

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.05.10

# CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 混合喷吹对铁液中 C、V 元素氧化的影响

文 钢,王 雨,堵伟桐

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**为了验证用 CO<sub>2</sub> 替代部分 O<sub>2</sub> 进行转炉氧化提钒的可行性,在实验室进行了 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 混合喷吹提钒模拟实验。结果显示 C 的氧化量与 C 的氧化速率随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而升高;V 的氧化量随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而降低,其中 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 与纯 O<sub>2</sub> 对 C、V 的氧化量接近;纯 O<sub>2</sub> 喷吹时 C 的氧化量为 34.56%,V 的氧化量为 96.85%;CO<sub>2</sub> 含量为 20% 混合气体喷吹时 C 的氧化量为 36.83%,V 的氧化量为 93.29%;以 V 的相对氧化量与 C 的相对氧化量的比值( $\Delta V/\Delta C$ )来衡量提钒保碳能力,CO<sub>2</sub> 含量为 20% 的最终  $\Delta V/\Delta C$  为 5.96,CO<sub>2</sub> 含量,40%、60%、80% 的最终  $\Delta V/\Delta C$  均小于 3.8;反应前期,V 的氧化速率随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而升高,反应后期 V 的氧化速率随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而降低。

**关键词:**CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>;混合喷吹;C、V;氧化

**中图分类号:**TF741

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2015)05-066-07

## Effect of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> mixed injection on the oxidation of carbon and vanadium in vanadium-containing hot metal

WEN Gang, WANG Yu, DU Weitong

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P.R.China)

**Abstract:** To clarify the possibility of substituting part of O<sub>2</sub> with CO<sub>2</sub> during the vanadium extraction process in converter, the oxidation of vanadium-containing hot metal is carried out on a laboratory-experimental scale by using CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> gas mixture as oxidizer. The results show that both the oxidized carbon and oxidation rate of carbon in the hot metal are increased with increasing proportion of CO<sub>2</sub> in the gas mixture, while the amount of oxidized vanadium decreases with increasing proportion of CO<sub>2</sub>. The amounts of oxidized vanadium and carbon are comparable when the CO<sub>2</sub> proportion is 0 and 20% (volume percentage) respectively. The amount of oxidized carbon and vanadium is 34.56% and 96.85% respectively when the CO<sub>2</sub> proportion is 0, and the amount of oxidized carbon and vanadium is 36.83% and 93.29% respectively when the CO<sub>2</sub> proportion is 20%. The ratio of vanadium oxidation amount to carbon oxidation amount ( $\Delta V/\Delta C$ ) is adopted to evaluate the effectiveness of extracting vanadium. The  $\Delta V/\Delta C$  is 5.96 when the CO<sub>2</sub> proportion is 20%, and the  $\Delta V/\Delta C$  are all below 3.8 when the CO<sub>2</sub> proportion is 40%, 60% and 80%. The vanadium oxidation rate increases in the early reaction stage and decreases in the late reaction stage with increasing of CO<sub>2</sub> concentration.

**Key words:** carbon dioxide; mixed injection; vanadium and carbon; oxidation

**收稿日期:**2015-05-15

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51334001)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51334001).

**作者简介:**文钢(1988-),男,主要从事材料科学研究。

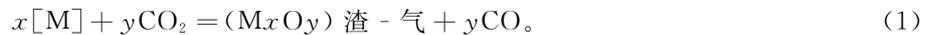
王雨(联系人),男,重庆大学副教授,主要从事材料科学研究,(E-mail)wangyu@cqu.edu.cn。

