



30Cr15Mo1N高氮不锈钢轴承钢组织结构表征 与旋弯疲劳机制

史智越¹, 宁鑫¹, 杜敏², 徐海峰¹, 王辉¹, 曹文全¹, 梁剑雄¹

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081; 2 钢铁研究总院有限公司中心实验室, 北京 100081)

摘要:高氮不锈钢轴承钢凭借高强度、高硬度、长寿命和优良的耐腐蚀性成为新型轴承材料研发热点。采用旋转弯曲疲劳试验等方法研究了热处理工艺对30Cr15Mo1N高氮不锈钢轴承钢疲劳性能和裂纹萌生机制的影响。结果表明, 试验钢1 050 °C淬火+180 °C回火热处理工艺的抗拉强度为1 985.3 MPa、硬度为60.5HRC、疲劳强度为867 MPa, 500 °C回火后硬度与180 °C相当, 抗拉强度为2 257.6 MPa、疲劳强度为1 020 MPa; 引起180 °C回火试样疲劳裂纹萌生的裂纹源主要为基体和夹杂物两类, 而引起500 °C回火试样疲劳裂纹萌生的裂纹源通常为边部缺陷。高温回火对基体组织内部应力集中的降低是其裂纹源类型转变和疲劳性能提高的主要原因。通过对高氮不锈钢轴承钢疲劳行为与裂纹萌生现象的深入研究, 为高氮不锈钢轴承钢热处理工艺制定及抗疲劳机制研究提供试验与理论基础。

关键词:30Cr15Mo1N高氮不锈钢轴承钢; 疲劳性能; 疲劳裂纹萌生

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00079 **中图分类号:**TG142.1

Characterization of the Microstructure and Mechanism of Rotatory Bending Fatigue of 30Cr15Mo1N High Nitrogen Stainless Bearing Steel

Shi Zhiyue¹, Ning Xin¹, Du Min², Xu Haifeng¹, Wang Hui¹, Cao Wenquan¹, Liang Jianxiong¹

(1 Research Institute of Special Steel, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;
2 Central Laboratory, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The high nitrogen stainless bearing steel (HNSBS) with the merits of high strength, high hardness, long life, and superior corrosion resistance has become a popular topic in the development of novel bearing materials. This paper uses methods such as rotatory bending fatigue (RBF) test to study the effect of heat treatment process on the fatigue performance and crack initiation mechanism of 30Cr15Mo1N HNSBS. The results show that the tensile strength of the HNSBS quenched at 1 050 °C and tempered at 180 °C is 1 985.3 MPa, with the hardness of 60.5HRC and the RBF strength of 867 MPa. After tempering at 500 °C, the hardness is equivalent to 180 °C, with the tensile strength of 2 257.6 MPa and the RBF of 1 020 MPa. And it is found that the crack sources in 180 °C sample are mainly the matrix and inclusions, the crack source causing the fatigue crack initiation of the 500 °C tempering sample is usually the side defect. The reduction of internal stress concentration in the matrix structure caused by high-temperature tempering is the main reason for the transformation of crack source type and the improvement of fatigue performance. This article conducts in-depth research on the fatigue behavior and crack initiation phenomenon of (HNSBS), providing experimental and theoretical basis for the formulation of heat treatment processes and the study of fatigue resistance mechanisms of (HNSBS).

Key Words: 30Cr15Mo1N High Nitrogen Stainless Bearing Steel; Fatigue Performance; Fatigue Crack Initiation

轴承作为航空、航天、汽车、高铁、机床、风电等领域重大装备的核心零部件, 决定着装备的寿命与可靠性。中国是制造大国, 装备制造业规模巨大, 年产值约2万亿美元, 但是高端轴承与相关原材料严重依赖进口^[1]。国内年生产400万t轴承钢、制造200亿套轴承、贡献2000亿元经济产值, 产量占世界三分之一、产值占六分之一^[2]。但是轨道交通(高

铁)、航空航天(航发)和高档机床(主轴)等用轴承几乎全部需要进口。而美国、欧洲、日本作为高端材料与基础零件的创新研发者, 垄断了高端基础材料和高端基础零件市场, 控制着相关技术、专利与标准^[3]。因此, 开展高端轴承材料基础研究, 对解决“国内高端材料依靠进口”问题具有重大战略意义。

