

用于铸铁熔炼的中频感应电炉

一汽铸造有限公司铸造研究所 (吉林长春 130062) 王成刚 马顺龙

【摘要】 主要针对铸造企业广泛应用的中频感应电炉铸铁熔炼技术的几个问题进行解析, 在中频感应电炉的熔炼工艺、技术特点、合成铸铁的熔炼及发展趋势等方面提供技术借鉴, 以利于中频感应电炉在铸造企业得到更好的应用。

感应电炉是目前铸造厂常用的熔炼设备, 按电源频率可分为高频炉、中频炉和工频炉三类; 按工艺目的可分为熔炼炉、加热炉、热处理设备和焊接设备等。常用的感应电炉习惯上归纳为有芯感应熔炼炉、无芯感应熔炼炉、真空感应熔炼炉和感应淬火设备等。本文主要对铸造常用无芯中频感应熔炼炉铸铁熔炼技术的几个问题进行分析。

一、概述

感应电炉按电流频率分为工频、中频和高频三类: 工频感应炉频率为50Hz; 中频感应炉频率为50~10 000Hz; 高频感应炉频率>10 000Hz。

1. 高频无芯感应电炉

高频无芯感应电炉容量一般在50kg以下, 适用于试验室和小规模生产中熔炼特种钢和特种合金。

2. 中频无芯感应电炉

中频无芯感应电炉的容量和功率都比高频炉大, 主要用于熔炼特种钢、磁性合金和铜合金等。这种炉子由于需要昂贵的变频设备, 所以在一些容量较大的场合已改用工频无芯感应电炉。但是和工频炉相比, 中频炉也有其独到之处, 如对于同样容量的炉子, 中频炉的输入功率比工频炉大, 熔化速度较快, 中频炉在冷炉起熔时不需要起炉块, 以及金属液可以全部倒出等, 因此使用时比工频炉灵活方便; 另外, 中频熔炼炉熔液对坩埚冲刷轻些, 对炉衬有利。因此, 在发展了大功率廉价的中频电源之后, 中频炉还是大有应用前途的。

3. 工频无芯感应电炉

在几种无芯炉中, 工频无芯感应电炉出现最晚而发展最迅速, 主要用于铸铁和钢, 特别是高强度铸铁和合金铸铁的熔炼, 以及铸铁熔液的升温、保温和成分调整等; 另外也用于铜、铝等有色金属及其合金的熔炼。但炉子容量小时采用工频是不经济的, 以铸铁为例, 容量<750kg时电效率将显著下降。

在相同的生产条件下, 与工频感应电炉相比, 中频(变频)感应炉功率密度大, 占地少, 生产灵活, 造价低, 变更铸铁牌号方便, 而且不需三项平衡和功率因素补偿装置, 因此中频感应电炉在生产中被广泛应用, 并逐步取代工频感应电炉。生产中, 中频感应电炉频率一般为1000~2500Hz。

4. 感应电炉的熔炼原理

感应电炉是利用交流电感应的作用, 使坩埚内的金属炉料本身发出热量进行熔化的一种熔炼方法。

无芯感应电炉的工作原理是在一个用耐火材料筑成的坩埚外面, 套有螺旋形的感应器(感应线圈); 坩埚内盛满金属炉料(或钢液), 如同插在线圈中的铁芯, 当线圈上通以交流电时, 由于交流电的感应作用, 使金

属炉料或钢液的内部在交变磁场的作用下产生感应电动势,并因此产生电的涡流。由于金属炉料或钢液有电阻,会产生热量而导致金属熔化与过热。感应圈内通过的电流越大,匝数越多,漏磁损失越小,金属料的电阻就越大,则传递的功率也越大,熔炼速度提高。

