综述

钒钛矿烧结生产的研究进展

邢汉威[1a]，姜 鑫[1]，张付林[2]，纪 恒[3]，靳亚涛[3]，隋孝利[3]，沈峰满[1]
（1. 东北大学 a. 冶金学院 b. 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819；2. 鞍钢股份有限公司 炼钢总厂，辽宁 鞍山 114021；3. 河钢股份有限公司 承德分公司，河北 承德 067101）

摘要：本文归纳了钒钛矿的烧结特点，分析了钒钛烧结矿强度差、低温还原粉化现象严重的主要原因，介绍了增加铁酸钙黏结相量、控制燃料配比、控制烧结温度、配加褐铁矿、强化制粒、复合造块及烧结矿表面喷洒$CaCl_2/B_2O_3$溶液等能够改善钒钛矿烧结指标的技术措施，展望了钢铁企业钒钛矿强化烧结面临的问题及解决方案。

关键词：钒钛烧结矿；钙钛矿；褐铁矿；含硼矿物；转鼓强度
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0001－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.034

Research progress on sintering production of vanadium-titanium ore

XING Hanwei[1a], JIANG Xin[1], ZHANG Fulin[2], JI Heng[3], JIN Yatao[3],
SUI Xiaoli[3], SHEN Fengman[1]
(1. Northeastern University a. School of Metallurgy; b. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Steelmaking General Factory of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China; 3. Chengde Branch of HBIS Group Co., Ltd., Chengde 067101, Hebei, China)

Abstract: The sintering characteristics of vanadium-titanium ore are summarized, and the main reasons for the poor strength of vanadium titanium sinter and the serious phenomenon of low temperature reduction pulverization are analyzed; and then the technical measures that can improve the sintering index of vanadium-titanium ore are introduced, such as increasing the binder phase of ferrite, controlling the fuel ratio, controlling the sintering temperature, adding limonite, strengthening granulation, composite briquetting and spraying $CaCl_2/B_2O_3$ solution on the surface of the sinter; finally, the problems and solutions faced by vanadium-titanium ore strengthening sintering in iron and steel enterprises are prospected.

Key words: vanadium-titanium sinter; perovskite; limonite; boron-bearing minerals; tumbler strength

钒钛磁铁矿是一种富含多种有价金属的矿物，具有很高的利用价值，已得到全球冶金工作者的重点关注。全球已探明的钒钛磁铁矿资源总储量在 400 亿 t 以上，主要分布在中国、俄罗斯、南非等国家。我国的钒钛磁铁矿储量极大，已探明的储量高达 180 多亿 t，主要产区有四川攀枝花、河北承德、辽宁朝阳等，其中攀枝花地区已探明的钒钛磁铁矿储量达 100 亿 t，占世界钛储量的 35.2%（且占全国的 90% 以上），位居世界第一[1-2]。钒钛磁铁矿的综合利用对改善炼铁工艺流程的技术经济指标具有重要意义，有利于我国钢铁工业的可持续发展。

收稿日期：2022－09－14；**修回日期**：2023－07－12
基金项目：国家自然科学基金资助项目（NSFC 52074074，NSFC 51974073）；国家重点研发计划资助项目（2021YFC2902401）；辽宁省兴辽英才计划资助项目（XLYC2007152）
作者简介：邢汉威（1999—），男，硕士研究生，从事钢铁冶金方面的研究。
通信作者：姜 鑫（1980—），男，教授，博士生导师，从事钢铁冶金方面的研究。

目前，钒钛磁铁矿冶炼的主流工艺为烧结造块—高炉炼铁—转炉提钒，该工艺生产效率高、规模大、技术成熟，可有效提取矿石中的铁、钒等元素，在钒钛磁铁矿利用领域占主导地位。本文对钒钛磁铁矿烧结的试验研究和生产实践进行了全面的文献调研，主要包括钒钛矿的烧结特性与优化措施，并提出了相应的解决建议，为钢铁企业高效使用钒钛矿，改善钒钛矿烧结的技术经济指标提供理论指导和参考依据。

1 钒钛矿的烧结特点

1.1 化学成分的特殊性

本文主要从钒钛矿的化学成分、化学反应、显微结构及冶金性能4个方面来分析钒钛矿的烧结特点。根据TiO_2含量不同，钒钛磁铁矿可划分为低钛、中钛及高钛三种类型，普遍认为低、中、高钛型钒钛磁铁矿的TiO_2质量分数在2%以内，中钛型在2%~7%，高钛型在7%以上。表1[1-3]为几种典型钒钛磁铁精矿成分。由表1可见，俄罗斯钒钛磁铁精矿属于中钛型钒钛磁铁矿，铁品位较高，钒含量较低；而南非钒钛磁铁精矿的钒含量高，适合作为提钒原料。国内的几种典型钒钛精矿中，攀枝花地区的钒钛磁铁矿具有低铁、低硅、高钛、粒度粗、成球性差等特点，导致烧结矿成品率较低、强度较差、低温还原粉化现象比较严重。而承德钒钛磁铁矿属于低铁、低硅、中钛、高铝型磁铁矿。朝阳钒钛磁铁矿属于贫矿，与国内其它钒钛磁铁精矿相比，铁含量最低，钒、钛含量最高，与南非钒钛矿类似，适合应用于提钒工艺。

