

GCr15 轴承钢球化退火碳化物的定量分析

潘恒沛^{1,2}, 刘 瑛¹, 王经涛¹, 冯虎田³, 田 毅⁴, 田茂林⁴

(1. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京 210000; 2. 洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471023;

3. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210000; 4. 陕西汉江机床有限公司, 汉中 723000)

摘 要:借助于扫描电镜分析和显微硬度测试等方法,对滚珠丝杠用 GCr15 轴承钢在不同热处理条件下的等温球化退火效果进行了研究,并通过定量金相的方法,分析统计了不同热处理工艺参数条件下碳化物的形貌及其分布。结果表明:GCr15 轴承钢在 790 °C 奥氏体化、冷却速率为 20 °C · h⁻¹ 的条件下球化退火后,其硬度分布最均匀,球化退火效果最好;此时碳化物平均粒径标准差最小,平均长短轴比值不大于 2.1,颗粒圆度不小于 0.17,粒径为 0.5~1.1 μm 的碳化物所占百分比约为 50%。该方法可定量评定 GCr15 轴承钢的球化质量级别,对实际生产有一定的指导意义。

关键词:GCr15 轴承钢; 球化退火; 碳化物; 定量金相

中图分类号: TG156.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-4012(2015)10-0701-05

Quantitative Analysis of Carbide in GCr15 Bearing Steel after Spheroidizing Annealing

PAN Heng-pei^{1,2}, LIU Ying¹, WANG Jing-tao¹, FENG Hu-tian³, TIAN Yi⁴, TIAN Mao-lin⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

2. Luoyang Ship Metal Research Institute, Luoyang 471023, China;

3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

4. Hanzhong Machine Tool Co., Ltd., Hanzhong 723000, China)

Abstract: The isothermal spheroidizing annealing effect with different temperatures and cooling rates was investigated by SEM analysis and hardness test, and the morphology and distribution of the carbide under different process parameters were analyzed by quantitative metallography methods. The results show that the hardness distribution was most uniform and the spheroidizing annealing effect was best when the GCr15 bearing steel was austenitized at 790 °C and cooling at 20 °C · h⁻¹. In this case, the standard deviation about average particle diameter of carbide was the minimum, the ratio of the major axis and minor axis was not greater than 2.1, the particle roundness was not less than 0.17, and percentage of 0.5~1.1 μm carbide was about 50%. This method can provide some references to accurately and quantitatively evaluate the spheroidizing annealing effect of GCr15 bearing steel, and it is significant for practical production.

Keywords: GCr15 bearing steel; spheroidizing annealing; carbide; quantitative metallography

滚珠丝杠副作为新型的螺杆传动元件,具有高效率、高精度、高刚度等特点,被广泛应用于机械行业,是一种利用滚动摩擦代替滑动摩擦,显著减少摩擦损失的精密机械元件。国产滚珠丝杠副基本可以满足丝杠工作过程中高硬度、高强度和耐磨性的要求,但与国外同类产品相比,国产滚珠丝杠在疲劳寿命与精

度稳定性上还有较大差距。国产滚珠丝杠的原材料质量欠佳和后续冷热加工工艺不当是造成其使用性能与国外产品存在较大差距的主要原因^[1-2]。

GCr15 钢作为传统的高碳铬轴承钢,主要用于制造轴承的套圈、滚子和钢球等部件。为了降低材料的硬度、改善切削加工性能、得到理想的淬火组织,要求轴承钢具有颗粒大小适中且均匀的球化组织,只有当原始组织为细粒状珠光体时,经过最终热处理后,轴承零件才能具有高的强度和韧性,以及高

收稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2012ZX04002021)

