

摩擦学学报

TRIBOLOGY



复合等温淬火对GCr15Si1Mo钢贝氏体转变及磨损性能影响

魏超凡, 杜三明, 傅丽华, 付壁聪, 张永振, 高元安, 花铝东, 郑晓猛

Effect of Compound Isothermal Quenching on Bainite Transformation and Wear Properties of GCr15Si1Mo Steel

WEI Chaofan, DU Sanming, FU Lihua, FU Bicon, ZHANG Yongzhen, GAO Yuan'an, HUA Lvdong, ZHENG Xiaomeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023123>

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>

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>

热处理工艺对铸造汽车覆盖件模具钢的耐磨性研究

Wear Resistance of Heat Treatment on Casting Automobile Covering Parts Die Steel

摩擦学学报. 2017, 37(2): 185 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.02.006>

微织构尺寸对轴承摩擦磨损性能的影响

Effect of Micro-Texture Size on Friction and Wear Performance of Journal Bearing

摩擦学学报. 2021, 41(5): 723 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020185>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

魏超凡, 杜三明, 傅丽华, 付壁聪, 张永振, 高元安, 花铝东, 郑晓猛. 复合等温淬火对GCr15Si1Mo钢贝氏体转变及磨损性能影响[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(7): 973–984. WEI Chaofan, DU Sanming, FU Lihua, FU Bicon, ZHANG Yongzhen, GAO Yuan'an, HUA Lvdong, ZHENG Xiaomeng. Effect of Compound Isothermal Quenching on Bainite Transformation and Wear Properties of GCr15Si1Mo Steel[J]. Tribology, 2024, 44(7): 973–984. DOI: [10.16078/j.tribology.2023123](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023123)

复合等温淬火对GCr15Si1Mo钢贝氏体转变及磨损性能影响

魏超凡¹, 杜三明¹, 傅丽华^{1,2*}, 付壁聪¹, 张永振¹, 高元安², 花铝东¹, 郑晓猛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)

摘要: 纳米贝氏体轴承钢具有优异的综合性能, 然而长时间的等温转变周期是限制其广泛应用的主要难题. 为了加速GCr15Si1Mo轴承钢纳米贝氏体转变, 本文中以常规一步(190 °C)等温淬火工艺作为对比, 设计了1种复合三步(157 °C+190 °C+250 °C)等温淬火工艺, 并对试验钢进行了不同工艺下的热处理. 使用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、透射电子显微镜(TEM)和洛氏硬度仪等对GCr15Si1Mo轴承钢微观组织和力学性能进行了表征, 利用UMT摩擦磨损试验机 and 三维形貌轮廓仪对试验钢的摩擦磨损性能进行了测试, 并分析了其磨损机制. 结果表明: 复合等温淬火工艺从纳米贝氏体的孕育期和转变期两阶段对其转变进行加速, 当转变相当含量贝氏体(53%~55%)时其相转变时间较常规等温淬火工艺缩短了5 h, 明显提高了贝氏体转变效率; 与常规等温淬火工艺相比较, 复合等温淬火工艺材料微观组织中的残余奥氏体含量明显降低, 且块状残余奥氏体大量转变为薄膜状残余奥氏体, 材料的冲击韧性明显提高, 但随复合等温淬火时间的延长, 材料的冲击韧性出现了先升高后降低的趋势; 当复合等温淬火工艺参数为157 °C×5 min+190 °C×2.0 h+250 °C×1.0 h时, 材料的强韧性匹配和耐磨性最佳, 且其耐磨性明显也优于常规等温淬火工艺下材料的耐磨性. 磨损机制结果表明: 复合等温淬火和常规等温淬火处理后试验钢的磨损机制均以磨粒磨损为主, 但复合等温淬火工艺下材料的磨粒磨损程度有所减轻并伴随轻微的黏着磨损和疲劳磨损.

关键词: 复合等温淬火; 轴承钢; 贝氏体转变; 微观组织; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.2; TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2024)07-0973-12

Effect of Compound Isothermal Quenching on Bainite Transformation and Wear Properties of GCr15Si1Mo Steel

WEI Chaofan¹, DU Sanming¹, FU Lihua^{1,2*}, FU Bicon¹, ZHANG Yongzhen¹,
GAO Yuan'an², HUA Lvdong¹, ZHENG Xiaomeng¹

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

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

Abstract: Nano-bainite bearing steel has excellent comprehensive properties, but the long isothermal transition period is

Received 3 July 2023, revised 16 September 2023, accepted 19 September 2023, available online 1 April 2024.

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

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (52101083), China Postdoctoral Science Foundation (2020M682316) and Science and Technology Research Project of Henan Province (232102221025).

国家自然科学基金项目(52101083)、中国博士后科学基金项目(2020M682316)和河南省科技攻关项目(232102221025)资助.

the main problem that limits its wide application. In order to accelerate the nano-bainite transformation of GCr15Si1Mo bearing steel, a compound three-step (157 °C+190 °C+250 °C) isothermal quenching process was designed in this paper as a comparison with the conventional one-step (190 °C) isothermal quenching process, and the test steels were heat-treated under different processes. The microstructure and mechanical properties of GCr15Si1Mo bearing steel were characterized by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), transmission electron microscope (TEM) and Rockwell hardness tester. The tribological properties and wear mechanism of the test steel were investigated by using UMT friction, wear testing machine and 3D topography profilometer. The results showed that the compound isothermal quenching process accelerated the transformation of nano-bainite from the two stages of gestation and transformation. Compared with the conventional isothermal quenching process, the phase transition time of the compound isothermal quenching process decreased by 5 h when they both transformed the equivalent content of bainite (about 53%~55%). Therefore it could significantly improve the transformation efficiency of nano-bainite. In the compound isothermal quenching process, the residual austenite content in the microstructure was obviously reduced, and the block residual austenite was largely transformed into thin film residual austenite, thus the impact toughness of the material which was treated by using the compound isothermal quenching was obviously improved. With prolonging the compound isothermal quenching time, the impact toughness of the material firstly increased and then decreased. When the compound isothermal quenching process parameter was 157 °C×5 min+190 °C×2.0 h+250 °C×1.0 h, the strength and toughness matching and wear resistance of the material were the best, and the wear resistance of the material was better than that of the conventional isothermal quenching process. The results indicated that the dominant wear mechanism of the test steel was abrasive wear after the compound isothermal quenching and the conventional isothermal quenching, but the degree of abrasive wear of the material under the compound isothermal quenching process was reduced and accompanied by slight adhesive wear and fatigue wear.

Key words: compound isothermal quenching; bearing steel; bainite transformation; micro-structure; friction and wear

轴承是众多机械设备的关键基础件之一,对于装备的稳定运行起着不可替代的作用,广泛应用在矿山机械、航空航天和风力发电等领域^[1-4].随着现代工业的快速发展,轴承的应用工况变得愈加苛刻,对轴承性能的要求越来越高,如低摩擦耐磨损、抗冲击性能、高尺寸稳定性和长使用寿命,这对轴承材料就提出了更高的要求^[5-6].纳米贝氏体轴承钢因其优异的综合性能和制造大型工程结构部件的可能性而备受关注^[7-10],研究表明这种独特的微观结构使其不仅具有优异的强度、耐磨性和接触疲劳性能,而且具有相当的延展性和韧性^[11-16].然而,由于轴承钢的纳米贝氏体相转变过程属于低温转变过程,使相变所需时间长达数天^[17].尤其对于高碳钢来说,高的碳含量使得贝氏体相变驱动力降低进而使其相变周期更长^[18],过长的转变周期成为了限制其工程广泛应用的重大难题.

