

太阳能光伏非碳高温冶炼实验及能量研究

吴华峰¹ 李士琦¹ 袁海伦^{1,2} 钱刚³ 朱荣¹ 王玉刚¹ 韩建军¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 中信重工机械股份有限公司,洛阳 471039;
3 湖北新冶钢大冶特殊钢股份有限公司,黄石 435001)

摘要 提出了“太阳能光伏非碳冶金”的概念,根据研究需要,确定了其实验系统构成及参数,设计制造了1 kg公称容量的实验炉。进行了“太阳能光伏非碳冶金”高温冶炼实验,确定了工艺参数,并进行了冶炼过程物料和热量的衡算。实验结果表明,所设计的系统满足冶炼要求,有较好的稳定性及可操作性。通过焓的计算可知太阳能光伏技术利用是一个将其自身焓值提高的过程。

关键词 太阳能光伏 非碳冶金 高温熔炼 物料衡算 能量衡算 焓计算

A Study on Non-Carbon Smelting Experiment and Process Energy at High Temperature by Solar Photovoltaic Technology

Wu Huafeng¹, Li Shiqi¹, Yuan Hailun^{1,2}, Qian Gang³, Zhu Rong¹, Wang Yugang¹ and Han Jianjun¹

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 CITIC Heavy Industries Co Ltd, Luoyang 471039; 3 Daye Special Steel Corp Ltd, Hubei Xinyegang, Huangshi 435001)

Abstract A new concept of “non-carbon metallurgy by solar energy photovoltaic technology” is proposed, according to the research requirement its experimental system structure and parameters are defined and 1 kg-capacity experimental furnace is designed and manufactured. With defined process parameters and balance-calculated charging mass and heat energy in smelting process, the high temperature smelting test of “non-carbon metallurgy by solar energy photovoltaic technology” has been carried out. Test results show that the designed system meets the requirement of smelting and has better stability and operability. With exergy calculation it is obtained that the utilization of solar photovoltaic technology is a process to increase itself exergy value.

Material Index Solar Photovoltaic, Non-Carbon Metallurgy, High Temperature Smelting, Mass Balance, Heat Balance, Exergy Calculation

现代钢铁工业的生产结构和技术结构都是建立在碳介质的基础之上,碳元素在钢的制造中有三方面的作用:一是合金元素,每吨钢用碳量约为10 kg;二是还原剂,每吨钢用碳量约为250 kg;三是燃料,每吨钢用碳量约为300 kg。按现行矿石-高炉炼铁-转炉炼钢的生产流程生产每一吨钢,相应产生温室气体2.0~2.2 t。按现行的废钢-电弧炉炼钢流程,每生产1 t钢,相应产生温室气体0.6~0.7 t(含火力发电)。当今,全球每年产钢量已逾13亿t,则年排放CO₂超过20亿t。

低碳经济已逐渐成为世界经济的发展潮流,世界经济历经工业化、信息化之后,正在走向“低碳化”。低碳经济是以低能耗、低排放、低污染、高效益为特征的新的发展模式,其核心内容包括:低碳产品、低碳技术、低碳能源或无碳能源的开发和利用。低碳技术涉及到电力、交通、建设、冶金、化工、石化等多个行业。

太阳光辐射能是人类已知的能源中最清洁,也

是最丰富的能源^[1]。每年达到地面的太阳能总量折合成标准煤共约 1.892×10^8 亿t,是目前探明主要化石能源储量的万倍。因此通过光伏技术使阳光辐射能量用于冶金,可有效实现钢铁工业低碳化^[2]。

1 太阳能光伏非碳高温冶炼概念

1.1 “太阳能光伏非碳冶金”概念

“非碳冶金”的含义是在冶金过程中不使用含碳介质为燃料和还原剂,但不排除其他少量的,如合金化、电极、耐火材料等碳素的消耗,因而不是完全的“无碳”过程,而是“非碳冶金”过程。从更广泛的意义而言,现行的钢铁冶金生产工艺中使用碳素还原剂和燃料,实际上是使用数千万年前光合作用“固化”的太阳能的载体,而在冶金过程中将这些积累的能量快速释放,与此同时,参与了自然界的碳循环,由于温室气体的排放速率极大超过“固碳”速率,于是形成大气中CO₂的蓄积。所以,现行的冶金工艺其根本也是在使用“太阳能”,只不过其中使用碳素为载体,以含碳物质为介质,具有数以千万公

