

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.10.008

# 铝粉对钒钛磁铁精矿碳热还原及熔分过程的影响

李 杰<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, 寇璐垚<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, 杨 黎<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, 胡 途<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, 张子木<sup>2</sup>

(1.昆明理工大学 a. 云南省特种冶金重点实验室; b. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室;  
c. 冶金与能源工程学院; d. 昆明理工大学非常规冶金教育部重点实验室, 昆明 650093;  
2. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 沈阳 110819)

**摘要:**研究了铝粉对钒钛磁铁精矿碳热还原及熔分过程的影响。结果表明:添加铝粉能提高钒钛磁铁精矿碳热还原反应速率。铝粉添加量越大,还原反应越快。在还原反应过程中,铝热还原反应的发生放出了大量热量,并在其反应界面周围形成局部高温,从而强化碳热还原反应过程,同时促进新生金属铁聚集长大。添加 1% 铝粉可稍微改善渣金分离;当铝粉添加量大于 2% 时,由于 TiC 的生成,渣的流动性变差,渣铁分离效果恶化。

**关键词:**钒钛磁铁精矿;含碳球团;碳热还原;铝热强化

**中图分类号:**TF556

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2019)10-065-08

## Effects of aluminum on the carbothermic reduction of vanadium-titanium magnetite concentrate and melting separation

LI Jie<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, KOU Luyao<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, YANG Li<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, HU Tu<sup>1a,1b,1c,1d</sup>, ZHANG Zimu<sup>2</sup>

(1a. Yunnan Provincial Key Laboratory of Intensification Metallurgy; 1b. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization; 1c. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering; 1d. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy Under the Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China; 2. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral Under the Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China)

**Abstract:** The effect of aluminum powder on the carbothermal reduction process of vanadium-titanium magnetite concentrate was studied. The results show that the addition of aluminum powder can promote the rate of carbothermic reduction of vanadium-titanium magnetite concentrate. During the reduction process, aluminum powder replaces carbon as a reductant to participate in the reduction reaction, which releases a large amount of heat to cause local high temperature around it, thereby promoting the progress of the

**收稿日期:**2019-05-02

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51504113);东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室开放课题基金资助项目(NEMM2017002)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51504113), and the Open Project of Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral Under the Ministry of Education, Northeastern University (NEMM2017002).

**作者简介:**李杰(1992—),男,硕士,主要从事有色金属冶金方向研究,(E-mail)ljliwenyu@163.com。

**通讯作者:**胡途,男,昆明理工大学副教授,硕士生导师,主要从事多金属矿高效提取及过程强化研究,(E-mail)hutu1219@126.com。

carbothermic reduction reaction and promoting the accumulation of new metal iron. The addition of 1% aluminum powder can slightly improve the separation of slag and metal; when the amount of aluminum powder added is more than 2%, the fluidity of the slag becomes difficult due to the formation of TiC, and the separation effect of slag and metal is deteriorated.

**Keywords:** vanadium-titanium magnetite concentrate; carbon-bearing pellets; carbothermic reduction; aluminothermic enhancement

我国四川攀枝花地区拥有丰富的钒钛磁铁矿资源,其中钒、铁和钛为主要有价元素,不仅种类繁多,而且赋存条件好,综合利用价值很高。长期以来,我国主要采用高炉-转炉工艺以生产钢铁为主,兼顾提钒。在此工艺中,大部分钒还原进入铁水,然后通过转炉提钒得到钒渣,实现钒的分离提取,而钛几乎全部进入高炉渣中,其  $\text{TiO}_2$  含量达到 22%~25%,很难加以利用,致使钛资源的利用率很低<sup>[1-9]</sup>。因此,开发新的工艺对高效综合利用我国钒钛磁铁矿资源意义重大。转底炉煤基直接还原工艺是将含碳球团铺在炉底上,与其同步运动,在高温下快速还原,具有温度高、还原速率快等特点,有利于实现钒钛磁铁矿资源综合提取利用。因此,转底炉直接还原-电炉熔分工艺逐步受到人们重视,成为处理钒钛磁铁矿的工艺之一<sup>[10-16]</sup>。

