

QT350-22AL 厚大断面低温球墨 铸铁件熔炼生产工艺

潘密, 邵斌, 杨宗明, 何程, 杨华, 刘伟

(武汉重型机床集团有限公司, 湖北武汉 430205)

摘要: 研究了QT350-22AL锥形支撑厚大断面低温球铁件。通过合理选择、控制化学成分, 以及采用轻、重稀土球化剂配合使用, 采取现场倒包球化和多次孕育处理熔炼生产工艺技术, 可以稳定生产出QT350-22AL厚大断面低温球铁锥形支撑铸件。

关键词: QT350-22AL; 厚大断面; 低温球铁

低温球铁是一种具有较高强度与高伸长率的功能材料, 在众多工业领域中有着不可替代的作用, 广泛应用于寒冷地区石油、天然气和石化设备配件, 工程机械、机车及车辆配件, 高铁及风力发电设备等^[1]。

锥形支撑属于低温球铁铸件, 是风力发电设备的主要应用部件, 其要求具有超低温状态下(-40℃)低冲性能稳定的特点, 根据风电材料特性及GB/T 1348—2009标准要求, 铸态下壁厚大于60 mm小于200 mm的铸件要求附注试块厚度70 mm, 附注试块抗拉强度 ≥ 320 MPa, 屈服强度 ≥ 220 MPa, 伸长率 $\geq 15\%$, -40℃的条件下冲击功平均要求 ≥ 10 J等关键性能指标要求对于熔炼生产工艺技术本身就是一种挑战, 且该铸件平均壁厚达80 mm, 法兰处壁厚更是达到300 mm, 属于厚大断面球铁, 熔炼工艺亦要控制厚大断面处石墨漂浮、石墨破碎、漂浮夹渣及石墨畸变的难题^[2-6]。

针对上述难点, 为生产出性能稳定且质量高的超低温球铁铸件, 本文通过对化学成分, 以及轻、重稀土球化剂, 采取现场倒包球化和多次孕育处理等熔炼生产工艺技术进行了优化和探讨, 通过实际生产和试块性能检验结果发现, 该生产工艺可以稳定地生产出厚大断面低温球铁锥形支撑铸件, 为厚大断面低温球铁铸件熔炼生产提供技术理论支撑。

1 低温球铁铸件化学成分的选择与控制

(1) 碳。球铁中C高能促进铸件石墨化而增加石墨球数, 有利于减小白口倾向; 亦可以提高铁液的流动性、充型能力, 同时降低铸件的缩松缺陷倾向, 并且根据文献资料实践得知^[7], 低温球铁铸件的终C含量应控制在3.5%~4.0%。

(2) 硅。Si是强烈促进石墨化元素, Si易于形成铁素体、同时可减少渗碳体产生的元素; 并且能够固溶强化铁素体, 脆性作用较为明显, 为了获得20%以上的伸长率, 尽量降低Si含量^[8]。同时大断面球铁件过高的硅量容易产生破碎状石墨, 当Si小于2.0%时, 破碎状石墨会明显减少^[9], 同时为了稳定并保证低冲性能合格, 低温球铁铸件的原铁液Si含量应控制在0.6%~1.0%; 孕育后铁液终Si量应控制在1.7%~2.1%^[10], 综合上述因素终Si含量应控制在1.7%~2.0%。

(3) 锰。Mn降低奥氏体向珠光体转变温度, 促进珠光体形成^[11], 但容易在共晶团边界上产生偏析形成晶界碳化物而使基体组织脆化, 不利于提高球铁的韧性,

作者简介:

潘密(1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事铸铁合金及熔炼研究工作。
E-mail: ph8223422@163.com

中图分类号: TG143.5
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)09-1169-04

收稿日期:

2022-01-05 收到初稿,
2022-01-25 收到修订稿。

选择低Mn含量的高纯生铁，保证原铁液的含Mn量在0.2%以下。

(4) 磷。P属于有害元素，且容易偏析产生磷共晶，形成磷共晶的数量取决于含磷量^[12]，极剧恶化铸件的力学性能，越低越好。

(5) 硫。S属于有害元素，但研究表明球铁原铁液S不宜过低^[13]。为保证球化的良好，控制原铁液S量小于0.02%。

(6) 锑 Sb强烈促进形成珠光体，可细化球墨铸铁石墨球，尤其对大断面球墨铸铁有效^[14]，但球铁应严

格控制加入量，铁素体厚大断面球铁合理的加入量应控制在0.008%以下。

(7) 残留稀土和镁。球化过后的铁液中存在少量的残留稀土、镁是确保石墨成球状生长的前提条件，但是过高的残留量会导致球化后的铁液白口倾向增大，铸件易产生缩松及夹渣缺陷。因此适宜的残留稀土、镁的范围应分别控制在0.01%~0.03%，0.03%~0.05%。

