

5 达涅利 SDM 模型冶金背景:

5.1 主要冶金平衡关系:

模型计算是建立在冶金关系的基础上，主要基于炼钢过程中的热平衡、氧平衡、铁平衡及渣平衡。

5.1.1 热平衡:

炼钢工艺中的热平衡可以计算出终点温度，依据有效的或者推算的输入值，输入的热量来自铁水以及氧气和其它元素的化学反应，热量输出是钢水带走的热量、炉渣和烟气的热量以及炉墙和辐射消耗的热量。

热平衡可以表述为如下方程：

$$(输入热量) + (产生的热量) - (消耗的热量) - (丢失的热量) = (钢水和炉渣的热量)$$

为了建立热平衡，需计算以下参数：

铁水热量（显热）；

反应热量；

转炉等待过程中的热量损失；

用于加热和熔化添加剂的热量；

用于加热和熔化废钢的热量；

钢包中的热量损失，依据钢包的历史；

输入的热量：

输入热量主要源自加入的铁水，是按照铁水的重量、特性和温度来计算的，铁水的热量和温度的关系比较明显，图 5-1 表示了铁—碳—硅—锰—磷合金的焓曲线：

铁水带入的热量：

铁水的热量计算方法为：

$$h_{hm} = C_{SP_{hm}} \times T_{hm}^{\text{charge}} + h_{hm}^0 \quad \text{MJ/t}$$

T_{hm}^{charge} ----- 开始吹炼时的铁水温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$C_{SP_{hm}}$ ----- 液态铁水的比热， $\text{MJ}/^{\circ}\text{C/t}$ ；

h_{hm}^0 ----- $T_{hm}=0$ 时的实际热量， MJ/t ；

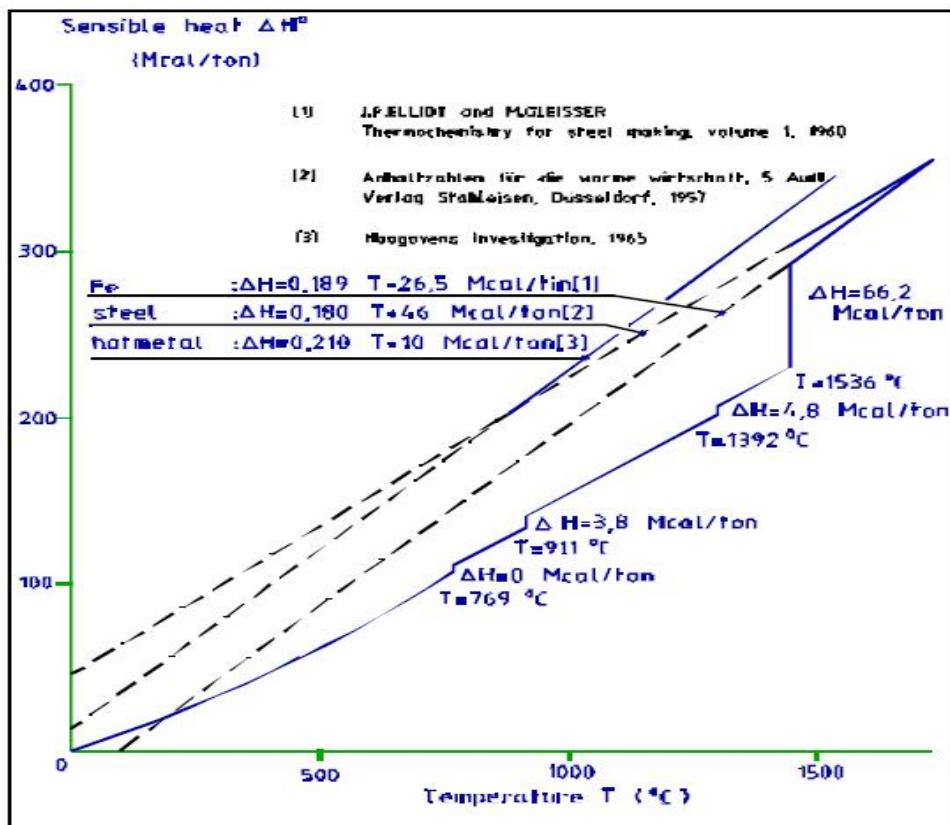


图 5-1 铁水热量与铁水温度的关系

铁水的温度可以在装入铁水后直接测量，当铁水灌到转炉中的时候，由于热量损失，铁水的温度有所降低，主要的热量损失在钢包的里衬上，另外，也有小部分热量损耗是炉渣传热以及炉渣表面辐射带来的，但是这些损耗很小，因为熔池中的铁水表层为炉渣，能起到隔热作用，减少辐射热损耗。

可以通过以下方法来计算里衬的传热到来的损耗：

$$\Delta t_{hm}^{trns} = P_{hm}^{trns} * \left\{ \sqrt{\Delta t_{hm}^{chrg} + \Delta t_{hm}^0} - \sqrt{\Delta t_{hm}^0} \right\} \quad ^\circ C$$

t_{hm}^0 ——偏移时间，单位为分钟；

Δt_{hm}^{chrg} ——装入铁水之后到加料的等待时间，单位为分钟；

P_{hm}^{trns} ——热损耗系数，单位为 $^\circ C/min^{-\frac{1}{2}}$ ；

这种关系能解释损耗的热传给了钢包壁上，钢包壁表层的温度会瞬时升高，相对于等待时间，钢包的出钢时间很短，因此可以忽略钢包壁上的热损耗，热损耗系数 P_{hm}^{trns} 根据钢包里衬的类型不同而不同，可以在实际操作中确定。

如果铁水在钢包中脱硫，这时模型计算中也要考虑脱硫造成的温度变化，如果脱硫后进行温度测量，此时的铁水可以认为是均匀的，测得的温度值也是可靠的。

另外一个热损耗发生在铁水灌入的时候，脱硫工艺结束后，铁水直接灌入转炉中。以下两个方程可以计算出铁水在从铁水罐倒入转炉时的散失的热量：

脱硫之前测量的铁水温度：

$$\Delta T_{hm}^{trns} = P_{hm}^{trns} * \left\{ \sqrt{(\Delta t_{hm}^{chrg} + \Delta t_{hm}^0)} - \sqrt{\Delta t_{hm}^0} \right\} + \Delta T_{hm}^{des} + \Delta T_{hm}^{rak} \quad ^\circ C$$

ΔT_{hm}^{des} ----- 由于脱硫工艺造成的温度差， $^\circ C$ ；

ΔT_{hm}^{rak} ----- 灌入铁水时造成的温度缺失， $^\circ C$ ；

装料时的铁水温度是估算或者在工艺中测量而来，因此这个方程用于计算温度的缺失，且结果中增加了温度缺失的修正项： ΔT_{HM}^{fhtmt} 。

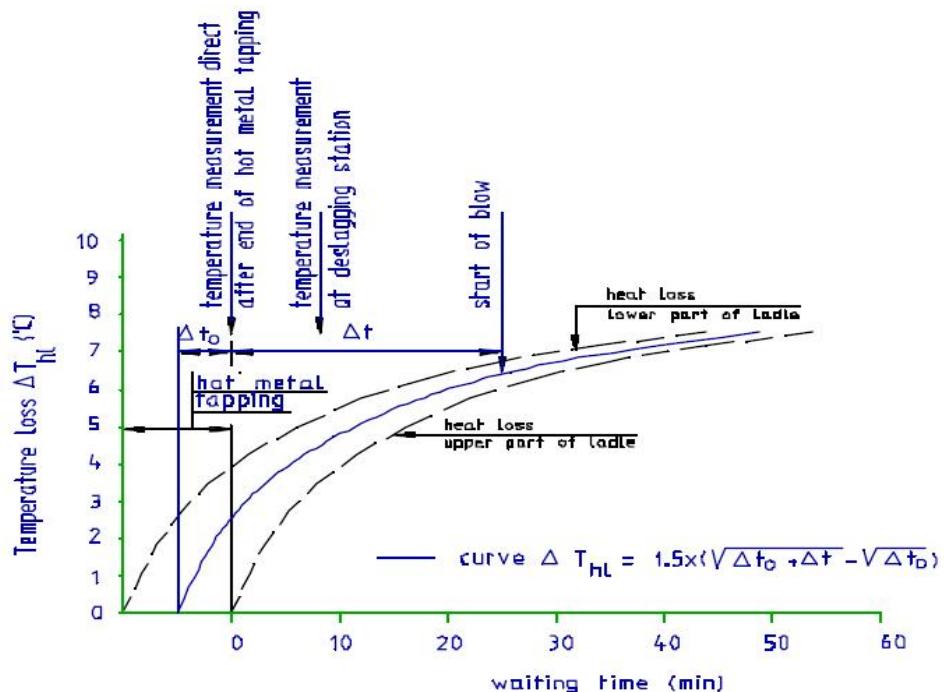


图 5-2 铁水包输送过程中的温降

废料带入的热量：

废料是另一个变化的热源，当废料的温度 T_{sc} 在 $100^\circ C$ 以下的低温区的时候，废料的热量 H_{sc} 可以用以下算式近似计算：

$$H_{sc} = \{C_{sp_{sc}} \times (T_{sc} - 25)\} \times W_{sc} \quad MJ$$

$C_{sp,sc}$ ----- 废料的比热, MJ/°C/t;

T_{sc} ----- 废料的温度, °C;

W_{sc} ----- 废料的重量, t;

