攀枝花含钠浸钒球团直接还原新工艺*

——窑头喷煤高温还原

执笔 余植春

（北京矿冶研究总院）

试验室研究结果表明，含钠浸钒球团还原粉化是在低温还原时，Fe_2O_3向Fe_3O_4转变阶段因内应力积累而引起Fe_3O_4晶粒开裂所造成的。提高开始还原温度能有效地防止球团粉化。

在北方流程第二次中间试验中，采用窑头喷煤高温还原技术，解决了含钠浸钒球团还原粉化问题，粉化率只有2.55%，并取得了金属化率为92.33%，金属化球团含硫0.023%和煤耗.807t/t产品的较好试验结果。

一、前 言

钒球团回转窑直接还原，是攀枝花精矿钠化焙烧——水浸提钒——直——熔化分离——电炉炼钢——钛钛白综合回收钒、钛、铁新流程北方流程）的一部分。

钠浸钒球团与普通铁矿球团不同，的回转窑直接还原工艺处理时，因化严重，给回转窑的操作带来很大结窑周期短，是北方流程试验过程重大技术难题之一[1]。

对钠化球团还原粉化机理和工艺系统的研究，弄清了还原粉化的原了消除还原粉化的措施，指出提还原温度（简称高温还原）能有效地钠浸钒球团回转窑直接还原粉化问，并在北方流程第二次全流程中间试验中得到验证。本文所介绍的是在本院实验厂ϕ1.2×13m回转窑进行的攀枝花浸钒球团窑头喷煤高温还原半工业试验结果。

二、工艺方案制定

实验研究结果表明，钠化浸钒球团还原粉化，是在低温还原时Fe_2O_3转变为Fe_3O_4过程中，由于新相（Fe_3O_4）与母相（Fe_2O_3）晶体点阵不同，在钠化畸变的晶格非共格转变中必然产生应力，此应力将随局部方式反应的进行而渐渐积累起来，最终导致Fe_3O_4颗粒开裂，使球团产生所谓灾难性膨胀而粉化（图1）。当控制低温还原速度或提高球团开始还原温度以改变还原反应方式时，均能不同程度的消除内应力的积累，防止球团膨胀粉化。考虑到控制低温还原速度不仅会降低回转

---

*加试验的有北方流程试验组有关单位

窑的生产能力，而且对回转窑的操作要求苛刻，因此，采用高温还原方案更为理想。

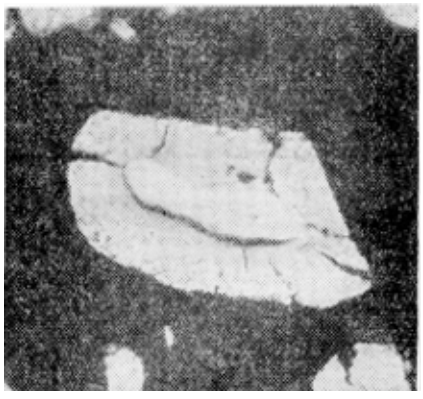


图1　低温还原方式：钠化钛赤铁矿晶体还原为Fe_3O_4后开裂　1000×

高温还原与低温还原不同。在高温条件下还原的过程中，Fe_3O_4取代Fe_2O_3，不是以局部化学反应的方式沿Fe_2O_3单晶体外缘向里推进，而是沿着Fe_2O_3单晶的（0001）结晶面方向还原（图2）。即高温还原是在某一特定方向以二维的方式推进，而低温还原则是在Fe_2O_3单晶颗粒的三度空间方向上进行。无疑，高温还原方式不利于应力的产生和积累，而低温还原对应力的产生和积累则是有利。

图2　高温还原方式：Fe_3O_4沿Fe_2O_3晶体（0001）结晶面取代Fe_2O_3　1000×

粉化机理研究结果还表明，采用高温还原消除球团还原粉化的开始还原温度，随球团晶粒大小不同而有很大差异。对细晶粒球团来说，开始还原温度约为900～950℃时，即可将还原膨胀率降至正常界限；中等结晶程度的球团，将还原膨胀率降到正常界限的开始还原温度为1000℃左右。而大晶粒球团，开始还原温度要＞1000℃才能使膨胀率降至正常范围。

在回转窑中实现高温还原主要是控制还原煤的加入点，使球团加热到一定温度才开始还原。因此，还原煤不能象传统的回转窑操作那样随球团从窑尾加入，而要从窑中或窑头加入预定区域。目前窑中或窑头加煤方式大致有三种可供选择，即窑中加煤器，窑头机械抛煤和窑头空气喷煤。比较这三种加煤方式的特点，本试验采用窑头空气喷煤方法。

