

• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.018

轴承钢超快速冷却工艺热模拟研究

陈胜楠¹, 王灏旭¹, 李 壮¹, 孙艳坤², 张润奇¹, 蔡一钦¹, 陈朝霞¹, 于 涛¹, 李朝华¹

(1. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 轴承钢棒材变形后的交货状态存在高温网状二次碳化物大量快速析出、网状级别和硬度超标等严重问题。采用热模拟实验机对 GCr15 轴承钢棒材高温变形后进行超快速冷却的热模拟实验, 研究了其显微组织和硬度。结果表明, 经过变形量为 40% 的高温变形后快速冷却至 700 °C 停留保温, 室温组织珠光体含量随等温时间延长而增多, 二次碳化物在晶界处析出更加明显。在 700 °C 等温、超快速析出和冷却, 网状二次碳化物快速析出数量减少, 并得到细小片层的珠光体。

关键词: GCr15 轴承钢; 超快速冷却; 等温; 二次碳化物

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)04-0375-04

Thermal Simulation of Ultra-rapid Cooling Process of Bearing Steel

CHEN Shengnan¹, WANG Haoxu¹, LI Zhuang¹, SUN Yankun², ZHANG Runqi¹, CAI Yiqin¹,
CHEN Zhaoxia¹, YU Tao¹, LI Zhaohua¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Serious problems existed in the delivery state of bearing steel bar after deformation, such as rapid precipitation of high temperature reticulated secondary carbides, excessive reticulated grade and hardness. The thermal simulation experiment of ultra-rapid cooling of GCr15 bearing steel bar after high temperature deformation was carried out by thermal simulation machine, and its microstructure and hardness were studied. The results show that the pearlite content increase with the extension of isothermal time after rapid cooling to 700 °C after deformation of 40% at high temperature. Secondary carbides are more obviously precipitated at grain boundaries. At 700 °C isothermal, ultra-rapid precipitation and cooling, the amount of rapid precipitation of reticulated secondary carbides is reduced, and fine lamellar pearlite is obtained.

Key words: GCr15 bearing steel; ultra-rapid cooling; isothermal; secondary carbide

生产高强度轴承钢和合金钢等一直是我国钢铁工业生产难点所在, 其中就包括 GCr15 轴承钢的生产^[1,2]。GCr15 轴承钢与其他低合金钢一样, 具有优异的力学性能, 如耐磨、耐腐蚀、抗疲劳、延展性好、尺寸稳定性好等优点, 在世界范围内得到了广泛的应用, 但是作为轴承钢也存在一些严重问题, 提高轴承钢内在质量和疲劳寿命是国内外钢铁行业工作者一直追求的目标^[3-6]。超快速冷却 UFC (Ultra Fast Cooling) 技术在热轧工艺过程中常与缓冷技术相配合使用, 得到性能优良的棒材。而 GCr15 轴承钢能够通过超快速空气冷却控制技术使其能

够有效率地抑制由于轴承钢的槽内网状物和碳化物析出, 提高其导热性能和提高产品质量^[7,8]。本文通过对 GCr15 轴承钢进行快速冷却的热模拟实验, 使轴承钢经过变形量为 40% 的高温变形后快速冷却至 700 °C 停留保温, 研究其显微组织和硬度, 通过不同的实验方案使轴承钢的高温网状二次碳化物快速析出的数量减少, 并得到细小片层的珠光体。为先进的控轧工艺和控冷技术在轴承钢棒材上加工和生产过程中的实际应用研究提供理论依据。

1 实验材料及方法

轴承钢试验材料为国内某厂提供的热轧棒材, 其化学成分列于表 1。把 $\phi 30$ mm 原始态棒材加工成热模拟试验试样 ($\phi 8$ mm \times 15 mm)。

表 1 试验钢的化学成分 $w(\%)$

Tab.1 Chemical composition of test steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al
1.03	0.32	0.34	0.009	0.003	1.49	0.07	0.15	0.02	0.0017	0.005