近年来,人们研究了许多影响纳米贝氏体转变的因素^[19-24],如材料化学成分、热处理工艺、预冷变形和引入外场等.以上因素中,热处理工艺调控方法不需要添加额外的处理步骤,其操作简单且成本低廉. Avishan等^[21]研究表明:在生成纳米贝氏体之前预先在马氏体开始转变温度(M_s 点)以下进行短时间等温停留生成部分马氏体能够加速后期纳米贝氏体的相变,预先存在的马氏体引入了大量位错为贝氏体转变提供

了更多的形核点. Ravi等^[22]提出在贝氏体形成之前,用晶界渗碳体修饰母相奥氏体晶界,由于在渗碳体/奥氏体界面上贝氏体形核的活化能降低,导致后续贝氏体形成动力学明显加快. 于新攀^[23]研究了中碳钢预生成部分铁素体对纳米贝氏体转变的影响,并得出结论:与直接等温相变工艺相比,预相变铁素体的形成引入了 α/γ 界面,增加了贝氏体形核位置并细化贝氏体铁素体板条厚度. Yang等^[24]研究了高碳钢在 M_s 点以上用两步等温淬火工艺对纳米贝氏体转变的影响,研究发现 M_s 点以上2步等温淬火工艺将相变时间从60 h以上缩短到近25 h,提出这可能是由于第一步淬火过程提供了额外的迟滞自由能所致.

相比于传统GCr15轴承钢来说, GCr15Si1Mo钢具有高的淬透性,合金元素的加入使其易于获得纳米贝氏体组织,更适合制造风电等大型重载机械设备. 另一方面,尽管影响纳米贝氏体转变的方法众多,但大都为单一影响因素的研究,未考虑多种因素对纳米贝氏体转变的协同加速效果. 为了进一步缩短纳米贝氏体轴承钢的生产周期,本研究中从热处理角度出发,结合预相变和双阶贝氏体等温淬火加速效应制定了1种复合等温淬火工艺,研究了复合等温淬火工艺对GCr15Si1Mo纳米贝氏体轴承钢微观组织的影响,揭示了其影响纳米贝氏体相转变的机制,探讨了不同等温淬火工艺下材料

的力学性能和摩擦磨损性能, 以期为纳米贝氏体轴承钢生产工艺的制定与实际工程的广泛应用提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料

本研究中所用材料为商用热轧态的GCr15Si1Mo

轴承钢, 其化学成分列于表1中. 高含量的C元素和Mn元素的加入可以降低材料的 M_s 点温度, 使得材料能够在低温下进行贝氏体转变. Si元素的加入能够有效抑制渗碳体的形成, Al和Mo元素可以增加贝氏体相变驱动力^[19]. 适量合金元素的加入, 可以改善轴承钢的综合性能。

表 1 GCr15Si1Mo轴承钢的化学成分
Table 1 The chemical composition of GCr15Si1Mo bearing steel

Element	C	Cr	Si	Al	Mn	Mo	Ni	S	P	Fe
Mass fraction/%	0.97	1.58	1.24	0.05	0.37	0.34	0.001	0.006	0.002	Bal

为了分析复合等温淬火工艺加速纳米贝氏体转变的效率及其对摩擦磨损性能影响, 本文中分别对GCr15Si1Mo轴承钢进行了常规一步等温淬火和复合三步等温淬火处理. 首先将GCr15Si1Mo轴承钢线切割为60 mm×45 mm×15 mm的块状试样若干, 使用KSX4-5-13型高温箱式电阻炉和KJL-12Y型快速升温盐浴炉对其进行常规一步等温淬火(Q-B_{190 ℃})和复合三步等温淬火(Q-M_{157 ℃}-B_{190 ℃}-B_{250 ℃})热处理, 热处理工艺曲线如图1所示. 由图1可知, 所有试样在进行等温淬火之前均进行等温球化退火处理(红色实线), 获得具有良好塑性的球化体组织. 常规一步等温淬火(蓝色实线)为190 ℃等温8.0 h; 复合三步等温淬火(绿色实线)依次为157 ℃等温5 min+190 ℃等温2.0 h+250 ℃等温0.5、1.0、1.5 和2.0 h, 等温淬火之后均进行低温回火处理(黄色实线).

1.2 试验方法

热处理后的样品使用线切割机切成10 mm × 10 mm × 10 mm的方块试样, 对其进行研磨和抛光, 并采用体积分数为4%的硝酸酒精溶液和质量分数为

10%的Na₂S₂O₂水溶液进行腐蚀. 利用Leica DMi8C光学显微镜和JSM-IT100型扫描电子显微镜(SEM)对热处理后试样的微观组织进行表征. 使用D8-advanced型X射线衍射仪(XRD)对试样进行物相分析, 同时检测组织中残余奥氏体的含量. 利用TEM-Talos F200X型透射电子显微镜(TEM)对微观组织中的纳米贝氏体组织进行观察. 采用200HRS-150型数显洛氏硬度计对试样进行硬度测试. 采用PTM2302-C型微机控制冲击试验机进行冲击试验, 将试样加工成10 mm×10 mm×55 mm方形无缺口形状^[25].

采用UMT-2多功能摩擦磨损试验机对不同热处理工艺下的试样进行摩擦磨损试验, 磨损方式选用球-盘往复式. 其中, 摩擦盘为试验钢, 直径为20 mm, 摩擦盘表面粗糙度 R_a 值小于0.05 μm. 配副选用Φ6.35 mm的GCr15钢球, 硬度约为62HRC, 表面粗糙度 R_a 值为0.08 μm. 试样盘加工尺寸和摩擦过程如图2所示. 参考大型风电主轴轴承的实际工况, 确定摩擦磨损试验条件如下: 载荷为30 N, 单向行程为6 mm, 往复速度为6 mm/s, 时间为30 min.

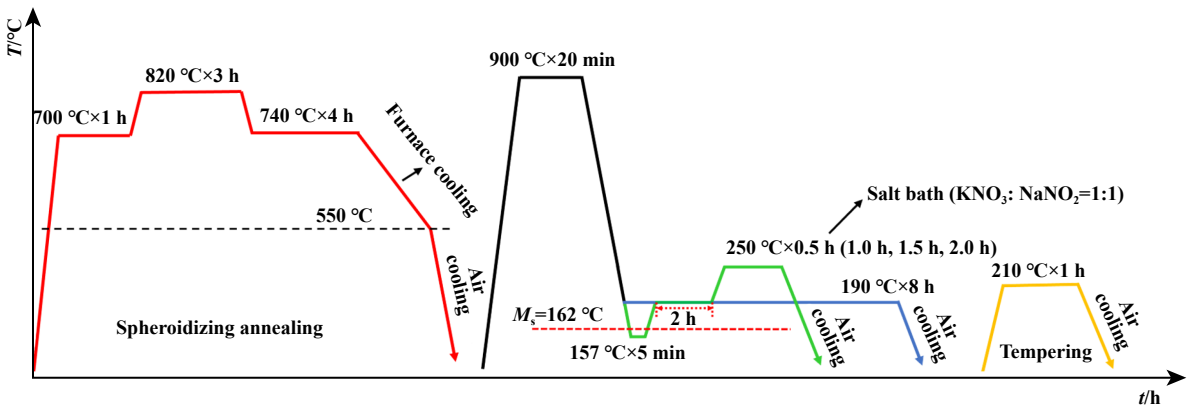


Fig. 1 Heat treatment curve diagram of conventional and compound isothermal quenching process
图 1 常规等温淬火和复合等温淬火工艺热处理曲线示意图

试验中摩擦系数由摩擦磨损试验机的主控计算机程序自动采集. 摩擦磨损试验后利用Nano focus AG型三维形貌测试仪对磨痕形貌进行分析, 并计算磨痕的宽度和深度, 通过公式(1)计算磨痕的体积磨损率 W_v .

$$W_v = \frac{1000\Delta V}{Fvt} \quad (1)$$

式中, W_v 为体积磨损率[mm³/(N·m)], ΔV 为磨损体积数值(mm³), F 为试验载荷(N), v 为往复速度(mm/s), t 为磨损时间(s), 本文中的磨损率是计算3次摩擦重复试验的平均值.

