

# 铌精矿配碳球团熔分过程与元素迁移试验研究<sup>①</sup>

马 壮<sup>1,2,3</sup>, 赵增武<sup>1,2,3</sup>, 郭文涛<sup>1,2,3</sup>

(1.内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 2.内蒙古科技大学 白云鄂博共生矿资源高效综合利用省部共建协同创新中心, 内蒙古 包头 014010; 3.内蒙古科技大学 白云鄂博共生矿废弃资源综合利用国家地方联合工程研究中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 以白云鄂博铌精矿及半焦粉为原料, 使用高温热台原位观察碱性对配碳球团还原产物熔分过程的影响。在不同熔分条件下对最佳碱度的样品进行淬火并制样, 采用 SEM-EDS 分析熔分过程中元素迁移规律, 采用 XRD、同步热分析仪以及 ICP 相结合定量分析了熔分过程中 Nb、Si 元素反应率。结果表明: 二元碱性为 1.0 时能够有效抑制熔分过程中渣液喷溅现象并提高熔分效果。在碱性 1.0 条件下, 1 350 °C 时渣中 SiO<sub>2</sub> 在渣金界面发生还原反应并进入铁相, 1 400 °C 保温 2 min 后在渣金界面上铁液中 C 优先与渣中铌氧化物发生还原反应生成 NbC。少量 NbC 溶入铁相, 其余大部分 NbC 将粒铁包裹形成滞留带, 阻碍渣金界面传质, 降低还原反应速率。1 400 °C 保温 10 min 后, Nb、Si 元素的反应率分别为 36% 和 1.7%。Ti、RE 元素在熔分过程中全程不参与反应。

**关键词:** 铌; 配碳球团; 还原; 碱性; 铌精矿; 原位观察; 熔分; 元素迁移

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.022

文章编号: 0253-6099(2023)01-0099-06

## Experimental Study on Melting Separation and Element Migration of Carbon-Containing Pellets of Niobium Concentrate

MA Zhuang<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Zengwu<sup>1,2,3</sup>, GUO Wentao<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Collaborative Innovation Center of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Exploitation of Bayan Obo Associated Mineral Waste Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** With Bayan Obo niobium concentrate and semi-coke powder as raw materials, effect of basicity on melting process of the reduction product of carbon-containing pellets was observed in situ by using a high temperature heat table. The samples with optimum basicity were quenched and prepared at different melting conditions. The migration rule of elements during the melting process was analyzed by SEM-EDS, and the reaction rates of Nb and Si in the melting process were quantitatively analyzed by XRD, TG-DSC and ICP. Results show that with the binary basicity of 1.0, the spattering of molten slag can be effectively suppressed and the melting efficiency can be improved. With the basicity of 1.0 and temperature of 1 350 °C, the SiO<sub>2</sub> in the slag is reduced at slag-gold interface and pulled into iron phase. After the molten slag is held at 1 400 °C for 2 min, the C in molten iron at slag-gold interface is preferentially reacted with the niobium oxide in the slag and reduced to NbC. A small amount of NbC is dissolved into the iron phase, and most of the remaining NbC is wrapped around the granular iron, forming a retention zone, which hinders the mass transfer at the slag-gold interface and reduces the reduction rate. After hot-holding at 1 400 °C for 10 min, the reaction rates of Nb and Si are 36% and 1.7% respectively. Titanium and rare earth are not involved in the reaction during the whole melting separation process.

**Key words:** niobium; carbon-containing pellets; reduction; basicity; niobium concentrate; in-situ observation; melting separation; element migration

① 收稿日期: 2022-09-01

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2018ZD07, 2020BS05016); 内蒙古重大基础研究开放课题(0406091701, 20140201); 内蒙古科技重大专项(ZDZX2018032)

