



## 高能电脉冲处理对 GCr15 轴承钢组织和性能的影响

尹青<sup>1</sup>, 刘佳俊<sup>2,3</sup>, 史智越<sup>2,3,4</sup>, 秦晋<sup>2,3</sup>, 王睿<sup>2,3</sup>, 王辉<sup>4</sup>, 曹文全<sup>4</sup>, 闫志杰<sup>2,3</sup>

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429; 2 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051; 3 特殊环境先进金属材料山西省重点实验室, 太原 030051; 4 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

**摘要:** GCr15 轴承钢凭借其高强度、高硬度的性能特点, 成为轴承构件中用量最大、应用最广的材料, 高效便捷制备细质化、均质化的基体组织一直是 GCr15 轴承钢研发热点。采用高频高能电脉冲技术代替传统固溶工艺对 GCr15 轴承钢进行闪速奥氏体化, 随后油冷, 对处理后的力学性能、微观组织结构进行表征分析。结果表明, 电脉冲电流产生的焦耳热和电子风效应的综合作用导致材料的快速奥氏体转变和碳化物溶解; 经“电压 50 V-频率 500 Hz-脉宽 50  $\mu$ s”电脉冲奥氏体化处理 300 s, 试样硬度为 62.3 HRC, 抗拉强度为 2 356 MPa, 伸长率 2.5%, 力学性能均优于传统热处理工艺; 试样平均碳化物尺寸为 0.46  $\mu$ m, 基体组织呈现均匀、细小、弥散分布。研究结果为新型轴承钢热处理工艺制定及组织调控提供了实验与理论基础。

**关键词:** GCr15 轴承钢; 电脉冲热处理; 微观组织结构; 力学性能

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.N250599 **中图分类号:** TG142.1

## Effect of High-Energy Electrical Pulse Treatment on the Microstructure and Properties of GCr15 Bearing Steel

Yin Qing<sup>1</sup>, Liu Jiajun<sup>2,3</sup>, Shi Zhiyue<sup>2,3,4</sup>, Qin Jin<sup>2,3</sup>, Wang Rui<sup>2,3</sup>,  
Wang Hui<sup>4</sup>, Cao Wenquan<sup>4</sup>, Yan Zhijie<sup>2,3</sup>

(1 Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China;

2 School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3 Shanxi Key Laboratory of Advanced Metal Materials for Special Environments, Taiyuan 030051, China;

4 Special Steel Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** GCr15 bearing steel is the most widely used material for bearing components due to its high strength and hardness. The efficient and convenient preparation of refined and homogenized matrix microstructures has always been a research hotspot for GCr15 bearing steel. In this study, a high-frequency, high-energy electrical pulse technology was used instead of the traditional solid solution process to achieve flash austenitization of GCr15 bearing steel, followed by oil cooling. The mechanical properties and microstructure were characterized and analyzed. The results show that the combined effect of Joule heating and the electron wind effect generated by the electrical pulse current leads to the rapid austenite transformation and carbide dissolution of the material. The hardness, tensile strength and elongation of the sample were 62.3 HRC, 2 356 MPa and 2.5% after the electric pulse heat austenitizing treatment of "voltage 50V - frequency 500Hz - pulse width 50  $\mu$ s" for 300 seconds. These mechanical properties are superior to those achieved by the conventional heat treatment process. The average carbide size of the samples is 0.46  $\mu$ m, and the matrix microstructure is uniform, fine, and dispersedly distributed. The research provides an experimental and theoretical basis for the development of new heat treatment processes and microstructure control for bearing steels.

