

# 感应淬火工艺参数对 GCr15 钢淬硬层的影响

刘江, 陈锋, 余新泉

(东南大学材料科学与工程学院, 江苏省金属材料先进技术研究重点实验室, 南京 211189)

**摘要:** 针对轧辊表面淬硬层深度大、表层具有细小马氏体组织的要求, 采用数控淬火机床、显微镜、硬度仪等研究了感应淬火工艺参数对 GCr15 钢表面淬硬层的影响。结果表明: 对淬硬层组织和性能影响较大的是加热功速比, 而冷却水流量的影响不大; 随着加热功速比的增大, 淬硬层深度增加, 但奥氏体晶粒和马氏体尺寸随之增大; 试样截面的硬度曲线总体呈梯度下降分布, 在离表面 3 mm 处存在一个峰值; 预热功速比也是调整淬硬层深度的一个参考因素, 增大预热功速比, 淬硬层深度也会相应增大。

**关键词:** GCr15 钢; 感应淬火; 功速比; 淬硬层

中图分类号: TG162.75 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2010)03-0019-04

## Effect of Induction Hardening Parameters on Hardened Layer of GCr15 Steel

LIU Jiang, CHEN Feng, YU Xin-quan

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu Key Laboratory for Advanced Metallic Materials, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirement that the roller should have great hardening layer depth and fine martensite microstructure on the surface, the effect of induction hardening parameters on the microstructure and properties of GCr15 steel after surface induction hardening was investigated by using NC quenching machine, optical microscopy and hardness tester. The results show that the ratio of output power to inductor speed had a great effect on the microstructure and properties of the steel, and the effect of the cooling water flow was weak. With the increase of the ratio of output power to inductor speed, the hardening layer depth increased, the austenite and martensite grains size increased. The hardness curve decreased along the depth direction and had a peak at 3 mm away from the surface. The ratio of preheating power to inductor speed was also a factor for adjusting the depth of hardened layer which increased with the increase of the ratio.

**Key words:** GCr15 steel; induction hardening; ratio of output power to inductor speed; hardened layer

## 0 引 言

轧辊是钢铁企业进行轧制生产的重要部件, 直接关系到轧制生产的效率、产品质量及生产成本, 如何提高轧辊的质量和使用寿命, 一直是轧辊制造业面临的重要课题<sup>[1]</sup>。轧辊在工作过程中尤其在冷轧时要承受很大的应力, 并受到强烈冲击, 工作面易磨损使精度降低, 或形成裂纹和剥落而报废。因此要求轧辊的淬硬层深和具有细小的表层马氏体组织, 以具有高的耐磨性、良好的接触疲劳强度和抗冲击

强度, 使轧辊整体保持高的强韧性配合<sup>[2-3]</sup>。

国内外冷轧辊一般使用的材料有 60CrMoV、80CrNi3W、86CrMoV7、Mo3A 和 GCr15 等高铬钼含量的钢以及高速钢<sup>[4]</sup>。为满足轧辊的特殊使用要求, 常采用表面感应淬火工艺对轧辊进行热处理。目前对高速钢轧辊热处理的研究较多<sup>[5]</sup>, 而对 GCr15 钢轧辊热处理的研究较少, 且对后者的研究主要集中在直径小于 100 mm 的轧辊<sup>[6]</sup>。在感应加热淬火过程中改变工艺参数, 如功率、感应器移动速度和淬火冷却速率等均可以改变淬硬层的组织及其硬度分布<sup>[7]</sup>。为满足 GCr15 钢轧辊对大淬硬层深度和细小表层组织的要求, 作者对直径达 120 mm 的 GCr15 钢棒材进行了表面感应淬火处理, 对影响淬硬层组织和深度的因素进行了研究。

