

钒钛铁精矿金属化球团磁选分离 铁钛试验研究

黄平 吴恩辉 杨绍利 侯静 李军

(攀枝花学院,四川省钒钛材料工程技术研究中心,四川攀枝花 617000)

摘要: 钒钛铁精矿金属化球团是转底炉煤基直接还原钒钛铁精矿后的产品,其中含有铁、钒、钛等多元素。采用实验室湿式磁选机对钒钛铁精矿金属化球团进行了磁选的可行性研究,通过正交试验考察了电流强度、粒度、矿液比等参数对金属化球团中铁、钛回收率的影响。结果表明:在电流强度 2.5 A、粒度 $-74\ \mu\text{m}$ (-200目)、矿液比为 1:7 时,铁、钛的回收率分别为 90% 和 45%。

关键词: 钒钛铁精矿;金属化球团;磁选;铁;钛;回收率

中图分类号:TF046.6 文献标志码:A 文章编号:1004-7638(2013)06-0039-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2013.06.009

Experimental Study on Magnetite Separation of Iron and Titanium from Metallized Pellet of Vanadium-bearing Titaniferous Iron Ore Concentrate

Huang Ping, Wu Enhui, Yang Shaoli, Hou Jing, Li Jun

(Panzhihua University, Sichuan Technology Engineering Research Center for Vanadium & Titanium Materials, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The metallized pellet of vanadium-bearing titaniferous iron ore concentrate containing iron, vanadium, titanium and other elements is the product of coal-based direct reduction of the concentrate in rotary hearth furnace. By using laboratory wet magnetic separator, a new technology of magnetite separation of iron and titanium from metallized pellet was introduced, and its feasibility was also studied by experiments. The effects of current intensity, particle size and ore to liquid ratio on the recovery rate of iron and titanium were examined through orthogonal experiment. The experimental results show that the recovery rates of iron and titanium are 90% and 45% respectively with the current intensity of 2.5 A, particle size of $-74\ \mu\text{m}$ and ore to liquid ratio of 1:7.

Key words: vanadium-bearing titaniferous iron ore concentrate, metallized pellet, magnetic separation, iron, titanium, recovery rate

0 引言

攀枝花钒钛磁铁矿是一种含铁、钒、钛为主并伴生少量铬、镍、钴、铂族、镓、铀等多种元素的复合

矿^[1]。攀西地区钒钛磁铁矿储量约 200 多亿吨,约占全国铁矿储量的 30% 以上。其中钛资源储量为 8.7 亿 t,占全国钛资源储量的 90.5%,占世界钛储量的 35.2%。此外伴生有 90 万 t 钴、70 万 t 镍、25 万 t 铀,

收稿日期:2013-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No51174122/E0413)。

作者简介:黄平(1969—),女,四川邻水人,副教授。主要从事矿产资源综合利用研究。

18 万 t 钽以及大量的铬、铜、硫等资源。钒钛磁铁矿由于其自身的特点,其冶炼及综合利用技术一直是世界性难题。目前,世界上处理钒钛磁铁矿的主要流程为高炉流程,但是高炉流程无法解决钛资源的利用问题。攀钢高炉投产至今,每年产生高钛型高炉渣 300 多万吨,目前已经堆积了上亿吨,不但造成了钛资源的严重浪费,而且形成巨大的环境压力^[2-4]。

为了解决钒钛磁铁矿综合利用的难题,国内外专家做了大量的研究工作,开发了多种非高炉流程,其中转底炉煤基直接还原工艺是其中的代表工艺之一。转底炉直接还原技术具有还原温度高、时间短、炉料不动炉盘转动的特点,因此对于钒钛磁铁矿来说,转底炉工艺解决了其难还原和低温还原膨胀两个难题^[5-7]。转底炉煤基直接还原—电炉熔分新流程实现了钒钛磁铁矿中铁、钒、钛的全部回收利用,但是其得到的熔分钛渣物相

