

氧气顶吹轉爐炼鋼

(炼钢工人进修班试用教材)

下 册

东北工学院钢冶系炼钢教研室翻印

一九七四年九月

目 录

第十一章 物料平衡和热平衡计算

11.1 物料平衡和热平衡计算	11.1
11.1.1 计算的原始数据	11.2-11.4
11.1.2 物料平衡计算	11.4-11.12
11.1.3 热平衡计算	11.12-11.15
11.2 物料平衡和热平衡计算的实际应用	11.15
11.2.1 铁水含硅量和渣中氧化铁含量的变化对钢水收得率的影响	11.15-11.17
11.2.2 铁水温度、含硅量、铁的氧化量和加矿量对终点钢水温度的影响	11.17-11.21

第十二章 泡沫渣和喷溅现象

12.1 泡沫渣的基本理论出发点	12.1-12.2
12.2 影响泡沫形成及稳定的主要因素	12.2
12.2.1 液体的表面张力	12.2-12.4
12.2.2 影响泡沫形成的主要因素	12.4
12.2.3 稳定泡沫的因素	12.5
12.3 吹炼过程中的泡沫渣	12.5-12.7
12.4 产生喷溅的原因及其防止措施	12.7
12.4.1 防止喷溅的意义	12.7-12.8
12.4.2 产生喷溅的原因及其控制	12.8-12.9

1 2. 5 生产上常见的几种喷溅及其控制办法....12.9

1 2. 5. 1 开吹后不久产生的喷溅.....12.9-12.10

1 2. 5. 2 加入第二批料后不久产生的喷溅....12.10-12.11

1 2. 5. 3 炉渣返干时产生的喷溅.....12.11-12.12

1 2. 5. 4 吹炼末期的喷溅.....12.12-12.13

第十三章 钢的脱氧

1 3. 1 钢水中氧的溶解度.....13.1-13.3

1 3. 2 直接脱氧(沉淀脱氧)原理.....13.3-13.4

1 3. 3 常用脱氧元素的脱氧能力.....13.5

1 3. 3. 1 锰的脱氧.....13.5-13.7

1 3. 3. 2 硅的脱氧.....13.7-13.8

1 3. 3. 3 铝的脱氧.....13.8-13.9

1 3. 3. 4 各种脱氧元素的脱氧能力比较.....13.9-13.10

1 3. 4 脱氧产物的形成及其排除条件.....13.10

1 3. 4. 1 脱氧产物在钢水中的上浮速度.....13.10-13.12

1 3. 4. 2 脱氧产物颗粒的长大.....13.12-13.13

1 3. 4. 3 复合脱氧剂的采用.....13.14-13.15

1 3. 4. 4 强化脱氧.....13.15-13.17

1 3. 5 脱氧操作实践.....13.17

1 3. 5. 1 沸腾钢的脱氧.....13.18-13.19

1 3. 5. 2 镇静钢的脱氧.....13.19-13.21

1 3. 5. 3 半镇静钢的脱氧.....13.21

1 3. 6 计算脱氧剂用量示例.....13.21-13.23

第十四章 各类钢种冶炼特点概要

1 4. 1	中碳钢和高碳钢的冶炼	14.2—14.4
1 4. 2	低合金钢的冶炼	14.4
1 4. 2. 1	合金的加入方法	14.5
1 4. 2. 2	铁合金的配料	14.5—14.8
1 4. 3	高合金钢的冶炼	14.8
1 4. 3. 1	采用其它熔化炉配合氧气顶吹转炉 的方法	14.8
1 4. 3. 2	单用氧气顶吹转炉的方法	14.8—14.12
1 4. 4.	试炼合金钢种时的计算问题举例	14.12—14.19
1 4. 5	合金化过程中钢水温度的变化	14.19—14.20

