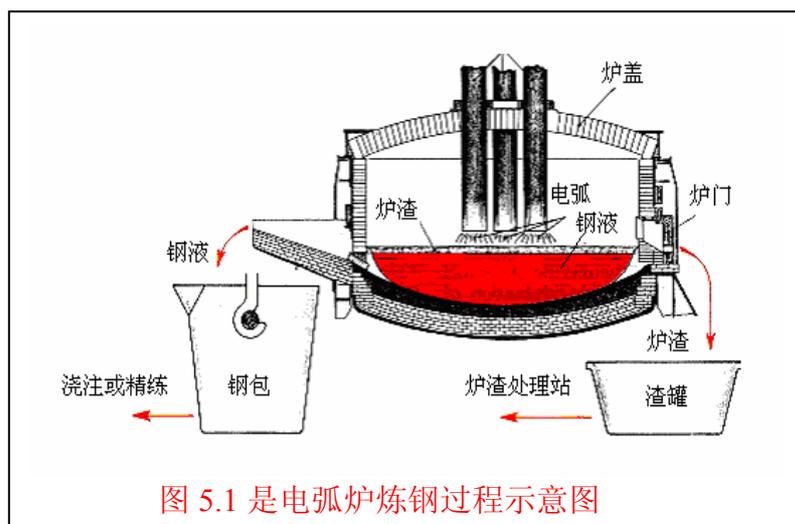


第五章 电弧炉炼钢

5.1 电弧炉炼钢概述

电弧炉（简称 EAF）炼钢是以电能作为热源的炼钢方法，它是靠电极和炉料间放电产生的电弧，使电能弧光中转变为热能，并借助电弧辐射和电弧的直接作用加热并熔化金属炉料和炉渣，冶炼出各种成分合格的钢和合金的一种炼钢方法。图 5.1 是电弧炉炼钢过程示意图。



电弧炉炼钢的特点为^[1]：

- (1) 电能为热源，避免燃烧燃料对钢液污染，热效率高，可达 65%以上；
- (2) 冶炼熔池温度高且容易控制，满足冶炼不同钢种的要求；
- (3) 电热转换，输入熔池的功率容易调节，因而容易实现熔池加热制度自动化，操作方便；
- (4) 电弧炉炼钢可以消纳废钢，是一种铁资源回收再利用过程，也是一种处理污染的环保技术。相当于是钢铁工业和社会废钢的回收工具。

由于钢铁良好的可再生性及环境、资源和能源等方面日益苛刻的要求，使得尽可能多的利用废钢成为国际趋势。废钢如得不到有效的回收和利用，将成为巨大的潜在环境污染源，有些甚至可能对水质、土壤等构成严重威胁。大量锈蚀的钢铁废料，不但造成资源的浪费，也将造成严重的粉尘污染。废钢的堆积本身也给环境带来不利影响。

(5) 炼钢过程的烟气污染和噪声污染容易控制；

(6) 设备简单，炼钢流程短，占地少，投资省、建厂快，生产灵活。

钢铁工业产生的大量固体钢制品若不认真对待，将是巨大的潜在环境污染源，有些甚至可能对水质、土壤等构成严重威胁。

当今钢铁生产可分为“从矿石到钢材”和“从废钢到钢材”两大流程。相对于钢铁联合企业中以高炉—转炉炼钢为代表的常规流程而言，以废钢为主要原料的电弧炉炼钢生产线具有工序少、投资低和建设周期短的特点，因而被称为短流程。近年来，短流程更特指那些电弧炉炼钢与连铸—连轧相结合的紧凑式生产流程。由最近的统计将两种流程作一比较(见表 5.1)，可见在投资、效率和环保等方面，以电弧炉为代表的短流程炼钢具有明显的优越性。

表 5.1 高炉—转炉炼钢和电弧炉炼钢两大流程的比较^[1-3]

类别	高炉—转炉流程	电弧炉流程
投资, 美元/吨钢	1000 — 1500	500 — 800
从原料到钢水的能耗, 标煤/吨钢	703.17	213.73
从原料到成品材的运输力需求, 吨/吨钢	15.8	9.48
二氧化碳排放 公斤/吨钢	2000 — 3000	800

5.2 电弧炉炼钢技术的发展

钢铁冶金的本质是高温化学反应，因而冶金中传统的能源是基于碳—氧反应的化学能，电弧炉炼钢所使用的能源以电能为主。

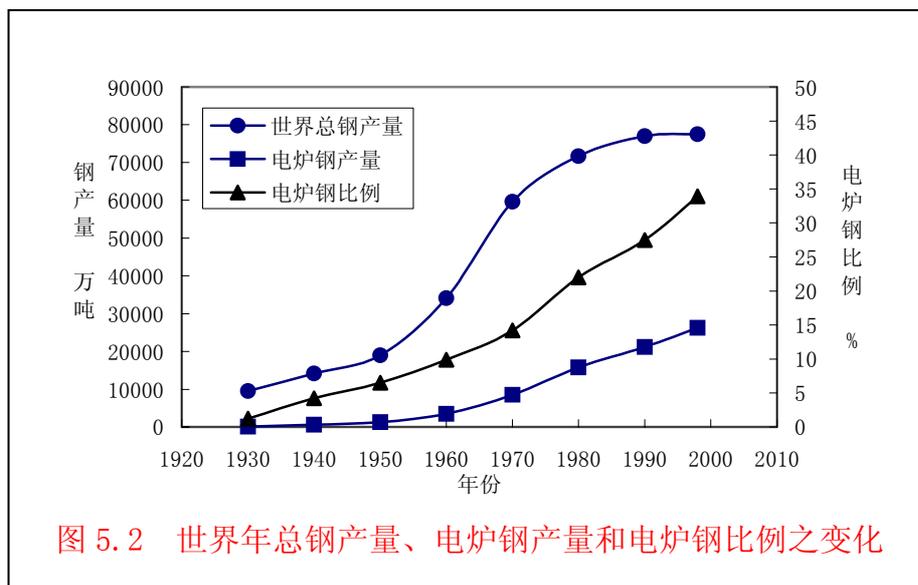
电能具有清洁、高效、方便、种种优越的特性，是工业化发展的优选能源。19 世纪中叶以后，各种大规模实现电—热转换的冶炼装置陆续出现：1879 年 William Siemens 首先进行了使用电能熔化钢铁炉料的研究，1889 年出现了普通感应炼钢炉，1900 年法国人 P. L. T. Heroult 设计的第一台炼钢电弧炉投入生产。从此，电弧炉炼钢在近一百年中得到了长足的发展，已成为最重要的炼钢方法之一^[2-5]。

20 世纪以来世界总钢产量、电炉钢产量和电炉钢所占百分比的变化列于图 5.2，可以看出：

- (1) 五十年代前电炉钢占百分比很低，是一类特殊的炼钢方法。
- (2) 五十年代以后，电炉钢得到迅速发展，1950~1990 年间世界电炉钢总

产量增长近 17 倍。电炉钢所占百分比也由 6.5% 增至 27.5%。

(3) 九十年代以来，世界电炉钢保持高速发展，1990~1998 年间世界电炉钢年产量增加 5123 万吨，电炉钢占百分比增长至 33.9%。



电弧炉炼钢发展过程中，经历了普通功率电弧炉→高功率电弧炉→超高功率电弧炉。其冶金功能也发生了革命性的变化，其功能由传统的“三期操作”^[1]发展为只提供初炼钢水的“二期操作”。

5.2.1 现代炼钢流程冶炼工序的功能演变

随着炼钢技术的进步，传统转炉和电炉的功能在发生转变：现代转炉的功能逐步演变为快速高效脱碳器、快速升温器、能量转换器和优化脱磷器^[1]；现代电炉的功能演变为^[1]：

(1) 快速废钢熔化

现代电弧炉冶炼的一个重要特征是冶炼周期大大缩短，已达到 35~45min，与同容量转炉冶炼周期相当，可满足高效连铸多炉连浇的节奏要求，成为了一个废钢快速熔化装置。

(2) 熔池快速升温

电炉原料中的废钢和生铁熔化后，为满足出钢温度要求，熔池快速升温，现代电炉成为了一个快速升温装置。

(3) 能量转换

现代电弧炉的能源结构包括电能、化学能和物理热。为缩短冶炼周期，必须充分利用变压器功率，增加电能输入；增加化学能和物理热，在一定的冶炼周期条件下，三种能量可以互相转换。在电力紧缺，价格高的地区，可以增加化学热和物理热的比例。采用废气预热炉料技术，可以增加物理热，减少电能的输入。原料中高配碳，生铁成为主要原料之一，加铁水是最好的生铁预热方式，可以增加化学热和物理热。现代电炉成为了一个很好的能量转换装置。

(4) 高效脱碳脱磷

为了缩短冶炼周期，以满足高效连铸节奏的要求，强化供氧，脱碳速度快，在废钢融化和升温过程中，电弧炉冶炼具有良好的脱磷条件，现代电弧炉成为了一个高效脱碳脱磷装置。

(5) 废弃塑料、轮胎等回收

现代转炉流程的焦炉、高炉工序可以回收部分废弃塑料；现代电炉流程也可能具有废弃塑料、轮胎等的回收功能且成本较低。

如上所述，转炉和电炉的功能已演变为基本相近，只是由于炉型不同，原料成分（主要是 C、P）不同，在脱碳量、脱碳速度和脱磷要求方面有所不同，从而工艺有所差别。

5.2.2 电弧炉炼钢工艺的进步

传统的电弧炉炼钢操作集炉料熔化、钢液精炼和合金化于同一熔池内，包括熔化期、氧化期和还原期。在电弧炉内既要完成熔化、脱磷、脱碳、升温，又要进行脱氧、脱硫、去气、去除夹杂物、合金化以及温度、成分的调整，因而冶炼周期长。这既难以保证对钢材越来越严格的质量要求，又限制了电弧炉炼钢生产率的提高。现代电弧炉炼钢工艺只保留了熔化、升温 and 必要的精炼操作，如脱磷、脱碳，而把其余的精炼过程均移到二次精炼工序中进行。电弧炉炼钢工艺上的改变，提高了电弧炉设备能力，使其能够以尽可能大的功率进行熔化、升温操作，而把只需要较低功率的操作转移到钢包精炼炉内进行。越来越完善的二次精炼技术，完全能满足钢液清洁度和严格的成分、温度控制的要求。

5.3 现代电弧炉炼钢工艺过程

5.3.1 原料

电弧炉炼钢使用的造渣材料、氧化剂等和转炉炼钢基本一样，但炼钢原料二者明显不同。转炉炼钢以铁水作为主要原料，电弧炉炼钢是以废钢作为主要原料。

废钢来源一般有三个方面，即钢铁企业在生产过程中的自产废钢、工矿企业在生产过程中的加工废钢、社会生产、生活、国防等废弃钢铁材料的拆旧废钢，如报废汽车、舰船、钢结构桥梁与建筑钢等。由于连铸技术的发展，连铸比不断提高，切头、切尾越来越少，每吨钢自产废钢大幅减少，钢厂内部回收废钢相应减少。

仅就电弧炉炼钢工序而言，废钢是基本原料，和其他冶炼工序一样，精料是首要的基础工作，废钢原料的鉴别、分类等管理工作和打包、剪切等预处理工作都是非常重要的。废钢铁是电炉的主要原料，电弧炉炼钢相当于钢铁工业的回收工具，它既回收从电弧炉流程返回的废钢，也回收从氧气转炉流程返回的废钢。这种现象，使得大型联合企业与小型钢厂形成一个闭环。为此，各个国家均把废钢铁视为宝贵资源。

电弧炉炼钢使用废钢原料的最大问题是金属残留元素，主要是残留的 Ni, Cr, Mo 等合金元素和 Cu, Sn, Bi, Sd, Pb 等有害元素。目前在电弧炉炼钢过程中，这些有害元素尚无有效方法去除，残留在钢材中造成种种危害，并在废钢循环再利用过程中不断积累。

目前采用的对策主要有：①加强废钢管理；②在废钢预加工过程中挑选或分离；③冶炼过程配加其他铁源，稀释残留元素的浓度。

5.3.2 补炉和装料

5.3.2.1 补炉

炉衬寿命的长短是多炼钢、炼好钢、节约原材料、降低成本的关键问题。

炉衬是指炉壁、炉底和炉盖。寿命最低的是炉壁，它的工作条件最差，距电弧近，温度高，又受炉渣的严重浸蚀。

炉衬严重损坏或补炉镁砂未烧结而在往渣中上浮时，渣中 MgO 颗粒大量增加，渣的流动性变坏，延缓渣钢间的化学反应，钢中夹杂物增加，钢质严重降低。

炉衬一般由碱性材料组成，渣中的碱性氧化物（如 CaO 、 MgO 、 MnO ），对炉衬浸蚀作用小，渣中的酸性氧化物如 SiO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 P_2O_5 等，对炉衬浸蚀作用大。炉衬寿命主要与渣中 SiO_2 含量有直接关系，一般在 10~20% 之间。

从补炉材料来分，有干补和湿补，干补时用镁砂 MgO 含量 < 78% 或白云石（焙烧过的）和焦油（碳氢化合物）作粘结剂；湿补用的粘结剂为卤水（ $\text{MgCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ）或水玻璃（ $\text{Na}_2\text{SiO}_4 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ），常用于损坏严重或坡度大不易补的地方。沥青和镁砂的配比约为 1: 10，卤水或水以玻璃或镁砂的用量以捏成团不松散为宜。

补炉时间因浸蚀的情况和炉子容量而定，一般为 3~5 分钟。

5.3.2.2 装料

装料质量对电弧炉炼钢熔化时间、合金元素烧损和炉衬寿命都有很大影响。装料应做到快和密实，以缩短冶炼时间和减少热损失。

为了保证炉料熔化的顺利进行，必须装得密实。炉料分为大料、中料、小料、轻薄料，装料时按一定比例以便一次加入。图 5.3 是电弧炉炉顶装料图。

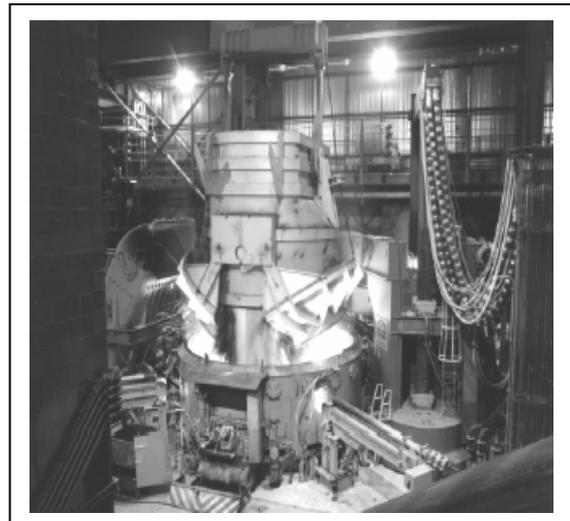


图 5.3 电弧炉炉顶装料图

5.3.3 炉料的熔化和钢液的氧化精炼

电弧炉炼钢首先需要快速熔化炉料，以便在氧化期和精炼期控制钢液的成份，去除有害的杂质磷、氢、氧和氮，并且去除钢中的非金属夹杂物。同时尽可能减少钢液吸收气体。

炉料熔化在整个电弧炉炼钢生产工艺中是很重要的时期。熔化时间占总冶炼时

间的 50%左右, 电能消耗占总耗电的 2/3 左右, 所以加速炉料熔化是缩短熔化时间、提高产量、降低电耗和成本的关键。

炉料熔化操作: 熔化操作主要是合理供电, 适时吹氧和尽快造渣, 以实现快速熔化炉料的目的。

合理供电: 开始时供电电流小些, 防止电弧向炉膛辐射大量的热, 使炉顶局部损坏, 当供电 5~10 分钟以后, 电弧已埋入炉料, 这时用大最大功率供电。

适时吹氧: 吹氧是利用氧化反应的热加速熔化炉料, 但吹氧过早, 氧气和冷炉料起作用小, 浪费了氧气。一般吹固体料时温度在 950℃ 以上时为宜, 这时氧和钢铁料的作用快, 容易熔化。一般全固体炉料时, 在熔化 50%左右时吹氧为宜。

尽快造渣: 覆盖在钢液面上的炉渣能稳定电弧的燃烧, 减少钢液散失热量, 减缓吸收氢和氮, 去除钢液中的磷和硫, 吸收上浮到钢液面上的夹杂, 减少铁及元素的蒸发等。

5.3.3.1 炉料的熔化

快速熔化和升温是当今电弧炉炼钢最重要的功能。电能是电弧炉熔化和升温的基本能源。熔化炉料时间的长短决定于熔化原材料需要的电能同每小时供给的电能之比, 可用下式表示:

$$\text{熔化时间(小时)} = \frac{\text{熔化原材料需要的电能}}{\text{每小时供给的电能}} = \frac{W_1 Q_1 + W_2 Q_2}{P \cdot C \cdot \eta - P_1}$$

式中 W_1 : 钢铁料质量, t;

W_2 : 渣料质量, t;

Q_1 : 熔化一吨钢铁料的电能消耗, 约为 340kWh, 折合成热量为 1.256×10^6 kJ/吨废钢 (3×10^5 大卡/吨废钢);

Q_2 : 熔化一吨渣料所需热量, 约 540kwh;

P : 变压器功率, 即炉料熔化时向炉内输入的平均功率, 一般不大于变压器的额定功率;

$C \cdot \eta$: 功率因数 $\cos \psi$ 和电效率 η 之积, 称为实际输出系数, 约为 0.765~0.81。电效率是电能转化为真正用于熔化炉料的热量的分数;

P_1 : 单位时间的热损失, 即熔化期内的平均电能损失。

从上式可以看出：炉料熔化时间决定于变压器每小时供给炉内电能。为缩短熔化期，应设法采用尽可能大的功率供电。减少热损失。

5.3.3.2 钢液的氧化精炼

(1) 钢液氧化精炼的目的

①去除钢液中的磷到规定的限度：在氧化精炼结束扒除氧化渣时，钢液中的磷含量低于钢种成份规定的含量。为了防止钢液在后续的还原精炼发生回磷、导致磷出格，要求氧化精炼控制的钢液磷含量低些。

②去除钢液中的气体（氢气和氮气）：在氧化结束时把溶解在钢液中的氢降到0.0001~0.0002%范围，氮降低到0.004~0.006%范围。

③去除钢液中氧化物夹杂：利用氧化精炼过程中的钢液沸腾，去除大部分夹杂物，在钢液的氧化精炼可以去除75~90%的夹杂物。

④升高钢液温度：冶炼过程需要较高的温度。在氧化精炼过程，利用熔池沸腾搅拌作用，有利于钢液加热升温，把钢液温度升高到高于出钢温度10~20℃。

⑤调整钢液的碳含量：氧化脱碳使钢液沸腾，在氧化精炼结束出钢前，钢液含碳量需要考虑还原精炼加入铁合金，会增加钢水的碳含量。相反，在钢液碳含量低时可用喷粉增碳。

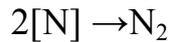
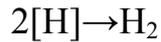
在氧化精炼时，钢液中的硅、锰、铬、钒等元素都进行氧化，含量都在降低，当钢液中残余硅、钒等含量高时使碳的氧化速度降低。

(2) 脱碳和各项任务的关系

脱磷和脱碳的关系：脱磷和脱碳都是氧化反应，它们之间有共性，都需要氧。它们对氧的需要方面又有矛盾，在强制氧化钢液时可满足二者的要求。加铁矿石氧化钢液时，氧通过炉渣向钢液溶解。在钢、渣界面产生脱磷反应，C—O反应在熔池进行，产生的CO气泡使钢液沸腾并增大钢、渣界面面积，加快了脱磷反应。在其他条件相同时增大熔池脱碳速度，能显著地提高脱磷反应速度。熔池脱碳速度和脱磷速度的关系见图5.4。

去气和脱碳的关系：脱碳时在熔池产生的CO气泡和钢液接触，此时溶解在钢液的氢和氮向CO气泡内扩散，并生成分子的H₂和N₂随气泡上浮进入炉气中，

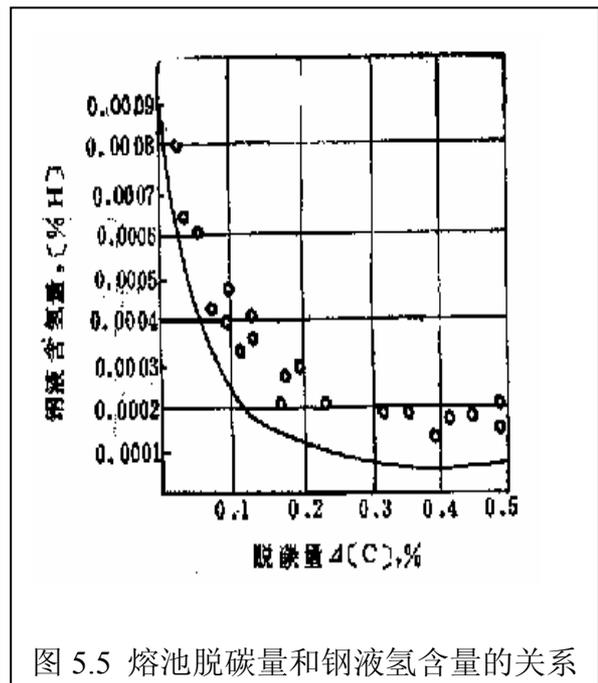
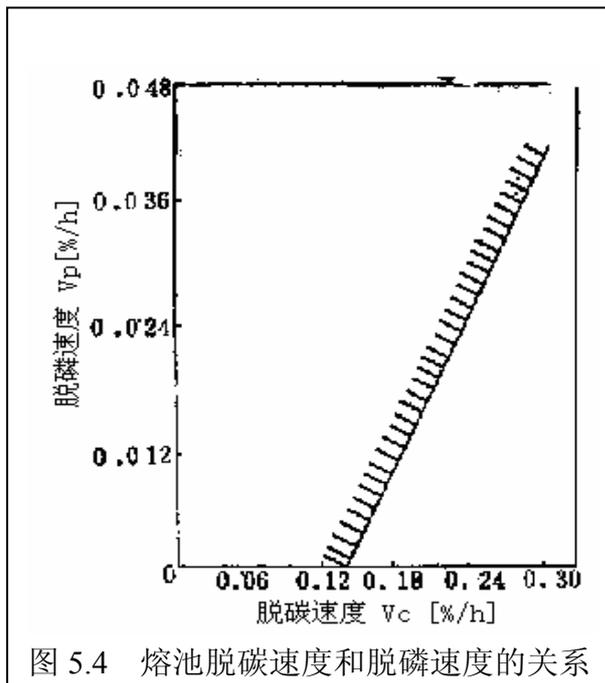
脱碳过程去气反应为：



