

## 超高速陶瓷 CBN 砂轮纳米陶瓷结合剂性能实验研究

张景强<sup>1,2</sup> 王宛山<sup>1</sup> 于天彪<sup>1</sup> 张松<sup>1,3</sup>

1. 东北大学, 沈阳, 110004 2. 沈阳航空航天大学, 沈阳, 110136

3. 沈阳远大企业集团, 沈阳, 110023

**摘要:**以超高速陶瓷 CBN 砂轮的结合剂低温高强性能要求为目标,在以化学纯原料为主的  $R_2O+RO-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$  玻璃体系基础上,引入纳米改性剂来对陶瓷结合剂基体进行改良强化。4 种成分结合剂性能的测试结果表明,纳米陶瓷结合剂的抗折强度、耐火度、浸润性与普通陶瓷结合剂相比有着显著优势。4 号纳米陶瓷结合剂的抗折强度达到了 83.75MPa,耐火度降至 795℃,其膨胀系数也与 CBN 磨料更为接近,是一种更适合用于制备超高速陶瓷 CBN 砂轮的结合剂。

**关键词:**超高速; CBN 砂轮; 陶瓷结合剂; 纳米陶瓷

**中图分类号:** TG580.614

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.01.016

### Experimental Study of Nano-ceramic Bond Based on Super High-speed CBN Grinding Wheel

Zhang Jingqiang<sup>1,2</sup> Wang Wanshan<sup>1</sup> Yu Tianbiao<sup>1</sup> Zhang Song<sup>1,3</sup>

1. Northeastern University, Shenyang, 110004

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110136

3. Shenyang Yuanda Enterprise Group, Shenyang, 110023

**Abstract:** In order to achieve the requirements of super-high speed vitrified bond of CBN grinding wheel with low-melting and high strength, nano-materials were added into formulations of the vitrified bond which was mainly based on a glass with properties of  $R_2O+RO-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ , a compound of pure raw chemical materials. Performances of four types bond were tested. Experimental results show that compared with traditional vitrified bond the new nano-ceramic bond has a significant advantages at its bending strength, refractoriness and infiltration. Especially, the bending strength of 4 # nano-ceramic bond has reached 83.75(MPa) and its refractoriness was 795℃, and its expansion coefficient is the closet to CBN abrasive. It proves that 4 # nano-ceramic bond is more suitable for super-high speed CBN grinding wheel.

**Key words:** super-high speed; CBN grinding wheel; vitrified bond; nano-ceramic

## 0 引言

近年来,超高速陶瓷 CBN 砂轮成为磨具开发的热点,其良好的容屑、散热、自锐性能以及稳定的化学性能,可很好地满足难加工材料磨削和高效磨削的需要,应用前景十分广阔<sup>[1-2]</sup>。超高速陶瓷 CBN 砂轮需要一种低熔高强陶瓷结合剂,即要求结合剂具有高强度,低耐火度,良好的气孔性、浸润性、工艺性、化学稳定性,且与 CBN 磨料热膨胀系数匹配。然而传统的陶瓷结合剂普遍存在烧结温度高、强度低、烧成尺寸一致性差等缺陷<sup>[3]</sup>。

超高速 CBN 砂轮结构的优化设计表明<sup>[4]</sup>,当  $\phi 370\text{mm}$  超高速砂轮贴片宽度为 6mm,厚度为 5mm,数量为 60 时,在 250m/s 线速度下,贴片所受最大拉应力为 19.36MPa,要保证砂轮安全,贴片的抗拉强度至少为 34.84MPa,相应的抗折强度值至少为 70MPa,而普通陶瓷结合剂难以满足

此要求。普通陶瓷砂轮的耐火度往往接近 1000℃,而部分 CBN 磨料在不到 1000℃时就会发生高温氧化导致砂轮性能低劣。另外,1000℃以上的高温烧结也增加了能耗成本。

为此,笔者将纳米材料技术引入到超高速陶瓷 CBN 砂轮结合剂开发中,以陶瓷结合剂为基体,通过加入多种纳米改性剂从而制备出力学性能和热学性能有明显改善,且适用于超高速陶瓷 CBN 砂轮的纳米陶瓷结合剂。