收稿日期: 2009-03-10; 修订日期: 2010-01-14

作者简介: 刘江(1986-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生。

导师: 陈锋教授

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为  $\phi 120$  mm 的 GCr15 钢,出厂时已经过球化退火处理,具有球状珠光体组织。其化学成分经 X 射线荧光仪检测结果(质量分数/%)为 0.99C,1.64Cr,0.18Si,0.29Mn;符合 GB/T 18254-2002 的要求。棒状 GCr15 钢经机加工成 5 根  $\phi 118$  mm $\times$ 500 mm 试样,采用数控淬火机床对试样进行不同参数的感应淬火试验。

用预热-加热双频感应器(间距为 300 mm)对试样表面加热,预热频率为 1 800 Hz,功率为 170 kW;加热频率为 1 650 Hz,功率设为 140 和 160 kW。双频感应器同步移动,速度可调。采用 5% 的聚乙烯醇合成淬火剂进行淬火,通过距加热感应器 45 mm 的喷水圈对试样进行连续冷却。感应淬火工艺参数如表 1 所示。

表 1 感应淬火工艺

Tab. 1 Procedures of the induction hardening process

试样	加热功率 /kW	移动速度 / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	加热功速比 / $(\text{kW} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$	冷却水流量 / $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
1	160	2.6	61.54	7
2	140	2.6	53.85	7
3	140	2.6	53.85	38
4	160	3.0	53.33	38
5	140	3.0	46.67	38

试样在感应淬火后立即进行  $165\text{ }^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$  的低温回火。在试样中段(220~280 mm 处)横切取样,经镶嵌、水磨抛光后用 FM-700 型全自动显微硬度计在横截面上沿深度方向进行硬度测试,载荷为 4.9 N。依据 GB/T 5617-2005,将淬硬层深度定义为表面至硬度达 560 HV 点间的距离。试样经 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后用 Olympus BHM 型光学显微镜观察显微组织。用 FM-700 全自动显微硬度计(压入载荷 0.098 N,测试显微组织压痕不能过大)进行不同微区组织显微硬度测试;淬硬层马氏体组织由细小到粗大按 1~10 级进行评定<sup>[8]</sup>;表层原奥氏体晶粒度依据 GB/T 6394-2002 进行评定。

此外,将球化退火的 GCr15 钢加工成 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 15 mm 试样进行常规淬火试验,分别在 800,840,880,920 和 960  $^{\circ}\text{C}$  的奥氏体化温度下保温 20 min,水淬;再经  $165\text{ }^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$  的低温回火后进行显微组织观察和硬度测试,并与感应淬火的结果进行对比。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 功速比对淬硬层组织与深度的影响

在感应淬火时,将淬火的功率与感应器移动速度的比值定义为功速比<sup>[9]</sup>,在本试验中特指为加热功率与感应器移动速度的比值。功速比对淬硬层组织和性能的影响综合了加热功率与感应器移动速度这两个因素的影响,因此在对多个淬火工艺参数进行研究时,对功速比研究更具有实际意义。

由图 1 可见,随功速比的增大,淬硬层深度增大,感应淬火表层组织的原奥氏体晶粒度降低,而马氏体级别提高。这说明随着功速比的增大,在淬硬层深度增加的同时表层组织有逐渐粗化的趋势。因为当感应器移动速度不变而增大加热功率时,功速比会增加,这意味着试样表层的加热温度升高,珠光体在发生奥氏体转变后晶粒会进一步长大,因此淬火组织会发生粗化;同时,随着试样表层温度升高,使热量能够传递到更深层,因此淬火后淬硬层深度也增加了。当加热功率不变而感应器移动速度降低时,功速比也增大,这意味着感应器对表层加热的时间延长,组织转变为奥氏体后随着保温时间的延长奥氏体晶粒也会长大,因此增大了淬火组织粗化的趋势;同时,加热时间延长也会使热量传递更加深入,奥氏体化层深度增加从而使淬硬层深度增大。

