

复合淬火高性能 ADI 曲轴的研制

蓝敏俐¹, 杨开怀¹, 魏喆良²

(1. 福建船政交通职业学院 机械工程系, 福建 福州 350007; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 通过球铁曲轴的等温淬火和表面超音频淬火复合处理的工艺研究,把等温淬火和超音频淬火两种热处理技术有机地结合在一起,应用于球铁曲轴上,获得了曲轴心部为上贝氏体、残余奥氏体和微量的下贝氏体,保证了心部的高强韧性;表面淬硬层为高密度位错马氏体的综合组织,提高了表层的高耐磨性。其抗拉强度达 1 200 MPa 以上、延长率达到 4%~6%、表面硬度达 50~58 HRC。因此具有优良的力学性能,完全可以取代钢件曲轴应用于中、高端内燃机曲轴。

关键词: 等温淬火球铁(ADI); 表面超音频淬火; 曲轴

中图分类号: TG255.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)04-0346-05

Development of high performance ADI crankshaft with composite quenching

Lan Minli¹, Yang Kaihuai¹, Wei Zheliang²

(1. Mechanical Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Two kinds of heat treatment technology, austempered and surface ultrasonic quenching were applied to develop ductile iron crankshaft. The upper bainite, retained austenite and lower bainite were obtained to ensure the high strength and toughness of the core. The tensile strength of the crankshaft reaches 1200 MPa, the elongation rate reaches 4~6%, while the surface hardness reaches 50~58 HRC. The results indicate that the ductile iron crankshaft has favourable mechanical property and can replace the steel parts of the crankshaft in the middle and high end of the internal combustion engine crankshaft.

Keywords: austempered ductile iron(ADI); surface super audio quenching; crankshaft

球墨铸铁经等温淬火处理后力学性能大大提高,使材料具有强度高、韧性好、抗磨损、耐低温、降噪、吸震性能好,弯曲疲劳和接触疲劳强度高,优良的综合性能,且生产成本低,经济效益好,已经成为机械行业的热点材料之一。该材料的基体组织以上贝氏体或下贝氏体为主,残余奥氏体为辅,以此来获得前述的优良性能。而这种材料的特殊基体组织主要是通过等温淬火处理来获得的,简称 ADI,也称之为“奥贝球铁”^[1]。

曲轴是发动机上的一个重要零件,服役条件

十分复杂且苛刻,当发动机工作时,气缸中的燃气将产生 500~1 300 MPa 的爆发压力,且该爆发力反复冲击曲轴的频率达到 200~300 次/s,使曲轴受到旋转质量的离心力、往复惯性力和周期变化的气体惯性力的共同作用,使曲轴承受弯曲扭转载荷的作用。曲轴的主要破坏形式是弯曲和疲劳断裂。而等温淬火球铁正因为具有弯曲疲劳强度高、抗点蚀能力强、成本低、热处理变形小、加工性能好等特点而适用于曲轴。

曲轴生产中,一般对球墨铸铁单独进行一种

热处理,如只经超音频表面淬火的曲轴,疲劳强度不足将导致使用过程中的早期断裂;只经等温淬火的曲轴则耐磨性低,使用寿命短,从而缩短了整机的大修期。本试验是把等温淬火和超音频淬火两种热处理技术有机地结合在一起,应用于曲轴上,实现了曲轴等温淬火加超音频表面淬火复合处理技术,真正提高球铁的强韧性和耐磨性。

1 ADI 曲轴的生产工艺研究

1.1 产品的技术要求和生产工艺流程

作为中、高端汽车内燃机曲轴,其技术要求抗拉强度达 1 200 MPa 以上;延伸率达 4% ~ 6%;表面硬度达 50 ~ 58 HRC。实现高强度、高韧性的基体组织和高硬度、高耐磨性的表面组织的完美结合。