作者简介: 马 壮(1989—), 男, 河北廊坊人, 博士研究生, 主要从事白云鄂博多金属矿产资源综合利用研究。

通信作者: 赵增武(1972—), 男, 山东东营人, 博士, 教授, 主要从事白云鄂博多金属矿产资源综合利用研究。

铌作为一种重要的战略资源,广泛应用于钢铁、超导、航空航天、原子能等工业领域,随着工业发展以及科技进步,世界对铌资源的需求量日益增加。白云鄂博矿作为我国重要的铁铌稀土共生矿,富含铌氧化物资源 382 万吨<sup>[1-2]</sup>,虽然铌资源储量大,但原矿中铌品位低、种类多、难分选,一直未得到有效利用。为了提高铌资源利用率,研究者针对低品位铌精矿特点,采用碳、氢气或硅铝合金作为还原剂,通过控制工艺参数(配碳比、温度、添加剂)进行选择还原-熔分,将铌元素富集进铁相得到低级铌铁,或富集进渣相再采用湿法浸出工艺进一步加工<sup>[3-8]</sup>。总体上看,火法工艺成熟度以及效率较高,但能耗巨大;湿法工艺存在腐蚀、挥发等问题,环境污染严重。

在火法制备低级铌铁的研究中,文献[9-11]模拟高炉冶炼富铌炉料,发现氧化铌在渣金界面处发生还原反应形成 NbC 滞留带,阻碍了铌元素从渣相进入铁相。产物 NbC 难以直接利用,降低了铌元素的回收率。随着科技进步,在粉末高速钢制备时克服了传统熔铸高速钢中碳化物偏析的问题,细小弥散的 NbC 阻碍再结晶后奥氏体晶粒长大,提高了钢材的硬度、热稳定性以及耐磨性<sup>[12-13]</sup>。将铌精矿配碳球团还原产物 NbC 与熔分后的铁相共同作为粉末高速钢的原料,不仅简化了工艺流程、提高了铌资源利用率,还提高了产品附加值。目前直接采用还原-熔分法处理铌精矿时渣金分离困难,熔渣容易喷溅,Nb、Ti、RE 等有价元素相际迁移规律不清晰。本文模拟转底炉工艺,对铌精矿配碳球团的熔分过程及元素相际迁移进行分析,为改进铌资源利用工艺提供依据。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

分析白云鄂博铌精矿化学成分可知,铌精矿中以铁氧化物为主,二元碱度( $m_{CaO}/m_{SiO_2}$ )约为 0.1,其中 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、CeO<sub>2</sub> 含量分别为 4.4%、6.7%、2.7%,还含有少量 CaF<sub>2</sub>。其余成分均小于 1%。本试验按照铌精矿主要成分,使用分析纯试剂配制铌精矿进行试验。由于铌精矿中二元碱度较低,试验通过调节碱度研究其对渣金分离过程的影响。不同碱度试验原料化学成分如表 1 所示。

表 1 不同碱度试验原料化学成分(质量分数) %

编号	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CeO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>
1	50.7	3.1	31.1	4.4	6.7	2.7	1.3
2	50.7	11.4	22.8	4.4	6.7	2.7	1.3
3	50.7	17.1	17.1	4.4	6.7	2.7	1.3

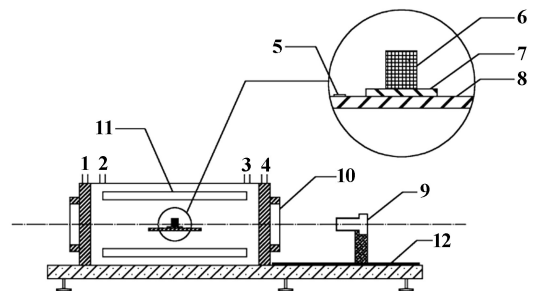
试验选用半焦作为还原剂,其化学成分见表 2。由表 2 可知,半焦粉固定碳含量较高而灰分及挥发分较低,适用于铌精矿直接还原。

表 2 半焦化学成分(质量分数) %

固定碳	灰分	挥发分	硫
84.68	5.51	9.81	0.4

### 1.2 主要试验设备与研究方法

为了研究碱度以及温度对配碳球团熔分过程影响,使用高温热台(Yonakura IR-QP)对料柱进行原位观察以及淬火工作。高温热台采用红外集光加热方式,将光源发出的红外辐射聚焦至试样处进行加热。配置的 CCD 相机通过石英窗实时观察料柱形貌变化。高温热台结构如图 1 所示。



1—出水口; 2—出气口; 3—进气口; 4—进水口; 5—热电偶;  
6—料柱; 7—BN 垫片; 8—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 垫片; 9—CCD 相机; 10—石英窗;  
11—卤素灯管; 12—滑轨

图 1 高温热台结构示意图

试验分为 3 部分:

1) 熔分试验。首先以样品的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中氧含量以及半焦中固定碳含量为依据,按照 C/O 物质的量比为 1.1 计算配碳量。之后按照表 1 配制出 3 种不同碱度的铌精矿,将 -74 μm 粒级占 95% 以上的半焦粉与分析纯药品称量混匀后配加适量黏结剂,使用冲压式模具(Φ3 mm×4 mm)压制成型,随后放入 110 °C 干燥箱中干燥 15 h。以 BN 片作为垫片承载料柱,将料柱分批装入高温热台加热腔。在氩气保护下以 200 °C/min 升温至 1 200 °C 保温 10 min 使球团充分还原,再以 100 °C/min 升温至 1 400 °C 保温 6 min 进行熔分,期间观察 3 种碱度配碳球团的熔分过程,确定熔分过程的适宜碱度。

2) 淬火试验。为研究熔分过程中有价元素迁移规律,使用高温热台,采用与熔分试验相同的升温制度对熔分试验确定的适宜碱度料柱进行加热,在升温阶段的 1 250 °C、1 300 °C、1 350 °C、1 400 °C 以及保温阶段的 2 min、4 min、6 min 时进行淬火,将淬火样品制样

后使用扫描电镜(Zeiss Supra 55)进行形貌观察与元素半定量分析。

3) 扩大试验。为定量分析熔分过程中 Nb、Si 元素的反应率,采用吊烧法进行扩大试验。分别配制 8 g 适宜碱度样品装入  $\Phi 24 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$  刚玉坩埚中,样品在氩气保护的管式炉中升温至  $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$  充分还原后吊入  $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$  保温的管式炉。待坩埚温度达到  $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$  开始计时,于保温 2 min、4 min、6 min、8 min、10 min 分别进行一次淬火,将淬火样品中熔分渣与铁粒进行物理分离。使用王水酸溶铁粒 24 h 后将未溶残渣过滤烘干,使用 X 射线衍射仪(Bruker Advance D8)鉴定残渣的物相,使用同步热分析仪(Netzsch STA 449 F3)在空气气氛中以升温速率  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  升温至  $600\text{ }^\circ\text{C}$  后对残渣与 NbC 粉分别进行热重试验,经分析后取同种残渣置于马弗炉,在空气中  $350\text{ }^\circ\text{C}$  下焙烧 5 h 提纯。对熔分渣进行 ICP(钢研纳克 Plasma 2000)定量分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 碱度对熔分过程的影响

使用高温热台沿水平方向观察不同碱度配碳球团在高温下的熔分过程发现:碱度影响熔渣喷溅程度以及渣金分离效果。在还原熔分过程中,反应产生的 CO 气体以气泡形式在样品自由表面长大至一定程度后破裂,破裂后液滴与液面塌陷时的垂直射流造成喷溅<sup>[14]</sup>。气泡破裂时临界半径越大,样品相对高度越高,渣液喷溅越严重。通过测定样品在各温度下相对高度来表征熔渣的喷溅性。将不同碱度球团在各温度条件下保温 10 min,对球团相对高度进行统计,结果见图 2。

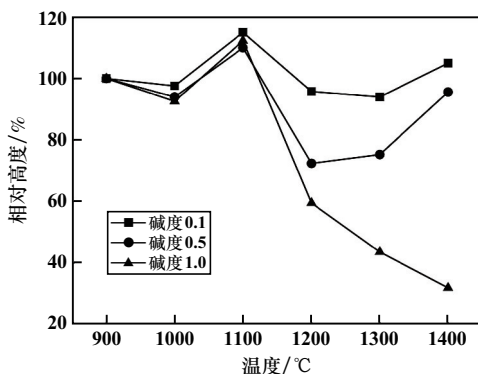
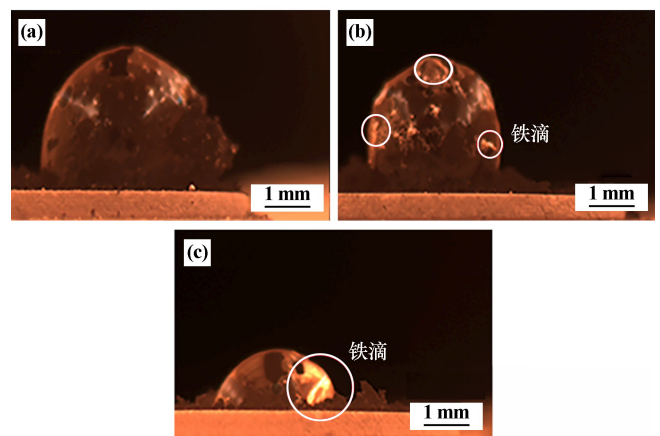


