花生壳还原提钒尾渣制备铬铁合金的试验研究

郭 锐[1]，周 密[1]，谢华清[1]，唐文博[1,2]，王征宇[1]，胡 鹏[2]
（1. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819；2. 攀钢集团研究院有限公司，四川 攀枝花 617000）

摘要：为解决目前提钒尾渣堆积造成的环境污染及资源浪费问题，实现固废资源化利用，本文将两种提钒尾渣按比例混合并添加花生壳作为还原剂在高温下进行还原，对还原产物进行 X 射线衍射、扫描电镜和化学定量分析，并对还原产物进行熔化分离，测定熔分产物的物相组成和化学成分。结果表明：花生壳还原提钒尾渣的最佳工艺参数下，吸氧比为 4，还原温度为 1 550 ℃，还原时间为 3 h；还原产物的物相组成主要为金属铁、金属铬、Cr_2O_3、碳化铬、铬铁合金、$NaCrS_2$、SiO_2、硅酸钙相；熔分所得铬铁合金中铬质量分数为 61.51%，铁质量分数为 31.05%，元素质量分数满足 FeCr65C4.0 牌号合金的国家标准要求。

关键词：提钒尾渣；生物质；还原；资源化利用；铬铁合金
中图分类号：TF09；TF557 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0116－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.092

Experimental research on preparation of ferrochrome by reducing vanadium tailings with peanut shell

GUO Rui[1], ZHOU Mi[1], XIE Huaqing[1], TANG Wenbo[1,2], WANG Zhengyu[1], HU Peng[2]
(1. *School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*; 2. *Pangang Group Research Insiture Co., Ltd., Panzhihua* 617000, *Sichuan, China*)

Abstract: In order to solve the problems of environmental pollution and resource waste caused by vanadium extraction tailings accumulation, and realize solid waste resource utilization, in this paper, two vanadium extraction tailings are mixed proportionally, and peanut shells are added as reducing agents to reduce at high temperature. The reduction products are analyzed by X-ray diffraction, scanning electron microscope and chemical quantitative analysis, and then melted and separated, and the phase composition and chemical composition of the melted products are determined. The results show that under the optimum technological parameters of reducing vanadium extraction tailings with peanut shells, the oxygen absorption ratio is 4, the reduction temperature is 1 550 ℃, and the reduction time is 3 h; The phase composition of the reduction product is mainly metallic iron, metallic chromium, Cr_2O_3, chromium carbide, ferrochrome, $NaCrS_2$, SiO_2 and calcium silicate phase. The mass fraction of chromium and iron in the melted ferrochrome is 61.51% and 31.05% respectively, and the element content meets the requirements of the national standard of FeCr65C4.0 alloy.

Key words: vanadium extraction tailings; biomass; redure; resource utilization; ferrochrome

钒钛磁铁矿是一种复合矿，含有的主要元素为铁、钒、钛、铬等。我国钒总产量的50%~60%是通过钒钛磁铁矿高炉炼铁—转炉炼钢吹钒工艺制备而成[1-2]，该工艺主要会形成两种废渣，分别为含有 30% 以上有价铁组分的水浸提钒废渣和含有 40% 以上的有价铬组分的沉钒废渣，其均具有较高的回收利用价值[3]。水浸提钒废渣和沉钒废渣统称为提钒尾渣，属于典

收稿日期：2022－10－11；**修回日期**：2022－11－02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52074081)；中央高校基本科研业务费资助项目(N2225043)
作者简介：郭 锐(1999—)，男，硕士研究生，从事固废资源化利用等研究。
通信作者：周 密(1987—)，男，副教授，从事矿物加工及冶金提取及资源化利用等研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型的矿产资源型固体废物[4]，目前这两种废渣的年产量可达到近百万吨，但其中大部分处于堆放处理[5]，不仅占用大量土地资源，带来严重的环境污染，还造成了废渣中有价金属资源的大量浪费。根据我国 2022 年 2 月发布的《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》，大宗工业固废综合利用率要求达到 57%，其中冶炼渣达到 73%，因此在固废政策和资源匮乏的双重影响下，提钒尾渣的资源化利用显得尤为重要。