CO<sub>2</sub> 是温室气体,对生态环境有很大的影响。钢铁冶金过程要排放大量的 CO<sub>2</sub> 气体。因此开展对 CO<sub>2</sub> 的回收利用研究,对环境保护、节能降耗具有重要意义。通过化学的方法将 CO<sub>2</sub> 作为资源加以利用是一种非常理想的 CO<sub>2</sub> 减排途径,除了涉及到的环境效益以外,将 CO<sub>2</sub> 这种自然界大量存在的廉价碳源化合物转化为具有高工业附加值的产品亦能够带来可观的经济效益<sup>[1-5]</sup>,钢铁企业是 CO<sub>2</sub> 的排放大户,许多研究人员关注钢铁企业如何减排及 CO<sub>2</sub> 利用<sup>[6-7]</sup>,并且做了大量的研究工作<sup>[8-12]</sup>。目前氧气转炉提钒工艺已经很成熟。但是,转炉提钒中由于 Si、Mn、Ti、C、P、V 等元素的氧化,会致熔池温度升高,影响钒的提取效果。利用二氧化碳对元素氧化反应和吸热效应,降低熔池温度有利于提钒过程的进行,并且可以消耗部分钢铁行业排放的 CO<sub>2</sub>,是 CO<sub>2</sub> 在钢铁冶金中应用的一个新方向。为了验证用 CO<sub>2</sub> 气体替代部分 O<sub>2</sub> 进行转炉氧化提钒的可行性,在实验室进行了 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 混合喷吹提钒模拟实验。研究 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 混合喷吹条件下,铁液中 C、V 元素的氧化规律。

## 1 理论分析

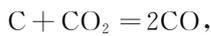
### 1.1 冶金热力学分析

CO<sub>2</sub> 作为氧化剂时与 O<sub>2</sub> 作为氧化剂时的氧化原理相似,铁水中 Fe、C、V 等元素被 CO<sub>2</sub> 氧化的途径亦应该有 3,且后 2 个反应与氧气做氧化剂时完全相同,不同的只有第一个反应,即被气相 CO<sub>2</sub> 直接氧化的反应不同,见式(1)

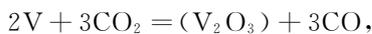


氧化产物(FeO)和(CO)所传递进入铁水中的[O],对铁液中各元素的氧化与氧气作为氧化剂时的后续反应是相同的。

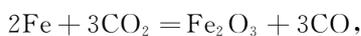
在标准状态下,铁水中各元素与 CO<sub>2</sub> 反应的方程见式(2)-(9)。



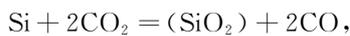
$$\Delta G^\theta = -0.1727T + 168.37, \text{kJ/mol.} \quad (2)$$



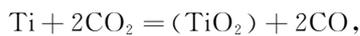
$$\Delta G^\theta = -0.0076T - 117.30, \text{kJ/mol.} \quad (3)$$



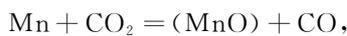
$$\Delta G^\theta = -0.0288T + 18.96, \text{kJ/mol.} \quad (4)$$



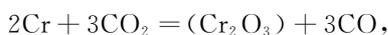
$$\Delta G^\theta = -0.0004T - 169.82, \text{kJ/mol.} \quad (5)$$



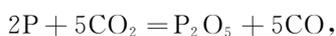
$$\Delta G^\theta = -0.0024T - 188.09, \text{kJ/mol.} \quad (6)$$



$$\Delta G^\theta = -0.0099T - 106.18, \text{kJ/mol.} \quad (7)$$



$$\Delta G^\theta = -0.0037T - 89.592, \text{kJ/mol.} \quad (8)$$



$$\Delta G^\theta = -0.0067T - 7.7951, \text{kJ/mol.} \quad (9)$$

根据热力学软件 Factsage 计算得出式(2)-(9)的标准生成自由能  $\Delta_f G^\theta$  与温度  $T$  的关系曲线见图 1。

根据热力学第二定律,从图 1 可以看出,在 700~1500 °C 的温度范围内上述各反应的标准生成吉布斯自由能均为负值,说明反应都可以正向进行。即用弱氧化剂 CO<sub>2</sub> 来氧化铁水中各种常见元素,在热力学上具备可行性。