对于转底炉含碳球团直接还原过程,辐射传热是炉内传热的主要方式,由于受上部料层的遮挡,限制了中下部料层吸收热量的速率,致使不同料层球团的还原速率很难达到一致。提高下部料层球团还原速率是实现转底炉厚料层操作的关键。钒钛铁精矿主要物相为钛磁铁矿和钛铁矿,其矿物组成和特点决定了其比普通矿物较难还原<sup>[17]</sup>。目前,强化钒钛铁精矿碳热还原的方法主要有矿物机械活化、矿物预氧化处理和配加添加剂等。近年来一些学者研究了钛铁矿机械活化处理对其碳热还原过程的影响<sup>[18-19]</sup>。结果表明,钛铁矿经机械活化处理后,其还原反应可在较低温度甚至室温下完成。但是实验条件苛刻,要求钛铁矿颗粒粒度在  $10\ \mu\text{m}$  以下,甚至达到  $1\sim 2\ \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>,一般的磨矿设备难以实现,且能耗较高,工业化应用难度较大。钒钛铁精矿经过预氧化处理后,其产物的物相组成和结构形态将发生变化,能在一定程度上强化钒钛铁精矿碳热还原过程,降低还原温度和提高产品金属化率,但效果取决于矿物的类型、化学组成、原始孔隙率等因素<sup>[21-27]</sup>。许多学者研究了多种添加剂对钒钛磁铁矿碳热还原过程的影响,其中,研究最多的主要是碱金属和碱金属盐添加剂<sup>[28-31]</sup>。目前形成的一般看法是,当添加剂的加入量较少时,碱金属离子能引起钛铁矿发生局部晶格畸变,增大其反应活性,具有提高还原反应速率、降低还原温度的作用;当添加剂的加入量较多时,碱金属添加剂将与钛铁矿发生反应,生成导致钛铁矿结构破坏的碱金属钛铁酸盐化合物,此时,碱金属添加剂不但能加快还原反应速率,降低还原温度,而且还具有促进金属铁晶粒长大的作用。但是,碱金属和碱金属盐添加剂的使用存在用量大、成本高、侵蚀炉衬以及破坏炉料强度等问题,至今仍未在工业生产中得到实际应用。

碳热还原是钒钛磁铁矿含碳球团还原的主要反应过程,是强吸热反应,高温有利于还原反应的进行。如果在还原过程中能提高中下部料层球团内部的温度,那么将会提高还原反应的还原速率。根据热力学分析可知,铝的还原性比碳强,而且铝作为还原剂时,还原反应会放出大量热量,会使还原反应界面周围出现局部高温。因此,我们试图用铝粉来强化钒钛磁铁矿碳热还原过程,以期钒钛磁铁矿碳热还原速率得以提高<sup>[32]</sup>。

## 1 实验原料及方法

### 1.1 原料

实验所用原料为四川攀枝花地区的钒钛磁铁矿精矿和煤粉,其化学成分和粒度组成如表 1~3 所示。图 1 是钒钛磁铁矿精矿的 X 射线衍射图谱,可以看出其物相主要包含  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  和  $\text{FeTiO}_3$ 。所用铝粉纯度为 99%,粒度为 200 目。

将钒钛磁铁矿精矿粉和煤粉在  $100\ ^\circ\text{C}$  下充分干燥后根据一定比例配料并充分混匀。本研究中,  $N_c:N_o$  为 1.2,其中  $N_c$  是煤粉所含固定碳摩尔数,  $N_o$  是钒钛磁铁矿精矿中含铁矿物所含氧原子摩尔数。铝粉的添加采用外部配加的方式,本研究中铝粉加入量  $w(\text{Al})$ ,即添加的铝粉量占矿-煤混合物总质量百分比为 1%~3%。在混合料中加入 1% 粘结剂,通过压球设备制成长轴为 30 mm、短轴为 15 mm 的椭球型含碳球团。

表 1 所用原料化学成分(以质量分数计)

Table 1 Chemical composition of materials used in experiment

%

钒钛磁铁精矿									煤粉		
TFe	FeO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	挥发分	灰分	S
52.47	31.28	12.50	0.55	3.25	1.95	3.06	3.88	76.91	7.71	12.66	0.48

表 2 钒钛磁铁精矿粒度组成

Table 2 Particle size distribution of titanomagnetite concentrate

粒度/ $\mu\text{m}$	<48	48~58	58~75	75~106	106~150	150~250	>250
含量/%	2.0	12.6	12.5	22.4	37.3	11.8	1.4