生物质是一种可再生的碳基能源，具有资源丰富、低污染性和碳中性等优点，其来源广泛，包括农林废弃物、生活垃圾、制糖工业和食品工业的残渣等[6-7]。生物质由纤维素、半纤维素和木质素等构成，高温时会分解产生气态 CO、CH_4、H_2、液态焦油和固态生物炭等还原性物质，因此生物质在含铬废渣高温还原时可以作为还原剂使用[8]。此外生物质中的碳来源于植物光合作用吸收的大气中的二氧化碳，因此相较于煤等化石能源，使用生物质并不会向大气排放额外的二氧化碳，对于减少温室气体的排放，实现“碳中和，碳达峰”目标有重要意义。李恒等[9]对生物质松木锯末和烟煤焙烧还原赤泥进行了对比试验，并通过热力学、动力学分析揭示了松木锯末对赤泥的还原机理。李理等[10]选用核桃壳和紫茎泽兰秸秆作为还原剂对提钒废渣进行高温还原，结果表明：紫茎泽兰秸秆和核桃壳对提钒废渣均有较好的还原解毒效果。

我国是花生生产大国，年产花生壳约 520 万吨，但目前大部分仍用作饲料和肥料，附加值与利用率低[11]。基于上述情况，本文提出以花生壳还原提钒尾渣回收铁、铬有价金属。将水浸提钒废渣和沉钒废渣按比例混合形成混合渣，并选取花生壳作为还原剂均匀混入混合渣中，在高温条件下对混合渣中的有价金属进行还原，随后对还原产物通过熔化分离试验制备铬铁合金，以此对提钒尾渣进行资源化利用。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

（1）水浸提钒废渣和沉钒废渣。两种固废的实物如图 1 所示。其中，左侧黑色粉状固废为水浸提钒废渣，右侧墨绿色细小颗粒固废为沉钒废渣，均来自于河北承德某公司。两种固废的化学成分分析结果如表 1 所示。

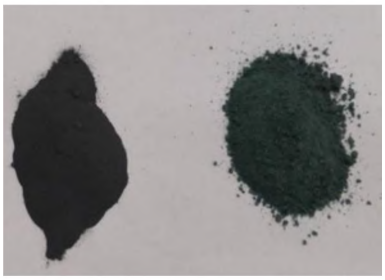


图 1　水浸提钒废渣和沉钒废渣

Fig. 1　The vanadium extraction tailing by leaching and the vanadium sediment tailing

表 1　水浸提钒废渣和沉钒废渣的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of the vanadium extraction tailing by leaching and the vanadium sediment tailing　　%

固废名称	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	Cr_2O_3	CrO_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	V_2O_5	$(NH_4)_2SO_4$
水浸提钒废渣	49.37	14.93	12.17	8.32	7.58	0.60	3.55	1.65	1.09	0.73	—	—	—
沉钒废渣	0.05	9.57	—	—	67.46	1.22	—	1.02	0.09	1.19	0.12	1.78	17.49

（2）生物质。实验所用生物质为花生壳。花生壳经过自然风干后，用粉碎机粉碎成颗粒状，其工业分析和元素分析结果如表 2 所示。

1.2　试验方法

试验所用原料分别为水浸提钒废渣、沉钒废渣和花生壳。为得到符合《铬铁》(GB/T 5683—2008)的 FeCr65C4.0 牌号合金，按照 Cr 在合金中质量占比为 65% 计算水浸提钒废渣和沉钒铬渣的试样用料配比，得到 m(水浸提钒废渣)∶m(沉钒废渣) = 1∶1.33。由于试验反应温

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 花生壳的工业分析和元素分析(质量分数)

Table 2 Industrial and elemental analysis of peanut shells %

工业分析				元素分析				
水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S
1.76	12.52	72.05	13.67	47.22	5.66	46.11	0.93	0.08