1.2 CaO反应的特殊性

钒钛矿烧结过程中CaO发生的反应主要有三类，包括与SiO_2反应生成硅酸盐[如式(1)、(2)]，与Fe_2O_3反应生成铁酸盐[如式(3)、(4)]，与TiO_2反应生成钙钛矿[如式(5)]，这些反应物及生成物之间也存在着置换反应[如式(6)、(7)]。

$$CaO + SiO_2 = CaO \cdot SiO_2 \quad (1)$$

$$2CaO + SiO_2 = 2CaO \cdot SiO_2 \quad (2)$$

$$CaO + Fe_2O_3 = CaO \cdot Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$2CaO + Fe_2O_3 = 2CaO \cdot Fe_2O_3 \quad (4)$$

$$CaO + TiO_2 = CaO \cdot TiO_2 \quad (5)$$

$$CaO \cdot Fe_2O_3 + TiO_2 = CaO \cdot TiO_2 + Fe_2O_3 \quad (6)$$

$$CaO \cdot Fe_2O_3 + SiO_2 = CaO \cdot SiO_2 + Fe_2O_3 \quad (7)$$

杨绍利等[4]的研究表明，600 ℃时，CaO与周围脉石和铁氧化物发生固相反应，除了生成钙钛矿，还会生成铁酸钙、硅酸钙等物质，钙钛矿在固相反应中的生成量受到限制。孙艳琴等[5]的研究表明，钙钛矿的生成减少了优质铁酸钙黏结相的生成量，在1 250~1 350 ℃时，钙钛矿生成速度最快，且钙钛矿生成后一直以固态弥散分布在烧结矿中，钙钛矿不是液相冷却过程中析出的。

1.3 钒钛烧结矿显微结构

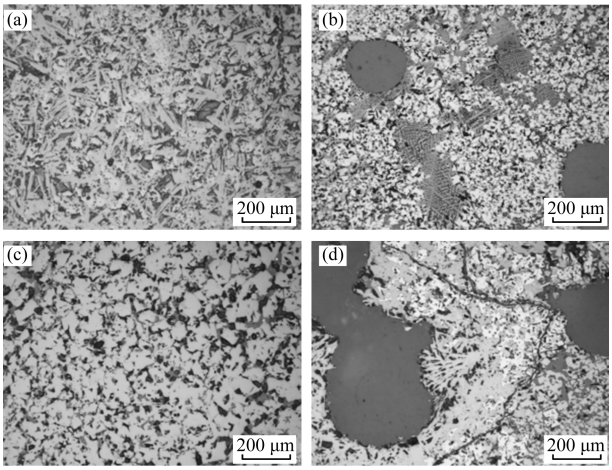
针对钒钛烧结矿强度较差的问题，广大冶金工作者对其矿相及显微结构亦进行了深入研究。白冬冬等[6]分别对中钛和高钛两种不同烧结矿进行了显微分析，结果表明中钛型烧结矿矿相以熔蚀结构为主，被熔蚀的钛磁铁矿与针状铁酸钙交织在一起[图1(a)]；高钛型钒钛烧结矿矿相以黏结相矿物晶粒与它形晶或半自形晶组成的粒状结构为主[图1(b)]；相较于中钛型烧结矿，高钛型烧结矿中出现了钙钛矿，呈网络状分布在钛磁铁矿中间[图1(c)]；铁酸钙黏结相以树枝状集中存在于气孔边缘[图1(d)]。陈霄等[7]的研究表明，

表1 典型钒钛磁铁精矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Mach chemical composition of typical vanadium-titanium magnetite concentrate %

矿区	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	V_2O_5	TiO_2
俄罗斯[4]	59.0	—	3.60	—	—	2.00	0.60	2.30
南非[5]	55.43	8.00	2.21	0.17	0.28	2.56	1.98	13.13
攀西[6]	56.44	28.62	1.79	0.69	0.94	0.32	0.86	11.96
承德[6]	64.94	27.61	4.99	0.96	0.64	2.28	0.16	2.28
朝阳[6]	43.75	18.40	7.00	3.52	0.70	1.83	1.62	21.54

普通烧结矿结构均匀，以交织熔蚀结构为主，而钒钛烧结矿以粒状结构、骸晶结构为主，且气孔率更高，不规则的气孔多数连通，裂纹贯穿气孔间。这种结构不利于保证烧结矿强度。



（a）中钛烧结矿交织熔蚀结构；（b）高钛烧结矿粒状结构；（c）高钛烧结矿网络状钙钛矿；（d）高钛烧结矿树枝状铁酸钙

图 1　钒钛烧结矿显微结构

Fig. 1　Microstructure of vanadium-titanium sinter

黏结相是烧结过程中高温生成的液相冷却凝结形成的，黏结相的数量、组成、形成机理及物理化学性质都直接影响烧结矿的冶金性能。陈霄等[7]对钒钛烧结矿和普通烧结矿的矿物组成进行了定量分析，结果如表 2 所示。由表 2 可知，钒钛烧结矿的钙钛矿质量分数高达 20% 以上，且优质的铁酸钙黏结相约为普通烧结矿的一半，这是钒钛烧结矿强度差、低温还原粉化严重的直接原因。刘然等[8]的研究结果表明，TiO_2 含量的增加抑制了优质的铁酸钙黏结相生成量，而生成的钙钛矿分布于各种矿物之间，减弱了黏结相的黏结能力及连晶效果，低温还原时先在钙钛矿附近产生裂纹，影响烧结矿强度。因此，控制 TiO_2 含量对改善钒钛烧结矿质量，提高烧结矿强度具有重要作用。