2 结果与讨论

2.1 微观组织分析

2.1.1 复合等温淬火时间对组织的影响

图3所示为GCr15Si1Mo轴承钢常规等温淬火8.0 h

和复合等温淬火不同时间的微观组织的SEM照片. 由图3(a)可以发现, 常规等温淬火后的轴承钢微观组织主要由针状贝氏体、残余奥氏体、球状碳化物和马氏体组成. 此时组织中存在的马氏体是由于贝氏体转变不完全, 未转变的奥氏体在随后冷却过程中经过 M_s 点而新生的新生马氏体^[26]. 由图3(b~e)可以看出, 复合等温淬火后的材料微观组织与常规等温淬火后的轴承钢微观组织构成相同, 而此时组织中马氏体的生成包含2种形式, 一种为第一步等温生成的预相变马氏体, 另一种即新生马氏体. 其中微观组织中的预相变马氏体一方面在转变时中过冷度较大, 组织形态比较粗大, 且被贝氏体板条包围; 另一方面, 由于在后续等温过程中会发生碳分配, 碳扩散至周围奥氏体中, 使得预变马氏体易于被腐蚀, 因此在微观组织中预相变马氏体为粗大深色相^[27]. 在复合等温淬火工艺下, 复合

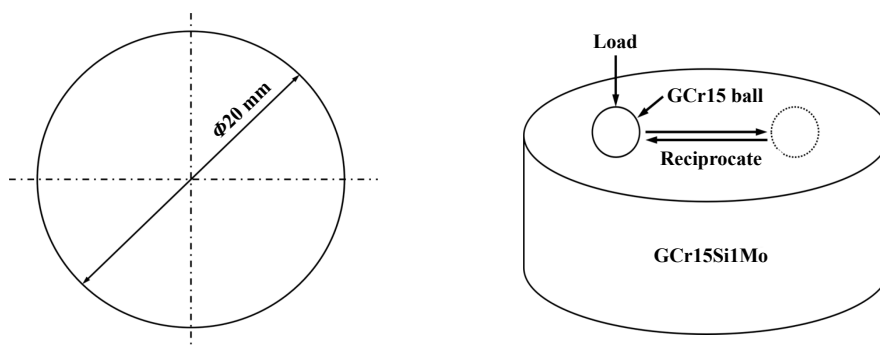


Fig. 2 Test sample size and friction and wear process schematic diagram

图 2 盘试样尺寸及摩擦磨损过程示意图

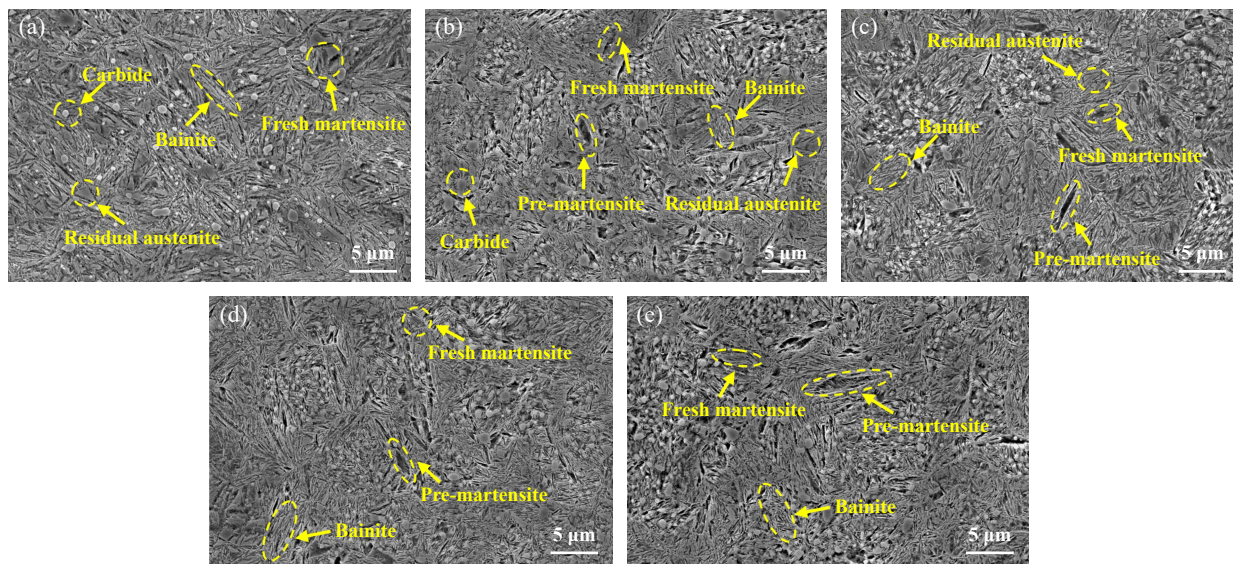


Fig. 3 SEM micrographs of microstructure at different isothermal quenching processes of GCr15Si1Mo steel: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b~e) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 2.5、3.0、3.5、4.0 h

图 3 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的微观组织的SEM照片: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b~e) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 2.5、3.0、3.5、4.0 h

等温淬火2.5 h时, 贝氏体转变量相对较少, 碳化物含量较多. 随着复合等温时间的延长, 针状贝氏体含量越来越多, 块状残余奥氏体含量也越来越少, 组织更均匀.

选用90 mL H₂O+10 g Na₂S₂O₂彩色金相侵蚀剂对热处理后的试样进行腐蚀, 并通过对试样金相图片进

行二值图像处理, 如图4所示, 利用定量金相统计软件计算出不等温淬火工艺下材料微观组织中针尖状贝氏体的含量^[28-29]. 结果表明, GCr15Si1Mo轴承钢常规等温淬火8.0 h时贝氏体转变量为53.5%, 复合等温淬火不同时间时贝氏体转变量分别为41.7%、54.6%、60.2%和65.1%.

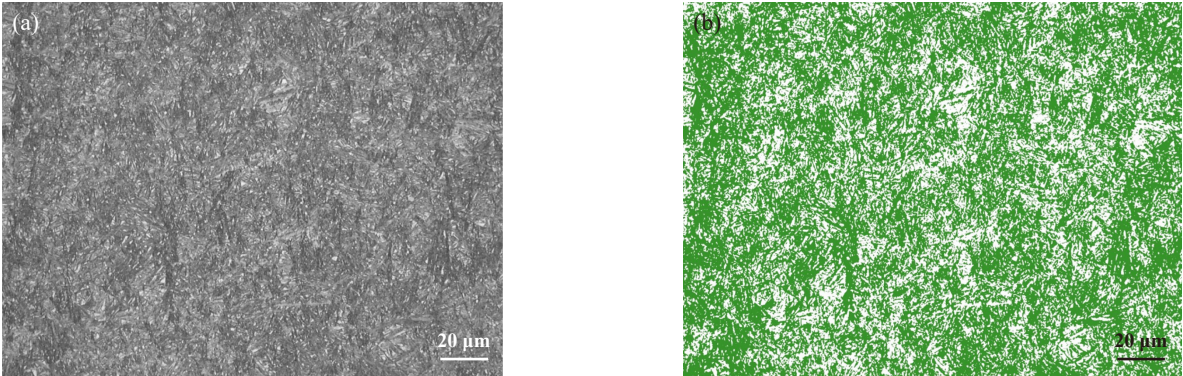


Fig. 4 (a) Micrograph of electrographic organization of GCr15Si1Mo steel insulated at 190 °C for 8.0 h and (b) its corresponding binary diagram

图 4 (a) GCr15Si1Mo钢在190 °C保温8.0 h的金相组织微观照片和(b)其相应的二值图

图5所示为GCr15Si1Mo轴承钢不同等温淬火工艺下的XRD曲线. 由图5中可以观察到体心立方结构的 α 相和面心立方结构的 γ 相的2种衍射峰. 对比不同工艺下的XRD谱图可发现: 常规一步等温淬火处理后试样的奥氏体(γ 相)峰强最大; 复合等温淬火工艺中随着等温时间的延长, 奥氏体(γ 相)峰强逐渐减弱, 铁素体(α 相)峰强逐渐增高, 由此可以发现贝氏体转变逐渐完全. 根据XRD衍射图可以计算出残余奥氏体的体积分数, 同时各工艺下的残余奥氏体含量数值变化趋势与XRD图谱的 γ 相峰强完全吻合.

