

摩擦学学报

TRIBOLOGY



等温淬火工艺对GCr15SiMo钢微观组织和摩擦磨损性能的影响

毛艳珊, 杜三明, 傅丽华, 张永振, 高元安, 杨军, 鲍向宇

Effect of Isothermal Quenching Process on the Microstructure and Wear Properties of GCr15SiMo Steel

MAO Yanshan, DU Sanming, FU Lihua, ZHANG Yongzhen, GAO Yuanan, YANG Jun, BAO Xiangyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等温淬火热处理工艺对Fe-0.5C-2.0Si-2.5Mn钢冲击磨损性能的影响

Effect of Impact Wear on Isothermal Quenching of Fe-0.5C-2.0Si-2.5Mn Steel

摩擦学学报. 2017, 37(1): 52 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.01.007>

不均匀组织ER8车轮滚动接触疲劳性能研究

Rolling Contact Fatigue Performance of ER8 Wheel Steel with Non-Uniform Microstructure

摩擦学学报. 2021, 41(4): 553 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020154>

热处理对Al-Si-Cu合金力学性能、显微组织与磨损性能的影响

Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties, Microstructures and Wear Resistance of Al-Si-Cu Alloy

摩擦学学报. 2017, 37(5): 618 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.008>

接触应力对FCB车轮钢组织演变与性能的影响

Effect of Contact Stress on the Evolution and Properties of FCB Wheel Steel

摩擦学学报. 2021, 41(5): 749 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020150>

Cr4Mo4V轴承钢滚动接触疲劳和磨损性能研究

Rolling Contact Fatigue and Wear Characteristics of Cr4Mo4V Bearing Steel

摩擦学学报. 2017, 37(2): 155 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.02.003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2022084

等温淬火工艺对GCr15SiMo钢微观组织和摩擦磨损性能的影响

毛艳珊¹, 杜三明¹, 傅丽华^{1,2*}, 张永振¹, 高元安², 杨军³, 鲍向宇¹

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 洛阳轴承研究所股份有限公司, 河南 洛阳 471003;

3. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了探究等温淬火工艺对GCr15SiMo轴承钢微观组织和摩擦磨损性能的影响. 本文中通过改变等温淬火温度(190、210和230 °C)和保温时间(4、8和24 h)对GCr15SiMo轴承钢进行不同等温淬火参数下的热处理. 利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、透射电子显微镜(TEM)和洛氏硬度计等对其微观组织、物相和硬度进行表征, 并借助摩擦磨损试验机对其摩擦磨损性能进行研究. 结果表明, GCr15SiMo轴承钢传统油淬得到的组织主要为马氏体, 等温淬火工艺获得的组织主要由贝氏体铁素体、残余奥氏体、少量马氏体和未溶碳化物组成. 且随着等温淬火温度升高和保温时间延长, 由于碳原子的扩散能力增强, 贝氏体转变周期变短, 贝氏体的含量增多, 马氏体含量减少, 未溶碳化物和残余奥氏体含量也逐渐降低. 传统油淬后的材料组织以脆性马氏体为主, 摩擦磨损时马氏体以细小碎片的形式剥落并作为硬质颗粒在摩擦表面移动, 导致其磨损机制以微观切削和氧化磨损为主. 等温淬火工艺下, 固定等温淬火时间为8 h, 随等温淬火温度升高, 材料中贝氏体含量增多, 韧性提高, 材料磨损机制由微观切削逐渐转变为黏着磨损; 当固定等温淬火温度为210 °C, 随等温淬火时间的延长, 材料中贝氏体含量大幅度增加, 材料韧性在提高的同时其硬度降低, 导致材料磨损机制由黏着磨损逐渐转变为严重的磨粒磨损. 最后, 文中最佳的等温淬火工艺是等温淬火温度为210 °C, 保温时间为8 h, 此时组织中各物相体积分数分别为残余奥氏体4.3%, 未溶碳化物4.8%, 马氏体32.3%, 贝氏体58.6%, 材料具有良好的强韧性, 磨损率最低, 为 0.38×10^{-4} mg/(N·m).

关键词: 轴承钢; 贝氏体; 等温淬火; 微观组织; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.1; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2023)07-0778-13

Effect of Isothermal Quenching Process on the Microstructure and Wear Properties of GCr15SiMo Steel

MAO Yanshan¹, DU Sanming¹, FU Lihua^{1,2*}, ZHANG Yongzhen¹, GAO Yuanan²,
YANG Jun³, BAO Xiangyu¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology,
Henan Luoyang 471023, China

2. Luoyang Bearing Research Institute Co, Ltd, Henan Luoyang 471003, China

3. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: To explore the influence of isothermal quenching process on the microstructure, friction and wear of

Received 6 May 2022, revised 22 August 2022, accepted 29 August 2022, available online 1 September 2022.

*Corresponding author. E-mail: flhustb@haust.edu.cn, Tel: +86-15690647838.

This project was supported by the China Postdoctoral Science Foundation (2020M682316), Science and Technology Research Project of Henan Province (212102210117) and Open Project of State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL-1916).

中国博士后科学基金(2020M682316)、河南省科技攻关项目(212102210117)和固体润滑国家重点实验室开放课题(LSL-1916)资助。

GCr15SiMo bearing steel. The GCr15SiMo bearing steel was heat treated under different isothermal quenching temperature (190, 210 and 230 °C) and different holding time (4, 8 and 24 h). Then, the microstructure, phase composition and hardness were characterized by using the optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscope (TEM), Rockwell hardness tester and so on. Also, the friction and wear properties of different samples were investigated by using the friction and wear testing machine. The results showed that the microstructure of GCr15SiMo bearing steel which was treated under the traditional oil quenching process mainly was martensite, the microstructure of samples which were treated under the isothermal quenching process were mainly composed of bainitic ferrite, retained austenite, a small amount of martensite and undissolved carbide. With the isothermal quenching temperature was risen and the holding time was prolonged, which resulted in the diffusion ability of carbon atoms was enhanced and the bainite transformation cycle became shorter, thus the content of bainite was increased, the content of martensite, undissolved carbides and residual austenite content were gradually reduced. The microstructure of sample which was treated under the traditional oil quenching process mainly was brittle martensite, and the martensite was easily peeled off by the form of fine fragments during the friction and wear process. When the fine fragments as hard particles which moved on the worn surface would result in the micro-cutting phenomenon. So, the wear mechanisms of the sample which was treated under the traditional oil quenching process were mainly micro-cutting and oxidation wear. Under the isothermal quenching process, when the isothermal quenching time was fixed as 8 h, with the increasing of the isothermal quenching temperature, the content of bainite was increased and the toughness of the materials was improved, thus the wear mechanism of the material gradually changed from micro-cutting to adhesive wear. When the isothermal quenching temperature was fixed at 210 °C, with the holding time was prolonged, the content of bainite in the material was increased significantly, the toughness of the material was improved and its hardness was decreased at the same time, so the wear mechanism of the material gradually transformed from adhesive wear to severe abrasive wear. Finally, the best isothermal quenching process in this study was that the isothermal quenching temperature was 210 °C and the holding time was 8 h. And, under the best isothermal quenching process, the volume percentage of each phase in the sample were retained austenite 4.3%, undissolved carbide 4.8%, martensite 32.3% and bainite 58.6%, respectively. the material had good strength and toughness combination, the minimum wear rate is 0.38×10^{-4} mg/(N·m).

Key words: bearing steel; bainite; isothermal quenching; microstructure; friction and wear

传统轴承材料主要以马氏体轴承钢为主, 因为马氏体轴承钢具有高强度和高淬透性等优点, 被广泛应用于在机械加工设备、冶金工业和精密机床等。随着各新兴产业的快速发展, 轴承的需求越来越大, 且服役条件越来越严苛, 对于轴承的性能要求也相应发生改变。例如, 飞机和风电等设备的轴承需要承受复杂交变的应力和各种冲击载荷^[1]。然而马氏体轴承在环境恶劣或受冲击载荷时韧性低, 使用寿命会大幅降低^[2]。相关研究表明, 贝氏体轴承钢因具有高强度、高塑韧性和低氢脆敏感性等优点, 且在硬度低于马氏体钢的情况下, 仍然具有比马氏体钢更高的耐磨性, 从而得到广泛关注^[3-5]。比如, 刘宏基等^[6]将1种超高碳钢经过等温淬火得到由纳米级贝氏体铁素体和薄膜状残余奥氏体组成的贝氏体组织, 该组织具有很好的强韧性配合。Leior等^[7]研究指出, 在摩擦磨损过程中, 贝氏体钢表层产生塑性变形, 会转变成新的马氏体, 对提升材料的耐磨性能是有益的。此外, 张福成教授课题组^[8-9]对贝氏体轴承钢进行了研究, 指出贝氏体具有比

马氏体更优异的抗接触疲劳和耐磨性能, 适用于制造大型风电轴承。

获得贝氏体轴承钢一般需要经过等温淬火热处理工艺, 其中等温淬火温度和保温时间是2个重要的参数, 对材料的微观组织和性能有明显影响^[10-12]。国内对等温淬火热处理工艺也有研究, 比如张增歧等^[13]研究了等温淬火工艺对GCr15钢组织与性能的影响, 发现采用等温淬火工艺可显著提高材料的冲击韧性、断裂韧性及使用寿命, 等温淬火温度和保温时间对贝氏体组织演变的影响尤为明显^[14-15]。苏丽婷等^[16]研究了等温淬火时间对GCr15SiMoAl组织和性能的影响, 表明随着淬火时间的延长, 贝氏体含量逐渐升高, 抗压强度逐渐降低。

由于GCr15SiMo钢具有高淬透性、良好抗疲劳性、耐磨性和韧性^[17], 是1种广泛应用的轴承钢。同时, 轴承是1个典型的摩擦副, 服役过程中, 在启动、变速、急停及润滑不足时, 经常会发生打滑及干摩擦现象, 而滑动及干摩擦往往带来轴承各部件接触表面发

生温度升高和擦伤等,直接影响了轴承的服役性能及寿命.本文中选取GCr15SiMo钢为研究对象,与传统油淬工艺进行对比,研究了不同等温淬火热处理后的GCr15SiMo钢的摩擦磨损性能,探讨不同等温淬火温度和不同保温时间对材料微观组织和摩擦磨损性能的影响,并对其磨损机制进行分析,为高性能轴承的生产与设计提供参考.