高氮不锈钢轴承钢作为第三代轴承材料, 具有高

基金项目: 钢铁研究总院有限公司院基金(事20T61200ZD); 国家自然科学基金资助项目(51871062)

作者简介: 史智越(1993—), 男, 博士研究生; **E-mail:** 602122219@qq.com; **收稿日期:** 2023-05-16

通信作者: 梁剑雄(1975—), 男, 硕士, 正高级工程师; **E-mail:** liangjianxiong@nercast.com

强度、高硬度、长寿命和优良的耐腐蚀性等优点,被广泛应用于航天飞机燃料泵轴承、遥感卫星控制力矩陀螺高速转子轴承、起落架滚珠丝杠、飞机发动机主轴轴承等^[4]。高氮不锈钢轴承钢研发之初就是为了改善传统不锈钢轴承钢耐蚀性不足的问题,以提高轴承材料在腐蚀服役环境下的使用寿命。传统的不锈钢轴承钢主要有 440(9Cr18)、440C(9Cr18Mo)、SUS440A(7Cr17)等牌号,这类不锈钢轴承钢的主要成分特点为高碳、高铬含量,经过热处理后硬度可达 60HRC 以上,同时兼具较好的耐蚀性能^[5]。由于较高的碳、铬含量使得基体中容易出现大块共晶碳化物^[6],会降低材料的耐蚀性能和滚动接触疲劳性能^[7]。因此,科研工作者通过降碳降铬方式以减小粗大碳化物的产生,同时添加氮元素弥补降碳后强度硬度的降低。Carpernter 公司于 1984 年开发出 Cr-Ni-Mo 系列高氮马氏体不锈钢(Pyromet350),之后德国 Cronidur 系列、日本 ES1 系列、美国 440 N2DUR 系列被相继研发应用^[8]。

氮作为一种廉价、环境友好的元素加入不锈钢中,能显著细化基体碳化物尺寸,改善基体力学性能和腐蚀性能^[9-10]。但是国内高氮不锈钢轴承钢生产与科研领域起步较晚,同时由于加压电渣装备的缺失,导致相关研究较为滞后^[11]。近年来,抚顺特殊钢股份有限公司和浙江天马轴承集团有限公司分别引进加压电渣设备,加速了国内高氮不锈钢轴承钢的研发和生产进程^[12]。超高可靠性一直是轴承材料研究领域追求的目标,因此,深入研究高氮不锈钢轴承钢疲劳行为,探寻疲劳性能控制因素,提升轴承零件服役时长、降低更换频率,一直是研究人员的重要研究方向。同时也是降本增效、绿色可持续发展的关键。因此本研究以高氮不锈钢轴承钢为研究对象,对其组织结构、旋转弯曲疲劳性能进行研究。通过热处理调控、组织表征、疲劳测试和断口观察,深入研究高氮不锈钢轴承钢疲劳裂纹萌生机制,为高氮不锈钢轴承钢长寿命研究提供试验与理论指导。

1 试验材料及方法

高氮不锈钢轴承钢的制备工艺包括热等静压、粉末冶金、加压感应熔炼、加压电渣重熔(PESR)、增压电弧渣重熔(ASR)等方法^[4]。但是由于生产成本、工艺控制等问题,PESR 冶炼是目前工业化制备高氮不锈钢轴承钢最为有效的生产路线。本课题以国内钢厂 PESR 冶炼路线制备的 30Cr15Mo1N 高氮不锈钢轴承钢作为研究对象,试验材料经过电极棒制

备、PESR 冶炼及凝固、高温炉均匀化处理、开坯锻造和锻造成材等工序最终制备成 $\phi 130$ mm 棒材,其主要化学成分(质量分数)见表 1。高氮不锈钢轴承钢为了满足不同服役环境要求,存在两种不同最终热处理状态:强腐蚀环境中通常采用 180 °C 低温回火热处理工艺;高温航空发动机环境中通常采用高温回火热处理工艺^[13]。高氮不锈钢轴承钢在 500 °C 回火存在二次硬化现象,以满足高强高硬的轴承材料服役需求。淬火-回火热处理选择 1 050 °C 保温 30 min 油冷淬火^[14],淬火后进行两次“-73 °C 深冷 2 h+回火 2 h”处理。由于轴承服役条件要求高硬度,本研究选择了硬化峰范围的 180 °C 和 500 °C 作为回火温度。