三、工艺流程及设备

（一）工艺流程简介

图3为本工艺流程简图。

浸钒球团过筛后装入给料斗，经给料皮带机定量从加料溜槽加入窑尾。在窑的转动过程中球团向前移动而被加热，当加热到一定温度后，与从窑头喷入的还原煤反应。经过破碎和按配比混合的还原煤过称后装入给煤斗，经螺旋给料机定量供给喷煤枪料斗，再被压缩空气喷入窑内预定区域。

脱硫剂（石灰石）与还原煤混合后，一并从窑头喷入窑内。

窑头还设有粉煤烧咀，为回转窑提供一定热量，此外在窑身上设有风机，向窑内送入二次空气，燃烧窑内可燃气体，以调节窑温并为回转窑补充热量。

还原物料经窑头排料管排入外冷式回

转筒冷却到100℃以下，再由皮带排料机定期排入料罐，然后通过带式磁选机磁选分离，磁性物料过筛后得＋4mm和－4mm两种产品。

窑尾烟气先经一级扩散式旋风除尘器除去大部分粉尘，再经过布袋除尘器进一步净化后由排风机排入大气。

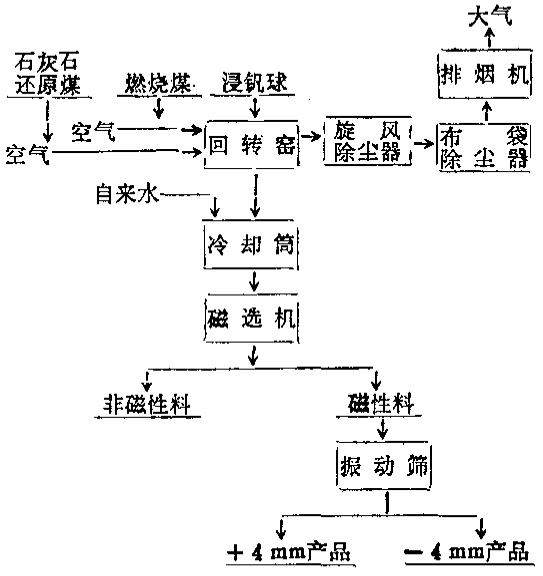


图3　工艺流程简图

（二）试验设备

试验设备联接图见图4。

回转窑外径1.20m，内径0.85m，长13m，内衬150mm厚的高铝砖，倾斜度3%，窑头挡料圈高175mm。窑上装有6台7-10-12型风机，风量为283m³/h，风压236mmH_2O。二次风管材料为$Cr_{25}Ni_{20}$，主管直径60mm，喷咀内径39mm。二次风风量可通过安装在风机进口的调节阀加以控制。

