钒钛矿粉与进口矿粉的熔融特性比较

张明远[1]，王 涛[1]，李汉州[2]，万 新[1]，刘正勇[1]，柳 浩[1]，向刘欣[1]
(1. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院，重庆 401331；2. 成渝钒钛科技有限公司，四川 内江 642469)

摘要： 随着进口矿粉的限制条件趋紧以及价格上涨，国内矿粉对粗钢产量的贡献率逐年提高，而针对我国攀西地区丰富的钒钛磁铁矿资源的高效开发利用受到钢铁企业的关注。本文以软化温度、半球温度、流动温度和软化区间等熔融特性指标值来近似描述矿粉的液相形成和流动特征，并采用自主研发的微型烧结和矿粉熔融特性测定装置，在约束 SiO_2 质量分数和碱度(二元碱度为 2.0)的条件下，进行混合钒钛矿粉与 4 种进口矿的熔融特性指标检测，并采用相图分析和互配试验比较钒钛矿粉与进口矿粉的熔融特性。结果表明：不同种类铁矿粉的熔融特性指标各异，黑谷田、瑞禾和百草粉 3 种钒钛矿粉的软化温度均不高于 1 350 ℃，半球温度、流动温度均不高于1 410、1 490 ℃，较有利于低温烧结生产；由 15% 黑谷田粉 +55% 瑞禾粉 +30% 百草粉配制成的混合钒钛矿粉的软化温度、半球温度、流动温度、软化区间分别为 1 332.5、1 382.5 、1 470.5、138 ℃；澳矿 1、2 配入对钒钛混合粉的熔融特性有利；当智利矿粉配比超过 20% 或巴西矿粉超过 50% 时，混合矿粉的液相生成困难、流动性变差，对烧结矿质量带来负面影响。将一种固定的混合钒钛矿粉与进口矿搭配使用后，混合矿粉的熔融特性能够性能互补，并呈现叠加性。

关键词： 钒钛矿粉； 进口矿粉； 熔融特性； 互配
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0040－05
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.021

Comparison of fusion characteristics between vanadium-titanium ore powder and imported ore powder

ZHANG Mingyuan[1], WANG Tao[1], LI Hanzhou[2], WAN Xin[1], LIU Zhengyong[1], LIU Hao[1], XIANG Liuxin[1]
(1. School of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. Chengyu Vanadium-Titanium Technology Co., Ltd., Neijiang 642469, Sichuan, China)

Abstract: With the tightening of the restrictions on imported ore powder and the increase in prices, the contribution rate of domestic ore powder to crude steel production is increased year by year, and the efficient development and utilization of the abundant vanadium-titanium magnetite resources in Panxi region of China has attracted the attention of steel enterprises. Such fusion characteristic index values as softening temperature, hemispheric temperature, flow temperature and softening interval are used to approximately characterize the liquid phase formation and flow characteristics of ore powder, and the fusion characteristics of mixed vanadium-titanium ore powder and four kinds of imported ores are tested under the condition of constraining SiO_2 mass fraction and alkalinity (binary alkalinity of 2.0), while the fusion characteristics of vanadium-titanium ore powder and imported ore powder are compared by phase diagram analysis and mutual matching test. The results show that the fusion characteristics of different kinds of iron ore powder are different, and the softening

收稿日期： 2021－12－09； **修回日期：** 2022－04－20
基金项目： 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj－msxmX0583)
作者简介： 张明远(1971—)，男，正高级工程师，从事冶金资源综合利用等研究工作。
通信作者： 万 新(1964—)，男，教授，从事冶金过程及资源综合利用等研究。

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

temperature of the three kinds of vanadium-titanium ore powder of Heigutian, Ruihe and Baicao powder is not higher than 1 350 ℃, and the hemispheric temperature and flow temperature are not higher than 1 410 and 1 490 ℃ respectively, which is more conducive to low-temperature sintering production. The softening temperature, hemispheric temperature, flow temperature and softening interval of vanadium-titanium ore powder mixed with 15% Heigutian powder + 55% Ruihe powder + 30% Baicao powder are 1 332.5, 1 382.5, 1 470.5 ℃ and 138 ℃, respectively. The incorporation of No. 1 and 2 of Australian ore is favorable to the fusion characteristics of vanadium-titanium mixed powder; when the ratio of Chilean ore powder exceeds 20% or Brazilian ore powder exceeds 50%, the liquid phase of the mixed ore powder is difficult to generate and the fluidity becomes poor, which negatively affects the quality of the sinter. After a fixed mixed vanadium-titanium ore powder is used with imported ore power, the fusion characteristics of the mixed ore powder can be complementary and superimposed.

