

# UHCP( 超高化学能) 电炉的设计与性能

王贵平译

岳喜全校

## 1 前言

建造有超高化学能输入的电弧炉是一个趋势, 这种电炉约有 40% 的能量由烧嘴提供。为了更完全地利用这些化学能需要对炉壳设计进行改进, 减少熔池及炉墙表面积, 以降低向炉壳的辐射散热量, 从而提高传热效率和废钢使用量, 还需要基于烟气成分分析对过程实施动态反馈控制。

最近完成的项目及新的电弧炉(EAF) 订单表明在电炉设计上的一种趋势, 即采用更高的化学能以提高生产率。

根据基本指标分析, 对运行结果进行评估, 可以看出, 目前的这种设计标准要优于几年前的最好水平。

影响这种工艺的关键因素在于:

- 使用高化学能;
- 炉壳设计。

EAF 上的烧嘴及超音速氧气喷吹量大增加, 吨钢氧气喷吹量接近于氧气转炉。

这种高能量输入要求采用不同的炉型设计和不同的有效过程控制设备。而这种不同设计概念的结果就是超高化学能电弧炉——UHCP - EAF。

## 2 高生产率电炉

Concast AG 是 SMS 集团的子公司, 它是一家集技术、工程、安装及设备的全面供应商, 提供用于生产长材(用废钢和直接还原

铁生产的大方坯、异形坯、圆坯及小方坯) 的电炉、钢包炉及连铸设备。

最近, Concast 已新建或改造了多台电炉, 这些电炉都采用了已被现场实际操作验证的统一数据库。

近三年来的电炉性能趋势显示, 电炉生产正在发生一些变化。

在为土耳其 Icdas Celik Enerji Tersane ve Ulasim Sayayi AS( Icdas) 新建一座炼钢厂时(该厂于 2003 年 11 月投产) 出现了一个新情况——一座电炉显示出出众的表现。

Icdas 厂的电炉公称容量为 175t, 能量输入需要达到较高的水平(变压器功率为 168MVA, 吹氧量 21 000Nm<sup>3</sup>/h, 天然气输入功率 39MW), 并需对其带有废钢预热装置的综合烟气系统在设计、结构和实际操作上进行全面改进。

Icdas 厂电炉生产优质小方坯时的一般指标为:

- 生产率: 230t/h;
- 耗电量: 325kWh/t(使用冷废钢);
- 耗电量: 290kWh/t(使用预热至 200℃ 的废钢);
- 总氧耗: 47Nm<sup>3</sup>/t;
- 总天然气消耗: 6Nm<sup>3</sup>/t;
- 电极消耗: 0.9kg/t。

这座电炉表现出与几年前的普通电炉相反的出众性能。普通电炉在公称容量为 80t 时效率最高, 炉容再增大效率就会降低。这

说明该电炉在今后有投资价值。

我们注意到,在 Icdas 之后建造的其它炉容量较小的电炉也显示出优良的性能。

这种新电炉的主要特点就是采用了 UHCP EAF 设计。

### 3 基本指标分析

要对 UHCP EAF 的基本特性进行对比分析,需要两组不同数据:历史数据和当前数据。

历史电炉数据主要来源于 10 年前 ABB (ABB 电炉部在 1997 年被 Concast 兼并,并入 Concast 电炉部)的电炉数据及 1997 年后 Concast 的电炉数据。

为使分析能够涵盖全部炉容范围,对比了 4 座 UHCP 电炉(这 4 座电炉的炉容量分别为 60t、80t、100t 和 175t)的数据。

图中画圈的是 UHCP EAFs 的数据,其余为 Concast 其它电炉的数据。

当今的新电炉的趋势是较大的炉壳直径以及产能和消耗指标的明显改善。

对小电炉进行改造的目的就是要进一步缩短冶炼周期、降低单位消耗值。

两方面的市场原因迫使生产商去大大提高电能和化学能的输入功率。缩短冶炼周期通常意味着非常高的电能输入功率。

UHP 指数(图 1)的提高主要是出于产量增长的需求,但会大大影响电极侧炉壳及耐材的寿命。

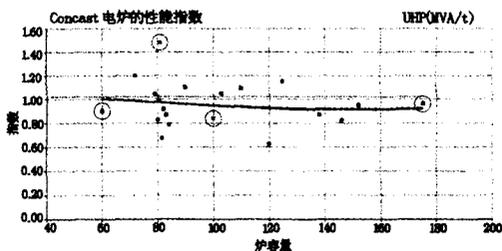


图 1 目前 Concast EAF 的 UHP 指数 (画圈的点为 UHCP 电炉)

