

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.010

湿型砂铸造高性能 TR905 球铁曲轴

丛建臣^{1,2}, 邵诗波², 于海明², 冯梅珍², 苏新同³

(1. 山东理工大学, 山东 淄博 255049; 2. 天润曲轴股份有限公司, 山东 威海 264400; 3. 山东省机械设计研究院, 山东 济南 250000)

摘要: 基于湿型砂铸造生产线, 主要以废钢为原料, 采用电炉熔化, 熔化过程中加入碳化硅基复合预处理变质剂, 稳定生产出本体抗拉强度 900 MPa, 伸长率 5% 以上的发动机球铁曲轴, 代替原锻钢曲轴, 大幅降低了生产成本。

关键词: 高性能球铁; 曲轴; 废钢; 变质剂; 正火

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)09-0927-04

Green Sand Casting High Performance TR905 Ductile Iron Crankshaft

CONG Jianchen^{1,2}, SHAO Shibo², YU Haiming², FENG Meizhen², SU Xintong³

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Tianrun Crankshaft Co., Ltd., Weihai 264400, China; 3. Shandong Institute of Mechanical Design and Research, Jinan 250000, China)

Abstract: Based on the green sand casting production line, the waste steel is used as main raw materials which was melted by electric furnace. The silicon carbide-based composite pretreatment modifier was added during the melting process. The results show that the ductile iron crankshaft of the engine with the tensile strength of 900 MPa and the elongation rate of more than 5% can be produced statically. Replace the original forged steel crankshaft, greatly reduce the production cost.

Key words: high performance ductile iron; crankshaft; scrap steel; modifier; normalizing

铸铁被誉为制造业之基石, 它广泛应用于汽车、工程机械、船舶、高铁等。球墨铸铁(以下简称球铁)是铸铁家族中性能最高的一类, 其中用于制造曲轴的高强度球铁代表了其最高性能水平。目前各发达国家的国家标准中珠光体球铁的最高牌号为 QT900-2, 其是指单铸试块的性能指标, 本体性能指标将有一定比例的降低。随着装备制造业对高性能球铁的需求, 许多铸造企业开发了一系列高性能球铁, 如菲亚特公司研制的 GH90-52-05 球铁, 玉柴研制的 QT800-6 球铁, 均代表了当今高强韧性球铁制造的先进水平^[1,2]。

当前, 高强度高韧性球铁曲轴大部分采用铁型覆砂工艺制造, 由于铸型刚度大、冷却性能好, 铸件石墨球细小、组织致密性好, 因而其力学性能很好^[3], 但铁型覆砂工艺只有在大批量生产时才具有良好的经济性。多品种小批量铸造生产一般选用湿型砂造型线。采用湿型砂铸造时, 由于铁液在砂型中冷却速度小, 使得曲轴本体获得高性能更为困难。我们基于现有的湿型砂铸造生产线, 研制了本体性能 900 MPa 以上, 伸长率 5% 以上的球铁(代号

TR905) 曲轴, 成功代替原锻钢曲轴, 降低了柴油机制造成本。

1 试验条件

造型线采用湿型砂高压造型线, 型板尺寸为 1 240 mm×890mm。采用感应电炉熔化铁液, 炉外进行一次孕育及球化处理, 球化后经过扒渣处理后导入浇注机, 然后由浇注机自动浇注, 浇注过程中采用螺旋式无级随流孕育装置进行二次孕育。浇注后的曲轴毛坯采用悬挂式正火线进行正火及回火处理。

2 试验过程与结果

2.1 原料选择与化学成分配比

生铁是铸铁的主要原料。由于生铁存在遗传性, 对球铁性能影响很大。生铁的遗传性主要表现在组织结构特征保留及微量元素遗传效应。由于废钢也是铁碳合金, 因而理论上也可作为球铁的原料。钢是铁矿石经高炉冶炼、氧化还原及一系列精炼过程得到, 其杂质少, 因而与生铁相比, 遗传性很低。然而废钢中的某些合金元素, 如 Cr、Mn 等对球铁的性能大都有负面影响, 甚至是污染元素^[4-6], 因而一般要予以控制。

