

等温淬火球墨铸铁表面热处理工艺的研究

刘海明, 祖方道, 余瑾, 赵飞, 孟庆一, 孙其强, 王强

(合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 具有多方面优越的性能特点, 然而, 单纯的等温淬火难以同时具有高强度、高硬度及高的韧性及塑性。为了进一步扩大 ADI 的应用范围, 采用不同的表面高频淬火工艺考察了 ADI 表面热处理的可行性, 并着重探讨了不同表面处理工艺对 ADI 表层组织及硬度的影响规律。研究表明, 对 ADI 采用二步法表面热处理可以得到理想的效果。

关键词: 等温淬火球墨铸铁; 表面热处理; 表层组织; 表面硬度

中图分类号: TG164.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2006) 02-0128-04

The Investigation on Surface Heat Treatment Process of ADI

LIU Hai-ming, ZU Fang-qiu, YU Jin, ZHAO Fei, MENG Qing-yi, SUN Qi-qiang, WANG Qiang
(College of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: Austempered ductile iron (ADI) has many exceptional properties. However, by single austempering process, it is hard to acquire the property that combines high hardness, high strength with high toughness and high plasticity. In order to enlarge the applied range of ADI, we explored the feasibility of surface heat treatment by two different processes of high-frequency quenching for ADI. Especially, we discussed the effects of different surface heat treatments on the surface microstructure and hardness of ADI. It shows that the property is considerably improved by two-step high-frequency quenching process.

Key words: ADI; surface heat treatment; microstructure of surface; surface hardness

等温淬火球墨铸铁 (ADI) 是近年来国内外一直关注和不断深入研究的一种应用面很广的新型材料^[1]。其具有优异的力学性能, 如高的韧性、拉伸强度、硬度、断裂韧性、疲劳强度等, 优于钢的耐磨性和减震降噪性能^[2-5]。随着现代工业竞争的不断激烈, 高性能低成本的材料正是所追求的目标, ADI 可以很好地满足要求, 并且在许多领域中得到应用。比如, 以 ADI 代替锻钢及铸钢生产汽车零部件, 可减重 10%~30%, 降低相对成本 15%~30%, 从源头上大幅度降低汽车噪音, 并可以降低能耗、减轻废气排放、提高驱动比。

然而, 球墨铸铁单纯采用等温淬火工艺难以同时获得高强度、高硬度及高的韧性与塑性。对于希望高强度、高韧性并兼具高的耐磨性的应用场合就不能满足要求, 比如汽车变速箱中硬质齿轮、二轴凸元, 要求表面硬度达 HRC55 以上, 同时基体也要求很高的韧性和强度。如果在高韧性及塑性 ADI 的基础上, 采用适当的后续表面热处理工艺, 在保持内部基体强度、塑性及韧性不变的同时大幅提高表面硬度, 则无疑能够进一步扩大 ADI 的应用范围, 充分发挥 ADI 降噪音、降重量、低成本的巨大优势。

由于 ADI 的基体组织为奥-铁体, 与传统球铁的基体截然不同, 其表面热处理过程的组织转变规律及相应工艺与传统球铁相比也必然有所不同。本文采用不同的表面高频淬火工艺探索了 ADI 表面热处理的可行性, 对所可能产生的缺陷进行了研究分析, 并着重探讨不同表面处理工艺对 ADI 组织及硬度的影响规律。研究表明, 对 ADI 采用二步法表面热处理可以得到理想的效果。

1 试验内容与方法

试验材料为本溪生铁、纯铜、纯镍、钼铁, 材质成分 (质量分数, %): 3.5~3.7 C、2.0~2.7 Si、<0.3 Mn、0.15~0.3 Mo、0.5~1.0 Cu、1.3~1.6 Ni; 在此范围内通过成分优化^[6]取定值 (3.6%C, 2.5%Si, 0.2%Mn, 0.2%Mo, 0.8%Cu, 1.5 Ni)。采用感应电炉熔炼, 球化剂为稀土镁硅合金 (3%RE-10%Mg-44%Si), 球化处理采用冲入法, 孕育剂采用 75SiFe, 进行浇包瞬时孕育。采用砂型铸造获得试样。铸态微观结构如图 1 所示。

试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm, 奥氏体化在电阻炉中进行, 奥氏体化温度为 900 °C, 保温时间为 1 h。