Key words: vanadium-titanium ore powder; imported ore powder; fusion characteristic; interworking

随着炼铁工业的飞速发展，2021 年我国生铁产量已达 86 857 万吨[1]，而烧结矿已成为炼铁原料中不可或缺的一部分。为了保证高炉的顺行高产，许多专家着手研究烧结矿的物理化学特性和冶金性能[2]。我国攀西地区有着丰富的钒钛磁铁矿资源，且价格低廉。但钒钛磁铁矿在冶炼过程中和主流的进口铁矿粉存在着许多不同特性，如黏度、烧结温度以及液相组成等[3-4]。我国西南地区烧结厂生产的原料中钒钛磁铁矿占比很大，其配比通常在 50% 左右[5]。采用钒钛磁铁矿生产的烧结矿的质量会发生很大变化，特别是低温还原粉化性指数明显下降，导致高炉出现悬料现象，影响高炉生产技术经济指标[6]。国内一些学者对常用进口铁矿粉的熔融特性和流动性进行了大量的研究，明确了采用普通烧结矿粉中 SiO_2 和 Al_2O_3 两种脉石成分对液相形成的影响，同时也阐明了钒钛矿烧结过程中液相生成的基本特点，但是脉石成分 TiO_2 的介入会对钒钛矿粉的熔融特性造成影响，相关规律研究还未见详细报道[7-10]。

已有研究表明，进口矿粉搭配使用时其烧结基础特性和熔融特性存在线性叠加规律，但是由于含有复杂脉石相的钒钛矿粉参与混合，其叠加特性仍需要予以确认。本文在研究主流进口矿粉熔融特性的基础上，对 8 种国内钒钛矿粉的熔融特性及配矿原则进行深入研究，探寻单种钒钛矿粉液相从生成到完全流动的变化规律，找到钒钛矿粉与进口矿粉的互配互补关系，并最终为实际烧结生产过程配矿提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用铁矿粉为我国西南地区钢铁企业常用的含铁原料，包括 8 种钒钛矿粉(矿粉 A ~ H，TiO_2、MgO 质量分数较高) 和 4 种进口矿粉(矿粉 I ~ L，铁品位较高，MgO、TiO_2 质量分数较低)，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：相较于钒钛矿粉，进口矿粉的铁品位普遍较高，将这两种矿粉搭配使用，可提高钒钛矿高炉冶炼的入炉矿品位。受制于铁矿价格，混合矿粉的各项特性及其对烧结过程液相生成的影响，以及混合配矿后应采取哪些适应性措施需要进一步研究。

1.2　试验方法

试验使用的仪器主要为自主研发的微型烧结和矿粉熔融特性测定装置，如图 1 所示。该装置能够实现温度和熔速监控条件下的矿粉熔融特性全时在线图像显示。试验分别将 12 种铁矿粉中的 SiO_2、CaO 质量分数配至 5.4%、10.8%，使混合矿粉的碱度达到 2.0；取一定量配好的铁矿粉磨碎，加入无水乙醇用压力机制成∅3 mm × 3 mm 的圆柱，并放置在刚玉载片上备用；待微型烧结炉的温度达到 1 000 ℃后，将样品缓慢送入设备中，设置升温速率为 5 ℃/min，进行矿粉熔融特性测定。在约束 SiO_2 质量分数和碱度的条件下，以电加热的方式测定单一矿粉或混合矿粉软化温度、半球温度、流动温度和软化区间等熔融特性。

定义软化温度为矿粉圆柱高度剩余 75% 时的温度，半球温度为矿粉圆柱高度剩余 50% 时的温度，流动温度为矿粉圆柱高度剩余25% 时的温度，

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

表 1 钒钛矿粉和进口矿的化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of vanadium titanium powder and imported ore %

原料编号	原料名称	TFe	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	V_2O_5	TiO_2
A	经久太和粉	55.70	3.19	2.82	2.00	0.88	0.62	11.43
B	立宇粉	55.35	4.06	3.16	2.17	0.93	0.66	10.37
C	百草粉	55.83	3.68	2.64	2.18	1.05	0.65	11.23
D	黑谷田粉	55.87	4.24	3.35	2.68	0.73	0.71	8.86
E	瑞禾粉	57.42	3.56	2.44	2.10	1.38	0.67	8.61
F	安隆粉	60.75	2.70	2.39	1.54	0.77	0.69	6.79
G	中睿粉	58.26	3.36	2.18	2.26	1.25	0.68	8.56
H	大石粉	54.01	5.53	2.44	2.96	1.65	0.56	9.25
I	巴西粉	62.71	5.91	1.57	0.10	0.12	0.10	0.13
J	澳矿 1	62.18	3.68	2.38	0.10	0.10	0.01	0.17
K	澳矿 2	59.52	5.39	2.50	0.10	0.10	0.10	0.16
L	智利粉	63.99	4.80	0.81	1.73	1.64	0.45	0.39