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 国家 863 科研项目 (2015AA03A501); 沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目 (X1701099)

作者简介: 陈胜楠 (1996-), 辽宁葫芦岛人, 本科生。研究方向:

金属材料的组织与性能。电话: 15166064029,

E-mail: 2385455854@qq.com

超快速冷却实验在热力模拟实验机上进行。热模拟工艺为热变形后分段冷却。图1为轴承钢超快速冷却工艺示意图。试样首先被加热到1100℃,保温300s,然后快冷至980℃进行变形量为40%的高温变形,然后再冷却到700℃停留保温不同时间,水冷到室温。

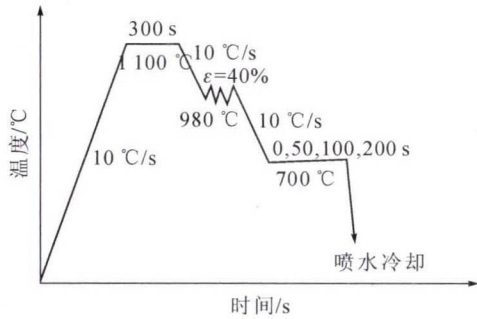


图1 轴承钢超快速冷却工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultra-rapid cooling of the bearing steel

热模拟实验后首先采取4%硝酸酒精溶液侵蚀磨抛后的金相轴承钢试样,在金相显微镜上对其进行金相显微组织的观察。对轴承钢热模拟实验后试样淬火-回火,然后采用深腐蚀,分析其不同工艺参数下的二次碳化物的析出。在显微硬度的测试仪器上对其进行显微硬度的测试。

2 实验结果与分析

2.1 热模拟后金相组织

图2为GCr15轴承钢在不同热模拟工艺下的金相组织。轴承钢经过变形量为40%的热变形后冷

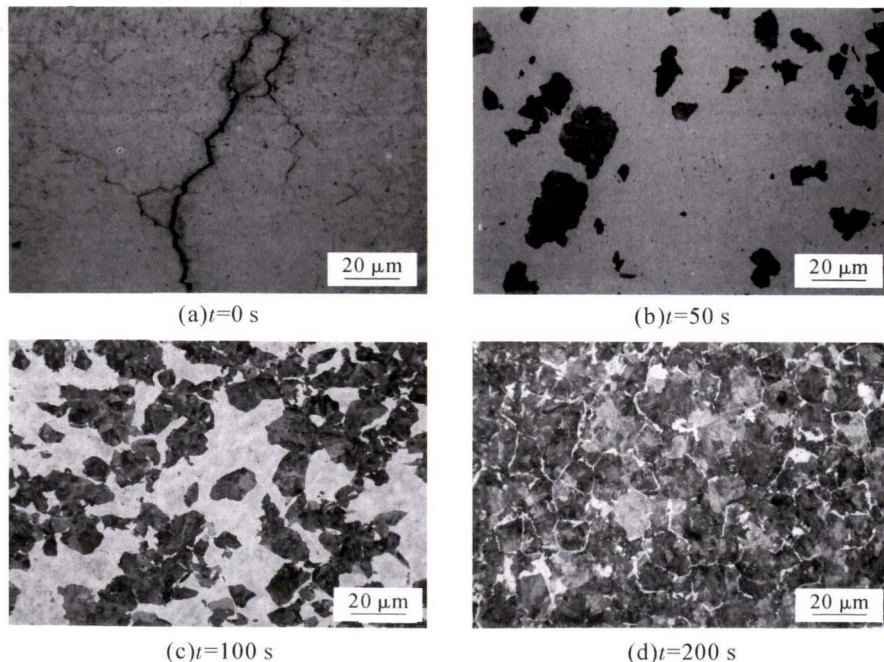


图2 700℃等温不同时间后轴承钢的金相组织

Fig.2 Microstructures after different isothermal time at 700 °C

至700℃直接喷水处理,得到完全的隐针马氏体组织(图2(a))。在700℃停留保温时间越长,从室温组织中由图2(a)到图2(d)可以明显的看出黑色珠光体逐渐增多,而马氏体则会逐渐减少。

