DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.009

# 电弧炉与中频炉双联熔炼生产铸铁件的工艺特点及应用优势分析

张　江[1],韦　斌[2],轩辕思思[3]

(1.山东省机械设计研究院,山东 济南 250031;2.山东省铸造协会,山东 济南 250013;3.山东信息通信技术研究院管理中心,山东 济南 250101)

**摘　要**:介绍了电弧炉与中频炉双联熔炼生产铸铁件的工艺特点及优势分析,剖析电弧炉与中频炉熔炼过程及特点要求,结合两者优势从环保、节能、生产成本、铸件质量各方面细致剖析,工艺具备处理铁液量大、成分精准、铁液纯净度高,变质基础优异等优势,兼容大批量生产与单件小批量生产方式的特点,是未来实现绿色、节能、智能铸造的一种新工艺。

**关键词**:电弧炉;中频炉;双联;绿色;节能;高端铸铁件

**中图分类号**:TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)08-0746-04

# Advantage Analysis of Process Characteristics and Application of Iron Castings Produced by Double Melting of Electric Arc Furnace and Intermediate Frequency Furnace

ZHANG Jiang[1], WEI Bin[2], XUANGYUAN Sisi[3]

(1. Shandong Machinery Design and Research Instiute, Jinan 250031, China; 2. Shandong Foundry Association, Jinan 250013, China; 3. Administration Center, Shandong Academy of Information & Communication Technology, Jinan 250101, China)

**Abstract**: Introduces the process characteristics and advantages analysis of electric arc furnace and intermediate frequency furnace dual melting production of iron castings. The melting process and characteristic requirements of electric arc furnace and intermediate frequency furnace are analyzed. Combined with the advantages of them, the environmental protection, energy saving, production cost and casting quality are analyzed in detail. This process has the advantages of large amount of iron water treatment, accurate composition, high purity of hot metal, excellent metamorphic foundation etc. The feature of compatible with mass production and single piece small batch production, is a new technology to realize green, energy saving and intelligent casting in the future.

**Key words**: electric arc furnace; medium frequency furnace; double connection; green; energy-saving; advanced iron castings

当前国内电弧炉熔炼高碳耐磨铸钢件发展较快,但其熔炼高端铸铁件方面的应用较少。下面就电弧炉与中频炉双联熔炼生产铸铁件的工艺特点及应用研究做一探讨。该工艺即通过加入热态铁液或直接用钢铁料在电弧炉中进行熔炼,具有成本低、节能环保、处理铁液量大、成分精准、铁液纯净度高,变质基础优异等优势;基础铁液合格后倒入中频炉,与中频炉双联后,其工艺匹配性、适应性更广,尤其在生产高端高附加值材质的铸铁件方面优势更加明显。

**收稿日期**:2020-07-13

**作者简介**:张　江(1980-),山东淄博人,高级工程师.主要从事铸造装备,铸造工艺及铸造管理方面的工作.
电话:13583121158,E-mail:zhangjiangyj@163.com.

## 1　电弧炉与中频炉双联熔炼优点

(1)在电弧炉熔炼铁液时,出铁温度控制在1 500 ℃以下,相比炼钢要求出钢1 600 ℃以上时,可降低电耗,由于电弧炉熔炼铁液时,温度低、时间短,产生的烟尘低于其冶炼钢液时粉尘及烟气;再者电弧炉几乎是全程封闭式熔炼、外泄烟尘更是比全程中频熔炼要减少90%以上。因而用全密闭除尘电弧炉熔炼铁液是环保的。

(2)用电弧炉熔炼基础铁液可选用价格低廉的原材料,严格控制熔炼过程,利用好电弧炉的脱磷脱硫等冶金特性,在熔制出同温度优质基础铁液的情况下,每吨铁液最高可比单独用中频炉节电近40%。

(3)与中频炉双联，利用优质低成本基础铁液，在中频炉中微调成分，再生产各种牌号的高端优质的高附加值铸铁件，即可实现同基础铁液的大批量产品，也可生产不同基础铁液的牌号各异的小批量产品，机动性强，适应范围广，质量高。既适应连续生产也适应间歇式生产，也可同时兼容两种生产方式。

## 2　电弧炉与中频炉双联熔炼工艺流程

电弧炉与中频炉双联熔炼工艺主要用电弧炉熔炼原铁液，然后将原铁液转入中频炉，根据生产要求调整成分和保温。

电弧炉熔炼铁液主要分为3个阶段：原材料配比与装入，熔化期，还原期，铁液合适后转入中频炉熔，调整成分和保温，根据要求进行孕育或球化处理，生产各种高附加值的铸铁件。其工艺流程见图1。

