

9.8.6 汽车电装品轴承

专用润滑脂 MA7、MA8

由于追求汽车高性能、低油耗、长寿命，而对发动机外围所装电器及发动机辅机轴承的性能要求更高。这类轴承由于发动机仓空间狭窄，而处于高温环境之中。加之，采用性能优良的聚合物V型带后，轴承长时间承受重载，还有盐水或泥水侵袭。处于如此恶劣的工况下，轴承最理想的润滑脂当属MA7、MA8。

MA7 润滑脂基础油选用氧化稳定性、热稳定性均优的醚油，增稠剂选用耐热性、耐水性、剪切稳定性俱佳的尿素化合物，并辅以优质添加

剂，是一种抗剥落性、抗烧粘性以及防锈蚀性极佳的润滑脂。

MA8 润滑脂基础油选用氧化稳定性、热稳定性俱佳的醚油加合成碳氢油，增稠剂选用耐热性、耐水性、剪切稳定性俱佳的尿素化合物，并辅以优质添加剂，是一种抗剥落性、抗烧粘性、防锈蚀性以及低温环境的宁静性极佳的润滑脂。

用途

MA7： 交流发电机

MA8： 电磁离合器、惰轮

表 1 MA7、MA8 润滑脂常规参数

项 目	MA7	MA8	试 验 方 法
外 观	浅褐色	乳白色	—
增 稠 剂	双脲	双脲	—
基 础 油	醚基合成油	醚基油+合成碳氢油	—
基础油动态粘度 mm ² /sec	40 °C	100	JIS K 2283
	100 °C	13	
混 合 稠 度	25 °C, 60 W	290	JIS K 2220 : 2003 (第7条)
滴 点	°C	248	JIS K 2220 : 2003 (第8条)
铜 板 腐 蚀	100 °C, 24 h	合格	JIS K 2220 : 2003 (第9条)
蒸 发 量 %	99 °C, 22 h	0.18	JIS K 2220 : 2003 (第10条)
分 油 度 %	100 °C, 24 h	0.6	JIS K 2220 : 2003 (第11条)
氧化稳定度 kPa	99 °C, 100 h	20	JIS K 2220 : 2003 (第12条)
混合稳定度	25 °C, 10 ⁵ W	336	JIS K 2220 : 2003 (第15条)
水冲洗耐水度 %	79 °C, 1 h	1.2	JIS K 2220 : 2003 (第16条)
低温力矩 N·m -30 °C	起动	0.30	JIS K 2220 : 2003 (第18条)
	旋转	0.20	
防 锈 试 验	0.1 % NaCl 25 °C, 48 h, 100 %RH	1,1,1	ASTM D 1743

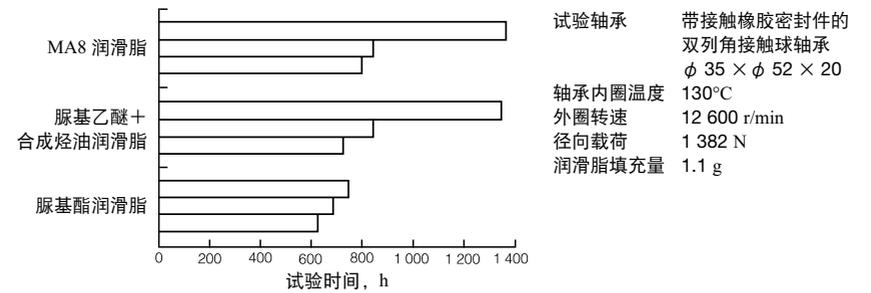


图 1 润滑脂寿命

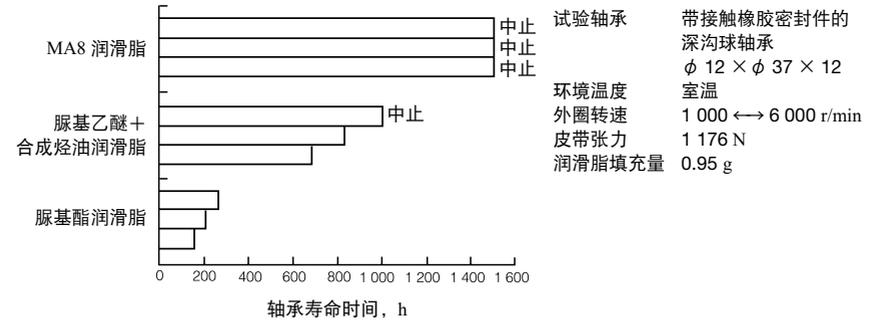


图 2 轴承寿命

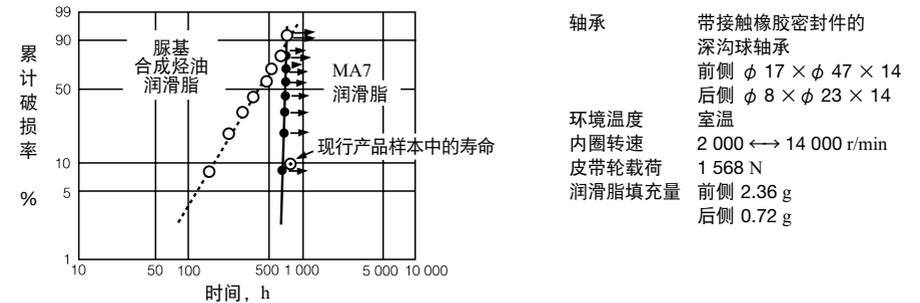


图 3 交流发电机在发动机试验下的轴承寿命

10 滚动轴承材料

10.1 各国滚动轴承专用钢材标准对照

滚动轴承列为重要的机械基础零部件,其尺寸系列已经实现国际标准化,其专用材料也已制定了ISO 683/17(热处理钢,合金钢及易切削钢/Part 17 球轴承及滚子轴承专用钢材)标准。不过,在各国标准体系之中,虽已将轴承专用材料纳入标准,却也不乏企业自行修订的情况。

近年以来,使用轴承的商品加快了国际化的步伐,有诸多场合需要将各国的钢材标准加以对照,为此,特举例有代表性的轴承钢材标准对照、差异及特点于后。

JIS G 4805	ASTM	其他主要国家标准
SUJ1 —	— 51100	— —
SUJ2 — — —	— A 295-89 52100 —	— — 100Cr6(DIN) 100C6(NF) 535A99(BS)
SUJ3 — —	— A 485-03 Grade1 A 485-03 Grade2	— — —
SUJ4	—	—
SUJ5 —	— A 485-03 Grade3	— —

