中频感应电炉熔炼高强度灰铸铁工艺

伍启华，王安家，乔进国，庄肃栋

摘要：利用中频感应电炉熔炼灰铸铁，通过对原材料进行选择与质量控制，优化炉料配比，优化孕育处理与合金化工艺，确定了中频感应电炉熔炼高强度灰铸铁的熔炼工艺，总结了其熔炼工艺过程的关键技术特点。

关键词：电炉熔炼；孕育；化学成分；高强度灰铸铁

我公司主要使用冲天炉-电炉双联熔炼工艺生产发动机铸件，近几年，随着发动机功率的不断提升，对缸体、缸盖等铸件要求越来越高，材料牌号种类变化较大，给生产带来不便，目前新建的铸造车间采用中频感应电炉熔炼铁液。本文主要是通过在生产中的实践，从原材料质量控制、配料、加料工艺、熔炼工艺等几方面对12t中频感应电炉熔炼高强度灰铸铁工艺进行探索。

一、化学成分及配料

1. 化学成分的确定

金相组织决定了灰铸铁的各种性能，而化学成分的变化可以改变金相组织，因此选择合理的化学成分是提高灰铸铁性能的途径之一。灰铸铁的化学成分必须按所生产铸件的壁厚和技术要求合理选择。

传统方法认为，提高灰铸铁强度就要降低碳当量，或者增加锰含量来提高灰铸铁中珠光体的比例，以此来提高铸件强度。但是，以降低碳当量来提高灰铸铁强度的方法会带来许多不利因素，如铸造工艺性能变差、白口倾向增大，特别是薄壁件可能会引起可加工性变差的情况，因此并未被广泛应用。

目前，普遍采用的方法是在达到较高强度的前提下，使用尽可能高的碳当量。碳当量的提高可以大幅改善灰铸铁的铸造性能，使缩孔、缩松减少，降低铸造废品率[1]。生产的铸件最薄的部位5～6mm，因此将原铁液碳当量控制在3.8%～3.95%；人们对S在灰铸铁中作用的认识是一个逐步提高的过程，从认为S是有害元素，到灰铸铁中要加入一定量的S来改善孕育效果和石墨形态，从而改善切削加工性能，逐步认识到灰铸铁中硫含量在一定范围内是有利的。我们根据生产铸件的结构特点确定了原铁液的化学成分，如表1所示。

原铁液化学成分主要通过配料以及熔炼过程的控制来保证，而铸件化学成分则通过炉前处理过程中的孕育及合金化来控制铸件化学成分。

2. 配料的确定

在冲天炉熔炼工艺中，加入大量废钢的目的是为了降低铁液的碳当量，利用炽热焦炭来增碳的方式满足铁液化学成分的同时提高铁液质量，因为通过焦炭渗进铁液中的碳比熔化原材料直接得到的质量更好，能够将生铁的遗传性减小到最低，更有利于提高铁液质量[2]，而电炉熔炼在熔化过程中是直接将原材料加入炉内进行熔化，与冲天炉熔化原理完全不一样，为了保证铁液质量，使用废钢加回炉料进行配料，不使用生铁，利用增碳剂进行增碳的工艺来生产铸铁，不仅消除生铁的遗传性，可使铸铁的

表1 原铁液化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	S	P
3.3～3.5	1.4～1.7	0.6～1.0	0.06～0.1	≤0.07

韧性和强度等力学性能得到提升，同时采用这种工艺会减轻铸件的收缩，使铸件这方面的缺陷明显减少，达到电炉与冲天炉熔炼的取长补短[3-4]。而且这种工艺熔化铁液生产的铸件石墨形态非常好。

二、原材料的选择

原材料直接影响灰铸铁的质量和生产过程的稳定性。由于电炉在熔炼过程中没有造渣过程和氧化还原过程，冶金性能较差，加入到电炉内的原材料必须要保持洁净，成分要稳定，特别是杂质元素，必须严格控制一些对铸件质量易造成重要影响的元素进入废钢中，需对外购的废钢原材料进行严格的挑选与检验，确保熔炼铁液质量；铁料锈蚀越多，熔化的铁液炉渣量就偏大，铁液纯净度差。特别是废钢等炉料若氧化严重，会导致氧化物偏多，容易引起炉料结壳现象的发生，造成电炉内铁料与铁液上下分离，无法正常熔化，并容易导致铸件夹渣及其他缺陷的产生[5]。因此，电炉熔炼所需的原材料如废钢、回炉料等必须保持洁净，特别是不能带有大量的氧化物和砂子等。废钢标准如表2所示。