## 1 纳米陶瓷结合剂的强化机理

纳米材料学研究表明,如果能在微米级粉末烧结基体中引入纳米相,则有望抑制基体晶粒的异常长大,使组织结构均匀,从而有利于复合材料力学性能的改变<sup>[5-6]</sup>。实际上,纳米陶瓷结合剂的强韧化机制不仅仅与纳米相抑制晶粒长大作用相关,还与结合剂内生成的内晶核结构强化、次晶界残余应力强化、结合剂晶粒潜在纳米化效应、残余

应力引起的裂纹偏转、穿晶钉轧作用过程有关<sup>[7-8]</sup>。因此,根据纳米复合材料强化机理我们设计了4种结合剂的配方,在陶瓷结合剂基体中加入纳米改性剂,研究了纳米氧化物对超高速磨削陶瓷结合剂性能的影响。

## 2 结合剂性能测试试验

### 2.1 试验方案

以  $R_2O+RO-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$  系统为陶瓷结合剂的基础玻璃体系,在化学纯原料中通过添加不同质量分数的纳米  $Al_2O_3$ 、纳米  $SiO_2$  及纳米  $ZrO_2$  对陶瓷结合剂进行强化增韧。表1所示为4种实验结合剂的配比,为了考察纳米改性剂对陶瓷结合剂的影响,分别对陶瓷结合剂的耐火度、膨胀系数、表面形貌、强度等基本性能进行了测试。

表1 4种陶瓷结合剂成分的质量分数 %

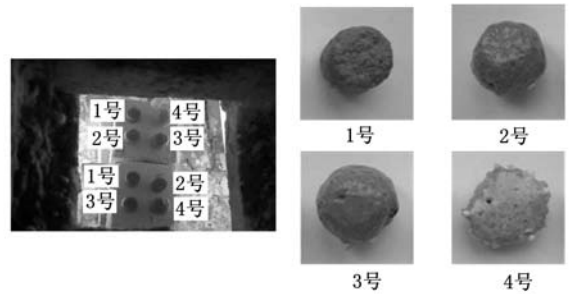
	配方1	配方2	配方3	配方4
$SiO_2$	49.0	42.0	45.5	45.0
纳米 $SiO_2$		5.0	5.0	5.0
$Al_2O_3$	19.3	21.0	11.0	11.0
纳米 $Al_2O_3$			10.0	10.0
$R_2O+RO$ 氧化物	8.8	14.8	10.2	7.7
纳米 $ZrO_2$				3.0
$B_2O_3$	14.9	13.2	14.3	14.3
其他成分	1.3	4.0	4.0	4.0

### 2.2 结合剂样条制备

试验采用的纳米材料是经过粉体分散稳定处理的,平均粒径为50nm,其中,纳米  $ZrO_2$  粒径约30nm,材料的质量分数超过99.9%。采用GZM-5型高频共振研磨机将结合剂纯料研磨至600目以细。以MYS-100压机冷压成形,制成 $37.0mm \times 5.8mm \times 5.0mm$ 的结合剂强度及膨胀系数测试条,以及直径为20mm、高为10mm的耐火度测试流动块。试验设备如下: $R \times 3-20-12$ 型箱式电炉,最高温度为 $1200^\circ C$ ;GP-3型高温线膨胀测试仪;伯纳克公司的X Pert Pro X射线衍射仪;4202-006型电子万能试验机;Keyence VHX-1000型超景深三维显微镜。

### 2.3 纳米陶瓷结合剂耐火度

将压制干燥好的流动块放入炉内,以 $5^\circ C/min$ 速率加热,取流动块熔化至1/2高度时的温度为结合剂的耐火度。图1为高温照相机所拍照片,可知1号普通结合剂流动块在 $800^\circ C$ 时几乎没有变化,2号、3号单纳米成分结合剂流动块变化甚微,4号结合剂则有明显软化。从 $850^\circ C$ 炉烧冷却后各流动块状态来看,除了1号结合剂外,2号、3号、4号结合剂均达到了熔融态,因此可以断定其耐火度在 $850^\circ C$ 以下。



