

异常白色组织滚动接触疲劳

刘耀中 温朝杰 李超强

洛阳轴承研究所有限公司

摘要：轴承使用过程中出现异常白色组织时滚动接触疲劳寿命大幅度降低。对于近年来国外的研究工作进行了综述，给出了异常白色组织剥落的机理。在分析氢对这一过程的作用后，指出了影响异常白色组织剥落寿命的因素。

关键词：滚动轴承；异常白色组织；疲劳剥落

1 异常白色组织剥落现象

通常，滚动轴承零件在交变接触应力作用下，在最大剪切应力对应的次表面处发生局部塑性变形。当应力足够大、作用时间足够长时，在该区域的显微组织将发生变化，先形成黑色腐蚀区（黑色组织），之后在黑色腐蚀区中出现与滚动方向呈约 30° 、 80° 的白色条带（称之为白色腐蚀区或白色组织），见图 1。随着时间的推移，在白色组织中形成显微裂纹（形核），最终裂纹扩展至接触表面，产生接触疲劳剥落。其时，对应的疲劳寿命很长，有些轴承在整个使用过程中都不会出现白色组织。这种白色组织可称之为正常白色组织。关于正常白色组织的形成机理及影响疲劳寿命的因素可参见文献[1]。

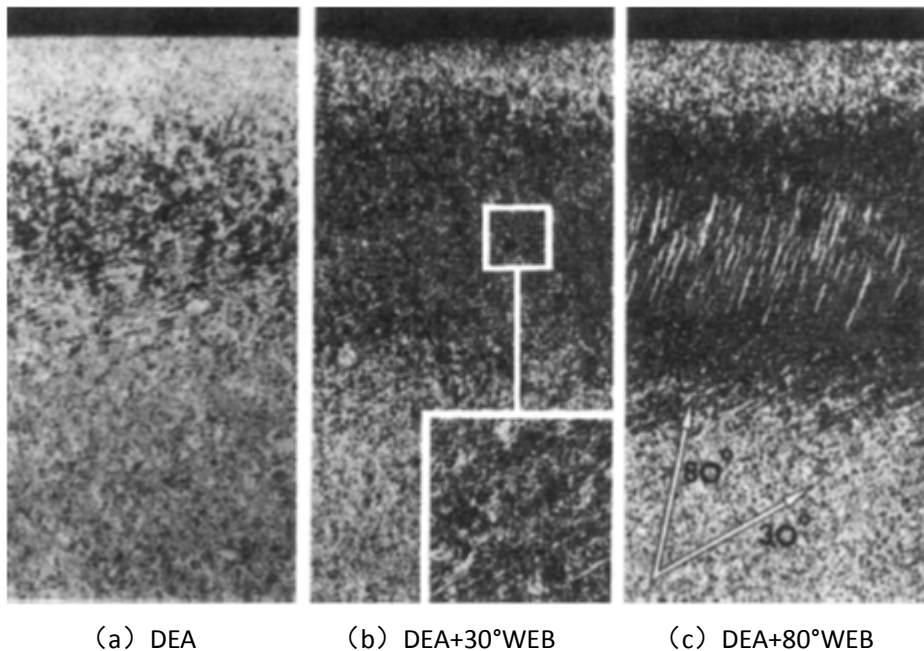


图 1 深沟球轴承内圈滚道面下的组织变化（截面平行于滚动方向，垂直于滚道面）

不少研究者发现，在某些应用场合，当满足一定的条件时，在滚动接触过程中轴承零件内形成不同于正常形态的白色组织，如图 2、3 所示。其形貌不同于正常 30° 、 80° 的白色条带，呈分枝发叉的不规则形状，且常伴有裂纹。这种白色组织称为异常白色组织或不规则白色组织。出现异常白色组织时，在裂纹的前端基体中不断有白色组织和微裂纹形成；这些微裂纹扩展连通，使疲劳裂纹总体上呈阶跃扩展，大大加速裂纹的总体扩展速率，宏观表现为极短疲劳寿命，远远低于正常的寿命，约为正常寿命的 1/10 左右，造成轴承的早期疲劳失效。

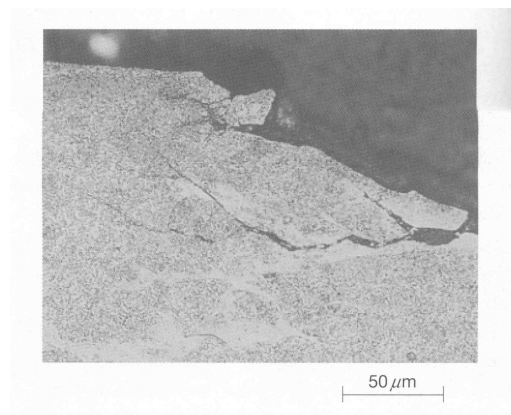


图 2 汽车交流发电机轴承的异常白色组织疲劳^[2]

