

## 我国轴承零件热处理现状及对策

刘耀中

洛阳轴承研究所，河南 洛阳 471039

随着主机的高速化、轻量化，轴承的工作条件更加苛刻，对轴承的性能要求越来越高，如更小的体积、更轻的质量、更大的承载容量、更高的寿命和可靠性等。其中，国产轴承的寿命和可靠性成为近年来越来越突出的问题，开发热处理新技术、提高热处理质量一直是国内外轴承生产企业及相关企事业单位关注的课题。本文对近年来热处理技术的进展进行综述，以期对我国的轴承行业相关人员有所借鉴。

### 1. 高碳铬轴承钢的退火

高碳铬轴承钢的理想退火组织是铁素体基体上分布着细、小、匀、圆的碳化物颗粒的组织，为以后的冷加工及最终的淬回火作组织准备。目前，除少数企业使用周期式设备外，普遍使用的是无保护气氛的单通道推杆式等温退火炉。退火的组织和硬度控制已比较成熟可靠，可较容易地把退火组织控制在JB1255标准中的2~3级或细点组织。存在的问题是能耗偏高、退火后氧化脱碳严重。近年来，从节能的角度出发，开发了油电复合加热等温退火炉、双室首尾并置（水平或上下）的等温退火炉，节能效果显著，应大力推广；同时，随着毛坯精密成形工艺和设备的出现，开始采用氨基保护气氛等温退火炉，以减少退火过程中的氧化脱碳，降低原材料的消耗和机加工成本。

### 2. 高碳铬轴承钢的马氏体淬回火

常规的高碳铬轴承钢马氏体淬回火工艺的发展主要分3个方面：一是开展淬回火工艺参数对组织和性能影响的基础性研究，如淬回火过程中的组织转变、残余奥氏体的分解、淬回火后的韧性与疲劳性能等；二是淬回火的工艺性能的研究，如淬火条件对尺寸和变形的影响、尺寸稳定性等；三是取缔氧化或保护气氛加热，推广可控气氛加热。

#### 2.1 组织与性能

常规马氏体淬火后的组织为马氏体、残余奥氏体和未溶（残留）碳化物组成。轴承钢淬火后马氏体基体含碳量为0.55%左右，组织形态一般为板条和片状马氏体的混合组织，或称介于二者之间的中间形态—枣核状马氏体，轴承行业上所谓的隐晶马氏体、结晶马氏体；其亚结构主要为位错缠结以及少量的孪晶。随淬火温度升高或保温时间延长，组织形态逐步由隐晶→结晶→细小针状过度。一般淬火后的正常组织为隐晶+结晶+细小针状马氏体的混合物。一旦出现大量明显的针状马氏体，则组织为不合格组织，应设法避免。

关于淬回火对性能的影响，国内外也进行了大量研究。洛阳轴承研究所在20世纪80年代开展了“GCr15钢热处理工艺的研究”。研究表明：淬火加热为835~865℃、回火为150~180℃时，能获得较好的综合力学性能和接触疲劳寿命，845℃淬火时，压碎载荷最高，疲劳寿命最长；随回火温度升高和保温时间的延长，硬度下降，强度和韧性提高。对有特殊要求的零件或采用较高温度回火以提高轴承的使用温度，或在淬火与回火之间进行-50~-78℃的冷处理以提高轴承的尺寸稳定性，或进行马氏体分级淬火以稳定残余奥氏体获得高的尺寸稳定性和较高的韧性。轴承钢淬火加热后在250℃进行短时分级等温空冷，接着进行180℃回火，或在马氏体转变温度等温（马氏体等温淬火），可使淬后的马氏体中碳浓度分布更为均匀，增加稳定的残余奥氏体量，冲击韧性比常规淬回火提高一倍。

目前，国外的轴承普遍采用所谓的个性化设计，即供应轴承前对轴承的工况条件进行调查，针对工况开展针对性设计，对热处理质量也提出针对性的要求，已使轴承寿命最长。国内对轴承零件的热处理要求统一按JB1255控制，相对较为粗犷，非个性化。应针对轴承工况细化要求，并注意内外圈与滚动体的硬度匹配。

