● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.005

大断面重型球墨铸铁件电弧炉熔炼的生产实践

张亮亮,李克锐,卫东海,李增利,赵竟翔
(郑州机械研究所有限公司,河南 郑州 450001)

摘　要:介绍了采用电弧炉生产大断面球墨铸铁件的铸造工艺及生产过程,通过铸造过程数值模拟软件预测分析了凝固时间和铸造缺陷,确定了冷铁尺寸及布置。结果表明,采用高纯生铁、废钢等优质纯净的原材料、严格控制铁液温度和化学成分、合理的球化处理和强化孕育等技术措施,获得组织和性能符合要求的大断面球墨铸铁铸件。

关键词:电弧炉;大断面;球墨铸铁;数值模拟

中图分类号:TG256　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)04-0327-04

Practice of Electric Arc Furnace Melting of Large Section Heavy Ductile Iron Casting

ZHANG Liangliang, LI Kerui, WEI Donghai, LI Zengli, ZHAO Jingxiang
(Zhengzhou Research Insitute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The casting technology and production process of large section ductile iron produced by electric arc furnace are introduced. The solidification time and casting defects were predicted and analyzed by numerical simulation software of casting process. Determine the size and layout of the chills. The results show that the large-section ductile iron castings with satisfactory microstructure and performance can be obtained by using high purity raw materials such as pig iron and scrap steel, strict control of temperature and chemical composition of molten iron, reasonable spheroidization treatment and strengthened inoculation.

Key words: electric arc furnace; heavy-section; ductile iron casting; numerical simulation

近年来,随着风电、核电等清洁能源的发展,厚大断面球墨铸铁件例如风电轮毂、底座、核废料罐等产品的市场需求和质量性能要求明显增加,其研究和生产取得显著进展[1-3],作者单位承担了某核能开发科研项目中"大型球墨铸铁乏燃料容器铸件制造技术研究"相关研究任务,并设计了环形球墨铸铁装置,用于百吨级核废料罐的研制,该环形装置材质为 QT400-18,最大壁厚 330 mm、重量约 33 t,属于大断面重型球墨铸铁件,其壁厚比较均匀,结构对称,最大轮廓外圆尺寸 3 675 mm,总高度 1 344 mm,有 52 个加强筋,如图 1 所示。大断面球墨铸铁件壁厚大,凝固时间长,球化衰退严重,尤其在热节部位或壁厚中心,易出现石墨畸变、石墨粗大等缺陷,对铸件性能产生不良影响[4],本文介绍了采用电弧炉熔炼大断面球墨铸铁环形铸件的生产过程,其凝固时间控制、铸造工艺设计、铁液的重量、成分与温度控制、球化与孕育处理等是生产中的关键问题。

1　铸造工艺设计

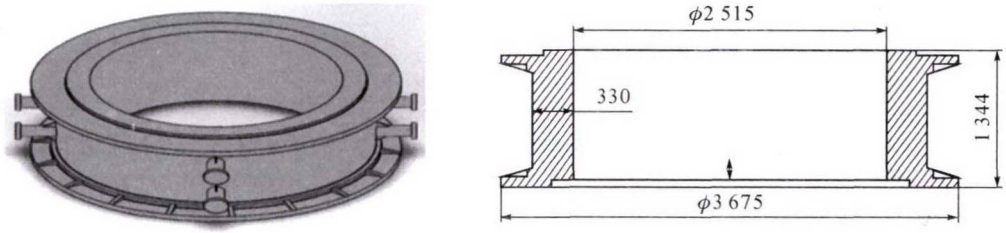
1.1　浇冒口系统设计

根据环形铸件的结构特点,浇注系统采用底注开放式,截面比确定为 $\sum A_{内}:\sum A_{横}:\sum A_{直}=2.0:1.5:1.0$,依据阻流截面法[5]计算直浇道、横浇道、内浇道的尺寸,采用陶瓷管设置浇注系统,浇道采用过滤网、浇口均采用挡渣装置进行挡渣;冒口依据经验比例法[5]进行设计,铸件顶部采用缩颈保温冒口,沿圆周均布,保证铸件补缩均匀。环形铸件内外圆均设置冷铁,冷铁厚度尺寸在 280~320 mm 内确定[5],保证均衡凝固、增加铸件的凝固速度、缩短凝固时间,并均匀分布于铸件厚壁处,减少铸件在凝固过程中的应力集中;图 2 是浇注系统、冒口和冷铁分布。