结合实际生产条件，锥形支撑铸件的原铁液及球化后的铁液成分范围见表1。

表1 锥形支撑铸件的原铁液及球化后的铁液成分
Table 1 Composition of raw and spheroidized molten iron with conical support

铁液	C	Si	Mn	S	P	RE _残	Mg _残
原铁液	3.8~4.1	0.7~1.2	≤0.2	≤0.02	≤0.04		
球化后	3.5~4.0	1.7~2.0	≤0.2	≤0.02	≤0.04	0.01~0.03	0.03~0.05

2 低温球铁铸件铁液温度控制

铁液过热、静置有利于消除生铁中粗大石墨遗传性的影响，当温度高于1 500 ℃，可将过共晶石墨溶解到结晶临界半径以下，并使晶粒边界上的氧化物夹杂减少^[15]。因此实际生产选择在1 360~1 400 ℃扒渣取样对成分进行检测后并调整成分，保证原铁液成分合格后将铁液过热至1 500~1 540 ℃。

球化温度过高会导致球化剂剧烈烧损，球化温度过低会导致球化剂反应不完全造成球化不良，良好的球化温度有助于球化孕育反应的进行。实际生产采用现场倒包球化及多次孕育处理工艺，等待转运包包内的铁液温度降至1 400~1 450 ℃后，再将铁液倒入到球化包内进行球化处理。倒包球化能准确控制球化温度且对铁液有快速降温作用，缩短至浇注温度前的时间间隔，最大限度保留原铁液的自身形核率，同时这种倒包球化孕育工艺可对转运包内的铁液进行一定的孕育处理以及可在后续球化过程的中、后期提供多次孕育操作的空间，可以促使石墨球更圆、更细、更小。

对于厚大断面的球铁铸件应该采用适宜的浇注温度，浇注温度过高会使铁液液态收缩大导致缩孔缺陷，浇注温度太低会导致渣孔缺陷，实际生产中锥形支撑铸件的浇注温度控制在1 330~1 370 ℃。

3 低温球铁铸件原材料和加入时期

生铁中的杂质元素总量超过0.1%时会严重降低球化效果，尤其对Ti、V进行严格的控制，因此原材料必须选用微量元素较低的低合金废钢及石墨化增碳剂配合使用，以增加电炉熔炼铁液的石墨核心。公司生铁选用低杂质Q10生铁，加料是在熔炼后期加入，可以减

少熔炼过程中的晶核损失；废钢选用低锰的冲压边角料，在前期加入；回炉料选用本厂经抛丸处理的风电铸件的浇冒口，必须进行抛丸处理，于熔炼的中后期加入；增碳剂选用石墨化增碳剂，在炉内随废钢前期加入，并预留0.1%作为预处理；采用75硅铁后期调整炉内原铁液硅含量。

4 低温球铁铸件球化、孕育处理工艺

据资料，使用轻稀土球化剂和抗衰退能力强的重稀土球化剂相互配搭使用，较单一使用轻、重稀土球化剂球化效果好、石墨畸变少^[16-17]。因此实际生产锥形支撑铸件选用轻稀土球化剂和抗衰退能力强的重稀土球化剂相互配合作为球化剂使用，同时侧重浇注过程中的多次孕育是电炉熔炼工艺生产厚大断面球铁的重要过程和环节，最终确保铸件获得稳定的力学性能和金相组织。

4.1 低温球铁铸件球化剂及球化处理

球化剂加入量：球化剂的加入量范围为0.9%~1.3%，选择轻重稀土对半使用。生产厚大断面球铁为了匹配过热温度与球化温度的之间过大的差异以及最大限度保留原铁液的自身形核率，同时为了创建有利的多次复合孕育处理空间，实际生产中采用现场倒包球化及多次孕育处理工艺。

4.2 低温球铁铸件孕育剂及孕育处理

生产遵循多次少量复合孕育处理，孕育剂采用含2%~4%Ba的孕育剂，粒度5~15 mm，转运包内一次孕育处理加入量0.2%~0.4%；球化包内二次孕育处

理加入量为0.3%~0.6%；浇注座包内三次孕育处理加入量0.05%~0.15%；浇注瞬时孕育用含Ce孕育剂，粒度0.5~1.5 mm，使用漏斗沿铁液流加入，加入量为0.05%~0.2%。

