

国外高温轴承材料

新金属材料编辑部

1973.4 北京

轴承的应用由来已久，随着时代的发展，轴承的使用温度不断提高。高温轴承在国防和近代科学技术领域中占据了日益重要的地位，因此，高温轴承材料的发展已成为各先进工业国家十分重视的问题。

本着“洋为中用”和“批判地吸收外国文化”的目的，我们对有关国外高温轴承材料的文献作了一些调研和汇总，编辑成本专辑。这里主要介绍了高温轴承钢和高温轴承材料，以及有关生产工艺和高温轴承润滑方面的一些资料，本专辑还注意收集了有关提高轴承钢质量和延长轴承使用寿命方面的一些问题。可供从事有关轴承材料的研制、使用、设计等部门的工程技术人员和科学研究人员参考。

由于我们水平有限，难免有错误和不妥之处，尚希读者批评指正。本专辑承蒙本院六室秦森，刘德金等同志审阅。

冶金部钢铁研究院 一室

目 录

国外高温轴承材料	(1)
一、高温轴承的发展概况	(1)
(一) 飞机发动机轴承	(1)
(二) 在特殊环境中使用的轴承	(3)
(三) 气体轴承	(4)
(四) 轴承材料的新进展	(4)
二、高温轴承对材料性能的要求	(6)
(一) 高温硬度	(6)
(二) 热膨胀	(7)
(三) 尺寸稳定性	(9)
三、滚动轴承的寿命问题	(9)
(一) 滚动轴承的磨损	(10)
(二) 轴承材料的疲劳	(11)
四、高温轴承材料	(11)
(一) 高温轴承钢	(13)
(二) 影响高温轴承钢质量的一些问题	(21)
(三) 其它高温轴承材料	(25)
(四) 保持架材料	(35)
(五) 生产工艺	(44)
五、高温轴承的润滑	(55)
(一) 润滑油	(56)
(二) 固体润滑剂	(58)
(三) 自润滑复合材料	(64)
IIIX15钢粗大点状夹杂物的岩相学研究	(68)
铜轴承钢的疲劳性能	(70)

国外高温轴承材料

一、高温轴承的发展

概况 [1-8]

轴承在机器零件中占据着极其重要的地位,随着机械科学和工业技术的迅速发展,轴承的应用范围日益扩大,同时对轴承性能的要求不断提高,日益需要在高温、高速、高负荷等苛刻条件下工作的轴承。普通滚动轴承,在一般使用场合中的运转温度,即使外界气温升高也只不过是 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$,最高也不会超过 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$,如果运转温度再高则被看作是异常现象。并非在很久以前,曾经把能够在赤热温度下运转的滚动轴承,看作是一种十分珍奇的轴承。过去曾经利用冷却剂将轴承运转温度保持在普通轴承材料和润滑剂的安全使用范围以内。

近些年来,由于各种机器性能的迅速提高,普遍采取了《极限设计》方案,不断向高速化、小型化方向发展,因此对于轴承使用条件的要求日益严格, 100°C 左右的运转温度已成为很平常的事了。如今,在火箭、可返回飞行器、燃气轮机、核动力推进系统、高温输送器等装置中所用的轴承、密封以及齿轮等,都是在很高的温度下工作的。随着宇宙飞行器、喷气发动机、燃气轮机以及涡轮增压器等近代工程技术的迅速发展,轴承的工作温度业已超过了 300°C ,高温轴承可以说是近代科学技术中不可缺少的重要零件。

(一) 飞机发动机轴承^(1,2,7,8)

一般机器或电机上的轴承 DN 值 (D 是轴承内径,以毫米计, N 是转速,以转数/

分计) 大都在30万以下,特别高速的也很少超过100万,但现代喷气发动机主轴承的 DN 值均已超过了100万以上。1945年初期的 J42 发动机主轴承的 DN 值只有100万左右,当时人们认为这个数值已达最高峰。战后,随着航空工程技术的迅速进步,在航空发动机领域中不断提高发动功率(提高效率)、减小尺寸(提高紧凑性)、提高每单位重量的输出功率、提高转速(工作应力也随之增高),因此,发动机主轴承的 DN 值也在不断提高,六十年代广泛使用的 JT3D、JT8D 发动机轴承的 DN 值为 1.5×10^6 , JT9D 发动机轴承的 DN 值已增至 1.8×10^6 。

喷气发动机主轴承由于转速很高,以致轴承温度也显著增高。同时来自外界的热负荷也很大,所以更加提高了轴承温度。六十年代常用的 JT3D 发动机各主轴承在运转时,涡轮侧的轴承温度高达 200°C 以上。不但在运转时轴承温度高,在停止运转时特别是在涡轮侧的轴承则会受到涡轮等高温热源的影响,以致在停止运转时轴承将处于更高的温度下。因此,在轴承停止运转时润滑油有时可能因高温而变质和挥发,以致给下次起动造成困难。

目前新型飞机涡轮发动机轴承, DN 值已达 2×10^6 ,运转温度约为 218°C (425°F)。七十年代,涡轮发动机轴承的 DN 值将要求 3×10^6 左右,在八十年代以后涡轮发动机轴承将要求高达 4×10^6 的 DN 值,运转温度将超过 300°C (600°F)。

SST 喷气飞机用的发动机,由于因超声速所带来的冲压效应而使空气温度显著升高,给轴承和润滑油造成更大的热负荷。实验证明,马赫数为3时空气温度将超过

400°C，当然发动机表面也将处于该温度附近。表1列出了，随着飞机巡航速度的增高，飞机各部位的温度变化。

表1 飞机各部位的温度(°C)

巡航速度 马赫数	0.9	2.2	3
油槽温度	149	177	260
排油温度	199	288	330
密封空气温度	260	344	538
轴承温度	260	260	316

随着喷气发动机马赫数的增高，例如现用JT8D-1发动机马赫数为0.85、JTF17发动机的马赫数为2.7，压缩机空气入口温度自-26°C（马赫数为0.85的）增高到250°C（马赫数为2.7）。并且在超声速飞机上利用现用燃料油的热交换对于润滑油的冷却效果也有所降低，润滑油的入口温度由120°C也将增高到160°C。因此，可以设想在超声速飞机上涡轮侧的滚动轴承的温度将高达300°C左右。

随着轴承温度的升高，对于滚动轴承材料和润滑油的要求也更加严格。一般常用的高碳铬钢SAE52100，硬度随温度的升高而急剧降低，这种材料采取标准热处理之后的最高使用温度为120°C，采取特殊热处理后的最高使用温度也只有177°C，因此，必须采用适当的高温材料。