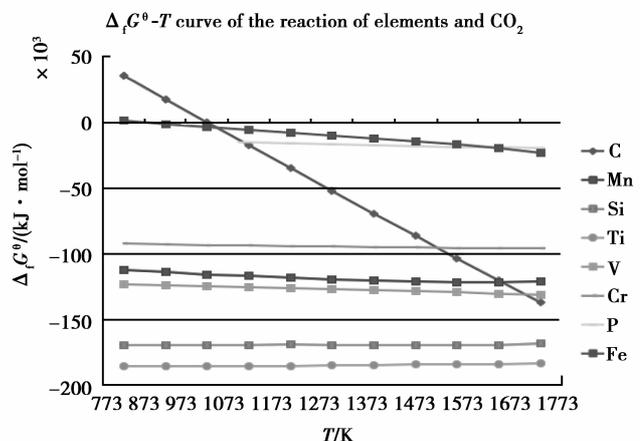


图 1 含钒铁水中常见元素与 CO<sub>2</sub> 反应的  $\Delta G^\theta$ - $T$  图  
Fig.1  $\Delta G^\theta$ - $T$  curve of the reactions of elements and CO<sub>2</sub>

## 2 实验研究

### 2.1 实验原料

实际工业生产中,含钒铁水氧化过程就是 C、V、Mn、Si、Ti、Cr、P、S 等元素的竞争氧化过程,实验主要对 C、V 的氧化过程进行研究。实验过程中采用含钒生铁成分如表 1 所示。

表 1 含钒生铁初始成分

Table 1 Composition of vanadium containing hot metal (%)

| 元素    | C    | V    | Si   | Mn   | P    | S    |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 质量百分数 | 3.53 | 0.69 | 0.08 | 0.40 | 0.22 | 0.05 |

实验过程模拟转炉喷吹过程,采用不同的氧气和二氧化碳比例进行实验所采用的氧气为工业纯氧,纯度为 99%;二氧化碳为工业纯二氧化碳,纯度为 99%,实验气氛为大气氛围。

### 2.2 实验方法

实验确定的氧气二氧化碳比例如表 2 所示。

表 2 O<sub>2</sub> 与 CO<sub>2</sub> 混合喷吹比例

Table 2 The proportions of the CO<sub>2</sub> in the CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixed gas

| 实验编号                 | 1  | 2  | 3  | 4  |
|----------------------|----|----|----|----|
| CO <sub>2</sub> 含量/% | 20 | 40 | 60 | 80 |

实验步骤如下:

- 1) 将 400 g 生铁块置于刚玉坩埚中,外套石墨坩埚,放入高温电炉内,至生铁完全熔化;
- 2) 当实验温度稳定为 1 340 ℃ 时,将刚玉喷吹管插入熔池进行喷吹,插入深度为熔池深度的一半,打开 O<sub>2</sub> 与 CO<sub>2</sub> 气阀,进行不同比例 O<sub>2</sub> 与 CO<sub>2</sub> 混合喷吹对铁水中钒的氧化过程,气体总流量控制为 0.6 L/min;
- 3) 用热电偶测量熔池温度的实时变化,并每隔 2~3 min 用石英管迅速吸取铁样,喷吹 9 min 后结束实验;
- 4) 实验过程中所取铁样经过制样后获得粉样,采用化学分析方法对所取铁样中 C、V 等元素进行含量分析。