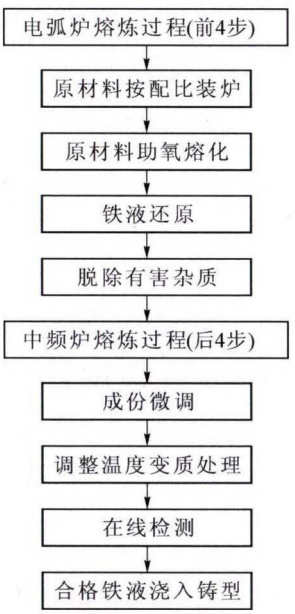


图1　工艺流程示意图
Fig.1　Flow Diagram

## 3　电弧炉熔炼过程

### 3.1　熔炼原材料的种类配比

电弧炉的原材料可选用高炉铁液、铁渣、磁选铁渣、渣钢、洗钢沙、废钢、生铁等，主要熔炼目的就是消化中频炉处理不了的材料，各种炉的质量好坏，直接影响到熔炼周期，熔炼成本，铁液收得率，因此，对各种炉料有以下几点最基本的要求：

(1)各种炉料的化学成分要明确稳定。

(2)各种炉料中不得混有密封容器、易燃、易爆和潮湿物料，以保证加料安全和熔炼安全。

(3)各种炉料应该清洁少锈、无杂物，否则会降低炉料的导电性，延长熔化时间，甚至是折断电极。因此，在配比及加料方面具很关键的一个环节。

(4)各种废钢、渣钢外形尺寸方面，横截面积不宜超过280 mm×280 mm过大会影响其加料时间和力料难度，大型不规则近圆形废料，在熔炼时，易塌料流动撞断电极。

(5)配料是电弧炉熔炼中不可缺少的重要组成部分，配料是否合理到操作工能否按照工艺要求正常进行熔炼操作。合理的配料能缩短熔炼时间。配料时应注意：①炉料的大小要按比例搭配，以达到好装，快化的目的；②各类炉料要根据铁液的质量要求和熔炼方法搭配使用；③配料成分必须符合工艺要求。

(6)关于炉料搭配加入到炉内的要求应做到：下致密，上疏松，中间高，四周低，炉门口无大块料，使得熔炼时穿井快，不搭桥。

### 3.2　熔化期

在电弧炉熔炼工艺中，从送电开始到炉料全部熔清为止称为熔化期。熔化期占整个熔炼过程的3/4的时间，熔化期的任务就是在保证炉子寿命的前提下，用最少的电耗快速的使炉料熔化升温。并选好熔化期的炉渣，以便稳定电弧炉良好的埋弧效果，是提高炉子使用寿命的必要条件之一。因用电弧炉熔炼的是原铁液，是在碱性熔炼气氛条件下，在熔化期既使不加石灰，炉内的泡沫渣形成效果也是比较好，炉渣也是偏弱碱性（电弧炉耐火材料特性也是碱性）。因此，不加石灰造渣，对炉子使用寿命也影响不大，在熔化期电弧炉以弧光化料为主，氧气作为辅助，对炉墙周边的冷区料子助熔，使其缩短熔化期。

### 3.3　还原期

熔化末期到出铁这段时间为还原期，还原期加入适量的碳化硅(原料4%~5%)停止吹氧，炉门密封，让炉内形成一个好的还原气氛，通过低电压高电流形成长弧搅拌，表层脱氧还原炉渣里的氧化物，来提高合金收得率，一般将还原期控制在10~15 min，最后控制好所需的温度出渣，整个熔炼过程完毕。

### 3.4　熔炼成本

电弧炉的熔炼原铁液成本，直接影响到电弧炉的使用率，虽然电弧炉的原材料选择方面比中频炉原材料选择方面要广，但是综合其化铁成本，肯定择低成本的方法。从中频炉和电弧炉，以及原材料的价格分析，电弧炉只要合理搭配好炉料配比，其总成本会大幅低于中频炉，依据山东省现有电费价格测算每吨铁液可降低130元左右。

从表1可看出双联熔炼综合耗电相比中频炉熔

表 1 吨铁液电弧炉、中频炉、双联综合耗电对比表
Tab.1 Comparison of comprehensive power consumption of electric arc furnace, medium frequency furnace and DUPLEX ELECTRIC ARC furnace

| 熔炼方式 | 电弧炉熔炼 | 中频炉熔炼 | 电弧炉中频炉双联熔炼 |
|---|---|---|---|
| kW·h/t | 350 | 620 | 390~400 |

炼吨铁液可节电 230 kW·h,达到 37%。该工艺绿色节能效果非常突出。

### 3.5 炉衬使用寿命

针对电弧炉熔炼特征，炉龄能达到长炉龄,具体分析如下：

(1)高温热作用影响　炉衬处于高温热状态一般在 1 600 ℃以上,还要承受急冷急热,对炉衬损害较大；而电弧炉熔炼铁液，温度方面一般控制在 1 500 ℃左右出铁,那么高温对炉衬的伤害基本可以忽略。因连续匹配铁液形成连续熔炼，同时为达到 1 550 ℃氧化吹氧温度出炉可大大提高炉衬使用寿命。

