DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.013

废钢增碳法熔炼 QT700–2 工艺控制

胡克潮[1,3],曹　琨[2,3],赵子文[2,3],苏义祥[4]

(1.兰州兰石集团铸锻分公司,甘肃 兰州 730314;2.兰州兰石能源装备工程研究院有限公司,甘肃 兰州 730314;3.甘肃省高端铸锻件工程技术研究中心,甘肃 兰州 730314;4.兰州理工大学材料科学与工程学院,甘肃兰州 730050)

摘　要:为降低冶炼成本,尝试以废钢为主要原材料,辅以铸造生铁和回炉铁,用中频感应电炉熔炼铁液,通过添加增碳剂、合金元素(Cu)、孕育剂(FeSi75)和球化剂(FeSiMg8RE7)调整化学成分和球化效果,生产高强高韧球墨铸铁件。结果表明:铸态下单铸试样抗拉强度≥700 MPa,伸长率最高能够达到 10%,球化等级 2 级,石墨大小≥6 级,珠光体含量≥90%,力学性能良好。无碳化物、磷共晶、缩松缩孔、裂纹、加工硬化等质量问题,可实现批量化生产。

关键词:废钢;增碳;球墨铸铁

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)11-1187-04

Process Control of Scrap Steel Carbonization Method of Smelting QT700–2

HU Kechao[1,3], CAO Kun[2,3], ZHAO Ziwen[2,3], SU Yixiang[4]

(1. Casting and Forging Branch of Lanzhou LS Group, Lanzhou 730314, China; 2. Lanzhou LS Group Energy Equipment Engineering Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China; 3. Gansu Engineering Research Center for High-end Forging and Casting, Lanzhou 730314, China; 4. School Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to reduce the cost of smelting, scrap steel was used as the main raw materials, cast iron and recycled iron were used as auxiliary materials, and molten iron was smelted by medium frequency induction furnace, by controlling the recarburizer, alloy element (Cu), inoculant (FeSi75) and nodularizer (FeSiMg8RE7) was used to adjust the chemical composition and spheroidization effect to produce high-strength ductile cast iron. The results show that the tensile strength of single casting samples of as-cast condition is ≥700 MPa, the elongation can reach 10% , the spheroidization grade is II, the graphite size is more than VI, the pearlite content is ≥90%, and as-cast specimens have good mechanical properties. Mass production can be realized, and no carbide, phosphorus eutectic, shrinkage cavity, crack, work hardening, etc.

Key words: scrap steel; recarburization; ductile cast iron

球墨铸铁件兼具中高强度和韧性、优异的耐磨性和减振性以及良好的铸造工艺性能等特点,是目前最具发展潜力的“以铁代钢”铸造材料。随着我国经济建设的快速发展,在铸件材料和铸造工艺不断创新形势下,研制和生产高品质球墨铸铁件,包括常温下韧性良好的 QT600-3、QT700-2 或者更高强度更高韧性的 QT800-5 球墨铸铁件,如机车铸件、汽车铸件、石油钻采铸件等势在必行[1,2]。但传统球墨铸铁生产需要大量的铸造生铁,成本较高。许多铸造企业开始采用废钢增碳技术替代铸造生铁,生产低成本高品质球墨铸铁件[3-10]。该方法熔炼的铁液,有害元素含量低,纯净度高,夹杂物少,球化孕育效果好,力学性能十分优异。铸态下力学性能就能达到 QT700-2 级别材料要求,且无需进行正火热处理(只进行去应力退火),直接减少一火次能源消耗,符合国家倡导的绿色可持续发展道路。

与传统生铁熔炼方式相比,合成球墨铸铁熔炼过程原铁液化学成分变化幅度大,生产过程中如果控制不当容易出现较多铸造缺陷。本研究主要从工艺过程控制角度,以废钢(兰石集团公司普通碳钢边角余料)为主要材料,铸造生铁和回炉料为补充材料,用石墨增碳法生产出低成本高品质 QT700-2 球墨铸铁件,力学性能符合国家标准 GB/T1348-2009要求,生产成本大幅度降低,为企业带来良好经济效益。