表 1 30Cr15Mo1N 试验钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of experimental 30Cr15Mo1N steel

							%	
C	N	Cr	Mo	Si	Mn	Ti	O	
0.30	0.38	15.43	0.95	0.66	0.44	0.001 4	0.003 4	

对试验钢进行室温拉伸、冲击和硬度性能测试。热处理后的试验钢加工成直径 $\phi 5$ mm 的台阶拉伸试样,按照 GB/T 228.1—2021 标准在拉伸试验机上进行拉伸试验,每组试样准备 3 个平行试样,取平均值后得到拉伸数据。室温冲击试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm,U 型开口,深度 2 mm,按照 GB/T 229—2020 标准在摆锤冲击试验机上进行,每组试样准备 3 个平行试样,取平均值后得到拉伸数据。室温硬度试验在 TH300 洛氏硬度计上进行,选取载荷 150 kg、加载时间 5 s,每组试样打 4 个硬度点,舍去第一个点后取平均值得到硬度数据。旋转弯曲疲劳(Rotatory Bending Fatigue, RBF)试验按照 GB/T 4337—2015 标准,在 QBWP-6000 简支梁旋转弯曲疲劳试验机上进行。热处理后的试样加工成如图 1 所示的 RBF 试样进行疲劳实验,加载频率 80 Hz、应力比 $R=-1$ 、通过周次为 10^7 、实验温度 25 °C。首先进行升降法试验,根据通过周次与破坏试样的加载应力计算出中值疲劳强度。然后根据中值疲劳强度提升 3 组应力级别,每组 3~4 个样品,得到的结果绘制出加载应力与疲劳周次曲线(S-N 曲线)。

金相试样经过 60/120/320/600/1000 目砂纸打磨、抛光剂抛光、腐蚀后,在扫描电子显微镜(SEM, JEOL-7800F)观察组织形貌,组织形貌腐蚀液为:氯

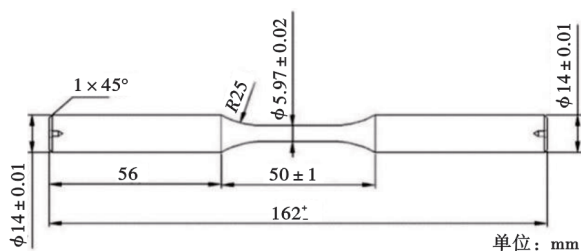


图1 旋转弯曲疲劳试样尺寸
Fig. 1 RBF specimen size

化铜+盐酸+乙醇+水溶液;旋转弯曲疲劳断口切割清洗后放入扫描电子显微镜(SEM, JEOL-7200F)、能谱仪(EDS, Oxford X-Max)进行观察。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能与组织结构

试验钢经热处理后,力学性能见表2。180 °C回火试样和500 °C回火试样硬度均在60HRC以上,180 °C和500 °C回火U型冲击功分别为6.2 J和5.8 J,断后伸长率均为2.3%,塑性基本相同。但是500 °C高温回火试样的强度与180 °C相比有较大区别,500 °C试样抗拉强度为2 257.6 MPa,高于180 °C的1 985.3 MPa。

表2 30Cr15Mo1N 试验钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of experimental 30Cr15Mo1N steel

回火温度/°C	硬度/HRC	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	U型冲击功/J
180	60.5	1 985.3	2.3	6.2
500	60.6	2 257.6	2.3	5.8

两组试样基体组织SEM照片如图2所示,可以看出,两组试样基体组织均为马氏体和球形第二相结构,这样的基体结构也是高氮不锈钢轴承钢高强度、高硬度的重要保证。高氮不锈钢轴承钢经