第十五章 氧气顶吹转炉的钢质量及其控制

1 5. 1	钢的机械性能和加工工艺性能	15.2—15.4
1 5. 2	钢的化学成分与性能的关系	15.4—15.9
1 5. 3	钢成分的合理控制	15.9—15.11
1 5. 4	钢成分的均匀性问题	15.11—15.12
1 5. 5	钢中气体	15.12
1 5. 5. 1	氧在钢中的作用	15.12
1 5. 5. 2	氮在钢中的作用	15.13
1 5. 5. 3	氢在钢中的作用	15.13
1 5. 5. 4	氧气顶吹转炉钢中的气体	15.13—15.16
1 5. 6	钢中非金属夹杂物	15.17—15.18
1 5. 7	氧气顶吹转炉的钢质量	15.18
1 5. 7. 1	钢的低倍和高倍检验	15.18—15.19

1 5.7.2 钢的机械性能.....	1510-1520
---------------------	-----------

第十六章 特殊生铁的冶炼

1 6.1 高磷铁水的吹炼.....	16.1-16.2
1 6.1.1 冶炼工艺.....	16.2-16.6
1 6.1.2 钢的品种和质量.....	16.6
1 6.1.3 钢渣磷肥.....	16.7-16.8
1 6.2 含钒铁水的吹炼.....	16.8
1 6.2.1 钒在钢中的作用.....	16.8
1 6.2.2 提炼钒渣.....	16.9-16.16
1 6.2.3 钒钛铁水的吹炼.....	16.16-16.17

第十七章 转炉炉型和炉衬

1 7.1 转炉的炉型.....	17.1
1 7.1.1 炉型的选择.....	17.2-17.3
1 7.1.2 转炉主要尺寸的确定.....	17.4-17.8
1 7.2 转炉的炉衬.....	17.8
1 7.2.1 提高衬砖的质量.....	17.9-17.19
1 7.2.2 冶炼操作工艺对炉衬寿命的影响...	17.20-17.25
附: 耐火材料基本知识.....	17.23
§ 1. 概述.....	17.23
一、耐火材料与转炉炼钢的关系.....	17.23-17.25
二、耐火材料的分类.....	17.25-17.26
§ 2. 耐火材料的一般性质.....	17.26
一、耐火材料的物理性质.....	17.26-17.31
二、耐火材料的高温使用性能.....	17.31-17.36

§ 3. 转炉常用耐火材料的介绍.....17.37

一、硅酸铝质耐火材料.....17.37

二、镁质耐火材料.....17.38

三、白云石质耐火材料.....17.38

第十八章 氧气顶吹转炉烟气净化及回收

18.1. 氧气顶吹转炉烟气的性质.....18.2-18.4

18.2 氧气顶吹转炉烟尘的性质.....18.4-18.6

18.3 氧气顶吹转炉烟气的净化原理与方法.....18.6

18.3.1 净化原理.....18.6-18.7

18.3.2 净化方法.....18.7-18.8

18.4 烟气净化系统的主要设备.....18.8

18.4.1 烟罩.....18.8-18.10

18.4.2 斜烟道与汽化冷却烟道.....18.10-18.11

18.4.3 溢流文氏管.....18.12-18.13

18.4.4 可调文氏管.....18.13

18.4.5 脱水器.....18.14-18.15

18.4.6 喷淋塔.....18.15-18.16

18.4.7 风机.....18.17-18.18

18.5 烟气净化回收系统.....18.18-18.19

18.6 氧气顶吹转炉烟气及烟尘的综合利用.....18.19

18.6.1 烟气的利用.....18.19-18.21

18.6.2 烟尘的利用.....18.22

18.7 我国烟气净化系统情况.....18.22-18.24

参考文献.....参1-参10

第十一章 物料平衡和热平衡计算

〔内容提要〕：

以例题的形式较详细的介绍了一般的物料平衡和热平衡计算方法，以及计算结果在实际生产中的运用，列出了一些常用的热工数据。

在氧气顶吹转炉炼钢过程中，给我们提出了各种各样“数”的问题。例如，根据一定的铁水成分，需要造什么成分和多少数量的炉渣，以保证钢和完成脱硫和脱磷的任务？为什么同样的炼钢条件，钢水收得率有高有低，是那些因素影响以及如何提高钢水收得率？等等。作为一个炼钢工作者，只有了解和掌握冶炼各钢种的工艺参数，才能做到操作时“胸中有数”，“把革命气概和实际精神结合起来”，以便努力实现高产、优质、低耗、多品种。

