

· 新材料 ·

# 直接还原炼铁工艺现状及 攀枝花钒钛磁铁矿处理工艺选择

杨保祥

攀枝花钢铁研究院

**摘要** 本文主要描述了直接还原炼铁工艺发展及处理钒钛磁铁矿所面临的机遇和挑战,分析了直接还原处理攀枝花钒钛磁铁矿工艺实践和存在的问题,针对攀枝花钒钛磁铁矿钒钛资源综合利用,提出了一些建议和设想。

**关键词** 攀枝花钒钛磁铁矿 炼铁 综合利用 直接还原

## 1 引言

随着炼铁原料结构的不断变化、优质铁原料存量减少以及煤炭对钢铁工业支撑条件的变化,世界各国从本国实际出发研究探索现有资源配置对不同炼铁工艺的适应性,最大限度提升钢铁工业的国际竞争力。直接还原炼铁主要基于对焦煤供应不足的担忧、富有天然气利用的考虑、富裕电力电炉炼钢和特殊元素提取需要的满足。直接还原炼铁工艺经过不同规模、不同矿种试验研究和新技术应用改进,从炼铁到炼钢工艺设备和与现有轧制设备的对接总体是可行的,但同时存在着一些令人深思的问题,如无法满足钢铁工业对规模化效益的追求、工艺成本、配套基础和特殊元素提取产品质量品质存在问题等,影响直接还原炼铁工艺的生命力。本文主要描述了直接还原炼铁工艺发展及处理钒钛磁铁矿所面临的机遇和挑战,分析了直接还原处理攀枝花钒钛磁铁矿工艺实践和存在的问题,针对攀枝花钒钛磁铁矿钒钛资源综合利用,提出了一些建议和设想。

## 2 直接还原炼铁工艺技术特点与优势

### 2.1 直接还原炼铁工艺技术特点

直接还原炼铁是在低于矿石熔化温度下,通过固态还原,把铁矿石炼制成铁的工艺过程。这种铁保留了失氧时形成的大量微气孔,在显微镜下观察形似海绵,所以也称为海绵铁;用球团矿制成的海绵铁也称为金属化球团。直接还原铁的特点是碳和硅含量低,成分类似钢,实际上也代替废钢使用于炼钢过程,通常把炼制海绵铁的工艺称作直接还原炼铁流程。目前达到工业生产水平或仍在继续试验的直接还原方法约有二十余种,主要分为两类。

#### 2.1.1 气体还原剂直接还原炼铁工艺技术

按工艺设备来分,有三种类型,包括竖炉法、反应罐法和流态化法。作为还原剂的煤气先加热到一定温度(约 900℃),并同时作为热载体,供应还原所需的热量。要求煤气中  $H_2$ 、CO 含量高,  $CO_2$ 、 $H_2O$  含量低;  $CH_4$  在还原过程中分解离析的碳要影响操作,含量不得超过 3%。用天然气转化制造这样的煤气最方便;也可用石油(原油或重油)制造,但价格较高。用煤炭气化制造还原气,是正在研究的课题。

竖炉法:在竖炉中炉料与煤气逆向运动,下降的炉料逐步被煤气加热和还原,传热和传质效率较高。竖炉法以 Midrex 法为代表,是发展最快和应用最广的直接还原炼铁法。作为原料的氧化球团矿自炉顶加入竖炉后,经过预热、还原及冷却三个阶段。还原所得的海绵铁,冷却到 50℃ 后排出炉外,以防再氧化。还原煤气用天然气及竖炉本身的一部分煤气制造补充,先加热到 760℃ ~ 900℃,在竖炉还原段下部通入。炉顶煤气回收后分别用于煤气再生、转化炉加热和竖炉冷却,生产率高,每吨产品能耗可达  $2.65 \times 10^6 \text{ k. cal}$ ,产品质量好,金属化率达 92%。

其它竖炉法有 Purofer 法:由原联邦德国提出,特点是用蓄热式天然气转化炉制造还原气,可以获得较高的煤气温度。另外竖炉不设冷却段,海绵铁在隔绝空气条件下热排料,然后进行钝化处理或送电炉热装。此法缺点是设备及操作较复杂,只有伊朗建有一个生产工厂。Wiberg 法是 30 年代瑞典开创的一种竖炉法,使用电弧供热的煤气粉,气化炉代替电弧供热的煤炭气化炉,对 Wiberg 法进行改造。

反应罐法:墨西哥的 Hyl 法是唯一的工业化反应罐法,在反应罐中炉料固定不动,通入热还原煤气一次进行预热、还原和冷却,最后定期停气,把炉料排出罐外。为了克服固定床还原煤气利用不良的缺点, Hyl 法采用了 4 个反应罐串连操作,还原煤气用天然气制造,先在换热式转化炉中不充分转化。经过每一个罐反应后都进行脱水、二次转化和提温,煤气在 1100℃ 的高温下进行还原。