为了使轴承和润滑油的运转温度尽量减低，应当把轴承设计得使轴承和润滑油都不与高温气流相接触的结构是很重要的。例如JTF17发动机（马赫数2.7）的滚动轴承采用了碳质材料密封和三重曲路密封。在曲路密封的最末一段由风扇吹送冷空气流进行冷却，并尽量防止高温气体进入轴承室内。

在严格条件下运转的JT8D发动机与JTF17发动机的轴承温度和各部分的放热量比较数据如下：

JT8D 发动机 JTF17 发动机
(在起飞时) (在超声速飞行)

轴承外套圈最高 温度	210°C	245°C
总放热量 (千卡/分)	1008	1104
主轴承放热量	291	272
机械密封放热量	208	343
副机齿轮箱	127	247

从上述数据可以看出，轴承温度JT8D比JTF17低，但前者主轴承放热量反而较高，是因为前者的轴承数较多的缘故。JTF17机械密封的放热量很大，所以需要三重曲路密封用油进行充分冷却。由比较数据可知，总放热量JTF17只不过比JT8D增高了10%，而JTF17的总给油量也比JT8D少，所以JTF17被润滑油吸收的热量也较少。

马赫数为3的超声速飞机发动机，从温度上来看轴承材料和润滑油并没有特别重大的问题。七十年代设计的涡轮发动机要求在马赫数高达4的速度下运转，长期的研究目标将是在极高速度下运行并将达到高超声速（马赫数>5）领域。

轴承之中最适用于高速运转的是空气轴承和磁性轴承，目前的空气轴承的圆周速度已达250米/秒以上，磁性轴承在理论上可达材料被离心力破坏程度的圆周速度。但是空气轴承的负荷能力很小，而磁性轴承又需要附设电气设备，故体积太大，所以这两种轴承都只限于在各别场合中使用。

滚动轴承的转速极限，受两种主要因素限制：一个是润滑条件，也就是说轴承因过热粘附而受到的限制；另一个是材料强度，它取决于滚动体离心荷重所导致的轴承使用寿命的缩短和保持架的机械强度。在强度上的限制，可以采取某种方法加以突破，例如使用空心滚动体能够大幅度地减轻滚动体的离心荷重。实验证明，使用空心滚动体是防止高速滚动轴承滑动磨损最有效的方法。

(二) 在特殊环境中使用的轴承^[1,4,5,9]

1. 宇宙飞行器用轴承^[4, 9]

在宇宙飞行器中需要使用很多轴承,例如在宇宙飞船上有天线轴承、传感器轴承、动力传动装置轴承等等。所以,必须根据轴承所必要的机能和宇宙的特殊环境来研究轴承可能发生的特殊问题。

在导弹和宇宙空间研究以及一些控制设备用的滚动机构上,要求轴承在很宽的温度范围和特殊的环境介质中运转。一些导弹滚动元件,可能要求在很短时间以极高的可靠性在非常高的温度下运转,另一方面在宇宙飞行中导弹还必须在火箭燃料燃烧热的影响或以高速重返大气层时的大气摩擦热的影响下,能够有效地进行控制运转。在宇宙飞船上,有一些是连续运转的设备,有些是要求间歇运转的设备,还有些只是在起飞时和停飞时运转的设备。

宇宙飞船在火箭燃烧室周围容易被加热到很高的温度,另外在外部控制系统的轴承在加速减速时由于空气摩擦也会加热到很高温度,并且以再入大气层时所产生的高温是最麻烦的问题。再入大气层时减速程度非常大,同时与空气摩擦会使飞行体,特别是飞行体前面的温度显著升高。翼操纵面的轴承可能达到1000°C以上的高温。

飞行高度和大气温度之间有着密切的关系,高度在10公里以下的对流层以内时大约每升高一公里气温约下降6°C,至平流层以后温度约为-55°C,大致保持恒温。以后温度开始上升,至30公里高空约升至0°C,随后温度又下降,至80公里高空时降至-40~-100°C。超出100公里高空后,温度便急剧升高,高层大气圈温度将达1000°C以上。如所周知,温度是与气体分子运动能量成正比而升高的,在高层大气圈的气体分子密度很小,所以实际热能对于宇宙飞船的温升影响

很小。因此,问题并不在于周围的大气,而在于来自太阳的热辐射。只有采取适当的热屏蔽,才能够将太阳辐射热的影响减到很低的程度。

另外,在宇宙飞行器用轴承上还要考虑到极低温,例如发射宇宙飞船用的液体火箭,采用各种低温液化气体作为燃料和氧化剂,所以涡轮泵的轴承将于极低温运转;放射线的影响,因为在宇宙中存在着许多种放射线,对于轴承材料、特别是高分子材料、润滑油或脂都会造成损伤;超高真空的影响,高度在800公里时真空度即减至 10^{-10} 毫米汞柱,在行星空间则下降至 10^{-16} 毫米汞柱。通常在大气中所获得的摩擦数据,还受着大气润滑效果的影响,在超高真空中金属之间的摩擦将显著提高。D. Tabor曾在理论上解释了纯净金属之间在完全真空中由于摩擦系数无限增大而造成的摩擦烧伤。宇宙飞船上使用的轴承处于在地球上难以靠人工方法所造成的超高真空之中,在这种真空中还存在着润滑剂的高度蒸发损失问题,所以在超高真空中轴承的润滑问题是非常重要的。在真空中因为没有对流传热,只能依靠辐射传热来散热,所以轴承温度将比在空气中运转时高得多,会显著影响轴承的疲劳寿命,所以把轴承周围结构设计得尽量减低轴承的温度是十分重要的。

2. 在液体金属介质中工作的轴承^[1,4,5,10]

在核反应堆动力装置中,以及宇宙火箭和宇宙飞船的动力装置,特别是目前正在发展中的核能涡轮发动机,因为要求很高的热效率(输出功率对重量的比值)故广泛采用液体金属——钠、钾以及NaK低共熔合金等——作为高温传热的工作流体。装在液体金属系统中的泵和涡轮机上的轴承和密封装置,均需在液体金属介质或金属蒸汽气氛中进行工作。因为液体金属的化学活性很高,具有很强的腐蚀性和还原性,同时液体金属

还具有破坏金属表面保护膜的趋势。另外，在液体金属工作温度（200°C以上）范围内，轴承亦将处于这样高的运转温度，在这样的环境中使用润滑剂是不可能的，如果利用液体金属作润滑剂时又因为液体金属粘度太低，且系单原子物质（所有良好的润滑剂都是长链分子的物质），所以不能起到充分的润滑作用。因此，选择适合于在液体金属中工作的轴承材料，是一项十分复杂的问题。