1　原辅材料要求

1.1　原材料

废钢(普通碳钢厚度不小于 0.5 mm),不得锈蚀和油污,化学成分 w (%) 符合:0.20~0.30 C,0.25~0.35 Si,0.70~1.00 Mn,P≤0.04%,S≤0.04%,其它反球化元素总量控制小于 0.1%;纯 Cu。生产用炉

收稿日期:2019-07-10
基金项目:甘肃省科技计划资助项目(2015GS05896)
作者简介:胡克潮(1970-),甘肃兰州人,高级工程师.主要从事铸造合金材料工艺研究及生产方面的工作.
电话:13893465815,E-mail:hukechao123@sina.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

料尺寸规定：1 t 中频感应电炉炉料长×宽小于 600 mm×300 mm，径向最大尺寸不超过炉膛直径2/3；5 t 中频感应电炉炉料长×宽小于 1000 mm×500 mm；铸造生铁，不得锈蚀和油污，化学成分符合 Q12 标准；回炉铁为球墨铸铁浇冒口及浇注剩余铁锭。

1.2 辅助材料

球化剂成分符合 FeSiMg8RE7 牌号要求；增碳剂为石墨化增碳剂，要求 C≥99%，S≤0.03%；孕育剂符合 FeSi75 牌号要求；保温覆盖材料为珍珠岩（不得受潮）或草木灰（不得受潮和其它残渣）。

1.3 炉料结构

废钢比例在 80%~100%范围可动态调整，视现场生产情况可加入少量回炉料；增碳剂加入量应根据炉料结构计算，一般为 3%~4%范围；碳含量不足时可加入少量 Q12 生铁增碳；球化剂加入比例为1.3%，孕育剂加入比例为 1.2%，铜加入范围为 0.4%~0.5%。

2 工艺控制

2.1 工艺路线

配料（原辅材料计算）→炉前准备（原辅材料去锈去油污预热）→熔炼（1 t 或 5 t 中频感应电炉，原辅材料块度符合加料要求）→孕育+球化处理+孕育→炉前检验（三角试片）→浇注铸件和基尔试块。

2.2 熔炼

中频感应炉预热后在炉底平铺废钢（占废钢总量 20%）和铸造生铁（占铸造生铁 10%），在废钢和铸造生铁上面平铺增碳剂（占增碳剂 20%），增碳剂上面放置 70%废钢和 80%铸造生铁，通电熔炼；铁液熔化至熔融状态时，分 3 批次加入剩余增碳剂（注意搅拌时防止增碳剂漂浮），最后加入剩余的生铁和废钢升温（控制温度）。

2.3 碳含量调整

铁液化清后升温至 1 500 ℃±10 ℃时保温 8~10 min 取样，在炉前用光谱分析碳含量及其它成分调整。碳量不足时补加增碳剂充分搅拌使其吸收，碳含量较高时可加入废钢降低碳量（注意温度变化）。其它成分可用废钢或铸造生铁调整，但同时检测碳量增减。当碳含量及其它成分调整合格后进行球化处理（炉外浇包）。

2.4 球化处理

将铁液包底部筑成堤坝式，在堤坝一侧加入全部球化剂，再加入 70%的孕育剂和适量的覆盖剂（珍珠岩或草木灰），用 3~6 mm 钢板盖住（钢板小于3 mm 时可覆盖两层），出铁时铁液（温度 1470~1490 ℃）不能直冲球化剂一端，以防止剧烈反应而加速球化剂烧损；当铁液流出 2/3 时，静置片刻（1~3 min）让球化剂充分反应使铁液球化，同时加入 20%的孕育剂，冲入剩余全部铁液，静置 2~3 min 使铁液完全球化杂质上浮，然后扒去铁液表面渣滓，再用干净的保温材料（珍珠岩或草木灰）覆盖铁液表面准备浇注；剩余的 10%孕育剂浇注时瞬时孕育。