收稿日期: 2005-09-01 收到初稿, 2005-10-07 收到修订稿。

作者简介: 刘海明 (1980-), 男, 河北省献县人, 研究生, 研究方向为新材料及材料加工工艺;

通讯作者: 祖方道教授, E-mail: fangqiu@hotmai.com

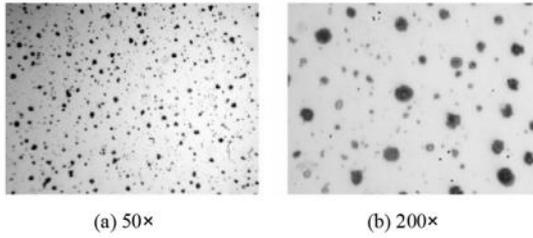


图1 球铁铸态组织 (酒精腐蚀)

Fig.1 Microstructure of the ductile iron in as-cast state

等温淬火在盐浴炉内进行, 等温淬火温度分别为340℃、355℃、370℃, 保温时间分别为60、90、120、150、180、210 min等, 淬火介质为50%NaNO₃+50%KNO₃混合盐。

经过等温淬火热处理后再对试样进行高频感应淬火, 对其进行表面强化。高频淬火在高频感应设备中

进行, 加热至860℃, 分别采用两种不同的高频淬火工艺: 一种是一次高频淬火工艺, 通过快速加热奥氏体化同时进行水淬; 第二种为二步高频淬火工艺, 先快速加热后空冷得到珠光体组织, 然后再进行快速加热奥氏体化, 同时进行水淬。在相同的热处理工艺条件下, 所得试验数据取三个试样的平均值。

2 试验结果与分析

2.1 等温淬火后的组织、硬度变化

图2是在340℃等温淬火转变过程中的组织。图中黑色球状为石墨, 黑色针状组织为铁素体, 白色为残余奥氏体。从图中可以看到在保温时间很短时, 组织中奥氏体含量比较少, 随着时间的延长残余奥氏体的含量逐渐增大, 到达120 min时达到最多, 在保温到210 min时残余奥氏体含量有所降低。