这样, 就可以动态输入废料的温度, 在最新版本的模型中, 废料的温度通常是一个固定值, 可以人工修改。

如果预先知道废料的类型和基本尺寸, 则计算时要考虑一个附加项, 即废料中的某些成分对氧化铁的分解作用, 分解对热量的影响可以这样计算:

$$\Delta H_{sc}^{ml} = h_{ml} \times pfe_{scrap, ml} \times W_{scrap, ml} \quad \text{MJ}$$

h_{ml} ----- 铁屑的热量, MJ/t;

$pfe_{scrap, ml}$ ---- 废料中铁的含量, -/-;

$W_{scrap, ml}$ ----- 废料的重量, t;

产生的热量:

产生的热量取决于氧化物的类型和参加反应的元素, 一方面, 取决于钢水中的元素, 另一方面, 取决于炉渣中的氧。

产生的热量 (H_E^{reaction}) 可以用以下公式来计算:

$$H_E^{\text{reaction}} = h_E * \left(W_E^{\text{input}} - \frac{P_{E,bth}}{100 \times W_{\text{bath}}} \right) \quad \text{MJ}$$

$$W_E^{\text{input}} = \sum_{\forall j} \frac{P_{E,j}}{100} W_j^{\text{input}} \quad \text{t}$$

h_E ----- 参加反应的元素 E, 单位为 MJ/ton;

元素 E 可以是碳、锰、磷、硫、硅、钛、铝;

W_E^{input} ---- 元素 E 的重量, 单位为 ton;

W_j^{input} ---- j 的填充重量, 单位为 ton;

W_{bath} ----- 水的重量, 单位为 ton;

$P_{E,j}$ ----- 加入的 j 中元素 E 的百分比, %;

$P_{E,bth}$ ----- 吹炼终点钢水中元素 E 的百分比, %;

如果加入的是铁水, 则在吹炼前, 铁水的成分参数 ($P_{E,hm}^{\text{charge}}$) 必须由 ($P_{E,j}$) 来替代。当铁水浇灌到转炉中的时候, 其成分体系发生了变化, 开始吹炼时的成分通常不是测量的, 而是

来源于鱼雷罐或者混合站的成分数据，或者来源于铁水包的成分数据。

对于铁的氧化反应产生的热量，不能用上面的公式来计算，而是由下式计算：

$$H_{Fe}^{reaction} = h_{Fe} \times W_{Fe}^{slag} \quad MJ$$

铁的重量 (W_{Fe}^{slag}) 可以由炉渣的成分和终点熔池参数计算得到，包括 FeO 和 Fe_2O_3 中的所有铁元素。

参加炉内反应的元素 E 来自铁水、废料中的金属料输入，其它元素来自转炉的添加剂，例如焦炭、硅铁、碳化硅等等，这些添加剂的成分通常按总添加剂的百分比来计量，对于焦炭来说，通常定义了烟气损耗因子，因为焦炭的百分比很小且通常不会进入转炉。因此，计算元素反应产生的热量时必须加上这些添加剂中的元素，下面的公式通常用来计算反应物中添加剂的重量：

$$W_{C, cks}^{add} = P_{C, cks} * (1 - L_{cks}^{chim}) * W_{cks}^{input} + P_{C, Siadd} * W_{Siadd}^{input} \quad t$$

$$W_{Si}^{add} = P_{Si, Siadd} * W_{Siadd}^{input} \quad t$$

$P_{C, cks}$ ----- 焦炭中碳的含量，-；

$P_{C, Siadd}$ ----- 添加剂的硅中的碳含量，-；

$P_{Si, Siadd}$ ----- 添加剂的硅中的硅含量，-；

L_{cks}^{chim} ----- 焦炭的烟气散失，-；

W_{cks}^{input} ----- 添加剂中焦炭的重量，t；

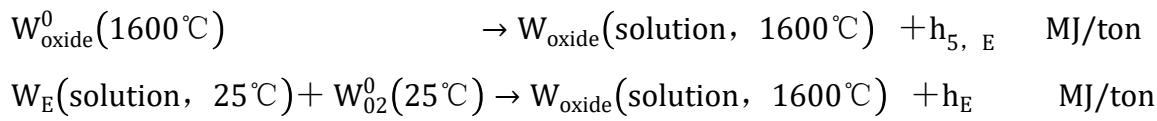
W_{Siadd}^{input} ----- 添加剂中硅的重量，t；

反应产生的热量：

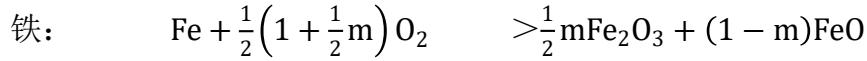
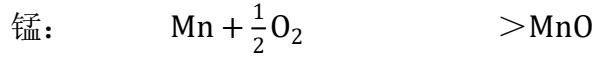
热平衡的计算建立在两个参考温度的基础上，熔池的参考温度是 $25^{\circ}C$ ，而炉渣的参考温度是 $1600^{\circ}C$ ，为了建立各元素之间的净热反应，必须考虑其前提条件，元素 E 的净热反应产生的热量 (h_E) 按照下表来计算：

元素 E 的反应焓参考表：

$W_E(\text{solution}, 25^{\circ}C)$	$\rightarrow W_E^0(25^{\circ}C)$	$+h_{1, E}$	MJ/ton
$W_E^0(25^{\circ}C)$	$\rightarrow W_E^0(1600^{\circ}C)$	$+h_{2, E}$	MJ/ton
$W_{O2}^0(25^{\circ}C)$	$\rightarrow W_{O2}^0(1600^{\circ}C)$	$+h_{3, E}$	MJ/ton
$W_E^0(1600^{\circ}C) + W_{O2}^0(1600^{\circ}C)$	$\rightarrow W_{oxide}^0(1600^{\circ}C)$	$+h_{4, E}$	MJ/ton



依据下面生成的氧化物信息来选择每个元素的需求量值：



从中可以看出，氧气与碳和铁的反应会产生两种氧化物，因此，氧气的消耗和热量的产生取决于这两种氧化物的比例。对于碳来说，因子 P_{CO_2} 不仅是 CO_2 在反应生成物中的比例系数，也是模型计算的一个因数，它取决于工艺条件，如熔池的温度以及炉渣的成分。在实际生产中，可以利用烟气检测分析设备对此因子进行动态测量，将实际值送入模型用来计算。在工艺中使用了二次燃烧氧枪来增加烟气中的 CO_2 的系数的情况下，并不是所有的 CO_2 在工艺中都释放热量，有一部分 CO_2 随着烟气冒出了转炉，所以计算过程中也得考虑到这部分热量。下面的方程是用来计算碳的热量：

$$h_C = h_{\text{CO}} + h_{\text{CO}_2} * \frac{\{P_{\text{CO}_2} - (1 - P_{\text{CO}_2}^{pc}) * \Delta P_{\text{CO}_2}^{\text{Oxltpe}}\}}{100} \quad \text{MJ/t}$$

P_{CO_2} ----- 烟气中 CO_2 的系数, %;

$P_{\text{CO}_2}^{\text{Oxltpe}}$ ----- 特殊氧枪引起的额外 CO_2 系数, %;

$P_{\text{CO}_2}^{pc}$ ----- 二次燃烧热量损失系数, -;

碳元素和氧气结合形成温度为 T 的煤气排出转炉，煤气的平均温度比 1600°C 低，因此，在计算碳和氧气反应的热函时按照气体的平均温度为 1425°C

在计算反应中铁的量的时候，如果 Fe_2O_3 的比率超过了 FeO ，则可以计算出参数 m :

$$m = \frac{72 * r_{\text{Fe}}}{80 + 72 * r_{\text{Fe}}}$$

r_{Fe} ----- 比率 $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{FeO}}$;

其它反应产生的热量:

参加反应的碳是指溶解在铁水中的碳，但是溶解在铁水中的碳还包括转炉添加剂中的碳，这部分碳元素参加反应产生的热量为:

$$H_{\text{C,C}_{\text{add}}}^{\text{reaction}} = h_{\text{C,C}_{\text{add}}} * W_{\text{C}}^{\text{add}} \quad \text{MJ}$$

或者:

$$H_{\text{C,C}_{\text{add}}}^{\text{reaction}} = (h_{\text{C,C}_{\text{add}}} + h_{\text{CO}_2} * P_{\text{CO}_2}) * W_{\text{C}}^{\text{add}} \quad \text{MJ}$$

$W_{\text{C}}^{\text{add}}$ ----- 从添加剂中输入的碳的重量, t;

计算中还得考虑一个额外的未知反应，它和氧气的量有关系，将在氧平衡中介绍，计算公式为:

$$H_{\text{cor}}^{\text{reaction}} = h_{\text{O}_2} * O_{\text{cor}} \quad \text{MJ}$$

产生的总热量:

产生的总热量为各种反应产生的热量之和:

$$H_{\text{reaction}} = \sum_{\forall,x} H_x^{\text{reaction}} \quad \text{MJ}$$

热量消耗:

热量的消耗主要是在炉渣上，而炉渣热量的计算是非常复杂的，在多数情况下，反应都是在1600°C的温度下进行的，因此热平衡是在1600°C参考温度下建立的，这样，才能描述所有的情况。

炉渣的成分来自于:

氧化产物;

转炉添加剂，如石灰石、白云石、铁矿以及其它稀释材料;

转炉炉衬的磨损物;

铁水中的杂质:

废料中的沙子以及炉渣;