注：※P ≤ 0.025, S ≤ 0.025

备注 ASTM：美国材料试验协会标准, DIN：德国标准,

JIS G 4052 G 4503	ASTM A 534-90	C
SCr420H —	— 5120H	0.17~0.23 0.17~0.23
SCM420H —	— 4118H	0.17~0.23 0.17~0.23
SNCM220H —	— 8620H	0.17~0.23 0.17~0.23
SNCM420H —	— 4320H	0.17~0.23 0.17~0.23
SNCM815 —	— 9310H	0.12~0.18 0.07~0.13

注※2：P ≤ 0.030, S ≤ 0.030

注※3：P ≤ 0.025, S ≤ 0.015

表 1 各国高碳铬轴承钢标准对照与化学成分

化学成分(%)						用途	备注
C	Si	Mn	Cr	Mo	其它		
0.95~1.10 0.98~1.10	0.15~0.35 0.15~0.35	≤ 0.50 0.25~0.45	0.90~1.20 0.90~1.15	— ≤ 0.10	※1 ※1	一般不大使用	标准范围稍有差异,但属同一钢种。
0.95~1.10 0.93~1.05 0.90~1.05	0.15~0.35 0.15~0.35 0.15~0.35	≤ 0.50 0.25~0.45 0.25~0.40	1.30~1.60 1.35~1.60 1.40~1.65	— ≤ 0.10 —	※1 P ≤ 0.025 S ≤ 0.015 —	轴承钢的代表性钢种,用于超小~中型轴承	标准范围稍有差异,但均属同一钢种。
0.95~1.10 —	0.15~0.35 —	0.20~0.40 —	1.35~1.60 —	≤ 0.08 —	P ≤ 0.030 S ≤ 0.025	—	—
0.95~1.10	0.10~0.35	0.40~0.70	1.20~1.60	—	※1	—	—
0.95~1.10 0.90~1.05	0.40~0.70 0.45~0.75	0.90~1.15 0.90~1.20	0.90~1.20 0.90~1.20	— ≤ 0.10	※1 P ≤ 0.025 S ≤ 0.015	大型轴承使用	SUJ3 与 Grade1 虽属同一钢种,但 Grade2 淬透性比 SUJ3 好。
0.85~1.00	0.50~0.80	1.40~0.70	1.40~1.80	≤ 0.10	P ≤ 0.025 S ≤ 0.015	—	—
0.95~1.10	0.15~0.35	≤ 0.50	1.30~1.60	0.10~0.25	※1	用量少	淬透性比 SUJ2 好。
0.95~1.10 0.95~1.10	0.40~0.70 0.15~0.35	0.90~1.15 0.65~0.90	0.90~1.20 1.10~1.50	0.10~0.25 0.20~0.30	※1 P ≤ 0.025 S ≤ 0.015	特大型轴承使用	Grade3 相当于 SUJ5,但 Grade3 的淬透性更好。

NF：法国标准, BS：英国标准

表 2 JIS, ASTM 渗碳轴承钢标准对照与化学成分

化学成分(%)						用途	备注
Si	Mn	Ni	Cr	Mo	其它		
0.15~0.35 0.15~0.35	0.55~0.95 0.60~1.00	0.25 以下 —	0.85~1.25 0.60~1.00	— —	※2 ※3	小型轴承用	属于类似钢种
0.15~0.35 0.15~0.35	0.55~0.95 0.60~1.00	0.25 以下 —	0.85~1.25 0.30~0.70	0.15~0.35 0.08~0.15	※2 ※3	小型轴承用	虽为类似钢种,但 4118H 淬透性比 SCM420H 差
0.15~0.35 0.15~0.35	0.60~0.95 0.60~0.95	0.35~0.75 0.35~0.75	0.35~0.65 0.35~0.65	0.15~0.30 0.15~0.25	※2 ※3	小型轴承用	标准范围稍有差异,但属同一钢种
0.15~0.35 0.15~0.35	0.40~0.70 0.40~0.70	1.55~2.00 1.55~2.00	0.35~0.65 0.35~0.65	0.15~0.30 0.20~0.30	※2 ※3	中型轴承用	标准范围稍有差异,但属同一钢种
0.15~0.35 0.15~0.35	0.30~0.60 0.40~0.70	4.00~4.50 2.95~3.55	0.70~1.00 1.00~1.45	0.15~0.30 0.08~0.15	※2 ※3	大型轴承用	属于类似钢种

10.2 长寿命轴承钢 (NSK-Z 钢)

