

· 综述 ·

高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向

曹文全 俞峰 王存宇 徐海峰 许达 刘正东
(钢铁研究总院特殊钢研究所,北京 100081)

摘要 针对滚动轴承特点、轴承钢类型以及国内外轴承钢差距,本文对国内外高端装备用轴承需求、国内外轴承钢品种、轴承钢生产装备与冶金质量、轴承钢热处理技术以及轴承钢质量性能评价技术等发展现状进行了综述,指出了国内外高端装备用轴承钢在冶炼流程的超纯净控制、新型热处理技术和新型轴承钢研发对提升轴承寿命的巨大作用,提出了未来基于夹杂物、碳化物和基体组织细质化、均匀化和稳定化的传统轴承钢质量性能提升、高性能热处理研发、新型轴承钢材料创新以及加强抗疲劳基础理论研究的发展方向和大幅度提升轴承钢接触疲劳寿命的发展目标。

关键词 高端轴承钢 冶金质量与性能 长寿命热处理 碳化物调控 接触疲劳性能

Status and Future Development of Metallurgical Quality and Performance of Bearing Steels for High-End Equipment

Cao Wenquan, Yu Feng, Wang Cunyu, Xu Haifeng, Xu Da and Liu Zhengdong
(Institute of Special Steel, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Focusing on the characteristics of rolling bearings, the types of bearing steels, and the gap between bearing steels at home and abroad, this paper summarizes the art of the status of the requirement of the bearing steel of the high-end equipment, the types of the bearing steels, the processing equipment and metallurgical quality of the bearing steels, the heat treatment technologies, and the evaluation technologies for both metallurgical quality and performance. It is put forward that the important role to improve the rolling contact life of the bearing steel by ultra-purification technologies among different melting routes, the new heat treatment technologies and the new bearing steel developments. This paper pointed out that it needs to be done in the future through the refinement, the homogenization and the stabilization of the inclusions, carbides and the matrix of the bearing steel to improve the quality and performance of existing bearing steels, to develop the high performance heat treatment technologies, to innovate the high performance bearing steel and to strengthen the basic research on the mechanism of the fatigue-resistance of the bearing steels, which would finally enhances the rolling contact fatigue life of the bearing steel significantly.

Material Index High-End Rolling Bearing, Metallurgical Quality and Performance, Long-Life Heat Treatment Technology, Carbide Control, Rolling Contact Fatigue Property

1 滚动轴承特点与轴承钢类别介绍

轴承是国民经济的战略物资,是装备制造业的关键基础件,可分为滚动轴承和滑动轴承两类,广泛应用于航空航天、交通运输和工业机械等各种装备中,用于确定旋转轴与其他零件相对运动位置,起支承或导向作用的基础零部件^[1-3]。滚动轴承由内、外套圈、滚动体(滚珠、滚柱或滚针)和保持器四部分组成,合称为轴承四大件^[4]。滚动轴承工作条件十分复杂,不仅要承受各类高的交变应力(如图1所示),还要承受各种瞬时冲击力的作用,使轴承极易产生疲劳裂纹和磨损破坏,严重的情况下出现轴承套圈的断裂破坏^[5-6]。轴承破坏形式主要有两种即

最常见接触疲劳破坏和占次要地位的磨损破坏^[7]。由于要承受高接触应力(一般高达1 500 ~ 5 000 MPa)、多次循环接触疲劳应力以及滑动磨损的工作环境,要求轴承有高抗塑性变形、抗摩擦磨损、高旋转精度及尺寸精度、高尺寸稳定性、长使用寿命和高可靠性;对于在特殊条件下工作的轴承,还有耐冲击、高Dn值(轴承直径与转速的乘积)、耐高温低温、防腐蚀和抗磁等性能。

轴承钢是制造轴承的主要材料,需要具有超高的纯净度、严格控制的夹杂物类型、尺寸、数量与分布等冶金质量和高的硬度、适当的韧性、较高的耐磨性和抗接触疲劳性能,满足滚动轴承对寿命和可靠性要求。因此轴承钢品质最高,性能要求苛刻,而且

量大面广,种类繁多,被称为特钢之王。按照轴承钢的化学成分及使用需求,轴承钢可分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、中碳轴承钢、高温轴承钢和无磁轴承钢等五大类型^[8]。其中高碳铬轴承钢(高碳铬轴承钢是轴承钢的代表钢种:GCr15、GCr15SiMn、GCr15SiMo、GCr18Mo等,该类钢是轴承钢的主体,占我国轴承钢总量的90%以上,也是欧洲滚动轴承用轴承钢的主要材料)^[9-10];渗碳轴承钢(表面经渗碳处理后

具有高硬度和高耐磨性,而心部仍具有良好的韧性,能承受较大的冲击,主要品种有G20CrMo、G20CrNiMo、G20CrNi2Mo、G20Cr2Ni4、G10CrNi3Mo、G20Cr2Mn2Mo等,渗碳轴承钢是美国滚动轴承的主打材料)^[11];中碳轴承钢(主要为适应轮毂和齿轮等部位具有多种功能的轴承部件或特大型轴承,适用于制作掘进、起重、大型机床等重型设备上用的特大尺寸轴承,50CrNi、42CrMo、65Mn2、70Mn2等)^[12];不锈钢轴承钢(440C系列和7Cr14Mo,主要应用于化工、石油、造船、食品工业等部门)^[13-16];高温轴承钢(具有高的的高温硬度(58HRC以上)、尺寸稳定性、耐高温氧化性、低的热膨胀性和高的抗蠕变强度。M50(8Cr4Mo4V)和M50NiL是含Mo的高温不锈钢和BG42钢是高温不锈钢轴承钢,工作温度分别在350℃和420℃以下^[17-18];CSS-42L是一种高温不锈渗碳轴承钢,可以使用到500℃以上^[19];Cronidur30钢是一种高氮(0.40%N)的超高强不锈钢,耐腐蚀性能比440C高出几十倍,主要应用于航空、航天工业的喷气发动机、燃气轮机和宇航飞行器的制造领域)及无磁轴承钢(高强度和高硬度G60以及52#合金等)等系列钢种^[20-23]。

因为轴承服役条件的严苛性和复杂性,要求轴承钢不仅要具有高的冶金质量、优异的疲劳性能和良好的耐磨性能,同时要满足轴承的耐温、耐蚀和无磁等各种不同要求,以满足矿山机械、精密机床、冶金设备、重型装备与高端汽车等重大装备领域和风力发电、高速铁路及航空航天等新兴领域等不同行业高端装备需求。