钒钛烧结矿的矿相结构与普通烧结矿有明显差异，导致其强度较差。控制 TiO_2 含量是提高钒钛烧结矿质量和强度的关键。

1.4　烧结指标的特殊性

与普通烧结矿相比，钒钛烧结矿成矿过程更为复杂，因其自身特性对烧结矿强度会产生不利影响。承钢烧结生产在不加钒钛矿时，烧结矿强度可达 76.2%，当钒钛矿配比在 40% 且碱度由 1.95 提高至 2.10 情况下，烧结矿强度降低至 75.4%。钒钛烧结矿强度较差[9]，原因主要有[9]：① 钒钛磁铁矿硅含量低，导致生成的液相量少，且硅酸盐少，导致生成的钙钛矿多；② 钒钛烧结矿中含有较多的 TiO_2 及其化合物，熔点较高，进一步减少液相的生成量；③ 分布在各矿物之间的钙钛矿不仅没有黏结性，还会削弱其它矿物之间的连晶效果及黏结效果。

低温还原粉化指数（ >3.15 mm）是评价烧结矿质量的重要参数。烧结矿的低温还原粉化会影响高炉透气性，严重时还会引发悬料、崩料等生产事故。同口径条件下，钒钛烧结矿的低温还原粉化性能差，某钢厂生产的普通烧结矿低温还原粉化指数为 73.5%[10]，而钒钛烧结矿低温还原粉化指数仅为 57.07%（一般要求在 65% 以上）[11]。其主要原因是钒钛烧结矿还原时发生了晶型转变，引起体积膨胀，且钛磁铁矿和钛赤铁矿固溶了多种矿物，它们在还原时产生的应力大小及方向不同，导致烧结矿内部裂纹的生成与发展[12]。钒钛烧结矿低温还原粉化的主要原因与普通烧结矿一致，但 TiO_2 及其化合物削弱了钒钛烧结矿强度，进而加剧了钒钛烧结矿的低温还原粉化[12]。

2　钒钛矿烧结的优化措施

2.1　控制合理的碱度

在广大冶金工作者的共同努力下，开发了多项强化烧结和改善烧结矿质量指标的技术措施，通常能够改善普通矿石烧结指标的技术措施基本

表 2　普通烧结矿与钒钛烧结矿的矿物组成及含量（质量分数）

Table 2　Mineral composition and content of ordinary sinter and vanadium-titanium sinter　　%

类型	赤铁矿	磁铁矿	铁酸钙	硅酸二钙	钙钛矿	玻璃质	硫化物
普通烧结矿	20 ~ 25	35 ~ 40	30 ~ 35	15 ~ 20	—	少量	微量
钒钛烧结矿	15 ~ 20	35 ~ 40	10 ~ 15	12 ~ 15	20 ~ 23	少量	微量

都可以在一定程度上改善钒钛矿烧结指标。本文主要结合钒钛矿烧结的特点，针对几种能够显著改善钒钛矿烧结指标的技术措施进行论述。

2.1.1 碱度对矿相结构的影响

碱度是烧结生产的一项重要参数，它不仅直接影响烧结矿的矿物组成和结构，还会对烧结过程中的诸多指标存在较大影响。钒钛磁铁矿 SiO_2 含量偏低，使得相同碱度条件下配加 CaO 的量减少；而且其中的 TiO_2 又会反应消耗一部分 CaO，因此通常钒钛矿烧结比普通矿烧结需要更高的碱度。随着碱度的增加，普通烧结矿的显微结构逐渐均匀化，形成交织熔蚀结构，铁酸钙黏结相逐渐过渡为针状矿物[13]，这种针状铁酸钙黏结相的断裂韧性好，有助于保证烧结矿强度。刘丽娜等[14]的研究表明，钒钛烧结矿随着碱度的提高，显微结构由不均匀结构逐渐转向均匀结构，并过渡到熔蚀结构(磁铁矿和钙钛矿被铁酸钙胶结)，铁酸钙黏结相明显增多，铁酸钙由它形晶过渡为柱状、针状，有助于提高烧结矿强度。

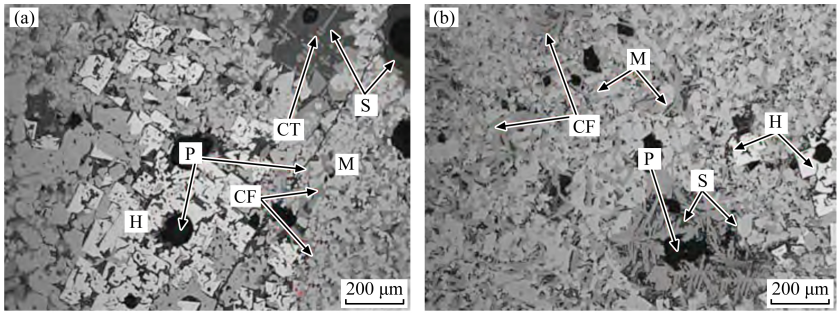
图 2[15]为不同碱度条件下钒钛烧结矿的矿相结构。由图 5 可知，当 $R=2.1$ 时，铁酸钙以块状为主，黏结相与磁铁矿、赤铁矿以点面形式黏结；当 $R=2.5$ 时，各种矿物之间主要以熔融交织结构黏结，铁酸钙多以高强度的针状形式存在，这种结构大大改善了钒钛烧结矿质量，是碱度提高可改善钒钛烧结矿冶金性能的内因。