1.2　铸造工艺模拟分析

在不同厚度冷铁的条件下,采用华铸 CAE 软件对环形铸件进行凝固过程数值模拟与缩孔缩松缺陷分析预测,确定冷铁厚度并分析工艺的合理性。图 3

收稿日期:2020-03-13
基金项目:国家核能开发科研项目"球墨铸铁乏燃料运输容器研制"
作者简介:张亮亮(1991-)河北邯郸人,硕士研究生.主要从事铸造合金及熔炼,铸造工艺及设计等方面的工作.电话 13838005239,E-mail:zlliang1225@163.com
通讯作者:李克锐(1963-),河南郑州人,博导,研究员.主要从事铸造合金材料技术与装备方面的科研与生产工作.E-mail:zrimpc@126.com



(a)铸件三维图　　(b)铸件主要几何尺寸

图 1 铸件几何形状和主要几何尺

Fig.1 Casting geometry and main geometry dimensions

图 2 环形铸件浇注系统、冒口及冷铁分布示意图

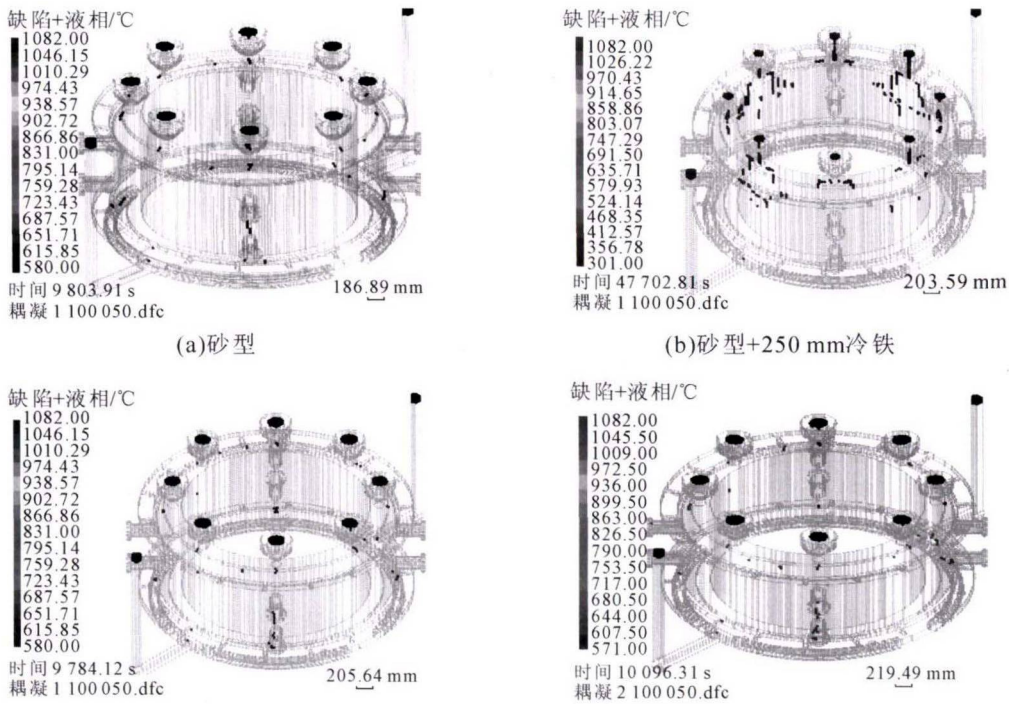
Fig.2 Distribution diagram of casting system, riser and chillers for circular casting

是凝固过程与铸造缺陷模拟分析结果，表 1 是不同厚度冷铁条件下的凝固时间，由表 1 可见：较砂型而言，设置冷铁可显著增加环形铸件的凝固速度，凝固时间可减少约 80%；冷铁厚度为 300 mm 时，其凝固时间最短，为 2.72 h，继续增加冷铁厚度、其传热和蓄热达到平衡，已起不到明显缩短凝固时间的效果。由图 3 可见，环形铸件在砂型工艺下的缩孔和缩松不仅数量多，而且分布范围广，设置冷铁后可以大幅度减少缩孔和缩松的分布和数量，冷铁厚度在 280 mm 和 350 mm 时铸件缩孔、缩松分布差别不大，冷铁厚度在 300mm 时缩孔和缩松的数量和分布最少。综上分析：采用厚度 300 mm 的冷铁。