2 国内外高端轴承与轴承钢现状

2.1 国内外高端轴承发展状况

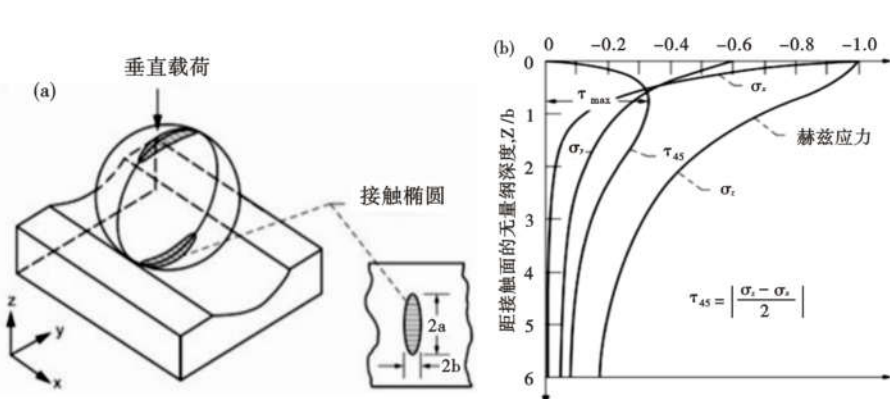


图1 滚动轴承滚道的接触区域及其应力分布:(a)滚动体与内外圈接触变形区域示意图;(b)接触区域应力分布示意图

Fig. 1 Contact area and stress distribution of rolling bearing raceway:(a) Schematic diagram of contact deformation area between rolling element and inner and outer rings;(b) Schematic diagram of contact area stress distribution

目前我国轴承已形成行业销售额2 000多亿元的经济规模,但在关键轴承上,我国在使用寿命、可靠性、Dn值与承载能力等方面与先进国家存在较大的差距,成为我国精密机床、冶金设备、重型装备与高端汽车等重大装备和风力发电、高速铁路及航空航天等战略新兴产业等装备制造业发展的制约瓶颈^[23-26]。目前作为准高速铁路客车和高速铁路客车最为关键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正常和持续发展;国外汽车变速箱轴承使用寿命最低50万公里,而国内同类轴承寿命约10万公里,且可靠性稳定性差;风电用轴承的使用寿命要求达到20年,国内目前可以生产6兆瓦以下的转盘轴承和偏航变桨轴承,但增速器轴承和电机轴承依然没有能力提供;国外高速机床主轴轴承高速性能指数Dn值可达到 $3.3 \times 10^6 \text{ rpm} \cdot \text{mm}$,而我国同类产品的Dn值最高不超过 $1.0 \times 10^6 \text{ rpm} \cdot \text{mm}$,而且无法保障高速精密数控机床的使用寿命。作为航空发动机的基础零部件,国外正在研发推重比为15~20的航空发动机主轴轴承,而我国则在进行10~12推重比的航空发动机轴承研制。以上现状表明,国内高端轴承与国外轴承存在很大差距,尤其是高铁用轴承、航空发动机用轴承和高速精密机床等方面与国外差距最为显著。

2.2 国内外轴承钢品种发展现状

轴承钢的接触疲劳是轴承失效的主要方式之一,得到了国内外高度关注。轴承钢的冶金质量对接触疲劳等性能有直接的影响。近百年以来,高碳铬轴承钢GCr15的化学成分没有大的变化,而接触疲劳寿命提高了100倍以上,这与轴承钢冶炼技术

的发展息息相关,氧含量的降低,非金属夹杂物数量和尺寸的减少,使轴承钢的疲劳寿命大幅提高。研究表明,氧含量从 30×10^{-6} 左右降低到 5×10^{-6} ,夹杂物总长度从 1 mm/cm^3 以上,减小到 0.0001 mm/cm^3 以下,轴承钢的接触疲劳额定寿命 (L_{10}) 从 10^7 次提高到 10^8 次以上,如图 2 所示。

随着高端装备向着长

寿命、耐高温、耐腐蚀以及其他特殊性能发展,国外相继开发出耐温不超过 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 的以 GCr15 为代表的第一代轴承钢、耐温性能不超过 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 M50 和 M50NiL 以及更高耐蚀性能和更高耐温性能的 Cronidur30 和 CSS-42L。常温条件下使用的第一代轴承钢,包括以 GCr15 为主高碳钢、以 G20CrNi2Mo 为主渗碳钢和以 42CrMo 为主的表面感应硬化中碳钢。

GCr15 是最经典的轴承钢牌号,已有百年历史,目前仍然是轴承钢中乃至特殊钢中产量最大的单一钢种,占到轴承钢总量的 85% 以上。GCr15 作为通用轴承钢,适用于 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下环境使用的各类轴承部件。为满足腐蚀及耐冲击等特殊环境要求,国内外也相应开发了高碳铬不锈轴承钢 G95Cr18 (440C)、渗碳轴承钢 G20CrNi2Mo (8620) 和中碳轴承钢 42CrMo (42CrMo4) 和 G55Mn (S53C) 等钢种。第二次世界大战以后,随着喷气发动机的出现,轴承的使用温度提高到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,高碳铬轴承钢 GCr15 耐温性不足,因此借鉴使用高速工具钢的钢种,典型牌号为 8Cr4Mo4V (M50),至今也有 60 年的历史,目前已经发展为航空发动机主打材料。为满足耐蚀性能的要求,国外开发了高温不锈轴承钢 G115Cr14Mo4V (BG42),满足轴承 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下高温腐蚀使用的要求。为满足高温耐冲击的要求,在 8Cr4Mo4V 的基础上,国外开发出了高温渗碳轴承钢 G13Cr4Mo4Ni4V (M50NiL)。相对于常温使用的轴承钢, M50、M50NiL 和 BG42 的使用温度分别达到了 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $400 \text{ }^\circ\text{C}$,被称之为第二代轴承钢而被广泛应用于航空航天领域。随着高端装备的发展,需要适应更加复杂的环境,除要求轴承钢具有高硬度、高耐磨、高接触疲劳性能以外,还要兼备耐温、耐蚀、耐冲击等良好的综合性能。第三代轴承钢则是耐蚀

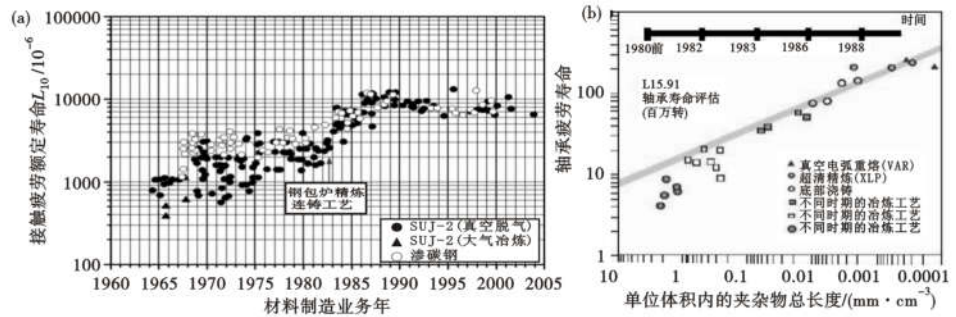


图 2 轴承钢接触疲劳寿命 L_{10} 随着研发时间的提升 (a) 以及 L_{10} 与夹杂物之间的关系 (b)

Fig. 2 Increasing of contact fatigue life L_{10} for bearing steel with development time (a) and relationship between L_{10} and inclusion (b)

