

陶瓷轴承技术发展与应用

洛阳轴研科技股份有限公司 张永乾

1. 概述

陶瓷轴承具有质量轻、耐高温、耐腐蚀、无磁、绝缘、刚性高、高速使用离心力小、运转温升低等优良特性，能用于高速、高温、腐蚀性介质等许多钢制轴承无法满足要求的特殊场合。

陶瓷轴承主要为两类：混合式陶瓷轴承及全陶瓷轴承。混合式陶瓷轴承一般滚动体用陶瓷材料制造，套圈用轴承钢制造；全陶瓷轴承则滚动体及套圈均用陶瓷材料制造；按照陶瓷轴承的结构不同，分为陶瓷球轴承和陶瓷滚子轴承。混合陶瓷球轴承一般用于高速、绝缘、贫油润滑等场合，全陶瓷球轴承一般用于高温、腐蚀、抗磁、绝缘等场合。

在多种陶瓷材料中，由于氮化硅陶瓷（ Si_3N_4 ）具有优良的综合机械性能，与轴承钢相同的疲劳剥落和疲劳寿命，成为制造陶瓷轴承的最佳材料。

陶瓷轴承研制开发时间表：

1960 年	开始陶瓷轴承研究，热压氮化硅材料制造陶瓷轴承
1970 年后	HIP 烧结氮化硅材料用于制造陶瓷陶瓷轴承
1980 年后	GPS 烧结氮化硅材料用于制造陶瓷轴承 国内开始氮化硅粉末研制及氮化硅陶瓷滑动轴承的研究
1990 年后	陶瓷轴承工业化规模生产 国内开始 GPS 烧结氮化硅陶瓷球及混合陶瓷轴承的研究
2000 年后	国内 GPS 烧结氮化硅陶瓷球批量化生产
2005 年后	国内陶瓷轴承批量化生产

2. 氮化硅陶瓷作为轴承材料的特性

氮化硅陶瓷材料作为轴承材料，虽然在工业陶瓷中硬度和韧性不是最高的，但是在要求高性能的轴承应用中，氮化硅具有最佳的机械物理综合特性，均质细密的氮化硅陶瓷具有良好的抗滚动接触疲劳特性，有如下明显的特征：

(1)低密度，氮化硅陶瓷的密度为 $3.19\sim 3.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，仅为轴承钢 ($7.85\text{g}/\text{cm}^3$) 的 40%，离心载荷小，高速运转温升低。

(2) 较高的弹性模量，氮化硅陶瓷的弹性模量是轴承钢的 1.5 倍，可使轴承的刚度提高，但会因应力集中降低轴承的承载能力。

(3) 热膨胀系数小，氮化硅陶瓷的热膨胀系数仅为轴承钢的 1/4，减少轴承对温度变化的敏感，有助于防止卡死，但对于角接触球轴承会使接触角改变。

(4) 抗压强度高，是滚动轴承高的接触应力需要的。

(5) 硬度高，氮化硅陶瓷硬度是轴承钢的 2 倍，可加工到较好的表面粗糙度，且能防止外界粒子和冲击损伤，以及滑擦损伤。

(6) 良好的抗滚动接触疲劳性能，氮化硅陶瓷具有与轴承钢相同或略高的接触疲劳寿命。

(7) 剥落失效形式，氮化硅陶瓷具有与轴承相同的剥落失效形式，使得轴承在卡死前有预兆，是一种造成危害最小的失效模式。

(8) 耐高温，氮化硅陶瓷可在高达 800℃ 的高温中稳定保持其机械特性。

(9) 耐腐蚀，氮化硅陶瓷具有优异的耐腐蚀性能，使轴承可在氧化和腐蚀环境，尤其是在反复滚动而挤压掉表面油膜的接触区具有抗氧化和腐蚀稳定性。

结构陶瓷与轴承钢的特性比较见表 1

表 1 结构陶瓷和轴承钢的典型特性

材料特性	Si ₃ N ₄	GCr15	SiC	ZrO ₂	Al ₂ O ₃
密度/ g/cm ³	3.19-3.3	7.85	3.1	5.9	3.9
弹性模量/ GPa	310	210	420	205	390
抗压强度/ MPa	3500	-	2000-2500	2000	2000-2700
抗弯强度/ MPa	700-1000	2500	500	600-900	300-500
维氏硬度/ HV10	1400-1800	800	2000-2400	1000-1300	1800-2000
断裂韧性 K _{1c} / MPa·m ^{1/2}	5~8	16-20	2-4	8-12	3-5
线膨胀系数/ 10 ⁻⁶ /K	3.2	12	4	10	8
导热系数/ W/m·K	20	30	100	2	30
比热/ J/kg·K	800	450	700	400	880
使用上限温度/ °C	800	150/300	1000	500	1000
耐腐蚀性	好	差	好	好	好
磁性	非磁性	磁性	非磁性	非磁性	非磁性