2 铸造和熔炼工艺

2.1 造型工艺

采用自硬砂造型，根据铸件对称回转体的结构



(a)砂型　　(b)砂型+250 mm冷铁

(c)砂型+300 mm冷铁　　(d)砂型+350 mm冷铁

图 3 环形铸件的缩孔缩松倾向性(紫色代表缩松，黑色代表缩孔)

Fig.3 Shrinkage cavity and porosity tendency of ring casting

表1 环形铸件在不同冷铁厚度条件下的凝固时间

Tab.1 Solidification time of ring casting under different thickness of chill irons

冷却条件	砂型	砂型 +250 mm 冷铁	砂型 +300 mm 冷铁	砂型 +320 mm 冷铁	砂型 +350 mm 冷铁
凝固时间 /h	13.25	2.80(10 085 s)	2.72(9 784 s)	2.72(9 811 s)	2.72(9 803 s)

特点，采用沿圆周方向的分块组芯造型方式，冷铁之间间隔约 20~30 mm，刷石墨醇基涂料、厚度约 1.5 mm。铸件分上中下 3 箱造型，浇注系统及附铸试块（根据国标 GB/T 1348-2009 进行设计，厚度 70 mm）置于底箱、铸件置于中箱、冒口置于上箱，合箱后在 400 ℃下烘型 8 h 以上，使型腔温度达到 80~100 ℃。

2.2 熔炼处理工艺

铁液化学成分控制、熔炼质量直接影响着铸件品质，在环形铸件生产过程中需严格控制铁液成分及熔炼温度、处理温度、球化温度等，环形铸件的化学成分要求如表 2。铸件和浇冒口总重 36 t，熔炼金属液富余量按 10%进行计算，熔炼金属液总重量需近 40 t。采用电弧炉一次性熔炼这么大量的铁液，其成分、温度、重量的精确控制是熔炼过程中的难点，因此可按成分要求计算原料配比，并多次分批加入高纯生铁和废钢进行熔炼，每次熔清后对铁液进行除渣、测温和取样分析，炉料全部溶清后，根据成分分析结果，调整至符合要求。铁液过热温度控制在 1 490～1 500 ℃，出炉温度控制在 1 440~1 460 ℃。

表2 环形铸件的化学成分要求(%)

Tab.2 Chemical composition requirements of ring castings

C	Si	Mn	S	P	Mg
3.60~3.80	1.90~2.30	<0.10	<0.02	<0.03	0.04~0.06

采用 50 t 底漏式堤坝浇包进行浇注，在浇包底部堤坝一侧放置 1.4%的球化剂，在球化剂上面覆盖 0.4%的高钙钡孕育剂，再覆盖一层铁屑；堤坝另一侧放置 0.15%高钙钡孕育剂。出铁时，将铁液的 2/3 快速浇入浇包，进行球化反应和包内一次孕育，待球化反应结束后浇入剩余铁液，进行扒渣，然后在包内铁液表面加入 0.15%高钙钡孕育剂进行二次孕育，扒渣后取样并测量铁液温度，温度为 1 350 ℃左右时浇注，并采用硫氧孕育剂进行随流孕育。浇注完成后在浇口和冒口表面撒漂珠，待铸件温度冷却到 300 ℃以下时打箱清理。

3 结果与分析

采用电弧炉熔炼生产球墨铸铁，保证铁液重量、化学成分和温度是其关键和难点：

(1)为了保证铁液重量准确，除对炉料进行精确称量外，对电弧炉炉底和炉衬进行了修补处理，保证铁液能够全部倾倒出来。

(2)因电弧炉中铁液温度不均匀，每次测温之前先进行搅拌，同时严格控制电炉功率。

(3)在电弧炉熔炼过程中，为了保证成分符合要求，充分考虑了碳的烧损，并采用增碳剂增碳，炉料溶清 C 含量为 3.5%，通过增碳剂增碳，将 C 含量调整至 3.7%。