回炉料均为浇冒口及经过破碎后的废铸件，必须分类存放，使用前要用专用的抛丸设备进行抛丸处理，保证回炉料不连带砂子进入电炉内。

由于使用感应电炉熔炼，必须选择合适的增碳剂，不同的增碳剂会影响铁液的含氮量，微量的氮能提高力学性能，但过量则容易产生氮气孔缺陷。宋克非[6]认为，石墨和非石墨结构的增碳剂对于灰铸铁和球墨铸铁内部的石墨结构有很大影响，石墨结构的材料有助于提高铁液的形核状态并可减少白口倾向。因此，根据本单位的实际生产情况，应优先选用经过高温石墨化的增碳剂。粒度是选择增碳剂的重要因素。增碳剂的粒度大小不同，溶解扩散速度和氧化损耗速度也就不同；而增碳剂吸收率的高低取决于增碳剂溶解扩散速度和氧化损耗速度的综合作用。一般来说，增碳剂颗粒小，溶解速度快，损耗速度大；增碳剂颗粒大，溶解速度慢，损耗速度小。增碳剂粒度大小的选择与炉膛直径和容量有关，一般情况下，炉膛的直径和容量大，增碳剂的粒度要大一些；反之，增碳剂的粒度要小一些。我公司根据电炉实际情况确定了适合的增碳剂，内控标准如表3所示。

三、熔炼工艺

熔炼工艺是获得高质量铁液的决定性环节，包括铁料的熔化速度，电炉熔化功率的选择，增碳剂的加入方式和时机，硅锰合金、硅铁、硫铁的加入时机，高温静置温度与时间等工艺，这些参数都影响电炉熔炼铁液的质量。

1. 熔化功率的选择

在熔化开始后，电炉熔炼必须满炉熔化，一方面是保护电炉的耐火材料（如果不满炉熔化，容易引起没有炉料保护的耐火材料出现裂纹，影响炉衬使用寿命）；另一方面感应线圈的热量也不能完全利用，浪费能源。

熔炼过程中熔化功率的输出非常重要，熔炼的不同阶段熔化功率不能一成不变，熔化功率是根据电炉内铁料的加入量来决定的，容量为12t的电炉熔炼过程（非第一炉）中，第一次加满料时，熔化功率只能在电炉额定功率的60%，不能太高，因为电炉内铁料量只有总容量的33%左右，太高的功率不仅浪费能耗，而且由于铁料数量有限不能完全利用感应热量，对电炉的控制器材有很大的损害，必须做到功率与铁料重量相匹配；随着熔炼过程不断进行，电炉内铁料重量不断增加，熔化功率也不断提升；在铁料加入到额定重量的70%左右时，电炉熔化功率就可以提升到电炉额定功率的90%以上，熔化功率与铁料加入量的关系如图1所示。这种熔炼功率与铁料重

表2 废钢使用标准

化学成分（质量分数%）	C	P	S	Mn
	≤0.70	≤0.045	≤0.045	≤1.2
质量要求	废钢不得锈蚀（允许表面有少量浮锈，但保证锈蚀不成层）；不得混有高合金钢、导轨钢、螺纹钢、铸铁、橡胶、塑料、泥土等杂物；管材两端不得封闭			

表3 增碳剂技术要求

化学成分（质量分数，%）					粒度（90%）/mm	水分（%）	C吸收率（%）
固定碳	挥发分	灰分	硫	氮			
≥98	≤1	≤1	≤0.05	≤300ppm	1～5	≤0.3	>90

量相匹配的熔炼方式，能够最大程度地利用电炉熔炼热效率，将电炉熔炼的热损失降低到最低，铁料熔化速度也能够提高到最高。

2. 加料工艺

增碳剂加入方法是采取随料加入法，就是随着铁料的不断加入而加入到炉内，加入时间对熔化过程中碳的吸收有很大的影响。增碳剂的加入时间若过早，容易使其附着在炉底附近，特别是炉内还没有铁液的时候，如果增碳剂加入到炉内，随着熔化的不断进行，铁料缓慢进入熔融状态，此时由于增碳剂与空气中的氧气接触后达到燃点，容易发生燃烧，浪费增碳剂，而且附着在炉壁的增碳剂又不易被熔入铁液。与之相反，加入时间如果过迟，则失去了增碳的时机，造成熔炼、升温时间的迟缓，这不仅延迟了化学成分分析和调整的时间，也有可能带来由于过度升温而造成的危害。因此，增碳剂还是在加入金属炉料的过程中分批次地加入为好。