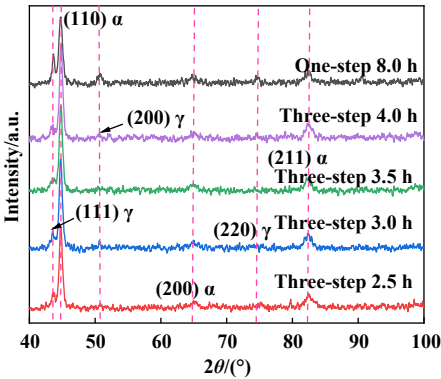


Fig. 5 Comparison map of XRD profiles for different isothermal quenching processes of GCr15Si1Mo steel

图 5 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺的XRD对比图谱

基于以上对组织中各相含量的计算, 可以得出不同等温淬火工艺下试样的各相含量并列于表2中. 结

果表明, 随着复合等温淬火时间的延长, 贝氏体含量逐渐上升, 马氏体和残余奥氏体含量逐渐减少, 碳化物含量无明显变化. 当复合等温淬火时间为4.0 h时, 此时残余奥氏体含量达到最低值, 组织中几乎不存在残余奥氏体. 其中, 复合等温淬火3.0 h得到的贝氏体组织含量与常规等温淬火8.0 h获得的贝氏体组织含量相当, 由此可发现复合三步等温淬火工艺对贝氏体转变起到了明显的加速效果, 其相转变效率提高了62.5%.

表 2 不同等温淬火工艺下试样的各相含量

Table 2 The content of each phase at different isothermal quenching processes

Technology	Volume fraction/%			
	Bainite	Martensite	Carbide	Residual austenite
Q-B ₁₉₀ 8.0 h	53.5	19.9	2.2	24.4
Q-M ₁₅₇ -B ₁₉₀ -B ₂₅₀ 2.5 h	41.7	44.9	4.2	9.2
Q-M ₁₅₇ -B ₁₉₀ -B ₂₅₀ 3.0 h	54.6	37.2	2.5	5.7
Q-M ₁₅₇ -B ₁₉₀ -B ₂₅₀ 3.5 h	60.2	34.4	2.6	2.8
Q-M ₁₅₇ -B ₁₉₀ -B ₂₅₀ 4.0 h	65.1	31.1	2.8	<1.0

图6所示为试样经常规等温淬火8.0 h和复合等温淬火3.0 h处理后的TEM照片. 由图6中可以看出, 2种等温淬火工艺下获得的贝氏体组织由板条状贝氏体铁素体和薄膜状的残余奥氏体相间分布组成, 并且复合等温淬火3.0 h处理后的试样组织中还发现了板条状较为独立粗大的预相变马氏体组织, 如图6(b)所示. 对大量不同取向分布的贝氏体铁素体板条厚度进行

了统计, 并利用体视学修正公式^[30]对贝氏体铁素体板厚进行了修正, 如公式(2)所示.

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

式中, $\bar{L}_T$ 为测得的垂直于贝氏体铁素体板长的线性截距, t 为经过修正之后平均的贝氏体板条宽度. 统计结果表明: 常规等温淬火8.0 h获得贝氏体板条的平均厚度约为82.1 nm, 复合等温淬火3.0 h获得贝氏体板条的

平均厚度约为63.5 nm, 由此也可发现复合等温淬火3.0 h后贝氏体平均板厚有所细化.

2.1.2 复合等温淬火工艺对贝氏体转变的影响

图7所示为GCr15Si1Mo钢经复合三步等温淬火处理后各阶段的微观组织. 由图7(a)可发现第一步等温处理后, 微观组织主要由预相变马氏体、球状碳化物和残余奥氏体组成, 未发现针状贝氏体存在. 由图7(b)可发现, 经过前两步等温处理后的试样, 其微观组织

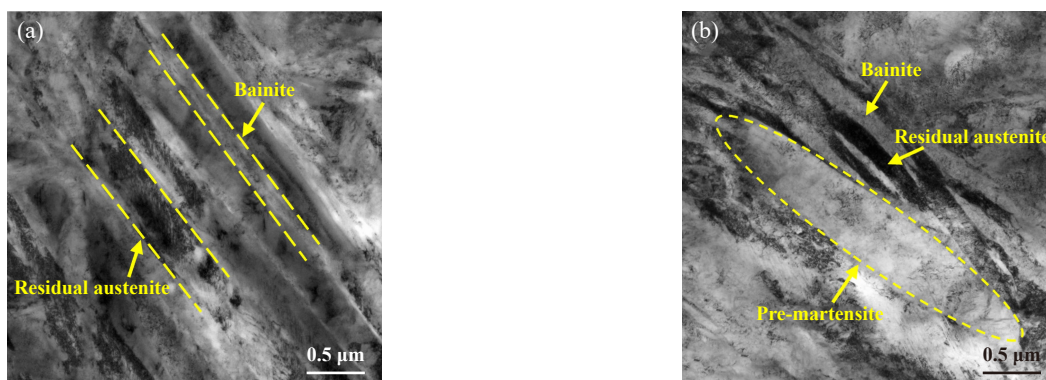


Fig. 6 SEM micrographs of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 3.0 h

图 6 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的SEM形貌照片: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 3.0 h