绝缘性	好	不绝缘	好	好	好
抗热冲击	高	很高	高	中等	低
滚动接触疲劳失效形式	剥落	剥落	断裂	剥落/断裂	断裂

3. 陶瓷球轴承特性

陶瓷球用于滚动轴承，使得轴承的性能明显改善，主要为：

(1) 较小的离心力，重量轻的陶瓷球在高速运动的滚动轴承中产生的离心力较小，除考虑外力外，在很高的转速下，钢制轴承由钢球引起的内部应力占主导地位，但由于陶瓷具有高的弹性模量，在相同的载荷下，陶瓷球的应力大于钢球，所以离心力的减小的优点不能完全发挥出来。

(2) 旋滚比小，与钢制轴承相比，陶瓷球轴承的旋滚比低约 30%，表示陶瓷球轴承接触状态更好，自旋摩擦更小。

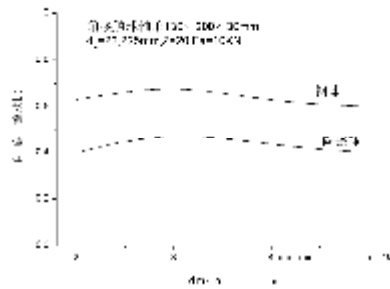


图 1 陶瓷球轴承与钢制轴承旋滚比的比较

(3) 刚度高，陶瓷材料弹性模量是轴承钢的 1.5 倍，可以用于刚度要求高的轴承，同时应该注意到，由于刚度和轴承应力不仅在滚动体材料，很大程度上取决于轴承滚动体的尺寸和数量，采用小而多钢球也可取得提高刚度的效果，所以应根据不同情况设计轴承。

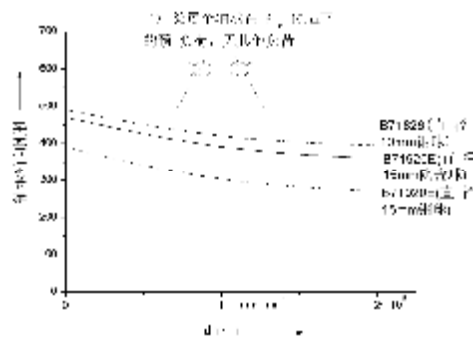
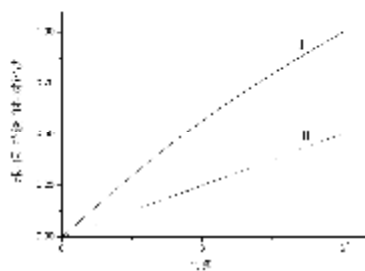


图 2 陶瓷球轴承刚性与钢制轴承刚性

(4) 球空转较小，如轴承在倾斜状态下运转，由于陶瓷球具有较好的滚动

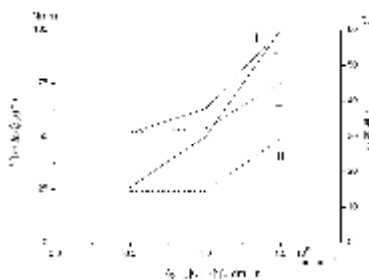
特性，陶瓷球的空转的不利影响小于钢球，引起的内部应力也较低。



I 钢制轴承 II 陶瓷球轴承

图3 陶瓷球空转较小

(5) 低摩擦和低温升，陶瓷球高的弹性模量，在轴承载荷下，形成的压力椭圆小，内圈和外圈之间的压力角差小，陶瓷球轴承在高速时具有较低的摩擦力矩，摩擦和温升较低。



I 钢制轴承 II 陶瓷球轴承

图4 陶瓷球轴承与钢制轴承摩擦力矩和温升

(6) 防摩擦性能好，高速运转条件下，陶瓷球轴承接触部位应力较低，摩擦及温升也较低，在润滑不足或润滑失效的状态下，混合陶瓷球轴承的最低运转时间至少为钢制轴承的一倍。陶瓷球轴承表现出三方面的明显特性，①润滑不足或失效后，轴承温度急剧升高，由于陶瓷材料热膨胀系数为轴承钢的 25%，可推迟轴承径向游隙的缩小，使轴承夹紧缓慢增加；②由于钢/陶瓷匹配的亲和性低于钢/钢的亲和性，当润滑膜未能很好的形成或缺少润滑时，较低的亲和性可有效地发挥作用，有效降低粘着摩擦的风险；③由于陶瓷球硬度高，在严重摩擦情况下，陶瓷球有很好的尺寸和形状精度保持性以及对外圈的修复性，保持轴承的运转。

