

滚动轴承材料及热处理进展与展望(续完)

刘耀中^{1,2,3}, 侯万果^{1,2,3}, 王玉良^{1,2,3}, 纱仲凯^{1,2,3}

(1. 洛阳轴承研究所有限公司, 河南 洛阳 471039; 2. 高性能轴承数字化设计国家科技合作基地, 河南 洛阳 471039; 3. 河南省高性能轴承技术重点实验室, 河南 洛阳 471039)

3 表面涂覆技术

表面涂覆技术包括: 物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、射频溅射(RF)、离子喷涂(PSC)、化学镀等, 可提高轴承零件的耐磨性、接触疲劳抗力, 并降低表面摩擦因数。

3.1 类金刚石涂层

类金刚石(DLC)涂层由石墨结构和金刚石结构的碳构成, 既具有石墨的润滑及低摩擦性能, 又具有金刚石的硬度(1200HV以上), 在许多工业技术中得到应用, 如汽车燃料喷射系统、阀门系、齿轮和滚动轴承等, 这些涂层在滑动状态下通常能表现出更好的耐磨性, 而在轴承类高载荷滚动和混合接触状态下则表现较差, 主要因为涂层在高载荷滚动状态下应用时裂纹在涂层的柱状组织中产生并扩展, 进而导致涂层成片剥落。为避免这种断裂型磨损模式, 必须消除这种柱状晶组织。优化工艺参数和涂层设计可消除涂层中亚微米级别的柱状组织, 大大提高涂层在高载荷滚动和混合接触状态下的持久性, 对涂层进行金属掺杂, 如加入W、Ti、Cr等, 在涂层中形成细小碳化物也有利提高涂层强度和耐磨性。DLC涂层代表轴承硬涂层的一个发展方向, 在降低摩擦磨损、减少表面损伤、提高接触疲劳寿命方面将会越来越多地应用于各种轴承产品。近年来, 涂层改性设计和实际应用成为表面涂覆的热点研究领域。

文献[45]对滚子涂覆纳米复合材料类金刚石碳的滚子轴承性能进行研究。通过非平衡磁控溅射将1 μm厚的W-aC:H涂层沉淀到滚子表面。W-aC:H涂层与钢基体之间有厚度小于100 nm的Cr过渡层以增加涂层与基体的结合力, W-aC:H涂层是一种由层厚为3~5 nm的富含钨和富含碳交替分布构成的层片结构, 每个薄层里的非晶态碳氢化合物基体含有β-W₂C的析出物, 含量约为17%~20%。W-aC:H涂层的压痕硬

度为12, 弹性模量为130 GPa。试验表明, W-aC:H涂层具有很高的耐磨性及硬度, 滚子涂覆W-aC:H的轴承在低A值下工作时可以大幅增加疲劳寿命, 原因是滚道滚动接触区被涂层滚子研磨成镜面, 而且可以磨平由润滑剂中污染颗粒在滚道上形成的压痕。另外, W-aC:H涂层可防止划伤及短期润滑失效的发生, 也可以防止伪压痕类的磨损失效。

文献[46]研究了在正常、乏油及碎屑损伤条件下DLC涂层对球轴承性能的影响。涂覆的DLC涂层有3种: WC/a-C:H, TiC/a-C和Ti/a-C:H。在正常润滑运转时, TiC/a-C涂覆钢球具有更大的扭矩降, 其次是TiC/a-C:H, WC/a-C:H涂覆钢球; 试验中, 相比于TiC/a-C:H, TiC/a-C和未涂覆钢球, WC/a-C:H涂覆钢球能够修复沟道损伤, 改善轴承碎屑损伤后的运转效率。WC/a-C:H, TiC/a-C:H和TiC/a-C涂层改善轴承的抗磨能力因子分别为3.5, 1.7, 1.3, 超过了装配未涂覆钢球轴承在乏油条件下的因子。WC/a-C:H涂覆钢球在碎屑损伤和乏油条件下表现出了最好的保护作用, 这归因于其有利的膜转化能力。

SKF公司近年来一直在进行利用PVD在轴承套圈及滚动体表面涂覆DLC涂层的研究和应用, 其涂覆的DLC涂层表面硬度比淬硬轴承钢高40%~80%、摩擦因数类似于PTFE或MoS₂, 具有自润滑特性, 且与基体结合良好、无剥落, 轴承寿命、耐磨性大幅度提高, 在断油的情况下仍可正常工作, 涂覆DLC的轴承被称为“no wear bearing”, 该技术早已应用于压缩机轴承、造纸机械轴承、液压马达轴承, 还拟利用DLC涂层的低摩擦性能, 将其应用于一些节能降耗的场合, 如新能源汽车等。TIMKEN利用W-aC:H涂覆滚子, 避免了滚子轴承因滚动接触面间的滑动引起的黏着磨损(涂抹)^[47]。

