第五章 电弧炉炼钢工艺

主要内容

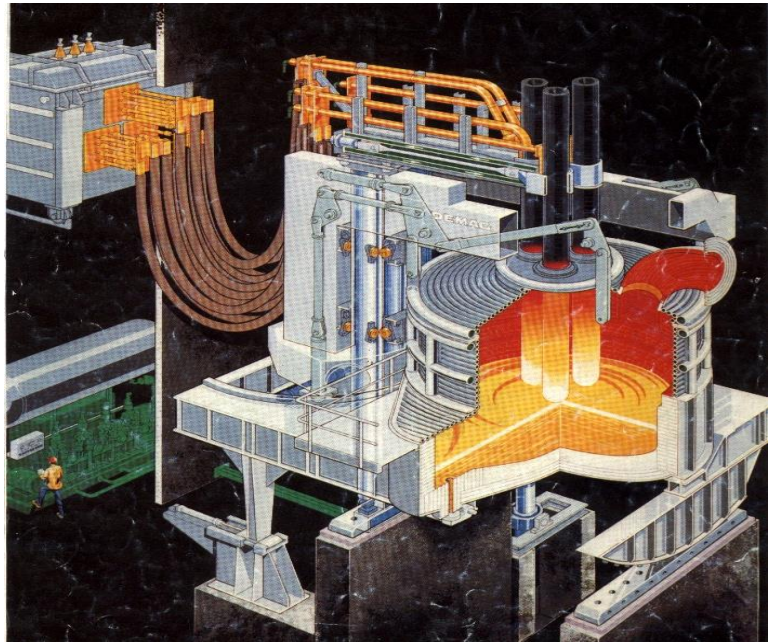
5.1 电弧炉炼钢概述

5.2 电弧炉炼钢的能量来源

5.3 电弧炉炼钢的原料及冶炼平衡

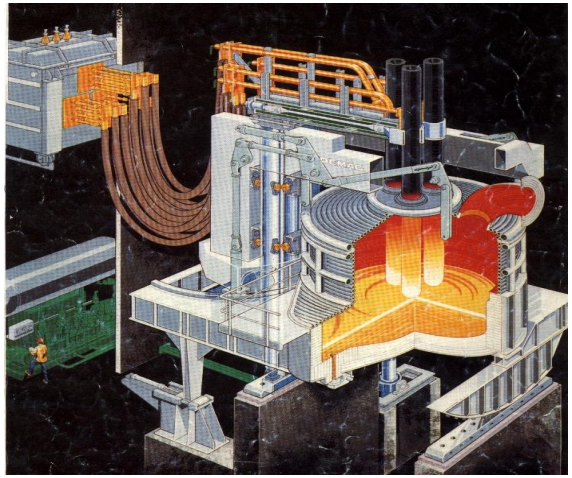
5.4 电弧炉冶炼工艺

5.5 现代电弧炉技术及装备进步



5.1 电弧炉炼钢概述

- 电弧炉炼钢是以电加热为手段的炼钢方式，又称为短流程炼钢，以废钢、直接还原铁或铁水为原料，可生产优质特殊钢，在现代钢铁生产，尤其是钢铁工业低碳转型中占有重要的地位。





电弧炉中正在发光的电极。左下为电极如何浸在加热的炉料中

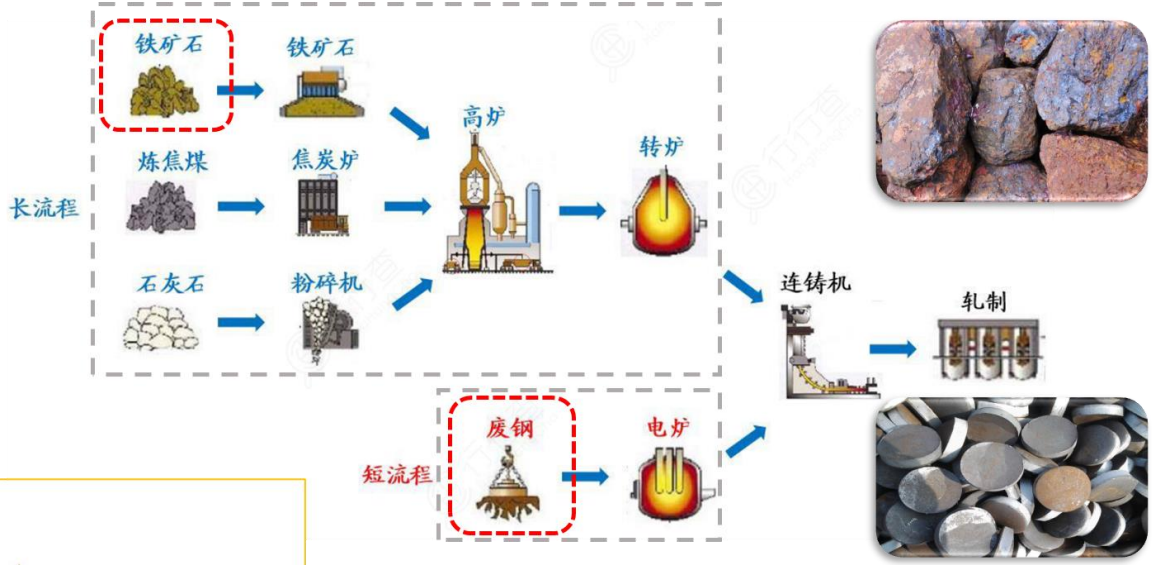
5.1.1 电弧炉炼钢的特点

- **温度高且容易控制。**氧气转炉主要靠铁水的物理化学热升温，而电弧炉采用电加热，不但可以熔化各种高熔点合金，升温迅速且准确，热效率可到65%以上；
- **可以造还原性气氛。**与复吹转炉强氧化性条件相比，电弧炉可以加入还原性材料，形成还原性气氛，有利于脱氧和脱硫，减少易氧化合金的烧损；
- **设备简单。**与氧气转炉相比，投资少，占地面积小。
- 电弧炉耗电量大，约为500kW·h/t钢，钢中氮、氢含量稍高（H=0.005~0.008%，N=0.005~0.010%）

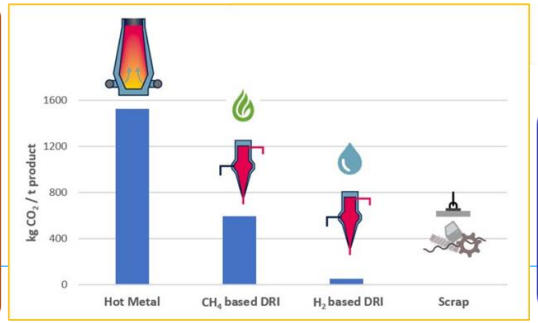


5.1.2 电弧炉炼钢的优势

炼钢工艺流程



炼钢原料碳足迹



- 废钢是一种经过充分还原、可循环的低碳炼钢原料；
- 随着氢冶金发展，氢基DRI成为潜在的低碳炉料；
- 电弧炉短流程可减少60%以上的CO_2排放，甚至近零碳排。

5.1.2 电弧炉炼钢的优势

重要

- **能耗和CO_2排放低，污染物排放少。**矿石经高炉/转炉流程而成粗钢的单位能耗高于700kgce/t，同时也是污染环境的大户；废钢经电炉熔炼所生产的粗钢吨钢能耗仅为270kgce/t，而污染的产生及其治理更远优于高炉/转炉流程。
- **人均生产率高。**采用废钢作原料的电炉炼钢，流程短，生产率高，全员劳动生产率高达4000 t/(人·a)，几乎是高炉/转炉流程的3-4倍。
- **发展循环经济。**社会大量废钢的积累，废品的再循环利用。