图 2 碱度对配碳球团相对高度的影响

由图 2 可知,3 种碱度配碳球团在  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时尚未烧结,样品保持原高度不变;待升温至  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$  时样品烧结,此时样品高度降低  $3\% \sim 8\%$ ;升温至  $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$  时,铁氧化物与碳迅速发生还原反应产生大量 CO 气体,

气体逸出至样品自由表面时受到低熔点熔渣阻碍形成气泡,样品相对高度增长约  $12\%$ ;在  $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$  烧结,铁氧化物与碳充分反应完成; $1\ 200 \sim 1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$  烧结时,碱度 0.1 及 0.5 的样品高度变化不大,而碱度 1.0 的样品高度不断降低; $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$  时还原反应产生的 CO 气泡在自由界面长大使得碱度 0.1 及 0.5 的样品高度迅速增高,而碱度 1.0 的样品高度继续降低。气泡临界半径主要由熔渣表面张力决定<sup>[15]</sup>。在本试验碱度范围内,硅酸盐熔体的聚合程度随碱度增大而降低,导致熔渣中离子平均粒径减小,阴阳离子间作用力增强,表面张力增大<sup>[16]</sup>。在气流量、密度相同的条件下,气泡内部气压需求增大,临界半径减小。气流逸出更加顺畅表现为样品高度降低,熔分过程中的喷溅现象得到有效抑制。

球团在  $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$  保温 4 min,碱度对渣金分离效果的影响如图 3 所示。碱度 0.1 的配碳球团渣金尚未分离,渣滴表面覆盖着部分黑色半焦粉,表面无法观察到明显铁滴;碱度 0.5 的配碳球团渣金基本分离,大部分铁滴聚集在熔渣底部,渣液表面尚有小部分铁滴尚未下落;碱度 1.0 的配碳球团渣金分离效果较好,全部铁滴在一侧底部团聚,渣液表面无铁滴存在。分析铁滴在渣液内部受力可知,铁滴在下落过程中主要受到重力、浮力、黏性力以及附加质量力,其中重力、浮力以及附加质量力主要由铁滴半径和渣铁密度决定;而在低雷诺数运动区间,黏性力主要由熔渣黏度决定<sup>[17]</sup>。在本试验碱度范围内,同样由于硅酸盐熔体的聚合程度随碱度增大而降低,熔渣黏度降低<sup>[18]</sup>,铁滴受到的黏性力减小,铁滴下沉速度加快,渣金分离效果得到有效提高。



(a) 碱度 0.1; (b) 碱度 0.5; (c) 碱度 1.0

图 3  $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$  保温 4 min 时碱度对渣金分离效果的影响

综上所述,合适的碱度可有效抑制渣液喷溅、提高渣金分离效果,因此添加适当的熔剂改变熔渣碱度对整个熔分过程有利。渣金熔分作为有价资源利用的中

间环节,应尽可能提高渣中有价资源品位。综合考虑,为了抑制渣液喷溅及提高有价资源品位,确定熔渣的适宜碱度为1.0。

## 2.2 熔分过程中元素迁移规律

为了研究熔分过程中配碳球团内部渣金形貌变化以及元素分布,进行了高温热台淬火试验。图4为升温过程中碱度1.0的淬火样品背散射图像。1 250 °C时样品内部存在大量还原后产生的黑色气孔,白色还原铁颗粒密布于气孔与灰色渣相界面;1 300 °C时气孔与渣变化不大,铁颗粒开始熔化并吞并周围铁滴形成大铁滴;1 350 °C时渣相开始熔化,铁滴与渣相作相对运动的同时发生团聚并长大;1 400 °C时部分铁滴沉至底

部,渣金出现分离。由元素面扫描图可知,在1 250~1 400 °C升温阶段,Fe元素主要富集在铁相中,而渣中无Fe元素存在。说明铁氧化物在1 250 °C时已被充分还原;Nb元素在渣相弥散分布;Si元素在1 300 °C以前富集在渣相中,1 350 °C时渣相流动增加了渣中SiO<sub>2</sub>与残余C的接触机会,在渣金界面处生成了溶于渗碳铁水的SiC。发生的化学反应如下:

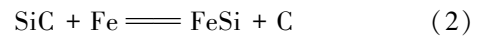
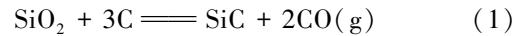
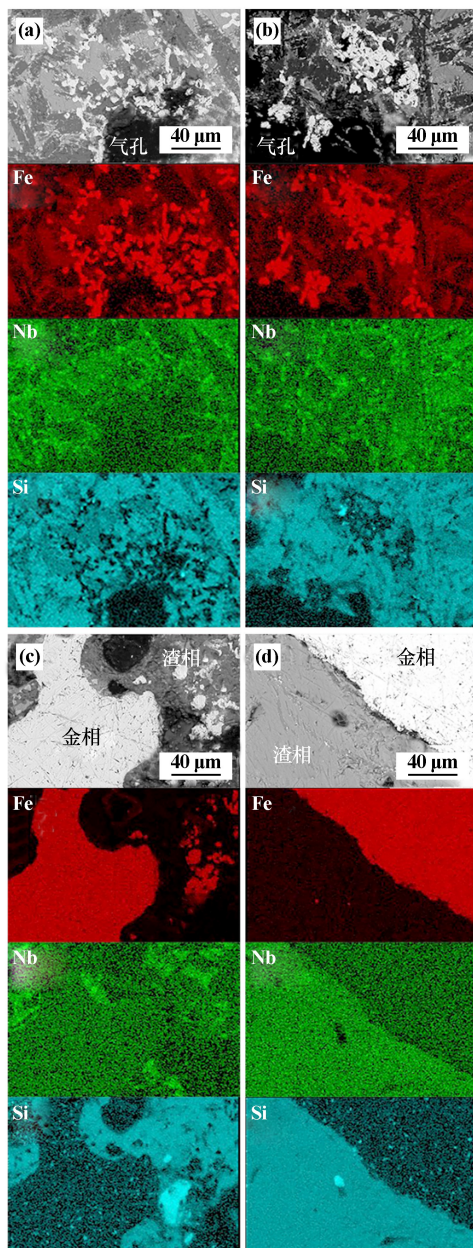
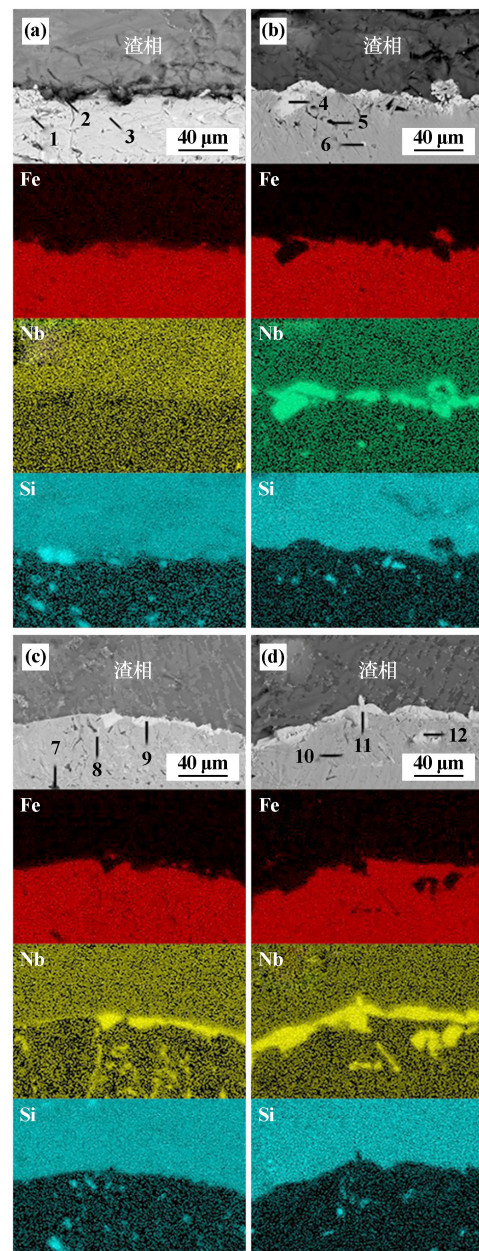