由于 CO 气泡中不含 H₂ 和 N₂，所以上述二个反应右边的压力等于零，反应向右自动进行。去气的速度和去气量直接和脱碳速度、脱碳量有关。

当钢液的去气速度大于炉气通过炉渣向钢液溶解气体的速度时，钢液去气，否则钢液吸气。熔池脱碳量和钢液氢含量的关系见图 5.5。

脱碳量增大时去氢量增加，钢液中的氢、氮含量降低。



去除钢中氧化物夹杂和熔池脱碳的关系：悬浮在钢液中的固体夹杂物，在氧化性的钢液中易形成 2FeO·SiO₂、2FeO·TiO₂ 和 2FeO·Al₂O₃ 等低熔点含氧化铁的大颗粒夹杂物，在沸腾的钢液中容易使夹杂物互相碰撞、聚积长大成大颗粒的夹杂物，上浮到炉渣中被炉渣吸收。

钢液升温和脱碳的关系：氧化期钢液升温比较容易，这是因为有强烈的熔池沸腾，能迅速将电弧下高温钢液搅拌到熔池底部，使温度均匀。氧化精炼中钢液上部和炉底的温差约 5℃。熔池沸腾时炉渣呈泡沫状，电弧被其周围的泡沫状炉渣包围，炉渣吸收电弧热能的能力比静止渣面要大，有利于快速加热钢液。所以脱碳沸

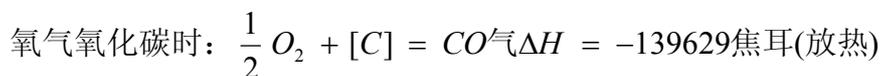
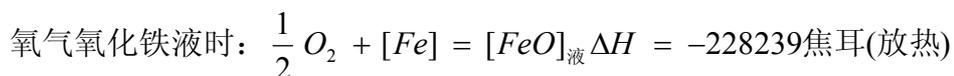
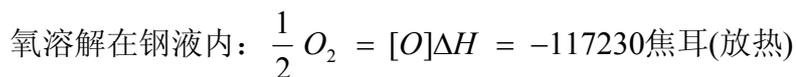
腾为加热钢液创造良好的条件。近些年来，在钢液氧化精炼中，向渣中喷入碳粉，产生 CO 气泡或吹入其它气体，造泡沫渣，强化供电加热，取得了良好的钢液升温效果。

5.3.3.3 炉料熔化、钢液氧化精炼的主要物理化学反应

炉料装入电炉后，随着电弧加热和吹氧助熔的进行，炉料逐渐升高温度、开始熔化。伴随着炉料的升温和熔化，炉内会发生一些物理化学反应。

(1) 钢液脱碳反应

熔池吹氧脱碳时的化学反应一般认为是放热反应：



熔池脱碳反应速度的大小很大程度上决定于供氧速度。当吹氧速度一定，熔池碳含量小于 0.2% 时，脱碳速度明显降低，脱碳的耗氧量显著增加。这是因为钢液中的氧含量和渣中 (FeO) 含量相应增加，单位脱碳量的总耗氧量显著增加的缘故。

当钢液碳含量 [C] > 0.2%，熔池温度 1600℃ 时，每吨钢去 0.01% 的碳需要 0.14m³ 的氧气。碳含量和氧气消耗的关系如图 5.6 所示。当 [C] < 0.2% 时熔池脱碳的实际氧消耗量显著增加，如 [C]=0.1% 时，去除 0.01% 的碳每吨钢液需氧 0.84m³。在生产条件下钢液温度为 1550℃ 时，吹氧前的碳含量 [C] 和脱碳量 Δ [C] 与氧的单位消耗 (m³O₂/t) 的关系如图 5.7 所示。

(2) 钢液脱磷反应

生产实践表明，在熔化后期往炉内加入适当的矿石和石灰，有良好的去磷效果。在氧化期造较高碱度的强氧化性炉渣，流动性良好，并控制冶炼温度较低，氧化前期采用自动流渣和扒渣反应是钢渣界面反应，其反应式为：



$$\Delta H = -45217 \text{ 焦耳/摩尔磷}$$



$$\Delta H = -724525 \text{ 焦耳/摩尔磷}$$

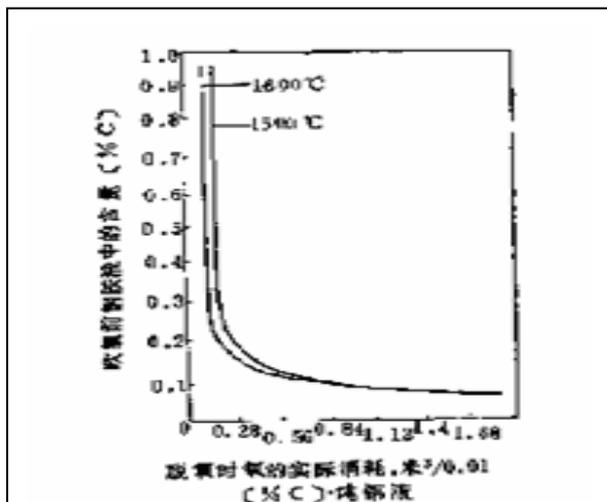


图 5.6 吹氧脱碳时钢液碳含量和氧的消耗之间的关系

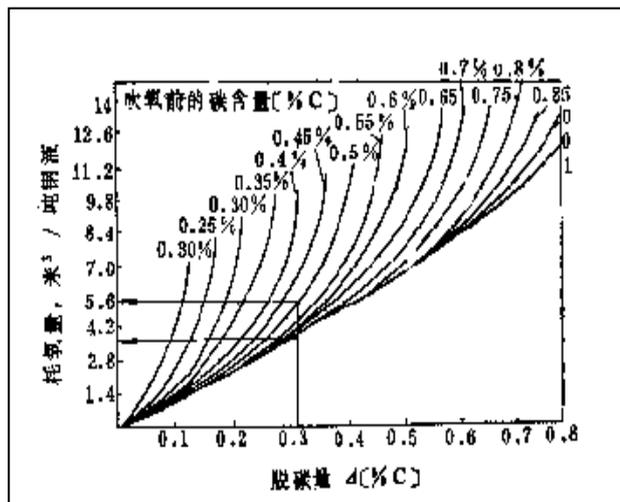


图 5.7 吹氧脱碳时钢液的氧耗量和脱碳量及含碳量的关系

脱磷反应是放热反应，熔池低温下有利于钢、渣间的脱磷反应。冶炼过程中要注意扒渣或自动流渣操作，将含（ P_2O_5 ）炉渣流到炉外，防止钢液的回磷。

炼钢温度与钢液中的碳含量有关，高碳钢的冶炼温度低（熔点低），低碳钢液的熔点高，当熔池温度高于熔点 $50^\circ C$ 时，钢液就有较好的流动性，脱碳速度较高，对快速脱磷有利。

脱磷反应中，炉渣中（ FeO ）和（ CaO ）的含量是脱磷的重要条件，增加渣中（ FeO ）、（ CaO ）能加速脱磷。在钢液氧化精炼过程中，可以向熔池加入石灰和铁矿石，以弥补脱碳反应的氧消耗，保证钢液和炉渣有足够的氧化能力，所以渣中（ FeO ）含量要始终保持较高的水平。冶炼中碳钢时，一般炉渣成分的控制范围见表 5.2。炉渣碱度一般控制在 $2.5 \sim 3.5$ 。

表 5.2 电弧炉炼钢氧化渣成分

成分	CaO	FeO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃
%	40~45	10~20	10~15	8~10	5~7	1~2

渣量对去除钢液磷有很大的作用，在脱磷条件下，渣量越大去磷越多（但要考虑到操作条件，原材料消耗，电耗和冶炼时间，渣量不能过大）。在冶炼过程中炉渣碱度 R 控制在 $2 \sim 4$ ，原始磷 $[P] > 0.030\%$ ，平衡时磷的分配系数 $L_p \left(\frac{[P]}{[P]} \right)$ 在 $50 \sim 60$ 之间。

归纳起来，影响脱磷反应的因素有三：温度、炉渣碱度、氧化性和炉渣渣量。

5.3.4 电弧炉炼钢炉料熔化、钢液氧化过程的主要操作

5.3.4.1 吹氧

电弧炉炼钢过程中，吹氧对降低电耗、缩短冶炼时间有显著的效果，图 5.8 示出不同吹氧量条件下氧气用量与电能的置换关系。

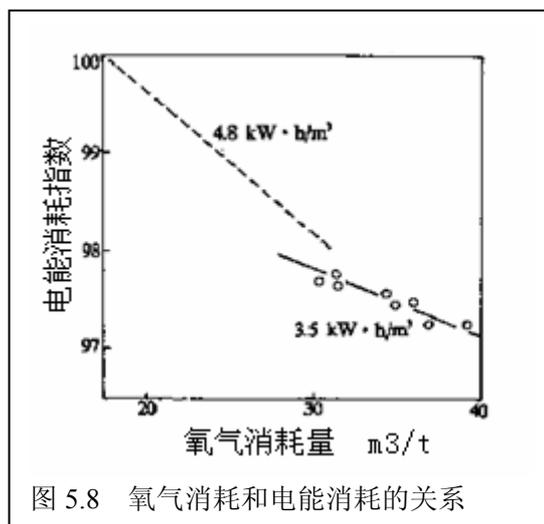


图 5.8 氧气消耗和电能消耗的关系

现代电弧炉采用留钢留渣操作，从冶炼一开始即可吹氧，不像普通功率电弧炉的传统操作那样，必须在通电一段时间（约 45min）后，等中心炉料变红，底部形成熔池才能吹氧，这种吹氧操作的作用是：在熔化开始是助熔、化渣，在氧化精炼期是脱碳、搅动熔池和升温。虽然现代电弧炉炼钢氧化升温时间已缩短到 10min 左右，吹氧脱碳放热对升温的意义已不那么重要，但无论如何，碳氧反应造成的熔池搅动以及形成的泡沫渣对升温的作用是明显的。因此，现代电弧炼钢中，吹氧操作几乎是从始至终一直进行，只在出钢和加料时才停止，吹氧部位可根据不同目的来确定，如果是助熔，要求对准红热废钢，或切割或造成不熔废钢周围钢液搅动，以促进熔化；如果是脱碳，要求将氧枪插入熔池较深部位，提高氧气利用率和增加熔池搅动；如果是造泡沫渣，要求氧枪在熔池较浅的部位（如渣—钢界面处）吹氧，这有利于泡沫渣的形成。

5.3.4.2 底吹气体搅拌

电弧炉炼钢是通过分布在极心圆上的三支电极对废钢和熔池表面加热，并通过炉渣和金属对整个熔池加热。由于加热的不均匀性，使炉内存在冷区，熔池温度、成分不均匀和炉渣过氧化等问题。

底吹气体搅拌为电炉炼钢克服上述问题提供了廉价而有效的解决办法。底吹气体搅拌，把只有电弧电力作用时的搅拌能 $1\sim 3\text{W/t}$ 提高到 $375\sim 400\text{W/t}$ ，因而可使电弧炉炼钢获得如下好处：

- 1) 改善钢—渣反应；
- 2) 提高熔池成分和温度的均匀性；
- 3) 加速电弧向熔池的传热；
- 4) 促进脱磷和碳氧反应，可冶炼 $C < 0.04\%$ 的钢种；
- 5) 能更有效地排渣进行无渣出钢操作，有利于清洁钢的生产。

一般认为底吹搅拌可使电耗减少 $10\text{kW}\cdot\text{h/t}$ ，冶炼时间缩短 5min ，金属收得率提高 $0.2\%\sim 0.5\%$ 。

5.3.4.3 泡沫渣操作

(1) 泡沫渣的作用

电弧炉炼钢泡沫渣操作源于连续加料的直接还原铁炼钢。连续不断的激烈碳氧反应和较大的渣量生成厚泡沫渣，有效地屏蔽和吸收了电弧辐射能，并传递给熔池，提高了加热效率，缩短了冶炼时间，减少了辐射到炉壁、炉盖的热损失。图 5.9 示出泡沫渣对输入炉内电能转化率的影响。

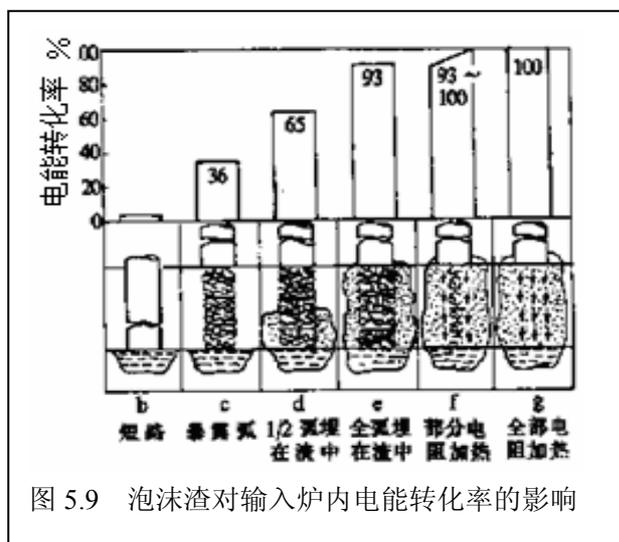


图 5.9 泡沫渣对输入炉内电能转化率的影响

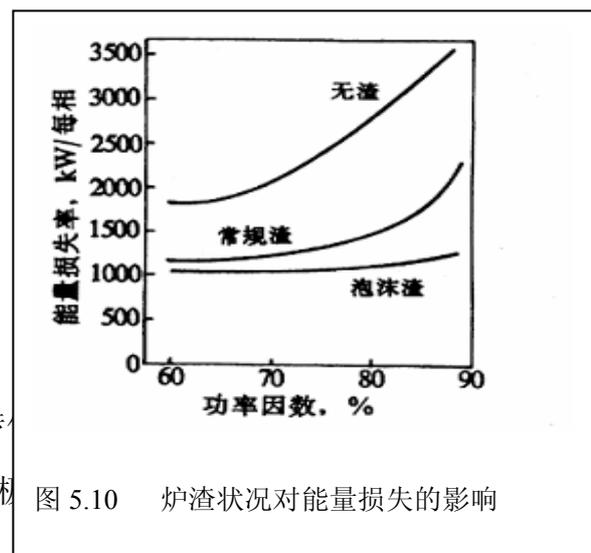


图 5.10 炉渣状况对能量损失的影响

墨电极电阻热(见图 5.9 中 b),在图 5.9 中 c 的电弧自由燃烧情况下,转化率为 36%。当电弧的 1/2 或全部埋于渣中时,辐射能的 1/2 或全部将通过渣传递给熔池,转化率分别达 65% (见图 5.9 中 d) 和 93% (见图 5.9 中 e) 图 5.9 中 f 和 g 的还是电弧、电阻混合加热和纯电阻加热。由于减少了燃烧点热损失,其转化率可达 100%,由此可以看出,泡沫渣对提高电弧炉加热效率是十分重要的。图 5.10 示出炉渣状况对能量损失的影响。在泡沫渣下能量损失最低,即使在长弧(高功率因数)下运行,能量损失也无明显增加,而且长弧运行电流降低,电极消耗量也是相应减少,因此,在操作中尽快造成泡沫渣并保持下去是确保炉子在整个周期内以高电压、最大功率运行和提高功率利用率的关键,而这种运行模式意味着低消耗和高生产率。

(2) 影响泡沫的因素

(a) 吹氧量: 泡沫渣主要是依靠碳、氧反应生成大量的 CO 所致,因此提高供氧强度既增加了氧气含量又提高了搅拌强度,促进碳、氧反应激烈进行,使单位时间内的 CO 气泡发生量增加,在通过渣层排出时,使渣面上涨,渣层加厚。图 5.11 示出吹氧强度对不同 FeO 含量炉渣泡沫高度的影响。

(b) 熔池碳含量: 碳是产生 CO 气泡的必要条件,如果碳不足将使碳氧反应乏力,影响泡沫渣生成,这时应及时补碳,或喷吹或从炉盖加料孔加入焦炭或煤,以促进 CO 气泡的生成。

(c) 炉渣的物理性质: 增加炉渣的粘度、降低表面张力和增加炉渣中悬浮质点数量,将提高渣的发泡性能和泡沫渣的稳定性。

(d) 炉渣化学成分: 在碱性炼钢炉渣中,(FeO) 含量和碱度 $(CaO) / (SiO_2)$ 对泡沫渣高度的影响很大。一般来说,随 (FeO) 含量升高,炉渣的发泡性能变差。从图 5.11 中可以看出这种趋势。炉渣碱度的影响示于图 5.12,碱度在指数 2 附近有一峰值,此时泡沫渣高度达最大。

(e) 温度: 在炼钢温度范围内,随温度升高,炉渣粘度下降,熔池温度越高,生成泡沫渣的条件越差。

(3) 泡沫渣的控制

良好的泡沫渣是通过控制 CO 气体发生量、渣中 FeO 含量和炉渣碱度来实现

的。足够的 CO 气体量是形成一定高度泡沫渣的首要条件。熔池中产生 CO 气泡主要来自溶解碳和氧的碳氧反应，其前提是熔池中有足够的碳含量。渣中 CO 气泡主要是碳和气体氧、氧化铁等一系列反应产生的。实践证明，产生泡沫渣的气体 80% 来自渣中，20% 来自熔池。熔池中产生的细小分散气泡即有利于熔池流动，促进冶金反应，又有利于泡沫渣形成。

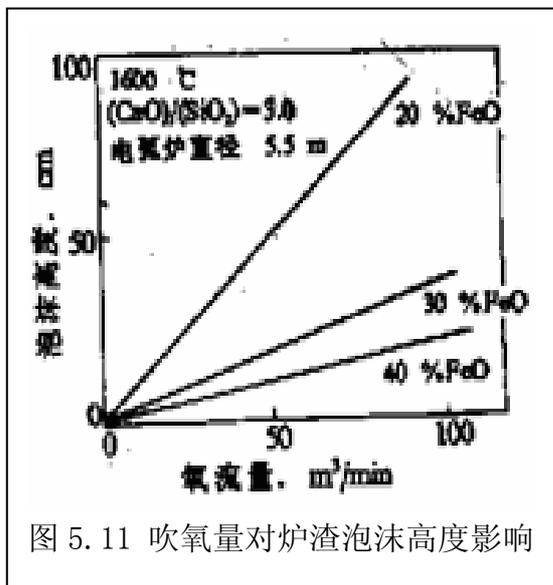


图 5.11 吹氧量对炉渣泡沫高度影响

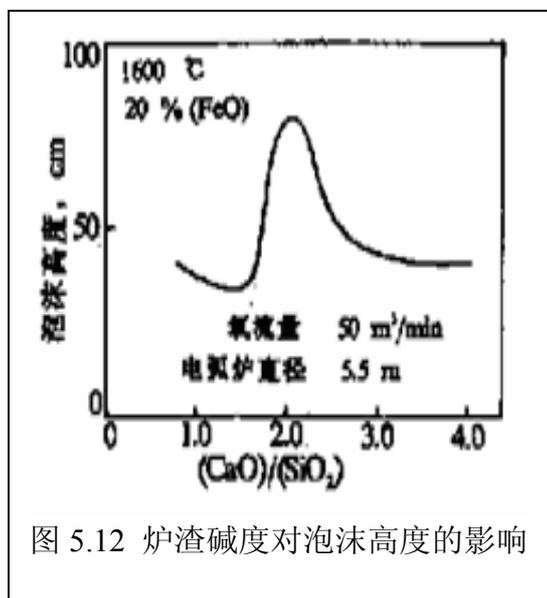


图 5.12 炉渣碱度对泡沫高度的影响

总之，在电弧炉炼钢过程中，控制适宜的渣中 (FeO) 含量 (20%左右) 和碱度 $[(CaO+MgO+MnO) / (SiO_2+AlO_2+P_2O_5)] = 2$ 左右，具有一定表观粘度 (含有一定量悬浮 $2CaO \cdot SiO_2$ 和 $FeO \cdot MgO$ 颗粒) 的炉渣，渣量和气体发生量足够时，就可以形成良好的泡沫渣。含碳材料以颗粒形式加入或以细粉形式喷入均可，氧可以用水冷枪，也可用炉门枪 (消耗式) 吹入。