J. W. Kissel 等人曾经研究了一些材料在液体钠中的化学效应，发现有一些金属及其氧化物能与钠或氧化钠起反应而生成钠-金属-氧化物的化合物，具有良好的润滑作用，例如钨、铬、钼等将与钠和氧发生反应而形成钠-金属-氧化物自动恢复润滑膜。W. H. Roberts 曾用钼、钨、铬、铁、镍在钠介质中作了试验，发现铬和钨在液体钠介质中于100~650°C温度范围内显示出良好的摩擦特性，钼在低于400°C时也具有良好的摩擦特性。因此，作为在液体金属中工作的轴承材料，宜采用含有W、Cr、Mo的合金。W. A. Glaeser^[5]指出在液体钠或NaK系统中，可以采用钴基合金、碳化钛、氮化处理的304不锈钢以及17-4PH不锈钢。

在宇宙飞船上使用的轴承，转速为20,000~50,000转/分、工作温度将超过500°C以上，而使用寿命要求高于10,000小时。所以目前正在研究使用滑动轴承，因为滑动轴承结构简单，随着速度的增高并不产生自磨重，同时滑动轴承比滚动轴承对高温耐蚀材料的选择余地大，而且耐久性也高。

（三）气体轴承^{〔11, 12〕}

在温度超过1000°F（538°C）的高温下工作的轴承，可以考虑使用过程流体进行润滑，在滚动机械上的轴承，日益增多地利用了气态和液态过程流体进行润滑。因为过程流体大都处于很高的温度下并且还可能具有

腐蚀性，所以对于轴承材料的要求相当严格。

为了制造气体轴承可以使用的材料很多，但应根据每一具体情况选择适宜的材料。过去对于气体轴承的研究主要集中在气体动力学方面，因为气体轴承的应用日益广泛，对适宜材料的选择已具有特别重要的意义。

通常对气体轴承材料的要求是：①容易制造；②相当高的强度；③轴承与轴具有近似的膨胀性质；④在长期使用过程中尺寸稳定性良好；⑤抗氧化性和耐蚀性良好；⑥具有良好的滑动适合性。

在气体轴承制造工艺中，对于具有优良摩擦特性的材料配合方面的要求日益提高，但往往产生与机械加工和热膨胀有关的一些问题。如果根据高温强度和易制造性选择适合的轴承材料，通过采用同样的材料制造轴、轴承和轴承箱，就可以解决热膨胀问题。这种办法显然比试图采用能够在颇大的温度范围内具有同样膨胀特性的不同材料要容易得多。利用适当的表面涂层，可以获得滑动相容性。因为轴承材料与过程气体往往发生表面反应，并且轴承材料还可能发生相变，所以保持材料的高温强度和尺寸稳定性是很重要的。

（四）轴承材料的新进展^{〔3, 5, 8, 13, 14—16, 24〕}

目前使用最广泛的轴承钢是高碳铬轴承钢，这种钢自从二十世纪初问世以来立即受到重视，1920年在轴承工业中即已把52100钢规定为标准轴承钢，与其相当的钢种有Hofors3或SKF3（瑞典）、LIX15（苏联）、SUJ2（日本）、100Cr6（西德）、ShKh15、En31（英国）等钢号很多。这种钢具有较高的延展性、强度和耐磨性，很多年来它的主要化学成分几乎没有改变，近年来已有采用改变其化学成分的改良型钢种的

趋势。

普通高碳铬钢的最高使用温度为204°C,而实际使用温度只能达到177°C,但若在这种钢中加入一定量的Mo元素(如TBS-600, TBS-1000)即可提高使用温度,添加一定量的Al(0.75~1.25%)并同时增加Si含量时(如MHT+Si),则在200°C具有良好的尺寸稳定性,在250°C仍具有很高的硬度和机械性能,其最高使用温度可提高到315°C,实际使用温度也可提高到250°C。在欧美一些国家使用的含Mo较高,并且调整了Si和Mn含量的钢种,适合于作可淬性高的轴承钢。近些年来,瑞典的哥尔特工业公司(Colt Industries Inc.)发展了一种高硅轴承钢——52CB(C0.85%, Mn0.35%, Si0.85%, Cr0.9%, Mo0.6%),它利用Si提高了钢的抗回火性,适合作为在250°C温度下工作的轴承材料,也是一种良好的高温渗碳钢。Timken公司研制成功的新钢种——TBS-9(C0.84~0.95%, Mn0.5~0.8%, Si0.2~0.35%, Cr0.25~0.4%, Mo0.05~1.0%)[22],在退火状态的性能比52100钢好,耐接触疲劳性能与52100钢相似,但可淬性更好。日本爱知制钢研究所^[21]根据左右轴承寿命的物理冶金因素所作的研究结果,研究成功含C量对轴承钢疲劳寿命最有利的中碳轴承钢《AUJ》,疲劳寿命大为提高。其中的AUJ-2(C0.7~0.85%, Si1.2~1.6%, Mn≤0.5%, Cr1.3~1.6%, S、P≤0.025%),具有颇高的抗回火软化性能,在250°C回火后仍保持HRC60左右的硬度。这些新钢种不但性能比52100钢优良,而且价格便宜,为轴承工业提供了丰富的材料资源。

为了试验可能适合高温轴承使用的一些材料,需要花费很大的人力物力。实际上,业已实验了大量高温材料的“轴承性能”。但是,因为试验时运行条件的范围很狭小,以致所得结果(摩擦和磨损特性等)在实际

运用时往往受到很大限制,因此,对于大量候选材料的试验和对于高温轴承材料的选择,随着使用温度的提高而愈加严格。

因为需要在很高温下使用的轴承材料,日益趋向于进行专供高温轴承使用的新材料的研制工作。在研制“自润滑”高温轴承材料方面所取得的一些进展,使得有可能消除有关固体润滑剂的选择和应用上的问题。在这方面努力的结果所取得的一些成绩包括有:材料自身含固体润滑剂量较高的强韧金属陶瓷;超级合金镀金,以提供耐氧化的软质金属润滑表面;给陶瓷材料添加一种能在高温下与介质起反应而形成保护性润滑表面膜的材料。

瑞典SKF的一些研究所,目前正在研究烧结钢轴承。初步试验证明,烧结钢轴承具有良好的耐疲劳性能。一旦能压制成功具有要求形状(尺寸合格)的轴承零件,即可采用烧结零件装配轴承。SKF的工程师们认为,压制成形的烧结轴承钢零件的造价,将比采用一般机械加工和磨削加工制造的零件便宜。