图5为1 400 °C保温过程中碱度1.0的淬火样品背散射图像。对渣金界面以及铁相内部进行了能谱分析,结果见表3。当温度刚达到1 400 °C时,渣铁界面



(a) 1 250 °C; (b) 1 300 °C; (c) 1 350 °C; (d) 1 400 °C

图4 升温过程中淬火样品背散射及元素面扫描结果



(a) 0 min; (b) 2 min; (c) 4 min; (d) 6 min

图5 1 400 °C保温过程中淬火样品背散射及元素面扫描结果

清晰,在渣铁界面处存在尚未溶入铁液中的 SiC, Nb 元素弥散在渣中尚未反应;由热力学计算可知:渣中铌氧化物与铁液中 C 在渣金界面处发生逐级还原反应。铌氧化物的还原顺序为  $Nb_2O_5 \rightarrow NbO_2 \rightarrow NbC$ 。保温 2 min 后,渣金界面处生成 NbC,部分 NbC 开始溶入铁液中;保温 4 min 后, NbC 大量聚集在渣金界面处,同时少部分 NbC 溶入铁液;保温 6 min 时,在渣金界面处存在一层较厚的 NbC 层。对保温 6 min 的样品进行面扫描,结果如图 6 所示。可知 NbC 已将铁液包裹,此时 Ce 元素与 Ti 元素依旧弥散在渣中,未参与反应。

表 3 配碳球团保温过程 EDS 能谱分析结果(原子分数) %

编号	Fe	C	Nb	Si
1	33.90	31.54	0	32.31
2	2.88	50.35	0	39.27
3	73.12	22.64	0	0.16
4	2.75	39.40	54.52	0.47
5	44.66	26.82	0	25.87
6	40.11	26.30	30.55	0.11
7	17.63	30.41	0	50.25
8	36.89	32.96	26.97	0.21
9	2.46	38.79	56.56	0.14
10	58.80	21.03	0	17.96
11	2.13	34.28	60.47	0.41
12	3.54	41.53	51.10	0.15

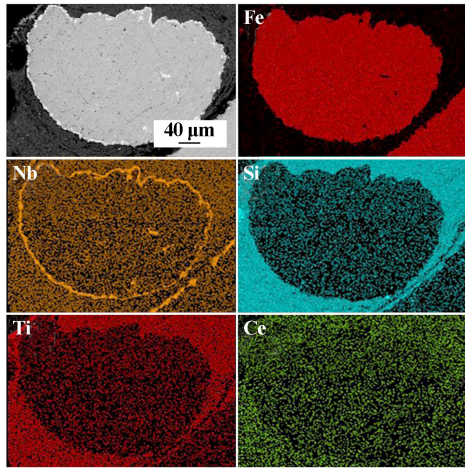


图 6 配碳球团 1 400 °C 保温 6 min 样品背散射及面扫描结果

### 2.3 熔分过程中 Nb、Si 元素反应率分析

为了定量分析熔分过程中 Nb、Si 元素随保温时间的反应率,取扩大试验淬火后样品进行渣金物理分离。由于渗碳铁液对 NbC 的浸润性强于渣相,冷却后 NbC 与铁相共同以铁粒形式与渣相分离。铁粒酸溶后仅余黑褐色外壳。将溶液过滤烘干后进行 XRD 鉴定,结果表明外壳由 NbC 与 C 共同构成。为了研究除碳的适宜温度,使用同步热分析仪研究 NbC 与 C 粉、纯 NbC

随温度的质量变化,结果见图 7。随着温度上升, NbC 与 C 的混合粉末被氧化,质量逐渐下降。当温度达到 378.8 °C 时已降为原质量的 73.70%;而 NbC 粉在温度低于 378.8 °C 时质量保持不变,不被空气氧化。将混合粉末在空气中于 350 °C 焙烧 5 h 后称量并进行 XRD 物相鉴定,焙烧前后 XRD 鉴定结果见图 8。XRD 结果证明焙烧后混合粉末中的 C 被氧化除去,仅有 NbC 剩余。此法可将铁粒中 NbC 取出并定量称量。

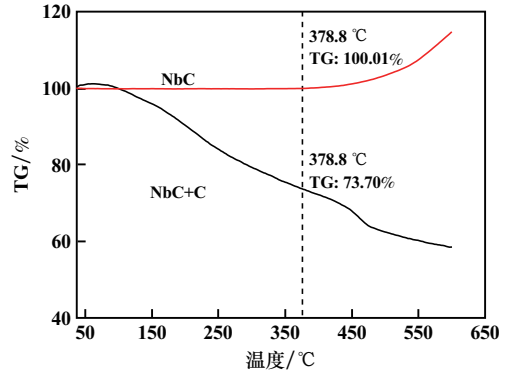


图 7 NbC 与样品的 TG 对比图(空气气氛)