度下钛氧化物的还原反应难以发生，且原料中 MnO、V_2O_5、MgO 质量分数相对较少，因此只根据 Cr_2O_3、CrO_3、Fe_2O_3 与花生壳中对应 C、H 质量分数计算理论花生壳配入量。引入吸氧比，其定义如式(1)所示。即先计算花生壳中可用于还原反应的相对 C、H 原子的摩尔量之和，再除上两种废渣混合物中与 Fe、Cr 结合的氧原子物质的量。

$$\eta_{ACR}=\frac{M_C+\frac{1}{2}M_H-M_O}{M_{Fe_2O_3}+M_{Cr_2O_3}+M_{CrO_3}} \quad (1)$$

式中：η_{ACR}为吸氧比；M_C、M_H、M_O 分别为生物质中 C、H、O 元素的物质的量，mol；$M_{Fe_2O_3}$、$M_{Cr_2O_3}$、M_{CrO_3} 分别为渣中 Fe_2O_3、Cr_2O_3、CrO_3 中氧原子的物质的量，mol。

将沉钒废渣、水浸提钒废渣和花生壳分别用高速粉碎机磨细，并过筛到 0.045 mm 以下；将磨细后的各种原料按照吸氧比为 1、2、3、4 和 5，配入配料量准确称量，并利用高速粉碎机进行不同配料混匀；利用压力成型设备将混合配料压制成椭圆形球团，每个试样质量约为 6 g。压制成型球团的抗压强度与所用混合配料的吸氧比关系如图 2 所示。

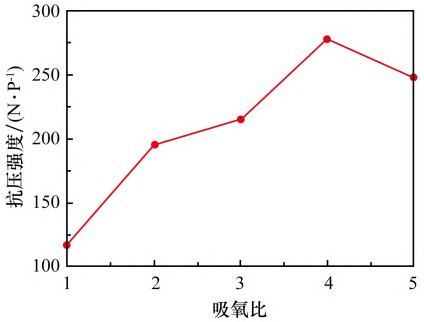


图 2 吸氧比对模压成型球团压力的影响

Fig. 2 The effect of AOR on pressure of pellets

将制备好的小球先放入具有耐急冷急热特性的刚玉坩埚中，再将刚玉坩埚放入石墨坩埚中，待炉内温度达到预设温度时，迅速将盛有球团的石墨坩埚放入炉内，给箱式炉设定好程序升温，待炉内温度达到预设温度时，迅速将盛有球团的石墨坩埚放入炉内进行还原试验。试验结束后，将球团取出冷却，磨细后进行 XRD 物相分析，选用国标法测定花生壳对水浸提钒废渣和沉钒铬渣中铁和铬的金属化率。本文采用金属化率用于直接评价还原结果，其定义如式(2)所示。

$$\rho=\frac{m_c}{m_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：ρ 为金属化率，%；m_c 为还原产物中该金属单质的质量，g；m_0 为提钒废渣被还原前(主要是金属氧化物)该金属元素的总质量，g。

最后对还原产物进行熔分试验，即可分离出渣相和金属相。熔分后对金属相进行 XRD 物相分析、SEM-EDS 分析并测定其各组分占比，对比国家铬铁合金牌号判断是否符合国家标准。

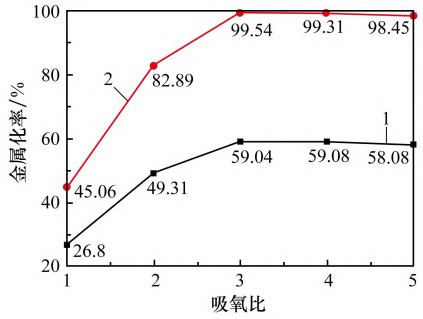
2 结果与讨论

2.1 吸氧比对还原过程的影响

当还原温度为 1 550 ℃、还原时间为 3 h 时，吸氧比对还原产物金属化率的影响如图 3 所示。由图 3 可知：随着吸氧比的增大，铁、铬金属化率均呈现先升高后降低的趋势，且下降的幅度较小。当吸氧为 1 时，反应试样中花生壳相对质量分数较少，造成提钒尾渣中铁氧化物、铬氧化物的还原不充分，因此铁、铬金属化率很低；随着吸氧比的增大，样品中花生壳质量分数增大，在热解过程中产生更多的还原性固定碳和热解气，使得还原反应进行得更充分。在吸氧比为 4 时，铁金属化率达到最大值 59.04%；在吸氧比为 3 时，铬金属化率达到最大值 99.54%。继续增大吸氧比到 5 时，金属化率反而呈现下降的趋势，这是因为吸氧比的增大也会带来更多的灰分，阻碍花生壳与废渣

