

钒钛磁铁矿综合利用现状及进展*

彭英健, 吕超

(山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同市 037003)

摘要:钒钛磁铁矿是一种典型的金属共伴生铁矿资源,具有极高的综合利用价值。我国对钒钛磁铁矿精矿主要以高炉转炉冶炼为主,该技术生产规模大,技术成熟,但钒钛资源回收利用率较低,环境污染较大且运行成本较高;还原-磨选法工艺难以控制,铁和钒钛分离不完全,应用困难较大;还原-熔分工艺可以实现有价值组元的高效分离,是综合利用钒钛磁铁矿最有前途的技术。对于攀枝花钒钛磁铁矿精矿,为获得TiO₂含量大于55%以上可利用级别的熔分钒渣,开展了还原-熔分工艺的工业应用。精矿原料深度除杂和气基还原可促进钒钛磁铁矿精矿中钛资源的利用。

关键词:钒钛磁铁矿;共伴生;钒钛资源;综合利用

中图分类号:TD981 文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2019)05-0150-06

攀枝花钒钛磁铁矿赋存于基性岩体内,主要矿物为钛磁铁矿和钛铁矿,钒和钛以类质同像取代磁铁矿晶格中的铁原子;硫化物主以磁黄铁矿为主,伴生钴资源;脉石以辉石和斜长石为主。钛磁铁矿与榍石、镁铝尖晶石的共生关系极为紧密,绝大部分钛磁铁矿中均匀分布有纳米级细脉状、网格状或布纹状榍石,镁铁尖晶石,与微细粒钛磁铁矿相间分布。镁铁尖晶石应为钛磁铁矿的固溶体矿物,而榍石则呈显微包裹。弱磁选出来的钒钛含量高的产品称为钒钛磁铁矿精矿,其利用方式主要有高炉转炉法、还原-磨选法、钠化提钒-回转窑还原-电炉法和还原-熔分法。

0 前言

钒、钛是世界公认的战略资源。钒在钢铁、国防、化工、航空、电子技术等领域有着重要的应用;钛具有抗腐蚀性强、比强度高、生物相容性好等优点,广泛应用于航空航天、海洋军工以及医疗器械等领域,其中钛白粉是重要的化工原料^[1-2]。随着时代的发展,对钒、钛的利用日益引起世界各国的重视。钒钛磁铁矿是铁、钒、钛资源的主要载体,部分矿石还伴生有铬、钴、铀等,对钒钛磁铁矿综合利用一直是世界各国研究的重点。我国钒钛磁铁矿保有资源储量超过100亿t,主要分布在四川攀西地区,其中的钒、钛储量分别占全国的62%和90%,分别居世界第三位和第一位,综合利用价值极高^[3]。因此,对攀枝花钒钛磁铁矿的高效利用应充分考虑铁、钒、钛的高效分离和提取。本文基于攀枝花钒钛矿资源的综合利用现状,同时结合现有工艺的特点及其存在的问题,并对钒钛磁铁矿精矿的资源综合利用提出了发展方向。

1 高炉转炉冶炼工艺

攀钢采用高炉流程处理钒钛磁铁矿精矿,钒钛磁铁矿高炉冶炼能够实现对钒钛磁铁矿规模化利用^[1-2]。攀钢高炉冶炼钒钛磁铁矿精矿以钢铁生产为主,兼顾提钒,铁的回收率在76%左右,钒的回收率仅在45%左右^[4-8]。该工艺流程复杂,能耗高,污染较大;高炉冶炼必须用价格高的焦碳作为还原剂;高炉渣中的TiO₂品位在22%左右,得不到利用而堆存,给环境带来压力并造成钛资源的严重浪费;在高炉冶炼过程中,必须严格控制焦炭用量,以防止TiC的生成使炉渣变稠给冶炼带来困难。

为了综合利用攀枝花高炉钒渣,许多学者进行了大量的研究工作,提出了许多技术方案,包括生产水泥、制取硅钛合金、高温碳化低温氯化制取TiCl₄、含钛组分重结晶长大富集再分选、直接制备钛白粉等。但因为技术或者成本等问题而难以得到工业化应用。至今,攀钢高炉钒渣的利用仍是一个有待解决的重大难题^[9-13]。

* 收稿日期:2019-01-14

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51604247);山西大同大学博士科研启动项目(2016-B-21)。