由可淬硬性合金钢(例如工具钢)基体和烧结碳化物结构所组成的材料,具有很高的表面硬度和耐磨性,并且具有与工具钢同样的可淬性。烧结材料可广泛用于宇航工业中。毫无疑问粉末冶金法,为获得特殊用途的“特制”材料性能提供了很有意义的途径。

在熔炼方面,随着熔炼技术的进步和真空脱气方法的采用,轴承钢质量获得了显著提高。由于轴承钢产量不断增长,熔炼设备正向大型化方向发展,目前已发展至采用LD转炉熔炼轴承钢,德国A.T.H.公司采用120吨LD转炉熔炼轴承钢,月产量已达5000吨。超高功率(U.H.P.)熔炼法和双联炉熔炼法均可进一步提高生产率。

苏联发明的电渣熔炼法熔炼的轴承钢,含非金属夹杂物量少而且很微细,很适合于

熔炼高级轴承钢。电渣熔炼法所用熔炼设备的构造与自耗电弧炉相似，但不需要在炉内造成真空，是利用合成炉渣覆盖于钢水上方进行熔炼。因为不需要真空设备，所以比自耗电弧熔炼法的建设费和运转费用都低，而且产品合格率也较高（高5%左右）。电渣重熔炉可在一定程度上大型化和大量生产，是很有发展前途的。西德Rheinstahl钢公司采用电渣重熔法生产了优质轴承钢，供制造高性能的大型轴承和精密轴承的钢材。日本山阳特殊制钢公司的实验证明，采用电渣重熔法生产的轴承钢，非金属夹杂物细小，所制成的轴承的滚动寿命较之自耗电弧炉钢轴承还高，其质量比得上电子束炉钢。

电子束炉熔炼的钢，比真空熔炼、甚至经过多次真空重熔的钢纯净得多。用电子束炉钢制造的轴承，滚动疲劳寿命大为提高。瑞典轴承钢公司（SKF）总经理Thomas W. Morrison认为，电子束炉钢只要进行工业生产，在生产成本上将可与自耗电弧炉钢相竞争。美国柏克力（加利福尼亚）Airco真空金属公司的一座连续铸造装置，每小时能生产5吨电子束熔炼的轴承钢，于1969年投入运行，其设计年产量为3万吨。熔炼温度为4460°C（8000°F）左右，真空度自50μ（熔炼时）至1μ（铸锭时）。

在铸锭方面，因为考虑到偏析问题，由于大型钢锭容易形成大块碳化物，所以钢锭不能过于大型化，但在容许范围以内正在逐渐加大钢锭尺寸。随着连续铸造技术的进步，快速凝固的连续铸锭法将有可能获得广泛应用，如果采取连续铸造能够高效率地生产轴承钢管材，将可提高产品的合格率，同时因为在成形时冷却速度高也会使偏析减少。

表面渗碳轴承钢，随着真空脱气处理和渗碳技术的进步，今后将得到进一步发展。目前常用的钢种以SAE4320、8620、9310为主，还有Bower315、TimkenCBS600和

Timken CBS1000等钢种，可以用作表面渗碳的高温轴承钢，它们的化学成分列于表10内。可以根据对其冷锻性、切削性、渗碳性以及热处理性质的要求，按用途对化学成分加以调整。近年来还研制了硼处理钢，以便代替一部分镍和铝等贵重合金元素。另外，形变热处理方法和马氏体转变压缩应力处理法（Marstressing），都能在很大程度上提高轴承的疲劳寿命，看来是有发展前途的。

二、高温轴承对材料性能的要求〔5〕

通常，对于高温轴承，大都根据一定的要求选择适宜的材料，专门为高温轴承研制的材料是很少的，以开发新高温材料为目的所获得的材料性能，并不一定符合高温轴承材料所要求的性能。因此，往往必须根据过去的经验选择适宜的材料。对于各种高温轴承材料的选择还不能规定出一种严格的标准，如果不充分注意到运行条件的重要性，在运用试验数据时就可能导致错误的结果。例如，一种在氧化性气氛中是适用于1000°F（538°C）的材料，而在惰性气氛中和同样温度下却可能造成严重的损伤。

轴承的类型不同，对于材料性能的要求也有所不同，轴承的类型可划分为滚动接触（滚珠轴承，滚柱轴承，滚针轴承，凸轮轴承）、滑动接触（轴颈轴承，轴封，滚动轴承的保持架，直线运动导槽，定位滑轨）、气体轴承、以及齿轮（齿轮具有滚动接触与滑动接触双重动作的特殊性）。对于每一种轴承所要求的材料的重要性能列于表2。

（一）高温硬度

在表2内所列出的高温硬度和尺寸稳定性，是选择高温轴承材料最常用的两个标准。高温硬度对于滚动轴承来说是一个特别

重要的性能，尺寸稳定性对于气体轴承来说是不容忽视的重要性能。滑动轴承则要求较高的热屈服强度，以便防止在接触粗糙面之间因塑性流变而造成粘附接触面扩大。对于陶瓷材料和金属陶瓷材料来说，导热率和抗热震性都是很重要的。

表 2 高温轴承材料所要求的性能

滚动接触	滑动接触	气体轴承
高温硬度>RC 50 尺寸稳定性,要求: 耐氧化 耐相变 耐残余应力 抗热震性良好 抗蠕变强度高	中等的高温硬 度耐过度氧化 或腐蚀 导热性良好 抗热震性高	非常高的尺寸 稳定性 能进行表面 精加工 气孔率最低 热胀系数低 弹性模数高

滚动轴承，多用于低摩擦、中等负载的场合，并且要求旋转轴准确定位。因为在滚珠（或滚柱）与套圈之间的接触应力很高，所以只有在运转温度下保持相当高的硬度才能准确定位。温度对于滚动轴承的负荷能力有显著影响，当温度超过每一材料所特有的温度限度后轴承的负荷能力即显著降低。图 1 示出了各种轴承材料的热硬度。

表 3 几种滚珠轴承材料的物理性能

材 料	物 理 性 能										材料的热处理
	硬度 HV		抗张强度 (公斤/毫米 ²)		抗压强度 (公斤/毫米 ²)		纵向弹性模数 (公斤/毫米 ²)		平均线胀系数 1/°C (温度范围)	比 重 (克/厘米 ³)	
	常温	400°C	常 温	400°C	常 温	400°C	常 温	400°C			
SAE 52100	772	—	160~200	—	—	—	2.1 × 10 ⁴	× 10 ⁴	× 10 ⁶	7.85	淬火材料
AISI 316	140	110	>52	50	>21	16	2.0	—	17.5 (0~500°C)	7.89	于1230°C热处理 后进行强制空冷
Hastelloy C	252	202	—	72	42	33	2.0	—	14.0 (21~649°C)	8.94	
Stellite 6	412	392	74	—	—	—	2.14	—	14.9 (50~600°C)	8.42	
Stellite D-6K	423	412	110	90	—	—	2.3	—	15.5 (0~1000°C)	8.40	热轧材料
Hynes 25	260	237	103	87	47	27	2.4	1.9	14.8 (21~649°C)	9.13	于1290°C热处理 后进行强制空冷