### 2.3 实验设备

本实验装置图如图 2 所示。

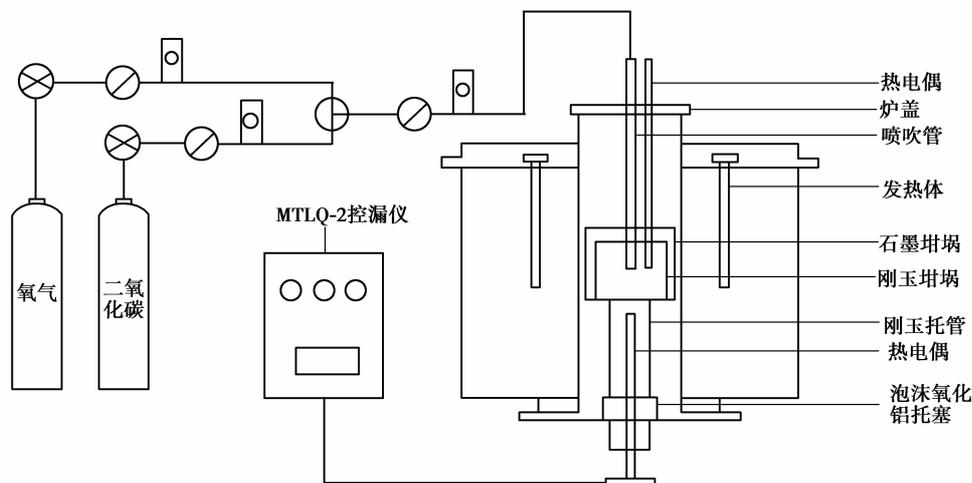


图 2 实验装置图

Fig.2 Schematic drawing of experimental apparatus

### 3 实验结果及分析

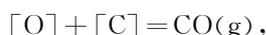
#### 3.1 不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下 C 含量随时间变化。

不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下碳含量随时间变化规律如图 3 所示。由图 3 可知不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下熔池中碳含量随时间延长不断降低,在实验进行到 5 min 时碳的氧化显现出平衡趋势。熔池中碳的氧化趋于平衡时,碳的氧化量随 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 喷吹比例升高而增大。当 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 时碳的氧化量为 9.3%, CO<sub>2</sub> 含量为 80% 时碳的氧化量达到 17%。由图所示曲线斜率的变化表示了碳的氧化速率,随 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 喷吹比例升高碳的氧化速率增大,达到平衡后氧化速率呈现趋于平衡不变的态势,即趋近于定值。随二氧化碳比例增加,碳氧化达到平衡所需时间变短。

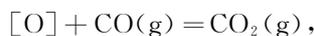
日本学者野村宏之<sup>[13-14]</sup>提出向铁液中喷入 CO<sub>2</sub> 含量较高的混合气体,铁液的脱碳反应受下列反应控制。



$$\Delta G^\theta = 34\,580 - 30.95T, \text{ J/mol.} \quad (10)$$



$$\Delta G^\theta = -17\,166 - 42.5T, \text{ J/mol.} \quad (11)$$



$$\Delta G^\theta = -161\,945 - 87T, \text{ J/mol.} \quad (12)$$

当用 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 混合喷吹铁液时,铁液中的碳的氧化量会随 CO<sub>2</sub> 分压的升高而迅速增大。

靳任杰<sup>[15]</sup>等通过实验得出结论 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 比例为 7:3 时脱碳速率最大,本实验结果显示,随二氧化碳分压增加,脱碳反应速率增加,脱碳速率在 CO<sub>2</sub> 含量为 80% 时达到峰值。由于实验的操作和分析方法的不同导致与其结果有一定的误差,但趋势基本与其结论相符。

#### 3.2 不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下 V 含量随时间变化

由图 4 可知,当 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 时,在喷吹终点 9 min 时,钒的氧化还没有达到动态平衡状态,喷吹时间延长钒含量呈现继续下降的趋势。但 CO<sub>2</sub> 含量为 40%、60%、80% 时钒的氧化在喷吹反应进行到 5 min 时显现出动态平衡的趋势,熔池中钒含量趋近定值。当钒的氧化达到平衡时,V 的氧化量随 CO<sub>2</sub> 含量升高而减小,截止到 9 min 时 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 的实验组 V 的氧化量大于 55% (本实验反应还未达到平衡),CO<sub>2</sub> 含量为 80% 的实验组 V 的氧化量仅为 27.4%。