性能更高和耐温性更好的 CSS-42L 钢和 Cronidur30 钢。我国在第三代航空发动机用高性能轴承齿轮钢的研发方面与国外存在更大差距,需要进行高温渗碳不锈轴承钢 CSS-42L 和高氮不锈轴承钢 Cronidur30 等轴承齿轮钢的研发。CSS-42L 是美国拉特罗布特殊钢公司 (Latrobe Special Steel Company) 研制的表面硬化型轴承齿轮钢,属于第三代轴承齿轮材料,应用于宇航齿轮传动机构和涡轮螺旋桨主轴轴承等零部件。国内近年来也开始了第三代轴承齿轮材料的研究工作,研制的新型高温不锈渗碳轴承钢 G13Cr14Co12Mo5Ni2,经淬回火热处理后的抗拉强度可达到 1800 MPa ,屈服强度可达到 1400 MPa ,断裂韧性 K_{IC} 可达到 $80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 以上。该钢经表面渗碳热处理后室温表面硬度可达到 900 HV (67 HRC) 以上,渗层深度可达到 1.0 mm ,心部硬度可达到 545 HV (52 HRC)。滚动接触疲劳寿命试验表明 G13Cr14Co12Mo5Ni2 的 L_{10} 比 G13Cr4Mo4Ni4V 高 10 倍以上^[27],如图 3 所示。Cronidur30 钢是欧洲最早开发的,典型化学成分为 $0.30\% \text{ C}$ 、 $15\% \text{ Cr}$ 、 $1\% \text{ Mo}$ 、 $0.4\% \text{ N}$,该钢采用 C-Cr-Mo-N 合金体系,属于高耐蚀高氮不锈轴承钢。通过 N 的固溶强化,形成细小弥散的 $\text{Cr}_2(\text{C}, \text{N})$ 碳氮化物和 M_{23}C_6 碳化物的双强化机理。由于 Cronidur30 钢中含有 $14\% \sim 16\%$ 的 Cr 和约 0.4% 的 N,赋予了高氮轴承钢高的硬度、高的耐蚀性能和优异的接触疲劳性能。据报道,Cronidur30 钢的耐蚀性能比 440C 钢提高了 100 倍,接触疲劳寿命提高了 4 倍以上。但高氮不锈轴承钢 Cronidur30 的 N 的加入需要专门的加压冶炼装备 (加压电渣炉 PESR) 和非常复杂的冶炼工艺,以保证材料成分的均匀性和稳定性^[28-30]。

装备的轻量化一直是科研工作者努力的方向,轴承作为装备的关键核心部件,由于其工作的特殊

性要求,如需要高负载、高耐磨等,因此轻量化材料的应用很少。而航天、航空等领域对轻量化的要求日益迫切,因此新一代的低密度轴承钢的研发成为关键。新型的镍钛合金 60NiTi 以及铁基的马氏体和奥氏体低密度轴承钢 GCr15Al 目前正在研发当中。NSK 公司经过多年研究,开发出了一种经表面淬硬的 SHX 耐热钢,SHX 具有良好的抗卡死和耐磨损特性,并且寿命长(比 SUJ2 钢制的轴承寿命长 3~4

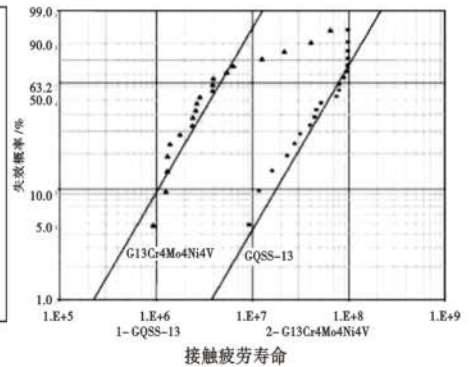
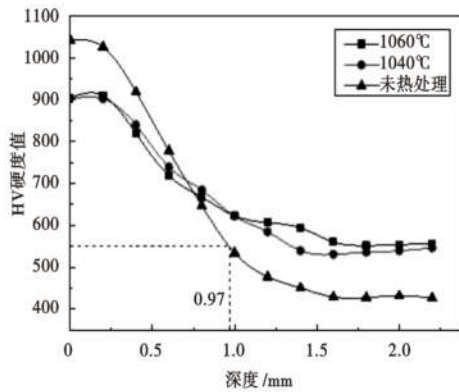


图 3 G13Cr14Co12Mo5Ni2 (CSS-42L、GQSS-13) 与 G13Cr4Mo4Ni4V (M50NiL) 工业试制钢的经真空表面渗碳后的硬度变化及 200 °C 下的接触疲劳性能

Fig. 3 Hardness variation of the industry trial steel of both G13Cr14Co12Mo5Ni2 (CSS-42L、GQSS-13) and G13Cr4Mo4Ni4V (M50NiL) after surface vacuum carburisation and contact fatigue property at 200 °C

倍)。可以看出尽管已经存在第一代、第二代及第三代系列化轴承钢材料,国外依然根据应用需求,进行更高性能轴承齿轮研发,而国内在新型轴承钢研发方面还存在创新能力不足的问题。

2.3 轴承钢生产装备与冶金质量现状

轴承钢的性能不仅与轴承钢钢种有关,还与轴承钢的生产装备及其工艺控制密切相关。目前国内国外基于真空脱气流程(高炉铁水(废钢)→转炉(电炉)→LF 钢包精炼炉→VD(RH 真空精炼炉)→连铸(模铸)),在原材料控制、冶炼、热加工及热处理等全流程质量控制的基础上,已经将高碳铬轴承钢 GCr15 的冶金质量和性能提高到了 $[O] \leq 5 \times 10^{-6}$ 、 $[Ti] \leq 10 \times 10^{-6}$ 、 $DS \leq 0.5$ 级、4.5 GPa 下接触疲劳寿命 $L_{10} \geq 1 \times 10^7$ 次等优异的冶金质量与疲劳性能水平。由于该流程生产流程长且主要应用于生产量大面广的 GCr15、GCr20CrNi2Mo 和 42CrMo 等轴承钢钢种,故而称之为真空脱气轴承钢。轴承钢夹杂物对寿命的影响,不仅受到夹杂物尺寸、夹杂物类型和夹杂物数量影响,同时也受到夹杂物分布的影响。因此如何提升夹杂物的分布均匀性依然是需要解决的装备与工艺问题。美国 Timken 为了获得高均匀性夹杂物分布的量面广轴承钢,建立了真空脱气轴承钢的垂直连铸生产线,目前 Timken 的垂直连铸生产线已经建成并投产,可见未来长流程的垂直连铸工艺也应该是未来轴承钢发展的重要方向。目前国内的河北钢厂、浙江天马、中原特钢都上马了垂直连铸生产装备,可以解决长流程轴承钢弧弯式连铸带来的夹杂物分布不均匀的问题。

除了长流程生产工艺,还有电渣冶炼和双真空冶炼 2 个特冶流程生产更高等级的轴承钢。电渣流

程:真空脱气(真空感应)→电渣炉(保护电渣炉和加压电渣炉),简称电渣重熔;双真空流程:真空感应炉(真空脱气)→真空自耗炉(VAR),简称双真空。由于这两个特冶流程仅仅包括两个冶炼阶段,故称之为轴承钢短流程冶炼工艺。电渣重熔通过渣洗提高轴承钢的纯净度,获得均匀细小的新生夹杂物,并通过水冷结晶器获得均匀的组织,质量稳定性高,但批量较小,成本较高。目前我国年产电渣重熔轴承钢 20 万 t 左右,主要应用于铁路、风电、轧机、兵器等领域。双真空工艺具有极强的脱氧能力,可获得极少数量且细小均匀分布的夹杂物,以及良好的组织均匀性,质量稳定性很高,但批量更小、成本更高,主要用于航空、航天等关键轴承部件。轴承钢的生产装备与工艺决定了轴承钢中纯净度与夹杂物控制水平,也极大影响着轴承钢的接触疲劳寿命。所以 GCr15 接触疲劳性能就是一种典型的由夹杂物大小、类型、分布所控制的,被称之为夹杂物控制的疲劳机制。图 4 给出了通过旋弯疲劳法进行真空脱气、电渣和真空自耗等冶炼方法获得的轴承钢夹杂物对比。从中可以看出,真空脱气轴承钢的大颗粒夹杂物是电渣钢和双真空钢的 2 倍左右^[31]。