里计、数以千万年计的极大极长的时空尺度^[3]。

借助于光伏技术直接由阳光获得电能,一方面由电能得到炼钢所必须的1 600 ℃高温;另一方面,任何一种氧化还原过程其实质是电子的得失,由光伏效应获得的电子可以以多种形式参与铁氧化物的还原反应,可实现“非碳”的冶金过程。“太阳能光伏非碳冶金”是以电子为介质的“非碳冶金”过程,具有极短、极小的时空尺度。其研究包括高温冶炼、非碳还原介质的选择及还原-熔融3个方面,本文述及的是高温冶炼方面的研究。

1.2 高温冶炼

从某种意义讲,冶炼是一种以能量换取合格钢生产量的过程。冶炼能耗用于合格钢水的物理热-有用能量 380 kWh/t_钢或1 368 MJ/t_钢;合格钢水与杂质的分离-冶炼操作耗能;可利用的余热-物理余热和化学余热;热损失。

太阳能光伏非碳高温冶炼即是研究利用太阳能光伏效应进而获得冶金用以熔化金属所需高温和能量;由此,也将带来一系列新的冶金原理和工艺技术问题。太阳能光伏非碳高温冶炼工艺是以普通冷废钢为原料,通过冷炉料的升温、熔化获得液态粗钢炼钢。太阳光辐射能资源的不连续性与炼钢高温过程的持续能量集中供给之间的匹配与协调是冶炼过程成功实现的核心问题;其难点在于系统的能量匹配,电压、电流、功率的整合。

2 实验炉设计及制造

太阳能光伏非碳高温冶炼实验在北京科技大学进行,能量的源头来自阳光日照。北京市位于北纬39°56',东经116°20'地区,年散射辐射量的历年平均值为2 413 MJ/m²,年直射辐射量的历年平均值为2 944 MJ/m²,北京太阳能日辐射量为15 261 kJ/m²,转换成标准光强下的平均日辐射时数,北京平均标准日照时间为4.24 h。

由于各种客观条件的限制,将所研制“太阳能光伏非碳冶金”实验炉公称容量定位为1 kg,技术核心是整个系统的能量匹配与整合。废钢转化成1 600 ℃钢液所需的理论能量约为0.38 kWh/kg^[4]。结合有关资料的能量衡算,经核算,设计确定了“太阳能光伏非碳冶金”实验炉系统构成及其主要参数如下。(1)机械系统:由立柱、横臂、拆卸式夹持器、横臂升降传动装置(微型直流电动机、蜗轮蜗杆减速机、联轴器、皮带轮)等组成。(2)电气系统:由光伏矩阵、控制柜、光伏控制器、储能蓄电池组、软电

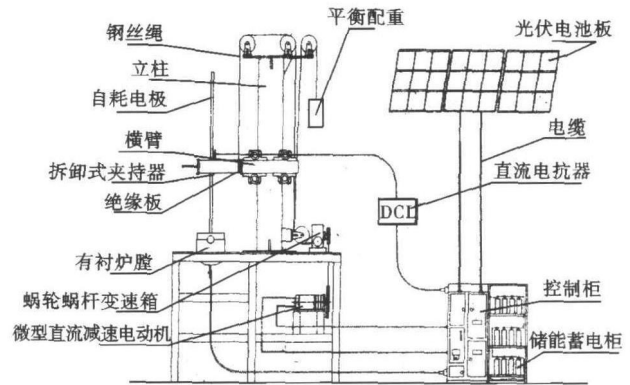


图1 太阳能非碳冶金实验炉

Fig. 1 Test furnace for non-carbon smelting by solar photovoltaic technology

缆、直流电抗器、直流调速控制系统、测量仪表等组成。(3)反应器:有衬炉膛。“太阳能光伏非碳冶金”实验炉如图1所示。

太阳能光伏非碳冶金实验炉从技术构成看,可分为4个单元:光电转换、蓄能、配电控电和电热转换;从工作特点看分为蓄能系统和释能系统两部分。蓄能系统主要包括太阳能电池板的光电转换和蓄电装置的电能-化学能转换两个过程;释能系统包括蓄电装置的化学能-电能转换和反应器的电-热转换两个过程;控制器控制两个系统协调工作。该实验系统^[5]与通常冶炼系统^[6-9]不同,它与动力电网不搭接,是一个完全独立的能量体系,炼钢过程的能量全部来自于太阳能光伏效应。