1 050 °C淬火(+73 °C)冷处理后,淬火过程中产生的残余奥氏体会转变为马氏体组织,在回火过程中,随着回火温度的变化而不断变化。回火温度为180 °C时,基体组织形貌为针状马氏体上分布着颗粒状碳氮化物^[15],其形貌如图2(a, b)所示;根据热力学计算以及文献调研,碳含量0.3%高氮不锈钢轴承钢180 °C回火第二相为M₂₃C₆和Cr₂N^[4, 16]。当回火温度升至500 °C,未转变的残余奥氏体进一步分解,针状马氏体结构逐渐消失^[13],如图2(c, d)所示。随着回火温度的升高,基体中奥氏体不断减少,500 °C回火仅有少量奥氏体存在,而且回火态马氏体更加细小均匀,基体中的微米级第二相仍为M₂₃C₆和Cr₂N^[17]。此外据文献^[4]报道,高氮不锈钢轴承钢500 °C回火会存在明显的二次硬化现象,高温回火过程中纳米级Cr₂N第二相的弥散析出,是高氮不锈钢轴承钢二次硬化现象产生的主要原因^[18]。

2.2 疲劳强度和S-N曲线

RBF性能测试主要分为两部分:升降法测量计算疲劳强度和甩点法绘制S-N曲线,如图3所示。图3(a)为180 °C和500 °C回火试样的升降法破断与通过情况图,其中500 °C数据点为红色、180 °C数据点为蓝色,可以看出500 °C通过试样的加载应力在180 °C破断试样上方。经过计算500 °C试样疲劳强度为1 020 MPa,180 °C试样疲劳强度为867 MPa,疲劳强度提高了153 MPa。结合表2中两组试样拉伸数据分析,500 °C回火试样比180 °C回火试样的抗拉强度提升了272 MPa,疲劳强度增量与抗拉强度增量比值约为0.56,这一数值与文献中疲劳强度和抗拉强度0.4~0.5倍正相关关系基本吻合^[19]。

甩点法绘制S-N曲线是根据计算所得的疲劳值提升3~4级加载应力,每级加载应力测试3~4个试样,以确定循环周次随加载应力的变化关系。图3(b)为180 °C和500 °C回火试样S-N曲线,可以

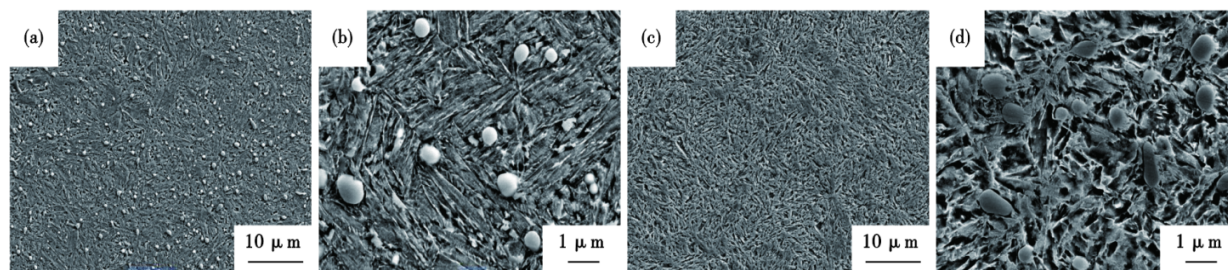


图2 30Cr15Mo1N 钢不同回火温度SEM组织结构:(a)(b)180 °C, (c)(d)500 °C

Fig. 2 Microstructure of 30Cr15Mo1N steel at different tempering temperatures : (a)(b)180 °C , (c)(d)500 °C

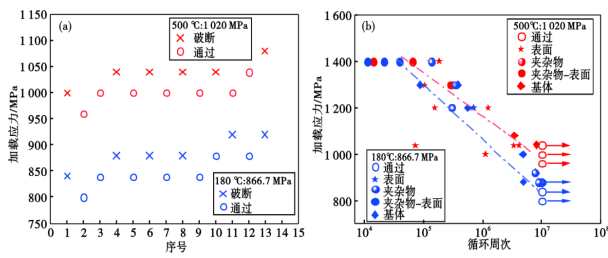


图3 30Cr15Mo1N 钢不同回火温度疲劳性能:(a)升降法, (b)S-N 曲线

Fig. 3 Fatigue performance of 30Cr15Mo1N steel at different tempering temperatures : (a) up and down method , (b) S-N curve

