

无芯感应电炉熔炼灰铸铁的技术应用与发展（上）

中国铸造协会顾问 李传斌

无芯感应电炉熔炼铸铁，从20世纪30年代采用电动机驱动的变频电源开始，随后用50/60Hz的工频电源，后来又进而发展到采用变频中频电源。

60年代后期，晶闸管静态变频电源的应用，导致铸铁行业中采用无芯感应电炉作为熔炼设备的企业逐渐增多，尤其是70年代逆变电源的开发，中频无芯感应电炉的电源有了重大改进，频率转变效率可提高到97%~98%，熔化铸铁时热效率可达到70%，同时，电炉设备和所用的耐火材料也在不断发展，因而其应用日益广泛。

对于不适于采用长炉龄大型冲天炉的中小型铸铁企业，用无芯感应电炉熔炼主要有如下优点：

- (1) 熔炼时排出的废气、烟尘和炉渣大幅度减少，便于治理环境和改善作业条件。
- (2) 可利用廉价的金属炉料，尤其是便于循环回用加工的切屑和边角余料。
- (3) 生产安排的灵活性较好。
- (4) 铸铁的化学成分和温度比较均匀且易于控制。

但是，感应电炉熔炼的冶金过程与冲天炉有很大的差别，如果不能切实了解其冶金特点，从而正确安排熔炼和各项后处理作业，则生产灰铸铁件时，往往会出现显微组织不符合要求，以及铸件的加工性能恶化等各种问题，不能确保铸件的质量要求。

一、感应电炉与冲天炉熔炼过程的不同

冲天炉是以焦炭为燃料的竖炉，无芯感应电炉则是以电感应加热的坩埚炉，熔炼过程当然会有很大的差别，即使熔炼得到的铁液化学成分相近，其在凝固过程中发生共晶转变的条件却有很大的不同，因而，铸件的微观组织和某些性能也会存在较

大的差异。

(1) 冲天炉内有高温过热区 冲天炉熔炼过程中，在底焦层内氧化带和还原带之间，有一高温过热区，温度一般在1700℃左右，高温运行的冲天炉还会更高一些。

感应电炉熔炼时，炉内不存在这样的过热区。

(2) 铁液中的硫含量 冲天炉熔炼时，炉料中生铁锭所占的配比较高，其硫含量一般都高于废钢。而且炉料在熔化区熔融后，以细小液滴状下落的过程中，流经硫含量较高的焦炭，二者接触的界面面积大。液滴到达炉缸后，所有的铁液都积存于焦炭块之间的空隙中。因此，熔炼灰铸铁时，铁液中的硫含量较高， w_s 通常都在0.1%左右。

无芯感应电炉熔炼铸铁时，由于炉料中废钢多而生铁锭少，配料中硫含量本来就低，再加以熔炼过程中完全不与焦炭接触，没有从焦炭中吸收硫的过程，如果不特意在配料中加硫，则熔炼得到的铁液中硫含量较低， w_s 一般都在0.04%以下。

(3) 铁液中的氧含量 冲天炉熔炼过程中，未熔的金属炉料、铁液与炉气接触的界面大、时间长，熔炼制得的铁液中氧含量较高，一般为 $w_o = 0.004\% \sim 0.006\%$ 。

无芯感应电炉熔炼铸铁时，金属炉料与炉气接触的时间很短，熔融的铁液与炉气接触的界面很小，铁液中的氧含量相当低， w_o 一般为0.002%左右，甚至更低一些。

高炉熔炼的铸造生铁，氧含量比废钢高得多。少用或不用生铁，代之以废钢，也是感应电炉熔炼的铁液中氧含量较低的重要原因。

(4) 铁液中的氮含量 冲天炉熔炼过程中，虽然铁液与炉气接触的时间长，接触的界面大，但是

由于铸铁中的碳、硅含量较高，溶于铁液中的氮并不很多， w_N 一般为0.004%~0.007%。铸铁中含有少量的氮，铸件中不易产生气孔，还有促成珠光体的作用，有助于改善铸铁的力学性能。

无芯感应电炉熔炼铸铁时，炉料中配用的废钢量较多。废钢中的碳、硅含量都低，氮含量比铸铁中的高得多，因此，感应电炉熔炼的铁液中氮含量要高一些。一般说来，炉料中废钢用量为15%时，铸铁中 $w_N=0.003\%\sim 0.005\%$ ；废钢用量为50%时， $w_N=0.008\%\sim 0.012\%$ ；炉料全部为废钢时， w_N 高达0.014%以上。