作者简介:彭英健(1983—),男,山东临沂人,博士,讲师,从事矿井瓦斯治理、安全管理的研究,Email:17229582@qq.com。

通信作者:吕超(1987—),男,山西天镇人,博士,讲师,从事矿物加工的研究,Email:lvchao0711@126.com。

2 还原—磨选法

还原—磨选工艺是将钒钛磁铁矿精矿和碳粉混匀后造球,球团在 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 范围内将钒钛磁铁矿精矿中的铁氧化物还原为零价铁并使其长大到一定粒度,并控制还原条件保持钒钛不被还原而滞留在渣相中,还原后的金属化球团经细磨后利用弱磁选进行分选,从而得到高品位金属铁精矿粉和非磁性富钒钛料,富钒钛料作为进一步提取钒钛的原料。该工艺可以避免还原—熔分工艺所需的高能耗和熔分过程渣铁分离困难的问题。但缺点是钒铁分离不彻底,对还原要求非常高。

黄丹利用助剂硼砂进行强化还原钒钛磁铁矿精矿,通过还原—磨选法回收精矿中的铁、钒和钛^[14]。试验结果表明,造球时添加助剂硼砂可以强化钒钛磁铁矿精矿的还原,对铁颗粒的长大有促进作用,可明显改善铁和钛的分离效果。在最佳的试验条件下,可得到 TFe 含量 90%,铁回收率为 96.5% 的磁性铁精粉,非磁性物料作为钒钛富料,钒钛富料 V_2O_5 含量为 1.64%, TiO_2 含量低于 30%,经过酸浸法提钒,制备出纯度大于 98% 的 V_2O_5 产品,而渣中钛资源则难以得到利用^[14]。高本恒等人采用直接还原—磨选法对印尼某高品位海砂钒钛磁铁矿精矿进行钒铁分离试验研究。试验研究表明,助剂 NCP 的添加可以有效促进铁的还原及其金属铁晶粒的长大,在还原温度为 1150°C ,还原时间为 90 min 时得到的金属化产品还原度高,铁晶粒尺寸较大,金属化产品经过细磨和弱磁选选别,可获得铁品位达 91%,铁回收率达 97% 的金属铁精矿。但金属铁精矿中 TiO_2 含量达 1.6%,磁选尾矿中 TiO_2 品位仅为 26%,钒铁分离效果差^[15]。高恩霞对印尼某海滨钒钛磁铁矿进行了还原磨选工艺的研究,试验结果表明,造球过程配入还原剂烟煤量为 20%,助剂 CaF_2 量为 10% 时,在 1250°C 温度下还原 60 min,还原产物经细磨磁选得到铁精矿粉的铁品位达 91.80%,铁回收率为 88.52%,但非磁性富钒钛料中 TiO_2 品位仅为 24%,富钒钛料中 TiO_2 品位低,难以实现其钛资源的回收利用^[16]。韩元庭研究了基于热压块的攀枝花钒钛磁铁矿精矿的还原,主要研究了精矿配碳量、还原温度以及还原时间对铁氧化物还原的影响,试验结果表明,配碳量比为 1.2 : 1,还原温度为 1350°C ,还原时间为 60 min,金属化球团金属化率达 93% 以上,金属化球团经过细磨磁选得到磁精矿铁品位为

85.90%,铁回收率为 91.19%。非磁性富钒钛料中 V_2O_5 品位为 1.40%, TiO_2 品位为 39.12%,富钒钛料中的 TiO_2 仍然难以得到利用^[17]。朱德庆等人利用冷固球团的直接还原—磨选法处理攀西地区太和钒钛磁铁矿进行铁、钒、钛的分离研究。试验中主要研究了还原温度、C/Fe 和助剂添加对还原效果的影响。试验结果表明,添加剂 Na_2SO_4 和 DA-1 均可促进铁氧化物的还原。在添加 1.5% 的复合粘结剂、2% Na_2SO_4 和 1% DA-1,还原温度为 1100°C 、C/Fe 比为 0.65 条件下还原 180 min 得到的金属化球团经细磨磁选,得到铁品位为 91.25%、 TiO_2 含量为 4.21%、 V_2O_5 含量为 0.22% 的磁精矿,磁精矿中的铁回收率达 92.24%。非磁性物 TiO_2 品位为 45.74%、TFe 含量为 16.35%、 V_2O_5 含量为 1.94%,钒和钛回收率分别为 82.65% 和 80.81%,可以看出钒铁分离不完全。综上所述,通过还原—磨选法得到的铁精粉中含钒较高,富钒钛料含铁较高,铁和钒分离效果差^[18]。