看出,在 800 ~ 1 050 MPa 范围的较低加载应力下, 500 °C 试样数据点在 180 °C 上方,也就是说相同加载应力下 500 °C 试样循环周次高于 180 °C 试样;而随着加载应力的提高这种差距逐渐降低,当加载应力提升至 1 200 MPa 以上时,500 °C 试样数据点分布与 180 °C 试样基本重合。这表明高温回火可以显著提升低应力下的疲劳强度,而对于高应力范围,两组试样的疲劳寿命大致相同。

2.3 疲劳断口

为了观察分析高氮不锈轴承钢疲劳裂纹萌生、扩展以及断口特征形貌,将 180 °C 和 500 °C 回火试样升降法和 S-N 曲线试验过程中的破断试样进行超声波清洗后放入 SEM 进行观察。

180 °C 回火疲劳断口形貌如图 4 所示,观察发现,裂纹源主要分为夹杂物和条带状基体两类。图 4(a, b) 试样加载应力为 880 MPa, 循环周次 9791861, 图 4(a) 为裂纹源位置低倍 SEM 照片, 右上角绿色方框为断口宏观形貌, 观察发现, 鱼眼为圆形, 与试样表面相切, 夹杂物裂纹源在鱼眼中心^[20]。图 4(b) 为夹杂物裂纹源位置高倍 SEM 照片, 可以观察到视场中央红色箭头所指位置为夹杂物, 其右上

角为夹杂物成分 EDS 面扫分析, 结果表明夹杂物富含 Al-Ca-O-Mg 元素, 为氧化物类夹杂^[21]。夹杂物外侧被颗粒状亮面 (granular bright facet, GBF) 包围^[22], 此外, 由夹杂物向外还延伸出两条裂纹, 向鱼眼内部扩展。夹杂物裂纹源试样的鱼眼区与疲劳断口呈水平分布, 这样的断口形貌与 GCr15 轴承钢中 RBF 断口试样大致相同^[23]。图 4(c, d) 试样加载应力为 1 000 MPa, 循环周次 4803514, 图 4(c) 为裂纹源位置低倍 SEM 照片, 鱼眼为圆形, 与试样表面相切, 其低倍形貌与图 4(a) 中夹杂物裂纹源类似。图 4(d) 鱼眼内部的红色标记处为裂纹源, 相较于图 4(b) 中的裂纹源明显不同, 其亮度更高, 且裂纹源内部并不光滑, 有更加细微的条带状结构, 此外除了在裂纹源四周发现 GBF 外, 在裂纹源平面处也观察到了颗粒状亮面结构的 GBF。这一现象表明 GBF 不仅会在裂纹四周形成, 同样会在裂纹源内部形成。

为了分析 500 °C 回火试样断口形貌和疲劳强度提高原因, 同样对每一个破断试样清洗后放入 SEM 进行观察。500 °C 回火试样的典型断口形貌如图 5 所示, 其主要由边部起裂和条带状基体作为裂纹源引起 RBF 裂纹萌生并扩展, 直至试样破断。其中图 5(a, b) 试样加载应力为 1 040 MPa, 循环周次 4132596, 图 5(a) 为裂纹源位置低倍 SEM 照片, 可以看出断裂面与试样轴向垂直, 裂纹源在试样边部位置; 图 5(b) 为裂纹源位置高倍 SEM 照片, 可以观察到裂纹源区域没有夹杂物以及图 4(d) 中描述的基体裂纹源结构。同时这类边部起裂断口也没有鱼眼区, 通常是由边部缺陷引起疲劳裂纹萌生, 并向试样内部扩展, 直至疲劳破坏^[24]。图 5(c, d) 试样加载应力为 1 040 MPa, 循环周次 8210415, 图 5(c) 为裂纹源区域低倍 SEM 照片, 其裂纹源依旧靠近试样