1 试验材料与方法

本文中以GCr15SiMo轴承钢为研究对象,分别对

其进行常规热处理和等温淬火热处理.其中常规热处理过程包括退火+油淬+回火工艺,等温淬火热处理过程包括退火+奥氏体化+等温淬火+回火工艺.图1所示为常规热处理和等温淬火热处理工艺的过程示意图.其中常规热处理首先经过球化退火(红色实线),在860℃下奥氏体化20 min后油淬(紫色虚线),最后回火(黄色实线).等温淬火热处理同样先经过退火,然后在880℃下奥氏体化20 min后迅速放入190、210和230℃的盐浴炉中分别保温4、8和24 h(蓝色和绿色实线),最后回火.

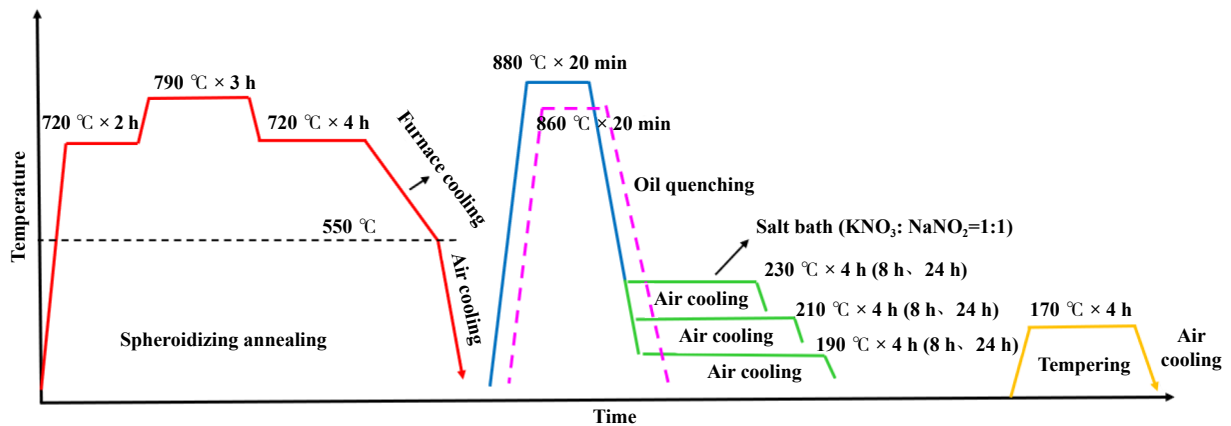


Fig. 1 Traditional heat treatment and isothermal quenching heat treatment process

图1 传统热处理和等温淬火热处理工艺

利用光学显微镜(OM)和JSM-IT100型扫描电镜(SEM)对热处理后试样微观组织进行表征.热处理后的样品采用线切割机切成10 mm×10 mm的试样,试样进行砂纸研磨,金刚石研磨膏抛光,采用体积分数为4%的硝酸酒精溶液和Na₂S₂O₂水溶液进行腐蚀.利用IPP软件统计材料微观组织中未溶碳化物和贝氏体组织体积分数.通过D8-advanced型X射线衍射仪(XRD)对试样物相进行分析,同时检测试样的残余奥氏体体积分数.利用TEM-Talos F200X型透射电子显微镜(TEM)对贝氏体组织观察.采用洛氏硬度计测试材料表面硬度,取点位置距边缘大于3 mm,每两个点之间的距离大于等于2 mm,每个试样测5个数据点取平均值减小误差.

利用HL-R7000摩擦磨损试验机对不同热处理样品在室温条件下进行摩擦磨损试验,其中接触方式选用球-盘往复式,如图2(a)所示.摩擦对偶采用直径为6.35 mm的GCr15钢球,硬度约为62 HRC.研究材料为盘试样,其加工尺寸如图2(b)所示.摩擦磨损条件的选择参考风机主轴的工况要求(典型重载低速),确定载

荷为200 N,频率为3 Hz,滑动距离为6 mm,试验时间为30 min.试验后摩擦系数由试验机直接获得,试验前后分别对试样进行清洗、干燥和称重,并利用如下公式计算磨损率:

$$W = \frac{w_1 - w_2}{vtf} \quad (1)$$

式中: W 为磨损率[mg/(N·m)]; w_1 和 w_2 分别为试样磨损前质量和磨损后质量(mg); v 为滑动摩擦速度(m/s); t 为摩擦时间(s); f 为载荷(N).

2 结果与讨论

2.1 微观组织分析

2.1.1 等温淬火温度对组织的影响

图3所示为GCr15SiMo轴承钢油淬和不同等温淬火温度下的微观组织.由图3可以看出,传统油淬后的轴承组织主要由板条状马氏体、球状碳化物和残余奥氏体组成[图3(a)].等温淬火后的轴承组织主要由针状贝氏体、残余奥氏体、未溶碳化物和马氏体组成.当等温淬火温度为190℃时,贝氏体转变量相对较少,等

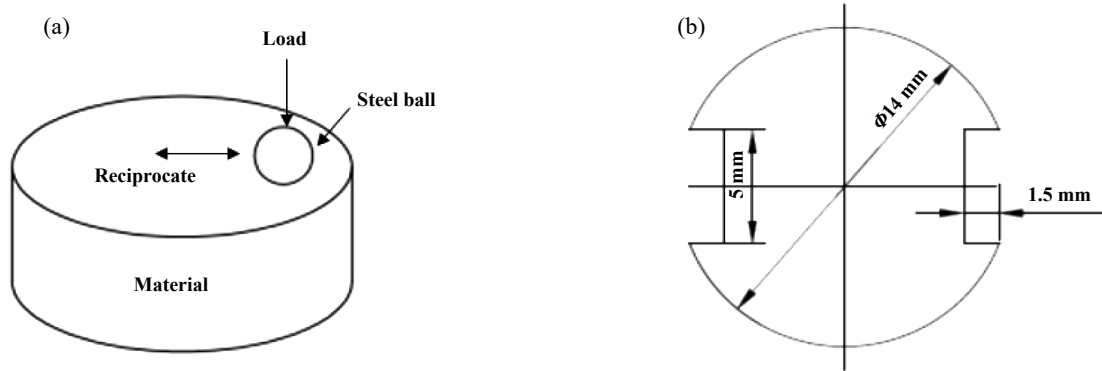


Fig. 2 Friction and wear process and disk sample diagram: (a) friction and wear process; (b) size of disk sample
图 2 摩擦磨损过程和盘试样示意图: (a)摩擦磨损过程; (b)盘试样尺寸