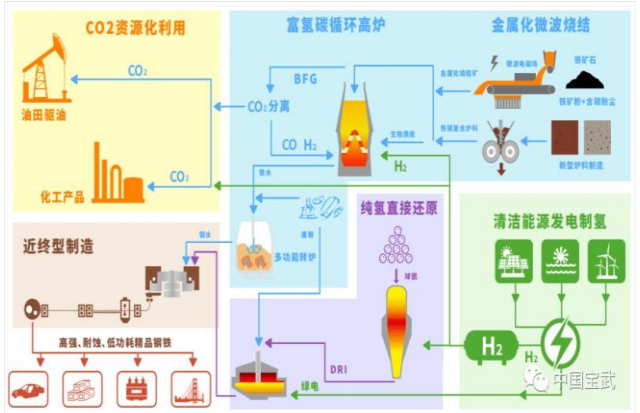
5.1.2 电弧炉炼钢的优势

- 近年来，各级政府、行业协会、钢铁企业发布的《碳达峰碳中和技术路线》中均明确提出“鼓励发展电炉短流程炼钢”，电弧炉炼钢成为中国钢铁工业实施低碳转型的必然选择。

《工业领域碳达峰实施方案》

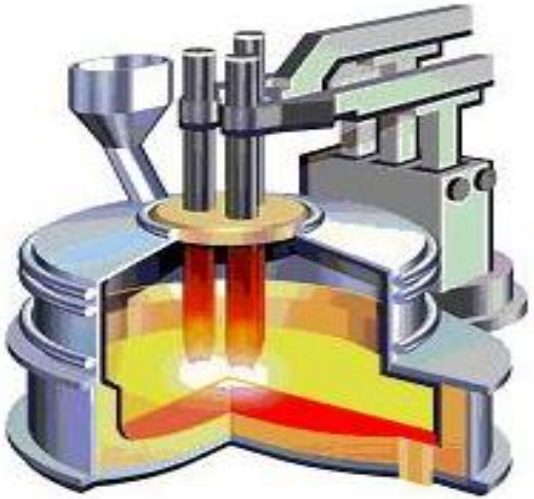
（四）推进钢铁行业碳达峰。严禁钢铁行业新增产能，确保粗钢产量只减不增。大力推进钢铁生产工艺从长流程向短流程转变，提高废钢回收利用水平。加快推进电炉项目建设和高炉调整，“十五五”推进高炉产能逐步转向电炉，到2030年废钢比提升至30%。推进炼铁工艺和自备电厂清洁能源替代，提升钢铁基地天然气储存和供应能力。依托宝武（上海）碳中和产业园，加快研发应用新型炉料、天然气替代喷吹煤、富氢碳循环高炉、微波烧结等节能低碳技术。探索开展气基竖炉氢冶炼技术、二氧化碳资源化利用、生物质固碳示范试点。持续推动产品升级，加大高能效变压器用取向硅钢等高性能钢材开发和生产力度。

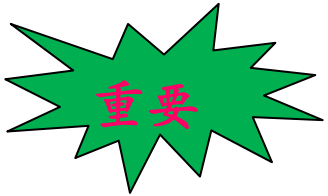
中国宝武碳中和冶金技术路线图



5.2 电弧炉炼钢的能量来源

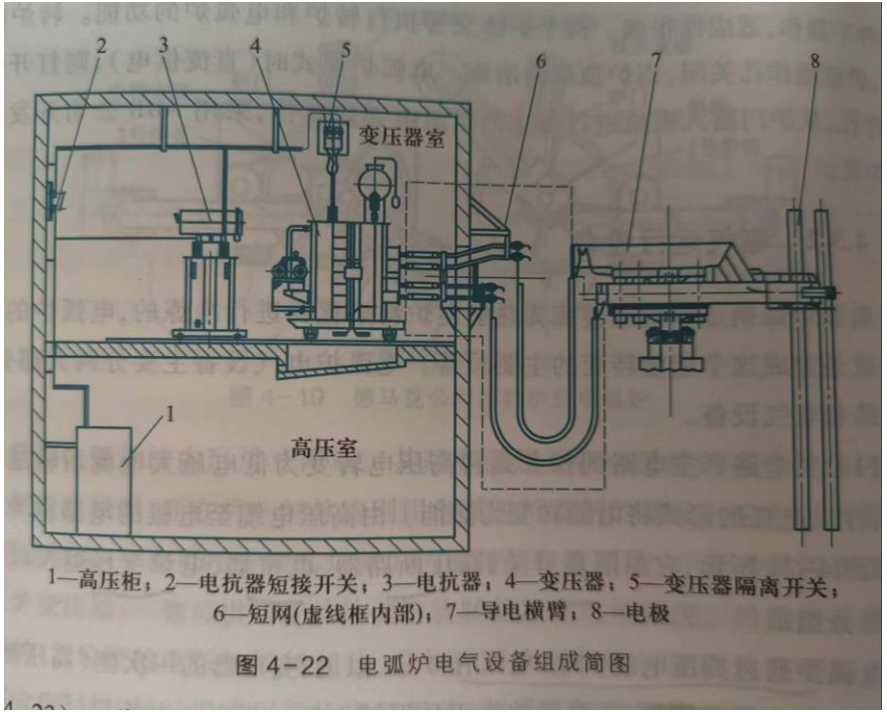
- **电能：**电能是电弧炉炼钢的主要能量来源。
- **化学能：**包括元素氧化及炉气燃烧带来的化学热、输入燃料带来的外来化学热。
- **物理热：**铁水或预热废钢带入的。





5.2.1 供电

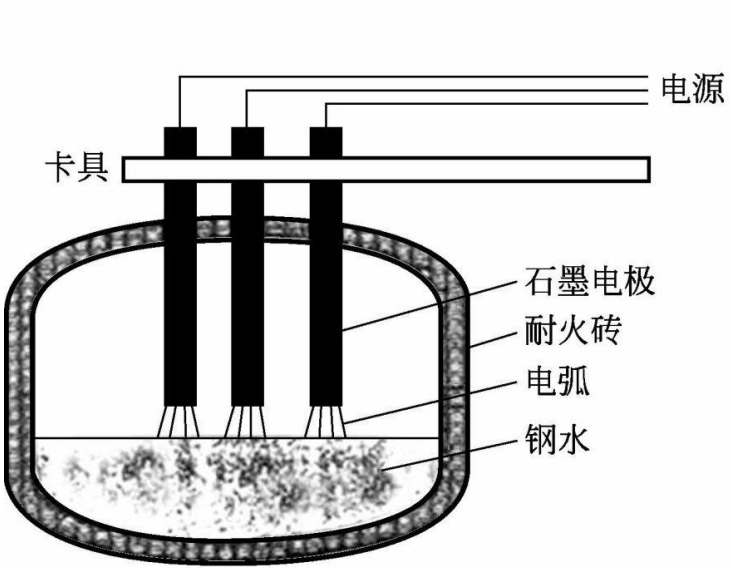
- 电流从电厂沿架空高压线输入变电所的配电系统；再沿高压电缆经配电装置输入电炉变压器。
- 电炉变压器将高压电转化成低压电流通向石墨电极，在电极与炉料之间产生电弧。
- 分常规功率供电(RP)、高功率供电(HP)、超高功率供电 (Ultra High Power，简称UHP)。
- 存在电污染、产生噪音。