在热平衡中没有提及与转炉炉衬的热交换，这是很难预测的，但是对模型的影响很小，通

常忽略不计。

铁水罐中的铁渣消耗的热量:

铁水罐中的铁渣在很小的温度范围内被加热，铁渣的温度比铁水低，因为铁渣飘浮在铁水的表层。炉渣的热量消耗这样计算：

$$\Delta H_{HMSl} = C_{sp_{HMSl}} * \{1600 - (T_{hm}^{chrg} - \Delta T_{HMSl})\} * W_{HMSl} \quad MJ$$

$C_{sp_{HMSl}}$ ----- 铁水中铁渣的比热，MJ/°C/t；

ΔT_{HMSl} ----- 铁水的温度和铁水中的铁渣的温度差， °C；

W_{HMSl} ----- 转炉中加入铁水时带入的铁渣重量， t；

残渣消耗的热量:

残渣是指炉体内上一炉次没有清理干净的炉渣，残渣的量通常是估算值，可以通过操作参数来设置，残渣的温度通常相对比较低，但是在转炉中必须加热到熔池的标准温度，下面的方程用来计算加热残渣消耗掉的热量：

$$\Delta H_{sslag} = C_{sp_{slag}} * \Delta T_{sslag} * W_{sslag} \quad MJ$$

ΔT_{sslag} ----- 残渣的熔池温度与起始温度的温度差， °C；

$C_{sp_{slag}}$ ----- 残渣的比热，MJ/°C/t；

W_{sslag} ----- 残渣的重量， t；

废料产生的炉渣消耗的热量:

加入的废料中包含一些非金属成分，可能是钢渣、铁渣或者其它材料，这些非金属材料在转炉中一样被加热处理，所以会消耗掉一部分热量，这里不作讨论。

转炉炉料消耗的热量:

转炉炉料以及其它包含氧化物的材料消耗的热量计算公式为：

$$H_{add} = \sum_{\forall A} h_A * W_A \quad MJ$$

h_A ----- 炉料或者其它材料 A 的热量， MJ/t；

W_A -----炉料或者其它材料 A 的重量, t;

总热量消耗:

$$H_{\text{cons}} = \Delta H_{\text{hmsl}} + H_{\text{sslag}} + H_{\text{add}} \quad \text{MJ}$$

热量散失:

转炉中的热量散失是因为辐射、对流以及传导，热量在吹炼期间在转炉机械结构之间通过这几种方式传播。

吹炼中散失的热量:

吹炼过程中，热量通过辐射散失，这些散失的热量 ($H_{\text{loss}_{\text{rad}}}$) 与工艺过程中的熔池温度直接相关，计算公式为：

$$H_{\text{loss}_{\text{rad}}} = h_{\text{rad}}^{T_{\text{bb}}} * \Delta T_{\text{bb}} + h_{\text{rad}}^{T_{\text{eb}}} * \Delta T_{\text{eb}} \quad \text{MJ}$$

ΔT_{bb} ----- 第一阶段的工艺温度变化, °C;

ΔT_{eb} ----- 最后阶段的工艺温度变化, °C;

$h_{\text{rad}}^{T_{\text{bb}}}$ ----- 工艺第一阶段 T 温差的散热系数, MJ/°C;

$h_{\text{rad}}^{T_{\text{eb}}}$ ----- 工艺最后阶段 T 温差的散热系数, MJ/°C;

中断吹炼时散失的热量:

吹炼中途停止时散失的热量主要是辐射和对流，下图表示了吹炼中止时的温降过程:

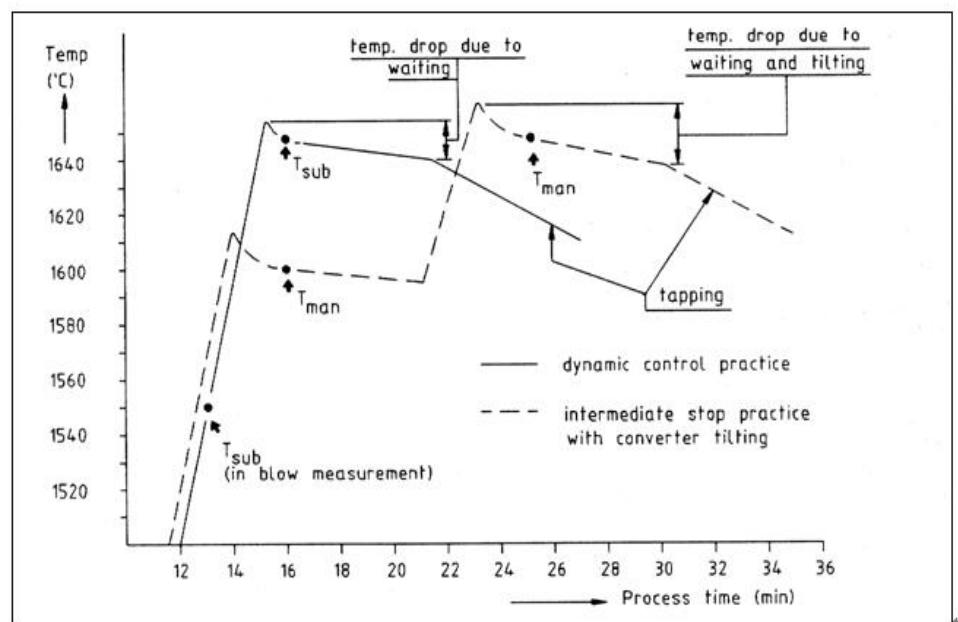


图 5-3 BOF 温度转炉温度曲线

氧气顶吹转炉在吹炼过程中，钢水和炉渣之间存在动态平衡，在等待时间内，如果没有底搅的话，会影响钢水中的锰元素含量和炉渣中的铁的含量，当吹炼工艺再次启动的时候，这种动态平衡关系被恢复，但是，出钢后不能达到这种动态平衡，考虑到这种现象，模型中对其作了修正，这个修正系数基于熔池中的碳含量，近似地用以下方法计算：

$$Tfac_{cor} = (1 + 0.6 * \exp[-C_{bath} / 0.350]) \quad -$$

C_{bath} -----熔池中的碳含量百分比，%；

因此，热量散失为：

$$Hloss_{wt} = Tfac_{cor} * \Delta Tw(t_{meas}) * Q_{bath} \quad MJ$$

$\Delta Tw(t)$ ----- 等待时间内的温度变化，℃；

$$Q_{bath} = Csp_{st} * W_{bath} + Csp_{slag} * W_{slag} \quad MJ / ^\circ C$$

下图给出一个实际例子来说明这种现象：

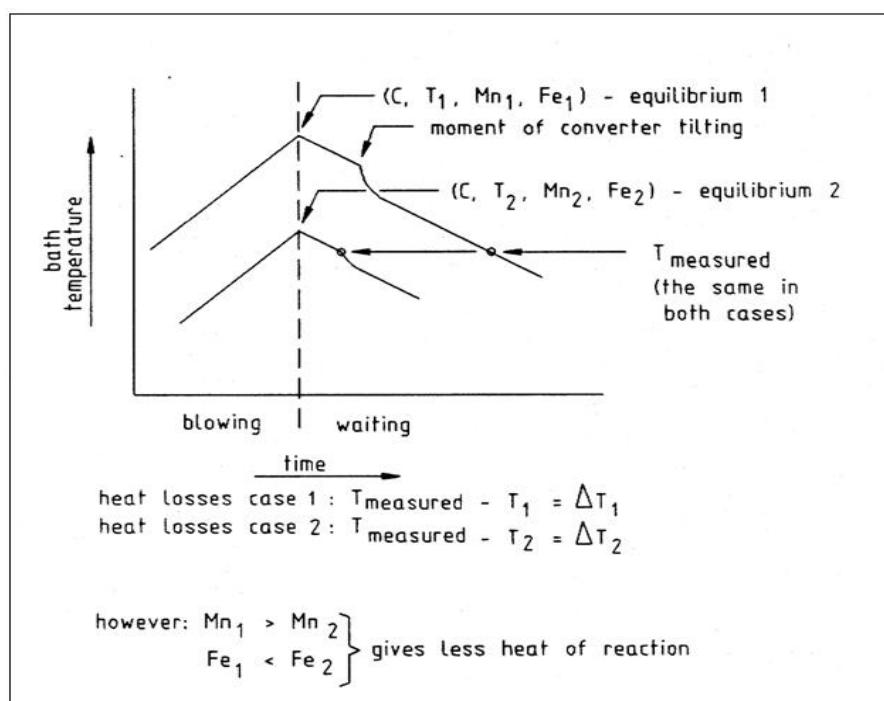


图 5-4 不同情况下的热量散失

从图中可以看出，在不同中止吹炼后可以测到同一温度，这就是说当氧气吹炼停止的时候，随着工艺条件的不同，钢水和炉渣之间的动态平衡条件也不同，这种由于不同停吹工艺要求造成的不同，在每个平衡计算中都要做考虑，利用下面的公式来计算由于不同停吹造成的热量散失：

$$H_{hist} = Tfac_{cor} * (T_1 - T_2) * Q_{bath} \quad MJ$$

补偿项：

热平衡中的闭合项有能量量纲，定义为热量丢失，为了让操作工知道这种闭合项，用温度单位来表示，闭合项的偏移量取 1000。在上图中可以看出内部的热效应关系存在一定规则，如果操作人员想补偿降温 10°C 的热量散失，他希望看到温度上升 10°C，确定温度上升 10°C，不仅是为了补偿熔池中散失的热量，也是为了让锰、铁、磷等元素充分反应，用下式计算闭合项的热量散失：

