

# 国内外轴承及轴承钢研发现状与发展趋势

钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院 曹文全

**摘要：**目前中国国产关键轴承与日本、欧美等先进国家相比，在使用寿命、可靠性、Dn 值与承载能力等方面存在较大差距。轴承服役性能涉及到材料、加工、制造及应用等多个环节，其中原材料冶金质量与热处理技术应用直接影响到轴承性能。本文对国内外轴承钢发展现状、国内外差距及其未来发展趋势和应用进行了综述，期望得到国内轴承钢及轴承制造同仁的重视，促进我国高端轴承钢及轴承的国产化。文章最后指出，鉴于我国高端轴承严重依赖进口的局面，一方面需要进行高碳轴承钢、新型中碳轴承钢和特殊性能轴承钢的基础理论与关键共性技术研究，以提升我国传统轴承钢质量性能和研发新型合金化与微合金化技术，形成高可靠长寿命轴承钢的稳定化核心控制技术；另一方面需要开展先进热处理技术对轴承性能影响的研究，形成大幅提升轴承寿命的新型热处理技术，推动我国高端装备用高可靠长寿命轴承的创新发展。

## 一、背景与需求

目前中国轴承已形成行业销售额达 2000 多亿元的经济规模，而且以每年 12%~15% 的速度增长，但国产轴承主要为中低端轴承和小中型轴承，与国外高端轴承和大型轴承等高附加值轴承相比存在较大差距，表现为低端过剩和高端缺乏<sup>[1]</sup>，无法满足中国高端装备国产化的需求。航发轴承：发动机主轴轴承、起落架轮毂轴承、螺旋桨轴承、操纵系统轴承、陀螺仪轴承；铁路轴承：160Km/h 以上铁路客车和城市轨道交通轴承全部进口，重载货车轴承用价格昂贵电渣钢，产值占 3.7%。作为准高速铁路客车和高速铁路客车最为关键的部件之一的专用配套轮对轴承，全部需要从国外进口，严重制约了国内高速铁路客车产业的健康和持续发展<sup>[2]</sup>；汽车轴承：占我国轴承总量 1/3，按每车 50 套轴承、2400 万辆需要 30-40 亿套。但高端汽车用轴承全部进口。比如国外汽车变速箱轴承使用寿命最低 50 万 km，而国内同类轴承寿命约 10 万 km，且可靠性、稳定性差<sup>[3]</sup>；机床轴承：机床是加工业之母，分为机械轴主轴轴

承和电机轴主轴轴承。目前我国普通机床用主轴轴承的  $Dn$  值在  $0.5 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{rpm}$ ，基本实现国产化，但寿命偏低；国外高速精密机床主轴轴承高速性能指数  $Dn$  值可达到  $4 \times 10^6 \text{ rpm}$ ，而中国同类产品  $Dn$  值最高不超过  $1.5 \times 10^6 \text{ rpm}$ <sup>[5]</sup>；轧机轴承：以 2250 线热轧线轧机轴承为例，国内轧机轴承可靠度仅 90%，轧制量为 300 万吨，进口可靠度 99%，轧制量 550 万吨；风电轴承：风电装机容量从 2012 年约 75GW 提高 2020 年 200GW，我国是世界上风电装机总量和年装机量第一大国。风电用轴承的使用寿命要求达到 20 年，国内目前依然没有能力提供 3MW 以上风电机组的增速器轴承和主轴轴承<sup>[4]</sup>。高速铁路用轴承：目前国内高铁轴承全部依靠进口。欧日各占约 50%，制约了我国高铁技术的发展。航发轴承：航空发动机用轴齿国内军机已经发展到第五代，但航空发动机用第二、三代轴承齿轮钢全部进口。作为航空发动机的关键基础零部件，国外正在研发推力比为 15-20 的第 3 代航空发动机轴承，准备在 2020 年前后装配到第 5 代战机，而中国则在进行推力比 10-12 的第 2 代航空发动机轴承的研发，与国外相比落后 1 代以上<sup>[6]</sup>。

## 二、国内外轴承钢冶金质量与性能现状

众所周知，长寿命、高转速、高负载和高推力轴承涉及到材料、加工、制造及检测等多个环节，其中材料性能的好坏直接影响到轴承的性能。影响轴承钢质量的因素主要有 4 个<sup>[7]</sup>：一是轴承钢中的夹杂物含量、形态、分布和大小；二是轴承钢中的碳化物含量、形态、分布和大小；三是轴承钢中的中心疏松缩孔和中心偏析；四是轴承钢产品质量和性能的一致性。目前国外已传统轴承钢的质量和性能提升的研究以及新型和特殊性能轴承材料研发并行的局面<sup>[8]</sup>。

轴承钢的夹杂物水平直接决定于原料的纯净度以及冶炼过程中氧含量的控制<sup>[9]</sup>。如图 1 所示，在 20 世纪 70 年代以前，国内外主要是使用无脱气冶炼(无炉外精炼)，钢中氧的质量分数高达  $30 \sim 40 \text{ ppm}$ ，20 世纪 70 年代到 90 年

代以真空脱气钢为主(应用炉外精炼),钢中氧的质量分数已经降到 15ppm 左右,20 世纪 90 年代后期到 21 世纪的今天,由于 3 脱工艺与真空脱气技术的联合应用,钢中氧的质量分数可以降到 5ppm 甚至以下。可以看出,国外高品质轴承钢中氧的质量分数在 20 世纪 90 年代到现在基本维持在 3-6ppm,没有进一步的大幅度提高<sup>[10]</sup>。由于氧含量的降低,钢中的夹杂物含量得到大幅度降低,分布更加均匀,尺寸更加细小。利用新型夹杂物的定量表征技术(ASPEX)研究表明,超高纯轴承钢中等效直径大于 2 微米的夹杂物已经达到 1-10 个/mm<sup>2</sup>,达到甚至超过了双真空钢的 1-10 个/mm<sup>2</sup>,和远远高于电渣钢的 10-30 个/mm<sup>2</sup>的夹杂物水平。随着钢的高纯净度冶炼平台(分电炉与转炉 2 个系统)的完善和轴承钢纯净度的提高,轴承钢中的夹杂物水平得到很大改善,以至于钢中碳化物的含量、分布、大小成为制约轴承钢质量的主要因素,因此,在高纯度冶炼平台下控制碳化物的水平显得越来越重要。可以说包括美国、欧洲和日本等轴承钢强国已经完成对轴承钢夹杂物控制的化学冶金的研究(从 20 世纪 90 年代到现在,钢中氧的质量分数稳定控制在 3-6ppm 的水平),目前主要进行以轴承钢中碳化物的控制、组织细化以及表面处理的物理冶金研究。