Hyl 法使用排料杆,在停止通气下,强迫排料,因此不怕炉料粘结,操作温度较高,虽系间断作业,生产率并不低。缺点是

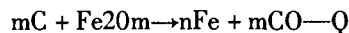
煤气利用差,每吨热耗达  $3.4 \times 10^6 \text{ k. cal}$ ,产品质量不均匀。Hyl 海绵铁含碳高 (1.2% ~ 2.0%),不易再氧化。墨西哥建有用此法生产的工厂,其产量仅次于 Midrex 法,第三代的 Hyl 法已放弃四个反应罐,改用一个反应罐,接近 Midrex 法。

流态化法:在流化床中用煤气还原铁矿粉的方法。在流态化法还原中,煤气除用作还原剂及热载体外,还用作散料层的流化介质。细粒矿石料层被穿过的气流流态化一次被加热,还原和冷却。还原产品冷却后压块保存。

流态化还原有直接使用矿粉省去造块的优点,并且由于矿石粒度小而能加速还原。缺点是:因细粒矿粉甚易粘结,一般在 600℃ ~ 700℃ 不高的温度下操作,不仅还原速度不大,而且极易促成 CO 的析碳反应。碳素沉析过多,则妨碍正常操作。为了克服这一困难,流态化海绵铁活性很大,极易氧化自燃,需加处理,才便于保存和运输。

### 2.1.2 固体还原剂直接还原炼铁工艺

使用固体还原剂的直接还原法:回转窑是最重要的使用固体还原剂煤炭进行直接还原的设备,由还原剂 0 ~ 3 毫米粒度的煤炭,小块矿石和细粒石灰石或白云石等组成的炉料由窑尾投入,窑体稍有倾斜,在转动时炉料逐渐向窑头运动。窑头设有烧嘴,使用能产生火焰的燃料(煤气、燃油或烟煤粉)。产生的高温窑气抽向窑尾,气流与固体炉料逆向运动,逐步把固体料加热,料温达到 800℃ 左右,开始固体碳还原:



析出的 CO 在料层上部空间燃烧,放出热量补充加热。为了保持料层中还原气氛,炉料配加的煤炭量必须超过还原反应的需要量。

按照出料温度,回转窑可以生产海绵

铁、粒铁或液铁,以回转窑海绵铁最重要。回转窑炼铁的主要优点是可以直接使用资源丰富的煤炭,其缺点是生产率低。最有代表性的回转窑海绵铁法是 SL/RN 和 Krupp 法,二者工艺流程基本相同。为了提高产量,减轻窑内预热段工作负担,在窑前配置链篦机,能把入窑料加热到 800℃。在窑内配置随窑转动的二次风机,以强化还原析出 CO 供燃烧。还原出的海绵铁经过回转冷却筒冷却到 150℃ 排料。把混合的剩余碳和吸硫的石灰清除后,得到产品。

把回转窑的出料温度提高到 1250℃ 左右,固体料呈半熔化状态,已还原的铁滴在滚动中聚合成小的铁粒,出窑后水淬冷却可与脉石杂质磁选分离,得到粒铁。此法称为回转窑粒铁法(Krupp—Renn 法),能够处理选矿困难的贫铁矿。

转底炉法:在高温条件下敞焰加热含碳球团,实现薄料层还原,以高温快速为主要特点,处理能力放大有一定难度,而且煤气和天然气需求较大,一定程度只能匹配小型钢铁规模化生产。

## 2.2 直接还原炼铁工艺技术的优势与不足

随着钢铁工业大规模发展,适合高炉使用的冶金焦的供应日趋紧张。为此,于 18 世纪末提出了直接还原法的设想。20 世纪 60 年代,直接还原法得到发展。(1) 20 世纪 50 ~ 70 年代,石油及天然气大量开发,为发展直接还原法提供了方便的能源;(2) 电炉炼钢迅速发展,开辟了海绵铁的广阔市场;(3) 选矿技术提高,能提供高品位精矿,使脉石含量可以降低得很低,简化了直接还原工艺。20 世纪 80 年代全世界直接还原炼铁生产量为 713 万 t, 占全世界生铁产量得 1.4%。最大的直接还原工厂规模达到年产百万吨,在钢铁工业中已占有一定的位置。