(7) 轴承精度保持好，陶瓷材料硬度高，耐磨损，在良好润滑状态下，轴陶瓷球轴承的磨损量仅为钢制轴承的 50%，如前所述，陶瓷球轴承摩擦小、温升

低、防摩擦，这些都有利于轴承保持良好的精度。在高温、腐蚀环境下表现更加突出。

(8) 高温特性，氮化硅陶瓷具有良好的温度特性，并适用于高温用材料，远远超过 M50 耐高温轴承钢使用极限温度 400℃，氮化硅在 800℃ 硬度和强度才开始下降，同时陶瓷在高温下，不变形不收缩，具有良好的尺寸稳定性。

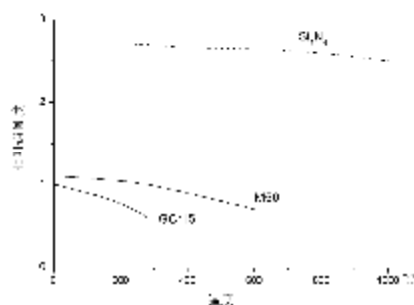


图 5 氮化硅材料与轴承钢高温硬度

(9) 物理化学稳定好，对于全陶瓷轴承，氮化硅耐酸的化学稳定性很好，盐酸、硫酸、硝酸、磷酸等到难以对氮化硅产生腐蚀，只有氢氟酸及盐酸与硝酸的混合液能对氮化硅产生腐蚀。一般认为氮化硅具有良好的耐碱腐蚀性能，但根据实验结果，氮化硅在高温高压碱性离子水中，耐腐蚀性极差，耐盐蚀性也需要评估。

陶瓷材料无磁、绝缘的，可以用来制造无磁及完全电绝缘的场合使用的轴承。

4. 陶瓷轴承国内外技术发展状况

国外陶瓷轴承技术近年发展较快，应用领域不断扩大，国外各大轴承公司 SKF, NSK, INNA, NTN, KOYO、SNFA 等均规模生产制造陶瓷轴承，轴承公差等级达到 P4 级以上，主要轴承种类为：高速主轴陶瓷球轴承、耐高温耐腐蚀无磁全陶瓷轴承、运动器材陶瓷球轴承等。陶瓷球制造球较著名的公司为：法国 SAINT-GOBAIN 公司，日本的 NTK 公司、TTC 公司、TSB 公司等；烧结方法主要为：热等静压烧结 (HIP)、气氛压力烧结 (GPS)。陶瓷球公差等级达到 G3，

国外陶瓷球及陶瓷球轴承的实物质量水平见表 2

表 2 陶瓷球质量水平

项目	产地				
	圣戈班	圣戈班	圣戈班	日本	日本

规格	4	4.763	7.144	7.938	12.7
公差等级	G5	G5	G5	G3	G3
球形误差/ μm	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.008	0.007	0.007	0.007	0.006
单球振动/dB	28	28	29	28	28
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.20	3.22	3.21	3.26	3.26
硬度 HV10	1650	1680	1670	1640	1670
孔隙度/%	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
断裂韧性/ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	7.2	7.8	7.6	6.2	6.4
压碎载荷比/%	53	38.6	44.5	52	53

5. 陶瓷轴承的应用领域

随着陶瓷制造技术的发展，陶瓷轴承的应用领域已经非常广泛，在此介绍陶瓷轴承的典型应用领域。

5.1 高速领域

一般认为，在轴承 $d_m \cdot n$ 值低于 $2 \times 10^6 \text{mm}\cdot\text{r}\cdot\text{mi}\cdot\text{n}^{-1}$ 外圈接触应力低于 2000MPa 时，使用钢制轴承能够满足要求；在轴承 $d_m \cdot n$ 值要求更高特别是轴承外圈接触应力高于 2000MPa，由于钢轴承的强度极限低于一定的接触应力，只有陶瓷球轴承才能满足极高速度的要求；随着陶瓷球制造成本的降低，陶瓷球轴承设计优化，轴承润滑方面的因素，使陶瓷轴承的应用速度范围向较低的转速特性值 $d_m \cdot n$ 方向推进。