利用计算物料平衡和热平衡的方法同炼钢生产实践紧密结合，可以确定很多重要的工艺参数，对指导生产和分析研究改进冶炼工艺、设计炼钢车间、选用炼钢设备、实现自动化控制都有着很重要的意义。

物料平衡计算是计算炼钢过程中加入炉内和参与炼钢过程的全部物料（如铁水、废钢、氧气、冷却剂、渣料、被浸蚀的炉衬等）和炼钢过程的产物（如钢水、炉渣、炉气、烟尘等）之间的平衡关系。热平衡计算是计算炼钢过程的热量收入（如铁水的物理热、化学热）和热量支出（如钢水、炉渣、炉气的物理热、冷却剂等化和分解热等）之间的平衡关系。

要进行物料平衡和热平衡计算,首先必须对转炉冶炼过程的有关数据进行实测。下面就是根据首钢30吨氧气顶吹转炉部分实测数据进行计算的。但是由于炼钢过程是在高温下进行的一个复杂的物理化学变化的过程,要全面实测所有数据目前是有困难的,有的数据目前也不能准确地测定,并且反应温度,反应物的浓度和状态等参数随着吹炼过程在不断变化。要求精确的进行计算,目前也是做不到的。因此,本计算中有的数据是引自别处测定的结果,有的是结合生产实际情况进行假定。显然,这样的计算只是近似计算,与生产实际比较会产生一定的偏差,必须在生产实际中进行修正。尽管如此,物料平衡和热平衡计算仍然在实践中起着重要的指导作用。

11.1. 物料平衡和热平衡计算

11.1.1 计算的原始数据

表11.1 30吨氧气顶吹转炉一炉钢实测数据

项 目	成 分 , %					重 量 吨	温 度 ℃	终 渣 成 分		
	C	Si	Mn	P	S			$\frac{CaO}{SiO_2}$	FeO %	Fe ₂ O ₃ %
铁水	4.4	0.93	0.20	0.12	0.04	31.7	1300	3.02	10.99	4.79
钢水	0.08	0.01	0.05	0.005	0.014		1670			
废钢*	0.30	0.20	0.50	0.04	0.04	3.0	25			

* 废钢成分及温度均系假定。

表 11.2

原 材 料 成 分

成分% 加入量, 吨 项目	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	MnO	CaF_2	Al_2O_3	S	烧 减
矿石	1.2	80	10		5.0		4.93	0.07	
石灰	2.6	92.15	1.58	1.25				0.10	4.92
萤石	0.42		4.80			95.70			
炉衬		55	2.60	40			2.40		

表 11.3

反 应 热 效 应

反 应 式 **	ΔH 千卡 公斤分子	ΔH 千卡 公斤元素
$(\text{O})_{\text{T}} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) = \text{O}(\text{气}, \text{T})$	-33300	-2780
$(\text{O})_{\text{T}} + \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) = \text{O}_2(\text{气}, \text{T})$	-99855	-8320
$(\text{Mn})_{\text{T}} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) = \text{MnO}(\text{液}, \text{T})$	-86400	-1575
$(\text{Si})_{\text{T}} + \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) = \text{SiO}_2(\text{液}, \text{T})$	-195300	-6970
$2(\text{P})_{\text{T}} + \frac{5}{2} \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) + 4\text{CaO}(\text{液}, \text{T}) = \text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_7(\text{液}, \text{T})$	-531500	-8570
$\text{Fe}(\text{液}, \text{T}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) = \text{FeO}(\text{液}, \text{T})$	-56900	-1020
$2\text{Fe}(\text{液}, \text{T}) + \frac{3}{2} \text{O}_2(\text{气}, \text{T}) = \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{液}, \text{T})$	-172550	-1533
$\text{SiO}_2(\text{固}, \text{T}) + 2\text{CaO}(\text{固}, \text{T}) = \text{Ca}_2\text{SiO}_4(\text{固}, \text{T})$	-23200	-287