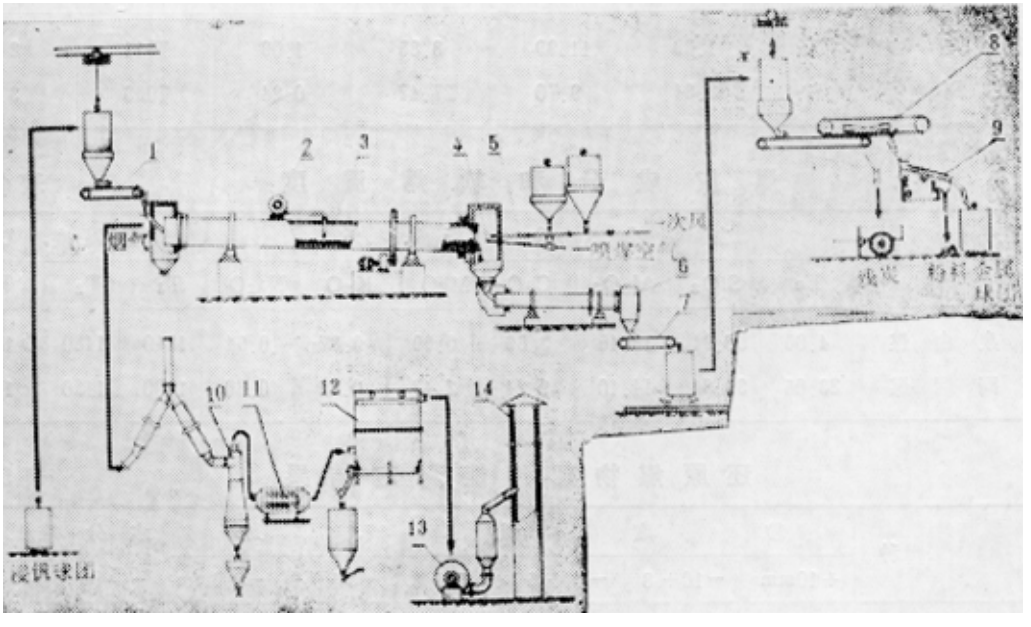
还原煤喷枪出口直径31mm，安装角4.5°。

冷却筒直径0.6m，长6m，倾斜度4%，筒内有三环高50mm挡料圈，以增加物料的停留时间，提高冷却效率。

四、原料和燃料

（一）浸钒球团

试验用球团是钠化焙烧水浸提钒工序



1.皮带加球机　2.二次风机　3.回转窑　4.还原煤喷枪　5.燃烧煤喷枪　6.冷却筒　7.排料皮带　8.磁选机　9.振动筛　10.扩散式旋风除尘器　11.冷却器　12布袋除尘器　13.排烟风机　14.烟囱

图4　设备联接示意图

提供的浸钒球团，其化学成分和物理性能　见表1、2。

浸钒球团化学成分　表1

元素	Fe	TiO_2	V_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O
含量，%	54.20	13.14	0.051	1.80	3.35	0.45	1.94	0.025
元素	Na_2O	S	C	As	P	Mn	Cr	
含量，%	1.22	0.14	0.15	<0.001	0.0063	0.285	0.0045	

浸钒球团物理性能测定结果　表2

粒度组成，%						压强	堆比重	水分	孔隙度
+15mm	−15+12.5	−12.5+10	−10+8	−8+3	−3mm	公斤/个	t/m^3	%	%
0.73	16.91	47.11	30.87	3.97	0.42	30.4	2.02	2.63	29～31

（二）还原煤和燃烧煤

还原煤采用60%阳泉无烟煤和40%大同烟煤的混合煤，燃烧煤为大同烟煤，各种煤的分析测定结果见表3、4、5、6。

（三）石灰石

脱硫用石灰石化学成分及粒度组成见表7。

煤的工业分析　表3

煤种	W^f %	A^f %	V^f %	S_Q^f %	Q_{GW}^f kcal/kg	粘结性
阳泉白煤	1.09	11.99	8.85	1.09	7311	2
大同烟煤	2.34	9.70	27.47	0.84	7066	3

煤灰成分和软熔温度　表4

煤种	灰分分析，%							软熔温度，℃		
	Fe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	T_1	T_2	T_3
阳泉白煤	4.05	50.24	33.45	3.69	0.59	0.37	0.54	1240	1480	>1500
大同烟煤	23.05	35.94	14.10	9.24	2.47	0.45	0.20	1100	1120	1160

还原煤物理性能测定结果　表5

煤种	粒度组成，%						水分	堆比重
	+10mm	−10+8	−8+5	−5+3	−3+0.9	−0.9mm	%	t/m^3
阳泉白煤	20.61	14.97	27.63	25.10	9.85	1.84	3.0	0.81
大同烟煤	2.25	11.71	25.64	27.44	18.57	14.38	5.5	0.79

燃烧煤物理性能测定结果 表6

粒度组成，%					水分	堆比重
+120目	−120+140	−140+160	−160+200	−200目	%	t/m³
7.54	3.02	9.80	8.29	71.35	2.0	0.56

石灰石化学成分及粒度 表7

化学成分，%						粒度
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	Fe	mm
1.39	0.61	51.28	2.94	0.0027	0.25	1～3

五、试验内容及结果

回转窑于1982年1月26日开始投料，29日正式试验，2月8日试验结束。共处理浸钒球团60t，产出合格金属化球团44t。试验过程操作稳定，试验开始各项技术经济指标就达到试验计划中规定的指标。

1.技术操作条件和工艺参数

浸钒球团加入量：260～280kg/h
回转窑最高温度：1170～1200℃
还原煤用量：106～110kg/h
燃烧煤用量：47～63kg/h
石灰石用量：21～23kg/h
还原煤喷吹空气量：48～55m³/h
燃烧煤喷吹空气量：380～470m³/h
二次风风量：560～650m³/h
回转窑平均填充系数：14.1%
球团在窑内停留时间：5.5～6.5h
窑尾压力：3～6mmH_2O
窑尾烟气温度：780～840℃
回转窑转速：0.4rpm
窑头窑尾气成分（%）：

