熔模铸造高性能QT600-10的研究与应用

陈娟，马波，李忠，柳建国，金柱

摘要： 采用熔模铸造工艺，通过合理成分设计、铁液净化、合金元素强化基体组织、完善球化及孕育处理等工艺，可以实现稳定生产铸态高性能QT600-10，在铸态条件下，抗拉强度≥600MPa，断后伸长率≥10%。

关键词：熔模铸造；合金化；铸态；高强度；高韧性

球墨铸铁具有较好的铸造性能、减震性、密度小及收缩倾向较小等优势，得到了广泛的应用。对于高性能QT600-10，已有的研究都倾向于砂型铸造，对于采用熔模铸造生产QT600-10的文献鲜有报道。本文主要研究采用熔模铸造工艺生产高强度、高韧性QT600-10，旨在解决熔模铸造铸钢件缩孔、缩松等缺陷，提高产品内在质量，为推广熔模铸造生产高性能球墨铸铁提供参考。

一、试验内容

1. 化学成分设计依据

（1）碳含量　其选择应从保证球墨铸铁具有良好的力学性能和铸造性能两个方面考虑。碳含量高，铁液的流动性好，凝固析出石墨数量越多，石墨球数多，石墨化膨胀体积增大，减小缩孔体积、缩松面积，使铸件致密[1-2]；但含碳量过高，降低缩松的作用不明显，反而会出现严重的石墨漂浮。

（2）硅含量　硅是石墨化元素，促进石墨析出，可消除自由渗碳体，减小白口倾向，增加石墨化膨胀力，便于获得铁素体基体；硅固溶到铁素体中能强化铁素体基体，使球墨铸铁具有较好的塑性和韧性。但当硅含量超过一定量后，会引起铁素体晶格畸变，增加了球墨铸铁的脆性[3]。

（3）锰含量　锰是稳定珠光体的元素，可以提高铸件的强度和硬度，降低塑性、韧性。锰含量越低，基体中得到的铁素体量越多，断后伸长率增大[4-6]。

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，易在共晶团边界形成碳化物，降低铸件的力学性能。

（4）铜含量　铜是中等促进石墨化元素，它能稳定奥氏体，提高奥氏体的稳定性及石墨的圆整度。在共析转变时，铜显著细化和稳定珠光体，其促进珠光体的能力为锰的3倍，可抑制铁素体的形成。铜在共晶转变时，促进石墨化，可减少或消除游离渗碳体的形成[7-8]；对基体起固溶强化、沉淀硬化的作用；同时随着铜含量的增加，球墨铸铁抗拉强度和硬度相应增加[9-10]，但断后伸长率有所下降。

根据化学元素对球墨铸铁力学性能及铸造性能的影响，经过多次工艺试验和生产实践表明，铸件的化学成分控制见表1、表2。

2. 球化处理

采用一次出铁冲入法进

表1　原铁液化学成分（质量分数）　（%）

炉次	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ce
1	3.67	1.72	0.228	0.029	0.005	0.002	0.570	0.005
2	3.88	1.76	0.184	0.022	0.011	0.002	0.532	0.003
3	3.65	1.84	0.250	0.022	0.023	0.002	0.570	0.022
4	3.61	1.74	0.237	0.034	0.004	0.003	0.560	0.010

行球化处理，球化剂选用FeSiMg6RE2，其化学成分见表3，粒度为10~30mm，加入量为处理铁液重量的1.2%～1.4%，球化处理温度控制在1490～1530℃，球化反应时间在45～70s。

3. 孕育处理

为增强球化孕育效果，提高球化等级，实现QT600-10性能的稳定达成，采用三次孕育处理方式，球化处理时选用粒度为4~8mm的FeSi75孕育剂进行初次孕育，加入量为处理铁液重量的0.4%；转包时选用粒度在4~8mm的钡硅铁孕育剂，通过冲入法进行二次浇包孕育，加入量为铁液重量的0.4%；浇注时选用粒度在2~4mm的钡硅铁进行三次型内孕育，孕育量为模组重量的0.2%。钡硅铁化学成分见表4。

4. 试验方法

根据GB/T1348—2009《球墨铸铁件》标准，试验时采用计算机控制电子30t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、图2所示。金相检验依据GB/T9441—2009球墨铸铁金相检验标准执行。

二、结果与分析

将表2每炉各取2个试样做金相，表5为不同炉次熔模铸造单铸试块金相组织检测结果。

由表5可以看出，前3炉石墨尺寸较小且球化效果较好，珠光体含量为35%~55%。与前三炉相比，第4炉珠光体含量较高。表6为不同炉次试棒力学性能测试结果，由表6并结合表5金相组织可以看出，熔模铸造铸态QT600-10时，当球化等级为1~3级，珠光体含量为35%~55%时，都能保证QT600-10的性能要求，但当珠光体含量大于55%时，抗拉强度升高，但断后伸长率降低，不能满足性能要求。在保证基体具有一定比例的珠光体和铁素体基体时，应尽量提高球化等级，细化石墨。

图3是熔模铸造铸态QT600-

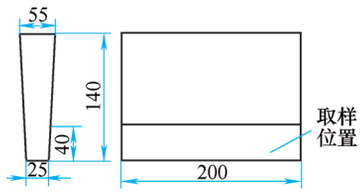


图1 Y形单铸试块

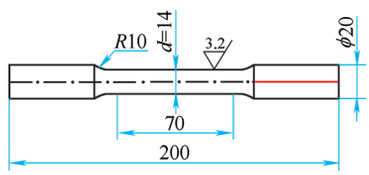


图2 拉伸试样的形状和尺寸

表2 球化孕育处理后铁液化学成分（质量分数） (%)