**反应式各右下角“T”字代表炼钢温度

表 11.4 平 均 比 热

项 目	固态平均比热 千卡/公斤·度	熔化潜热 千卡/公斤	液态或气态平均比热 千卡/公斤·度
生 铁	0.178	52	0.20
钢	0.167	65	0.20
炉 渣		50	0.298
炉 气			0.2715
烟 尘	0.238	50	

下列数据本炉次没有测定。现根据首钢和其他资料，作以下假定：

- (1)炉气平均温度为 1450°C ；
- (2)金属中烧损的碳 90 % 氧化成 CO，10 % 氧化成 CO_2 ；
- (3)炉衬消耗量根据首钢资料为 1.0 %；
- (4)根据首钢测定，炉渣中含有的铁珠量为渣量的 8.0 %；
- (5)烟尘损失为 1.16 %，其中 Fe_2O_3 为 70 %， FeO 为 20 %；
- (6)因喷溅而产生的机械吹损在炉役中期平均为 1.2 %。

11.1.2 物料平衡计算

为简化起见，以 100 公斤钢铁料为计算基本单位。

本炉次钢铁料总重量 = $31.7 + 3 = 34.7$ 吨，其中铁水占 91.4 %，废钢占 8.6 %。

每 100 公斤钢铁料加入原材料数量为：石灰 7.49 公斤，矿石 3.46 公斤，萤石 1.2 公斤。

表 11.5 (1) 各元素的氧化量, 公斤

项 目	C	Si	Mn	P	S
铁水 (91.4%)	4.02	0.85	0.18	0.11	0.037
废钢 (8.6%)	0.03	0.02	0.04	0.003	0.003
钢铁料 (平均成分)	4.05	0.87	0.22	0.113	0.040
钢水	0.06	0.01	0.05	0.005	0.014
氧化量	3.99	0.86	0.17	0.108	0.026

表 11.6 (2) 各元素氧化产物和数量

元素	氧化产物	元素氧化量, 公斤	耗氧量, 公斤	氧化产物量, 公斤
Si	SiO ₂	0.86	$0.86 \times \frac{32}{28} = 0.98$	$0.86 \times \frac{60}{28} = 1.84$
Mn	MnO	0.17	$0.17 \times \frac{16}{55} = 0.05$	$0.17 \times \frac{71}{55} = 0.22$
O	CO	$3.99 \times 90\% = 3.59$	$3.59 \times \frac{16}{12} = 4.79$	$3.59 \times \frac{28}{12} = 8.38$
O	CO ₂	$3.99 \times 10\% = 0.40$	$0.40 \times \frac{32}{12} = 1.07$	$0.40 \times \frac{44}{12} = 1.47$
P	P ₂ O ₅	0.108	$0.108 \times \frac{80}{62} = 0.14$	$0.108 \times \frac{142}{62} = 0.25$
Fe	FeO	1.26	$1.26 \times \frac{16}{56} = 0.36$	1.62
Fe	Fe ₂ O ₃	0.49	$0.49 \times \frac{48}{112} = 0.21$	0.70
S	SO ₂	$0.026 \times \frac{1}{3} = 0.009$	$0.009 \times \frac{32}{32} = 0.009$	$0.009 \times \frac{64}{32} = 0.018$
S	CaS	$0.026 - 0.009 = 0.017$	—	$0.017 \times \frac{72}{32} = 0.04$
共 计		6.90	7.61	