(a)800°C炉温时照片 (b)850°C炉烧后4种流动块状况

图1 纳米陶瓷结合剂耐火度测试过程

随后继续进行多次耐火度测量,更加精确地确定了4种陶瓷结合剂的耐火度范围,最终得到的各结合剂的耐火度及对应烧结范围如表2所示。其中,1号传统结合剂的耐火度最高,4号结合剂的耐火度最低,可见细粒度纳米氧化物的加入能增强结合剂烧熔反应能力,可明显降低结合剂耐火度。通过对比结合剂配方组成可以发现,纳米  $SiO_2$  对耐火度的降低影响较大。

表2 4种配方结合剂的耐火度

	1号	2号	3号	4号
耐火度( $^\circ C$ )	840	810	800	790
烧结范围( $^\circ C$ )	50	45	40	40

### 2.4 纳米陶瓷结合剂热膨胀系数

将4种陶瓷结合剂压制成 $50mm \times 10mm \times 10mm$ 的生胚条后按照参考烧成温度进行烧成,然后将烧熔融后冷凝的结合剂固块磨成 $37.0mm \times 5.8mm \times 5.0mm$ 规格的膨胀系数实验条,以获得最终工作状态下的结合剂试样。将制成的实验条放到高温热膨胀分析仪上,样品升温速率按照 $5^\circ C/min$ ,加热直至 $750^\circ C$ ,测出各个温度阶段的相应膨胀系数,如图2所示。

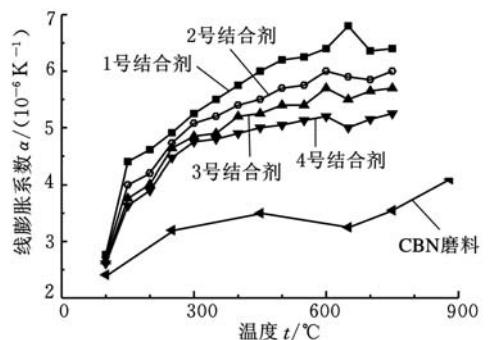


图2 4种陶瓷结合剂与CBN磨料的热膨胀系数

与CBN磨料的膨胀系数最接近的是4号结合剂,然后依次是3号、2号、1号结合剂。另外,可以发现2号、3号、4号结合剂在温度由常温升至 $300^\circ C$ 范围内线膨胀系数变化较快,之后变化缓慢,温度超过 $550^\circ C$ 后,4号结合剂的膨胀系数基本稳定在 $5.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ 。此时,CBN磨料的

热膨胀系数达到  $3.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , 仅与 4 号结合剂条的膨胀系数相差  $1.7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。加入纳米改性剂后, 纳米陶瓷结合剂条线膨胀系数变小的原因是, 结合剂粗大颗粒间的缝隙被弥散的纳米材料填充, 结合剂内生成的纳米相残余应力使结合剂更加致密, 从而使结合剂受热应力影响所产生的体积变化幅度变小。

热膨胀系数的实验数据表明, 4 号结合剂最理想, 其热膨胀系数与 CBN 磨料的热膨胀系数最接近, 因此结合剂和磨料在烧结过程中产生的热膨胀量能够协调变化, 从而减小热应力对砂轮强度的影响。另外, 1 号结合剂的热膨胀系数在  $650^\circ\text{C}$  时有突变, 上升到  $6.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  左右, 这对结合剂强度是不利的。

## 2.5 纳米陶瓷结合剂物相

为了考察超高速纳米陶瓷 CBN 砂轮结合剂中玻璃相的生成情况, 我们运用 X 射线衍射仪对结合剂进行了物相分析, 如图 3 所示。1 号结合剂中有残留的  $\text{SiO}_2$  相, 说明有方石英的析出, 这势必会导致结合剂本身强度的下降。2 号结合剂中除了  $\text{SiO}_2$  相外, 还有少量  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  相, 而  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  相的析出在一定程度上能使 2 号结合剂强度有所提高, 所以, 2 号结合剂的强度较 1 号结合剂高。4 号结合剂的玻璃相最好, 其中出现的  $\text{ZrSiO}_4$  相具有高强度的四面体晶型结构, 有着良好的机械及耐磨性能。