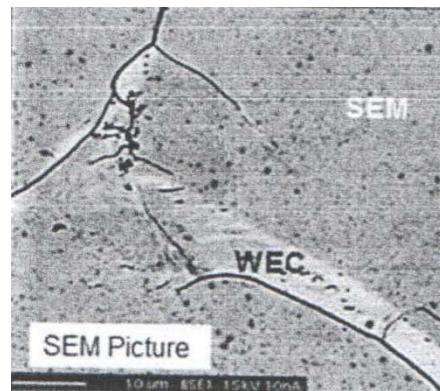


图 3 风电齿轮箱轴承的异常白色组织疲劳^[3]

对正常和异常白色组织进行更微观的结构分析、微区成分分析和硬度分析表明：两种白色组织也同样存在差异。

正常白色组织是碳含量较低(30° 带状物中的碳含量大约为 0.2%)或几乎不含碳(80° 带)的浅色或白色铁素体条。没有残留碳化物或析出碳化物，固溶的碳量很低（相对于未发生变化的基体马氏体组织）。更微观的分析显示：形成的铁素体条是大量塑性变形的产物，其中的位错胞将其分割成为细小的纳米尺度的晶粒（约 20nm），为纳米级的铁素体颗粒组成。白色条带的硬度较低（相对于未发生变化的基体马氏体组织）^[1]。

异常白色组织的微观结构尽管和正常白色组织一样，同为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 75HRC，且其内还有非常细小的碳化物析出。接触疲劳中常见的碟状组织（图 4）也属此类^[4]。

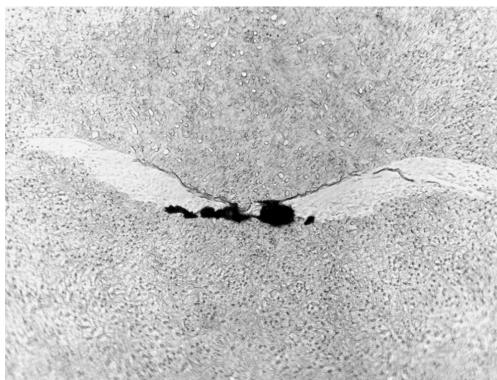


图 4 夹杂物周围的蝴蝶状白色腐蚀区及微裂纹

2 形成机理

国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统一认识。一种机理是氢致脆性剥落。另一种是认为钢中的裂纹面相互摩擦而产生，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5所示。处于接触面间的润滑剂在高温高压下或受电流（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而产生氢原子或离子，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。

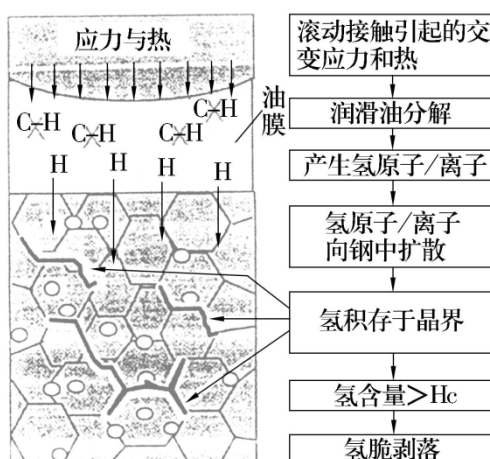


图 5 氢致脆性剥落机理^[5]

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，一是裂纹面的新鲜金属对润滑油的分解起催化作用，二是裂纹面的相互摩擦产生摩擦化

学反应，促进润滑油分解，产生氢离子，靠近裂纹尖端产生白色组织，加速裂纹扩展，如图 6 所示。

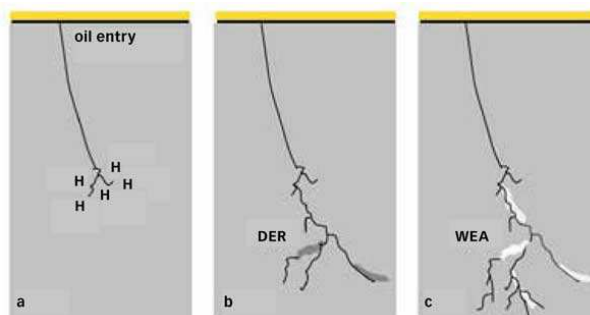


图 6 润滑油进入导致的白色组织裂纹扩展^[6]

关于氢在异常白色组织形成过程中作用及其对疲劳寿命的影响机理，目前也同样存在较大的争议。从微观分析的结果可以看出：无论是正常白色组织还是异常白色组织，其均由纳米级的铁素体颗粒组成。可以推测：两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，如原奥氏体晶界、接触载荷产生的最大剪应力区、裂纹尖端附近的区域等，使氢离子存在时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。