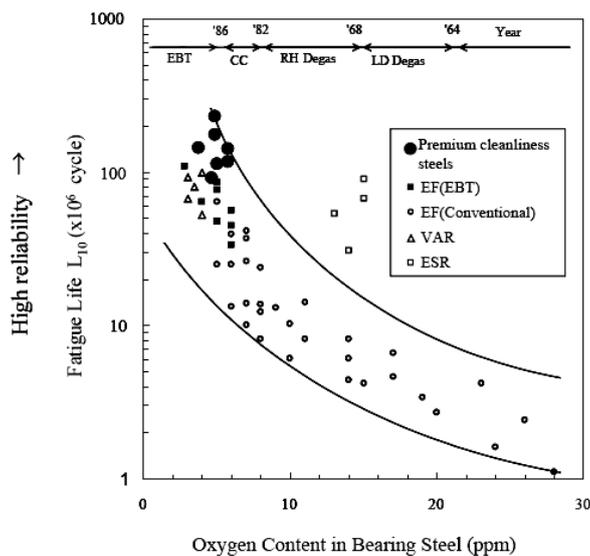


图 1 国外轴承钢 GCr15 的接触疲劳寿命 L10 与轴承钢氧含量与年代的关系

## 2.1 国内外夹杂物的质量控制水平

国外发达国家，例如瑞典、日本、德国、美国等国的轴承钢产量和质量都处于领先地位，其共同特点是设备先进、工艺技术成熟、质量稳定。世界上生产轴承钢最著名的厂家有日本的山阳特殊钢厂、瑞典 Ovako 公司、美国 Timken 公司等轴承钢生产企业。以连铸轴承钢为代表的日本山阳 (Sanyo) 和以模铸轴承钢为代表的瑞典 Ovako，代表了目前国外轴承钢生产工艺及质量的最高水平。日本山阳轴承钢中氧的质量分数普遍控制在 5ppm 以下，有的甚至达到 2-3ppm；最大夹杂物尺寸为 11  $\mu\text{m}$ ；硫的质量分数达到 20-30ppm、钛的质量分数达到 10ppm 以下，且化学成分波动范围小，有害元素含量小。接触疲劳寿命接近 VAR 方法冶炼的轴承钢的水平。山阳超高纯轴承钢，即 extra purified bearing steel (EP)，代表了其轴承钢化学冶金质量的最高水平<sup>[11]</sup>。瑞典 Ovako 是通过模铸冶炼的轴承钢，其普通级 (B 级) 轴承钢氧的质量分数控制在 4-6ppm，且偏差值低 0.5ppm；钛的质量分数在 8-12ppm。钢中氢含量不大于 1ppm (精炼结束时钢水中的测定值)。Ovako 超高纯净轴承钢是它的各等向性轴承钢，即 Identical quality bearing steel (IQ 钢)，其氧的质量分数在 3-4ppm，硫的质量分数在 10ppm，因其极限疲劳强度和韧性在轧向和径向等各个方向基本相同，故而称为各向同性轴承钢<sup>[12]</sup>。

图 2 给出了日本山阳的 Z 级轴承钢与 EP 级轴承钢的夹杂物情况与对应的接触疲劳寿命情况。瑞典 Ovako 的轴承钢分为 BQ 和 IQ 2 个级别。其中 BQ 级别属于普通轴承钢级别，与日本山阳的 Z 级钢接近。而瑞典 Ovako 公司的各向同性轴承钢 (IQ steel) 则在轴向和径向具有基本一致的性能，即轴承钢的疲劳强度、韧性和夹杂物水平在各个方向基本相同，如图 3 所示<sup>[13]</sup>。以 GCr15 轴承钢为例，瑞典 Ovako 轴承钢在各个方向的旋转弯曲强度 ( $\sigma_{-1}$ ) 为 950MPa，室温无缺口冲击功达到 150-200J，夹杂物含量也降低到普通轴承钢的 1/10。从报道的结果来看，其 IQ 钢的性能也达到了双真空轴承钢的冶金水平。

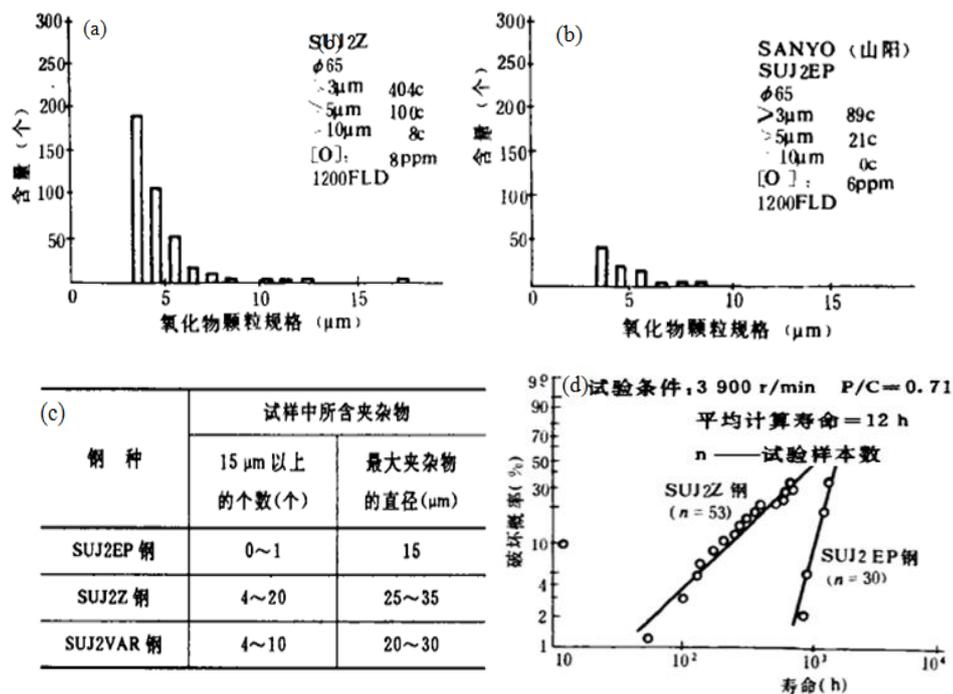


图 2 山阳的 Z 级及 EP 级轴承钢的夹杂物水平及其接触疲劳寿命 (a) Z 级轴承钢中氧化物颗粒的尺寸分布; (b) EP 级轴承钢中氧化物颗粒的尺寸分布; (c) Z 级、EP 级及真空重熔的 SUJ2 钢最大夹杂物的直径及其数量对比; (d) Z 级和 EP 级 SUJ2 钢的接触疲劳寿命对比。

国外近年研制了其他多种新型轴承钢，例如，NSK 公司经过多年研究，开发出了一种表面淬硬的 SHX 耐热轴承钢，SHX 具有良好的耐温性能(可以耐温 300℃)、抗卡死和耐磨损特性，并且寿命长(比 SUJ2 钢制造的轴承寿命长 3~4 倍)<sup>[14]</sup>。在超高速运转时，通常认为内圈由于受到高的环向应力作用而易于断裂。通过使用 SHX 材料的内圈，其内部残余应力能抵消环向应力，从而避免了轴承内圈的断裂。目前用 SHX 材料制造的 ROBUST 系列轴承已经应用于许多高速精密机床的主轴，其长寿命和高可靠性能也已经得到验证。