轴承钢的接触疲劳寿命不仅受到夹杂物影响,还与轴承钢中碳化物颗粒尺寸存在直接相关性。碳化物对接触疲劳寿命影响在 M50 和 440C 中表现得更为显著。双真空冶炼的 440C 钢的 L_{10} 仅仅达到了 0.5×10^7 次,低于炉外精炼的 GCr15 的 $L_{10} \geq 1 \times 10^7$ 次。主要原因是 440C 钢中的碳化物尺寸达到了 50 μm 的尺寸,远远大于钢中最大夹杂物 D_s 的尺寸(20 μm),同时也远远大于炉外精炼和双真空 GCr15 的碳化物尺寸(最大碳化物一般小于 10 μm)。据报

道,与 440C 钢一样, M50 钢的接触疲劳寿命主要受到钢中碳化物尺寸所控制。针对于 M50 钢和 440C 钢的接触疲劳寿命与轴承钢中的碳化物之间的关系,提出了 M50 和 440C 等高碳高合金钢的碳化物控制的接触疲劳机制。尽管人们更多地研究了 GCr15 夹杂物对接触疲劳寿命的影响,但碳化物对接触疲劳寿命的影响得到长时间关注。人们发现高碳铬轴承钢 GCr15 通过高温扩散、控轧

控冷、球化退火工艺技术等,使钢中的碳化物液析、碳化物网状和碳化物带状得到一定的控制与改善,从而可以提高轴承钢的接触疲劳性能。

轴承钢的组织均匀性,特别是夹杂物与碳化物的均匀性,严重影响轴承钢的接触疲劳寿命。瑞典 OVAKO 通过超低 S 含量 ($\leq 1 \times 10^{-5}$),以及 A、B、C 类夹杂物的尺寸控制,从而获得轴承齿轮钢的各向同性。该公司对外宣称可以将不同 C 含量和性能级别的轴承钢处理成各向同性轴承钢,体现出国外较高的控锻控冷水平。OVAKO 公司最近报道的各向同性轴承及齿轮钢(IQ-Steel)的部分结果,可以看出夹杂物长度、旋转弯曲疲劳强度、冲击韧性等在横、纵 2 个方向基本相同。碳化物不均匀性的根源在于凝固组织的均匀性,因此对于凝固技术的研究是控制碳化物不均匀性必不可少的。电渣重熔和真空自耗工艺就是利用水冷结晶器获得良好的铸态组织,从而极大改善了轴承钢中的碳化物不均匀性。通过控制轧制实现轴承钢整个截面的均匀变形,实现碳化物的破碎及形变诱导碳化物析出,改善轴承钢的带状及网状不均匀性分布^[32,33]。

无论是夹杂物还是碳化物都有可能成为疲劳裂纹萌生的源头。目前国内外已经发现了不同种类轴承钢的夹杂物疲劳控制机制和碳化物疲劳控制机制,同时除了夹杂物、碳化物外,还有基体组织等其他因素,通过抑制疲劳裂纹扩展来影响着轴承钢疲劳寿命。但国内尚没有对此展开系统深入研究,因而也无法形成夹杂物、碳化物和其他因素的控制理论指导轴承钢的生产实践。

2.4 国内外轴承钢长寿命热处理控制技术

热处理决定了轴承钢最终的组织状态和性能,是轴承长寿命与高可靠性性能保障的重要技术之一。

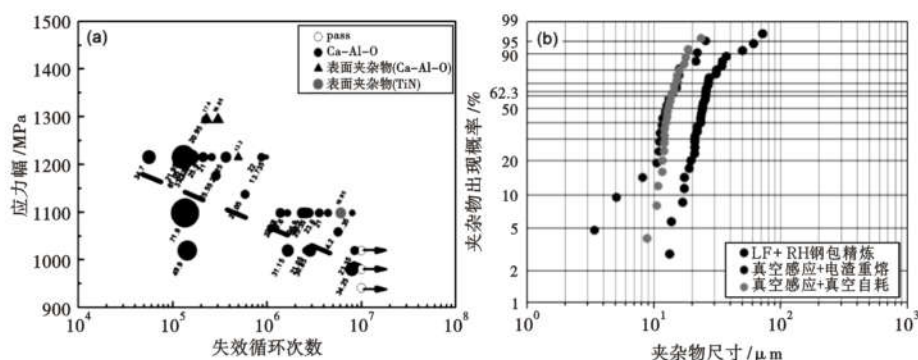


图 4 通过旋弯疲劳法进行轴承钢中夹杂物评价(a)及冶炼工艺对夹杂物影响的评价结果(b)

Fig. 4 Inclusion evaluation by Spin-bending Fatigue Method (a) and evaluation results of the effect of smelting process on inclusions (b)

为获得高硬度、高耐磨、高接触疲劳等性能,热处理的目的是获得细小均匀的基体组织和析出相。常规淬火(SQ)后的高碳铬轴承钢 GCr15 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。最近国内外报道了一种新型循环热处理可以大幅度细化 GCr15 的原始奥氏体尺寸,从而大幅度提升轴承钢接触疲劳性能的研究成果。研究指出,双阶段特殊热处理(DQ)后,GCr15 轴承钢的原始奥氏体晶粒尺寸从约 15 μm 细化到约 5 μm 和轴承钢中的碳化物平均尺寸也从 0.6 μm 细化到了 0.3 μm 的水平,从而将轴承钢的接触疲劳寿命提高了 5 倍以上,如图 5 所示^[34]。据报道国外对渗碳轴承钢进行了新型热处理及表面复合处理研究并得到了应用,该技术可将轴承的使用寿命提高 5 ~ 10 倍,显示出热处理技术在提高轴承齿轮寿命方面的巨大作用。原始奥氏体细化大幅提升接触疲劳寿命的机理可以通过位错在夹杂物边部的塞积加以解释^[35],即晶粒越细化,作用到夹杂物与基体界面的位错数量越少,减轻夹杂物周围应力聚集程度,降低了夹杂物作为裂纹源的倾向。

目前国外成功运用了 GCr15 轴承钢表面碳氮共渗的特殊热处理技术(SH),该技术可以将轴承钢的

疲劳寿命最高提高了 10 倍。国内也进行了相关研究,通过对轴承钢 GCr15 进行渗碳,以提高表面硬度与残余奥氏体含量,将接触疲劳寿命提高了 10 倍以上。另外,考虑到加工表面粗糙度、轴承钢中残余奥氏体及表面残余应力等对轴承寿命影响的新型表面处理技术也亟需研究。目前国外的轴承寿命是国内的 2~4 倍,其关键原因还在于轴承钢的表面处理技术没有到位。目前国外进行了含大量奥氏体轴承钢,即超长寿命轴承钢研发,比传统轴承钢