如果铁液中 $w_N>0.01\%$ ，铸件就易于因氮析出而产生气孔。因此，用感应电炉熔炼时，要注意防止因氮而致的气孔。

(5) 对铁液的搅拌作用 冲天炉熔炼过程中，炉料熔化后，只在液滴下落的短暂时间内有些扰动。铁液进入炉缸或前炉后，除内部有轻微的对流外，基本上没有搅拌作用。

感应电炉熔炼过程中，熔融的铁液内部自始至终都有感应磁场的搅拌作用。

二、铁液共晶结晶时的过冷度

在碳当量相同的条件下，用感应电炉熔炼的铸铁与用冲天炉熔炼的相比，共晶结晶时的过冷度大得多，如图1所示。

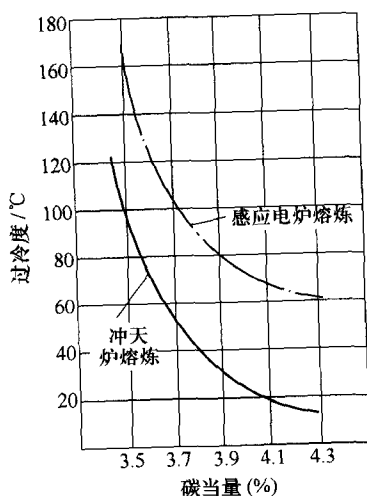


图1 不同碳当量对共晶结晶过冷度的影响

在碳、硅含量相同的条件下，用感应电炉熔炼的铸铁与用冲天炉熔炼相比，三角试片的白口宽度也有明显的差别，如图2所示。

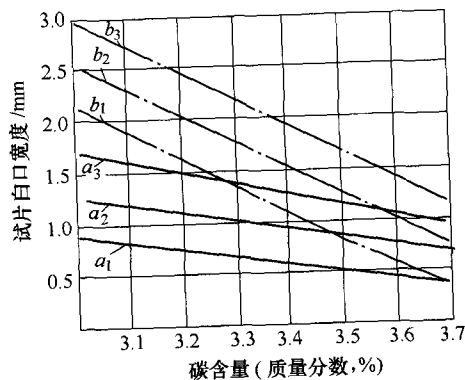
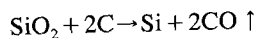


图2 不同熔炼条件对白口宽度的影响

a_1 —冲天炉熔炼， $w_{Si}=2.5\%$ ； a_2 —冲天炉熔炼， $w_{Si}=2.0\%$ ； a_3 —冲天炉熔炼， $w_{Si}=1.5\%$ ； b_1 —感应电炉熔炼， $w_{Si}=2.5\%$ ； b_2 —感应电炉熔炼， $w_{Si}=2.0\%$ ； b_3 —感应电炉熔炼， $w_{Si}=1.5\%$

由图1、图2可见，熔炼条件不同的铸铁，共晶结晶时特性差别很大。感应电炉熔炼的铁液过冷度大，其原因主要有以下三个方面。

(1) 共晶结晶时晶核的数量减少 冲天炉熔炼时，从炉料开始熔化到铁液自炉中流出所经历的时间很短，约10min。感应电炉熔炼时，从炉料开始熔化到出铁一般要经1h左右，而且又有感应加热所特有的搅拌作用，易于使铁液中微细的碳质晶核溶于铁液。与此同时，在共晶结晶时可作为异质晶核的微细颗粒也大幅度减少。例如，可作为异质晶核的 SiO_2 ，在温度很高且有搅拌作用的条件下，易于与铸铁中的碳发生如下反应而生成硅，在其溶于铁液后异质晶核消失。



因此，用感应电炉熔炼灰铸铁时，要特别注意做好孕育处理作业，孕育剂用量应比冲天炉熔炼时略多一些，最好出炉前先在炉中进行预处理，以改善铸铁共晶结晶时的生核条件。

(2) 铁液中的硫含量低 前面已谈到，用感应电炉熔炼铸铁时，熔炼得到的铁液， w_S 一般都在0.04%以下。可是，对于灰铸铁而言，一定的硫含量是保证微观组织正常所不可或缺的。

浇注前向铁液中加入孕育剂后，孕育剂中的活性元素与铁液中含有的硫、氧作用，生成大量微细的氧化物、硫化物和硫氧复合化合物，弥散于铁液中。在灰铸铁铁液的共晶凝固过程中，这些细小的夹杂物能作为石墨析出的异质晶核，促进石墨生核，使共晶团数量增多，共晶团细化。