#### 2.2 常规马氏体淬火的发展动向

目前，轴承零件的常规马氏体淬火多采用铸链炉、网带炉等连续淬火设备，淬火后的组织、硬度等指标很容易控制在所期望的范围内。对此类淬火工艺，今后的发展方向有以下两方面：

##### 2.3.1 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或渗碳，从而可以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又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；且对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。因影响淬火畸变的因素繁多，变形的机理较为复杂，所以，每个生产厂家应根据自身的设备和产品特点等多方面的因素，从生产实践中探索出一些控制畸变的、行之有效的措施，如控制工件的摆放、入油方式、淬火油及油温、搅拌等，实现少、无畸变淬火。

### 2.3.2 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，对残余应力和残余奥氏体没有评定指标限制。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等，将是我国轴承行业热处理研究的主要方向之一。

## 3. 贝氏体等温淬火

贝氏体等温淬火是近年来国内轴承行业研究的热点。自20世纪80年代开始，洛阳轴承研究所与重庆轴承厂合作，开始了贝氏体等温淬火在铁路轴承上的应用研究，随后与沙河轧机轴承厂开展了贝氏体等温淬火在轧机轴承上的应用研究，均取得了良好的效果，并在JB1255-1991中引入贝氏体等温淬火相关的推荐性技术要求。同时，轴承行业也开始了贝氏体等温淬火的推广应用研究。借助于国家“八五”重点企业技术开发项目“铁路客车轴承”，有关单位对贝氏体等温淬火的组织与性能进行了较为系统的研究，并成功地应用于准高速铁路轴承的生产中。2001年在修订JB1255时，正式将贝氏体等温淬火的技术内容列入标准正式条文。贝氏体淬火工艺在轧机、机车、铁客等轴承上得到较为广泛的推广应用。

贝氏体组织的突出特点是冲击韧性、断裂韧性、耐磨性、尺寸稳定性好，表面残余应力为压应力。因此适用于装配过盈量大、服役条件差的轴承，如承受大冲击负荷的铁路、轧机、起重机等轴承，润滑条件不良的矿山运输机械或矿山装卸系统、煤矿用轴承等。高碳铬轴承钢BL等温淬火工艺已在铁路、轧机轴承上得到成功应用，取得了较好效果。

在铁路、轧机轴承生产中，由于套圈尺寸大、重量重，油淬火时马氏体组织脆性大，为使淬火后获得高硬度常采取强冷却措施，结果导致淬火微裂纹；由于马氏体淬火后表面为拉应力，在磨加工时磨削应力的叠加使整体应力水平提高，易形成磨削裂纹，造成批量废品。而贝氏体淬火时，由于贝氏体组织比M组织韧性好得多，同时表面形成高达-400~-500MPa的压应力，极大地减小了淬火裂纹倾向[16]；在磨加工时表面压应力抵消了部分磨削应力，使整体应力水平下降，大大减少了磨削裂纹。

SKF公司把高碳铬轴承钢贝氏体等温淬火工艺主要应用于铁路轴承、轧机轴承以及在特殊工况下使用的轴承，同时开发了适合于贝氏体淬火的钢种（SKF24、SKF25、100Mo7）。其淬火时采用较长的等温时间，淬后得到全下贝氏体组织。近来，SKF又研制出一种新钢种775V，并通过特殊的等温淬火得到更均匀的下贝氏体，淬后硬度增加的同时其韧性比常规等温淬火提高60%，耐磨性提高了3倍，处理的套圈壁厚超过100mm。

部分等温后得到马氏体/贝氏体复合组织的性能尚有争议，如BL的含量多少为最佳等。即使有一最佳含量，在生产实际中如何控制，且复合组织在等温后还需进行一次附加回火，增加了生产成本。另外，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。还应开展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；开展取代硝盐等温的热处理设备的研制，减少环境污染等等。