5.3.5 出钢

当钢液满足下述生产条件时即可出钢。

- (1) 符合该钢种的出钢温度。
- (2) 钢液 [C]、[P] 成分控制合格。

出钢温度通常用下式描述

$$T_{\text{出钢}} = T_1 + \Delta T_{\text{过程}} - \Delta T_{\text{加热}} + \Delta T_{\text{浇注}}$$

式中 T_1 ——液相线温度；

$\Delta T_{\text{过程}}$ ——过程温降（包括出钢温降、运输温降、由在钢包到中间包的温降）；

$\Delta T_{\text{加热}}$ ——钢包加热补偿温度；

$\Delta T_{\text{浇注}}$ ——浇注过程温降（一般为 $30 \pm 10^\circ\text{C}$ ）。

出钢温度应根据不同钢种，充分考虑以上各因素来确定。出钢温度过低，钢水流动性差，不利于出钢过程的钢、渣反应和化渣，同时增加后续精炼的钢液升温任务；出钢温度过高，使钢清洁度变坏，钢中氧、气体含量增高，造成合金消耗量增大。总之，出钢温度应在能顺利完成后续精炼任务的前提下尽量控制低些。

钢液出钢过程到开始精炼的时间很短，发生激烈的化学反应，钢液和炉渣成分变化，钢液中的夹杂物、气体、温度也产生了变化。

除钢、渣界面化学反应脱除溶解的氧外，渣粒还吸收了钢液中的氧化物夹杂，使钢液的总含氧量降低。

5.3.6 电弧炉炼钢冶炼方法及合金比

（1）不氧化法冶炼：当钢铁原材料质量较好时，如废钢锈较少，清洁，磷含量低，配碳量较准时，可采用不氧化法冶炼。不氧化法冶炼的特点是没有氧化操作，不必沸腾脱碳去气，也不需脱磷，故要求在熔化终了时[C]和[P]应达到氧化末期的水平，[C]小于规格下限 0.1%左右，[P]小于规格含量 0.02~0.015%。此时钢液温度不高，需要 15 分钟左右的加热升温时间。此种冶炼方法时间短，电耗少，渣料等消耗少，是一种经济的冶炼方法。

（2）返回法冶炼：使用的炉料可配入返回钢（含 Cr、W、Mo……等元素）在熔化过程中（不加矿石、不吹氧）返回钢合金元素的收得率为：

元素	W	Cr	Mn	V	Si	Ti	Al
收得率 (%)	95~98	90~85	85~75	85~75	40~60	10~20	0

炉料熔化中的吹氧助熔时元素的收得率降低，为了提高收得率，可在升温阶段，向渣面加入一些还原材料，还原渣中的 Cr、W、Mn、V 等氧化物。这种方法节约了贵重的合金元素和电能消耗，降低了成本，常采用这种方法冶炼高速钢等钢种。

(3) 返回吹氧法冶炼：是冶炼碳低铬高不锈钢的一种特有方法。使用清洁、整齐并由本钢种的返回钢和其他合金返回钢所组成的原材料。从本质看这种方法属于高温条件下铬不氧化法返回冶炼，保留返回钢中的大部分铬。

采用不氧化冶炼方法与原料质量有直接关系。因为返回钢原料中含硫较低，所以对硫化物夹杂要求严格的钢种，用不氧化法较为有利。含有效多贵重元素的返回钢及难熔元素的钢种，如高速钢及高铬钨工具钢等，多用不氧化法冶炼。不锈钢常采用返回吹氧法冶炼。

(4) 电弧炉炼钢合金比：电弧炉炼钢的总产钢量与其合金钢产量之比称电弧炉炼钢的合金比。钢中合金元素总量 $>10\%$ 称高合金钢； $2.5\sim 10\%$ 称中合金钢， $<2.5\%$ 称低合金钢。

5.4 电弧炉炼钢的节能降耗技术

现代电弧炉炼钢工艺的基本技术思想是高效、节能、低消耗。应用于现代电弧炉炼钢的各项技术，如超高功率供电、吹氧和氧燃助熔、二次燃烧、水冷炉壁和炉盖、熔池底吹搅拌、泡沫渣操作、无渣出钢、废钢预热、炉料多样化等都是在这种技术思想指导下开发出来的。综合应用这些技术，与计算机控制、管理和炉外精炼相配合，已经使现代电弧炉炼钢（全废钢冶炼）达到冶炼周期（出钢—出钢时间）小于60min，冶炼电耗低于 $410\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，电极消耗量低于 $2.2\text{kg}/\text{t}$ 的高水平。图5.13是现代电弧炉各项工艺技术与主要操作指标的进步情况。

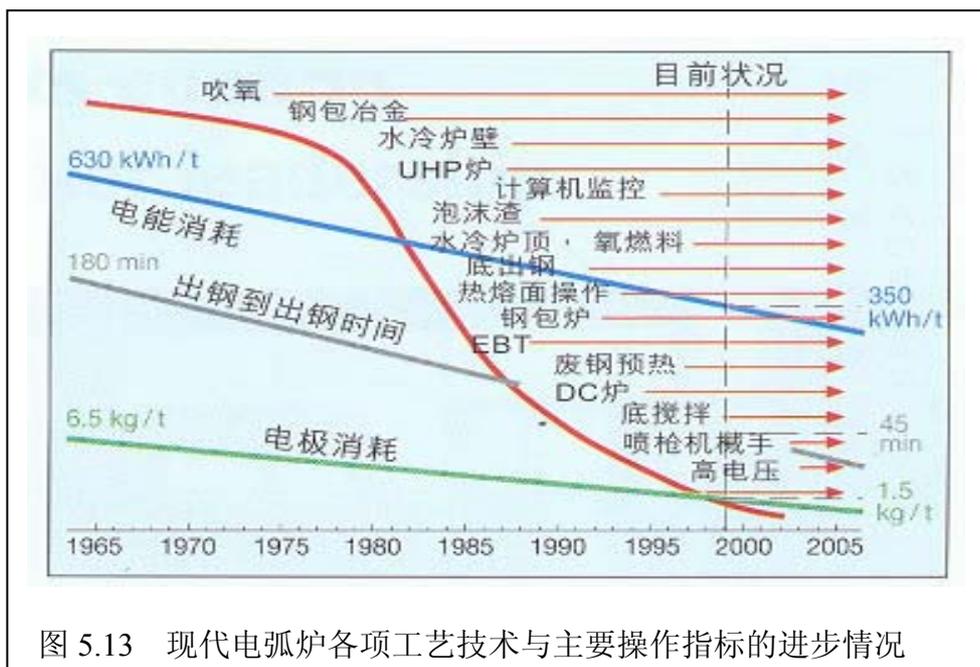


图 5.13 现代电弧炉各项工艺技术与主要操作指标的进步情况

综观近年来电炉炼钢技术的发展，电弧炉炼钢无论从提高生产率，还是改善质量，必须配以炉外精炼，并与连铸机相匹配。所有电弧炉炼钢技术的现代化都环绕此中心在发展。包括^[11-15]：①大型化、高功率化，提高生产率；②多元化的能量利用技术，应用其他辅助能源，包括氧气，油，天然气，煤；③主原料多样化；④重视电弧炉炼钢的环境保护；⑤节能技术，主要是用炉气余热利用。

5.4.1 合理供电技术

电弧炉容量逐渐增大是近几十年来的基本趋势，国际上指标最先进的电弧炉炉容量大都在 80~120 吨左右。其原因在于：①在其它条件相同的前提下，电弧炉生产率与炉容量呈正比关系，大型化是合理单炉生产规模的保证；②大型化有利于提高热效率，并便于集中采用供电、用氧以及机械化、自动化各项先进技术，便于提高管理水平，容易取得较好的生产运行效果；③合理大型化是实现全连铸的基础；④合理大型化是实现与后步轧机等物流匹配的基础。

随着电弧炉容量的增加，变压器容量也在增大。如何高效的使用大容量的变压器，提高电弧炉炼钢生产率，是大家关注的问题之一。

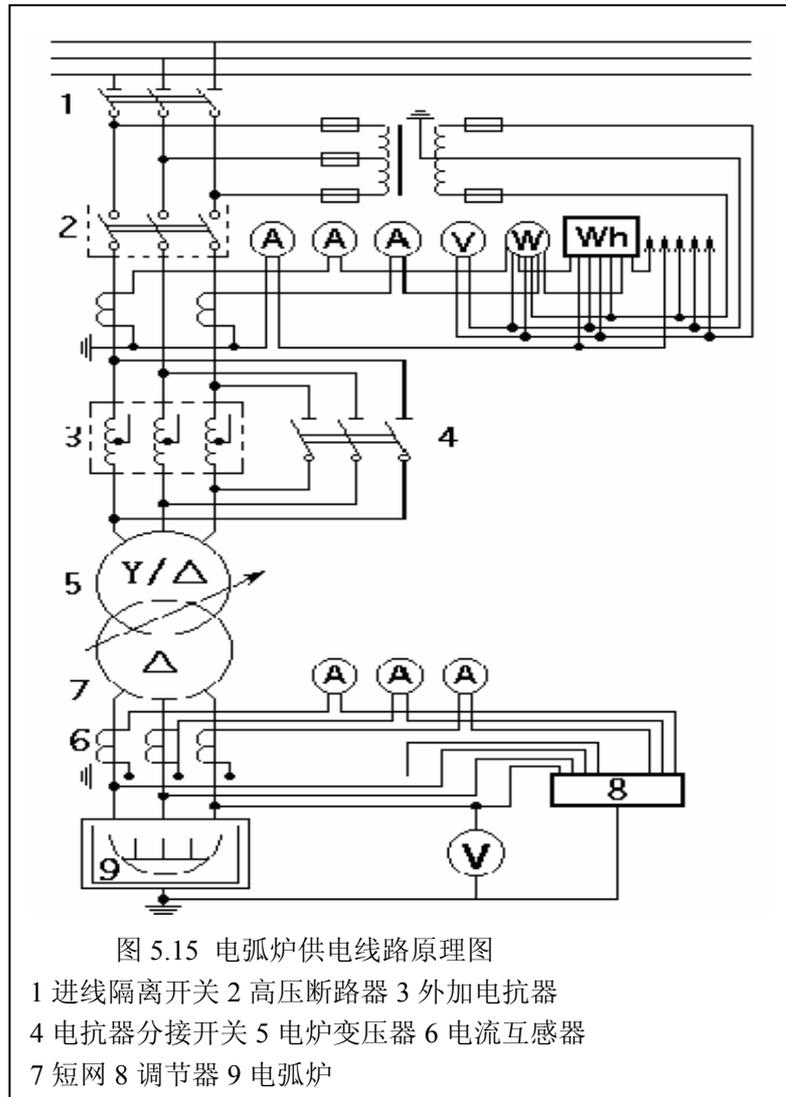
合理供电是电弧炉炼钢生产最基本的保障，它关系到冶炼工艺、原料、电气、设备等诸多方面的问题，直接影响电弧炉炼钢生产的各项技术经济指标。超高功率电弧炉炼钢过程中合理的供电制度是其最基本的工艺制度之一，合理的供电制度，不仅对操作顺行是必要的，而且有助于降低电耗、电极损耗和耐材侵蚀，缩短冶炼周期，带来良好的经济效果。

5.4.1.1 电弧炉电气设备

电弧炉以三相交流电作为供电电源，按直接加热的原理工作，利用电弧的弧光熔化和冶炼金属；电弧是电弧炉上三个石墨电极与炉膛内炉料之间通过强大的电流而产生的。电弧炉炼钢是电能转变为热能而使炉料熔化进行物理化学反应的过程，而完成这种能量转变的主要设备就是电弧炉电气设备。电弧炉电气设备完成的任务主要有：①为获得工艺要求的强大电流，用电炉变压器把高压变为低压，提供电能；②为使电弧电流和电压电流保持在一定的水平上，电弧炉装有电极自动调节器，冶炼中随时调节电极和炉料之间的电弧距离为一定值。故此，电弧炉电气设备主要为电炉变压器和电极升降自动调节装置。

电弧炉供电线路原理如图 5.14，该线路可分为以下几个部分：

主回路(进线隔离开关——高压断路器——电抗器——电炉变压器——短网——电
弧)。



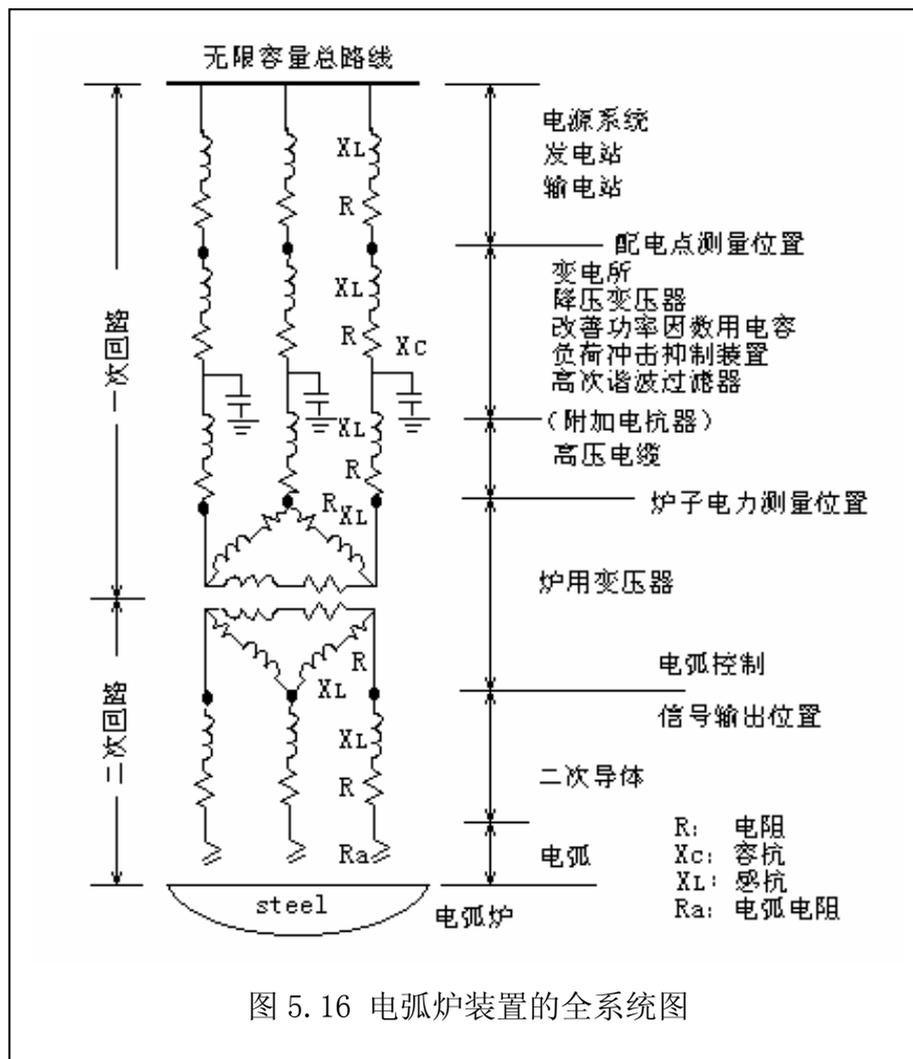
电弧炉主电路指从电炉变压器供电到电炉电弧为止的电路。它将高电压转变为低电压大电流输给电弧炉，提供冶炼所需电能，并以电弧形式将电能转变为热能。

炼钢电弧炉设备的工作特点是频繁接通和断开电炉变压器，后者的接通和断开是通过高压断路器来完成。可见，高压断路器是在极其繁重的条件下工作的。据统计，对具有多级电压的无励磁电动调压变压器的电炉通断频度而言，一年期间通断次数共达 2.5~3 万多次。^[113]

5.4.1.2 电弧炉运行电气特性

电弧炉以特高压配电，经过必要的高压变压器送至炉用变压器，在这里变为适合于发生电弧的二次电压。电弧炉的三相二次电路如图 5.16 所示由以下设备构成：

(1)炉用变压器；(2)电气室内二次导体（也可称三角形封接）；(3)挠性电缆（主要为水冷电缆）；(4)炉上二次导体（最近以导电臂为主）；(5)石墨电极；(6)交流电弧（可变纯电阻）。



电弧是可变纯电阻，而除此之外全部由电阻或感抗组成。它们具有电弧平稳器的机能，有助于电弧的稳定。三相电弧炉的电路，从导体的构成、配置看，本质上就是三相不平衡电路，并且以废钢或钢液形成的三相电路的中点位置也不固定，时常进行复杂的迁移。另外根据电弧及被加热废钢的特性，电压及电流由正弦波变为相当畸变的波形。而且因为这个状态不断波动，电弧特性的解析不得不用统计方法。

这里假设为正弦交流电和三相平衡电路，首先分析构成它的单相等值电路，并将这些特性换算到炉用变压器二次侧表示。^[114]

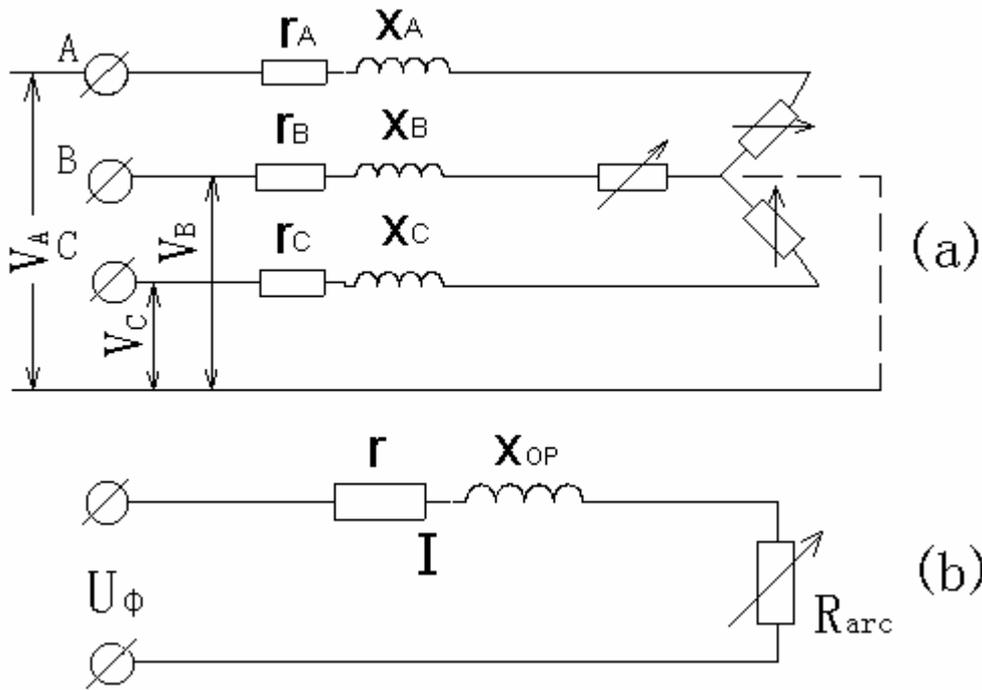


图 5.17 三相交流电弧炉等效电路

(a) 三相等效电路图 (b) 单线等效电路图

r_A, r_B, r_C, r —相电阻; X_A, X_B, X_C, X_{OP} —相电抗;
 V_A, V_B, V_C, U_ϕ —相电压; R_{arc} —电弧电阻。

如上图，三相交流电弧炉的主电路包括母线、炉变压器、断路器等，研究时主要考虑高电流二次侧电路。电弧炉是星形联结且中点不接地、参数变化的非线性、不对称线路。将电弧作为阻抗来处理，用以模拟交流电弧的电气特性。由此得到交流电弧的简化等效电路如图 5.17。由电网向电弧炉供电时，线路、变压器、和电抗器等有一定的电阻和感抗，为了方便，折算成变压器次级的三相交流等效电路图，如图 5.17 (a)，在三相对称的情况下得到单线等效电路图 5.17 (b)，其中 R_{arc} 是可变的。

用下列符号表示电弧炉主电路中的一些电量值。

- Z: 电路总阻抗、包括电弧电阻;
- Z: 短网、变压器、电抗器等构成的等值电路的阻抗;
- Φ : 功率因数角;
- U: 加于等值电路的相电压;
- U_h: 电弧电压;
- U_r, U_x, U_z: 相应为等值电路中 r, X 和 z 上的电压降;
- S: 电路的表观功率;

Pa: 电路中总的有功功率;

Ph: 电弧功率;

Pr: 电阻 r 上放也的电损功率 P 损;