国内以兴澄特钢、宝钢特材、东北特钢和南京钢厂等为代表的先进轴承钢生产企业，具有品质高(通过国际知名轴承公司 SKF、FAG、Timken 等国外轴承钢公司的认证)和产量大等特点，代表了中国轴承钢冶金质量的最高水平。目前冶金质量已经达到国外先进水平，但在热处理技术与新型长寿命轴承钢

开发方面与国外还存在较大差距。

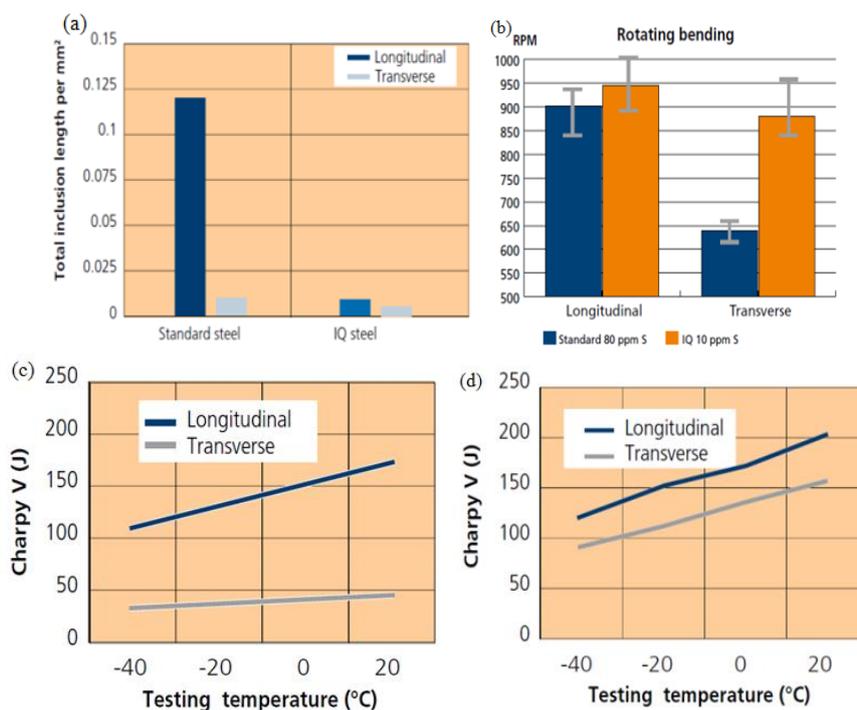


图 3 Ovako 各向同性轴承钢的夹杂物含量、韧性及极限弯曲疲劳强度 (a) 夹杂物的含量; (b) 旋弯疲劳性能; (c) 传统轴承钢轴向与径向的韧性; (d) IQ 轴承钢轴向与径向的韧性。

## 2.2 国内外轴承钢碳化物质量控制的现状

未来中国轴承钢的努力方向，一是经济洁净度：在考虑经济性的前提下，进一步提高钢的洁净度，降低钢中的氧和钛含量，减小钢中夹杂物的含量与尺寸，提高分布均匀性。二是组织细化与均匀化：通过合金化设计与控轧控冷工艺的应用，进一步提高夹杂物与碳化物的均匀性，降低和消除液析、网状和带状碳化物，降低平均尺寸与最大颗粒尺寸；进一步提高基体组织的晶粒度，使轴承钢的晶粒尺寸进一步细化。三是减少低倍组织缺陷：进一步降低轴承钢中的中心疏松、中心缩孔与中心成分偏析，提高低倍组织的均匀性。四是轴承钢的高韧体化：通过新型合金化、热轧工艺优化与热处理工艺研究，大幅度提高轴承钢的韧性，从而提高轴承的可靠性。

与 GCr15 等过共析轴承钢相比，中碳轴承钢与渗碳轴承钢中的碳化物控

制主要为带状铁素体的控制，即轴承钢中带状组织的控制。相对于过共析轴承钢，渗碳和中碳轴承钢无网状碳化物的问题，其工艺控制技术相对容易。也许这也可以理解为，除了通过渗碳轴承钢和中碳轴承钢提高轴承钢的韧性外，渗碳轴承钢和中碳轴承钢的网状碳化物控制工艺技术相对简单，是国外发达国家渗碳轴承钢与中碳轴承钢的比例高达 30%~50%的另一个原因<sup>[16]</sup>。为了提高过共析轴承钢的碳化物分布均匀性和降低碳化物颗粒的尺寸，一方面可以采用低温控轧控冷技术，以减少和抑制网状碳化物的出现，为后续的球化退火提供良好的组织预备；另一方面可以改进球化退火工艺，实现过共析轴承钢的碳化物细化和均匀化。目前国外利用循环感应球化退火技术，对热轧态的 GCr15SiMn 轴承钢进行球化退火，实现了在几分钟的时间内将轴承钢中的碳化物细化，大大缩短了轴承钢的球化退火时间，提高了轴承钢中碳化物的均匀性与细质化<sup>[17, 18]</sup>。可见轴承钢的碳化物球化退火工艺尚存在很大的发展空间，未来需要进一步的研究。

在高洁净度冶炼技术的基础上，通过特殊热处理不仅可以细化晶粒，也可以细化碳化物，改善碳化物分布。这种细化组织的特殊热处理技术不仅可以提高轴承钢的强度和硬度，还可以将轴承的接触疲劳寿命提高 3 倍以上<sup>[19]</sup>。图 4 给出了 NSK 公司通过特殊热处理对 GCr15 组织细化的结果。可以看出，晶粒细化热处理后，GCr15 轴承钢的晶粒尺寸从约 15  $\mu\text{m}$  细化到约 5  $\mu\text{m}$  的水平。目前中国对奥氏体化工艺对轴承钢组织结构及性能影响的研究不是特别深入，有必要深入开展热处理工艺对轴承钢接触疲劳寿命影响的研究，形成长寿命和高可靠性的轴承钢的组织细化热处理技术。同时轴承钢的组织细化热处理技术也说明了一个道理，那就是可以在一定洁净度的水平下，通过轴承钢组织的细化和均匀化来大幅度提高轴承钢的接触疲劳寿命，这为研发和生产经济性或低成本轴承钢提供了一个可能的方向。