作者简介: 潘恒沛(1991-),男,工学硕士。

的硬度、耐磨性和接触疲劳抗力,从而提高轴承零件的使用寿命^[3]。GCr15 钢作为滚珠丝杠的原材料,其组织状态为球化退火态,近年来国内外不少学者对于 GCr15 钢的球化退火进行了研究^[4-6],主要包括球化退火后的组织变化及力学性能的研究,以及利用离异共析^[7]的转变方式,大量缩短球化退火的时间。在球化组织鉴别方面,潘淑红等人^[8]主要采用光学显微镜对比方式,通过不同工艺参数的对比试验,得到了大量的金相组织,为球化退火组织的鉴别提供了大量帮助。但问题是只是单一地通过金相组织对比的定性研究,对球化退火后组织均匀性的表征有所欠缺,GB/T 18254—2002《高碳铬轴承钢》中对于 GCr15 钢球化退火态的技术要求为球化级别 2~4 级,硬度 179~207 HB,要求较为宽泛。可见目前的试验方法与标准要求都偏定性,缺少定量表征^[9]手段。笔者以此入手,采用扫描电镜与定量金相分析相结合的方式,通过 Photoshop 与 Image-Pro Plus 软件,对经过不同奥氏体化温度及冷却速率球化退火得到的 GCr15 钢显微组织扫描电镜形

貌进行分析处理,并与显微硬度分布测定结果进行对比,为定量地鉴定球化退火组织的均匀性提供参考,从而达到精确控制滚珠丝杠原材料组织均匀性的目的。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

对试验材料进行等温球化退火处理,试验分为 A 和 B 两组。其中 A 组为将试样 A1~A5 分别加热至不同奥氏体化温度 740~830 °C,保温一段时间后,以 20 °C·h⁻¹ 速率冷却至 720 °C,保温 3 h 后,再以 20 °C·h⁻¹ 速率冷却至 650 °C,取出空冷。B 组为将试样 B1~B4 加热至 790 °C,保温 4 h 后以不同的速率 (10, 20, 50, 100 °C·h⁻¹) 冷却至 720 °C,等温 3 h 后,再以 20 °C·h⁻¹ 速率冷却至 650 °C,取出空冷。具体工艺流程如图 1 所示。

经不同工艺参数等温球化退火处理后,利用线切割切取心部试样,尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。试样经研磨、抛光、化学侵蚀后待用。

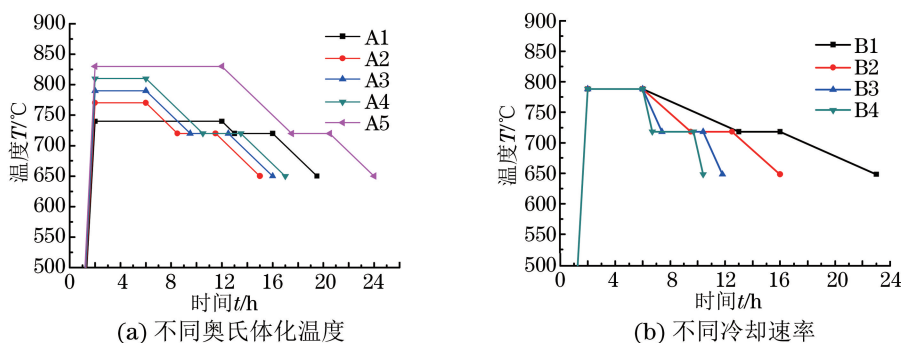


图 1 等温球化退火工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of isothermal spheroidizing annealing process

(a) Different austenitizing temperatures (b) Different cooling rates

1.2 试验方法

采用 HMV-G21 显微硬度计测试显微硬度分布(载荷为 1.96 N,加载 10 s);采用日立 SU1510 扫描电子显微镜观察显微组织。为了定量分析试样渗碳体颗粒的形貌、尺寸及不同大小颗粒的分布情况,根据体视学原理^[10],分别测量并计算出不同等温球化退火工艺参数下扫描电镜形貌中渗碳体颗粒的平均尺寸、平均颗粒尺寸标准差、颗粒长短轴比的均值、圆度(颗粒面积/颗粒周长)均值,以及不同尺寸颗粒所占总颗粒的百分比,每个试样选取随机视场共计 1 400~1 800 个渗碳体颗粒进行统计;同时,对每个试样沿一条直线以 0.5 mm 为间隔取 10 处,每处周围取 5 个点(共计 50 个点)