表 11.6 [注]：

 ① 气化去硫 (SO_2) 假定为总去硫量的 $\frac{1}{3}$ ；

 ② 氧化铁 (FeO , Fe_2O_3) 是由计算出来的渣量，按照已知成分反算的。见表 11.7 之后。

表 11.7 (3) 炉渣重量及成分

项 目	氧化产物量，公斤	石 灰 斤 公 斤	矿 石 公 斤	萤 石 公 斤	炉 衬 公 斤	共计 公斤	%
SiO_2	1.84	$7.49 \times 1.58\%$ $= 0.12\%$	3.46 $\times 10\%$ $= 0.35$	$1.2 \times 4.3\%$ $= 0.05$	$1 \times 2.6\%$ $= 0.03$	2.39	16.27
CaO		$7.49 \times 92.15\%$ $= 6.90$			$1 \times 55\%$ $= 0.55$	7.45	50.71
CaF_2				$1.2 \times 95.7\%$ $= 1.15$		1.15	7.83
MnO	0.22		$3.46 \times 5\%$ $= 0.17$			0.39	2.65
MgO		$7.49 \times 1.25\%$ $= 0.09$			$1 \times 40\%$ $= 0.40$	0.49	3.34
FeO	1.62					1.62	11.03
Fe_2O_3	0.70					0.70	4.77
P_2O_5	0.25					0.25	1.70
Al_2O_3			3.46 $\times 4.93\%$ $= 0.17$		$1 \times 2.4\%$ $= 0.02$	0.19	1.29
		$7.49 \times 0.10\%$ $\times \frac{72}{22} = 0.017$	3.46×0.03 $\times \frac{72}{32}$ $= 0.005$			0.06	0.41
共 计						14.89	100.00

表 11.6、11.7 中氧化铁量是这样计算出来的：

由表 11.7 知，除 FeO 、 Fe_2O_3 外的炉渣重量为：

$$\begin{aligned} & \text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{CaF}_2 + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS} \\ &= 2.39 + 74.5 + 1.15 + 0.39 + 0.49 + 0.25 + 0.19 + 0.06 \\ &= 12.37 \text{ 公斤} \end{aligned}$$

又由表 11.1 知终渣成分中：

$$\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 10.99 + 4.79 = 15.78\%$$

则其他成分占：

$$100\% - 15.78\% = 84.22\%$$

故总渣量为：

$$\frac{12.37}{0.8422} = 14.69 \text{ 公斤}$$

则： $\text{FeO} = 14.69 \times 10.99\% = 1.62 \text{ 公斤}$ ，

其中： $\text{Fe} = 1.62 \times \frac{56}{72} = 1.26 \text{ 公斤}$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 14.69 \times 4.79\% = 0.70 \text{ 公斤}$$

其中： $\text{Fe} = 0.70 \times \frac{112}{160} = 0.49 \text{ 公斤}$

分别代入表 11.6、11.7 中。

又由表 11.7 计算结果：炉渣碱度 $R = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = \frac{74.5}{2.39} = 3.12$ ，

$\text{FeO} = 11.03\%$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4.77\%$ ，与原来实际成分基本符合。

(4) 铁矿石还原、转炉烟尘和总耗氧量

加入铁矿石为 3.46 公斤，其中：

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3.46 \times 80\% = 2.77 \text{ 公斤}$$

在 2.77 公斤 Fe_2O_3 中含:

$$2.77 \times \frac{112}{160} = 1.94 \text{ 公斤 Fe,}$$

$$2.77 \times \frac{48}{160} = 0.83 \text{ 公斤 } \text{O}_2 \text{。}$$

每 100 公斤铁水(近似地认为是钢铁料)产生烟尘 1.16 公斤, 烟尘中 70% Fe_2O_3 , 20% FeO , 则烟尘中含:

$$1.16 \times 70\% \times \frac{48}{160} + 1.16 \times 20\% \times \frac{16}{72} = 0.30 \text{ 公斤 } \text{O}_2 \text{,}$$

$$1.16 \times 70\% \times \frac{112}{160} + 1.16 \times 20\% \times \frac{56}{72} = 0.75 \text{ 公斤 Fe。}$$

