高温高速全陶瓷轴承配合技术研究

靳国栋[1,2]，薛进学[1]，李亮[2]，王玉飞[2]，张同贺[2]
（1. 河南科技大学 机电工程学院，河南 洛阳 471003； 2. 洛阳轴研科技股份有限公司，河南 洛阳 471039）

摘要：基于先进氮化硅陶瓷材料的特点，对全陶瓷轴承内圈与钢轴配合的影响因素以及过盈配合动、静态极限值进行了分析和实例试验，证明了给出的全陶瓷轴承与钢轴配合的分析方法可行，对高科技陶瓷轴承的推广应用具有重要的理论和现实意义。

关键词：全陶瓷轴承；动态极限值；静态极限值；过盈配合；氮化硅；试验

Research on the Fit Technology of High Temperature and High Speed Ceramic Bearing

Abstract: Based on the characteristics of advanced silicon nitride ceramic materials, the fit factors of ceramic bearing and steel shaft, and their dynamic and static interference limit are analyzed and experiment. The results show that the proposed method to analyze the fit of ceramic bearing and steel shaft is feasible, it is great of theoretical and realistic significance to popularization and application the high-tech ceramic bearing.

Key words: Ceramic bearing;Dynamic limit;Static limit;Interference fit; Silicon nitride;Test

0 引言

近几十年来，随着科学技术的进步，滚动轴承的使用环境和条件越来越苛刻，如高速、高温、耐腐蚀、强磁性、无油润滑等恶劣工况，采用脂润滑和油润滑的钢制轴承已不能满足要求[1, 2]。实践已证明，先进陶瓷材料完全可以作为滚动轴承材料，随着高技术陶瓷材料在轴承领域的应用，研发的高新性能的陶瓷轴承，在民用、航空航天等领域获得了应用[3, 4]，明显看到陶瓷新材料对轴承的创新所带来的促进作用。但是，作为高附加值的高端全陶瓷轴承的推广应用仍存在问题，诸如高强度、高韧性氮化硅陶瓷材料制备，氮化硅全陶瓷轴承评价技术，寿命预测理论，特别是陶瓷材料与钢材料的性能差异，在高温高速陶瓷轴承与钢轴配合间隙不合理，严重影响轴承的性能。文献[5,6]中分别提出使用柔性零件和特殊的胶粘剂，来实现陶瓷轴承与金属的联结，分析认为仅适用于低速常温轻载等工况，而高温高速重载等恶劣工况条件下陶瓷部件与金属部件的联接技术制约了高附加值的高端陶瓷轴承的推广应用，为解决这一瓶颈难题，本文基于先进氮化硅陶瓷材料的特点，分析了全陶瓷轴承与钢轴配合的影响因素，以及过盈配合动、静态极限值，在此基础上，针对特定工况条件下对全陶瓷轴承与钢轴配合进行了计算分析及试验验证。

1 影响全陶瓷轴承配合因素分析

轴承与轴以及轴承座必需相配合才能使用，其中内圈与轴的过盈量过大，会使轴承装配困难，甚至破坏配合表面；而过盈量过小则会造成配合表面打滑，加剧主轴、轴承的磨损和温升，因此，必需根据具体的使用要求，合理选择配合，提高轴承使用寿命及主轴系统的工作可靠性，影响配合过盈量的主要因素有载荷、温升、粗糙度和离心力等。

1.1 轴承载荷引起过盈量变化

对过盈配合的轴承，外加载荷将引起过盈量减小，减小量按式 (1) 计算。

$$\Delta d_F = 0.08\sqrt{\frac{d}{B}Fr}\times 10^{-3} \tag{1}$$

增加引用“球轴承的设计计算”。

式 (1) 中 Δd_F– 过盈量，d– 轴承内径，B– 轴承宽度，Fr– 径向载荷。

1.2 温升引起过盈变化

轴承高速旋转时，滚道上发生的滚动摩擦，保持架与滚动体及套圈的摩擦，以及润滑剂的搅拌，都会发热，使轴和轴承温度升高，因此轴承内圈和主轴都会发生径向热膨胀，而轴和轴承的温度和材料线膨胀系数不同，均会使配合过盈量发生变化。虽然高速全陶瓷轴承的损耗发热和摩擦发热较全钢轴承引起轴和轴承温升小，但由于陶瓷材料的线热膨胀系数约为钢的四分之一，使配合间隙发生很大变化。若轴和陶瓷内圈温度均匀分布，内圈温升 ΔT_b，轴温升 ΔT_s，其配合量 Δd_r 变化按式 (2) 计算。

$$\Delta d_T = \mathrm{d}\times(\Delta T_b \times a_b - \Delta T_s \times a_s) \tag{2}$$