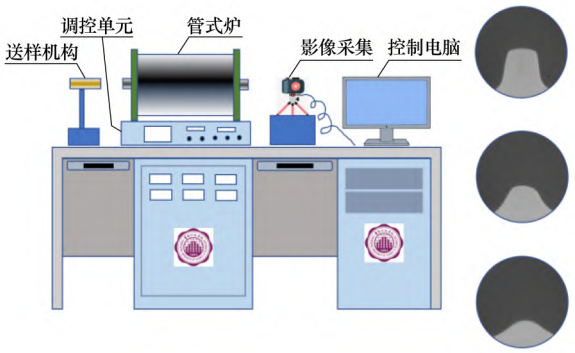


图 1 矿粉熔融特性测定装置

Fig. 1 Measuring device for fusion characteristics of mineral powder

软化区间为矿粉状态从开始软化到流动的温度区间。根据试验设定的条件并结合烧结过程原理可知，软化温度描述了固相反应完成且形成低熔点化合物，并开始生成液相的特征温度，该指标可以表征对应矿粉烧结的难易程度；随着烧结进程的推进以及液相的扩展，固相可以消化成为液相或残留固相，因此用半球温度体现了液相的扩展及其对固相的消化能力；流动温度则用来表征液相流动性的好坏，体现固相消化和熔融动力学条件的优劣，该温度在烧结进程加快时较低，反之则较高[11]。

2 试验结果与讨论

2.1 铁矿粉的熔融特性

12 种铁矿粉的软化温度、半球温度、流动温度和软化区间如表 2 所示。由表 2 可知：

(1) 8 种钒钛矿粉的软化温度略有差别，但均在易烧结的温度范围内。经久太和、百草、中睿和瑞禾 4 种钒钛矿粉的软化能力较强，均不高于 1 340 ℃；黑谷田、立宇和安隆 3 种钒钛矿粉的软化能力一般，为 1 340 ~ 1 350 ℃；大石粉的软化能力较弱，为 1 361 ℃。相对钒钛矿粉而言，巴西、澳矿 1 和澳矿 2 这 3 种进口矿的软化温度较低，均不高于 1 330 ℃。

(2) 8 种钒钛矿粉的半球温度略有差别，但都高于智利粉、澳矿 1 和澳矿 2 这 3 种进口矿。大石粉的半球温度最高，为 1 419.5 ℃，其余 7 种钒钛矿粉的半球温度较低，均不高于 1 409 ℃。

(3) 8 种钒钛矿粉的流动温度差别较大。安隆和大石 2 种钒钛矿粉的流动温度较高，均为 1 500 ~ 1 510 ℃，其余 6 种钒钛矿粉的流动温度较低，均不高于 1 490 ℃。巴西、澳矿 1 和澳矿 2 这 3 种进口矿的流动温度同样也存在着较大差异。

(4) 智利粉的软化温度、半球温度和流动温度远高于其他 3 种进口矿粉和钒钛矿粉，其在低温烧结条件下很难生成足够的有效液相，导致烧结矿的固结强度下降。分析原因认为，钒钛磁铁矿的 TiO_2 质量分数很高，其在高温条件下会生成钙钛矿抑制铁酸钙的形成；从化学成分来看，虽然智利粉的铁品位最高，但相比于其他 3 种进口矿而言，其 Al_2O_3 质量分数非常低，MgO 质量分数非常高。而 MgO 会抑制铁酸钙黏结相的形成，

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

而在高碱度下 Al_2O_3 会促进铁酸钙的生成。

(5) 8 种钒钛矿粉的软化区间差别较大。其中，百草、经久太和、立宇 3 种钒钛矿粉的软化区间较小，均不高于 120 ℃；安隆钒钛矿粉的软化区间较大，为 152 ℃；巴西粉软化区间最大，为 177.5 ℃，其在低温烧结条件下可以产生足够的液相，且其烧结温度区间相对容易控制；智利粉的软化区间最小，为 111.5 ℃，其在实际生产中的烧结温度区间很难控制。