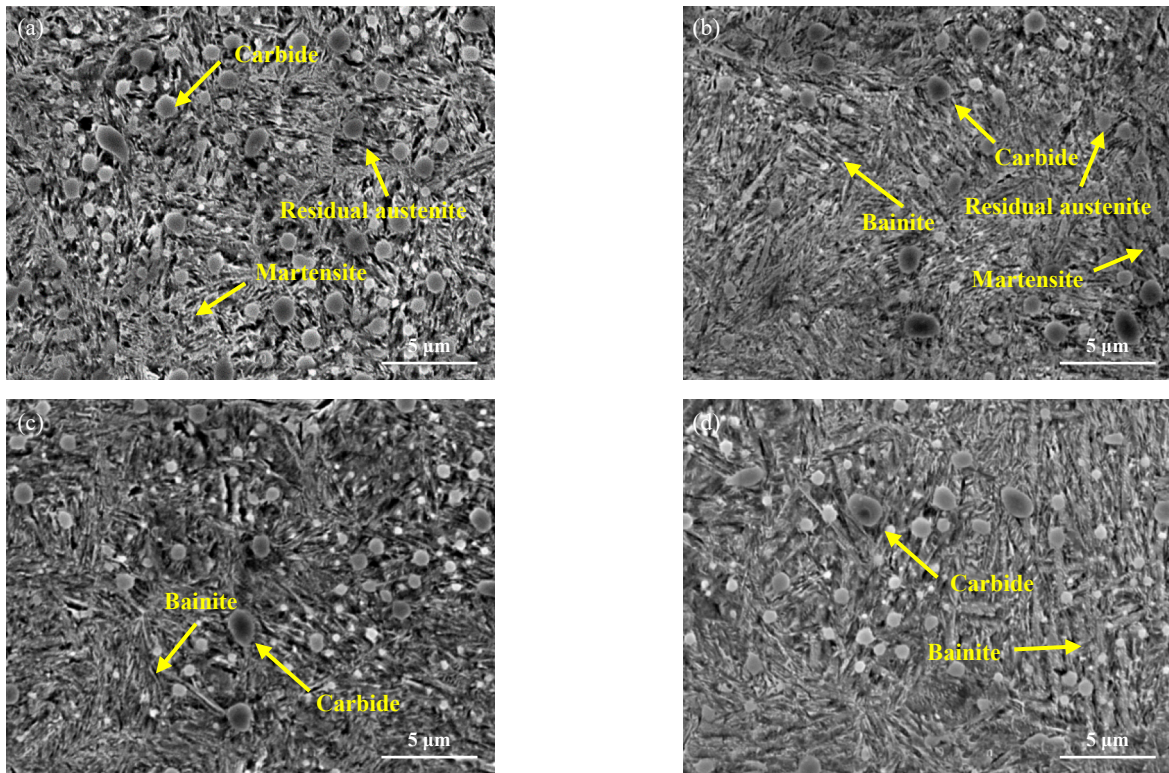


Fig. 3 SEM micrographs of GCr15SiMo steel at different isothermal temperature: (a) 860 °C-oil quenching; (b) 190 °C-8 h; (c) 210 °C-8 h; (d) 230 °C-8 h

图 3 不同等温温度下GCr15SiMo钢的微观组织的SEM照片: (a) 860 °C-油淬; (b) 190 °C-8 h; (c) 210 °C-8 h; (d) 230 °C-8 h.

温淬火温度为210 °C时, 组织比较致密, 等温淬火温度为230 °C时, 贝氏体组织出现粗化现象[图3(b~d)]. GCr15SiMo轴承钢油淬后的未溶碳化物平均体积分数为11.4%, 等温淬火温度在190、210和230 °C保温时间8 h的样品, 其未溶碳化物平均体积分数分别为5.2%、4.8%和4.3%. 对比马氏体组织与贝氏体组织发现, 等温淬火后贝氏体组织中的球状碳化物含量明显少于油淬样品中碳化物含量, 且随着等温淬火温度的升高, 未溶碳化物逐渐减少. 分析认为, 在贝氏体转变过

程中, 碳原子会不断溶解并向奥氏体中扩散, 所以等温淬火后贝氏体组织中的未溶碳化物减少^[18-21].

为了统计贝氏体含量, 本文中对试样采用Na₂S₂O₂水溶液腐蚀得到其金相组织, 并对其进行二值图处理^[1], 如图4所示. 在光学显微镜下, 贝氏体组织的颜色更深, 在二值图中便把颜色深的区域识别为贝氏体, 并用绿色标记. 统计结果列于表1中, 结果表明: 随着等温温度的升高, 贝氏体含量逐渐增多, 与图3微观组织的照片结果相一致. 分析认为, 当等温淬火温度较低

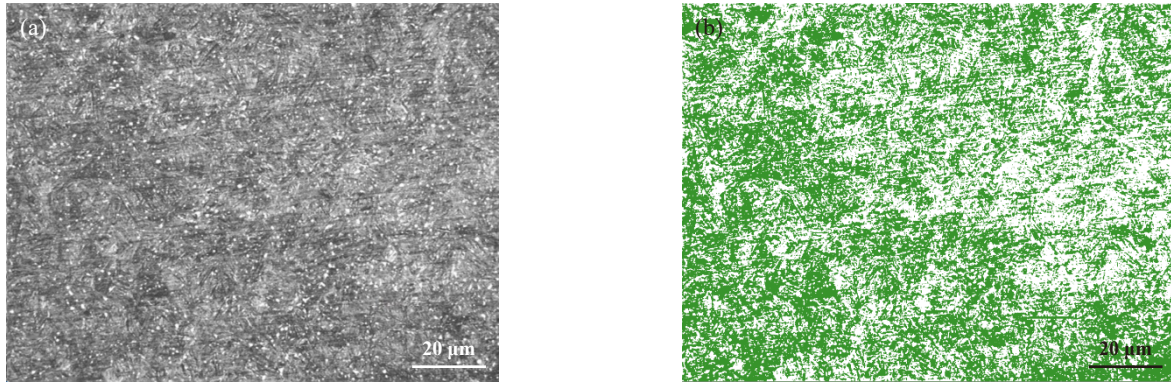


Fig. 4 Microstructure and binary figure of GCr15SiMo steel: (a) OM micrograph; (b) binary figure

图4 GCr15SiMo钢的金相组织和二值图: (a)光学显微镜照片; (b)二值图

表1 不同等温淬火温度下样品中各组成相的体积分数, f_v

Table 1 The volume fraction (f_v) of each phase in the samples for different isothermal temperature

Isothermal temperature	$f_v/\%$			
	Undissolved carbide	Bainite	Martensite	Retained austenite
190 °C	5.2	54.7	33.3	6.8
210 °C	4.8	58.6	32.3	4.3
230 °C	4.3	59.4	33.9	2.4

时, 碳原子不活跃, 自扩散系数较小, 向薄膜状残余奥氏体中的扩散速度减慢, 从而影响贝氏体组织的转变速度, 因此其贝氏体转变量较少^[22]; 随着等温淬火温度的升高, 碳原子的扩散能力增强, 贝氏体转变周期变短, 当等温淬火温度进一步升高时, 贝氏体含量增多的同时继续长大。

图5所示为GCr15SiMo轴承钢不同等温温度下的XRD谱图。在44.8°、65.3°和82.2°时出现明显的马氏体/贝氏体峰, 在43.1°时出现明显的奥氏体峰。随着等温温度的升高, 马氏体/贝氏体(α 相)峰逐渐增强, 奥氏体(γ 相)峰逐渐减弱。通过对残余奥氏体进行测试发现, 试样油淬后残余奥氏体的体积分数为6.42%; 在190、

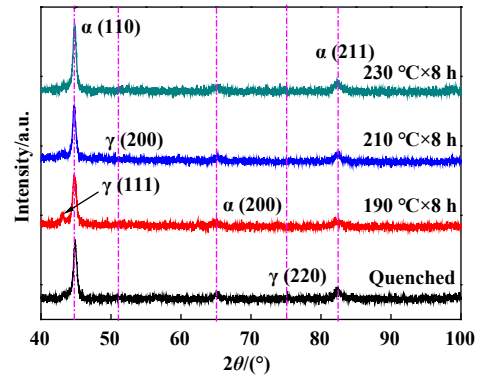


Fig. 5 XRD profiles of GCr15SiMo steel for different isothermal temperature

图5 GCr15SiMo钢不同等温温度的XRD图谱

210和230 °C等温8 h时残余奥氏体的体积分数依次为6.8%、4.3%和2.4%。分析认为, 随着等温温度的升高, 贝氏体转变速率加快且含量增多, 当贝氏体转变达到50%~60%时, 残余奥氏体含量降低^[23]。

2.1.2 等温淬火时间对组织的影响

图6所示为GCr15SiMo轴承钢在等温淬火温度为210 °C, 保温时间分别为4、8和24 h微观组织的SEM照片。结果表明当保温时间由4 h延长至8 h时, GCr15SiMo

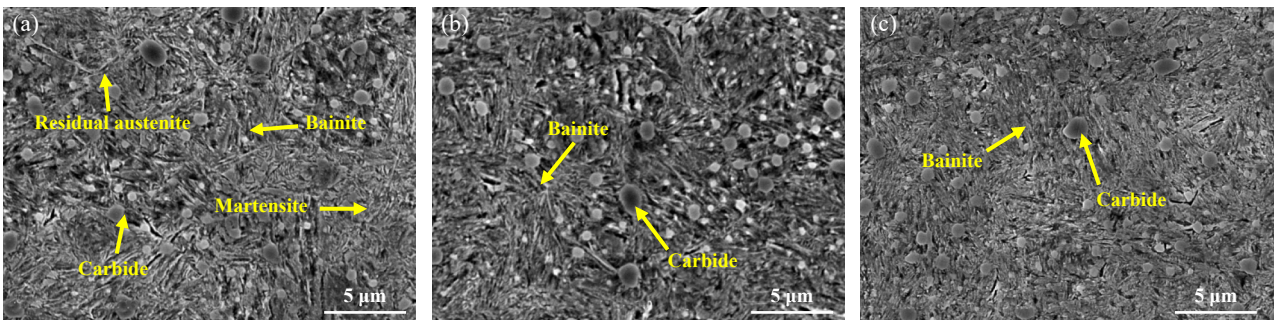


Fig. 6 SEM micrographs of GCr15SiMo steel under different holding time: (a) 210 °C × 4 h; (b) 210 °C × 8 h; (c) 210 °C × 24 h

图6 GCr15SiMo钢不同保温时间下的微观组织的SEM照片: (a) 210 °C × 4 h; (b) 210 °C × 8 h; (c) 210 °C × 24 h

轴承钢中针状贝氏体明显增多, 未溶碳化物体积分数减少, 由5.1%降至4.8% [图6(a~b)]. 保温时间延长至24 h, GCr15SiMo轴承钢中贝氏体组织变粗, 未溶碳化物平均体积分数为3.6% [图6(c)]. 对不同保温时间试样的各物相含量进行统计, 结果列于表2中. 分析认为, 首先在贝氏体相变之初, 碳原子会从铁素体向周围的奥氏体扩散, 随着保温时间的延长, 大量的碳原子扩散到奥氏体中, 剩余的未溶碳化物就减少^[21], 随着保温时间的延长, 转换的贝氏体组织也越来越多, 达到一定程度后再延长保温时间组织出现粗化^[24-25].