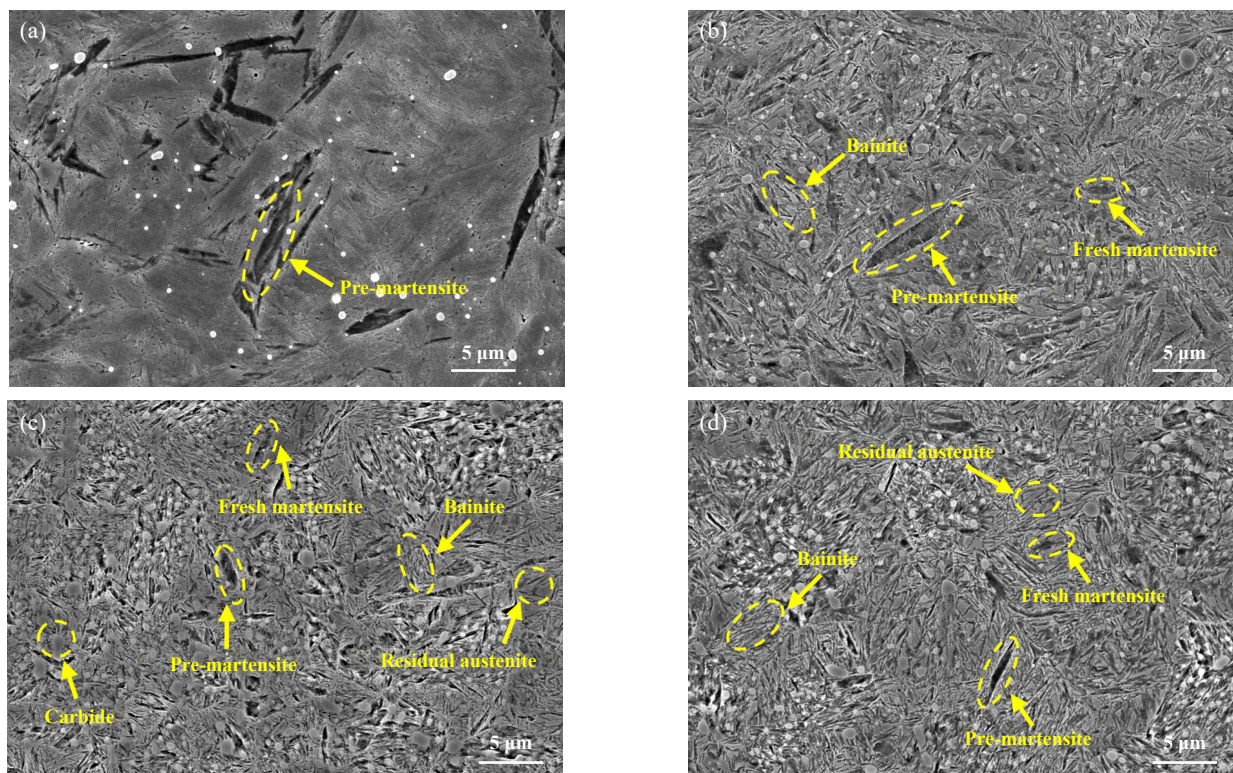


Fig. 7 SEM micrographs of each stage of three-step isothermal quenching process of GCr15Si1Mo steel: (a) Q-M₁₅₇ 5 min; (b) Q-M₁₅₇-B₁₉₀ 2.0 h; (c) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 2.5 h; (d) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 3.0 h

图 7 GCr15Si1Mo钢三步复合等温淬火工艺各阶段的微观组织的SEM照片: (a) Q-M₁₅₇ 5 min; (b) Q-M₁₅₇-B₁₉₀ 2.0 h; (c) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 2.5 h; (d) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 3.0 h

中块状残余奥氏体被贝氏体分割且含量大大降低, 在预相变马氏体周围产生一定量的针状贝氏体. 由图7(c)可知, 经过短时间三步等温处理后试样微观组织中, 贝氏体含量大幅增多. 进一步延长第三步等温淬火时间, 材料微观组织中贝氏体含量增多, 如图7(d)所示. 此外, 发现随着材料微观组织中贝氏体的逐渐生成, 预相变马氏体的尺寸逐渐减小, 这是由于贝氏体首先会在预相变马氏体晶界处形核, 并由预相变马氏体晶界向其晶内生长, 从而使预相变马氏体的尺寸随贝氏体的生产而逐渐细化.

基于上述复合三步等温淬火处理后各阶段的微观组织结果, 分析复合等温淬火工艺影响纳米贝氏体相转变的机理, 本文中给出了常规一步等温淬火工艺和复合三步等温淬火工艺过程中贝氏体组织演变过

程的示意图, 如图8所示. 分析认为第一步等温淬火过程首先产生部分预马氏体相, 而马氏体为切变共格生成, 引入大量晶界, 为后续贝氏体转变提供了更多形核点; 在第二步等温转变过程中, 贝氏体开始转变并围绕预相变马氏体形核并长大; 当继续进行第三步等温淬火处理, 由于升高了等温淬火温度, 碳原子的扩散速率加快, 增大了贝氏体相变驱动力, 使得贝氏体转变加速. 由此可见, 复合等温淬火工艺从贝氏体孕育期和生长期2个阶段同时加速了贝氏体的转变. 对于常规一步等温淬火工艺来说, 贝氏体首先在奥氏体晶界处形核, 然后在生成的贝氏体晶界处形核并长大. 基于2种工艺对贝氏体相转变的影响规律, 综合考虑, 本试验中设计的三步复合等温淬火达到了目标的加速效果, 并获得了理想的轴承钢微观组织.

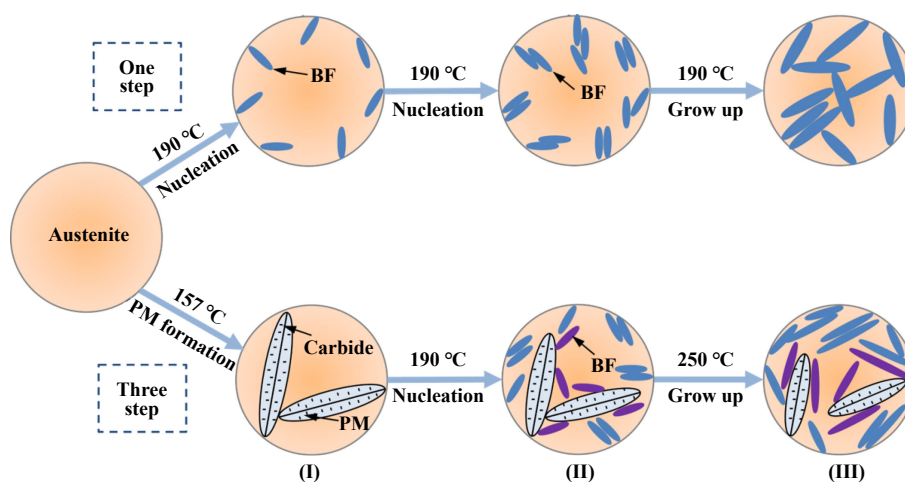


Fig. 8 Diagram of influence of isothermal quenching process on bainite transformation of GCr15Si1Mo steel

图8 等温淬火工艺对GCr15Si1Mo钢贝氏体转变的影响示意图

2.2 硬度和冲击功分析

图9所示为GCr15Si1Mo轴承钢不同等温淬火工艺下的硬度对比结果. 结果表明, 常规一步等温淬火处理后的试样硬度约为62.3HRC, 其硬度高于复合等温淬火处理后的材料硬度. 分析认为, 一方面由于常规等温淬火时温度较低, 碳原子扩散速度较慢, 使得贝氏体铁素体中碳含量较高; 另一方面, 由于试验钢中Si元素含量较高, 有效抑制了碳化物的析出, 使碳原子固溶于奥氏体中, 强化了奥氏体, 因此常规等温淬火后的试样硬度较高. 在复合等温淬火工艺中, 随着复合等温淬火时间的延长, 试样的硬度先降低后升高. 这是由于等温时间较短时, 组织中马氏体含量较多, 硬度较高; 随着等温时间的延长, 贝氏体含量逐渐

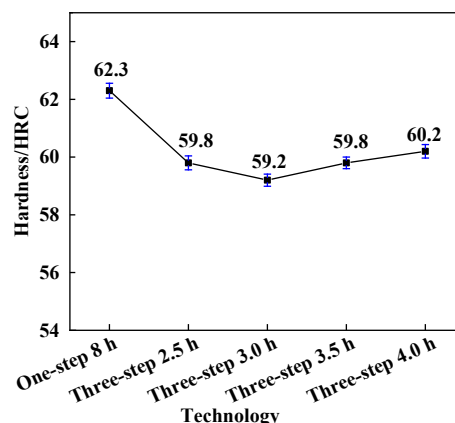


Fig. 9 Hardness of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes

图9 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的硬度

上升, 马氏体含量逐渐下降, 使得硬度呈现下降的趋势. 当贝氏体转变到一定量时, 针尖状的贝氏体铁素体产生的细晶强化作用占主导作用, 使得材料硬度又有所提升.