**Key Words:** GCr15 Bearing Steel; Electrical Pulse Heat Treatment; Microstructure; Mechanical Properties

轴承作为工业装备、机械制造和国防军工领域的关键部件, 在服役期间长期承受交变、复杂多向应力载荷, 轴承材料需要具有较高的冶金质量、优异的力学性能和良好的耐磨性<sup>[1-2]</sup>。GCr15 轴承钢

研发至今已有百年历史, 凭借其高强度、高硬度、高耐磨性和优良的接触疲劳性能占据轴承钢应用市场的 80% 以上, 在轨道交通、矿山机械、冶金设备、汽车等领域广泛应用<sup>[3]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2023YFB3712704); 国家自然科学基金 (No. 52474367); 吕梁市校地合作重点研发专项 (No. 2024XDHZ01); 山西省高等学校科技创新项目 (No. 2025Q022); 山西省基础研究计划-青年科学研究资助项目 (202403021212111)

**作者简介:** 尹青 (1984—), 男, 博士; **E-mail:** yinqing@citicsteel.com; **收稿日期:** 2025-12-17

**通信作者:** 闫志杰 (1974—), 男, 博士生导师, 教授; **E-mail:** zjyan@nuc.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

GCr15 轴承钢研发至今核心成分组成基本没有发生变化,其材料性能和服役寿命的不断进步主要围绕“冶炼工艺”和“组织调控”两方面进行<sup>[4]</sup>。研究表明,提高 GCr15 轴承钢纯净度是提升服役性能行为有效的方法之一<sup>[5]</sup>。随着二次精炼技术的不断发展,国内轴承钢企业通过对全流程质量、工艺控制<sup>[6]</sup>,对 GCr15 轴承钢采用真空脱气冶炼工艺(高炉铁水(废钢)→转炉(电弧炉)→钢包精炼炉(LF)→真空脱气精炼炉(VD(RH))→连铸(CC)),其 $w[\text{O}]$ 小于 $5 \times 10^{-6}$ 、 $w[\text{Ti}]$ 小于 $10 \times 10^{-6}$ ,热处理后材料抗拉强度大于 2 000 MPa、滚动接触疲劳寿命 $L_{10} \geq 10^7$ <sup>[7]</sup>;电渣重熔路线(真空感应(VIM)→电渣炉(ESR)/加压电渣炉(PESR)→模铸(DC))可以使基体中的夹杂物更为弥散细小,热处理后材料抗拉强度大于 2 200 MPa、滚动接触疲劳寿命 $L_{10} \geq 2 \times 10^7$ <sup>[8]</sup>。组织调控方面,班佳乐等设计了一种 GCr15 轴承钢双淬火工艺,与传统热处理工艺对比晶粒尺寸细化至 11.20  $\mu\text{m}$ 、碳化物尺寸 1.55  $\mu\text{m}$ 、抗拉强度提升 300 MPa 以上<sup>[9]</sup>;江涛等采用温挤压技术将 GCr15 轴承钢晶粒尺寸细化至 11 级,滚动接触疲劳寿命 $L_{10}$ 达到 $2 \times 10^7$ <sup>[10]</sup>;Cao 等对热处理后的 GCr15 轴承钢进行表面渗碳处理,渗碳表面球形 $\text{Fe}_3\text{C}$ 转变为蠕虫状,其硬度提升至 750 HV、滚动接触疲劳寿命 $L_{10}$ 超过 $9 \times 10^7$ <sup>[11]</sup>。此外,梁桃云、廖劲成等对 GCr15 轴承钢进行(Nb + N)、(Nb + V)微合金化制备,利用含 Nb 第二相钉扎晶界、细化珠光体片层间距,材料强度提升 130 MPa<sup>[12-13]</sup>。

伴随着装备制造业高可靠性要求和节能减排的发展方向,低成本、高效、快速的高品质轴承钢热处理技术研究成为科研生产领域关注的重点<sup>[14]</sup>。电脉冲处理技术是给金属材料施加短时高频、高能脉冲电流,其焦耳热、电子风及扩散效应可以对金属材料实现改性<sup>[15-16]</sup>。以 GCr15 轴承钢作为研究对象,研究了电脉冲热处理后的力学性能与微观组织,探究电脉冲处理对材料改性的规律,为创新轴承钢热处理工艺及组织调控提供实验与理论基础。