为获得纯净的铁液, 提高原料中的废钢比例, 采用 50% 的废钢、30% 的高纯生铁及 20% 的回炉料为

收稿日期: 2019-07-11

作者简介: 丛建臣(1963-), 山东威海人, 教授, 研究方向: 金属材料及热处理技术研究工作. E-mail: jchcong@tianrun.com

铸造原料。由于废钢在原料中的占比较大,铁液中必须增碳增硅。常用 75 硅铁中铝含量达 1.2%~1.5%,单一增硅将把硅铁中大量的铝带入铁液,造成铁液铝污染,易形成皮下气孔和夹杂物缺陷;同时由于硅铁熔化速度快,硅浓度差消失时间短,形核率低。单一增碳,铁液中存在大量起伏不定、超过临界晶核尺寸的近程有序排列的碳原子集团,极易生成均质晶核,不利于石墨析出^[9]。

为此,在电炉内添加 SiC 基复合预处理变质剂,碳化硅在铁液中不断熔解、反应,持续生成高活性的“非平衡石墨”,使铁液中出现“碳峰”,促进石墨析出;同时向周围液相中释放大量热量,使共晶冷却曲线上移,使铁液按铁-石墨稳定系凝固。

合金元素对石墨化和促进珠光体形成具有重要作用,因此生产高性能球铁时需要加入合金化元素。其中铜元素在一次结晶时,属于中等石墨化元素,其石墨化能力相当于硅的 1/5^[7]。铜能稳定奥氏体,使共晶阶段在石墨球外的奥氏体壳免受干扰,有利于石墨球的圆整。在共析转变过程中,阻碍石墨化,使固溶在奥氏体中的碳以共析渗碳体析出,促进珠光体的形成,并能降低或消除游离碳化物。铜含量小于 0.4%时球铁强度、硬度急剧提高,铜含量超过 0.4%后,强度增加的速率下降,随含铜量的增加伸长率逐渐降低^[8],因此确定铜含量 0.3%~0.5%。铁液化学成分见表 1。

表1 铁液化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of melting iron

C	Si	Mn	P
3.70~4.00	1.60~2.20	0.30~0.50	<0.04
S	Cr	Cu	Mg
<0.02	0.02~0.05	0.30~0.50	0.02~0.08

由于原料中增加了废钢的比例,与主要以生铁为原料熔制的普通球铁相比 Ti、Al、S、P 等有害元素减少(表 2),使得不经热处理的铸态球铁各项技术指标得以提高(表 3)。

表 2 控制元素及有害元素含量对比表 w(%)
Tab.2 Control element and harmful element content comparison table

类别	Ti	Al	S	P
普通球铁	≤0.10	≤0.03	≤0.03	≤0.06
本试验球铁	<0.01	<0.005	<0.015	<0.03

与普通球铁对比,本试验球铁的石墨球大小更集中,统计数据见表 4。

2.2 工装设计

该曲轴长度 1 120 mm,重 109 kg,现有型板尺

表 3 铸态 QT700-2 球铁机械性能对比表
Tab.3 Cast QT700-2 ductile iron mechanical performance comparison table

类别	抗拉强度 /MPa	伸长率(%)
普通球铁	723.0	3.16
本试验球铁	798.8	4.38

表 4 石墨球尺寸与数量对比表
Tab.4 Dimension and quantity of graphite

石墨球直径 /μm	普通球铁石墨球		本试验球铁石墨球	
	数量	比例(%)	数量	比例(%)
<20	61	19.5	31	9.5
20~40	173	55.3	228	70.2
40~70	64	20.4	56	17.2
>70	15	4.8	10	3.1

寸为 1 240 mm×890 mm,使得曲轴模样和浇冒系统排布非常紧凑。按图 1 所示,采用一个高发热保温冒口补缩 2 支曲轴,其作用是:在浇注过程中发热剂被高温铁液迅速点燃放出大量的热量,使冒口套内铁液温度升高、保温时间延长,提高冒口的补缩效率。为保证补缩效果,在冒口颈部位也同时采用保温冒口颈套形式,以保证冒口颈较长时间的补缩效果,图 2。铸件经过解剖未发现缩松缺陷,为类似曲轴工艺提供了非常好的应用实例。



图 1 工装设计图
Fig.1 Tooling design

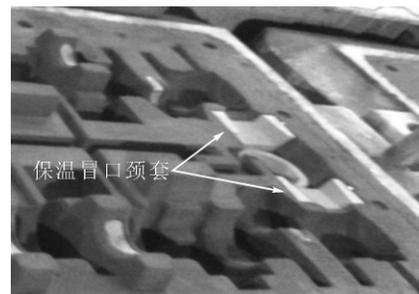


图 2 上箱放置保温冒口颈套
Fig.2 Heat preservation neck cover in the upper box

2.3 热处理

当球铁的抗拉强度要求超过 800 MPa 时,一般需要对铸件进行正火处理以获得珠光体及少量铁素体的组织。研究表明,细小的晶粒可增加材料的综合力学性能。另外在珠光体球铁中,铁素体为破碎状时

