

## 150 t 顶底复吹转炉物料及热平衡计算与应用

吕亚<sup>1</sup> 王新志<sup>1</sup> 胡锐<sup>2</sup> 刘磊<sup>1</sup> 李文山<sup>1</sup> 吕高森<sup>3</sup>

(1 安阳钢铁集团有限责任公司第二炼轧厂, 安阳 455004; 2 山西工程职业技术学院, 太原 030009;

3 南京铁道职业技术学院(苏州校区), 苏州 215137)

**摘要** 以安钢 150 t 转炉炼钢数据为计算依据, 进行了物料平衡和热平衡计算, 并建立了计算模型。方案优化后, 对其物料及热平衡进行了多次循环测算, 从而得到合理的炉料结构配比, 热平衡钢水物理热和炉渣物理热约占总热量支出的 75%, 废钢物理热支出占总热量支出的 6% ~ 7%, 当废钢比为 7% ~ 10% 时, 钢铁料消耗降低了 5.9 kg/t<sub>钢</sub>, 约节省生产成本 26.14 元/t<sub>钢</sub>。

**关键词** 150 t 转炉 物料平衡 热平衡 计算模型

## Calculation and Application of Charging Material and Heat Balance in 150 t Top and Bottom Combined Blown Converter

Lü Ya<sup>1</sup>, Wang Xinzhi<sup>1</sup>, Hu Rui<sup>2</sup>, Liu Lei<sup>1</sup>, Li Wenshan<sup>1</sup> and Lü Gaosen<sup>3</sup>

(1 No2 Steelmaking and Rolling Plant, Anyang Iron & Steel Group Co Ltd, Anyang 455004; 2 Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009; 3 Nanjing Institute of Railway Technology (Suzhou Campus), Suzhou 215137)

**Abstract** Based on data of 150 t converter steelmaking at Anyang Steel, the calculation of charging material balance and heat balance have been carried out and a calculation model is established. With optimum scheme, the multi-cycles calculation on the charging material and heat balance has been carried out to get a reasonable ratio of charging structure, the physical heat of heat balance of liquid and slag making up 75% of total heat expenditure, the physical heat of scrap making up 6% ~ 7% of total heat expenditure, and with the scrap ratio being 7% ~ 10%, the consumption of iron and steel charging material decreases by 5.9 kg per ton of steel and the production cost reduces about 26.14 Yuan per ton of steel.

**Material Index** 150 t Converter, Charging Material Balance, Heat Balance, Calculation Model

通过采集现场初始冶炼数据, 并以相关热力学数据为基础, 对安钢 150 t 转炉的物料及热平衡进行测算, 来评定转炉的物料和热平衡状况; 通过分析建立计算模型, 以分析在初始条件变化时转炉的物料和热平衡变化, 来指导炉料结构优化。

### 1 第二炼轧厂生产流程及转炉参数

安钢第二炼轧厂现有 150 t 顶底复吹转炉 3 座、铁水脱硫设备 2 套、RH 真空处理精炼炉 2 座、LF 钢包精炼炉 3 座、VD 精炼炉 1 座、3 250 mm 单流板坯连铸机 1 台、1 600 mm 双流板坯连铸机 2 台, 根据所炼钢种的要求进行铁水脱硫、吹炼和二次精炼。安钢第二炼轧厂生产流程图见图 1。

150 t 顶底复吹转炉的平均冶炼周期为 34 min; 在出钢过程中采用钢芯铝对钢水进行脱氧; 转炉使用氧枪为 5 孔喷头, 氧气流量为 30 000 ~ 36 000 m<sup>3</sup>/h, 氧枪枪位为 1.5 ~ 2.0 m; 复吹前期供氮气, 后期切换为氩气, 底吹气体流量为 400 ~ 600 m<sup>3</sup>/h。转炉的相关参数见表 1<sup>[1]</sup>。