高出 10 倍的寿命。通过复合的渗碳和渗氮处理后 (duplex hardening)^[36],M50NiL 的疲劳寿命与可靠性比 M50 提高的幅度更大,可以比未复合表面处理的 M50NiL 的寿命提高 10 倍以上。我国采用双真空冶炼工艺生产的高温渗碳轴承钢 M50NiL 具有较高的纯净度,但由于其属于低碳钢,钢中的晶粒度特别是渗碳热处理后的晶粒度控制较难,往往在钢中出现粗大的晶粒,影响其力学等性能,因此仍需研究 M50NiL 的组织细化和均匀化热处理技术。

相对于国外对轴承钢热处理技术研究的系统与深入程度,国内依然停留在轴承钢的纯净度控制阶段,还没有对轴承钢的碳化物、残余奥氏体和基体组织等影响因素进行深入系统研究,也没有形成指导轴承钢生产和轴承制造的新型长寿命热处理工艺。

2.5 轴承钢的冶金质量评价技术发展现状

材料的检测技术不仅可以保证产品的质量,同时可为工艺的优化提高数据支持。轴承钢是特殊钢中要求最为严格,检测项目最多的钢种,包括化学成分、高低倍组织、脱碳层、表面与内部缺陷、尺寸精度等。在这些检测项目中,对轴承钢接触疲劳性能影响较大的非金属夹杂物和碳化物等的标准检测方法,多采用图谱法评定。然而对于高纯净轴承钢而言,图谱法 (GB/T 10561-2005) 已经无法有效评价高纯轴承钢冶金质量的优劣,因此需要探讨非金属夹杂物等的定量评价方法。目前国外利用水浸超声波检测技术检测夹杂物的精度在 10~100 μm,是一种可实现在线无损夹杂物检测技术,因此得到大力的发展。目前国内多家先进轴承钢生产企业已经具备水浸超声波检测技术及能力,而且该检测方法的国家标准也已发布,铁路货车用轴承钢的技术条件率先规

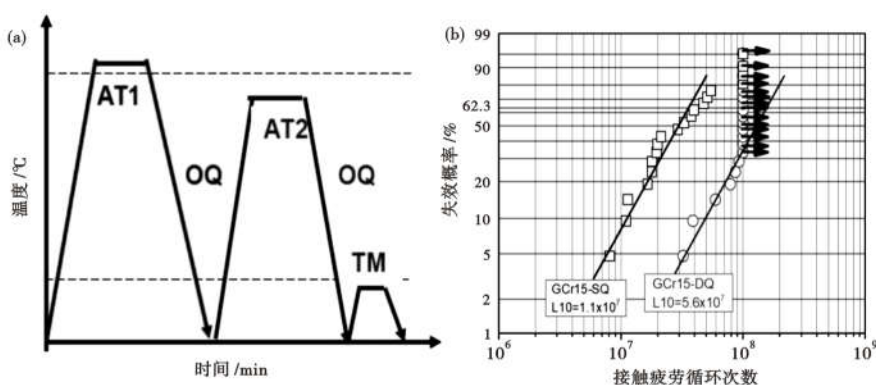


图 5 轴承钢双细化热处理工艺 (a) 及双细化热处理对接触疲劳寿命的影响 (b) 的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double refining heat treatment (a) and effect of double refining heat treatment on contact fatigue life (b) in bearing steel

定了水浸超声波检测大颗粒夹杂物的要求,未来高铁轴承用钢及超高纯净轴承钢标准都将采用水浸超声波检测技术,检测钢中的大颗粒夹杂物。另外,利用 Aspex explorer 全自动夹杂物分析检测仪和旋转弯曲疲劳试验法,对钢中非金属夹杂物的定量检测及评价也进行了大量的研究。研究表明^[37-38],Aspex 作为新型夹杂物检测仪器,具有制样较为简单、检测分析速度快、可以输出如夹杂物尺寸类型种类等数据等优点;但无法全面表征夹杂物三维形态等缺点。旋转弯曲疲劳法表征夹杂物最为显著的优点就是可以直观观察夹杂物的三维形态,同时利用能谱仪对夹杂物进行点线面的成分分析;但是也存在制样繁琐、耗时较长、成本高昂等问题,与此同时由于疲劳断裂机理,疲劳法对于小尺寸夹杂物较难表征。

相对于国外的轴承钢冶金质量的定量检测,我国对轴承钢冶金质量的检测评价还处在定性检测与评价阶段,已经无法进行超纯净轴承钢的夹杂物和碳化物的评价,导致无法细分不同等级的轴承钢冶金质量。未来需要进行轴承钢冶金质量检测评价从定性走向定量、从二维走向立体的研究,为轴承钢生产企业和轴承钢用户提升精确指导。

3 高端轴承钢发展方向探讨

影响轴承钢冶金质量与服役性能的因素很多,需要深入系统的理论研究,给轴承钢的研发、轴承钢制造、轴承加工制造和轴承的使用提供理论基础。但是目前国内研究非常薄弱,无法给相关轴承钢和轴承企业提供理论指导。需要一方面进行传统轴承钢质量性能提升的理论与技术研究,保障传统装备的寿命与可靠性;另一方面进行新型轴承钢开发,进行长寿命高可靠性和适应不断发展的装备需求。

3.1 国内外长流程轴承钢超纯净的发展方向

根据轴承钢中合金含量、夹杂物控制水平及轴承钢接触疲劳性能控制水平,轴承钢的冶炼方式可以分为两大类:一是生产量大面广的低合金轴承钢(GCr15、G20CrNi2Mo)的长流程工艺(BOF/EAF + LF + RH + CC/IC),另外一种生产特殊应用的高合金轴承钢(440C、M50、M50NiL、CSS-42L等)的短流程工艺(VIM + ESR和VIM + VAR)。当然这两种工艺也可以穿插使用,以获得低成本的高性能轴承钢(BOF/EAF + LF + RH + CC/IC + ESR/VAR,如高均匀性和长寿命的GCr15)。国外发达国家,比如瑞典、日本、德国、美国等国的轴承钢质量处于领先地位,共同特点是设备先进、工艺技术成熟、质量稳定。世界上生产轴承钢的最著名的厂家有日本的山阳特殊钢厂、瑞典Ovako公司、美国Timken公司等轴承钢企业。日本山阳特殊钢厂通过长流程轴承钢生产工艺,将冶金质量控制的 $[O]$ 在 5×10^{-6} 以下,有的甚至达到 $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$;最大夹杂物尺寸为 $11 \mu\text{m}$;硫含量达到 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ 、Ti达到 $(14 \sim 15) \times 10^{-6}$ 。同时日本近年研制了多个新钢种,例如NSK公司经过多年研究,开发出了一种经表面淬硬的SHX耐热钢,SHX具有良好的抗卡死和耐磨损特性,并且寿命长(比SUJ2钢制的轴承寿命长3~4倍)。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,使用SHX材料的内圈,其内部残余应力能抵消环向应力,因此可以大大地避免断裂。用SHX材料制造的ROBUST系列轴承已经应用于许多高速主轴,其性能已经得到验证。在要求高载荷、高可靠性方面,开发出了EP钢以及一般环境下实现长寿命的Z钢。瑞典Ovako钢厂通过长流程生产工艺,将轴承钢的冶金质量控制的 $[O]$ 在 $(5 \sim 8) \times 10^{-6}$,且偏差值低 (0.5×10^{-6}) ; $[Ti]$ 波动在 $(8 \sim 12) \times 10^{-6}$;钢中 $[H] \leq 1 \times 10^{-6}$ 。此外瑞典Ovako公司最近报道的各向同性轴承及齿轮钢(IQ-Steel)的部分结果,表明通过控制轴承钢各向同性,可以实现各种力学性能,特别是钢的冲击韧性在各个方向基本一致。因此可以说日本山阳特殊钢厂和瑞典Ovako的生产工艺和冶金质量代表了当代世界量大面广轴承钢GCr15和G20CrNi2Mo等生产质量的水平和发展方向。美国TIMKEN公司对轴承材料的研究和开发大致分为三个方面:(1)通过采用新的冶炼技术和装备,或对传统的冶炼工艺和设备进行改进,降低钢中氧含量及夹杂物的数量,改善夹杂物的分布、尺寸和形态,改善结晶状态等,