$$Hloss_{CI} = Tfac_{cor} * (T_{ci} - 1000) * Csp_{st} * W_{bath}^0 \quad MJ$$

T_{ci} ----- 闭合项的温度， °C；

Csp_{st} ---- 钢水的比热， MJ/°C/t；

W_{bath}^0 ----- 标准熔池重量， t；

钢水和炉渣中的热量：

热平衡中热量输入是前面提到的所有输入热量的综合：

$$Hproc = Hhm + Hsc - \Delta H_{sc}^{ml} + Hreac - Hcons - Hloss \quad MJ$$

其中散失的热量为：

$$Hloss = Hloss_{rad} + Hloss_{wt} + Hloss_{CI} \quad MJ$$

输出的热量为铁水和炉渣的热量：

$$H_{process} = h_{bath} * W_{bath} + \Delta h_{slag} * W_{slag} \quad MJ$$

其中：

$$h_{bath} = Csp_{ST} * T_{bath} + h_{ST}^0 \quad MJ/t$$

$$\Delta h_{slag} = Csp_{slag} (T_{bath} - 1600) \quad MJ/t$$

h_{bath} ----- 熔池中钢水的热量， MJ/t；

Δh_{slag} ----- 炉渣在 1600°C 时的不同显热， MJ/t；

T_{bath} ----- 熔池温度， °C；

Csp_{ST} ----- 钢水的比热， MJ/°C/t；

Csp_{slag} ----- 炉渣混合物的平均比热， MJ/°C/t；

h_{ST}^0 ----- $T_{bath}=0$ 时的实际热量， MJ/t；

熔池温度T_{bath}为:

$$T_{\text{bath}} = \frac{H_{\text{proc}} - h_{\text{ST}}^0 * W_{\text{bath}} + C_{\text{sp}}_{\text{slag}} * W_{\text{slag}}}{C_{\text{sp}}_{\text{ST}} * W_{\text{bath}} + C_{\text{sp}}_{\text{slag}} * W_{\text{slag}}} \quad ^{\circ}\text{C}$$

热平衡中的模型参数:

下表给出了模型中热平衡有关的参数，如果是相关的典型参数值，可以在不同的钢厂模型之间移植：

变量描述	模型参数	典型值	单位
通用			
C _{sp} _{HM}	SPHHM	0.88	MJ/°C/T
h _{HM} ⁰	SPHHM0	42	MJ/t
C _{sp} _{HMSl}	SPHHS	1.13	MJ/°C/t
C _{sp} _{ST}	SPHST	0.76	MJ/°C/t
h _{ST} ⁰	SPHST0	193	MJ/t
C _{sp} _{SC}	SPHSC	0.46	MJ/°C/t
C _{sp} _{SLAG}	SPHSL	1.19	MJ/°C/t
热量输入			
P _{hm} ^{trns}	PHLHOM	1.5	°C/min ^½
ΔT _{hm} ⁰	ZTHOM0	5.0	Min
ΔT _{hm} ^{rak}	TLHRAK	10.0	°C
ΔT _{hm} ^{fht}	TLHMD	-	°C
h _{ms}	HRMS	3000	MJ/t
T _{sc}	TSCRAP	25	°C
各种材料的热量输入			
P _{C,scrap}	CSCRP[1..10]	Type dependent	%
P _{Mn,scrap}	MNSCRP[1..10]	Type dependent	%
P _{P,scrap}	PSCRP[1..10]	Type dependent	%
P _{S,scrap}	SSCRP[1..10]	Type dependent	%
P _{Si,scrap}	SISCRP[1..10]	Type dependent	%
P _{C,cks}	CCOKE	0.9	-
P _{C,siadd}	CFSI	Type dependent	-
P _{Si,siadd}	SIFSI	Type dependent	-
L _{cks} ^{chim}	CHLCK	0.20	-
产生的热量			
h _{co}	HRCO	7470	MJ/t
h _{co2}	HRCO2	21285	MJ/t
h _{cadd,CO}	HRCKCO	3935	MJ/t
ΔP _{CO2} ^{Oxtype}	DCOLH[1..3]	0	%

变量描述	模型参数	典型值	单位
$P_{CO_2}^{pc}$	HTRPCM	0.50	-
h_{Mn}	HRMN	5530	MJ/t
h_P	HRP	26160	MJ/t
h_{Si}	HRSI	27620	MJ/t
h_{Ti}	HRTI	17115	MJ/t
h_{Al}	HRAL	26010	MJ/t
h_{Fe}	HRFE	3135	MJ/t
h_{O_2}	HRO2	19	MJ/m³
转炉炉料消耗的热量			
$h_{burnt lime}$	SHSBL	2845	MJ/t
$h_{dolomitic lime}$	SHSDL	3165	MJ/t
$h_{iron ore}$	SHSOR	4770	MJ/t
$h_{manganese ore}$	SHSMO	4810	MJ/t
h_{flux}	SHSFL	2345	MJ/t
$h_{bauxite}$	SHSBX	2300	MJ/t
$h_{lime stone}$	SHSLS	4020	MJ/t
$h_{raw dolomite}$	SHSRD	4100	MJ/t
$h_{rec. steel slag}$	SHSRS	1885	MJ/t
$h_{gunning material}$	SHSGN	420	MJ/t
$h_{opt addition 1}$	SHSR1	Pm	MJ/t
$h_{opt addition 2}$	SHSR2	pm	MJ/t
废料中的非金属成分消耗的热量			
$h_{steel slag}$	SHSSS	pm	MJ/t
$h_{hot metal slag}$	SHSSH	pm	MJ/t
$h_{ore parts}$	SHSOR	pm	MJ/t
$h_{various parts}$	SHSSDV	pm	MJ/t
铁水中渣滓和转炉残渣的温度			
ΔT_{HMSl}	DTHMSL	200	°C
ΔT_{ssalg}	DTSSPH	300	°C
热量散失			
h_{rad}^{tbb}	DHBTEB	-20	MJ/°C
h_{rad}^{teb}	DHBTEB	-5	MJ/°C

5.1.2 氧平衡:

氧平衡贯穿于整个转炉工艺过程，包括氧气源和消耗的氧气，平衡关系为：

$$(参加反应的氧) + (没有溶解的氧) - (辅料中的氧气) = (氧枪吹入的氧气)$$

对于氧平衡，需计算以下参数：

吹炼氧气；

来自添加剂的氧气；

用于反应的氧气；

溶解在钢水中的氧；

参加反应的氧：

转炉工艺中，参加反应的氧气需求量取决于转炉中输入的与氧气发生反应的元素的量，氧气的消耗计算建立在补偿理论以及假定双氧化物的比率固定的基础上。

输入的元素消耗的氧气：

转炉中需要参加反应的氧气形成了大部分的气体氧化物和炉渣中少量的液体氧化物，各种不同元素消耗的氧气可以用比例系数来计算。

在工艺中与各种元素发生反应的氧气这样计算：

$$O_E = S_{ox_E} * \left(W_E^{\text{input}} - \frac{P_{E,bath}}{100} \right) * W_{\text{bath}} \quad \text{m}^3(\text{stp})$$

S_{ox_E} ----- 参加反应的元素 E 对氧气的消耗系数, $\text{m}^3(\text{stp})/\text{t}$;

W_E^{input} ----- 参加反应的元素 E 的输入重量, t ;

$P_{E,bath}$ ----- 参加反应的元素 E 在熔池中的浓度, %;

W_{bath} ----- 熔池重量, t ;

碳元素对氧气的消耗量取决于废气中二氧化碳的比率, CO 和 CO_2 的比率是按照系数 P_{CO_2} 来计算的：

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2} \quad \%$$

氧气的消耗系数取决于 CO_2 的因数：

$$S_{ox_C} = S_{ox_C^{\text{CO}}} * (1 + P_{\text{CO}_2}) \quad \text{m}^3(\text{stp})/\text{t}$$

CO 和气体随烟气排出了转炉, 其他的氧化物以液态的形式存留在转炉的炉渣内, 在这些氧化物中, 只有铁会形成较为复杂的 Fe_2O_3 和 FeO 的混合物, 因此, 氧气消耗因数取决于与铁结合的氧气重量因子:

$$S_{ox_{\text{Fe}}} = \frac{S_{ox_{\text{Fe}}^{\text{m}}}}{\rho_{\text{O}_2}} \quad \text{m}^3(\text{stp})/\text{t}$$

$\text{Sox}_{\text{Fe}}^{\text{m}}$ ----- 氧气消耗的重量系数, t/t ;

ρ_{O_2} ----- 氧气的密度, t/m^3 ;

氧平衡的补偿项:

氧平衡中的补偿项, 主要是考虑了为止的反应和与模型描述不同的反应, 这也取决于几种不同的工艺条件, 石灰石的质量也是非常重要的影响因素, 转炉炉嘴边缘的红烟的形成也会消耗掉一部分来自氧枪输入的氧气, 氧气也可以在燃炉之前以分子的形式逸出转炉, 其他的影响因素包括氧枪的磨损以及转炉炉衬的磨损等等。

补偿项也可以消除测量设备带来的误差或者错误。

补偿项包含了所有这些常量或者变量, 闭合项的偏移为 $2000 \text{ m}^3(\text{stp})$, 这样计算闭合项中的补偿氧气:

$$O_{\text{cor}} = (O_{ci} - 2000) \quad \text{m}^3(\text{stp})$$

钢水中没有溶解的氧气:

钢水中没有溶解的氧气与碳之间存在动态平衡关系, 可以这样计算:



其中:

$$[O] = \frac{P_{\text{CO}} / \exp \left[\frac{-\Delta G}{RT} \right]}{[C]} = \frac{E}{[C]}$$

P_{CO} ----- 一氧化碳的气压, bar;

ΔG ----- 反应剩余热量, J/mol;

R ----- 气体常量 ($= 8.31$), J/molK;

T ----- 温度, K;

E ----- 动态平衡常数;

因为温度的影响很小, 因此, E 值可以用常数来表示, $E = 32 \times 10^{-4}$, 可以用下式计算没有溶解的氧气:

$$O_{\text{dissolved}} = \frac{0.0224}{[C]} * W_{\text{bath}} \quad \text{m}^3(\text{stp})$$

[C] ----- 碳含量, %;

W_{bath} ----- 熔池重量, t;

炉料带来的氧气输入:

除了氧枪吹入的氧气外, 加入转炉的其它材料也可以带入氧气, 例如石灰石含有部分 CaCO_3 , 而白云石含有 MgCO_3 , 这些双氧化物可以分解为 CaO 、 MgO 和 CO_2 , 同样, 工艺中添加的炉料中铁的氧化物也会带来氧气。

计算转炉炉料中的氧气:

$$O_{add} = \frac{1}{\rho_{O_2}} * \sum_{VA} \frac{P_{O,A}}{100} * W_A \quad \text{m}^3(\text{stp})$$

$P_{O,A}$ ----- 炉料 A 带来氧气所占的比例, %;

W_A ----- 炉料的重量, t;

ρ_{O_2} ----- 氧气的密度, t/ $\text{m}^3(\text{stp})$;

氧枪吹入的氧气:

氧枪吹入氧气的计算方法:

$$O_{lance} = O_{reaction} + O_{dissolved} - O_{vsr} \quad \text{m}^3(\text{stp})$$

模型参数:

变量描述	模型参数	经典值	单位
Sox_C^{CO}	Fixed in model	933	m^3/t
Sox_{Mn}	Fixed in model	203	m^3/t
Sox_P	Fixed in model	903	m^3/t
Sox_{Si}	Fixed in model	797	m^3/t
Sox_{Ti}	Fixed in model	467	m^3/t
Sox_{Al}	Fixed in model	622	m^3/t
Sox_{Fe}^m	O2BFE	0.315	-/-

5.1.3 渣平衡:

氧气顶吹转炉工艺中的渣控制非常重要, 直接影响了终点工艺控制。通过对炉渣成分进行分析, 可以得出其成分, 炉渣中铁的氧化物也取决于炉渣的成分, 因此, 有必要建立渣平衡来计算炉渣的成分, 模型中只包括相关的氧化物, 这些氧化物包括 SiO_2 、 TiO_2 、 CaO 、 MnO 、 MgO 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 、 FeO_x 。

渣平衡的模型关系:

$$(氧化物输入) + (氧化物形成) = (渣中的氧化物)$$

对于渣平衡需要计算以下参数:

来自添加剂;

铁水渣;

前一炉的留渣及耐材内衬中的氧化物;

反应生成的氧化物;

氧化物输入带来的渣:

氧化物输入带来的炉渣主要来自转炉的吹炼过程中添加的各种添加剂、转炉炉衬以及粘在废料上的杂质等等，氧化物的重量计算公式为:

$$W_{oxide\ i}^{input} = \sum_{\forall, K} P_{K, oxide, i} * W_K^{input} \quad t$$

$P_{K, oxide, i}$ ----- 添加剂 K 中氧化物 i 的重量百分数, -;

W_K^{input} ----- 添加剂 K 的输入重量, t;

对于有的添加剂，需要考虑其颗粒随着烟气排除转炉而造成的损失，这部分的损失取决于转炉烟嘴烟气的排出速度和氧化物粉尘颗粒的大小。

在模型中，只考虑了煅烧石灰石、白云石、和含碳添加剂随着转炉烟气排除带来的渣的损失，这就是说添加的重量和计算中输入的重量并不相等，这样计算:

$$W_K^{input} = (1 - L_K^{chim}) * W_K^{added} \quad t$$

L_K^{chim} ----- 添加剂 K 随烟气排出的比例因数, -;

W_K^{added} ----- 添加剂 K 的重量, t;

在其他情况下，添加的重量就是输入的重量。

渣平衡中包含以下材料:

转炉炉料:

白云石;

铁矿石;

锰矿石;

煅石灰;

萤石晶体;

铝土矿;

石灰石;

生白云石;

回收渣;

焦炭;

选择的添加剂 1;

选择的添加剂 2;

其他来源的加入材料:

铁水中的渣物;

铁水中半成品矿渣;

转炉炉衬;

炉渣冲洗材料;

废料中的非金属材料:

钢水中的非金属炉渣;

铁水非金属炉渣;

矿石中的非金属材料;

其它;

液态氧化物:

液态氧化物的计算方法:

$$W_{\text{oxide E}}^{\text{formed}} = (1 + \rho_{O_2} * S_{Ox_E}) * \left(W_E^{\text{input}} - \frac{P_{E,bth}}{100} W_{\text{bath}} \right) \quad t$$

$W_{\text{oxide E}}^{\text{formed}}$ ----- 元素 E 的氧化物重量, t;

S_{Ox_E} ----- 单位重量的元素 E 消耗氧气的量, $m^3(\text{stp})/t$

W_E^{input} ----- 元素 E 的输入重量, t;

$P_{E,bth}$ ----- 熔池中元素 E 的百分比, %;

W_{bath} ----- 熔池重量, t;

ρ_{O_2} ----- 氧气的密度, t/m³(stp);

炉渣的重量以及成分:

炉渣中氧化物的重量是加入的氧化物和反应中生成的氧化物重量的和,

$$W_{\text{oxide } i}^{\text{slag}} = W_{\text{oxide } i}^{\text{input}} + W_{\text{oxide } i}^{\text{formed}} \quad t$$

炉渣总量为:

$$W_{\text{slag}} = \sum_{\forall i} W_{\text{oxide } i}^{\text{slag}} \quad t$$

炉渣的成分计算:

$$P_{\text{oxide } i}^{\text{slag}} = 100 * \frac{W_{\text{oxide } i}^{\text{slag}}}{W_{\text{slag}}} \%$$

炉渣的重量和成分以加入的炉料为依据, 例如, 当石灰石在一定的温度下没有完全融化解时, 相关的计算就不能以加料的重量和成分来计算, 而是要按照实际的溶解的重量来计算。尤其是石灰石和白云石很可能不完全溶解, 溶解比率取决于工艺过程中的温度, 这样计算溶解的石灰石的重量:

$$W_{\text{CaO}, \text{diss}}^{\text{slag}} = Bas^{\text{act}} * W_{\text{CaO}}^{\text{slag}} \quad t$$

MgO 能最大程度地溶解在炉渣中, 其百分比决定于铁水的温度和碱度, 溶解的 MgO 的重量小于或等于:

$$W_{\text{MgO}, \text{dissi}}^{\text{slag}} = \frac{P_{\text{MgO}}^{\text{max}}}{100} * W_{\text{slag}} \quad t$$

如果

$$P_{\text{MgO}}^{\text{slag}} \leq P_{\text{MgO}}^{\text{sat}}$$

则:

$$P_{\text{MgO}}^{\text{max}} = P_{\text{MgO}}^{\text{slag}}$$

否则:

$$P_{\text{MgO}}^{\text{max}} = P_{\text{MgO}}^{\text{sat}}$$

且：

$$P_{MgO}^{sat} = P_{MgO}^{0, sat} + q_{MgO}^T * (T_{bath} - T_{bath}^0) + q_{MgO}^{bas} * (Bas^{act} - Bas_{bath}^0) + q_{MgO}^{FeT} * (P_{FeT}^{slag} - P_{FeT}^0) t$$

$P_{MgO}^{0, sat}$ ----- 标准条件下 MgO 的含量, %;

T_{bath} ----- 熔池温度, °C;

Bas^{act} ----- 实际碱度, -/-;

P_{FeT}^{slag} ----- 炉渣中铁的含量, %;

T_{bath}^0 ----- 熔池的标准温度, °C;

Bas_{bath}^0 ----- 炉渣的标准碱度, -/-;

P_{FeT}^0 ----- 炉渣中铁的标准含量, %;

q_{MgO}^{FeT} ----- 方程系数, pm;

模型参数：

变量描述	转炉辅料以及炉渣的成分参数						单位
	煅石灰	白云石	石灰石	生白云石	萤石	铝土矿	
P_{SiO_2}	SIO2BL	SIO2DL	SIO2LS	SIO2RD	SIO2FL	SIO2BX	-
P_{CAO}	CAOBL	CAODL	CAOLS	CAORD	CAOFL	CAOBX	-
P_{MNO}	MNOBL	MNODL	MNOLS	MNORD	MNOFL	MNOBX	-
P_{MGO}	MGOBL	MGODL	MGOLS	MGORD	MGOFL	MGOBX	-
P_{P2O5}	P2O5BL	P2O5DL	P2O5LS	P2O5RD	P2O5FL	P2O5BX	-
$P_{Al_2O_3}$	ALOXBL	ALOXDL	ALOXLS	ALOXRD	ALOXFL	ALOXBX	-
P_{DOX}	DOXBL	DOXDL	DOXLS	DOXRD	DOXFL	DOBXBX	-
P_s	SBL	SDL	SLS	SRD	SFL	SBX	-
P_{O_2}	O2BL	O2DL	O2LS	O2RD	-	-	-
P_{CAF2}	-	-	-	-	CAF2FL	-	-
	含铁的氧化物的转炉辅料						
	铁矿	锰矿	回炉炉渣	1号可选炉料	2号可选炉料		
P_{SiO_2}	SIO2OR	SIO2MO	SIO2RS	SIO2R1	SIO2R2		-
P_{CAO}	CAOOR	CAOMO	CAORS	CAOR1	CAOR2		-
P_{MNO}	MNOOR	MNOMO	MNORS	MNOR1	MNOR2		-
P_{MGO}	MGOOR	MGOMO	MGORS	MGOR1	MGOR2		-