根据上述分析，增碳剂的加入时间确定如下：在炉内铁料加入到5.5t左右时，炉内已经有一定量的铁液存在，此时开始加入增碳剂，并根据每炉的总加入量均分成3～4个批次，每加入1～2t铁料时加入一批增碳剂，在炉内总铁量达到9t时将增碳剂全部加入到炉内。这种加入方式能够充分利用中频电炉电磁搅拌作用，有利于碳的溶解和扩散，避免增碳剂浮在铁液表面而被烧损。在增碳剂未完全熔解前，搅拌时间长，吸收率高，这样能避免增碳剂的烧损，提高增碳剂的吸收利用率。

铁液化学成分对增碳剂吸收率有一定的影响，当铁液中初始碳含量高时，在一定的熔解极限下，增碳剂的吸收速度慢，吸收量少，烧损相对较多，增碳剂吸收率低。当铁液初始碳含量较低时，情况相反。因此，在选择增碳剂加入方法时应采用随炉分批加入法；铁液中的硅对增碳效果有较大的影响。硅含量高的铁液增碳性不好。如图2所示，不同硅含量的铁液加入增碳剂后不同时间段里吸收效果差别很大，硅含量偏高的铁液增碳剂吸收效果在同等时间下明显低于硅含量低的铁液，尤其是电炉熔炼过程中遵循“快速熔化”原则，所以在短时间内如果增碳剂来不及熔化吸收，可能就出现烧损严重的现象，增碳剂吸收率就低。

正如铁液中硅含量对增碳效果的影响那样，硫含量对增碳也有一定的影响。用相同增碳剂，在加入到电炉内之前先加入增硫用的硫化铁，观察S含量对增碳的影响。当铁液中w_S为0.05%时，将其与没添加硫化铁、铁液中w_S为0.015%的低硫铁液相比较，增碳速度要迟缓得多。

铁液中硅和硫阻碍碳的吸收，降低增碳剂的吸收率；而锰元素则是有助于碳的吸收，提高增碳剂吸收率。就影响程度而言，硅最大，锰次之，硫影响较小。因此，实际生产过程中，应先增锰，再增碳，后增硅、硫。

3. 高温精炼工艺

铁液熔炼最高温度对铸铁各方面性能有着较大影响。在一定的范围内提高铁液的过热温度并保持一定时间，可以使铁液中残存着未溶的石墨质点完全溶入铁液中，以消除各种材料的遗传影响，充分发挥孕育剂的孕育作用，提高铁液受孕育能力。

理论上，粗大的过共晶石墨在铁液温度达到1500℃并保持6～9s，可以熔化到结晶临界半径以下，只有在这样的熔炼条件下，生产的高牌号孕育铸铁或球墨铸铁的质量和性能是可靠的。因此，当铁料全部熔化为铁液后经过扒渣，将温度提升到1500℃以上，将石墨熔解到结晶临界半径以下。在该温度铁液氧化物夹杂、气孔最低，抑制增硫，消除石墨遗传性，稳定化学成分。熔炼温度过高，将增加铁液的结晶过冷度，对使用性能不利。我们将高温静置工艺温度定为1520℃，保温8～12min。

四、炉前处理工艺

1. 炉前孕育

优质铁液再配以有效的孕

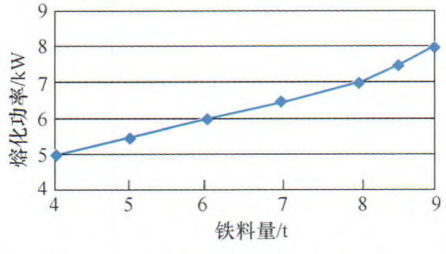


图1 熔化功率与铁料加入量对应关系

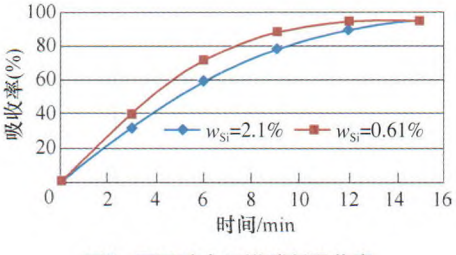


图2 不同硅含量增碳剂吸收率

育，是获得高性能铸件的有效方法。通过有效的孕育不仅可以细化基体组织，改变石墨形态，还可以减少白口倾向，改善加工性能。孕育处理的目的主要是促进石墨化，减少白口倾向，增加共晶团数量，控制石墨形态以获得A型石墨，改善灰铸铁性能。

