

· 工艺技术 ·

真空感应炉熔炼过程供电制度的优化

邓长辉 桑海峰 王福利 王 姝 郑险峰 任 伟 姜立新 宗德平
(东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004) (东北特殊钢集团抚钢公司, 抚顺 113001)

摘 要 通过对 3~6 t 真空感应炉熔炼过程的能量需求与损失的系统分析与计算, 利用热电平衡规律, 推导得出真空感应熔炼过程能量平衡模型, 并提出各熔炼阶段合理的电能供给制度。采用优化的供电制度在 3~6 t 真空感应炉中通过所冶炼的 38 炉 300M 钢 (0.4C, 1.10Mn, 1.64Si, 0.29Co, 1.85Ni, 0.4Mo) 的结果可得, 冶炼电耗降低 41 kWh/t, 生产效率提高 8.3%, Mn 收得率提高 1.6%, Cr 收得率提高 0.25%, 并提高了坩埚使用寿命。

关键词 真空感应炉 熔炼 电热平衡 供电制度优化

Optimization of Electric Power Supply for Melting Process of Vacuum Induction Melting

Deng Changhui, Sang Haifeng, Wang Fuli and Wang Shu
(College of Information Science and Engineering, Northeast University, Shenyang 110004)
Zheng Xianfeng, Ren Wei, Jiang Lixin and Zong Deping
(Fushun Steel Co, Dongbei Special Steel Group, Fushun 113001)

Abstract A model for energy equilibrium in melting process of vacuum induction melting and the rational electric power supply regulation in each melting period have been derived and got by systematical analysis and calculation on power requirement and loss in melting process of 3~6 t vacuum induction furnace and on basis of electro-thermal equilibrium law of system. The results of melting 38 heats steel 300M (0.4C, 1.10Mn, 1.64Si, 0.29Co, 1.85Ni, 0.4Mo) in 3~6 t vacuum induction furnace showed that after using optimum electric power supply regulation the electric consumption decreased by 41 kWh/t, the productivity increased by 8.3%, Mn and Cr yield increased by 1.6% and 0.25% respectively, and the service life of crucible increased obviously.

Material Index Vacuum Induction Furnace, Melting, Electro-Thermal Equilibrium, Optimization of Electric Power Supply

和其他类型电弧炉相比较^[1], 真空感应炉的优点主要是加热速度快, 设备生产率高, 氧化损失少; 金属在坩埚内进行熔炼, 由于存在电磁搅拌, 有利于脱气以及合金成分的均匀化。但通过对真空感应炉生产工况的分析, 发现还存在许多问题, 如能耗高, 电热效率低, 凭经验操作等。由于真空感应熔炼过程具有多输入、多输出、非线性, 钢水成分、温度难以在线检测, 并且坩埚内的反应复杂多变, 难以建立精确的数学模型^[2]; 另外, 我国真空感应炉熔炼的自动化水平低, 基本上依靠人工经验进行操作, 这就大大增加了生产成本^[3]。

本文以 3~6 t 真空感应炉为背景, 结合实际生产工艺并加以理论指导进行了熔炼过程的建模, 提出了生产过程中工艺设定值优化操作思想, 与常规工艺比较具有生产效率高、电耗低和元素收得率高等优点。

1 真空感应炉熔炼工艺

真空感应炉熔炼时, 炉料以废钢铁料为主, 以各种微量合金料为辅料。炉料在感应电流的作用下加热并熔化, 经过一系列复杂的物理变化及化学反应, 最后形成成分与温度合格的产品。工艺流程如下:

供电 | 抽真空 | 一次取样 | 二次取样 | 三次取样
装料 ———→ 熔化期 ———→ 精炼期 ———→ 合金化 ———→ 出钢浇注

真空感应炉装料与常压感应炉冶炼类似, 不同材料按其熔点、易氧化程度、比重、加入数量以及易挥发程度等加入不同部位, 并选择合宜的加入时间。装料要“下紧上松”, “梯形装料”, 这样可防止卡料。熔化期的主要任务是使炉料熔化、去气并使合金液有适当的温度和足够的真空度, 为精炼期创造条件。精炼与合金化过程主要是进一

步完成脱氧、脱气和去除有害杂质,以进一步净化合金,调整温度,调整合金成分并使之均匀化(即完成合金化过程)。当达到出钢温度与合金成分要求时即进行出钢浇注操作,至此完成一炉熔炼。