式 (2) 中 ΔT_b– 内圈温升，ΔT_s– 轴温升，a_b– 内圈线热涨系数，a_s– 轴线热涨系数。

1.3 表面粗糙度引起配合量变化

过盈配合压力，使过盈量减小，按式 (3) 计算。

$$\Delta d_{eff} = \frac{2}{d+2}(\Delta d_F + \Delta d_T) \tag{3}$$

式 (3) 中 Δd_{eff} –过盈减小量。

1.4 离心力引起过盈变化

轴承与轴高速旋转时，由于离心力的作用，会引起轴承内圈内径扩张，轴外径膨胀，从而引起过盈量变化。

由于轴承内环是轴对称的，因此在极坐标系中，应力与位移是轴对称的，配合件的切向位移和剪应力为零。根据弹性力学原理，应力函数只是径向尺寸的函数，与极角无关。由几何方程可得应变分量为：

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \tag{4}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \tag{5}$$

平面应力下的物理方程为：

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta) \tag{6}$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r) \tag{7}$$

式 (6)、(7) 中 σ_r，σ_θ—分别代表径向和环向应力；u—径向位移；E—轴承内圈材料的弹性模量；μ—轴承内圈材料的泊松比。

高速旋转的轴承内圈因离心力引起径向位移，其在极坐标系的平衡微分方程简化为：

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho\omega^2 r = 0 \tag{8}$$

式 (8) 中 ρ1—轴承内圈材料密度；ω—旋转角速度；r—径向半径。

联立式 (4)–(8) 得：

$$\frac{du^2}{dr^2} + \frac{1}{r}\times\frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = \frac{-\rho(1-u^2)\omega^2 r}{E} \tag{9}$$

其一般解为：

$$u = -\frac{\rho(1-u^2)\omega^2 r^3}{8E} + C_1 r + \frac{C_2}{r} \tag{10}$$

将式 (10) 代入式 (1)–(4) 有：

$$\sigma_r = \frac{EC_1}{1-\mu} - \frac{EC_2}{(1+u)r^2} - \frac{\rho(3+u)\omega^2 r^2}{8} \tag{11}$$

1.4.1 内圈径向离心位移。

如图 1 所示，对于高速旋转的轴承，假设其内圈滚道表面不受力，内径表面过盈安装在主轴上，内圈内表面直径为 2b，用内圈滚道直径 2c 近似模型中的外环尺寸，材料的弹性模量 E_b，泊松比 μ_b，密度 ρ_b，旋转角速度为 ω。将该内圈的边界条件 $r=b$，$\sigma_r=-p$，$r=c$，$\sigma_r=0$，代入式 (10) 可得 C1 和 C2，再将 C1 和 C2 代入式 (2–11)，令 $r=b$，可得到内圈内表面的径向位移为：

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

$$I_1 = u|_{r=b} = \frac{(3+\mu_b)\,bc^2 + (1-\mu_b)b^3}{4E_b}\rho_b\omega^2 \tag{12}$$

式 (12) 中 I_1—内圈内表面的径向位移。

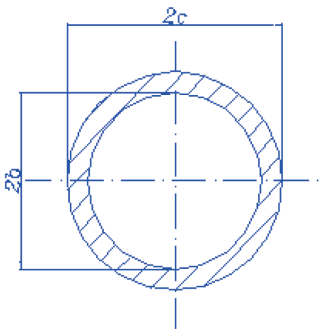


图 1 圆环

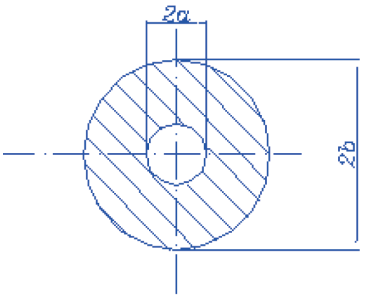


图 2 轴

1.4.2 主轴外径径向离心位移。

将空心主轴简化为厚壁圆筒，按平面应变问题求解，可得平面应变下的物理方程为：

$$\sigma_r = \frac{E(1-u)}{(1+u)(1-2u)}\left(\varepsilon_r + \frac{\mu}{1-u}\varepsilon_\theta\right) \tag{13}$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(1-u)}{(1+u)(1-2u)}\left(\varepsilon_\theta + \frac{\mu}{1-u}\varepsilon_r\right) \tag{14}$$

