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。

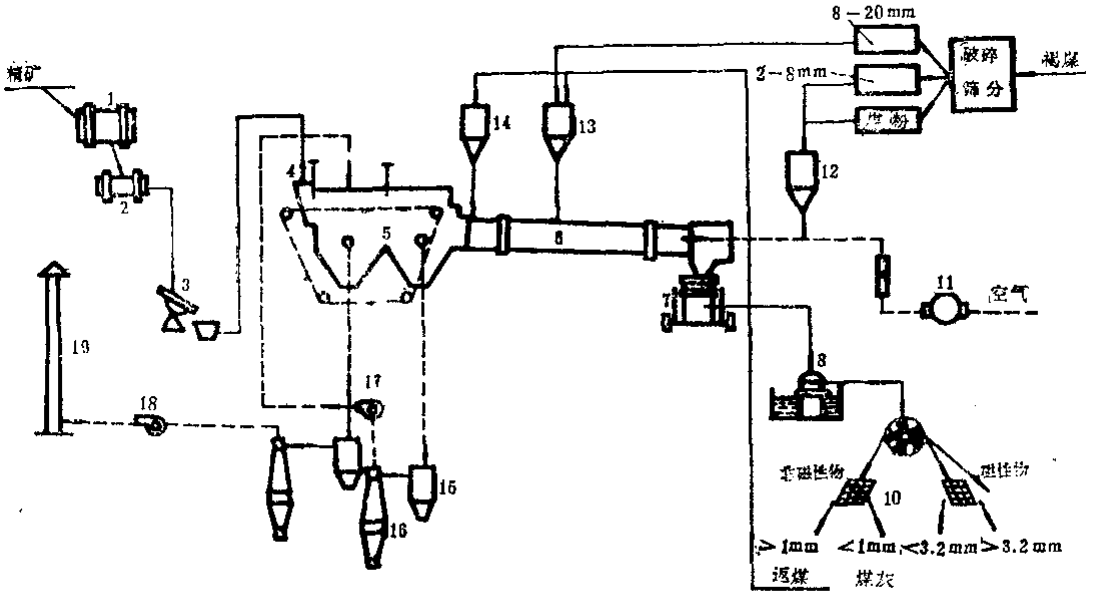
（二）原料条件

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.



1.球磨机 2.混料机 3.造球盘 4.料斗 5.链篦机 6.回转窑 7.出料罐 8.冷却水池 9.磁选机 10.振筛机 11.一次风机 12.窑头喷煤罐 13.窑中煤罐 14.窑尾煤罐 15.重力除尘器 16.旋风除尘器 17.循环热风机 18.废气风机 19.烟囱

图1 φ0.4×7m回转窑直接还原扩试工艺流程

原料及金属球成分(%) 表1

种类		TFe	MFe	V_2O_5	TiO_2	FeO	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	S
铁精矿		57.95	/	0.652	14.50	27.58	52.14	0.53	1.34	2.70	1.93	0.40	0.034
金属球		67.62	58.26	0.810	17.60	12.03	/	0.50	2.08	3.45	2.14	0.46	0.038
小龙潭褐煤煤灰	还原煤						11.48	35.18	14.46	7.57	2.44	0.097	8.88
	燃煤粉						13.47	26.97	25.17	9.03	1.84	0.150	7.19
吕合褐煤煤灰							8.49	2.06	50.44	29.20	4.67	0.035	2.93

2.生球。生球平均抗压强度1.77公斤/个球，落下强度7.93次/0.5米，预热球强度为15.4公斤/个球以上。

3.试验用云南小龙潭褐煤作为还原剂及燃烧煤粉，化检验结果见表2。其主要特性如下：

（1）高反应性。1000℃的反应性已达95%。

（2）高挥发分。800～1050℃的平均挥发分产率为0.3821/g干煤，析出时间25 min。挥发分含H_2 31.89 %，CH_4 13.34%，CO 15.94 %，C_2H_2 1.82 %，H_2S 4.39%。发热值为3177kcal/m^3（相当于褐煤总发热值的1/3）。