轴承钢在700℃停留保温不同时间时的珠光体含量见表2。轴承钢热变形后在冷却到700℃的过程中,因为快速冷却,珠光体转变来不及发生。这是由于珠光体的转变需要充足的孕育周期。而在700℃停留保温50s时,开始发生珠光体转变,此时片层状的珠光体含量达23.8%;随着在700℃停留保温时间达到100s时,组织中出现少量的马氏体,同时,白色的网状的二次碳化物在珠光体团周围析出,此时珠光体含量达52.7%;当在700℃停留保温200s时,组织中没有了马氏体,而呈现出白色呈网状的二次碳化物所包围的珠光体团,此时珠光体转变彻底完成。

表2 不同工艺下转变的珠光体量

Tab.2 Pearlite content under different isothermal time

等温时间/s	0	50	100	200
珠光体转变量(%)	0	23.8	52.7	98.2

2.2 热模拟后显微硬度

GCr15轴承钢不同时间和条件下等温后发生的珠光体转变的量和其显微硬度值的变化见表3。不同轴承钢在等温的时间和条件下其显微硬度值的变化见图3。

图3为700℃等温不同时间的显微硬度。可以看出,显微硬度在相同等温温度长时间的等温时,下降的幅度很大,几乎保持了恒定。不经过等温时,由

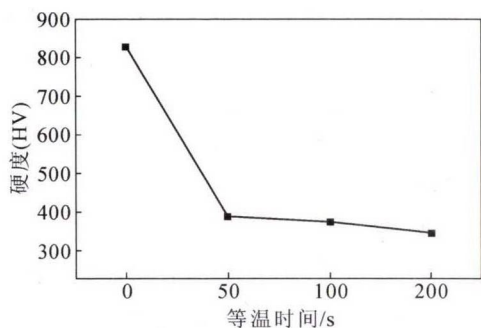


图3 700 °C等温不同工艺下的显微硬度
Fig.3 Hardness under different isothermal time at 700 °C

表3 不同工艺下珠光体的显微硬度和其转变量
Tab.3 Pearlite content and hardness in different isothermal times

保温时间/s	0	50	100	200
HV	825	387	374	346
珠光体转变量(%)	0	23.8	52.7	98.2

于已经是完全的马氏体组织,所以其显微组织马氏体的硬度已经达到了 825 HV 的最高值;在经过等温的时间 50 s 时,因为含有许多马氏体的缘故,其显微硬度达到了 387 HV 的较高值;显微硬度在等温 200 s 时达最低(346 HV),这是由于珠光体转变已经彻底的完成所导致的。

2.3 淬火-回火后金相组织

图 4 为 GCr15 轴承钢试样经过淬火-回火,然后深度腐蚀的金相组织。

图 4(a)中,试样因直接喷水冷却,网状的二次碳化物不见了;而在图 4(a)、图 4(b)中,半网状的二次碳化物结构会随试样等温停留保温时间的缩短和

延长而逐渐出现,条状、短棒状逐渐地消失;而在图 4(c)中,紧密的网状结构(试样网状碳化物的级别已经达到 5 级)的二次碳化物在试样等温 200 s 时才会出现。实验证明,GCr15 轴承钢在冷却到 700 °C 的过程中,由于超快速冷却的作用,网状的二次碳化物被抑制了析出。而网状的二次碳化物如果要析出,其等温时间必须足够(图 4(d))。