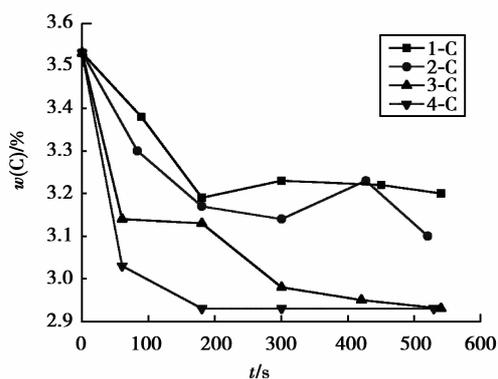


图 3 不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下 C 含量随时间变化

Fig.3 The [C] in molten iron changes

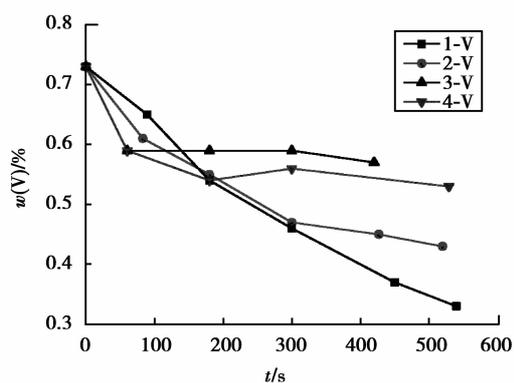
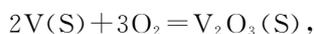


图 4 不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下 V 含量随时间变化

Fig.4 The [V] in molten iron changes

研究表明,V 的氧化受以下反应控制



$$\Delta G^\theta = -1\,202\,900 + 237.53T, \text{ J/mol.} \quad (13)$$



$$\Delta G^\theta = -440\,000 + 12\,526T, \text{ J/mol.} \quad (14)$$



由于  $O_2$  为强氧化剂,  $CO_2$  为弱氧化剂,  $V$  的氧化主要依照式(13)与式(15)进行。 $V$  的氧化量随  $O_2$  流量的增加而增加。因此  $V$  的氧化量随  $CO_2$  含量升高而减小。

### 3.3 不同 $CO_2$ 含量喷吹条件下 $V$ 的氧化速率随时间变化

如图 5 为钒的氧化速率随时间的变化图, 可知不同  $CO_2$  含量实验组的  $V$  的氧化速率随时间呈下降趋势。在反应进行到 2min 之前  $V$  的氧化速率会随  $CO_2$  含量升高而增大, 而后  $V$  氧化速率又随着  $CO_2$  含量升高而减小。 $CO_2$  含量为 20% 与纯  $O_2$  对  $V$  氧化能力接近。实验室实验对  $CO_2$  含量为 20% 与纯  $O_2$  对  $V$  氧化比较数据如表 3 所示。

表 3 纯  $O_2$  与 20%  $CO_2$  喷吹下 C、V 氧化率比较

Table 3 The oxidation rate of [V] and [C] when  $CO_2$  blowing proportion was 0% and 20%

| $CO_2$ 含量/% | C/%   | V/%   |
|-------------|-------|-------|
| 0           | 34.5  | 96.85 |
| 20          | 36.83 | 93.29 |

许多研究结果表明,  $[V]$  在铁液中的氧化特征可视为: 先与  $[Fe]$  反应生成  $(FeO)$ , 再由  $(FeO)$  与  $[V]$  反应形成  $(V_2O_3)$ 。 $[V]$  的氧化主要以反应式(14)-(16)进行。

反应过程由以下步骤组成

- 1)  $CO_2$  与  $O_2$  向铁液扩散;
- 2)  $CO_2$  与  $O_2$  与  $[Fe]$  反应;
- 3) 铁液中  $[V]$  向渣、铁界面扩散;
- 4) 渣中  $(FeO)$  向渣、铁界面扩散;
- 5) 渣铁界面反应;
- 6) 生成的  $(V_2O_3)$  离开界面向渣中扩散;
- 7) 生成的  $Fe$  离开界面向铁液中扩散。