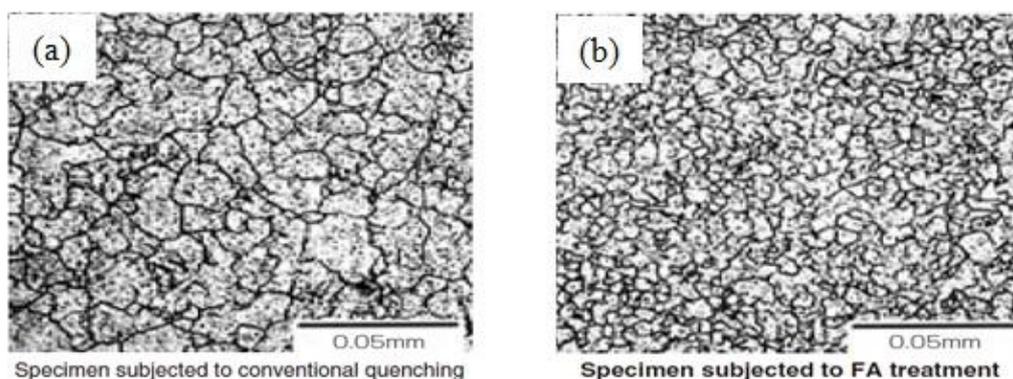


图 4 GCr15 轴承钢的常规淬火组织

(a) 和经过双阶段热处理细化后的基体组织 (b)

常规淬火后的高碳铬轴承钢中一般含有体积分数为 6%-15%的残余奥氏体，该残余奥氏体为软的亚稳定相，在一定的条件下(如回火、自然时效或零件的使用过程中)会失稳转变为马氏体或贝氏体。相变带来的后果是零件的硬度提高，韧性下降，尺寸发生变化而影响零件的尺寸精度，导致轴承无法正常工作。对尺寸精度要求较高的轴承零件，一般希望残余奥氏体越少越好，如淬火后进行补充水冷或深冷处理，采用较高温度回火等消除残余奥氏体。但残余奥氏体可提高韧性和裂纹扩展抗力，在一定的条件下，工件表层的残余奥氏体还可降低接触应力集中，提高轴承的接触疲劳寿命。因此通过材料的成分和工艺的改进，采取措施保留一定量的残余奥氏体含量并提高其稳定性，可以提高轴承的寿命与可靠性。目前国外成功开发了表面超量奥氏体含量的热处理技术，将轴承钢的疲劳寿命最高提高了 10 倍。由图 5 可知，相比于长寿命轴承钢，超长寿命轴承钢具有较高的残余奥氏体含量，然而其维氏硬度依然维持较高水平(图 5(a))，且疲劳寿命明显高于 SUJ2 与普通的渗碳轴承钢(图 5(b))。

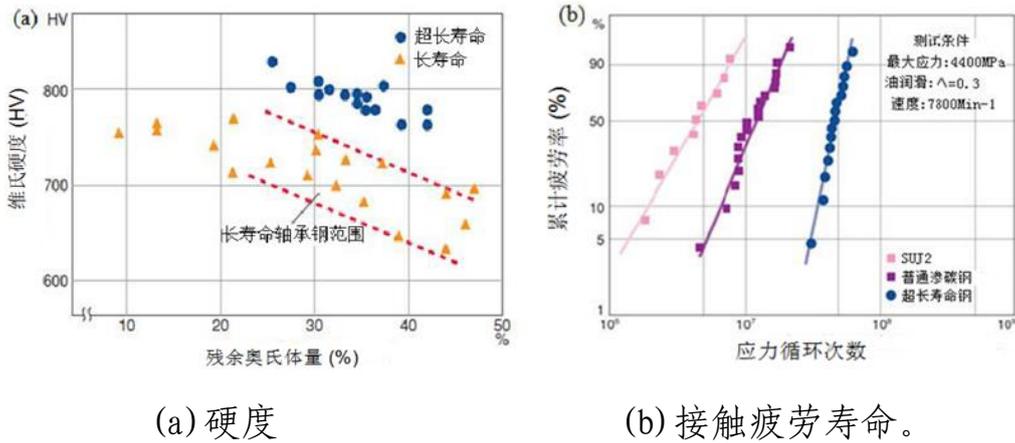


图 5 轴承钢表面超高奥氏体含量热处理技术对性能的影响

高碳铬轴承钢一般是整体淬硬，淬后残余应力为表面拉应力状态，易造成淬火裂纹，降低轴承的使用性能<sup>[20, 21]</sup>。根据表面超大量奥氏体可以提高轴承寿命和可靠性的研究结果，可以对全淬透轴承钢进行渗碳、渗氮或碳氮共渗，提高表层的碳、氮含量，降低表面层的 Ms 点，保证在淬火过程中表面层最后发生相变而形成表面压应力和保留大量稳定的残余奥氏体，来提高轴承钢的耐磨性及滚动接触疲劳性能。最近的研究还表明：高碳铬轴承钢经渗碳或碳氮共渗后还可提高轴承在污染条件下的接触疲劳寿命。一般在淬火加热时，通过控制气氛的碳(氮)势，可达到以上目的。但如果对高碳铬轴承钢进行超常渗碳(碳势 2%)，则必须加大加工余量，去除渗碳淬火后表层的粗大碳化物。目前人们对于轴承钢表面超量奥氏体技术以及超高碳势表面热处理技术的研究还不是特别深入，特别是对表面奥氏体稳定性、表面超高硬度和表面残余压应力对轴承钢接触疲劳性能影响机理的研究还不系统和深入，有待于未来进一步加强研究。

### 2.3 国内外新型轴承钢研发现状

为了适应未来轴承的复杂使用环境和更高性能的要求，轴承材料的研发不仅仅是传统全淬透轴承钢的品质提升，还应该进行众多新型低成本、环境适应型和更高性能轴承钢的研发。据报道，在传统轴承钢品质提升的研发方面，日本山阳和瑞典 Ovako 等国外轴承钢企业相继开发了超高纯的 EP 钢和

IQ 钢，其冶金质量和使用性能远远超过了价格昂贵的电渣冶炼的轴承钢，达到了双真空冶炼轴承钢的水平。所以未来中国高端传统轴承钢的冶金质量与使用性能，应该通过冶金设备、工艺与流程的改进，使真空脱气轴承钢达到双真空冶炼的轴承钢的质量和性能水平，着力开发中国低成本真空脱气轴承钢的超纯化技术，达到国外 EP 钢和 IQ 钢等真空脱气轴承钢的冶金质量和使用性能。

进入 21 世纪，新技术、新工艺的不断出现推动着制造业的飞速发展，对轴承部件提出更高的要求，研发高端轴承成为未来竞争发展的关键。高端轴承就是高性能轴承，即要求高转速、高可靠性、长寿命、高承载、低噪声及低摩擦力矩，且能适应高温、低温和腐蚀性等极端工作环境。高端轴承主要应用在高速铁路、船舶制造、航空航天、精密机床、高档轿车和石油化工设备。在新型中碳轴承钢与新型超高强耐温耐蚀轴承钢方面，随着主机向着高功率、高转速和超长寿命、高可靠性和环境适应性的发展，需要新型具有轻质化、高强度、高韧性、耐腐蚀和耐高温轴承齿轮钢。国外开发和应用了一系列新型轴承钢，比如美国 Latrobe 公司研发的 CSS-42L 耐 500℃ 的高温不锈钢轴承齿轮钢、德国公司开发了耐 350℃ 的高氮耐蚀轴承钢、瑞典开发了低成本的空冷硬化 677Q 轴承钢，日本 NSK 开发了 SHX 轴承钢等和我国研发的轻质化轴承钢。目前我国尚无相关生产技术或加工制造技术，制约了我国第三代航空发动机、高档机床及高档汽车变速箱等高端装备的发展。