2.1.2 碱度对烧结指标的影响

提高碱度会使 CaO 与铁氧化物有更高的结合概率，在反应动力学方面有助于铁酸钙黏结相的生成量。李文英等[16]的研究表明，随着碱度的升高，生石灰的配比增加，生石灰消化后生成的消石灰具有很强的黏结性，增强了钒钛磁铁矿的成球性，进而改善烧结料层的透气性。周密等[17]的研究表明，随着碱度的升高，生成更多的铁酸钙黏结相，使钒钛烧结矿中的赤铁矿(尤其是次生赤铁矿)含量下降，较高的碱度对钒钛矿的烧结是有利的。但是，碱度过高也会产生负面影响，故碱度应有上限值。由于不同研究人员所采用的原料不同、配比不同、参数不同，得到的最佳碱度范围也有所不同。表 3 列出一些研究人员对最佳碱度范围的成果汇总，供相关人员参考。

2.2 控制合理的燃料配比

烧结燃料配比取决于热量供求关系，直接影响烧结温度与烧结液相量，进而影响烧结矿质量。ZHOU 等[20]、王强等[20-21]的研究表明，当烧结温度为 1 300 ℃时，钒钛烧结矿中的铁酸钙生成量达到最大，继续升温则会使钙钛矿大量生成，铁酸钙减少，而过低的烧结温度又会使液相量减少。ZHANG 等[22]认为随着焦粉含量的增加，焦粉的燃烧量和放热量升高，垂直烧结速度加快，但过快的烧结速度会影响成品率。YANG 等[23]认为焦粉含量增加导致液相量增多，过多的液相会影响烧结混合料透气性，还会增强烧结过程中的还原气氛，影响复合铁酸钙的生成量。因此，钒钛矿烧结应采用烧结温度约为 1 300 ℃对应的燃料配比。笔者认为，燃料配比增加对钒钛矿烧结具有正负两方面的影响：正面影响是燃料配比增加放热量增多，有助于形成液相，解决钒钛矿烧结液



碱度：(a) 2.1；(b) 2.5

P—气孔；CF—铁酸钙；H—钛赤铁矿；M—钛磁铁矿；S—硅酸盐；CT—钙钛矿。

图 2 不同碱度钒钛烧结矿的显微照片

Fig. 2 Micrographs of vanadium-titanium sintering with different basicity

表 3　钒钛矿最佳碱度研究汇总

Table 3　Research summary of the optimal basicity

研究人员	铁矿粉 $w(TiO_2)$/%	碱度研究范围	钒钛烧结指标变化规律	继续增加碱度	最佳碱度
李文英[19]	2.17	1.7～2.1	当碱度由 1.7 提升至 2.1 时，垂直烧结速度提高 1.64 mm/min，成品率提高 4.7%，转鼓指数提高 6.7%，固体燃耗降低4.9 kg/t，还原度增加 10.2%；低温还原粉化指数增加 9.6%；软熔区间变窄	—	2.1
周密[20]	1.25～9.81	1.9～2.7	当碱度由 1.9 提升至 2.5 时，垂直烧结速度提高 5.57 mm/min，转鼓指数先降低后升高，共提高 2%；低温还原粉化指数增加 20%；软化性能变好	垂直烧结速度降低，成品率降低，固体燃料消耗升高	2.5
李秀[21]	1.54	1.55～2.35	当碱度由 1.55 提升至 1.9 时，成品率提高 3.3%，转鼓指数提高 4%，还原度增加 10%，低温还原粉化指数增加 10.8%	效果不明显	1.9
ZHANG[22]	11.01	1.7～2.5	当碱度由 1.7 提升至 2.3 时，垂直烧结速度提高 2.08 mm/min，还原度增加 7.7%；低温还原粉化指数增加 17%；软化性能变好	软熔区间变宽，成品率降低	2.3

相量不足的问题；负面影响是燃料配比增加，还原性气氛增加，不利于将钒钛矿中含量较高 FeO 氧化成 Fe_2O_3，从而不利于铁酸钙液相的生成。此外，适宜的燃料配比还跟燃料种类、燃烧效率相关，例如在总的热需求一定的情况下，焦粉放热量高，适宜配加量可以略低；而煤粉放热量低，适宜配加量则应当略高。因此，适宜的燃料配比应根据钒钛矿的配加比例、现有工艺参数下液相量的多少以及燃料种类等综合考虑，在承钢钒钛矿配比约为 60%、碱度约为 2.1、在使用焦粉煤粉混合燃料的情况下，燃料配比控制在 5.4%～5.8% 为宜。