	窑头	窑尾
CO_2	12～16	18.2～21.9
CO	5～12	0～2.5
O_2	0.3～2.5	0.9～2.6

2.主要技术经济指标

表8为试验计划规定指标和2月1—7日试验指标对照表。

3.产品分析

2月1日至7日物料平衡测定过程所取各种产品检测结果如表9、10。

六、问题讨论

（一）高温还原热工制度

图5为本次试验窑内不同位置气体成分和温度的测定结果。从CO含量变化可以看到，进料端至距窑头8m处，无论是料层气还是空间气，CO含量都很低，6#取样孔（离窑头8.4m）料层气含CO只有4.4%，空间气CO含量更低（0.8%），而温度高达1060℃。离窑头9.5m处的温度也高达990℃。也就是说，球团要在温度1000℃以上时才开始还原。对于本次试验所用的赤铁矿晶粒较细的浸钒球团来说，完全能满足高温还原工艺要求，所以试验过程的球团粉化率很低，小于4mm的产品只有2.55%。这说明试验过程控制的喷煤距离（大部分还原煤是落在离窑头4—6m处）和热工制度比较理想。窑内不同位置的球团中铁量的分析结果（图6）和镜下观察也证明了这点。6#取样孔取出

主 要 技 术 经 济 指 标　　表8

序号	项　目	单　位	试验计划指标	试验完成指标
1	金属化球团产量	t/d	4.3	4.843
2	回转窑利用系数	t/d·m³	0.6	0.677
3	金属化率	%	>90	92.33
4	金属化球团含硫	%	<0.07	0.023
5	粉化率	%	<5	2.55
6	产品单耗			
	浸钒球团	t/t产品	/	1.347
	还原煤	t/t产品	/	0.540
	燃烧煤	t/t产品	/	0.267
	总煤耗	t/t产品	/	0.807
	石灰石	kg/t产品	/	108
	冷却筒用水	m³/t产品	/	23
	还原煤喷吹空气	m³/t产品	/	254

产 品 化 学 成 分　　表9

品　种	化学成分，%														
	Fe	TiO_2	V_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	S	C	As	P	Mn	Cr
金属化球团	68.95	16.76	0.063	2.91	4.40	1.32	2.76	0.039	1.20	0.023	0.27	<0.001	0.0125	0.375	0.0048
-4mm磁性物	49.40	10.05	0.034	10.24	6.25	16.17	2.54	0.10	1.18	1.18	0.43	<0.001	0.023	0.41	0.0043

成 品 球 物 性 检 测　　表10

粒　度　组　成，%					压　强	堆比重
+12.5mm	−12.5+10	−10+8	−8+5	−5+3	公斤/个	t/m³
15.00	50.36	30.48	3.39	0.76	35～50	2.4

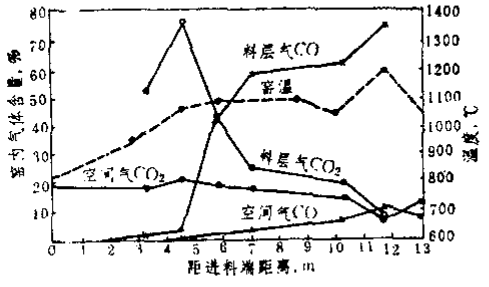


图5　窑内温度和气氛变化曲线

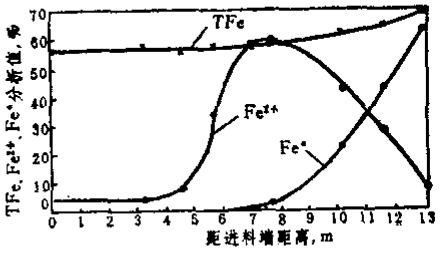


图6　球团中铁矿物沿窑长变化情况

的球团基本没有还原，只有表层（0.2mm厚）开始还原，而且也是按照高温还原方式沿钛赤铁矿（0001）方向进行（图7）。

还原按高温还原方式沿赤钛铁矿（0001）方向进行　630×

（二）关于煤耗

本次试验平均煤耗为807kg/t产品，这对于每天生产4—6t金属化球团的试验窑来说是比较低的。影响煤耗的因素很多，但与前二个方案的试验结果比较，残煤率低是个较为明显的因素。北方流程三个方案的残煤量唯数本方案最低（仅为0.199t/t产品）。