中碳轴承钢是指含碳量在 0.35-0.65% 的轴承钢。通过 Cr、Si、Mo 等合金化，NSK 开发了长寿命高韧性中碳渗碳钢 (SHX) 及配套的热处理技术，解决了在污染润滑的条件下，润滑剂中的污染粒子在轴承零件滚动接触面上形成压痕，造成早期表面疲劳剥落失效的问题。首先是对渗碳钢的成分进行调整，然后利用 NSK 的新的热处理工艺在渗碳或碳氮共渗后在渗层中得到大量的细小碳化物或碳氮化物，在得到高残余奥氏体含量 (30~35%) 的同时保持高的

硬度。一方面利用高的表面硬度使污染粒子不易在接触表面形成压痕，另一方面利用大量的易变形的残余奥氏体降低压痕的边缘效应（或应力集中）及形变诱发相变使裂纹不易形核和扩展，以得到高的轴承寿命。NSK 中碳钢轴承在污染润滑条件下的寿命比普通轴承提高 4-10 倍，如图 6a 所示。另外，系列化的中碳钢制轴承具有优越耐温性能、耐磨性能和咬合极限，尺寸稳定性介于全淬硬和一般表面淬硬材料，如图 6b 所示。

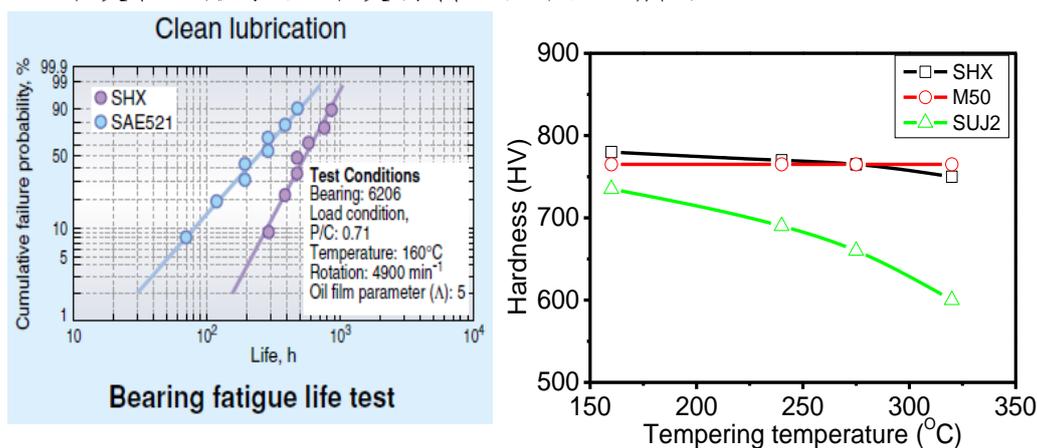


图 6 日本 NSK 开发的中碳轴承耐温性能及其接触疲劳寿命与传统轴承钢对比

高氮马氏体轴承钢：目前使用较为广泛的传统不锈钢轴承为 AISI440 (9Cr18)、AISI440C (9Cr18Mo)、SUS440，该钢通过淬火-回火处理后获得 60HRC 的高硬度，在一般湿润气氛下具有良好的耐蚀性能，然而氯离子存在的条件下耐蚀性较弱，且高碳铬含量导致大块共晶碳化物的存在，降低了钢的耐蚀性和接触疲劳性能。为了解决这一问题，在过去的几十年中，国外通过合金设计及新型冶炼工艺方法，在原有高碳不锈钢轴承钢成分基础上降碳降铬和添加 N 元素，相继开发出达到或超过极限含量的高氮不锈钢轴承钢，如美国的 440N-DUR、法国的 XD15N、德国的 Cronidur30 等。经氮合金化处理后钢中共晶碳化物明显减少，标准热处理后硬度与原来基本相同，而疲劳寿命提高近 4 倍，且耐蚀性能显著提高。比如 Cronidur30，其中 0.6%~0.8% 的 (C+N) 含量确保热处理后不低于 60HRC 的高硬度，其接触疲劳寿命和耐蚀性能高于 SUJ2 和 M50。耐温性能可以达到 350℃，耐蚀性能比传统不锈钢轴承钢

440C 高出近 100 倍。另外更加引人关注的是 Cronidur30 轴承钢中的碳化物尺寸细小均匀，其最大碳化物尺寸不大于 5 $\mu\text{m}$ ，远远小于 440C 轴承钢 60 $\mu\text{m}$  以上的大碳化物颗粒尺寸，如图 7 所示。总之，国内外的研究表明，高氮不锈钢是一种集碳化物充分细化、耐高温、高强度、高耐腐蚀能力、优异耐磨性、良好韧性及加工性能于一体的优质轴承钢。上述高氮不锈轴承钢国外目前已知应用于火箭燃料泵轴承、直升机挡板和尾轴轴承、飞机襟翼的滚珠丝杆和螺母组件等领域。



图 7 Cronidur30 钢退火条件下及淬硬条件下的碳化物尺寸及其分布

**超高强高温耐蚀轴承钢：**随着航空发动机设计的进步和传递能量及转速增大、功率的不断提高、推动比和功重比以及  $Dn$  值的不断增加，航空轴承的工作温度可能达到  $350 \sim 500^\circ\text{C}$ ，在新条件下工作的高温轴承要求高温轴承材料需要具有高的表面硬度以提高耐磨性能，同时其芯部应具有良好的断裂韧性、延展性和冲击韧性。腐蚀失效的因素也要考虑在内。为此国外开发了新型耐高温、耐蚀高强韧渗碳轴承钢 (CSS-42L)。该合金主要用于制造轴承套圈，在渗碳和热处理后具有高的表面高温硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能，同时其芯部仍具有高的韧性和强度。CSS-42L 合金是采用双真空熔炼的新型低碳 Cr-Ni-Mo-Co 合金，表层硬化型不锈轴承钢，其室温硬度可达到 HRC68，在  $430^\circ\text{C}$  下的最高高温硬度为 HRC62，在  $480^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  下的最高高温硬度 HRC58，心部最高断裂韧性可达到 50J，如图 8 所示。