2.3　烧结矿表面喷洒 $CaCl_2$

如前文所述，低温还原粉化性能差是钒钛烧结矿的弊端之一。周知，在烧结矿表面喷洒 $CaCl_2$ 溶液能够有效改善烧结矿的低温还原粉化性能；同样，该方法亦能有效改善钒钛烧结矿的低温还原粉化性能，但其影响机理尚不明确。ZHANG 等[24]认为 Cl^- 是降低钒钛烧结矿低温还原粉化指数(<3.15 mm)的主要物质，低温还原粉化率随 Cl^- 浓度的增加而降低；李咸伟[28]认为 Cl^- 能与对烧结矿低温还原粉化指数不利的 K、Na 等元素结合并挥发除去，故只要喷洒的溶液中含有 Cl^-，就能降低钒钛烧结矿低温还原粉化率；韩秀丽等[26]认为喷洒 $CaCl_2$ 溶液后，$CaCl_2$ 与烧结矿之间并没有明显的化学反应，而是烧结矿表面的片状 $CaCl_2$ 堵塞了气孔，阻碍了 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ 的还原过程，抑制了因低温还原而产生的粉化现象，从而使烧结矿 *RDI* 指标得到改善。实验结果表明在钒钛烧结矿表面喷洒 $CaCl_2$ 溶液后，低温还原粉化指数达到 97.75%，较不喷洒时提高了 37.2%，效果显著。但是，喷洒 $CaCl_2$ 溶液易导致高炉煤气中携带大量氯化物，腐蚀设备及管道，不宜长期大规模使用。此外，Cl 和 V 元素易生成低熔点化合物(VCl_2、VCl_3 等)，既能够随烟气逸出炉外，降低 V 元素的收得率；也能降低初渣熔点，局部产生低熔点物质，影响煤气流分布，从而降低含钒铁水的生产效率。

2.4　含硼资源的搭配使用

钒钛烧结矿强度差的原因之一是由于钙钛矿等高熔点矿物较多，导致烧结过程液相少，对烧结矿的固结能力弱。研究表明，含硼资源能够降低矿物熔点，促进液相的生成，因此在烧结料中配加含硼资源也能抑制烧结矿粉化，提高转鼓强度，改善烧结矿冶金性能。常用的含硼资源包括硼铁矿、硼泥、硼酸等。付小佼等[27]的研究表明，B_2O_3 熔点低(450 ℃)、易与其它氧化物形成低熔点化合物，促进烧结液相形成；还会使烧结液相黏度降低，烧结料层的透气性变好，对黏结

相的形成有促进作用。何木光等[11]的研究表明，配加 B_2O_3 的钒钛烧结矿中铁酸盐含量升高了约5%，钙钛矿含量下降了约2%，烧结矿相结构改善；同时，使用 B_2O_3 溶液等量替代 $CaCl_2$ 溶液喷洒在烧结矿表面，亦可以大幅度降低钒钛烧结矿的低温还原粉化率，其效果与喷洒 $CaCl_2$ 溶液接近。汪小虎等[28]的研究表明，硼离子半径小、易扩散，能够进入正硅酸钙晶格中起到稳定晶型的作用。何木光等[8]在烧结矿中配入0.23%的 B_2O_3，使钒钛烧结矿转鼓指数提高了1.66%、成品率提高了2.08%、产量增加3.82%、固体燃料燃耗下降了1.89 kg/t、低温还原粉化率降低了5.56%。

过多的 B_2O_3 会导致烧结速度过快，烧结过程中高温保持时间较短，冷却速度加快，从而影响钒钛烧结矿的强度和成品率；还会使生成的液相过多，烧结混合料的透气性变差。因此，含硼资源的使用应当适量，不宜过高。

2.5 搭配褐铁矿使用

与普通磁铁矿相比，钒钛磁铁矿由于含有 TiO_2 等熔点高、反应性差的矿物，使得矿石的同化性差(同化温度高)，这也是钒钛烧结矿强度差、返矿率高的原因之一。而褐铁矿同化温度相对较低，同化性较强，即在较低温度就能生成较多的液相。因此，从互补配矿的原则来看，褐铁矿可与熔点高、液相量偏少的钒钛磁铁矿形成互补，二者搭配使用可获得较好的同化效果，有助于改善烧结矿冶金性能。刘东辉等[29]的研究表明，适当配加褐铁矿可改善钒钛混合矿与熔剂反应的动力学条件，提高黏结相的流动性和自身强度，且可降低液相中的 TiO_2 含量，从而减少钙钛矿的生成量，矿物结构变好，提高烧结矿质量。表4为配加褐铁矿对钒钛矿烧结指标影响的研究案例[30]。由表4可见，当褐铁矿配比由27.5%增加至37.5%时，烧结矿成品率由70.11%增加至82.99%，转鼓强度由59.17%增加至62.98%，低温还原粉化指数由54.69%增加至57.87%，总体而言冶金性能成变好趋势，且褐铁矿价格低廉，具有一定的成本优势，钒钛矿烧结料中配加一定比例的褐铁矿可获得较好的技术经济指标。但是，应当注意，若褐铁矿取代普通铁矿粉，不会影响高炉铁水的钒含量；若褐铁矿取代钒钛矿，则会影响高炉铁水的钒含量，不利于含钒铁水的生产。

表4 配加褐铁矿对钒钛烧结矿冶金性能的影响

Table 4 Effect of adding limonite on metallurgical properties of vanadium-titanium sinter

质量分数/%					ΔT/℃
褐铁矿配比	成品率	转鼓指数	低温还原粉化指数	还原度	
27.5	70.11	59.17	54.69	83.15	74
32.5	81.70	60.93	56.08	82.25	73
37.5	82.99	62.98	57.87	78.68	68