## 1 实验材料和方法

选取国内钢厂 120 t 转炉+真空脱气(BOF+LF+RH)冶炼制备,经 420 mm 连铸并热轧至 $\phi 60$  mm 的 GCr15 轴承钢棒料为研究对象,其具体成分见表 1。首先对直径 60 mm 的热轧 GCr15 棒材进行等温球化退火热处理:加热至 820  $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h, 30  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 冷却至 720  $^{\circ}\text{C}$ 后保温 4 h, 30  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 冷却至 600  $^{\circ}\text{C}$ 后空冷至室

温。其中,1#试样采用传统热处理工艺:840  $^{\circ}\text{C}$ 奥氏体化保温 30 min 油冷,170  $^{\circ}\text{C}$ 回火 3 h 后空冷;其余 4 组试样由电脉冲进行奥氏体化固溶处理后油冷,170  $^{\circ}\text{C}$ 回火 3 h 后空冷。电脉冲装置如图 1 所示,由大功率脉冲电源输出交流方形波,方形波加载电压、脉冲频率和脉冲宽度等参数由计算机软件控制,脉冲电流通过铜电极接入专用热处理样品台进行电脉冲处理。设定电脉冲加载峰值电压 50 V、脉冲频率 500 Hz、脉冲宽度 50  $\mu\text{s}$ , 2#试样加载时间 240 s、3#试样加载时间 300 s、4#试样加载时间 360 s、5#试样加载时间 420 s。

表 1 GCr15 实验钢的化学成分(质量分数)

									%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	N	O	
1.03	0.29	0.30	0.013	<0.005	1.51	0.0011	0.0019	0.0005	

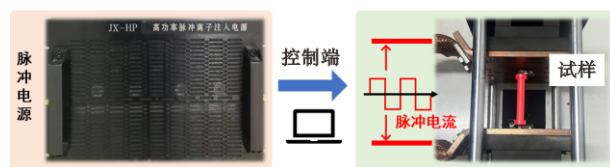


图 1 电脉冲处理装置

Fig. 1 Electropulsing treatment equipment.

对常规热处理以及电脉冲处理后的试样进行室温拉伸、硬度性能测试以及拉伸断口和微观组织观察。热处理后试样经机械加工成标准拉伸试样,按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》标准在岛津万能试验机 AGS-X 10 KN 进行,每组试样准备 3 个平行试样,取平均数后得到拉伸数据。室温硬度试验在 HRS-150 洛氏硬度仪上进行,选取 150 kg 的载荷,加载 5 s,每组试样打 3 个硬度点,取平均值。微观组织观察试样经过 60/120/320/400/800/1 200/2 000 目砂纸打磨、抛光、腐蚀后(腐蚀溶液为:2% 硝酸酒精),利用扫描电子显微镜(SEM, JEOL-7200F)和能谱仪(EDS, Oxford X-Max)观察分析微观组织。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 力学性能

经常规 840  $^{\circ}\text{C} \times 30$  min 奥氏体化处理 and 电脉冲闪速奥氏体化处理力学性能见表 2。采用常规奥氏体化处理的 1#试样硬度为 59.3 HRC,电脉冲加载 240 s 的 2#试样硬度为 59.2 HRC,而采用电脉冲加载

300 s的3#试样硬度达到62.3 HRC、抗拉强度提升至2 356 MPa;随着电脉冲加载时间延长,试样硬度、强度及伸长率均有所下降;4组不同工艺处理样品的拉伸工程应力应变曲线如图2所示,可以看出,3#试样强塑性均优于1#试样。此外,3#试样奥氏体化处理时间仅为300 s(5 min),是传统GCr15钢奥氏体化工艺的六分之一,展现出了电脉冲闪速奥氏体化处理的高效、质优的优良特点。

