

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.04.008

铸态高强高韧性 QT600-10 合成球铁的研制

陈忠士¹, 邹泽昌¹, 傅高升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 机械工程和自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 采用废钢增碳技术, 利用合金化元素 Cu 和 Sn 强化基体组织, 通过完善球化、孕育处理等工艺措施, 制备出铸态 QT600-10 高强高韧性球墨铸铁。试验表明: 采用废钢增碳生产合成球铁, 选择适当的化学成分, 其铸态抗拉强度 ≥ 600 MPa, 断后伸长率 $\geq 10\%$ 。

关键词: 废钢增碳; 合金化; 铸态; 球墨铸铁

中图分类号: TG255

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)04-0342-04

Development of high strength, high-toughness cast QT600-10 synthetic ductile iron

Chen Zhongshi¹, Zou Zechang¹, Fu Gaosheng²

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

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

Abstract: Using waste-steel recarburization technique and enhancing the cast matrix with alloying elements of Cu-Sn, high strength, high-toughness cast QT600-10 synthetic ductile iron was produced through strengthening spheroidization and inoculation treatment. Experimental results show that choosing appropriate chemical composition, the as cast tensile strength and the elongation of the cast QT600-10 synthetic ductile iron is higher or equal to 600MPa, and is higher or equal to 10%, respectively.

Keywords: waste (scrap) steel carburizing; alloying; cast; ductile iron

“强韧化、轻量化、精密化、高效化”, 是我国铸造技术的发展趋势。球墨铸铁是石墨全部或大部分呈球状的一种铸铁, 由于强度、塑性、韧性高, 加工性能好而得到广泛应用。本试验在我国现有的 QT600-3 牌号基础上, 采用废钢增碳技术生产合成铸铁的方法, 旨在进一步提高材料的抗拉强度与延伸率, 为研究开发高强度、高韧性球墨铸铁打下基础。

1 试验内容

1.1 化学成分设计依据

研究认为, 铸铁的组织 and 性能取决于铸铁成分和结晶条件, 生产强韧性球铁的前提是选择合

适的化学成分^[1-3]。对于球铁 QT600-10, 其基体属于铁素体和珠光体的混合基体, 需要保证其强度不低于 600 MPa, 还应具有较高的断后伸长率。因此, 成分设计时应综合考虑各元素对基体组织和性能的影响, 保证形成一定量的珠光体和铁素体, 使之具有恰当的比例关系, 并采取一定的措施对基体组织进行细化和强化, 获得铸态高强度高韧性的球墨铸铁。

(1) 碳当量

碳当量的选择应从保证球化、具有良好的铸造性能、减少铸造缺陷以及对珠光体和铁素体的形成等方面来考虑。提高碳当量, 可以保证球化良好, 提高铁液的流动性, 减小缩孔、缩松倾向, 增

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 福建省交通厅科技项目(201321)

第一作者简介: 陈忠士(1966-), 男, 江西广丰人, 副教授, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 强韧性材料研制与开发。

加铁素体含量,但碳当量过大,则易产生石墨漂浮。本试验将碳当量控制在 4.4~4.7 之间,为过共晶成分。

(2) 含碳量

选择含碳量应从保证球墨铸铁具有良好的力学性能和铸造性能两方面考虑^[4]。对于铸态球墨铸铁,含碳量对球墨铸铁力学性能的影响主要通过其对基体的影响起作用。在一定范围内增加含碳量,铁素体量上升,硬度下降,断后伸长率增大;另一方面,高碳量有助于获得健全的铸件。因此,试验中将碳量选择在 3.6%~3.9%。

(3) 含硅量

在满足石墨化要求前提下,尽量降低终硅量。通常生产球墨铸铁时,其终硅量控制在 2.0%~2.9% 之间,本试验将终硅量选择在 2.4%~2.6%,其主要目的是为了形成一定量的珠光体和一定量铁素体的混合基体。珠光体量保证材料的强度,而铁素体量来提高材料的断后伸长率。

(4) 含锰量

锰是稳定珠光体的元素,可以提高球墨铸铁的强度和硬度,但是断后伸长率将随含量的增加而显著下降,含锰量越低,得到的铁素量越多,断后伸长率增大。在考虑锰对基体组织和力学性能影响的同时,要注意锰会使铸件白口倾向增加,是偏析倾向特别显著的元素,易形成碳化物并富集在共晶团边界,为此将锰的含量控制在 0.15%~0.35%。