无论是高能量还是低能量多次冲击性能都优于铁素体为牛眼状时的性能^[10]。

为了获得细小的珠光体和少量的破碎状铁素体,曲轴铸件采用两阶段正火处理。将铸件加热到 Accm 以上 30~50℃保温,使石墨表面的碳逐渐溶入奥氏体中提高含碳量,然后在 Accm 以下 20℃-40℃等温处理,使组织处于奥氏体、铁素体、石墨的三相平衡区,奥氏体中的碳及其它元素得到均匀化,避免了石墨球周围存在贫碳区,阻碍了牛眼状铁素体的形成,促进了铁素体以游离态析出,铁素体含量 5%~10%。

利用扫描电镜分别分析了仅进行一阶段正火处理的 QT900-2 球铁和本实验的两阶段正火处理的 TR905 球铁的珠光体形态,结果表明两者珠光体片间距相当,但经两阶段正火的球铁的珠光体条纹方向具有不一致性,表明其晶粒细小,有利于力学性能的提高,见图 3。

2.4 力学性能试验

拉伸和冲击试样在曲轴铸件本体上制取。通过对不同试验批数百支曲轴的检验,曲轴本体抗拉强度可稳定达到 900 MPa 以上,伸长率 5%以上,室温冲击功达到 50 J 以上,检测数据均值见表 5。

表5 材料机械性能检验结果

Tab.5 Mechanical Properties of cast iron

检验项目	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	硬度 (HBW)	冲击功 /J
均值	940	6.2	282	67

表 6 中列出了开发的 TR905 与菲亚特 GH90-52-05、玉柴 QT800-6 球铁的性能指标对比。

表6 几种高性能球铁曲轴本体性能指标对比

Tab.6 Comparison of performance indexes of several high performance ductile iron crankshafts

铸造厂	菲亚特	玉柴	天润
牌号	GH90-52-05	QT800-6	TR905
铸造方式	湿型砂	铁型覆砂	湿型砂
Rm/MPa	≥800	≥800	≥900
A(%)	≥4	≥6	≥5

2.5 疲劳试验

按照 GB/T4337-1984《金属旋转弯曲疲劳试验方法》,对 TR905 球铁进行疲劳试验,其弯曲疲劳极限 374 MPa,与曲轴常用材料的疲劳极限对比列于表 7 中。

表7 TR905与常用材料疲劳极限对比表 循环基数 1×10^7

Tab.7 Comparison of fatigue limits

材料牌号	45 钢	QT900-2	SAE1548	TR905
热处理	正火	正火	控冷	正火
疲劳极限 /MPa	249	290	320	374

按照 QC/T637《曲轴弯曲疲劳试验方法》,在谐振式曲轴疲劳试验机上进行疲劳试验。分别分析了 45 碳素钢、42CrMo 合金钢和 TR905 球铁制造的同款曲轴的中值弯曲疲劳强度,结果表明 TR905 球铁曲轴疲劳强度超过氮化钢曲轴,疲劳强度数据见表 8。

表8 不同材质的同型号曲轴疲劳强度

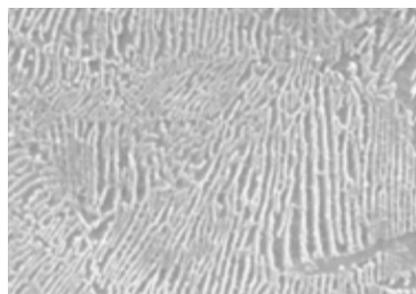
Tab.8 Fatigue strength and safe ratio

曲轴材质	45 钢	42CrMo	TR905
表面强化方式	氮化	氮化	滚压
弯曲疲劳强度 /MPa	3 900	4 930	5 500

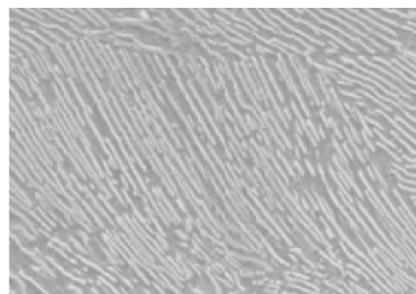
2.6 曲轴台架试验

用于试验的曲轴原设计为 45 钢和 42CrMo 两种锻钢材质,分别匹配不同功率的发动机。由于该锻钢曲轴采用气体氮化处理,45 钢材质曲轴表面硬度 $\geq 300\text{HV}_{10}$,42CrMo 材质曲轴表面硬度 $\geq 450\text{HV}_{10}$,而采用 TR905 材质制造的该款球铁曲轴轴颈表面并不进行任何硬化处理,轴颈表面微观组织为珠光体加少量铁素体,硬度 HB250-300。为验证曲轴轴颈耐磨损性能,使用同型号发动机分别装配上述 3 种材质的曲轴按照 GB/T19055《汽车发动机可靠性试验方法》,进行 1 000 h 台架试验,结果表明 3 款曲轴的轴颈磨损量相当,表 9。