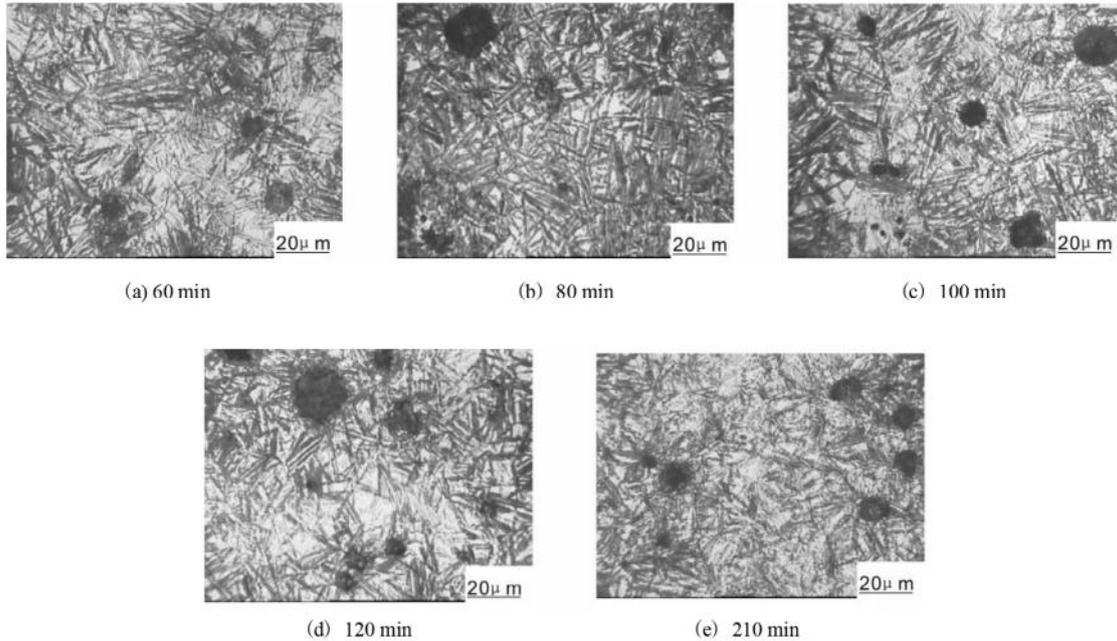


图2 340℃下金相组织

Fig.2 Microstructure after austempering at 340℃

图3的奥氏体等温转变过程表示了图2的组织变化规律, 其横坐标为等温淬火保温时间, 纵坐标为相组成, 图中A为奥氏体, F为铁素体, M为马氏体, e为碳化物。可以看出在等温淬火保温120 min前奥氏体转变不完全, 组织中含有奥氏体、铁素体和马氏体。随着等温淬火保温时间的延长, 组织转变继续进行, 铁素体和残余奥氏体的含量逐渐增多, 马氏体的含量降低。当残余奥氏体含量达到最大时表明等温转变第一阶段完毕, 并且在随后的保温时间内残余奥氏体含量基本不变。再继续保温则进入第二阶段如图3中II所示, 残余奥氏体开始分解, 生成铁素体和碳化物, 使残余奥氏体的含量降低, 直到组织比较稳定。这样就会在转

变过程中出现材料的力学性能的变化^[3-4]。

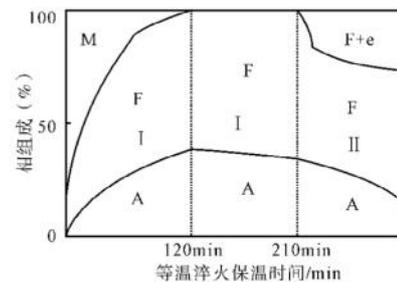


图3 奥氏体等温转变过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of phase transformation in the matrix during austempering

图4所示是等温淬火保温温度为340℃、370℃的保温时间对硬度的影响，可以看出硬度随保温时间延长而下降，然后达到最低值，此时为第一阶段转变结束。随保温时间的继续延长，硬度转而增加。这是由于残余奥氏体分解成铁素体和碳化物使得硬度提高。等温淬火温度340℃时最低硬度为40.4HRC、370℃时的最低硬度为34.3HRC，随等淬温度降低硬度提高。

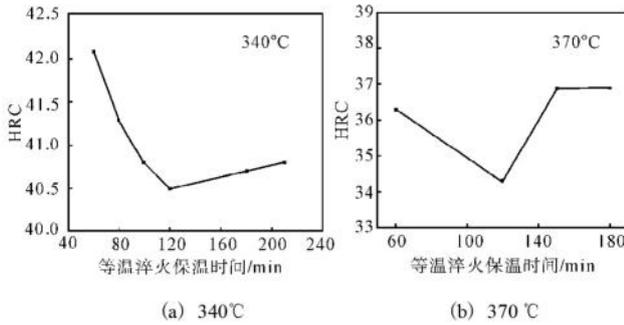


图4 等温热处理后的硬度

Fig.4 The hardness of ADI austempered at different austempering temperature

2.2 一次高频加热淬火工艺

仅仅依靠等温淬火热处理，ADI的硬度可以达到很高，如图4所示在340℃时的硬度可以达到40HRC以上，并且随着等温淬火温度的降低硬度可以达到更高^[4]。当ADI的硬度很高时塑性和韧性都会大大降低，将不能得到高强度和强韧性的综合性能。若对ADI工件进行表面强化热处理（如采用高频感应淬火，即对试样快速感应加热同时进行水冷），使其表面形成一层马氏体组织，在不影响内部韧性的情况下大大提高表面硬度，那么就可以在一些高冲击、高硬度、高耐磨性的工况条件下得到推广应用。

图5是等温淬火和等淬后又经一次高频感应淬火后的硬度对比，可以看出在经过高频感应淬火后硬度显著提高，达到55HRC以上。340℃、370℃等淬加一次高频淬火所得到的硬度变化趋势和只经等淬的硬度变化趋势相同，转折点基本相同。说明原始组织对一次高频淬火有很大影响。由于在等温淬火后基体的组织、晶粒大小有所差异，所以在经过一次高频淬火后所得到的组织不同，硬度也不同。