近年来, 国内对DLC类涂层进行了较多研究。

除 DLC 外,西安理工大学等开发了 Cr 掺杂 GLC 涂层(图 8),通过使用 Cr 过渡层提高涂层与基体的结合力,并通过 C/Cr 多层复合成膜技术提高涂层强度,除低摩擦磨损外,且无触媒效应,脆性更低,结合强度更好,已成功应用于切削刀具,大大

提高了刀具寿命。在轴承上也进行了初步的应用试验,钢球涂覆 GLC 的轴承试验表明:在高速下,轴承振动、温升显著降低,且 GLC 可作为固体润滑材料,使轴承在短时断油后仍可运转一定时间,该特性对于航空发动机轴承尤其重要。

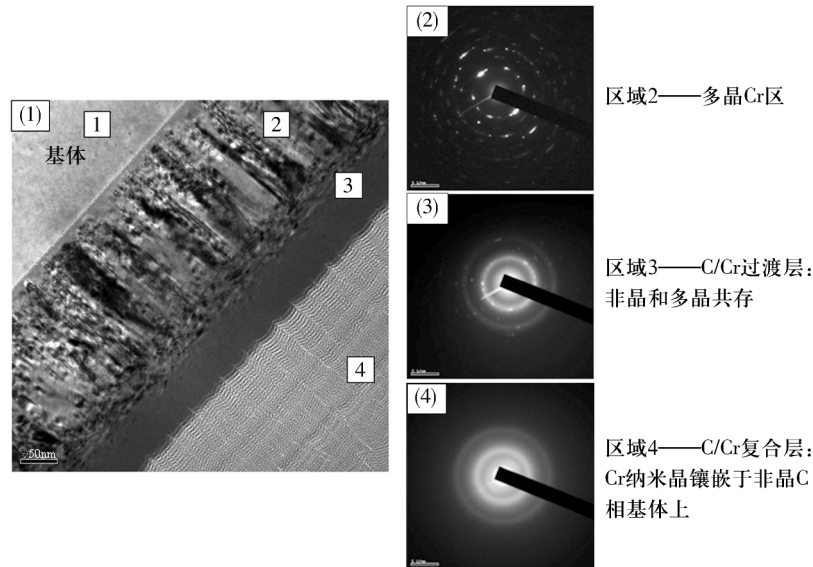


图 8 Cr 掺 GLC 涂层

Fig. 8 Coating doped with CrGLC

3.2 固体润滑涂层

固体润滑涂层主要是涂覆具有润滑性能的软材料或层片结构材料,具有良好的润滑性能,一般应用于真空等不易使用油、脂润滑的场合。

软金属涂层有 Au、Ag、Pb 等,一般采用离子镀或溅射成膜,应用于高真空用滚动轴承,或用于改善保持架与滚动体间的润滑状态,如航空发动机轴承保持架镀银。

典型的层片结构材料如 MoS_2 、石墨等,一般采用溅射或使用有机、无机黏接剂烧结成膜, MoS_2 一般用于高真空,石墨一般用于高温。

高分子材料以 PTFE 为代表,具有独特的带结构,表现出低摩擦,容易在配对面形成转移润滑膜,耐化学药品,且不易受环境介质影响,一般采用黏接剂烧结成膜,应用于清洁或耐蚀环境用轴承。

纳米金刚石处于滚动接触面时可像轴承中的滚动体一样减小摩擦,纳米金刚石涂层也可作为润滑涂层,硬度可能超过金刚石的 CN_x ,同样可作为固体润滑材料使用^[48]。

3.3 其他涂层

文献[49]介绍铁路拖动电动机用绝缘轴承。一种是在外圈外径面及端面喷涂氧化铝涂层并采用树脂封孔;一种是喷涂玻璃纤维增强 PPS 树脂,

并在其中添加非导电的高导热填充物,提高导热性。2 种涂层均具有较高的绝缘性能,可避免电蚀且温升与非涂层轴承相同,能够有效延长轴承寿命。

文献[50]介绍了利用聚合物材料提高机床主轴轴承寿命。轴承与轴承座及轴的配合面会发生摩擦腐蚀磨损,增大配合间隙,使轴承中最大接触应力升高。在外圈上涂覆聚合物涂层后,保证外圈与轴的配合面处于弹性接触状态,在受载时涂层发生弹性变形,增加轴承中的有效承载面积,降低最大接触应力,进而提高轴承寿命。在外圈循环加载和局部加载时,外圈涂覆 6ϕ 密封胶(厚度为 0.125 mm)和 BK 聚合物(厚度为 0.09 mm)的轴承寿命分别为计算寿命的 4.3 倍以上。为提高轴承内的载荷分布系数,涂层的厚度应尽可能厚,且应选择低弹性模量的材料。

SKF 研究了发黑对轴承性能的影响^[51],实验室研究、轴承试验和现场经验表明:发黑提供一定的抗摩擦化学腐蚀保护,能减少氢渗透,还能增强抗潮气腐蚀损伤(如静止腐蚀)的能力。此外,当轴承在边界或混合润滑条件下出现黏着磨损、涂抹损伤或表面疲劳等失效形式时,发黑轴承钢表面提高了安全系数。SKF 除了将经过发黑处理的

