

# 厚渣层铁浴熔融还原炼铁工艺的静态模型

何奕波, 李承志, 魏 国, 邹宗树  
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 提出了一种两步三段式厚渣层铁浴熔融还原炼铁工艺, 铁浴炉利用厚渣层保证反应器内球团矿的氧化区氧化放热与还原区还原的梯度隔离, 煤气改质炉提高煤气利用率, 转底炉预还原匹配整个系统能耗最低。依据物料平衡与能量平衡的原理, 建立了该工艺的静态模型, 依据设定的工艺流程中各个环节的生产指标, 掌握了各个环节的物料消耗与能量消耗情况, 并与现阶段各种炼铁工艺进行了对比, 阐明了本工艺的特点与优势, 为该工艺的生产实践提供了参考。

**关 键 词:** 厚渣层; 两步三段式; 铁浴熔融还原法; 球团矿; 静态模型

**中图分类号:** TF 512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)05-0651-05

## Static Model of Iron Bath Smelting Reduction Process with Thick Slag Layer

HE Yi-bo, LI Cheng-zhi, WEI Guo, ZOU Zong-shu

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Zong-shu, professor, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A two-step three-segment iron bath smelting reduction process with thick slag layer was proposed. The thick slag layer in the smelting reduction vessel was adopted to ensure the separation between the oxidation exothermic of oxidation zone and the reduction of reduction zone. The use of gas reforming furnace improved the gas utilization rate, and the use of rotary hearth furnace pre-reduction matched energy consumption of whole system to be lowest. Based on the material balance and energy balance principle, a static model of the process was established. According to all set aspects of process in production, the mass consumption and energy consumption were obtained and compared with other ironmaking processes to clarify the characteristics and advantages of the present process, which could provide a reference to the production practice.

**Key words:** thick slag layer; two-step three-segment; iron bath smelting reduction; pellet; static model

熔融还原法是以非焦煤为主要能源, 在高温熔态下进行铁氧化物还原并得到热态铁水的工艺<sup>[1]</sup>。熔融还原法在国内的发展并不顺利, 熔炼炉主要难题是如何同时保证反应器内氧化区与还原区的分离以及熔池上部热量的有效回传, 提高能量利用率, 降低煤耗<sup>[2-3]</sup>。利用厚渣层使熔化及还原过程在渣层中完成的厚渣层铁浴熔融还原工艺为这些问题提供了解决方案。本文欲建立该种工艺的静态模型, 从物料平衡与能量平衡的计算

出发, 考察工艺的物料与能量消耗, 为新工艺的付诸实践提供参考, 以期在熔融还原炼铁工艺开发的道路上另辟蹊径。

## 1 厚渣层铁浴熔融还原工艺设计

厚渣层铁浴熔融还原炼铁法一贯式流程如图1所示。矿粉经过混合后, 在造球机中造球, 球团经过预热达到转底炉入炉温度后, 在转底炉中进

行预还原,得到一定金属化率的球团,直接投入厚渣层铁浴反应器中进行熔炼.铁浴炉煤气经改质炉改质后输送回转底炉进行循环利用,转底炉烟气的能量在换热装置中预热富氧热风与球团矿,生产过程中产生的粉尘还可以作为球团生产的原料加以回收,铁浴炉渣也可进行进一步回收利用.

本文设计的厚渣熔融还原炼铁工艺反应器模

型如图 2 所示.反应器采用三层侧吹喷枪的设计,上部喷枪处于熔渣上部,喷吹纯氧与反应器中产生的 CO 气体发生二次燃烧的反应,将热量传回熔渣;中层喷枪喷吹煤粉与氧气,提供球团熔化所需要的热量;下层喷枪也喷吹煤粉与氧气,除了提供球团中铁氧化物还原所需的碳以外,根据需要喷吹氧气,为铁水熔池提供必要的热量.