表2 GCr15试验钢力学性能  
Table 2 Mechanical properties of GCr15 steel

序号	处理工艺	硬度(HRC)	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1#	840 °C×30 min	59.3	2 050	1 787	1.7
2#	电脉冲240 s	59.2	1 770	-	-
3#	电脉冲300 s	62.3	2 356	1 508	2.5
4#	电脉冲360 s	60.7	1 973	1 482	1.7
5#	电脉冲420 s	61.2	1 956	1 515	1.6

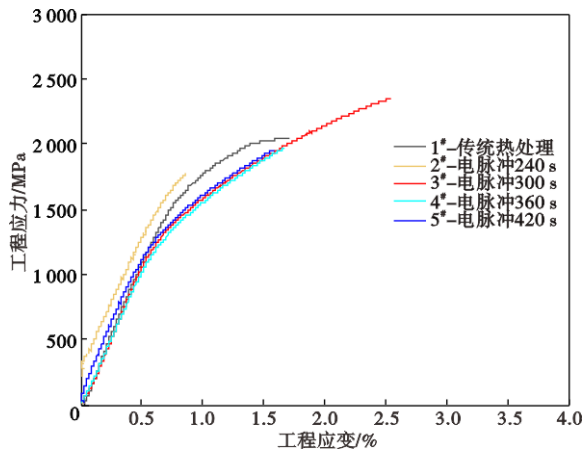


图2 GCr15试验钢工程应力应变曲线

Fig. 2 Engineering stress - strain curve of GCr15 steel.

## 2.2 拉伸断口

对常规奥氏体化处理的1#试样和电脉冲加载300 s的3#试样进行拉伸断口SEM观察,如图3所

示。通过观察可以看出,无论是传统奥氏体化处理还是电脉冲处理,其拉伸断口均符合脆性断裂典型特征,宏观形貌呈现断口平齐有结晶状或者放射性花样,无明显颈缩特征,以解理断裂为主,如图3(a)(c)所示。然而,通过对比观察1#、3#拉伸断口高倍形貌发现,断裂面处分布着细小的球形碳化物,且3#试样碳化物的尺寸更加细小、弥散,如图3(b)(d)所示。

## 2.3 微观组织观察与讨论

对常规奥氏体化处理的1#试样和电脉冲加载300 s的3#试样进行微观组织表征分析,如图4所示。无论是常规奥氏体化处理还是高频高能电脉冲闪速奥氏体化处理,组织均为马氏体基体和其上分布的球形碳化物。GCr15轴承钢基体内碳含量为1.0%,其碳化物主要为 $Fe_3C$ 渗碳体<sup>[17]</sup>。图4(a)为1#试样高倍组织结构,可以看出碳化物尺寸不均匀、大颗粒碳化物球度较差;图4(b)(c)(d)依次为3#试样低倍宏观组织和高倍碳化物分布,可以看出,经过电脉冲奥氏体化处理后,碳化物细小、均匀的分布在马氏体基体上。

为了定量对比分析电脉冲处理对GCr15轴承钢碳化物影响规律,分别对1#、3#试样在扫描电子显微镜X5000放大倍数的10个视场,共计 $4.5 \times 10^3 \mu m^2$ 面积进行碳化物数量、尺寸测量,碳化物直径由弦心法计算等效<sup>[18]</sup>,其结果如图5所示。在 $4.5 \times 10^3 \mu m^2$ 的统计面积内,1#试样碳化物数量为735个、平均尺寸为 $0.60 \mu m$ ,而3#试样碳化物数量为1 056个、平均尺寸为 $0.46 \mu m$ 。图5(a)为两组试样碳化物尺寸与数量频数增长趋势图,曲线上的点代表小于选定尺寸的碳化物数量<sup>[19]</sup>,可以看出,3#试样中碳化物尺寸均小于 $1 \mu m$ ,且小尺寸碳化物数量显著多于1#试样。图5(b)为选取 $0.2 \mu m$ 频数区间的碳化物尺寸分布图,3#试样小于 $0.6 \mu m$ 碳化物尺寸占比为91.8%,显著高于1#试样的60.4%。将基体内碳化物均等效为