Q: 在电抗 X 上放出的无功功率。

这些电量相互联系的电路等式列于表 5.3。

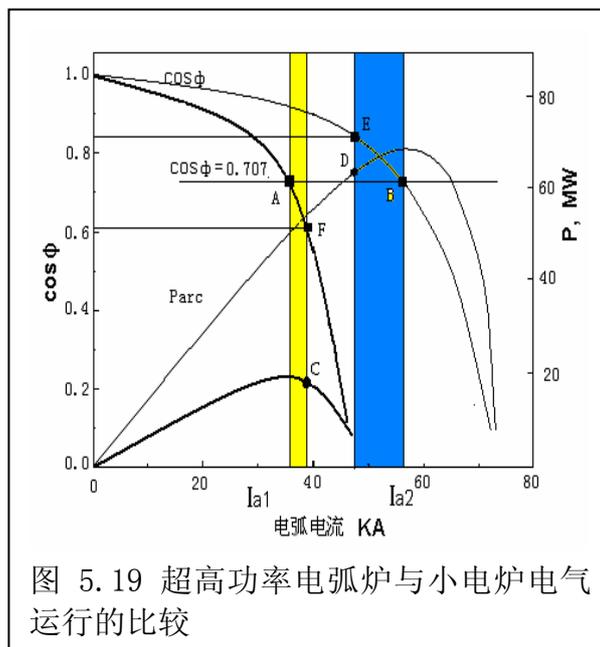
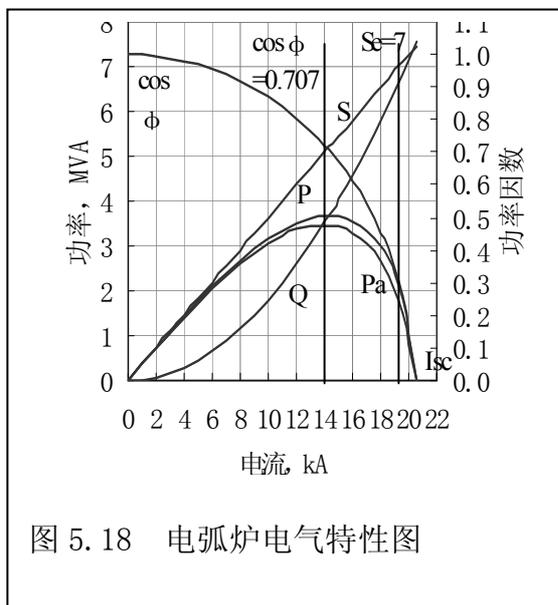
表 5.3 电炉电路中各个电参数之间

名称	符号	等式	单位
电路总阻抗	Z	$\sqrt{(r + R_h)^2 + X^2}$	Ω
电弧电流	I	$\frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(r + R_h)^2 + X^2}}$	A
表观功率	S	=3IU (以下式中 3 指三相总值)	VA
无功功率	Q	=3I ² X	Var
电损功率	Pr	=3 I ² r	W
电路功率	Pa	$=\sqrt{P_h + P_r} = \sqrt{S^2 - Q^2} = 3I\sqrt{U^2 - (IX)^2}$	W
电弧功率	Ph	$=3I(\sqrt{U^2 - I^2 X^2} - Ir)$	W
电弧电压	Uh	$=\frac{P_h}{3I} = \sqrt{U^2 - I^2 X^2} - Ir$	V
电效率	η	$=\frac{P_h}{P_a} = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 X^2} - Ir}{\sqrt{U^2 - I^2 X^2}}$	%
功率因数	cos	$=\frac{P_a}{S} = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 X^2}}{U}$	%

根据前例假设, U、r、X 三者为常量, 则下列电炉的一些特性量值如 Pa、Q、Ph 和 Uh 等将随电弧电阻 Ph 或电流 I 而改变。因而可作出相应的曲线, 称为电炉的电气特性曲线。电弧炉设备的电流强度是一可调量, 它既能控制变压器的负荷(功率), 也能控制炉子工作制度。电弧炉用电规范的各项主要指标与电流之间的函数关系可用电弧炉的“电气特性”来表征

5.4.1.3 现代电炉炼钢过程的实际电气运行特性

(1) 超高功率电炉的出现使电弧炉炼钢得到飞速发展，大型化、超高功率化成为现代电炉炼钢的主流，现代电炉主变压器容量，达到 60~100MVA。为了提高炉子的工作效率、避免电极电流过大，电弧炉的操作方式发生了改变。其特征是：高功率因数、高电压、低电流操作，如图 5.18 和图 5.19 所示。



现代超高功率电弧炉炼钢电气操作方式的显著变化是工作点位置的变化，普通功率小电弧炉，操作区间的功率因数小于 0.707，如图 5.18 示，工作点较接近短路状态，操作电抗接近短路电抗，传统的电弧炉运行工作点的工程计算模型是适用的。而大型超高功率电弧炉的操作区间的功率因数接近于 0.86，如图 5.19 的阴影区域所示，工作电流小于短路电流的二分之一，该工况下谐波的影响、非线性操作电抗的影响不可忽略。现代电弧炉运行工作点的工程分析必须建立在非线性工作电抗模型的基础上。

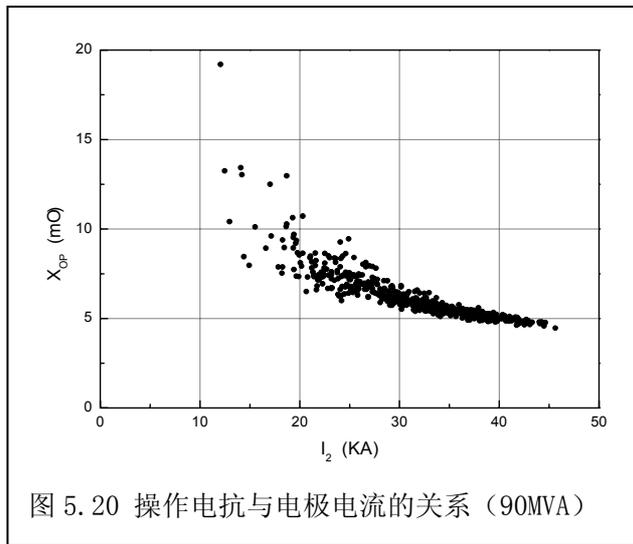
(2) 根据电工学原理，交流电路中的感抗 X 可表示为：

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L$$

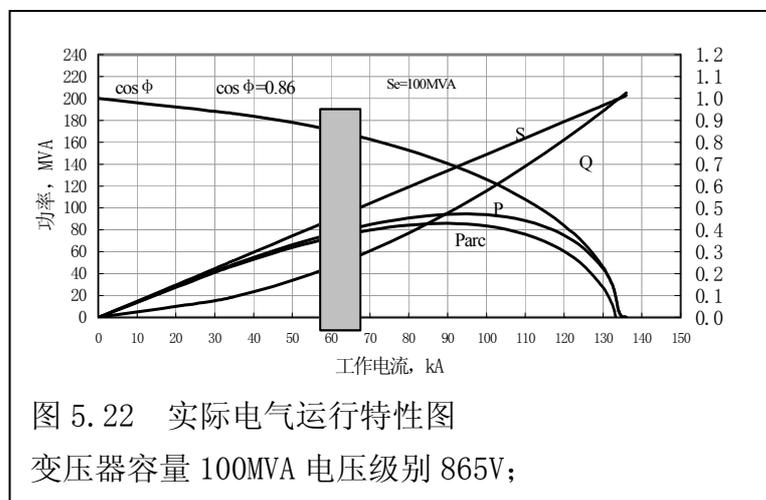
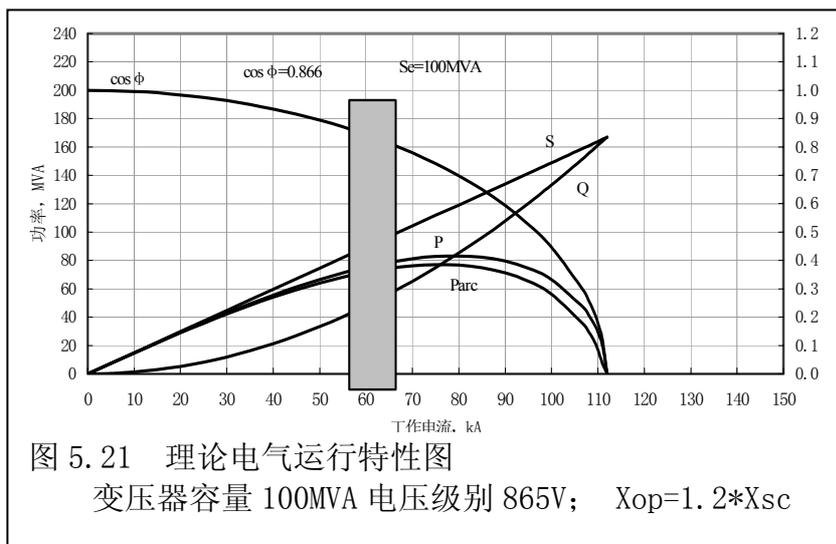
式中 f 为交流电的频率， L 为电感。在交流电弧电路中，由于高次谐波的存在，实际操作电抗 X_{op} 是各高次谐波产生的感抗的加和，即：

$$X_{op} = \sum_{i=1}^n 2\pi \cdot f_i \cdot L$$

实测操作电抗和电极电流的关系如图 5.20 所示。



(3) 由于操作电抗的非线性，电弧炉炼钢的实际电气运行曲线与传统的理论曲线已经有所不同。早期用短路阻抗 X_{sc} 的 1.2 倍来近似操作阻抗，得到的电气特性曲线如图 5.21 所绘，根据实测的非线性电抗模型得到电气特性曲线绘如图 5.22。



(4) 工作点总表

工作点总表描述了在每个电压级别下各电极工作电流(点)处的电流功率或有功功率。根据非线性工作电抗模型得到的工作点总表,更为贴近电炉炼钢的实际情况。

按两方面指标,对工作点总表予以判别:①功率因数是否过高,不能稳定运行;②变压器容量或工作电流是否过载,不宜长期使用。得到许用工作点总表,见表5.4。

表 5.4 许用工作点总表的评价

级	U ₂ (V)	Curve		Curve		Curve5	
		1	2	3	4	5	6
35	892	△△	△	*	*	**	**
34	865	△△	◎	◎	◎	**	**
33	839	△	◎	◎	◎	*	**
32	811	◎	◎	◎	◎	◎	*
31~19 级		均可安全稳定运行					

表中:△△—变压器过载严重,不宜长期使用;△—变压器略有过载;**— $\cos\varphi$ 太高,不能稳定运行;*— $\cos\varphi$ 值过高,不宜使用;◎—可安全、稳定运行。

(5) 供电曲线

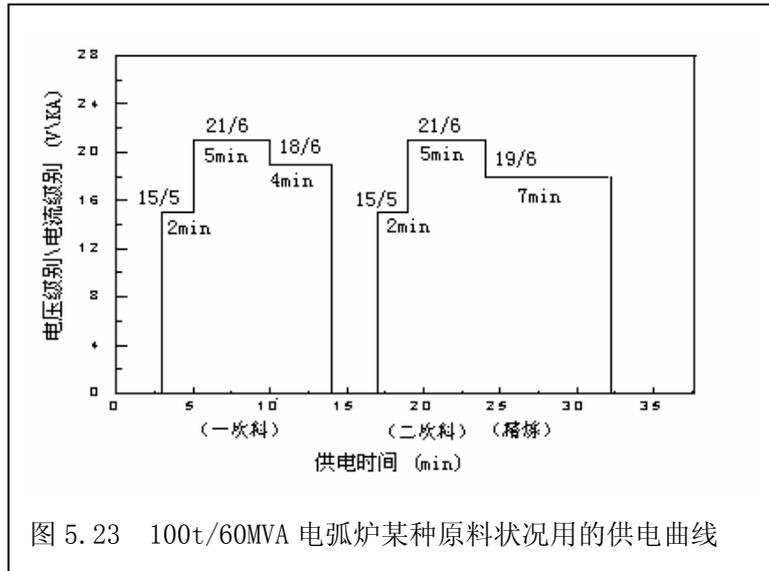
制定交流电弧炉供电曲线的总的目标是快节奏、低成本地冶炼出合格钢水。制定的供电曲线要能够安全、稳定运行,同时兼顾生产节奏,即:保证电炉变压器承受的视在功率不过载;电弧稳定高效燃烧($0.75 \leq \cos\varphi \leq 0.86$);电压有载切换次数尽可能少。

制定供电曲线时要考虑冶炼特点和实际条件,根据不同的原料结构和生产要求制定不同的供电曲线。一般来说,制定供电曲线主要从两方面来考虑:

①能量需求。保证电弧炉冶炼过程中炉内金属在不同阶段熔化、升温时所必需的能量。

②能量的有效利用。针对冶炼不同阶段特点把握有利的加热条件、选定合理的电流、电压和功率。

图 5.23 是 100t 电弧炉某种炉料条件下的供电曲线。



5.4.2 电弧炉炼钢多元化的能量利用技术

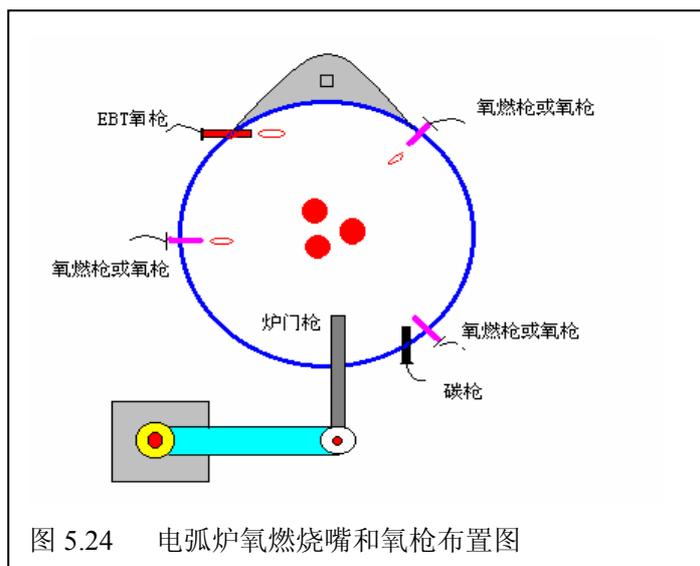
为降低电（能）耗，提高能量输入强度以缩短冶炼周期，多种形式的能量利用技术被采用，如大流量机械式氧—碳枪、二次燃烧、炉壁烧咀、底吹等。近年来电炉炉壁烧嘴技术应用日益普及：将传统烧嘴的亚音速喷吹变为超音速而成为炉壁喷枪，并进而通过所谓的集束射流技术^[8]，使得氧气流股的动能损失减小，实现向熔池高速供氧脱碳，不仅改善了炉内热量和成分的均匀性，而且可关闭炉门冶炼，达到降低热损失和噪音的良好效果。采用炉壁喷枪使冶炼周期缩短 10min 以上，吨钢电耗降低 50kWh 以上已不乏实例。

5.4.2.1 氧、燃烧嘴助熔

氧、燃烧嘴助熔是电弧炉广泛采用的技术。在提高电弧炉生产率的各种方法中，氧、燃助熔是降低生产成本最有效的方法。一般在电弧炉上安装 3 支烧嘴，分别对准三个冷区。炉料熔化时，烧嘴和电极共同加热，使废钢能更均匀、更有效地熔化。熔化速度提高，使电力消耗和电极消耗量降低，缩短了冶炼时间，提高了生产率和过程的经济性。

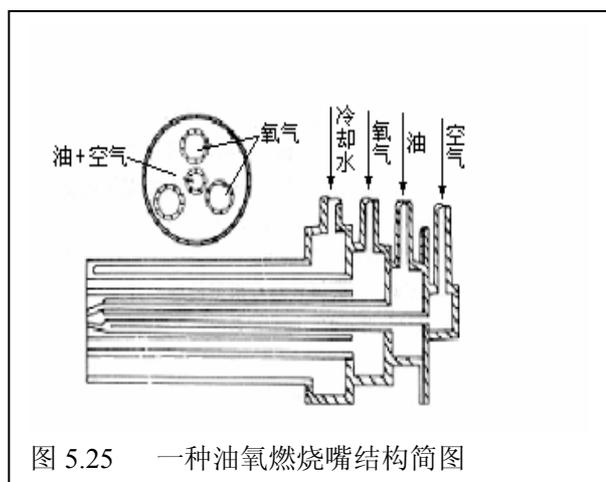
电弧炉上安装氧、燃助熔烧嘴，是替代部分电能和降低成本的措施。现代电弧炉采用水冷炉壁、水冷炉盖行第四孔排烟除尘，使其更适合氧、燃烧嘴的应用。

现代高效、高生产率的炼钢电弧炉上，几乎都安装有氧、燃烧嘴。图 5.24 是电弧炉氧燃烧嘴和氧枪布置图。



(1) 氧、燃烧嘴结构

氧、燃烧嘴的结构取决于使用的燃料。对于油（轻油或重油），天然气、煤粉或焦炭粉，其烧嘴结构有完全不同的型式。图 5.25 示出一种氧、油烧嘴的结构图。



(2) 烧嘴位置

每座电弧都是独立的，它需要与操作特性相适应的氧—燃烧嘴系统。烧嘴的位置的选择应考虑到：

在大多数电弧炉中，炉壁安装的氧、燃烧嘴可提供穿透冷点区的是佳角度。烧嘴被安装在靠近冷点区处，其传热效率可能最高。烧嘴火焰迅速切开冷点区处的废

钢，可直达电极三角区。

为实现氧气与燃料的理想配比，在操纵台上应装有氧气流量和燃料消耗量的显示器，操作工可以根据炉子的情况，调节氧气与燃料的比值，以控制烧嘴的操作。

水冷炉壁的迅速发展以及提高生产率的需要，导致产生了新一代炉壁烧嘴。这种烧嘴固定在水冷炉壁上，其主要特点是：无运动系统、维修费用大大降低、提高了生产率。其原因，一是提高了烧嘴效率；二是缩短了装料与烧嘴点火之间的间隔。

5.4.2.2 富氧操作

与氧、燃烧嘴相配合的富氧操作对强化电弧炉炼钢是必不可少的措施。富氧操作的主要目的如下：

1) 吹入氧气切割大块废钢：随着熔化的进行形成熔池，在熔池中吹入氧气产生氧化反应，释放出反应热，促进废钢的熔化。通过氧气的搅拌作用，提高了炉底废钢的熔化速率，而且减小了钢水温度的不均匀性，抑制了精炼期的大沸腾现象。

2) 进行快速脱碳，脱碳终了，同时达到氧化期结束的目标温度。通过富氧操作加速钢熔化，缩短氧化期时间，生产率得到提高。

富氧操作时，氧气消耗与电耗之间有明确的关系（见图 5.26）。从图 5.26 中可看出，虽然变压器容量不同，但随着氧气消耗量的增加，电耗呈现出迅速下降趋势。图 5.27 是电弧炉炼钢氧枪操作系统的示意图。图 5.28 是一种电弧炉炉门氧枪结构示意图。

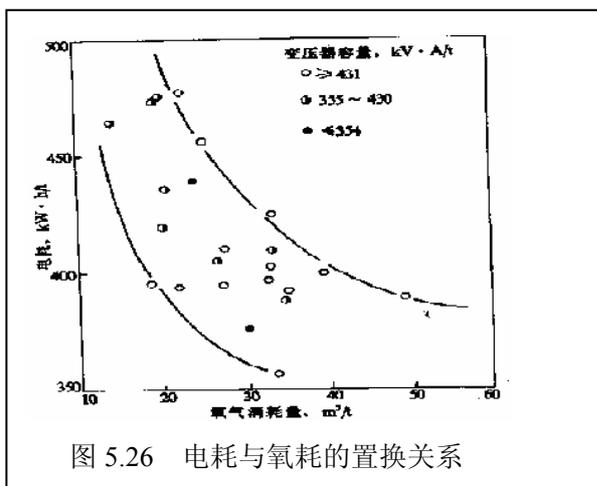


图 5.26 电耗与氧耗的置换关系

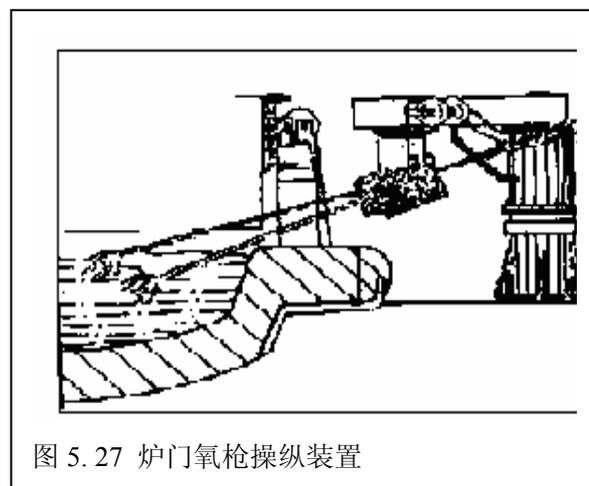


图 5.27 炉门氧枪操纵装置

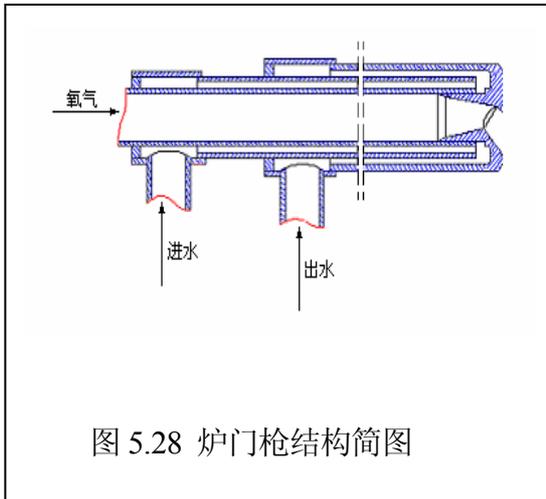


图 5.28 炉门枪结构简图

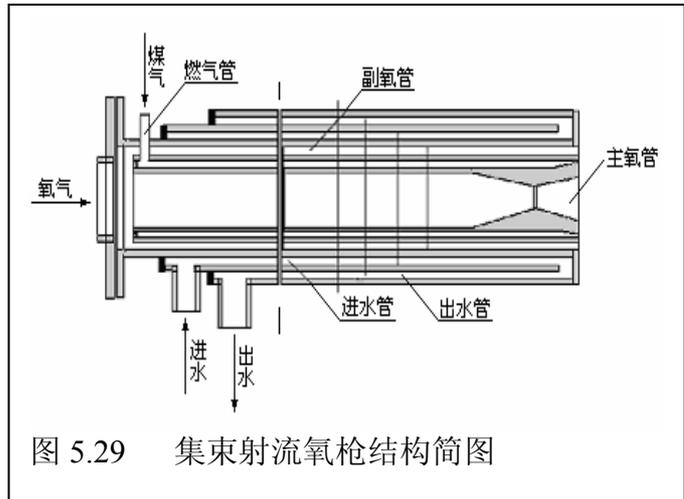
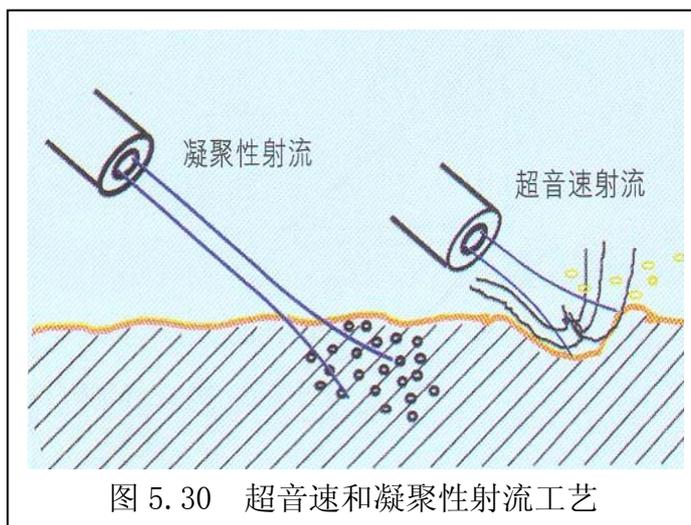