（3）碱性灰分。小龙潭褐煤煤灰中$CaO>SiO_2$，因此与酸性灰分的褐煤搭

配使用，即使原煤含硫在1～2%，仍可生产较低含硫量的金属球[2]。

（4）热稳定性及湿稳定性较差。小龙潭褐煤被加热或受潮之后，龟裂粉化较严重。可见，其煤质易碎、堆比重较小[3]。

褐煤的化验结果　　表2

种类	工业分析，% A^g	V^g	C^g	全硫 S^g_Q %	水分 W^y %	元素分析，% C	H	N	S	O	发热值 Q^g_{Dt} kcal/kg	煤灰软熔性 ℃ T_1	T_2	T_3	反应性，% 900℃	1000℃	1100℃
小龙潭褐煤 还原煤	10.18	47.39	43.43	1.63	15.52	61.25	3.95	1.50	0.44	22.01	5465	1164	1317	1335	61.7	94.8	98.6
褐煤 燃煤	21.44	45.33	33.23	1.82	11.00	53.90	4.05	1.23	0.31	22.50	5513	1135	1234	1263			
吕合褐煤	13.33	42.20	44.47	3.15	20.05												

（三）试验结果

由于采用上述试验条件和操作，褐煤挥发分在链一窑系统中得到利用，消除了挥发分对环境的污染，连续试验35天窑内无结圈，各项指标也取得了预期的结果，详见表3。

试验结果主要指标　　表3

项目		前期十九天平均	后期十六天平均	三十五天平均
金属球金属化率，%		85.0	85.8	85.4
金属球含硫，%		0.038	0.033	0.036
窑容利用系数，$t/m^3 \cdot d$		0.605	0.667	0.633
作业率，%		98.7	97.0	98.0
煤耗 t/t金属球	还原剂消耗	1.80	1.59	1.69
	燃煤粉消耗	0.18	0.18	0.18
	总煤耗	1.98	1.75	1.87
	折合标准煤消耗	1.31	1.16	1.24
热耗，$\times 10^6$kcal/t金属球			7.1517	

二、投煤方式及热工制度

合理的投煤方式配合相应的温度及送风制度，既能保证铁氧化物还原的顺利进行，又能达到利用褐煤挥发分、降低煤耗以及防止结圈的目的。试验证明，采用窑头喷入细粒褐煤为主，配合从窑中加入粗粒褐煤及返煤，从窑尾加入返煤的投煤方式，控制最高操作温度在1030～1050℃，并使高于1000℃的区间占窑长的一半。这些就是小龙潭褐煤还原太和钒钛磁铁矿的

回转窑合理工艺制度。

采用上述投煤方式后，褐煤均匀地投到窑的大部分长度上。图2为试验期中沿窑长度上测温取样结果。由图2看出，炉气中CO、H_2含量在整个窑长上均较低，CH_4、H_2S等可燃物均已烧尽，即使回转窑废气中含有少量H_2及CO，也在链篦机预热室中燃烧并利用。这样的工艺较之褐煤预先干馏、将挥发分作为二次能源进行利用要合理，而且简化了工艺设备。国