(5) 合金化元素铜和锡的加入量

生产铸态铁素体和珠光体混合基体的球墨铸铁,其基本工艺要点就是在铁素体球铁的基础上,适当地增加珠光体量并使珠光体得到细化和强化。其中最有效措施之一是添加铜^[5]。对于铸态是铁素体基体的球铁来说,铜的加入会使抗拉强度明显提高,而断后伸长率则有明显的下降。为保证材料具有高强度的同时又有高韧性,铜的加入量选择在 0.30%~0.50% 之间。

锡增加珠光体量的作用比铜大,如果铜对珠光体的作用是 1,则锡的作用是 10^[6]。锡是球化干扰元素,但在采用稀土球化剂时,可使其干扰球化的作用得到中和。为进一步增加球铁中的珠光体量,增加石墨球的圆整度,提高材料的力学性能又不会使冲击韧度下降,试验中添加了 0.02%~0.03% 的锡。

表 1 是试验时的化学成分设计。

表 1 化学成分的设计

Tab.1 The design of the chemical composition of high strength, high-toughness cast QT600-10 synthetic ductile iron

元素	C	Si	Mn	Cu	P	S	Sn
$\omega/\%$	3.6	2.4	0.15	0.30	\leq	\leq	0.02
	~	~	~	~	0.06	0.05	~
	3.9	2.6	0.35	0.50			0.03

1.2 试验方法

在 300 kg 频感应电炉中,采用低 S、低 P、低 Mn 的废钢为主要炉料,选用石墨型增碳剂,按分层法加入^[7]。球化剂为稀土镁硅铁,用量为 1.3%~1.5%,视铁水中的纯净度与含 S 量而定。球化处理方式为传统的冲入法;孕育剂为硅-钙-钡合金,加入量 1.1%~1.3%;分 3 次孕育,即包内孕育(20% 孕育剂)、随流孕育(60% 孕育剂)和转包孕育(20% 孕育剂)。

根据 GB/T1348-2009《球墨铸铁件》标准,试验时采用 WEW 型 30 t 万能拉伸试验机, Y 形单铸试块,加工试样形状与尺寸如图 1 和图 2。金相检验依据 GB/T9441-2009 球墨铸铁金相检验标准执行。

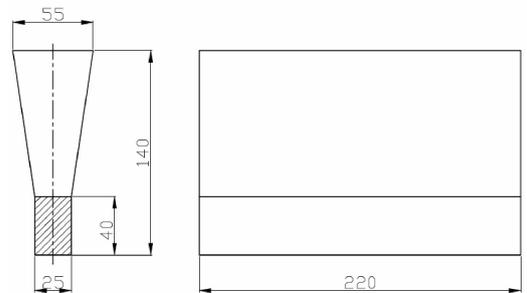


图 1 Y 形单铸试块(单位:mm)

Fig.1 The dimension of Y-shaped single-casting test block (unit:mm)

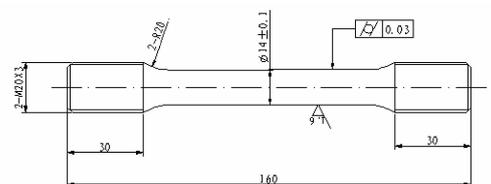


图 2 拉伸试样的形状与尺寸(单位:mm)

Fig.2 Schematic of tensile specimen (unit:mm)

2 试验结果与分析

2.1 QT600-10 合成球铁的力学性能

表 2 是不同炉次浇注单铸试块测出的铸态合成球铁的室温力学性能。可以看出,试验材料的抗拉强度 ≥ 600 MPa,伸长率 $\geq 10\%$,属于球铁 QT600-10。

表 2 合成球墨铸铁的力学性能与组织

Tab.2 The mechanical property and microstructure of synthetic ductile iron

炉次与 试样编号	抗拉强度/ MPa	断后伸 长率/%	铁素体 量/%	珠光体 量/%	球化 等级	石墨大 小等级
01-1	619	11.8	55	45	2-1	7-6
01-2	620	11.6	55	45	2-1	7-6
02-1	656	11.4	50	50	1-2	6-7
02-2	660	11.2	50	50	1-2	6-7
03-1	698	10.6	45	55	2-1	7-6
03-2	703	10.3	45	55	2-1	7-6
04-1	725	10.0	35	65	1-2	7-6
04-2	735	10.0	35	65	1-2	7-6