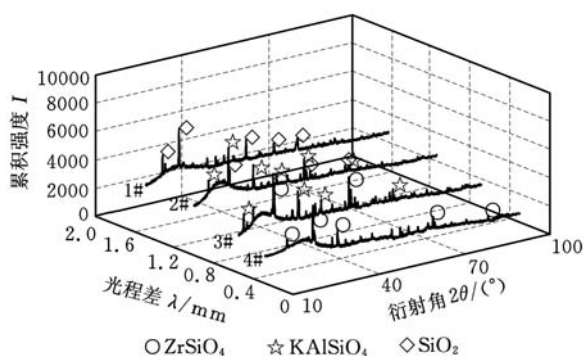


图 3 4 种陶瓷结合剂物相衍射图

## 2.6 纳米陶瓷结合剂强度

为了考察纳米陶瓷结合剂实际增韧的效果, 同时验证以上物相分析对结合剂强度的预测, 我们在 4202-006 型电子万能试验机上对 4 个结合剂实验条进行了抗折强度测试。测试所得抗折力曲线如图 4 所示。

1 号结合剂的强度最低, 仅为  $59.91 \text{MPa}$ ; 2 号结合剂(强度为  $69.21 \text{MPa}$ )中 5%(质量分数)的纳米  $\text{SiO}_2$  对结合剂强度起到了较好的增韧效果。3 号、4 号结合剂(强度分别为  $78.82 \text{MPa}$  和

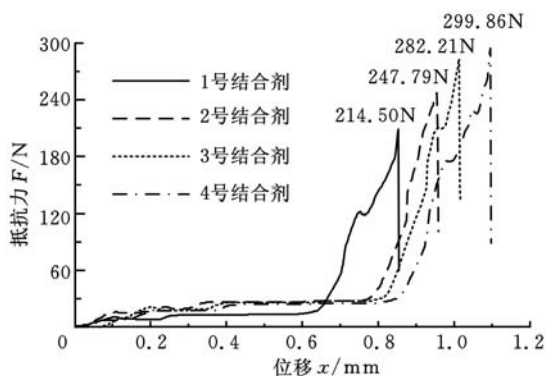


图 4 4 种结合剂条的抗折力与位移的曲线

$83.75 \text{MPa}$ ) 中纳米  $\text{SiO}_2$  和纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的质量分数较大, 其强度都在  $70 \text{MPa}$  以上, 可见结合剂中形成玻璃相的纳米主成分的质量分数对结合剂强度影响较大。4 号结合剂中纳米  $\text{ZrO}_2$  对结合剂强度增韧的效果较  $\text{Al}_2\text{O}_3$  要好, 但纳米  $\text{ZrO}_2$  本身的耐火度高、难以熔化, 在结合剂中多半是以玻璃相的晶核形式存在, 其质量分数过大时反而会降低晶型强度, 对结合剂强度不利。因此, 这里的抗折强度测试数据与之前结合剂物相测试的预计强度相吻合。

## 2.7 纳米陶瓷结合剂表面形貌

为了进一步从微观上考查 4 种结合剂强度、膨胀系数、显微硬度各自差异的原因, 我们使用 VHX-1000 型超景深三维显微镜, 观察 4 种结合剂试样的微观形貌, 如图 5 所示。

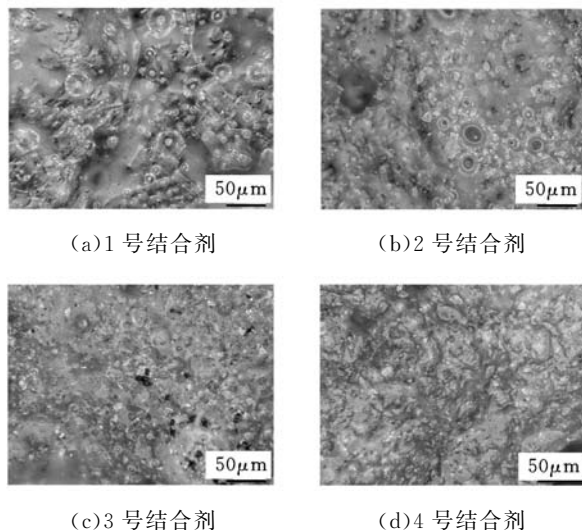


图 5 4 种结合剂微观形貌

由图 5 可见, 1 号结合剂(传统陶瓷)烧结后所含的气泡最多、最大, 且结合剂表面出现了线膨胀热应力效应导致的大量微裂纹, 这是 1 号结合剂强度、线膨胀系数较大的原因。2 号结合剂中由于加入了纳米  $\text{SiO}_2$  成分, 故结合剂玻璃相较好, 表面显性气孔比 1 号结合剂的少; 3 号、4 号结