根据以上对轴承钢质量与性能综述，可以认为目前国内外真空脱气轴承

质量基本可以用三个级别来概括。一是普通级，其氧含量在 15ppm 以上，钛含量在 20ppm 以上，夹杂物在 20 个/mm<sup>2</sup> 以上，最大夹杂物颗粒 DS 在 26um 以上，接触疲劳寿命低于 5x10<sup>6</sup> 次 (4.5GPa 接触应力)；二是高纯级 (对应国外 Z 钢、BQ 钢，性能与国内电渣钢接近)，其氧含量在 6-10ppm，钛含量在 10-20ppm，夹杂物在 10-20 个/mm<sup>2</sup>，最大夹杂物颗粒 DS 在 13-20um，接触疲劳寿命在 1x10<sup>7</sup> 次 (4.5GPa 接触应力)；三是超纯级 (对应国外的 EP 钢与 IQ 钢，性能与国内 VIM+VAR 钢接近)，其氧含量在 3-6ppm，钛含量在 5-9ppm，夹杂物在 1-10 个/mm<sup>2</sup>，最大夹杂物颗粒 DS 不大于 13um，接触疲劳寿命在 (0.5-1.5)x10<sup>8</sup> 次 (4.5GPa 接触应力)。目前国内大部分钢厂属于普通级和高纯级，少量钢厂可以达到超纯级轴承钢性能。但对同级别轴承钢而言，国内轴承钢的接触疲劳寿命上与国外相比也存在比较大的差距。这种差距可能与轴承钢质量稳定性、轴承钢中碳化物控制水平以及轴承钢热处理技术等方面差别有很大关系，未来需要根据轴承钢接触疲劳寿命进行国产轴承钢化学冶金、物理冶金以及热处理等技术的研究，促进我国轴承钢整体水平的提升。

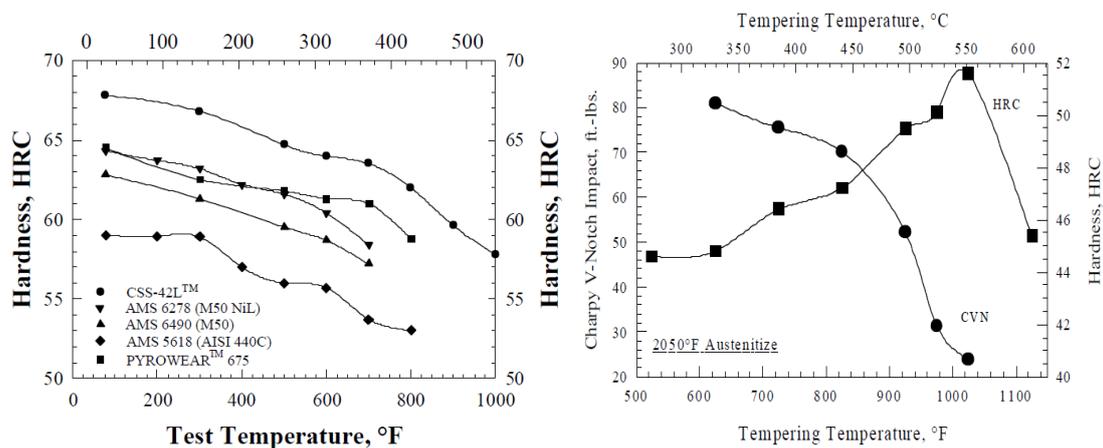


图 8 超高强不锈钢轴承钢 CSS-42 耐温性能及回火温度对冲击韧性和表面硬度的影响

## 2.4 我国高端轴承应用现状

中高档轿车用轴承：据有关资料统计<sup>[22]</sup>，比例为 40% 的滚动轴承应用于汽车且约占轴承行业产值的 1/3。近年来，随着汽车工业的发展和汽车性

能要求的不断提高，汽车轴承向着小型化、轻量化、高速化和高效率化及使用条件越来越苛刻的方向发展。中国汽车产量已从 2005 年的 500 多万辆增加到 2015 年的 2400 多万辆，预计 2030 年中国汽车产量将达到 3500 万辆，汽车用轴承的产值将达到近 900 亿元。但目前国产汽车用变速箱的寿命为 10 万 km，远远低于国外的 50 万 km，导致中国高档轿车变速箱全部从国外进口。对于汽车轮毂轴承，中国目前处于广泛应用的第 1 代和第 2 代轮毂轴承(球轴承)和研发第 3 代轮毂轴承的阶段<sup>[23]</sup>。第 3 代轮毂轴承单元的主要优点是可靠、有效载荷间距短(刚性高)、易安装、无需调整、结构紧凑等。而第 3 代轮毂轴承单元在欧洲已达到广泛实用阶段，装配量已达 1600 万套。目前中国引进车型大多采用这种轻量化和一体化结构轮毂轴承。另外随着现代汽车的节能需求，变速箱结构更简单、质量更轻、可靠性更高和噪声更低。而目前国产轿车用中高档自动变速箱及 CVT 无级变速箱等还主要依靠进口<sup>[24]</sup>。除了轴承设计和加工制造以外，像 GCr15、S55C、42CrMo 和 G20CrNiMo 等真空脱气轴承钢的夹杂物与碳化物的质量控制水平低，也严重影响了国产汽车用轴承的寿命与可靠性。

轨道交通用高端轴承：轨道交通车辆主要包括高速铁路客车、重载货车及城市轨道车辆。目前世界高速铁路客车发展越来越迅速，运行速度越来越高(最高时速 420km/h)。因其能源消耗与环境污染是航空运输的 1/5，是汽车运输的 1/10，成为未来绿色环保的主要交通工具<sup>[25]</sup>。随着中国铁路货车单车载重达到 70t 级、时速向 120km 迈进和寿命达到 150 万 km 的发展，铁路轴承需要更高的承载能力、更长的使用寿命和更高的可靠性。目前中国铁路重载列车用轴承全部采用国产电渣重熔 G20CrNi2MoA 渗碳钢制造，其成本远远高于国外采用超高纯真空脱气轴承钢材料。另外目前中国电渣钢中的氧的质量分数最低仅仅达到 15-30ppm，导致电渣轴承钢中的夹杂物含量也远远高于氧的质量分数为 3-6ppm 的国外超高纯真空脱气轴承钢。因此有必要开发超高纯

真空脱气轴承钢以替代电渣钢，实现中国重载铁路货车轴承的低成本、长寿命和高可靠性。另外城市轨道交通进入史无前例的快速发展阶段，在今后 10 年左右将建设线路 1.7 万多 km，总投资需 6200 多亿<sup>[26]</sup>。公共轨道交通已成为在城市和市郊区域的拥挤街道中代替汽车的主要选择。但目前国内地铁轴承长期被国外 SKF、NTN、FAG、TIMKEN、NSK 等国际知名企业垄断。目前国外对超高纯轴承钢 (EP 钢) 的真空脱气冶炼技术、夹杂物均匀化技术 (IQ 钢)、超长寿命钢技术 (TF 钢)、细质化热处理技术、表面超硬化处理技术和先进的密封润滑技术等的研究比国内系统深入，而且已经应用到轴承的生产和制造，从而大幅度提升了轴承的寿命与可靠性。而中国所用电渣轴承钢不仅质量水平低于国外高端真空脱气轴承钢，而且成本也比真空脱气钢高出 2000~3000 元/t，所以未来中国需要开发超高纯、细质化、均匀化与质量稳定的真空脱气轴承钢代替目前采用的电渣轴承钢，需要进行以真空脱气轴承钢为材料的轨道交通轴承的模拟设计、加工制造、密封润滑和应用研究，以实现高速铁路客车、重载货车及城市轨道车辆用轴承的低成本化与国产化。