表 2　钒钛矿粉与进口矿粉的软化温度、半球温度、流动温度和软化区间

表 2　The softening temperature, hemispheric temperature, flow temperature and softening interval of vanadium-titanium ore powder and imported mineral powder　℃

原料名称	软化温度	半球温度	流动温度	软化区间
经久太和粉	1 320.0	1 382.5	1 437.0	117.0
立宇粉	1 347.5	1 403.0	1 467.5	120.0
百草粉	1 327.0	1 389.0	1 441.5	114.5
黑谷田粉	1 346.0	1 406.0	1 483.5	137.5
瑞禾粉	1 334.5	1 401.0	1 456.5	122.0
安隆粉	1 348.0	1 408.5	1 500.0	152.0
中睿粉	1 334.0	1 405.5	1 472.0	138.0
大石粉	1 361.0	1 419.5	1 510.0	149.0
巴西粉	1 309.5	1 398.0	1 487.0	177.5
澳矿 1	1 325.0	1 370.0	1 466.0	141.0
澳矿 2	1 330.0	1 369.0	1 450.0	120.0
智利粉	1 401.0	1 459.5	1 512.5	111.5

由上述结果可知，不同种类铁矿粉的熔融特性指标不同。就熔融特性而言，黑谷田、瑞禾和百草粉 3 种钛矿粉的软化温度均不高于 1 350 ℃，半球温度均不高于 1 410 ℃，流动温度均不高于 1 490 ℃，较有利于低温烧结生产。根据钢铁企业原料情况，后续试验选用 15% 黑谷田粉 + 55% 瑞禾粉 + 30% 百草粉配制成混合钒钛矿粉，并将混合钒钛矿粉与各进口矿粉进行互配试验。

2.2　钒钛矿粉与进口矿粉的互配关系

2.2.1　CaO-SiO_2-TiO_2 三元系相图分析

低温烧结技术要求烧结温度不能过高，期望在较低的温度范围内产生足够的液相，且液相生成过程较为稳定。因此，在配矿时应重视将不同熔融特性的矿粉之间搭配使用，以起到互补或改善作用。本文通过 FactSage 软件绘制 CaO-SiO_2-TiO_2 三元系相图，结果如图 2 所示。由图 2 可知：8 种钒钛矿粉的物相所在区间为三角形区域，该区域内的物相组成为液相和红金石，其矿物熔化温度比较低，这证明在控制烧结组分的条件下钒钛矿粉可以具有良好的熔融特性。

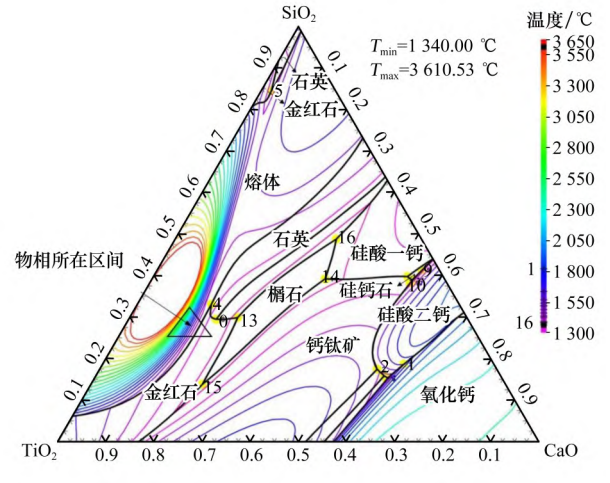


图 2　CaO-SiO_2-TiO_2 三元系相图

Fig. 2　Phase diagram of CaO-SiO_2-TiO_2 ternary system

由 15% 黑谷田粉 + 55% 瑞禾粉 + 30% 百草粉配制成混合钒钛矿粉的熔融特性中，软化温度为 1 332.5 ℃，半球温度为 1 382.5 ℃，流动温度为 1 470.5 ℃，软化区间为 138 ℃。由此可知：混合钒钛矿粉的软化温度，相对于黑谷田粉和瑞禾粉分别降低了 13.5、2.0 ℃，相对于百草粉升高了 5.5 ℃；半球温度相对于黑谷田、瑞禾和百草粉分别降低了 23.5、18.5、6.5 ℃；流动温度相对于黑谷田粉降低了 13 ℃，相对于瑞禾粉和百草粉升高了 14、29 ℃；软化区间相对于黑谷田、瑞禾和百草粉分别扩大了 0.5、16.0、23.5 ℃。