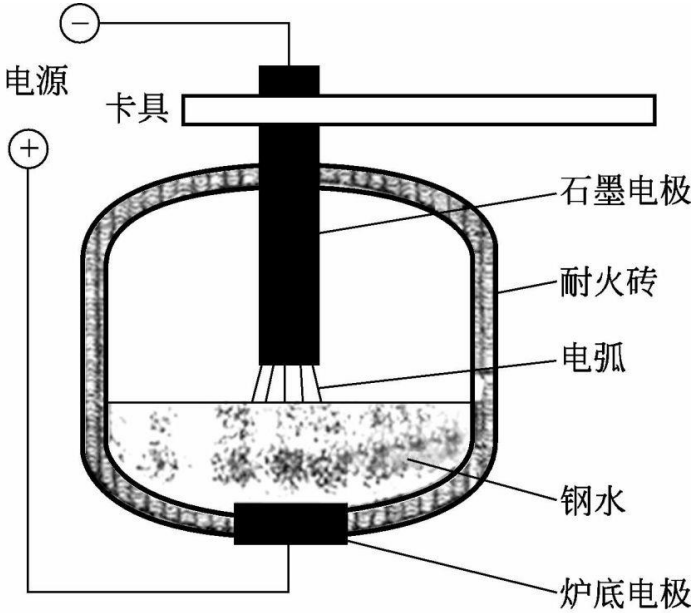
1—高压柜；2—电抗器短接开关；3—电抗器；4—变压器；5—变压器隔离开关；6—短网(虚线框内部)；7—导电横臂；8—电极

图 4-22 电弧炉电气设备组成简图

5.2.1.1 电弧炉供电方式

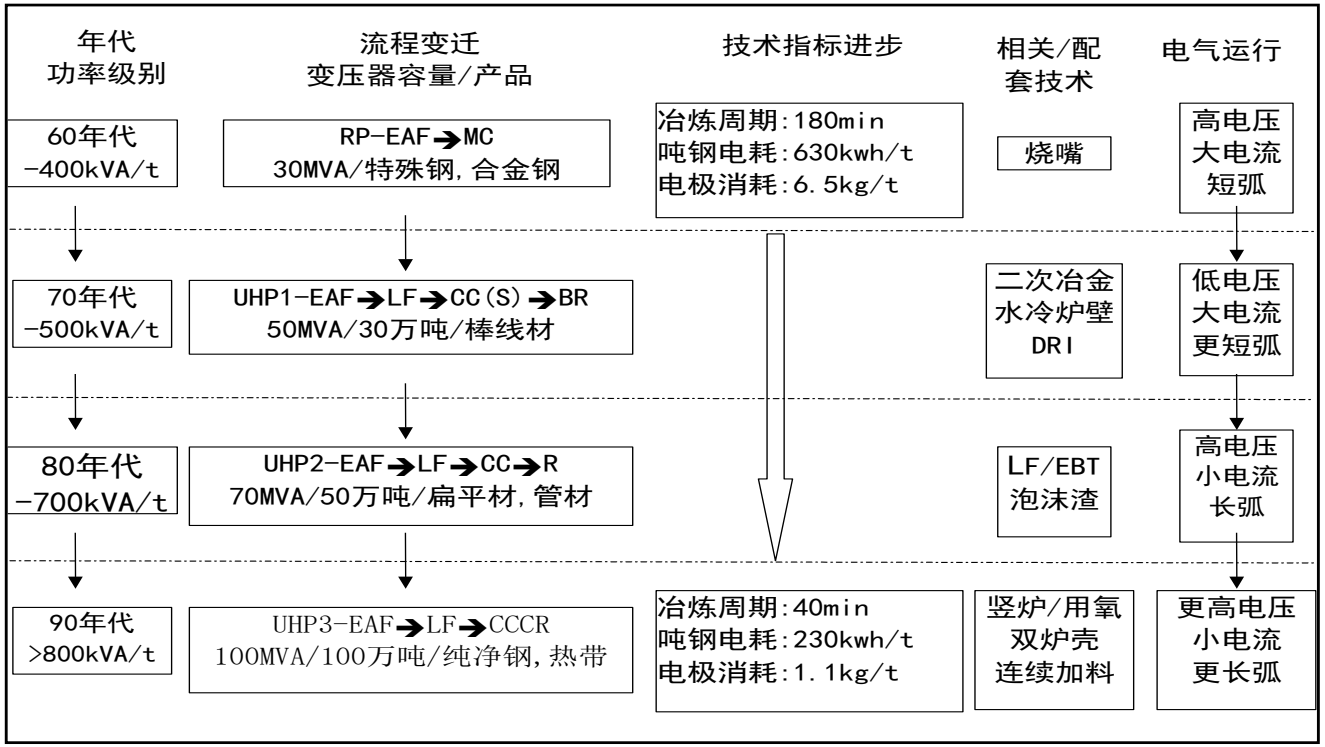


交流供电：三根顶电极



直流供电：一根顶电极和一根底电极

5.2.1.2 电弧炉供电技术进步



5.2.1.2 电弧炉供电技术进步

电弧炉供电新技术

直流电弧炉	消除炉衬热点问题，减少电极消耗，搅拌熔池	消除偏弧；减少对电网冲击
高阻抗电弧炉	利用泡沫渣埋弧操作、提高变压器水平，降低电极消耗	提高功率因数，减轻对电网干扰
无功功率静止式动态补偿	消除或减弱电弧炉冶炼冶炼中电负荷造成的电压波动与谐波对电网的危害	降低闪烁和谐波
冶炼过程计算机自动化控制	按冶金模型、热模型进行最佳配料、电热平衡、最佳控制功率等计算，实现控制、管理、决策	合理电气工作点动态选择、保证合理供电制度执行
智能电弧炉	利用人工智能，具有三相意识，也可进行电弧炉综合控制	解决电弧炉供电三相不平衡问题，减少对电网冲击

5.2.1.3 供电时间计算

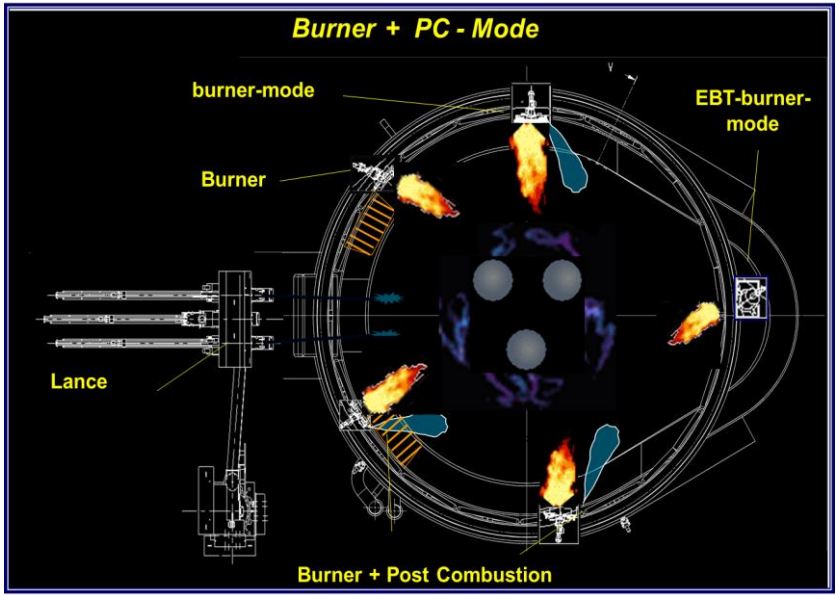
$$t_{出钢-出钢}=\frac{C\cdot W}{P\cdot\Psi+P_{燃料}}+t_0$$