2.5 炉前检验

采用炉前快速热分析仪或者光谱分析球化铁液镁含量检测球化质量，若无上述检测仪器，可用传统方法宏观判断检测，将球化后等待浇注的铁液浇注三角试片，等三角试片温度降至暗红色（550~650 ℃）时用水激冷，然后敲断三角试片观察其断口。球化合格的三角试片在敲击折断时有清脆的钢音声，断口平整呈现银白色，组织细密，晶粒分布均匀，中心部位有缩孔，三角试片两侧及顶部缩凹，白口宽度为 3~7 mm。若白口宽度大于 7 mm 时，适量加入孕育剂降低白口宽度；若白口宽度小于 3 mm，三角试片断口呈深灰色或灰黑色，组织不细密，晶粒不明显，证明球化不良或孕育不充分，应回炉处理或者浇注其它不重要铸件。

2.6 浇注

炉前检验合格后的球墨铸铁液，首先浇注力学性能试样（基尔试样），然后快速浇注铸件，浇注温度为 1 350~1 400 ℃，薄壁铸件取上限，厚壁铸件取下线。浇注温度过低铸件容易在壁厚较薄之处产生冷隔缺陷，浇注温度过高铸件容易在较厚大部位产生球化衰变。因此，球化处理合格的铁液必须在 10 min 之内完成浇注，否则会发生球化衰退现象。

2.7 制样方法

浇注 Y 型单铸试样，在铸态下进行力学性能检测，试验中经常出现拉伸试样断于标距外现象，试验无效，需重新送样。通过查阅标准，ISO 1083-1987《球墨铸铁分级》及 GB/T 1348-1988《球墨铸铁件》中对平行段和夹持段之间过度圆角均要求为 R20 mm，但是在 ISO 1083-2004《球墨铸铁分类》及 GB/T 1348-2009《球墨铸铁件》未规定该圆角具体数值。如果圆角度数过小，进行拉伸试验时该部位容易应力集中发生标距外断裂。因此对拉伸试样尺寸 R 值进行规定（如图 1），其他尺寸按照 GB/T 1348-2009《球墨铸铁件》之规定执行，据此进行试验后拉伸试样断于标外次数明显降低。

3 实验结果与分析

3.1 化学成分

原铁液成分、配料成分（设计）、控制成分（目标）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

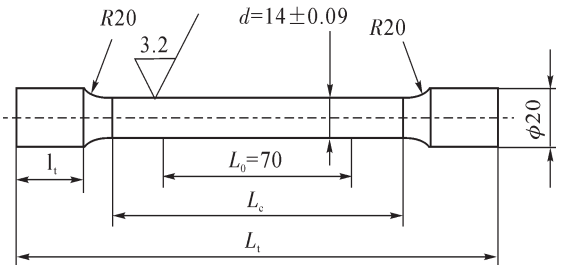


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 The size of tensile specimen

见表 1。对于珠光体型球墨铸铁应适当提高碳当量，增加铁液流动性，减少铸件发生缩松缩孔倾向，碳当量选择在 4.3%~4.6%。根据“高碳低硅”的原则，碳含量控制在 3.6%~3.8%，Si 含量控制在 2.0%~2.3%。

锰能够显著提高珠光体含量，提高铸件力学性能，此外由于锰原子扩散速度低于碳的扩散速度，共晶转变结束后晶界上容易形成共晶碳化物，降低铸件塑韧性，一般认为对于厚壁件含锰量应控制在 0.2%以下[11]。也有研究认为，在合适的熔炼与孕育状况下，锰含量可以提高至 0.8%[12]。由于我厂使用的废钢多为 16Mn、压力容器用 Cr、Mo 钢等中高锰钢，大比例加入废钢铁液中锰含量范围约为 0.6%~0.9%，根据我厂实际生产经验，锰含量≤1.0%时未出现碳化物，如果出现时可通过正火热处理进行消除。