复杂,杂质含量较高,无法直接用于现有的钛白生产工艺。磁选工艺具有成本低、不改变物相组成、处理量大等优点,广泛用于处理复合矿、低品位矿、冶金渣等资源的综合利用,是近年来的研究热点之一^[8-10]。笔者在实验室采用湿式磁选机对钒钛铁精矿金属化球团进行磁选试验研究,使用正交试验的方法研究了各因素对磁选效果的影响,得出了合理的磁选工艺参数。

1 试验原料及设备

试验原料为攀枝花某公司钒钛铁精矿转底炉煤基直接还原后得到的金属化球团,其主要化学成分见表 1,金属化球团磨细后的粒度分布见表 2。试验主要设备为 XCRS—Ø400 × 240 电磁湿法多用鼓形弱磁选机,主要工艺参数见表 3,磁选机激磁电流与磁场强度关系见表 4。

表 1 钒钛铁精矿金属化球团的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of metallized pellet of vanadium-bearing titaniferous iron ore concentrate %

TFe	MFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	S	P
77.74	72.30	10.9	0.56	4.69	4.64	1.57	3.91	0.53	0.004

表 2 钒钛铁精矿金属化物料的粒度分布

Table 2 Particle size distribution of metallized materials of vanadium-bearing titaniferous iron ore concentrate %

+178 μm (+80 目)	178 ~ 124 μm (80 ~ 120 目)	124 ~ 74 μm (120 ~ 200 目)	-74 μm (-200 目)
26.9	21.2	13.3	38.6

表 3 XCRS - Ø400 × 240 弱磁选机主要参数

Table 3 Main parameters of XCRS - Ø400 × 240 low-intensity magnetic separator

给料粒度/mm	分选转鼓 (mm × mm)	功率/ W	主辊转速/ (r · min ⁻¹)	激磁电 流/A	处理量/ (kg · h ⁻¹)
-2.5	Ø400 × 240	370	33	0 ~ 5	20 ~ 50

表 4 磁选机激磁电流与磁场强度的换算关系

Table 4 The conversion relation of magnetizing current and magnetic field intensity of the magnetic separator

I/A	B/Oe	I/A	B/Oe
0.5	400	3.0	1 825
1.0	960	3.5	2 100
1.5	1 175	4.0	2 250
2.0	1 675	4.5	2 500
2.5	1 800		

2 试验方法

首先将金属化球团进行破碎、细磨、筛分,得到具有一定粒度的钒钛铁精矿金属化物料,然后采用单因素及正交试验的方法,考察磁场强度、矿液比和粒度对金属化球团磁选工艺的影响。人工配料,将一定粒度的钒钛铁精矿金属化物料与一定量的水混合并搅拌均匀后加入电磁湿法多用鼓形弱磁选机,将磁场强度调整到设定值进行磁选试验,得到的磁性物和非磁性物经过沉淀、过滤、干燥后测定其主要成分,试验流程见图 1。

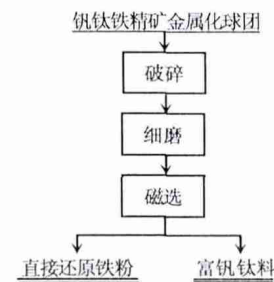


图 1 试验流程

Fig. 1 The experimental flow chart

3 试验结果及讨论

3.1 单因素试验

在正交试验之前,为了探索电流强度和矿液比对钒钛矿金属化球团磁选效果的影响,做了两组探索试验。称取钒钛铁精矿金属化物料 1 kg,在矿液比为 1:5,金属化物料未分级的条件下,研究不同电流强度对磁选效果的影响,试验结果见图 2。随着电流强度的增加,磁性物的质量也呈上升趋势,但是上升趋势有所减小,说明钒钛铁精矿金属化物料可以采用磁选方式分离铁钛,合适的电流强度在 1.5~4 A 范围内,电流强度太低,磁性物与非磁性物分离不完全,电流强度太高,电耗高。