表 3 煤粉粒度组成

Table 3 Particle size distribution of coal

粒度/ $\mu\text{m}$	>150	105~150	75~105	61~75	53~61	<53
含量/%	10.36	17.93	35.36	21.21	10.57	4.57

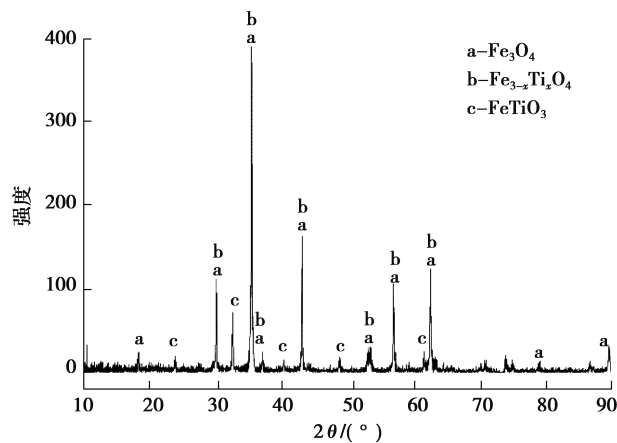


图 1 钒钛磁铁精矿 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of titanomagnetite concentrates

## 1.2 实验方法

实验采用可控气氛的卧式管式电阻炉。实验开始前,先用大流量氩气在管内吹扫以排出管内空气。然后将氩气流量控制在 1 L/min。球团用刚玉坩埚盛装,在温度升到设定值时立即放入炉管内,达到指定时间后迅速取出,然后在氩气保护下冷却。金属化球团的金属化率根据式(1)计算:

$$\eta = \frac{w(\text{TFe}) - \frac{56}{72}w(\text{FeO})}{w(\text{TFe})} \times 100, \quad (1)$$

式中: $\eta$  为金属化球团的金属化率,%;金属化球团的全铁含量,%; $w(\text{FeO})$  为金属化球团的 FeO 含量,%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铝粉加入量对金属化率的影响

不同铝粉添加量的钒钛磁铁精矿含碳球团在 1 350 °C、氩气保护下进行还原后金属化率随时间的变化关系如图 2 所示。从图中可以看出,无论添加铝粉与否,随着还原时间增加,金属化率逐渐升高。添加铝粉后,钒钛磁铁精矿含碳球团的还原速率明显提高,特别是在还原前期阶段。还原 6 min 时,未添加铝粉的金属化

率仅为 63.2%，添加 1% 铝粉后则达到了 77.1%，且铝粉加入量越大，金属化率越高。这主要是因为还原反应进行过程中，与精矿粉颗粒接触的铝粉作为还原剂参与了还原反应。根据热力学可知，与碳热还原反应相比，铝热还原反应的热力学温度更低，并且铝热还原是一个强放热反应，铝粉参与还原后，放出大量热量，使其反应区域出现局部高温，促进了强吸热的碳热还原反应进行，从而加快了还原速率。值得注意的是，还原 15 min 后，铝粉的加入对钒钛磁铁精矿金属化球团的金属化率影响很小。主要是因为还原过程后期，铝粉已被大量消耗，且含铁物相的含量降低，还原产物包裹住了部分含铁物相颗粒，减小了铝粉与含铁物相颗粒之间的接触几率，从而无法继续参与还原。

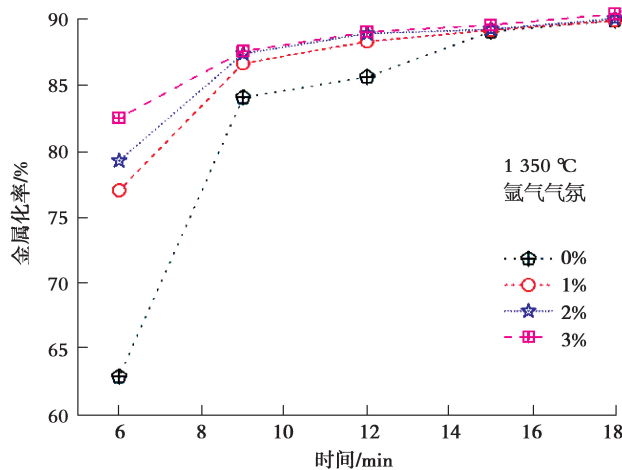


图 2 不同铝粉加入量和还原时间对金属化率的影响

Fig. 2 Effects of different Al dosage on the metallization rate for different reduction time