机床主轴轴承：加工机床特别是加工中心，以提高加工效率和加工精度为目的而要求高速化，陶瓷轴承的应用使机床主轴轴承的转速特性值 $d_m \cdot n$ 值油气润滑条件下达到 $2 \times 10^6 \text{mm}\cdot\text{r}\cdot\text{mi}\cdot\text{n}^{-1}$ 以上、脂润滑条件下达到 $1 \times 10^6 \text{mm}\cdot\text{r}\cdot\text{mi}\cdot\text{n}^{-1}$ 而且摩擦特性、温升特性、刚度等得到极大改善，在机床主轴中广泛应用。各国主轴轴承型号如下：日本 NSK 公司陶瓷球轴承主要型号包括：8BNT10FSN24~30BNT10FSN24 系列，轴承内径：8~30mm，接触角： 12° ；40BNC10SN24~100BNC10SN24 系列（相当于我国的 B7000C/HQ1 系列），轴承内径：40~100mm，接触角： 15° ；35BNC19SN24~100BNC19SN24 系列（相当于我国的 B71900C/HQ1 系列），轴承内径：35~100mm，接触角： 15° ；法国 SNFA 公司是世界生产高速精

密主轴轴承最著名的轴承公司之一，该公司陶瓷球轴承主要型号和极限转速见表4。表中所列 VEX 系列 9CE1 接触角 15° ，相当于我国的 B7000C/HQ1 系列，9CE3 接触角 25° ，VEB 系列相当于我国 B71900C/HQ1 系列。

牙钻轴承：牙科工具的超高速化和组件化，转速达到 40×10^4 以上，充分发挥了陶瓷球轴承的高速特性。

电主轴轴承：陶瓷球轴承使电主轴转速提高 30%，寿命是钢制轴承的 2 倍以上。

涡轮增压器轴承、气动工具轴承，也已开始批量应用。

5.2 极限温度环境

高温轴承：全陶瓷轴承，采用固体润滑，可在 500°C — 1000°C 下可靠工作，如烘箱和热处理设备轴承等，熔融盐及熔融金属设备轴承等。混合陶瓷轴承可使轴承在 200°C — 400°C 下长期工作，如热风装置轴承，外球面轴承座及外球面轴承等。

低温轴承：利用陶瓷良好的摩擦特性，用于低温环境，在 -180°C 以下稳定工作，如液氧泵轴承。

5.3 腐蚀环境

利用陶瓷良好的耐腐蚀特性，使得陶瓷轴承可以用于多种腐蚀环境，在腐蚀环境下长时间工作。如化工设备、食品加工设备、自行车等室外运动装备等

5.4 绝缘、磁性环境

利用陶瓷的绝缘和非磁性特性，陶瓷轴承用于电动机和发电机等存在电蚀的场合，以及用于存在磁性需要轴承良好转动的场合。如电力机车、风电设备、核磁共振医疗设备等，日本 KOYO 公司开发了内径 12mm—75mm 的防止电蚀（绝缘）电机专用混合陶瓷轴承，型号为 3NC6201ZZC3—3NC6315ZZC3。

5.5 航空航天领域

随着各国对航空航天器向尖端方向发展，航空航天器的工作条件越来越苛刻，有些场合金属材料已经不能满足要求，甚至不能使用，各国已经在航空航天领域较多的采用陶瓷轴承，如飞机燃气轮机主轴轴承，宇航装备轴承等。

综上所述，陶瓷轴承的应用领域非常广泛，有广阔的发展空间和前景。

表 3 陶瓷球常规用途示例

球公差等级 材料等级	G3	G5	G10, G16	G20
I 级	高速动力设备	液氧泵	关键航空部件	
	太空机械装置 航空仪表	主轴轴承		
II 级		真空设备		
	涡轮分子泵	高效机械工具角接触球轴承	中低速马达	检测球
	牙钻	高速设备	精密星形轴承	分离球
III 级		球形螺旋桨（非太空用）		
			运动、娱乐 食品加工	机械装置

6. 陶瓷轴承技术发展趋势

随着技术发展和进步，虽然陶瓷轴承的已在多种场合和环境应用，仍需在以下方面进行不断研究和开发：陶瓷材料体系开发，以适应不同的场合如更耐腐蚀，更耐高温。陶瓷轴承零件无损检测技术，需要开发可靠高效的检测方法和仪器。陶瓷轴承优化设计技术。陶瓷轴承基础理论研究。陶瓷轴承制造成本的降低，使陶瓷轴承更加经济。陶瓷轴承摩擦学特征研究。陶瓷轴承高效加工技术开发。

（张永乾：教授级高工，洛阳轴研科技股份有限公司特种材料开发部部长，中轴协技委会滚动体专委会秘书长）

BEARING • 2010

2010 上海国际轴承峰会演讲之二十一（2010/9）