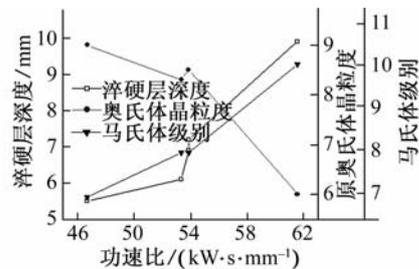


图 1 功速比与淬硬层深度和晶粒尺寸的关系

Fig. 1 The relation of the output power ratio to the inductor speed and depth of the hardened layer

此外,由试验结果可以发现,功速比与淬硬层深度之间存在着近似的线性关系。因此在一定范围内,可以从功速比上推测出在不同的加热功率和感应器移动速度组合中淬硬层的深度。以上规律可以对轧辊在表面感应淬火后淬硬层深度的估算提供理论参考,也可以应用于实际淬火工艺参数的调整。

### 2.2 冷却水流量对淬硬层深度的影响

试样 2,3 的淬火冷却水流量不同,其他工艺参数一样。由图 1 和图 2 可见,试样 2 和 3 的淬硬层深度一致,这是因为表层组织的马氏体级别和原奥

氏体晶粒度基本一致。淬火冷却水流量即淬火冷却速率大于 GCr15 钢的临界冷速时,该钢就能发生马氏体转变得到一定深度的淬硬层。以上结果表明,淬火冷速大于临界冷速后可以得到马氏体组织,但是进一步提高冷却速率,对淬硬层深度和表层组织影响不大。从生产成本上考虑,采用较小的冷却水流量即可满足要求。

### 2.3 预热功速比对淬硬层深度的影响

试验中用两个感应器对试样进行加热,试样表面经过预加热后,加热感应器随之对试样进行补充加热,以弥补试样表面温度的降低,使表层温度分布更均匀<sup>[10]</sup>。此外,预热能使加热深度加大,增加淬硬层深度;同时,在淬火之前使表层加热组织与心部未被加热组织的温差尽可能地减小,从而降低淬火组织的内应力以保持尺寸的稳定性<sup>[11]</sup>。

试样 3,4 的加热功速比基本相同,但预热功速比不同,分别为 65.4 和 56.7 kW·s·mm<sup>-1</sup>。由图 2 可见,预热功速比对试样表面硬度影响不大,两者分别为 697,693 HV,但前者淬硬层深度(6.9 mm)较后者的(6.1 mm)大。试样 3,4 的预热功速比的比值为 65.4/56.7=1.15,两者淬硬层深度的比值为 6.9/6.1=1.13,因此可初步认为预热功速比与淬硬层深度之间存在着线性关系,即调整预热功速比也能改变淬硬层深度,这就为进行下一步试验提供了参考。

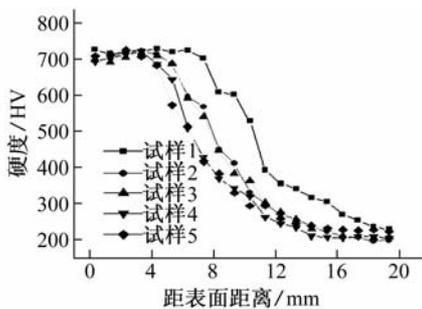


图 2 感应淬火试样硬度分布曲线

Fig. 2 The hardness distribution curves of the induction hardened samples

### 2.4 淬硬层的表层组织和硬度分布

由图 2 可见,淬火后表面至心部的硬度分布存在梯度,可以将硬度曲线分为 3 个区域,并根据文献<sup>[12]</sup>推测出与硬度分布曲线相对应加热时的温度分布,见图 3。在表面感应加热时,感应器对试样表层产生交变磁场形成涡流,使表层迅速加热。由于热传入深度有限<sup>[13]</sup>,表层热量大、温度高,越靠近心部温度越低。