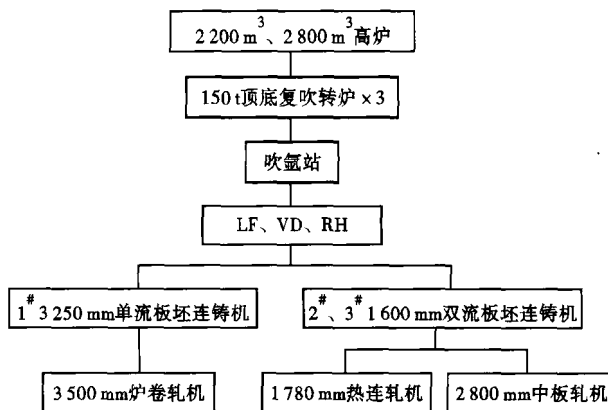


图 1 生产流程图  
Fig. 1 Flow sheet of production

### 2 原始数据采集与计算方法

#### 2.1 原始数据采集

实际冶炼生产中, 初始铁水条件和目标钢水条件是随冶炼钢种及冶炼条件随机变化的, 现以普碳钢 Q235B 的生产条件为依据进行物料及热平衡测算, 基础数据采集见表 2、表 3、表 4<sup>[2]</sup>、表 5<sup>[2]</sup>。

设定加入量项目的控制数据有: (1) 铁矿石-

表 1 150 t 转炉参数  
Table 1 Parameters of 150 t converter

项目	参数
公称容量/t	150
平均炉产钢水量/t	165
最大炉产钢水量/t	170
出钢口交角/°	0
炉壳全高/mm	9 576
炉壳外径/mm	6 800
炉壳高径比	1.41
炉容比	1.05
炉口直径/mm	2 970
溶池直径/mm	5 021
出钢口直径/mm	150

3.0 kg/100 kg 铁水,其中 FeO 占氧化铁总量(TFeO)的 75%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 25%;(2)白云石-1.7 kg/100 kg 铁水;(3)炉渣碱度 R-3.0;(4)石灰加入量 
$$= \frac{R \times \Sigma(\text{SiO}_2) - \Sigma(\text{CaO})}{\% \text{CaO}_{\text{有效}}}$$
,式中:  $\Sigma(\text{SiO}_2)$  = 铁水中 Si 氧化成 SiO<sub>2</sub> 量 + 矿石带入的 SiO<sub>2</sub> + 白云石带入的 SiO<sub>2</sub>;  $\Sigma(\text{CaO})$  = 白云石带入的 CaO - 铁水中 S 成渣消耗的 CaO。

表 2 初始铁水和目标钢水成分  
Table 2 Chemical composition of initial hot metal and aim liquid steel

类别	化学成分/%					温度/°C
	C	Si	Mn	P	S	
铁水	4.00	0.500	0.20	0.070	0.025	1 330
钢水	0.08	0.001	0.10	0.010	0.020	

表 3 主要炉料组成/%  
Table 3 Ingredient of main charging materials /%

炉料	TFeO	CaO	MnO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
石灰	-	90	-	2	-	5
铁矿石	80	-	5	10	5	-
白云石	-	45	-	2	-	35

表 4 各物质物理热/[kJ·(°C·kg)<sup>-1</sup>]  
Table 4 Physical heat of each material /[kJ·(°C·kg)<sup>-1</sup>]

物料	固态平均比热容	熔化潜热	液态气态比热容
生铁	0.75	218	0.837
钢	0.70	272	0.837
炉渣	-	209	1.247
炉气	-	-	1.140
烟尘	1.00	209	-

## 2.2 测算设定

设定条件如下<sup>[3]</sup>:

(1)炉气平均温度 1 450 °C;(2)炉气中自由氧含量为 0.5%;(3)金属中烧损的碳 90% 氧化为 CO,10% 氧化为 CO<sub>2</sub>;(4)转炉渣中 TFeO 为 15%;(5)烟

表 5 化学反应热  
Table 5 Heat of chemical reaction

反应式	$\Delta H / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
C + 1/2O <sub>2</sub>	11 632
C + O <sub>2</sub>	34 811
Mn + 1/2O <sub>2</sub>	6 590
Si + O <sub>2</sub>	29 162
2P + 5/2O <sub>2</sub> + 4CaO	35 857
Fe + 1/2O <sub>2</sub>	4 247
2Fe + 3/2O <sub>2</sub>	6 556
SiO <sub>2</sub> + 2CaO	1 619