## 2.2 物相转变规律

未加入铝粉和加入 2% 铝粉后钒钛磁铁精矿含碳球团在氩气保护条件下、在 1350 °C 还原不同时间后的 XRD 图谱如图 3~4 所示。可以看出，未添加铝粉时，还原 6 min 后，金属化球团的物相主要包含金属铁 (Fe)、 $\text{FeTiO}_3$ 、 $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ 、 $\text{FeTi}_2\text{O}_5$  和  $\text{Fe}_{2.25}\text{Ti}_{0.75}\text{O}_4$ 。还原 9 min 后， $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$  消失，出现  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Fe}_{2.25}\text{Ti}_{0.75}\text{O}_4$ 。添加 2% 铝粉后，还原时间为 6 min 时，金属化球团中没有出现  $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ 。还原 18 min 后，金属化球团的物相为金属铁 (Fe)、 $\text{FeTi}_2\text{O}_5$  和少量  $\text{TiO}_2$ 。这主要归因于添加铝粉后，在还原前期，铝热还原反应的发生强化了碳热还原反应的进行，提高了其反应速率。

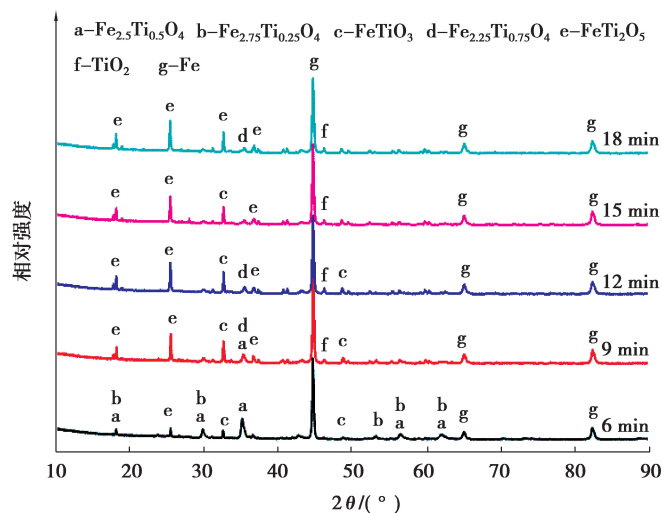


图 3 1350 °C 氩气保护下还原不同时间后的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of titanomagnetite concentrates-coal briquettes reduced at 1350 °C under argon atmosphere for different time

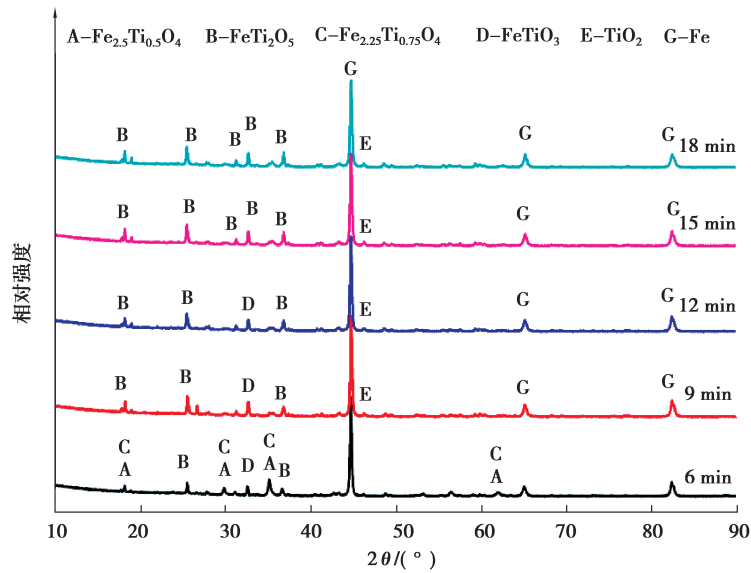


图 4 1 350 °C、氩气气氛保护下,加入 2% 铝粉后钒钛磁铁精矿含碳球团还原不同时间后的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of titanomagnetite concentrates-coal briquettes reduced at 1 350 °C under argon atmosphere for different time with 2% Al added