海绵铁中能氧化发热的元素如硅、碳、锰的含量很少,不能用于转炉炼钢,但适用于电弧炉炼钢。这样就形成一个直接还原炉—电炉的钢铁生产新流程。经过电炉内的简单熔化过程,从海绵铁中分离出少量脉石,就炼成了钢,免除了氧化、精炼及脱氧操作,使新流程具有作业程序少和能耗低的优点。其缺点是:(1) 成熟的直接还原法需用天然气作能源,而用煤炭作能源的直接还原法尚不完善,而 70 年代后期石油供应不足,天然气短缺,都限制了直接还原法的发展。(2) 直接还原炉—电炉冶炼流程,生产一吨钢的电耗不少于 600kwh,不适于电力短缺地区使用。(3) 海绵铁的活性大,易氧化,长途运输和长期保存困难。目前,只有一些中小型钢铁厂采用此法。

## 3 攀枝花钒钛磁铁矿直接还原实践及存在的问题

基于对焦煤供应不足的忧虑、电炉炼钢前景的预测以及攀枝花钒钛磁铁矿提取钒钛的需要,在国家“六五”和“七五”计划期间国家科研院所高校和相关企业分工合作,分北方流程和南方流程进行了攀枝花钒钛磁铁矿新流程试验。

### 3.1 攀枝花钒钛磁铁矿直接还原实践

针对攀枝花钒钛磁铁矿特点和直接还原工艺的发展趋势,开展了以下几个层面的工业试验。

3.1.1 钠化球团——水浸提钒——回转窑还原——分离铁钒工艺,打通了整体试验工艺流程,钠化化工序钒转化率 85% ~ 90%,钒产品五氧化二钒品位 99%,废水达标排放,球团还原克服了粉化和窑炉结圈,粉化率 2.5% ~ 3.5%,回转窑结圈周期 35 天,耗煤 808kg/t。金属化球团,含 0.023% ~ 0.034% S,褐煤作还原剂比较理

想,金属化球团电炉熔分得到 50%  $\text{TiO}_2$  的酸溶性钛渣和优质半钢,钛渣钛品位偏低,硅铝偏高,采用硫酸法生产了电焊条钛白和锐钛型涂料钛白,余渣可掺合作水泥原料,半钢经回炉或双联法共炼出 16 个品种的优质碳素钢和高锰钢等,轧制出符合部颁标准的钢材,熔分电耗 720 ~ 790kwh,整体工艺金属回收率铁 90% 左右,钒 80% 左右,钛 80% 左右。

3.1.2 球团回转窑还原——熔分炼钢——提钒提钛工艺,经过试验打通了整体试验工艺流程,克服了设备故障,解决了窑温控制、窑内结瘤和硫超标问题,每吨 70% 金属化球团耗干煤 1.4t,熔分钒收率 49.8% ~ 76.7%,熔分渣制钛白钛收率 65% ~ 70%,吹钒渣制取钒收率 70%,整体工艺金属回收率铁 90% 左右,钒 45% ~ 69%,钛 65% ~ 70%。

3.1.3 流态化还原工艺,经过流态化还原和两次等离子熔分得到工业纯铁与钒钛渣,解决了资源流失、收尘效率和硫含量问题,含钒钛渣未进行提钒钛试验,流态化还原制氢成本高,试验规模小,无法进行技术经济评价。

3.1.4 竖炉还原——磁选或熔化分离——提钒提钛工艺,用天然气对氧化球团进行还原,过程添加催化剂,金属化率可达 90%,每吨金属化球团耗用天然气 2500 $\text{m}^3$ ,还原存在设备故障等一系列问题。球团加钠盐盐化焙烧,使铁晶长大以便磁选分离,粒铁电炉熔化分离后,半钢碳含量稳定,冶炼了 T12、40Cr、45 号和 20 号钢,熔分渣分别制取钛白和五氧化二钒,整体工艺金属回收率铁 95.5% 左右,钒 85% 左右,钛 85% 左右。

3.1.5 加碳球团焦炉还原工艺,铁精矿配加气煤、焦油和沥青压球,在焦炉中还原,金属化率大于 87%,每吨金属化球团耗标

煤 300kg ~ 350kg,试验用半工业装置未建,试验未进行下去,对整体工艺无法进行技术经济分析。

### 3.2 攀枝花钒钛磁铁矿直接还原面临的问题与挑战

在攀枝花钒钛磁铁矿直接还原新流程试验中,持续时间最长的是球团回转窑还原——熔分炼钢——提钒提钛工艺,如果对球团金属化率控制在 95% 左右或更高水平,球团直接电炉熔分,得到的是低品位钒钛渣,提取钒钛相互影响,工序复杂,成本偏高;如果对球团金属化率控制在 90% 左右,球团在电炉中深度还原,钒还原进入铁相,得到的是低品位钛渣,铁相吹钒制取钒渣,半钢炼钢,深还原钛渣制取钛白,工序复杂,提取钒钛成本偏高。不论是直接还原球团熔分和深还原,规模化炼铁的技术需求难以达到。