尘损失为钢铁料量的 1.16%,其中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 70%,FeO 为 20%;(6)喷溅铁损为钢铁料量的 1%;(7)氧气成分为 99.5% O<sub>2</sub>,0.5% N<sub>2</sub>;(8)假定汽化脱硫占总脱硫的 1/3;(9)为简化计算,取冷料入炉温度均为 25 °C,纯铁熔点为 1 536 °C;(10)吹炼过程炉子热辐射、对流、传导传热、冷却水等带走热量与炉子大小等因素有关,一般为总收入热量的 3% ~ 8%,测算取 3%;(11)转炉终渣中 TFeO 为 15%,其中 FeO 占 TFeO 的 80%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 占 20%。

## 2.3 计算方法

以 100 kg 全铁水为计算依据进行物料及热平衡测算。在物料平衡中,物料收入项有铁水、废钢(0 kg)、石灰、矿石、白云石、氧气;物料支出项有钢液、炉渣、炉气、喷溅、铁珠、烟尘。

测算验证:误差率 = (收入项 - 支出项)/收入项 × 100%。

在物料平衡的基础上进行热平衡计算。热平衡中,热收入项有铁水物理热、元素氧化放热及成渣热(C、Si、Mn、P、Fe、SiO<sub>2</sub>)、烟尘氧化热;热支出项有钢水物理热、炉渣物理热、矿石分解热、烟尘物理热、炉气物理热、铁珠及喷溅金属物理热、白云石分解热、其他热损失、富余热值。

富余热值可熔化废钢(kg):废钢量 = 富余热值/ {1 × [钢固态比热容 × (钢熔点 - 25 °C) + 钢的熔化潜热 + 钢的液态比热容 × (出钢温度 - 钢熔点)]}。

## 3 测算结果与分析

### 3.1 物料平衡计算

物料平衡的计算结果列于表 6 中。本物料平衡计算是以安钢冶炼普碳钢 Q235B 时的出钢目标成分和所采用铁水的实际数据为初始条件,并以 2.2 节中的边界条件假定做为测算依据进行计算的。计算中忽略了冶炼过程中出现的一些偶然因素和次要环节对物料平衡的影响(如出钢时渣子过于泡沫化时会加入一些泡沫渣抑制剂以及炉衬损失带入量等)。

表6 物料平衡计算结果  
Table 6 Calculating results for material balance

物料	收入		物料	支出	
	质量/kg	比例/%		质量/kg	比例/%
铁水	100.00	86.80	钢液	93.67	81.79
废钢	0	0	炉渣	8.62	7.53
石灰	4.11	3.57	炉气	9.75	8.52
矿石	3.00	2.60	喷溅	1.00	0.87
白云石	1.70	1.48	铁珠	0.69	0.60
氧气	6.39	5.55	烟尘	0.79	0.69
总计	115.21	100.00	总计	114.53	100.00

误差检验:  $(115.21 - 114.53) / 115.21 \times 100\% = 0.59\% < 1.00\%$

通过计算钢液收得率为93.67%,和安钢150 t转炉的实际生产数据统计得出的钢液收得率93%~95%基本是符合的。通过检验,误差率为0.59%,说明本物料平衡计算是正确的。

### 3.2 热平衡计算

在物料平衡的基础上,又进一步进行了热平衡计算,依然以全铁水为热平衡计算初始条件。因影响热平衡计算的条件比较复杂,如吹炼过程炉子有热辐射、对流、传导传热、冷却水、炉子耐火材料分解热等,测算比较复杂,且波动较大,因此本测算根据经验取热损失为总热量损失的3.0%。热平衡计算结果见表7。

表7 热平衡计算结果  
Table 7 Calculating results for heat balance

项目	收入		项目	支出	
	热量/kJ	比例/%		热量/kJ	比例/%
铁水物理热	120 942.77	59.14	钢水物理热	133 249.9	65.16
元素氧化放热及成渣热	79 087.83	38.67	炉渣物理热	19 218.46	9.40
其中 C	54 683.61	26.74	矿石分解热	10 242.49	5.01
Si	14 581.00	7.13	烟尘物理热	1 895.44	0.93
Mn	659.00	0.32	炉气物理热	15 844.27	7.75
P	2 151.42	1.05	铁珠及喷溅金属物理热	2 390.91	1.17
Fe	4 604.15	2.25	白云石分解热	2 418.42	1.18
SiO <sub>2</sub>	2 408.65	1.18	其他热损失	6 135.29	3.00
烟尘氧化热	4 479.09	2.19	富余热(废钢物理热)	13 114.52	6.41
共计	204 509.69	100.00	共计	204 509.70	100.00