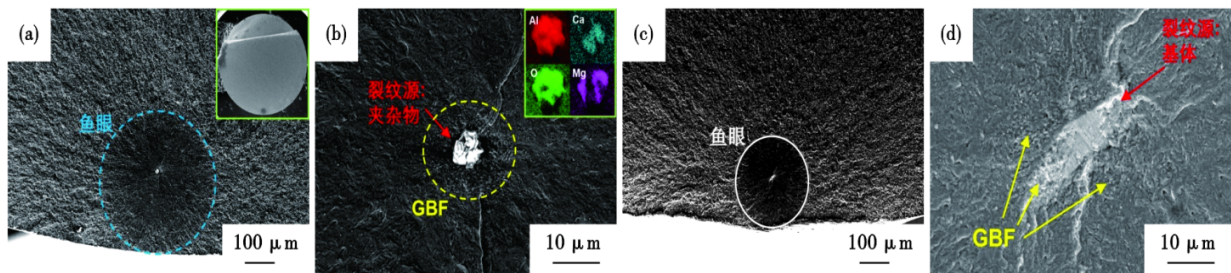


图4 30Cr15Mo1N 钢 180 °C 回火断口形貌:(a)(b)加载应力 880 MPa, 循环周次 9791861; (c)(d)加载应力 1 000 MPa, 循环周次 4803514

Fig. 4 180 °C tempering fracture morphology of 30Cr15Mo1N steel : (a)(b)stress amplitude 880 MPa , fatigue cycle 9791861 ; (c)(d) stress amplitude 1 000 MPa , fatigue cycle 4803514

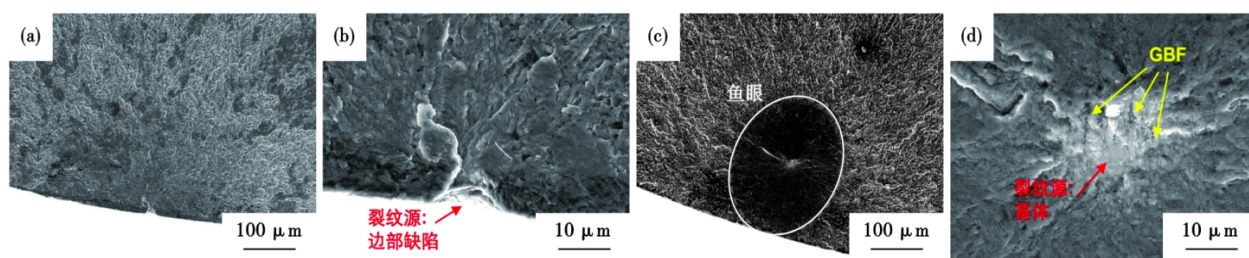


图5 30Cr15Mo1N钢500℃回火断口形貌:(a)(b)加载应力1040MPa,循环周次4132596;(c)(d)加载应力1040MPa,循环周次8210415

Fig. 5 500 °C tempering fracture morphology of 30Cr15Mo1N steel : (a)(b) stress amplitude 1040 MPa , fatigue cycle 4132596 ; (c)(d) stress amplitude 1040 MPa , fatigue cycle 8210415

表面,鱼眼区为圆形与试样表面相切;图5(d)为鱼眼和裂纹源位置高倍SEM照片,观察发现裂纹源内部的基体组织结构及其周围的GBF结构,这与图4(d)中180℃回火试样1000MPa加载、循环周次4803514裂纹源形貌类似;对比这两组疲劳裂纹源基本相似、500℃回火试样加载应力为1040MPa、疲劳寿命均 8×10^6 ,这也说明500℃回火试样的疲劳性能优于180℃回火试样的疲劳性能。

2.4 断口形貌与疲劳性能讨论

试验钢180℃和500℃回火RBF断口为条带状基体、夹杂物和边部起裂三类,但其数量不同,表3统计了这两组试样断口裂纹源类型。180℃和500℃回火试样分别有17个和16个破断试样,180℃回火试样有鱼眼形貌的疲劳断口合计12个,占70%,而500℃回火试样只有3个,占有破断试样的19%。500℃回火试样除这3个具有鱼眼形貌疲劳断口外,均为边部起裂或表面夹杂物起裂。这表明500℃回火试样降低了基体内部缺陷、夹杂物造成的应力集中,使得疲劳裂纹萌生不易从基体内部发生,这也是其疲劳性能优于180℃回火试样的主要原因。此外,之前研究表明,马氏体孪晶剪切断裂诱导疲劳基体裂纹萌生是高氮不锈钢中条带状基体裂纹源形成的主要原因^[25]。结合图2中不同回火温度组织SEM表征,随着回火温度由180℃升至500℃,针状马氏体和孪晶结构逐渐消失,减少基体内部马氏体孪晶断裂诱导裂纹萌生的倾向,大幅提升疲劳性能。