4.3 实际低温球铁铸件生产结果

实际生产中在铸件厚壁处附注70 mm试块，采用WAW-300微机控制电液伺服万能试验机、XJG-04大型金相显微镜、ZBC2302-EC微机控制型低温全自动冲击试验机分别对附注试块试样进行力学性能、金相组织、低温冲击功检测，其结果列于表2，其中2[#]试样（腐蚀后）金相组织见图1所示。

由图1金相组织可以看出试块组织中石墨球细小、圆整、数量多，铁素体同样细小、数量多。由于采用

了轻稀土搭配重稀土及使用倒包球化和转运包孕育及后期多次复合孕育处理工艺，转运包的孕育处理为球化提供了一个良好的反应平台^[18]，球化剂中的Mg、孕育剂中的Si、Ba等元素与铁液中的氧、硫反应并形成大量的氧化物、硫化物由此可以形成石墨有效异质形核核心及基底，结合多次孕育大大提高石墨的有效形核率，提升石墨球数，即保证铸件的单位面积石墨球数，同时细化了铁素体，并与微量Sb合金一起作用最终可以防止厚大断面处石墨产生畸变。由表2可以看出，70 mm厚的附注试块的力学性能在370~430 MPa，屈服强度在250~320 MPa，伸长率在15%~18.5%，低温冲击功在12~14 J，其各项性能都符合并超越GB/T 1348—2009国标要求，即通过合理选择、控制化学成分，以及采用轻、重稀土球化剂配合使用，采取现

表2 铸件附注试块金相组织及力学性能统计表

Table 2 Statistics of metallographic structure and mechanical properties of casting test block

试验号	零件号	石墨形态	石墨等级	珠光体/%	硬度HBW	抗拉强度/MPa	伸长率/%	屈服强度/MPa	平均冲击功/J (-40 °C ± 2 °C)
7	105 [#]	2	7	5	129	425	16.5	275	13.8
9	106 [#]	2	7	5	129	415	16	270	13.2
230	107 [#]	2	7	5	143	435	15	285	12.1
213	108 [#]	2	7	5	143	425	16.5	275	12.5
231	109 [#]	2	7	5	143	430	16	280	13.1
214	110 [#]	2	7	5	143	405	16.5	265	13.7
232	111 [#]	2	7	5	143	415	17.5	270	12.8
215	112 [#]	2	7	5	143	410	16	265	14.1
295	113 [#]	2	7	5	129	410	15.5	265	13.6
344	114 [#]	2	7	5	129	410	16	265	13.5
345	115 [#]	2	7	5	129	400	16.5	260	12.7
347	116 [#]	2	7	5	131	420	15	275	13.2
346	117 [#]	2	7	5	131	425	15	280	13.8
343	118 [#]	2	7	5	131	420	15	275	12.7
513	119 [#]	2	7	5	129	390	18	255	13.2
514	120 [#]	2	7	5	130	425	16	275	12.2
3554	2 [#]	2	7	5	123	376	18.5	320	15.9

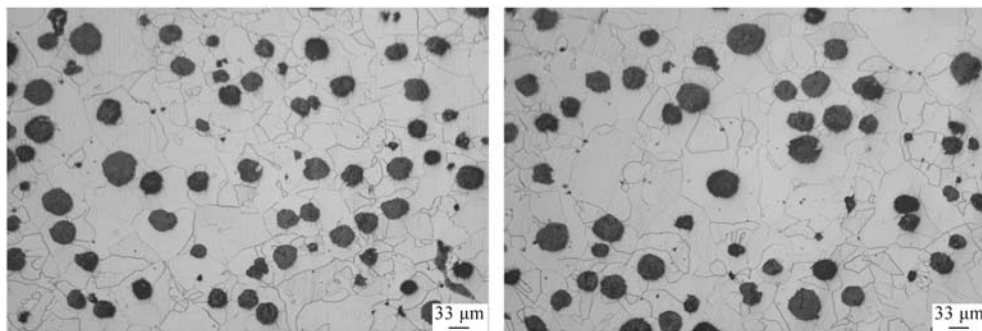


图1 2[#]试块（70 mm）金相组织照片

Fig. 1 Metallographic structure photo of 2[#] test block (70 mm)