在全国范围普遍缺电和优质煤及天然气供应不足的大环境下,直接还原炼铁面临整体技术支撑和体系配套等多层次问题,需要认真对待和解决。

### 4 对攀枝花钒钛磁铁矿钒钛铁资源利用的建议

攀枝花钒钛磁铁矿钒钛铁资源综合利用是国家省市以及大企业一贯追求的目标,经过多年的科技攻关实践,从不同视角考察了攀枝花资源综合利用问题,特别是对钒钛资源利用有了深刻的理解。经过分析,我们对攀枝花钒钛磁铁矿钒钛铁资源利用提出如下建议。

4.1 对照不同攀枝花钒钛磁铁矿处理工艺条件,按照经济高效、技术可行和生态环保的原则安排相关项目

对于攀枝花钒钛磁铁矿而言,高炉炼铁工艺要求大量的富矿来支撑钢铁规模化,对焦煤需求旺盛,以全铁利用和部分回收钒钛为主要特征,资源利用率偏低,形成

的二次资源性固体废弃物量大,而且用途不广,造成一定的环境社会问题。但三十多年的攀钢实践证明,高炉流程具有技术经济可行性,铁钒钛产品满足国家相关技术标准,有强大的市场需求,但攀枝花焦煤供应不足和资源利用率偏低的情况应当引起足够的重视;直接还原炼铁工艺需要配置相当规模的还原气体、电力供应和褐煤资源,以铁钒钛资源全面利用为主要特征,铁钒钛产品试生产规模小,质量品级与标准质量差异较大,技术层面难以形成对规模化利用的支撑,经济性测算与高炉流程没有可比性,需要进一步的工作。所以必须对照不同攀枝花钒钛磁铁矿处理工艺条件,按照经济高效、技术可行和生态环保的原则安排相关项目。

4.2 认真总结国家“六五”“七五”计划期间攀枝花钒钛磁铁矿新流程试验的经验教训,有条件地进行钒钛资源回收试验,寻求新的技术经济突破

国家在“六五”“七五”计划期间对攀枝花钒钛磁铁矿新流程试验进行了大量有益探索,试验规模和试验动员的水平达到了国家国际水准,形成了部分堪称共识的结论和意见:在工业试验打通了工艺流程,中间产品制成的铁钒钛产品可以达到技术标准。但技术经济指标无法就经济性做出判断,其中也存在一些经验教训需要认真总结,现阶段只能有条件地进行铁钒钛资源回收试验,寻求新的技术经济突破。

4.3 多途径寻求攀枝花钒钛资源综合利用的方法,实现铁钒钛全面有效利用目标

南非、新西兰和俄罗斯存在与攀枝花钒钛磁铁矿相类似矿物,各国根据矿物特性和国内经济发展需要也曾进行过不同的探索,形成了一些有国际影响力的企业实体,铁钒钛利用达到了一定水平,但离全面利用尚有差距。攀枝花钒钛磁铁矿属于品

质低的矿物,结构复杂,需要借鉴不同的经验。根据攀枝花经济社会发展实际,多途径寻求攀枝花钒钛资源综合利用的方法,实现铁钒钛全面有效利用目标。

4.4 有针对地完善攀钢高炉流程,应用高新技术设备提高钒钛利用率

目前攀钢高炉冶炼工艺流程不论基础理论研究还是经济技术指标都达到了全新水平,顺利实现了铁钒产品的生产工艺顺行,系列化产品支撑了攀枝花的经济社会发展,钛资源以高钛型高炉渣形式作为后备资源储存,可以专门研究进行用途开发,应用高新技术设备提高钛利用率。

## 5 结论

5.1 直接还原炼铁工艺具有其独特的技术资源和经济适应性,应该根据不同资源特点,按照经济高效、技术可行和生态环保的原则安排直接还原类炼铁项目的开发研究。

5.2 世界范围对高效经济炼铁流程的开发有其历史必然性,应当认真总结国内外不同直接还原炼铁工艺发展的特点、经验和教训,以科学严谨的态度,进行进一步研究探索,充实新技术理论,使其技术性、经济性和环保性有机的统一起来,真正实现循环经济发展的目的。

5.3 不同攀枝花钒钛磁铁矿处理工艺具有不同的配套条件和技术需求,攀枝花建设初期以铁资源利用入手,分步实施提取钒钛,历史地形成了以攀钢为核心的矿产资源利用实体,有较强技术经济性支撑,已经承担起了攀枝花经济社会发展的支撑作用。

5.4 攀枝花钒钛磁铁矿直接还原工艺经过多层次试验,解决了一些明显的技术性问题,深层次技术设备完善、经济技术指标优化和资源匹配等问题需要进一步落实解决。