磷是铸铁中有害元素，共晶转变形成的脆性相磷共晶能降低材料塑韧性，我公司使用的废钢中磷含量在 0.030%~0.050%。废钢增碳法熔炼的铁液中硫含量很低，一般在 0.007%~0.020%，硫与球化元素(Ce、Mg、La)有较强亲和力，影响球化效果，但是微量的硫与镁、稀土的化合物可作为石墨的形核核心，能够促进点状石墨的形成。

铜是促进石墨化元素，也能提高珠光体体积分数，一般加入 0.4%~0.5%。为适当提高珠光体体积分数，可考虑加入微量锑元素，锑是强烈促进珠光体化元素，但是会降低铸件伸长率，增加铸件脆性，经过多次试制发现效果较差，不建议加入。

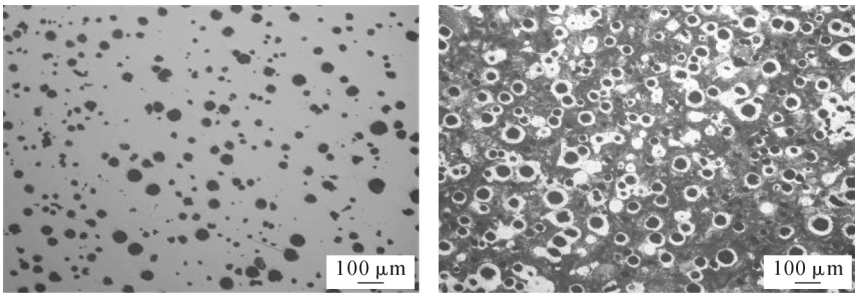
为防止球化衰退，残余镁含量应在 0.03%~0.06%，稀土元素含量为 0.03%~0.05%。

3.2 金相检测

图 2 分别为抛光态和腐蚀后球墨铸铁金相照片，从图中可以看出，石墨十分圆整且分布均匀，球化级别为 2 级，石墨大小为 6 级，球化效果良好。这主要是由于大比例加入废钢后，铁液中遗传的不良石墨减少，增碳剂在铁液中作为形核核心，通过良好的球化孕育保证石墨长大，通过瞬时孕育手段避免了球化衰退现象。通过腐蚀后金相照片可以看出，牛眼状铁素体分布较少，珠光体含量≥95%，废钢中夹杂物、有害元素含量较少，无反球化元素，因此没有出现碳化物、磷共晶等有害相，保证了基体组织具有良好力学性能。

3.3 力学性能

统计了 5 炉次力学性能检测数据如表 2 所示。由此可见，采用废钢增碳法替代铸造生铁生产的球墨铸铁件力学性能(铸态)完全能够满足国家牌号标准要求。相对于传统生铁熔炼球墨铸铁其强度越高，伸长率越低的缺点，废钢增碳法生产的球墨铸铁既具有高强韧性又具有高塑性，抗拉强度为711~769 MPa，伸长率为 7.5%~10%，硬度在 230~260 HB，机加工性能良好，具有优异综合力学性能。这是由于废钢的纯净度很高，与生铁相比其 P、S 含量低、夹杂物少，冶



(a)抛光态　　(b)腐蚀态

图 2 石墨大小与形貌

Fig.2 Graphite size and morphology of sample

表1 化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of casting

项目	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	RE	CE
原铁液成分	3.6~3.9	0.3~0.7	0.6~1.0	≤0.070	≤0.050	/	/	/	
目标成分	3.6~3.8	2.3~2.5	0.6~0.9	≤0.050	≤0.030	0.4~0.5	0.03~0.06	0.03~0.05	4.3~4.6
检测成分	3.70	2.30	0.70	0.035	0.012	0.44	0.043	0.049	4.39

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 力学性能
Tab.2 Mechanical properties of casting