短短几年,辐射指数 RI 就从 130k $WV/cm^2$  提高到 250k $WV/cm^2$ ,增长了近 90%。

UHP 指数平均为 1.0MVA/t,但在一次性装料情况下的峰值会达到 1.5MVA/t。

在化学能使用更便利的国家普遍要求降低电能消耗,加上快速冶炼的需求,导致了新一代燃烧器及氧气喷嘴的产生。

烧嘴及吹氧管的快速安装自动提高了对化学能输入的要求,如图 2 所示。

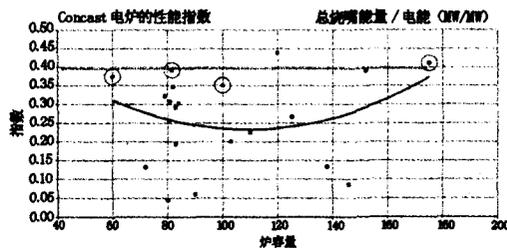


图 2 烧嘴能量(红色)及电能输入 (画圈的点为 UHCP 电炉)

有两种不同的选择:

- 增加烧嘴和吹氧管数量;
- 增大烧嘴和吹氧管的功率。

为减少维修、简化电炉设备,Concast 选择了第二种方法,同时引入了有效的过程控制设备。

UHCP EAF 的烧嘴能量输入约占电能输入的 40%,也就是说,比总能量输入多 30%。

一般而言,要改善电炉性能,化学能输入量与电能输入量的比值要高。对大电炉来说,不仅要考虑相对能量输入,也要考虑绝对能量输入;而这些又导致能量输入控制及其实现手段的选择。近几年电炉技术和设计的革新显示正在发生着一些变化,我们将在后面讨论这一话题。

UHCP 电炉还需要选择不同的力学设计参数。其中之一就是炉容指数(VI) = 面积/容积 [ $m^2/m^3$ ]。降低 VI 可以延长废气在炉内的停留时间,从而提高炉气与废钢间的传

热效率。

此外,增大炉容有利于增多废钢的填充量和优化废钢在炉内的分布。而且在开炉盖及浅熔池操作时,熔池表面的辐射散热减少,同时减少了水冷炉壳面积,从而降低了水冷炉壳散热量。

降低 VI 的主要缺点是,提高了电弧辐射指数(RI)及水冷炉壁的理论热应力。

另一个缺点是在冶金学方面,它减少了钢液熔池表面积,从而减少了钢—渣反应面积。

图3、图4所示分别为熔池钢液表面积与电炉容积的比(三角形数据点)及炉墙总面积与电炉容积的比(方形数据点)。不同颜色的圆形的数据点分别为4个UHCP电炉的指标值。图3为10年前的电炉数据,图4为近10年来的电炉数据。

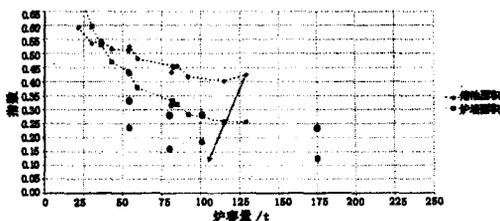


图3 10年前不同炉容量电炉的几何指数数据点:菱形为熔池表面积/炉容积,方形为炉墙总面积/炉容积,圆形为UHCP数据

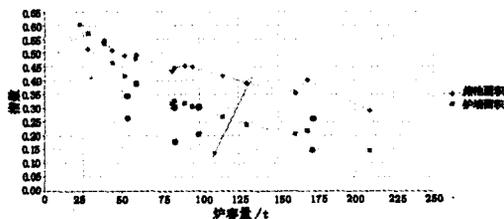


图4 近10年来不同炉容量电炉的几何指数

一般而言,新型UHCP电炉的指数比老式电炉低20%以上。

过去10年中安装的电炉与早期电炉炉

型不同,主要原因是需要分两篮装入轻型废钢。

从机械性能角度而言,我们有必要对水冷炉壁(WCP)进行讨论。在现在的电炉中,由于电弧及烧嘴和吹氧管的作用,水冷炉壁所受的热应力很大。输入功率的提高直接影响了水冷炉壁,目前一般采用具有独立水循环系统的两片式(一片为铜板、一片为钢板)结构制造。根据热负荷的不同,对每块水冷板设定相应的冷却水流速。