众所周知，滚动轴承所用高碳铬轴承钢 (SUJ2、SAE52100) 的滚动疲劳寿命与非金属夹杂物密切相关。

非金属夹杂物大致分为硫化物类，氧化物类，氮化物类，经多年的寿命试验查明：氧化物类非金属夹杂物对滚动疲劳寿命危害最大。

图 1 表示氧化物类非金属夹杂物的物理参数，钢中含氧量与寿命的关系。

为降低氧化物类非金属夹杂物的含量，而尽可能控制钢中含氧量，并明显减少 Ti、S 等杂质的长寿命材料，它就是 Z 钢。

Z 钢是 NSK 凭借大量寿命试验数据，与钢厂联手改进炼钢设备、炼钢条件而取得的成果。

图 2 表示钢中含氧量的变化。

图 2 中的钢样寿命试验结果见图 3。随着钢中含氧量降低，寿命呈现延长趋势，优质 Z 钢的寿命达到传统脱气钢的 1.8 倍。

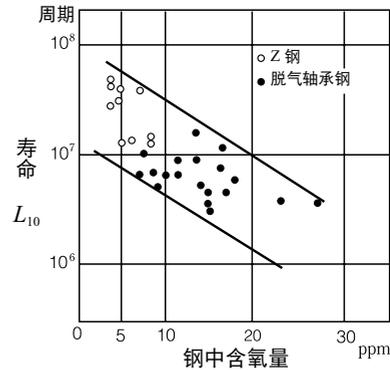
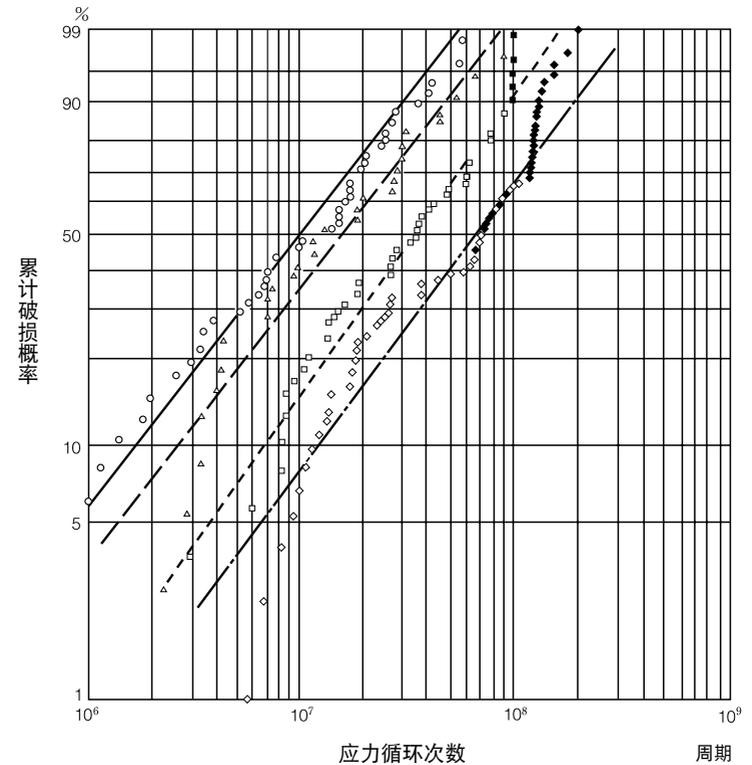


图 1 轴承钢中含氧量与寿命的关系



钢材分类	试验套数	破损套数	韦布尔斜率	L_{10}	L_{50}
○ 大气熔炼钢	44	44	1.02	1.67×10^6	1.06×10^7
△ 真空脱气钢	30	30	1.10	2.82×10^6	1.55×10^7
□ MGH 真空脱气钢	46	41	1.16	6.92×10^6	3.47×10^7
◇ Z 钢	70	39	1.11	1.26×10^7	6.89×10^7

备注 图表中■◆表示试验还在继续

图 3 轴承钢推力寿命试验结果

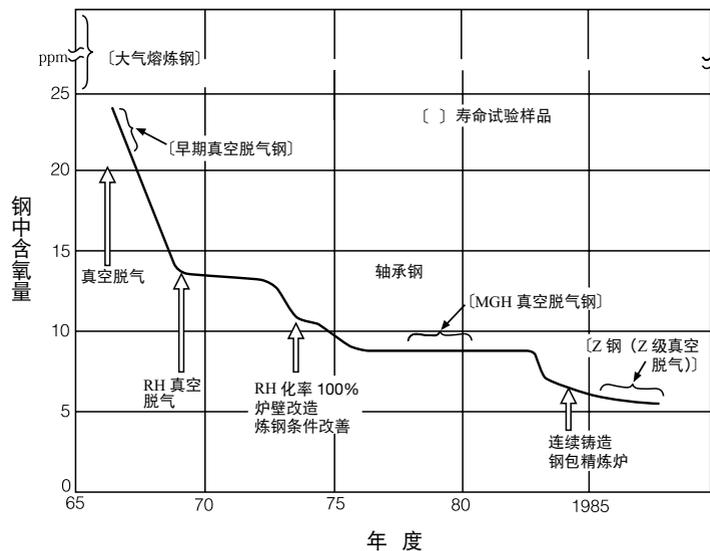


图 2 NSK 轴承钢中含氧量的变化

10.3 高温轴承专用材料

滚动轴承即使采取了耐高温措施，却还要受润滑剂的制约，其工作温度上限仅约 400 °C。不过，在限定耐久时间、转速、载荷等的前提下，也有高达 500 ~ 600 °C 事例。

高温轴承专用材料在其工作温度下，必须达到硬度、抗疲劳强度、组织变化及尺寸稳定性均能满足使用要求，保证硬度尤为重要。

通常使用的铁质高温材料，多为高速钢 SKH 4 及 Cr-Mo-V 钢 AISI M50。要求耐热耐蚀的，也使用 SUS 440C 马氏体不锈钢。

这些材料连同轴承钢 SUJ2 的化学成分列于表 1，其高温硬度如图 1 所示。

如果超过回火温度，轴承钢的高温硬度同样也会降低（见图 1）。常规回火（160 ~ 200 °C）的轴承，其工作温度上限约为 120 °C，采取高温回火（230 ~ 280 °C），在低载时，工作温度可达 200 °C 左右。

SKH 4 多用于 X 光管专用轴承，配用固体润滑剂，足以在 450 °C 的高温下工作。M50 主要用于飞机专用高温高速轴承，其工作温度上限约为 320 °C。

在要求高温硬度与耐腐蚀性时，对 SUS 440C 高温回火（470 ~ 480 °C），可以达到介于 SUJ2 与 M50 之间的硬度，故而，可以在 200 °C 的高温下工作。在 600 °C 以上的高温工况里，连高速钢也会硬度不足，因而，采用耐热镍基与钴基铬钨合金等材料。

在要求温度更高的用途中，近年来引人注目的高温耐蚀材料有精细陶瓷氮化硅（Si₃N₄），碳化硅（SiC）等等，目前尚有难加工、成本高等诸多缺点，但未来定会逐步得到推广。

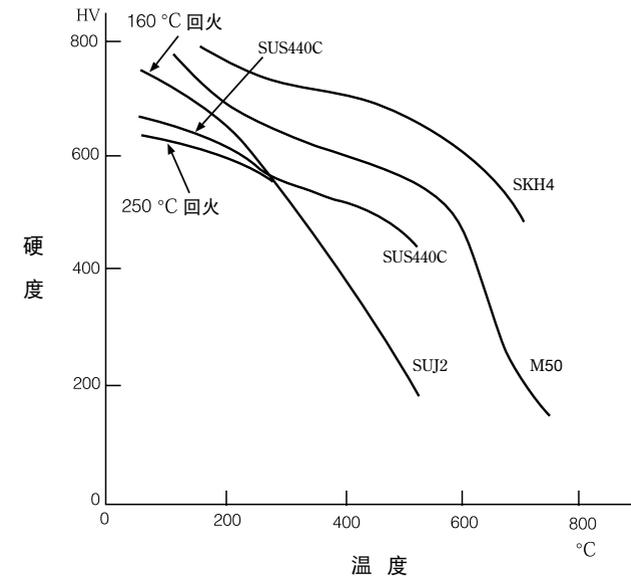


图 1 高温专用材料的高温硬度

钢种	化学成分 %	
	C	Si
SUJ2	1.02	0.25
SKH4	0.78	≤ 0.4
M50	0.81	≤ 0.25
SUS 440C	1.08	≤ 1.0