2.6 强化制粒

通常，钒钛磁铁精矿比普通精矿的粒度粗，在烧结料制粒过程中既不适合做核颗粒，也不适合做粘附粉，因此不利于烧结制粒工序。而且，钒钛磁铁矿颗粒表面比较光滑，比表面积小(约为700~800 cm^2/g)，导致其亲水性较差，可接受的毛细水量较低(适合水分约为6.5%)，使得钒钛磁铁矿的制粒性能较差，且制粒颗粒的热强度差，在预热带、干燥带易爆裂破碎，不利于保证烧结料层的透气性。通过强化制粒可以有效改善钒钛磁铁矿的这些问题。蒋大军等[31]通过添加生石灰进行强化制粒操作，发现生石灰消化后变为消石灰胶体颗粒，内部的CaO会从扩散层和水膜内夺取水分，使胶体颗粒聚集，吸附矿粉，进而提升颗粒的吸附力及热稳定性，促进了液相生成和提高了烧结矿的强度。何木光等[32]的研究表明，活性石灰的活性度更高，强化制粒与烧结效果更好，用其代替部分生石灰有更好的制粒及烧结效果。何木光等[32]配加5%的生石灰代替消石灰，钒钛烧结矿质量得到改善，产量增加5.40%，固体燃料消耗降低5.42 kg/t。

2.7 复合造块技术

对于钒钛磁铁矿制粒性能差、料层透气性差、烧结矿强度差的问题，除使用强化制粒外，还可以使用复合造块技术处理钒钛磁铁矿。复合造块的种类较多，图3所示为一种典型的复合造块工艺流程[33]。这种烧结矿由酸性球团矿与高碱度烧结矿紧密镶嵌构成，具有良好的冶金性能。

与传统造块工艺相比，复合造块工艺将碱性

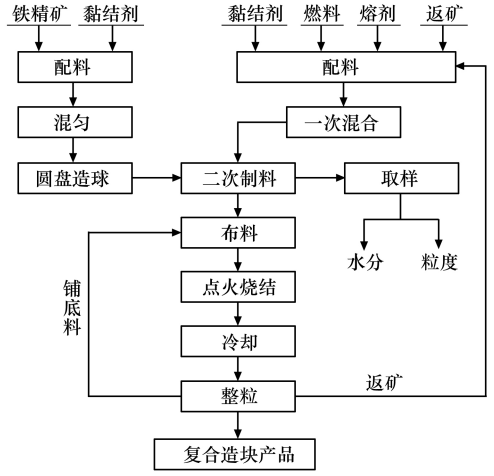


图 3　典型的复合造块工艺流程

Fig. 3　Flow chart of a typical multi-granulation process

料和酸性球团烧成一个整体，可解决单独使用球团矿造成的炉料偏析，且可以在烧结过程中直接调整高炉生产所需的碱度。万新宇等[33]的研究表明复合造块生产的酸性球团和碱性烧结矿的矿相结构没有明显界限，通过优质的铁酸钙黏结相牢固的胶结在一起，酸性球团嵌入碱性烧结矿中，形成较高强度的整体。马黎明等[34]使用细磨生石灰消化代替膨润土，生石灰消化后可以起到黏结剂的作用，既减少了碱度分布的不均匀，又可以提高复合矿的品位。张展雷等[35]在烧结混合料中配加 70% 的球团，相比传统工艺，复合造块工艺生产的钒钛烧结矿转鼓指数提高了 8.39%、成品率上升了 5.54%、固体燃料消耗下降了7.91 kg/t。酸性球团不会生成钙钛矿，而高碱度烧结矿会生成大量铁酸钙黏结相，使复合矿有较好的强度。应用复合造块工艺可将钒钛磁铁矿配比增至 100%，明显优于传统工艺(一般在 60% 以内)，并且实现了在同一烧结设备上同时生产烧结矿和球团矿，既降低了设备成本，又节约了能耗，具有良好的经济、环境效益。

3　结语与展望

(1) 相较于普通铁矿粉，钒钛矿的化学成分特殊，烧结过程更为复杂，尤其是 CaO 除生成铁酸钙以外，更容易生成高熔点的钙钛矿，矿相结构与普通烧结矿存在明显差异，强度、低温还原粉化等冶金性能较差。

(2) 采用适当提高碱度、控制燃料配比、控制烧结温度，可增加烧结过程中铁酸钙黏结相的生成量，配加褐铁矿、强化制粒、复合造块及烧结矿表面喷洒 $CaCl_2/B_2O_3$ 溶液等措施可改善钒钛矿的烧结技术指标，有助于提高钒钛烧结矿的冶金性能。各钢铁企业原料条件及生产特点不同，可根据自身的实际情况来合理选择烧结工艺参数，以获得最好的烧结技术指标和经济效益。

参考文献：

[1] 杜厚益. 俄罗斯钒工业及其发展前景(续)[J]. 钢铁钒钛,2001,22(4):61－68.
DU Houyi. Russian vanadium industry and its development prospects (continued)[J]. Iron and Steel Vanadium-Titanium,2001,22(4):61－68.

[2] 王玉萍. 南非钒钛磁铁矿炉渣性能及渣系优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2022.
WANG Yuping. Study on slag performance and slag system optimization of vanadium-titanium magnetite in South Africa[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2022.