(4)为了保证底漏式堤坝浇包能够出铁完全，在堤坝中设置一个通道，使浇包内堤坝无浇口一侧的铁液可以顺利浇入铸型。

表 3 是处理后铁液的化学成分，从附铸试块上截取拉伸试样和金相试样，进行金相组织和力学性能检测，图 4 是检测结果。由表 3 和图 4 可见：其化学成分符合设计要求，球化率 90%，球化级别 2~3 级，石墨大小为 5~6 级，基体为全铁素体；其抗拉强度、伸长率等性能符合目标值，表中值为 3 个试样平均值，环形铸件毛坯壁厚 330 mm，超过了 GB/T1348-2009 规定的最大壁厚 200 mm，附铸试块的力学性能仍以 GB/T1348-2009 中铸件壁厚

表3 环形铸件的化学成分 w(%)

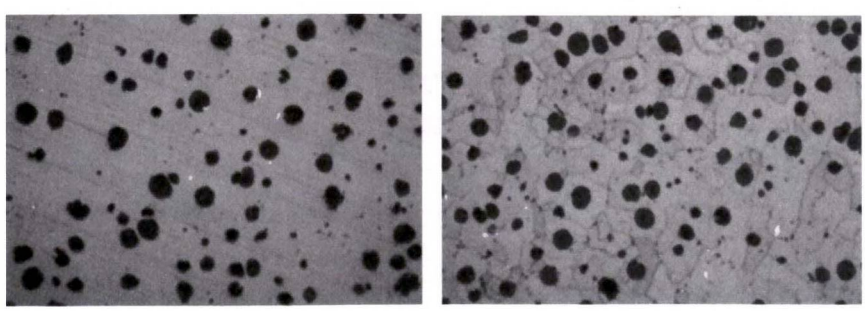
Tab.3 Chemical composition of ring castings

C	Si	Mn	S	P	Mg
3.71	2.20	0.09	0.019	0.022	0.05

表 4 环形铸件的力学性能

Tab.4 The mechanical properties of ring casting

	抗拉强度 /MPa	屈服极限 /MPa	伸长率 (%)	弹性模量 /GPa	备注
目标值	350	200	15	150	附铸
实测值	366	215	24.5	157	附铸



(a)石墨形态　　(b)基体组织

图 4 环形铸件附铸试块金相组织

Fig.4 Microstructure of cast-on test block

60～200 mm 为参考。对环形铸件进行机加工，未发现宏观缺陷，采用超声波探伤检测，未发现内部缺陷。最后获得的铸件成品如图 5 所示。

图 5 环形铸件成品
Fig.5 Finished ring casting

4 结论

根据大断面环形球墨铸铁件结构特点进行铸造工艺设计，基于数值模拟合理确定冷铁厚度及工艺的合理性；按照成分要求配置优质原辅材料，采用电弧炉多次分批熔炼炉料，严格控制熔炼过程中的铁液的重量、化学成分和温度，采用堤坝式浇包和冲入法球化处理以及复合强化孕育处理等技术措施，获得了成分、组织、性能满足要求、内部无缺陷的大断面环形球墨铸铁件。

参考文献：

[1] 李克锐，曾艺成，张忠仇，等. 我国铸铁生产技术的新进展(1)[J]. 现代铸造，2016(3)：19-29.
[2] 曾艺成，李克锐，张忠仇，等. 球墨铸铁生产技术的新进展[J]. 黑龙江冶金，2014(1):3-13.
[3] 孙文山，梁维中，刘军，等. 大型厚壁球铁件生产现状及展望[J]. 现代铸造，1999(1):5-11.
[4] 陈维平，柳哲，邓宇，等. 大断面球墨铸铁件的应用与研究进展[J]. 铸造技术，2011(11):967-971.
[5] 李新亚. 铸造手册第五卷[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动，旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式，深度挖掘铸造界人文财富，倾心打造行业精深资讯，进而从独有的精神与文化之角度施力，推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于“榜样的力量是无穷的”以及“益言可以兴邦”的基本理念和初衷，《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层面无障碍恳谈，从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事，在第一时间得到启迪与感悟，进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信“唯有真情可以感人”。能感动人的专访报道，必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受，高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处，无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入，是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛，激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染，使人情不自禁地用看似清淡的笔墨，仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对“说理”情有独钟。信奉“唯有讲理可以服人”。因“至”即无限趋近高端，故“至理”系高度符合科学规律的道理。“科学”乃说理的学问，科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶，科学是全人类的共同财富，科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年，读者不难发现，所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是，以优秀传统文化底蕴为基石，以高尚道德操守与精神境界为标杆，倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格，倾心为读者朋友打造理性思考的空间，竭力实现被访者—读者的理性与情感的惊人共鸣。