• 工艺技术 Technology •

DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2019.04.012

铸态高强度高伸长率合成球铁的试验研究

谢来旺[1]，蔡坤山[1]，范晓明[2]，王修强[1]

(1. 湖北三环铸造股份有限公司，湖北 随州 441300；2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院，湖北 武汉 430070)

摘　要：采用中频感应电炉熔炼，以废钢、原料纯铁为主要炉料，通过 Cu、Ni 合金化，优质增碳剂增碳，利用钟罩法分别进行炉内预处理和球化处理，浇包冲入法孕育处理，树脂砂壳型，制备了铸态高强度高伸长率合成球铁 Y 块铸件。结果表明，石墨球化级别 2 级，石墨大小 7 级，基体组织细小，为珠光体–铁素体混合基体，其中珠光体的含量为 65%，铸态合成球铁的抗拉强度和伸长率分别达到 763.0 MPa 和 11.2%。

关键词：铸态；高强度高伸长率；QT700-10；合成球铁

中图分类号：TG255　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2019)04-0380-04

Study on the High Strength and High Elongation of As-cast Synthetic Ductile Iron

XIE Laiwang[1], CAI Kunshan[1], FAN Xiaoming[2], WANG Xiuqiang[1]

(1. Hubei tri-ring casting incorporated company, Suizhou 441300, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Using medium frequency induction furnace smelting, pure iron as the main burden with scrap steel, raw material, through the Cu, Ni, alloying, high quality recarburizer carburization, respectively by the method of bell jar furnace pretreatment and spheroidized, ladle inoculation into method, shell mold casting resin sand, the preparation of as-cast high strength and high elongation synthetic Y type of ductile iron casting. The results show that the graphite spheroidization grade is grade 2, the graphite size is grade 7, the matrix structure is fine, the pearlite-ferrite mixed matrix, the pearlite content was 65%, the tensile strength and elongation of as-cast synthetic ductile iron reached 763.0 MPa and 11.2%, respectively.

Key words: as-cast; high strength and high elongation; QT700-10; synthetic ductile iron

目前，汽车的产量和保有量迅速增长，逐渐成为世界能源消耗和污染物排放的主要来源，并产生了油耗、安全和环保三大问题。而汽车轻量化是降低能耗、减少排放的最有效措施之一，相关技术成为目前汽车发展的前沿和热点。铸件是汽车零部件的重要构成部分，其轻量化、薄壁化、精确化、强韧化的实现是汽车创新发展的关键技术之一[1]。铸铁件在汽车制造上的应用十分广泛，为汽车性能的提升起了十分重要的作用。高性能铸态合成球墨铸铁与传统的球墨铸铁生产工艺相比，综合力学性能优良，具有能耗小、产品质量高等优点，对实现汽车减重、降耗、环保、安全、低成本意义重大。国外先进的铸造企业已经实现铸态 QT700-10 的产业化，但是具体的技术信息未见公开。相对而言，中国对铸态高强度高伸长率合成球铁的研究与应用尚处于起步阶段[2]。并且，我国现行球墨铸铁国家标准(GB/T 1348—2009)[3]规定的牌号中，抗拉强度为 700 MPa 时伸长率为 2%，而且还常常需要热处理，已很难满足使用需求。铸态合成球铁主要采用废钢增碳的方法来调节碳量，并在铸态的基础上提高球铁的性能，不需热处理[4]。这在拥有丰富废钢资源的今天，不仅可变废为宝，而且由于废钢所含杂质元素较少，合成球铁铁液质量好，材质均匀性好，力学性能及加工性能更加优良，利于提高球铁性能。加之若球墨铸铁铸态性能能够达到技术要求，将会大大缩短生产周期、减少人力物力、节约能源，因此优势明显，将是球铁发展的必然趋势[5-8]。当然，这也对球铁的生产技术提出了更高的要求。因此，积极开发铸态高强度高伸长率合成球铁对于合理利用废钢资源，提升球铁性能，

收稿日期：2018-10-26

作者简介：谢来旺(1972-)，湖北随州人，工程师，主要从事铸造工艺技术与企业管理。电话：13872889677，E-mail:xielaiwang001@163.com