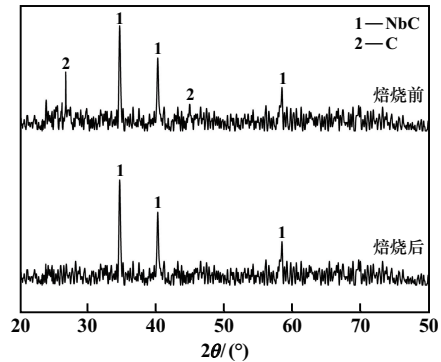


图 8 焙烧前后样品 XRD 鉴定图

将称量结果与熔分渣溶样后 ICP 定量分析结果汇总,可定量分析在熔分过程中 Nb、Si 元素随保温时间的迁移规律。保温时间对 Nb、Si 元素反应率的影响见图 9。由图可知,由于渣中  $SiO_2$  与渣中 C 反应的温度较低,

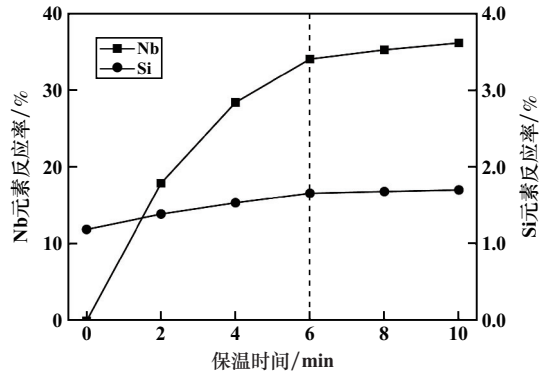


图 9 保温时间对 Nb、Si 元素反应率的影响

温度刚达到 1 400 ℃ 时已反应了 1.3%, 而 Nb 元素尚未参与反应。随后渣中 NbO<sub>2</sub> 与铁中 C 在渣金界面反应生成 NbC, NbC 的生成速率大于溶解进铁相速率, 因此在 6 min 时生成的 NbC 已将铁滴完全包裹, 阻碍渣金间传质进而限制 Nb 元素继续还原。在 1 400 ℃ 保温 10 min 时, Nb、Si 元素反应率分别为 36% 和 1.7%。

### 3 结 论

1) 通过添加熔剂 CaO 调节铌精矿配碳球团的碱度可有效抑制渣液喷溅、提高渣金分离效果, 合理的熔渣碱度为 1.0。

2) 在升温阶段 1 350 ℃ 时发现渣中 SiO<sub>2</sub> 与渣中残余 C 发生还原反应, 产物开始进入渗碳铁相。在 1 400 ℃ 保温 2 min 后渣金界面处有 NbC 生成, 除少量 NbC 溶入渗碳铁水外, 生成的 NbC 主要堆积在渣金界面形成致密外壳。

3) 渣金界面处致密 NbC 层阻碍了渣金界面传质, 降低了还原反应速率。1 400 ℃ 保温 10 min 后 Nb、Si 元素反应率分别为 36% 和 1.7%。Ti、RE 元素在熔分过程中不参与反应。