备注 无不等号的数字为中职。

表 1 高温轴承专用材料

化学成分 %							备注
Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Co	
≤ 0.5	—	1.45	—	—	—	—	通用 高温 专用 耐蚀高温专用
≤ 0.4	—	4.15	—	18.0	1.25	10.0	
≤ 0.35	≤ 0.10	4.0	4.25	≤ 0.25	1.0	≤ 0.25	
≤ 1.0	≤ 0.60	17.0	≤ 0.75	—	—	—	

10.4 轴承钢的尺寸稳定性

滚动轴承的尺寸在使用中发生时效变化，称为时效变形。时效变形会引起内圈膨胀，轴与内圈之间的过盈量减少，构成内圈滑移的诱因。

一旦轴与内圈发生相对滑动这种滑移现象加剧，轴承就会由发热升级为咬粘（俗称烧伤），对整机机器造成重大损伤。因此，有些运行工况也要求对轴承的时效变形采取充分对策。

轴承时效变形的原因，是热处理后，钢中残余奥氏体发生的时效性热解现象，随着相变的进行，轴承渐渐膨胀起来。

由于上述理由，轴承的尺寸稳定性与热处理时的回火温度和轴承工作温度的相对关系就出现了差异。回火温度越高，轴承的尺寸稳定性越好；而轴承的工作温度越高，残余奥氏体热解趋势越强。

图1是轴承温度对其尺寸稳定性的影响一例。图右以对轴径的百分比罗列了各公差段内的轴与内圈的过盈量。由图1可知，轴承温度升高，对尺寸稳定性明显不利。可以料想，在如此工况之下，常规轴承内圈与轴的过盈量会逐渐变小。所以，要使用经过尺寸稳定化处理的轴承，以防配合松动。

如上所述，由于轴承温度升高有可能造成内圈滑移，故而，在轴承选型时应当注意。最好事先与NSK商谈。

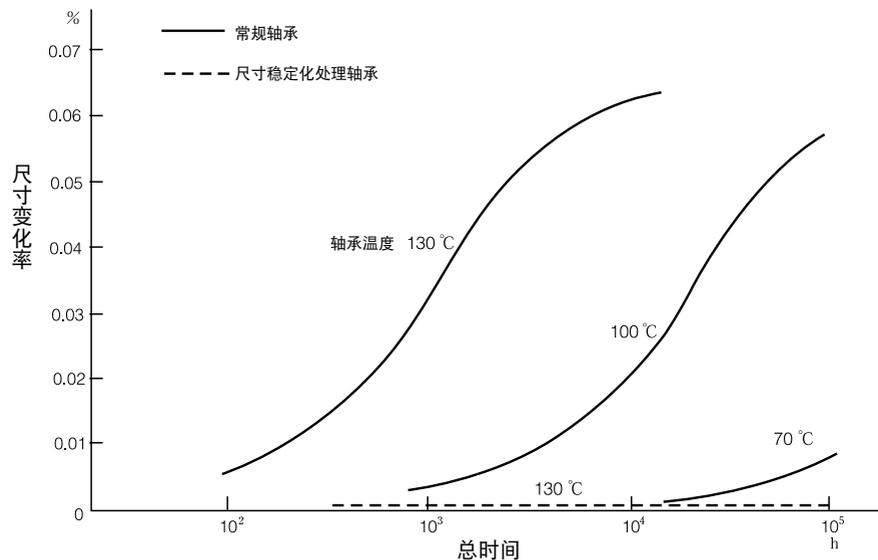
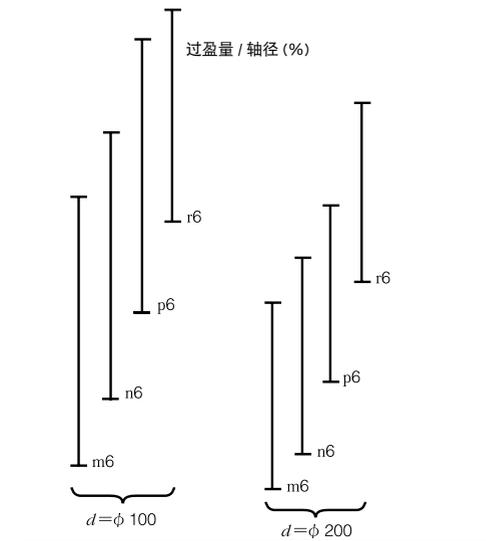


图1 轴承温度与尺寸变化率



10.5 滚动轴承、轴及轴承座材料的特点

滚动轴承必须抗重载、能高速并且经久耐用，而要充分发挥轴承性能，熟悉轴及轴承座的材料特性也很重要。

表 1 列举了代表性滚动轴承、轴及轴承座材料的物理、机械特性，以供参考。

用途	材料	热处理
轴承	SUJ2	淬火，回火
	SUJ2	球化退火
	SCr420	淬火，低温回火
	SAE4320 (SNCM420)	淬火，低温回火
	SNCM815	淬火，低温回火
	SUS440C	淬火，低温回火
	SPCC	退火
	S25C	退火
轴	CAC301 (HB _s C1)	—
	S45C	淬火，650°C 回火
	SCr430	淬火，520 ~ 620°C 急冷
	SCr440	淬火，520 ~ 620°C 急冷
	SCM420	淬火，150 ~ 200°C 风冷
	SNCM439	淬火，650°C 回火
	SC46	退火
	SUS420J2	1 038°C 油冷 400°C 风冷
轴承座	FC200	铸造
	FCD400	铸造
	A1100	退火
	AC4C	铸造
	ADC10	铸造
	SUS304	退火