通讯作者：范晓明(1963-)，湖北洪湖人，博士，副教授，研究方向：铸造合金及铸造工艺研究。电话：13871276037，E-mail：fanxm@whut.edu.cn

节约能源，降低成本和球铁标准的更新均具有十分重要的意义。

本文采用中频感应电炉和废钢增碳工艺试制了铸态高强度高伸长率合成球铁 QT700-10，但愿对开发高性能合成球铁有所裨益。

1　实验材料及方法

1.1　实验材料

实验材料包括废钢（Q235 板材边角料，0.16%C、0.30%Si、0.50%Mn、0.045%S、0.04%P），原料纯铁（0.01%Mn、0.003%S、0.008%P），优质增碳剂（wC≥99.9%，粒度为 3~5 mm），阴极铜（wCu≥99.95%），75 硅铁（70.3%Si、0.65%Al），预处理剂（组成为 64.69%Si、1.39%Ca、1.18%Al、9.11%Ba，粒度为 2~6 mm），NiMg 球化剂（组成为 15.74%Mg、82.20%Ni、0.40%MgO，粒度为 5~20 mm），硅钙孕育剂（组成为 75%Si，0.8%Ca，1.2%Al，余为 Fe，粒度为 1~3 mm），75 硅铁孕育剂等。含 Bi 随流孕育剂（组成为 0.7%Bi，0.7%RE，余为 Si、Fe 等，粒度为 1~3 mm）

1.2　实验方法

首先初步确定目标成分，计算配料并确定炉料配比。由于一般钢材含锰相对较高，采用低锰原料纯铁以降低含 Mn 量。试验炉料约 30 kg。采用废钢 Q235 和原料纯铁配制。然后在 100 kg 中频感应电炉中熔制合金。测温采用 NSP 浸入式测温枪，采用 Metal Lab 直读光谱仪测定激冷试样的化学成分。增碳采用炉底加入法，即先将优质增碳剂放入炉膛底部，废钢和炉料纯铁置于其上，升温至 1 550 ℃左右熔化完毕后，再加入球铁回炉料、调整成分的 75 硅铁和阴极铜，熔炼测温，待铁液达到 1 480~1 500 ℃时，采用钟罩法先后对铁液进行预处理和球化处理。其中预处理剂的用量为 0.35%，球化剂的用量为 0.85%。球化处理后，铁液中 Ni 含量应为 0.5%～0.7%。测温，1 480 ℃左右出炉，随后，在烘烤好的浇包内，将铁液从中频炉倒入放入 0.3%的硅钙孕育剂的浇包进行冲入法孕育，适当搅拌，静置 1～2 min，撇渣后浇注树脂砂壳型 Y 块铸型（见图 1）。一侧凹坑放入含 Bi 随流孕育剂。这样左、右两侧所得 Y 块分别为未补充型内孕育和加含 Bi 孕育剂补充型内孕育。自然冷却，低于 600 ℃打箱，可得到铸态合成球墨铸铁 Y 块铸件。最后采用锯床从 Y 块底部取样，按照球铁标准车制拉伸试棒（见图 2），制备边长为 20 mm 立方块硬度测试样。最后采用 MTS Exceed E45 万能材料试验机和 HB-3000 型布氏硬度测试仪进行拉伸试验和硬度测试，从拉断试棒端部

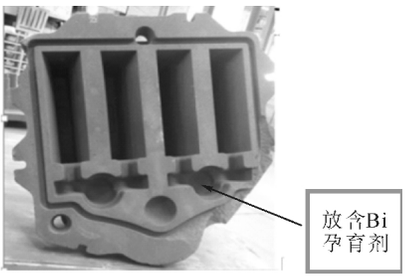


图 1　Y 块铸型实物图（下型）
Fig.1　Physical map of block Y casting (drag)