ADI 曲轴的生产工艺流程见图 1。

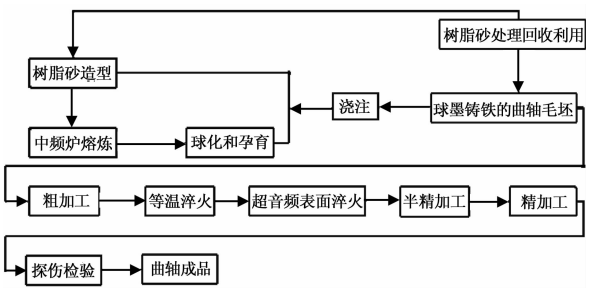


图 1 曲轴的生产工艺流程图

Fig. 1 The production process flowchart of crankshaft

1.2 高韧性 ADI 的化学成分研究

对高韧性 ADI 的化学成分要求严格,选择适当的化学成分及合金含量,可提高奥贝球铁的强韧性。经过反复试验,选定的配比见表 1。

(1) C、Si、Mn 量的确定

碳能稳定奥氏体,并使上贝氏体转变的下限

表 1 ADI 曲轴的化学成分

Tab. 1 The microstructure of cast iron before austempering

元素	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni
$\omega/\%$	3.40 ~ 3.80	2.30 ~ 2.90	≤ 0.30	≤ 0.06	≤ 0.05	0.50 ~ 0.85	0.12 ~ 0.28	0.60 ~ 0.85

温度下移,对残余奥氏体的稳定性起决定性作用。含碳量偏低,易出现碳化物,从而产生白口组织,使铸件产生缩孔、缩松等缺陷。含碳量偏高,容易出现石墨飘浮。因此,碳含量宜选择在 3.40% ~ 3.80%。硅能使过冷奥氏体充分转变,有效提高力学性能。研究表明,硅含量增加在 3.50% 的范围内,抗拉强度和冲击韧度均随之上升,当硅含量超过 3.50% 时,性能才有下降趋势,但硅在奥氏体中的扩散速度较慢,故提高硅量势必提高等温淬火温度和延长保温时间,否则硅的作用不能充分发挥^[2-3]。同时,硅过高会造成铁原子晶格的严重歪扭,致使脆性增加,因此,硅含量也不可过高,多次试验最终选择在 2.30% ~ 2.90%。锰能增加淬透性,但锰易富集于共晶团界面,会增加脆性,故锰含量以 <0.30% 为宜,但因为该球铁的石墨球数较多,可减少锰的偏析,因此锰含量可适当放宽至 0.10% ~ 0.50%。

(2) 合金元素的确定

少量的 Cu、Mo、Ni 能溶于铁素体和渗碳体中,起到固溶强化、细化晶粒、均匀断面组织的效果。加入的合金元素 Cu、Mo、Ni 在热处理时可有

效增加过冷奥氏体的稳定性,使奥氏体等温转变曲线右移,显著提高其淬透性^[4]。因此研究后选定的配比为铜含量 0.50% ~ 0.85%,钼含量为 0.12% ~ 0.28%,镍的含量为 0.60% ~ 0.85%。

1.3 高韧性 ADI 的铸造工艺研究

(1) 造型

采用粘土湿型砂造型,呋喃树脂砂制芯,湿型砂造型应确保较高的铸型紧实度,且型砂的透气性要好。设计合理的铸造工艺,在浇注系统中用过滤网撇渣,设计出气孔以利排出型腔中的气体,厚大部位用冷铁提高冷却速率,防止缩松。

(2) 熔炼

为获得稳定的高强度高韧性 ADI 铸件,要求稳定控制铁液的化学成分和出炉温度,尽量减少铁液中合金元素的烧损,减少气体及夹渣物产生。出炉温度控制在 1 470 ~ 1 490 ℃。选用低稀土镁球化剂 FeSiMg8RE3 (RE: 2% ~ 4%, Mg: 7% ~ 9%) 进行球化处理,加入量为 1.3% ~ 1.6%;孕育剂采用 FeSi75,加入量为 1.2% ~ 1.6%,采用包内和随流两次孕育。球化处理后及时扒渣,防止回硫。

1.4 热处理工艺的选择

对该曲轴的热处理采用等温淬火和表面超声淬火复合处理。

1.4.1 等温淬火工艺

曲轴等温淬火工艺为:铸造球铁毛坯—粗加工—奥氏体化加热及保温—等温淬火—清洗。

高韧性 ADI 热处理要严格选择以下参数。

(1) 较低的奥氏体化温度与适当的保温时间

选定高韧性 ADI 工件的奥氏体化工艺参数温度为 $880 \sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 $2 \sim 2.5\text{ h}$ 。这是因为在正常的热处理中石墨球形态不会改变, 但若奥氏体化温度过高或保温时间过长, 出现石墨球外表的少量石墨扩散, 甚至使富碳奥氏体析出游离碳附着在石墨球外表面, 则会使石墨球发生不规则变化, 破坏了石墨球的圆整度^[5-6]。所以奥氏体化温度以 $880 \sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜, 使基体完全转变成富碳奥氏体。