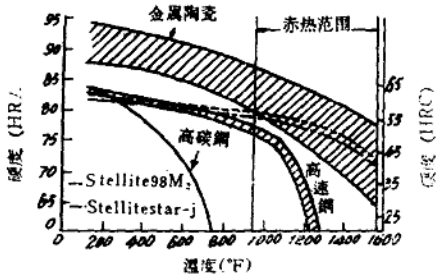


图 1 各种轴承材料的硬度随温度之变化

(二) 热 膨 胀

随着轴承运行温度的提高，轴承材料的热胀性能愈加重要，特别是对于滚动轴承和气体轴承来说更为重要。因为滚动轴承和气体轴承要求精密度高，所以滚动体和套圈或者轴颈和座套应该采用相同的材料制造。膨胀性质相似的材料，即使在膨胀系数上的微小差异，都可能导致在高温下运转时产生明显的变化。用于制造高温轴承元件的材料，准确地了解材料的热胀系数随温度的变化情况是非常必要的。滚动轴承和气体轴承均系低导热体，因此，即便采用同一材料也会产生温度梯度，轴承游隙将随温度而变，所以在设计轴承时必须留出一定的游隙余量。

续表 3 一些高温轴承材料的性能

材 料	线性热胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	高 温 硬 度	室 温 硬 度
M-2 工具钢	6.9 (75—900°F)	RC 57 (900°F)	RC 62
TZM 钼	3.0 (68—212°F)	RC 23 (1600°F)	RC 33
含 0.5 Ti 的 TZM	3.4 (68—1832°F)		
17—4 PH 不锈钢	6.5 (70—1000°F)	RC 36 (800°F)	RC 39
	6.6 (70—1500°F)		
Hastelloy C	7.0 (70—600°F)		RC 40
	7.4 (70—1000°F)		
	8.2 (70—1600°F)		
René 41	7.5 (70—1000°F)		RC 30 40
	8.5 (70—1500°F)		
	8.7 (70—1600°F)		
Inconel X	7.5 (70—600°F)	RA 56 (1000°F)	RC 28
	8.1 (70—1000°F)		
	9.3 (70—1600°F)		
Stellite 6	8.3 (32—932°F)	HB 100 (1600°F)	RC 40
	9.7 (32—1832°F)		
Stellite 19	7.7 (68—725°F)	RC 27 (1600°F)	RC 58
	8.2 (68—1292°F)		
Stellite Star J	6.8 (32—752°F)	HB 100 (1832°F)	RC 60
	7.1 (32—1112°F)		
	8.4 (32—1832°F)		
LT-1B (Al_2O_3 -Cr-Mo 金属陶瓷)	4.7 (77—1832°F)	在 1800°F 下的抗张极限 强度 16,800 磅/吋 ²	RC 50
KT 碳化硅	3.0 (80—2000°F)	在 2500°F 下的抗弯强度 20,000 磅/吋 ²	Knoop 2500
TiC	5.0 (200—1200°F)	RC 45 (1500°F)	RC 74
	5.2 (200—2000°F)		
α - Al_2O_3 (热压制品)	5.0 (70—1000°F)	RC 36 (2000°F)	RC 79
	5.0 (70—2500°F)		
ZrO ₂ (稳定化的)	2.6* (70—1000°F)		RC 55—60
	1.0 (70—2500°F)		

* 各文献的数据不统一。

表 3 内给出了几种滚珠轴承材料的物理性能及一些高温轴承材料的线性热膨胀系数,但这种热胀系数在各文献中报道不一,因为不同的测量和试样制备方法对测量数据都有一定的影响。所以在确定一定温度下的游隙时应当慎重运用这些数据,特别是设计紧配合的高精密度轴承(滚动轴承和气体轴

承)时更为重要。这些数据最好用于计算目的,在确定最终尺寸时应当进行严格的高温测量。

对于高温气体轴承来讲,需要选用热胀系数低而弹性模数高的耐氧化性材料,以便能够保持很严格的轴承游隙并且使变形程度减至最小。

(三) 尺寸稳定性^[18,20]

尺寸稳定性是轴承材料应当具备的重要特性。轴承钢经过淬火和回火之后，在钢组织中仍有少量残余奥氏体，这些残余奥氏体在轴承使用过程中将逐渐分解而产生体积变化，即引起时效变形。这种尺寸变化将因回火温度而异，并且随着使用温度的提高会促进残余奥氏体的分解以致引起更大的尺寸变化。

关于轴承钢在高温下使用时的尺寸稳定性问题，国际标准化机构 ISO 按运转温度不同规定了轴承尺寸的容许变化率。如表 4 所示，滚动轴承于 150°C 温度下运转 2500 小时，其尺寸变化率按 26 号标准不应超过 0.01%，按 27 号标准不得超过 0.015%。在 200~350°C 温度范围内运转 2500 小时后，按 28—31 号标准轴承尺寸变化率均不应超过 0.015%。但是表内所列数据，并不是在任何使用条件下都适用，应当特别注意有时候因使用条件而要求很严格的尺寸稳定性。

表 4 滚动轴承在高温下使用时的尺寸变化率容许值（按国际标准 ISO）

温 度 (°C)	时 间 (小时)	容许的尺寸 变化 (%)	标 准 号
150	2500	0.010	26
			27
200		0.015	28
250			29
300			30
350			31
(425)	(1500)	(0.015)	32

表 5 列出了几种高温轴承钢在不同温度下保持 1000 小时后的尺寸变化实验数据。图 2 示出了几种重要高温轴承钢的尺寸稳定性曲线。实验数据表明，MHT 轴承钢在低

于 200°C 的温度下具有十分良好的尺寸稳定性，但其尺寸稳定性随着使用温度（200°C 以上）的升高而显著恶化。M50 和 M2 高速钢在 400°C 以上的高温下，仍保持良好的尺寸稳定性。

表 5 尺寸稳定性试验数据

	在各温度下保持 1000 小时后的 尺寸变化 (10^{-6})			
	204°C	315°C	426°C	538°C
52100	+55	-742	-1030	—
MHT	+20	+20	-1502	—
M 50	+22	+12	+27	-50
T 5	+1	+27	+46	+270