(2)化学成分侵蚀的影响　电弧炉耐火材料属碱性耐材,原材料配比是,渣钢又附带大量碱性渣,使得炉料整体呈弱碱性,那么原料在熔炼过程中对炉墙侵蚀也较小,碱性熔炼环境是提高炉龄的基本条件,但渣过于偏稠,使局部形成高温区,会降低炉衬使用寿命。

(3)弧光的辐射成反射的影响　熔炼时选好泡沫渣埋弧,可以缩短电炉的熔炼周期,同时良好的埋弧效果能减少对炉衬的热辐射,从而提高炉龄。

(4)机械碰撞与振动也会影响炉子使用寿命　合理的加料方法也会提高炉子使用寿命,装料与布料不合理,或料罐抬得过高,炉底坡可能承受大块重料的碰撞,振动与冲击而形成坑洼,均降低炉衬寿命,另外根据电弧炉墙都是热区,那么加料能往这 3 个点铺上料子,也会提高炉衬使用寿命。

(5)吹氧方法也会影响炉子使用寿命　氧气在电炉熔炼中起着辅助电弧助燃化料的效果,一般靠炉墙两侧及炉门口为冷区,靠电极送电化料,周期会加长,合理的吹氧手法能缩短熔炼周期和提高炉龄(根据不同的料况配比,大块料选择吹扫,尽可能氧气火焰不对着炉底及炉墙吹)，且同一个点吹氧时间不宜过长,避免靠近炉墙处的局部温度高而侵蚀炉墙)。

## 4 中频炉熔炼过程

### 4.1 均匀微调成分

电弧炉熔炼完毕,其化学成分合适后,温度达到 1 500 ℃左右，依据所浇注重量的大小倒入相应吨位的中频炉进行双联熔炼,在中频炉内根据铸件牌号进行成分调整,合格后即可进行下一步工序。

### 4.2 铁液处理

由于浇注铸件牌号不同，需根据工艺的要求进行铁液孕育或球化处理，来保证高附加值铸件所需要的性能，满足多品种小批量或大批量生产的工艺要求

### 4.3 浇注铸件

铁液达到工艺要求后,即可进行浇注。

## 5 电弧炉与中频炉双联熔炼工艺可生产高端优异的铸件品质

(1)利用电弧炉的碱性熔炼环境,可实现脱硫脱磷、净化铁液等熔炼关键环节,从而获得品质最优化的原铁液。在山东某钢企的该工艺应用实验过程中,采用双联工艺生产 QT450-15 中大型球铁铸件过程中,用电弧炉熔炼的原铁液主要化学成分 $w$(%)为: 3.65 C,1.05 Si,0.16 Mn,0.017 S,0.013 P。倒入中频炉精调成分，经球化处理后各项指标均大幅超过单独用中频炉熔炼生产的铸件的各项指标。

(2)可实现适应各种批量不同重量的高端铸件的高品质同一化的稳定性生产。

(3)可稳定生产高耐磨、高刚度、高延伸、耐高低温、耐蚀、耐冲击的高端、异性、极端要求的特种铸件。

## 6 电弧炉与中频炉双联熔炼工艺便于实现智能化、自动化管理

(1)由于集中熔炼,便于实现自动化熔炼,转运浇注,提升安全系数,节省人力资源,精准铁液品质,优化熔炼效率。

(2)便于无外泄式、自动化、智能化、除尘治理,集尘率远高于中频炉多炉次间歇生产方式。

(3)便于实现全系统化智能管理,如智能排产,智能过程控制,智能仓蓄,智能销售等。

## 7 电弧炉与中频炉双联匹配生产铸铁件工艺特点总结

(1)充分利用了电弧炉与中频炉的各自优点特长,形成了绿色节能,优质的近短流程工艺特点,吨铸件的综合电耗相比单独用中频炉熔炼节电高达近 40%。

(2)可生产高端,控制精准的特殊性能铸件,便于打造高端精益铸件的产销基地。

(3)充分利用了电弧炉连续性大量熔炼优质

(下转第 755 页)

表2 灰斑附近的基体组织成分 $w$(%)

Tab.2 Composition of matrix structure of gray spots

| 位置 | Fe | Si | Mn | Cu |
|---|---|---|---|---|
| 灰斑外部区域 | 94.06 | 2.13 | 0.85 | 1.09 |
| 灰斑内部区域 | 97.2 | 2.43 | 0.18 | 0.21 |
| 过渡区域 | 97.26 | 2.43 | — | 0.33 |