炉次	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ce
1	3.51	2.78	0.213	0.022	0.002	0.046	0.54	0.02
2	3.48	2.8	0.249	0.028	0.005	0.047	0.52	0.456
3	3.42	2.84	0.245	0.029	0.007	0.049	0.55	0.024
4	3.49	2.92	0.252	0.036	0.001	0.046	0.54	0.018

表3 球化剂化学成分（质量分数） (%)

Mg	RE	Si	Ca	MgO	Fe
5.0~7.0	1.5~2.5	35~44	2.0~3.0	＜1.0	余量

表4 钡硅铁孕育剂化学成分（质量分数） (%)

Si	Ca	Al	Ba	Fe
63~68	0.8~2.2	1.0~2.0	4~6	余量

表5 试样金相组织结果

编号	球化等级	石墨大小等级	珠光体含量（%）	铁素体含量（%）
1-1	1~2	6~7	35	65
1-2	2	7	45	55
2-1	1~2	7	35	65
2-2	1~2	6~7	45	55
3-1	2	6~7	55	45
3-2	2	6	45	55
4-1	2	6	65	35
4-2	2	6	65	35

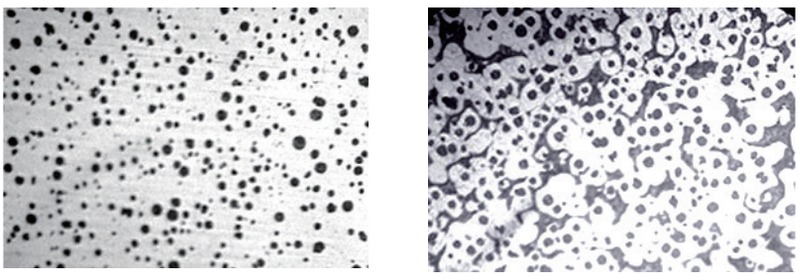
表6 球墨铸铁的力学性能

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率（%）
1	435	645	11.5
2	465	635	14.5
3	415	625	13
4	505	720	5.5

10石墨大小与分布的金相组织。可以看出，铸态QT600-10球墨铸铁中的石墨球数多、细小且分布均匀。其球化等级在2级，球化率在95%以上，石墨球的大小为6级。其组织是牛眼状铁素体和细片状珠光体为主的混合基体，珠光体含量为45%。

活性硅即在铁液中未完全溶解的起合金作用的硅，这部分硅能起到孕育作用，因为完全溶解到铁液中的硅不能作为石墨形核质点，起不到孕育效果[11-12]。本文采用3次孕育方式，孕育作用显著，这是因为采用3次孕育方式，随着孕育时间的延长，熔体中活性硅的含量降低较小，从而促使形核质点增多，增加了石墨晶核，导致石墨球数增多；石墨球数多可缩短碳的扩散距离，共析转变时，加速奥氏体向铁素体和石墨转化，使铁素体增加，从而抑制了珠光体及碳化物的形成，因此在QT600-10的球墨铸铁中具有较高的铁素体量，从而提高了断后伸长率。

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。但是由于球墨铸铁形成的石墨球数多，促进了铁素体的形成并使铁素体得到了细化。另外，在球墨铸铁中加入了一定量的铜，主要目的是使球墨铸铁在铸态下得到不同数量的珠光体，并使珠光体得到不同程度的细化和强化。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断后伸长率，提高抗拉强度，从而达到QT600-10的性能技术要求。



(a) (b)

图3 铸态QT600-10石墨形态与基体组织（×100）

三、结语

（1）熔模铸造QT600-10孕育方式采用“球化包孕育+浇包孕育+型内孕育”的三次孕育方式，球化级别可达到1~2级，球化率>95%。

（2）熔模铸造生产铸态QT600-10，珠光体含量控制为35%~55%为宜，应尽量提高球化等级和石墨大小等级。

（3）合理控制化学成分，严格并精细控制球化与孕育工艺操作，能够实现熔模铸造高性能QT600-10的稳定生产。

参考文献

[1] 陈忠士等.铸态高强高韧性QT600-10合成球铁的研制[J].福建工程学院学报，2015，13(4):342-345.

[2] 李蒙.铸态QT600-10球铁的试制.中国铸造活动周文集[C]，2009.

[3] 国林钊.高强度高伸长率球墨铸铁材质(QT700-10)研究[D].济南：山东大学，2015.

[4] Sisak. The Influence of Silicon and Boron on Tensile Properties of Ductile Iron[J]. Livarski vestnik，2012，59:68-79.

[5] 徐慧民.合金化元素对铸态球墨铸铁性能的影响[J].金属铸锻焊技术，2008，37(21):47-49.

[6] 李冬琪，徐德民，等.高端球墨铸铁件的研究与应用[J].现代铸铁，2015，5:26-31.

[7] 曾艺成等.球墨铸铁生产技术的新进展[J].黑龙江冶金，2014,34(5)：3-13.

[8] 中国机械工程学会铸造分会.铸造手册[M].北京：机械工业出版社，2006.

[9] 万仁芳.浅谈近年来铸铁件的发展[J].现代铸铁，2014，3:15-24.

[10] 柯志敏.关敏权.铸态QT600-10球墨铸铁的研制[J].现代铸铁，2007（6）21-23.

[11] 原野，球墨铸铁孕育处理优化控制方法研究[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2014.

[12] 蔡启舟，等.铸造合金原理及冶炼[M].北京：化学工业出版社，2010.

作者简介：陈娟、马波、李忠、柳建国、金柱，东风精密铸造有限公司。

MW 20160618