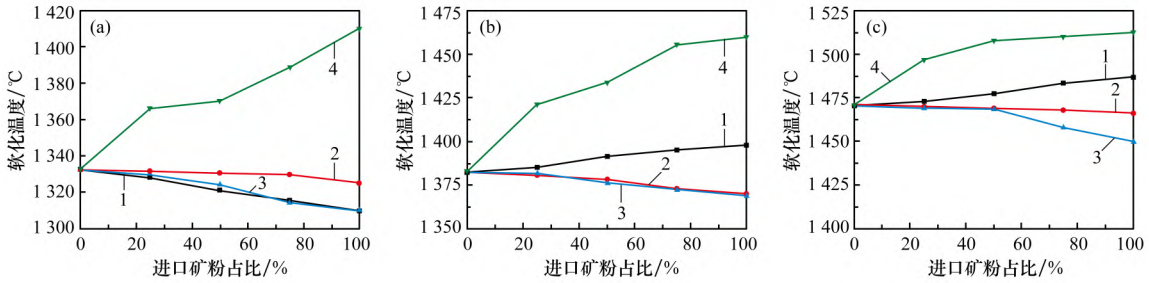
2.2.2　混合钒钛矿粉与单种进口矿粉的互配试验

设定混合钒钛矿粉的配比分别为 100%、75%、50%、25%、0，对应单种进口矿粉的配比分别为 0、25%、50%、75%、100%，进行矿粉互配试验，矿粉的软化温度、半球温度和流动温度如图 3 所示。

由图 3 可知：互配矿粉的软化温度，随澳矿 1、澳矿 2 和巴西粉配比的增加呈下降趋势，随着智利粉配比的增加呈上升趋势；互配矿粉半球温

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

度和流动温度，随澳矿 1、2 配比的增加均呈下降趋势，随着巴西粉和智利粉配比的增加均呈上升趋势。当钒钛混合粉中智利矿粉配比超过 20% 或巴西矿粉配比超过 50% 时，混合矿粉的液相生成困难、流动性变差，对烧结矿质量带来负面影响。分析原因认为：混合钒钛矿粉与进口矿粉互配可弥补钒钛矿粉矿相成分不均的问题，弱化了钙钛矿的生成能力，有利于液相的生成；且相较于其他 3 种进口矿，智利粉 Al_2O_3 质量分数较低，MgO 质量分数较高，而在高碱度条件下 Al_2O_3 具有促进复合铁酸钙形成的作用，且能增加液相的表面张力，增加氧离子扩散，有利于磁铁矿向赤铁矿转变[12-14]。由此可知，互配矿粉的熔融特性呈现线性叠加性，达到了较好的互补效果。



(a) 软化温度；(b) 半球温度；(c) 流动温度

1—巴西粉；2—澳矿 1；3—澳矿 2；4—智利粉。

图 3 互配矿粉的软化温度、半球温度和流动温度

Fig. 3 Softening temperature, hemispheric temperature and flow temperature of powder matching

3 结 论

(1) 不同种类铁矿粉的熔融特性指标各异。就熔融特性而言，黑谷田、瑞禾和百草粉 3 种钛矿粉的软化温度均不高于 1 350 ℃，半球温度均不高于 1 410 ℃，流动温度均不高于 1 490 ℃，较有利于低温烧结生产。

(2) $CaO-SiO_2-TiO_2$ 三元系相图分析结果表明，由 15% 黑谷田粉 + 55% 瑞禾粉 + 30% 百草粉配制成的混合钒钛矿粉的软化温度为 1 332.5 ℃、半球温度为 1 382.5 ℃、流动温度为 1 470.5 ℃、软化区间为 138 ℃。互配试验结果表明，澳矿 1、2 配入对钒钛混合粉的熔融特性有利，当智利矿粉配比超过 20% 或巴西矿粉超过 50% 时，混合矿粉的液相生成困难、流动性变差，对烧结矿质量带来负面影响。

(3) 将一种固定的混合钒钛矿粉与进口矿搭配使用后，混合矿粉的熔融特性能够性能互补，并呈现叠加性。

参考文献:

[1] 吴胜利，刘宇，杜建新，等. 铁矿石烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报，2002，24(3)：254－257.
WU Shengli，LIU Yu，DU Jianxin，et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2002，24(3)：254－257.