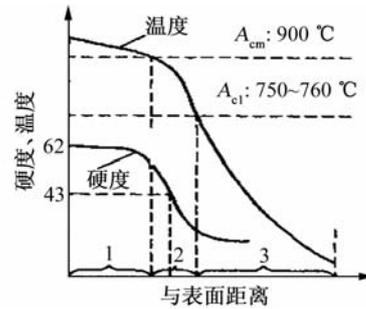


图 3 GCr15 钢加热温度与组织和硬度分布示意

Fig. 3 The hardness and microstructure changed with heating temperature of GCr15 steel

图 3 中 1 区的温度高于  $A_{cm}$  (900 °C),加热时组织为奥氏体+少量未溶碳化物,淬火冷却后形成马氏体+残余奥氏体+碳化物的组织,硬度高而变化平缓;2 区温度介于  $A_{cm}$  和  $A_{c1}$  间(750~900 °C),加热时组织为奥氏体+较多数量未溶碳化物,淬火冷却后形成马氏体+残余奥氏体+碳化物组织;2 区内随深度的增加温度逐步降低,溶入奥氏体的碳化物减少,淬火后马氏体中的碳含量降低,硬度逐步下降;3 区的温度低于  $A_{c1}$ ,在加热和冷却时组织未发生变化,仍然为球状珠光体,硬度沿深度方向基本保持不变。

试验发现感应淬火试样最表层的硬度并不是由表面向里逐渐降低,而是先升高再降低,在离表面约 3 mm 处有一个峰值。对该钢在不同奥氏体化温度下保温并进行的常规淬火、回火的试验结果见图 4。可见,随着淬火温度升高,硬度先增加,温度达到 920 °C 时硬度达到最高值,然后硬度反而降低。由于该钢淬火表层组织为马氏体+残余奥氏体+碳化物,其硬度主要由马氏体和残余奥氏体的相对含量决定<sup>[14]</sup>。感应加热时表层的温度最高,奥氏体中溶入了较多的碳化物,淬火后马氏体的碳含量增加使硬度增大;但奥氏体中碳含量的增加降低了  $M_s$  点,使淬火后的残余奥氏体含量增加,从而使钢的硬度

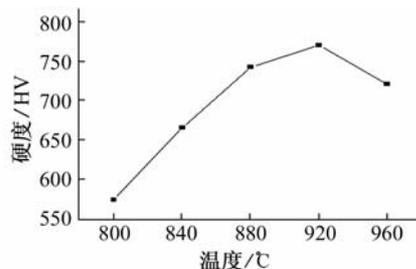


图 4 不同温度常规淬火 GCr15 钢的硬度

Fig. 4 The hardness of GCr15 steel conventionally quenched at different temperatures

有所降低。所以在离表面约 3 mm 处加热温度为 920 ℃ 左右,合适的马氏体和残余奥氏体组合使该钢获得了最高的硬度。

由图 5 可见,试样 3 的表层淬火感应组织由针状马氏体和针间白区组成。显微硬度测试发现针状马氏体硬度约为 743 HV,针间白区组织的硬度约为 580 HV,证明其为残余奥氏体。在试样最表面,加热温度最高,马氏体组织比较粗大,残余奥氏体含量较多;在离表面 3 mm 处,加热温度有所降低,马氏体组织较细小,残余奥氏体含量减少,证明了前述结论。该结果的实际指导意义在于感应淬火后工件的磨削加工深度要适当,以保持加工面具有最高的硬度和耐磨性。