氢渗入钢中后如何加速白色组织的形成和裂纹的扩展，有多种假设，大致可分为：(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^[7]。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。以上这三种作用中，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（氢助）异常白色组织剥落。

3 影响因素

由以上的分析可知：凡有利于氢离子的产生、扩散及聚集的因素，均会影响异常白色组织剥落出现。

3.1 工况环境

滚动轴承的工况环境包括载荷的大小及类型、工作温度、电场或磁场、润滑剂及润滑状态等。这些因素主要是通过影响接触状态来影响氢离子的产生。氢离子的主要来源是润滑剂的分解，滚动接触面上“新鲜”金属对润滑剂的分解起催化作用。

3.1.1 载荷

轴承的载荷越大，滚动接触应力越大，次表层中的最大剪切应力越大，位置越深，应力体积越大，在次表层易于发生位错运动和局部塑性变形，有利于氢的扩散和聚集。同时，滚动面也易于发生金属的直接接触。但过小的载荷易造成滚动体的打滑，产生滑动摩擦和磨损，使“新鲜”的金属暴露于表面，同时发生摩擦化学反应，催化润滑剂分解和氢离子向零件内部扩散。恒定的载荷有利于形成稳定的弹流润滑油膜，方向、大小变化的外部载荷，如振动、急加减速等，则造成油膜的破裂和金属间的直接接触，同时易发生滑动，产生与轻载打滑类似的效果。如风电齿轮箱轴承、振动机械轴承就易于发生异常白色组织剥落。滚道和滚子采用凸度设计，保证安装的同轴度避免偏载等可降低局部接触应力集中；保证最小工作载荷，防止轻载打滑等。这些均可降低次表面和表面的最大剪切应力。

3.1.2 工作温度

工作温度越高，润滑剂黏度越小，油膜越薄，易于产生金属间接触。同时高温也有利于润滑剂的分解和氢、碳离子的扩散和位错的运动。加强轴承散热，降低轴承的内部温度，可提高轴承寿命，如采用减摩设计，加强润滑油的流动，采用轴承座水冷等。

3.1.3 电场（磁场）

轴承工作于电场（磁场）中时，在滚动体和套圈之间形成电位差，达到一定值时发生放电，加速润滑剂的分解。如带式 CVT 带轮轴承等汽车发动机辅机轴承就易于产生异常白色组织剥落^[8]。如采用绝缘轴承或陶瓷滚动体混合轴承，轴承外圈接地；采用导电润滑脂^[2]等，可减低轴承中的电位差，降低轴承中放电风险。

3.1.4 润滑

润滑剂，尤其是润滑脂由多种成分组成，如基础油、增稠剂、防锈添加剂、极压添加剂等。润滑剂一方面影响油膜的形成和厚度，进而影响润滑状态和金属之间的直接接触；另一方面影响轴承运转过程中是否易于在滚动接触表面上形成（或不断形成）钝化膜或磷酸盐覆膜，防止“新鲜”金属面的形成，阻止氢离子的形成和向零件内部的扩散；再者是基础油本身是否容易分解。烃基碳氢化合物基础油在高温下易于分解产生氢离子，烷基二苯醚类基础油则具有较好的抗分解能力^[6,9-10]。在易发生氢致脆性疲劳剥落的场合，

使用芳香族双脲作为增稠剂优于常用的锂皂增稠剂；添加亚硝酸钠能确认寿命变长。在脂中加入铝微粉（粒径 $3\ \mu\text{m}$ ），轴承运转后在滚道面上形成厚度约 300nm 的氧化铝膜，延长寿命。

另外，如果润滑剂中混入硬质污染颗粒，则随着轴承的运转硬质颗粒啃入滚动接触部位，在滚动接触面上形成压痕，产生大的应力集中或直接产生表面微裂纹，使氢离子在表面聚集或使润滑剂沿裂纹渗入，使次表面起源型剥落转变为表面起源型剥落。润滑剂中混入水时，使润滑状态恶化，且有利于氢离子的产生，加速异常白色组织剥落，并使疲劳源向表面迁移^[11]。

3.2 材料及热处理状态

3.2.1 材料

材料的化学成分影响氢离子的形成、扩散和聚集。(1) 提高钢中 Cr 含量，利用 Cr 降低氢在钢中的扩散速率和在微缺陷处的聚集，原理见图 5^[6]；同时，Cr 在钢的表面与空气中的氧结合，生成钝化膜阻止氢离子向钢中扩散。NSK、NTN 在 GCr15 的成分基础上适当增加 Cr 含量，开发了 SHJ5 等新钢种，在清洁脂润滑环境中，发生白色组织剥落的寿命为 SUJ2 的 4 倍以上^[7, 11]。(2) 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，一是降低氢离子在钢中的扩散速度，二是分散氢离子的分布，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]。