由于安装了吹氧管,在喷吹超音速氧气流时热负荷会急剧增加:在很短的时间内冷却水温度会提高一倍。

近几年的水冷炉壁技术发展,降低了冷却造成的热损失。开发了多层或双层水冷炉壁——这是一种内部采用低导热系数惰性材料的复合水冷炉壁。采用这种绝热性高的炉壁,降低了向冷却水的传热量。

较高的绝热性能使炉壁内表面的温度更高(约达1100℃),从而使炉气温度更高,改善了向炉料的传热。

#### 4 过程控制系统

炉型是影响电炉性能的重要因素,但安装的过程控制系统则是更加重要的影响因素。

UHCP电炉的主要过程控制系统为:

- 可稳定电弧操作的先进电极调节系统(ERS);
- 为降低过热期裸电弧的危害,采用了带有碳粉喷嘴的炉渣控制系统(SCAD);
- 使用高效喷嘴的高功率烧嘴及超音速吹氧管(ConsoTech);
- 氧气和碳粉喷枪采用实时烟气分析、反馈控制系统(IPD)。

这些过程控制系统是有效的功率输入控制所必需的,是UHCP电炉实现最佳性能的保障。

例如, ERS 和 SCAD 与电弧控制密切相关, 能够确保电弧稳定和埋弧良好。良好的电极控制能够改善电能输入(即时功率)和电极消耗, 并且影响精炼期的电耗和耐材寿命。

同样, 氧气利用技术也会影响电炉效率。ConsoTech 和 IPD 会直接影响化学热的传递效率, 并影响电极消耗和耐材寿命。

烧嘴效率对化钢期有重要影响, 能够实现快速化钢并保证熔池均匀。而吹氧效率则与电极消耗、熔池喷溅或耐材消耗有间接关系。

由于有了 IPD 系统的烟气实时激光分析系统, 可以实时确定氧气利用率, 并对吹氧操作进行控制。

如前所述, 冶炼周期的缩短也大大改变了化学能输入的方法。

### 5 基本指标

电炉性能基本指标中最重要也最常用的一个就是单位电耗。

图 5 为生产小方坯时的单位电耗(红线)及总电能消耗(黑线), 单位为 kWh/t。此数据为目前 Concast 电炉的数据。划圈的是 UHCP 电炉的数据, 它们都显示出卓越的性能。

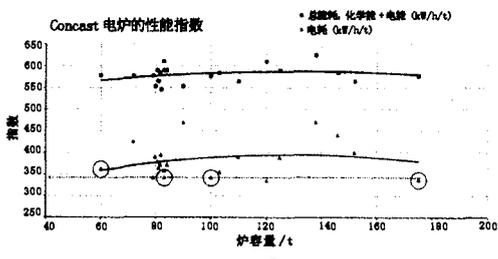


图 5 10 年前不同炉容量电炉的几何指数

第二个基本指标是单位生产率与输入总能量(化学能 + 电能)之比(见图 6)。应强调的是, 送电功率对生产率的影响很大(炉

子毕竟是电炉), 因此图 6 应与图 1 中的 UHP 指数结合起来一起看。UHP 指数越大, 单位生产率越高。

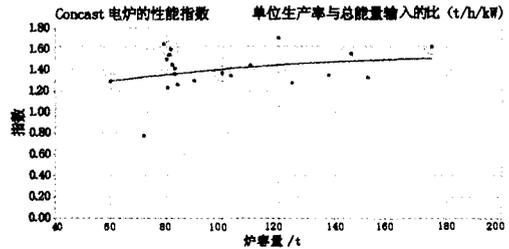


图 6 单位生产率与总能耗之比画圈的为 UHCP 电炉

两台 UHCP 电炉的指标均达到最佳, 它们的 UHP 指数都在 1MVA/t 以上。这说明大炉容量有利于生产率的提高。这一指标值的单位为 [t/h/MW]。

另一个常用指标是单位氧耗。普通电炉平均单位氧耗为 35 ~ 40Nm<sup>3</sup>/t, 而 UHCP 电炉则高出 20% - 30%。这些数据来自采用全废钢的电炉, 因此可以认为化钢期操作基本是相似的(图 7)。