因此，用感应电炉熔炼时，应特别关注铁液中

的硫含量,必须使之保持在 $w_s=0.06\%\sim 0.08\%$ 之间。如配料中没有引入硫的组分,一般可加入适量的硫化亚铁使之增硫。

感应电炉中加入硫化亚铁的量很小,硫含量往往不易准确控制。最近,日本有人提出,在为生产高档灰铸铁件而提供的高纯生铁中,应特意配加一定的硫含量,以便于铸造厂的质量控制。

(3) 铁液中的氧含量低 用感应电炉熔炼的铸铁中,氧含量一般都较低。如果 $w_o<0.001\%$,铁液中可作为外来晶核的氧化物、硫氧复合化合物就很少,铁液对孕育处理的回应能力会很差。对于灰铸铁而言,作为异质晶核,氧化物尤为重要。

在确认铸铁中氧含量过低的情况下,就应适当增加氧含量。最方便的办法是采用含氧、硫的孕育剂。这种孕育剂,国外早已有供应,随着我国采用感应电炉熔炼的铸铁企业日益增多,近年来也有类似的产品问世。

在炉料中配入30%左右的铸铁切屑,既可循环利用废弃物料,降低生产成本,又可使熔炼铁液中氧含量增多,不失为一种可取的增氧措施(例如,美国某铸铁厂,炉料中铸铁切屑的用量为50%)。

三、生铁用量多会导致石墨组织异常

前面曾经提到,用感应电炉熔炼铸铁时,由于液态铸铁在炉内保持的时间长,又有感应电流的搅拌作用,会使微细的碳质晶核溶于铁液,同时,能作为外来晶核的氧化物、硫化物和硫氧复合化合物也会大量损失。但是,对于生铁锭中所含的粗大石墨,情况就不一样了。

生铁锭中,一般都含有粗大的片状石墨。冲天炉熔炼时,即使出铁的温度不太高,炉内过热区的温度也在1700℃左右。铁液通过过热区所经历的时间虽然很短,但却是以细小液滴通过的,能得到高温过热,有助于使石墨溶于铁液。因此,即使炉料中配加的生铁锭较多,只要铸铁的成分不是过共晶的,显微组织中的石墨都呈细小的片状,一般不会有块片状(C型)石墨出现。

感应电炉熔炼铸铁时,虽然液态铸铁在炉内保持的时间长,又有感应电流的搅拌作用,但炉内的温度毕竟比冲天炉熔化带的温度低得多。如果炉料中配用的生铁锭太多,就不可能使熔点高、稳定性

强的片状石墨全部溶入铁液,总有一些晶态石墨保留在铁液中。

在这种条件下,铸铁开始凝固前就存在较大的晶态石墨,即使铸铁的成分是亚共晶的,凝固时也会有初生石墨依托晶态石墨析出。最后,铸铁的显微组织中就会出现块片状(C型)石墨,影响铸铁的力学性能。

因此,用感应电炉熔炼铸铁时,炉料中生铁锭的用量最好不超过10%,以保证显微组织正常。

1980年,笔者曾在美国造访过七八家用感应电炉熔炼、生产高档灰铸铁件的铸造厂,没有见到一家用生铁锭的。欧洲用感应电炉熔炼铸铁的铸造厂,炉料中生铁锭的配用量一般都不超过10%。

目前,我国还有不少铸造厂,将冲天炉熔炼时所用的炉料配比,原封不动地用于感应电炉,不少企业生铁锭的用量为30%,有的企业甚至高达50%,再加以未能按感应电炉的冶金特点安排适当的孕育处理,结果显微组织中既有块片状(C型)石墨,又有D型、E型石墨(过冷石墨),这种不正常的组织当然有损于铸件的质量,希望能尽早纠正这种不合适的做法。

四、认真做好孕育处理和预处理

感应电炉熔炼的铁液,共晶结晶时的过冷度大,用以生产灰铸铁件,必须做好出铁时的一次孕育处理和浇注过程中的二次孕育处理。在此基础上,生产高质量铸件时,出铁前还应在炉内进行预处理。大批量生产高质量铸件时,还有必要考虑采用动态孕育工艺,以确保铸件质量的可重复性。

关于常规的孕育处理,有关的参考资料很多,不必在此处重复。这里,只想简要地介绍一下预处理和动态孕育工艺。

1. 预处理

铸铁的预处理工艺,约在20世纪70年代后期开始应用于欧洲,随后差不多与感应电炉熔炼铸铁的工艺同步发展。1980年,笔者在美国造访了几家用感应电炉熔炼铸铁的铸造厂,均采用预处理工艺,所用的处理剂都是碳化硅。目前,一些工业国家中,预处理工艺的应用面很广,而且已从感应电炉熔炼推广到冲天炉熔炼。