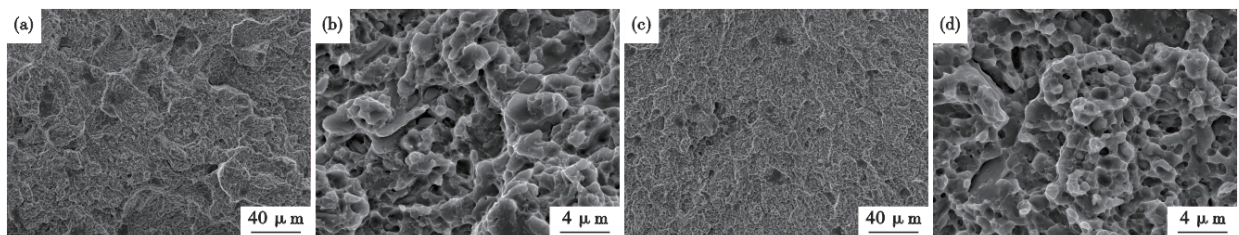


图3 GCr15试验钢断口形貌:(a)(b)1#传统热处理;(c)(d)3#电脉冲300 s

Fig. 3 Fracture morphologies of GCr15 steel : (a)(b) conventional heat treatment (Sample 1#); (c)(d) electrical pulse treatment for 300 s (Sample 3#)

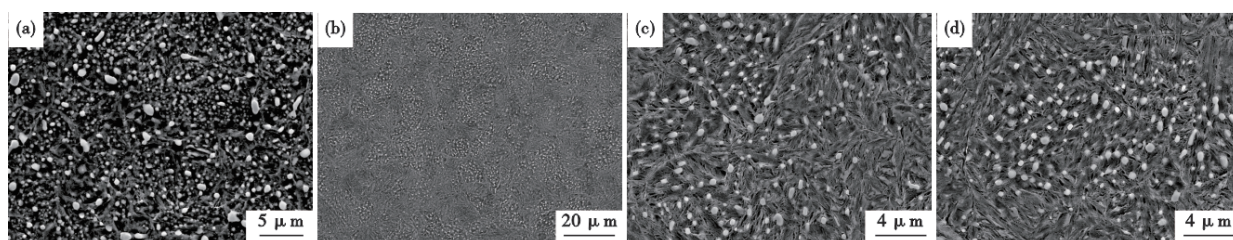


图4 淬火回火热处理后 GCr15 轴承钢 SEM 组织结构: (a) 1<sup>#</sup>传统热处理; (b)(c)(d) 3<sup>#</sup>电脉冲 300 s

Fig. 4 SEM microstructures of GCr15 bearing steel after quenching and tempering: (a) conventional heat treatment (Sample 1<sup>#</sup>); (b)(c)(d) electrical pulse treatment for 300 s (Sample 3<sup>#</sup>)