变量描述	转炉辅料以及炉渣的成分参数						单位
P _{P2O5}	P2O5OR	P2O5MO	P2O5RS	P2O5R1	P2O5R2		-
P _{Al2O3}	ALOXOR	ALOXMO	ALOXRS	ALOXR1	ALOXR2		-
P _{DOX}	DOXOR	DOXMO	DOXRS	DOXR1	DOXR2		-
P _S	SOR	SMO	SRS	SR1	SR2		-
P _{FE}	PFEOR	PFEMO	PFERS	PFER1	PFER2		-
P _{O2}	O2OR	O2MO	O2RS	O2R1	O2R2		-
转炉渣平衡中的其他重要材料							
	残渣	炉衬	铁水渣	废料中的钢渣			
P _{SiO2}	SIO2HF	SIO2LI	SIO2HS	SIO2SS			-
P _{CAO}	CAOHF	CAOLI	CAOHS	CAOSS			-
P _{MNO}	MNOHF	MNOLI	MNOHS	MNOSS			-
P _{MGO}	MGOHF	MGOLI	MGOHS	MGOSS			-
P _{P2O5}	P2O5HF	P2O5LI	P2O5HS	P2O5SS			-
P _{Al2O3}	ALOXHF	ALOXLI	ALOXHS	ALOXSS			-
P _{DOX}	DOXHF	DOXLI	DOXHS	DOXSS			-
P _S	SHF	SLI	SHS	SSS			-
P _{FE}	PFEHF	-	-	PFESS			-
P _{O2}	O2HF	-	-	O2SS			-
其它参数					典型值		
L ^{chim} _{burnt lime}	CHLBL				0.06		-
L ^{chim} _{calc dolomit}	CHLDL				0.02		-
W ^{vsrc} _{Dioxide}	DOXSL				1.0	t	
P ^{0,sat} _{MgO}	MGOSAT				8.0	%	
Q ^T _{MgO}	PMGOT				0.06	%/°C	
Q ^{Bas} _{MgO}	PMGOBS				-2.0	%/-	
Q ^{FeT} _{MgO}	PMGOFT				0.285	%/%	

5.1.4 铁平衡:

铁平衡中计算铁的重量，对于氧平衡和热平衡来说，这都是很重要的，铁的主要来源是铁水和废料，一小部分的铁以红色的烟雾从烟筒冒出了转炉，且一部分铁形成了炉渣中的氧化物，铁平衡方程表示为：

$$(输入的铁) - (损失的铁) - (渣中的铁) = (熔池中的铁)$$

对于铁平衡，需计算以下参数：

来自含铁原料的铁，如铁水、废钢、铁矿石、球团等；

烟尘中的铁损失；

渣中的铁；

出钢过程中损失铁；

来自铁合金的铁；

输入的铁：

转炉中的铁来自铁水、废料、或者其他辅料（如铁矿等），依据下式计算：

$$W_{Fe}^{input} = \frac{p_{Fe_{HM}}}{100} * W_{HM} + \sum_{\forall, S} \frac{p_{Fe_{scrap^S}}}{100} * W_{scrap^S} + \sum_{\forall, A} p_{Fe_{add^A}} * W_{add^A} \quad t$$

这里的 $p_{Fe_{HM}}$ 为：

$$p_{Fe_{HM}} = 100 - C_{HM} - Mn_{HM} - p_{HM} - S_{HM} - Si_{HM} - Ti_{HM} \quad \%$$

如果废料中铁的成分不确定，则模型采用下式计算：

$$p_{Fe_{scrap^S}} = 100 - C_{scrap^S} - Mn_{scrap^S} - P_{scrap^S} - S_{scrap^S} - Si_{scrap^S} \quad \%$$

其中：

Fe_{HM} ----- 铁水中元素 E 的百分比，%；

$p_{Fe_{HM}}$ ----- 铁水中铁的含量，%；

Fe_{scrap^S} ----- 废料 S 中元素 E 的百分比，%；

$p_{Fe_{scrap^S}}$ ----- 废料 S 中铁的百分比，%；

$p_{Fe_{add^A}}$ ----- 辅料 A 中铁的系数，-；

W_{HM} ----- 铁水的重量，t；

W_{scrap^S} ----- 废料 S 的重量，t；

W_{add^A} ----- 辅料 A 的重量，t；

损失的铁：

一部分的铁以烟尘的形式从烟筒冒出了转炉，这种烟尘被称为“红色烟雾”，常出现在开始吹炼时。通过烟气回收和清洁系统，对烟尘进行取样，就可以确定这部分损失的铁 $W_{loss_{Fe}^{chim}}$ ：

$$W_{\text{Fe}}^{\text{loss}} = L_{\text{Fe}}^{\text{chim}} * W_{\text{Fe}}^{\text{input}} \quad t$$

$L_{\text{Fe}}^{\text{chim}}$ ----- 通过烟气损失铁的系数，—；

$W_{\text{Fe}}^{\text{input}}$ ----- 输入的铁的重量，t；

根据经验值，这部分的铁损失通常为输入的铁量的 1%。

铁渣：

炉渣中 FeO_x 的含量取决于炉渣的成分，与炉渣的成分和温度有关，这里不做描述。

熔池中的铁：

熔池中的铁重量为：

$$W_{\text{Fe}}^{\text{bath}} = W_{\text{Fe}}^{\text{input}} - W_{\text{Fe}}^{\text{losses}} - W_{\text{Fe}}^{\text{slag}} \quad t$$

或者：

$$W_{\text{Fe}}^{\text{bath}} = (1 - L_{\text{Fe}}^{\text{chim}}) * W_{\text{Fe}}^{\text{input}} - W_{\text{Fe}}^{\text{slag}} \quad t$$

熔池重量：

熔池重量的计算依据熔池中铁水的计算和钢水的成分：

$$W_{\text{bath}}^{\text{conv}} = \frac{W_{\text{Fe}}^{\text{bath}}}{1 - P_{\text{Fe}}_{\text{bath}}} \quad t$$

这里：

$$P_{\text{Fe}}_{\text{bath}} = 1 - \frac{P_C + P_Mn + P_P + P_S}{100}$$

$P_{\text{Fe}}_{\text{bath}}$ ----- 熔池中铁的含量系数，—；

铁水的输出值通常比这个值小，这是因为不是全部的钢水从转炉倒入例如钢包里面，这是因为转炉炉壁形状不规则或者在出钢时还没有完毕过早停止造成的，另一方面，在出钢时，加入了合金材料，这样又增加了熔池的重量，这样，出钢的重量计算方法为：

$$W_{\text{bath}}^{\text{ladle}} = W_{\text{bath}} - W_{\text{loss}}^{\text{conv}} + W_{\text{alloy}} \quad t$$

$W_{\text{loss}}^{\text{conv}}$ ----- 出钢后转炉中剩余的钢水，t；

W_{alloy} ----- 当出钢时加入转炉的合金材料, t;

经验证明, 对于一个 100t 的转炉来说, 这个损失通常大约为 1t。

模型参数:

变量描述	模型参数	典型值	单位
L_{Fe}^{chim}	CHLFE	0.01	-
C_{scrap}	CSCRP[1..10]	Type dependent	%
Mn_{scrap}	MNSCRP[1..10]	Type dependent	%
P_{scrap}	PSCRP[1..10]	Type dependent	%
S_{scrap}	SSCRP[1..10]	Type dependent	%
Si_{scrap}	SISCRP[1..10]	Type dependent	%
Fe_{scrap}	FESCRP[1..10]	Type dependent	%
P_{sand}	PSAND	1	%
W_{loss}^{conv}	WLSBTH	1.5	t

5.2 主要计算模型:

模型还包括其它一系列的冶金关系, 用于 Mn、P 和 S 的预测, 渣中总的铁含量和渣碱度的计算, 以及等待过程中的温度损失、氧枪高度的计算, 还可预测炉内产生的废气中的 CO₂ 的平均百分比。

对于脱磷、Mn 的回收和脱硫等监测, 模型会计算出每一炉的 P、Mn、S 和 Fe 的“标准值”。这些值是通过将实际炉次与所谓的标准炉次进行比较算出来的。它可以计算出在实际炉次的参数与标准炉次相等时其相应的 Mn、P、S 和 Fe 的含量。并计算出 Mn、P、S 和 Fe 的这些参数的差值, 然后得出上面提到的标准值。

由于这些值可以在不同的炉次间进行比较, 这个标准已成为监测工艺操作的一个强有力的工具。

其他冶金关系用于预测脱碳率和含氧化铁冷却剂降低率与钢水中碳含量的关系。冶金关系还可以与钢包合金模型结合计算出出钢过程中 Mn 和 C 的损失, 还原物料用量 (Al 和/或 C), 以及铝、硅、碳, 各种其他合金物料和渣调节剂的温度效果。