作均值统计各试样显微硬度分布,结合硬度分布及定量金相统计数据对不同工艺参数的试样进行组织均匀性分析。

2 试验结果与讨论

2.1 显微硬度均匀性分析

A 组试样的显微硬度分布如图 2 所示, A1~A5 试样的显微硬度均值和标准偏分别为 195.4 ± 7.8 , 181.4 ± 5.2 , 183.0 ± 3.8 , 184.9 ± 5.0 , $186.8 \pm 4.1 \text{ HV0.2}$, 均能满足 GB/T 18254—2002 对于高碳铬轴承钢球化退火态硬度的技术要求。其中 A1 试样由于奥氏体化温度较低,虽然保温时间较长,但奥氏体化效果差,各点硬度标准差最大,且曲线波动

最明显,硬度均匀性最差,这是由于奥氏体化温度过低时,加热及保温过程中未溶解的片层状碳化物较多,不利于均匀的球化组织的形成。A3 和 A5 试样的硬度分布曲线波动较小,硬度均匀性较好;A3 试样较于 A5 试样硬度均值更小且波动也更小,即均匀性更好。

B 组试样的显微硬度分布如图 3 所示,B1~B4 试样的显微硬度均值和标准差分别为 182.6 ± 6.5 , 182.5 ± 5.1 , 186.8 ± 8.5 , 188.1 ± 6.2 HV0.2,符合

相应国家标准技术要求。其中 B2 和 B4 试样的硬度分布曲线波动性较小,硬度均匀性较好;B2 较于 B4 试样硬度均值更小且波动也更小,即均匀性更好。可见 GCr15 钢经过不同工艺等温球化退火处理后,虽然其硬度都能满足标准技术要求,但显微硬度均匀性不同,表明其组织均匀性也可能存在差异,对最终成品丝杠的组织也有影响。而单一的硬度测试并不能完全表征出其组织的均匀性,因而还要进一步通过扫描电镜进行组织观察。

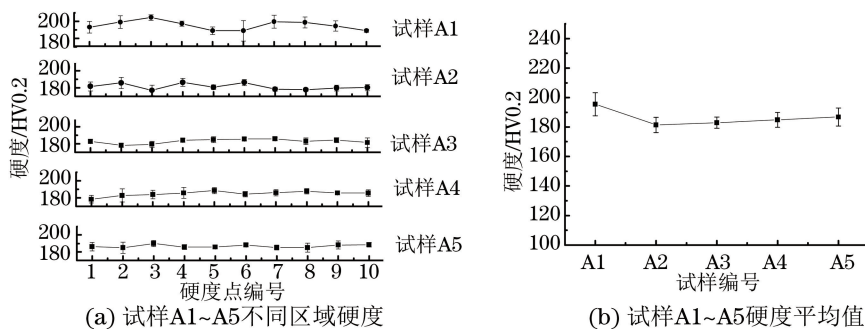


图 2 A 组试样显微硬度

Fig. 2 Hardness of samples in Group A

(a) Hardness in different regions of sample A1-A5 (b) Average hardness of sample A1-A5

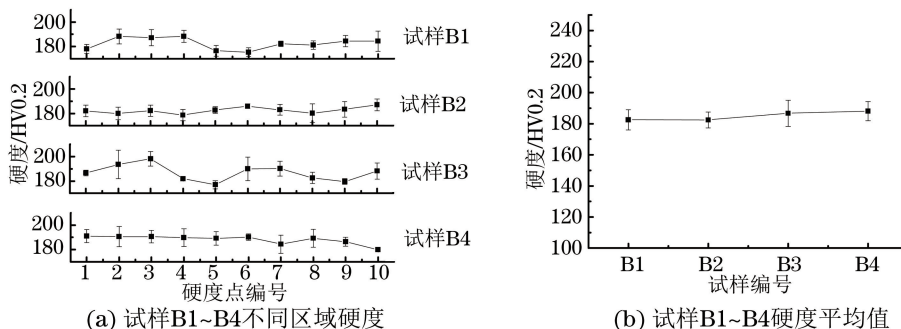


图 3 B 组试样显微硬度

Fig. 3 Hardness of samples in Group B

(a) Hardness in different regions of sample B1-B4 (b) Average hardness of sample B1-B4