表2 不同等温淬火时间下样品中各组成相的体积分数
Table 2 The volume fraction (f_V) of each phase in the samples for different holding time

Holding time/h	$f_V/\%$			
	Undissolved carbide	Bainite	Martensite	Retained austenite
4	5.1	30.2	51.2	13.5
8	4.8	58.6	32.3	4.3
24	3.6	67.5	27.3	1.6

图7所示为GCr15SiMo轴承钢在等温淬火温度210 °C保温时间为8和24 h的TEM照片. 可以看出, 保温8 h的组织含有板条状的贝氏体铁素体和残余奥氏体. 利用IPP软件大量统计了透射照片中贝氏体铁素体板条平均宽度, 为了提高计算的精确度, 利用公式(2)对板条组织在观察时的位向关系误差进行修正^[26].

$$\bar{L}_T = \pi t / 2 \quad (2)$$

式中: \bar{L}_T 为直接测得的贝氏体板条的线性截距, 经过修正之后的贝氏体板条平均宽度为 t . 保温8 h后所获得的贝氏体板条宽度平均尺寸为59.9±3 nm, 贝氏体铁素体板条厚度小于100 nm的约占80%. 而保温24 h

后获得的贝氏体铁素体板条宽度平均尺寸为82.1±3 nm, 贝氏体铁素体板条宽度小于100 nm的约占60%, 说明等温淬火时间延长至24 h时, 贝氏体铁素体板条宽度表现出粗化的现象.

图8所示为GCr15SiMo轴承钢不同保温时间下的XRD图谱. 在44.8°、65.3°和82.2°处出现明显的马氏体/贝氏体峰, 在43.1°时出现明显的奥氏体峰. 随着等温时间的延长, 马氏体/贝氏体(α 相)峰逐渐增强, 奥氏体(γ 相)峰逐渐减弱. 通过对残余奥氏体进行测试, 结果表明, 试样在210 °C分别等温4、8和24 h时的残余奥氏体的体积分数分别为13.5%、4.3%和1.6%. 可以看出, 随着保温时间的增加, 残余奥氏体的含量在逐渐降低, 保温4~8 h, 残余奥氏体的含量降低较快, 保温8~24 h, 残余奥氏体的含量降低较缓慢. 这是因为贝氏体逐渐转变增多, 残余奥氏体的含量不断降低, 当等温时间比较长时, 残余奥氏体含量下降到1个较低的值, 变化就不再那么明显^[27].

2.2 硬度测试分析

图9所示为GCr15SiMo轴承钢不同热处理条件下的硬度对比. 结果表明, 传统油淬处理后的材料硬度约为62 HRC, 其稍高于等温淬火处理后的材料硬度. 这一现象是由马氏体组织的硬度高于贝氏体组织的硬度造成的. 随着等温温度的升高, 材料的硬度逐渐降低 [图9(a)]. 分析认为, 等温温度的升高使贝氏体转变速率加快, 马氏体组织减少, 其次热处理后作为脆硬相弥散分布在基体中的未溶碳化物含量逐渐减少^[28-29], 所以材料硬度降低. 随着保温时间的延长, 材料的硬度也呈现降低的趋势 [图9(b)]. 分析认为, 保温时间由4 h延长至8 h时, 马氏体组织逐渐减少, 碳原子不断地扩散到奥氏体中, 组织中细小、均匀且弥散的

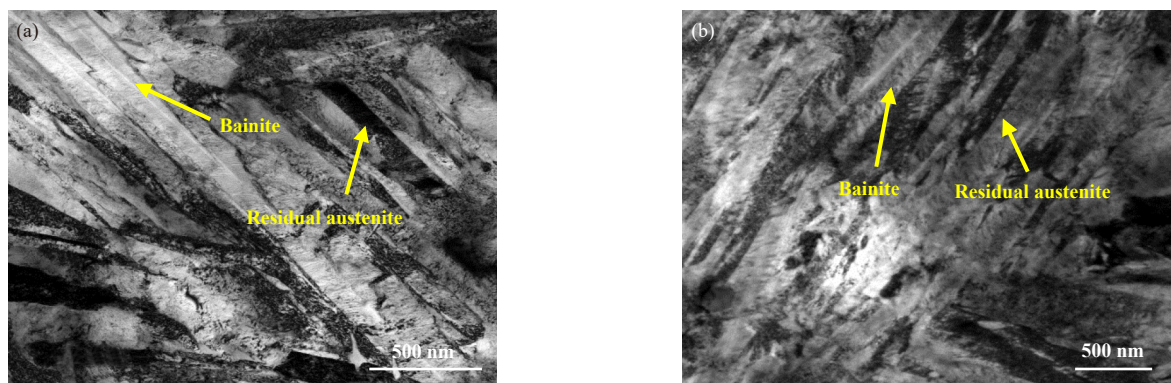


Fig. 7 TEM micrographs of the GCr15SiMo steel for different holding time when the isothermal temperature is 210 °C: (a) 8 h; (b) 24 h

图7 GCr15SiMo钢等温温度210 °C下保温不同时间的TEM照片: (a) 8 h; (b) 24 h

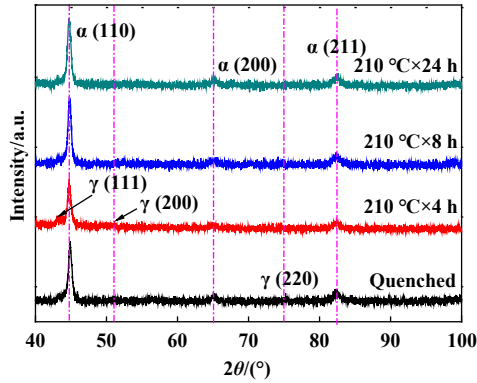


Fig. 8 XRD profiles of GCr15SiMo steel for different holding time

图8 GCr15SiMo钢不同保温时间的XRD图谱

未溶碳化物越来越少,同时作为韧性相的针状贝氏体组织逐渐增多^[30],当等温淬火时间延长至24 h时,马氏体组织含量继续降低,针状贝氏体组织出现粗化现象,从而导致材料硬度有所降低。

2.3 摩擦磨损性能分析

对不同热处理参数下的GCr15SiMo轴承钢进行

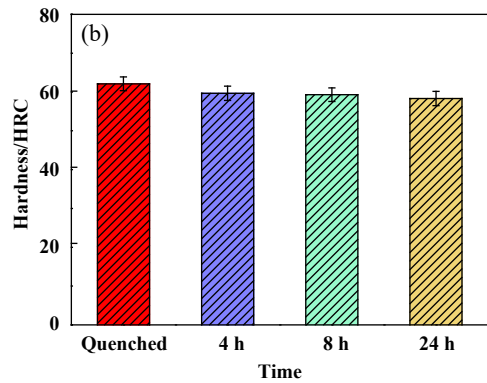
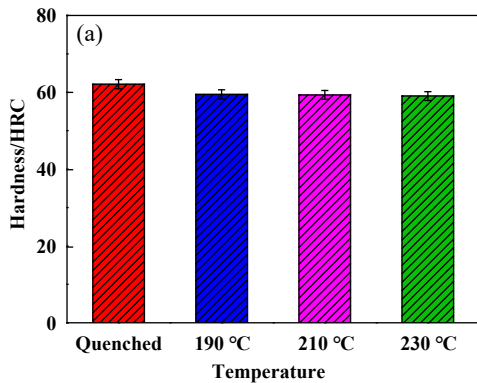


Fig. 9 Hardness change of GCr15SiMo steel with different isothermal temperature and holding time: (a) temperature; (b) time