图 5.29 集束射流氧枪结构简图

随着电弧炉炼钢强化用氧技术的发展，近年来出现一种所谓凝聚性射流技术，其原理是在主氧射流周围设置环状高温保护气流（由燃气燃烧产生，也有直接用氧气作保护环流的），使得主氧射流超音速核心段长度延长（为传统超音速射流的数倍），形成类似激光束一样的射流。此种射流能量集中，具有极强的穿透力和搅拌力，对促进钢渣反应、均匀钢水成分和温度、提高氧气利用率、提高金属收得率等都有十分明显的效果，因而是近年来电炉炼钢领域内的一项变革性技术。

由美国 Praxair 公司制造的多功能 CoJet 炉壁喷枪。采用 CoJet 喷枪后，废钢熔化明显加快，熔池泡沫渣埋弧效果好且脱碳速率快。在未增加氧耗前提下电炉电耗、电极单耗及冶炼周期等主要技术指标均显著改善。冶炼周期缩短约 10~15min，电耗下降 20~50 kWh/t，电极单耗下降约 0.2kg/t，在铁水比为 33% 及氧耗为 40 Nm³/t 的条件下最低冶炼周期为 35min，对应电耗为 210kWh/t。

图 5.29 图 5.30 分别是集束射流氧枪结构简图和凝聚性射流工艺示意图。一般 Cojet 喷枪有三种操作模式：①烧嘴模式：快速加热与熔化废钢；②氧枪模式：熔清后可转换成氧枪；脱碳方式；③二次燃烧模式：可独立向熔池上方喷吹二次燃烧氧气。根据冶炼的不同阶段，调整 Cojet 喷枪，使其适应工艺的需要。



5.4.3 主原料多样化

出于各种目的，相继采用铁水、生铁、DRI/HBI、碳化铁等作为废钢的代用品。这些代用品不仅使电炉的适应性更强，还因稀释了废钢中的残余有害元素而提高了钢水质量，使得电炉钢的产品范围得以拓展。特别是随着薄板坯连铸连轧的兴起，短流程钢厂涉足板带甚至高品质带钢产品，电炉主原料的多样化更具有了特殊的意义。

5.4.3.1 生铁

生铁在电弧炉炼钢配料中主要作为碳的来源。生铁可降低废钢熔点，加速熔化过程。由于生铁价格较贵，应尽量使用废铁，如报废的铸铁制品、钢锭模等。焦炭、无烟煤是廉价的碳源，在现代电弧炉炼钢中也广泛使用。当然，在废钢短缺时，可考虑用生铁代替部分废钢。电弧炉炼钢用生铁主要有 P08，P10 和 S10，S15，配料时用前两种，后期增碳时用后两种。其成分列于表 5.6。

表 5.6 电弧炉炼钢使用生铁的化学成分

牌号	Si	Mn	P			S		
			1 级	2 级	3 级	1 级	2 级	3 级
			≤			≤		
P08	≤0.85	不规定	0.15	0.2	0.4	0.03	0.05	0.07
P10	0.85~1.25	不规定	0.15	0.2	0.4	0.03	0.05	0.07
S10	0.75~1.25	0.50~1.00	0.07	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06
S15	1.25~1.75	0.50~1.00	0.07	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06

5.4.3.2 直接还原铁（HBI、DRI）

目前 95%的直接还原铁用于电弧炉生产^[76,77]。直接还原是指铁矿石和含铁氧化物在低于熔化温度之下还原成金属产品的炼铁过程。直接还原一般在竖炉或回转窑中进行，根据产品不同，分为海绵铁、金属化球团及热压块三类产品。生产方法有气基直接还原法和煤基直接还原法。

电弧炉使用直接还原铁的优点：

- 1) 化学成分稳定，有害杂质少，特别是 P、S、N 含量低^[78]；
- 2) 在一定的条件下可以提高产量 15~20%^[79]；
- 3) 能自动连续加料，断电时间少，热损失小，有利于节电。

但由于脉石及氧化铁在直接还原铁中的含量较高，增加了冶炼难度，石灰、电耗、熔化时间等指标均受到影响，因此不宜大量使用，一般用量不超过 20%^[80]。

5.4.3.3 铁水

电弧炉炼钢热装部分铁水冶炼工艺(下称热装工艺)是近几年发展起来的电炉炼钢的一项节能新技术。该工艺不但缓解了废钢紧缺的形势,而且可显著缩短冶炼周期,降低冶炼电耗,提高劳动生产率。加入电炉中的铁水,可以稀释废钢中的有害残余元素,提高钢的质量。

电炉采用热装工艺后,代替传统的等量生铁配碳,使电炉的物料平衡和能量平衡发生显著变化。铁水带入大量的碳,熔化期、氧化期充分利用吹氧脱碳化料升温。提前结束熔化期,很快进入氧化期,脱碳速度明显高于传统工艺,缩短冶炼时间。如果熔清碳较高,可充分利用碳—氧反应热,停电吹氧脱碳,使钢水温度迅速上升,顺利进入精炼期。铁水带入大量的物理和化学热,使供电制度发生变化,最终影响到整个电炉炼钢工艺。

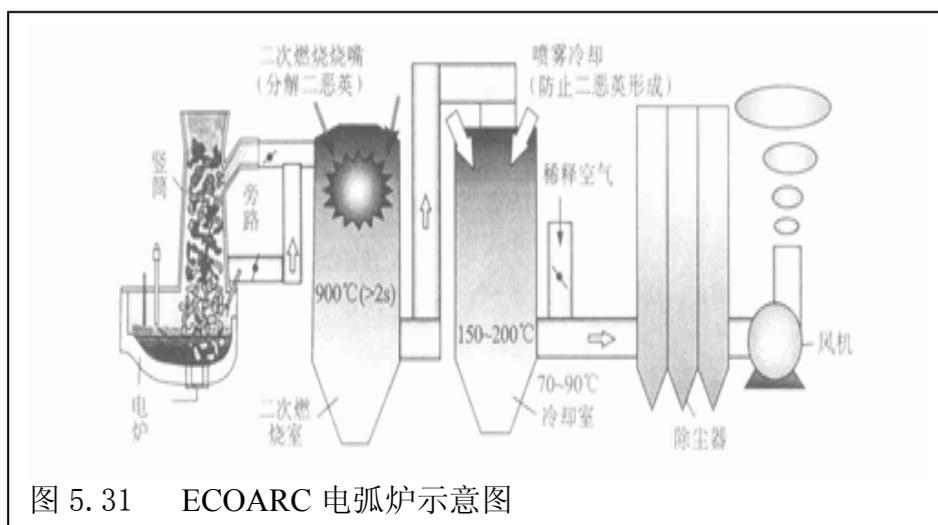
热装铁水对电弧炉炼钢工序十分有利。除与使用冷生铁相同的优缺点外,铁水带入大量的物理热使电弧炉冶炼效率大大提高,在有廉价铁水资源的条件下,适当的热装铁水工艺已为一些企业所采用^[5,6]。例如多配 10%的热铁水,带入的物理热约为 25kWh/t 钢,化学热约 25kWh/t 钢(氧耗量须增加 6~7m³/t 钢)。热装铁水是电弧炉炼钢炉料结构的重大改变,要求对工艺、装备做适当的改动,特别是流程的性质有所变化。

5.4.4 环境保护措施加强

二恶英(dioxins)是多氯化二苯并二恶英(Polychlorinated dibenzo—p—dioxins, 简称 PCDDs, 包扩 75 种异构体)和多氯代二苯并呋喃(Polychlorinated dibenzofurans, 简称 PCDFs, 包括 135 种异构体)的总称。目前已知来源的 95% 以上是废弃物(含城市生活垃圾、工业废弃物等)焚烧时所产生的。此外, 金属制造业、一些造纸业的副产品等也产生一定量二恶英。研究表明, 二恶英可通过凝聚反应、取代反应和基团反应等方式形成, 也能在富氧和催化条件下, 由碳氢化合物和无机氯经过复杂的反应复合而成。产生的主要条件是: 1) 成分条件: 原料有含氯的碳氢化合物; 2) 温度条件: 200℃~600℃, 其中 250℃~400℃是最有利于二恶英形成的温度区间; 3) 催化条件: 如粉尘中的某些金属氧化物^[24]。

冶金界已提出一些针对废钢处理中防止二恶英产生的措施^[25], 其中包括控制电弧炉冶炼中二恶英排放量的技术, 可以使排放到大气中的二恶英浓度降为 0.04~0.06ng/m³ 当量, 完全符合环保要求的排放标准^[26]。

电弧炉炼钢带来的环境问题包括炉渣、粉尘、CO、CO₂、NO_x、SO_x、二恶英和其它有机物、重金属、噪音、电磁辐射、直流炉的强磁场等。密闭罩和全程泡沫渣冶炼在降低噪音方面作用明显。例如, 因采用炉壁喷枪而能够使炉门在大部分时间关闭或半关闭, 将所谓的 Doghouse 扩展为 Elephant house 已成为趋势。还有另一个极好的例子是 ECOARC 炉如图 5.31 所示。该炉型在控制烟尘放散方面采取了专门措施, 利用二次燃烧和喷雾冷却解决二恶英的问题, 将二恶英放散的可能性降至最低。



5.4.5 电炉炼钢余热利用技术

电弧炉炼钢技术发展的集中体现，是基于不同的解决方案，各种炉型的不断涌现。例如为提高变压器利用效率、缩短非通电时间而采用的双炉壳被扩展为同时具有顶电极和顶氧枪的适应各种废钢—铁水比例的转炉化电炉 CONARC 炉^[9]；双炉壳与竖炉结合、连续装料与竖炉结合后形成效率更高、能量利用更好的电弧炉炼钢系统；而所谓 DANARC 技术^[11]及 K—ES 技术^[6]则宣称可根据不同的当地条件对电弧炉本身以及相关的所有辅助设备进行综合的优化设计。另外还有 Comelt^[12]、CONTIARC^[13]、Consteel^[14]等形式的电弧炉，最近又出现了一个崭新的炉型 ECOARC。这些炉型的成功应用，均从不同方面推进了电弧炉炼钢设备及工艺技术的发展。

从某种意义上讲，电炉炼钢引入辅助能源的主要效果是降低电耗，而无助于降低总能耗。降低电炉炼钢总能耗的根本措施在于减少能量消耗，其中，废气的余热再利用是很重要的一个方面。

5.4.5.1 化学余热利用：二次燃烧

电炉冶炼过程中，产生的废气所携带的热量约为向电炉输入总能量的 11%左右^[14]，有的高达 20%^[15]，这部分能量若不被利用会白白地被浪费掉。炉气能量损失有两种：(1) 高温炉气带走的物理显热；(2) 炉气可燃成分带走的化学能。

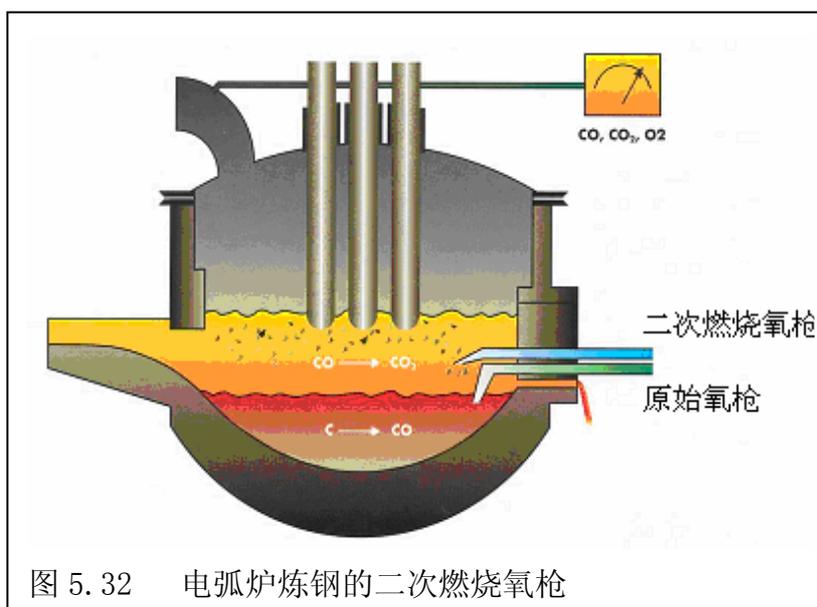
根据电弧炉炼钢的能量平衡，炉气能量损失占输出能量的 21%，损失的能量可高达 18.4kWh/t。根据理论计算，C-CO 反应产生的热量可为废钢熔化提供 12.5MJ/kgC 的热量，即最大熔化能力为 9kg/kgC，若气相中发生 CO-CO₂ 反应，则可提供 20.7MJ/kgC 的热量，即二次燃烧可使熔化废钢的能力进一步提高到 15kg/kgC。

电弧炉炼钢的二次燃烧见图 5.32。增加二次燃烧氧枪对熔池上面的渣中吹氧，氧化碳氧反应生产的 CO 成 CO₂，得到附加的能量。

二次燃烧率 PC 可定义为：

$$PC = \%CO_2 / (\%CO + \%CO_2) \times 100\%$$

当 PC 值为 0%时相当于碳只燃烧成 CO，PC 值为 100%时相当于碳完全燃烧成 CO₂。



若考虑到 H_2 的燃烧，二次燃烧率 PCR 定义为：

$$PCR = \%CO_2 + \%H_2O / (\%CO + \%CO_2 + \%H_2O) \times 100\%$$

二次燃烧产生热量后，如何传递给熔池吸收是很关键的问题。二次燃烧热效率定义为：

$$\mu_{pc} = (1 - \text{废气过热} / \text{二次燃烧生成热}) \times 100\%$$

在 PC 的操作工艺中，供氧是关键。一般要注意以下几点：

(1) 根据电炉的冶炼特点，一炉钢冶炼过程中的气体成分变化很大。为此应连续分析炉气成分，以便在线控制吹氧量，达到理想的 PCR。

(2) 冶炼过程中应注意控制用于熔池反应和 PC 的氧量在不同阶段的变化和相互间的匹配。如 PC 用氧过大，不但使金属收得率下降，而且电极消耗增加，

(3) 电弧炉的 PC 在三个部位进行：炉膛内，废钢熔化阶段在渣面上，熔池形成后在渣中。炉膛内的 PC 会增加炉体的热负荷。应进行厚渣层操作，有助于增加 PC 和减少烟尘的产生，也不易使炉中形成的 CO_2 与熔池中的碳反应生成 CO 而降低 PCR。

5.4.5.2 废钢预热技术

利用高温炉气的物理热预热废钢已实践多年。废钢预热技术的种类包括：料篮式、双炉壳式、竖炉型、多级竖炉式、连续加料式等。从原理上看，所有的废钢预热技术都是：在高温炉气排放之前，通过废钢（炉料）产生热交换，把热量传给

废钢，提高废钢的温度，从而达到加快废钢（炉料）熔化、降低电耗，提高生产率的目的。

（1）竖炉式废钢预热

烟道竖炉电弧炉的炉体为椭圆形，在炉体第四孔（直流炉为第二孔）的位置配置一烟道竖井，并与熔化室连通。利用电弧炉冶炼时排放的烟气来预热废钢，并借废钢自身重量下落到电弧炉炉内进料。这种废钢预热系统的余热利用率高，且投资成本相应较低，是现在主要的废钢预热系统。在预热废钢时，同样可以向预热器内喷吹燃料以将废钢预热到更高的温度，但应防止废钢粘接以影响进料。实际操作中装料时，先将大约 60%废钢直接加入炉中，余下的（约 40%）由竖井加入，并堆在炉内废钢上面。送电熔化后，炉中产生的高温废气 $1200\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ，直接对竖井中废钢料进行预热。随着炉膛中的废钢熔化、塌料，竖井中的废钢下落，进入炉膛中废钢温度高达 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 。图 5.33 为带指托的烟道竖炉电弧炉操作示意图^[38]。

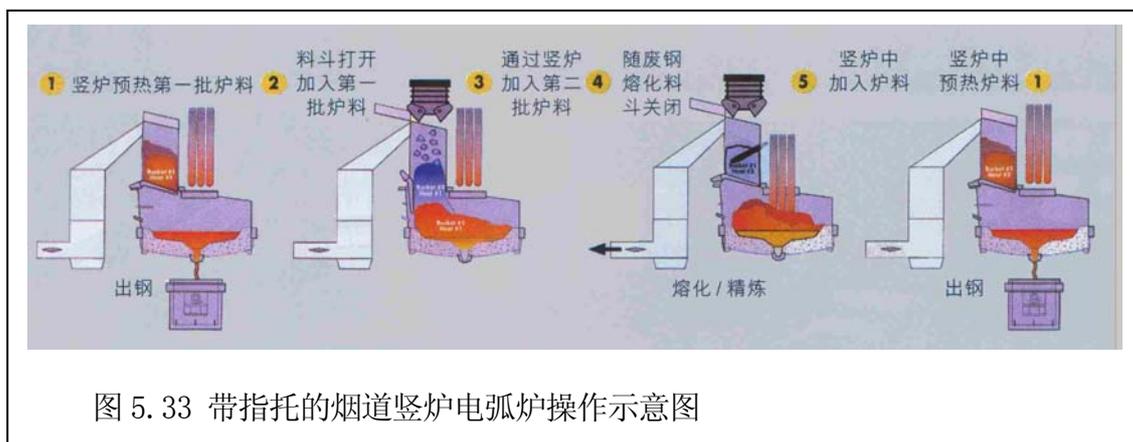
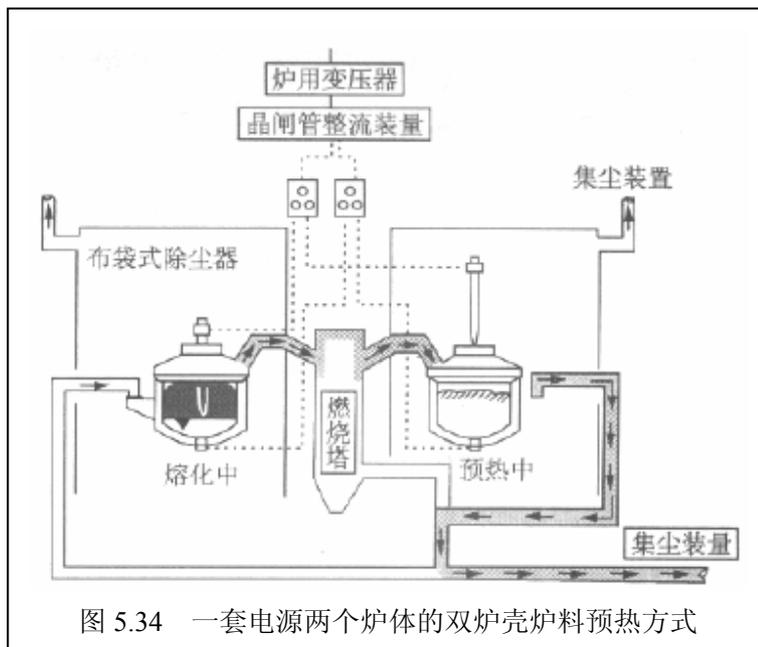