大型精密高速数控机床用轴承：中国高速电机主轴存在的主要问题是轴承寿命低。国外公司通过对钢材、滚动体、保持架、润滑和密封方面进行研究，推出了 Dn 值达到  $4.0 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{rpm}$  的超高速角接触主轴轴承<sup>[27]</sup>。为满足磨削等一些恶劣环境的要求，一些公司还推出了带有非接触密封的精密主轴轴承以及密封元件等。与国外机床轴承对比，国产轴承存在精度储备量低、精度不稳定、短期丧失原有精度；轴承温升高；因材质和热处理因素导致轴承寿命低；尺寸允差离散度偏大和配对角接触轴承的预载荷偏差量大等等一系列问题<sup>[28]</sup>。可以看出，作为高端装备之母的机床轴承在模拟设计、加工制造、密封润滑以及轴承材料等方面全面落后于国外。在轴承用钢材质量控制技术方面，中国使用的高端真空脱气轴承钢的质量一般只能达到国外 Z 级钢的水平，迫切需要开发超纯净轴承钢 (相当于 EP 钢) 以及新型中碳钢来满足高

精度高可靠长寿命高速机床轴承的使用要求。提高寿命的主要措施，一般是采用更加优质的材料、更加先进的润滑技术和密封技术等<sup>[29]</sup>。如日本 NSK 公司采用高纯净度的 Z 钢作为普通机床主轴轴承的标准材料(其含氧量为 3-8ppm)，寿命比原采用的标准材料真空脱气钢提高了约 1.8 倍；而对于  $Dn > 1.8 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{rpm}$  的轴承，推荐采用用于超高速主轴轴承的 SHX 钢，其与 M50 钢性能相当，但寿命比真空冶炼钢提高了约 4 倍。混合陶瓷轴承，一般寿命可达钢制轴承的 2 倍以上，而且在低黏度油润滑时表现良好，在高温时耐烧伤，使用中不易磨损；采用润滑脂自动补给技术，使轴承的使用寿命更长，免维护时间达 10000h。Schaeffler 新研发的“X-life”超级轴承，套圈采用高氮不锈钢 Cronidur30 制造，寿命是常规轴承钢的 10 倍，可认为是“无失效”轴承。要加速中国加工制造业的发展，高档精密机床用轴承的系统化研究应该成为中国高端装备基础件研发的重中之重，这包括超高纯轴承钢冶炼技术研发、长寿命新材料技术(SHX、X30)、高精度加工和先进热处理技术等。另外对于超高转速和高精密轴承，轴承转动过程中产生极大的离心力，对轴承的刚度、轻量化和耐温性能也提出了极高的要求。所以未来机床主轴用轴承钢需要考虑轻质化、整体淬透性和耐温性能，需要进一步开发新材料。

长寿命轧机轴承：大型薄板轧机设备用轴承轧钢机轴承，特别是轧机轧辊颈轴承，作为轧机设备中的关键零件，其可靠性和稳定性直接影响了轧机的使用寿命<sup>[30]</sup>。目前国产轧机轴承的寿命短，可靠性差，满足不了客户需求，这是国内轧机轴承存在的一个共性问题。日本 NSK 与 NTN 轴承公司分别开发了表面奥氏体强化技术，即通过增加表层奥氏体含量，开发出了 TF 轴承和 WTF 轴承，从而将轴承的寿命提高了 6-10 倍<sup>[31]</sup>。以上使用寿命的差异也导致了国产轴承的价格远远低于国外，比如寿命为 8000h 的 TIMKEN 轧机的轴承售价为 12 万元/套，而国产寿命 800h 的轧机轴承则仅仅售价 0.8 万/套。大

多数轧机辊颈轴承的损坏是由于轧制过程中轧制油和氧化皮侵入轴承内部引起的。未来发展方向就是如何通过材料选择、优化设计、表面处理来进一步提高轧机轴承的使用寿命、使用温度和运转精度。目前国内关键轴承选择采用电渣重熔渗碳轴承钢来保证轧机轴承的寿命与运转精度。未来需要进行轧机用传统轴承钢 GCr15SiMn、G20Cr2Ni4 和新型中碳轴承钢等钢材的超高纯真空脱气冶炼和轴承表层大奥氏体量控制热处理等技术的研发，以提高轧机轴承的寿命、精度和降低轧机轴承的成本。

### 三、钢研新一代长寿命轴承钢研发情况

针对长寿命轴承钢需求，钢铁研究总院开展了新一代长寿命轴承钢研发。通过对 GCr15、M50 和 X30N 等第一、第二和第三代全淬透轴承钢的系统研究，发现了循环载荷作用下的夹杂物/碳化物等硬质颗粒与基体间界面处应力集中是造成裂纹形核与扩展的主要根源，大颗粒夹杂物或碳化物是引起轴承钢接触疲劳的关键因素。研究结果表明，GCr15 类是大颗粒夹杂物控制疲劳机制，M50 类是大颗粒碳化物控制的疲劳机制，以及 X30N 是夹杂物与孪晶马氏体共同控制的疲劳机制。表明轴承钢的抗疲劳行为不仅取决于轴承钢的夹杂物和碳化物，还与轴承钢基体组织类型密切相关。

基于传统轴承钢的质量性能关系的定量研究，提出了基于应力集中与裂纹扩展的轴承钢抗疲劳组织结构单元模型和经济洁净度下的容忍夹杂物/碳化物的低成本长寿命轴承钢的均质化、细质化和稳定化基体组织性能控制发展思路，发明了基体双细化技术、表面超硬化技术、非均温轧制技术与新型合金化技术等长寿命化组织性能控制技术，突破了电渣轴承钢和双真空轴承钢等质量性能极限，实现了 GCr15 室温接触疲劳寿命自  $L_{10} \geq 1.0 \times 10^7$  次到  $L_{10} \geq 1.0 \times 10^8$  次的突破进展及其他类型轴承钢抗疲劳性能的大幅提升，为超长疲劳寿命轴承钢的工业化试制以及多款高端装备的轴承国产化奠定了材料基础。

通过与国内特钢企业、轴承企业及用户合作，钢铁研究总院成功实现了

GCr15、G20CrNi2Mo、M50, X30N 和 CSS-42L 等多种代表性长寿命轴承钢的工业化试制, 和航空航天、铁路轴承、机床轴承和轧机轴承等高端装备用轴承的加工制造、性能评价与应用技术研究。初步结果显示轴承钢材料试制结果和部分已完成试制轴承质量性能达到预期目标。例如, 利用新一代长寿命轴承钢, 试制了重载货车轴承并通过了 60 万公里的耐久型式试验验证。