2 感应加热过程模型

在感应炉熔炼过程中,电能的输入是非常重要的环节,建立熔炼过程的电热模型,进行电能的合理分配,可以优化各熔炼阶段的操作工艺,保证出钢质量,缩短熔炼时间,提高生产率,最大程度地降低熔炼成本。

2.1 能量需求计算模型

能量需求主要包括两部分:物理反应所需能量和化学反应所需能量^[4]。

物理反应所需能量指用于加热炉料熔化到熔点并升温到过热温度(即出钢温度)所需的能量,用 Q_{r1} 和 E_{r1} 表示。 Q_{r1} 为加热、熔化炉料的热流, E_{r1} 为加热、熔化炉料的总热量。影响其主要因素有炉料熔化速度,固态炉料和钢水的比热,炉料的人炉初始温度,液相线温度和钢水过热温度等。

化学反应吸热能量为 Q_{r2} 和 E_{r2} 。 Q_{r2} 为化学反应吸热速度,影响其因素有反应元素质量,反应元素反应热(具体数值由文献[5]给出),元素的分子量以及收得率(由实验值给出)等。

这样,在熔炼过程中某一时刻所需的能量为

$$Q_r = Q_{r1} + Q_{r2} \quad (1)$$

整个炼钢过程中总的需求能量为

$$E_r = E_{r1} + E_{r2} \quad (2)$$

2.2 能量损失计算模型

感应加热过程最主要的能量损失为坩埚炉衬散热。而坩埚炉衬散热又包括侧壁和炉底两部分散热。其中坩埚侧壁炉衬为三层圆柱筒壁组成,其热损计算可按多层无限长圆柱体的传导热计算公式进行,炉底热损耗可按多层平面壁的传导热公式计算。为简化计算,假设坩埚炉衬内壁表面温度均匀并且与熔池内金属液温度相同,各层壁之间导热均匀。

坩埚侧壁热损耗为:

$$Q_{L11} = \frac{t_1 - t_0}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (3)$$

式中: t_1 -坩埚内壁,各层炉衬交界面及外表面温

度; t_0 -环境温度; R_i -各层炉衬的热阻。

炉底的热损耗为:

$$Q_{L12} = \frac{t_1 - t_0}{R_1' + R_2' + R_3' + R_4'} \quad (4)$$

式中: R_i' -各层的炉衬的热阻。

所以炉衬的总散热损失热量为:

$$Q_{L1} = Q_{L11} + Q_{L12} \quad (5)$$

由于熔炼过程中,钢水的温度是不断在变化的,所以为了计算方便,假设钢水的升温与降温过程都是按线性变化,那么知道了某一熔炼阶段的始末温度和时间,就可以计算出某一温度下的散热时间 $\Delta\tau$,这样就能估算出该阶段的总的散热能量。

$$E_{L1} = \sum_i Q_{L1i} \Delta\tau \quad (6)$$

除炉衬散热外,能量损失还包括水冷系统的吸热、抽空烟气带走的热损失热量以及停电装料时的能量损失。

所以,可得熔炼过程中某一时刻,总的能量损失速率为:

$$Q_L = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} \quad (7)$$

考虑到打开炉盖的辐射散热,总的能量损失为:

$$E_L = \int (Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3}) dt + Q_{L4} \Delta\tau' \quad (8)$$

式中: Q_{L2} -整个感应炉系统各个水冷系统的吸热总和; Q_{L3} -抽空烟气带走的热损失热量; Q_{L4} -停电装料时的能量损失; $\Delta\tau'$ -加料时间总和。

3 熔炼过程供电制度

电能的输入应以能量平衡来计算,即电能输入量应等于熔炼过程的需求能量与能量损失之和,但是电能分配不能以瞬时的能量平衡为基础进行计算,因为在熔炼过程中存在着取样测温,添加合金炉料等突变情况。因而,通常电能的输入应以熔炼各个过程的能量平衡为基础而分段设定进行合理的分配。