表3 30Cr15Mo1N钢疲劳断口统计

回火温度/℃	疲劳强度/MPa	基体(鱼眼)/个	夹杂物/个		边部/个	合计/个
			鱼眼	表面		
180	867	6	6	3	2	17
500	1020	2	1	3	10	16

通过对高氮不锈钢轴承钢180℃和500℃回火试样组织、力学性能、旋转弯曲疲劳研究发现,500℃回火试样的力学性能以及疲劳性能均高于180℃回火试样,表现出更加优异的疲劳性能。但是高氮不锈钢轴承钢采用500℃回火时,基体内部会析出大量细小弥散的 Cr_2N 第二相,此类富Cr第二相析出会加剧基体中Cr原子消耗,大幅降低材料耐蚀性能^[4,26]。因此,针对不同服役环境下的零部件,应将服役周期、服役环境等因素综合考虑,制定合理的热处理工艺。

轴承在服役过程中除了受到长运行周期、高转速、高温等条件外,还要承受极高的接触应力,这就要求轴承材料除了满足高强度、硬度外,还需要具备承载高循环接触应力不发生疲劳破坏的能力^[27]。滚动接触疲劳(Rolling Contact Fatigue, RCF)试验是最接近轴承服役状态的轴承钢疲劳测试方式,也是最能代表轴承钢服役条件下疲劳性能的关键手段^[28]。但是目前将RBF强度与RCF寿命建立联系较为困难,这是由于滚动接触疲劳加载应力并不能视为试样所承受最大剪应力^[29]。根据经验公式,滚动接触疲劳最大剪应力 τ_{RCF} 约为0.3倍加载应力,而旋转弯曲疲劳最大剪应力 τ_{RBF} 约为0.5倍加载应力^[19,30-32]。由于加载状态的不同,在探究RBF与RCF过程和其内在联系时,应该考虑最大剪应力对其的影响。关于如何建立RBF与RCF破坏机制、服役寿命之间的联系需要进一步深入研究探讨。

3 结论

(1)试验钢1050℃淬火+180℃回火热处理工艺的硬度为60.5HRC,抗拉强度为1985.3MPa,通过对基体组织表征,180℃回火试样基体由针状马氏体和颗粒状碳氮化物构成。试验钢经500℃回火后,硬度可达60.6HRC,抗拉强度2257.6MPa,硬度与180℃回火相当,抗拉强度显著提升。

(2) 试验钢 180 °C 回火的疲劳强度为 866.7 MPa, 500 °C 回火试样中值疲劳强度为 1 020 MPa, 较 180 °C 回火提高 153 MPa。两组试样 S-N 曲线结果表明高温回火可以显著提升低应力下的疲劳强度, 而对于高应力范围, 两组试样的疲劳寿命大致相同。

(3) 通过对疲劳断口观察分析, 引起 180 °C 回火试样 RBF 裂纹萌生的裂纹源主要为基体和夹杂物两类, 而引起 500 °C 回火试样 RBF 裂纹萌生的裂纹源通常为边部缺陷。高温回火对基体组织内部应力集中的降低是其裂纹源类型转变和疲劳性能提高的主要原因。