计算得出富余热为13 114.52 kJ,可加热废钢量计算:

1 kg 废钢需吸收热量为:  $Q = 1.0 \times [ \text{钢的固态平均比热容}(\text{废钢熔点} - \text{物料常温温度}) + \text{废钢熔化潜热} + \text{钢液态比热容}(\text{目标钢液温度} - \text{废钢熔点}) ]$ , 计算得出1 422.51 kJ,故可加热废钢9.22 kg, 废钢/(铁水+废钢)=8.44%,因此理想的废钢比可能会在7%~10%浮动。影响废钢加入量的主要

因素在于初始铁水温度、铁水成分(C、Si、Mn)、目标出钢温度和目标钢水成分,因此在实际应用时需充分考虑各因素对装入制度的影响。

### 4 计算模型与应用

安钢根据自身的炉料结构特点,并结合生产实际,抓物料和热平衡的主要平衡环节,建立了结合生产实际的物料和热平衡的计算模型,用于快速测算和循环测算,指导生产。

以全铁水为第一次模型运算初始数据,模型方案见图2。

本模型是在上述第2、3节计算及假定的基础上建立的,通过优化初始条件可重复测算物料平衡和热平衡的合理性。通过以上基础研究,安钢对某钢种炉料结构进行了物料及热平衡测算,并对原来实行方案进行了优化,各项指标结果如表8。

方案优化后,废钢比由原来的11.76%变为7.06%,同时对造渣料进行了微调,使热平衡中热量收支项更加趋于合理,减少了吹损量。现场实际数据为转炉终渣 TFe 由15%~21%降为13%~18%,喷溅率也得到了有效控制,说明原先方案中废钢比为11.76%,在造渣过程中调入的冷却剂(烧结返矿或氧化铁皮)偏多,使得后期过吹,增加了吹损量,才可保证命中出钢温度。因此若想在原先造渣方案基本不变的情况下,进一步降低钢铁料消耗,需要增加铁水比,以保证有足够的热量富余;当然,若想保持原有的铁水比,就需要调整相应的造渣方式或初始铁水条件,才能有合理的热量富余,来保证出钢温度。在同为170 t的装入量下,方案优化后钢水收得率提高了约0.5%,钢铁料消耗由1 058.5 kg/t<sub>钢</sub>降到1 052.6 kg/t<sub>钢</sub>,且冶炼过程稳定。根据当前生产资料价格对生产成本进行分解优化,计算得出约可节省26.14元/t<sub>钢</sub>。

这里需要指出,物料及热平衡是众多影响因素相互作用下的综合反映,科学应用物料及热平衡可以找到一个物料利用率较高、能量损失又较少的冶炼方法,片面追求某一技术指标的做法不可取。

目前国内各厂在炉料结构优化时,根据钢种和实际的原材料条件,考虑的侧重点会有所不同,但是较好地保证物料平衡和热平衡是降低物料消耗、能耗及生产成本的根本依据。随着炼钢水平的不断提高,采用低硅低锰铁水,少渣冶炼,在合理的物料及热平衡下,可有效抑制喷溅、减少吹损、提高冶炼效率,钢水收得率会进一步提高。