(2) 较高的等温淬火温度与适当的保温时间

选定盐浴温度为 $270 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 等温淬火时间为 $1.5 \sim 2.5\text{ h}$ 。等温温度超过 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 组织以粗大上贝氏体为主, 附加少量下贝氏体。如果等温温度过高, 使碳的扩散能力明显提高, 易形成碳化物, 减少了奥氏体量, 同时碳化物的析出会使力学性能下降, 特别是冲击韧度急剧下降。等温温度太低, 延伸率会下降。所以等温温度就选择在 $270 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 以获得较多的下贝氏体、残余奥氏体和微量的上贝氏体组织。在等温盐浴中保温 $1 \sim 2\text{ h}$, 随着针状铁素体的生成, 所排出的碳向奥氏体扩散, 从而使奥氏体的含碳量增加, 这种含碳量约为 $1.8\% \sim 2.2\%$ 的奥氏体, 在热力学和力学性能上都是稳定的, 受外力作用, 不会再转变为铁素体。如果在盐浴中保温时间超过 3 h , 高碳奥氏体将发生分解, 分解成铁素体和碳化物, 碳化物的出现会明显降低伸长率和韧性^[7], 所以为了避免碳化物的出现, 保温时间以 $1.5 \sim 2.5\text{ h}$ 为宜。

1.4.2 超声表面淬火工艺

等温淬火球铁(ADI)虽然具有优异的机械性能, 但客户所追求的目标是更高性能而低成本的材料。因此, 让曲轴在高强度韧性的基础上, 通过超声表面淬火工艺, 对高强度、韧性的 ADI 曲轴进行表面硬度强化处理。在保持基体内部强度、塑性和韧性不变的同时大幅提高表面硬度, 充分发挥 ADI 降噪音、降重量、低成本的巨大

优势^[8]。

(1) 选择淬火设备

企业利用原有的旧高频机, 成功改造了一台振荡频率 30 kHz 、输出功率 60 kW 的超声频率淬火机床。

(2) 表面超声频率淬火工艺的选择

经过反复试验, 选定的表面超声频率淬火工艺是: 超声频率淬火机床上安装感应圈和工装后安装工件, 采用 30 kHz 的频率、 60 kW 的功率, 在感应器中输入超声频率交流电, 交变磁场在工件中产生同频率的感应电流, 利用集肤效应^[9], 感应电流对工件表面进行快速加热, 而在心部感应电流很弱, 接近于 0, 在电流 $2 \sim 5\text{ A}$ 、电压 $10 \sim 15\text{ kV}$ 条件下, 加热时间 $5 \sim 10\text{ s}$, 使工件表面温度迅速升至 $900 \sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的同时进行水冷却。通过对 ADI 曲轴进行表面超声频率淬火, 能大大提高曲轴表面硬度, 增强表面的耐磨性, 而不影响芯部韧性, 强化其综合性能。

经等温淬火和表面超声频率淬火复合处理后的曲轴, 其基体组织为上贝氏体、残余奥氏体和微量的下贝氏体, 表面硬化层金相组织为高密度位错马氏体, 硬化层深 1 mm 以上。曲轴抗拉强度达 $1\,200\text{ MPa}$ 以上, 延伸率达到 $4\% \sim 6\%$, 表面硬度为 $50 \sim 58\text{ HRC}$ 。此曲轴能承受弯曲应力、扭转应力、拉伸应力、压缩应力、摩擦应力和小能量多次冲击力等复杂交变负荷作用力。适用于各种高速运转的内燃机曲轴。