#### 四、我国轴承钢未来发展方向

根据以上对轴承及轴承钢质量、性能与需求等国内外差距的分析, 为进一步提升我国轴承钢及轴承质量和性能水平, 未来我国不仅需要在传统轴承钢及新型轴承材料研发方面, 需要加大投入, 不但进行传统轴承钢的装备、工艺和流程的改进和基础理论研究, 还要进行长寿命、高可靠、低成本、低密度和耐高温等性能的新型轴承钢的开发, 以适应高端装备用轴承材料的多样化、功能化和高端化发展需求。

对于传统轴承钢材料, 未来我国轴承钢的冶金质量与使用性能, 应该通过冶金设备、工艺与流程的改进, 使真空脱气轴承钢达到双真空冶炼的轴承钢的质量和性能水平, 着力开发中国低成本真空脱气轴承钢的超纯化技术、细质化与均匀化(夹杂物的少量、细质与均匀靠化学冶金的控氧解决; 碳化物的细质、均匀与稳定靠物理冶金的控碳解决; 基体超细化、强韧、耐温靠化学冶金及物理冶金的综合解决), 达到甚至超过国外 EP 钢和 IQ 钢等真空脱气轴承钢的冶金质量和使用性能。在新型轴承钢的研发方面, 未来在新型轴承钢及轴承材料研发方面, 进行长寿命、高可靠、低成本、低密度和耐高温等性能的新型轴承钢的开发, 以适应高端装备用轴承材料的多样化、功能化和高性能化的发展需求。

在对传统轴承钢品质提升和新型高性能轴承钢研发的同时, 还需要进行先进热处理工艺与理论的研究。热处理是提升材料性能的关键工序, 通过对轴承钢的基体强韧化处理与表面超硬化处理, 可以将轴承钢的接触疲劳寿命

提高 5-10 倍，使轴承的性能产生了质的飞越(基体强韧化、表面超硬化、超量奥氏体化、性能特殊化等)。因此未来我国要加大各种热处理在轴承钢组织结构调控和性能提升方面的基础研究，为我国高端长寿命轴承的国产化奠定热处理基础。

### 参考文献

- 1.中国轴承工业协会. 全国轴承行业“十二五”发展规划[R]. 北京: 中国轴承工业协会, 2011.
- 2.晁代勇.高速铁路轴承试验台设计研究[D].洛阳:河南科技大学, 2011.
- 3.黎桂华. 轿车轮毂轴承性能分析与实验研究[D].广州:华南理工大学, 2008.
- 4.冯琴, 张先鸣.风电机组中的风电轴承[J].电器制造, 2010 (11):69.
- 5.杨立芳, 叶军. 高速加工中的机床主轴轴承技术[J]. 轴承, 2012 (1):54.
- 6.唐云冰. 航空发动机高速滚动轴承力学特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.
- 7.付云峰, 崔连进, 刘雅琳.国内轴承钢的生产现状及发展[J].重型机械科技, 2004 (4):37.
- 8.杨建虹, 雷建中, 叶健熠, 等.轴承钢洁净度对轴承疲劳寿命的影响[J].轴承, 2001(5):28.
- 9.王博, 姜周华, 龚伟, 等. GCr15 轴承钢夹杂物及全氧含量控制工艺分析[J]. 材料与冶金学报, 2004, 3(2):90.
- 10.Kim K-H, Lee J-S, Lee D-L. Improvement of rolling contact fatigue life of bearing steel by quenching and partitioning process[J]. Materials Science Forum, 2012, 706-709: 2152.

11. Toshikazu U. Production of high-carbon chromium steel in vertical type continuous caster[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1986, 26(7):614.
- 12.[32] Steels for bearing production from Ovako. Ovako, [www.ovako.com](http://www.ovako.com), 2008.
13. Cost efficient steel for high performing mechanical parts. Ovako, [www.ovako.com](http://www.ovako.com), 2013.
14. Innovation SHX Steel. NSK Americas, [www.nskamericas.com](http://www.nskamericas.com), 2003.
15. 杨晓蔚. 对轴承钢的一般认识和深入认识[J]. 轴承, 2012(9):54.
16. 虞明全. 轴承钢钢种系列的发展状况[J]. 上海金属, 2008, 30(3):49.
17. Hauserova D, Dlouhy J, Novy Z. Effect of heating rate on accelerated carbide spheroidisation (ASR) in 100CrMnSi6-4 bearing steel[J]. Archive of Metallurgy and Materials, 2014, 59(3):1199.
18. Dlouhy J, Hauserova D, Novy Z. Accelerated carbide spheroidisation of chromium bearing steel by induction heating[J]. Advanced Materials Research, 2013, 739:161.
19. 张增岐, 高元安, 扈林庄. 谈我国轴承钢热处理技术的发展[J]. 现代零部件, 2005(6):60.
20. 尤绍军. 我国轴承钢及热加工技术的现状和研究方向[J]. 金属热处理, 2012, 37(1):119.
21. 陈君豪. 轴承钢的最新技术及市场动向[J]. 2000, 1:37.
22. 刘耀中, 张松. 汽车轴承的材料及热处理长寿命技术[J]. 轴承, 2010(9):51.
23. 肖晖. 国外汽车轮毂轴承的发展[J]. 现代零部件, 2003(1):67.

- 24.刘汝卫, 张钢, 殷庆振, 等. 汽车轮毂轴承的发展现状及趋势[J]. 现代机械, 2009 (6):78.
- 25.叶军, 杨立芳. 发展中的轨道交通车辆用轴承[J].轴承, 2013(12):61.
- 26.未来轨道交通投资规划规模预计达 2 万亿.中国公路网, <http://www.chinahighway.com/news/2012/708089>
- 27.姜韶峰, 王小龙, 袁玉同. 精密机床轴承的特点与应用技术[J]. 轴承, 2011 (7):57.
- 28.姜韶峰. 精密机床轴承应用技术[J]. 轴承工业, 2012 (3):8.
- 29.杨晓蔚.机床主轴轴承最新技术[J], 轴承, 2010, 1:61-63
- 30.方名. 轧辊颈轴承的正确安装与维护[J].设备管理与维护, 2010 (4):16.
- 31.王建喜, 陈於学, 黄志强. 钢铁工业中轴承技术的发展趋势[J]. 轴承, 2006 (3):43.
- 32.冯琴, 张先鸣. 风电机组中的风电轴承[J].电器制造, 2010 (11):69.
- 33.杨晓蔚. 风电产业、风电设备及风电轴承[J]. 轴承, 2009 (12):54.
- 34.何加群. 风电产业和风电轴承(一)[J]. 电气制造, 2009 (9):58.