3 高温冶炼实验

(1) 实验过程。试验中碳钢(%:0.45C、

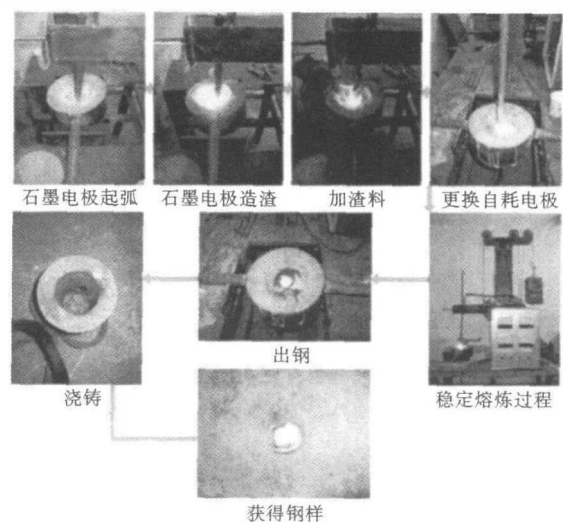


图2 太阳能非碳冶金实验炉冶炼过程

Fig. 2 Smelt process of test furnace for non-carbon smelting by solar photovoltaic technology

0.27Si、0.65Mn、 $\leq 0.035P$ 、 $\leq 0.035S$)的高温冶炼过程分为准备期、造渣期和熔炼期 3 个阶段。冶炼过程采用恒电流方式进行熔速控制。电流控制通过调节电极的进给速度来实现。光伏非碳高温冶炼实

表 1 3 次熔炼过程的工艺参数
Table 1 Process parameters of three smelts

| 熔炼号数 | 三元渣系组成/% | 渣量/g | 自耗电板直径/mm | 工作电压/V | 工作电流/A | 获得钢锭质量/g |
|------|---|------|-----------|--------|-----------|----------|
| 1# | CaO: CaF ₂ : SiO ₂ = 60: 30: 10 | 100 | 14 | 21 | 110 ~ 130 | 235 |
| 2# | CaO: Al ₂ O ₃ : CaF ₂ = 42: 28: 30 | 200 | 16 | 23 | 150 ~ 170 | 327 |
| 3# | CaO: Al ₂ O ₃ : CaF ₂ = 42: 28: 30 | 100 | 16 | 22 | 180 ~ 190 | 373 |

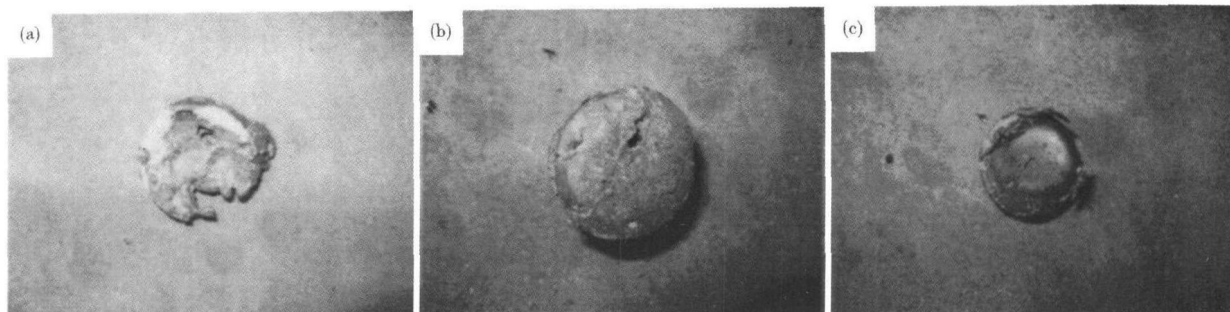


图 3 3 次冶炼所获得钢锭: (a) No1; (b) No2; (c) No3
Fig. 3 Ingots obtained by three smelt; (a) No1; (b) No2; (c) No3

验过程如图 2 所示。

(2) 实验结果。典型的 3 次“太阳能光伏非碳冶金”实验试炼共得到钢锭 3 块, 质量分别为: 235、327、373 g, 3 次熔炼过程的工艺参数如表 1 所示, 获得钢锭实物图如图 3 所示。