以提高原有钢种的冶金质量,生产出长寿命、纯净或超高洁净钢;(2)对原有钢种的化学成分进行改进或开发全新轴承用钢,以满足不同使用场合对轴承越来越高的性能要求;(3)在具有同样性能的前提下降低材料费用和整个轴承的生产成本。

国内以兴澄特钢、大冶特钢、南京钢厂、东北特钢和宝武特冶等为代表的通过长流程生产先进轴承钢生产企业,年产量基本维持在30~100万t,代表了我国长流程轴承钢冶金质量的最高水平。目前国内以兴澄特钢为代表的轴承钢生产企业,已经将轴承钢GCr15在纯净度方面提升至国外先进水平。兴澄特钢生产的轴承钢GCr15,冶金质量方面已经达到钢中 $[O]$ 普遍控制在 5×10^{-6} 以下,最大夹杂物尺寸为 $18 \mu\text{m}$;硫含量达到 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ 、Ti达 10×10^{-6} 以下。但通过国内外轴承钢实物解剖发现,国内轴承钢的强韧性与国外存在很大差距。比如国外轴承钢的抗拉强度可以稳定达到2400 MPa以上,而国内轴承钢的抗拉强度在1800~2200 MPa之间,不仅普遍低而且稳定性差。这说明虽然国内轴承钢的纯净度控制水平已经达到或超过了西方发达国家,但在碳化物与基体组织控制等方面还存在比较大的差距。通过以上对国外先进GCr15轴承钢技术与国内轴承钢技术的比较可以看出,轴承钢技术的先进与否,不仅与轴承钢中夹杂物的数量、尺寸和分布、碳化物的数量、尺寸与分布控制水平密切相关,另外还与轴承钢中基体组织与碳化物控制密切相关。未来我国长流程生产的轴承钢发展方向主要是超纯净冶炼工艺条件下的轴承钢夹杂物细小化和均匀化,轴承钢中碳化物、基体组织及其相关的合金化与热处理工艺改进与提升。

目前国内外长流程轴承钢中的氧含量已经降低到 $(3 \sim 5) \times 10^{-6}$,已经达到了轴承钢氧含量的控制极限,而轴承钢的接触疲劳寿命 L_{10} 也仅仅达到 $(1 \sim 2) \times 10^7$ 次水平。未来像高铁、机床、盾构、风电等高端装备用更长寿命($L_{10} \geq 1 \times 10^8$ 次)和更高Dn值($\geq 3 \times 10^6 \text{ rpm} \cdot \text{mm}$)等更高性能的长流程轴承钢冶金质量的进一步提升不仅需要控制纯净度和夹杂物,更需要控制碳化物与基体组织。因此未来我国长流程轴承钢发展,一方面需要进行基体组织细化与均匀化,通过合金化设计、控轧控冷与热处理技术联合应用,使轴承钢的晶粒尺寸大幅细化,形成超细晶组织轴承钢产品与技术;另一方面需要进行碳化物的细化和均匀化,通过合金化优化、冶炼铸造、热变形与热处理等工艺技术相结合,进一步提高碳化物的均匀

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,形成高强韧轴承钢 GCr15。

3.2 国内外短流程轴承钢发展方向

除了以上量大面广的轴承钢长流程生产工艺外,国内外对于一些高端高合金轴承钢或特殊领域用长寿命轴承钢采用短流程工艺生产,如真空感应+电渣重熔(VIM+ESR)、真空感应+真空自耗(VIM+VAR)和VIM+ESR+VAR等联合应用的多联工艺来进一步提高轴承钢中夹杂物的质量。轴承钢短流程的电渣冶炼和自耗重熔的作用均是显著降低夹杂物尺寸和控制夹杂物分布。目前这一类轴承钢主要用在航空发动机、坦克、装甲车及战术导弹等用基础件,其中航空发动机用轴承对钢的要求最高。

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、推重比和功重比以及Dn值的不断增加,航空轴承的工作温度可达到350~500℃,在新条件下工作的高温轴承要求轴承材料具有高的表面硬度、高耐磨性能、良好的断裂韧性、延展性和冲击韧性。目前航空发动机M50和M50NiL是美国卡本特公司研发并通过VIM+VAR的短流程冶炼制造,已经成为国内外航空发动机主轴轴承的主打材料。近20年美国拉特罗布特殊钢公司(Latrobe Special Steel Company)开发应用于航空发动机主轴轴承的高温渗碳不锈钢CSS-42L,渗碳后碳化物组织细小且分布均匀,室温最高硬度可达到68HRC,在430℃下的最高高温硬度为62HRC,在480~500℃下的最高高温硬度58HRC,芯部最高断裂韧性可达到110MPa·m^{1/2}。滚动接触疲劳寿命试验表明它的L₁₀是M50钢约28倍,具有广泛的应用前景。所以利用CSS-42L替代M50等第二代轴承齿轮钢不仅可以大幅度提高轴承齿轮寿命和可靠性,大幅降低轴承齿轮的更换频率,提高安全性和降低发动机维修成本。欧洲为了提升航空轴承的耐腐蚀性能和疲劳性能,开发了高氮轴承钢Cronidur30钢,目前已经形成产品与标准,并成功得到应用。纵观国内外航空发动机用钢的发展,可以看出航空发动机用钢已经形成了以GCr15、440C等为代表的常温使用的第一代航空用轴承钢(使用温度不高于150℃),以M50、M50NiL、Proywear675及BG42等为代表的中温使用的第二代航空用轴承钢(使用温度不高于350℃)和以CSS-42L及Cronidur30轴承齿轮钢为代表高韧性耐腐蚀和耐高温特点的第三代航空轴承钢(使用温度不高于500℃)。随着国外航空三代轴承齿轮钢的发展,国外(主要是欧洲、日本

和美国等发达国家)相继建立了不同轴承齿轮钢的系列化先进冶炼设备、轧制锻造设备及高精端热处理设备,满足了不同成分类型轴承齿轮钢的生产与应用需求,极大促进了高端航空器件的发展。针对轻量化、长寿命、高负载与高耐温,美国还进行了密度低于6.8g/cm³的第四代航空轴承材料的研发,以满足更高载荷和更高Dn值要求。