与锻钢材质经氮化处理的曲轴相比,虽然球铁曲轴表面硬度低,但由于轴颈与轴瓦之间存在润滑油膜,并非干摩擦;同时由于球铁表面石墨坑可起到



(a)QT900-2×400



(b)TR905×400

图3 珠光体形态

Fig.3 SEM images of pearlite shape

表9 曲轴轴颈磨损量对比
Tab.9 Comparison of crankshaft journal wear

曲轴材质	45#	42CrMo	TR905
轴颈处理方式	气体氮化	气体氮化	未处理
磨损量/mm	0.004 49	0.004 48	0.004 44

储油作用,有利于润滑,因此3款曲轴轴颈磨损量并无明显差异。

该球铁曲轴近几年已累计装机数十万台,使用情况良好,其代替钢轴可使成本降低20%以上。

3 结语

(1)通过提高废钢在球铁原料中的比例,获得了纯净的铁液,减少了铁液中有害元素的含量,降低了生铁遗传性对性能的制约。在此基础上通过合金元素的调整及两阶段奥氏体化等温正火处理,可获得细小的珠光体和破碎状铁素体,提高材料综合力学性能及稳定性。

(2)采用高强度高韧性 TR905 球铁材料制造的曲轴弯曲疲劳强度超过了 45 钢和 42CrMo 锻钢材质气体氮化曲轴的水平,因而可以代替氮化钢轴从而降低生产成本。

(3)试验的球铁曲轴轴颈不经硬化处理后也可

保证轴颈磨损量与钢轴相当,但由于发动机设计的差异性,轴颈不硬化工艺是否适用于其它曲轴还需进行试验研究。

参考文献:

- [1] 吕莉雯. 我国部分引进车型主要零部件材料[J]. 世界汽车, 1995(2):30.
- [2] 廖记棠. 球铁 QT800-6 曲轴的生产技术[J]. 机械工人(热加工), 2002(5):62-63.
- [3] 李应明. 高强韧球铁曲轴的铁型覆砂工艺研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- [4] 边秀房, 孙保安. 铸铁遗传性和本溪人参铁研究 //2006 中国铸造活动周论文集[C]. 162-169.
- [5] 刘金海, 李国祿, 曾艺成, 等. 铁液纯净度对铸件质量的影响[J]. 现代铸铁, 2010(3):64-70.
- [6] 李传斌. 如何面对球铁中干扰元素的影响(上)[J]. 金属加工, 2009(21):57.
- [7] 朱先勇, 刘耀辉, 宋雨来, 等. Cu、Mn 元素对发动机球铁曲轴组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2006(10):51-54.
- [8] 吴英考, 胡家聪, 关洪国, 等. 锰铜和二次孕育对铸态高强度高韧性球铁的作用[J]. 铸造, 1991, 40(6):20-25.
- [9] 张文和, 丁俊, 聂富荣. 铸铁的 SiC 孕育预处理[J]. 铸造, 2009, 58(3):279-280.
- [10] 赖毅翔. 高强韧破碎铁素体球墨铸铁曲轴的研究与制备[D]. 大连:大连理工大学, 2014.

《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动,旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式,深度挖掘铸造界人文财富,倾心打造行业精深资讯,进而从独有的精神与文化之角度施力,推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于“榜样的力量是无穷的”以及“益言可以兴邦”的基本理念和初衷,《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层次无障碍交谈,从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事,在第一时间得到启迪与感悟,进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信“唯有真情可以感人”。能感动人的专访报道,必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受,高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处,无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入,是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛,激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染,使人情不自禁地用看似清淡的笔墨,仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对“说理”情有独钟。信奉“唯有讲理可以服人”。因“至”即无限趋近高端,故“至理”系高度符合科学规律的道理。“科学”乃说理的学问,科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶,科学是全人类的共同财富,科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年,读者不难发现,所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是,以优秀传统文化底蕴为基石,以高尚道德操守与精神境界为标杆,倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格,倾心为读者朋友打造理性思考的空间,竭力实现被访者一读者的理性与情感的惊人共鸣。