太阳能光伏非碳高温熔炼实验从热试到获得较为理想的钢锭, 经历了多次工艺参数的调整。经多次实验, 确定的冶炼工艺参数如表 2 所示。

4 物料和能量衡算

对冶炼过程进行物料和能量衡算, 首先将冶炼过程的各物料变量和热化学变量分为 3 大类, 即: 输入变量、输出变量和工艺变量, 如图 4 所示。

物料收入项包括: 废钢量、空气消耗量。

物料支出项包括: 金属量、炉渣量、炉气量、烟尘量。热收入项包括: 物料带入物理热、元素氧化热、成渣热、电能消耗。热支出项包括: 钢水物理热、炉渣物

表 2 太阳能非碳冶金实验工艺参数
Table 2 Process parameters for test of non-carbon smelting by solar photovoltaic technology

| 项目 | 参数 | |
|------|-----------|---|
| 渣池 | 渣系组成/% | CaO: Al ₂ O ₃ : CaF ₂ = 42: 28: 30 |
| | 渣量/% | 25 |
| | 工作电压/V | 22 |
| 电参数 | 工作电流/A | 180 |
| | 输入功率/kW | 6 |
| | 自耗电板尺寸/mm | D = 16; L = 400 |
| 几何尺寸 | 炉膛尺寸/mm | D = 48; H = 65 |
| | 炉膛深径比 | 1.35 |
| | 工作时间/min | 40 ~ 60 |

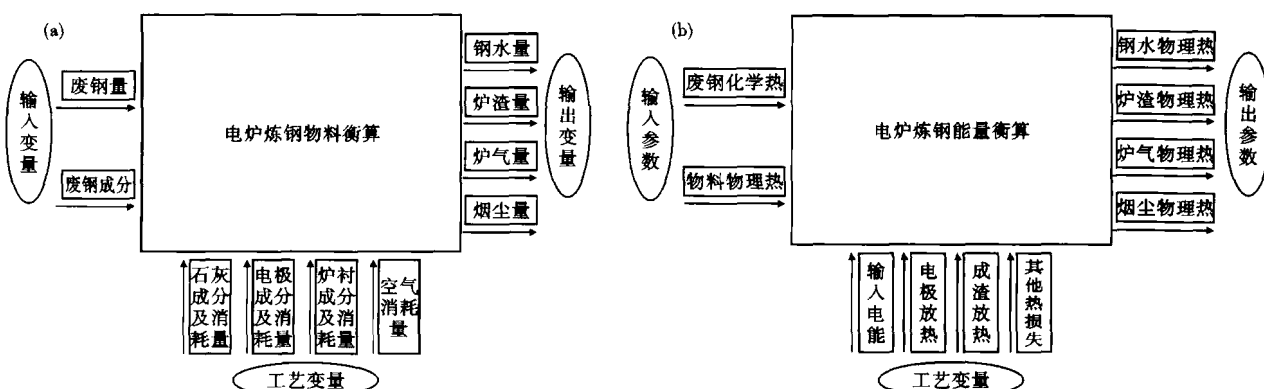


图 4 冶炼过程物料衡算(a)和热化学计量(b)层次分析
Fig. 4 Structure analysis on mass calculation (a) and heat chemistry calculation (b) in melting process

理热、吸热反应消耗的热量、炉气物理热、烟尘物理热、其他热损失。

(1) 物料衡算。物料衡算如表3所示。

(2) 能量衡算。能量衡算如表4所示。

表3 物料衡算表

Table 3 Charging and output mass balance schedule

| 收入 | | | 支出 | | |
|--------------------------------|-----------|-------|----|----------|-------|
| 项目 | 质量/g | 比例/% | 项目 | 质量/g | 比例/% |
| 废钢 | 1 000 | 82.43 | 金属 | 926.16 | 76.34 |
| 石灰 | 50 | 4.12 | 炉渣 | 160.17 | 13.20 |
| 萤石 | 36 | 2.97 | 烟气 | 76.24 | 6.28 |
| Al ₂ O ₃ | 34 | 2.80 | 烟尘 | 50.57 | 4.17 |
| 电极 | 0.2 | 0.02 | | | |
| 空气 | 90(0.07L) | 7.42 | | | |
| 炉衬 | 3 | 0.25 | | | |
| 合计 | 1 213.2 | 100 | | 1 213.14 | 100 |