试验结果表明:生产铸态 QT600-10 合成球铁时,其珠光体量应控制在 45%~65% 为宜。当珠光体量超过 65% 时,则抗拉强度高而伸长率小于 10%;当珠光体量低于 45% 时,则伸长率高而抗拉强度小于 600 MPa。在保证珠光体与铁素体量比例的同时,应尽可能提高石墨化等级,细化石墨球。

1) 选择合适的碳、硅量,辅加适量的合金化元素和微量元素,调节基体组织中的珠光体和铁素体比例,是获得 QT600-10 合成球铁的基础。本试验加入了一定量的铜,使合成球铁在共晶转变时,促进石墨化;在共析转变时促进珠光体的形成;并通过固溶和沉淀强化,进一步提高球铁的抗拉强度。另一方面,在合成球铁中附加微量的锡元素,使基体组织中的珠光体明显增加,凝固时在晶界处形成低熔点区域,改善形变能力,提高冲击韧度^[8]。

2) 提高球化等级,增加单位面积上的石墨球数量和石墨球的圆整度,保证球化与孕育效果,是获得高强高韧性球墨铸铁的重要保证。试验发现,如果球化等级在 4 级以下,石墨大小在 5 级以下,其抗拉强度与断后伸长率急剧下降。

3) 加入合金元素铜,减少或消除游离碳化物

的形成,抑制磷共晶的产生,是获得 QT600-10 合成球铁的有力保证。

2.2 QT600-10 合成球铁的金相组织

2.2.1 石墨球的大小与分布

采用废钢增碳生产合成球铁时,由于废钢中的含碳量极低,增碳时无论如何扩散,始终存在着大量的富碳区和贫碳微^[9]。高温状态下的富碳区仍存在高熔点的石墨,造成了大量弥散分布的非均质核心,促进了初生石墨的形成;另一方面,大量的贫碳区又使铁水具有很强的形成奥氏体枝晶的能力,奥氏体枝晶的出现又使其周边铁液富碳,反过来又促进了石墨球的形成;再者,球化处理后的孕育处理,又改善了石墨的形核条件。三者综合结果是获得了量大、形小、外观圆整、分布均匀的球状石墨铸铁。

图 3 是 QT600-10 合成球铁中石墨球大小与分布的金相组织。可以看出,QT600-10 合成球墨铸铁中的石墨球数多、细小且分布均匀。其球化等级在 1~2 级,球化率在 95% 以上,石墨球直径大小在 10~20 μm ,石墨球的大小达 6~8 级。由于石墨球数多,且细小、圆整、均匀分布,减小了对金属基体的切割作用,使金属基体的强度利用率提高,金属基体的性能得到最大限度的发挥。

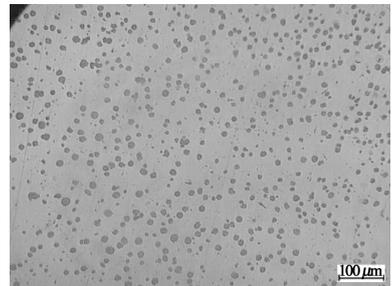


图 3 QT600-10 合成球铁的石墨形状与分布

Fig.3 The shape (microstructure) and distribution of synthetic ductile iron QT600-10 graphite

2.2.2 基体组织

QT600-10 合成球墨铸铁,其组织是牛眼状铁素体和细片状珠光体为主的混合基体(图 4),未发现自由渗碳体的存在。

观察试验中合成球铁的基体金相组织,主要特征有以下几方面:

(1) 基体中含有大量呈牛眼状分布的铁素体

由于废钢增碳后,富碳区存在大量弥散分布的高熔点石墨,石墨球以此为析出并长大,使

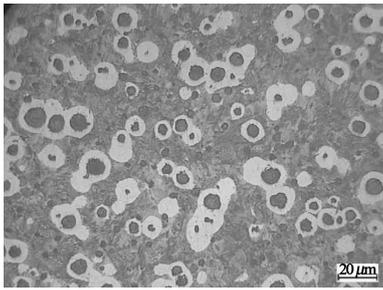


图4 QT600-10 合成球铁的基体组织

Fig.4 The microstructure of the matrix of synthetic ductile iron QT600-10

周围铁液发生贫碳,逐渐形成一个环绕石墨球的奥氏体外壳,即石墨-奥氏体共晶团。共析转变时,石墨球四周的奥氏体转变为铁素体,形成了特有的牛眼状基体组织。

合成铸铁的初生石墨和共晶石墨球数的增多,缩短了碳在奥氏体中的扩散距离,共析转变时,使铁素体易于形核析出;试验中锰含量低,得到的铁素体量也多;强有力的孕育措施会使单位面积上的石墨球数增多,就很容易得到铁素体。因此,在 QT600-10 的合成球铁中具有较高的铁素体量。