合剂最致密,表面显性气孔最少,且结合剂晶粒微小,这十分有利于提高结合剂的抗冲击性能和耐磨性。4号结合剂晶粒最微小、致密,其间均匀分布着玻璃相与微气孔,这有助于增加结合剂的浸润性,提高结合能力。同时,4号结合剂的线膨胀系数较小的原因也可以从4种结合剂最为致密的微观形貌特征上得到印证。

## 2.8 纳米陶瓷结合剂高温润湿性测试

结合剂对磨料的高温润湿性能决定两者能否产生良好结合,是提高磨具强度与使用性能的关键。传统方法测陶瓷结合剂高温润湿性时,将结合剂圆柱体放于细粒度磨料压制成的托板上,依照工艺曲线升温,对结合剂熔融状态进行观察并照相,再在照片上测量结合剂浸润角。但这种方法却并不适用于陶瓷 CBN 砂轮结合剂。一方面,CBN 磨料的硬度很高,在不添加黏结物的情况下是很难将细粒度 CBN 磨料压制成板块的;另一方面,粗粒度磨料与实际砂轮生产所用磨料性能相去甚远,在此状况下测量的浸润角  $\theta$  并没有说服力。实验借鉴座滴法原理<sup>[9]</sup>,采用以下的方法进行纳米陶瓷结合剂的浸润性能实验测试:

(1)将结合剂压制成  $\phi 20\text{mm} \times 3\text{mm}$  的圆柱薄片,将薄片平放到  $\phi 30\text{mm}$  的刚玉坩埚内。

(2)将用于超高速砂轮生产的 170/200 粒度的 CBN980 磨料均匀撒置于 4 种结合剂薄片上。

(3)将坩埚放入到高温电阻炉内,按照结合剂各自的升温曲线,升温至结合剂耐火度  $10^\circ\text{C}$  以上,保温 2h 后随炉冷却到室温。

(4)将融化在坩埚底部的试样放到超景深三维显微镜下观察其浸润状况,确定结合剂对 CBN 磨料的润湿性。

从图 6 可以看出,在结合剂的浸润性方面,同样是 4 号结合剂最好,其次是 3 号、2 号结合剂,最差的是 1 号结合剂。从显微镜下可以明显看出,结合剂与 CBN 磨料结合处有多处裂隙。由于测量方法的差异,虽然无法确定结合剂与磨料浸润角  $\theta$  的大小,但仅从图 6 就可以直观地看出,3 号、4 号结合剂对 CBN 磨料的浸润性是非常好的,且由于实验使用的磨料是项目研究中专用于超高速陶瓷 CBN 砂轮生产制备的磨料,因此测试结果更加具有工艺参考价值。