表 1 滚动轴承轴及轴承座材料的物理、机械特性

密度 g/cm ³	比热 KJ/ (kg·K)	传热率 W/ (m·K)	电阻率 μΩ·cm	线膨胀 系数 (0~100°C) × 10 ⁻⁶ /°C	纵弹性模量 MPa {kgf/mm ² }	屈服强度 MPa {kgf/mm ² }	抗拉强度 MPa {kgf/mm ² }	伸长率 %	硬度 HB	备注			
7.83	0.47	46	22	12.5	208 000 {21 200}	1 370 {140}	1 570 ~ 1 960 {160 ~ 200}	到0.5	650 ~ 740	高碳铬轴承钢 2种			
7.86				11.9		420 {43}	647 {66}				27	180	
7.83				12.8		882 {90}	1 225 {125}				15	370	铬钢
				11.7		902 {92}	1 009 {103}				16	**293 ~ 375	镍铬钼钢
7.89				—		40	35				—	—	*1 080 {110} 以上
7.68	0.46	24	60	10.1	200 000 {20 400}	1 860 {190}	1 960 {200}	—	**580	马氏体不锈钢			
7.86	0.47	59	15	11.6	206 000 {21 000}	—	*275 {28} 以上	*32 以上	—	冷轧钢板			
	0.48	50	17	11.8		323 {33}	431 {44}		33	120	机械结构用碳钢		
8.5	0.38	123	6.2	19.1	103 000 {10 500}	—	431 {44} 以上	*20 以上	—	超强黄铜铸件			
7.83	0.48	47	18	12.8	207 000 {21 100}	440 {45}	735 {75}	25	217	机械结构用碳钢			
			22	—		*637 {65} 以上	*784 {80} 以上	*18 以上	*229 ~ 293	铬钼钢			
	45	23	12.5	—	*784 {80} 以上	*930 {95} 以上	*13 以上	*269 ~ 331	同上				
	0.47	48	21	12.8	—	*930 {95} 以上	*14 以上	*262 ~ 352	铬铜钢				
—	—	—	—	—	206 000 {21 000}	294 {30}	520 {53}	27	143	低碳铸钢			
7.75	0.46	22	55	—	200 000 {20 400}	1 440 {147}	1 650 {168}	10	400	马氏体不锈钢			
7.3	0.50	43	—	10.4	98 000 {10 000}	—	*200 {20} 以上	—	*到217	灰口铸铁			
7.0	0.48	20	—	11.7		*250 {26} 以上	*400 {41} 以上	*12 以上	*到201	球墨铸铁			
2.69	0.90	222	3.0	23.7	70 600 {7 200}	34 {3.5}	78 {8}	35	—	工业用纯铝			
2.68	0.88	151	4.2	21.5	72 000 {7 350}	88 {9}	167 {17}	7	—	砂型铸造用铝合金			
2.74	0.96	96	7.5	22.0	71 000 {7 240}	167 {17}	323 {33}	4	—	压铸用铝合金			
8.03	0.50	15	72	15.7 ~ 16.8	193 000 {19 700}	245 {25}	588 {60}	60	150	奥氏体不锈钢			

注 * JIS 标准值或参考值

** 通常以洛氏 C 标准硬度表示，为供比较，特换算为布氏硬度

备注 SUJ2、SCr420 的比例极限，分别为 833 MPa {85 kgf/mm²}、440 MPa {45 kgf/mm²}。

10.6 滚动轴承专用工程陶瓷材料

与金属材料相比，陶瓷具有耐腐蚀、耐热、抗磨损等方面的优势，但性脆这一缺点使其用途有了局限。然而，工程陶瓷克服了它的脆性，成为金属的替代材料，引起各界广泛关注。已在切削工具、阀门、喷嘴、隔热器材、工程构件等领域大量采用。

陶瓷轴承材料也令人耳目一新，氮化硅球角接触球轴承已用于机床主轴之中。而且，由于其发热低及机械刚度高的优点，还发挥了前所未有的功能。

主要工程陶瓷与金属（以轴承钢为代表）的各项特性比较，如表 1 所示。

与金属相比，轴承专用工程陶瓷具有下列优点

- 因其密度很低，故可以实现轻质、高速旋转；
- 因其硬度高、摩擦系数小，故而抗摩性能优异；
- 热膨胀系数小，尺寸稳定性好；
- 十分耐热，在高温下，强度少有降低；
- 耐腐蚀性能极其优异；
- 电绝缘性极佳；
- 属于非磁性材料。

目前，人们正积极研发应用这些特性的用途，诸如金属溶液中的旋转装置专用轴承，洁净室与半导体生产设备内的洁净工况专用免润滑轴承等等。

工程陶瓷包括氮化硅、碳化硅、氧化铝、部分稳定化氧化锆等诸多种类，各有所长。

在用作轴承材料之时，必须充分理解各种陶瓷材料的一应特性，挑选合乎使用要求的材料。

尽管尚有难加工、成本高的问题，但是通过材料设计、制造技术等不断改进，未来在高温、耐蚀工况，真空免润滑专用轴承等方面的应用将会长足发展。

轴承专用工程陶瓷所应具备的首要特性，就是在滚动疲劳寿命上的可靠性。陶瓷轴承大多用于高温高速工况，其损伤往往给外围设备、机械的性能造成重大的影响。因此，为了提高其在滚动寿命方面的可靠性，人们正在从原料粉末、烧结直至加工成品的全过程殚精竭虑，不懈研发。

材料	密度 g/cm ³	硬度 HV
氮化硅 (Si ₃ N ₄)	3.1 ~ 3.3	1 500 ~ 2 000
碳化硅 (SiC)	3.1 ~ 3.2	1 800 ~ 2 500
氧化铝 (Al ₂ O ₃)	3.6 ~ 3.9	1 900 ~ 2 700
部分稳定化 氧化锆 (ZrO ₂)	5.8 ~ 6.1	1 300 ~ 1 500
轴承钢	7.8	700