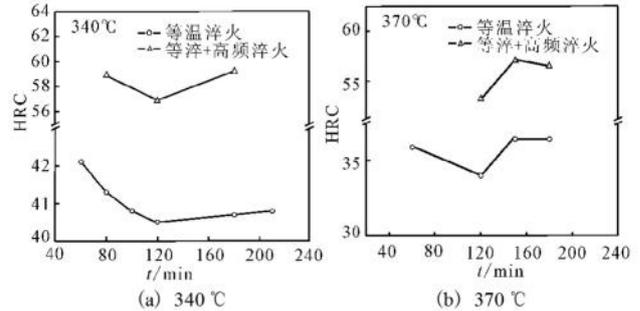


图5 等温热处理与一次高频淬火后硬度的对比

Fig.5 The comparison of hardness by different austempering and single high-frequency quenching processes at different austempering temperature

图6是370℃等淬加一次高频淬火的金相组织，图6a是试样表面区组织，由较细小的马氏体和球状石墨组成；图6b是中间过渡区组织，由石墨、针状马氏体和片状混合组成；图6c是中心区组织。因此形成了表面区硬度高中心区韧性好的特点，具有良好的综合性能。

但是ADI基体的铁素体含量很高，在一次高频淬火的瞬时加热过程中，部分基体增碳来不及进行，因而在快冷后得不到均匀的淬火组织，容易在局部出现软点，为了克服这一弊端，可采用二步高频淬火工艺。

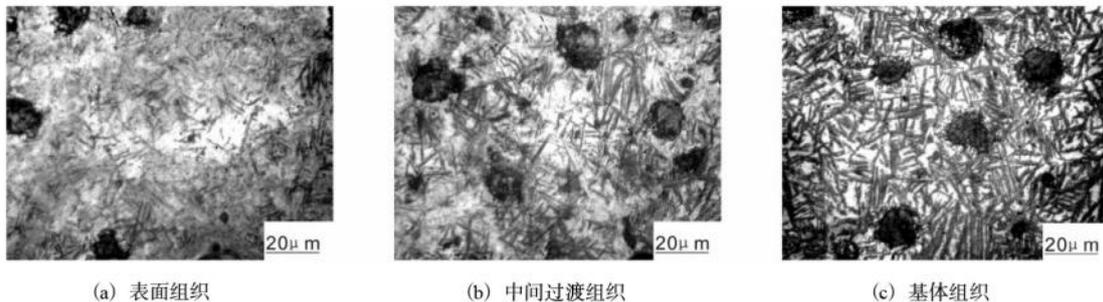


图6 一次高频感应淬火工艺的金相组织

Fig.6 Microstructure of ADI quenched by single high-frequency quenching process

2.3 二步高频感应加热淬火工艺

二步法高频感应淬火工艺是在感应加热后先空冷至室温，使表面硬化层生成珠光体组织，然后再一次快速加热至奥氏体化温度，这样就可以在此次感应加热过程中容易实现快速奥氏体化和增碳，同时快速水冷。经过这种工艺处理后的ADI就可以获得比较好的微观组织和力学性能。

图7为等淬后分别经过一次和二次高频淬火后的硬度对比，两种工艺达到的表面硬度56~63HRC。结果显示不同等淬温度下的试样经二步高频淬火后，表面硬度可提高20~25HRC，均比一次高频淬火高，这是由于经过了一次空冷的正火，组织得到细化。并且在第二步的快速感应加热中组织中的奥氏体较易增碳，含碳量较高的奥氏体水冷后马氏体组织细化、均匀，见图8。