参考文献

- [1] 曹文全, 俞峰, 王存宇, 等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向 [J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 1-10.
- [2] 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.
- [3] 李扬帆. 在产业基础领域突破“卡脖子”技术 [J]. 中国工业和信息化, 2021, (5): 78.
- [4] 李花兵, 姜周华, 冯浩. 高氮不锈钢 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [5] 钟顺思, 王昌生. 轴承钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [6] 徐亮, 李涛, 马永强, 等. 改善不锈钢轴承钢 9Cr18 共晶碳化物的工艺研究 [J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 46-49.
- [7] 徐海峰, 史智越, 俞峰, 等. 高氮不锈钢轴承钢的微观组织与性能研究 [J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 71-76.
- [8] Johansson A, Arnberg L, Gustafson P, et al. Nitrogen alloyed stainless steels produced by nitridation of powder [J]. Metal Powder Report, 1991, 46(5): 65-68.
- [9] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 高亦斌, 陈根保, 金卫强. AOD 精炼高氮奥氏体不锈钢 1Cr22Mn15N 的工艺实践 [J]. 特殊钢, 2005, 26(2): 51-53.
- [11] 徐海峰, 曹文全, 俞峰, 等. 国内外高氮马氏体不锈钢轴承钢研究现状与发展 [J]. 钢铁, 2017, 52(1): 53-63.
- [12] 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.
- [13] 陈豪, 周天鹏, 陈泽军, 等. 回火温度对 30Cr15Mo1N 微观组织和力学性能影响 [J]. 钢铁, 2019, 54(5): 60-7.
- [14] 陈豪, 徐海峰, 周天鹏, 等. 淬火和低温处理对 X30CrMoN151 组织性能影响 [J]. 钢铁, 2019, 54(9): 85-93.
- [15] 张敏, 杨卯生, 李树索, 等. 高氮不锈钢轴承钢中的碳氮化物对力学性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(5): 18-23.
- [16] 郑滔, 俞峰, 张家涛, 等. 热处理工艺对高氮不锈钢轴承钢 G30 组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 21-25.
- [17] Qin Y, Li J, Herbig M. Microstructural origin of the outstanding durability of the high nitrogen bearing steel X30CrMoN15-1 [J]. Materials Characterization, 2020, 159: 110049.
- [18] Kubota S, Xia Y, Tomota Y. Work-hardening behavior and evolution of dislocation-microstructures in high-nitrogen bearing austenitic steels [J]. ISIJ International, 1998, 38(5): 474-481.
- [19] Forrest P G. Fatigue of metals [M]. Oxford: Pergamon Press, 1962.
- [20] Cao Z X, Shi Z Y, 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.
- [21] da Costa e Silva A L V. Non-metallic inclusions in steels - origin and control [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2018, 7(3): 283-299.
- [22] Shiozawa K, Morii Y, Nishino S, et al. Subsurface crack initiation and propagation mechanism in high-strength steel in a very high cycle fatigue regime [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(11): 1521-1532.
- [23] Cao Z X, Shi Z Y, Yu F, et al. Effects of double quenching on fatigue properties of high carbon bearing steel with extra-high purity [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 128: 105176.
- [24] Shi Z Y, Wang H, Gao Y H, et al. Improve fatigue and mechanical properties of high carbon bearing steel by a new double vacuum melting route [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45(7): 1995-2009.
- [25] Shi Z Y, Xu H F, Wang C Y, et al. Crack initiation induced by twin-martensite and inclusion in rotatory bending fatigue of a high nitrogen martensite bearing steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 861: 144402.
- [26] Feng H, Jiang Z H, Li H B, et al. Influence of nitrogen on corrosion behaviour of high nitrogen martensitic stainless steels manufactured by pressurized metallurgy [J]. Corrosion Science, 2018, 144: 288-300.
- [27] 赵鑫, 温泽峰, 王衡禹, 等. 中国轨道交通轮轨滚动接触疲劳研究进展 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 1-35.
- [28] 宗华. 轴承钢球滚动接触疲劳寿命预测方法 [J]. 传动技术, 2022, 36(4): 28-33.
- [29] Trojahn W, Streit E, Chin H A, et al. Progress in bearing performance of advanced nitrogen alloyed stainless steel, cronidur 30 [J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 1999, 30(10): 605-611.
- [30] 王中光译. 材料的疲劳 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [31] Sadeghi F, Jalalahmadi B, Slack T S, et al. A review of rolling contact fatigue [J]. Journal of Tribology, 2009, 131(4): 041403-1.
- [32] Bhadeshia H K D H. Steels for bearings [J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(2): 268-435.