图9 GCr15SiMo钢硬度随不同等温温度和保温时间的变化关系: (a) 温度; (b) 时间

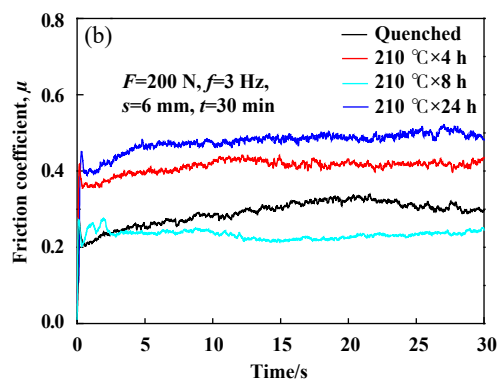
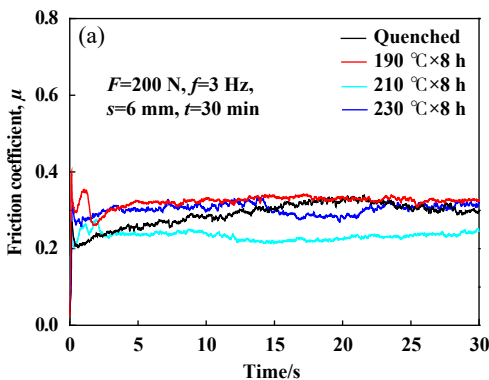


Fig. 10 Friction coefficient of GCr15SiMo steel with different isothermal temperature and holding time: (a) temperature; (b) time

图10 GCr15SiMo钢摩擦系数随等温温度和保温时间的变化关系: (a) 温度; (b) 时间

摩擦磨损试验,不同等温淬火温度和保温时间条件下所得摩擦系数如图10所示.可以看出,随摩擦的进行,摩擦系数先增大后减小再趋于平稳,这是因为摩擦系数趋于平稳之前需要经过短暂的磨合,一段时间后材料与摩擦对偶之间接触平稳^[31].在不同等温淬火温度条件下,摩擦系数变化趋势相似,等温淬火温度为210 °C保温8 h的试样摩擦系数较低[图10(a)].图10(b)所示为试样在不同保温时间下的摩擦系数结果,可知保温24 h的试样摩擦系数最高,保温8 h的试样摩擦系数最低,油淬试样的摩擦系数略高于保温8 h的试样摩擦系数。

图11所示为GCr15SiMo轴承钢不同热处理工艺下的磨损率结果.当保温时间为8 h时,随着等温温度的升高,材料的磨损率呈现先降低后升高的趋势,其中等温温度为210 °C时磨损率最低[图11(a)].这可能是受到韧性的影响,其中贝氏体和奥氏体都属于韧性相,而且贝氏体形成需要一定的驱动力和时间^[21].随着等温温度的升高,贝氏体不断转变,贝氏体与奥氏体的共同作用使材料的耐磨性增强.继续升高等温温度,材料的耐磨性降低,这是因为硬度也是影响耐

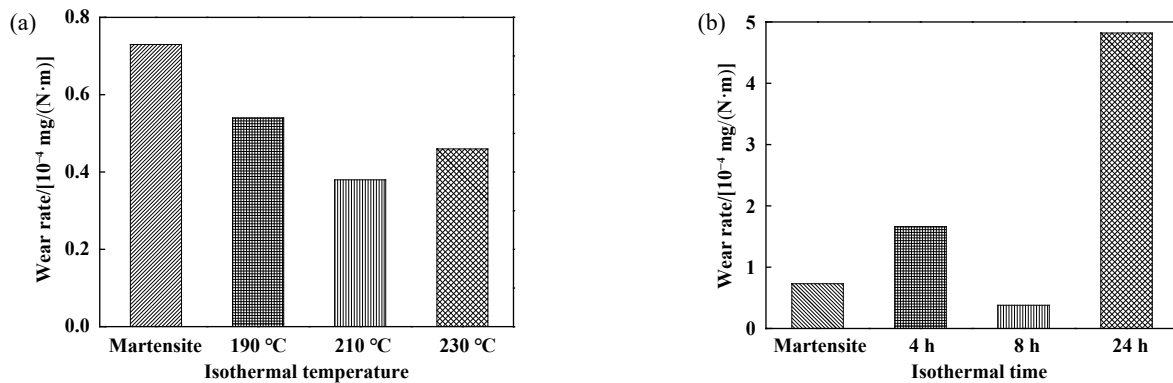


Fig. 11 Wear rate of GCr15SiMo steel varies with different isothermal temperature and holding time: (a) temperature; (b) time

图 11 GCr15SiMo 钢磨损率随不同等温温度和保温时间的变化关系: (a) 温度; (b) 时间

磨性的1个重要因素, 根据图9(a)可知硬度逐渐降低, 所以等温温度为230 °C时材料的耐磨性降低. 图11(b)所示为等温温度固定为210 °C时不同保温时间下的磨损率结果. 结果表明, 相同等温淬火温度下, 磨损率呈现出先降低再升高的趋势, 且保温时间为8 h时材料磨损率最低为0.38 mg/(N·m). 分析认为, 1个具有良好耐磨性的材料需要强韧性配合^[27], 保温时间为4 h时, 材料强度虽然高, 但贝氏体相含量少韧性低; 保温时间为8 h时, 贝氏体转变增多, 材料韧性提高; 保温时间为24 h时, 马氏体组织含量较少且贝氏体针状组织粗化, 材料强度不够, 所以磨损率随着保温时间的延长先降低再升高. 与等温淬火温度相比, 保温时间对材料的组织和耐磨性能的影响更为明显, 上述结果表明, GCr15SiMo轴承钢在等温淬火温度为210 °C, 保温时间为8 h时耐磨性最优, 其磨损率为0.38 mg/(N·m). 对比传统油淬后得到的马氏体轴承钢材料可知, 等温淬火优化工艺下获得的贝氏体轴承材料的耐磨性明显优于马氏体轴承材料的耐磨性, 对比马氏体轴承, 贝氏体轴承钢的磨损率降低了47.9%. 分析认为, 油淬处理后的材料组织以马氏体为主, 材料硬度虽然稍高但缺少韧性, 等温淬火温度为210 °C, 保温时间为8 h的材料为贝氏体和马氏体的复相组织, 有较好的强韧性搭配, 材料耐磨性更好.

2.4 磨损机制

图12所示为不同等温温度下GCr15SiMo轴承钢磨痕的SEM照片和EDS(能谱仪)成分分析结果. 传统油淬试样的磨损表面可以看到许多细小犁沟, 呈现出明显的微观切削特征[图12(a1)]. 当等温淬火温度为190 °C, 保温时间为8 h时, 材料磨损表面除了存在少量犁沟, 还出现了明显的黏着坑, 即其磨损机制是微观切削和黏着磨损共存[图12(b1)]. 当等温淬火温度升

高至210和230 °C时, 材料磨损表面的微观切削现象相对减弱, 主要以黏着磨损机制为主, 且等温淬火温度为230 °C时的黏着磨损程度较等温淬火温度为210 °C时的相对严重[图12(c1~d1)]. 分析认为, 油淬试样的微观组织主要以脆性马氏体为主, 摩擦磨损过程中马氏体首先以细小碎片剥落下来, 接着这些细小碎片在后续磨损过程中作为硬质颗粒对材料造成严重的切削. 对试样进行等温淬火处理后, 材料微观组织中逐渐形成了贝氏体, 材料韧性提高, 材料的磨损机制由微观切削逐渐转变黏着磨损.

图12(a2)、(b2)、(c2)和(d2)所示为不同等温淬火温度下试样磨损表面氧元素分布结果. 分析可知, 不同等温淬火温度下试样摩擦磨损后其表面都存在氧化反应, 并且氧元素的分布与图12(a1)、(b1)、(c1)和(d1)磨损形貌照片中亮白色物质的分布一致. 图12(a3)、(b3)、(c3)和(d3)是不同试样磨损形貌中亮白色物质相的点扫描能谱结果, 结果表明不同试样磨损形貌中亮白色物质相是铁的氧化物^[32]. 由此可以判断, 上述样品在摩擦磨损过程中也发生了氧化磨损, 并且油淬试样和等温淬火温度为230 °C条件时试样的氧化磨损程度较为严重.

图13所示为不同保温时间下, GCr15SiMo轴承钢磨痕的SEM照片和EDS成分分析结果. 结果表明, 当等温淬火温度为210 °C, 保温时间为4 h时, 材料磨损表面存在较为严重的黏着坑, 呈现出黏着磨损特征[图13(a1)]. 保温时间为8 h时, 材料磨损表面仍主要以黏着磨损为主, 但其黏着磨损程度轻于保温时间为4 h的样品[图13(b1)]. 保温时间为24 h时, 材料磨损表面存在明显的沟槽, 呈现出严重的磨粒磨损特征[图13(c1)]. 分析认为, 保温时间短时, 组织中马氏体含量多且贝