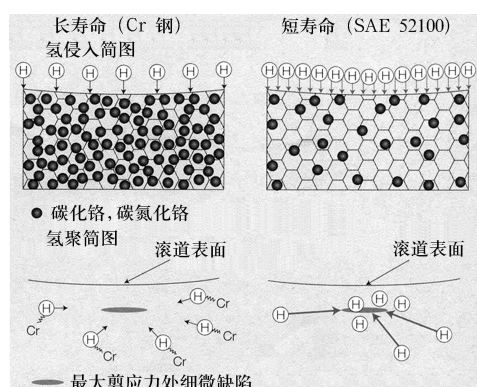


图 5 Cr 的作用机理

3.2.2 热处理

采用特殊的碳氮共渗，一方面利用碳氮共渗在表层形成大的压应力，阻止氢的渗入和扩散；另一方面利用密集细小的碳氮化物减少磨损，进而减少新鲜的金属表面的形成，降低金属的催化作用，使氢不易生成。如 NSK 开发的含 Cr 较高的 SHX3，施以特殊碳氮共渗 (STF 技术)，其白色组织剥落寿命为 GCr15 的 10 倍以上^[6]。

3.2.3 表面处理

(1) 接触面镀镍, 利用镀镍膜和在滚动接触过程中镍向内部扩散形成的富镍层阻止氢向金属中渗入, 从而使钢中氢含量控制在发生氢致脆性剥落的临界氢含量 H_c 以下, 寿命可提高 4 倍左右。(2) 利用其他覆膜技术, 如镀氮化钛、离子注入等, 或减少金属的直接接触以抑制氢的生成, 或阻止氢的渗入。(3) 在有电流或电荷存在的场合(如发电机轴承、电动机轴承), 可采取绝缘措施, 如采用陶瓷滚动体, 或在外圈外径面上涂覆氧化铝或树脂, 减少金属间的接触或阻断电流通路, 寿命明显提高。

4 结束语

相对于传统的滚动接触疲劳剥落而言, 异常白色组织疲劳剥落的寿命较短, 也成为行业的热门话题。国外开展了不少的研究工作, 给出不同的疲劳剥落机理或假设, 也提出了相应的应对措施。国内目前还鲜见类似的研究结果公布。

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来解释, 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的硬度; 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的区域或形成速度远远超出裂纹的区域或形成速度。在实物观察中, 有些远离裂纹的地方就出现了白色组织(如图 2); 有些白色组织只出现在裂纹一侧(如图 4)。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的研究, 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。

* 刘耀中: 硕士, 教授级高级工程师, 中国轴承工业协会技术委员会副秘书长、专家委员会委员, 曾任《轴承》杂志总编

参考文献:

- [1] Warhadpande A, Sadeghi F, Evans R. Microstructure Alterations in Bearing Steel under Rolling Contact Fatigue Part 1--historical Overview. Tribology Transactions, 2013, 56: 349-358
- [2] Iso K, Yokouchi Y. Research work for clarifying the mechanisms of white structure flaking and extending the life of bearings. Motion & Control, 2007, 19: 27-36
- [3] Stadler K, Stubenrauch A. Premature bearing failures in wind gearboxes and white etching cracks (WEC). #2 2013 evolution.skf.com. 2013
- [4] Bhadeshia HKDH. Steels for Bearings. Progress in Materials Science, 2012, 57: 268-435

- [5] Holweger W, et al. White Etching Crack Root Cause Investigation Tribology Transactions, 2015,58:59-69
- [6] 木野伸郎. 轉動疲労寿命にげす水素の影響とさの対策// 自動車技術会论文集 vol.3, July 2003
- [7] Fujita S, et al. Long-life materials countering white structure flaking . Motion & control, 19:20-26
- [8] Tanaka S. Pulley Support Bearings for Push-belt CVTs. Motion & Control , 19:13-19
- [9] 田中進. 自動車補機電装品用グリスの動向. トライポロジスト, 2010, 55(9):622-627
三上英信. グリスの長寿命化技術. 摩擦学者, 2008, 53(4):248-253
- [10] 樋口博和. 最近の軸受のトユーザーニーズ. 特殊鋼, 2009, 58(5):7-16
- [11] Zhan J. Rolling Contact Fatigue Properties and Flaking Mechanism Under Water-infiltrated Lubricated Condition Committee F34 International Symposium on Rolling Element[C]. Bearings, 2007, 7-9:2007
- [12] Szost BA, et al. Developing bearing steels combining hydrogen resistance and improved hardness. Materials and Design , 2013, 43:499-506