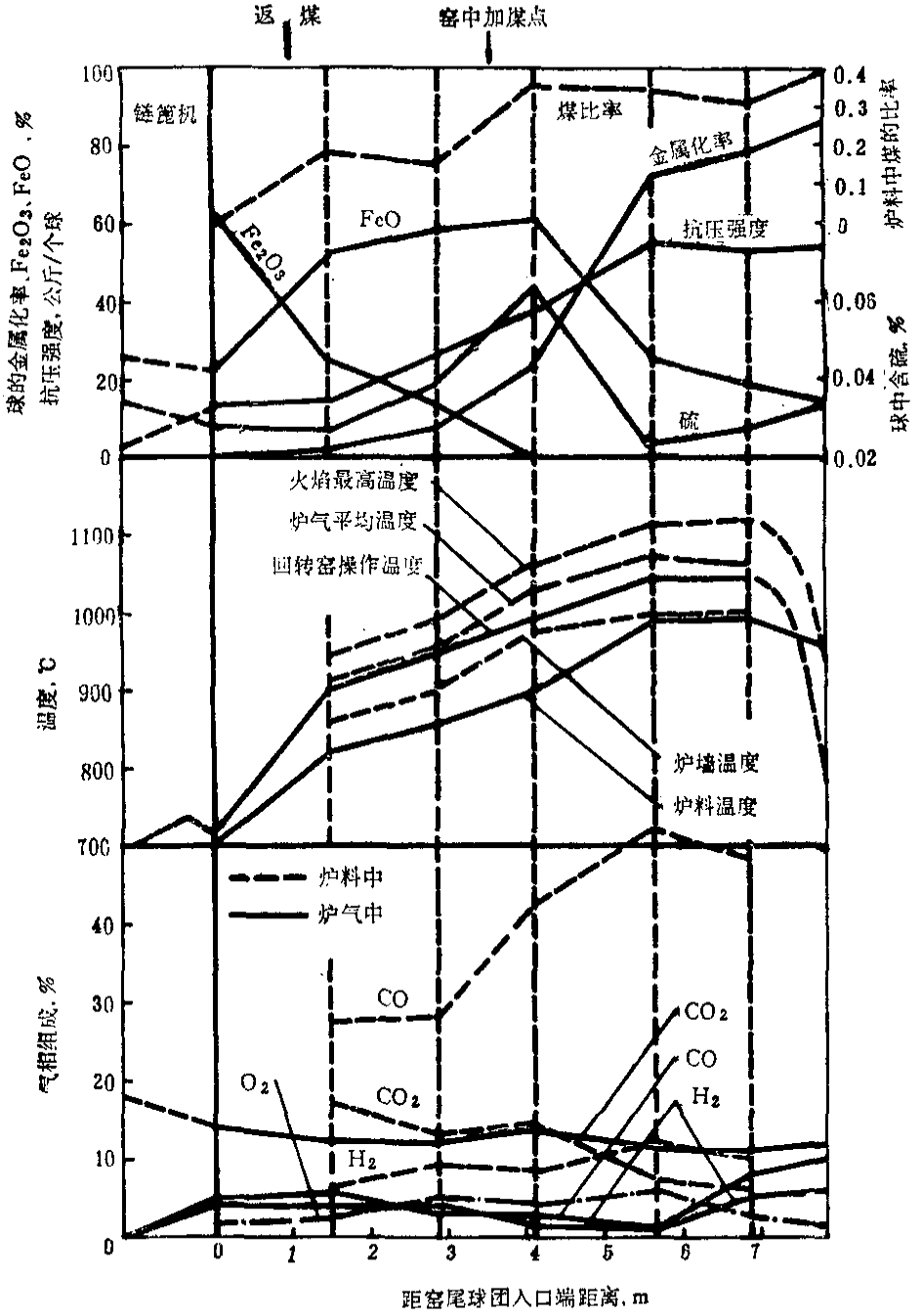


图2 链—窑长度上测温取样结果

外几台应用褐煤的工业化回转窑[4, 5, 6]，是在窑尾增设再燃烧室烧掉挥发分及焦油。与之相比，本工艺显然是进了一步。

分析图2的测温结果可见，在窑尾至窑中加煤点区间里，炉料温度低于900℃，铁的还原反应仅完成初期阶段的过程（即Fe_2O_3的还原及少量金属铁的出现），在这个区间里主要是进行炉料的增温（从700℃增到900℃）。窑尾加入的返煤及来自窑中的挥发分，提供了加热炉料所需的热源。在窑中煤及窑头喷煤进入窑内以后，由于传热条件的改善，炉料温度很快升高到900～1000℃，炉料中煤的重量比率也明显地由0.15增大到0.35，料层中CO、H_2分别升高到50%及10%，在这个区域里具备了FeO还原最好的动力学条件，因而金属铁被迅速还原出来。而且由于窑头煤的喷入，起到还原及保护层的双重作用，使金属化率保持上升趋势，没有出现再氧化现象。

三、防止结圈的主要措施

由于7 m小回转窑内径仅0.4m，较易形成结圈物。分析结圈物和结圈成因发现，炉衬上的粘结物主要是煤灰软熔或煤灰与还原过程铁氧化物粉末生成低熔点化合物所引起的。实际测温结果表明，煤粉燃烧的火焰温度高于回转窑操作温度70～100℃，软熔点低的煤灰很可能就在这火焰温度下熔融，并粘结在煤灰所落下的炉衬或二次风管上。根据实验室测定，各种铁氧化物粉末与煤灰混合，其熔点比煤灰软熔点低40～80℃，因而在矿粉较多的情况下，形成硅酸盐类型的低熔点粘结物。这是形成结圈的重要原因。