较高的铁素量将使材料具有较高的断后伸长率和较低的抗拉强度。但是由于合成球铁形成的石墨球数多,促进了铁素的形成并使铁素体得到了细化;另一方面,由于所加入的铜具有固溶和沉淀强化作用,可显著提高铁素体的强度,断面均匀性得到改善。其综合结果就是降低铁素体的伸长率,提高抗拉强度,从而达到 QT600-10 的要求。

(2) 细片状珠光体

控制奥氏体枝晶的数量和形态是获得高质量球墨铸铁的重要环节。在生产合成球铁时,由于

废钢碳量极低而形成的富碳区和贫碳区,促进了初生石墨和奥氏体的形成,而且贫碳区愈多,奥氏体的枝晶越发达,转变成的铁素体和珠光体越细小,球墨铸铁的强度就越高^[10]。

试验中在球墨铸铁中加入了一定量的铜、锡合金元素,主要目的是使球墨铸铁在铸态下得到不同数量的珠光体,并使珠光体得到不周程度的细化和强化,以期提高强度,达到抗拉强度在 600 MPa 以上。

(3) 无自由渗碳体存在

利用废钢增碳生产合成球铁,铁液中的碳在很大程度上能以石墨形式析出,形成大量的石墨球。另一方面,铜的加入进一步促进了石墨化,可有效减少甚至消除自由渗碳体,这是获得高强韧性球墨铸铁的重要保证。

3 结论

1) 利用废钢增碳生产合成铸铁的方法,选择适当的碳(3.6%~3.9%)、硅(2.4%~2.6%)、锰(0.15%~0.35%)含量,添加合金化元素铜(0.30%~0.50%)和微量合金化元素锡(0.02%~0.03%),通过加强球化与孕育处理,可以实现铸态生产 QT600-10 球墨铸铁。

2) 在生产 QT600-10 合成球铁时,珠光体量应控制在 45%~65% 为宜,尽量细化石墨球,提高单位面积上的石墨球数量和石墨球的圆整度,球化等级在 1~2 级,石墨大小在 6~8 级。

3) 细化和强化基体组织中的铁素体和珠光体,是生产高强度、高韧性球墨铸铁的重要保证。附加合金化元素铜和微量合金化元素锡,是 QT600-10 合成球铁在铸态下得到不同数量珠光体的有效手段。

参考文献:

- [1] 李蒙,孙雅心,郭振廷. 铸态高强韧球铁的生产[J]. 矿山机械,2006,34(4):142-143.
- [2] 高洁,焦有生,解卫红,等. 合成铸铁的性能研究[J]. 铸造技术,2008,29(2):181-183.
- [3] 郭振廷,王成锋,孙雅心. 铸态高强高韧球墨铸铁的研制[J]. 铸造,2005,54(2):195-197.
- [4] 王晓江. 铸造合金及其熔炼[M]. 北京:机械工业出版社,2007:81-88.
- [5] 丁陈民,李永红,刘红. 铸态高强度高韧性球墨铸铁的生产技术[J]. 铸造,2011,60(8):788-790.
- [6] 李炯辉. 金属材料金相图谱上册[M]. 北京:机械工业出版社,2007:6-8
- [7] 陈忠士,邹泽昌,温丽娜,等. 合成铸铁的增碳工艺技术及组织的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(19):67-69.
- [8] 吴德海. 球墨铸铁[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:57-66.
- [9] 贺焱,郭学锋,林浩,等. 高强高韧合成球墨铸铁的组织 and 力学性能[J]. 热加工工艺,2010,39(7):27-29.
- [10] 周继杨. 球墨铸铁基础理论的近代发展[J]. 铸造世界报,2001(11):2-12.

(责任编辑:陈雯)