图 5.33 带指托的烟道竖炉电弧炉操作示意图

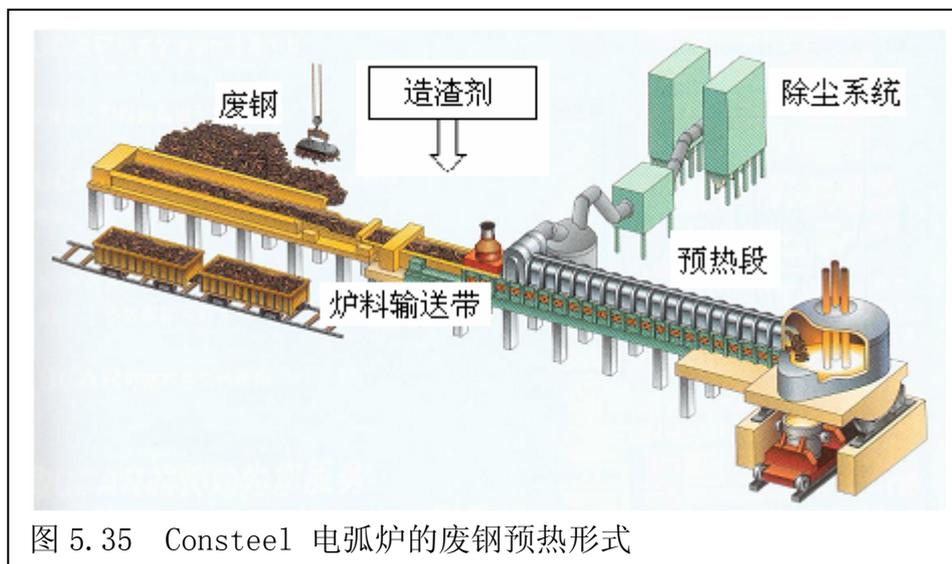
可以更加有效地发挥一次加料式竖炉型直流电弧炉的节能与环保效果，提高生产效率，降低炼钢成本。

所谓双炉壳式炉料预热方式，即 1 套电源 2 个炉体的电弧炉，利用 1 台炉子作业中的排气对另一台炉壳内的炉料进行预热的炉料预热方式（图 5.34）。传统式炼钢电弧炉，只能对初装料进行预热，而一次加料式电弧炉可以实现炉料 100% 的完全预热，显著提高炉料预热效率。



(2) 连续加料式废钢预热 Consteel

废钢由传送带通过动态密封送入该系统的预热器，废钢通过预热器，靠炉气的化学能和物理热加热至 550~600℃，然后进入熔池，炉内总有一定的剩余钢水，有助于熔化加热的废钢。可用的炉料是：废钢、生铁和热压块、热的和冷的直接还原铁。Consteel 电弧炉的废钢预热见图 5.35。



(3) 多级废钢预热技术 MSP

多级废钢预热 (Multi Stage Preheating) 技术代表着当代废钢预热技术发展方

向，具有较高的技术水平。多级废钢预热是将整个竖炉分上、下两层预热室。上、下两层预热室均可用手指状的簧子独立开闭，在废钢进入电弧炉前，可单独分批预热废钢。竖炉位于电弧炉炉盖上方，设有三个工位，即预热位、加料位和维修位。预热位主要是接受废钢和预热废钢；加料位是把预热后的废钢从竖炉加入电弧炉。竖炉可在预热位、加料位和维修位往返运行。多级废钢预热室电弧炉主要结构见图 5.36。

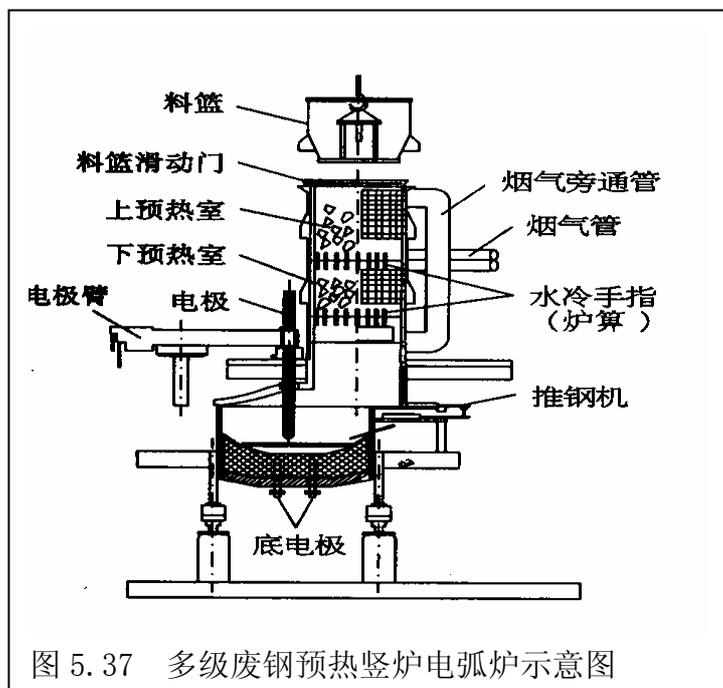


图 5.37 多级废钢预热竖炉电弧炉示意图

5.4.6 无渣出钢和留钢操作

5.4.6.1 无渣出钢

经初炼后温度、成分达到出钢要求的钢水为顺利转入炉外精炼，一般要求无渣（少渣）出钢，最常用的技术是偏心炉底出钢（EBT）。

采用偏心炉底出钢的优点是：

- 1) 可以做到无渣出钢；实现留钢操作；
- 2) 减少倾炉角度，大大缩短大电流电缆长度（减少阻抗）；炉壁水冷面积可进一步扩大；
- 3) 圆而粗的出钢口和短的出钢流程减少了出钢时间和降低了出钢温度（可降低出钢温度 32°C ），也减少了钢水吸气和二次氧化；钢水垂直注入钢包，减轻了对

耐火材料的冲刷侵蚀，提高了包衬寿命。

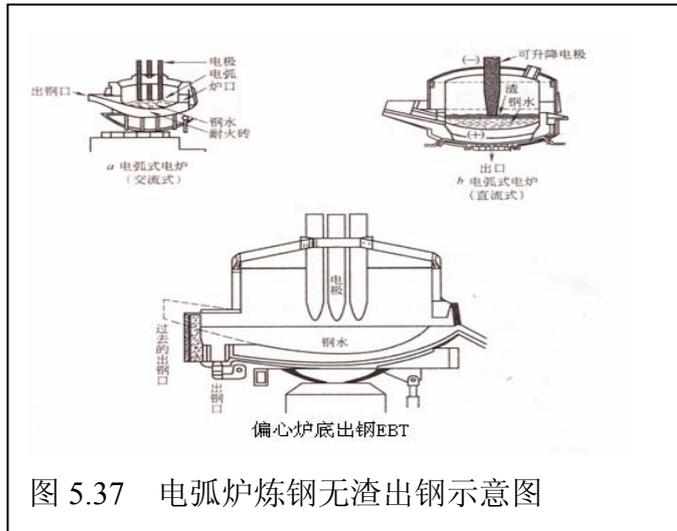


图 5.37 电弧炉炼钢无渣出钢示意图

5.4.6.2 留钢操作

电弧炉炼钢的无渣出钢操作会使炉内留有一部分（10%~15%）钢水和几乎全部炉渣，这为下一炉加速熔化、早期脱磷创造了条件；同时，由于液体熔池的存在，使熔化初期电弧稳定性提高，平均输入功率增加，提高生产率。

图 5.38 示出装入量为 155t 电弧炉留钢量（加入量为重量百分比）与熔化时间和生产率的关系。图 5.39 示出钢量与熔化速度的关系。可以看出，留钢量在 10% 附近可获得最佳效果。

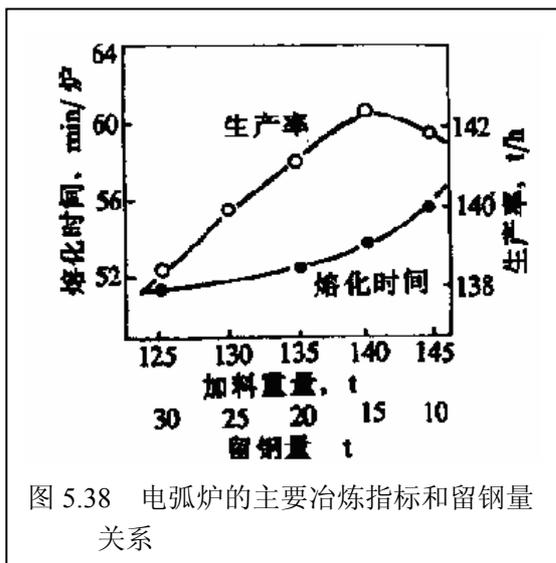


图 5.38 电弧炉的主要冶炼指标和留钢量关系

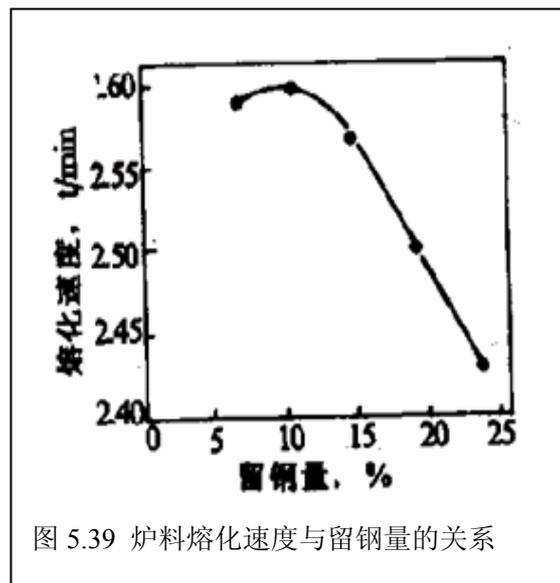


图 5.39 炉料熔化速度与留钢量的关系

5.4.7 电弧炉炼钢的计算机应用

5.4.7.1 电弧炉炼钢计算机应用概述

现代电弧炉生产的一个重要动向是应用电子计算机技术,计算机应用水平已是衡量企业现代化水准的重要指标之一。世界上各工业发达国家的电弧炉炼钢生产中不同程度地使用了计算机技术,计算机系统已成为现代炼钢电弧炉不可缺少的技术装备。

近年来人工智能(AI,Artificial Intelligence)技术的发展,给现代电弧炉供电技术带来了新的动力。如利用神经网络(NN, Neural Networks)技术模拟电极调节器运动规律、学习动态变化的不平衡三相电气参数、预报电极在给定电气参数条件下的运动趋势等;利用专家系统(ES, Expert System)对神经网络控制进行监控、学习,保证控制的最佳化。

近年来,国际上较为活跃的智能电弧炉技术有三种,即美国的 IAF、SmartArc 和德国的 Simelt NEC 系统。表 5.7 是三种智能电弧炉的基本比较^[69]。

智能电弧炉技术是一项综合技术,可以融合各种现代超高功率电弧炉及其配套技术,是超高功率电弧炉的主要发展方向之一。智能电弧炉考虑了越来越多的工艺、设备(包括电气)方面的因素,如水冷炉壁的温度、废钢的组成、泡沫渣的厚度、钢种、炉壁及炉门氧燃烧嘴、碳枪等。

表 5.7 三种智能电弧炉的基本比较

项目	IAF	Smart Arc	Simelt NEC
厂家	NAC(美国)	SMF(美国)	SIMENS(德国)
使用情况	工业生产	工业生产	工业生产
技术特点	三相意识	识别炉况	控制功率分配
控制目标	最大功率	最优供电曲线	最大有功功率
控制对象	电极调节器	电极调节器	电极调节器
采用智能技术	人工神经网络	人工智能	人工神经网络
效果	产量提高 12%	产量提高 13.1%	产量提高 9.1%

电子计算机在工业中有广泛的应用价值,对其应用功能有许多大同小异的分类方法,表 5.8 列出一种按计算机与生产过程接近程度的分类(表中的层次从上到下依次提升)。

表 5.8 计算机技术工业应用的功能分类

层次	功能	在电弧炉炼钢中的应用
1	自动调节	电弧炉电极自动调节
2	过程自动控制	供电曲线的自动程序控制
3	生产装置的自动操作	生产过程的计算机控制
4	生产过程的控制与管理	电弧炉车间的计算机系统
5	生产系统的控制与管理	电弧炉的计算机系统

5.4.7.2 电弧炉炼钢计算机控制的主要建模算法

为了方便建模，可将电弧炉炼钢所涉及的变量（参数和指标）分为四大类：①炉料结构参数；②消耗参数；③钢水成分；④技术指标。各变量之间的逻辑关系可绘成图 5.40。

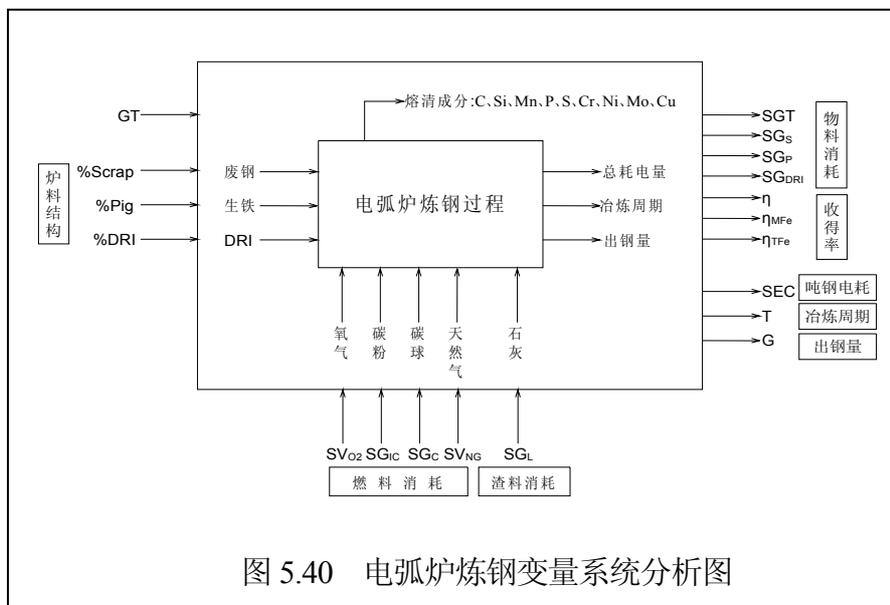


图 5.40 电弧炉炼钢变量系统分析图

目前，电弧炉工艺模型建模方法研究较多的是在物料、能量平衡的基础上运用先进的算法来实现的。主要可分为衡算法、人工神经网络法等。

(1) 衡算法

模型依据的基本思想^[71, 72]是：①以物料平衡、能量守恒为基础，结合化学平衡的影响及冶金物理化学等理论建立模型，模型中的部分系数采用经验或公认的数值。②运用最优化技术，以线性规划手段，进行优化配料和最佳合金补加计算。

(2) 人工神经网络算法

人工智能(AI-Artificial Intelligence)是计算机科学的一个分支,它涉及的内容非常广泛^[75],如模式识别、自然语言处理和理解、专家系统、知识工程等。反向传播算法(或简称BP算法)是目前学习算法中比较有影响的一种算法^[76],此种算法也可以应用于冶金领域^[77, 78]。另外,模糊控制也在冶金中得到应用。还有一种算法称为遗传算法。遗传算法也在冶金行业有很广泛的应用。

图 5.41、图 5.42 分别是电弧炉炼钢的能量供应、熔炼计算机控制系统示意图。

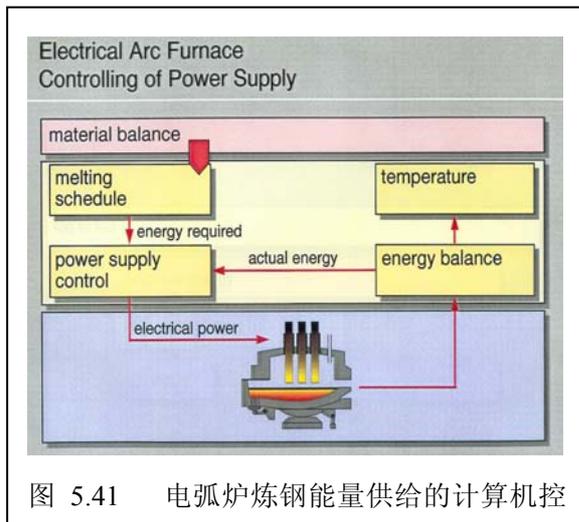


图 5.41 电弧炉炼钢能量供给的计算机控

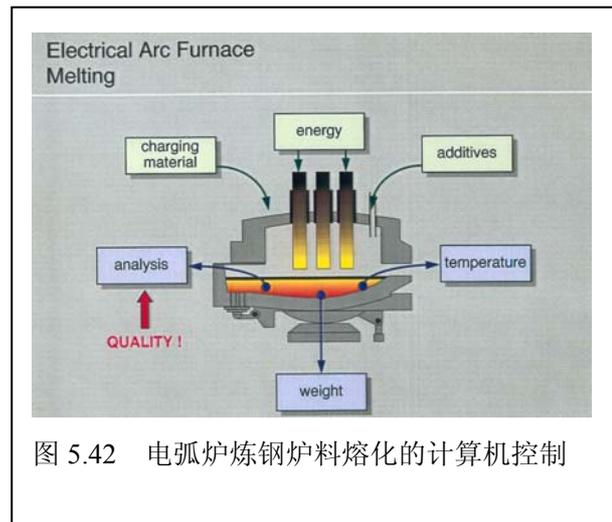


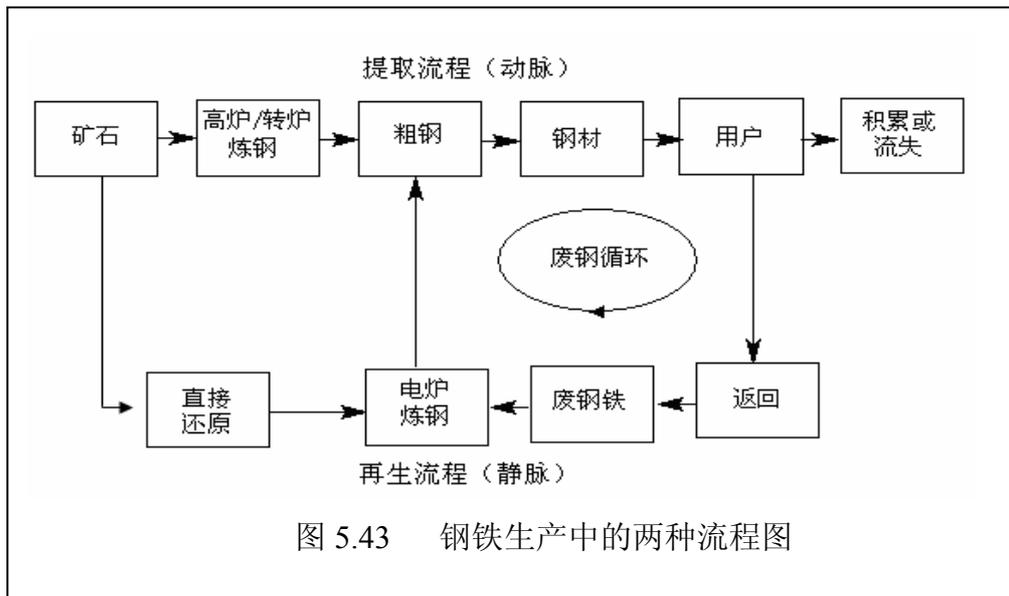
图 5.42 电弧炉炼钢炉料熔化的计算机控制

5.4.8 电炉炼钢流程是再生流程

将电炉炼钢置于铁元素利用的大循环之中,得到图 5.43。可以看出:

(1) 电炉炼钢流程主要以社会废钢为原料,是一类再生流程、静脉流程。由于废钢不足而补充的直接还原铁和热铁水则取自矿物,属于不可再生资源。

(2) 与高炉/转炉流程相比,电炉炼钢流程在炼钢工序之前工序很少,因之称为“短流程”或“再生流程”、或“静脉流程”、或“废钢——电炉流程”。



(3) 国际钢铁工业协会 IISI 给出的两类流程的物料和能量的数据，列于表 5.9。

表 5.9 两类钢铁生产流程的典型数据 IISI

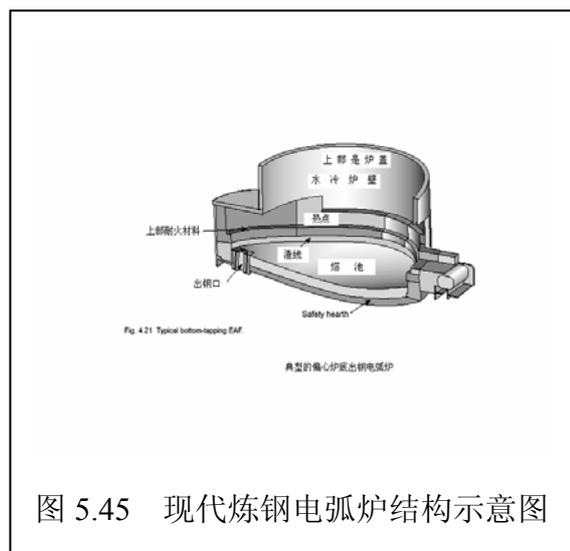
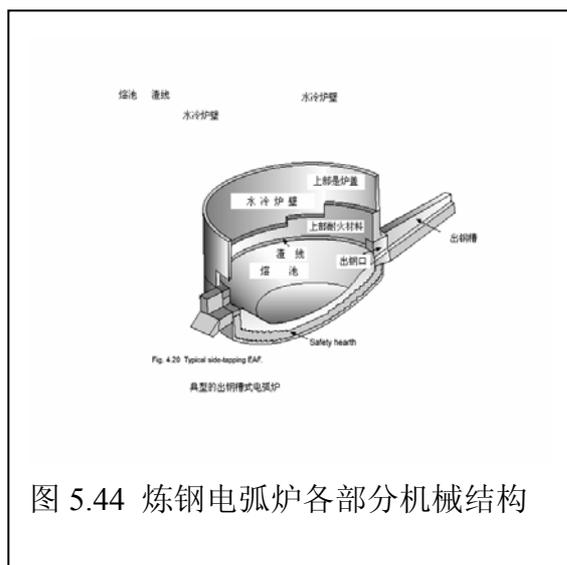
输入能量(1t 粗钢)				输出能量(1t 粗钢)			
矿石—钢铁联合企业		废钢—小钢厂		矿石—钢铁联合企业		废钢—小钢厂	
煤	5333.3 kWh	煤/焦	125 kWh	蒸汽	1444.4 kWh		
蒸汽	1444.4 kWh			电	944.4 kWh		
电	972.2 kWh	电	1527.8 kWh	煤 焦	250 kWh		
氧气	83.3 kWh	氧气	56.9 kWh	苯	83.3 kWh		
天然气	11.1 kWh	天然气	361.1 kWh	Σ=	2722.1 kWh		
		电极	33.3 kWh	净能耗	BF/BOF 是 EAF 的 2.4 倍		
Σ=	7844.3 kWh	Σ=	2104.1 kWh	总能耗	BF/BOF 是 EAF 的 3.4 倍		