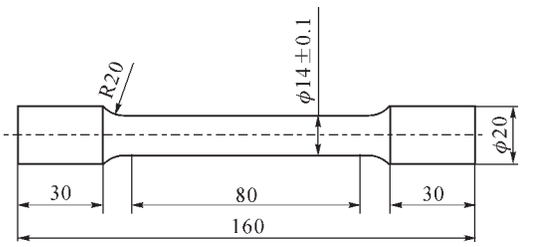


图 2　拉伸试样的形状
Fig.2　The shape and size of tensile specimen

取样磨制金相，采用 Nikon-LV100POL 型金相显微镜观察基体组织，分析珠光体和铁素体含量、球化率和球化级别，并用 JXA-8230 型电子探针分析组成相的成分和元素分布。

2　实验结果与分析

2.1　化学成分

制备球铁时，综合考虑合金元素对铁碳相图的影响，目标成分一般选用共晶或过共晶碳当量，为 4.7%左右。表 1 示出了目标成分及原铁液与终铁液光谱分析化学成分实际测试结果。为了提高韧性，即提高石墨球数，控制含碳量，最终 C 的含量控制在 3.5%～3.7%。为了达到较高的抗拉强度，必须适当提高孕育效果，增加并细化石墨球，适当提高含硅量，起到固溶强化作用，因此含硅量控制在 2.9%～3.3%。Mn 是稳定珠光体的元素，虽然有利于强度和硬度的提高，但是 Mn 存在正偏析倾向，严重时甚至会促使形成晶间碳化物，显著降低球墨铸铁的韧性，因此控制锰含量在 0.2%以下。磷在球墨铸铁中有严重的偏析倾向，易形成晶间磷共晶，严重降低球墨铸铁的塑性、韧性和强度，增加缩松倾向，因此严格控制 P≤0.035%。硫与球化元素镁、稀土有很强的结合能力，生成硫化物或硫的氧化物，不仅消耗球化剂，造成球化不稳定，而且还是夹杂物数量增多因素，导致铸件产生缺陷，造成球化衰退速度加快，因此应严格控制 S≤0.02%。为了有效控制珠光体含量，促进石墨化，减少或消除游离渗碳体的形成，细化珠光体，强化基体组织，提高基体强度和硬度，改善铸件

断面组织均匀性，改善石墨球的形状和增加石墨球数，本研究在材料中加入 0.50%~0.75%的铜、0.55%~0.75%的镍。为了保证球化效果，$(Mg+Ce)_{残}$应为 0.03%~0.06%。从表 1 中可以看出试验材料中各元素达到目标值。

2.2 显微组织和力学性能

图 3(a)、(b)分别示出了同一炉铁液不加含 Bi 孕育剂型内补充孕育和进行加含 Bi 孕育剂型内补充孕育金相试样的显微组织照片。其对应的基体组织金相照片分别为图 4(a)和图 4(b)。图 3 照片显示，石墨均较为圆整，细小。图 4 照片显示，基体组织主要由一定比例的珠光体和铁素体组成。

对试样金相显微组织和力学性能测试分析结果如表 2 所示。需要说明的是炉次Ⅰ-1 为按图 1 所示 Y 块铸型一侧凹坑未放入含 Bi 随流孕育剂的 Y 块铸件，Ⅰ-2 为同一铸型另一侧凹坑置放含 Bi 孕育剂补充型内孕育的 Y 块铸件。测试结果表明，球化率均达到 90%以上、球化级别 2 级，石墨大小为 7 级，而基体组织是由牛眼状铁素体和细片状珠光体为主的混合基体，未发现自由渗碳体和磷共晶存在，差别不大。没有加含 Bi 孕育剂补充孕育的材料的铸态抗拉强度达到 763.0 MPa，伸长率达到 11.2%，力学性能达到了 QT700-10 的要求。相对而言，加 Bi 补充孕育处理后石墨球数有所增加，但是抗拉强度略有提高，为 768.3 MPa，而延伸率为 8.8%，略有下降，但是，均表现出很好的力学性能，其伸长率值远高于现行球铁国家标准。

2.3 讨论

本次实验实现了铸态球铁的高强度与高伸长率，究其原因，主要体现在如下几方面：①化学成分

表 1 目标化学成分及实际测试结果化学成分 w(%)
Tab.1 Target chemical composition and actual measured results