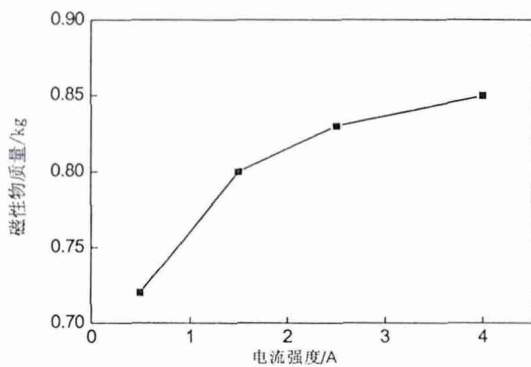


图 2 电流强度对金属化球团磁选效果的影响
Fig. 2 The effect of current intensity on magnetic separation result of metallized pellet

称取钒钛铁精矿金属化物料 1 kg,在电流强度 2.5 A,金属化物料未分级的条件下,研究不同矿液比对磁选效果的影响,试验结果见图 3。从图 3 可以看出,随着给矿浓度的增大,磁性物质量增大,但是上升趋势有所减小。矿液比越大,粉料在水中扩散越均匀,磁化效果越好,越有利于钒钛铁精矿金属化球团中磁性物与非磁性物的分离。

3.2 正交试验

试验选取三因素三水平的正交试验方法,研究电流强度、粒度、矿液比对钒钛铁精矿金属化物料磁选的影响规律,确定最佳工艺参数并以稳定性试验验证。

1) 因素和水平

试验选取的因素及水平见表 5。

2) 正交试验结果

正交试验结果见表 6,采用极差法处理表中数

据,处理结果列入表 7、8。其中 k_{ij} 表示第 j 因素,第 i 水平的平均值 R_j 表示极差。

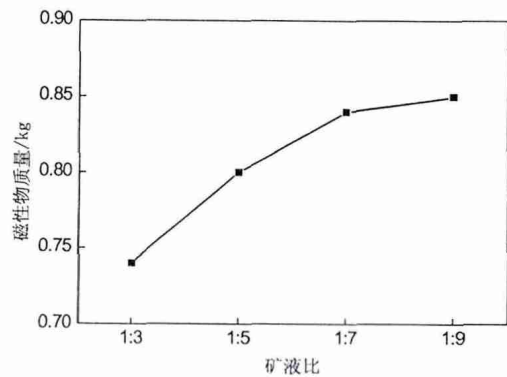


图 3 矿液比对金属化球团磁选效果的影响
Fig. 3 The effect of ore to liquid ratio on magnetic separation result of metallized pellet

表 5 正交试验因素和水平
Table 5 The factors and levels of orthogonal test

水平	电流强度/A	粒度/ μm	矿液比
1	1.5	+178	1:3
2	2.5	178~74	1:5
3	4	-74	1:7

表 6 试验结果
Table 6 The experimental results

序号	因素			铁的回 收率/%	二氧化钛的 回收率/%
	电流强度	粒度	矿液比		
1	1	1	1	86.53	41.95
2	1	2	2	93.12	38.12
3	1	3	3	90.89	44.49
4	2	1	3	87.19	70.01
5	2	2	1	76.09	86.53
6	2	3	2	95.96	64.35
7	3	1	2	83.85	51.74
8	3	2	3	87.70	54.22
9	3	3	1	92.45	60.44

表 7 各因素对铁回收率的影响
Table 7 The effect of various factors on the recovery rate of Fe

编号	因素		
	电流强度	粒度	矿液比
k_{1j}	90.18	85.86	90.06
k_{2j}	86.41	85.64	90.92
k_{3j}	88.00	93.10	83.61
R_j	3.77	7.46	7.31

3) 直观分析与讨论

电流强度与回收率的关系见图 4,由图 4 可

知,铁的回收率随着电流强度的增大变化不大,因为钒钛铁精矿金属化球团的金属化率超过 90%,金属铁在较低的磁选强度中就可以与非磁性物分开。而钛的回收率随着电流强度的增大,先升高后减小,主要是由于钛氧化物在钒钛铁精矿金属化球团中的赋存状态较复杂,一部分与铁氧化物紧密结合形成钛铁矿或钛铁晶石,另一部分则在钒钛铁精矿还原过程中夹杂在金属铁中,随着金属铁进入到磁性物中。

表 8 各因素对二氧化钛回收率的影响
Table 8 The effect of various factors on the recovery rate of TiO₂