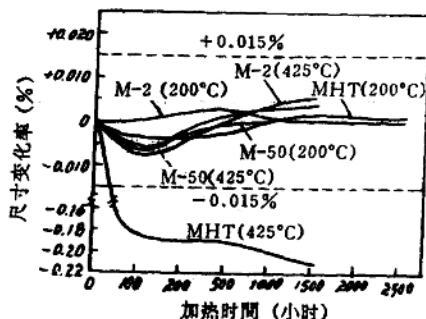


图 2 高温轴承钢的尺寸稳定性曲线

三、滚动轴承的寿命问题^[16,18,23,31]

滚动轴承，是由直接承受负荷的套圈和滚动体，以及将滚动体保持成相等间距的保持架等零件所构成。在这些零件之间，有进行滚动运动的部分也有进行滑动运动的部分，例如在轴承套圈的滚道与滚动体之间同时发生滑动和滚动运动；在轴承座圈凸边面与滚动体端面之间进行滑动运动；滚动体与保持架之间进行滑动运动；轴承环导向面与保持架之间进行滑动运动。

滚动接触部分，在其滚动面下方受到很高的交变剪应力，因此在轴承运转过程中，

一旦超过材料的耐疲劳性就会在滚动面上产生剥离，这种剥离现象即表示了轴承的滚动疲劳寿命。

在滑动接触部分，引起摩擦并产生磨损。随着磨损程度的增大，往往引起焊着粘连，或者导致保持架的破损，即便不发生这样严重的磨损，磨损了的轴承也会使得轴承运转精度恶化、震动增大、噪音增高，成为

轴承损伤的原因。

引起轴承损伤的原因很多，现将一些重要原因列于表6，该表虽然划分了轴承设计、材料、热处理、制造、安装、负荷、运转和维护几个方面，但往往是由于几种原因错综复杂的作用而引起轴承损坏。表7列出了为达到滚动轴承所具备的机能而对材料提出的要求。

表 6 影响轴承损坏的原因

设 计	材料和热处理	制 造	安 装	负 荷	运 转	维 护
滚动体个数	基体材料强度	研 磨	配 合	负荷方向	润滑方法	粘 度
滚动体直径	纯 度	精加工	安装误差	负荷大小	转 速	添加剂
套圈的壁厚	硬度差	残余应力	余 隙	负荷变化	介质温度	异 物
节圆直径	残余应力	表面光洁度	轴的刚性	停歇时间	转差率	水 分
保持架滚动体槽的半径	纤维组织取向	形状精确度	消震装置			
滚轴的长度	锻造比					

表 7 滚动轴承的机能及其对材料的要求

机 能	特 性	材料特性
耐高荷重	抗形变强度高	硬度高
能进行高速回转	摩擦和磨损小	耐磨强度高
回转性能好	回转精度高	显微组织不发生变化
具有互换性	尺寸精度高	
	尺寸稳定性良好	
能够长期使用	具有耐久性	疲劳强度高

随着现代科学技术的迅速进步，特别是航空工业和宇宙开发事业的迅速发展，对于滚动轴承精度的要求也愈加严格，同时要求轴承在高负荷和高转速下摩擦轻微、不增高疲劳损伤、磨损、发热咬住以及噪音等，在这样的基础上谋求延长轴承的使用寿命，乃是一项极其重要的问题。

（一）滚动轴承的磨损

滚动轴承是利用内外套圈和滚动体进行滚动接触的机构，应当设计得使摩擦阻力小

和尽量减少滑动运动。滚动轴承的磨损原因在于：滚动轴承内部在（1）套圈和滚动体滚动面的滑动；（2）滚动体与保持架接触面上的滑动；（3）套圈凸边和滚动体端面上的滑动；（4）套圈和保持架导向面上的滑动等许多滑动运动作用下而引起的。

在套圈和滚动体滚动面上的磨损，带来正圆度的降低、滚动体相互之间的尺寸差增大、加工表面光洁度恶化，从而引起轴承震动、噪音增强、回转精度降低，对疲劳寿命也造成很坏的影响。套圈凸边和滚动体端面的磨损，对于轴承回转精度、滚动体导向以及内部间隙都会造成恶劣影响。

保持架，如果使用硬质材料制成，则将滚动体磨伤而影响轴承回转精度，因此一般多用硬度较低而耐磨性优良的材料制造。保持架磨损时，则对滚动体导向、轴承震动和噪音等都会造成不良影响。

磨损程度，受着相对滑动速度、负荷的方向和大小、转速等项使用条件的 影响 很大，但在实际运转当中，最重要的应该是注意采取不让异物（特别是硬度高于或等于轴

承材料的异物) 侵入润滑剂中去的密封装置或润滑油过滤装置, 同时在轴承的滚动接触部分和滑动接触部分, 应该采取能够经常保持或供给润滑剂的润滑方法。因此, 选择适合于轴承运转条件的润滑方法也是很重要的。

(二) 轴承材料的疲劳

轴承材料的疲劳是表示轴承寿命的明显特征之一, 轴承的疲劳寿命又取决于材料性能、转速、荷重、接触部位的滑动、接触状况、温度、润滑等很多因素。疲劳现象, 通常是以发生剥离作为初始特征, 剥离的深度位于最大剪应力区域, 剥离宽度位于滚动体的接触面以内。

滚动轴承在很高的荷重下运转时, 经过某一时期后若突然发出噪音或震动增强, 即说明轴承的套圈或滚动体表面可能产生了剥离。产生剥离的原因在于: 当滚动体在滚道面上滚动时, 在接近并平行于滚动面的套圈和滚动体内部, 由于交变剪应力振幅的作用使得滚道面下方出现微裂纹, 这种微裂纹的进一步扩大而形成剥离, 即产生疲劳破坏。这种滚动疲劳机理, 是以赫芝 (Hertz) 弹性接触理论为基础而发展起来的, 并经过 Lundberg 和 Palmgren 等人的专门研究, 目前已成为最普通的滚动轴承疲劳机理。

疲劳寿命的波动很大, 即便是同一批轴承在同样条件下试验时寿命最长的和寿命最短的, 甚至相差几十倍也并不稀奇。导致轴承疲劳损坏的原因甚多 (如表 4 所示), 但其中的材料和热处理, 显然是影响轴承寿命的最重要的因素。特别是材料的非金属夹杂物和基体强度对于轴承寿命影响极为显著。为了提高材料的疲劳强度, 必须减少缺陷和使材料具有良好的机械强度。在长期使用过程中不会由于组织变化和蠕变而发生尺寸变化都是很重要的。