炉次	成分									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	$(Mg+Ce)_{残}$	Fe	其他
目标成分	3.55~3.75	2.90~3.30	≤0.02	≤0.035	≤0.02	0.55~0.75	0.55~0.75	0.030~0.060	余量	
原铁液	3.723	2.115	0.155	0.020	0.004	0.000	0.631	0.018	93.551	余量
终铁液	3.561	2.950	0.185	0.018	0.001	0.750	0.617	0.043	92.060	余量

表2 金相显微组织及力学性能测试结果
Tab.2 Test results of microstructure and mechanical properties

炉次	显微组织					力学性能		
	石墨			基体组织(%)		抗拉强度	屈服强度	伸长率
	球化率(%)	球化级别	石墨大小	P	F	R_m/MPa	$R_{0.2p}$/MPa	A(%)
Ⅰ-1	≥90	2	7	65	35	763.0	459.3	11.2
Ⅰ-2	≥90	2	7	65	35	768.3	470.9	8.8

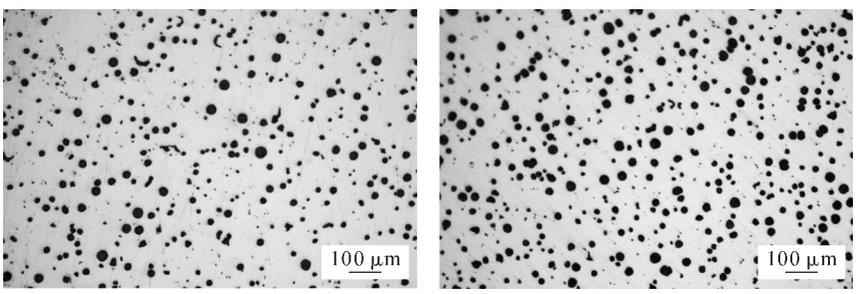


图 3 石墨大小与形貌
Fig.3 Graphite size and morphology

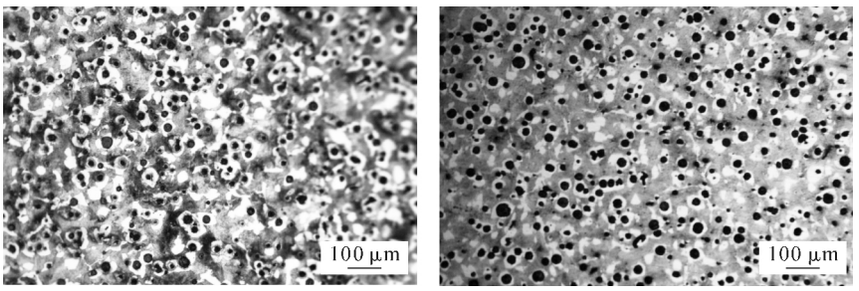


图 4 基体金相显微组织
Fig.4 Metallographic microstructure of the matrix

选择控制适宜。选用材料较为纯净，没有按传统球铁的制备使用普通铸造生铁，使用优质增碳剂对废钢和炉料纯铁增碳，减小了由于普通铸造生铁作为原材料的杂质含量高，遗传性的作用而导致力学性能的降低。采用 Si、Ni、Cu 进行合金化处理，有效提高了力学性能。Si 是铸铁中的常规元素，Si 促进铁素体的形成，同时在一定的范围内对铁素体有显著的强化作用，而且塑性下降不显著。Cu、Ni 促进珠光体形成并细化珠光体，适当的含量可调控基体组织中珠光体和铁素体比例，Cu、Ni 都促进一次结晶石墨化，没有晶间偏析，都有固溶强化作用。此外，由于 S、P、Mn 含量较低，磷共晶相较少，Mn 的晶间偏析大幅下降，也是促使材料韧性大幅提升的主要因素之一；②处理工艺保证了试样的石墨形状圆整、细小，珠光体细化。本研究中，处理工艺包括增碳处理、预处理、球化处理和强化孕育处理。合成铸铁以废钢和回炉料等为主要原料，增碳时造成的碳浓度起伏和孕育处理有利于奥氏体的形成和石墨球的析出，即共晶团数量增多且细化[9]。在熔炼炉内球化处理前对铁液进行的预处理，为含 Ba 孕育剂，有效控制了铁液中的 O/S 在较低和稳定的水平，并形成稳定的形核质点，为球化反应提供良好的条件，利于增加石墨球数并提高球化率[10]。对于原材料含硫低的原材料，选用了不含稀土的 NiMg 球化剂，得到了较好的石墨球化效果。同时，复合孕育处理促进石墨球形核，细化石墨，使铸件性能得以提高。即除了正常包内冲入法所使用的硅钙孕育剂之外，调整硅含量的 75 硅铁，也以适当颗粒放入浇包，在调整 Si 含量的同时也兼具孕育作用，加强了孕育效果，促使石墨球更圆整、细小，分布更均匀，并同时细化了珠光体（见图 5）。用含 Bi 的孕育剂对铁液进行型内孕育，可以细化石墨球，增加石墨球数，使石墨球分布更加均匀，但是，球铁件的力学性能却不升反降。因此，实际生产中，要慎重添加含 Bi 的孕育剂，具体的影响原因尚不清楚。而 Y 块冷却速度亦会对基体中珠光体与铁素体的含量比例产生影响[11]，本研究在 600 ℃以下打箱，也尚待今后深入研究。