编号	因素		
	电流强度	粒度	矿液比
k_{1j}	41.52	56.57	53.50
k_{2j}	73.63	59.62	56.19
k_{3j}	57.48	56.43	62.92
k_j	32.11	3.19	9.42

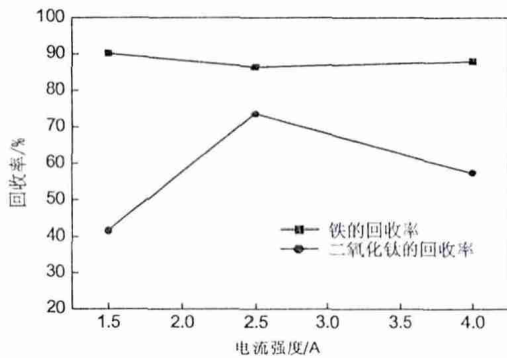


图 4 电流强度对铁、二氧化钛回收率的影响
Fig. 4 The effect of current intensity on the recovery rate of Fe and TiO₂

矿液比与回收率的关系见图 5。由图 5 可知,铁的回收率随着矿液比的增大变化不大,铁的回收率都在 85% 以上,但在矿液比为 1:7 的时候略有下降。主要是因为钒钛铁精矿金属化物料在矿液比增加时,金属化物料在水中分散均匀,一部分磁性不强的铁钛复杂化合物随着水流向非磁性物中,从而也导致了钛的回收率随着矿液比的增大逐渐升高。

物料粒度与回收率的关系见图 6。由图 6 可知,铁的回收率随着金属化物料粒度的减小而升高,主要是因为金属化球团中铁晶粒与其他脉石矿物解离相对完全,从而磁性物的金属铁品位得以提高导致了铁回收率的提高。钛的回收率随着金属化物料

的粒度增加变化不大,但是当粒度过细时,由于物料粒度细,在磁选过程中容易流失,导致钛的回收率略有降低。

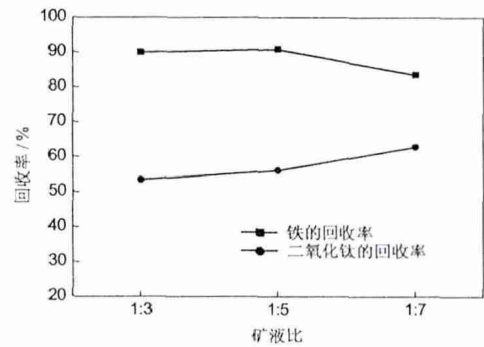


图 5 矿液比对铁、二氧化钛回收率的影响
Fig. 5 The effect of ore to liquid ratio on the recovery rate of Fe and TiO₂

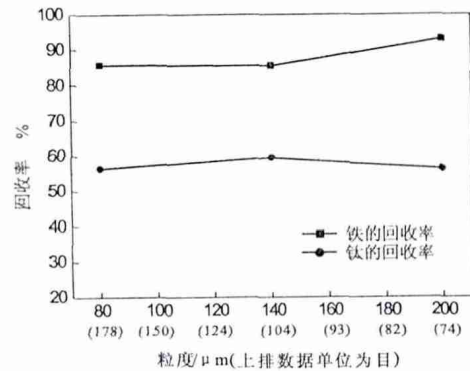


图 6 粒度对铁、二氧化钛回收率的关系
Fig. 6 The effect of particle size on the recovery rate of Fe and TiO₂

由正交试验极差分析可知,在影响铁回收率的因素中,因素的主次关系为:粒度 > 矿液比 > 电流强度;在影响钛回收率的因素中,因素的次要关系为:电流强度 > 矿液比 > 粒度。综合考虑各因素对铁钛回收率的影响,选取电流强度 2.5 A、粒度 -74 μm (-200 目)、矿液比为 1:7 为钒钛铁精矿金属化球团磁选的最佳工艺参数。

4) 稳定性试验

根据正交试验得到的最佳工艺参数进行稳定性试验,以验证正交试验分析的准确性。稳定性试验结果见图 7、8 及表 9、10。表 9 为磁性物的主要化学成分,表 10 为非磁性物的主要化学成分。