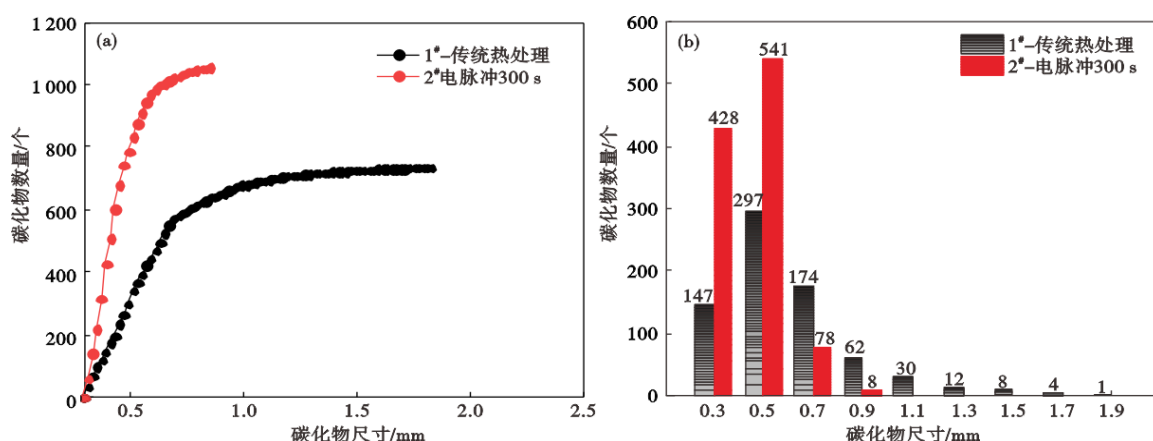


图5 GCr15 试验钢碳化物统计: (a) 尺寸数量分布, (b) 频数分布

Fig. 5 Carbide statistics of GCr15 steel: (1) size quantity distribution, (2) frequency distribution

圆形,用统计得出的碳化物尺寸数据进行计算,1<sup>#</sup>试样在  $4.5 \times 10^3 \mu\text{m}^2$  面积上的碳化物总面积为  $246.3 \mu\text{m}^2$ ,而 3<sup>#</sup>试样碳化物总面积为  $175.2 \mu\text{m}^2$  小于 1<sup>#</sup>试样。这表明电脉冲奥氏体化处理不仅可以显著细化 GCr15 轴承钢中碳化物尺寸,还可以促进碳化物溶解,增加固溶强化对基体硬度、强度贡献。此外,碳化物的溶解使得电脉冲奥氏体化过程中基体内奥氏体碳含量上升,导致马氏体转变不完全,淬火的过程中更多的残余奥氏体被保留到室温,这也是 3<sup>#</sup>电脉冲试样屈服强度低于传统热处理试样的主要原因。高频高能电脉冲加载过程中,由于 GCr15 轴承钢作为导体材料,其自身的电阻会使试样本身产生焦耳热效应<sup>[20]</sup>,产生的热效应是驱动 GCr15 轴承钢奥氏体相变的主要热力学条件。而电脉冲加载过程中电子会与金属原子发生碰撞<sup>[21]</sup>,同时,促进材料内部的位错迁移<sup>[22]</sup>,这一效应也被描述为电子风、位错电子风效应<sup>[23]</sup>。电子风效应可以驱动 Cr 等元素沿电流方向定向迁移,消除了奥氏体化过程中微区成分偏聚带来的成分不均,避免成分不均带来的局部碳化物粗大聚集。脉冲电流产生的瞬时高密度电磁力可以破坏粗大碳化物结构促使其发

生断裂,在局部焦耳热与应力协同作用下,断裂的碳化物颗粒发生表面能驱动的球化转变,促进了 GCr15 轴承钢基体碳化物弥散、细小、均匀分布。正是由于电脉冲加载带来的焦耳热和电子风效应协同作用,既促进了碳化物向基体内溶解以提升固溶强化效果,又使得碳化物细小、均匀、弥散分布,成为高效处理 GCr15 轴承钢新方法。

### 3 结论

1) 高能电脉冲对 GCr15 轴承钢进行闪速奥氏体化处理 300 s,随后油冷和回火处理后硬度可达 62.3 HRC、抗拉强度 2 356 MPa,力学性能优于传统热处理工艺。

2) 试验钢经 300 s 电脉冲处理后基体上碳化物尺寸小于  $1 \mu\text{m}$ ,平均尺寸由传统奥氏体化工艺的  $0.60 \mu\text{m}$  细化至  $0.46 \mu\text{m}$ ;脉冲电流可以极大程度细化第二相尺寸,同时改善第二相尺寸分布均匀性。