还原—磨选法处理钒钛磁铁矿精矿的优点是耗能低、污染较小。但这种方法对钒钛磁铁矿精矿的还原要求很高,必须要达到还原后的金属化球团金属化率 90% 以上,并且需要使其铁晶粒长大到合适的分选粒度,铁和钛的分离才有一定的效果。而钒钛磁铁矿的还原本身就难度大,需要较高的温度以及还原势,还原出来的铁晶粒受矿物特性的影响,很难长大到合适的分选粒度,细磨磁选后钒铁分离不够彻底。适当助剂对还原过程有一定的加强作用,但钒钛磁铁矿自身难还原,助剂的添加不能解决根本问题,而且助剂的添加会腐蚀炉衬以及降低非磁性产品中 TiO_2 的品位。此外,还原—磨选法生产规模小、处理量低,这就更加增加了其工业应用的难度^[19-25]。

3 钠化提钒—回转窑还原—电炉法

钠化提钒—回转窑—电炉法基本工艺流程是将钒钛磁铁矿精矿和钠盐混匀造球,然后在回转窑中进行氧化焙烧,使钒钛磁铁矿精矿中的钒氧化物在焙烧过程中转化成可溶性钒酸钠,通过水浸使钒酸钠溶于水,实现钒与铁钛的分离。经过水浸提钒后的残球再送入回转窑进行还原,还原后的金属化产品再送入电炉进行高温熔分以获得铁水和钛渣,达到钒和铁的分离,从而使钒钛磁铁矿精矿的资源得到综合利用。我国科研工作者曾对攀西地区钒钛

磁铁矿进行过该工艺的试验,试验结果表明,采用此流程可制备出高档的 V_2O_5 产品,钒的回收率可达 80%。该工艺的缺点是消耗大量钠盐,生产成本较高。并且,水浸提钒后残球强度较差,在回转窑还原过程中容易发生粉化,同时,球团残余的钠盐可造成回转窑结圈的问题。因此,此工艺未在我国得到大规模工业生产^[26]。目前,仅南非、芬兰等国采用钠化焙烧提钒处理含钒较高的钒钛磁铁矿精矿并用于工业化生产。南非年生产金属钒在 8960 t 以上,成为世界上最大的钒生产基地和出口国^[27-30]。

4 预还原—电炉法

近年来,随着炼焦用煤的减少和价格的增加,高炉冶炼工艺受到较大的挑战和限制,而非高炉冶炼具有流程短、无须使用焦炭、灵活性大等优势,受到越来越多的关注。根据所采用的预还原设备不同,预还原—电炉法又可分为回转窑预还原—电炉法、转底炉预还原—电炉法、竖炉气基预还原—电炉法等。尤其是近年来随着环境保护法的规定愈加严格,国家已出台相应政策淘汰落后产能设备,而电弧炉冶炼由于具有排污少、环境友好、能耗低等特点,成为各国高温冶炼重点发展利用的对象。结合我国钛矿资源特点,发展钒钛磁铁矿精矿电炉冶炼是我国钛资源高效利用势在必行的道路^[31-36]。

4.1 回转窑预还原

回转窑预还原是采用回转窑作为钒钛磁铁矿的预还原设备,预还原产品再送入电炉中进行高温熔化分离得到铁水和钛渣,从而达到钛铁分离的目的。该工艺在新西兰钢铁公司和南非海威尔德钢钒公司得到了工业化应用,为保证顺利冶炼,通过添加助熔剂使二元碱度在合适的范围内,将冶炼得到的含钒铁水装入到窑包中进行吹钒生产出钒渣和半钢;钒渣可以作为商品出售,或再加工成工业 V_2O_5 出售;半钢送入顶吹转炉,冶炼成钢。从而回收了钒钛磁铁矿中的铁和钒资源。然而,熔分渣 TiO_2 品位只能维持在 30%左右,钛渣不能得到利用而堆存,钛资源不能得到有效利用^[37-38]。20 世纪 80 年代,攀枝花钢铁公司曾经对回转窑预还原—电炉熔分流程进行了扩大化试验技术攻关,以期实现攀枝花钒钛磁铁矿精矿中铁、钒和钛资源的综合利用。试验结果表明,利用 TFe 品位为 54%左右的钒钛磁铁矿精矿经过还原熔分得到的含钒铁水中铁和钒的回收率低于高炉冶炼法,且钛渣 TiO_2 品位不超过 50%,难以