### 2.3 微观形貌

在 1 350 °C、氩气气氛保护下,铝粉加入量对钒钛磁铁精矿含碳球团还原 12 min 后微观形貌的影响如图 5 所示,其中较亮区域为金属铁相。可以看出,未添加铝粉时,金属化球团中金属铁相呈散点状结构,而添加铝粉后,金属铁相颗粒显著长大。随着铝粉添加量增大,金属铁颗粒聚集得越大。这是因为添加铝粉后,铝粉参与还原反应,铝热还原放出热量,使其周围形成局部高温,这有利于新生金属铁相的聚集长大。

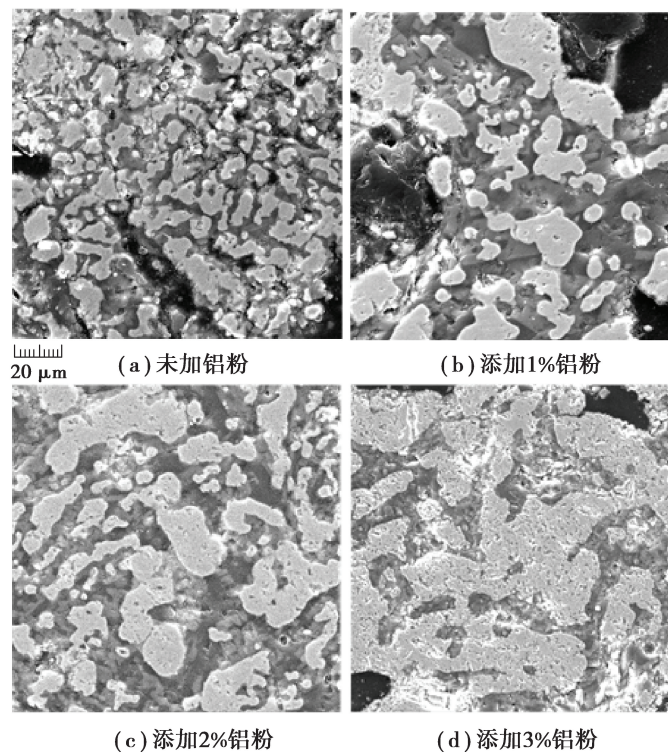


图 5 不同铝粉添加量的钒钛磁铁精矿含碳球团在 1 350 °C、氩气气氛下还原 12 min 后的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of reduced titanomagnetite concentrates at different Al dosages for 12 min at 1 350 °C under argon atmosphere

## 2.4 铝粉添加量对渣铁分离的影响

将添加不同铝粉含量的金属化球团在  $1\ 550\ ^\circ\text{C}$ 、惰性气氛下熔分  $0.5\ \text{h}$ ，考察铝粉添加量对渣金分离效果的影响，结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，未添加铝粉和添加  $1\%$  铝粉时，熔分效果均很好，当添加  $2\%$  铝粉时，熔分效果急剧恶化，渣铁难以分离。而添加  $3\%$  铝粉后，金属化球团出现未熔。图 7 所示的是不同铝粉添加量金属化球团熔分后渣相的 XRD 图谱，通过物相分析可知，未添加铝粉和添加  $1\%$  铝粉时，渣中主要物相组成为  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{Mg}_{1.2}\text{Ti}_{1.8}\text{O}_5$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 。当铝粉添加量为  $2\%$  时，渣中含有金属铁相，且出现了  $\text{TiC}$  和  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  相，随着铝粉添加量增大到  $3\%$  时，这两物相的衍射峰增强，并且出现了  $\text{V}_8\text{C}_7$ 。这主要是因为铝粉添加量增大后，取代碳作为还原剂的铝粉量增多，使碳富余，进而与  $\text{TiO}_2$  反应生成高熔点物质  $\text{TiC}$ ，使渣的流动性变差，导致渣金难以分离。由图 8 也可以看出，随着铝添加量增多，渣中金属铁(MFe)含量升高，表明大量金属铁夹在渣中难以分离。