轴承用于新设备外,还将其用作风力发电厂例行维护中常规轴承的替换品。为使轴承达到最优性能,SKF 建议内圈、外圈和滚动体都进行发黑处理。

低温离子渗硫是 20 世纪 80 年代后期出现的表面改性技术,其基本原理与离子渗氮相似,在一定的真空度下,利用高压直流电使含硫气体电离,生成的硫离子轰击工件表面,在工件表面与铁反应生成以 FeS 为主约 10 μm 厚的硫化物层。硫化物是良好的固体润滑剂,可有效降低钢件接触表面的摩擦因数,且其摩擦因数随载荷增大而进一步降低,因此可以大大提高重载下轴承的耐磨性,将轴承的使用寿命提高 3 倍左右。

低温磷化与渗硫的作用相似。通过把工件放置于 40 °C 的 TAP 溶液(磷酸十三烷酸脂)中浸渗 4 h,可在工件表面获得 0.05 ~ 0.25 μm 厚的 Fe₂O₃ 和 Fe₄(P₂O₇)₃ 表面层,降低摩擦因数并提高耐磨性。经磷化的 M50 钢轴承在短期断油的情况下不出现卡死,提高了轴承的可靠性。

文献 [3] 通过在滚动表面镀镍抑制氢的渗入,大幅度降低钢中的氢含量,防止异常白色组织剥落。

4 异常白色组织剥落及长寿命技术

正常条件下工作的轴承,在接触疲劳应力的作用下也会出现白色组织,但其形态和异常白色组织明显不同。在较高的工作载荷下,经过大量的接触应力循环后,接触区下表层首先出现类似高温回火的黑色组织,而后在黑色组织中出现与滚动方向呈 30° 左右的白色条带,继而出现与滚动方向呈 80° 左右的白色条带,最后在该区域萌生裂纹成为疲劳源,扩展至表面形成疲劳剥落。若无夹杂物等其他有害因素导致的疲劳剥落出现,这种正常白色组织剥落的寿命极长,在 3 000 MPa 的最大接触应力下,轴承寿命可达 1 × 10¹⁰ r 以上。

异常白色组织疲劳剥落是近年来出现较多的新型疲劳剥落形式,主要是发生于周边存在电磁环境情况下的轴承(如电机轴承),工作中内部存在较大滑动的轴承(调心滚子轴承)或受到冲击、振动等的轴承,在滚动接触面下的次表层中出现不规则的块状白色组织,白色组织中伴生有裂纹(图 9)。出现该组织时,轴承疲劳剥落寿命很短,约为正常寿命的 1/10 ~ 1/5。异常白色组织的微观结构尽管与正常白色组织一样,由纳米级的铁素体颗粒组成,但其硬度较高(相对于未发生变化的基体马氏体组织),可达 75 HRC,且其内还有

非常细小的碳化物析出。接触疲劳中常见的蝶状组织也属此类^[52]。

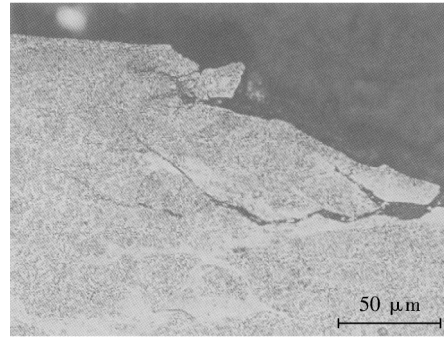


图 9 异常白色组织剥落

Fig. 9 Abnormal white structure flaking

国内外研究者对产生异常白色组织的机理开展了大量的工作,但对其形成机理尚未形成统一认知。一种机理是氢致脆性剥落;另一种则认为由于钢中裂纹面的相互摩擦而产生,即在白色组织形成之前,钢中已经存在裂纹(如钢中夹杂物在热加工过程中与基体脱开,淬火微裂纹,空洞等),或在接触疲劳过程中产生的裂纹(如被弱化的原奥氏体晶界处),裂纹面在交变接触应力的作用下发生相互摩擦,使裂纹附近的材料发生绝热变形,并使碳化物溶解,发生机械固溶,形成硬的白色组织。

目前,较为流行的理念是该类白色组织剥落是由氢引起的,其产生机理如图 10 所示^[53]。处于接触面间的润滑剂在高温高压或受电流(电荷)的放电影响,并受接触金属的催化作用,发生摩擦化学反应,分解产生氢原子或离子,氢原子吸附于接触面并向金属内扩散,在最大剪应力区的微小缺陷处聚集,当氢含量大于某一临界值 H_c 时,最终形成白色组织剥落。原奥氏体晶界为氢扩散和聚集的优先部位,故白色组织优先在该处形成。