2 高韧性 ADI 的显微组织与力学性能

2.1 球铁铸态组织

对铸态球铁(等温淬火前)的金相试样, 按 GB9941-88 的要求进行分析, 如图 2。分析结果为试样的球化效果良好, 从图 2(a)中可见石墨球完整, 球化级别为 $2 \sim 3$ 级, 石墨球大小为 $6 \sim 7$ 级, 球化率大于 90% , 从图 2(b)中可见基体中珠光体量约占 85% , 碳化物和磷共晶量小于 1% , 其余为铁素体。图 2(c)、(d)分别为 500 倍光学显微镜和 $10\,000$ 倍扫描电镜下的珠光体形态, 清晰可见组成珠光体的铁素体片与渗碳体片间距小, 体现该材料铸态力学性能较好, 符合球铁等温淬火的要求。

2.2 球铁等温淬火后的金相组织

等温淬火后的金相组织主要由石墨、上贝氏

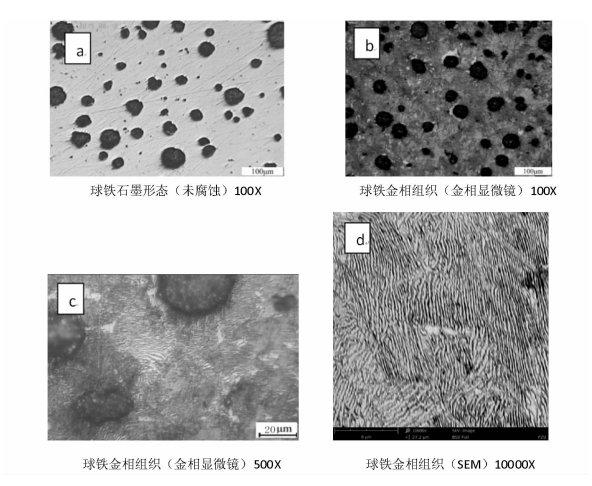


图 2 等温淬火前球铁的铸态组织

Fig. 2 The microstructure of cast iron before austempering

体、下贝氏体和残余奥氏体组成。不同等温温度不同等温时间下,金相组织各不相同。随着等温温度的升高,等温淬火球铁中的上贝氏体的量也会逐渐增加,由针状的下贝氏体逐渐过渡为羽毛状的上贝氏体^[10]。图 3(a)为 400 倍光学显微镜下等温温度为 300 ℃ 淬火球铁的金相组织,灰黑色为球状石墨,基体为细小针状下贝氏体及羽毛状的上贝氏体混合分布,白色为残余奥氏体。图 3(b)为 10 000 倍扫描电镜下的贝氏体和残余奥氏体,可见其基体以细小针状下贝氏体为主,辅以少量羽毛状的上贝氏体。

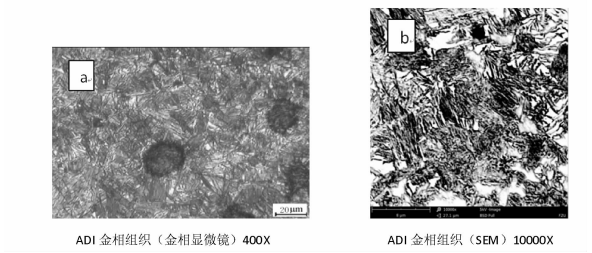


图 3 等温温度为 300 ℃ 淬火球铁的金相组织

Fig. 3 The metallurgical microstructure of quenched ductile iron at 300 ℃

2.3 表面超音频淬火后的金相组织

球墨铸铁曲轴经等温淬火和表面超音频淬火复合处理后,其心部基体组织为上贝氏体、残余奥氏体和微量的下贝氏体,表面硬化层金相组织为高密度位错马氏体的综合组织,如图 4(a)。对表面淬硬层进一步进行扫描电镜分析如图 4(b),清

晰可见 10 000 倍下高密度位错的针状马氏体,这种马氏体又称高碳马氏体,它的强度和硬度都明显高于低碳马氏体,从表 2 的实验数据表明其硬度平均值高达 55HRC。

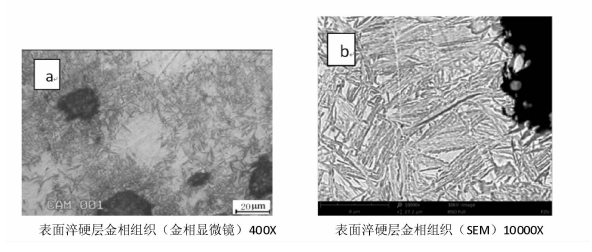


图 4 复合淬火后的表面淬硬层组织

Fig. 4 Surface hardened layer after composite quenching

2.4 高韧性 ADI 的力学性能

对经过等温淬火和表面超音频淬火复合处理后的曲轴进行力学性能实验,实验结果见表 2。

表 2 等温淬火和表面超音频淬火复合处理后的曲轴力学性能

Tab. 2 The mechanical property of crankshaft after austempered and surface ultrasonic quenching