1. C 吨钢电耗，kWh/t
2. W 钢水总重，t
3. P 电炉变压器容量，kV.A
4. Ψ 变压器利用率，
5. T_0 非通电时间，min



5.2.2 化学能

- 化学反应热在电炉能量输入中占了较大的比例，达到30%；
- 特别是电炉使用铁水后，化学热的比例达到40%以上，这是现代电弧炉炼钢工艺的一个特点；
- 在变压器确定后，化学能是电炉提高生产节奏及节能降耗的重要手段。



5.2.2 化学能

重要

在吹氧条件下，熔池中各元素氧化1kg时所产生的理论热值

元　素	产　物	反　应　热		相对成本*（参考值）
		kJ/kg	kwh/kg	
Al	Al_2O_3	30.995	8.61	3.7
Si	SiO_2	32.157	8.93	3.2
Mn	MnO	6.992	1.94	6.0
Fe	FeO	4.775	1.33	1.8
C	CO	9.159	2.54	0.5～0.6
C	CO_2	32.761	9.10	0.3～0.6

化学反应中各发热元素的来源首先是炉料——废钢、生铁、铁水等，还有是由碳枪喷入的碳粉或焦粉。对于普通铁水，每吹入1m^{3}的氧气，所含各元素在1600℃时反应理论发热值约为4 kwh。