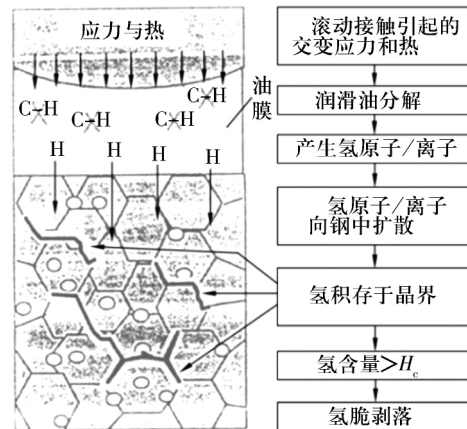


图 10 氢致脆性剥落机理

Fig. 10 Hydrogen brittle flaking mechanism

另外,在表面已存在裂纹或夹杂物暴露于滚动表面的情况下,润滑油进入裂纹内,由于裂纹面的新鲜金属对润滑油的分解起催化作用,且裂纹面相互摩擦产生摩擦化学反应促进润滑油分解,从而产生氢离子,靠近裂纹尖端处产生白色组织,加速裂纹扩展,如图 11 所示^[54]。

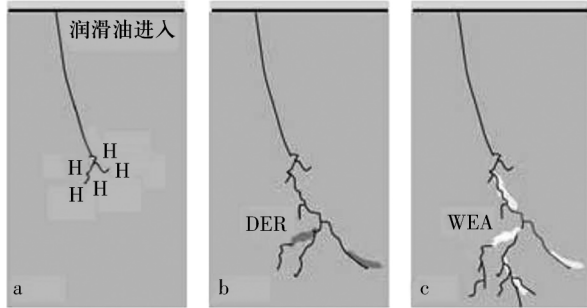


图 11 润滑油进入导致的白色组织裂纹扩展

Fig. 11 White structure crack expansion caused by lubricating oil

关于氢在异常白色组织形成过程中的作用及其对疲劳寿命的影响机理,目前也存在较大的争议。由于正常和异常白色组织均由纳米级的铁素体颗粒组成,可以推测:2 种白色组织的形成均是局部微区发生大量塑性变形的产物;氢的存在加速了这一过程,越是氢浓度高的部位,这种加速作用就越强烈。但由于氢离子在钢中扩散与聚集的不均匀性,使其在不同区域产生的白色组织呈现不规则的异常形态。如原奥氏体晶界,空穴、位错密度高于晶内,有利于氢离子的扩散和聚集,使白色组织优先在晶界形成,并逐步发展成为分叉裂纹;又如裂纹扩展时,裂纹尖端附近的区域应力较高,发生微区变形,产生较高的位错密度,有利于氢离子的聚集,使这些区域更易于产生白色组织和微裂纹,微裂纹与主裂纹连通,使主裂纹呈阶跃式扩展。

对于氢渗入钢中后如何加速白色组织形成和裂纹扩展有多种假设:

1) 内压作用。渗入钢中的氢离子在缺陷(如密集的位错、晶界、夹杂物、碳化物)处聚集结合成 H_2 , 体积增大,产生内压,造成高的应力集中,与外

加应力叠加促进微区变形。当内压足够大时,超过材料的微观断裂强度,直接产生裂纹。

2) 降低位错运动阻力,削弱金属键的结合力。钢中的氢离子向位错处扩散,与位错结合,降低位错运动阻力,同时因削弱金属键的结合力,使局部的位错更容易运动,也使富集氢离子的部位易于发生微观塑性变形,而这些变形大的区域又更易于吸收更多的氢离子,进一步加剧微区塑性变形。

3) 表面吸附作用。氢离子吸附于裂纹面上降低裂纹表面能,从而降低裂纹扩展阻力,加速裂纹扩展。

以上这 3 种作用或有利于异常白色组织的形成,或有利于裂纹的扩展,或二者兼而有之。最终的结果是形成氢致(或氢助)异常白色组织剥落。一般认为:轴承工作过程中接触部位氢的渗入是主要原因。阻止氢的产生、渗入和在特定的区域富集,可有效提高轴承寿命。

应对异常白色组织剥落的长寿命材料及热处理技术思路有:

1) 碳氮共渗或渗碳处理。对 SUJ2 或中碳合金钢(如 NSK 的 TF 钢)进行碳氮共渗,提高表面层碳氮化物的数量,通过细小碳化物或碳氮化物的析出提高滚动表面的耐磨性,以减少活性新鲜金属的形成和氢的产生,同时高的残余压应力可阻碍氢的渗入和扩散,从而提高轴承异常白色组织剥落寿命。

2) 通过添加合金元素降低氢在钢中的扩散和聚集,阻止异常白色组织的形成。应对异常白色组织剥落而进行试验的几种钢的成分及寿命试验结果见表 3^[18]。由表可知,增加钢中 Cr 含量可以阻止氢渗入及在轴承钢中的扩散^[13](图 12);提高钢中 V 含量并经过合适热处理,使 V 与钢中的 C 形成与基体共格的细小 V_4C_3 , 成为捕集氢离子的氢阱,不仅可以降低氢离子在钢中的扩散速度,而且可以分散氢离子的分布,使氢离子不易在某处大量聚集,同时提高热处理后的硬度^[12];钢种添加 8% Cr, 1.9% Mo 及 0.5% V 的 M3 钢具有最好的异常白色组织剥落寿命。

