 800 °C

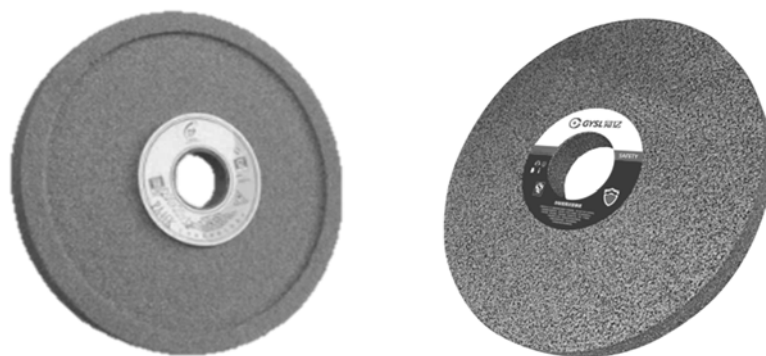


图 10 以所研制的结合剂制备的砂轮产品: (a) 低温磨量规砂轮; (b) 低温磨导轨砂轮
Fig.10 Grinding wheel products prepared with the developed binder
(a) grinding wheel for gauge, (b) grinding wheel for guide

3 结 论

(1) B_2O_3 含量对 $K_2O-Na_2O-CaO-B_2O_3-SiO_2$ 玻璃的抗折强度影响很大, 该体系的硼反常效应显著, 当 B_2O_3 添加量为 9% 时, 玻璃抗折强度最大可达 119.51 MPa。

(2) 以所制备的玻璃为刚玉砂轮结合剂, 能够大幅度降低传统刚玉砂轮的烧成温度, 当烧成温度为 1000 °C、保温时间为 4 h 时, 可获得强度为 101.96 MPa 的砂轮试样, 显著高于当前普通陶瓷砂轮的结合强度, 具有明显的推广应用潜力。

参考文献:

- [1] JACKSON M J, DAVIS C J, HITCHINER M P, et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications and future technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 110(1): 78-88.
- [2] LIN K H, PENG S F, LIN S T. Sintering parameters and wear performances of vitrified bond diamond grinding wheels [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2007, 25(1): 25-31.
- [3] HERMAN D. Glass and glass-ceramic binder obtained from waste material for binding alundum abrasive grains into grinding wheels [J]. *Ceramics International*, 1998, 24(7): 515-520.
- [4] 余舜. CBN 砂轮用微晶玻璃结合剂的研究[D]. 湖南大学, 2004.
- [5] 王鹏飞, 李志宏, 朱玉梅. 碱金属氧化物对陶瓷结合剂性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(s1): 285-287.
WANG P F, LI Z H, ZHU Y M. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(s1): 285-287.
- [6] 董晓烽, 肖卓豪, 易维民, 等. 刚玉砂轮用 $K_2O-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ 玻璃结合剂的研究[J]. *中国陶瓷工业*, 2017, 24(3): 1-5.
DONG X F, XIAO Z H, YI W M, et al. *K₂O-B₂O₃-Al₂O₃-SiO₂ glass binder for corundum grinding wheel*[J]. *China Ceramic Industry*, 2017, 24(3): 1-5.
- [7] 肖卓豪, 王赞, 罗民华, 等. 低温 $Li_2O-ZnO-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ 玻璃结合剂的研究[J]. *中国陶瓷工业*, 2018, 25(3): 7-11.
XIAO Z H, WANG Z, LUO M H, et al. *China Ceramic Industry*, 2018, 25(3): 7-11.
- [8] 肖卓豪, 卢安贤. $R_2O-MO-Al_2O_3-SiO_2$ 玻璃的组成与其热膨胀系数的关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2005, 36(4): 566-570.
XIAO Z H, LU A X. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2005, 36(4): 566-570.
- [9] HU X, LEI C, LIU T, et al. Crystallization and properties of B_2O_3 doped LZAS vitrified bond for diamond grinding tools [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, 427: 69-75.
- [10] HE F, ZHOU Q, XIE J L, et al. Characterization of low sintering temperature and high strength $SiO_2-B_2O_3-CaO$ vitrified bonds for diamond abrasive tools [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(3, Part A): 3449-3455.
- [11] HOU Z X, WANG S H, XUE L X, et al. Crystallization and microstructural characterization of $B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ glass [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, 356(4): 201-207.
- [12] 戴长禄, 杨勇, 杨明. 锌在建筑陶瓷坯体、釉料及微晶玻璃中的作用与影响[J]. *佛山陶瓷*, 2012, 22(4): 29-32.
DAI C L, YANG Y, YANG M. *Foshan Ceramics*, 2012, 22(4): 29-32.
- [13] 胡志强. 无机材料科学基础教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [14] HE F, CHENG J S, DENG D W, et al. Structure of $Bi_2O_3-ZnO-B_2O_3$ system low-melting sealing glass [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 17(2): 257-262.