备注 表中为概略值。

表 1 主要工程陶瓷与金属材料（轴承钢）的特性

纵弹性模量 Gpa {×10 ⁴ kgf/mm ² }	抗弯强度 MPa {kgf/mm ² }	断裂韧性值 MPa · m ^{1/2}	热膨胀系数 × 10 ⁻⁶ /°C	冲击热阻 °C	热导率 W/(m · k) {cal/cm · s°C}	电阻率 Ω · cm
250 ~ 330 {2.5 ~ 3.3}	700 ~ 1 000 {70 ~ 100}	5.2 ~ 7.0	2.5 ~ 3.3	800 ~ 1 000	12 ~ 50 {0.03 ~ 0.12}	10 ¹³ ~ 10 ¹⁴
310 ~ 450 {3.1 ~ 4.5}	500 ~ 900 {50 ~ 90}	3.0 ~ 5.0	3.8 ~ 5.0	400 ~ 700	46 ~ 75 {0.11 ~ 0.18}	100 ~ 200
300 ~ 390 {3.0 ~ 3.9}	300 ~ 500 {30 ~ 50}	3.8 ~ 4.5	6.8 ~ 8.1	190 ~ 210	17 ~ 33 {0.04 ~ 0.08}	10 ¹⁴ ~ 10 ¹⁶
150 ~ 210 {1.5 ~ 2.1}	900 ~ 1 200 {90 ~ 120}	8.5 ~ 10.0	9.2 ~ 10.5	230 ~ 350	2 ~ 3 {0.005 ~ 0.008}	10 ¹⁰ ~ 10 ¹²
208 {2.1}	—	14 ~ 18	12.5	—	50 {0.12}	10 ⁻⁵

图 1 是 6 种原料、组织、成分等各不相同的 HIP（保护气加压烧结）氮化硅陶瓷球向心球轴承试验结果的韦布尔图表。该试验将直径 3/8 英寸的陶瓷球装入轴承钢内、外圈之间，依照表 2 的条件进行。

在图 1 中，X、Y 是 NSK 严格控制材料加工工艺研发的陶瓷球。在同样的条件下、内、外圈及球均为轴承钢的轴承理论计算寿命 (L_{10}) 为 263 小时，而 NSK 陶瓷球的寿命则达钢球的 8 倍以上。其他陶瓷球往往在短时间内就会发生剥落，偏差也非常大。

剥落的形态，全都呈现独特的疲劳状（见照片 1）。已经查明：大都以金属杂质、烧结催化剂析出及空洞引起的缺陷为主。

通常，工程陶瓷的强度如抗弯强度、硬度、 K_{IC} （断裂韧性值）等都是重要的特性指标。对于滚动寿命而言，除了这些强度特性以外，还要求原材料纯净度高，采用最佳烧结工艺，消除催化剂析出及空洞等缺陷。

因此，为了使工程陶瓷成为可靠性更高的轴承材料，就应从生产厂家的原料粉末到烧结的全过程都过细控制，一丝不苟。

表 2 试验条件

试验轴承	6206（陶瓷球 8 粒，塑料保持架）
支承轴承	6304
径向载荷	3 800 N{390 kgf}
接触面最大压力	2 800 MPa{290 kgf/mm ² }
转速	3 000 r/min
润滑	FBK 油 RO-68

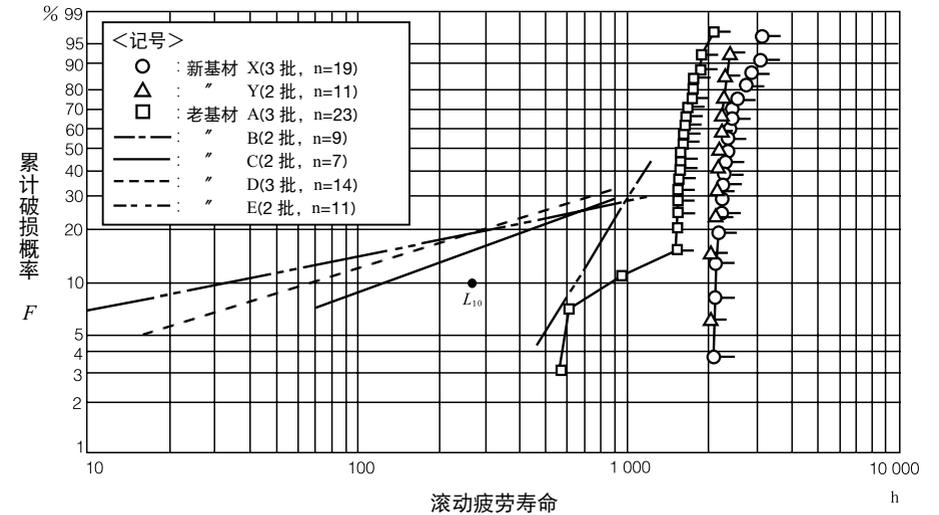
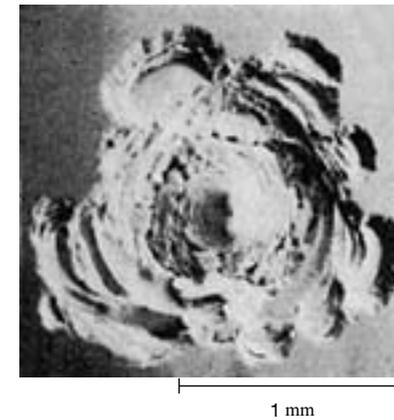


图 1 寿命评价结果韦布尔图表



照片 1 剥落外观

10.7 轴承材料中代表性聚合物的特点

基于质轻、易成形、耐蚀性强等优点，高分子材料广泛用作保持架等轴承零部件。高分子材料既有单独使用的，也有很多为满足轴承材料低摩擦、低磨损、不滑移、极限 PV 值高、不擦伤配合材料、机械性能、耐热性好等的要求而添加各种功能性填料，制成改性复合材料使用的。

表 1 列出了代表性聚合物的特性。

塑料	弹性率 (GPa) ⁽¹⁾
聚乙烯 HDPE UHMWPE	0.115 0.5
聚酰胺 尼龙 6 尼龙 66 尼龙 11	2.5 3.0 1.25
聚四氟乙烯 PTFE	0.40
聚丁烯对酞酸脂 PBT	2.7
聚缩醛 POM 同聚物 共聚物	3.2 2.9
聚醚砜 PES	2.46
聚砜 PSf	2.5
多芳基树脂 (芳香族多芳基树脂) 芳香族聚脂	1.3 3.0
聚苯基硫化物 PPS(GF40%)	4.2
聚醚醚酮 PEEK	1.7
聚间苯异酞 酰胺	10 (纤维) 7.7 (成形品)
聚丙烯苯六酞亚胺 (芳香族聚酞亚胺 PI) 芳香族聚酞亚胺	3 (薄膜) 2.5 ~ 3.2 (成形品)
聚酞亚二胺 PAI	4.7
聚醚亚二胺 (芳香族聚酞亚二胺) PI 聚胺顺丁烯二酸	3.6 —