## 3 超高速陶瓷 CBN 砂轮砂条性能测试

### 3.1 纳米陶瓷结合剂砂条抗折强度

对 4 种陶瓷结合剂强度的测试可知,传统的 1 号结合剂强度显然无法承受 250m/s 线速度旋转

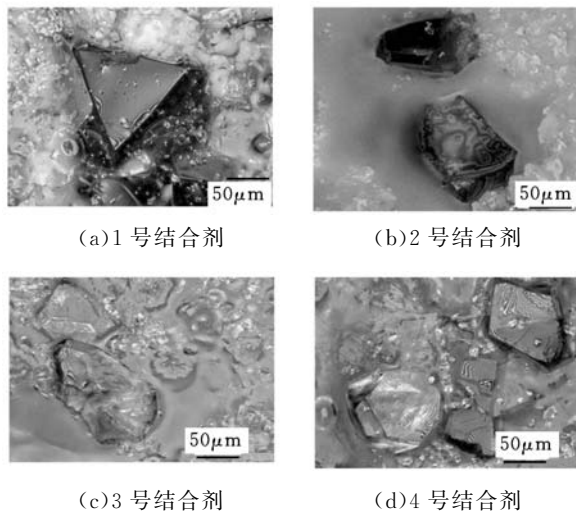


图 6 4 种陶瓷结合剂润湿状况

下的拉应力,只有 3 号、4 号结合剂满足 250m/s 线速度超高速陶瓷 CBN 砂轮的强度要求。然而,结合剂的强度并不等同于超高速陶瓷 CBN 砂轮贴片的真实强度。因此我们制备了对应的 4 种结合剂的 CBN 砂轮强度实验条,其中,CBN 磨料选用国产 200 目粒度的 CBN980。表 3 为对应的抗折力及抗折强度测试数据。其中,4 号实验条的强度达到了 88.23MPa,可见采用纳米陶瓷结合剂的砂轮实验条强度较普通陶瓷结合剂砂轮实验条有很大提升。同时也说明纳米结合剂与 CBN980 具有很好的结合性能。

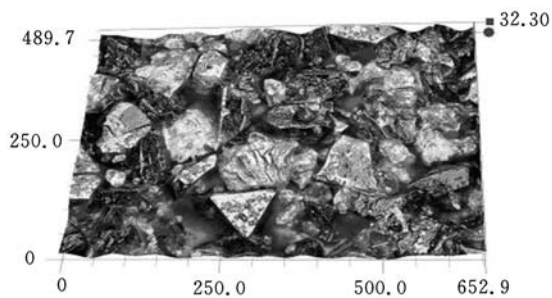
表 3 4 种结合剂砂条的抗折力及对应抗折强度

	1 号	2 号	3 号	4 号
抗折力(N)	202.24	259.4	298.12	315.87
抗折强度(MPa)	56.49	72.45	83.27	88.23

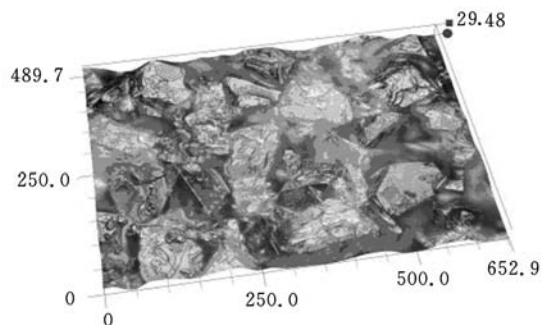
### 3.2 纳米陶瓷结合剂砂块显微结构观察

图 7 所示为 4 种陶瓷结合剂实验砂块的微观形貌。实验砂块所用磨料为 200 目粒度的国产 CBN980,其中,图 7a 所示为烧成温度  $900^\circ\text{C}$ 、未加任何纳米改性剂的 1 号结合剂制成的砂条表面形貌照片,图 7b~图 7d 所示分别为加入 2 号、3 号、4 号结合剂的砂块。图 7 中的大块黑色及琥珀色的晶体物质是国产 CBN980 磨料,磨料周围浅灰色呈玻璃光泽类絮状物质和包覆磨料表面的薄膜状玻璃物质都是结合剂,CBN 磨料之间由结合剂桥粘结。

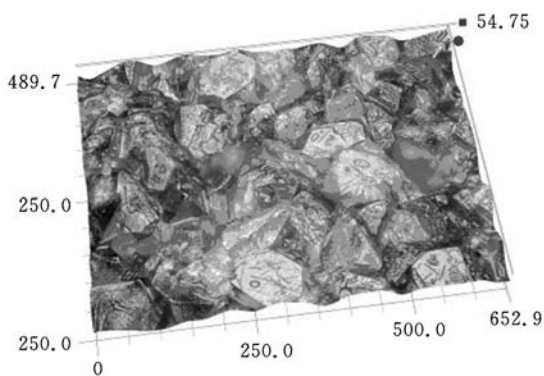
微观形貌测显示,1 号结合剂砂条磨料之间的气孔(多为显性气孔)较大,结合剂桥上存在着小气孔,这些小气孔尺寸在  $20\mu\text{m}$  左右。出现此种情况是因为结合剂本身缺点导致熔融状态黏度大、气体逸出较难。虽然多孔容屑性能是陶瓷结合剂的优点之一,但是这种存在于结合剂桥中的大气孔,却会显著降低砂块强度。另外,1 号砂