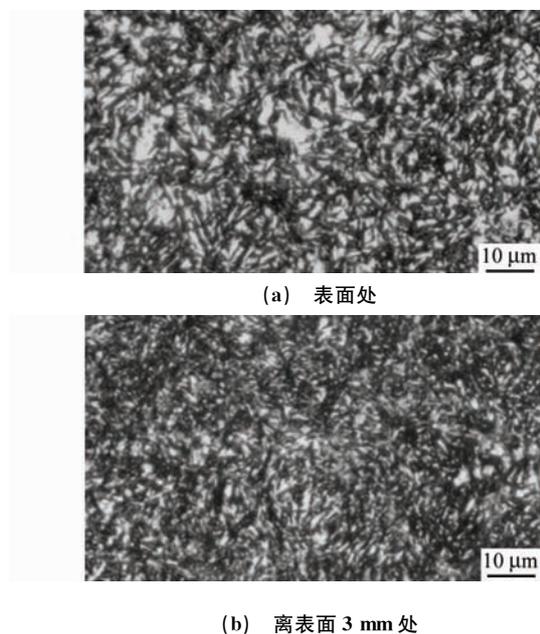


图 5 试样 3 的感应淬火显微组织

Fig. 5 The microstructure of sample 3 after induction hardening:  
(a) surface and (b) 3 mm away from surface

### 3 结论

(1) GCr15 钢表面感应淬硬层的组织和深度主

要受加热功速比的影响,随着加热功速比增大,淬硬层深度增加,但奥氏体晶粒和马氏体尺寸随之增大。

(2) 冷却水流量对淬硬层深度和表层组织的影响不大。

(3) 预热功速比也是影响淬硬层深度的一个因素,提高预热功速比可提高淬硬层的深度。

(4) 感应淬火试样截面硬度曲线呈梯度分布,在距表面约 3 mm 处出现一个峰值,这是因为最表面处加热温度高,淬火后残余奥氏体数量增多所致。

#### 参考文献:

- [1] 王天义,曹建芳,饶建华. 轧辊材料及其热处理工艺发展的现状与趋势[J]. 南方金属,2005(1):4-7.
- [2] 申飞平. 高性能冷轧辊的研究与选用[J]. 四川冶金,2002(3):20-31.
- [3] 吕纪武,李宝伟,杨成召. ZG70Mn2Mo 铸钢轧辊的热处理[J]. 热处理,2003(10):45-47.
- [4] 师江伟,杨涤心,倪锋. 高速钢复合轧辊研究的进展[J]. 铸造设备研究,2005(1):28-31.
- [5] 刘德富,尹钟大. 高速钢及半高速钢轧辊[J]. 钢铁,2004,39(4):69-72.
- [6] 张书阵. 大型 GCr15 钢轧辊热处理工艺的探讨[J]. 热处理,1993(4):19-20.
- [7] 杨飒,张军,才剑男. 半轴感应淬火的工艺研究[J]. 金属热处理,1999(9):30-32.
- [8] 上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1987:358-360.
- [9] 鄢波,程先华. 汽车减振器连杆高频感应淬火工艺应用研究[J]. 中国表面工程,2002(2):43-46.
- [10] 陈彬,沈伟芳. 锻钢冷轧辊双频感应淬火工艺[J]. 金属热处理,2007(6):105-107.
- [11] ROYF K,谢燮揆. 用预热解决感应淬火工件的尺寸稳定性问题[J]. 热处理,1993(3):2-5.
- [12] 姜江,彭其风. 表面淬火技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:73-81.
- [13] 林信智. 淬火感应器的选用、设计与制造[M]. 北京:机械工业出版社,1991:1-18.
- [14] 陆兴. 热处理工程基础[M]. 北京:机械工业出版社,2007:85-92.

**本刊启事** 热烈庆祝我刊再次入编《中文核心期刊要目总览》2008 年版(即第五版),成为金属学与金属工艺类的中文核心期刊。我刊已连续第五次入编,这是广大作者、读者与本刊编委及编辑部成员共同努力的成果,在此对所有支持本刊的朋友深表感谢! 欢迎您在本刊投稿,投稿网站为“材料与测试网(<http://www.mat-test.com>)”,请在网站首页的“在线投/审稿”进入,注册成功后就可以进行投稿,您可以方便地在网上查询稿件的处理进度与状态。具体使用方法可以查阅投稿页面上的“使用指南”。欢迎您订阅本刊,联系电话:021-65556775-311。欢迎您在本刊刊登广告和信息,联系电话:021-65556775-324。