由于气体喷吹速率相对较大, 因此可忽略步骤①的影响。由于在冶金中的高温反应中, 界面化学反应一般进行的很快, 不作为反应的限制性环节, 由此可忽略步骤②⑤。在反应期间, 由于  $[Fe]$  会先被氧化生成大量的  $(FeO)$ , 因此与  $[V]$ 、 $(V_2O_3)$  的扩散相比较步骤④可以忽略。 $[Fe]$  的含量很大其活度趋近于 1, 因此步骤⑦一般不作为限制性环节。通过以上分析可知钒的氧化速率由  $[V]$ 、 $(V_2O_3)$  的传质和  $CO_2$  与  $O_2$  的喷吹比例控制。

由于铁液中  $V$  含量随反应时间进行逐渐减小,  $V$  在铁液中传质通量减小。因此  $V$  的氧化速率整体呈下降趋势。反应前期, 由于  $C$  的氧化量随  $CO_2$  含量的升高而增大, 生成产物为  $CO$ , 因此生成较多的  $CO$  气体对铁液加强了搅拌从而增大了  $V$  与氧化剂在铁液中反应界面, 加快了  $[V]$ 、 $[V_2O_3]$  的传质速率。所以在反应进行到 2 min 之前  $V$  的氧化速率会随  $CO_2$  含量升高而增大。反应前期  $[V]$  的氧化主要由  $[V]$ 、 $(V_2O_3)$  的传质控制。当反应进行到 2 min 后时,  $[V]$  含量进一步降低, 到达反应界面的  $[V]$  也大大减少, 加强搅拌提高的  $[V]$ 、 $[V_2O_3]$  的传质速率已不能满足其反应的需要, 这时就需要有更多的具有强氧化性质  $O_2$  提供更多的  $[O]$  才能有机会与之反应。所以在反应进行到 2 min 之后,  $V$  氧化速率又随着  $CO_2$  含量升高而减小。反应后期  $[V]$  的氧化主要由  $CO_2$  与  $O_2$  的喷吹比例所控制。

### 3.4 不同 $CO_2$ 含量喷吹条件下 $\Delta V/\Delta C$ 氧化比例随时间变化

图 6 为不同  $CO_2$  含量喷吹条件下  $V$ 、 $C$  相对氧化量的比值与时间的关系, 该关系表征了不同  $CO_2$  含量

喷吹条件下去钒保碳的能力,由图可知 CO<sub>2</sub> 含量为 20%、40% 两组实验中  $\Delta V/\Delta C$  比例随反应的进行逐渐增大,CO<sub>2</sub> 含量为 60%、80% 两组实验  $\Delta V/\Delta C$  比例随反应的进行基本保持不变。 $\Delta V/\Delta C$  比例随 CO<sub>2</sub> 含量升高而减小,并且差距会随反应时间而逐渐拉大。CO<sub>2</sub> 含量为 20% 的最终  $\Delta V/\Delta C$  为 5.96,CO<sub>2</sub> 含量,40%、60%、80% 的最终  $\Delta V/\Delta C$  均小于 3.8。由此可见本实验中以 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 这组实验对提钒最有利,既有高的 V 的氧化率,又抑制了 C 的氧化,达到了提钒保碳的目的。

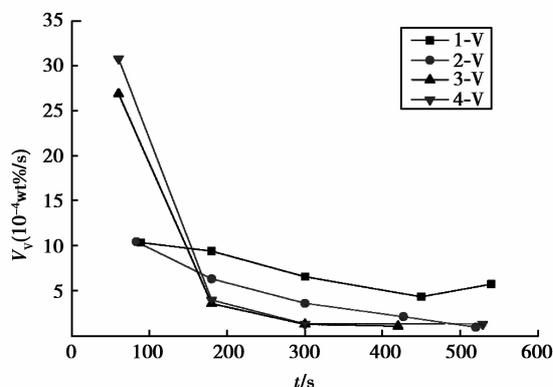


图 5 不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下 V 氧化速率随时间变化

Fig.5 The oxidation rate of [V] in molten iron changes when CO<sub>2</sub> blowing proportion from 20% to 80%