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接触，使得金属化率稍有下降。

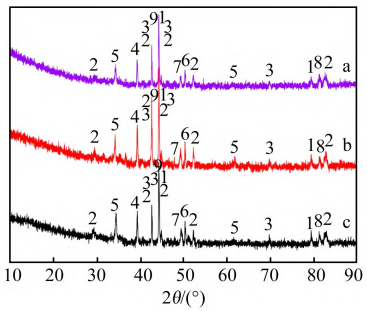


1—铁金属化率；2—铬金属化率。

图 3　吸氧比对还原产物金属化率的影响

Fig. 3　The effect of AOR on metallization rate of reduction products

不同吸氧比下还原产物的 X 射线衍射分析结果如图 4 所示。由图 4 可知，在吸氧比为 3 的条件下，还原产物的物相主要由金属铁(Fe)、金属铬(Cr)、Cr_2O_3、碳化铬(Cr_xC_y)、铬铁合金[$(Cr\text{-}Fe)_x$]、$NaCrS_2$、SiO_2、硅酸钙相[$Ca_x(SiO_2)_y$]组成。金属铁由废渣中的铁氧化物还原后生成。Cr_2O_3 是 $Cr(OH)_3$ 高温分解生成，铬氧化物(Cr_xO_y)和碳化铬(Cr_xC_y)为 Cr_2O_3 还原中间产物。$NaCrS_2$ 是还原过程中硫腐蚀金属铬生成，会对合金的性能产生不良影响，应尽量减少其生成[12]。SiO_2 和硅酸钙是灰分中的重要组分。当吸氧比从 3 增大到 4 时，铬氧化物、铁氧化物的还原反应进行得更充分，金属铁、金属铬、碳化铬、铬铁合金的衍射峰均增强，由于金属铬的增多也使得更多的铬被硫腐



吸氧比：a—3；b—4；c—5。

1—Fe；2—Cr_xO_y；3—$(Cr\text{-}Fe)_x$；4—Cr_2O_3；5—Cr_xC_y；6—$NaCrS_2$；7—SiO_2；8—$Ca_x(SiO_2)_y$；9—Cr。

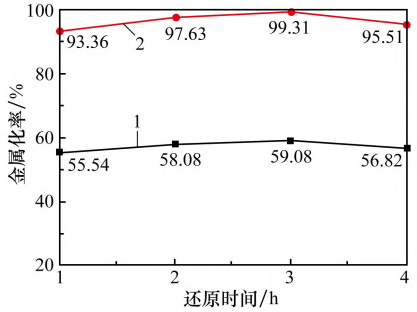
图 4　不同吸氧比下还原产物的 XRD 图谱

Fig. 4　XRD patterns of reduction products under different AOR

蚀，因此 $NaCrS_2$ 的衍射峰也增强。当吸氧比从 4 增大到 5 时，生物质配入量的增多也引起灰分的增多。过多的灰分阻碍还原反应的进行，因此金属铁、铬铁合金的衍射峰稍有减弱，铬氧化物的衍射峰稍有增强。综合吸氧比对还原产物金属化率和物相组成的影响，得到最佳吸氧比为 4。