在轴承钢滚动疲劳破坏方面, 在表面下最大剪应力起作用的部位, 将发生回火状组

织变化和塑性形变状组织变化。

回火状组织变化, 是由于反复剪应力引起的内部应变能转变为热能, 使得马氏体回火而分解成为铁素体和微细碳化物组织, 当然在高温下比在常温更容易发生回火状组织变化, 疲劳龟裂将从发生这种组织变化的部位产生。

塑性形变状组织变化, 是白色的难腐蚀组织, 大都在非金属夹杂物附近出现, 特别是在夹杂物两侧出现的这种组织形似蝴蝶, 故被称之为《蝴蝶》。这种组织变化部分的周围经常有微小龟裂形成。

因此, 材料的显微龟裂和非金属夹杂物, 以及不规则碳化物等, 对于疲劳性能都有重大影响。

目前有很多非破坏性检验方法, 适用于检查夹杂物和材料表面层下的缺陷。例如利用电磁波、超声波、机械滞后现象、涡电流、导磁率等检验方法。特别是超声波检查法, 对于检查表面层下的缺陷颇为灵敏, 是检验轴承质量的很有效的方法。

四、高温轴承材料

根据高温轴承对材料所提出的要求, 可从下列材料中选择出适宜的轴承材料: 高温轴承钢, 高合金材料, 难熔金属, 金属陶瓷, 陶瓷材料, 粘结碳化物以及石墨。图 3

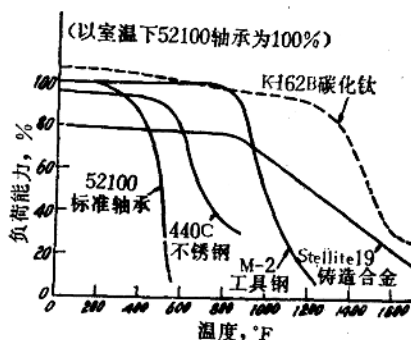


图 3 几种重要轴承材料在高温下的动态负载能力

表 8 主要高温轴承钢的化学成分和使用温度

钢 号	最高使用温度	化 学 成 分 (重 量 %)									
		C	Mn	Si	Cr	V	Mo	W	Ni	Co	其 它
SAE 52100	177°C	0.95~1.10	<0.50	0.15~0.35	1.3~1.6						≤0.025
MHT	260°C	0.95~1.10	0.25~0.45	0.25~0.55	1.3~1.6						≤0.025
TBS-600	316°C	0.95~1.10	0.6~0.8	0.85~1.20	1.25~1.65						≤0.030
Halmo	316°C	0.60	0.30	1.0	5.0	0.65	0.25~0.35				≤0.030
VSM	540°C	0.70	0.50	1.0	3.0		5.25				≤0.030
M 1	482°C	0.75~0.85	0.2~0.4	0.2~0.4	3.75~4.50	0.90~1.30	7.75~9.25	1.15~1.85	2.8		≤0.030
M 2	482°C	0.78~0.88	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	1.60~2.20	4.50~5.50	5.50~6.75			≤0.030
M 3	482°C	1.00~1.25	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	2.25~3.25	4.75~6.25	5.50~6.75			≤0.030
M 4	482°C	1.25~1.40	0.20~0.40	0.20~0.40	4.00~4.75	3.90~4.50	4.50~5.50	5.25~6.50			≤0.030
M 10	427°C	0.85	0.30	0.30	4.00	2.00	8.00				≤0.030
M 50	316°C	0.75~0.85	<0.40	<0.35	3.75~4.25	0.90~1.10	4.00~4.50				≤0.030
ГОСТ ЭИ-161		0.55~0.65	0.30~0.60	0.30~0.60	6.5~7.50	<0.30	0.25~0.35	6.5~7.50	<0.3		≤0.030
ГОСТ ЭИ-944		0.70~0.80	<0.4	0.20~0.40	4.40~5.00	0.70~1.00	0.40~0.60	4.00~5.00			<0.03
ГОСТ P 9		0.85~0.95	<0.4	<0.40	3.80~4.40	2.00~2.60	<0.30	8.50~10.00	<0.4		<0.03
ГОСТ P 18	540°C	0.70~0.80	<0.4	<0.40	3.80~4.40	1.00~1.40	<0.30	17.5~19.00	<0.4		<0.03
ГОСТ ЭИ-347		0.70~0.80	<0.25	<0.25	4.00~4.60	1.30~1.70		8.50~10.00			<0.03
ГОСТ P 18 K10	600°C	0.65~0.77	<0.35	<0.40	3.60~4.50	1.00~1.40	0.3~0.6	17.00~18.50	<0.49	5.0~10.50	<0.03
T 1	427°C	0.65~0.75	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	0.90~1.30		17.25~18.75			<0.03
T 5	540°C	0.75~0.85	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	1.80~2.40	0.70~1.00	17.50~19.00			<0.03
T 15	540°C	1.50	0.30	0.30	4.10	5.00		12.00			<0.03
WB 49	540°C	1.09	0.30	0.30	4.20	1.90	3.70	6.70			<0.03
440C	149°C	0.95~1.20	<1.00	<1.00	16.0~18.0	<0.15	<0.75				<0.03
14-4	480°C	0.95~1.20	<1.00	<1.00	13.0~16.0	<0.15	3.75~4.25				0.006
AL-129	480°C	0.70	0.30	1.00	12.0		5.25				
BG 42	480°C	1.15	0.30	0.30	14.5	2.00	4.00				
WD 65	540°C	1.10~1.15	<0.15	<0.15	14.0~16.0	2.50~3.00	3.75~4.25	2.00~2.50	5.00~5.50		
NM 100	540°C	1.25			17.5			10.50	9.50		

示出了几种重要轴承材料在高温下的动态负荷能力。

高温轴承材料的选择，取决于轴承的最高运转温度，可想而知，随着轴承最高运行温度的提高，可以选用的材料也愈益减少。表 8 给出了一些常用的高温轴承材料及其工作温度极限，是以材料在氧化环境中的性能为根据的。在氧化环境中工作的高温轴承也可以采用保护涂层。特别是钼基合金和铌基合金可以在相当高的温度下使用。从强度观点来看，石墨可以在3000°F (1649°C) 附近温度的惰性气氛中使用。

除耐氧化性能以外，热抗张屈服强度、高温硬度以及热抗弯强度都可能是最重要的性能。高温材料的屈服强度，大都随着温度的升高而降低，并且当温度超过某一临界温度时强度即急剧降低。图 4 示出了几种高温