众所周知，钢是世界上回收程度最高的材料，这一特性使其成为制造厂家和消费者在生态环境上的理想选择。钢的回收性也使能源和资源消耗大规模降低。据分析，回收 1t 钢可节能 1.12×10^{10} J，另外还可节省 1000kg 铁矿石、400kg 煤和 16kg 石灰石。权威资料表明，用废钢代替铁矿石炼钢，可减少气体污染 86%，减少水污染 76%，减少耗水量 40%，同时减少采矿废弃物 97%。因此看出，全球环境问题日益苛刻的要求为电炉炼钢流程的发展提供了绝好的机会^[2]。

5.5 电弧炉设备

5.5.1 电弧炉机械结构

一般炼钢电弧炉机械结构包括：炉盖、炉壳（炉体）、变压器、导电横臂、炉体倾动系统等部分。传统炼钢电弧炉各部分机械见图 5.44 所示、现代炼钢电弧炉见图 5.45。



5.5.1.1 电弧炉炉（壳）体系统

炼钢电弧炉炉体系统一般包括：炉壳、炉顶圈、工作门。见图 5.46。

炉壳：炼钢电弧炉炉壳通常是圆桶形的，下面带截头圆锥形的底部。采用球状盘形底部则强度更好。炉壳承受着炉衬和金属的重量，还要承受炉衬热膨胀而引起的热应力。电弧炉炉顶升转、电极升降、倾炉等结构一般和炉壳直接连接，炉壳上还有炉门、出钢口（或偏心出钢区以及热装铁水装置）等。要求炉壳有足够的机械强度和刚度。

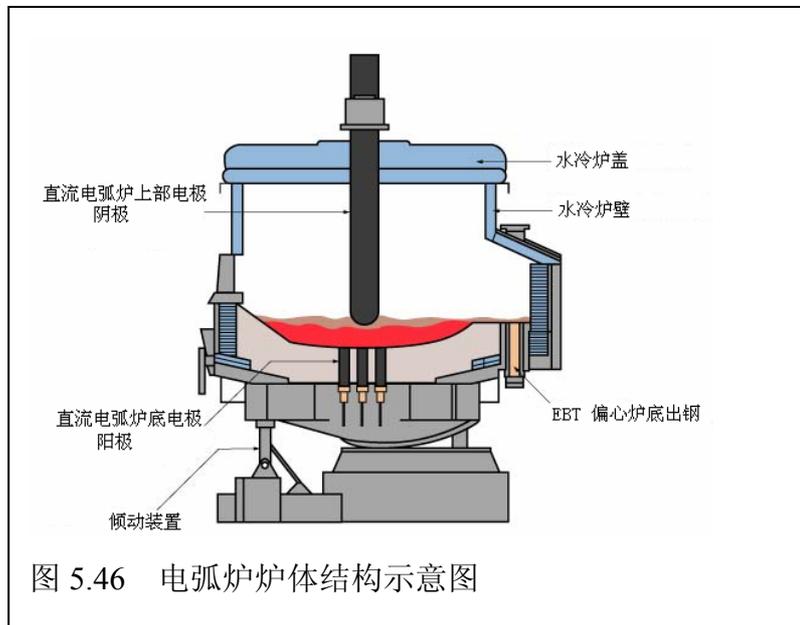
炉壳直径 4m 以上的大中型电弧炉，炉壳做成上下能拆的两部分，接缝应避开渣线，一般上部炉壳安装水冷臂和下部是耐火材料砌筑的炉衬。

炉顶圈：要承受拱起的炉顶砖的重量和热膨胀的作用力。炉顶圈应通水冷却，防止变形，其直径应大于炉壳直径，使全部炉顶重量加于炉壳加固圈而并非炉壁上。

现代炼钢电弧炉由于变压器功率提高、生产节奏加快，炉盖大部分采用水冷结

构，只是在电极区由少部分耐火材料砌筑，这样提高了炉盖寿命。

工作门主要用于熔池搅拌、钢水测温取样等操作。大型炉盖电弧炉有时在炉壳侧面增设一个操作工作门。电弧炉工作门要易于开关，以减少高温辐射热损失和便于操作。一般常采用液压和电动升降控制的工作门。



5.5.1.2 电极系统

电弧炉炼钢电极系统包括：电极密封圈、电极夹持器、电极横臂、电极立柱、电极升降机构。

电极横臂用作装设电极卡头和导电铜管，横臂必须有足够的刚度，在较大的炉子上横臂采用水冷，在传送极大电流的超高功率电炉上，中间相的横臂有时用奥氏体不锈钢制作，中间相立柱的上半部分也如此，目的都是为了减少电磁感应发热。图 5.47 是电极导电横臂及母线示意图。

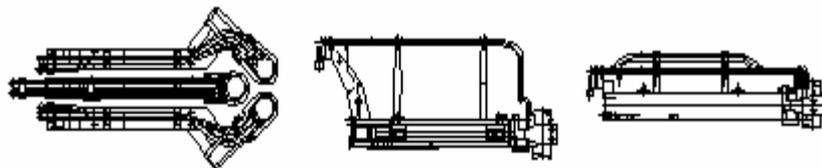


图 5.47 电极导电横臂及母线示意图

5.5.2 电弧炉的排烟集尘

与氧气转炉炼钢一样,电弧炉炼钢过程中要产生大量烟尘,必须经过除尘处理、达到环保要求后才能排放。图 5.48 是电弧炉炼钢除尘示意图。

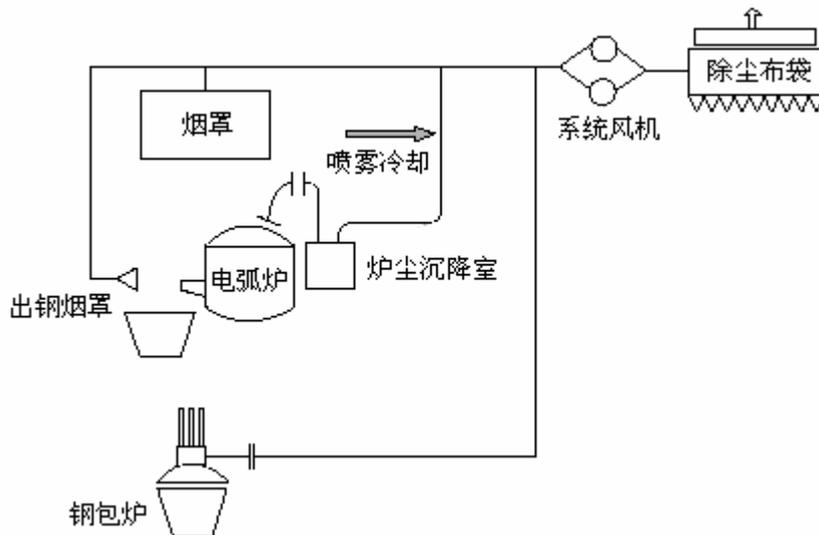


图 5.48 电弧炉炼钢除尘示意图

5.5.3 能量供给制度

随着电弧炉炼钢过程的进行,输入炉子的电功率随时间而变动,其变动曲线叫能量供给制度,也可称作输入功率曲线。广义而言,输入功率和能量还应包括吹氧和燃料氧气烧嘴的工作制度。

废钢铁炉料装入电弧炉后,从通电开始,一般炉料熔化过程可分为如下几个阶段(图 5.49):

(1) 起弧:自通电开始到电极进入钢铁料距离约 1.5 倍电极直径为止。为了避免炉顶过热,在该阶段要适当降低电弧电压、电流和功率。时间约 2~3 分钟。

(2) 穿井:自起弧阶段后,电极逐渐降至最低位置为止。这时电弧被钢铁料所包围,传热条件良好。希望“井”的直径大些,以使更多的金属液体能聚集于炉底而防止炉底被电弧损坏。该阶段应采用较大功率供电。电极在炉料中穿井速度正比于电弧功率而反比于炉料堆比重,上层炉料若是轻碎料,电极将能较快进入炉料。一般高功率或超高功率电弧炉穿井时间 5~10 分钟。

(3) 主熔化阶段：电极自最低位置（随着钢水增多）逐渐升起，直至炉料基本熔清而炉衬暴露于电弧。由于电弧是在液体熔池上燃烧而变得比较稳定，而炉衬仍受到废钢铁料的屏蔽。该阶段应采用最高电压和最大功率供电，尽可能加快炉料熔化。

(4) 平熔池阶段：这时电弧暴露于熔池面上，炉衬在热交换过程中起极重要的作用。随着熔池渣面温度 $t_{渣}$ 的升高，辐射能力随着下降。为了防止炉衬吸收、储存更多的能量而温度过高，输入炉子的功率应该随 $t_{渣}$ 升高而降低，经常是炉子电压相应地逐步降低。

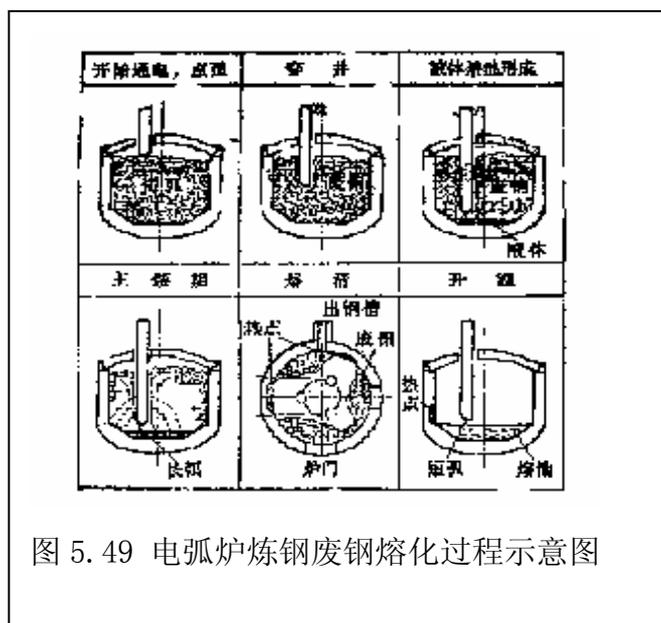


图 5.49 电弧炉炼钢废钢熔化过程示意图

5.5.4 炉衬

电弧炉常采用碱性炉衬，炉底可分成工作层、支持层和绝缘层三层。

中小型电弧炉工作层常采用镁砂打结，厚度约 250mm，要求镁砂中 MgO 含量不小于 95%。大中型电弧炉工作层一般采用含 MgO 达 95%的、用焦油浸渍过的烧结镁碳砖砌筑。

支持层的厚度可达 500mm，通常用含 MgO90~98%的镁砖。

绝缘层用作增加整个炉底的热阻，以减少钢水纵深的温度差。

渣线区的耐火材料应能抵抗高氧化铁的炉渣。因此采用含高 MgO 的烧结镁砖或镁碳砖。合适的喷补炉材料对提高渣线寿命相当关键。

含 Al₂O₃ 大于 70%的高铝砖是国内最普遍的炉顶砖。有些炉顶在局部用碱性砖，

如铬镁砖，使寿命延长。

电弧炉炼钢过程中，含 FeO 、 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 的炉渣支以及炉尘被喷射到炉壁上，和炉壁相湿润，向耐火材料中的气孔中渗透，表面层被渣化，由于机械原因或冲击而剥落。

随着电弧炉炼钢功率的提高，七十年代出现了水冷挂渣炉壁，以降低耐火材料的消耗。目前有四种水冷炉壁结构。①铸铁或铸钢水冷块，中间有钢管水冷。②钢板焊接结构。③钢管结构，适用于大中型电炉。水冷炉壁在炉中的下沿应高于门坎平面约 400mm，因而水冷面积不可能超出全部炉壁面积的 60~70%。④为了加大水冷面积，在钢制的水冷块下面，安装第四种铜制水冷块，以适应更高的加热功率。

采用水冷炉壁的优点在于能加大炉子的输入功率以缩短炉料熔化时间，提高生产率，同时减少耐火材料消耗。问题是炉子热损失加大，有可能使电耗加大（达 10kWh/t）。电炉采用水冷炉壁（面积和水冷强度）决定于炉子容量和功率强度，使炉子仍然维持较高的热效率。

5.5.5 电弧炉设备的能量平衡和参数配合

5.5.5.1 电炉主要参数和工作指标的关系

一套电弧炉炼钢设备，包括三个主要参数：

(1) 炉子容量 G (t)：可以用炉子实际的出钢水量或是废钢铁料装入量来表示。两者之间有固定的联系。炉子容量 G 是冶金操作、生产管理、车间设计等方面的基础。在炉衬的一个炉役期间，出钢量有少量变动，可以取平均的整数值。

(2) 炉壳直径 D_k (m)：用炉缸平面上的炉壳的内径值。这个参数直接反应了炉子的实际大小，因而可知道炉子其它各部分甚至附属部分的尺寸。炉壳直径决定车间占地面面积和高度。

(3) 变压器容量（额定功率） P_e (MVA)：一方面，电炉变压器容量决定与其配套的的所有的高压电器参数，以及上级变电所的相应容量。另一方面，它又决定电炉设备的输入功率 P 和电弧功率 P_h ，因而也决定炉料的熔化速率。

5.5.5.2 变压器容量 P 的影响，超高功率的概念

电弧炉机械部分固定时，主要依靠采用大容量的变压器增大输入功率 P 。在工艺和其它设备不变时， τ_1 和 τ_3 以及热损功率 P_s 都将不变。

从另一角度看，炉子在炉料熔化阶段的热效率，可按效率定义用下式表示：

$$\eta_t = 1 - \frac{P_{s2}}{P\eta_e}$$

在 P 加大时，炉子热效率增大，因而单位电耗 ω 降低。

在低功率输入条件下，电弧炉的生产周期长达 8~10 小时，生产率很低。1960 年美国的 W. E. Schwabe 等人发表了超高功率（UHP）作业概念，并于 1964 年在国际电炉会议正式提出了超高功率电弧炉这一概念^[2]的同时，在 North Western Steel and Wire Co. 证实增大输入电功率可以带来生产率的提高。超高功率电弧炉本身就是以电气为其技术特征，即以“电”为其本质^[16-17]。

从本质上说，超高功率操作是以最低的操作成本达到最大的生产率的电炉炼钢方法。作为创始人的 W. E. Schwabe 对当时超高功率操作的定义如下^[3,4]刘冰论文：

- ① 吨钢变压器额定容量功率水平 C1 (kw/t)；大型炉 >100t, C1=250~330 kw/t；中型炉 40~100t, C1=330~410 kw/t；
- ② 功率利用系数，即平均功率与最大功率之比 C2 ≥ 0.7；
- ③ 时间利用率 T₀ ≥ 0.7；
- ④ 负载系数 F_L ≥ 0.5。

超高功率作业并不意味着一台普通功率电弧炉只要简单地换上大容量变压器就可望变成正常运行的超高功率电弧炉。超高功率电弧炉是冶金、电气、机械三部分的结合，是一项技术性很强的综合性技术。

超高功率操作促进了电弧炉炼钢的其它各项改革，因为功率水平的提高必须要有其它相关技术的配合。在超高功率操作下，电炉的电气运行操作必需有相应的改变：UHP 技术的前期倡导“大电流、短电弧、低功率因数”的操作制度，随着 UHP 及其配套技术的不断发展，主要采用“高电压、长电弧”操作；炉衬的热负荷大幅度增加；若没有相应的措施如提高耐材质量、水冷炉壁、泡沫渣等措施，炉衬必然很快损失；二次回路的电流强度大大增加；因此降低回路阻抗并均匀化就成了重要问题；熔炼工艺也要有一定相应的变化：UHP 技术问世后，为了充分利用变压器的能力，传统的电弧炉三段式操作法很快消亡，电弧炉的主要功能变成了一台高效的熔化炉；熔炼周期大大缩短，车间内炉座数虽然减少，但物料输送和试样化验等的负担大大增加了；辅助能源的利用，同样增加了单位时间输入炉内的能量，因此 UHP 的概念并不仅仅局限于电能。

近年来，随着超高功率电弧炉及其配套技术的飞速发展，超高功率电弧炉表现出

许多优异特性和竞争力，这也使得人们对其认识不断深入和全面。一些冶金工作者认为“UHP”应为(Ultra-High Performance)^[18-19],因为一台合格的超高功率电弧炉并不只意味着比功率级别的提高,而是综合性能的改善;也有一些冶金工作者认为,“UHP”应为超高产率(Ultra-High Productivity),因为超高功率电弧炉的目的就是缩短冶炼时间,提高生产率;还有一些冶金工作者认为应将“UHP”改为“UHE”(Ultra-High Efficiency)^[20-21],因为超高功率电弧炉的许多新技术都是围绕节能降耗、有效利用能源而展开。此外,还有最佳节能炉“EOF”(Energy Optimise Furnace)、电转炉“EAOF”(Electric Arc Oxygen Furnace)^[22]等说法,但都没有得到一致公认,因为这些说法或过于笼统、或过于偏重,只反映超高功率电弧炉及其配套技术发展的某些方面或趋势。超高功率(UHP, Ultra-High-Power)还是反映了电弧炉发展最本质、最具有代表性的特点,这也是表明电气运行一直是电弧炉发展的原动力和技术保证。

5.5.6 电极

电极的名称来源于它是炼钢电弧炉主电路的极端。炼钢电弧炉中,电极的工作条件是恶劣的,电极直接接触大功率电弧。在其纵向和横向产生很高的温度梯度和热应力。在炉料熔化过程中塌料时,有可能遭到料块的机械撞击。生产中,炼钢电弧炉只能采用碳素材料作电极。常采用人造石墨化电极。石墨具有下列性能:

- (1) 石墨加热后,直接由固态升华为气态,升华温度高达 3800℃。
- (2) 它与大部分材料不同,在温度上升时,其机械强度上升。
- (3) 相对于其它材料,石墨的导热性能好而膨胀系数较低,使石墨的抗热震性能较好,降低了电极中的热应力。
- (4) 在石墨表面温度大于 400℃后会和氧气相结合。氧化量与气体中的氧含量、气体流速和暴露时间有关。在温度大于 600℃后,氧化过程将变得很激烈。
- (5) 石墨易于机械加工,可使电极两端的螺纹接头座和螺纹接头有较高的加工精度,电极接头处接触良好,机械应力分布较好。
- (6) 与某些高熔点金属(如钨、钼、钽等)相比,石墨的价格便宜多了。

电极消耗一般有下列三种情况:

(1) 电极端面消耗:①在电弧高温下不断升华;②由于电弧温度极高,在炉料熔化过程中较冷的废钢会使电极冷却,在电极中产生的热应力使电极剥落;③在大电流下电弧剧烈向外偏移。在渣层较厚时,电极端和渣液相接触而被部分熔解。

(2) 电极侧面消耗是指电极圆柱体表面被氧化消耗。在温度超过 400℃时,

氧气即能渗入石墨表面发生氧化。在温度超过 550~600℃时电极表面氧化加剧。电极附近的氧浓度和气流速度对电极氧化损失有较大影响。一般氧气燃料烧嘴、吹氧操作和除尘排气等，都会影响电极消耗。

(3) 电极折断损失。在炉料熔化过程中由于炉料塔落造成的电极折断损失。

石墨电极制造过程复杂、生产周期长，因此，炼钢电弧炉的石墨电极价格较高，特别是直径大的超高功率电弧炉所使用的电极价格更高。电极消耗的指标直接影响电弧炉炼钢生产成本。电弧炉炼钢中，要尽可能降低电极消耗，这样才能有低的成本，提高企业的市场竞争力。

5.5.7 电弧

超高功率电弧炉主要应用电弧进行加热、熔化废钢。所谓电弧，就是阴极和阳极间放电的一种形式，离子具有低电压、大电流和高能密度的特征。在弧柱内，随着内部能量的增大，一部分的分子会离解成原子，进而激励→电离，形成等离子体，它不同于固体、液体和气体，属于物质的第四态。电弧各部分的温度为，阴极点 3500~4000℃；阴极附近的弧柱最高温度为 15000~20000℃；弧柱外侧最高温度为 6000℃左右，越靠近内侧温度越高^[37]。交流电弧与直流电弧不同。交流电弧的电压及电流每一个周期会改变两次方向，即采用 50Hz 电源，其电压及电流在 1 秒内从零点通过的次数为 100 次，并且改变方向。当电流减小时，弧柱内的带电粒子会再次结合，等离子状态趋于消失。在这种等离子状态消失之前，如果有附加逆电压，且有电流，电弧就会持续。交流电弧比直流电弧易于熄灭。稳定电弧的主要因素有：大电流、短电弧、大的电抗百分比、高的电源频率；炉气流动越少，电弧越稳定；炉气压力越高，电弧越稳定；炉渣的存在也提高了电弧的稳定性；受外部磁场影响越少的电弧越稳定。