试样编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	HRC
1	1 242	910	5.6	54
2	1 408	1 154	4.2	55
3	1 472	1 243	4.0	57
平均值	1 374	1 102	4.6	55

从表 2 中可见,曲轴经等温淬火加超音频表面淬火复合强化处理后的球墨铸铁,选 3 个试样进行实验,对结果分析如下:①高强度:抗拉强度平均值达 1 374 MPa;②塑性和韧性好:延伸率平均值达到 4.6%;③耐磨:表面硬度平均值达到 55 HRC,满足该产品的抗拉强度达 1 200 MPa 以上;延伸率达到 4% ~ 6%;表面硬度达 50 ~ 58 HRC 的要求。

表 3 为曲轴采用不同的材质及不同的热处理工艺后,其性能也各不相同。综合各工艺过程,经等温淬火加超音频表面淬火的复合淬火工艺曲轴其综合性能最优异。

表 3 曲轴采用不同的材质或不同的热处理工艺后力学性能对比

Tab. 3 Mechanical property of different materials or different heat treatment processes for crankshaf

力学性能	复合淬火 ADI 曲轴	ADI 曲轴	表面淬火 球铁曲轴	表面淬火 40 Cr 锻 钢曲轴
抗拉强度/ MPa	900 以上	900 以上	900 以下	900 以上
屈服强度/ MPa	600 以上	600 以上	600 以下	600 以下
伸长率/%	6 ~ 8	6 ~ 8	2 ~ 4	8 以上
硬度 HRC	50 ~ 58	35 ~ 45	50 ~ 58	50 ~ 60
重量	轻	轻	轻	重
切削性能	易	易	易	难
成本	低	低	低	高

参考文献:

[1] 刘光华. 等温淬火球铁(ADI)基本知识[J]. 中国铸造装备与技术,2007(6):65-68.

[2] 王彦华. 等温淬火工艺对铸件组织和性能的影响[J]. 铸造技术,2007,8(5):610-613.

[3] 付明,王彬. ADI 拨叉的壳型铸造和等温淬火工艺[J]. 现代铸铁,2014(1):29-32.

[4] 邓宏远,王春景,章舟. 等温淬火球墨铸铁的生产及应用实例[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[5] 赵月. 等温淬火工艺对 ADI 组织和性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015:3.

[6] 黄星. 等温淬火参数对 ADI 力学性能影响机理研究及预测模型建立[D]. 苏州:苏州大学,2013:4.

[7] 蒋原伟. 等温淬火球铁热处理[J]. 热处理技术与装备,2008,29(1):60-62.

[8] 张军,李志华,管胜敏,等. 高强度等温淬火球铁件的生产[J]. 球墨铸铁,2013(5):23-25.

[9] 罗大州. 凸轮轴超音频淬火工艺的改进[J]. 热处理,2012,27(4):62-64.

[10] 刘金城,时胜利. 等温淬火球铁(ADI)的微观组织与力学性能[J]. 铸造技术,2006,27(12):1282-1285.

(责任编辑:陈雯)

3 结语

球铁曲轴经等温淬火加超音频表面淬火复合强化处理后,成功获得了心部为上贝氏体、残余奥氏体和微量的下贝氏体,保证了心部的高强韧性;表面淬硬层为高密度位错马氏体的综合组织,保证了表层的高耐磨性,使曲轴性能达到:抗拉强度达 1 200 MPa 以上、延长率达到 4% ~ 6%、表面硬度 HRC50 ~ 58。

此曲轴具有优良的力学性能和使用性能,不但具有高强韧性,同时具有高耐磨性能,可以承受弯曲应力、扭转应力、拉伸应力、压缩应力、摩擦应力和小能量多次冲击力等复杂交变负荷作用力,且成本低、易加工、噪音低,完全可以取代钢件曲轴,可广泛应用于中、高端内燃机曲轴,市场前景广阔。