即根据电热平衡求出电能总量:

$$E_e = \int_0^t (Q_r + Q_L) d\tau \quad (9)$$

由合理的供电原则确定具体的供电制度。真

空感应炉供电可分为熔化期供电、精炼期供电、合金化期供电与出钢浇注前的供电。

3.1 熔化期供电

熔化期的主要任务是使炉料熔化和去气。根据前面所建立的能量平衡模型,计算炉料熔化并升温的精炼要求温度(一般约为 1 550 ℃)所需求与损耗的能量,给出熔化期总的电能输入 $E_{r, melt}$ 。熔化期供电可分为两个阶段,称为熔化前期和熔化后期。这个时刻的工作点,可由炉内真空度的大小来判断,因为当炉料刚开始要熔化时,必然有大量的气体排除,而导致炉内的真空度急剧下降。而当固体炉料相对较少,出气速度较慢,也就是当炉内真空度迅速回升并达到某一临界值 F 时,可作为熔化前期与后期的分界点。

熔化期前期,采用逐渐升高功率,缓慢熔化的供电方式。这里,可按线性供电方式供电。根据大量实际熔炼过程数据,对于某一钢种可以估算出到熔化前期结算时(即炉内真空度达到 F 时)的时间 τ^* 和输入的能量 E^* ,那么,有如下的关系式:

$$\frac{P_0 + P_{\tau^*}}{2} \tau^* = E^* \quad (10)$$

$$P_{\tau^*} = P_0 + k\tau^* \quad (11)$$

式中: P_0 -初始输入功率(一般取 100 kW); P_{τ^*} -真空度达到 F 时的输入功率; k -斜率。从式(10)与(11)就可计算出斜率 k ,就可以得出熔炼前期的功率输入曲线。在实际熔炼过程中,熔炼时间 τ_1 与熔炼前期结束的输入功率 P_{τ_1} 大小以炉内真空度达到临界值 F 时为准,这样就可以求出实际的熔炼前期的输入电能 E_1 。进入熔化后期,按最大功率 P_{max} 供电,供电时间 τ_2 由下式计算:

$$P_{max} \tau_2 = E_{e, melt} - E_1 = E_{r, melt} + Q_{L, melt} (\tau_1 + \tau_2) - E_1 \quad (12)$$

$$\text{则 } \tau_2 = \frac{E_{r, melt} + Q_L \tau_1 - E_1}{P_{max} - Q_L} \quad (13)$$

式中: $E_{e, melt}$ -熔化期的总的输入能量; $E_{r, melt}$ -熔化期总的需求能量,可由 2.1 中方法求出; $Q_{L, melt}$ -熔化期的热损失速率,由 2.2 中模型求出; E_1 -熔化前期的已输入的能量。

3.2 精炼期供电

精炼期的主要任务是脱气,并保证熔体有一

定的过热度,并在一定的保持时间内能够保持这一温度,所以只要按能量平衡所需进行供电即可。精炼时间 τ_3 可采用脱气的程度来计算^[6]:

$$\tau_3 = \frac{2.3 V \delta}{BD} \log\left(\frac{c'}{c_0}\right) \quad (14)$$

式中: B -金属与气相接触的表面积; V -液态金属的体积; δ -扩散界面层的厚度; D -气体原子在金属内部的扩散系数; c_0, c' -分别为初始时刻气体的浓度(可由第一次取样分析数据获得)和达到要求的气体浓度。由于精炼期保持精炼温度不变,所以输入电能 $E_{e, fine}$ 与该时期的热损耗相同,即:

$$E_{e, fine} = \int_0^{\tau_3} Q_{L, fine} d\tau \quad (15)$$

式中: $Q_{L, fine}$ 为精炼期的热损失速率,这样就能确定出精炼期的输入功率。

3.3 合金化的供电

合金化的供电采用降温加料,高功率搅拌的原则。加入合金时,需要停电,以最大降温速度来缩短冶炼时间,其所需降温停电时间 t_{stop} 可用下式计算:

$$\tau_{stop} = \frac{t_{st} - t_r}{v_t} \quad (16)$$

式中: t_{st}, t_r -分别为过热温度(即精炼温度)与液相线温度; v_t -停电降温速率。低温加入合金化料后,应立即高功率(可以用 600 ~ 700 kW)搅拌以达到均匀化目的,但时间不宜过长,一般约 10 min。

3.4 出钢浇注前的供电

在第三次采样测温确定成分满足要求后,要进行出钢前加热,升温到出钢温度,此时可采用最大功率 P_{max} 加热。同样利用能量需求计算模型与热损耗模型计算出总的输入电能 $E_{e, out}$,最后计算出加热时间 τ_4 。熔炼过程电能输入设定值的具体计算步骤如图 1 所示。