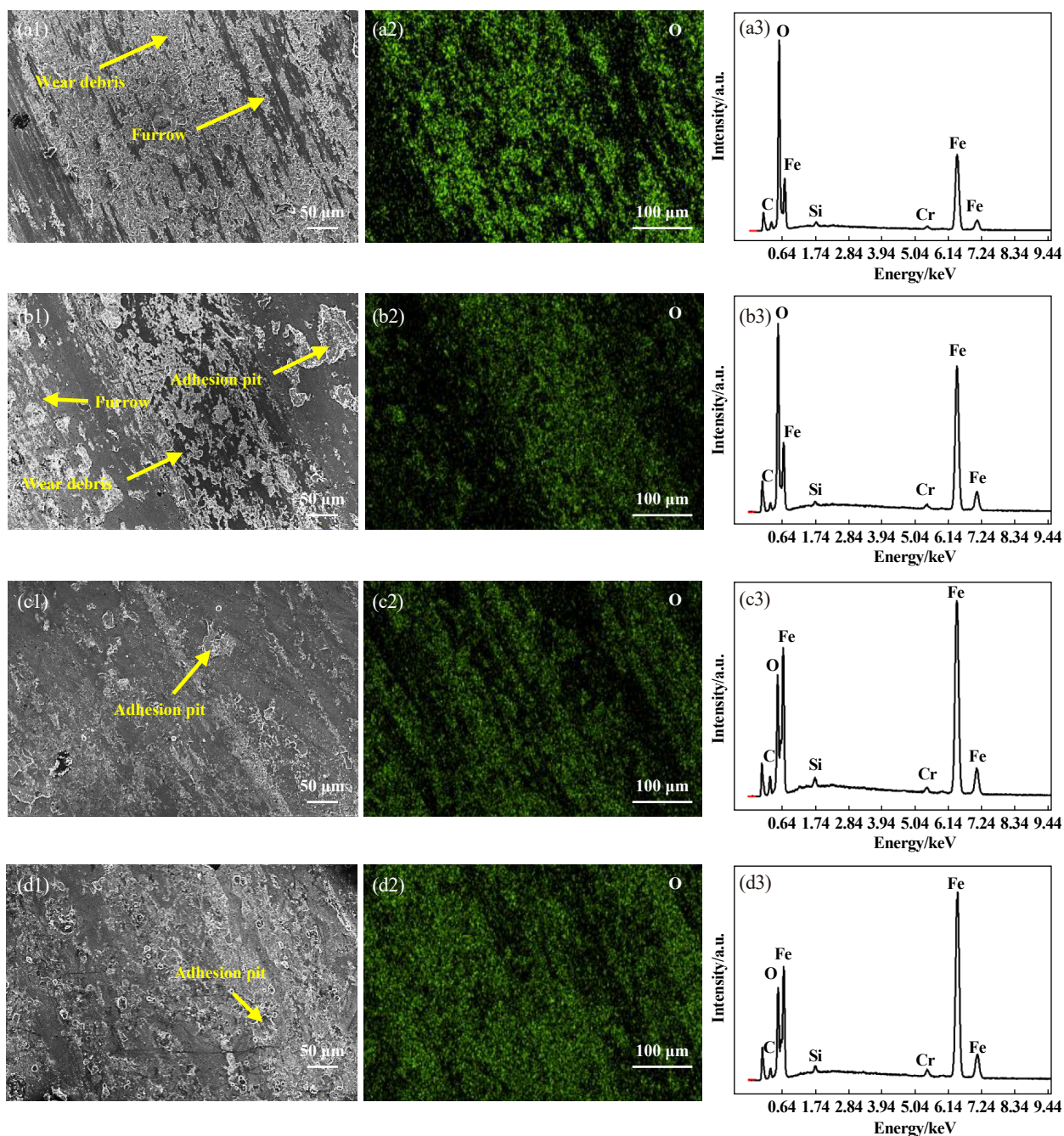


Fig. 12 SEM micrographs and EDS elements distribution at worn surface of GCr15SiMo steel for different isothermal temperature: (a) 860 °C-oil quenching; (b) 190 °C×8 h; (c) 210 °C×8 h; (d) 230 °C×8 h

图12 不同等温温度下GCr15SiMo钢磨损形貌的SEM照片和EDS元素分布图: (a) 860 °C-油淬; (b) 190 °C×8 h; (c) 210 °C×8 h; (d) 230 °C×8 h

氏体含量少,材料韧性差,在磨损过程中基底出现裂缝并扩大,接着在后续磨损过程中被黏着掉,呈现出黏着磨损机制^[33].保温时间为8 h时,其含有一定含量的马氏体和贝氏体的复相组织,还有残余奥氏体,提高了材料的塑韧性,导致其耐磨性好^[34-36].继续延长保温时间,贝氏体含量增多,硬度降低,所以沟槽加深.图13(a2~c2)和图13(a3~c3)同样表明不同保温时间的

样品在摩擦磨损过程中皆发生了氧化磨损.

图14所示为不同等温温度下GCr15SiMo轴承钢摩擦磨损试验后的纵截面组织照片.油淬后的试样和190 °C保温8 h试样的磨损纵截面可以观察到明显裂纹,裂纹的扩展方向与表面呈15°~30° [图14(a~b)].分析认为油淬试样和190 °C保温8 h试样的韧性都较低,容易形成裂纹.由于等温淬火温度210和230 °C保温8 h

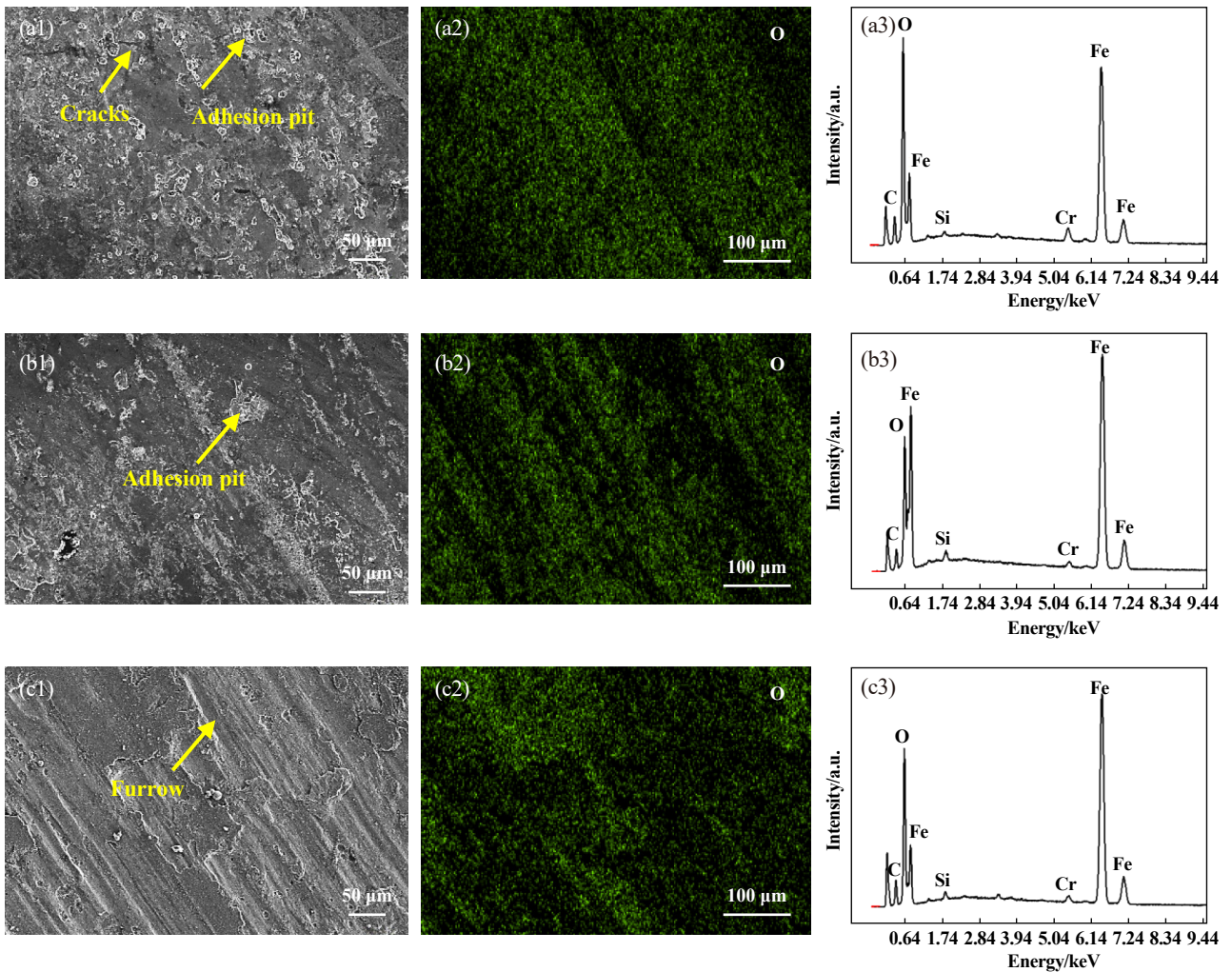


Fig. 13 SEM micrographs and EDS elements distribution at worn surface of GCr15SiMo steel for different holding time: (a) 210 °C-4 h; (b) 210 °C-8 h; (c) 210 °C-24 h

图 13 不同保温时间下GCr15SiMo钢磨损形貌的SEM照片和EDS元素分布图: (a) 210 °C-4 h; (b) 210 °C-8 h; (c) 210 °C-24 h

的试样贝氏体含量增多, 韧性较好, 磨损后的截面没有出现明显的裂纹. 然而对比等温淬火温度210和230 °C的试样, 发现试样存在明显变形区, 且等温淬火温度230 °C的试样截面组织变形区明显比210 °C的试样变形区大[图14(c~d)]. 这些试样的磨损截面结果与图11(a)磨损率和图12磨损机制结果相符合.