图10所示为GCr15Si1Mo轴承钢不同等温淬火工艺下的冲击功结果. 由图10可知, 常规一步等温淬火工艺下材料的冲击功最小, 分析认为常规等温淬火工艺下试样微观组织中块状残余奥氏体含量较多, 且其贝氏体铁素体中碳的过饱和程度较大, 从而使得材料微观组织硬度较高、脆性较大. 在复合等温淬火工艺下, 随着复合等温淬火时间的延长, 材料的冲击功呈现先升高后降低的趋势. 这是由于随着复合等温淬火时间的延长, 贝氏体含量逐渐增多, 组织中块状的残余奥氏体数量明显减少, 而薄膜状残余奥氏体数量增多, 使得材料韧性有所提高; 当复合等温淬火时间为4.0 h时, 材料微观组织中贝氏体板厚变粗, 使得其冲击韧性有所降低. 对比2种工艺发现, 复合等温淬火工艺下材料的冲击韧性均高于常规等温淬火工艺下材料的冲击韧性. 本文中对2种工艺下的冲击断口形貌进行了表征, 如图11(a)和(b)所示. 结果表明, 常规等温淬火工艺下材料的冲击断口呈现出明显的解离特征, 而复合等温淬火工艺下材料的冲击断口韧窝数量明显增多, 解理面数量明显减少, 这些断口形貌结果刚好与冲击功结果相符合.

2.3 摩擦磨损性能分析

对不同等温淬火工艺下GCr15Si1Mo轴承钢进行摩擦磨损试验. 图12和图13所示为不同热处理工艺下材料的瞬时摩擦系数和平均摩擦系数. 由图12可知, 5种不同等温淬火工艺下材料的摩擦系数整体上都呈现出先急剧升高后逐渐下降, 再趋于平稳的趋势, 这是

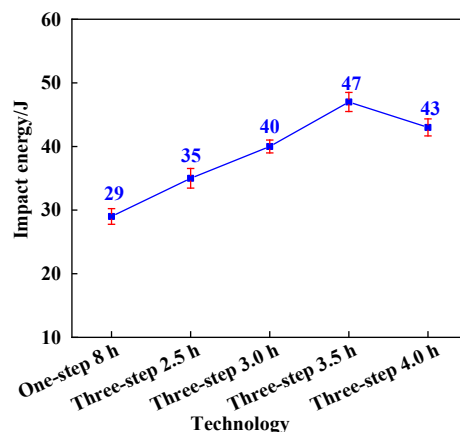


Fig. 10 Impact energy of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes

图 10 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的冲击功

由于摩擦副在摩擦初始阶段存在1个磨合期, 导致试验初始阶段摩擦系数较大. 对比发现, 常规一步等温淬火工艺下材料摩擦系数在摩擦过程中波动较大. 分析认为, 由于常规一步等温淬火工艺下材料的硬度最高而韧性最低, 由于硬质磨粒不断地产生和挤出, 导致了瞬时摩擦系数波动相对较大. 由图13各工艺下材料的平均摩擦系数可知, 随着复合三步等温淬火时间的延长, 材料的平均摩擦系数呈现先降低后升高的趋势, 且复合等温淬火3.0 h时材料的平均摩擦系数最低.

图14所示为不同等温淬火工艺下GCr15Si1Mo轴承钢的磨损率结果. 结果表明, 在复合等温淬火工艺中, 随着复合等温淬火时间的延长, 材料的磨损率呈现先降低后升高的趋势. 分析认为, 当复合等温淬火时间为2.5 h时, 脆性相马氏体含量较高, 组织韧性较低, 在摩擦过程中抵抗磨损变形的协调性相对较差, 马氏体与贝氏体的界面处更易产生微裂纹形成粗大磨粒, 使得摩擦系数较高, 磨损率相对较大; 多步等温

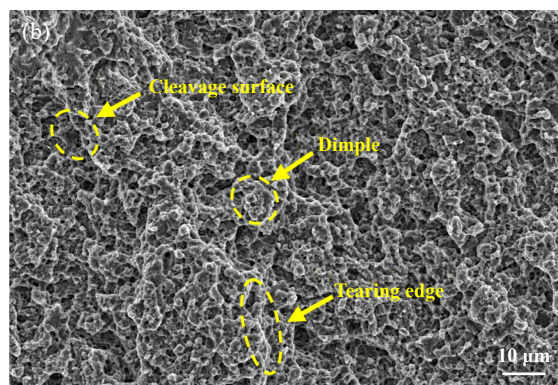
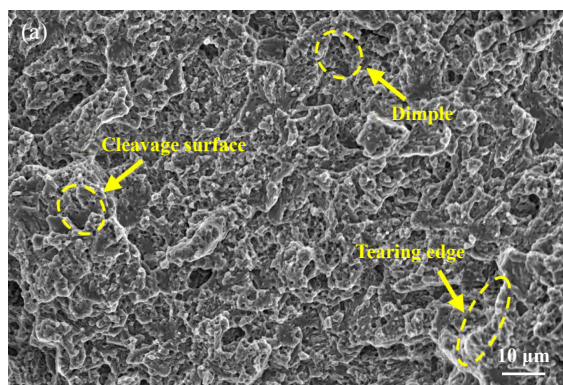


Fig. 11 SEM micrographs of impact fracture morphology of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 3.0 h

图 11 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的冲击断口形貌的SEM照片: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 3.0 h

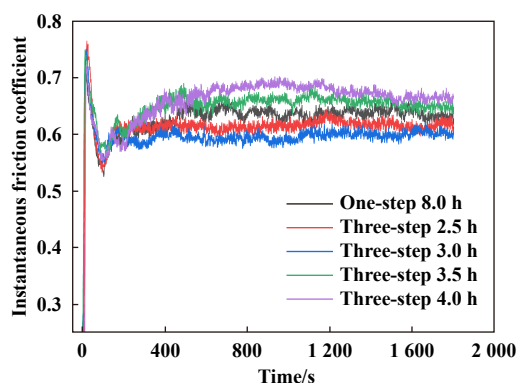


Fig. 12 Instantaneous friction coefficient of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes

图 12 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的瞬时摩擦系数

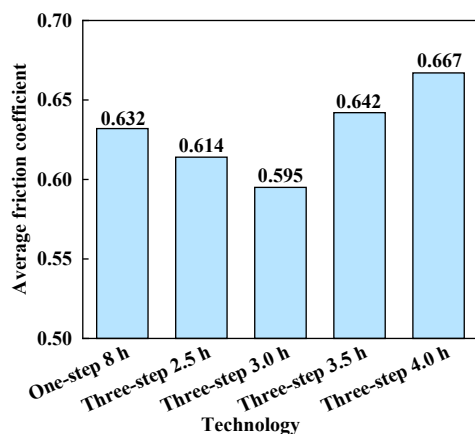


Fig. 13 Average friction coefficient of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes

图 13 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的平均摩擦系数

淬火时间为3.0 h时, 贝氏体含量增加到达一定值, 脆性相马氏体和韧性相贝氏体达到了1个良好的强韧性配合, 此时材料的摩擦系数最低, 材料的耐磨性最佳; 随着等温时间的继续延长, 材料的韧性较高而强度较低, 易发生黏着磨损, 材料的摩擦系数又升高, 磨损率增大. 由此可见, 材料的耐磨性不仅仅取决于其硬度, 更需要合适的强韧性配合, 相关文献已做过相似的报道^[31-33]. 对比复合等温淬火3.0 h和常规等温淬火8.0 h的磨损率结果可知, 采用这2种等温淬火工艺制备相同贝氏体含量时复合等温淬火工艺下材料的耐磨性优于常规等温淬火工艺下材料的耐磨性.