通常在炉气中含有 0.5% 左右的自由氧。由以后表 11.8 炉气成分中反算出为 0.056 公斤。

$$\text{氧气总耗量} = 7.61 + 0.30 - 0.83 + 0.056 = 7.136 \text{ 公斤,}$$

或
$$7.136 \times \frac{22.4}{32} = 4.995 \text{ 米}^3 \text{,}$$

氧气纯度为 99.5%, 所以,

$$\text{实际氧气总耗量} = \frac{4.995}{0.995} = 5.02 \text{ 米}^3 \text{,}$$

在 5.02 米³ 氧气中带入的 N_2 为

$$5.02 - 4.995 = 0.025 \text{ 米}^3 \text{。}$$

表 11.8 (5) 炉气成分

成分	重 量 公 斤	体 积 米 ³	体 积 百 分 数 %
CO	8.38	$8.38 \times \frac{22.4}{28} = 6.70$	86.90
CO ₂	1.84*	$1.84 \times \frac{22.4}{44} = 0.94$	12.19
N ₂	0.03	$0.03 \times \frac{22.4}{28} = 0.025$	0.33
O ₂	0.056	$0.056 \times \frac{22.4}{32} = 0.039$	0.50
SO ₂	0.018	$0.018 \times \frac{22.4}{64} = 0.006$	0.08
共 计	10.324	7.71	100.00

* CO₂ 成分中包括石灰烧减量 = $7.49 \times 4.92\%$
= 0.37 公斤。

上述炉气中含有0.5%左右自由氧重0.056公斤，是由表11.8炉气成分表中这样反算出来的：

设在炉气总体积中，氧气占X米³，氮气占Y米³。根据表11.8已知的炉气中的其他成分，则：

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{6.70 + 0.94 + 0.006 + Y}{0.995} (6.70 + 0.94 + 0.006 + Y) \\
 &= \frac{7.646 + Y}{0.995} - (7.646 + Y)
 \end{aligned}$$

$$= \frac{1 - 0.995}{0.995} (7.646 + y)$$

$$= \frac{0.005}{0.995} (7.646 + y)$$

$$\therefore X = \frac{7.646 + y}{199} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{又 } y = \frac{\frac{22.4}{32}(7.61 + 0.30 - 0.83) + X}{0.995}$$

$$- \left[\frac{22.4}{32} (7.61 + 0.30 - 0.83) + X \right]$$

$$= \frac{0.7 \times 7.08 + X}{0.995} - [0.7 \times 7.08 + X]$$

$$= \frac{1 - 0.995}{0.995} [4.956 + X] = \frac{4.956 + X}{199}$$

$$\text{故 } 199y = 4.956 + X \dots\dots\dots(2)$$

$$(1) \text{代入}(2) \quad 199y = 4.956 + \frac{7.646 + y}{199}$$

$$199y - \frac{y}{199} = \frac{7.646}{199} + 4.956$$

$$y(199 - 0.005) = 7.646 \times 0.005 + 4.956$$

$$y = \frac{0.038 + 4.956}{198.995} = \frac{4.994}{198.995} = 0.025 \text{ 米}^3, N_2$$

$$X = \frac{7.646 + 0.025}{199} = \frac{7.671}{199} = 0.039 \text{ 米}^3, O_2$$

$$y = 0.025 \times \frac{28}{22.4} = 0.03 \text{ 公斤}, N_2$$

$$X = 0.039 \times \frac{32}{22.4} = 0.056 \text{ 公斤, } O_2。$$

将 N_2 、 O_2 量代入表 11.8 中。

(6) 钢水收得率

吹损组成如下:

- 化学损失: 6.90 公斤,
- 烟尘损失: 0.75 公斤,
- 炉渣中铁珠损失: $14.69 \times 8\% = 1.18$ 公斤,
- 机械吹损: 1.2 公斤。

加入铁矿石还原出 Fe 为 1.94 公斤。

则钢水量 (这里也即是钢水收得率) 为:

$$\text{钢水量} = 100 - (6.90 + 0.75 + 1.18 + 1.2) + 1.94 = 91.91 \text{ 公斤。}$$

表 11.9 (7) 物料平衡表

收 入			支 出		
项 目	重量, 公斤	%	项 目	重量, 公斤	%
铁 水	91.4	75.98	钢 水	91.91	76.29
废 钢	8.6	7.15	炉 渣	14.69	12.19
石 灰	7.49	6.22	炉 气	10.32	8.58
矿 石	3.46	2.88	喷 溅	1.20	1.00
萤 石	1.20	1.00	烟 尘	1.16	0.96
炉 衬	1.0	0.83	铁 珠	1.18	0.98
氧 气	7.14	5.94			
共 计	120.29	100.00	共 计	120.46	100.00