2.4 轴承钢冷却中的组织变化

轴承钢中的二次碳化物形态以及珠光体的转变由其冷却过程中的工艺参数所决定。轴承钢在实际生产时,其经过热轧后的冷速是一个变量。如果采用本实验的超快速冷却工艺,网状二次碳化物能够被抑制析出,珠光体能够被细化。GCr15 轴承钢在快冷到 700 °C 后的等温过程中直接生成了珠光体的组织。从珠光体等温转变动力学来看,珠光体在发生转变之前有一个孕育期。当其由高温冷至 700 °C 直接喷水时,由于快速冷却,过冷奥氏体直接转变成马氏体。因此图 2(a) 中,获得了隐针马氏体。而当其在 700 °C 短时间停留保温时,团状珠光体数量不多,见图 2(b)。当其在 700 °C 较长时间停留保温时,由于 Fe 原子、C 原子有时间充分扩散,团状珠光体数量增多,个别的珠光体团合并成为较大的团(图 2(c))。图 2(d)中,随着轴承钢等温时间的延长和增加,各个团状珠光体的球团逐渐长大,直到各个珠光体球团长大到完全相碰为止,珠光体孕育期结束,珠光体转变完成,此时,组织中没有马氏体生成。

图 5 为铁碳系准平衡结构示意图。当试样由高

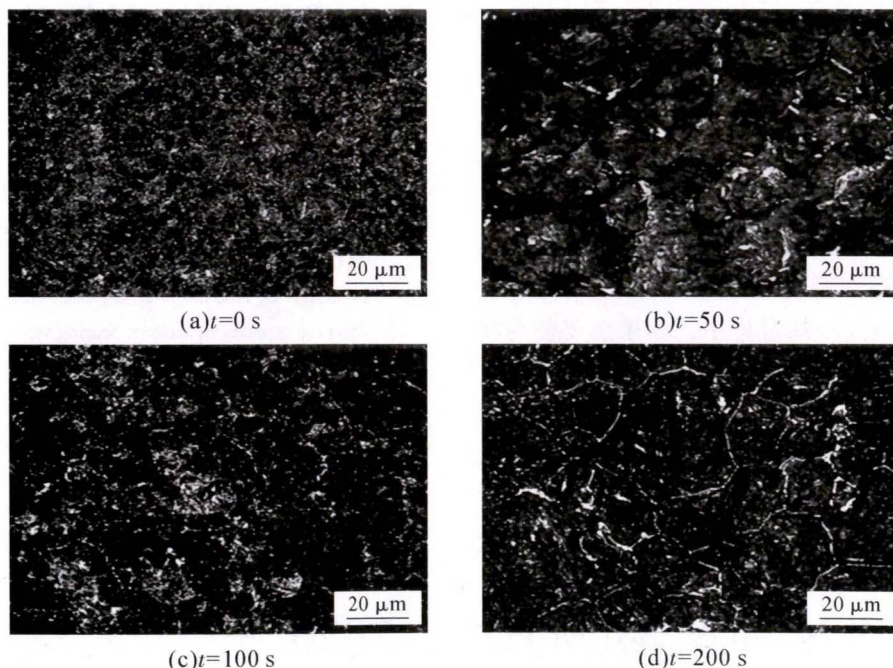


图 4 700 °C 不同等温时间条件下淬火回火后组织
Fig.4 Microstructures after quench and temper in different isothermal times at 700 °C