5.5.7.1 电弧

电弧是电弧炉炉内的热源，它决定炉中的热工状况。由于电弧本身的特点，它决定电弧炉设备的电气特性。因而决定了电弧炉炼钢的各个方面。

电弧是一种气体放电现象。在两电极间加上一定的电压，就能自行放电。放电时两电极间的气体被电离，出现大量带电质点——自由电子和正离子，电极间出现导电通道，电流密度达数 kA/cm²，气体温度达几千摄氏度。

5.5.7.2 电弧稳定燃烧条件

(1) 电弧按电源性质可分为直流电弧和交流电弧两大类。工业应用的电弧大多数是交流电弧。理想的交流电弧的电压和电流为正弦波形。对交流电弧来说，其电压和电流的大小和极性随时间周期性地改变，交流电弧的电压和电流每一个周期会改变两次方向，即采用 50Hz 电源，其电压及电流在 1 秒内从 0 点通过的次数为 100 次，并且改变方向。

为了保证电弧的燃烧，两电极端面之间，除应有一定数量的带电质点之外，还要求有一定强度的电场，也就是应有一定大小的电弧电压。电弧开始燃烧的电压称为起弧电压或燃弧电压 (U_h)。当外电压过最大值后减小时，电弧电压减小到某一数值时，电弧熄灭，此时的电压称为熄弧电压。由于弧区温度的影响，燃弧电压略大于熄弧电压。对于大功率交流电弧，熄弧的瞬间弧区温度降低不明显，可近似认为燃弧电压等于熄弧电压。

若外电路中电抗 $x=0$ ，电弧电流和电弧电压同相。在外电压 U 小于起弧电压时，电弧熄灭，电流为 0。在时间横轴上，在电源电压过 0 点的前后就有一段时间间隔，此时电弧是熄灭的，这就是交流电弧燃烧不稳定的根源。为了不灭弧，要求电路有一定的感性，使电弧电流和电源电压之间有一相位差 φ ，在炼钢情况下要求的理论值是功率因数 $\cos \varphi \leq 0.866$ 。

(2) 交流电弧的极性在燃烧过程中快速地变化。石墨电极在负半周作为阴极时有比较稳定的阴极斑点，形成了稳定的电弧；与此相反，当正半周时由于从阴极钢水熔池喷射出蒸汽，使阴极斑点在钢水液面高速转动，电弧的形状变得不规律。此外，在熔化期，由于冷钢存在的缘故，电弧不断地从一块炉料跳向另一块炉料，电弧电压和电流波形无规则地剧烈变动。这些情况导致了电弧在工作条件下的不稳定性。交流电弧在工作中的剧烈变化使得电弧电流和电弧电压的波形严重地畸变，也就是会产生一系列的高次谐波，降低了向它供电的电网的供电质量。

5.5.7.3 炼钢炉中电弧

炼钢炉中是交流大功率电弧，在电弧的外电路中的电抗必须有足够大小的量值。这是为了满足电路条件，使电弧电流有一确定的大小。

电弧炉中电弧电压 U 和长度 l 的关系可用下列经验式子表示：

$$U_h = a + \beta l \quad \text{V}$$

式中 a ——电弧阴极区和阳极区电压降的和，实验值常是 10~20V，它随电极

和炉渣的不同而改变；

β ——弧柱中的电位梯度，V/mm，可取如下的数值：

电弧燃烧阶段	熔化初期	熔化中期	精炼期
β , V/mm	10	3.8	1.1

在三相炼钢电弧炉中，每相电弧受到其它两相电弧所建立磁场的作用，于是被电磁力移至电极端靠近炉衬的外侧——电弧外吹。由于外吹作用，弧柱和金属面间夹角减小至45~75°。有一股高温气流——电弧弧焰冲向炉壁，高速抛出金属，渣、石墨等质点，在电弧附近渣线上方的炉壁上形成热点。因为热负荷最高因而受化学侵蚀最严重。

电流流过钢液产生磁场，使钢液发生搅动。在高功率炉子上，约有20~30%的电弧热量由这种搅拌作用传入钢液。每分钟被移动的钢液总重的9%左右。

5.5.8 电弧炉变压器和主电路

电炉电弧电压低而电流大的特性，要求有专用的电炉变压器和高压电网相连接。其它电器设备是以电炉变压器为中心，并为后者服务的。电炉变压器的特征是低压侧电流非常大，因此应将它安装在由它供电的电炉附近。

5.5.8.1 电炉变压器的工作原理

变压器在变换电压的同时，变换着电流和阻抗的量值。

(1) 电磁感应定律

电磁感应定律的一般表达 $E = -N \frac{d\Phi}{dt}$ ，代入 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，得到下列等式：

$$E = 4.44fN \cdot \Phi$$

式中 E ——感应电势有效值，V；

Φ_m ——正弦变化磁通的最大值，Wb

f ——磁通变动或电源频率，Hz；

$\omega = 2\pi f$ ——角频率；

N ——线圈匝数。

(2) 电压关系

变压器原付两绕相间存在着下列关系：

$$E_1/E_2=N_1/N_2=K$$

即原付绕组中的电势比等于其匝数比，即变压器的变比 K。

实践中常用 $U_1/U_2 \approx N_1/N_2$ ，即用电压来代替电势，只是在变压器绕组中的电压降能略去不计的条件下，电压才和电势的量值相等。

(3) 电流关系

按变压器磁势平衡的关系，各电流的向量之间存在下列关系式：

$$\bar{I}_1 N_1 + \bar{I}_2 N_2 = \bar{I}_0 N_1$$

在变压器正常的负载工作条件下，空载电流 I_0 相对于原边的电流 I_1 很小而可略去，假若只注意电流的有效值而不计其方向，就能得到下列关系：

$$I_1/I_2=N_2/N_1=1/K。$$

(4) 阻抗变换（折算）

加于电路 a 和 b（图 1-48）的电压是不相同的。若能使 r' 和 r 之间， x' 和 x 之间保持一定的大小关系，则电路 a 和 b 在功率上是完全等值的，即 $U \cdot I = U' \cdot I'$ ； $I^2 \cdot r = I'^2 \cdot r'$ ； $I^2 \cdot x = I'^2 \cdot x'$ 。反之，可以用两电路的功率相等来求出两电路间的参数 r' 和 r 以及 x' 和 x 间的关系。

变压器原边和付边是两个电压和电流不同的电路，存在着功率相等 $U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2$ 。关系，因而可将原边和付边两个电路中的阻抗互相变换。如将变压器原边电路中的阻抗变换（折合）到付边，只需将其数值各除以变比 K 的平方。

$$r'_1 = r_1 \cdot \frac{1}{K^2} \qquad x'_1 = x_1 \cdot \frac{1}{K^2}$$

(5) 变压器内部阻抗

变压器绕组是用导线绕制而成的，有一定的电阻。线圈附近的漏磁通（区别于铁心中的主磁场）使绕组具有一定的电抗。按阻抗变换原理，可将原付边的电阻和电抗折合到另一边。按电工界习惯，都折合到原边，这个变压器的内部阻抗被称作短路阻抗 Z_B ，通常以额定电压的百分数表示：

$$U_B \% = \frac{Z_B \cdot I_1}{U_1} \times 100\%$$

5.5.8.2 电炉变压器的特点

通常电炉变压器原边由 6~35KV 电源供电。但目前已有由 60KV 以上甚至 220KV 的输电电网直接供电的电炉变压器。

电炉变压器的低压大电流出线是其极为重要的一部分。出线要防止本身和邻近结构的过分发热。出线处要防止漏油并要承受短路时的机械力量。每相当几十千安的流难以在各单个出线导体间均匀分布。此外，要求变压器三相出线间的阻抗尽可能相同。

5.5.9 电弧炉的主电路

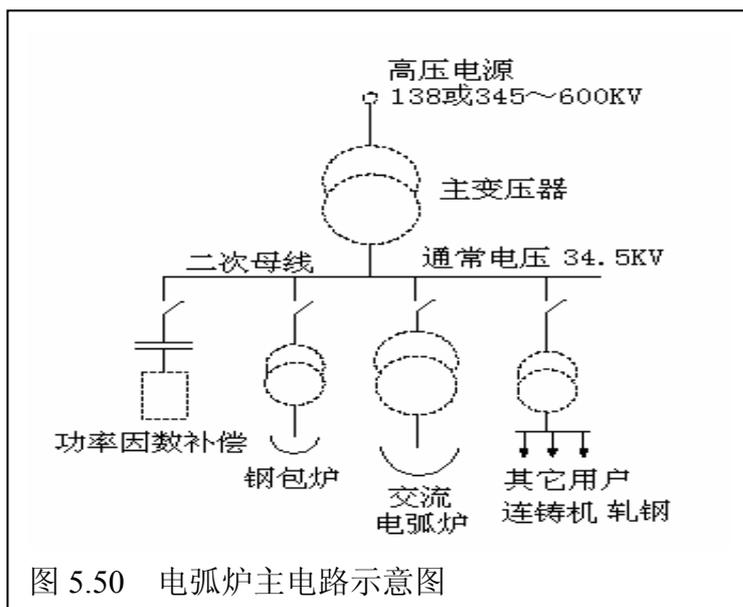
5.5.9.1 电炉钢厂供电

大型电炉炼钢厂用电量很大，常常要求由输电电网（110~220kV）供电。为了保证供电，常常由两条线路甚至两个独立电源向炼钢厂变电所的母线供电。但就供电可靠性讲，除了冷却水外，还是允许电炉本身突然停电的，当然这将引起经济损失。

5.5.9.2 主电路高压电器

电弧炉主电路指从电炉变压器供电到电炉电弧为止的电路。它将高电压转变为低电压大电流输给电弧炉，提供冶炼所需电能，并以电弧形式将电能转变为热能。

炼钢厂的中心变电站以 10~35kV 的电压向位于电炉近旁的电炉变电所从电。电炉变电所中最重要的中心设备是电炉变压器。向电炉变压器供电直至电炉中电弧为止的电路称作电弧炉的主电路。图 5.50 是电弧炉主电路的示意图。



5.5.10 电磁搅拌

电磁搅拌器如同巨型感应电动机的一段定子线圈。而钢水就相当于该电动机的转子。搅拌器的两相线圈通以相位差 90° 的交变电流，在线圈上面和钢水中产生一个直线移动的磁场。钢水将随着磁场移动而移动，只要更换任何相电流 I_1 和 I_2 的方向，磁场移动方向改变，钢水运动方向也随之改变。

为了让磁通进入钢水，有两点需要注意：1) 电炉炉底壳的钢板需用无磁性钢制作。2) 搅拌器电流频率应很低，如 $0.5\sim 0.2\text{HZ}$ ，目前采用晶闸管低频电源供电。

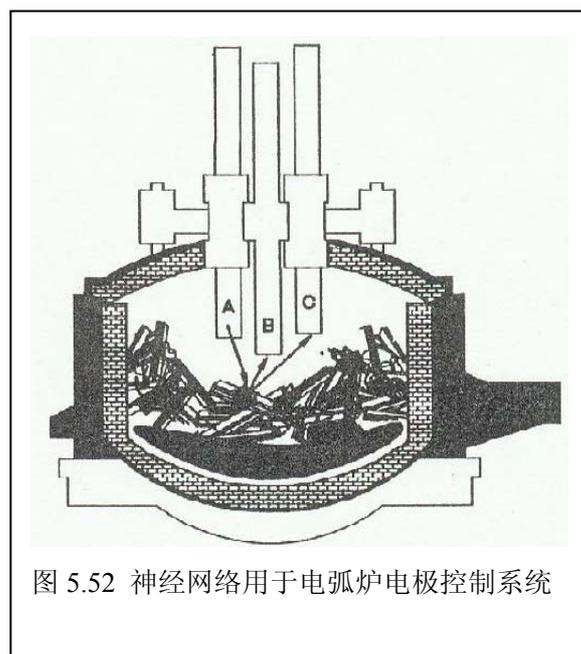
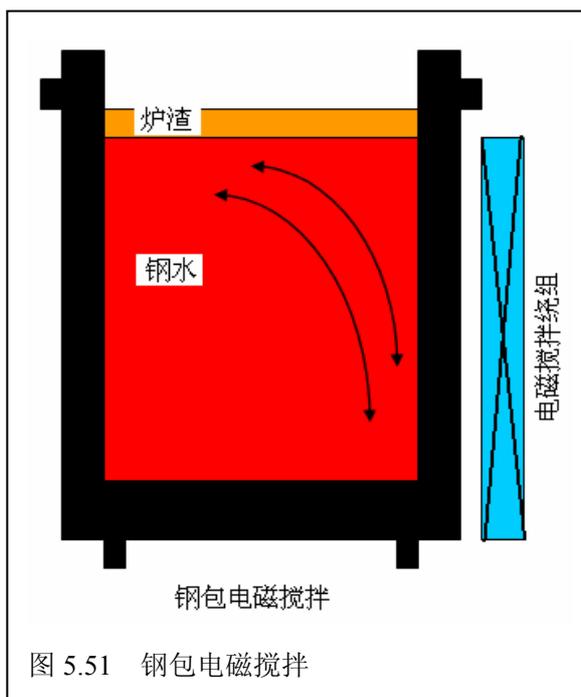
电磁搅拌设备的价格要占炉子本身的 $30\sim 40\%$ ，只有少量电炉子采用。

将电磁搅拌器装于钢包的壁上，形成电磁搅拌式的钢包精炼炉（图 5.51）。

电炉或钢包装设的搅拌器，容量常在 $350\text{V}\sim 700\text{kVA}$ 范围内，钢水中的搅拌力大约 $200\sim 500\text{N/m}^2$ 。钢水平均运动速度约为 $0.5\sim 1.0\text{m/sec}$ 。

5.5.11 电极自动调节器

电炉机械的或液压的电极升降机构和电极自动调节器一起，构成电极自动调节系统。电极调节器的一个重要指标是电极上升速度。一些优质的液压电极升降系统可达 $7\sim 9\text{m/min}$ ，下降速度约为上升速度的 70% 。



随着计算机应用技术的发展,利用数字模件以及计算机控制电极调节系统,用模拟的方法或软件计算真实的电弧电压和电弧电路的功率因数,从功率因数来判断电极位置,如是否接近于和炉料相短路。

美国的北星(North Star)钢厂与米尔切克(Milltech·HOH)公司合作研究用神经网络技术改善电弧炉的电极控制系统,在一台80t交流电弧炉炼钢生产中投入运行,所取得的成绩是:生产率提高10%~20%;电极消耗量降低0.4~0.6kg/t;电能消耗减少18~20kwh/t,其控制示意图见图5.52^[99]。

5.5.12 短网

从电炉变压器压侧的出线开始到炉中电弧为止,传导低电压、大电流导体,称作短网。从电气特性看来,石墨极也包括在内。

炼钢电弧炉上,由于经常发生冲击性的短路电流,导体间会有很大的电动力。因而只采用机械强度较好的铜作导体。导体截面大小决定于电流大小,对自然冷却导体,电流密度不大于 $1.5\text{A}/\text{mm}^2$ 。对水冷导体电流密度可取 $3.5\sim 5.0\text{A}/\text{mm}^2$ 。对每相电流大至几十千安,采用每根截面达 $3000\sim 6000\text{mm}^2$ 的水冷电缆,允许电流密度高达 $10\text{A}/\text{mm}^2$,每相只用2根水冷电缆。

短网的电阻和电抗对电炉电气特性有重大影响。人们总是力图减小其电阻和电抗的数值。并且力图使三相的数值相等。

5.5.13 电弧炉作为电网的负载

电弧炉是电网中很大的用电负载。同时,电弧炉负载对电网还有一定影响。这表现在使电网电压波动,谐波电流和单相负载。这给电网带来不利的影

5.5.13.1 电弧炉负载的特点

从供电重要程度来看,炼钢电弧炉不会由于突然停造成人身和重大设备事故,允许短时停电。

从用电角度来看,在炼钢过程的不同工艺阶段,负载的大小是大不相同的。只是在炉料熔化期中,电炉变压器才是满载工作。在出钢、补炉装料的预备期间,炉子停电。精炼期间负载较轻。电炉变压器的全年满载利用时间小于2500小时。若将电炉只作为熔化废钢的工具,则可提高至3500小时。

电炉的平均功率因数常常只有 0.70~0.85，大炉子的值要小些。

从所周知，电弧炉的电流不在断地变动。尤其是在炉料的熔化阶段，电弧位置随某块炉料熔化而连续移动。电弧能从一块炉料突然跳至距离变得更近的另一块炉料。炉料形状是极不规则的，使电弧长度不断变动。冷炉料、渣料等又使电弧四周气氛改变，这些是电弧电流变动的根源。在金属熔池形成后以及在精炼期中，电流稳定的多。

根据实测，电流冲击变动的频度 N 可达每秒 0.1~30 次，变动的幅度 ΔI 大的其冲击的发生频度要小得多，认为是呈高次双曲函数减少，如 $N \cdot (\Delta I)^4 = \text{常数}$

5.5.13.2 电网电压波动

按短路容量的定义，在所考察的临界母线上或公共联接点（PCC）的短路容量是 $S_K = \frac{U_0^2}{X_n} \approx \frac{U^2}{X_n}$ 。为方便起见，电压常采用电网额定值 U；而 X_n 是指电网在该运行方式下的电抗。同时，设 PCC 从电网吸取的无功功率 Q 只是供给电炉所用。此时 $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \Phi$ ；于是相对电压降 $\Delta U/U$ 值为；

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{\sqrt{3}I \cdot X_n \cdot \sin \varphi}{U} = \frac{\sqrt{3}U \cdot I \cdot \sin \varphi}{\frac{U^2}{X_n}} = \frac{Q}{S_K}$$

在电炉中三根电极升起时，此时电流为零， $U=U_0$ 。在三根电极插入钢水时，电流最大是 $\frac{U_0}{X + X_n}$ 。此时母线上的电压降也将最大，并等于线路上 X_n 上的电压降， $\Delta U = \frac{U_0}{X + X_n} \cdot X_n$ 。相对值是 $\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X_n}{X + X_n}$ 称为静态电压降。

按电炉功率特性曲线，若电流有一变动 ΔI ，相应地就有一有功功率变动 ΔP 和无功功率变动 ΔQ 。显然， ΔQ 的值大于 ΔP 的值。由于电流的快速变动，P 和 Q 值也有相应的快速变动。

注意到 Q 存在引起电压降 ΔU ，而快速变动的 ΔU 将引起电压的快速变动。这是一种周期性的电压波动，频度为 0.1~30 次/秒，是一种快速电压波动。这种波动由于白炽灯亮度闪烁而被发现。

炼钢电弧相起的这种快速电压波动成为电网的一种公害。这种电压波动的频率多在 2~10Hz 中，所引起的灯光闪烁正是在人眼最敏感的范围攻之中。

根据 $\Delta U/U=Q/S_K$ 。若设额定电流下电炉设备的 $\cos \Phi=0.80$ ，则 $X\%=\sin \Phi=0.60$ 。

在电极插入钢水短路状态下的无功功率 $Q_k = P_e / X\%$ 。式中 P_e 是电炉变压器的额定容量。于是，若取 $\Delta U/U \leq 2.0\%$ ，则电网在公共联接点上的短路容量 S_k 至少应为电炉变压器额定容量 P_e 的 83.3 倍。

为了减小电炉炼钢引起的电压波动，要求公共联接点上的短路容量 S_k 值足够大。这就要求电炉钢厂位于发电厂附近或者要求更高的输电电压向电炉钢厂送电。必须注意在电网的不同点上其短路容量是不相同的。

减少电压波动的一个方法是增加电炉的电抗 X 。如公式 $\Delta U/U = X_n / (X + X_n)$ 所指出的那样，增大 X 和增大额定电流下的 $X\%$ 有同样的含义。

减少电压波动的主要方法是减少通过输电线路的无功功率波动。如采用静止的无功功率被偿设备。

原则上，有两种不同的补偿方法：①间接补偿：补偿设备中感性元件的无功容量可调节，使通过输电线路的无功功率维持为一恒定不变的最大量。②直接补偿：补偿设备中的电容元件的无功容量可调节，使通过输电线路的无功功率恒定地维持为零，即由补偿设备直接向电炉提供变动的无功功率。两种补偿型式相比，直接补偿系统的损耗大约是 3W/Kvar。间接补偿系统的损耗约是 13 W/Kvar。

5.5.13.3 谐波的影响

在交流电弧炉炼钢过程中产生谐波干扰的主要原因有：

- ①电弧的电阻不恒定，并且在交流电弧的半个周期中电弧电阻也在变动，这造成电弧电流的非正弦畸变。
- ②交流电的正负半周换相、石墨电极和钢交替作阴极和阳极，因不同材料的发射电子能力不一样，故使电流的正负两个半周的波形不对称，造成偶次谐波。
- ③三相电弧不均匀，导致基次谐波。
- ④供电系统连结的各种谐波源导致各种谐波的形成。