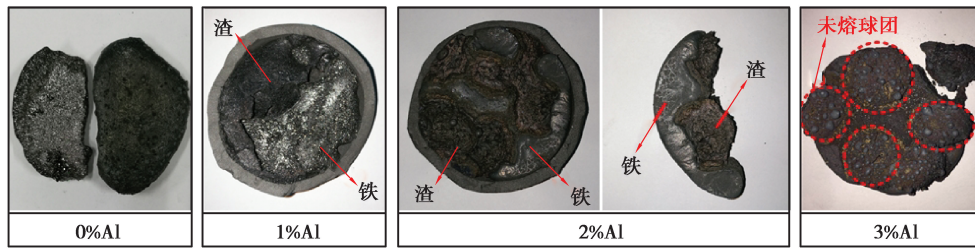


图 6 不同铝粉添加量下金属化球团在  $1\ 550\ ^\circ\text{C}$  下熔分  $0.5\ \text{h}$  渣铁分离效果图

Fig. 6 Separation effect of metallized pellets at  $1\ 550\ ^\circ\text{C}$  for  $0.5\ \text{h}$  with different amounts of aluminum powder

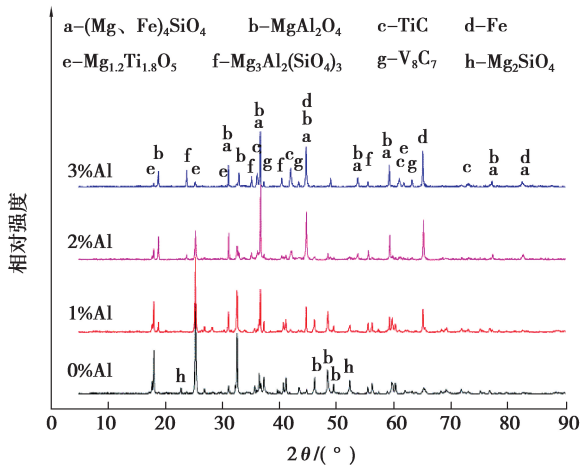


图 7 不同铝粉添加量时熔分渣 XRD 谱图

Fig. 7 XRD patterns of molten slag when different aluminum powders are added

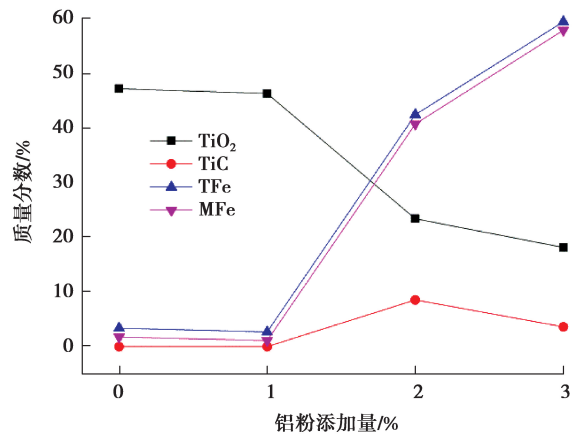


图 8 不同铝粉添加量时熔分渣化学成分

Fig. 8 Chemical composition of molten slag when added with different amounts of aluminum powder

## 3 结 论

1) 添加铝粉能促进钒钛磁铁精矿碳热还原反应速率，在  $1\ 350\ ^\circ\text{C}$  下氩气气氛中还原  $6\ \text{min}$ ，未添加铝粉时金属化率为  $63.2\%$ ，添加  $1\%$  铝粉时金属化率达到  $77.1\%$ 。铝粉添加量越大，还原反应速率越快。

2) 还原过程中，铝粉取代碳作为还原剂参与还原反应，放出的大量热量使反应界面周围产生局部高温，从而强化了碳热还原反应过程，同时局部高温促进了新生金属铁的聚集长大。

3) 添加  $1\%$  铝粉后，渣金分离效果进一步强化，渣中金属含量仅为  $1.10\%$ ；当铝粉添加量增加到  $2\%$  时，由于  $\text{TiC}$  的生成，渣的流动性变差，渣铁分离效果恶化；添加  $3\%$  铝粉时，铝粉替代碳作为还原剂的量增加，致使渣中生成大量  $\text{TiC}$ ，熔点升高，金属化球团未熔化。