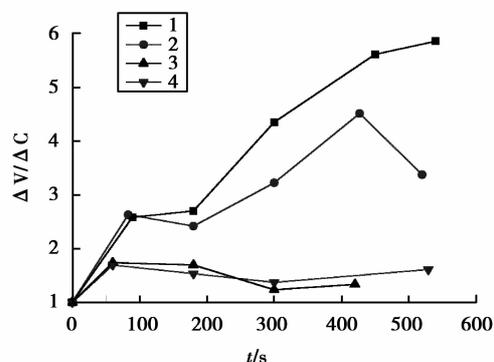


图 6 不同 CO<sub>2</sub> 含量喷吹条件下  $\Delta V/\Delta C$  氧化比例随时间变化

Fig.6 The  $\Delta V/\Delta C$  in molten iron changes

## 4 结 论

1) 经过理论分析与试验研究证明用 CO<sub>2</sub> 替代部分 O<sub>2</sub> 进行转炉提钒可行。

2) C 的氧化量与 C 的氧化速率随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而升高;纯 O<sub>2</sub> 喷吹时 C 的氧化量为 34.56%,CO<sub>2</sub> 含量为 20% 混合气体喷吹时 C 的氧化量为 36.83%。

3) V 的氧化量在 CO<sub>2</sub> 含量为 0~20% 时相对稳定;纯 O<sub>2</sub> 喷吹时 V 的氧化量为 96.85%,CO<sub>2</sub> 含量为 20% 混合气体喷吹时 V 的氧化量为 93.29%;反应前期,V 的氧化速率随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而升高,反应后期 V 的氧化速率随 CO<sub>2</sub> 含量的增加而降低。

4) 混合喷吹气体中随 CO<sub>2</sub> 含量的升高去钒保碳的效果越差,以 V 的相对氧化量与 C 的相对氧化量的比值( $\Delta V/\Delta C$ )来衡量提钒保碳能力,CO<sub>2</sub> 含量为 20% 的最终  $\Delta V/\Delta C$  为 5.96,CO<sub>2</sub> 含量为 40%、60%、80% 的最终  $\Delta V/\Delta C$  均小于 3.8。在本实验中混合喷吹气体 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 时去钒保碳的效果最好。因此利用 CO<sub>2</sub> 进行提钒时,其用量应合理控制。

### 参考文献:

- [1] 田恒水,李峰,陆文龙,等.发展二氧化碳的绿色高新精细化工产业链促进产业结构优化节能减排[J].化工进展,2010,29(6):977-983.  
TIAN Hengshui,LI Feng, LU Wenlong, et al. Development of green fine chemical industrial chain of carbon dioxide, promote industrial structure optimization of energy conservation and emissions reduction[J]. Chemical Progress, 2010, 29(6):977-983.(in Chinese)
- [2] Andrew P E Y, Xiao T C, Malcolm L H G, et al. Methane oxyforming for synthesis gas production[J]. Catalysis Reviews, 2007, 49(4):511-560.
- [3] Bradford M C J, Vannice M A.CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub>[J].Catal. Rev-Sci.Eng,1999,41(1):1-42.
- [4] Grimston M C, Karakoussis V, Fouquet R, et al. The European and global potential of carbon dioxide sequestration in tackling climate change[J]. Climate Policy, 2000, 1(2):155-171.
- [5] Wang K, Wang C, Lu X, et al. Scenario analysis on CO<sub>2</sub> emissions reduction potential in China's iron and steel industry[J]. Energy Policy, 2007, 35(4):2 320-2 335.
- [6] Hashimoto K, Yamasaki M, Meguro S, et al. Materials for global carbon dioxide recycling[J]. Corrosion Science, 2002, 44(1):371-386.
- [7] Worrell E, Price L, Martin N. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and