联立以上式 (1)、(2)、(5)、（13）和 (14) 可得：

$$r^2\frac{du^2}{dr^2} + r\times\frac{du}{dr} - u = \frac{-\rho(1+u)(1-2\mu)\omega^2 r^3}{E(1-\mu)} \tag{15}$$

其一般解为：

$$u = -\frac{-\rho(1+u)(1-2\mu)\omega^2 r^3}{8E(1-\mu)} + C_1 r + \frac{C_2}{r} \tag{16}$$

$$\sigma_r = \frac{\rho(2\mu-3)\omega^2 r^2}{8} + \frac{E}{(1-2\mu)(1+u)}\left[C_1 + \frac{(2\mu-1)}{r^2}C_2\right] \tag{17}$$

如图 2 所示，对于高速旋转的钢轴，内径面自由，外径和内孔尺寸分别为 2b 和 2a，材料的弹性模量为 E_s，泊松比 μ_s，密度 ρ_s，旋转角速度为 ω。内径表面自由，由边界条件 $r=b$，$\sigma_r=-p$，$r=a$，$\sigma_r=0$，代入式 (2−16) 可以求得 c1、c2，再将 C1 和 c2 代入式 (2−17)，并令 $r=b$，可以得到主轴外径表面的径向位移为：

$$I_2 = u|_{r=b} = \frac{(1+\mu_s)[(3-2\mu_s)a^2 b + (1-2\mu_s)b^3]}{4E_s}\rho_s\omega^2 \tag{18}$$

式 (18) 中 I_2—轴外径面径向位移。

通过上述分析，可得轴承内圈与轴的过盈量 Δmin，按式 (19) 计算。

$$\Delta\min > \Delta d_F + \Delta d_T + \Delta deff + I_1 - I_2 \tag{19}$$

2 全陶瓷轴承内圈与钢轴配合分析

氮化硅陶瓷材料的线热膨胀系数和密度都比钢小，弹性模量高，对比见表 1 所示。特别在高温条件下，将影响陶瓷内圈与金属轴的配合，配合间隙不合理，将导致陶瓷内圈断裂，严重时发生碎裂现象。

表 1

材料类别	密度 /10^3Kg/m^3	热膨胀系数 /10^{-6}/℃	泊松比	弹性模量 /GPa	抗弯强度 /MPa
钢（不锈钢）	7.8	10.5 ～ 11.8	0.3	207	2400
氮化硅（Si3N4）	3.2	3.2	0.26	320	800

2.1 过盈配合静态极限分析

氮化硅材料为脆性材料，其内圈容许的最大结合压力 $P_{f\max}$，按式 (20) 计算，取系数为 2，此时内圈容许的最大结合压力为 69.6MPa。

$$P_{f\max} = b\sigma_{be}/(2\sim3) \tag{20}$$

式 (20) 中 b− 与内圈内径、外径尺寸有关的常数，σ_{be}− 材料抗弯强度，陶瓷轴承内圈与钢轴配合允许的最大过盈配合量 e_{max} 按式（21）计算。

$$e_{\max} = P_{f\max}d\,(C_b/E_b + C_s/E_s) \tag{21}$$

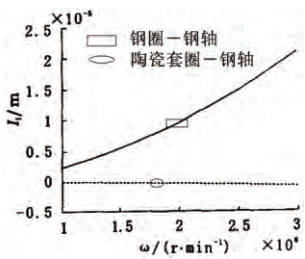
式 (21) 中 C_b、C_s− 与内径、外径及泊松比有关常数，E_b− 陶瓷内圈弹性模量，E_s− 钢轴弹性模量。

2.2 过盈配合动态极限分析

高速轴承使钢轴和轴承温度升高，发生径向热膨胀，并受离心力、载荷等因素影响会使配合过盈量发生变化，同时也应考虑不同的润滑条件对滚道表面产生拉应力而导致轴承失效。图 3 －图 5 仅分析了离心过盈和温升过盈对动态配合的影响。

由图 3 可知，陶瓷套圈与钢轴配合所需要的离心过盈

量基本上与转速无关，这主要是由于 Si_3N_4 陶瓷密度为钢的 1/2.44，而弹性模量却是钢的 1.5 倍。由图 4 可以看出，不论采用钢制还是陶瓷内圈，温升对过盈量的影响均很显著，而对陶瓷套圈的影响更为明显。由图 5 可以看出，对于陶瓷套圈与钢轴配合，过盈量仍然随主轴转速的变化而变化很大，而且温升的影响比离心力的影响更为显著，如果按静态过盈量设计，钢轴转速越高，陶瓷套圈与其配合会越紧，从而使配合面间压力增大，可能造成轴承的过早损坏。经上述分析，在参考静态配合极限值的基础上，为提高陶瓷套圈与钢轴配合的可靠性，取系数 3，此时动态配合内圈容许的最大结合压力为 46.4MPa，从而确定动态配合最大过盈量。