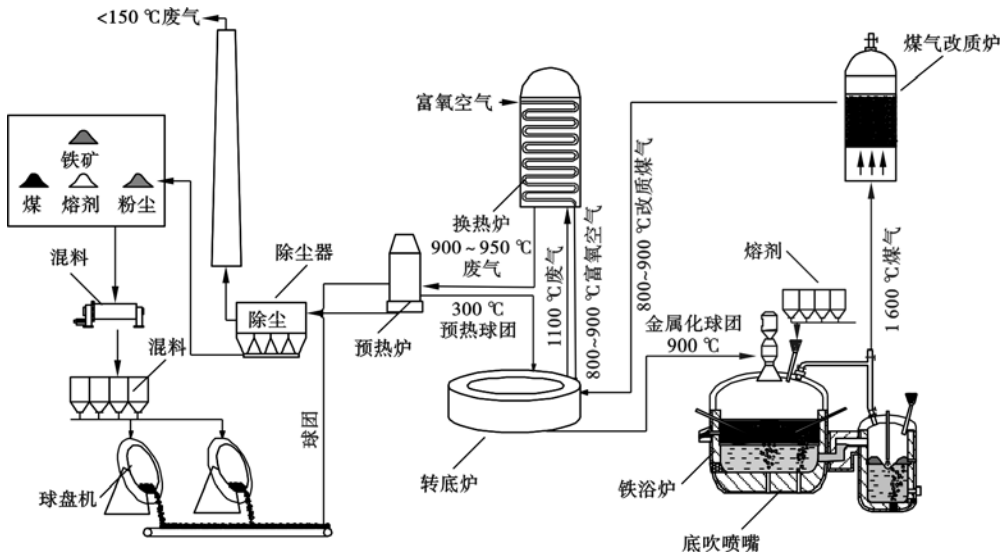


图 1 厚渣层铁浴熔融还原工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of thick slag smelting reduction process

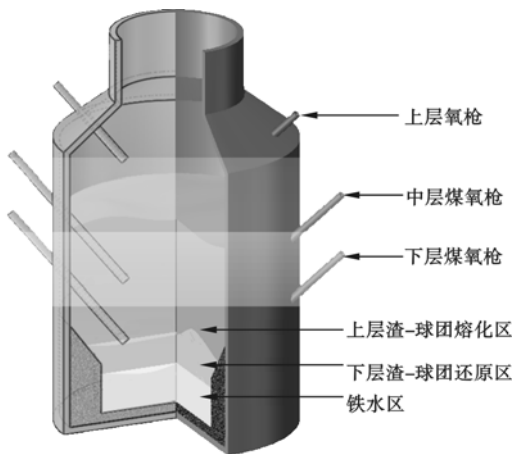


图 2 厚渣层铁浴熔融还原反应器

Fig. 2 Iron bath smelting reduction vessel with thick slag layer

2 厚渣层铁浴熔融还原工艺静态模型

2.1 转底炉物料平衡与热平衡

以厚渣层铁浴还原工艺使用球团矿的金属化率为 80% 为例,根据物料平衡与热平衡的原理,对转底炉的物料与能量消耗进行了计算,转底炉

工艺计算结果如表 1,表 2 所示.

表 1 转底炉物料平衡计算表

Table 1 Mass balance of rotary hearth furnace

kg·t <sup>-1</sup>			
物料输入	值	物料输出	值
铁矿粉	1 177. 18	金属化球团	1 000. 00
膨润土	30. 58	烟气	1 942. 98
煤粉	321. 05		
富氧热风	1 280. 34		
煤气	133. 91		
合计	2 014. 23	合计	2 013. 13

表 2 转底炉热量平衡计算表

Table 2 Heat balance of rotary hearth furnace

kg·t <sup>-1</sup>			
热量输入	值	热量输出	值
生球显热	295 479. 23	还原反应	3 602 906. 72
富氧热风	1 067 060. 78	烟气	2 407 362. 22
煤气燃烧	1 010 716. 17	球团显热	779 838. 70
煤气显热	131 433. 75	热损失	1 699 051. 71
二次燃烧	5 081 436. 07		
挥发分燃烧	909 132. 54		
合计	8 495 258. 53	合计	8 489 159. 34

由计算可知,生产 1 t 金属化球团,转底炉排出 1 100 ℃ 的烟气 1 942. 98 kg,所含热量

2 407 362. 22 kJ;将富氧热风加热至 800 ℃,炉料预热至 300 ℃,共需要热量 1 362 540. 01 kJ. 若采用竖炉预热炉料、气-气管式换热器预热富氧空气,并保证预热设备的平均换热效率不小于 60%,则烟气热量便可以满足预热设备的需求,实现能量的循环利用.

生产球团过程中使用的煤气是来自铁浴炉煤气的改质气,也实现了能源的循环利用. 还原后球团金属化率为 80%,温度为 1 100 ℃,即使在运送过程中有热量的损失,也能够满足铁浴炉的入炉要求.

2. 2 铁浴炉物料平衡与热平衡

厚渣层冶炼需要在反应器开始冶炼之前,预先将高炉生产出的铁水与高温熔渣装入反应器作为冶炼基础物料,然后开始喷吹加料进入冶炼流程. 渣层厚度应该考虑多方面的因素来决定,例如应考虑渣层的渣浴熔池必须具备足够大的热容,在冷球团或预热球团投入到熔池中时,熔池可以维持温度在熔点以上,以保证熔渣的流动性;其次熔渣要保证一定的厚度,既能保证球团在熔渣中充分熔化还原,又能保证氧化区域与还原区域的分离. 冶炼过程采用连续出铁排渣的工艺,冶炼条件如表 3 所示.