2.2　还原时间对还原过程的影响

当吸氧比为 4、还原温度为 1 550 ℃时，还原时间对废渣还原后金属化率的影响如图 5 所示。由图 5 可知，提钒废渣的铁、铬金属化率随还原时间的延长均呈现先升高后降低的趋势。当还原时间为 3 h 时，铁、铬金属化率均达到最大值，分别为 59.08% 和 99.31%；当还原时间延长到 4 h 时，铁、铬金属化率稍有降低。这是由于当反应时间较短时，存在较多未被还原的铬氧化物和铁氧化物，随着还原时间的增加，还原反应进行得更充分，废渣的铁、铬金属化率升高；但当还原时间较长时，还原性物质固定碳、H_2 被消耗完全，还原后的金属铁和金属铬在高温条件下发生二次氧化，造成废渣的铁、铬金属化率降低，因此图中提钒废渣的铁、铬金属化率随还原时间的延长普遍呈现先升高后降低的趋势。



1—铁金属化率；2—铬金属化率。

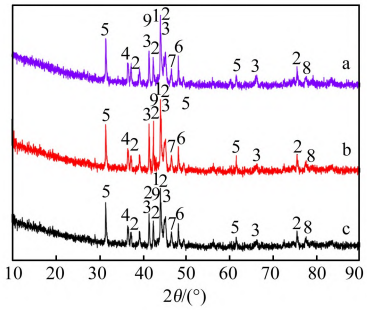
图 5　还原时间对还原产物的金属化率影响

Fig. 5　The effect of reduction time on the metallization rate of reduction products

不同还原时间下样品还原后，产物的 X 射线衍射分析结果如图 6 所示。由图 6 可知，当还原时间从 2 h 增加到 3 h 时，还原反应随着还原时间的延长而进行得更彻底，铬氧化物(Cr_xO_y)的衍射峰稍有减弱，金属铁、金属铬、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

碳化铬、铬铁合金的衍射峰稍有增强。继续将还原时间从 3 h 增加到 4 h 时，金属铁和金属铬发生二次氧化，因而金属铁、金属铬、铬铁合金的衍射峰下降。综合还原时间对还原产物金属化率和物相组成的影响，得到最佳还原时间为 3 h。



还原时间/h：a—3；b—4；c—5。

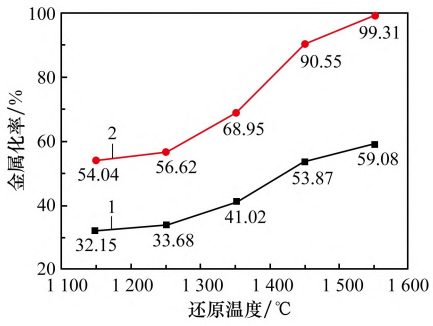
1—Fe；2—Cr_xO_y；3—$(Cr\text{-}Fe)_x$；4—Cr_2O_3；5—Cr_xC_y；6—$NaCrS_2$；7—SiO_2；8—$Ca_x(SiO_2)_y$；9—Cr。

图 6 不同还原时间下还原产物的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of reduction products at different reduction times

2.3 还原温度对还原过程的影响

当吸氧比为 4、还原时间为 3 h 时，不同温度下还原后废渣的金属化率如图 7 所示。由图 7 可知，提钒废渣的金属化率随还原温度升高呈现不断升高的趋势。当还原温度从 1 150 ℃升高到 1 550 ℃过程中，铁金属化率从 32.15% 升高到 59.08%，铬金属化率从 54.04 升高到 99.31%；当还原温度从 1 350 ℃升高到 1 450 ℃时，铁、铬金属化率升高幅度最大，铁金属化率从 41.02% 升高到 53.87%，铬金属化率从 68.95% 升高到90.55%。这是因为碳和H_2在实验温度



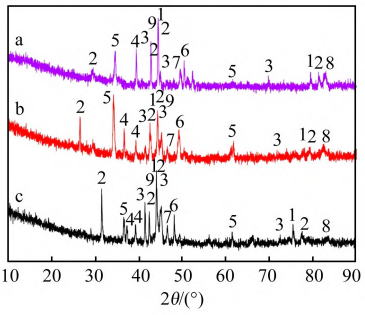
1—铁金属化率；2—铬金属化率。

图 7 还原温度对还原产物金属化率的影响

Fig. 7 The effect of reduction temperature on metallization rate of reduction products