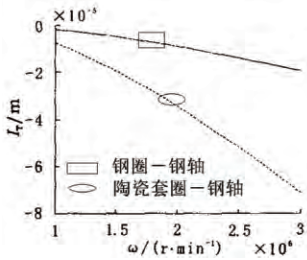


图 3 转速对所需离心过盈的影响 图 4 转速对所需温升过盈的影响

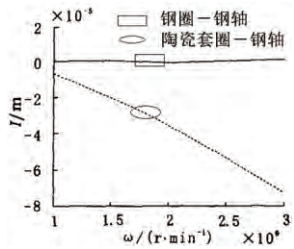


图 5 转速对所需离心 + 温升过盈的影响

3 实例与试验

3.1 过盈配合的静态极限试验

实例轴承采用全陶瓷角接触球轴承 B7208Q4C1/HQ1，其外形尺寸：Φ40×Φ80×18（mm），内圈结构尺寸如图 6，试验轴采取了实心和空心钢轴，材料见表 1 所示，图 7 给出了空心钢轴尺寸，图 8 给出了实心钢轴尺寸，公差见表 2。试验在恒温箱中进行，试验结果如图 9 所示。

表 2

轴	轴颈 /mm	内圈内径 /mm
实心轴	-0.017	-0.006
空心轴	-0.008	-0.0065

分析图 9 可得，空心轴与实心轴过盈静态配合极限理

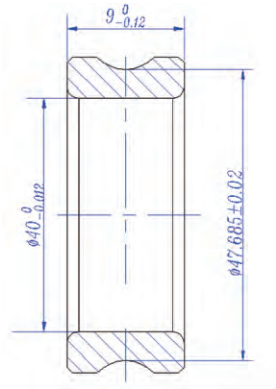


图 6

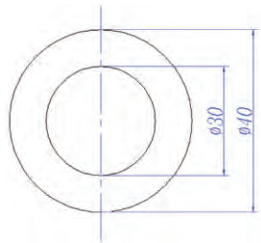


图 7

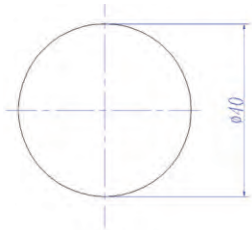


图 8

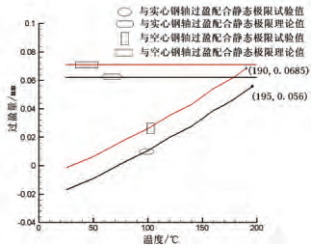


图 9

论值分别为 0.071mm 和 0.062mm，而且空心轴导致陶瓷套圈断裂的静态极限过盈量比实心轴大，约为实心轴的 1.2 倍，此时，内圈内径表面容许的最大结合压力分别为 68.5MPa 和 62.2MPa；由于空心轴缓解了陶瓷内圈内径表面的切向应力，使导致致裂过盈量增大，相对提高了材料容许最大结合压力，因此，在使用陶瓷轴承时，若内圈与钢轴的配合需要较大的过盈量，采用空心轴比实心轴好，另外，根据配合试验的过盈量极限值换算成陶瓷内圈内径表面切向应力，约为 405MPa。

3.2 过盈配合的动态极限试验

针对试验轴承 B7208Q4C1/HQ1 的工况条件，如表 3 所示，利用过盈配合动态极限分析方法，得到陶瓷内圈与实心钢轴的动态过盈配合极限值为 0.035mm，采用温升尺寸补偿方法，常温间隙配合安装，试验轴承配合尺寸见表 4，设定试验件最高温度 180℃。

表 3

运转工况		润滑条件						
最高转速 /r/min	最大加载载荷 /kN	滑油种类	润滑方式	供油温度 /℃	供油流量 /L/min	供油压力 /MPa	喷嘴数量	喷嘴孔径 /mm
42000	Frmax=4 Famax=5	4050	喷射	100	0.55	0.4	2	1.25

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

表 4

轴承编号	内径 /mm	轴 /mm	常温间隙配合量 /mm
6 #	-0.006	-0.030	0.024
3 #	-0.0065	-0.031	0.0245

3.2.1 试验方法及目的。

常温间隙配合安装的 2 套全陶瓷轴承试车前，通过热滑油使轴承内圈和钢轴达到 100℃，此时达到了启动运转需要的最小过盈量 0.0075mm，试验历程中试验件温度不得超过 180℃，试验温度下轴承内圈和钢配合情况见表 5。试验目的是验证过盈配合的动态极限值。