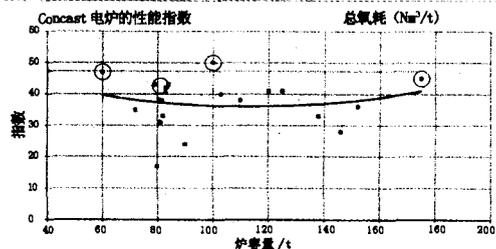


图 7 总氧耗(画圈的为 UHCP 电炉)

更重要的指标是供氧强度, 见图 8。它是考查操作及电炉本身的重要指标。值得指出的是, 氧气转炉的供氧强度极限约为 180Nm<sup>3</sup>/h/t, 而 UHCP 电炉的供氧强度极限可达 150Nm<sup>3</sup>/h/t。

这个指标的计算方法是, 吹氧管氧气流速与出钢量之比 [Nm<sup>3</sup>/h/t]。采用废钢的电炉很少能够达到 150Nm<sup>3</sup>/h/t 的极限值, 仅在

采用 DRI 或铁水的电炉中能够达到这一水平。

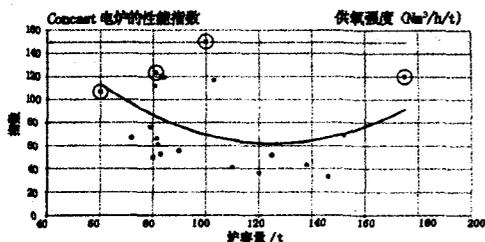


图 8 供氧强度(画圈的为 UHCP 电炉)

如前所述,当冶炼周期缩短到约 30min 时,必须提高氧气浓度。采用目前的吹氧技术,可在 5min 的过热时间内达到要求的脱碳率。

可通过熔池表面供氧强度对这一指标做进一步分析(图 9)。该图显示,当氧气利用率较高时,这一指标值达到较高水平。

这一指标值比传统电炉高出近三倍。指标的计算方法为,吹氧管的氧气流速比熔池表面积 $[Nm^3/h/m^2]$ 。

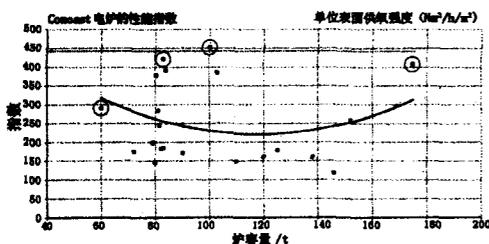


图 9 熔池表面供氧强度(画圈的为 UHCP 电炉)

## 6 化学能效率

最后一个需要讨论的问题是输入化学能的利用率(和化学能的传热效率)。这是一个很难回答的问题,因为它们不易被测定。

电能是连续测定的;同样,也能够对天然气(或液化石油气)和碳粉提供的总能量进行估算,但很难对氧气的总贡献进行估算,因为氧气不会在燃气和碳粉的燃烧中完全反应

掉。

另外,要假设一定的操作条件,并对数据进行收集处理,来确定化学能利用率的值。图 10 所示为估算的化学能输入量对电炉的影响。

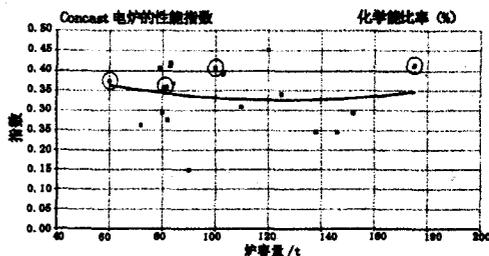


图 10 化学能与总能耗比值(画圈的为 UHCP 电炉)

将燃气和碳粉带入的总能量同电耗对比后估算化学能的输入量;其余化学能的贡献是根据能量的生成计算的(如 Si 或 Mn 的氧化等)。化钢过程中,化学能占到总能耗的 35%~45%。