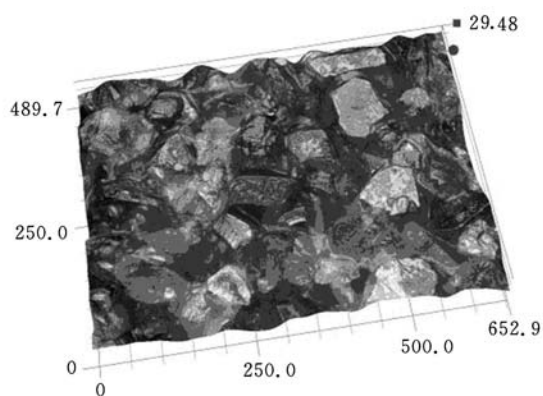
(a) 1 号结合剂砂条表面



(b) 2 号结合剂砂条表面



(c) 3 号结合剂砂条表面



(d) 4 号结合剂砂条表面

图 7 砂块表面超景深三维照片( $\mu\text{m}$ )

块表面残留有较多的大粒白色石英晶粒,这是烧结反应中石英相析出的特征,石英相的残留会降低砂条强度。

再观察其他几种纳米陶瓷砂条状况,4 号结合剂砂条在宏观状态下几乎观察不到显性气孔,只在磨料与结合剂缝隙中有一些隐性微气孔,砂

条的气孔率也较小。4 号砂条的玻璃相生成也是最好的,在显微镜下观察可见纳米陶瓷结合剂在 CBN 磨料表面形成了十分均匀的包覆层,并呈现出金属般的釉色光泽,磨料晶型也保持得很完整。因此,在 4 种结合剂中,4 号纳米陶瓷的综合性能也是最好的。

## 4 结论

(1) 纳米结合剂的性能测试表明,纳米改性物的加入有助于细化结合剂晶粒,提高结合剂强度,同时能促进结合剂反应能力,从而降低其耐火度。另外,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (质量分数为 10%) 对结合剂的耐火度降低能力不如纳米  $\text{SiO}_2$  (质量分数为 5%)。

(2) 从浸润能力来说,纳米改性物的加入有助于结合剂晶粒的细化,提高结合剂的浸润能力。

(3) 值得注意的是,纳米改性物种类及质量分数的增多虽然可以一定幅度降低结合剂耐火度,但却会使结合剂的烧结范围变窄,使纳米陶瓷结合剂的制备工艺难度进一步增加。

(4) 根据纳米复合材料强化机理,加入合理质量分数的纳米成分后,实验得到的陶瓷结合剂在耐火度、线膨胀系数、机械强度、浸润性能上都有着明显的改善。4 号结合剂的强度达到了 83.75MPa,以其制备的陶瓷 CBN 砂轮砂条强度达到了 88.23MPa,耐火度约为 795 $^{\circ}\text{C}$ ,是一种更加理想的超高速陶瓷 CBN 砂轮结合剂。

## 参考文献:

- [1] Oliveira J F G, Silva E J, Guo C, et al. Industrial Challenges in Grinding[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(2): 663-680.
  - [2] Wang Y H, Zang J B, Zhang X H, et al. Interface Bonding between Ti-coated CBN and Vitrified Bond [J]. Key Engineering Materials, 2004, 259/260: 14-18.
  - [3] Moya J S, Lopez-Esteban S, Pecharroman C. The Challenge of Ceramic/Metal Microcomposites and Nanocomposites[J]. Progress in Materials Science, 2007, 52(7): 1017-1090.
  - [4] 张景强, 王贵和, 于天彪, 等. 超高速陶瓷 CBN 砂轮结构优化设计[J]. 中国机械工程, 2011, 22(16): 1916-1921.
- Zhang Jingqiang, Wang Guihe, Yu Tianbiao, et al. Optimization Design of Vitrified CBN Wheel Structure in Super High-speed Grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(16): 1916-1921.