二、中频感应电炉熔炼工艺

1. 中频感应电炉熔炼的特点

中频感应电炉适用于熔化各种牌号铁液,满足各种成分、温度铁液的技术与工艺要求,易达到性能指标,有很好的适应性。

由于中频炉调整成分较方便,所以工艺上对铁液成分范围的要求可更窄,以使铸件性能更加稳定。具体范围可根据铸件种类划分为多个“牌号”,或对个别铸件制定特殊的成分要求。

由于中频炉电源功率很大,所以提温能力也很强,可对不同铸件给出不同的温度范围来满足技术要求。

2. 感应电炉铁液配料原则

由于合金元素补加相对容易,尽量使原始配料成分等于或略低于目标成分,以便在首次化验后进行补加合金的调整。

若铁液某项成分超出目标,进行调整时需加入大量的铁料(废钢、生铁或回炉料)进行稀释,将增加铁液总量,同时使其他元素也发生较大变化,带来连锁反应。因此无论是配料、调整都不宜超出铁液成分的上限。若超出铁液成分目标值,则再调整时将非常困难。

3. 铁液温度的控制原则

只要能满足力学性能和浇注温度,就应尽量降低铁液的出炉温度,以保证耐火材料寿命,但通常来说铁液的熔化温度不应低于1500℃。

4. 加料

冷炉开炉时,无芯感应电炉应先加入与坩埚内径相近的大块金属料作为炉块,再加入熔点低而元素熔炼损耗又少的炉料,然后加其他炉料(合金材料大多在最后一炉)。有芯感应电炉在冷炉开炉时最好直接加入铁液或块度小、熔点低的炉料。热炉开炉最好留有1/3~1/4炉的铁液启动。

在采用以生铁为主要熔炼方式的状态下,加料顺序通常为:生铁→废钢→回炉料→合金。

如果采用合成铸铁熔炼工艺,加料顺序一般为:增碳剂→废钢→回炉料→合金。

在加料过程中应尽量使金属保持密实的状态并充满整个炉腔,以保证热效率的最大利用,提高熔化效率,但一定要注意防止搭料。

5. 熔化

先低压供电以预热炉料,然后提高供电功率,一般可以送到满功率的80%~90%,边熔化加炉料,在铁料完全熔化前应将整炉料加完,至铁液温度符合要求后,再停电扒渣出炉。这种炉子的铁液温度可较为精确地进行控制和调节,炉内铁液可以倒空。

6. 球化处理

感应电炉熔炼时,硫的变化不明显,不像冲天炉那样由于焦炭等原因会产生增硫现象。中频炉铁液中的硫含量主要来自炉料,熔炼过程中既不增硫也不脱硫,因此原材料的含硫量直接决定了铁液的最终含硫量。球化处理是一个脱硫、脱氧的过程,通常原材料(生铁、废钢等)中含硫量均较低,故中频炉熔炼后铁液的含硫量较低,通常 $w_s < 0.025\%$ (附以炉内脱硫工艺,会进一步降低硫含量),这对进行球化处理是一个非常有利的因素,更利于实现好的球化效果,也可以减少球化剂的加入量,降低生产成本。

三、中频感应电炉熔炼的铁液成分变化

中频炉在熔炼过程中与冲天炉不同的是,铁液元素的变化并不是特别明显,这一特点使其在保持铁液成分稳定性方面非常有力。

1. 碳、硅含量的变化

中频感应电炉大多采用酸性炉衬,当铁液温度超过C-Si-O系的平衡临界温度时,炉衬中的 SiO_2 将被铁液中的碳还原,使铁液脱碳增硅,炉衬侵蚀加剧。实践表明,当铁液在1450℃以上保温时,就可能出现上述现象。