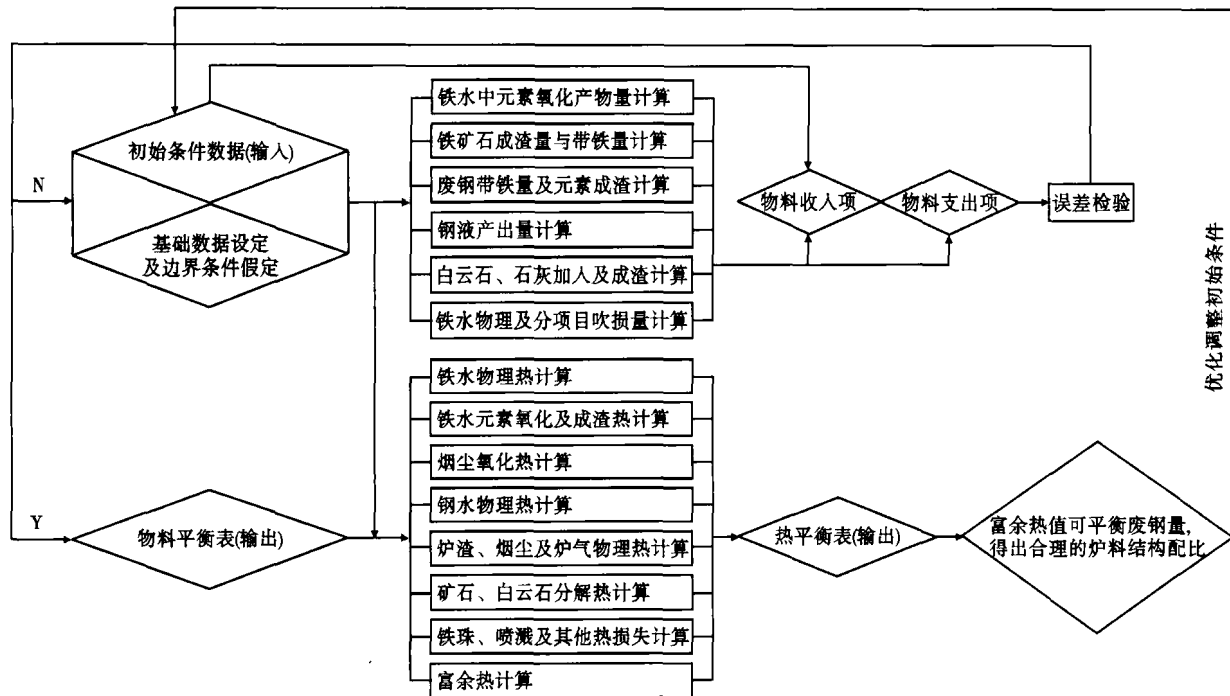


图 2 物料和热平衡计算模型  
Fig. 2 Calculation model for charging material and heat balance

表 8 炉料结构方案优化  
Table 8 Optimized scheme of charging structure

成本项目	市场价 (元·t <sup>-1</sup> )	市场价测算						
		原来实行方案		优化后方案		原来实行方案 - 优化后方案对比		
		消耗/kg	成本/元	消耗/kg	成本/元	消耗/kg	成本/元	
钢铁料	铁水	2 150	933.97	2 008.04	978.30	2 103.35	-44.33	-95.31
	铁块	2 307	10.53	24.29	0	0	10.53	24.29
	自产废钢	2 350	114.00	267.90	66.30	155.81	47.70	112.09
	小渣钢	1 609	0	0	8.00	12.87	-8.00	-12.87
	小计	-	1 058.50	2 300.23	1 052.60	2 272.03	5.90	28.20
造渣料	烧结返矿	643	25.70	16.53	25.00	16.08	0.70	0.45
	氧化铁皮	260	6.50	1.69	5.00	1.30	1.50	0.39
	石灰	400	57.75	23.10	65.00	26.00	-7.25	-2.90
	白云石	140	29.00	4.06	29.00	4.06	0	0
	其它	-	1.95	5.80	1.95	5.80	0	0
	小计	-	120.90	51.18	125.95	53.24	-5.05	-2.06
合计	-	-	2 351.41	-	2 325.27	-	26.14	

5 结语

(1) 计算得出 150 t 转炉物料平衡钢水收得率为 93.67%，误差率为 0.59%，与生产实际的钢水收得率 93%~95% 基本一致；热平衡钢水物理热和炉渣物理热占总热量支出的约 75%，富余热占总热量支出的 6%~7%，废钢比为 7%~10%。

(2) 影响物料平衡和热平衡的主要因素为初始铁水温度、铁水成分（尤其 C、Si、Mn）、目标出钢温度、目标钢水成分及造渣原材料条件。

(3) 建立计算模型可以对不同初始条件下的物料平衡和热平衡进行快速测算和循环测算，以找到适合不同钢种、不同冶炼条件下较合理的物料配比，

使物料消耗较少，能耗较低。今后还需进一步对物料平衡、热平衡及边界条件优化做深入研究。

参考文献

- 1 吕亚, 杨晓奇, 张勇. 安钢 150 t 转炉中后期炉衬的维护实践. 江西冶金, 2009(4): 14
- 2 冯聚合. 炼钢设计原理. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 3 王雅珍, 张岩, 张红文. 氧气顶吹转炉炼钢工艺与设备. 北京: 冶金工业出版社, 2009

吕亚(1985-), 男, 助理工程师, 2006 年太原理工大学毕业, 转炉炼钢工艺。