表 3 抗异常白色组织剥落钢

Tab. 3 Anti-abnormal white structure flaking steel

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	N	备注
M1	0.69	1.0	0.3	3.0				发生异常白色组织剥落,但寿命为 52100 的近 2 倍
M2	0.40	0.3	1.0	5.0				未发生异常白色组织剥落,寿命远长于 52100
M3	0.80	0.9	0.4	8.0	1.9	0.5		未发生异常白色组织剥落,寿命远长于 52100,效果最好
M4	0.45	0.3	0.4	13			0.14	未发生异常白色组织剥落,寿命远长于 52100,高于 M2

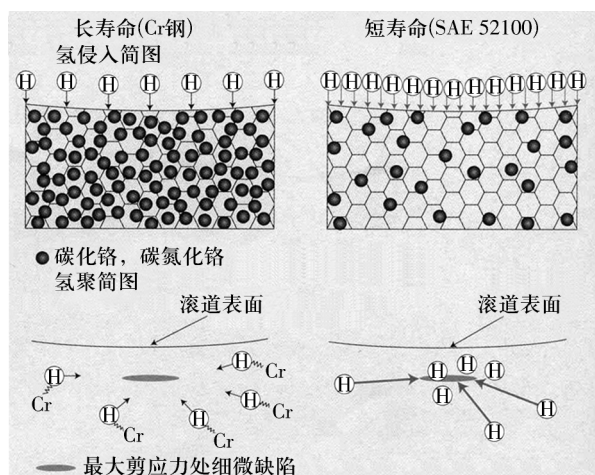


图 12 Cr 的作用机理

Fig. 12 Mechanism of action of Cr

3) 采用绝缘技术,轴承内润滑剂在电场的作用下易发生分解产生氢,在内外圈安装配合面涂覆绝缘层或使用陶瓷球隔绝静电或电流,可避免异常白色组织剥落。

4) 在滚动接触面形成氧化膜等,避免新鲜金属面接触,避免氢的产生,如轴承制造过程对零件进行发黑处理,或在润滑剂中添加合适的添加剂(亚硝酸钠、铜粉、铝粉等),在轴承工作过程中依靠摩擦化学反应在滚动接触面形成氧化膜。

5) 采用导电脂(如在脂中加入纳米石墨)避免静电影响^[55]。

6) 通过滚动表面涂层,如镀镍,抑制氢的渗入,大幅度降低钢中的氢含量,防止异常白色组织剥落^[5]。

关于异常白色组织的形成机理还有大量的研究工作要做。如果按正常白色组织形成机理解释,即发生局部的大量塑性变形,则无法解释异常白色组织的形态及其高硬度;如果单纯按预先存在的裂纹面相互摩擦,则无法解释异常白色组织疲劳剥落过程中白色组织区域形成速度远远超出裂纹区域的形成速度。在实物观察中,有些远离裂纹的地方就出现了白色组织,有些白色组织只出现在裂纹一侧。氢的存在是加速裂纹形成为主,还是加速微区变形先形成白色组织为主,至今没有定论。对异常白色组织的形成机理进行深入研究,找出其产生的先导因素,才能有针对性地采取提高寿命的措施。

5 材料及热处理技术展望

5.1 现有钢种的新应用

现有钢种中,GCr15SiMn,GCr15SiMo 具有较

高的淬透性,一般用于制造大型轴承零件,以获得足够的淬硬层和硬度,根据目前轴承使用工况的变化,这2种钢可用于制造准高温或重载工况下使用的中小型轴承,以提高其承载能力及抗高温性能;GCr18Mo 是为贝氏体淬火开发的钢种,原用于制造经贝氏体淬火处理的铁路、轧机轴承,现可开展用于带电环境下工作的脂润滑轴承的研究,以提高抗白色组织疲劳剥落的性能。

5.2 开发新钢种

开发不同淬透性的轴承钢以适应不同尺寸轴承零件的要求,避免为保证零件的淬硬层而采取过度加热和激烈冷却而带来的不利影响(淬火裂纹、变形等),解决我国轴承钢种单一的问题。

开发不同用途的轴承钢以适应不同轴承用途的要求,如:开发新型马氏体不锈钢、准高温用钢、耐水系列轴承钢、耐污染轴承钢、抗白色组织疲劳剥落的钢种、高氮钢 HNS(X30,ESI) 等。

5.3 提高现有材料的质量

改善夹杂物的性质、分布及尺寸均匀性,提高轴承的寿命及可靠性。在氧含量较低的水平下,夹杂物的总量较低,但偶尔有个别大尺寸的氧化物碰巧出现在滚道面或次表面最大应力区,会造成轴承寿命非常短,从而使整批轴承的可靠性大大下降。因此,在降低氧含量的同时要严格控制夹杂物的均匀性,如严格选取炼钢原料,改进冶炼工艺及轧钢工艺等。