#### 参考文献:

- [1] 何海洋, 何敏, 李建武. 我国铌矿资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 1-5.
- [2] 刘玉宝. 浅议白云鄂博铌矿资源开发及展望[J]. 稀土信息, 2015(9): 30-31.
- [3] 孙林泉, 王丽娜, 于宏东, 等. 低品位含铌矿物中铌的提取工艺研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(4): 1847-1862.
- [4] 张诗瀚, 王广, 杜亚星, 等. 含钛铌铁精矿含碳球团熔分过程试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(3): 5-10.
- [5] 王广, 薛庆国, 宁晓宇, 等. 含碳球团还原熔分综合利用铌铁精矿新工艺[J]. 矿冶工程, 2014, 34(1): 65-69.
- [6] 李林, 郭汉杰, 孟祥龙, 等. 钛磁铁矿球团还原与熔分关系试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(3): 106-110.
- [7] 孙志杰, 魏国, 刘占华, 等. 铜渣球团还原-熔分工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(2): 103-106.
- [8] 张波, 姜茂发. 利用白云鄂博含铌尾矿制备铌铁工艺的研究[J]. 工业加热, 2011, 40(3): 56-59.
- [9] 何旭初, 范鹏, 周渝生, 等. 高炉中铌还原产生的碳化铌滞留带[J]. 北京科技大学学报, 1990, 12(6): 504-509.
- [10] 何旭初, 杨永宜, 董一诚. 富铌炉料还原冶炼时铌进入铁相过程的研究[J]. 湖南冶金, 1994(5): 8-12.
- [11] 何旭初, 范鹏, 杨天钧, 等. 提高高炉冶炼含铌铁矿铌回收率的研究[J]. 湖南冶金, 1990(4): 1-3.
- [12] 王宁. Nb 变质处理铸造高速钢的组织 and 性能[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(2): 68-71.
- [13] 卢林, 黄进峰, 侯院刚, 等. 铌对喷射成形 M3:2 型高速钢组织和性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(10): 1292-1298.
- [14] 程军明, 吴伟烽, 聂娟, 等. 气泡在静水中上升破裂产生射流特性的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 513-517.
- [15] Oratis A T, Bush J W M, Stone H A, et al. A new wrinkle on liquid sheets: Turning the mechanism of viscous bubble collapse upside down[J]. Science, 2020, 369: 685-688.
- [16] 高蕾, 罗剑, 闵义, 等. 碱度和温度对结晶器保护渣表面张力的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2015, 38(6): 408-411.
- [17] 杨宏博. 夹杂物穿越钢渣界面过程运动行为研究[D]. 北京: 北京科技大学冶金与生态学院, 2015.
- [18] MA Z, ZHAO Z W, GUO W T, et al. Influence of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and basicity on the viscosity and structure of CaO-SiO<sub>2</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-CeO<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub> slag system[J]. Metallurgical Research & Technology, 2020, 117(3): 307.
- [9] 张国成, 白晓光, 邬虎林, 等. 钢渣脱硫剂用于湿法石灰石-石膏法脱硫工艺的试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 647-653.
- [10] LI Z B, ZHAO S Y, ZHAO X G, et al. Cementitious property modification of basic oxygen furnace steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 575-579.
- [11] 谢雪珍, 叶有明, 黄小芳, 等. 改性甘蔗渣吸附剂的制备及其对废水中铬的吸附[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 166-169.
- [12] 张金矿, 黄业豪, 孙景敏, 等. 重金属污染土壤浮选修复方法概述[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 67-71.
- [13] 曹丰泽. MgO 膨胀剂的作用机理及在补偿收缩水泥基材料中的应用[D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2021.
- [14] 吴吉响, 冯博, 陈燕, 等. 粉煤灰-硅藻土复合材料对选矿废水中 Cr(VI) 的吸附行为研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4): 125-129.
- [15] 牟文宁, 辛海霞, 雷雪飞, 等. 表面改性对铁尾矿基复合材料吸水性能的影响[J]. 矿冶工程, 2018, 38(4): 139-143.
- [16] 韦武举, 徐金玉, 郑炳峰, 等. 基于不同陈化工艺的水泥稳定钢渣基层试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(6): 1169-1172.
- [17] 李婷婷, 张廷安, 吕国志, 等. 钛白废酸直接浸出含钒钢渣基础实验研究与机理分析[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 104-108.
- [18] 杜惠惠, 倪文, 高广军. 水淬高钛高炉渣制备 C40 固废混凝土试验研究[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24055-24060.
- [19] 郝帅, 罗果萍, 陈银胜, 等. 磷铝复掺对 C<sub>2</sub>S 晶型转变的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(9): 126-133.
- [20] Kaur Ubhi M, Kaur M, Singh D, et al. Hierarchical Nanoflowers of MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Bentonite and B-, P- Co-Doped Graphene Oxide as Adsorbent and Photocatalyst: Optimization of Parameters by Box-Behnken Methodology[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(17): 9678.
- [21] 刘佳文, 陈铁军, 周仙霖, 等. 基于无碳烧结的褐铁矿型红土镍矿固结机理研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(3): 1-7.

引用本文: 郝帅, 罗果萍, 陈银胜, 等. MgO 掺杂对高炉渣熔调质钢渣物相组成及结构的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 95-98.

(上接第 98 页)