场倒包球化和多次孕育处理工艺,能稳定地生产出QT350-22AL厚大断面低温球铁锥形支撑铸件。

5 结论

(1) 倒包球化及多次孕育处理工艺,能准确控制球化温度且对铁液有快速降温作用能最大限度保留原铁液的自身形核率,结合多次的孕育可以促使石墨球更圆、更细、更小。

(2) 对球铁球化处理 and 孕育处理技术的掌握和

提高,利用Si、Ba、Mg等元素降低球铁铁液中的O、S并形成石墨有效异质形核核心及基底,同时复合微量Sb,是防止厚大断面处石墨产生畸变的重要控制工艺。

(3) 通过合理选择、控制化学成分,以及采用轻、重稀土球化剂配合使用,采取现场倒包球化和多次孕育处理工艺,在实际中生产出了合格的QT350-22AL锥形支撑厚大断面低温球铁件。

参考文献:

- [1] 曾艺成, 马敬仲, 丁建中. 低温铁素体球铁及其在轨道交通上的应用 [C]//中国铸造行业高层论坛. 中国铸造协会, 2013.
- [2] 马敬仲, 曾艺成. 厚大断面球墨铸铁件生产中若干问题的探讨 (1) [J]. 现代铸铁, 2020, 40 (1): 1-5.
- [3] 王承辉, 徐怀志, 李得文, 等. 厚大球铁件生产技术的探讨 [J]. 铸造, 2012, 61 (11): 1336-1339.
- [4] 沈闯, 刁晓刚, 于志斌, 等. Z字形厚大断面球墨铸铁平台的生产实践 [J]. 铸造, 2019, 68 (5): 488-491.
- [5] 刁晓刚, 魏伟, 沈闯, 等. 厚大断面球墨铸铁端盖的生产实践 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 71-74.
- [6] 王强, 吴铁明, 蒋毓良. 1 000 MW二次再热汽轮机特大型球墨铸铁件中压外缸的铸造 [J]. 铸造, 2016, 65 (5): 424-427.
- [7] 彭建中, 刘玲霞, 杨忠贤. 大型风电球墨铸铁轮毂质量的控制 [J]. 铸造, 2010, 59 (9): 969-972.
- [8] 周恬武, 赖海萍, 胡艳军. 工艺因素对铸态高韧性球铁伸长率的影响 [J]. 现代铸铁, 2004 (1): 13-16.
- [9] CAMPOMANES E. Effects of minute additions of antimony on structure and properties of ductile iron [J]. Transaction of AFS, 1971, 79: 57-62.
- [10] 刘泳. 2 MW风电轮毂低温球铁的生产工艺 [J]. 中国铸造装备与技术, 2013 (4): 42-47.
- [11] 段汉桥, 韦世鹤, 肖理明, 等. 厚大断面球铁生产中的几个问题 [J]. 中国铸造装备与技术, 2001 (3): 7-11.
- [12] 吴德海. 球墨铸铁 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [13] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册: 第一卷 铸铁 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [14] 陆文化, 李隆盛, 黄良余. 铸造合金及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 39-40.
- [15] 王丽萍, 李大勇, 郭二军, 等. 厚大断面RE—Mg球铁喷粉净化及球化效果的研究 [J]. 铸造技术, 2007, 28 (7): 899-903.
- [16] 周恬武, 邵斌, 刘金水, 等. 大断面球铁件电炉熔炼工艺及石墨畸变机理研究 [J]. 铸造, 2012 (8): 908-916.
- [17] 周建祥, 邓国山, 潘密, 等. 铸态厚大断面QT700-3铸件的生产实践 [J]. 现代铸铁, 2012 (1): 28-30.
- [18] 潘密, 张杰, 陈春生, 等. QT400-15A大型鼓风机铸件的生产工艺 [J]. 现代铸铁, 2020 (4): 1-3.

Smelting Process of QT350-22AL Heavy Section Ductile Iron Castings

PAN Mi, SHAO Bin, YANG Zong-ming, HE Cheng, YANG Hua, LIU Wei
(Wuhan Heavy Duty Machine Tool Group Corporation, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract:

QT350-22AL conical supported heavy section low temperature nodular iron castings were studied. Through reasonable selection and control of chemical composition, combined use of light and heavy rare earth spheroidizing agents, on-site ladle spheroidizing and multiple inoculation melting production technology, QT350-22AL thick large section low temperature ductile iron conical support castings can be stably produced.

Key words:

QT350-22AL; thick large section; low temperature ductile iron