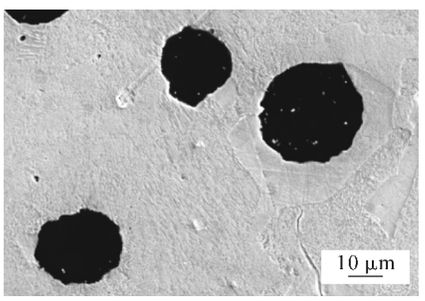


图 5 高倍下片状珠光体组织

Fig.5 The lamellar pearlite structure at high magnification

3 结论

实验结果证明，采用废钢和原料纯铁增碳工艺、结合硅、铜、镍合金化和预处理、球化处理、孕育处理等工艺共同作用，获得了圆整、细小、分布均匀的石墨球，铁素体与珠光体比例适当，珠光体的片层间距细化的基体组织，在铸态条件下制备了高强度高伸长率球铁 QT700-10，可充分利用废钢资源，取消热处理，缩短生产周期，降低生产成本。

参考文献：

[1] 曾大本. 面向汽车轻量化材料加工技术的发展动向 // 第 9 届中国铸造协会年会论文集 [C]，北京：中国铸造协会，2010. 231-236.

[2] 柳建国，曾大新. 铸态 QT700-10 技术初探 [J]. 铸造，2014，63（5）：507-509.

[3] 中国国家标准化管理委员会. 球墨铸铁件（GB/T 1348-2009）[S].

[4] 曾大新，何汉军，张元好，等. 铸态高强度高伸长率球墨铸铁研究进展[J]. 铸造，2017，66（1）：38-43，49.

[5] 贺焱，郭学锋，林浩，等. 高强高韧合成球墨铸铁的组织及力学性能[J]. 热加工工艺，2010，39（7）:27-29.

[6] 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.

[7] 陈忠士，邹泽昌，林燕清，等. 铸态 QT750-5 合成球铁凸轮轴的组织及力学性能 [J]. 南昌大学学报（工科版），2015，37（3）：292-294，306.

[8] 陈忠士，傅高升，蓝敏俐. 铸态高强度高韧性合成球铁 QT750-5 的研制[J]. 铸造技术，2013，34（5）:538-540.

[9] Graham P S. Principles of manufacturing ductile iron gears [J]. AFS Trans，1995，46: 437- 445.

[10] 陈子华. 球墨铸铁预处理技术原理及生产应用实例 [J]. 现代铸铁，2010（5）：31-36.

[11] Gonzaga R A. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons [J]. Materials science & Engineering A，2013，567(2)：1-8.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52–64　　国外发行号：M855　　国内定价：18 元/本　　海外定价：18 美元/本