表 5

温度 /℃	25	55	85	105	125	145	165	185
过盈量 /mm	-0.024	-0.013	0.0006	0.0088	0.017	0.0252	0.0339	0.0426

3.2.2 试验过程及分析。

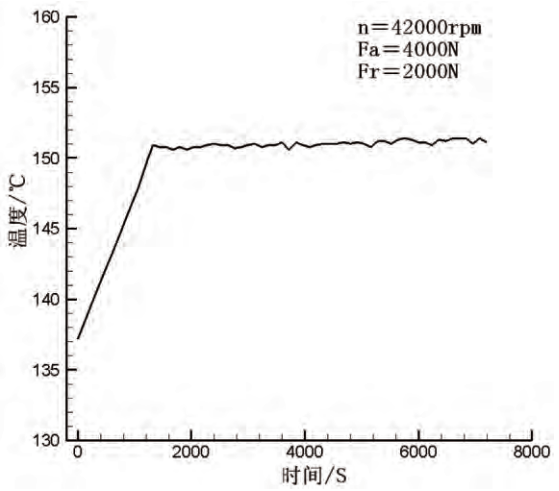


图 10

两轴承在转速为 42000rpm、Fa = 4000N、Fr = 2000N 工况下进行试验，图 10 所示，当轴承运转 20min 后，轴承运转正常、稳定，外圈温度平稳，最高达 151.4℃。当提高轴承的轴向和径向载荷分别到 5000N 和 4000N 时，轴承运转 30s 后发生损坏，拆机发现内圈断裂。

对内圈断裂分析认为：轴承内圈断裂时，内圈和轴温已达 165 ～ 180℃，说明轴承在图 10 所示的试验工况下，内圈和钢轴配合已达到过盈配合动态极限值，参照表 5，由此可判断其值不小于 0.0339mm，取 0.0339mm 为动态过盈极限配合量，约为静态过盈极限配合量的 61%，而设计值为 0.035mm，与其相对误差约 3%，此时内圈容许的最大结合压力 37.7MPa，内圈内径表面周向应力约为 213MPa。

通过上述试验及分析，高温、高速、高载荷陶瓷轴承内圈与钢轴的配合不应超过过盈配合的动态极限值与周向应力值。

4 结束语

本文基于先进氮化硅陶瓷材料的特点，对全陶瓷轴承配合的影响因素及其过盈配合动、静态极限值进行了分析，在此基础上，通过实例试验得到以下结论：

(1) 氮化硅陶瓷内圈材料以及温升是影响内圈与钢轴配合过盈量的主要因素，而转速越高，影响也越大。

(2) 陶瓷内圈与钢轴配合应以动态极限配合值为准；过盈配合动态极限下陶瓷内圈内径配合面的周向应力约为 213MPa。

(3) 采用空心轴可增大断裂过盈量，提高轴承的承载温度。

(4) 工作温度下，与钢轴具有一定过盈量的陶瓷轴承，应考虑轴系的冷却系统或采取温升尺寸补偿方法，可在高速、高载荷下使用。

(5) 氮化硅全陶瓷轴承内圈与钢轴的配合分析技术可行，对高科技陶瓷轴承的推广应用具有重要的理论和现实意义。

展望：温度变化不仅影响陶瓷内圈与轴配合，而且也会影响陶瓷外圈与钢座孔的配合，对轴承的性能产生不利的影响，也需要进一步研究。

参考文献：

[1] 王黎钦 李秀娟等 . 弹用混合式陶瓷轴承的开发研究 [J]. 推进技术 ,2001,(6):9 ～ 16.

[2]Wang L,Snidle R W,Gu L.Rolling contact silicon nitride bearing technology:a review of recent research[J].WEAR,2000,246:159~173.

[3]Pete Cento,Don W.dareing.Ceramic Materials in Hybrid Ball bearings[J]. Tribology Transactions 1999,42(4):707~714.

[4]Wan GTY.Increased performance of hybrid bearing with silicon nitride balls[J].Tribology Transactions 1997,40(4):701~707.

[5] 刘家文 . 特殊要求用混合陶瓷轴承与全陶瓷轴承 [J]. 轴承 ,2002,(9):43 ～ 47.

[6] 田万鸿 , 匡杲 . 全陶瓷轴承与金属轴用的胶粘剂及使用方法 : 中国 ,200910051145.3. 2010-11-17.