## 参考文献:

- [1] 朱俊士. 钒钛磁铁矿选矿及综合利用[J]. 金属矿山, 2000 (1): 1-5, 11.  
ZHU Junshi. Beneficiation and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Metal Mine, 2000 (1): 1-5, 11. (in Chinese)
- [2] 袁章福, 徐聪, 郑少华, 等. 攀枝花钛资源综合利用的新思路[J]. 现代化工, 2003, 23 (5): 1-4, 8.  
YUAN Zhangfu, XU Cong, ZHENG Shaohua, et al. Comprehensive utilization of titanium resources in Panzhihua[J]. Modern Chemical Industry, 2003, 23 (5): 1-4, 8. (in Chinese)
- [3] 徐采栋, 林蓉. 攀枝花钒钛磁铁矿高温还原中的重要物理化学问题[J]. 钢铁钒钛, 1980 (2/3): 1-10.  
XU Caidong, LIN Rong. Important physicochemical problems in high temperature reduction of Panzhihua vanadium titanomagnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1980 (2/3): 1-10. (in Chinese)
- [4] 邹建新. 攀枝花钛(钪、钴)资源综合利用发展研究[J]. 四川有色金属, 1994 (4): 53-59.  
ZOU Jianxin. Progress in the comprehensive utilization of titanium (scandium and cobalt) resources in Panzhihua[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 1994 (4): 53-59. (in Chinese)
- [5] 周建国, 邹建新. 攀枝花钛资源的赋存状态与在采选过程中的走向规律[J]. 四川有色金属, 1997 (1): 27-31, 42.  
ZHOU Jianguo, ZOU Jianxin. Occurrence of titanium resources in Panzhihua and the extent of vein in its mining and dressing[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 1997 (1): 27-31, 42. (in Chinese)
- [6] Sole K C. Recovery of titanium from the leach liquors of titaniferous magnetites by solvent extraction [J]. Hydrometallurgy, 1999, 51 (2): 239-253.
- [7] 刘熙光, 邱克辉, 张其春, 等. 关于钒钛磁铁矿综合利用可持续发展问题的探讨[J]. 中国矿业, 2001, 10 (4): 21-23.  
LIU Xiguang, QIU Kehui, ZHANG Qichun, et al. Multipurpose use of vanadium-titanium magnetite and realization of sustainable development[J]. China Mining Magazine, 2001, 10 (4): 21-23. (in Chinese)
- [8] 邓国平, 刘宛康, 沙南生, 等. 攀钢发展资源综合利用及相关产业调研报告[J]. 中国国土资源经济, 2006 (1): 4-7.  
DENG Guoping, LIU Wankang, SHA Nansheng, et al. Findings report of developing resource comprehensive utilization and related industry in Panzhihua Steel Corporation[J]. Natural Resource Economics of China, 2006 (1): 4-7. (in Chinese)
- [9] 胡途. 钒钛磁铁精矿转底炉多层球还原基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.  
HU Tu. Fundamental study on coal-based reduction of vanadium-titanium magnetite concentrates with multi-layer pellets in rotary hearth furnace[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [10] Eketorp S. Smelting reduction (retroactive coverage) [C]//Ironmaking Conference 27th Proceedings 1968. Iron & Steel Society, 1968: 36-39.
- [11] Hoffman G E. A closer look at FASTMET and FASTMELT[C]//58th Electric Furnace Conference and 17th Process Technology Conference. November 12-15, 2000, Orlando, Florida. Iron and Steel Society, 2000: 751-767.
- [12] Hoffman G, Tsuge O. ITmk3--application of a new ironmaking technology for the iron ore mining industry[J]. Mining Engineering, 2004, 56 (10): 35-39.
- [13] 赵辉. 攀枝花钒钛磁铁矿资源综合利用方向的思考[J]. 宏观经济研究, 2007 (2): 50-52.  
ZHAO Hui. Thoughts on comprehensive utilization of Panzhihua vanadium titanomagnetite resources[J]. Macroeconomics, 2007 (2): 50-52. (in Chinese)
- [14] 吴秋廷. 钒钛磁铁矿转底炉直接还原工程化技术研究[J]. 钢铁, 2010, 45 (11): 22-26.  
WU Qiuting. Engineering study on RHF direct reduction of vanadium-bearing titanomagnetite[J]. Iron & Steel, 2010, 45 (11): 22-26. (in Chinese)
- [15] 翁庆强, 黄斌. 钒钛磁铁矿转底炉直接还原投资探析[J]. 四川冶金, 2011, 33 (4): 11-14.  
WENG Qingqiang, HUANG Bin. The vanadium titanomagnetite rotary hearth furnace direct reduction investment analysis[J]. Sichuan Metallurgy, 2011, 33 (4): 11-14. (in Chinese)
- [16] 徐丽君, 李亮, 陈六限, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿综合回收利用现状及发展方向[J]. 四川有色金属, 2011 (1): 1-5.  
XU Lijun, LI Liang, CHEN Liuxian, et al. Comprehensive recycling situation and development direction of vanadium-titanium magnetite in PanXi[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2011 (1): 1-5. (in Chinese)
- [17] 刘松利, 白晨光, 胡途, 等. 钒钛铁精矿内配碳球团高温快速直接还原历程[J]. 重庆大学学报, 2011, 34 (1): 60-65.  
LIU Songli, BAI Chengguang, HU Tu, et al. Quick and direct reduction process of vanadium and titanium iron concentrate