表4 热平衡表

Table 4 Heat balance schedule

| 收入 | | | 支出 | | |
|-------|----------------------|--------|-------|-----------|--------|
| 项目 | 热量/J | 比例/% | 项目 | 热量/J | 比例/% |
| 炉料物理热 | 21 457 | 0.95 | 钢水物理热 | 1 266 417 | 55.90 |
| 氧化热 | 162 460 | 7.17 | 炉渣物理热 | 336 416 | 14.85 |
| 电能 | 2 081 646 (0.58°) | 91.88 | 炉气烟尘热 | 209 617 | 9.25 |
| | | | 其他热损失 | 453 113 | 20.00 |
| 合计 | 2 265 563 | 100.00 | 合计 | 2 265 563 | 100.00 |

(3) 焓衡算。目前焓值的确定,大多根据工程技术的需要,针对不同系统、不同状态及不同的运动形式采用不同的计算方法。当封闭系统只能和环境交换热量,且忽略动能、势能差时,其稳态稳流系统的焓(E_x)为: $E_x = (H - T_0S) - (H_0 - T_0S_0)$

式中: H_0 -环境基准焓/J; T_0 -环境基准温度/K; S_0 -环境基准熵/($J \cdot K^{-1}$)。

可以说从工程应用的观点看,焓确是一个用来描述热力学第二定律以及表征能质的理想参数,而焓分析法确实也在节能实践中发挥了其独特的作用。冶炼过程焓平衡表见表5。

表5 焓平衡表

Table 5 Exergy balance schedule

| 收入 | | | 支出 | | |
|-------|------------|-------|-------|---------|------|
| 项目 | 热量/J | 比例/% | 项目 | 热量/J | 比例/% |
| 废钢化学焓 | 234 897 | 2.34 | 钢水物理焓 | 993 251 | 9.89 |
| 电极化学焓 | 5 580 | 0.06 | 吸热反应焓 | 35 148 | 0.35 |
| 成渣焓 | 20 472 | 0.20 | 炉渣物理焓 | 248 041 | 2.47 |
| 电能焓 | 9 781 200 | 97.40 | 炉气物理焓 | 161 679 | 1.61 |
| | | | 电极物理焓 | 8 034 | 0.08 |
| 合计 | 10 042 149 | 100 | | | |

焓的利用系数为:

$$\eta = \text{钢水物理焓} / \text{焓总收入} = 993\,251.2 / (234\,897 + 2.442 \times 3\,600\,000) = 0.11$$

通过能量衡算,可以看出,太阳光辐射能是低热流密度的能源,利用光伏技术将其转换为高品质的能量,电能提高了其焓值,可以有效的实现能源利用。

5 结论

(1) 太阳能光伏非碳高温冶炼实验证明,钢铁冶炼可以实现不借助以碳为介质。其冶金学特征是钢的生产过程不涉及化石能源,以求碳的消耗和CO₂的排放最低;其技术特征在于太阳能光伏发电与炼钢过程的能量的集成匹配。

(2) 自主设计制造的“太阳能光伏非碳冶金”实验炉,经能量、功率、电压、电流的整合可以满足冶炼要求,并具有很好的稳定性和可操作性。

(3) 在冶炼顺行的条件下,进行了过程物料、能量和焓的平衡计算,确定整个过程能量利用效率。太阳能能量非常丰富,焓值很低。通过焓的计算可知,太阳能光伏技术利用是一个将其自身焓值提高的过程。

参考文献

- 赵玉文. 我国太阳能光伏产业发展形势和思考. 世界科技研究与发展, 2003, 25(4): 36
- 李士琦, 宋建新, 朱 荣, 等. 清洁能源炼钢前景的分析及探索. 钢铁研究学报, 2008, 20(7): 8
- 宋建新. 新疆巴州太阳能资源及其冶金应用探索研究: [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2007
- 李士琦, 张汉东, 陈 煜, 等. 废钢-电弧炉炼钢流程和循环经济. 特殊钢, 2006, 27(3): 4
- 李士琦, 胡 卫, 吴华峰, 等. 太阳能光伏炼钢探索性实验及思考. 中国冶金, 2008, 18(1): 5
- 朱应波, 宋东亮, 曾昭生, 等. 直流电弧炉炼钢技术. 北京: 冶金工业出版社, 1997
- 陈希春, 冯 涛, 傅 杰, 等. 电渣冶金的最新进展. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 62
- 孟繁德. 电渣重熔的设备选型和工艺选择. 上海钢研, 2000(2): 26
- 姜兴渭. 电渣炼钢-有衬电渣炉及其熔炼. 北京: 国防工业出版社, 1978

吴华峰(1980-), 男, 博士生, 清洁能源冶金和系统工程研究。

收稿日期: 2009-12-18