经过改革开放以来的40年发展和国外装备与技术引进,我国也形成了第一代和第二代航空发动机用钢,并进行了第三代轴承钢的先期研发。但总体而言,在轴承钢的冶金质量与性能来看,我国第一代和第二代轴承钢与国外尚存在比较大的差距。我国也进行了第三代轴承钢Cronidur30和CSS-42L的国内仿制,目前还没有进行第三代轴承钢轴承制造及应用技术研究,距离到轴承应用还需要更多的工作。未来像航空发动机主轴轴承和机体轴承等更高推重比(15~20)、更高Dn值($\geq 4.0 \times 10^6$ rpm·mm)和更高耐温耐蚀性能(≥ 500 ℃)等高强韧性、低密度、更高耐温性和耐蚀性能轴承钢将会是短流程轴承钢的重要发展方向,以满足我国航空航天、交通运输等高端装备的发展。

3.3 国内外轴承钢质量热处理技术发展方向

轴承钢的冶金质量影响轴承的寿命与可靠性,也与轴承钢的热处理工艺存在比较大的关系。近20年来,国外报道了多种大幅度提升轴承钢接触疲劳寿命的热处理技术。我国高温渗碳轴承钢M50NiL的接触疲劳寿命目前较国外低,热处理工艺不完善可能是另一个很重要的原因。在我国轴承制造企业,渗碳钢的渗碳热处理是通过多用途渗碳炉中通过碳势的控制,获得所需的碳浓度和渗碳层的深度,常常导致渗层的碳浓度和深度比较不均匀、组织也不理想,并且变形较大。国外多采用真空渗碳热处理工艺,该工艺通过控制炉内压力和流量以及渗碳时间,也可采用真空低压渗碳及等离子渗碳等工艺获得均匀的碳浓度和渗层深度,获得理想的组织并且变形很小,磨加工以后可以保持比较均匀的渗层深度。因此开展真空渗碳热处理的工艺研究,并对热处理后的表层应力分布状态和结构、微观组织、过度层和心部组织与失效以及接触疲劳性能的研究很有必要。另外,据报道国外对渗碳轴承钢进行了新型热处理及表面复合处理研究,并得到了应用,该技术可将轴承的使用寿命提高5~10倍,显示出热处理技术在提高轴承齿轮寿命方面的巨大作用。

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;这样既可以提高强度和硬度,又可以大幅度提高轴承的接触疲劳寿命。目前我国针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,有必要开展新型热处理工艺对轴承钢接触疲劳寿命影响的研究,形成轴承钢的特殊热处理技术。同时轴承钢的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,这为我国轴承钢制造的经济性或低成本提供了可能方向。残余奥氏体可提高韧性和裂纹扩展抗力,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。根据这一思路,目前国外成功运用了轴承钢的特殊热处理技术,该技术可以将轴承钢疲劳寿命最高提高了10倍。

4 我国高端轴承钢发展机遇与方向

通过以上国内外量大面广轴承钢和特殊用途轴承钢分析可以看出,我国与国外发达国家还存在较大差距,也是导致我国轴承质量与性能存在较大差距的重要原因。目前我国制造和运行速度最快和里程最长的高铁,世界最大的盾构机正在中国生产和使用,生产和使用世界上最大的风力发电装备,也在进行更高推重比和高功重比航空发动机及大型远程运输机的研发制造,更应该拥有世界上最好性能的轴承钢和更长寿命的高端轴承。本文分析表明,未来轴承钢的发展需要在超纯净冶炼的基础上,进行夹杂物、基体组织、碳化物和残余奥氏体细质化、均匀化和稳定化的研究,形成更长寿命的轴承钢。图6是对国内外轴承钢夹杂物控制阶段、长寿命热处理研发阶段以及未来新型超长寿命轴承钢合金化趋势的判断。由此可以看出,我国轴承钢未来的发展方向应该是传统轴承钢的性能提升和新型高性能轴承钢的创新研发。针对国内外轴承钢质量与热处理技术差距,未来我国轴承钢应在一下几个方面进行深入系统研究:

(1)传统轴承钢品质提升:我国量大面广轴承钢 GCr15 和 G20CrNi2Mo 等和特殊用途轴承钢 M50、M50NiL、Cronidur30 和 CSS-42L 等在纯净度控制水平

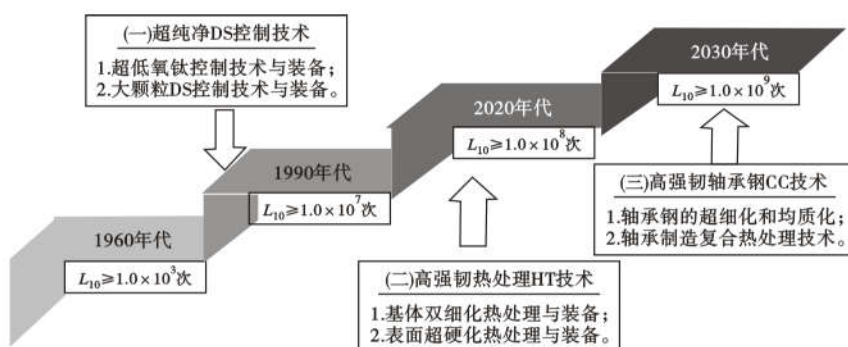


图6 百年来国内外轴承钢的接触疲劳寿命随年代变化以及各阶段采用长寿命技术和未来超长寿命轴承钢发展方向判断

Fig. 6 Variation of contact fatigue life of bearing steels with age in domestic and abroad over past century and long-life technology at various stages and future development direction of ultra-long-life bearing steel

方面已经达到甚至超过国外水平,但在夹杂物、碳化物和基体组织的细质化均匀化控制方面与国外存在较大差距,导致轴承钢的强韧性与接触疲劳寿命稳定性方面落后于国外,无法满足高端装备需求。

(2)新型长寿命热处理技术:我国量大面广轴承钢和特殊用途轴承钢的热处理工艺过于陈旧,依然停留在30年前的水平,与国外的轴承钢双细化热处理、轴承钢表面超硬化热处理以及轴承钢表面改性技术存在较大差距,需要进行相关机理与长寿命热处理技术研究,指导轴承钢生产实践和高端轴承的加工制造,实现高端装备用轴承的长寿命与高可靠性。

(3)新型高性能轴承钢创新:新型高性能轴承钢开发的步伐与支持力度不足,无法形成基于使用环境要求的轴承钢自主创新,一直处于跟跑状态;未来需要在更高强韧轴承钢、超长寿命轴承钢、更高耐温与耐腐蚀性能轴承钢和低密度轴承钢等方向进行创新研发,以满足高端装备需求和引领国内外高端轴承钢的发展。

(4)基础理论与评价体系完善:轴承钢抗疲劳理论研究严重落后和没有得到充分重视,导致传统轴承钢质量控制技术、长寿命热处理技术以及新型高性能轴承钢研发等跟不上高端装备发展需求。需要建立健全相关轴承钢冶金质量检验检测装备,进行影响轴承钢疲劳性能因素的系统理论研究,指导轴承钢冶金质量控制和未来新型超长寿命轴承钢和高端轴承的创新研发。

通过以上高性能轴承钢基础理论和工程化研究,完成长流程真空脱气轴承钢、短流程特种冶炼轴承钢、轴承钢组织性能调控、新型高强韧轴承钢创新以及高性能轴承钢检验检测平台等研究,实现:(1)