改善碳化物及成分均匀性。国产轴承钢的碳浓度分布不均匀,碳化物尺寸大且分布不均匀,出现大颗粒、带状碳化物等,破坏了基体的连续性,变形协调能力及碳化物的有益作用,影响加工质量。可通过钢水浇注增加电磁搅拌,加大钢坯尺寸和轧制比,并进行 1 200 ~ 1 250 °C 的长时间高温退火等措施,均匀成分,改善碳化物的分布。

5.4 改进常规马氏体淬火技术

目前,轴承零件的常规马氏体淬火多采用铸链炉、网带炉、辊底炉等连续淬火设备,淬火后的组织、硬度等指标很容易控制在所期望的范围内。此类淬火工艺今后的发展方向有以下 2 个方面。

5.4.1 淬火变形的控制

淬火加热设备基本采用了保护气氛或可控气氛,可以保证不脱碳或根据需要进行复碳、渗碳,从而大大压缩热处理后的加工余量。但加工余量的可压缩程度往往受到淬火变形的制约,目前,淬火变形(尤其是畸变)成为控制加工余量的主要因

素。例如,对于密封防尘轴承的套圈,淬火畸变将影响防尘盖的压入,进而影响密封性能。因此,减小淬火畸变或实现零畸变将是常规马氏体淬火需要解决的主要问题。影响淬火畸变的因素繁多,变形机理较为复杂,因此,每个生产厂家应根据自身设备和产品特点,从生产实践中探索出一些有效控制畸变的措施,如控制工件的摆放、入油方式、淬火油及油温、搅拌等,从而实现少或无畸变淬火。

5.4.2 残余应力及残余奥氏体的控制和评定

我国目前的热检标准中,增加了残余奥氏体含量控制及相应检测方法,但还没有残余应力的评定指标限制。大量的研究表明:残余应力影响零件的接触疲劳性能、韧性和磨削裂纹,适当的残余压应力可以提高接触疲劳寿命,防止磨削及安装裂纹的产生;残余奥氏体降低尺寸稳定性,其影响程度与残余奥氏体本身的稳定性、数量和存在部位有关,但适量的残余奥氏体可以提高断裂韧性和接触疲劳性能。

多家国外的著名轴承公司已把残余应力和残余奥氏体列入热处理控制指标,因此,进一步开展残余应力和残余奥氏体对热处理后性能的影响及其机理的研究,开展淬回火工艺对残余应力和残余奥氏体影响的研究,进而根据轴承的工况提出残余应力和残余奥氏体的控制指标等,将是我国轴承行业热处理研究的主要方向之一。

5.5 开发贝氏体等温淬火新钢种及新工艺

就贝氏体等温淬火而言,虽然对其工艺、组织、性能进行了较为系统的研究,但在大力推广此工艺的同时,应注意该工艺的限制,并非所有的轴承零件均适合贝氏体等温淬火。

同时,应开展纳米贝氏体等温淬火用钢的开发,进一步提高贝氏体等温淬火后的性能。另外,需开展贝氏体等温淬火介质和相关技术研究,一方面开发控制盐浴含水量的技术以保证盐浴的冷却性能;另一方面寻求替代介质和技术以减少环境污染,如采用无毒盐浴代替硝酸盐或采用其他冷却方式代替盐浴(控制喷水冷却);三是开展贝氏体淬火工艺研究,缩短等温时间。

5.6 进一步开展碳氮共渗及渗碳热处理技术研究

近年来,洛阳轴承研究所与有关单位合作,开展了高碳铬轴承钢的碳氮共渗或渗碳热处理工艺研究,同时独家开展了中碳合金钢特殊热处理工艺的研究。研究结果表明:通过碳氮共渗或渗碳

热处理可以显著提高接触疲劳寿命。这一工艺在轴承行业具有重大的推广价值,已在不少企业得到应用。但仍有许多问题需要研究,如对不同工况的轴承零件,如何得到最佳的渗层深度和组织,并进一步细化碳氮化物,增加其数量,如何改变钢的成分在渗后得到氮化硅、碳化钒等特殊化合物从而进一步提高零件性能等。

对于渗碳钢常规渗碳,国内目前主要控制渗层深度、表面碳含量及碳化物形态,国外先进企业还控制碳浓度及残余应力沿深度的分布趋势。应针对不同零件开展碳浓度及残余应力沿深度分布的研究,以优化渗后性能。

5.7 表面改性技术

轴承零件主要工作表面为滚动接触面,进行表面涂层及其他改性处理可大幅提高轴承性能。我国轴承行业从20世纪80年代开始离子注入、涂覆 MoS_2 类软膜等在轴承上的应用研究,并成功应用于航空、航天领域,取得了良好的效果。近年来,在轴承外圈涂覆陶瓷绝缘涂层也成功应用于铁路牵引电机轴承,但其他硬涂层的研究和应用相对落后,应开展DLC、GLC、TiN、TiAlN等硬膜涂层的相关研究。