孕育剂的选择特别重要，含Ba孕育剂除具有明显的石墨化能力、易获得A型石墨、细化共晶团组织及较高的力学性能等优点外，另一个突出特点在于这类孕育剂有较强的抗衰退能力[7]。含Ba孕育剂的长效作用主要是由于Ba阻碍了铁中C、Si的扩散，从而为石墨核心的形成和生长提供了良好的环境。硅钡孕育剂增加一定量的钡钙成分后，促进了铁液的形核能力，容易形成细小、分散的石墨，适当增加共晶团数，从而提高铸件的力学性能。长期的生产实践证明，硅钡孕育剂中Ba含量对铸件在冷却过程中孕育衰退有一定的影响，特别是在大件上影响特别明显。因此我们选用的孕育剂为含Ba为3%～5%的硅钡孕育剂。

2. 合金化工艺

灰铸铁合金化的主要目的就是通过向铁液中加入一定量的合金元素，以达到强化、细化基体，从而提高基体强度。对于高强度灰铸铁来说，就是要设法增加基体中珠光体的含量，并细化珠光体。

合金元素在灰铸铁中的作用主要是提高铸件的强度，主要表现为：①细化石墨和共晶团。②增加基体中珠光体的含量，并使珠光体的片间距细化。③提高渗碳体的热稳定性。④形成碳化物或含有合金元素的磷共晶等硬化相。

但合金元素的加入一方面要考虑其对性能的影响，另一方面还要考虑经济性。一些贵重金属（如镍）虽然对铸件力学性能的提高有较大的帮助，但价格较贵，增加了铸造成本，故一般情况下不予采用。我公司加入的合金是铜、锡、铬铁等。

3. 炉前处理材料加入方式

孕育剂一般在出铁口处加入，随铁液缓慢进入包内，合金材料可以直接加到包内，通过铁液的冲刷、搅拌，力求均匀。实际操作时，待包内铁液量达到约20%时开始加入炉前处理材料，至包内铁液为80%时全部加完。因此保证炉前处理材料在包内能充分均匀熔入铁液中，使整包铁液成分均匀，才能保证铸件组织一致。

五、结语

利用该熔炼工艺生产的牌号为HT250、HT280的缸体、缸盖、曲轴箱等铸件，各种理化性能都满足工艺要求，并且提高了铸件加工性能，其工艺的控制要点主要有以下几方面：

（1）确定合理的化学成分和炉料配比是获得优质铁液、生产高性能灰铸铁件的前提条件。

（2）选择合适的原材料，加强原材料质量的管理和控制，特别是增碳剂等重要炉料的管理，减少微量元素对铸件质量的影响。

（3）根据熔炼过程合理选择电炉熔化功率，各种炉料的加入方式和时机，高温静置温度与时间等工艺参数是获得优质铁液的重要环节。

（4）选择能延长孕育效果和增强形核能力的硅钡孕育剂，以及铜、锡、铬的合金化工艺，合理的材料加入方式可细化基体组织，改变石墨形态，还可减少白口倾向，改善加工性能。

参考文献

[1] 陈军. 高强度HT250灰铸铁的熔炼技术[J]. 铸造，2004,8（53）：635-636.

[2] 于海生.冲天炉熔炼优质铁液及其增碳机理分析[J]. 中国铸造装备与技术，2009，（2）：21-23.

[3] 刘小龙. 浅谈冲天炉和电炉熔炼[J]. 中国铸造装备与技术，2006，（4）：52-53.

[4] 曾大本.灰铸铁研究和生产的新进展与展望[J]. 现代铸铁，2005，（1）：14-17.

[5] 孙文斌. 中频感应电炉熔炼铸铁的质量控制与研究[D]. 南京理工大学，2010.

[6] 宋克非. 增碳剂对于铸件微观组织品质和整体生产成本的影响[J]. 铸造技术，2006，（4）：425-428.

[7] 宋岩. 硅Ba孕育剂在缸体铸件上的应用研究[J]. 中国铸造装备与技术，2012，(3):31-34.

作者简介：伍启华，潍柴动力(潍坊)铸锻有限公司，工程师，主要从事铸造技术质量工艺方面工作。王安家、乔进国、庄肃栋，潍柴动力(潍坊)铸锻有限公司。

MW 20170720