本次试验的回转窑操作温度最高处为1040～1050℃，而火焰温度最高处为1113℃，试验所用小龙潭燃煤粉煤灰软熔点T_1为1135℃，即使在煤粉燃烧的火焰温度下，煤灰也不会熔融。本次试验的预热球强度也大有提高，使窑内粉化率降低到1.11%，炉衬上没有熔融粘结物，避免了结圈行程的出现。

总之，为了防止结圈，应将操作温度降至低于煤灰软熔点$T_1$70～100℃，提高球团质量，减少窑内粉化率，这对半工业试验的回转窑也是适用的。

四、降低煤耗的有效途径

单位金属产品的煤耗包括还原煤耗和燃烧粉煤消耗。7 m回转窑最初试验时，还原煤耗高达3.4t/t金属球，本次试验降到1.69t/t金属球；燃煤粉消耗由过去的1.2t/t金属球减少到0.18t/t金属球，总煤耗（折合成标准煤）降到1.24t/t金属球。其主要原因是：

1.合理的投煤方式及热工制度。随着窑尾加褐煤量的减少和窑头喷煤量的增加，还原煤的消耗相应减少（表3），后期比前期还原煤耗降低13%。以入窑还原褐煤计，窑头喷入比例前期为55%，后期为69%；如果包括返煤及燃烧煤在内，窑头煤、窑中煤及窑尾返煤的比例前期分别为51%，38%、11%，后期分别为58%、33%、9%。可见，增加后期窑头煤的比例，减少窑尾煤比例，有利于降低还原煤耗。降低回转窑的操作温度，控制适宜的产物金属化率，也是降低煤耗的重要原因。

2.减少炉壳散热及废气带走的热损失。过去试验时这两项热损失占热耗的85%。本次试验增加了炉壳的绝热层，使炉壳外表温度由240～260℃降低到160～180℃。因而炉壳散热损失就减少了1/2左右。

其次是减少了一次风和二次风（约1/3以上），废气量显著减少，显热损失大为降低。这样，总热耗降到7.15×10^6 kcal/t金属球，燃煤消耗也随之下降。

3.煤粉完全燃烧。燃煤粉不完全燃烧是燃煤消耗高的又一个重要原因，本次试验将燃煤磨到-200目占70～80%，在燃煤与还原煤均用一杆喷枪的情况下，按燃煤计风煤比为12～13m^3/kg煤，燃烧空气过剩系数超过2.0，同时将喷枪位置从中心抬高100mm，以增加煤粉燃烧空间，这些措施都有利于煤粉的完全燃烧。

五、硫的行为及脱硫问题

本次试验应用碱性灰分的小龙潭褐煤，在没有外加脱硫剂的条件下，原煤含硫在1.5～1.6%，入窑的硫负荷高达41.15 kg/t金属球，仍然生产出含硫较低的金属球（含硫0.03～0.04%）。由图2的取样结果可知，球团经链篦机后，含硫由0.034%降到0.027%；预热球进入窑后，球团从煤中吸硫，含硫量增至0.063%以上，向窑头运动过程中由于碱性煤灰的脱硫作用，球团的硫又降到0.022%；卸料前再次吸收窑头喷入褐煤中的硫，硫含量又上升到0.034～0.036%。

根据Neuhaus.H等人的研究结果[7]，球团从煤中增硫过程主要有下列两个反应：

$$Fe_{(固)}+COS_{(气)}=FeS_{(固)}+CO \qquad (1)$$

$$Fe_{(固)}+H_2S_{(气)}=FeS_{(固)}+H_2 \qquad (2)$$

根据资料[8, 9]，在$P_{CO_2}/P_{CO}=0.1$～0.4时，球团脱硫反应是通过气态硫化物为媒介质完成的。当没有H_2时，COS为媒介质，而有H_2时，H_2S则为媒介质[7,8]。本次试验炉料中P_{CO_2}/P_{CO}为0.15～0.6，含H_2 7～12%，故窑内脱硫反应机构为：

$$\begin{aligned} &FeS_{(固)}+CO_{(气)}=Fe_{(固)}+COS_{(气)}\\ &CaO_{(固)}+COS_{(气)}=CaS_{(固)}+CO_{2(气)}\\ +\quad&\\ &FeS+CaO+CO=Fe+CaS+CO_2 \end{aligned} \qquad (3)$$