2.4 磨损机制

图15所示为不同等温淬火工艺下GCr15Si1Mo轴承钢磨损后的磨痕形貌的SEM照片. 观察图15(a)可发现, 经常规等温淬火处理后试样磨损表面存在犁沟,

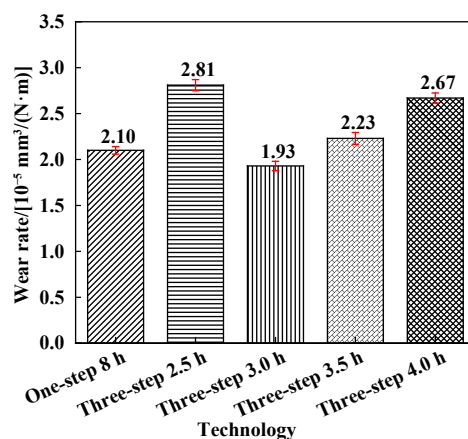


Fig. 14 Wear rate of GCr15Si1Mo steel under different isothermal quenching processes

图 14 GCr15Si1Mo钢不同等温淬火工艺下的磨损率

并伴随着磨屑的堆积, 而未发现黏着坑的存在, 此时磨损机制以磨粒磨损为主. 分析认为, 由于常规等温淬火工艺下的试样硬度较高, 摩擦表面抵抗外界物质压入的能力较强, 因此发生了轻微的磨粒磨损. 另外, 在干摩擦过程中试样表面温度升高, 但试样表面由于高的硬度, 难以和摩擦对偶形成焊合, 不会发生黏着撕裂现象^[34]. 观察图15(b~e)可发现, 当复合等温淬火时间为2.5 h时, 脆性相马氏体含量高, 马氏体界面处易产生微裂纹形成粗大磨粒^[35], 使得磨粒磨损较重, 此时磨损机制主要为磨粒磨损; 当复合等温淬火时间为3.0 h时, 材料组织中存在一定量的马氏体/贝氏体复相组织, 同时伴有大量薄膜状残余奥氏体的存在, 此时材料的强韧性匹配达到最佳, 磨痕表面整体较为平整, 犁沟深度较浅且黏着坑较少; 随着复合等温淬火时间的继续延长, 材料的韧性升高但强度有所降低, 磨痕表面犁沟变深且黏着坑变大, 磨粒磨损和黏着磨损又有所加剧. 此外, 在图15(c~e)中还发现了少量的点蚀坑的存在, 说明当复合等温淬火3.0、3.5和4.0 h时, 材料的磨损机制以磨粒磨损为主, 并伴随轻微的黏着磨损和疲劳磨损.

3 结论

本文中对GCr15Si1Mo轴承钢进行常规等温淬火处理和复合等温淬火处理, 研究了不同等温淬火工艺对GCr15Si1Mo轴承钢贝氏体转变、力学性能、摩擦磨损性能及磨损机制的影响, 得到以下主要结论:

a. 常规和复合等温淬火工艺下试验钢微观组织均由贝氏体铁素体、残余奥氏体、马氏体和未溶碳化物组成. 复合等温淬火3.0 h时贝氏体转变量(54.6%)与

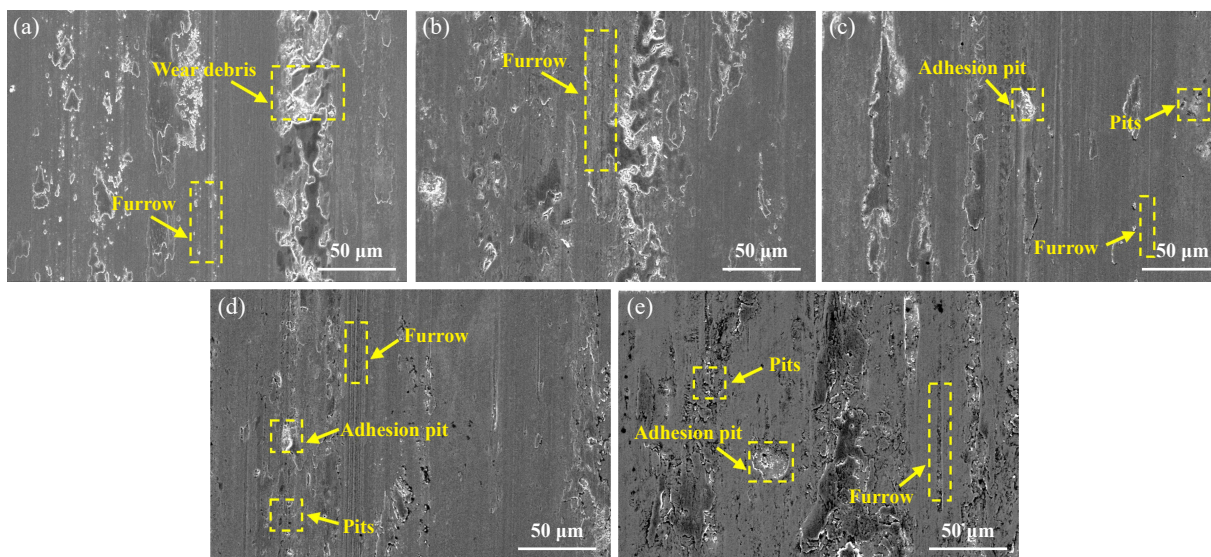


Fig. 15 SEM micrographs of GCr15SiMo steel after wear at different isothermal quenching processes: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b~e) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 2.5、3.0、3.5、4.0 h

图 15 不同等温淬火工艺下GCr15SiMo钢磨损后的形貌的SEM照片: (a) Q-B₁₉₀ 8.0 h; (b~e) Q-M₁₅₇-B₁₉₀-B₂₅₀ 2.5、3.0、3.5、4.0 h

常规等温淬火8.0 h时贝氏体转变量(53.5%)相当, 复合等温淬火工艺对贝氏体转变加速效果明显, 加速比率高达62.5%, 且复合等温淬火3.0 h时贝氏体平均板厚有所细化。

b. 与常规等温淬火处理后试验钢的力学性能相比, 复合等温淬火工艺材料微观组织中的块状残余奥氏体大量转变为薄膜状残余奥氏体, 使材料的硬度有所下降, 冲击功出现了先增加后减小的趋势, 复合等温淬火3.0 h时试验钢冲击功从29 J提升至40 J。

c. 在该摩擦磨损试验条件下, 复合等温淬火3.0 h时试验钢摩擦磨损性能比常规等温淬火8.0 h时更为优异, 磨损率最低, 为 $1.93 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 磨损机制分析表明, 常规等温淬火和复合等温淬火处理后试验钢的磨损机制皆以磨粒磨损为主, 但复合等温淬火工艺下材料磨粒磨损程度有所减轻并伴随轻微的黏着磨损和疲劳磨损。

d. 综合考虑材料性能和相变时间, 文中最佳的复合等温淬火工艺为157 °C等温5 min+190 °C等温2.0 h+250 °C等温1.0 h, 该工艺下组织中贝氏体和马氏体的体积分数分别为54.6%和37.2%, 此时硬度为59.2HRC, 冲击功为40 J, 磨损率为 $1.93 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

参考文献

[1] Zhang Fucheng, Yang Zhinan. Development of and perspective on high-performance nanostructured bainitic bearing steel[J]. Engineering, 2019, 5(2): 319–328. doi: 10.1016/j.eng.2018.11.024.

[2] Yang XiaoWei. Key technology of high-end bearing manufacturing[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2013(16): 16–18 (in Chinese) [杨晓蔚. 高端轴承制造的关键技术[J]. 金属加工(冷加工), 2013(16): 16–18]. doi: 10.3969/j.issn.1674-1641.2013.16.008.