实现钛的回收利用,在回转窑还原过程中存在结圈问题,电弧炉熔分由于不调渣碱度而造成熔分温度高、耗电量大等问题,该工艺未能实现工业化生产^[39-42]。

4.2 转底炉预还原

转底炉还原工艺具有还原温度高、还原时间短、设备运行稳定、环境污染少、炉料与炉底保持相对静止,避免了球团因运动而产生粉化的问题,可满足大多数铁矿的直接还原等优点^[43]。转底炉直接还原由于自身的特点能够满足钒钛磁铁矿的直接还原高金属化率的要求,得到的金属化产品在电炉中进行熔化分离,可实现铁、钒、钛资源综合回收利用^[44]。攀枝花学院和四川龙麟矿业公司曾对转底炉还原—电炉深还原熔分工艺进行试验探索,针对铁品位在 56%~58%的钒钛磁铁矿精矿进行处理,可得到金属化率大于 90%的还原球团,通过电炉深还原熔分,钒在铁水中的分配率达 80%,得到钛渣 TiO_2 的含量大于 45%,但难以超过 50%^[45]。同时,转底炉还原的缺点也是明显的,还原采用的是内配碳造球进行钒钛磁铁矿精矿的还原,如果还原剂的质量不高,会使铁水中的硫含量过高且渣中杂质含量偏高,从而影响渣中 TiO_2 品位;其次,炉体传热方式为辐射传热,炉料层厚度提高困难,处理量不易扩大,极大地限制了其生产规模的进一步扩大^[46-48]。

4.3 气基竖炉预还原

气基竖炉法直接还原工艺以 MIDREX 和 HYL-III 为代表的生产技术在世界直接还原铁的生产领域取得了极大成功,是应用最普遍、发展最成熟的直接还原工艺。2012 年全球 DRI 总产量达 7400 万 t 以上,其中气基还原生产的 DRI 占 77%以上。气基还原呈现出快速发展的势头,具有很强的竞争力。在世界各国已获得广泛应用^[49-53]。气基竖炉还原具有生产率高、不会引入外来杂质、产品质量高和处理量大的特点。在生产效率、能耗、环保等方面,气基竖炉还原均优越于回转窑和转底炉。MIDREX 工艺由于技术成熟、操作简单、生产率高、热耗低、产品质量高等优点,已经发展成为气基直接还原铁的主导工艺。但是 MIDREX 工艺需要大量天然气资源作为保障,且反应温度不超过 1000℃,反应速率慢,需要较长时间才能达到满意的还原度,再就是对矿石品位要求高。由于钒钛磁铁矿精矿的有效还原需要较高的温度,钒钛磁铁矿精矿的还原不适合通过 MIDREX 工艺来实现。与 MIDREX 竖

炉还原相比, HYL-III 竖炉产量更大, 生产效率更高, 制气部分和还原部分相对独立, 在选择还原气体方面具有极大的灵活性。当今煤制气工艺已成为化工业的成熟技术, 煤制合成气完全可以作为 HYL-III 气基竖炉还原剂的可靠来源, 为天然气资源不足的地区发展气基直接还原提供了技术支持^[54-57]。HYL-III 技术还原温度一般高于 950℃, 可用于钒钛磁铁矿精矿的还原。气基竖炉还原—电炉熔分工艺是攀钢提出的非高炉新流程, 目的是使用煤制气还原钒钛磁铁矿精矿, 再将金属化球团热出料送入电炉进行熔分得到高品位熔分钛渣和含钒铁水, 实现攀枝花地区钒钛磁铁矿精矿的钒、钛、铁资源的综合利用。相比于一般铁精矿, 钒钛磁铁矿精矿较难还原, 若想在还原竖炉内使球团还原得到较高的金属化率, 还原气体须满足 $\text{CO} + \text{H}_2 > 90\%$ 的高还原势条件, 并且需要具有较高的还原温度^[58-59]。张鹏通过模拟 HYL 技术还原钒钛磁铁矿精矿, 在还原温度为 1000℃ 时, 还原后的金属化球团金属化率可达到 92.42%^[60]。陈刚利用气基竖炉还原—电炉熔分处理攀西地区所产的钒钛磁铁矿精矿, 通过气基还原球团金属化率最高可到 92.43%。金属化球团在熔分温度 1550℃, 渣碱度调整到 1.1, 配碳量为 5% 的条件下进行深还原熔分 20 min, 得到含钒铁水和熔分钛渣。其中钛渣中 TiO_2 品位可达 50.79%, 钒在生铁中的回收率达 94.82%, 实现了钒、钛、铁的综合利用^[61]。利用气基还原可以实现钒钛磁铁矿精矿的高效还原和有效避免杂质的引入, 得到的熔分钛渣 TiO_2 品位在 50% 上下, 但仍达不到可利用级别的钛渣 (TiO_2 品位大于 55%)。昆明理工大学文书明教授团队针对攀枝花选铁厂产出的钒钛磁铁矿精矿杂质含量高, 对原精矿利用还原熔分技术难以获得 TiO_2 品位大于 55% 的可利用级别钛渣的问题, 创新性地提出精矿原料的细磨深度精选除杂—外配煤模拟气基还原—电炉熔分工艺, 试验结果表明, 在合适的碱度下熔分可获得 TiO_2 品位近 60% 的中品位钛渣, 为攀枝花钒钛磁铁矿精矿的资源综合利用提供了一条有效的技术路线^[62]。