下还原铁氧化物和铬氧化物的反应均为吸热反应，升高温度有利于还原反应的进行。另外，随着温度升高，生物质热解反应和热解气转换反应进行得更彻底，使得直接参与反应的还原性物质增多，同样有助于还原反应的进行。

不同还原温度下还原产物的 X 射线衍射分析结果如图 8 所示。由图 8 可知，在还原温度从 1 350 ℃升高到 1 550 ℃时，铬氧化物的衍射峰出现明显的减弱，金属铁、金属铬、碳化铬和铬铁合金的衍射峰呈现出不同程度的增强。这是因为随着还原温度的升高，铁氧化物和铬氧化物的还原反应进行得更彻底。在反应温度升高过程中，SiO_2 和 $NaCrS_2$ 质量分数基本保持稳定，它们所对应的衍射峰也基本保持稳定。硅酸钙的衍射峰稍有降低。综合还原温度对还原产物金属化率和物相组成的影响，得到最佳还原温度为 1 550 ℃。



还原时间/℃：a—1 350；b—1 450；c—1 550。

1—Fe；2—Cr_xO_y；3—$(Cr\text{-}Fe)_x$；4—Cr_2O_3；5—Cr_xC_y；6—$NaCrS_2$；7—SiO_2；8—$Ca_x(SiO_2)_y$；9—Cr。

图 8 不同还原温度下还原产物的 XRD 图谱

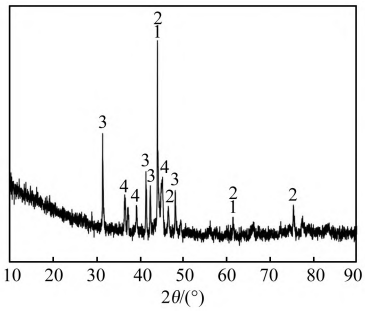
Fig. 8 XRD patterns of reduction products at different reduction temperatures

2.4 熔分产物物相组成及微观形貌分析

将吸氧比为 4 的样品在 1 550 ℃还原 3 h 后得到还原产物，再将其置于 1 600 ℃高温炉中加热 1.5 h 进行熔化分离，接着对熔分产物进行物相组成、微观形貌分析。熔分产物合金相的 XRD 分析如图 9 所示。由图 9 可知，熔分产物的物相主要由金属铁(Fe)、铬铁合金[$(Cr\text{-}Fe)_x$]、碳化铬铁($Cr_xFe_yC_z$)和碳化铬相(Cr_xC_y)组成。

熔分产物的 SEM 分析及铁、铬、硅、铝、氧、硫、锰和钒的面分布如图10所示。由图10

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



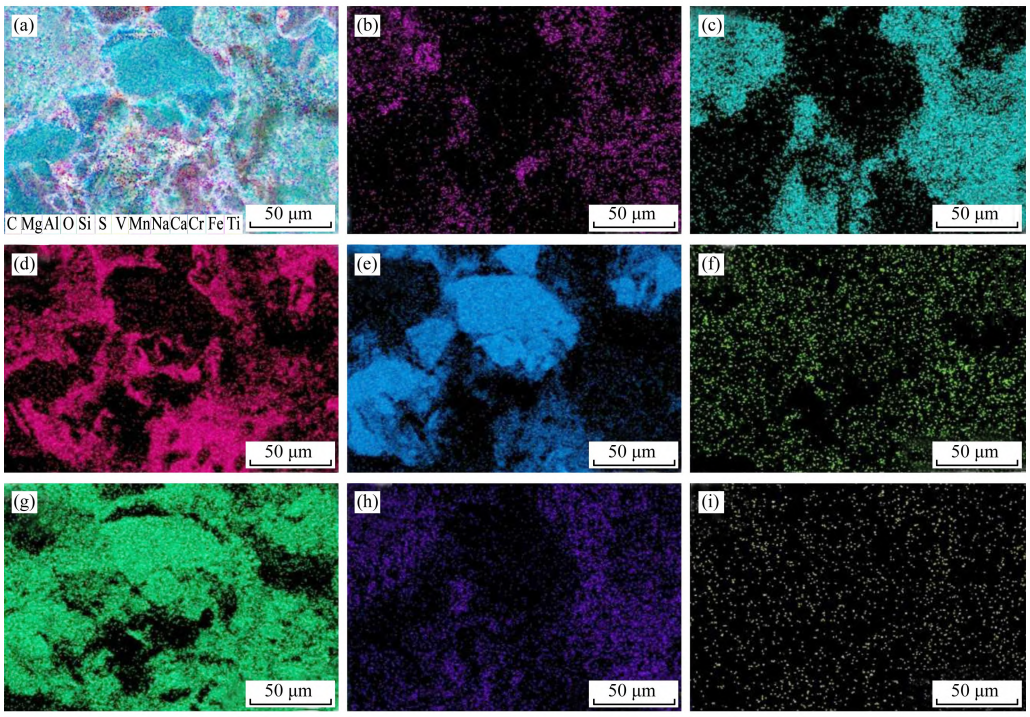
1—Fe；2—$(Cr\text{-}Fe)_x$；3—$Cr_xFe_yC_z$；4—Cr_xC_y。