图15所示为不同保温时间下, GCr15SiMo轴承钢摩擦磨损试验后纵截面组织的SEM照片. 等温淬火温度210 °C保温4 h的试样纵截面可以观察到较大的凹坑, 靠近表层出现碳化物减少和变形[图15(a)]. 与210 °C保温4 h的试样相比, 保温8 h的试样磨损小, 靠近表层组织变形小且较为平整[图15(b)]. 保温24 h的试样纵截面组织变形较大, 变形区厚度约为10 μm, 出现流变区和碳化物回溶现象, 磨损最为严重[图15(c)]. 这些纵截面组织结果与图11(b)的磨损率和图13的磨损机制

结果相一致.

3 结论

本文中对GCr15SiMo轴承钢进行传统油淬和等温淬火处理, 并研究了等温淬火温度和保温时间对GCr15SiMo轴承钢组织、摩擦磨损性能和机制的影响, 得到以下主要结论:

a. GCr15SiMo轴承钢经过传统油淬后组织以马氏体组织为主, 等温淬火后的轴承组织出现贝氏体组织. 随着等温淬火温度的升高和保温时间的延长, GCr15SiMo轴承钢中贝氏体针状组织逐渐增多随后粗化, 残余奥氏体和未溶碳化物的体积分数逐渐降低, 硬度也逐渐降低.

b. GCr15SiMo轴承钢传统油淬后的材料其磨损机制主要为微观切削, 在等温淬火工艺下, 升高等温

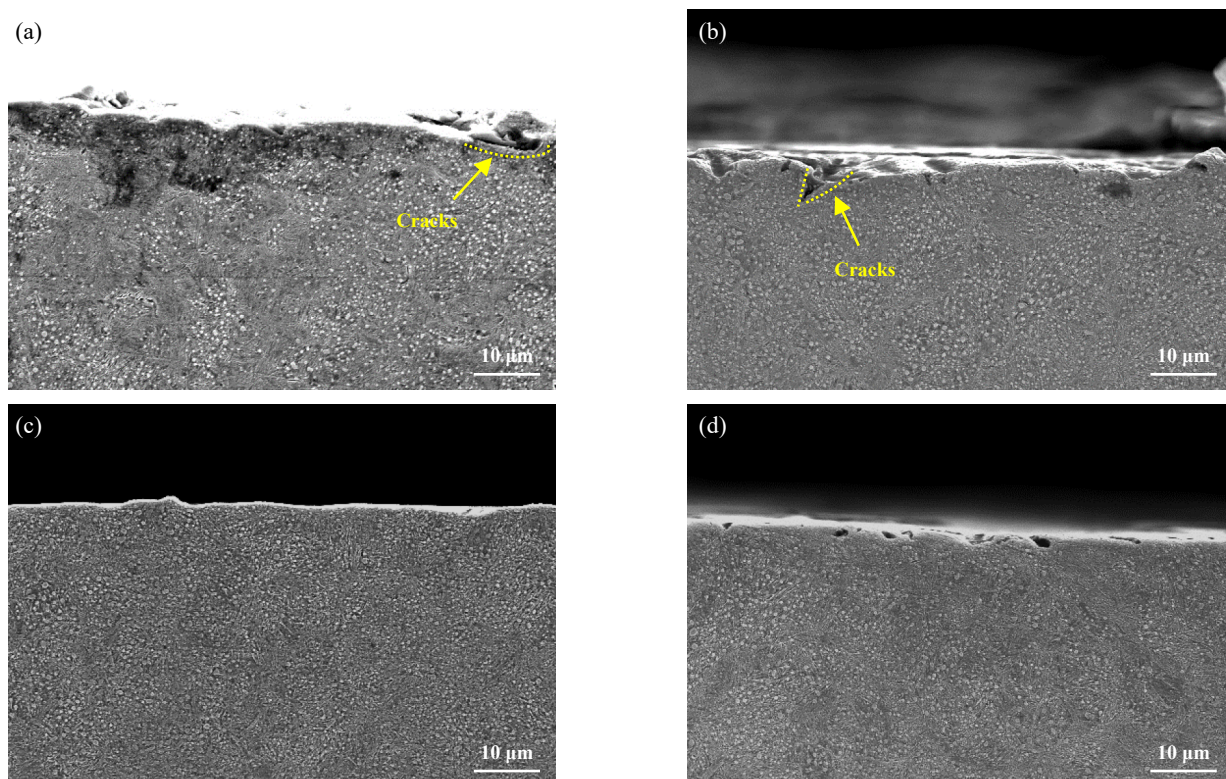


Fig. 14 SEM micrographs of longitudinal section organization of GCr15SiMo steel after wear testing for different isothermal temperature after wear and tear: (a) 860 °C-oil quenching; (b) 190 °C×8 h; (c) 210 °C×8 h; (d) 230 °C×8 h
图 14 不同等温温度下GCr15SiMo钢磨损后纵截面组织的SEM照片: (a) 860 °C-油淬; (b) 190 °C×8 h; (c) 210 °C×8 h; (d) 230 °C×8 h

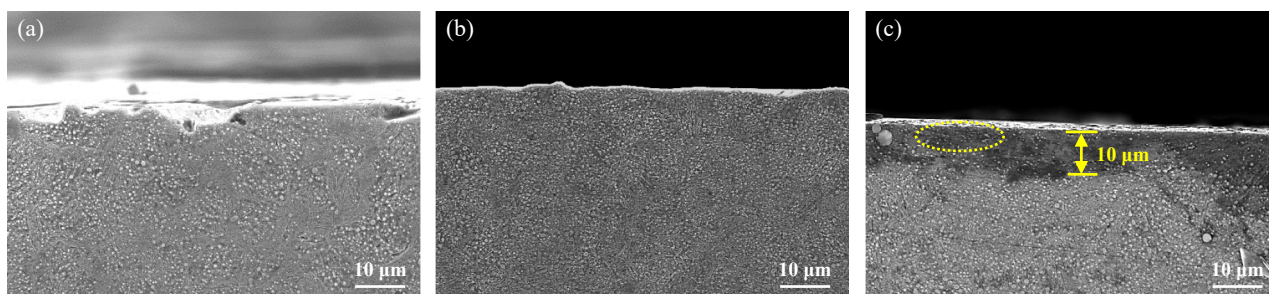


Fig. 15 SEM micrographs of longitudinal section organization of GCr15SiMo steel after wear testing for different holding time: (a) 210 °C×4 h; (b) 210 °C×8 h; (c) 210 °C×24 h
图 15 不同保温时间下GCr15SiMo钢磨损后纵截面组织的SEM照片: (a) 210 °C×4 h; (b) 210 °C×8 h; (c) 210 °C×24 h

淬火温度,材料韧性提高,磨损机制由微观切削逐渐转变为黏着磨损.延长等温淬火时间,由于材料韧性增加,强度降低,磨损机制由黏着磨损转变为磨粒磨损.样品在摩擦磨损的过程中也发生了氧化磨损,且油淬试样和等温淬火温度为230 °C时试样的氧化磨损程度较严重.

c.本文中,GCr15SiMo轴承钢最佳的淬火工艺是等温淬火温度为210 °C,保温时间为8 h,该工艺下组织中各物相体积分数分别为残余奥氏体4.3%,未溶碳

化物4.8%,马氏体32.3%,贝氏体58.6%,测试其硬度为59.32 HRC,磨损率最低为 0.38×10^{-4} mg/(N·m).

参考文献

- [1] Wang Yanhui. Chemical component design, microstructure and properties control of nanobainitic steels used for high-power wind power bearing[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017 (in Chinese) [王艳辉.大功率风电轴承用纳米贝氏体钢化学成分设计与组织性能调控[D].秦皇岛:燕山大学,2017].
- [2] Zhi Chao, Zhao Aimin M. Study on two-body wear mechanism of