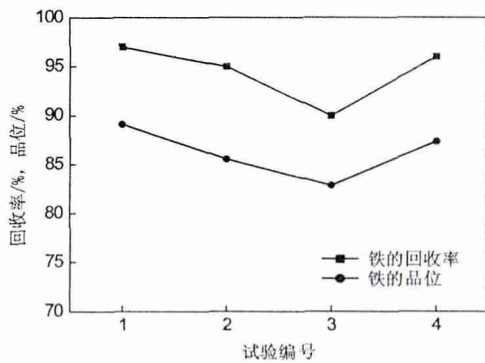


图 7 稳定性试验磁性物中铁的回收率及品位
Fig. 7 The grade and recovery rate of Fe in magnetic substances in the stability test

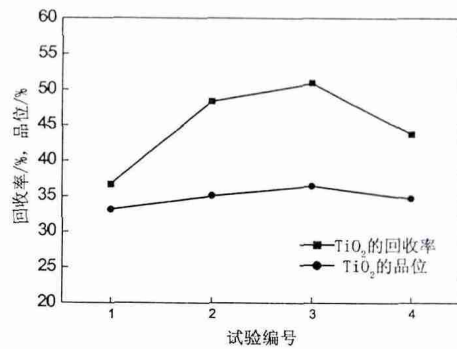


图 8 稳定性试验非磁性物中二氧化钛的回收率及品位
Fig. 8 The grade and recovery rate of TiO₂ in non-magnetic substances in the stability test

表 9 磁性物的主要化学成分

Table 9 Main chemical compositions of magnetic substances %

TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	S	P
88.79	6.23	0.05	0.79	0.84	0.42	0.58	0.01	0.02

表 10 非磁性物的主要化学成分

Table 10 Main chemical compositions of non-magnetic substances %

TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	S	P
18.63	33.65	1.58	19.25	18.31	5.20	11.47	0.08	0.04

由图 7、8 可知,在钒钛铁精矿金属化球团磁选最佳工艺参数条件下,铁的回收率及在磁性物中的品位均在 90% 左右,钛的回收率在 45% 左右,钛在非磁性物中的品位在 35% 左右。

钒钛铁精矿金属化球团磁选试验得到的产品为直接还原铁粉和富钒钛料,直接还原铁粉的性质与直接还原铁相似,主要成分 TFe 在 90% 左右,脉石含量低,外观为粉状物料。由于一般电炉炼钢用直接还原铁要求 TFe 最好要大于 90%,所以本试验得到的直接还原铁粉进行压块处理后,可作为电炉炼钢的原料。富钒钛料是本试验得到的另一重要产品,其中 V₂O₅ 含量在 1.58%,TiO₂ 含量在 33.65%,Si、Ca、Mg、Al 等杂质含量较高。该富钒钛料可通过钠化焙烧—水浸提钒—酸浸除 Fe、Mg、Ca 等—碱浸出工艺,使渣中 TiO₂ 进一步富集,作为生产钛白的

原料,实现钒钛铁精矿中铁钒钛的综合利用。

4 结论

1) 钒钛铁精矿金属化球团磁选分离铁钛是可行的,铁的回收率及在磁性物中的品位均在 90% 左右,钛的回收率在 45% 左右,钛在非磁性物中的品位在 35% 左右。

2) 本试验中,钒钛铁精矿金属化球团磁选分离铁钛的最佳工艺参数为:电流强度 2.5 A,粒度 -74 μm(-200 目),矿液比为 1:7。

3) 钒钛铁精矿金属化球团磁选试验得到的产品为直接还原铁粉和富钒钛料,直接还原铁粉杂质含量相对较低,经压块后可直接作为电炉炼钢原料;富钒钛料 TiO₂ 品位较低,杂质含量高,如何对其进行处理是未来钒钛铁精矿磁选工艺的重要研究方向。

参考文献

[1] Cheng Xixiang. A study on process mineralogy of vanadium-bearing titaniferous magnetite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1984, 3(4): 27-32.