表 3 厚渣层铁浴反应器基本冶炼条件  
Table 3 Basic parameters of SRV with thick slag layer

参数	值	参数	值
球团入炉温度/℃	900	铁水温度/℃	1 400
炉渣温度/℃	1 550	炉顶煤气氧化度/%	55
氧气纯度/%	100	炉渣二元碱度	1. 25
炉顶煤气温度/℃	1 600	渣中 FeO 质量分数/%	4
四元碱度	1	热损失/%	10

基于厚渣层冶炼的特点,铁水温度与熔渣温度设定相差 150 ℃,冶炼过程中喷吹纯氧气,利于煤粉与煤气快速充分燃烧,而 55% 的炉顶煤气氧化度也保证了较高的二次燃烧率,为球团的熔化还原提供热量. 炉渣碱度与高炉设定一致. 依据物料平衡与热量平衡的原理,对冶炼过程中的物料以及能量消耗进行了计算,结果如表 4、表 5 所示.

表 4 铁浴炉物料平衡计算表 Table 4 Mass balance of SRV			
物料输入		物料输出	
值	值	值	值
入炉球团矿量	1 223. 06	铁水质量	1 000. 00
熔剂量	273. 00	炉渣质量	364. 33
煤粉量	295. 50	产生煤气质量	842. 17
纯氧质量	392. 80	其他	9. 00
其他	33. 09		
合计	2 217. 45	合计	2 215. 50

表 5 铁浴炉热量平衡计算表 Table 5 Heat balance of SRV			
热量收入项		热量支出项	
值	值	值	值
球团显热	825 608. 92	铁水显热	1 249 797. 10
碳燃烧热	4 078 737. 27	渣显热	415 975. 67
氢燃烧热	808 552. 48	煤气显热	1 756 650. 97
成渣热	194 528. 88	反应吸热	1 875 713. 33
		热损失	590 742. 75
合计	5 907 427. 55	合计	5 905 665. 88

由表中可以看出,反应器生产 1t 铁水,产生炉渣 364. 33 kg,携带显热换算成标煤为 14. 21 kg,炉渣余热可以使用水淬或者干淬的方法回收,用于供暖或者预热原料,假设热量回收率为 50%,对于年产 45 万 t 的铁水产量,相当于 3 197 t 标煤热量的回收,具有相当好的经济效益.

2. 3 煤气改质炉物料平衡与热平衡

铁浴炉产生的煤气温度达到 1 600 ℃,假设设计这样的改质炉,可以将铁浴炉产生的煤气直接通入装有还原剂的改质炉中,使其充分地反应直到达到平衡,还原过程所需的热量仅来自煤气自身携带的显热,根据物料与能量守恒的原理,计算出改质前后的煤气成分变化、反应物料平衡与热平衡,计算结果如表 6~表 8 所示.

表 6 降温改质前后煤气成分对比(体积分数) Table 6 Comparison of chemical composition before and after gas reforming( volum fraction) %						
煤气成分	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
改质前	39. 22	37. 69	15. 44	4. 25	2. 40	1. 00
改质后	55. 19	24. 70	3. 94	14. 17	2. 00	0

表 7 降温改质物料平衡计算表 Table 7 Mass balance of gas reforming			
物料输入	值	物料输出	值
改质前煤气	840. 92	改制后煤气	898. 92
碳	57. 52		
合计	898. 44	合计	898. 92

铁浴反应器生成的 1 600 ℃的高温煤气经改质后,温度降为 711 ℃,还原度升高到 71%. 冶炼 1 t 铁水所产生的煤气经改质后,共有 898. 92 kg,虽然温度较转底炉使用的煤气略低,但经过换算,转底炉煤气用量仅为 164 kg/t,剩余煤气可以作为储备,也可以直接用于发电,使能源得到充分利用. 另一方面,也应适当调整参数以减少煤气输出.