- nano bainitic steel[C]//Proceedings of the 14th National Wear-resistant Materials Conference. 2015 (in Chinese) [智超,赵爱民. 纳米贝氏体钢二体磨损机理研究[C]//第十四届全国耐磨材料大会论文集,2015].
- [3] Zhang P, Zhang F C, Yan Z G, et al. Wear property of low-temperature bainite in the surface layer of a carburized low carbon steel[J]. *Wear*, 2011, 271(5-6): 697-704. doi: [10.1016/j.wear.2010.12.025](https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.025).
- [4] Pauschitz A, Roy M, Franek F. Mechanisms of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures[J]. *Tribology International*, 2008, 41(7): 584-602. doi: [10.1016/j.triboint.2007.10.003](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.10.003).
- [5] Zhi Chao, Zhao Aimin, He Jianguo, et al. Thermodynamic analysis and strength-toughness research of nanobainite[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(5): 691-698 (in Chinese) [智超,赵爱民,何建国,等. 纳米贝氏体的热力学分析及强韧化研究[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(5): 691-698].
- [6] Liu Hongji, Song Zhaohuan, Zhang Xiliang, et al. Effect of superbainite on the strength and toughness of ultrahigh-carbon steel with 1.37 wt.% C[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2018, 35(3): 90-96 (in Chinese) [刘宏基,宋兆焕,张喜亮,等. 超级贝氏体对1.37wt.% C超高碳钢强度和韧性的影响[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(3): 90-96].
- [7] Leiro A, Vuorinen E, Sundin K G, et al. Wear of nano-structured carbide-free bainitic steels under dry rolling-sliding conditions[J]. *Wear*, 2013, 298-299: 42-47. doi: [10.1016/j.wear.2012.11.064](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.064).
- [8] Yang Zhinan, Zhang Fucheng, Wang Yanhui, et al. Carburization bearing steel and preparing method[P]. CN112030065A (in Chinese) [杨志南,张福成,王艳辉,等. 一种渗碳轴承钢及其制备方法[P]. CN112030065A].
- [9] Yang Zhinan, Zhang Fucheng. Steel for impact-resistant load bearing and heat treatment method[P]. CN105714190A (in Chinese) [杨志南,张福成. 一种耐冲击载荷轴承用钢及其热处理方法[P]. CN105714190A].
- [10] Yang Zhinan, Chu Chunhe, Jiang Feng, et al. Accelerating nano-bainite transformation based on a new constructed microstructural predicting model[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 748: 16-20. doi: [10.1016/j.msea.2019.01.061](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.061).
- [11] Jiao Yan, Li Zulai, Shan Quan, et al. Effect of Impact Wear on Isothermal Quenching of Fe-0.5C-2.0Si-2.5Mn Steel[J]. *Tribology*, 2017, 37(1): 52-58 (in Chinese) [焦岩,李祖来,山泉,等. 等温淬火热处理工艺对Fe-0.5C-2.0Si-2.5Mn钢冲击磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(1): 52-58]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.01.007](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.01.007).
- [12] Li Wei, Qin Yuman, Li Yanguo, et al. Effect of heat treatment on surface microstructure and properties of nano bainitic carburized bearing steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(4): 63-72 (in Chinese) [李伟,秦羽满,李艳国,等. 热处理工艺对纳米贝氏体渗碳轴承钢表层组织和性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(4): 63-72]. doi: [10.3901/JME.2021.04.063](https://doi.org/10.3901/JME.2021.04.063).
- [13] Zhang Zengqi, Chang Baoliang, Liang Hua, et al. Application of bainite isothermal quenching technology to rolling mill bearings[J]. *Bearing*, 1998(2): 24-28, 46 (in Chinese) [张增歧,常保良,梁华,等. 贝氏体等温淬火工艺在轧机轴承上的应用[J]. *轴承*, 1998(2): 24-28, 46].
- [14] He Jianguo, Zhao Aimin, Huang Yao, et al. Effect of warm rolling process on phase transformation, microstructure and mechanical properties of nano-bainite steel[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2015, 29(3): 207-212 (in Chinese) [何建国,赵爱民,黄耀,等. 温轧工艺对纳米贝氏体相变速率、组织和力学性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2015, 29(3): 207-212].
- [15] Kumar A, Singh A. Toughness dependence of nano-bainite on phase fraction and morphology[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 729: 439-443. doi: [10.1016/j.msea.2018.05.106](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.106).
- [16] Su Liting. Study on microstructure and properties of compression, contact fatigue and wear in new type bainitic bearing steel[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016 (in Chinese) [苏丽婷. 新型贝氏体轴承钢的组织与压缩、接触疲劳及磨损性能[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016].
- [17] Ye Jianyi, Wang Jiejun, Lai Weiming, et al. SiMoGCr15SiMo high hardenability bearing steel in hot places richard[J]. *Bearing*, 1999, 8: 14-16, 40(in Chinese) [叶健熠,王杰君,赖维明,等. GCr15SiMo高淬透性轴承钢的热处理[J]. *轴承*, 1999, 8: 14-16, 40].
- [18] Caballero F G, Miller M K, Babu S S, et al. Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(1): 381-390. doi: [10.1016/j.actamat.2006.08.033](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033).
- [19] Caballero F G, Miller M K, Garcia-Mateo C, et al. Redistribution of alloying elements during tempering of a nanocrystalline steel[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(2): 188-199. doi: [10.1016/j.actamat.2007.09.018](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.09.018).
- [20] Caballero F G, Miller M K, Garcia-Mateo C. Carbon supersaturation of ferrite in a nanocrystalline bainitic steel[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(7): 2338-2343. doi: [10.1016/j.actamat.2009.12.020](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.12.020).
- [21] Ji Yunlong. Study on rolling contact fatigue and wear behavior of G23Cr2Ni2Si1Mo nano-bainite bearing steel[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018 (in Chinese) [纪云龙. G23Cr2Ni2Si1Mo 纳米贝氏体轴承钢的滚动接触疲劳及磨损行为研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018].
- [22] Qi Liang, Hao Qiqi, Yang Dongbiao, et al. Effect of alloying element and austempering process on microstructure of ultrafine bainitic steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(8): 82-85 (in Chinese) [齐亮,郝齐齐,杨东彪,等. 合金元素及等温淬火工艺对超细贝氏体钢组织的影响[J]. *金属热处理*, 2017, 42(8): 82-85].
- [23] Zhao Jing. Microstructure and mechanical properties of nanostructure bainite used for bearings[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013 (in Chinese) [赵敬. 高碳轴承钢纳米贝氏体组织

- 与性能的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013].
- [24] Guo Hui, Li Qiang, Su Jianmin, et al. Microstructural characterizations and kinetics model of isothermal bainite formation with the presence of prior martensite in high-carbon nanostructured bainitic steel[J]. *Steel Research International*, 2021, 92(7): 2000708. doi: [10.1002/srin.202000708](https://doi.org/10.1002/srin.202000708).
- [25] Li Wei, Qin Yuman, Wang Yanhui, et al. Effects of low temperature bainite transition on surface structure and properties of carburized nano-bainite bearing steel[J]. *Journal of Yanshan University*, 2021, 45(1): 25–32 (in Chinese) [李伟, 秦羽满, 王艳辉, 等. 低温贝氏体转变对渗碳纳米贝氏体轴承钢表层组织与性能的影响[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(1): 25–32].
- [26] Garcia-Mateo C, Caballero F G, Bhadeshia H K D H. Acceleration of low-temperature bainite[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(11): 1821–1825. doi: [10.2355/isijinternational.43.1821](https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1821).
- [27] She Li. Study on contact fatigue property of bainitic bearing steels[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015 (in Chinese) [余丽. 贝氏体轴承钢滚动接触疲劳性能的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015].
- [28] Kang J H, Rivera-Díaz-del-Castillo P E J. Carbide dissolution in bearing steels[J]. *Computational Materials Science*, 2013, 67: 364–372. doi: [10.1016/j.commatsci.2012.09.022](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.09.022).
- [29] Ji Shan. Effect of carbon content on microstructure and properties of bainite steel[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020 (in Chinese) [计珊. 碳含量对贝氏体钢组织和性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020].
- [30] Cao Y J, Sun J Q, Ma F, et al. Effect of the microstructure and residual stress on tribological behavior of induction hardened GCr15 steel[J]. *Tribology International*, 2017, 115: 108–115. doi: [10.1016/j.triboint.2017.05.028](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.028).
- [31] Ma Biao, Fu Lihua, Shangguan Bao, et al. Friction and wear properties of GCr15 and G20CrNi₂Mo bearing steels under high temperature lubrication[J]. *Lubrication Engineering*, 2022, 47(2): 62–68 (in Chinese) [马彪, 傅丽华, 上官宝, 等. GCr15及G20CrNi₂Mo轴承钢高温润滑条件下摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2022, 47(2): 62–68].
- [32] Wang Jiawei. The research on the microstructure and anti-wear performance of high performance nitriding bearing steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese) [王家玮. 高性能渗氮轴承钢微观组织和磨损性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013].
- [33] Rajaram G, Kumaran S, Rao T S, et al. Studies on high temperature wear and its mechanism of Al-Si/graphite composite under dry sliding conditions[J]. *Tribology International*, 2010, 43(11): 2152–2158. doi: [10.1016/j.triboint.2010.06.004](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.06.004).
- [34] Luo Ping, Gao Guhui, Gui Xiao, et al. Charpy impact properties of grain boundary allotriomorphic ferrite and granular bainite duplex microstructure[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1004–1005: 1236–1244. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1004-1005.1236](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1004-1005.1236).
- [35] Zhao Jingli, Zhao Xianming, Zhao Xiaoyu, et al. Effects of nucleation site and morphology of carbide-free bainite on microstructures and properties of bainite/martensite multi-phase steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 744: 86–93. doi: [10.1016/j.msea.2018.11.060](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.060).
- [36] Zhu Xiaotong, Pan Jinzhi, Zhao Xiujuan, et al. Effect of contact stress on the evolution and properties of FCB wheel steel[J]. *Tribology*, 2021, 41(5): 749–757 (in Chinese) [朱晓彤, 潘金芝, 赵秀娟, 等. 接触应力对FCB车轮钢组织演变与性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(5): 749–757]. doi: [10.16078/j.tribology.2020150](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020150).