表 1 代表性聚合物的特性

强度 (GPa) ⁽¹⁾	密度 g/cm ³	比弹性率 (× 10 ⁴ mm)	强力指数 (× 10 ⁴ mm)	熔点 (°C)	玻璃化转 变温度(°C)	承载挠曲 温度 ⁽²⁾ (°C)	连续使用 温度(°C)	备注
0.03 0.025	0.96 0.94	12.6 53.2	3.3 2.7	132 136	— 20 — 20	75/50 75/50	— —	滑移大，韧性大，易软化
0.07 0.08	1.13 1.14	221.2 263.2	6.2 7.0	215 264	50 60	150/57 180/60	80 ~ 120 80 ~ 120	吸水性强，韧性大
0.04	1.04	120.2	3.8	180	—	150/55	比尼龙 6、66 低	吸水性强
0.028	2.16	18.5	1.3	327	115	120/—	260	滑移大，可烧结，低摩擦，低凝结，惰性，290°C 仍稳定
0.06	1.31	206.1	4.6	225	30	230/215	155	
0.07 0.06	1.42 1.41	225.3 205.7	4.9 4.3	175 165	— 13 —	170/120 155/110	— 104	坚硬，韧性大，吸水性强
0.086	1.37	179.6	6.3	—	225	210/203	180	工作温度可达 200°C，化学性能稳定
0.07	1.24	201.6	5.6	—	190	181/175	150	
0.07 0.075	1.35 1.40	96.3 214.3	5.2 5.4	350 350	— —	293 293	300 260 ~ 300	惰性，坚硬，用作 PTFE 填料。到 320°C 稳定
0.14	1.64	256.1	8.5	275	94	> 260	220	360°C 发生热硬化
0.093	1.30	130.8	7.2	335	144	152	240	
0.7 0.18	1.38 1.33	724.6 579	50.7 13.5	375 415(分解)	> 230 > 230	280 280	220 220	耐燃，耐热纤维
0.17 0.1	1.43 1.43	203 203	7.0 7.0	热分解 热分解	417(分解) 417(分解)	360/250 360/250	300 ⁽³⁾ 260	到 350°C 在惰性气体中不起变化，供到 300°C 的高温轴承使用，可烧结，不熔化(成形品)
0.2	1.41	333.3	14.2	—	280	260	210	作为粘接剂，涂料工作温度可达 290°C，改进熔化成形性的聚酞亚胺
0.107 0.35	1.27 1.6	240.9 —	— 21.9	— —	215 —	210/200 330 ⁽³⁾	170 260	改进熔化成形性的聚酞亚胺

注 (1) $\text{GPa} \approx 10^4 \text{ kgf/cm}^2 = 10^2 \text{ kgf/mm}^2$

(2) 承载挠曲温度的数字 / 左侧的数字是 451 kPa 时之值，其余为 1.82 MPa 时之值。

(3) 为参考值。

10.8 保持架用尼龙材料的特点

近年来，各种滚动轴承大都采用塑料保持架代替金属保持架。塑料保持架的优点如下：

- (1) 由于质轻，适于高速旋转；
- (2) 有自润滑特性，且磨损少，不易产生磨屑，易保持轴承内部洁净；
- (3) 低噪声，适于宁静环境；
- (4) 耐蚀性好，不会生锈；
- (5) 抗冲击性强，经得起很大的力矩载荷；
- (6) 易于加工成复杂形状，为提高保持架性能而选型的自由度很大。

相反，塑料保持架与金属保持架相比，其耐热性差，适用温度范围有限（通常 $\leq 120^{\circ}\text{C}$ ）。而且，会受某些化学药剂侵蚀，使用时务必注意。

聚酰胺树脂在塑料保持架材料中非常具有代表性，尤其是尼龙 66 具备了高耐热性以及机械性能而被广泛的应用。聚酰胺树脂的特点是，分子链中含有能结合氢元素的酰胺键（ $-\text{NHCO}-$ ），其浓度与氢键的存在状态将左右材料的耐热性、各种机械特性及吸水性等。尼龙 66 具有很高的吸水性（见图 1）、会引起尺寸变化、降低刚度，被视为缺点。但是用作保持架材料，吸水能提高可挠性，对滚动体需要较大抱紧量的保持架，具有防止轴承装配时保持架破损的作用。而且，可以提高韧性，有助于吸收运行冲击，这可视为优点加以应用。

尼龙添加少量纤维就显著提高强度与耐热性，根据保持架的类型或用途采用玻璃纤维增强材料，但出于保证保持架在装配时的变型量考虑，大都采用玻璃纤维含量较少的材料（见表 1）。

由于尼龙 66 在柔性工况下显示极佳的性能，故而，作为塑料保持架的主要材料，用途十分广

泛。不过，在高温油中的苛刻工况下，往往会急剧老化变质，故而，使用时须谨慎。

表 2 以强度降至初始值 50 % 的时间列出了各类尼龙 66 在不同工况下的耐久性能。在油中的老化程度因油的种类而异，在含有极压添加剂的油中老化显著。已知硫类极压添加剂比磷类极压添加剂更易加速老化，而且，温度越高，老化越严重。

另外，在润滑脂及大气之中，材料老化比油中缓慢。

而且，在玻璃纤维增强材料中，玻璃纤维增强的效果抑制了材料老化引起的强度下降，延长了耐久时间。

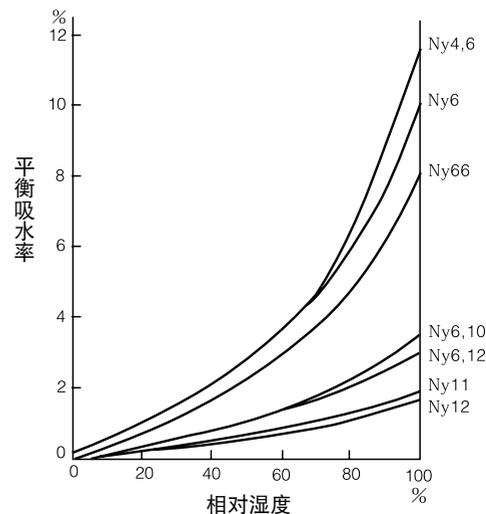


图 1 各种尼龙的平衡吸水率与相对湿度

表 1 纤维增强塑料保持架使用实例

分类	轴承类型	主要用途举例	保持架材料
球轴承	微型球轴承	VTR, IC 冷却风扇	尼龙 66 (玻璃纤维含量 0 ~ 10 %)
	深沟球轴承	交流发电机, 空调机风扇电机	
	角接触球轴承	电磁离合器, 汽车车轮	
滚子轴承	滚针轴承	汽车变速箱	尼龙 66 (玻璃纤维含量 10 ~ 25 %)
	圆锥滚子轴承	汽车车轮	
	ET 型圆柱滚子轴承 H 型调心滚子轴承	通用 通用	