2.2 显微组织形貌分析

A 组试样经 740,770,790,810,830 °C 奥氏体化后等温球化退火处理后的显微组织形貌如图 4 所示。当奥氏体化温度为 740 °C 时,由于温度较低,尽管保温 10 h,时间较长,仍然有部分片状珠光体未能完全溶解,所以试样 A1 没有得到合格^[9]的球化组织;当奥氏体化温度为 770 °C 并保温 3 h 时,试样 A2 中原有的片层状渗碳体溶解断裂,基体上出现了较大颗粒状的碳化物,但仍存在极少量棒状碳化物;当奥氏体化温度为 790 °C 并保温 3 h 时,短棒状及片层状碳化物完全消失,形成了颗粒大小及分布均

匀的细粒状珠光体;当奥氏体化温度为 810 °C 并保温 3 h 时,此时由于随着奥氏体化温度的升高,碳元素扩散速率增大,颗粒状碳化物开始长大,组织均匀性有所下降;当奥氏体化温度进一步升高为 830 °C 并长时间保温时,由于奥氏体化温度过高,保温时间过长,局部区域的奥氏体成分均匀,导致冷却后珠光体形态呈片状,在后续的等温过程中不能完全消失,出现了大量的片层状珠光体,组织极为不均匀。

试样经 10,20,50,100 °C · h⁻¹ 冷却速率进行球化退火处理后的显微组织形貌如图 5 所示。B 组试样经不同冷却速率降温的等温球化退火处理后,显

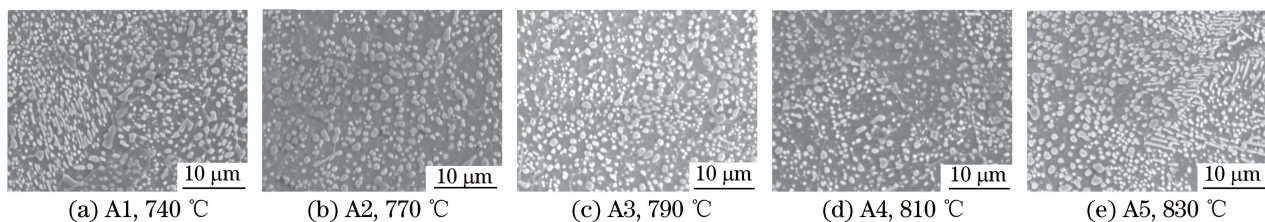


图 4 不同温度奥氏体化球化珠光体的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology of spherical pearlite with different austenitizing temperatures

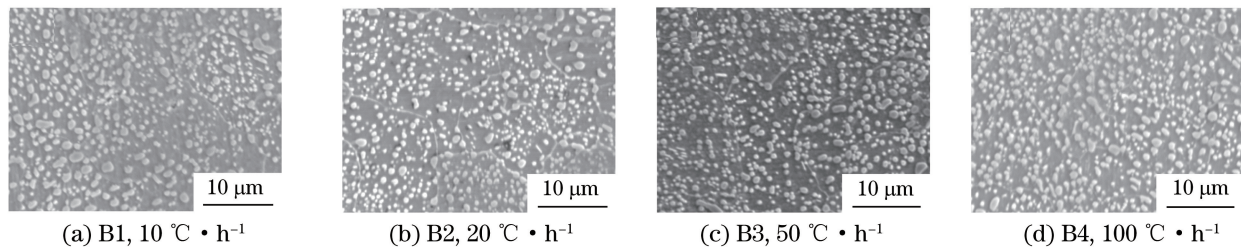


图 5 不同冷却速率下球化珠光体的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of spherical pearlite with different cooling rates

微组织均为均匀分布的细粒状珠光体,其中试样 B4 沿晶界出现少量较大的碳化物颗粒。

实践证明^[11],奥氏体的成分越不均匀,退火后越容易得到球化组织。对于过共析钢,奥氏体温度较低时,奥氏体中碳含量不均匀,且存在未溶解的碳化物,加热过程中,未溶碳化物会由片状逐渐变为球状,在随后的等温保持过程中,不均匀奥氏体中的高碳处,会成为碳化物的形核位置,从而使一部分碳化物直接长成球状,另一部分仍以片状生长的碳化物则在随后的慢冷和等温保持过程中逐渐球化。