5 结 论

综上所述, 攀钢钒钛磁铁矿精矿现阶段利用高炉转炉的技术可以有效回收其铁资源, 技术成熟, 生产规模较大, 但冶炼过程复杂, 耗能大, 且钛资源利用率几乎为零。为实现钒钛磁铁矿钒、钛、铁资源的

综合利用, 还原—熔分技术是最有希望在生产上突破的工艺, 通过对原料进行深度除杂、气基还原或外配煤还原, 杜绝引入其他杂质, 获得可利用级别的钛渣从而使钒钛磁铁矿精矿中的钛资源得到利用, 为实现钒钛磁铁矿精矿资源综合利用提供了最有前途的发展方向。

参考文献 (References):

- [1] 刘世友. 钒的应用与展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2000(2): 58-61.
- [2] 和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
- [3] 邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展[J]. 材料与冶金学报, 2007(2): 83-86+93.
- [4] Taylor P R, Shuey S A, Vidal E E, et al. Extractive Metallurgy of Vanadium—Containing Titaniferous Magnetite Ores: A Review[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 2006, 23(2): 80-86.
- [5] 吕庆, 唐琦, 孙艳芹, 等. 钒钛磁铁矿高炉冶炼的炉渣性质与钒氧化物还原关系[J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(6): 1-4+12.
- [6] 马家源, 孙希文, 盛世雄. 钒钛磁铁矿高炉冶炼的强化[J]. 钢铁, 2000(1): 4-8+12.
- [7] 刁日升. 对高炉冶炼钒钛磁铁矿问题的新认识[J]. 钢铁, 1999(6): 14-16+40.
- [8] 杜鹤桂. 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] He S Q, Sun H J, Tan D Y, et al. Recovery of titanium compounds from Ti-enriched product of alkali melting Ti-bearing blast furnace slag by dilute sulfuric acid leaching [C]//Selected Proceedings of the Tenth International Conference on Waste Management and Technology, 2016(31): 977-984.
- [10] 高运明, 李慈颖, 李亚伟, 等. 高炉钛渣碳氮化实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2008(1): 1-4.
- [11] He L X. Application of High Ti-bearing Blast Furnace Slag in Field of Building Materials [J]. Innovative Materials: Engineering and Applications, 2014, (1052): 392-395.
- [12] 王爱平, 赵磊, 汪胜东, 等. 含钛炉渣综合利用技术研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(10): 32-34.
- [13] 陆平. 攀钢高炉渣综合利用产业化研究进展及前景分析[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(3): 33-38.
- [14] 黄丹. 钒钛磁铁矿综合利用新流程及其比较研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [15] 高本恒, 王化军, 曲媛, 等. 印尼某海滨砂矿精矿直接还原—磨矿—磁选提铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(5): 44-46+53.
- [16] 高恩霞. 海滨钛磁铁矿直接还原—磁选钛铁分离及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [17] 韩元庭. 基于热压块的钒钛磁铁矿还原—磁选分离[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