[3] 陈汪兴,梁海军,高子先,等. 辽宁朝阳地区某钒钛磁铁矿中铁精矿的工艺矿物学研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(10):2681－2688.
CHEN Wangxing, LIANG Haijun, GAO Zixian, et al. Process mineralogy study of iron concentrate in a vanadium-titanium magnetite in Chaoyang area, Liaoning Province[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition),2020,51(10):2681－2688.

[4] 杨绍利. 钒钛磁铁矿综合利用技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2021.
YANG Shaoli. Technical manual for comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2021.

[5] 孙艳芹. 钒钛磁铁矿烧结特性与强化技术研究[M]. 北京:冶金工业出版社,2016.
SUN Yanqin. Research on sintering characteristics and strengthening technology of vanadium-titanium magnetite[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2016.

[6] 白冬冬,韩秀丽,李昌存,等. 钒钛烧结矿矿相特征及其对 RDI 的影响机理[J]. 烧结球团,2020,45(2):1－4;9.
BAI Dongdong, HAN Xiuli, LI Changcun, et al. Characteristics of vanadium-titanium sintered ore and its

influence mechanism on RDI[J]. Sintering and pelletizing,2020,45(2):1 -4;9.

[7] 陈霄,冯帅,刘小杰. 河钢烧结矿冶金性能和矿相的研究[J]. 四川冶金,2020,42(3):27 -31.
CHEN Xiao, FENG Shuai, LIU Xiaojie. Study on metallurgical properties and oretic phase of HBIS sinter [J]. Sichuan Metallurgy,2020,42(03):27 -31.

[8] 刘然,刘朝卿,吕庆,等. 中钛型钒钛烧结矿液相量的研究[J]. 钢铁钒钛,2014,35(5):72 -77.
LIU Ran, LIU Chaoqing, LÜ Qing, et al. Study on liquid phasor of medium titanium vanadium-titanium sinter[J]. Iron and Steel Vanadium-Titanium,2014,35(5):72 -77.

[9] 李小松,杨广庆,杨文康,等. 攀钢钒钛烧结矿与莱钢普通烧结矿冶金性能对比研究[J]. 烧结球团,2018,43(1):10 -14.
LI Xiaosong, YANG Guangqing, YANG Wenkang, et al. Comparative study on metallurgical properties of Pangang vanadium-titanium sinter and Laigang ordinary sinter [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(1):10 -14.

[10] 何立鹏,原夏建. 榆钢公司烧结矿低温还原粉化指数影响因素研究[J]. 甘肃冶金,2022,44(1):4 -6.
HE Lipeng, YUAN Xiajian. Research on the factors influencing the low temperature reduction pulverization index of sintered ore from Yugang company[J]. Gansu Metallurgy,2022,44(1):4 -6.

[11] 何木光,蒋大均,崔庆爽,等. 喷洒硼酸对钒钛磁铁精矿烧结性能的影响[J]. 烧结球团,2020,45(6):40 -46.
HE Muguang, JIANG Dajun, CUI Qingshuang, et al. Effect of boric acid spraying on sintering properties of vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):40 -46.

[12] 王喜庆. 钒钛磁铁矿高炉冶炼[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
WANG Xiqing. Vanadium-titanium magnetite blast furnace smelting[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1994.

[13] 陈许玲,肖永贤,范晓慧,等. 烧结矿低温还原过程矿相结构演变规律[J]. 烧结球团,2019,44(5):1 -6;22.
CHEN Xuling, XIAO Yongxian, FAN Xiaohui, et al. Evolution of ore structure during low-temperature reduction of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(5):1 -6;22.

[14] 刘丽娜,韩秀丽,刘磊. 不同类型烧结矿随碱度变化的矿相结构研究[J]. 钢铁钒钛,2017,38(2):112 -115.
LIU Lina, HAN Xiuli, LIU Lei. Study on the mineral phase structure of different types of sinter with basicity [J]. Iron and Steel Vanadium-Titanium,2017,38(2):112 -115.

[15] 周密,姜涛,杨松陶,等. 碱度对含铬型钒钛磁铁矿烧结性能的影响[J]. 过程工程学报,2015,15(3):457 -462.
ZHOU Mi, JIANG Tao, YANG Songtao, et al. Effect of basicity on sintering properties of chromium-containing vanadium-titanium magnetite[J]. Chinese Journal of Process Engineering,2015,15(3):457 -462.

[16] 李文英. 碱度对钒钛烧结矿质量的影响[C]//河北省金属学会. 2011 年河北省炼铁技术暨学术年会论文集:2011 年卷. 2011:51 -56.
LI Wenying. Effect of basicity on the quality of vanadium-titanium sinter[C]//Hebei Metallurgical Society. Proceedings of 2011 Hebei Iron Smelting Technology and Academic Annual Conference,2011:51 -56.

[17] 周密,姜涛,杨松陶,等. 普矿配加对钒钛烧结矿质量的影响[J]. 钢铁,2015,50(8):10 -15.
ZHOU Mi, JIANG Tao, YANG Songtao, et al. Influence of the addition of ordinary ore on vanadium-titanium sinter properties[J]. Iron and Steel,2015,50(8):10 -15.

[18] 李秀,李杰,张玉柱,等. 不同碱度对钒钛烧结矿质量的影响[J]. 矿产综合利用,2017(5):115 -118.
LI Xiu, LI Jie, ZHANG Yuzhu, et al. Effect of different basicity on quality of vanadium-titanium sinter[J]. Comprehensive Utilization of Minerals,2017(5):115 -118.