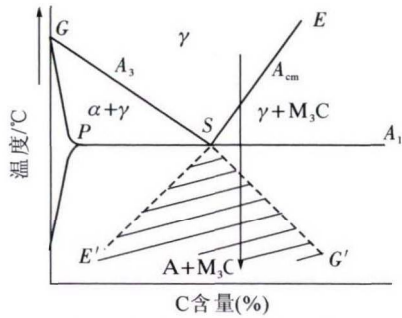


图5 铁碳系准平衡示意图

Fig.5 Quasi-equilibrium diagram of Fe-C

温向低温比较缓慢的冷却过程中,沿ES线将析出先共析的二次碳化物。试样从高温快速冷却过程中,由于快冷,则抑制了二次碳化物的析出,因此最后组织中大大减轻了网状二次碳化物的级别,而珠光体组织也获得了有效的细化。在铁碳系准平衡结构示意图中,奥氏体的析出区为GSE线和及其GES线以上的部分,ES线以右为先共析二次碳化物区。渗碳体在高温过冷奥氏体组织中的饱和溶解度的极限、铁素体在高温过冷奥氏体组织中的饱和碳化物溶解度的极限分别如SE'线、SG'线所示。当在700℃停留保温时间较长时,钢中C原子与合金元素Cr有了相对较充分的时间进行扩散。这样就导致了基体中的元素C、Cr含量的降低,珠光体的强化和硬化能力逐渐减弱,所以钢中珠光体的显微硬度也逐渐降低。当轴承钢从700℃快冷时,因快冷冷却时间较短,钢中C原子与合金元素Cr向晶界处的扩散来不及进行,由此造成C和Cr在基体中含量增高,因此强化了珠光体,显微硬度达到最高值;在轴承钢进行快冷后等温实验时,等温的时间越来越长,而在晶界处的二次碳化物也析出的越来越多,因为晶界处网状的级别也随之逐渐增大,致使晶界处碳的含量也逐渐增添,而珠光体中碳含量逐渐减少,这就说明了随着等温时间增加,珠光体显微硬度反而会随之降低即使不同的等温时间下的珠光体组织都是在700℃时形核长大的。GCr15轴承钢由高温冷却过程中,如果想要使网状碳化物的析出受到抑制,最后得到细小的珠光体,就要使轴承钢在900~700℃的温度区间快冷。这样,网状碳化物析出将会得到有效的抑制、而C和Cr元素的扩散也会被有效的阻止。同时还要使钢在700℃附近(珠光体转变区)等温,以使弥散的碳化

物和珠光体发生快速转变而不至于产生网状的二次碳化物。随着珠光体等温时间的延长,室温组织中网状的珠光体含量逐渐增多,与此同时,晶界处二次碳化物形成网状的级别也应该逐渐增大,碳化物应该为正交渗碳体型(FeCr)₃C。

对轴承钢采用合理的超快速冷却工艺,能够使其冷却中发生珠光体转变,而同时抑制网状碳化物的析出,最终得到细小的珠光体组织。

3 结论

(1)GCr15轴承钢经变形量为40%的高温变形后快速冷却至700℃停留保温,最后组织中马氏体量随等温时间延长而减少,珠光体量增多,硬度降低。

(2)轴承钢在700℃等温过程中,设定实验方案使等温时间逐渐提高,晶界处二次碳化物析出趋势也逐渐增大,其碳化物结构由简单的条状、短棒状逐渐转变为复杂的半网状结构、紧密的网状结构,网状级也同时别显著的增大。

(3)采用超快冷却技术可以有效的改善轴承钢的组织缺陷,获得抑制网状碳化物析出的理想组织。

参考文献:

- [1] 车晓健,扬卯生,唐海燕,等.高性能GCr15轴承钢中夹杂物控制与疲劳性能[J].钢铁,2018,53(5):76-85.
- [2] 郑春雷,余丽,王艳辉.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.
- [3] Jiang D, Wang R, Zhu L, et al. Thermal and numerical simulation of mould electromagnetic stirring of GCr15 bearing steel[J]. Materials Science and Technology, 2019(2): 1-8.
- [4] Fu J. Microstructure and corrosion behavior of hot-rolled GCr15 bearing steel [J]. Applied Physics A, 2016, 122(4): 416.
- [5] Romanowicz P J, Szybiński B. Fatigue life assessment of rolling bearings made from AISI 52100 bearing steel [J]. Materials, 2019, 12 (3): 1-23.
- [6] Londhe N D, Arakere N K, Subhash G. Effect of plasticity on the dynamic capacity of modern bearing steels [J]. Tribology International,2019, 133: 160-171.
- [7] 赵亮明,吴迪,王国栋,等.一种线材和棒材热轧生产线用超快速冷却装置:中国:CN:200510046822.4[P],2006.
- [8] Sarkar I, Chakraborty S, Jha J M. Ultrafast cooling of a hot steel plate using Cu-Al layered double hydroxide nanofluid jet [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 116: 52-62.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64 国外发行号:M855 国内定价:25元/本 海外定价:25美元/本