[2] 何占伟，薛向欣. 典型钒钛磁铁矿的烧结基础特性[J]. 钢铁，2020，55(5)：20－25.
HE Zhanwei，XUE Xiangxin. Basic sintering characteristics of several typical vanadium titanium magnetite [J]. Iron and Steel，2020，55(5)：20－25.

[3] 郭兴敏，朱利，李强，等. 高碱度烧结矿的矿物组成与矿相结构特征[J]. 钢铁，2007，42(1)：17－20.
GUO Xingmin，ZHU Li，LI Qiang，et al. Mineralogical composition and microstructure of high basicity sinters [J]. Iron and Steel，2007，42(1)：17－20.

[4] 李建，毛晓明. 钒钛磁铁矿对烧结及炼铁的影响分析[J]. 矿冶工程，2018，38(4)：98－101.
LI Jian，MAO Xiaoming. Effect of vanadium titanium magnetite on sintering and iron making [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2018，38(4)：98－101.

[5] 何群，甘勤，李洪芳，等. 攀钢烧结合理配矿试验[J]. 钢铁钒钛，1999(3)：30－36.
HE Qun，GAN Qin，LI Hongfang，et al. Rational ore matching test for sintering at Pangang [J]. Iron Steel Vanadium Titanium，1999(3)：30－36.

(下转第 51 页)

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

[15] 刘柏谦，张飞龙，谭培来. NACT 滚筒冷渣机工业性能研究[J]. 热能动力工程，2017，32(10)：71－75；83.
LIU Baiqian，ZHANG Feilong，TAN Peilai. Study of the industrial performance of a new ash cooling technology (NACT)-based roller type slag cooler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2017，32(10)：71－75；83.

[16] 谢强. 还原铁球团快速冷却方法及其应用研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.
XIE Qiang. Research on rapid cooling method for directly reduced iron pellets and its application [D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2019.

[17] 孙立军，刘柏谦，谭培来，等. 滚筒冷渣机料床温度分布及传热性能研究[J]. 动力工程学报，2015，35(7)：568－573.
SUN Lijun，LIU Baiqian，TAN Peilai，et al. Study on bed temperature distribution and heat transfer performance of rotary drum ash coolers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2015，35(7)：568－573.

(上接第 44 页)

[6] 杨广庆，杨文康，李小松，等. 钒钛烧结矿与普通烧结矿还原过程中微观结构变化对比研究[J]. 钢铁钒钛，2018，39(2)：102－109.
YANG Guangqing，YANG Wenkang，LI Xiaosong，et al. Comparative study of microstructure changes in vanadium titanium sinter and ordinary sinter during reduction process [J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2018，39(2)：102－109.

[7] LIU H，QIN Y，WU X，et al. Experimental study on oxygen-enriched sintering of vanadium-titanium magnetite [J]. Journal of Chemistry，2018(6)：1－9.

[8] 金明芳，李光森，姜鑫，等. 影响烧结过程最初液相形成的因素分析[J]. 节能，2008(4)：7－9.
JIN Mingfang，LI Guangsen，JIANG Xin，et al. Influence factors on the formation of initial melt during sintering [J]. Energy Conservation，2008(4)：7－9.

[9] MATSUMURA M，HOSHI M，KAWAGUCHI T. Improvement of sinter softening property and reducibility by controlling chemical compositions [J]. ISIJ International，2005，45(4)：594－602.

[10] EIKI Kasai，WU Shengli，YASUO Omori. Factors governing the strength of agglomerated granules after sintering [J]. ISIJ International，1991，31(1)：17－23.

[11] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2014.
JIANG Tao. The technology enchiridion of sintering and pelletizing [M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2014.

[12] 张建良，苏步新，车晓梅，等. 若干国内外铁矿粉的同化性实验研究[J]. 冶金工程学报，2011(2)：97－102.
ZHANG Jianliang，SU Buxin，CHE Xiaomei，et al. Experimental study on assimilation of iron ores at home and abroad [J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2011(2)：97－102.

[13] 姚君豪，杨军，韩冬，等. 添加剂对高 MgO 烧结矿中铁酸钙生成的影响[J]. 钢铁，2015，50(2)：12－16；21.
YAO Junhao，YANG Jun，HAN Dong，et al. Effect of additives on formation of calcium ferrites in magnesiariched sinters [J]. Iron and Steel，2015，50(2)：12－16；21.

[14] HESSIEN M M，KASHIWAYA Y，ISHII K，et al. Sintering and heating reduction processes of alumina containing iron ore samples [J]. Ironmaking and Steelmaking，2008，35(3)：191－204.

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