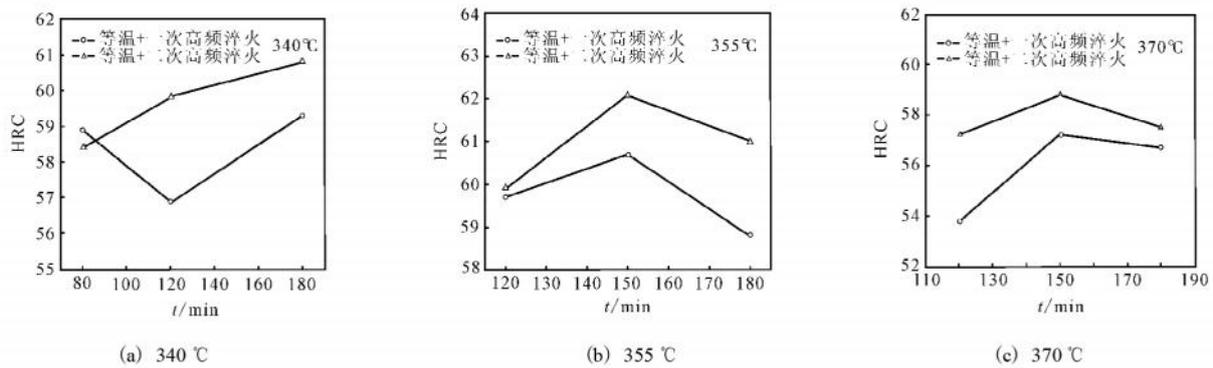
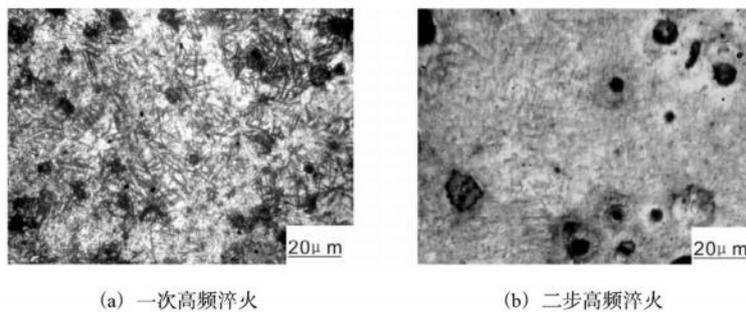


图7 两种高频感应淬火工艺后的硬度比较

Fig.7 Comparison of two high-frequency quenching processes after different austempering temperature on hardness



(a) 一次高频淬火

(b) 二步高频淬火

图8 两种高频淬火工艺的微观组织比较

Fig.8 Microstructure of ADI after high-frequency quenching processes

虽然经两种工艺处理后的硬度相差不大,但两种感应淬火工艺下所得到的金相组织明显不同,如图8所示。在二步高频淬火工艺下,由于进行了反复两次高频感应加热后淬火,所得到的淬硬层较厚,硬度较高,表面组织细小致密。

试验表明,在两种高频淬火工艺所采用的加热温度860~880℃之间,均没有产生淬裂、过烧等缺陷。从金相组织和硬度说明二步高频淬火工艺可以获得ADI表面强化的预期效果,优于一次感应淬火。

3 结论

(1) 在不同等温淬火温度下,通过将等温时间增加至某一温度时,硬度会降低到最低点,而后随着时间的延长有碳化物析出而有所上升。相比高温而言在低温下的等温淬火组织较细,可获得较高的硬度。

(2) 表面高频淬火对表层以下本体的基体组织不产生改变,却显著提高表面硬度,可以达到55~60 HRC。原有等温处理工艺得到的ADI原始组织对表面高频淬火效果有一定影响。

(3) 二步法表面高频淬火热处理工艺容易实现在短时间内奥氏体化及碳的均匀扩散,可以有效地获得高的表面硬度和细化及均匀的淬火组织。相比于单次高频淬火工艺,二步法表面热处理工艺可以得到较厚

的淬硬层,获得更高的硬度(最高达到62.1HRC),有利于获得高耐磨性。表面高频淬火没有产生淬裂及其他缺陷,表明对ADI采取表面热处理是可行的。

参考文献:

- [1] 范志康, Harding R A. 发达国家奥贝球铁的研究与进展[J]. 铸造技术, 1994 (3): 37-42
- [2] 刘金城, 孙国雄. 国外ADI的最新进展[J]. 现代铸铁, 2003 (3): 1-5
- [3] Lin C K, Hung T P. Influence of microstructure on the fatigue properties of austempered ductile irons-low-cycle fatigue [J]. Int. J. Fatigue, 1996, 18 (5): 309-320,
- [4] Liu Jincheng, Sun Guoxiong. Impact toughness and fracture toughness of austempered ductile iron [J]. CHINA FOUNDRY. 2004, 1 (2): 79-88
- [5] Susil K Putatunda. Development of austempered ductile cast iron with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A315: 70-80
- [6] 祖方通. 金属型ADI的组织形成特点[J]. 铸造, 1998 (10): 21-25
- [7] Sohi M H, et al. The role of austempering parameters on the structure and mechanical properties of heavy section ADI [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 203-208

(编辑: 张允华, zyh@foundryworld.com)

(选自《铸造》2006年第2期)