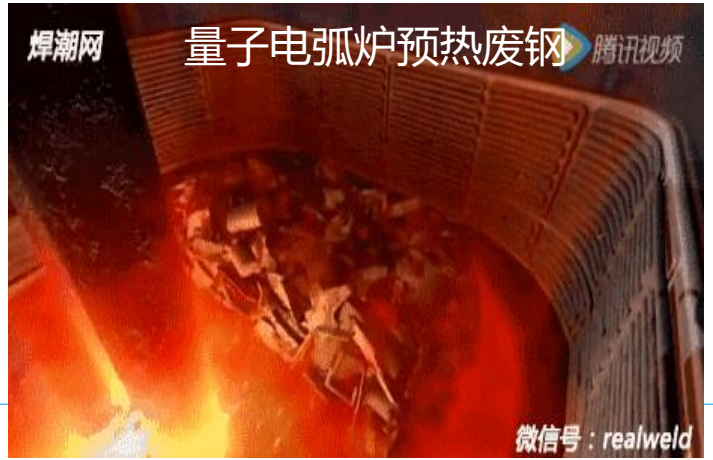
5.2.3 物理热

- 主要是电炉加铁水工艺的采用。

根据国内电炉的现状，提升电炉与转炉的竞争力，节电及提高冶炼节奏。电炉钢质量的要求。

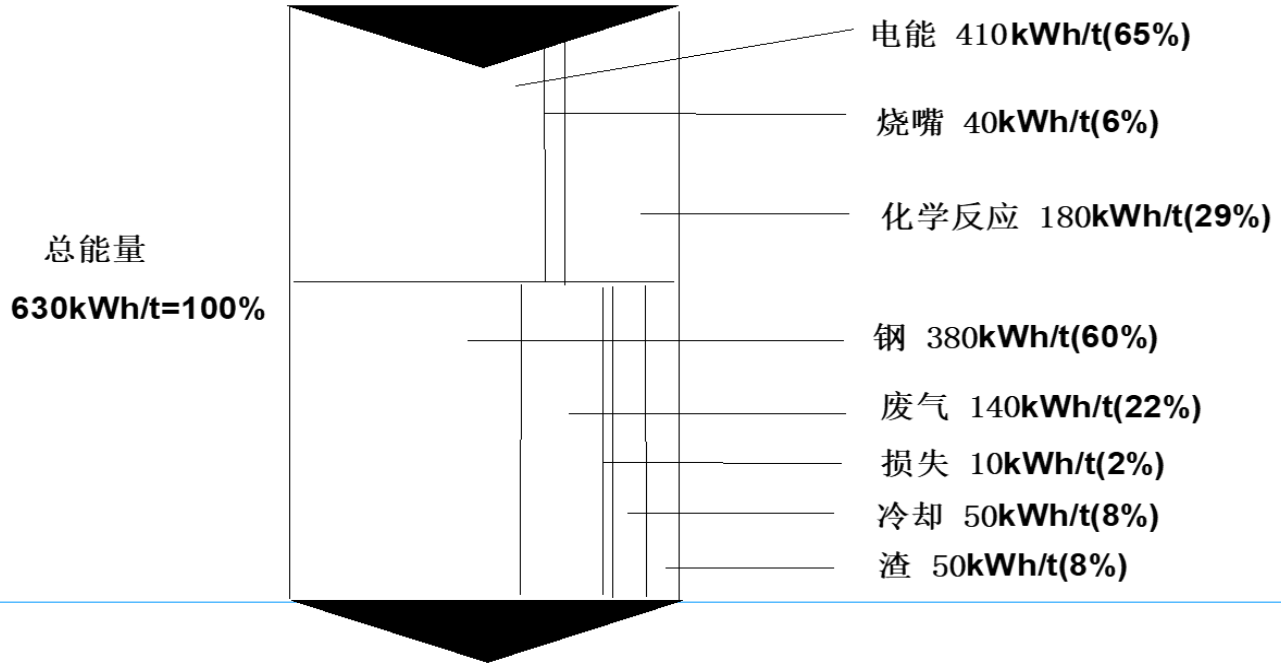
- 废钢预热，可以达到600度以上。





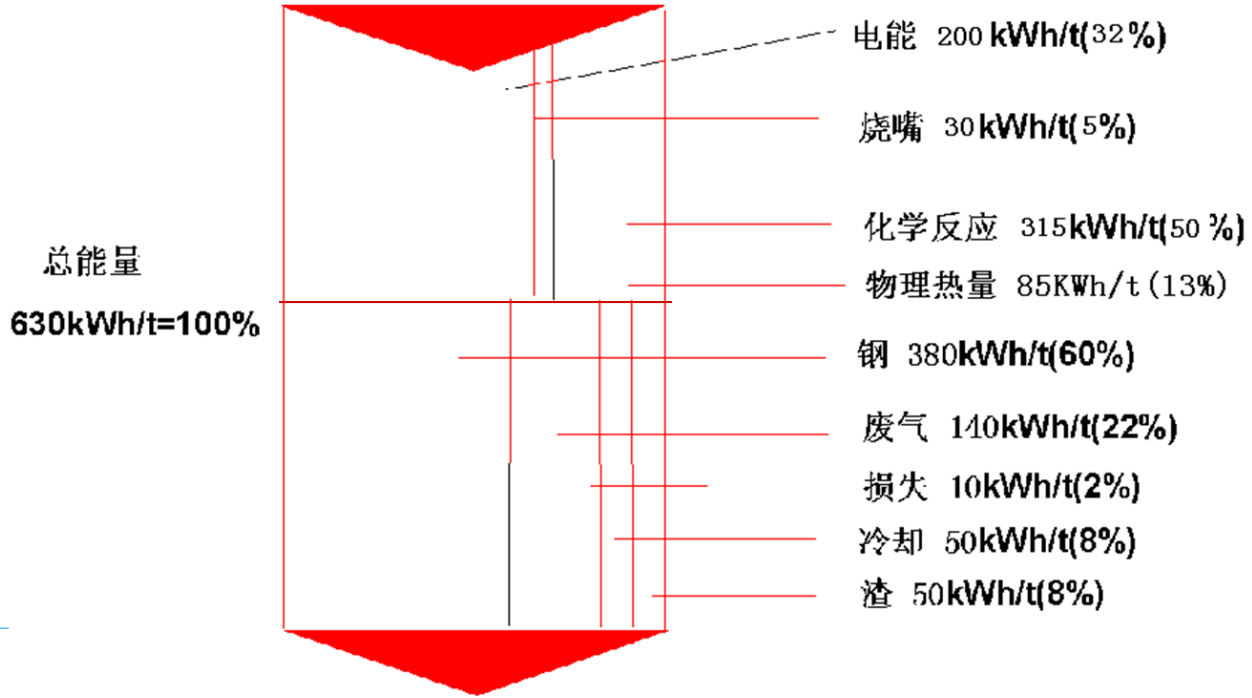
5.2.4 电弧炉热量平衡

电炉总能量(热)平衡（全废钢）



5.2.4 电弧炉热量平衡

现代电炉总能量(热)平衡(装铁水30-40%)



5.3 电弧炉炼钢的原料及冶炼平衡

- 传统的电弧炉炼钢是全废钢工艺以冷废钢为主，配加10-30%左右的生铁块；
- 现代电弧炉炼钢使用的其它原料还有：除冷生铁外，直接还原铁（DRI，HBI）、热铁水、碳化铁等；
- 电弧炉炼钢的原料构成对其工艺、装备、指标等有决定性影响；
- 不同原料结构下的生产过程是不可比的。或者说只有原料结构相当的情况下才是可比较的。







5.3.1 废钢

- 电炉炼钢废钢是基本原料，废钢原料需进行鉴别、分类管理和打包、剪切等处理。
- 当前电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。（它们在电炉炼钢过程中尚无有效方法去除，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：加强废钢管理；废钢预加工；冶炼过程配加其他铁源，稀释残留元素的浓度。
- 应注意设备及人员的安全问题。

5.3.1 废钢-车削料



5.3.1 废钢-轻薄料



5.3.1 废钢-重型废钢



5.3.2 废钢-破碎料



5.3.2 废钢-打包料

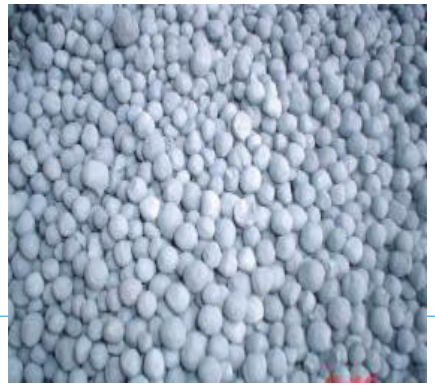


5.3.2 废钢-废钢锭



5.3.2 其他金属料

- **冷生铁**：配碳、稀释残留元素、渣量增加
- **直接还原铁**：粒状直接还原铁（DRI）和块状热压块（HBI）
- **铁水**：配加10%的热铁水，带入的物理热约为25kwh/t-steel，化学热约40-50kwh/t-steel，铁水热装工艺。
- **碳化铁(Fe_3C)**：技术问题，不能大量生产。







5.3.3 造渣材料

- 造渣材料质量的优劣直接影响炼钢节奏；
- 带入电炉的无用东西越少越好；
- 根据经验：石灰应自给，质量稳定，特别是南方的潮湿；
- 石灰的要求：CaO>90%，活性度>380ml，生烧过烧率<6%，块度20-70mm。
- 对白云石及碳粉等原料的要求。