两种合金元素均发生偏析，超出铸件平均质量分数的两倍，这两种元素均有强烈的促进珠光体形成的作用，因此形成了100%的珠光体基体。灰斑内部区域正好相反，基体组织Si含量为2.43%，较正常含量高出0.13%，Mn含量为0.18%，较正常含量低0.30%。Si是强烈促进石墨化的元素，而Mn是稳定珠光体的元素，由于两种元素的偏析，使奥氏体枝晶内部的碳充分析出，形成了接近100%的铁素体基体。

### 2.3 消除灰斑缺陷的对策

控制合理的碳当量。碳当量低于4.3%时，奥氏体成为共晶反应的领先相，由于石墨与奥氏体的共格关系，奥氏体枝晶生长的同时促进了片状石墨的形成。对此类铸件，应将碳当量控制在4.3%~4.4%。当铸件碳当量在共晶点附近，液态时析出的石墨数量较少，难以出现石墨漂浮现象，同时可有效抑制先共晶奥氏体的产生，从而达到防止灰斑的目的。

抑制成分偏析。高牌号的球墨铸铁合金含量较高，Si、Al等促进石墨化元素的负偏析和Mn、Cr等反石墨化元素的正偏析使奥氏体枝晶内部石墨化程度加强，是形成灰斑铁素体基体的主要原因。

优化铸造工艺。由于铸件厚大部位铁水凝固时间长，易形成粗大的奥氏体枝晶，铸件顶部或半封闭的厚大部位易出现灰斑。而且铁水在铸件顶部或半封闭的结构中凝固受到的扰动较小，有利于枝晶生长和成分偏析。对此类铸件，可设置溢流冒口改善凝固过程中的元素偏析，使基体组织均匀化。利用流动的高温铁水对最早接触冷铁形成的激冷层进行重熔，从而扰乱奥氏体基体的正常生长，并使溶质再分配，使组织的成分均匀化。

## 3 结论

(1)厚大球墨铸铁中条带状灰斑缺陷的形成主要有3方面的原因：低于4.3%的碳当量、成分偏析和厚大且相对封闭的铸件结构。

(2)亚共晶成分下的厚大球墨铸铁件，易形成粗大的奥氏体枝晶。在一定条件下，Mn、Si等元素会发生严重偏析，产生条带状铁素体区域，使铸件硬度降低，在成分设计中应适当控制合金含量的加入量，抑制偏析。

(3)厚大球墨铸铁件成分设计中应将碳当量控制在4.3%~4.4%，在铸造工艺上应采取措施抑制缓冷枝晶生长，减少灰斑缺陷的产生。

**参考文献：**

[1] 张伯明主编. 铸造手册(铸铁卷)第二版[M]. 北京：机械工业出版社，2003.

[2] B Kaoui1, M Noureddine1, R Nassif. Phase-field modelling of dendritic growth behaviour towards thecooling/heating of pure nickel[J]. VOLUME 6, NUMBER 1.

[3] 姜志超. 球墨铸铁铸造新工艺新技术与产品质量缺陷控制实用手册[M]. 北京：北方工业出版社，2016.

[4] 陈丹，赵岩，刘天佑. 金属学与热处理[M]. 北京：北京理工大学出版社，2017.

(上接第748页)

原铁液，部分中频炉间歇式调质的特点，形成了大批量生产与单件小批量生产方式兼容的特点，对于市场的覆盖范围极宽。而且品质优异竞争力强。可使综合管理成本下降近30%。

(4)原铁液的大量集中连续或熔炼，便于实现铸件生产销售的智能化管理及粉尘集中治理系统的智能化管理。

(5)特别适用于国内有铸造产能的中小型钢企的低成本转型升级，在大幅减少设备投资的前提下向集约化绿色铸造企业转型而且铸件产品性价比优势特别突出。节能减排方面更加明显。

(6)在未来发展过程中，随着装备制造业个性化生产的需求增加，本工艺更能体现出优势；在打造高端精密机床部件产业集群化区域的同时，其带动形成的综合社会效益更加明显。

## 8 结束语

电弧炉中频炉双联熔炼工艺可生产高附加值精密机床件或其他类似高端铸铁件，其绿色节能特点显著是未来绿色节能智能铸造新工艺之一。

**参考文献：**

[1] 芮争家. 铸铁及其熔炼技术 [M]. 北京：化学工业出版社出版，2010.

[2] 杨清顺. 电弧炉熔炼铸铁的机械性能 [J]. 铸造技术，1984(2)：63-67.

[3] 吴军，张有功，孙涛. 采用1.5 t中频炉浇注4.4 t灰铸铁件的生产方法[J]. 现代铸铁，2019(6):16-18.

[4] 王锋. 灰铸铁件的生产[J]. 现代铸铁，2019(1):17-21.