图 9　合金相的 XRD 图谱

Fig. 9　XRD patterns of alloy phases

(a)可知，铁、铬、锰、硅、铝、氧元素分布较为集中且质量分数较大，硫、钒元素分布较为分散且质量分数较小。结合图 10 可知：绝大部分铁元素与铬元素分布位置相同，说明该区域为形成的铬铁合金；铝元素分布较为集中并与部分氧元素形成铝酸盐相；硅元素与氧元素一起形成硅酸盐相；少部分的硅、钙元素和大部分的锰元素也分布在金属相中；另外，酸盐相还分布有部分的硫、钙元素。

对所得熔分产物进行化学成分分析发现，合金中铬、铁、碳、硅、硫的质量分数分别为 61.51%、31.05%、2.3%、2.72%、0.04%，其元素质量分数满足 FeCr65C4.0 牌号合金的国家标准要求。



(a) 基础图；(b) Fe；(c) Cr；(d) Si；(e) Al；(f) S；(g) O；(h) Mn；(i) V。

图 10　熔分产物的 SEM 图像及主要元素面分布

Fig. 10　SEM image and surface distribution of main elements of the melted and separated product

3　结　论

(1) 花生果壳还原提钒尾渣的最佳工艺参数：吸氧比为 4、还原温度为 1 550 ℃、还原时间为 3 h。

(2) 熔分后合金相的物相组成主要为金属铁、铬铁合金、碳化铬铁和碳化铬相，此外还含有铝酸盐，和硅酸盐等。

(3) 熔分所得铬铁合金中铬质量分数为 61.51%，铁质量分数为 31.05%。各种元素质量分数满足 FeCr65C4.0 牌号合金的国家标准要求。

参考文献：

[1] 张建廷，陈碧. 攀西钒钛磁铁矿主要元素赋存状态及回收利用[J]. 矿产保护与利用，2008(5)：38－41.
ZHANG Jianting，CHEN Bi. Occurrence state and recycling of main elements in Panxi vanadium titanomagnetite[J]. Mineral Protection and Utilization，2008(5)：38－41.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] 叶国华. 从含钒钢渣中提取 V_2O_5 的新工艺与机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
YE Guohua. Research on the new technology and mechanism of V_2O_5 extraction from vanadium-bearing steel slag[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.

[3] 王滢. 钠化提钒废渣资源化利用制备铬铁合金研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.
WANG Ying. Study on resource utilization of sodium vanadium extraction waste residue to prepare ferrochromium alloy[D]. Shengyang: Northeastern University, 2019.

[4] 刘红盼,倪海涛,段亨攀,等. 工业固废资源化过程中组分"分离-转化-定向制备"研究进展[J]. 化学通报,2022,85(4):452-459.
LIU Hongpan, Ni Haitao, Duan Hengpan, et al. Research progress of component "separation-transformation- directed preparation" in the process of industrial solid waste recycling[J]. Chemistry, 2022, 85(4): 452-459.