由于采用了新技术,可以用其它方法来测定输入化学能的利用率。最近,Concast 安装了 3 台基于红外线激光技术的实时烟气分析系统。这些分析系统安装在第四孔弯头处,能够连续监测烟气的化学成分(体积百分比)。对烟气中的 CO、O<sub>2</sub> 含量及烟气温度进行连续监测。其中一台还对烟气中的水蒸气含量进行分析。

从这些系统得到的数据有利于我们确定传热效率(CO 含量)及氧气利用率(烟气中的自由氧含量)。对水蒸气含量的监测有助于确定碳氢化合物的燃烧效率,更重要的是,它能够反映电炉冷却水系统的泄露情况,这对防止发生氢爆炸是至关重要的信息。

作为过程控制器,它与电炉自动控制系统的每个参数相联接。

实时烟气分析系统的使用创造了前所未有的新机遇。例如,向喷吹系统进行实时反馈废气分析结果,可以优化工艺,并更好地掌

握电炉的热力学条件。

## 7 集成式过程控制器(图 11)

喷嘴和烟气系统全自动实时控制的真正创新在于所有相关任务和目标的集成。

集成式过程控制器(IPD)是一项创新,是一种强有力的过程控制工具。它的运行是基于现场各种参数,特别是实时激光废气分析仪的实时信息反馈。

其中最重要的集成部分为:

- 激光烟气分析仪;
- 喷吹系统阀站;
- 电炉炉压。

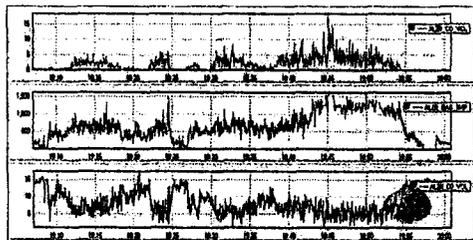


图 11 IPD 过程干涉

SCAD(泡沫渣)调节系统和 ERS(电极)调节系统也被分别联接到 IPD 的不同控制级中。

概括地说,IPD 的目标包括:

- 提高传热效率,如降低炉气中 CO 浓度,提高 CO<sub>2</sub> 浓度;
- 降低并优化氧气、碳粉和天然气的消耗;
- 防止由于在第四孔弯头后的烟气管道中 CO 浓度过高引起的爆炸;
- 检测漏水情况,防止由于炉内产生氢气引发的爆炸;
- 在设定的操作范围内指导工艺过程。

该控制器的主要功能是,采用实时烟气分析仪和基于模糊逻辑技术设计的控制软件,对烧嘴、吹氧管、碳粉喷枪和第四孔弯头

后用于控制气缝的滑阀进行反馈控制。

IPD 系统的主要输入数据来自于第四孔弯头处的烟气(图 12),包括:

- CO、O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的体积含量;
- 烟气温度;
- 电炉炉内负压;
- 烟气管道滑阀位置。

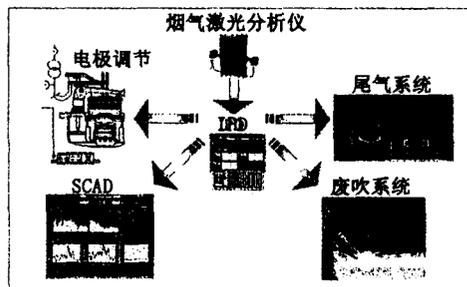


图 12 IPD 第四孔弯头处的实时烟气分析

IPD 根据所采用的控制模型对反馈信息作出反应,以调节各个喷嘴阀装置及烟气滑阀。并采用经验控制矩阵指导冶炼过程的系统操作。例如,其中一个控制模型可根据在第四孔弯头处测定的烟气温度及 O<sub>2</sub>、CO 含量作出相应反应,从而降低烟气中的 CO 含量。

对废气中水蒸气含量的监测是一项创新性的技术。由 IPD 控制的水量平衡不仅能确定天然气的燃烧效率,更重要的是能够使操作人员了解是否发生了漏水。一旦发生漏水,IPD 会起动警报程序,验证信息是否准确,并发出警告。这一安全周期能够在 30s 内完成,足以防止可能发生的严重危害。