从显微硬度分布测定结果发现,A 组试样中 A3~A5 显微硬度分布均匀性较好,整体无明显波动且各点硬度的标准差均较小,而显微组织显示试样 A2~A4 的球化组织较为均匀,A5 试样中出现大量的片层状珠光体,碳化物分布极不均匀,与显微硬度分布有完全不同的表现。B 组试样中,B2 和 B4 显微硬度分布无明显波动,均匀性较好,但显微组织无明显差别。可见,单一地通过显微硬度或显微组织观察,并不能准确量化地表征等温球化效果,这也是滚珠丝杠原材料质量精确控制的一个瓶颈。因此,笔者提出了一种量化表征碳化物形貌、尺寸以及不同颗粒尺寸分布的方法,从而对 GCr15 轴承钢的等温球化退火效果进行定量地准确鉴别。

2.3 渗碳体颗粒粒径统计及定量分析

将 A、B 两组试样显微组织的 SEM 形貌经 Photoshop 和 Image-pro plus 软件进行处理,选定渗碳体颗粒直径(该文中渗碳体颗粒直径为颗粒的

长轴即最大几何长度)、渗碳体颗粒长轴与短轴比值、渗碳体颗粒圆度(颗粒面积与周长之比,同等周长下,面积越大,则圆度值也越大)以及不同直径颗粒所占比例为主要参数,对球化退火组织的均匀性进行表征,具体数值如表 1 所示。

A 组试样中 A3 的粒径标准差为 $0.58 \mu\text{m}$,数值最小,颗粒尺寸均匀性最好;圆度值为 0.175 ,数值最大,碳化物颗粒的饱满度最好,最长轴与最短轴比值也较小;同时,如图 6 所示,对球状碳化物的粒径分布进行统计,试样 A3 粒径分布峰值最宽,且最为平稳,粒径为 $0.5 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的碳化物所占百分比约为 50% ,过大和过小粒径的球状碳化物最少。说明 A 组试样中 A3 的球化效果最好,碳化物颗粒与组织最为均匀,对比各试样的硬度均值与硬度标准差,其硬度标准差也最小,硬度均值处于较低状态,故而对应用于滚珠丝杠生产的 GCr15 轴承钢进行等温球化退火时, 790°C 为最合适的奥氏体化温度。

同理,B 组试样中,试样 B2 的硬度标准差最小,其硬度均匀性最好,综合对比试样 B2 对应的圆度值、长短轴比值、粒径标准差以及粒径分布,也均处于较为理想的状态。由此可见,通过对球化退火后碳化物形貌及圆度值、长短轴比值、粒径标准差和粒径分布的定量分析,统一了硬度标准差的均匀性和显微组织均匀性的差异,该方法可以准确地表征 GCr15 钢球化退火的组织均匀性,对球化退火质量的精确控制有一定的指导意义。

表 1 球状珠光体定量金相分析结果与硬度

Tab. 1 Results of quantitative metallography for the spherical pearlite and hardness

试样编号	粒径均值/mm	粒径标准差/mm	长轴/短轴平均值	圆度均值(周长/面积)	硬度均值/HV0.2	硬度标准差/HV0.2
A1	1.02	0.79	2.752	0.156	195.44	7.84
A2	1.03	0.71	2.258	0.162	181.38	5.19
A3	0.98	0.58	2.067	0.175	182.96	3.80
A4	0.90	0.64	1.945	0.161	184.90	4.99
A5	0.99	0.77	2.269	0.159	186.80	4.10
B1	1.00	0.67	2.085	0.169	182.56	6.48
B2	1.02	0.63	2.094	0.170	182.52	5.11
B3	0.96	0.78	2.117	0.160	186.78	8.46
B4	1.03	0.67	2.228	0.171	188.14	6.25