4 实验结果和分析

本文针对 300M 钢种,在 3 ~ 6 t 真空感应炉上进行了一个坩埚的冶炼,共计 38 炉。其平均化学成分见表 1。

在冶炼过程中,采用分段能量平衡的方法,结合具体工艺给出了输入功率阶段值,与优化前各

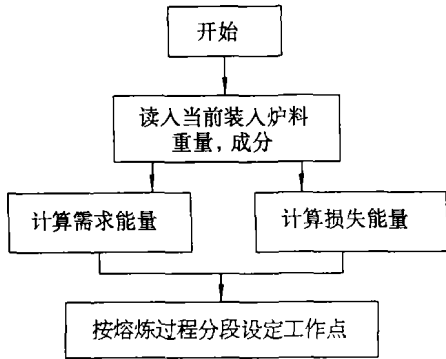


图 1 电能输入计算框图
Fig.1 Calculating chart of electric power supply

熔炼时期的参数对照如表 2 所示。

这次 38 炉 300M 的成功冶炼,其各项指标的平均值达到了优化前最佳炉次的水平,与以前平均值相比个别指标有明显改善。

在熔化期,对真空度与熔化速率的关系进行了模型控制,使输入的功率曲线更为合理。在很好的实现了熔化期去气功能的同时,又提高了生产效率。

在精炼、合金化及浇注期,由于优化了熔炼功率的输入,避免了金属过热、减少了对坩埚的冲刷、缩短了出钢期时间,不仅降低了能源消耗,还因为避免了过热和冲刷而提高了坩埚寿命,因此

表 1 300M 钢化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of steel 300 M /%

C	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Mn	Si	S	P
0.395	0.86	余	0.29	1.85	0.40	1.10	1.64	0.001	0.005

表 2 3~6 t 真空感应炉熔炼过程供电制度优化前后输入功率和熔炼时间对比
Table 2 Comparison of input power and metallurgy time of 3~6 t vacuum induction furnace melting before and after optimization of electric power supply

输入功率与时间		熔化前期	熔化后期	精炼期	合金化时期	出钢浇注期
优化前	输入功率/kW	100~600	600~750	310	搅拌功率 800	700~800
	时间/min	160	100	85	每次搅拌 10	20
优化后	输入功率/kW	100~540(k=2.9)	540~800	310	搅拌功率 700	800
	时间/min	152	75	78	每次搅拌 10	15

也减少了钢中的非金属夹杂物,提高了产品质量。
本文方法给出 300M 钢种的输入功率设定值与实际熔炼过程中最佳炉次的工艺结果相当,说明该方法是可行的,能对工业生产进行理论指导,具有实际价值。

5 结论

针对 3~6 t 真空感应炉熔炼工艺过程进行了深入的研究,并结合实际操作情况进行感应加热过程的建模,在该模型的基础上,给出了熔炼过程的供电制度。对具体钢种进行计算得出了与实际熔炼最佳炉次相当的结果,熔炼结果表明,吨钢电耗降低了 41 kWh/t;生产效率提高了 8.3%;提高元素收得率 Mn:1.6%、Cr:0.25%;提高坩埚寿命 2 次。非金属夹杂物降低 0.5 级。说明该方法的可行性,对于真空感应炉的实际应用具有较大参考价值。

本研究课题为国家基金项目“973”计划子课题(2002CB312200)

参考文献

1 李恩琪,殷经星,张武城. 铸铁用感应电炉. 北京:中国农业机械出版社,1981,11
2 侯少良,边 舫. 3 t 和 6 t 真空感应炉冶炼工艺实践. 特殊钢, 2000,21(3):42
3 彭杰楼. 国内外真空感应炉发展概况. 工业加热,1998(4):12
4 武拥军,姜周华,梁连科,等. 钢的液相线温度的计算. 钢铁研究学报,2002,14(6):6
5 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册. 北京:冶金工业出版社, 1984,2
6 戴永年,赵 忠. 真空冶金. 北京:冶金工业出版社,1988,3

邓长辉,男,41 岁,教授级高级工程师,博士研究生。主要从事智能控制与工业自动化的研究及开发工作。