在弱酸性炉衬的条件下,碳、硅在1500℃左右的熔炼温度条件下,主要是熔炼损耗原因导致其含量均会略有降低,降低比例 $< 5\%$ 。

2. 锰的变化

在酸性炉中,锰的熔炼损耗一般在5%左右。

3. 磷、硫的变化

磷、硫一般没有变化,但通过炉内加入碳化钙脱

硫，可将铁液中硫（质量分数）降至0.01%以下。

4. 合金元素的变化

合金元素的熔炼损耗与其他化学、物理作用会导致熔炼过程损失，这与合金元素自身的理化性能、加入方式等有关，但总体来说在合适的加入状况下，合金元素的变化量也很低。

因此，工频电炉铁液的化学成分控制较精确，但由于炉渣不能感应发热，且渣温较低，所以工频电炉的冶金性能较差。

四、合成球墨铸铁的熔炼

采用废钢加增碳剂生产铸铁及合成铸铁的生产方式，可使铸铁的韧性和强度均得到提高，性能提升；同时废钢增碳工艺也不像传统认为的那样会使铸件的收缩倾向加剧。事实上，如果工艺处理得当，采用废钢增碳工艺会减轻铸件的收缩，这主要是源于采用废钢增碳的熔炼方式，铸件的基体晶粒组织会得到均匀化和细化，铁液的纯净度高，同时增碳剂具有孕育效果，促进石墨化的效果也更突出。

1. 对废钢和增碳剂的要求

采用优质废钢加增碳剂（合成铸铁）为主要原材料的铸造熔炼方式非常有意义，可使球墨铸铁的韧性和强度得到提高，性能提升。但生产合成铸铁时对废钢有一定的要求：首先要求废钢自身品质高。废钢中的杂质元素较少，成分稳定，已经过高温熔炼，消除了铸造用生铁的遗传效应，熔炼出的铁液具有较高的品质；其次要求废钢的P、S及微量元素含量低，事实上废钢通常都有较低的P、S和微量元素含量；第三最好应使用优质碳素合金钢炉料，废钢中最好没有合金元素。当然在生产珠光体基体铸铁时可以适当放宽废钢中的锰等有益合金元素的含量，

增碳剂的品质对生产合成铸铁也至关重要。增碳剂需经过高温持续电热处理，使硫、水分、灰分、挥发物及气体杂质被分离出去，具有高的化学纯度及石墨晶体形态。因此，增碳剂的品质对最终石墨化效果、增碳剂的吸收率都至关重要。

废钢增碳的熔炼方式，铸件的基体晶粒组织会均匀化、细化，铁液的纯净度高，而同时增碳剂具有孕育效果，促进石墨化的效果也更突出。这种全废钢或大比例废钢的熔炼方式国外广泛应用，国内也已兴起并呈迅

速上升趋势。

2. 合成铸铁生产的熔炼要点

（1）增碳 废钢中的碳含量很低，灰铸铁或球墨铸铁的最终含碳量均较高，这需要对铁液进行增碳，增碳剂就是铁液碳的来源。增碳剂通常放于炉底（如可能最好炉底存有适量铁液），其上覆加废钢和回炉料，依据废钢、回炉料和最终铁液含碳量要求来计算增碳剂的加入量，但应注意增碳剂的吸收率。

（2）增硅 同样，由于废钢中硅含量较低，通常需对铁液进行增硅处理，增硅的办法是加入硅铁合金，以达到目标成分。硅铁可在化清后直接加入炉内。

（3）熔炼原料 可以采用全部废钢+增碳剂来进行熔炼，也可以采用部分废钢+增碳剂+回炉料或部分废钢+增碳剂+生铁+回炉料来进行熔炼。

（4）球化处理 采用合成铸铁的熔炼工艺，由于废钢中硫及微量元素含量较低，可适当减少球化剂加入量或调整球化剂种类，以保证球化效果，降低球化成本。

当然采用全废钢熔炼工艺，需要在感应电炉熔炼的条件下进行，能耗较高，废钢的来源与控制较严格，并不一定每个工厂都现实可行，但无疑这种熔炼方式为高品质的球墨铸铁生产提供了另一条途径，应予以重视。