另外,应大力开展其他表面改性技术的研究,如高能束(如激光)表面淬火、表面熔覆、表面织构处理等,改善表面性能及形貌,提高耐磨性及润滑性能。

6 结束语

纵观国内外轴承热处理技术的发展,我国轴承行业与国外发达国家的材料及热处理技术尚有较大的差距,严重制约着我国轴承质量,尤其是寿命和可靠性的提高。整个轴承行业应注重新材料的开发,注重热处理基础理论和新技术的研究,并将研究成果在实际生产中大力推广应用,以尽快提高我国轴承材料及热处理水平。

参考文献:

- [1] 中島碩一,HIROKAZU NAKASHIMA. ころがり軸受の材料・熱処理技術の動向[J]. NTN Technical Review 2008(76):10-16.
- [2] 宗男夫,张慧,张兴中. 国内外高品质轴承钢洁净化与均质化控制技术的进展[J]. 轴承 2017(1):48-53.
- [3] 木野仲郎. 氢对滚动疲劳寿命的影响及对策[J]. 国外轴承技术 2003(4):26-30.

- [4] STOVER J D. 使用非金属夹杂物含量很低的空气熔炼钢改善滚动轴承的寿命[J]. 国外轴承, 1992(5): 21-25.
- [5] 佐田隆. 非金属介在物と母材との密着による転がり軸受の寿命向上(第1報)[J]. トライボロジスト 2016 61(4): 68-77.
- [6] 宗男夫 张慧, 刘洋, 等. 连铸轴承钢压下技术的研究与应用进展[J]. 轴承 2018(1): 58-64.
- [7] 木南俊哉, 木村利光. 特殊环境用轴承钢的开发[J]. 国外轴承技术 2005(3): 57-60.
- [8] 大崎浩志. 添加 Si 和 Mo 的新型轴承钢在准高温下的滚动疲劳特性[J]. 国外轴承技术 2008(2): 41-47.
- [9] UEDA T, MITAMURA N. Mechanism of dent initiated flaking and bearing life enhancement technology under contaminated lubrication condition. part II: effect of rolling element surface roughness on flaking resulting from dents, and life enhancement technology of rolling bearings under contaminated lubrication condition [J]. Tribology International 2009(42): 1832-1837.
- [10] TAKANORI OOSHIMA, SATOSHI MASUDA. New technology for bearings in electric vehicle and hybrid electric vehicle and hybrid electric vehicle powertrains [J]. Motion & Control 2017 28: 32-46.
- [11] 山村贤二. SWR™ 轴承的开发[J]. 国外轴承技术, 2003(2): 35-39.
- [12] SZOST B A, VEGTER R H, RI VERA - DÍAZ - DEL - CASTILLO P E J. Developing bearing steels combining hydrogen resistance and improved hardness [J]. Materials and Design 2013(43): 499-506.
- [13] FUJITA S. Long-life materials countering white structure flaking [J]. Motion & Control 2006 19: 20-26.
- [14] BAHNSEN C. Verbesserung der zerspanbarkeit des wälzlagerstahls 100Cr bei gleichzeitig höher schwingfestigkeit mit hilfe des sprühkompaktierens [J]. Z. Werkst. Wärmebeh. Fertigung 2004.
- [15] CLEMONS K. 热处理对轴承用钢的影响[J]. 国外轴承技术 2008(2): 58-62.
- [16] YOKOTA K. Technological trends and outlook automotive bearings [J]. JTEKT Engineering Journal, 2017 (1014E): 14-21.
- [17] KITTAMURA M. 汽车传动系轴承的技术发展趋势[J]. 国外轴承技术 2005(2): 1-5.
- [18] GOTOH M. 大容量圆锥滚子轴承(KE-II)的研制[J]. 国外轴承技术 2005(4): 43-47.
- [19] YUKIO OHURA. 机床主轴用 ROBUST 系列高速精密角接触球轴承[J]. 国外轴承技术 2001(3): 42-48.
- [20] 田中進. 带式 CVJ 带轮支承轴承[J]. 国外轴承技术 2007(3): 1-6.
- [21] 三田村宣晶. 轉がり軸受け材料[J]. ふえろす, 2006 11(12).
- [22] 清史平川. 滚动接触下内圈的断裂特征[J]. 国外轴承技术 2001(3): 49-56.
- [23] 松本洋一. 水混入润滑条件下的滚动疲劳[J]. 国外轴承技术 2005(4): 36-43.
- [24] 国分秀树. 高性能表面改質術“ール”DS“ール”の開[J]. NSK Technical Journal 2003(675): 14-17.
- [25] 後藤蔭夫. 耐锈蚀长寿命表面硬化轴承钢[J]. 国外轴承技术 2009(2): 61-64.
- [26] KÖPF A. Verschleiß mindrung an miniature - und kleinkugellagern durch verwendung eines neub, stickstofflegierten wälzlagerstahls [J]. Tribologie schmierungstechnik 2002.
- [27] HETZNER D W. 易渗碳高速钢轴承合金[J]. 国外轴承技术 2005(1): 36-39.
- [28] KLECKA M A, SUBHASH G, ARAKERE N K. Microstructure - property relationships in M50 - NiL and P675 case - hardened bearing steels [J]. Tribology Transactions 2013 56(6): 1046-1059.
- [29] VIEILARD C, BRIZMER V, KADIN Y. Benefits of hybrid bearings in severe conditions [J]. Evolution 2017(3): 21-26.
- [30] ЧЕРМЕЧКИ О Н. 不同硬度的轴承的工作性能[J]. 国外轴承技术 2005(2): 54-58.
- [31] 樋口博和. 最近の軸受の動向とユーザーニーズ[J]. 特殊鋼 2009 58(7): 7-16.
- [32] GHEORGHIES C, STEFANESCU I I. Effects of thermo-magnetic treatment on microstructure and mechanical properties of rolling bearing steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(9): 46-52.
- [33] SRI S R, AROCKIA J M, MOHAN L D. Enhancing the wear resistance of 100Cr6 bearing steel using cryogenic treatment [J]. Tribology Transactions 2012 55(3): 387-393.
- [34] BARTARYA G, CHOUDHURY S K. Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI 521000 grade steel [J]. Procedia CIRP 2012 7: 651-656.
- [35] BRYAN A, GHATU S, NAGARAJ A, et al. Influence of initial residual stress on material properties of bearing steel during rolling contact fatigue [J]. Tribology Transactions 2014 57(3): 533-545.
- [36] 张福成 杨志南, 雷建中, 等. 贝氏体钢在轴承中的应用进展[J]. 轴承 2017(1): 54-64.
- [37] KARTHIKEYAN R, VINOD J, ARINDAM G. Effect of carbonitriding on endurance life of ball bearing produced from SAE 52100 bearing steels [J]. Journal of