- with carbon-containing pellets at high temperature[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34 (1): 60-65. (in Chinese)
- [18] Chen Y, Hwang T, Williams J S. Ball milling induced low-temperature carbothermic reduction of ilmenite[J]. Materials Letters, 1996, 28 (1/2/3): 55-58.
- [19] Chen Y, Hwang T, Marsh M, et al. Study on mechanism of mechanical activation[J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 226/227/228: 95-98.
- [20] 赵沛, 郭培民. 低温还原钛铁矿生产高钛渣的新工艺[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26 (2): 1-4.  
ZHAO Pei, GUO Peimin. New technology of producing titanium slag by reducing ilmenite at low temperature[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2005, 26 (2): 1-4. (in Chinese)
- [21] Zhang J B, Zhu Q S, Xie Z H, et al. Morphological changes of Panzhihua ilmenite during oxidation treatment[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44 (4): 897-905.
- [22] Sun K, Takahashi R, Yagi J I. Reduction kinetics of cement-bonded natural ilmenite pellets with hydrogen. [J]. ISIJ International, 1992, 32 (4): 496-504.
- [23] Xiao W, Lu X G, Zou X L, et al. Phase transitions, micro-morphology and its oxidation mechanism in oxidation of ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ) powder[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23 (8): 2439-2445.
- [24] Fu X, Wang Y, Wei F. Phase transitions and reaction mechanism of ilmenite oxidation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41 (5): 1338-1348.
- [25] Chen D S, Song B, Wang L N, et al. Solid state reduction of Panzhihua titanomagnetite concentrates with pulverized coal[J]. Minerals Engineering, 2011, 24 (8): 864-869.
- [26] Becher R G, Canning R G, Goodheart B A, et al. A new process for upgrading ilmenitic mineral sands[C]// Australasian Institute of Mining and Metallurgy Proceedings 1965. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1965: 21-44.
- [27] Donnelly R P, Brennan L J, Rouillard A. Reduction of iron oxide in ilmenite beach sands: part 1[J]. Australian Mining, 1970, 62 (3): 58-65.
- [28] 陈德胜, 宋波, 王丽娜, 等. 钒钛磁铁精矿直接还原反应行为及其强化还原研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33 (11): 1331-1336.  
CHEN Desheng, SONG Bo, WANG Lina, et al. Direct reduction and enhanced reduction of vanadium-bearing titanomagnetite concentrates[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33 (11): 1331-1336. (in Chinese)
- [29] 吴剑辉, 孙康, 李伟, 等. 碱金属氯化物对预氧化钛铁矿碳热还原反应的协同催化作用[J]. 广东有色金属学报, 2000, 10 (1): 25-29.  
WU Jianhui, SUN Kang, LI Wei, et al. The co-operative catalytic effect of alkali chlorides on the carbothermic reduction of pre-oxidized ilmenite[J]. Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals, 2000, 10 (1): 25-29. (in Chinese)
- [30] 张永键, 吴阳红, 王厚忠, 等. 碱金属碳酸盐对假板钛矿碳热还原反应的催化研究[J]. 有色矿冶, 2001, 17 (4): 22-24.  
ZHANG Yongjian, WU Yanghong, WANG Houzhong, et al. Research on catalysis of alkali metal carbonate to carbon-heating reduce reaction of perilmene ore[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2001, 17 (4): 22-24. (in Chinese)
- [31] El-Tawil S Z, Morsi I M, Yehia A, et al. Alkali reductive roasting of ilmenite ore[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1996, 35 (1): 31-37.
- [32] 李杰. 钒钛磁铁精矿碳热还原铝热强化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.  
LI Jie. Study on thermite enhancement of vanadium-titanium magnetite concentrate by carbothermal reduction [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)