据笔者所知,目前美国用作预处理剂的碳化硅

约70%自中国进口,而我国采用预处理工艺的铸造厂却很少。

预处理的作用不仅在于减轻激冷倾向和减少碳化物的形成,还在于改善共晶转变时石墨的形核和长大。出于对灰铸铁的冶金要求,希望在较高的温度下发生共晶转变,析出石墨,并使过冷度最小,从而保证得到A型石墨,防止产生B型、D型和E型石墨。另外,还希望发生共晶转变时石墨形核率高,共晶团数量多,以得到细小的片状石墨。

通过预处理,生产薄壁铸件时,不仅可避免组织中出現碳化物,而且可使过冷型石墨(B型和D型)减至最少。预处理工艺可用于砂型铸造,也可用于金属型铸造和离心铸造。

铸铁所用的预处理剂,应该是含碳、硅的晶态材料,碳化硅的应用较广。对于灰铸铁,一般都采用SiC含量(质量分数)为85%~90%的冶金碳化硅;对于球墨铸铁则宜采用SiC含量为97%~98%的碳化硅。

人造石墨(晶态石墨)也可用作预处理剂。

75SiFe则只有提高硅含量的作用,作为预处理剂的效果不明显。

用碳化硅作预处理剂时,加入量一般为0.7%~1.0%,实际应用时,应通过试验求得最佳值。

2. 动态孕育工艺

铸铁是非常复杂的铸造合金,其显微组织和性能决定于很多因素,例如:所用炉料的状况,炉料熔化的过程及温度控制,奥氏体和石墨在铁液中形核的条件,化学成分,孕育方法,以及孕育剂的品种及用量等。虽然生产和应用铸铁件已有2000多年的历史,大家对铸铁的结晶、凝固过程(奥氏体和石墨的析出和长大)也都有所了解,但是,时至今日,我们的认识仍然很不全面。而且,在生产条件下进行孕育处理时,对于孕育剂品种的选用,加入量的确定,以及所依据的资料和信息往往都是不够充分的,只能依据经验或过去的试验结果。因此,即使是很有经验的技术人员,也经常会遇到始料未及的问题。

(1) 化学成分分析 现在,一般的铸造厂都配备有炉前快速分析仪,很多铸造厂还配备了光谱分析仪,这对于控制铸铁的化学成分虽然十分必要,但对于有效地控制铸铁的显微组织和性能则是不充

分的。而且,用感应电炉熔炼的铸造厂尤其需要知道铁液中的氧含量。

实际上,炉前快速分析所能测定的元素是非常有限的,一些对铸铁组织有重要影响的微量元素都不能测定。采用光谱仪,能测定的元素多了,但对铁液中所含的气体,各种氧化物、硫化物、硅酸盐的含量,以及其他影响铸铁凝固过程的因素,仍然无从知晓。

总之,炉前化学分析是必要的,但对于实施有效的工艺过程控制则是不充分的。因此,不同铸造厂生产的化学成分相近的铸铁件,性能可能有很大的差别。即使同一铸造厂,在不同时间生产的化学成分相近的铸铁件,其性能也不尽相同。

(2) 热分析 要对铸铁的微观组织和性能进行有效的控制,除化学成分外,还必须依靠由热分析得到的数据和信息。

目前,铸铁企业所用的热分析系统,大多在试验样杯中加砷,使铸铁试样按亚稳定系凝固。通过这样的热分析,可得知铸铁的液相线温度和按亚稳定系凝固时的共晶转变温度,并由此推算碳、硅含量和碳当量。但对于生产灰铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁件,都不能提供任何有关石墨化的信息。

因此,铸铁所用的热分析系统,应采用不加砷的样杯,使试样按稳定系凝固,并得到相应的冷却曲线。然后再由人工智能系统根据设定的条件,就每一种合金解读其冷却曲线,并提供相关的信息。这种热分析系统可适应各企业的具体条件,通常称之为“自适应热分析系统”(ATAS)。

最近,业界开发的控制蠕墨铸铁质量的NovaCast系统和SinterCast系统都是自适应热分析系统的发展。

(3) 铸铁的动态孕育处理 动态孕育处理的特点:孕育剂的加入量不是固定不变的,孕育剂的品种也不限于一种。进行处理时,根据成分分析和热分析得到的数据,实时地调整孕育剂的品种及其加入量,使铸铁的微观组织达到最佳状态(德国的铸造工艺研究所多年前就已就此编制相应的软件)。这样,就可以有效地控制铸件的显微组织和性能,保持铸件的质量稳定一致,防止铸造缺陷的产生,并使废品率降到最低水平。MW

(待续) (20120712)