- [18] 朱德庆,姜涛,郭宇峰,等.钒钛磁铁矿铁钒钛综合利用新流程[J].矿产综合利用,1999(2):17-21.
- [19] Saikat Samanta, Manik Chandra Goswami, Tapan Kumar Baidya, et al. Mineralogy and carbothermal reduction behaviour of vanadium-bearing titaniferous magnetite ore in Eastern India [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials,2013,20(10):917-924.
- [20] Jena M S, Tripathy H K, Mohanty J K, et al. Roasting Followed by Magnetic Separation: A Process for Beneficiation of Titano-Magnetite Ore. Separation Science and Technology,2015,50(8):1221-1229.
- [21] 汪云华,彭金辉,杨卜,等.钒钛磁铁矿制备还原铁粉的碳还原过程的实验研究[J].南方金属,2005(5):26-27+30.
- [22] Chen S, Chu M. Metalizing reduction and magnetic separation of vanadium titanomagnetite based on hot briquetting [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials,2014,21(3):225-233.
- [23] Wang M Y, Zhou S F, Wang X W, et al. Recovery of Iron from Chromium Vanadium-Bearing Titanomagnetite Concentrate by Direct Reduction[J]. JOM, 2016, 68(10):2698-2703.
- [24] Zhao L S, Wang L N, Chen D S, et al. Behaviors of vanadium and chromium in coal-based direct reduction of high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates followed by magnetic separation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(4):1325-1333.
- [25] Geng C, Sun T, Yang H, et al. Effect of Na_2SO_4 on the Embedding Direct Reduction of Beach Titanomagnetite and the Separation of Titanium and Iron by Magnetic Separation [J]. ISIJ International,2015,55(12):2543-2549.
- [26] 储满生,唐珏,柳政根,等.高铬型钒钛磁铁矿综合利用现状及进展[J].钢铁研究学报,2017,29(5):335-344.
- [27] 刘淑清.南非海威尔德钢钒公司[J].钢铁钒钛,2000(3):43.
- [28] 廖世明,柏谈论.国外钒冶金[M].北京:冶金工业出版社,1985.
- [29] Moskalyk R R, Alfantazi A M. Processing of vanadium: a review[J]. Minerals Engineering,2003,16(9):793-805.
- [30] Hukkanen E, Walden H. The production of vanadium and steel from titanomagnetites [J]. International Journal of Mineral Processing,1985,15(1-2):89-102.
- [31] 陈旻.我国炼钢机械工艺的优缺点及发展方向[J].山东工业技术,2018(17):32.
- [32] Sun H Y, Wang J S, Dong X J, et al. A Literature Review of Titanium Slag Metallurgical Processes [J]. Metallurgia International,2012,17(7):49-56.
- [33] Lin X L, Peng Z W, Yan J X, et al. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust[J]. Journal of Cleaner Production,2017,(149):1079-1100.
- [34] 庞文杰,曾子高,刘卫平,等.国外电炉烟尘处理技术现状及发展[J].矿冶工程,2004(4):41-43+46.
- [35] 郭汉杰,孙贵永.非焦煤炼铁工艺及装备的未来(2)—气基直接还原炼铁工艺及装备的前景研究(上)[J].冶金设备,2015(3):1-13.
- [36] 王兴兵.短流程铸造工艺改进节能效果的探讨[J].山西冶金,2014,37(2):94-95.
- [37] Steinberg W S, Geyser W, Nell J. The history and development of the pyrometallurgical processes at Evraz Highveld Steel & Vanadium [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy,2011,111(10):705-710.
- [38] 周传典.钒钛铁矿冶炼试验研究[J].鞍钢技术,2004(2):1-3.
- [39] 朱德庆,姜涛,郭宇峰,等.钒钛磁铁矿铁钒钛综合利用新流程[J].矿产综合利用,1999(2):17-21.
- [40] 高建军,洪陆阔,张俊,等.钒钛磁铁矿全氧熔池熔炼试验研究[J].钢铁钒钛,2018,39(2):8-13.
- [41] 徐义新.攀枝花钒钛金属化球团熔化分离工艺的探讨[J].钢铁技术,2000(4):8-12.
- [42] 郭新春.钒钛磁铁矿的利用现状及其使用价值[J].攀枝花科技,1996(2):14-18.
- [43] 高文星,董凌燕,陈登福,等.煤基直接还原及转底炉工艺的发展现状[J].矿冶,2008(2):68-73.
- [44] Wei R, Lun Z, Lv X, et al. Improvement of the Energy Utilization Efficiency of the V-Ti-Magnetite Reduction Process with Rotary Hearth Furnace [J]. Journal of Mining and Metallurgy Section B-Metallurgy,2015,51(1):1-6.
- [45] 刘功国.基于转底炉直接还原工艺的钒钛磁铁矿综合利用试验研究[J].钢铁研究,2012,40(2):4-7.
- [46] Zhang Z H, Kong W M, Zhao F C, et al. The production and utilization of two smelting processes for V-Ti magnetite [J]. Chemical, Material and Metallurgical Engineering Iii, 2014, Pts 1-3,(881-883):1297-1300.
- [47] Mishra S, Roy G G. Reduction Behaviour of Iron Ore-Coal Composite Pellets in Rotary Hearth Furnace (RHF): Effect of Pellet Shape, Size, and Bed Packing Material [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2017,70(4):967-978.
- [48] 秦洁,刘功国,李占军,等.直接还原处理钒钛矿资源的几种典型工艺评述[J].矿冶,2014,23(4):79-82+91.
- [49] 张福明,曹朝真,徐辉.气基竖炉直接还原技术的发展现状与展望[J].钢铁,2014,49(3):1-10.
- [50] Hu J G. Development of Gas-Based Shaft Furnace Direct Reduction Technology [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2009(16):1288-1291.
- [51] 陈宏.HYLⅢ海绵铁生产技术[J].钢铁,1999(11):64-67.
- [52] 张奔,赵志龙,郭豪,等.气基竖炉直接还原炼铁技术的发展[J].钢铁研究,2016,44(5):59-62.
- [53] Wei G, Shen F M, Shen Y S, et al. Development of non-coke ironmaking processes in China [J]. Steel Research International,2005,76(10):683-685.
- [54] Lungen H B, Knop K, Steffen R. State of the art of the direct reduction and smelting reduction processes [J]. Stahl Und Eisen,2006,126(7):25.
- [55] 周渝生,钱晖,齐渊洪,等.煤制气生产直接还原铁的联合工艺方案[J].钢铁,2012,47(11):27-31+35.