3) 高能电脉冲的焦耳热和电子风效应协同作用在驱动 GCr15 轴承钢奥氏体化相变的同时,促进了碳化物的溶解,提升固溶强化效果;回火后细小碳化物均匀弥散分布于基体。

## 参考文献

- [1] 王坤,胡锋,周雯,等. 轴承钢研究现状及发展趋势[J]. 中国冶金,2020,30(9):119-128.
- [2] 周冠霖,阿达依·谢尔亚孜旦,尚中昇,等. GCr15轴承钢电化学加工钝化膜特性研究[J]. 热加工工艺,2025,54(22):39-44.
- [3] 丰涵,包汉生,厉勇,等. 我国先进特殊钢材材料技术与应用进展[J]. 特殊钢,2025,46(6):8-23.
- [4] 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.
- [5] 尹青,曹文全,吴小林,等. 高洁净轴承钢GCr15滚动接触疲劳机制研究[J]. 特殊钢,2023,44(5):113-120.
- [6] 姜周华,董艳伍,刘福斌,等. 我国特种冶金产品、技术和装备的最新进展与展望[J]. 特殊钢,2024,45(4):1-12.
- [7] 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.
- [8] Cao Z X, Shi Z Y, Liang B, et al. Melting route effects on the rotary bending fatigue and rolling contact fatigue properties of high carbon bearing steel SAE52100 [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 140: 105854.
- [9] 班佳乐,史智越,俞峰,等. GCr15轴承钢双淬火对组织性能影响[J]. 钢铁,2022,57(9):114-122.
- [10] 江涛,陈君豪. GCr15轴承钢晶粒和碳化物细化工艺的研究[J]. 轴承,1985,(5):22-29+63.
- [11] Cao Z X, Liu T Q, Yu F, et al. Carburization induced extra-long rolling contact fatigue life of high carbon bearing steel [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 131: 105351.
- [12] 梁桃云,朱华明,严红革,等. Nb+V复合微合金化对GCr15钢微观组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2025,46(1):114-123.
- [13] 廖劲成,宋佳敏,杨弋涛. 淬火和回火温度对钨氮微合金化GCr15高碳铬轴承钢组织及性能的影响[J]. 机械工程材料,2025,49(8):33-39.
- [14] 孙伟,张玲,王云广. 轴承行业热处理节能和环保技术的现状与展望[J]. 金属加工(热加工),2016,(S2):26-28.
- [15] Zhang M K, Ren L, Huang X S, et al. Differential regulation of primary carbides in high carbon bearing steel using pulsed current to improve corrosion resistance [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 6763 - 6777.
- [16] 许尚峰,张元波,姜雁斌,等. 电脉冲处理提升退火态Ti-6Al-4V合金塑性[J]. 中国有色金属学报,2025,35(9):2938-2952.
- [17] 阴湛清,张天宇,刘明洋,等. GCr15轴承钢碳化物带对力学性能的影响[J]. 特殊钢,2025,46(6):112-121.
- [18] 史智越,徐海峰,许达,等. 采用ASPEX和旋弯疲劳法表征GCr15轴承钢夹杂物[J]. 钢铁,2019,54(4):55-62.
- [19] 史智越,徐海峰,许达,等. 冶金工艺对GCr15高周旋转弯曲疲劳性能的影响[J]. 钢铁,2018,53(11):85-92.
- [20] 张伟,隋曼龄,周亦青,等. 高密度电脉冲下材料微观结构的演变[J]. 金属学报,2003,39(10):1009-1018.
- [21] Gao L L, Liu J X, Cheng X W, et al. Effects of short time electric pulse heat treatment on microstructures and mechanical properties of hot-rolled Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 618: 104-111.
- [22] Fard R A, Kazeminezhad M. Effect of electropulsing on microstructure and hardness of cold-rolled low carbon steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3): 3114-3125.
- [23] Conrad H, Karam N, Mannan S. Effect of electric current pulses on the recrystallization of copper[J]. Scripta Metallurgica, 1983, 17(3): 411-416.