## 4. 特殊热处理

高碳铬轴承钢一般是整体淬硬，淬后的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。一类特殊热处理是通过高碳铬轴承钢进行渗碳、渗氮或碳氮共渗，提高表层的碳、氮含量，降低表面层的Ms点，在淬火过程中表面后发生转变而形成表面压应力，提高耐磨性及滚动接触疲劳性能[17, 18]。另一方面，通过一定的方法使热处理后的轴承零件中保留一定量稳定的残余奥氏体，利用易变形的残余奥氏体降低压痕的边缘效应，使起源于压痕边沿的表面疲劳源不易形成和扩展，从而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。NSK的NSJ2钢[19]及KOYO的SH技术[20]正是基于这一理论开发的。

另一类特殊热处理方法是采用基体碳含量较高（0.4%）的高韧性渗碳钢并配合特殊的渗碳或碳氮共渗热处理。首先，对渗碳钢的成分进行调整：在保证韧性的前提下提高基体碳含量以提高基体强度，同时提高Si、Mn含量以提高残余奥氏体的稳定性，加入Mo以细化碳化物、碳氮化物。其次是严格控制渗碳或碳氮共渗工艺，使零件处理后在其表面得到较多的残余奥氏体（约30%~35%）和大量细小的碳化物、碳氮化物。一方面，大量细小的碳化物、碳氮化物可保证表面的硬度和耐磨性使压痕不易形成；另一方面，即使形成压痕，较多的稳定残余奥氏体也可降低其边缘效应，阻止疲劳源的形成和扩展。基于这一理论，NSK、KOYO分别开发了TF系列技术（HTF、STF、NTF）和KE技术，大大提高了轴承在污染润滑条件下的寿命。如NSK采用HTF技术生产的圆锥滚子轴承在污染润滑条件下的疲劳寿命为普通轴承的10倍[21]。NSK等公司在多种新开发的轴承产品中使用了特殊热处理技术。

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特殊热处理工艺研究，同时还独家开展了中碳合金钢特殊热处理工艺的研究。初步的研究结果表明：通过特殊热处理可以显著通过接触疲劳寿命。这一工艺将在轴承行业具有重大的推广价值，并将成为我国轴承行业研究和应用的热点技术。

## 5. 表面改性技术

### 5.1 离子注入

美国海军实验室从1979年起进行了轴承零件离子注入的研究，英国、丹麦和葡萄牙等国从1989年开始进行与美国海军实验室类似的工作。结果表明：注入铬离子能显著提高M50钢的抗腐蚀性能，而且抗接触疲劳性能也有所提高；此外还用注入硼离子来提高仪表轴承的抗磨损能力；对轴承钢52100进行氮等离子源离子注入（PS II）后在表面形成薄层氮化物，可提高轴承钢的耐蚀性，用于代替昂贵的不锈钢；对SUS440C不锈钢球轴承进行氮、硼离子注入可减小球轴承微小摆动的微振磨损及轴承的灰尘排放，另外，对不锈钢进行（Ti+N）或（Ta+N）等离子体浸没离子注入（PSIII）可显著提高其显微硬度、耐磨性和寿命。

我国轴承行业从20世纪80年代开始离子注入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。

### 5.2 表面涂覆

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（Plasma spraying coating, PSC）、化学镀等。PVD与CVD相比，其工艺过程中被处理工件的温生低，镀后不需再进行热处理，在轴承零件的表面处理中得到较广泛的应用。100Cr6、440C等钢制轴承零件经PVD、CVD或RF镀TiC、TiN、TiAlN硬膜或MoS<sub>2</sub>类软膜等后，可提高轴承零件的耐磨性、接触疲劳抗力，降低表面摩擦系数。

SKF公司近年来开发了两种涂镀技术：一是采用PVD在轴承套圈及滚动体表面镀硬度极高的金刚石结构的碳（Diamond-Like Carbon, DLC），表面硬度比淬硬轴承钢高40%~80%、摩擦系数类似于PTFE或MoS<sub>2</sub>，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，被称为“*No Wear bearing*”；二是采用PSC在轴承的外圈外圆面喷涂一层100 $\mu$ m厚的氧化铝，使轴承的绝缘能力高达1000V以上，通过增加氧化铝的厚度使轴承具有更高绝缘能力。涂镀的氧化铝与基体结合牢固，还可提高轴承的耐蚀性，镀后的轴承（INSOCOATTM bearing）可像一般轴承一样进行安装。

## 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，以尽快提高我国的热处理水平。