[19] ZHANG Liheng, GAO Zixian, YANG Songtao, et al. Effect of basicity on sintering behavior and metallurgical properties of high-chromium vanadium-titanium magnetite [J]. Metals,2020,10(5):4 -10.

[20] ZHOU Mi, YANG Songtao, JIANG Tao, et al. Influence of coke content on sintering process of chromium-containing vanadium-titanium magnetite[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2018, 33(1):68 -72.

[21] 王强. 钒钛磁铁精矿烧结特性及其强化技术的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.

WANG Qiang. Study on sintering characteristics and strengthening technology of vanadium-titanium magnetite concentrate[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[22] ZHANG Liheng, YANG Songtao, TANG Weidong, et al. Effect of coke breeze content on sintering mechanism and metallurgical properties of high-chromium vanadium-titanium magnetite[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(7): 821 – 827.

[23] YANG Songtao, ZHOU Mi, TANG Weidong, Jiang Tao, et al. Influence of coke ratio on the sintering behavior of high-chromium vanadium-titanium magnetite[J]. Minerals, 2017, 7(7): 2 – 8.

[24] ZHANG Xu, ZHANG Jianliang, HU Zhengwen, et al. Effect of $CaCl_2$ on RDI and RI of sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(11): 2 – 5.

[25] 李咸伟. 氯化物对烧结矿 RDI 影响的试验研究[J]. 宝钢技术, 1998(1): 21 – 25; 30.
LI Xianwei. Experimental study on the effect of chloride on sinter RDI[J]. Baosteel Technology, 1998(1): 21 – 25; 30.

[26] 韩秀丽, 王程, 伊凤永, 等. $CaCl_2$ 对钒钛烧结矿矿相结构及 RDI 的影响机理[J]. 烧结球团, 2020, 45(4): 1 – 5; 26.
HAN Xiuli, WANG Cheng, YI Fengyong, et al. Influence mechanism of $CaCl_2$ on ore phase structure and RDI of vanadium-titanium sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(4): 1 – 5; 26.

[27] 付小佼, 赵嘉琦, 陈双印, 等. 硼铁矿应用于高铬型钒钛矿烧结优化的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(8): 1115 – 1119.
FU Xiaoling, ZHAO Jiaqi, CHEN Shuangyin, et al. Experimental study on the application of borate to sintering optimization of high chromium vanadium-titanium ore[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2015, 36(8): 1115 – 1119.

[28] 汪小虎, 李星志. B_2O_3 对钒钛烧结矿液相量影响研究[J]. 四川冶金, 2020, 42(5): 32 – 34; 45.
WANG Xiaohu, LI Xingzhi. Effect of B_2O_3 on liquid phasor of vanadium-titanium sinter[J]. Sichuan Metallurgy, 2020, 42(5): 32 – 34; 45.

[29] 刘东辉, 吕庆, 邹雷雷, 等. 褐铁矿配比对钒钛磁铁矿烧结基础特性的影响[J]. 钢铁, 2014, 49(4): 13 – 17.
LIU Donghui, LÜ Qing, ZOU Leilei, et al. Effect of limonite ratio on basic characteristics of vanadium-titanium magnetite sintering[J]. Iron and Steel, 2014, 49(4): 13 – 17.

[30] 吕庆, 刘东辉, 邹雷雷, 等. 褐铁矿配比对钒钛磁铁烧结矿性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(5): 78 – 82.
LÜ Qing, LIU Donghui, ZOU Leilei, et al. Effect of limonite ratio on properties of vanadium-titanium magnetite sinter[J]. Iron and Steel Vanadium-Titanium, 2014, 35(5): 78 – 82.

[31] 蒋大军. 钒钛磁铁精矿的矿物特性与造块强化技术[J]. 钢铁, 2010, 45(1): 24 – 27; 42.
JIANG Dajun. Mineral characteristics and block strengthening technology of vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. Iron and Steel, 2010, 45(1): 24 – 27; 42.

[32] 何木光, 蒋大军, 杜斯宏, 等. 攀钢钒高钛型钒钛磁铁矿烧结技术进步[J]. 四川冶金, 2013, 35(1): 14 – 19.
HE Muguang, JIANG Dajun, DU Sihong, et al. Progress in sintering technology of Pangang vanadium high titanium vanadium-titanium magnetite[J]. Sichuan Metallurgy, 2013, 35(1): 14 – 19.

[33] 万新宇, 吕庆. 钒钛磁铁矿的复合造块新工艺[J]. 钢铁, 2014, 49(6): 12 – 17.
WAN Xinyu, LÜ Qing. New process of composite block making of vanadium-titanium magnetite[J]. Iron and Steel, 2014, 49(6): 12 – 17.

[34] 马黎明, 张建良, 吴胜利, 等. 基于熔剂性生球的复合造块工艺处理钒钛磁铁矿[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(6): 462 – 469.
MA Liming, ZHANG Jianliang, WU Shengli, et al. Treatment of vanadium-titanium magnetite by composite block making process based on flux pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(6): 462 – 469.

[35] 张展雷, 于恒, 宋志芳, 等. 钒钛磁铁精矿复合造块试验研究[J]. 烧结球团, 2014, 39(4): 1 – 5.
ZHANG Zhanlei, YU Heng, SONG Zhifang, et al. Experimental study on composite block formation of vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(4): 1 – 5.