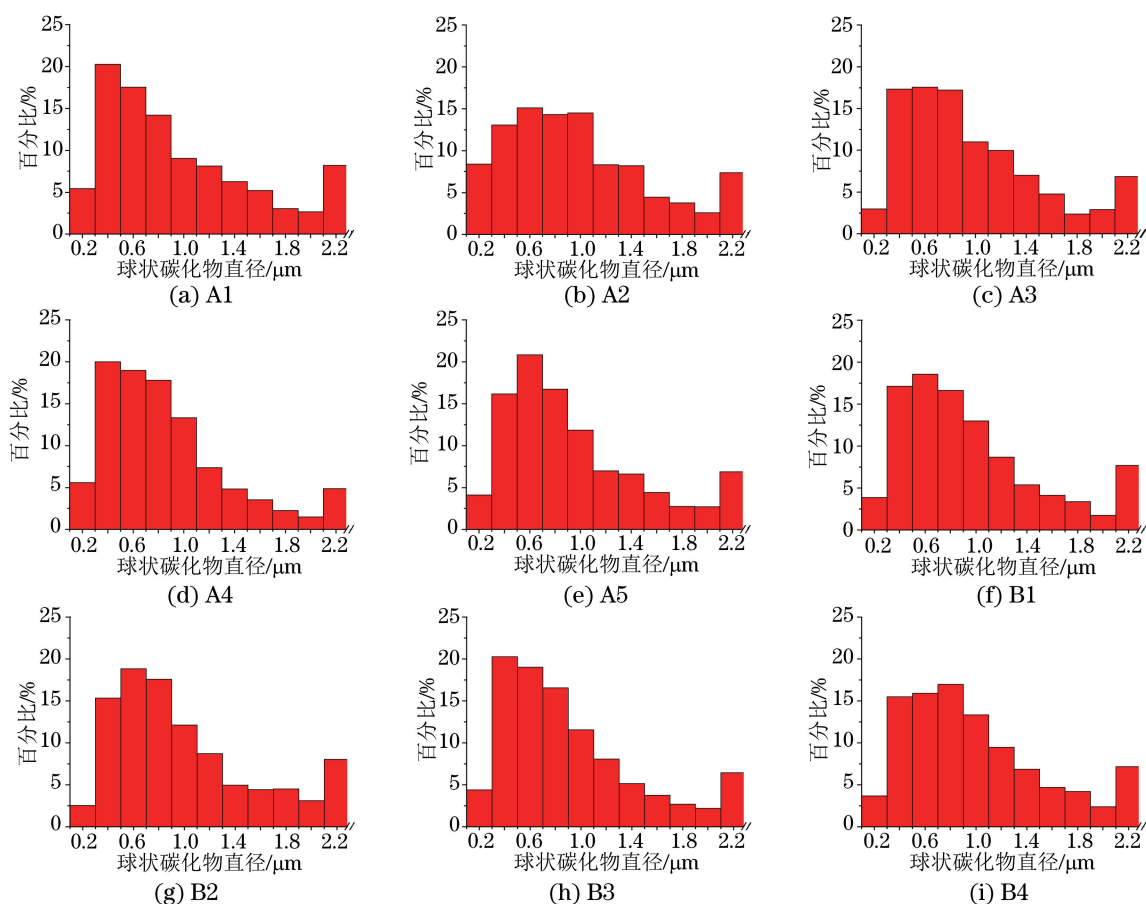


图 6 球状碳化物直径分布

Fig. 6 Size distribution of the spherical carbide

3 结论

(1) 用于生产滚珠丝杠的 GCr15 轴承钢,最佳球化退火工艺为:790 ℃奥氏体化,保温 3 h 后,以 20 ℃·h⁻¹ 速率冷却至 720 ℃,保温 3 h 后,再以 20 ℃·h⁻¹ 速率冷却至 650 ℃后出炉空冷。

(2) 等温球化退火后,可通过统计微观组织碳

化物颗粒粒径均值及标准差、圆度、长短轴比值和粒径分布等相关参数,对球化退火组织的均匀性进行定量分析,精确表征球化退火效果的优劣。

参考文献:

- [1] 肖正义. 滚珠丝杠副的发展趋势[J]. 制造技术与机床, 2000(4): 11-13. (下转第 710 页)

(1) 因马氏体的存在,焊缝处的硬度和脆性比回火索氏体要高,相应地降低了焊缝的夏比 V 形缺口冲击韧度 A_{KV} ,将导致焊缝断裂韧度 K_{IC} 下降,进而导致钻杆发生脆性断裂。根据相关文献资料^[6],高强度钢的断裂韧度 K_{IC} 与全尺寸试样的夏比 V 形缺口冲击韧度 A_{KV} 之间存在如下关系:

$$K_{IC} = 0.387 \ 9Y A_{KV} \sigma_y - 0.002 \ 2\sigma_y Y^{1/2} \quad (2)$$

式中: K_{IC} 为材料断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; A_{KV} 为夏比 V 形缺口冲击韧度, J; Y 为裂纹形状系数; σ_y 为钻杆受到的垂直于裂纹面的拉应力, MPa 。