（三）空气喷煤的特点

空气喷煤过程中，还原煤的落点分散在较宽的区间，而不是集中在一处，这不仅有利于窑温和气氛的调节，还可以避免定点加煤可能造成的结窑。

值得指出的是，空气喷煤距离与煤的粒度有关。在一定条件下，煤的粒度粗，其喷吹距离就远，反之喷吹距离就近。我们可以利用这种特性对还原煤进行两种煤质和粒度组成均不同的配煤方法，以求得到合理的热工制度，达到降低煤耗的目的。例如：把挥发份低、反应性差的煤的粒度控制粗些，使喷吹距离远些；而挥发份高、反应性较好的煤的粒度则控制细些，喷吹距离近些。这样就可以避免窑的后部因还原气氛太强而造成球团粉化以及窑尾烟气温度过高或可燃成分高使热损失增大。而挥发份高、反应性好的煤落在离窑头较近的还原区，从而保证该区域有较强的还原气氛，使球团深度还原而防止再氧化。试验时，把挥发份较低、反应性较差的阳泉白煤的粒度破碎到3～15mm，而挥发份高、反应性较好的大同烟煤的粒度控制在0～8mm。试验结果证明，这种配煤方案合理，窑头箱和还原区的还原气氛强，窑温容易调节，热工制度合理，煤耗低，且在残煤较少的情况下也能获得高金属化率的产品。

另外，喷煤装置由于没有机械转动部件，结构简单，所以运行可靠，维修方便，噪音小，能耗低；同时喷煤枪是一种引射装置、即使煤斗不密封也没有粉尘飞扬，岗位劳动条件好。

七、结　语

本工业试验证明，窑头喷煤高温还原工艺解决了攀枝花含钠浸钒球团回转窑还原粉化问题。该工艺技术先进、操作稳定、粉化率低、产品质量好、煤耗低。球团平均金属化率92.33%、含硫0.023%、粉化率2.55%、煤耗0.807t/t产品。

窑头空气喷煤（还原煤），不仅满足了含钠浸钒球团回转窑高温还原工艺要求，而且具有设备结构简单，操作方便可靠，劳动条件好和易于工业化等优点。

以褐煤为能源的回转窑直接还原工艺研究*

执笔　陈树法　阎世贵

（攀枝花钢铁研究院）

本文介绍了攀枝花钒钛磁铁矿以褐煤为能源的回转窑直接还原试验研究条件及结果；总结了应用褐煤的回转窑工艺制度；分析了防止回转窑结圈、降低煤耗及脱硫等问题。

前　言

应用高反应性的褐煤作为钒钛磁铁矿回转窑直接还原的能源，使攀枝花资源综合利用立足于丰富的、良好的能源基础之上。因而，探索了回转窑如何用好高挥发分、高硫及低灰软熔点的云南褐煤。

我院在 $\phi 0.4\times 7$m 回转窑第一次应用褐煤作还原剂试验时，由于按照一般回转窑的投煤方式，将全部还原用褐煤从窑尾加入，出现未烧尽的挥发分及煤焦油对环境的严重污染，煤耗高、产量低、结圈及产品含硫高等问题。为了解决这些问题，曾先后进行了多种工艺方案的对比试验，寻找到了有效途径，并于1982年2～4月试验中连续运转35天，各项指标取得了预期的结果[1]。

一、试验条件及结果

（一）试验设备及流程

试验设备及流程见图1。全流程主要设备包括直径1m的造球盘；宽0.3m、有效长3m的链篦机，内径0.4m、有效长6.87m的回转窑。

精矿成球后在链篦机中干燥预热，再导入回转窑内还原；还原产物经由冷却罐外冷后进行磁选及筛分，分离出金属球产品、返煤及煤灰。

（二）原料条件

1.试验用410厂产的太和钒钛磁铁矿。磨矿粒度－200目占80%以上，－320目占60%左右。铁精矿的化学成份见表1。造球配入皂土量为1%。

* 参加试验的还有本院及攀钢410厂有关人员

参　考　文　献

〔1〕首都钢铁公司等，攀枝花太和钒钛铁精矿浸钒球团生产金属化球团新工艺试验研究报告，1979.8.
〔2〕冶金部北京矿冶研究院，氧化钠化球团还原膨胀及其抑制问题的初步研究，1978.10.
〔3〕冶金部矿冶研究总院，抑制含钠浸钒球团还原粉化机理研究，1980.3.
〔4〕冶金部矿冶研究总院，抑制含钠浸钒球团还原粉化实验室补充试验报告，1980.3.