大幅度提升传统长流程真空脱气轴承钢(GCr15、G20CrNi2Mo和42CrMo等长流程轴承钢)中夹杂物、碳化物和基体组织控制等冶金质量,使我国轴承钢接近或达到国外先进水平。作为轴承寿命指标的现有轴承钢的接触疲劳寿命(L_{10})从 10^7 提高到 10^8 水平,实现长流程轴承钢在高铁、机床、盾构、风电等领域应用,解决高端装备卡脖子问题;(2)通过进行短流程特种冶炼轴承钢(M50、M50NiL、Cronidur30及CSS-42L等)的合金化、冶炼锻造及热处理技术研究,大幅细化夹杂物、碳化物和基体组织,实现航空发动机轴承和飞机机体轴承的国产化应用;(3)通过芯部与表面梯度组织控制技术,形成传统轴承钢新型表面处理技术及表面组织控制技术,大

幅度提升轴承的寿命与可靠性,满足我国高端装备对高性能轴承钢的要求;(4)完成新型高强韧、耐高温和长寿命轴承钢和新型低密度轴承齿轮研发并实现产业化,使其达到或超过国外同类产品水平。通过控制接触疲劳寿命(L_{10})达到 10^8 来提高轴承使用寿命;(5)建立健全高性能轴承钢冶金质量和性能的检验检测平台并制定相关标准,为高端轴承钢质量性能调控的基础理论研究和高端轴承钢工业化产品分析评价奠定坚实的分析评价装备和平台。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0300101)

国家自然科学基金资助项目(51871062)

参考文献

- [1] 杨晓蔚. 高端轴承制造的关键技术[J]. 金属加工(冷加工), 2013(16):16-18.
- [2] 钟顺思,王昌生. 轴承钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:1-10.
- [3] 刘飞,刘静波,盛青志. 国内轴承行业发展现状研究[J]. 现代经济信息,2018(20):317-318.
- [4] 杨晓蔚. 滚动轴承产品技术发展的现状与方向[J]. 轴承,2020(8):65-70.
- [5] Vaskamp A P. Microstructural Changes Druing RCF [M]. Delft: Delft University of Technology,1996:13-26.
- [6] Vaskamp A P. Microstructural Changes Druing Rolling Contact Fatigue; Metal Fatigue in the Subsurface Region of Deep Groove Ball Bearing inner Rings [M]. Delft: Delft University of Technology, 1997:5-9.
- [7] 付悍巍,崔一南,张弛,等. 轴承钢滚动接触疲劳研究进展[J]. 中国冶金,2020,30(9):11-23.
- [8] 李昭昆,雷建中,徐海峰,等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报,2016,28(3):1-12.
- [9] 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):119-125.
- [10] 薄鑫涛. 轴承钢的发展[J]. 热处理,2012,27(4):33.
- [11] 虞明全. 轴承钢钢种系列的发展状况[J]. 上海金属,2008(3):49-54.
- [12] 王坤,胡锋,周雯,等. 轴承钢研究现状及发展趋势[J]. 中国冶金,2020,30(9):119-128.
- [13] 俞峰,魏果能,许达. 不锈钢材料的研究和发展[J]. 钢铁研究学报,2005(1):6-9.
- [14] 魏果能,许达,俞峰,等. 高纯H9Cr18不锈钢的组织与性能[J]. 钢铁研究学报,2004(6):37-40+46.
- [15] 叶健熠,仇亚军,高元安,等. 新型不锈钢轴承钢6Cr14Mo冲击韧性与显微亚结构[J]. 特殊钢,2004,25(1):29-31.
- [16] 雷建中,叶健熠,杨巧玲,等. 新型不锈钢轴承钢6Cr14Mo的组织与性能[J]. 轴承,2002(2):25-27+41.
- [17] 李文东,吴春雷,唐光泽,等. 热变形量对M50钢碳化物分布的影响[J]. 材料热处理学报,2012,33(S2):98-100.
- [18] 丁开勇,李雷,冀国良,等. M50NiL轴承钢的奥氏体晶粒长大行为[J]. 材料热处理学报,2016,37(11):166-171.
- [19] 田勇,宋超伟,葛泉江,等. 航空用高温轴承钢CSS-42L热处理技术及其展望[J]. 轧钢,2019,36(6):1-5+28.
- [20] 张鹏,陈鹏飞. CRONIDUR30高氮不锈钢的热处理工艺及组织和性能[J]. 热处理,2020,35(1):1-9.
- [21] 林桐震,郝雪玲,杨红卫,等. 高氮不锈钢Cronidur30轴承套圈锻造工艺设计[J]. 轴承,2019(4):23-25.
- [22] 郑滔,俞峰,张家涛,等. 热处理工艺对高氮不锈钢轴承G30组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2013,38(9):21-25.
- [23] 何加群. 中国工业强国战略和轴承产业[J]. 轴承,2015(1):55-63.
- [24] 张俊江. 高端轴承装备制造业的发展机遇[J]. 轴承,2011(12):59-63.
- [25] 杨晓蔚. 高速铁路轴承概述[J]. 轴承,2011(10):59-61.
- [26] 李尚勇,宋丽,邓四二. 汽车轴承技术及其发展动向[J]. 轴承,2009(7):58-63.
- [27] 俞峰,陈兴品,徐海峰,等. 滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢发展方向[J]. 金属学报,2020,56(4):513-522.
- [28] Xu H F, Wu G L and Wang C, et al. Microstructure, Hardness and Contact Fatigue Properties of X30N High Nitrogen Stainless Bearing Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2018,25(9):954-967.
- [29] Xu H F, Yu F and Wang C, et al. Comparison of Microstructure and Property of High Chromium Bearing Steel with and Without Nitrogen Addition. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017,24(2):206-213.
- [30] 徐海峰,曹文全,俞峰,等. 国内外高氮马氏体不锈钢轴承研究现状与发展[J]. 钢铁,2017,52(1):53-63.
- [31] Cao Z X, Shi Z Y and Liang B, et al. Melting Route Effects on the Rotatory Bending Fatigue and Rolling Contact Fatigue Properties of High Carbon Bearing Steel SAE52100 [J]. International Journal of Fatigue,2020,140:105854.
- [32] 王志蒙,王玉辉,曹文全,等. GCr15轴承钢热变形行为及加工图[J]. 材料热处理学报,2017,38(1):191-197.
- [33] 邢鹏达,王玉辉,王志蒙,等. 基于非均匀温度场的GCr15轴承钢均匀化轧制[J]. 钢铁,2017,52(10):59-64.
- [34] Cao Z X and Shi Z Yu F. Effects of Double Quenching on Fatigue Properties of High Carbon Bearing Steel with Extra-High Purity [J]. International Journal of Fatigue, 2019,128:105176.
- [35] 刘宏基,孙俊杰,江涛,等. 一种超高碳钢的滚动接触疲劳研究[J]. 金属学报,2014,50(12):1446-1452.
- [36] Bhadeshia H K D H. Steels for Bearings [J]. Progress in Materials Science, 2012, 57: 268-435.
- [37] 史智越,徐海峰,许达,等. 冶金工艺对GCr15高周旋转弯曲疲劳性能的影响[J]. 钢铁,2018,53(11):85-92.
- [38] 高宏适. 钢中夹杂物自动检测装置[N]. 世界金属导报,2020-10-13(B07).

曹文全(1969-),男,博士,2003年清华大学博士毕业,正高级工程师,轴承钢、汽车钢、耐磨钢与其他高性能钢铁材料研究。E-mail:caowenquan@necast.com

收稿日期:2020-12-09