Surface Engineered Materials and Advanced Technology 2013(3):172-177.

[38] DAISUKE S,CHIKARA O. Rolling contact fatigue life of highly-carbonitrided JIS-SUJ2 [J]. NTN Technical Review 2013(81):78-84.

[39] XIE L C,PALMER D,OTTO F. Effect of surface hardening technique and case depth on rolling contact fatigue behavior of alloy steels [J]. Tribology Transactions 2015,58(2):215-224.

[40] GLOECKNER P,EBERT F J. Micro-sliding in high-speed aircraft engine ball bearings [J]. Tribology Transactions 2010,53(3):369-375.

[41] YAGITA K,OHKI C. Plasma nitriding treatment of high alloy steel for bearing components [J]. NTN Technical Review 2010(78):33-40.

[42] 星野照男. 轴承相关基础技术 [J]. 国外轴承技术, 2003(1):54-65.

[43] FUJITA T,SUZUKI N. Development of induction through-hardening and induction tempering methods with temperature control and microstructural control in bearing steel [J]. NTN Technical Review 2012(80):33-40.

[44] YUKI H,SATO M. Influence of induction heating conditions on bearing steel characteristics [J]. NTN Technical Review 2015(83):75-80.

[45] ECKELS M,KOTZALAS M N,DOLL G L. Attaining high levels of bearing performance with a nanocomposite diamond-like carbon coating [J]. Tribology Transactions 2013,56(3):410-416.

[46] MUTYALA K C,SINGH H,EVANS R D,et al. Effect of diamond-like carbon coatings on ball bearing performance in normal oil-starved and debris-damaged conditions [J]. Tribology Transactions 2016,59(6):1039-1047.

[47] EVANS R D,BARR T A,HOUPTERT L,et al. Prevention of smearing damage in cylindrical roller bearings [J]. Tribology Transactions 2013,56(5):703-716.

[48] 铃木雅裕. 滚动轴承表面处理技术的动向 [J]. 国外轴承技术, 2006(4):43-46.

[49] 山田孝则,内山贵彦. 铁路机车主轴绝缘轴承 [J]. 国外轴承技术, 2006(1):56-59.

[50] Р. И. ДИ. 利用聚合物材料提高机床主轴轴承寿命 [J]. 国外轴承技术, 2006(2):26-28.

[51] BRIZMER V,STADLER K,HAN B,et al. Benefits of using black oxidized bearings in wind applications [J]. Evolution 2015(2):25-30.

[52] BHADESHIA H K D H. Steels for bearings [J]. Progress in Materials Science 2012,57(2):268-435.

[53] HOLWEGER W,WOLF M,MERK D,et al. White etching crack root cause investigation [J]. Tribology Transactions 2015,58(1):59-69.

[54] 木野伸郎. 轉動疲労寿命にげず水素の影響とさの対策 [C]. 自動車技术会论文集, 2003.

[55] 磯贤一. Research work for clarifying the mechanism of white structure flaking and extending the life of bearing [J]. Motion & Control 2006,19(9):27-35.

(编辑:张旭)

《轴承》被 EBSCO 学术数据库全文收录