5.3.4 耐火材料

- 对耐材的要求：

高耐火度、高荷重软化温度、良好的热稳定性、抗渣性、高耐压强度、低导热性等。

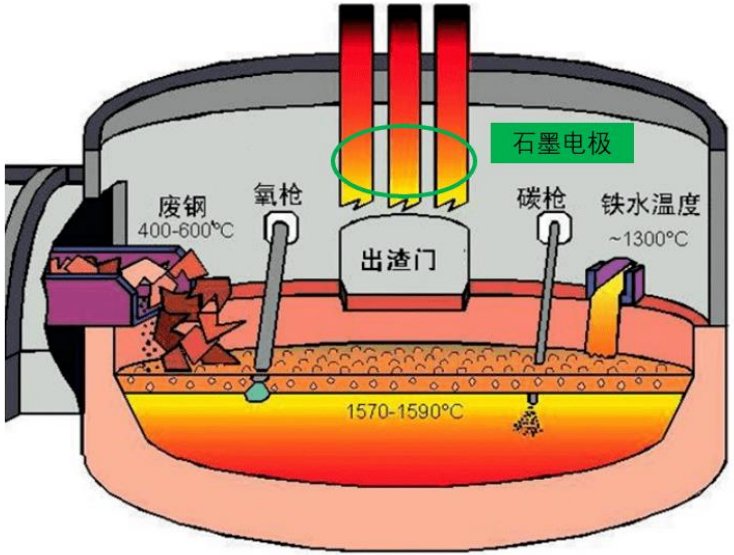
炉盖：高铝砖为主。

炉壁：镁碳砖为主。

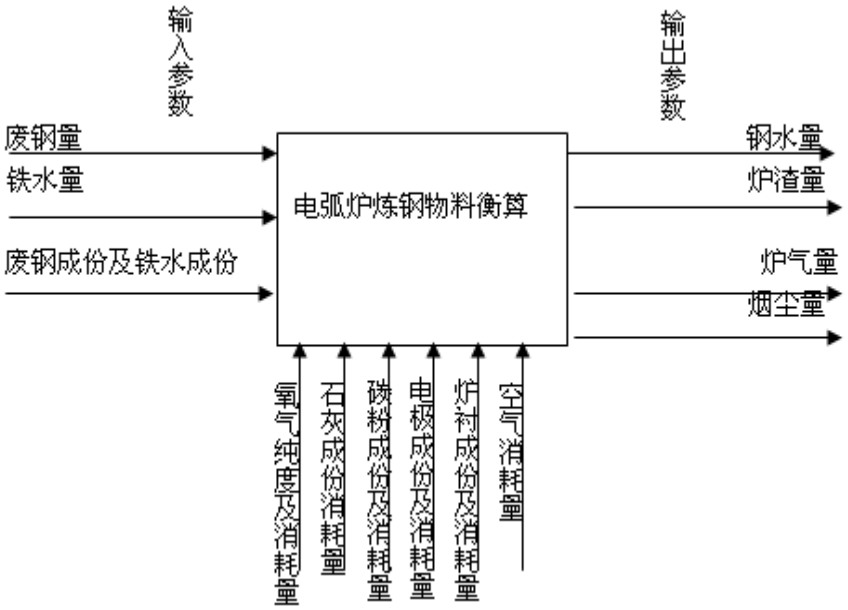
炉底：镁砂打结。



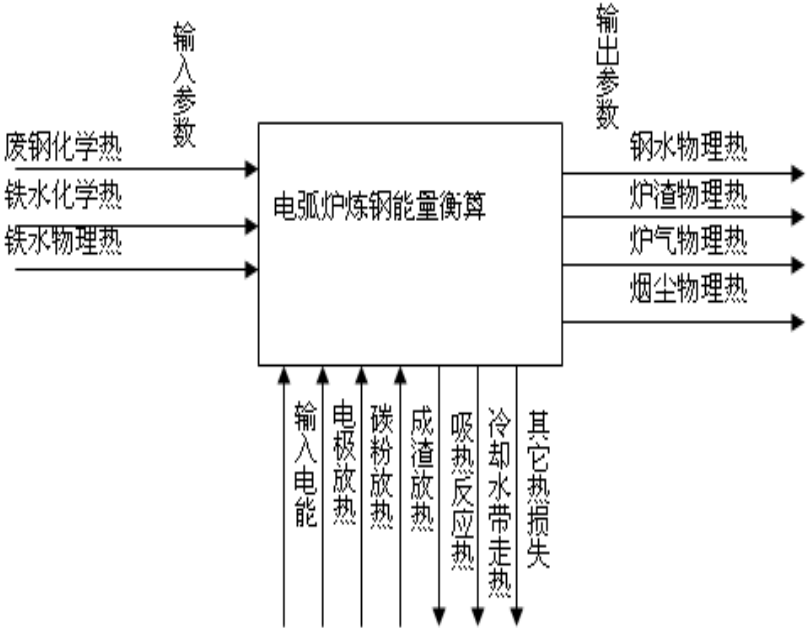




5.3.5 电弧炉冶炼平衡



电弧炉炼钢过程的物料衡算示意图



电弧炉炼钢过程的能量衡算示意图

5.3.5 电弧炉冶炼平衡

吨钢物料平衡表 （30%铁水）

	收入				支出		
项目	质量/kg	体积/m^3	比例/%	项目	质量/kg	体积/m^3	比例/%
废钢	700		60.53	金属	951.05		82.24
铁水	300		25.94	炉渣	57.71		4.99
焦炭	5		0.43	炉气	116.79	82.73	10.10
电极	1.7		0.15	烟尘	30.87		2.67
石灰	29.24		2.53				
炭粉	10		0.86				
炉顶	0.25		0.02				
炉衬	5		0.43				
氧气	60.48	42.24	5.23				
空气	44.75	34.69	3.87				
合计	1156.42	76.93	100	合计	1156.42	82.73	100

5.3.5 电弧炉冶炼平衡

吨钢能量平衡表 （30%铁水）

收入	kW•h/t钢	%	支出	kW•h/t钢	%
废钢	63.62	9.88%	钢水物理热：	385.06	59.82%
铁水化学热	93.62	14.54%	炉渣物理热：	36.22	5.63%
焦炭	16.67	2.59%	吸热反应耗热：	24.42	3.79%
炭粉	35.89	5.57%	冷却水吸热：	79.48	12.35%
电极	6.52	1.01%	其他热损失：	44.00	6.84%
铁水物理热	100.33	15.59%	炉气物理热：	61.09	9.49%
成渣热	7.48	1.16%	炉尘物理热：	13.45	2.09%
炉气二次燃烧	20.33	3.16%			
电能	299.26	46.49%			
合计	643.72	100.00%		643.72	100.00%

5.4 电弧炉冶炼工艺

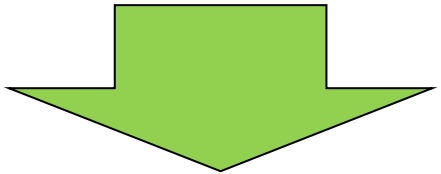
重要

- 传统氧化法冶炼工艺是电炉炼钢法的基础，主要操作过程包括装料、熔化、氧化、还原、出钢5个阶段；
- 电炉炼钢过程中，熔化、氧化、还原三个阶段称为电炉三期，现在俗称“老三期”。
- 传统电炉老三期冶炼工艺，集熔化、氧化、精炼于一体，在炉内既要完成废钢的熔化，脱碳，脱磷，去气，去除杂质等任务，又要进行脱氧和脱硫操作，以及温度和成分的调整，复杂繁琐，冶炼周期长。
- 因此，现代电弧炉冶炼摒弃了传统方法，变得更为有效、紧凑，生产效率大大提高。

5.4 电弧炉冶炼工艺

重要

传统流程：　EAF(熔化期+氧化期+还原期)→CC



高效、节能、紧凑

现代流程：　废钢预热→ UHP-EAF→SR → CC

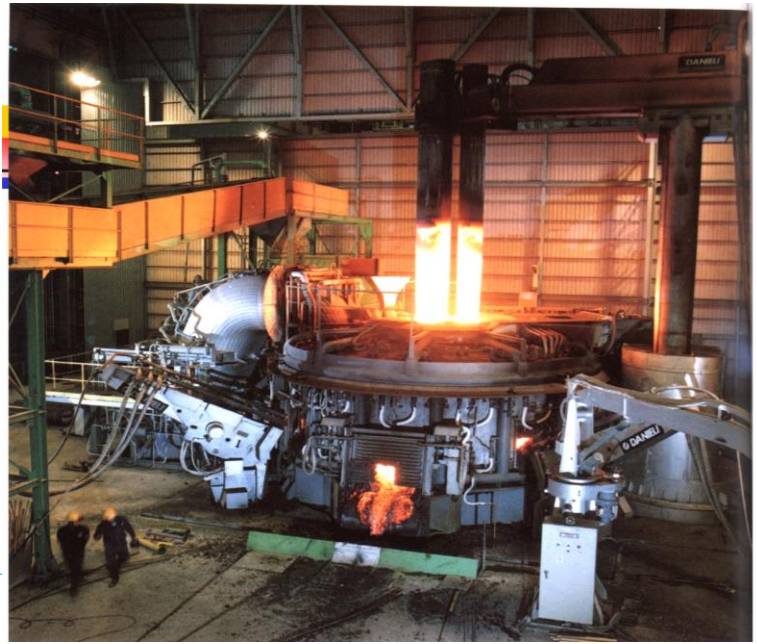
本质区别： 现代流程可以与多种炉外精炼配合，电炉的功能简化，只需熔化、升温和必要的精炼。

5.4.1 装料（配料）

- 电炉炉料主要是废钢、返回料和增碳剂，也有部分DRI、生铁（或铁水）与合金料；
- 目前，传统电弧炉主要是采用炉顶料罐（或料篮、料筐）装料，每炉钢分1~3批次加入。
- 装料的好坏影响炉衬寿命、冶炼时间、电耗、电极消耗以及合金元素的烧损等；
- 现场布料经验是：下致密，上疏松，中间高，四周低，炉门口无大块，穿井快，不搭桥，熔化快，效率高。