表 8 降温改质热平衡计算表  
Table 8 Heat balance of gas reforming  $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$

热量输入	值	热量输出	值
改质前煤气	1 565 612.85	改制后煤气	775 134.85
		反应吸热	686 600.02
		热损失	103 877.99
合计	1 565 612.85	合计	1 565 612.86

综上,铁浴炉生产流程中,每生产 1 t 铁水,工艺总能耗折合标煤为 465.40 kg,能够循环回收的能量包括转底炉烟气回收热量折合标煤 46.55 kg,铁浴炉炉渣回收热量折合标煤 7.11 kg,煤气改质炉回收热量折合标煤 26.48 kg,共计 80.14 kg 标煤,相当于工艺总能耗的 14.39%。

### 3 综合能耗分析对比

为了对工艺进行分析对比,将工艺流程中的各个环节综合起来,以生产 1 t 铁水为标准,折算了整体的物料消耗与能量消耗,并与 COREX, HISMelt, 高炉等炼铁工艺进行比较<sup>[4-10]</sup>,结果如表 9 所示。

表 9 各工艺物料消耗与能耗对比  
Table 9 Comparison of mass and energy consumption among various processes

工艺	COREX	HISMelt	BF	本文模型	最大差
矿石	1 464	1 500	1 782.93	1 439.76	-343.17
煤粉	980	650	528.34	745.68	+234.32
氧气	528	985.19	492.79	862.58	+369.79
熔剂	344	140	24.16	303.58	+279.42
能耗*	597.88	444.14	343.84	465.40	-132.48

\* ce - coal equivalent, 1 kg 标准煤的低位热值为 29 270 kJ。

本文工艺与 COREX 的铁矿石用量基本接近,相对较少,高炉原料中有烧结矿,脉石成分较高。HISMelt 由于其工艺原因,顶部高压氧枪在吹炼过程中穿透渣层,容易使铁水发生二次氧化,降低铁水收得率,因此,即使使用铁精粉,其矿粉用量也比较高。

非高炉炼铁工艺与高炉最大的差别就是无需使用焦炭,因此煤比相对较高, COREX 炉顶煤气还原度高,几乎没有二次燃烧的反应,热量主要来源于煤粉的燃烧,因此在非高炉工艺中, COREX 煤耗最高,本文工艺与 HISMelt 工艺煤耗相当。

氧气的消耗与炉顶煤气氧化度直接相关, COREX 炉顶煤气氧化度约 30%, Hismelt 约 75%, 高炉煤气约 45%, 本文工艺转底炉烟气氧

化度 100%, 铁浴炉煤气氧化度为 55%, 综合考虑再与其他工艺对比,可以知道,氧气消耗随着煤气氧化度的提高而增大。

熔剂用量与矿石品位、终渣碱度有关, HISMelt 使用的是铁精矿粉,渣量最少, COREX 与本文工艺使用球团矿或块矿,熔剂量较为接近,高炉炉料使用烧结矿,本身含有大量脉石成分,因此熔剂用量最少。炼铁流程熔渣碱度大都向高炉看齐,除了后续工艺对熔渣碱度有特别需求外,一般与高炉渣相差不大,对熔剂量基本无影响。

由表中工艺总能耗的数据可以知道,高炉是能耗最低的炼铁工艺,但高炉焦炭的生产需要消耗大量的能量,并且污染相当严重。非高炉工艺中 HISMelt 能耗最低,本文工艺居中, COREX 最高。与 HISMelt 相比,本文提出的厚渣层工艺,原料不需要使用铁精粉,在冶炼过程中不仅将氧化与还原区域分隔开来,而且侧吹氧煤枪对渣层的搅拌也改善了冶炼的动力学条件,同时也能适应原料条件的多变,能耗相对较低,在实际炼铁操作中更具实用价值。

### 4 结 语

本文提出了一种两步三段式厚渣层铁浴熔融还原炼铁工艺,建立了该工艺的静态模型,设定了工艺流程中各个环节的生产指标,掌握了各个环节的物料消耗与能量消耗情况,并与现阶段各种炼铁工艺进行了对比,阐明了本工艺的特点与优势,为该工艺的生产实践提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] Fruehan R J. Iron bath smelting-current status and understanding[C]//Elliot Symposium Proceedings. Boston, 1990:1-10.
- [2] Kadrolkar A, Roy S K, Sen P K. Minimization of exergy losses in the COREX Process[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2012, 43(2):173-185.
- [3] Li Y L, Li H B, Wang H, et al. Smelting potential of Hismelt technology for high-phosphorus iron ore and ilmenite[C]//2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. Changsha, 2011:1283-1286.
- [4] 项钟庸, 银汉. 高炉生产效率的评价方法[J]. *钢铁*, 2011, 46(9):17-21.  
(Xiang Zhong-yong, Yin Han. Evaluation method on productive efficiency of ironmaking in blast furnace[J]. *Iron and Steel*, 2011, 46(9):17-21.)

(下转第 684 页)