五、感应电炉的优缺点与发展方向

1. 感应电炉熔炼具有的优势

（1）感应电炉热量产生于炉料内部，热效率高，加热速度快。

（2）铁液过热度容易调解，出铁温度高。

（3）元素熔炼损耗少，铁液中气体含量和非金属夹杂物少。

（4）由于电磁搅拌作用，铁液的化学成分和温度均匀。

（5）熔炼工艺稳定、易控，铁液化学成分准确。

（6）可以多用或全部使用废钢，采用增碳方式生产合成铸铁。

（7）铁屑、切边废料易于熔化。

（8）烟气和粉尘较少，噪声小，易于环保控制，符合节能减排的发展要求。

（9）铁液含硫量低，污染少。

（10）易于实现自动化管理。

（下转第20页）

上海爱知锻造、2800kW文登天润克鲁勃曲轴、山推2750kW和2000kW，丹东518厂及纳铁福传动轴等项目。



图 6

我们与著名压机供货商（Hatebur哈特贝尔，Muller米勒万家顿，Eumuco奥姆科及TMP伏龙涅什等）有着长期配套的历史。同时，我们集团中的英国Newelco、Radyne，以及澳大利亚的连续棒料感应加热炉以其先进的技术优势，在世界范围内享有绝对的市场占有率。例如Newelco在世界范围内有200多台棒料感应加热设备与Hatebur 热成形机配套。在中国市场，从我们集团进口的棒料加热炉共约有40来套。具体如汽车行业的上海汽车锻造厂、一汽长春锻造、东风二汽锻造厂和东风

紧固件厂等；轴承行业如洛阳轴承集团（3套）、哈尔滨轴承（4套）、韶铸集团精锻厂（5套）、重庆长江轴承及黄石轴承厂等都是我们长期的用户。

对于这样的项目，根据客户的定位需求，我们可以采用全进口或关键电源进口，以及整套设备技术引进、完全国内制造生产等形式来满足客户的需要。

七、结语

总之，基于我们广泛的经验，我们不仅仅只提供中频感应加热炉，同时，还可以给客户很多选项设备和整体解决方案来满足客户的各种特殊需求，如自动化上料系统、温度分选机构、重量分选机构、温锻石墨涂层系统、坯料自动清空装置、线圈快速更换机构、温度闭环记录系统，以及双频系统等。另外，应达工业的Heating加热部门也有针对如管线材整体或端部加热、挤压加热及热处理等其他应用的专用或通用感应加热设备以满足中国市场对高品质设备的需求。MW

(20081228)

(上接第16页)

2. 感应电炉熔炼存在的不足

- (1) 电能消耗大，熔炼成本高。
- (2) 炉渣不能感应发热，熔渣温度低。
- (3) 熔炼能力比冲天炉低。

3. 感应电炉的发展方向

优质球墨铸铁熔炼需要高温、低硫、洁净、成分准确，以及铁液质量高，感应电炉正好提供这样的良好平台。目前国内外采用中频感应电炉熔炼也非常普遍，在国外，工频感应电炉仅用于有芯保温炉等有限用途。

根据企业生产的需求，中频感应电炉应用的发展方向将主要体现在以下几个方面：

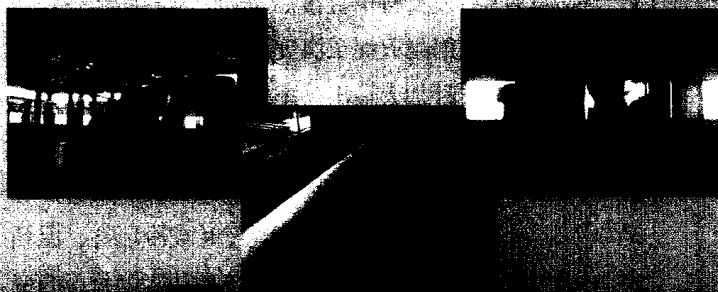
- (1) 提高比功率，实现电效率和热效率的双高与快速熔炼。
- (2) 功率连续可调，以适应不同升温 and 保温条件的需求。
- (3) 采用变频技术。即熔炼先期用高频，后期保温用低频。
- (4) 双供电。即一套电源控制两个炉体。
- (5) 自动化管理，实现编程作业。
- (6) 宽口炉体，实现大料直接熔炼。MW

(20090108)

开泰抛丸机械

为您设计制造

为您提供适合的解决方案



山东开泰抛丸机械有限公司