5.4.1 装料（配料）

- 对废钢的要求：（1）不允许有有色金属；（2）不允许有封闭器皿、易爆炸物；（3）入炉的钢铁料块度要合适，不能太大。





5.4.1 装料（配料）

- **装料量要求**

二次进料：第1次，60%；第2次，40%；

三次进料：第1次，40%；第2、3次，30%；

四次进料：第1、2次，30%；第3、4次，20%。

- **加废钢的同时还需要向炉内配碳**

配碳重要性：废钢铁氧化、氧化期去气(N、H)、去夹杂。

5.4.1 装料（配料）

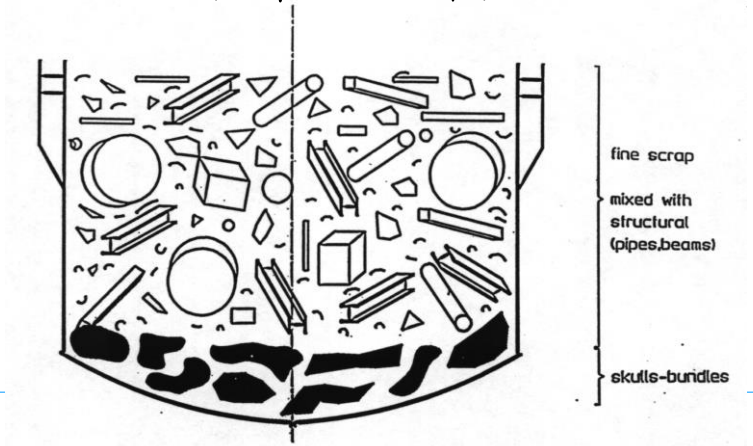
- **装料原则**

重要

大、中、小料配合；

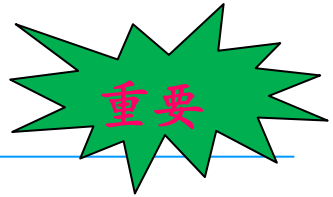
重料在下、轻料在上；

大块在中、轻料在边。





5.4.2 熔化期



- 装料完毕，确认设备可以运转，开始通电，称为熔化期开始，至炉料熔化完毕，并将熔化的钢液加热至可以加矿或者吹氧所需要的温度，称为熔化期结束。
- 熔化期约占电炉冶炼时间的50~70%，电耗约占60~80%；
- 熔化期的主要任务：使固体炉料迅速熔化成均匀的液体，提前造好熔化渣，以稳定电弧，减少钢液吸气和金属的挥发。
- 熔化期操作原则：合理供电、合适吹氧、提前造渣。

5.4.2.1 废钢熔化过程

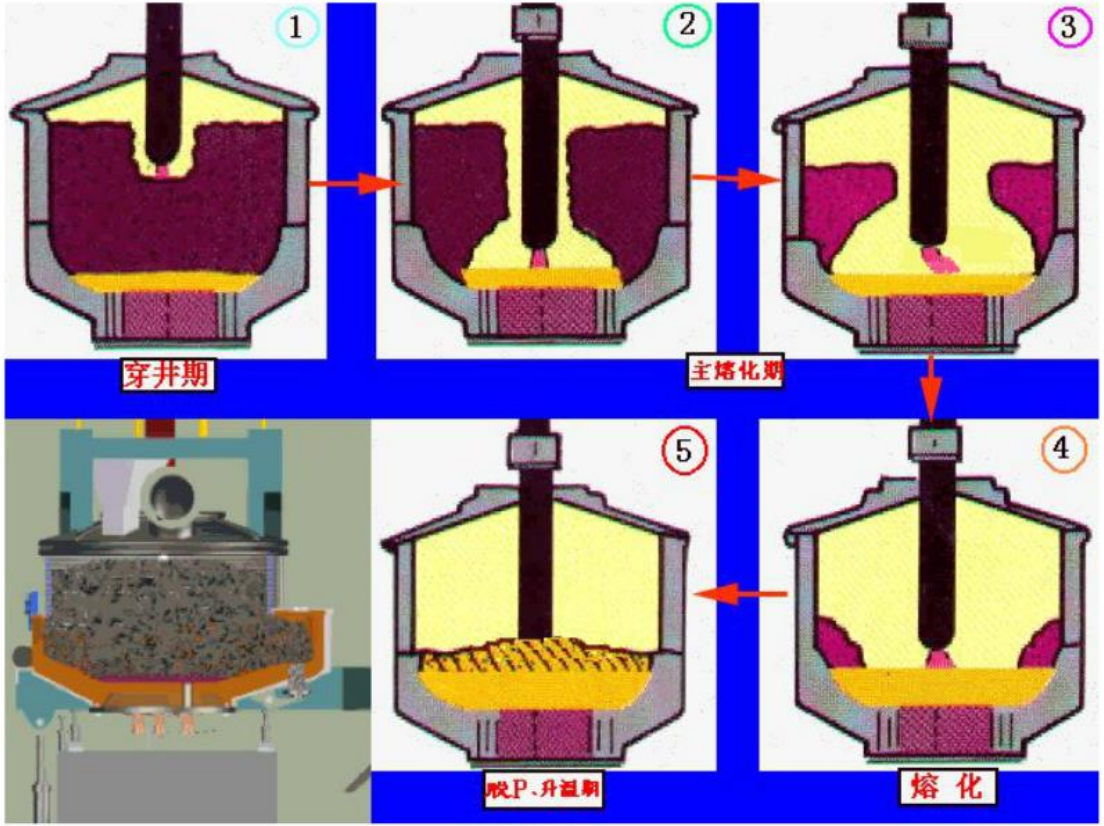
- 炉料熔化过程示意图

熔化过程：

从中心向四周

从热区向冷区

从下向上。



5.4.2.2 熔化期工艺要点

- **吹氧助熔**
- 熔化期吹氧助熔，初期以切割为主，当炉料基本熔化形成熔池，则以向钢液吹氧为主；
- 吹氧是利用元素氧化热加速炉料熔化，当固体料发红（900℃）开始吹氧。
- 熔化期内，Si、Al、Ti、V等几乎全部氧化，Mn氧化40~60%，P氧化40~50%；有吹氧时，C氧化10~30%，Fe氧化2~3%。

5.4.2.2 熔化期工艺要点

- 造渣与脱磷
- 当炉料熔化至80%时，做好脱磷准备，调整好有利于脱磷的炉渣，包括合适的碱度，强的氧化性，足够的渣量及良好的流动性；
- 熔化期炉渣成分大致为：CaO 30~45%，SiO_2 15~25%，MnO 6~10%，FeO 15~25%， MgO 6~10%， P_2O_5 0.4~1.0%

5.4.3 氧化期

重要

➢ 氧化期的主要任务：

- 进一步脱磷。考虑到还原期可能回磷，要求在氧化期将P控制在<0.010%的水平；
- 去除气体和杂质。氧化结束要求H<0.00035%，N<0.007%；
- 加热和均匀钢水温度。氧化末期要求温度高于出钢温度10~20℃，为还原期造渣、合金化创造条件；
- 控制钢中C含量。考虑到还原期脱氧和电极增碳，氧化期要求C低于钢种要求下限0.03~0.08%。

5.4.4 还原期

- **还原期的主要任务：**

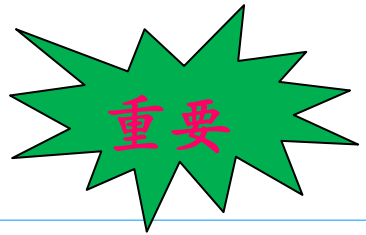
① 使钢液脱氧，尽可能去除钢中氧量和氧化物夹杂物；

② 将硫含量去除到小于钢种规定的要求，一般S<0.045%，优质钢S<0.02~0.03%；

③ 调整钢液合金成分；

④ 调整炉渣成分，使碱度合适，流动性良好，有利脱氧和脱硫；

⑤ 调整钢液温度，确保正常浇注。



5.4.4.1 还原期脱氧

- 电炉采用综合脱氧法，还原操作以脱氧为核心：

1. 当钢液的T、C、P达到要求后，扒渣>95%；
2. 加Fe-Mn，Fe-Si等预脱氧（沉淀脱氧）；
3. 加石灰、萤石、火块砖、精炼剂等，造稀薄渣；
4. 还原，向渣中加C粉，Fe-Si粉扩散脱氧，分3~5批，7~10min/批
5. 搅拌、取样测温；
6. 调整成分，合金化；
7. 加Al或Ca-Si等终脱氧（沉淀脱氧）；
8. 出钢。