[3] Ma Zihao, Wang Rui, Zhao Haitao, et al. Coupling behavior of lubrication and dynamics for tapered roller bearing[J]. Tribology, 2022, 42(1): 55–64 (in Chinese) [马子豪, 王瑞, 赵海涛, 等. 圆锥滚子轴承润滑与动力学耦合研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(1): 55–64]. doi: 10.16078/j.tribology.2020278.

[4] Li Zhaokun, Lei Jianzhong, Xu Haifeng, et al. Current status and development trend of bearing steel in China and abroad[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(3): 1–12 (in Chinese) [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]. doi: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20150345.

[5] Liu Yaozhong, Hou Wanguo, Wang Yuliang, et al. Progress and prospect on materials and heat treatment for rolling bearings[J]. Bearing, 2020, (1): 55–63 (in Chinese) [刘耀中, 侯万果, 王玉良, 等. 滚动轴承材料及热处理进展与展望[J]. 轴承, 2020, (1): 55–63]. doi: 10.19533/j.issn1000-3762.2020.01.012.

[6] Guo Jun, Yang Maosheng, Lu Dehong, et al. Rolling contact fatigue and wear characteristics of Cr₄Mo₄V bearing steel[J]. Tribology, 2017, 37(2): 155–166 (in Chinese) [郭军, 杨卯生, 卢德宏, 等. Cr₄Mo₄V轴承钢滚动接触疲劳和磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 155–166]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.02.003.

[7] 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].
- [8] Bhadeshia H K D H. The first bulk nanostructured metal[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2013, 14(1): 014202. doi: [10.1088/1468-6996/14/1/014202](https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014202).
- [9] 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).
- [10] Caballero F G, Bhadeshia H K D H, Mawella K J A, et al. Very strong low temperature bainite[J]. *Materials Science and Technology*, 2002, 18(3): 279–284. doi: [10.1179/026708301225000725](https://doi.org/10.1179/026708301225000725).
- [11] Solano-Alvarez W, Pickering E J, Bhadeshia H K D H. Degradation of nanostructured bainitic steel under rolling contact fatigue[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 617: 156–164. doi: [10.1016/j.msea.2014.08.071](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.071).
- [12] Zhang P, Zhang Fu cheng, Yan Z G, et al. Rolling contact fatigue property of low-temperature bainite in surface layer of a low carbon steel[J]. *Materials Science Forum*, 2011, 675–677: 585–588. doi: [10.4028/www.scientific.net/msf.675-677.585](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.675-677.585).
- [13] Zhao J, Wang T S, Lv B, et al. Microstructures and mechanical properties of a modified high-C–Cr bearing steel with nano-scaled bainite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 628: 327–331. doi: [10.1016/j.msea.2014.12.121](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.121).
- [14] Zheng Chunlei, She Li, Wang Yanhui, et al. Rolling contact fatigue behaviors of high carbon bainitic bearing steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(24): 110–117 (in Chinese) [郑春雷, 余丽, 王艳辉, 等. 高碳贝氏体轴承钢滚动接触疲劳性能的研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(24): 110–117]. doi: [10.3901/JME.2017.24.110](https://doi.org/10.3901/JME.2017.24.110).
- [15] Yoozbashi M N, Yazdani S, Wang T S. Design of a new nanostructured, high-Si bainitic steel with lower cost production[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(6): 3248–3253. doi: [10.1016/j.matdes.2011.02.031](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.031).
- [16] Garcia-Mateo C, Caballero F G, Sourmail T, et al. Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3 wt% silicon[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 549: 185–192. doi: [10.1016/j.msea.2012.04.031](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.031).
- [17] 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].
- [18] Liu Cheng, Zhao Bin, Zhao Zhenbo, et al. Role of carbon in super bainite steels[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(2): 1–7 (in Chinese) [刘澄, 赵斌, 赵振波, 等. 碳在超级贝氏体钢中的作用[J]. *金属热处理*, 2015, 40(2): 1–7]. doi: [10.13251/j.issn.0254-6051.2015.02.001](https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2015.02.001).
- [19] Sourmail T, Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(7): 2639–2648. doi: [10.1016/j.actamat.2013.01.044](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.044).
- [20] Zhang Chunsheng. Effect of pre cold deformation on microstructure and properties of GCr15Si1Mo bearing steel[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021 (in Chinese) [张春生. 预冷变形处理对GCr15Si1Mo轴承钢组织与性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021].
- [21] Avishan B, Khoshkebari S M, Yazdani S. Effect of pre-existing martensite within the microstructure of nano bainitic steel on its mechanical properties[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 260: 124160. doi: [10.1016/j.matchemphys.2020.124160](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124160).
- [22] Ravi A M, Sietsma J, Santofimia M J. The role of grain-boundary cementite in bainite formation in high-carbon steels[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 185: 7–11. doi: [10.1016/j.scriptamat.2020.03.042](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.03.042).
- [23] Yu Xinpan. Effect of pretransition on phase transformation behavior and thermal stability of medium carbon ultra-fine bainite steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021 (in Chinese) [于新攀. 预相变对中碳超细贝氏体钢相变行为及其热稳定性的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2021].
- [24] 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).
- [25] Fielding L C D, Jones N G, Walsh J, et al. Synchrotron analysis of toughness anomalies in nanostructured bainite[J]. *Acta Materialia*, 2016, 105: 52–58. doi: [10.1016/j.actamat.2015.11.029](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.11.029).
- [26] Zhao J, Hou C S, Zhao G, et al. Microstructures and mechanical properties of bearing steels modified for preparing nanostructured bainite[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(10): 4249–4255. doi: [10.1007/s11665-016-2289-8](https://doi.org/10.1007/s11665-016-2289-8).
- [27] Guo Hui. Acceleration of low temperature phase transformation and mechanism of plastic deformation in ultrafine bainitic steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018 (in Chinese) [郭辉. 超细贝氏体钢低温相变加速技术及其塑性变形规律[D]. 北京: 北京科技大学, 2018].
- [28] Mao Yanshan, Du Sanming, Fu Lihua, et al. Effect of isothermal quenching process on the microstructure and wear properties of GCr15SiMo steel[J]. *Tribology*, 2023, 43(7): 778–790 (in Chinese) [毛艳珊, 杜三明, 傅丽华, 等. 等温淬火工艺对GCr15SiMo钢微观组织和摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2023, 43(7): 778–790]. doi: [10.16078/j.tribology.2022084](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022084).
- [29] 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].
- [30] 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).
- [31] Fu Lihua, Zhou Meng, Wang Yanlin, et al. The microstructure transformations and wear properties of nanostructured bainite steel with different Si content[J]. Materials, 2022, 15(18): 6252. doi: [10.3390/ma15186252](https://doi.org/10.3390/ma15186252).
- [32] 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.2017.05.008](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.008).
- [33] 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).
- [34] Ma Biao, Fu Lihua, Shangguan Bao, et al. Research on microstructure and friction wear performance of GCr15 and G20CrNi₂Mo bearing steel[J]. Materials Reports, 2021, 35(16): 16120–16125 (in Chinese) [马彪, 傅丽华, 上官宝, 等. GCr15及G20CrNi₂Mo轴承钢材料微观组织和摩擦磨损性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16120–16125].
- [35] Tang Peng, Li Jie, Tu Xiaohui, et al. Effect of carbon content on wear resistance resistant properties of quenching-partitioning martensitic steel[J]. Tribology, 2023, 43(2): 189–196 (in Chinese) [唐鹏, 李杰, 涂小慧, 等. 两种碳含量Q-P马氏体钢冲击磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(2): 189–196]. doi: [10.16078/j.tribology.2021248](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021248).