项目	Rm≥(MPa)	$R_{p0.2}$≥(MPa)	A≥(%)	HBW
GB/T1348-2009	700	420	2	225-305
第 1 炉	722	487	10	248 235 240
第 2 炉	711	525	8	237 232 236
第 3 炉	748	466	8	257 255 256
第 4 炉	757	534	9	246 245 245
第 5 炉	769	570	7.5	236 232 232

金反应更充分，原始组织中没有不良石墨相，在此基础上孕育能获得更加细小圆整的石墨球及发达的奥氏体晶枝骨架。此外，废钢中 Mn、Mo、Ni 等合金元素也能起到细化珠光体、强化基体作用，因而得到的铸件力学性能很高。Cu 更能促进珠光体形成并细化珠光体，有利于共晶石墨化，细化和圆整石墨形态，球化率越高，伸长率也越高。

4 成本分析

用废钢（80%以上）增碳法替代铸造生铁生产的球墨铸铁，目前已大批量生产出石油钻采装备配件“十字头、衬板、轴套”等铸件，此工艺与铸造生铁为主要原材料生产的球墨铸铁件相比较，生产成本降低 954 元 /t。由于废钢中 Mn 含量较高，能够提高珠光体数量，因此废钢增碳法生产球墨铸铁强度都很高，一般只适用于珠光体、铁素体–珠光体型球墨铸铁的生产，通过调整化学成分，生产的球墨铸铁铸态下就能能够满足 QT700-2、QT600-3、QT500-7 牌号性能要求，生产 QT800-2 以上牌号时必须进行正火热处理，因此废钢增碳法生产球墨铸铁力学性能优异，应用范围广泛。

5 结论

废钢增碳法生产的球墨铸铁既具有高强韧性同时具有高塑性，抗拉强度为 711~769 MPa，伸长率为 7.5%~10.0%，球化级别达到 2 级以上，石墨大小为 6 级，珠光体含量≥95%，无碳化物、磷共晶等有害组织，具有优异综合力学性能。已经大规模应用于实际生产，显著降低生产成本，为企业带来良好经济效益。

参考文献：

[1] 苏义祥，马历民，胡克潮. QT700-2 的质量控制[J]. 机械研究与应用，2000(3): 24-25.
[2] 赵子文. 锑高强度球墨铸铁生产实践 [J]. 铸造，1994，43(10): 34-36.
[3] 郑兴睿，苑振涛，王永振. 合成球墨铸铁生产工艺研究及应用[J]. 热加工工艺，2015，44(9): 72-74.
[4] 吴元立，洪良林，阚正军. 采用废钢通过增碳生产球铁活塞环[J]. 内燃机与配件，2014(2): 39-42.
[5] 周亚军，韩贵恩，刘志虎. 废钢化球墨铸铁熔炼工艺[J]. 金属加工(热加工)，2013(7): 72-73.
[6] 崔炜，何春华，黄和江. 废钢增碳工艺的特点和控制方法[J]. 中国铸造装备与技术，2012(6): 40-42.
[7] 周亚军，韩贵恩，刘志虎. 废钢用于球铁熔炼工艺[J]. 铸造技术，2012，33(10): 1240-1241.
[8] 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.
[9] 俞卫全. 高韧性合成球墨铸铁的生产 [J]. 现代铸铁，2005(4): 34-36.
[10] 杨群收，田永富. 合成铸铁的熔炼及增碳剂的使用[J]. 金属加工(热加工)，2017(11): 46-49.
[11] 谢来旺，蔡坤山，范晓明，等. 铸态高强度高伸长率合成球铁的试验研究[J]. 铸造技术，2019，40(4): 380-38.
[12] 李翠英，卢宝胜，王成刚. 高品质球墨铸铁的生产技术[J]. 汽车工艺与材料，2015(1): 45-49.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1、重大铸件生产技术；2、耐热耐磨产品生产技术；3、耐蚀耐磨产品生产技术；4、耐磨产品生产技术；5、铸造工艺设计；6、铸造用辅助产品生产技术；7、铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。
邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net