# 轮毂电机独立驱动电动汽车差速转向路感控制研究

赵万忠<sup>1</sup> 王春燕<sup>1</sup> 张宗强<sup>1</sup> 于蕾艳<sup>2</sup> 赵 婷<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016 2. 中国石油大学, 青岛, 266580

**摘要:**为改善电动轮汽车差速转向系统的转向路感,建立了电动轮汽车差速转向和整车系统的动力学模型。基于鲁棒控制理论,在保证  $H_\infty$  性能的前提下,设计了系统 PID 控制器,并进行了仿真分析。结果表明,基于  $H_\infty$ -PID 控制的差速转向系统可在满足系统  $H_\infty$  鲁棒性能的基础上,进一步减小系统的静态误差,提高差速转向路感系统的灵敏度和系统精度,使驾驶员获得更为满意的转向路感。

**关键词:**车辆工程;电动轮汽车;差速转向;路感控制

中图分类号:U461.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.01.017

## Study on Road Feel Control of Differential Steering for In-wheel Electric Vehicle

Zhao Wanzhong<sup>1</sup> Wang Chunyan<sup>1</sup> Zhang Zongqiang<sup>1</sup> Yu Leiyan<sup>2</sup> Zhao Ting<sup>1</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580

**Abstract:** In order to improve the road feel of differential steering system, the dynamics models for the vehicle including the differential steering system were built. Based on the robust control theory, guaranteeing the  $H_\infty$  property, a PID controller was designed for the novel differential steering system and the simulation was conducted. The simulation results show that the novel differential steering system with the  $H_\infty$ -PID controller can meet robust performance of  $H_\infty$  and decrease static errors of the system. It can improve the steering sensibility and system accuracy, then the driver can obtain more satisfied steering road feel.

**Key words:** vehicle engineering; in-wheel electric vehicle; differential steering; road feel control

## 0 引言

电动轮汽车采用轮毂电机独立驱动技术,通过控制左右车轮差速转矩,可实现新型差速转向。在电动轮汽车基础上,发展一种新型差速转向系

统,使其同时融合主动转向和助力转向功能,不仅能实现汽车轻便转向和驾驶员满意路感的完美融合,还能使汽车的安全性与灵活性协调统一,是一种理想的动力转向技术,具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

目前,国内外有关电动轮汽车的研究主要集中在动力学建模与驱动转矩控制方面。文献[4]

收稿日期:2013-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375007, 51005115, 51205191)

[5] Zheng Yaping, Zheng Y, Ning Rongchang. Effects of Nanoparticles SiO<sub>2</sub> on the Performance of Nanocomposites[J]. Materials Letters, 2003, 57(19): 2940-2944.

[6] 王辅忠,张慧春,史冬梅,等. 纳米陶瓷研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(增刊2): 19-23.

Wang Fuzhong, Zhang Huichun, Shi Dongmei, et al. Research Development of Nano-ceramics[J]. Materials Review, 2006, 20(S2): 19-22.

[7] 朱红. 纳米材料化学及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

[8] 王昕,谭训彦,尹衍升,等. 纳米复合陶瓷增韧机理分析[J]. 陶瓷学报, 2000, 21(2): 107-111.

Wang Xin, Tan Xunyan, Yin Yansheng, et al. Analysis on Toughening Mechanisms of Ceramic Nano-

composites[J]. Journal of Ceramics, 2000, 21(2): 107-111.

[9] 李志宏. 陶瓷磨具制造[M]. 北京:中国标准出版社, 2000.

(编辑 张 洋)

**作者简介:**张景强,男,1983年生。东北大学机械制造及其自动化学院博士研究生,沈阳航空航天大学机电工程学院讲师。主要研究方向为数字化制造、精密磨削与加工技术。发表论文20余篇。王宛山,男,1946年生。东北大学机械工程与自动化学院教授、博士研究生导师。于天彪,男,1968年生。东北大学机械工程与自动化学院教授、博士研究生导师。张松,1983年生。东北大学机械工程与自动化学院硕士研究生,沈阳远大企业集团工程师。