[5] 侯静,吴恩辉,李军. 提钒尾渣的综合利用研究现状及进展[J]. 矿产保护与利用,2017(6):103-108.
HOU Jing, WU Enhui, LI Jun. Research status and progress of comprehensive utilization of vanadium extraction tailings[J]. Mineral Protection and Utilization, 2017(6): 103-108.

[6] 谢鸿智,宁寻安,邱国强,等. 木屑生物质热解制备高还原性气体机理[J]. 环境工程学报,2022,16(5):1639-1648.
XIE Hongzhi, NING Xunan, QIU Guoqiang, et al. Mechanism of pyrolysis of sawdust biom-ass to produce highly reductive gas[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(5): 1639-1648.

[7] 田宜水,单明,孔庚,等. 我国生物质经济发展战略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(1):133-140.
TIAN Yishui, SHAN Ming, KONG Geng, et al. Research on the development strategy of biomass economy in China[J]. Chinese Engineering Science, 2021, 23(1): 133-140.

[8] 卜庆洁,罗思义,马晨,等. 生物质焦油还原多孔铁矿粉试验研究[J]. 钢铁研究,2015,43(2):1-4;13.
BU Qingjie, LUO Siyi, MA Chen, et al. Experimental study on reduction of porous iron ore powder with biomass tar[J]. Steel Research, 2015, 43(2): 1-4; 13.

[9] 李恒,刘晓明,赵喜彬,等. 生物质松木锯末中低温还原高铁拜耳法赤泥[J]. 工程科学学报,2017,39(9):1331-1338.
LI Heng, LIU Xiaoming, ZHAO Xibin, et al. Reduction of high iron Bayer red mud by biomass pine sawdust at medium and low temperature[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2017, 39(9): 1331-1338.

[10] 李理,张润虎,贾黎春,等. 生物质干法解毒铬渣的实验研究[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2013(1):1-5.
LI Li, ZHANG Runhu, JIA Lichun, et al. Experimental study on detoxification of chromium residue by biomass dry process [J]. Journal of Kunming Metallurgical College, 2013(1): 1-5.

[11] 董文召,韩锁义,徐静,等. 花生壳研究现状与应用前景分析[J]. 中国农学通报,2019,35(32):14-19.
DONG Wenzhao, HAN Suoyi, XU Jing, et al. Research status and application prospect of peanut shell[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(32): 14-19.

[12] ERDOS E, RAHMEL A, SCHORR M, et al. The identification of the sulfide $NaCrS_2$ in nickel-base superalloys during corrosion in sulfate melts[J]. Oxidation of Metals, 1982, 18: 188-192.

(上接第30页)

[29] 蒋金海,李琦,陈艳,等. 镍渣制备轻质镁橄榄石-尖晶石闭孔泡沫陶瓷及分形表征[J]. 中国陶瓷,2018,54(7):47-52.
JIANG Jinhai, LI Qi, CHEN Yan, et al. Preparation and fractal characterization of lightweight forsterite-spinel based closed-cell foam ceramics with nickel slag [J]. China Ceramics, 2018, 54(7): 47-52.

[30] LIU Taoyong, TANG Yu, LI Zhuo, et. al. Red mud and fly ash incorporation for lightweight foamed ceramics using lead-zinc mine tailings as foaming agent [J]. Materials Letters, 2016, 183: 362-364.

[31] CHEN Xingjun, LU Anxian, QU Gao. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent[J]. Ceramics International, 2013, 39(2): 1923-1929.

[32] 王清涛,李森,于华芹,等. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报,2018,37(4):1393-1398.
WANG Qingtao, LI Sen, YU Huaqin, et al. Preparation of lightweight high-strength thermal insulation and decoration integration building materials using red Mud as raw materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramics, 2018, 37(4): 1393-1398.

[33] 丁祥,潘凯凯,彭波,等. 熔融发泡法制备赤泥-高铝粉煤灰基多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报,2022,50(3):713-722.
DING Xiang, PAN Kaikai, PENG Bo, et al. Preparation of porous ceramics with red mud and high-aluminum fly ash by melting foaming method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(3): 713-722.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net