(2) 钻井液中常存在 H_2S , CO_2 等腐蚀性较强的介质,相关的研究报告表明^[7], H_2S 应力腐蚀开裂(SSCC)临界应力与材料显微组织有密切关系,如图7所示,马氏体对硫化氢应力腐蚀开裂和氢致开

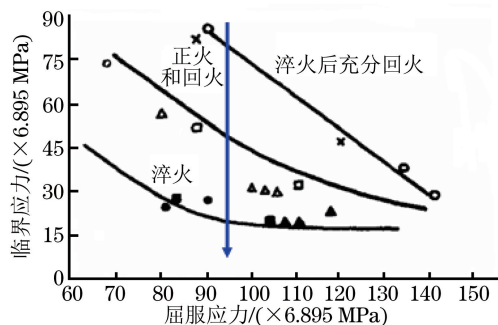


图7 SSCC 临界应力与材料显微组织的关系
Fig.7 Relationship of SSCC critical stress and microstructure of materials

裂最为敏感,远远超过正常焊缝处回火索氏体的。因此过火回造成的异常组织会对钻杆的使用性能造成严重的不良影响。

3 结论及建议

钻杆焊缝处的异常组织是由于热处理过程中出现过回火造成的。

对钻杆生产过程建议如下:①确保摩擦焊缝外飞边切除干净;②保证焊径与感应线圈的同心度;③定期对测温枪进行校准;④采用智能温度控制方式。

参考文献:

- [1] 朱世忠. 石油钻杆的摩擦焊接和焊缝热处理工艺研究[J]. 宝钢技术, 2006(1): 52-55.
- [2] 许翠华, 田东庄. 回火温度对摩擦焊焊区力学性能的影响[J]. 焊接, 2013(6): 60-63.
- [3] 杨勇平, 孙家栋. 石油钻杆焊缝热处理与摩擦焊接研究[J]. 装备制造技术, 2010(6): 13-15.
- [4] 唐孝杰, 张菁. 钢的热处理组织分析[J]. 理化检验-物理分册, 1997, 33(5): 43-46.
- [5] 刘永铨. 钢的热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 2.
- [6] 李鹤林, 李平全, 冯耀荣. 石油钻柱失效分析及预防[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 54-61.
- [7] 王建军, 杨秀娟, 闫相祯. 含裂纹注气管道的硫化氢应力腐蚀试验研究[J]. 理化检验物理分册, 2006, 42(7): 325-327, 334.
- [7] VERHOEVEN J D. The role of the divorced eutectoid transformation in the spheroidization of 52100 steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2000, 31(10): 2431-2438.
- [8] 潘淑红, 钟传珍, 刘志勇. GCr15 轴承钢的球化退火组织鉴别[J]. 理化检验-物理分册, 1997, 33(10): 17-19, 20.
- [9] 徐炜新, 谢崇津, 杨伟宁, 等. 测定显微组织中第二相颗粒分布均匀性的定量金相法的介绍[J]. 理化检验-物理分册, 2009, 45(8): 491-494.
- [10] BLIXIA G E. 体视学和定量金相学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [11] 胡光立, 谢希文. 钢的热处理: 原理和工艺[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 67-68.

(上接第 705 页)

- [2] 冯虎田. 滚动功能部件行业发展症结及突破对策[J]. 金属加工: 冷加工, 2013(5): 4-9.
- [3] 崔崑. 钢的成分、组织与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 877-879.
- [4] 马宝国, 杨洪波, 朱伏先, 等. GCr15 轴承钢中渗碳体的奥氏体化行为研究[J]. 热加工工艺, 2009(20): 5-7.
- [5] ROGAL L, DUTKIEWICZ J. Effect of annealing on microstructure, phase composition and mechanical properties of thixo-cast 100Cr6 steel [J]. Materials Characterization, 2012, 68: 123-130.
- [6] 孙明义, 杜振民, 郑秀仿, 等. GCr15 轴承钢球化退火工艺[J]. 金属制品, 2013, 39(4): 22-27.