在进行钢包分析时, 作为反馈计算, 合金物料的合金收得率被计算出并存储起来。

模型还包括进行热损失计算的冶金关系, 是根据钢包的内衬类型、钢包历史、钢包的加热和加盖情况来计算的。

模型首先通过目标值进行**静态计算**，得出主原料、辅原料的加入量及主吹的用氧量；然后根据副枪（TSC 探头）的测量结果进行**动态计算**，得出二次吹炼时的用氧量及冷却剂的加入量，达到目标值；如果副枪（TSO 探头）的测量结果与目标值不符，即冶炼结果达不到目标值，可再通过模型计算，进行补吹，以达到目标值。

5.2.1 静态计算模型：

5.2.1.1 工艺目标计算模型：

工艺目标计算是为了计算钢水的温度和碳含量，基于每个钢包添加剂量的多少，可由模型计算或由钢包添加剂的数量人工计算，具体由操作工选择。碳含量的计算建立在出钢（定碳过程）过程中没有碳化剂的基础上，这个过程也涉及锰铁以及锰铁脱碳剂的比率。如果目标碳含量确定，模型将采用这一目标值，必要时模型也会给出钢包脱碳剂的量，提供锰和硅的合金计量参考值，当钢包中某一元素的实际值比转炉中期望的要高时，模型也会给出添加剂的设定值。另外，铝的计算有所不同，模型中，有个控制标志位，通过它可以取消铝的计算，因此，可以方便地从出钢期间禁止切换到钢包处理期间禁止铝的计算。

模型可以通过标号的通讯来控制不同合金材料的可用性，对于硅铁、锰铁、锰铁脱碳剂、硅碳化合物等都定义了标号，通过这些标号，合金的添加原料可以动态地添加或者去除。模型可以处理两中脱碳剂，一种标准脱碳剂，一种可供选择的脱碳剂，这也由一个标志位来控制，只用于温度计算。

在工艺目标计算中，当需要钢包合金计算时，也会计算转炉工艺过程的相关参数，这通常是模型的第一个计算请求。这些参数包括转炉添加剂白云石、石灰石、生白云石、退渣、铝土矿、生铁、锰矿石和两种可选择的转炉添加剂，参数的预设依据操作数据和有效的标志位。

同样，在钢种参数信息中可以获得磷和硫的目标含量以及最大含量，当模型没有输出硫的目标含量时，硫含量的目标值取自吹炼结束时硫含量的最大值。

目的：计算出钢操作之前，吹炼结束时钢水目标温度和碳含量。

输入：

- ① 目标钢包温度；
- ② 出钢后的目标钢水成分；
- ③ 目标钢水重量；

- ④ 目标碱度；
- ⑤ 相关出钢操作，包括模型没计算的合金料，脱氧剂的加入方式、选用特殊合金等；
- ⑥ 预先设定的合金加入量；
- ⑦ 铁水成分（估计值）；
- ⑧ 不同平衡的模型标准值和修正项；
- ⑨ 相关的吹炼操作，包括底吹模式或效果、除渣操作等；

输出：

- ① 出钢前目标温度；
- ② 出钢前目标碳含量；
- ③ 出钢前目标钢水重量；
- ④ 合金添加剂的情况；

数据检查：

在计算时，模型对相关的输入值进行检查，如果输入值超出范围，模型会给出警告信息，如果缺少的数据为非常重要的参数，则模型不会输出任何值，否则，模型会选择一个比较合理的数值，同时通知操作人员。

5.2.1.2 脱硫计算模型：

依靠钢包中铁水的温度、硫含量和需要的硫含量来计算脱硫剂的用量。如果铁水中硫含量的值比实际值低时，SDM 模型会给出建议值。模型中关联了三种脱硫剂：纯碱、电石、镁。如果推荐使用镁进行脱硫时，模型会给出单位长度镁条的重量。

反馈系统会和模型配置的几种脱硫剂关联，当系统使用而了模型中没有安装的脱硫剂的时候，模型会采用预设的指定脱硫剂的标准重量。

目的：计算脱硫剂加入量。（仅在铁水包要进行脱硫时进行计算。）

输入：

- ① 所供铁水中的硫含量（直接输入或者根据吹炼结束时钢水的目标硫含量计算得出）；
- ② 铁水目标硫含量，或吹炼结束时钢水中的目标硫含量；

输出：

- ① 脱硫剂用量；

脱硫过程中可以使用多种脱硫剂，模型中包含两种冶金关系来计算脱硫剂的量。一种用来计算纯碱（苏打灰），另一种用来计算脱硫剂中镁的含量。

这两种计算都由反馈系统来控制，标准条件下，标准量的脱硫剂可以使硫的含量减少 50%，模型中的标志位 Fl_{des}^{type} ，表示模型中使用的脱硫剂的类型。

常见类型的脱硫剂计算 ($Fl_{des}^{type}=1$) :

计算普通脱硫剂量的关系式：

$$\frac{W_{des}}{W_{HM}} = P_{DES}^0 * \exp \left[\frac{P_{DES}^0}{T_{hm}} \right] * \left\{ -\ln \left(\frac{S_{at}}{S_{bt}} \right) \right\}^{P_{DES}^S} -$$

W_{des} ----- 脱硫剂的重量, t;

W_{HM} ----- 铁水的重量, t;

T_{hm} ----- 铁水的温度, K;

S_{at} ----- 脱硫之后的 S 的含量, %;

S_{bt} ----- 脱硫之前的 S 含量, %;

P_{DES}^x ----- 关联系数;

将此方程变形为：

$$\frac{W_{des}}{W_{HM}} = \frac{W_{des}^0}{W_{HM}^0} * \exp \left[P_{DES}^T * \left(\frac{1}{T_{HM}} - \frac{1}{T_{HM}^0} \right) \right] * \left\{ \frac{\ln \left(\frac{S_{at}}{S_{bt}} \right)}{\ln [Rs_{ratio}^0]} \right\}^{P_{DES}^S} -$$

W_{des}^0 ----- 脱硫剂的标准重量, t;

W_{HM}^0 ----- 铁水的标准重量, t;

Rs_{ratio}^0 ----- 标准脱硫比率 ($=0.5$) , -;

T_{HM}^0 ----- 铁水的标准温度, K;

这里的参量 Rs_{ratio}^0 并不是外围定义的，表示脱硫剂的标准重量 W_{des}^0 达到 50% 的脱硫效果。

含镁的脱硫剂计算 ($Fl_{des}^{type}=2$) :

计算这种脱硫剂可以采用以下算式:

$$\frac{W_{des}}{W_{HM}} = P_{DES}^0 + P_{DES}^S * (S_{bt} - S_{at}) + P_{DES}^T * \left(\frac{T_{HM}}{S_{at}} \right) + \frac{P_{DES}^{Rs}}{S_{at}} -$$

同样, 定义标准的脱硫剂量, 取代标准的数据, 方程就可以变换为:

$$\begin{aligned} \frac{W_{des}}{W_{HM}} &= \frac{W_{des}^0}{W_{HM}^0} + P_{DES}^S * (S_{bt} - S_{at} - S_{ratio}^0 * S_{HM}^0) + P_{DES}^T * \left(\frac{T_{HM}}{S_{at}} - \frac{T_{HM}^0}{R_{ratio}^0 * S_{HM}^0} \right) \\ &\quad + P_{DES}^{Rs} * \left(\frac{1}{S_{at}} - \frac{1}{R_{ratio}^0 * S_{HM}^0} \right) - \end{aligned}$$

S_{HM}^0 ----- 铁水中标准的硫含量, %;

脱硫剂对铁水中其它成分的影响:

实践证明, 脱硫剂不只改变铁水中 S 的含量, 也会影响其它成分的含量, 特别是元素 Si 的含量, 用下面的关系式来计算对其它元素的改变:

$$\Delta Si = P_{DES}^{Si} * \frac{W_{des}}{W_{HM}} \quad \%$$

P_{DES}^{Si} ----- 方程系数;

脱硫剂的热效应:

在脱硫过程中, 由于给脱硫剂加热, 铁水的温度有所下降, 这些热量损失可以这样计算:

$$\Delta T_{HM}^{des} = \Delta T_{des}^0 + \Delta \theta_{des}^t * t_{des} + h_{des} * \frac{W_{des}}{Q_{HM}} \quad ^\circ C$$

ΔT_{des}^0 ----- 脱硫过程中的温度变化, $^\circ C$;

$\Delta \theta_{des}^t$ ----- 脱硫过程中的温度变化系数, $^\circ C$;

t_{des} ----- 脱硫时间, min;

h_{des} ----- 脱硫剂的热效应系数, MJ/t;

Q_{HM} ----- 铁水的热熔, MJ/ $^\circ C$;

5.2.1.3 加料计算模型:

废钢添加指令可发到废钢库, 或用调整程序处理后调用预装废钢槽中废钢, 废钢添加的结果可用于调整铁水添加指令, 反之亦然。

输入:

- ① 铁水的成分和温度；
- ② 预选定的废钢所需量（如果适量使用）；
- ③ 终点目标温度和碳含量；
- ④ 目标钢水重量；
- ⑤ 吹炼操作参数；

输出：

- ① 添加废钢的重量；
- ② 添加铁水的重量；
- ③ 转炉加料的情况；
- ④ 出钢前目标钢水成份；

5.2.1.4 吹炼计算模型：

根据转炉实际加料数据，计算出（第一次）吹炼期间的用氧量。这是根据选定的吹炼操作计算出来的。另外，用于二次吹炼的用氧量也将计算出来，以备紧急切换之用。

为了指导转炉添加剂的用量和吹炼的氧量，模型常常采用温度匹配的方法，这就是说，如果温度低的时候，碳的含量也会低。

通常，期望的工艺条件是就钢水的成分而言的，渣的重量和不同工艺条件下的成分被计算出来，模型考虑吹炼操作模式、副枪的使用、出渣和底搅等信息，铁水的重量可在下列工艺之后定义：铁水倾倒之前、铁水倾倒之后和铁水加料完毕。

可能的转炉添加剂为：煅石灰、煅烧白云石、石灰石、生白云石、退渣、铝土矿、萤石晶体、铁矿石、锰矿、硅铁合剂、碳以及其它可供选择的添加剂。

输入：

- ① 所添加铁水的实际重量；
- ② 所添加废钢的实际重量；

输出：

- ① 转炉添加剂的重量；
- ② 出钢前目标钢水成份；
- ③ 出钢前目标渣成分；

- ④ 副枪浸入深度；
- ⑤ 氧枪高度；
- ⑥ 用氧量；

5.2.1.5 吹炼结束判断模型：

确认吹炼是否达到了目标，如需要给出补吹建议。

输入：

- ① 吹炼结束实际温度和碳含量；
- ② 前一个测量点取样分析结果（结合二次吹炼结果）；
- ③ “直接出钢”操作；

输出：

- ① 补吹建议；
- ② 如果采用“快速出钢”或“直接出钢”，计算当前钢水成份；

5.2.1.6 钢包合金化计算模型：

计算出钢过程中的添加剂量和出钢结束时的温度值，如果预期的温度太高，模型会给出冷却建议，需要向钢包中添加冷却剂或者废料。如果钢水中某一元素的含量比出钢前分析的高，模型也会给出建议，铝的计算有所不同，模型中，有个控制标志位，通过它可以取消铝的计算，因此，可以方便地从出钢期间禁止切换到钢包处理期间禁止铝的计算。

输入：

- ① 实际或是计算出的钢水成份；
- ② 实际或是计算出的钢水温度；
- ③ 钢水目标成分；

输出：

- ① 钢包合金添加剂重量；
- ② 所需额外冷却剂重量；

5.2.1.7 冶炼终点计算模型：

目的：出钢后做炉次冶炼终点计算，其目的是评估冶炼炉次并计算冶炼终点数据作报表。

输入：

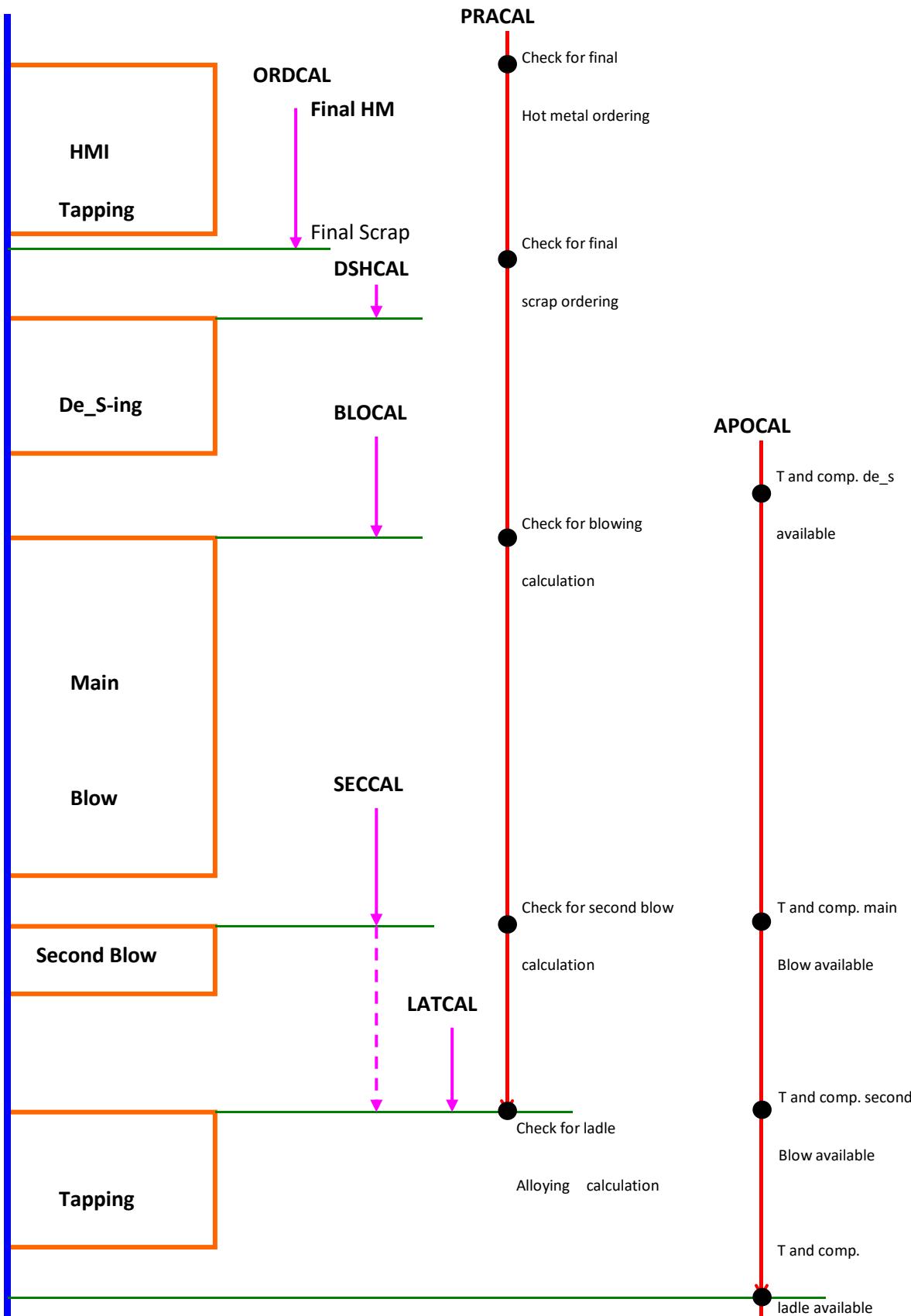


图 5-5 达涅利 SDM 模型静态计算时序图

①出钢前钢水成份;

②出钢后钢水成份;

输出:

①出钢后钢水重量;

②每种元素的合金收得率;

5.2.1.8 静态计算时序图:

5.2.2 动态计算模型:

5.2.2.1 动态控制计算模型:

输入:

① 由副枪测量系统测量的熔池温度和碳含量;

输出:

①副枪测量之后吹入氧量;

②冷却添加剂的重量;

③氧枪高度;

5.2.2.2 二次吹炼计算模型:

如遇中途停吹，则需进行二次吹炼计算。在中途停吹时测量温度和碳含量，另外进行取样并等待取样分析结果。

输入:

① 在中途停吹测量中决定的熔池温度和碳含量;

② 取样分析结果;

输出:

① 中断后吹氧量;

② 冷却添加剂的重量;

③ 氧枪高度;

5.3 自学习模型:

自学习模型也称为反馈计算模型，其目的是计算下一炉次的各种工艺参数。即根据冶炼炉次的目标结果和实际结果在每个炉次都生成一个修正因数。更新的值在下一炉次中由一反馈

信息处理系统进行处理。此反馈计算将对用于静态、动态模型的一些所谓“封闭项”进行更新。

输入:

每个步骤的实际结果。

输出:

更新的模型参数，如：氧气和热平衡的封闭项。

5.4 模型参数训练：

由于引进的 SDM 模型平台具有通用性，为了适应济钢 4#转炉的实际，其模型的参数必须进行训练。另一方面由于 SDM 模型中其静态模型是基于冶金原理建立起来的，其冶炼操作条件也在不断变化，各种平衡关系将会随着生产的变化而变化。因此模型训练的目的也是为了维护模型，并通过结合冶金背景分析改进模型。

SDM 模型是建立在冶金平衡的基础上的，由于转炉冶炼原理的局限性，对于这些模型的参数的适应性也有一定局限，本项目的训练范围主要有冶炼过程的关系包括平衡关系、转炉吹炼过程关系及第二次吹炼关系，出钢过程中的关系训练。

冶炼过程中平衡关系包括：

- ① 铁水在钢包中等待的温度损耗关系；
- ② 铁水装入成分的变化关系；
- ③ 等待出钢时的温度损失；
- ④ 与过程温度相关的热损失。

转炉吹炼过程关系包括：

碳含量计算、锰含量计算、磷含量计算、硫含量计算、渣中全铁计算、脱碳速度计算、氧枪高度等计算关系。

第二阶段吹炼关系包括：氧平衡、温度平衡和热平衡涉及到的相关关系和转炉加料对冷却剂加入量和氧枪吹氧量、吹氧时间的影响关系。其目的是确定冷却剂和吹氧量模型中相关系数。

出钢过程中的关系包括：钢包加料关系、出钢过程中元素损失关系、温度平衡、温度降低、钢包加料过程对温度的影响、热辐射产生的温降、钢包衬料引起的温降等关系训练。

模型训练的目的是通过数理统计的方法，对基于冶金理论建立的模型系数进行确定，即根据冶炼实际确定模型参数。