表 2 尼龙 66 树脂的环境耐久性

环境	温度 (°C)	玻璃纤维含量	至物理指标降低一半的时间 (h)				备注
			500	1 000	1 500	2 000	
油中	齿轮油	— D	~500	~1000	~1500	~2000	含极压添加剂
		A D	~1000	~2000	~3000	~4000	
	合成润滑油	100 A	~1000	~2000	~3000	~4000	含极压添加剂
		120 A	~1000	~2000	~3000	~4000	
		130 A C	~500	~1000	~1500	~2000	
		150 B D	~200	~500	~1000	~1500	
	工作油	80 D	~1000	~2000	~3000	~4000	含极压添加剂
		120 D	~500	~1000	~1500	~2000	
		150 D	~200	~500	~1000	~1500	
	ATF 油	120 D	~1000	~2000	~3000	~4000	
		140 A D	~500	~1000	~1500	~2000	
	机油	120 D	~1000	~2000	~3000	~4000	
80 D		~1000	~2000	~3000	~4000		
润滑脂中	120 D	~1000	~2000	~3000	~4000		
	130 A D	~1000	~2000	~3000	~4000		
	160 A C	~1000	~2000	~3000	~4000		
大气中	180 D	~1000	~2000	~3000	~4000		
	160 A C	~1000	~2000	~3000	~4000		

玻璃纤维含量：A < B < C < D

10.9 保持架用耐热树脂材料

如今，聚酰胺树脂已在中度运行工况下显示出优异性能，且因价格较为低廉，而被大量用作保持架材料。不过，在 120 °C 以上连续工作以及长时间或者间歇接触含有极压添加剂的油类、酸类等药剂的条件下，则会出现时效老化，影响使用。

用于超过 150 °C 的高温环境之中或接触腐蚀性药剂等严酷工况的轴承保持架，必须使用超强工程塑料。它的耐热、抗药、高温刚度、机械强度等材料性能均优，但保持架要求的一些特性，诸如成形及装配时所需要的韧性、熔融接合部的强度、抗疲劳性等却还不足，而且价格过高。表 1 从用作保持架的可行性着眼，列出了可注塑成形的代表性超强工程塑料评价情况。

在表 1 中，支链 PPS 树脂现已广泛使用，但因韧性差、较脆弱，在成形时不能硬从模具中拉出，故而，保持架形状受到局限。而且，还有轴承装配过程中，保持架爪、过梁、环或凸缘等易折断的问题，不大适合于作保持架使用。

相反，NSK 研发的耐热塑料保持架是在聚合工序就已使分子链成直链升至高分子体，分子链实质上已不含支链或桥链，因而，韧性高于前者。这种直链 PPS 树脂具有优异的耐热、耐油、抗药性，且具有保持架所需的减震安全性及高温刚度等良好的机械特性。

NSK 还改进了直链 PPS 树脂脱模困难及结晶迟缓等缺点，保证了用作保持架的材料优势。

直链 L-PPS 树脂从性价比上看，堪称高温专用耐热保持架材料的佼佼者。

表 1 代表性超强工程塑料材料用作保持架的可行性

名称	聚醚 (PES)	聚醚亚二胺 (PEI)	聚酰亚二胺 (PAI)
分类	非晶体树脂	非晶体树脂	非晶体树脂
连续使用温度	180 °C	170 °C	210 °C
物理特性	<ul style="list-style-type: none"> • 韧性差 (要注意保持架形状设计) • 焊接强度低 • 抗疲劳性差 	<ul style="list-style-type: none"> • 韧性差 • 焊接强度低 • 抗疲劳性差 	<ul style="list-style-type: none"> • 非常脆弱，成形时不能硬从模具中拉出 • 性能可行性需要长时间特殊热处理 • 热处理后材料刚度高
环境适应性	<ul style="list-style-type: none"> • 有吸水性 (尺寸稳定性差) • 抗老化性良好 • 抗应力断裂性差 	<ul style="list-style-type: none"> • 抗老化性良好 • 抗应力断裂性差 	<ul style="list-style-type: none"> • 环境适用性良好
材料价格优势排序	3	2	5
用作保持架材料的可行性	<ul style="list-style-type: none"> • 性能方面问题较多 • 材料价格偏高 	<ul style="list-style-type: none"> • 性能方面问题较多 • 材料价格偏高 	<ul style="list-style-type: none"> • 性能良好 • 材料价格，成形价格较高 (供应特殊用途)

聚醚基醚酮 (PEEK)	支链聚苯基硫化物 (PPS)	直链聚苯基硫化物 (L-PPS)	名称
晶体树脂	晶体树脂	晶体树脂	分类
240 °C	220 °C	220 °C	连续使用温度
<ul style="list-style-type: none"> • 韧性，抗磨损性，抗疲劳性均优 • 焊接强度差 	<ul style="list-style-type: none"> • 机械特性好 • 韧性差 	<ul style="list-style-type: none"> • 机械特性好 • 韧性良好 • 尺寸稳定性良好 (无吸水性) 	物理特性
<ul style="list-style-type: none"> • 环境适应性良好 	<ul style="list-style-type: none"> • 环境适应性良好 	<ul style="list-style-type: none"> • 环境适应性良好 • 几乎所有药品均不侵蚀在添加 EP 剂的高温油中也不老化 	环境适应性
4	1	1	材料价格优势排序
<ul style="list-style-type: none"> • 性能很好 • 材料价格偏高 (供应特殊用途) 	<ul style="list-style-type: none"> • 韧性差 • 目前性价比比较差 	<ul style="list-style-type: none"> • 性价比良好 (可供常规用途) 	用作保持架材料的可行性