- steel sector[J]. Energy, 2001, 26(01):513-536.
- [8] Bo H. Cost effectiveness of measures for the reduction of net accumulation of carbon dioxide in the atmosphere[J]. Biomass & Bioenergy, 1998, 15(4):299-309.
- [9] Toshie T. Exploration and research of removal of molten silicon and carbon by blowing weak oxidation gas[J]. Tetsu-to-Hagane, 2008, (23):23-27.
- [10] Bi X R, Zhu R, Liu R Z, et al. Fundamental research on CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> mixed injection stainless steelmaking process[J]. Steelmaking, 2012, 28(2):36-46.
- [11] Ning X J, Yin Z J, Cao Y I, et al. Experimental research on dust reduction in steelmaking by CO<sub>2</sub>[J]. Steelmaking, 2009: 41-49.
- [12] Zhu R, Yi C. Inner circulation research of steel making dust by COM I steel making process[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2010, 29(1):55-66.
- [13] 野村宏之, 森一美. 高炭素領域における溶鉄の脱炭反応機構に関する研究 [J]. 鉄と鋼, 1971(9): 1468-1473.  
YE Cunhongzhi, SENG Yimei. The mechanism of the decarburization when use carbon dioxide to the high carbon liquid iron [J]. Iron and Steel, 1971, 9: 1468-1473.
- [14] 野村宏之, 森一美. 低炭素領域における溶鉄の脱炭反応機構に関する研究 [J]. 鉄と鋼, 1972, 1: 30-40.  
YE Cunhongzhi, SENG Yimei. The mechanism of the decarburization when use carbon dioxide to the low carbon liquid iron [J]. Iron and Steel, 1972, 1: 30-40.
- [15] 靳任杰, 朱荣, 冯立新, 等. 二氧化碳-氧气混合喷吹炼钢实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(1):11-18.  
JING Renjie, ZHU Rong, FENG Lixin, et al. Experimental study carbon dioxide, oxygen mixed injection of steelmaking [J]. Journal of Beijing university of Science and Technology, 2007, 29(1):11-18. (in Chinese)

(编辑 侯 湘)

---

**(上接第 58 页)**

- [15] 高建军, 齐渊洪, 周渝生, 等. 氧气高炉炼铁技术分析[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(2):40-45.  
GAO Jianjun, QI Yuanhong, ZHOU Yusehng, et al. Oxygen blast furnace ironmaking technology analysis[J]. Journal of iron and steel vanadium titanium, 2012, 33 (2):40-45. (in Chinese)
- [16] 王成善, 时艳文, 李丹丹, 等. 全氧高炉炼铁工艺模拟分析[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(9):47-58.  
WANG Chengshan, SHI Yanwen, LI Dandan, et al. Full oxygen blast furnace ironmaking process simulation analysis[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37 (9):47-58. (in Chinese)
- [17] 刘炳南. 基于煤气化学能最大化利用的上部吹氧竖炉研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.  
LIU Bingnan. Research based on the gas chemical energy to maximize the use of oxygen blowing the top of the shaft furnace[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [18] 刘炳南, 李强, 冯明霞, 等. 基于煤气化学能最大化利用的上部吹氧竖炉静态模型[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(6): 691-694.  
LIU Bingnan, LI Qiang, FENG Mingxia, et al. Static model based on chemical energy to maximize the use of oxygen blowing the top of the shaft furnace gas[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2012, 34 (6):691-694. (in Chinese)
- [19] 王筱留. 钢铁冶金学: 炼铁部分[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.  
WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy, iron parts[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [20] Parisi D R, Laborde M A. Modeling of counter current moving bed gas-solid reactor used in direct reduction of iron ore[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 104(1):35-43.
- [21] Valipour M S, Saboohi Y. Numerical investigation of nonisothermal reduction of hematite using Syngas; the shaft scale study[J]. Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering, 2007, 15(5):487-507.
- [22] Rao Y K, Pichestapong P. Modelling of the MIDREX direct-reduction iron making process; mass transfer and virtual equilibrium at steady state[C]// XVth CMMI Congress, Johannesburg, 1994:81.
- [23] 沈春枝. 碳材料捕获燃烧后二氧化碳过程研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.  
SHEN Cunzhi. Carbon materials to capture the carbon dioxide after combustion process research[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

(编辑 张 莘)