- (程希翱. 钒钛磁铁矿的工艺矿物学研究[J]. 矿冶工程, 1984, 3(4): 27-32.)
- [2] Chen Desheng, Song Bo, Wang Lina, *et al.* Solid state reduction of Panzhihua titanomagnetite concentrates with pulverized coal [J]. Minerals Engineering, 2011 (24): 864-869.
- [3] Xue Xun. Research on direct reduction of vanadic titanomagnetite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2007, 28(3): 37-41. (薛逊. 钒钛磁铁矿直接还原实验研究[J]. 钢铁钒钛, 2007, 28(3): 37-41.)
- [4] Liu Xiaohua, Gai Guosheng, Yang Yufen, *et al.* Kinetics of the leaching of TiO₂ from Ti-bearing blast furnace slag [J]. Journal of China University Mining & Technology, 2008(18): 275-278.
- [5] Hong Liu, Ding Yehua, Xie Hongen. Prospect of comprehensive utilization of V-bearing titanomagnetite by rotary hearth furnace process [J]. Metal Mine, 2007(5): 10-13. (洪流, 丁跃华, 谢洪恩. 钒钛磁铁矿转底炉直接还原综合利用前景[J]. 金属矿山, 2007(5): 10-13.)
- [6] Cao Mingming, Zhang Jianliang, Xing Xiangdong, *et al.* Reduction mechanism of vanadium titanomagnetite carbon composite pellets [J]. Iron and Steel, 2012, 47(8): 5-12. (曹明明, 张建良, 邢相栋, 等. 钒钛磁铁矿含碳球团的还原机制[J]. 钢铁, 2012, 47(8): 5-12.)
- [7] Chen Housheng, Fan Xianguo, Qing Tingxu. Industrial tests of a new process for vanadium-bearing titaniferous magnetite smelting [C]// Proceedings of the First Top Level Conference Symposium on Innovation and Development of Vanadium and Titanium Industries, 2007: 75-83. (陈厚生, 范先国, 秦廷许. 钒钛磁铁矿冶炼新流程工业试验研究[C]//首届中国(承德)钒钛产业创新与发展高端会议论文集, 2007: 75-83.)
- [8] Zhu Deqing, Zhai Yong, Pan Jian, *et al.* Beneficiation of super microfine low-grade hematite ore by coal-based direct reduction magnetic concentration process [J]. Journal of Central South University (Science & Technology), 2008, 39(6): 1132-1138. (朱德庆, 翟勇, 潘建, 等. 煤基直接还原—磁选超微细贫赤铁矿新工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(6): 1132-1138.)
- [9] Yang Huifeng, Jing Lili, Dang Chungu. Iron recovery from copper-slag with lignite-based direct reduction followed by magnetic separation [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 25(5): 1165-1170. (杨慧芬, 景丽丽, 党春阁. 铜渣中铁组分的直接还原与磁选回收[J]. 中国有色金属学报, 2011, 25(5): 1165-1170.)
- [10] Yang H F, Jing L L, Zhang B G. Recovery of iron from vanadium tailings with coal-based direct reduction followed by magnetic separation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011 (185): 1405-1411.

编辑 杨冬梅

(上接第28页)

参考文献

- [1] Mo Wei, Deng Guozhu, Luo Fangcheng, *et al.* Metallurgy on titanium [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 369. (莫畏, 邓国珠, 罗方承. 钛冶金(第2版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 369.)
- [2] Chen Guoliang. High temperature alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988: 241. (陈国良. 高温合金学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 241.)
- [3] Schmidt. Method for preparing high purity vanadium: United States Patent #610720 [P]. 1986-09-09.
- [4] Peng Yumin, Wang Heng. Preparing high purity vanadium ingots by electron beam cold-hearth furnace [J]. Baosteel Technology, 2012(5): 17. (彭予民, 王恒. 电子束冷床炉熔炼制备高纯钒铸锭[J]. 宝钢技术, 2012(5): 17.)
- [5] Yang Shaoli, Liu Guoqin, Chen Housheng. Vanadium titanium materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 157. (杨绍利, 刘国钦, 陈厚生. 钒钛材料 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 157.)
- [6] Mukherjee T K, Gupta C K. Open aluminothermic reduction of vanadium oxides [J]. J. Less Common Met., 1971, 27: 251.

编辑 余文华