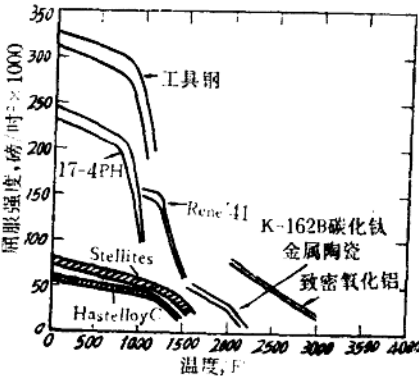


图 4 几种重要的高温轴承材料的屈服强度随温度升高而降低的特性

轴承材料的屈服强度随温度升高而降低的特性曲线，表明了这些高温轴承材料的使用温度极限。这种强度降落特性，对于滚动轴承来说是很重要的；对于滑动轴承来说，会增加未润滑表面的粘附和磨伤以及保护性润滑表面膜破裂的可能性，也是决定轴承寿命的重要因素。

（一）高温轴承钢

随着机械科学、特别是宇航事业的迅速发展，高温轴承钢也获得了重大进展。表 8 列出了主要高温轴承钢的使用温度和化学成分，表 9 给出了几种常用高温轴承钢的机械性能。

表 9 高温轴承钢的机械性能

钢 种	试验温度 °C	抗张强度 公斤/毫米 ²	拉 伸 屈服点 公斤/毫米 ²	压 缩 屈服点 公斤/毫米 ²	疲劳强度(10 ⁷) 公斤/毫米 ²
52100	室温	239	169	281	91
	177	239	183	204	67
Halmo	室温	260	218	288	98
	260	235	218	239	77
M-1	室温	260	218	295	91
	260	245	210	250	77
M-50	室温	260	207	239	88
	260	235	210	239	70

滚动轴承元件一般可容许的最低硬度为 RC 58，硬度若低于此值时，轴承套圈就可能产生压痕。轴承的使用寿命，取决于材料的耐磨性和疲劳强度，并且均与材料的硬度有密切关系。几乎所有材料的硬度都随着温度的升高而降低，图 5 和图 6 示出了几种重要高温轴承钢的硬度随温度而变化的情况。

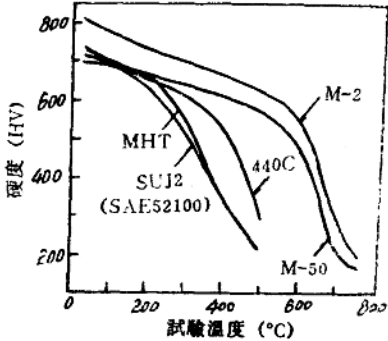


图 5 轴承钢的硬度随温度升高的变化

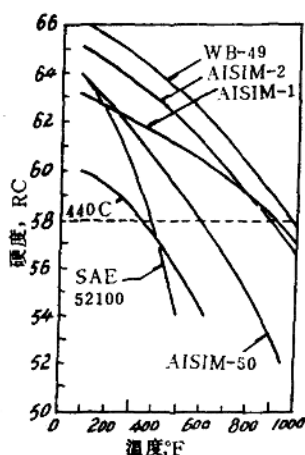


图 6 几种重要高温轴承钢的热硬度

1. 高碳铬轴承钢

最常用的高碳铬轴承钢是 SAE52100，它具有相当高的延展性、强度和耐磨性。作为轴承钢一般是在非真空电炉中熔炼的，需要严格控制熔炼过程方可获得纯净度很高的钢。这种钢若采取真空脱气能显著提高轴承寿命，估计这种钢的使用量今后将不断增高。

根据使用经验证明，轴承钢的硬度最好在 RC60 以上。为了提高轴承钢的使用温度，可以在比标准回火温度较高的温度下热处理，因为一般淬火钢的稳定使用温度极限，大都比其回火温度低 30~40°C。例如，在造纸机械中可以利用高温回火制造干燥机和研光机上所用的鼓形滚柱轴承（工作温度范围为 150~230°C）。但是高温回火处理只限于某些特殊场合中使用，并不能普遍采用。

普通高碳铬轴承钢的标准回火温度为 150~180°C，如果在高于 120°C 的温度下长期使用就会逐渐丧失其硬度和尺寸稳定性，如果采取高温回火处理来提高其组织稳定性，其最高使用温度极限仍然只有 204°C，而且在实际使用时尚不宜超过 177°C。为了研制适合于较高温度下使用的轴承钢曾经付出了很大代价，发现往轴承钢中添加 Mo、W、Cr、V 之类的合金元素都能提高轴承

钢的高温硬度，Al 和 Si 也能在较高温度下保持轴承钢的硬度。美国利用往高碳铬钢中添加 1% 左右的 Al，研制成功的 MHT 钢，最高使用温度可达 260°C。Colt Industries Inc. 公司发展的 52CB (C0.85%，Mn 0.35%，Si0.85%，Cr0.9%，Mo0.6%)，是利用 Si 的抗回火性的高硅轴承钢，适合作中高温轴承钢，是十分有价值的材料。在高碳铬轴承钢中添加少量 Mo，研制成功的 TBS-600、TBS-1000，最高使用温度已提高到 300°C 以上，实际使用温度可以达到 260°C。

高碳铬轴承钢，可以使用硬质合金车刀进行切削加工，但若使用高速钢车刀进行切削加工是有困难的。利用退火方法使球状碳化物粗粒化，可在一定程度上改善其切削性，但有一定限度。如果要求更高的切削性，则需要添加 S、Se 和 Te 等易切削元素，制成易切削轴承钢。最近，很多国家研究证明，轴承钢含一些硫化物不但无害反而会提高轴承的滚动寿命，估计易切削轴承钢不久将获得实用。

2. 工具钢 [5, 6, 12, 18, 20, 21, 26, 27]

因为燃气轮机和喷气式航空发动机等主轴轴承都在颇高的温度下运转，高碳铬轴承钢已不能满足这方面的要求。鉴于高速钢具有良好的高温硬度和疲劳强度，所以作为高温轴承材料获得了广泛应用。

高速钢大致可分为钨系和钼系两大类，由于各国原料资源和国情之不同而采用的高速工具钢的类型也有所不同，像苏、英、法、捷等国多用钨系，且以 18-4-1 型高速钢（相当于苏联 ГОСТ 钢号 P18，美国 AISI 钢号 T1）应用最广，美国和日本则广泛使用钼系，尤以 M2 和 M50 应用最广。表 8 列出了一些高温轴承钢的化学成分和使用温度。

钨系高速钢具有颇高的耐高温硬度，并且随着 Co 含量的增高而趋于进一步提高，因