5.4.5 出钢

- 残余氧化渣的危害：

  降低脱硫脱氧能力；

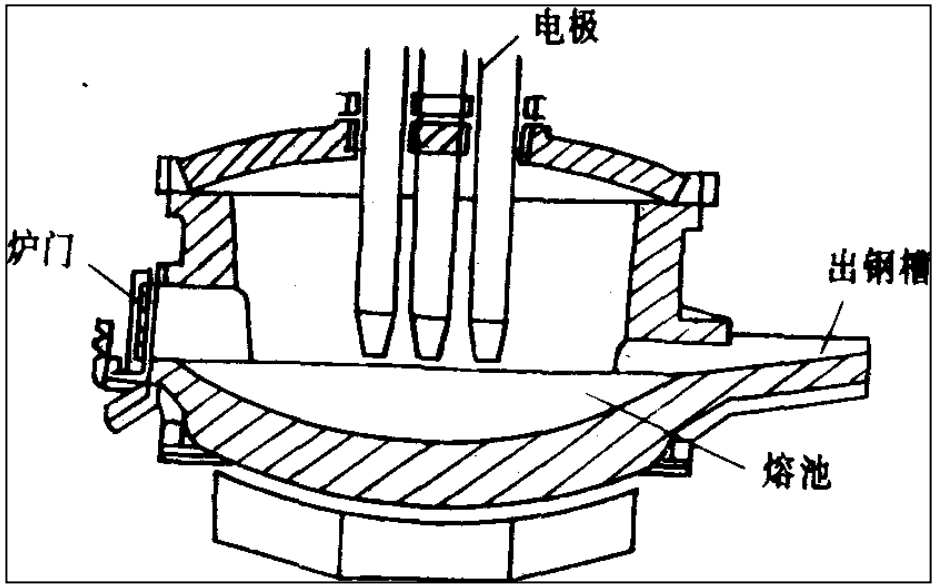
  降低合金收得率；降低钢包搅拌强度；

  降低包衬寿命。

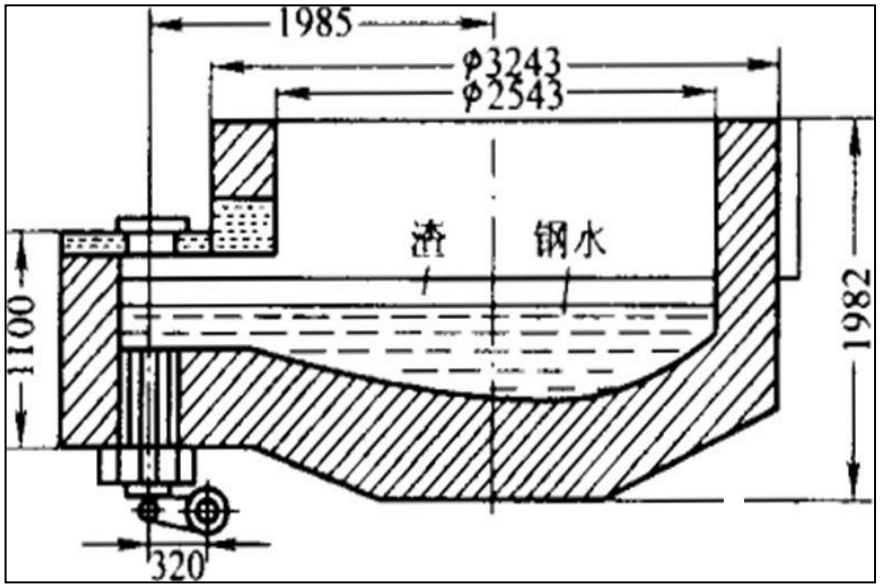


- 传统电炉采用出钢槽出钢，需扒渣。
- 新型的偏心炉底出钢（EBT）彻底解决了这一问题，可实现无渣出钢。

5.4.5 出钢



传统的出钢槽出钢方式



新型的EBT出钢方式

5.4.5 出钢

- 偏心炉底出钢（EBT）方式的优越性：

① 熔池中可以保留98%的熔渣；

② 耐火材料消耗可降低25%左右；

③ 钢水温度一般只下降25℃左右；

④ 出钢时间短，60t电弧炉的出钢时间仅80s左右；

⑤ 电耗可下降20kW·h/t；

⑥ 电极消耗可降低0.5kg/t左右；

⑦ 出钢口耐火材料内衬寿命可达250次左右。

⑧ 将出钢口移到炉壳外边，便于维修与检修



5.5 现代电弧炉技术及装备进步

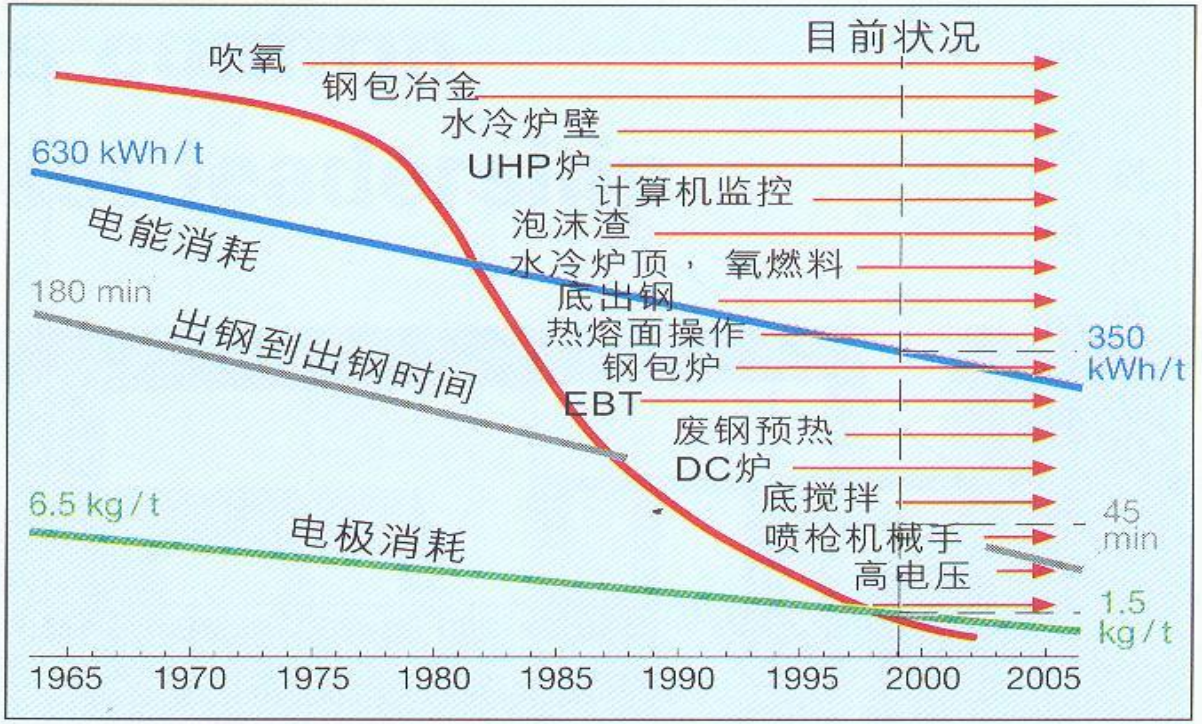


图3 电弧炉技术的发展

电弧炉炼钢60年技术进步