- [56] Kolbeinsen L. Modelling of DRI Processes with Two Simultaneously Active Reducing Gases[J]. Steel Research International, 2010, 81(10): 819-828.
- [57] 钱 晖,周渝生.HYL-III直接还原技术[J].世界钢铁, 2005, 5(1): 16-21.
- [58] Sui Y L, Guo Y F, Jiang T, et al. Reduction kinetics of oxidized vanadium titano-magnetite pellets using carbon monoxide and hydrogen [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017(706): 546-553.
- [59] 韩子文.钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原—电炉熔分新工艺的实验研究[D].沈阳:东北大学, 2011.
- [60] 王 帅,郭宇峰,姜 涛,陈 凤,郑富强.钒钛磁铁矿综合利用现状及工业化发展方向[J].中国冶金, 2016, 26(10): 40-44.
- [61] 张 鹏.印尼钒钛磁铁矿砂矿气基还原基础工艺研究[D].沈阳:东北大学, 2014.
- [62] 吕 超.攀枝花钒钛磁铁矿精矿制备中钛渣的技术和理论研究[D].昆明:昆明理工大学, 2017.

Comprehensive Utilization Status and Progress of Vanadium Titano-magnetite

PENG Yingjian, LV Chao

(Institute of Coal, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037003, China)

Abstract: Vanadium titano-magnetite is a typical metal-associated iron ore resource with comprehensive utilization value. Smelting vanadium titano-magnetite concentrate in China mainly adopted blast furnace-converter process, which has advantages of large-scale production and reliable technology. However, the recycling rate of vanadium and titanium was low, environmental pollution was large and the operating cost was high. Moreover, it was difficult to control the reduction-grinding process, and the separation of iron from vanadium and titanium was not complete, so the application of this technology was difficult. But the reduction-melting process could realize the goal of the efficient separation of valuable components, and it was the most promising technology for the comprehensive utilization of vanadium titano-magnetite concentrate. For Panzhihua vanadium titano-magnetite concentrate, in order to obtain the titanium slag with TiO_2 content greater than 55% of available grade, the reduction-melting process was applied. The complete impurity removal of concentrate material and gas-based reduction could promote the utilization of titanium resources in vanadium titano-magnetite concentrate.

Key words: Vanadium titano-magnetite, Co-associated, Vanadium titanium resources, Comprehensive utilization