以及

$$\begin{aligned} &FeS_{(固)}+H_{2(气)}=Fe_{(固)}+H_2S_{(气)}\\ &CaO_{(固)}+H_2S_{(气)}=CaS_{(固)}+H_2O_{(气)}\\ +\quad&\\ &FeS+CaO+H_2=Fe+CaS+H_2O \end{aligned} \qquad (4)$$

小龙潭煤灰中的CaO在窑内起到良好的脱硫剂作用。同时碱性灰分中的CaO还能缚住褐煤自身的硫，使反应（1）、（2）受到限制。试验还发现即使返煤的硫含量达3.47%，在循环入窑应用中对球团含硫量没有影响。

为了研究酸性灰分褐煤脱硫问题，还进行过配煤脱硫试验，用小龙潭煤与吕合褐煤搭配应用考察脱硫效果。吕合煤灰分为酸性，含硫高达3%以上，见表1、2。试验进行了三种搭配方案的对比，其结果如图3所示。方案Ⅰ为窑头、窑中及窑尾各处均为小龙潭配吕合煤（3∶2），结果金属球含硫为0.476%，说明碱性灰分的脱硫作用没有得到充分发挥。方案Ⅱ为窑头全部小龙潭煤，窑中全部吕合煤、窑尾吕合煤配返煤（1∶1），试验结果金属球含硫0.333%。窑头喷入小龙潭煤脱硫作用比较显著，但由于窑中吕合煤可使球团

增硫到0.67%，故靠窑头脱硫还不能达到合格的含硫量。方案Ⅱ基本同方案Ⅰ，差别是在窑中外加昌合煤量20%的石灰石，试验结果金属球含硫0.08%。这个试验为今后应用高硫酸性灰分褐煤指出了一条途径。

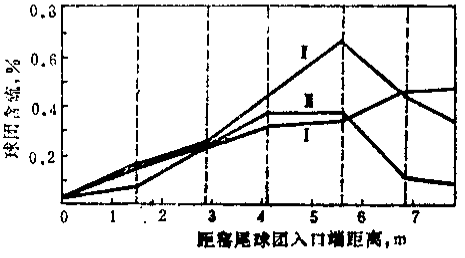


图3　不同方案的配煤脱硫试验结果

六、结　论

1.以窑头喷入煤褐为主，配合从窑中和窑尾加入褐煤和返煤的投煤方式及操作温度1030～1050℃等热工制度，既生产出合格金属球团，又使褐煤挥发分在链—窑系统得到利用而不污染环境，这样原煤不须经过干馏可以直接入窑使用。

2.小回转窑防止结圈的主要措施是操作温度低于煤灰软熔点70～100℃，降低炉料在窑内的粉化率。

3.降低煤耗的有效途经是合理的投煤方式及热工制度，减少热损失，创造煤粉完全燃烧的条件。

（4）应用小龙潭褐煤不加脱硫剂可生产低硫金属球。如果用含硫较高的酸性灰分褐煤，从窑中配少量脱硫剂一起加入，窑头喷碱性灰分褐煤，仍可生产出合格的金属球。

以褐煤为能源的回转窑直接还原，今后应在提高产量及降低煤耗等方面开展试验研究，强化回转窑过程，以创造回转窑直接还原工艺的新的更高水平。

参　考　文　献

〔1〕攀枝花钢铁研究院，钒钛磁铁矿以褐煤为能源回转窑直接还原试验研究总结，1983.5.
〔2〕罗克庸、王巨敏、柱珍盛、杨爱如等，回转窑以褐煤为能源的几个基本问题，1982.2.
〔3〕陈树法，回转窑直接还原应用褐煤的工艺研究，1982.4.
〔4〕Tbom, G.G.W., Ironmaking Conference, 1976, 396—402.
〔5〕Norman, G.B., Ironmaking Conference, 1977, 446—451.
〔6〕Speich, P. etal, Экспресс—информация черная Металлургия, 36 (1974), 15—21.
〔7〕Neuhaus, H. usw, Archiv Für das Eisenhüttenwesen, 37 (1966), 1～11.
〔8〕一伊达稔等，铁亡钢，Vol, 66, 11 (1980), 724.
〔9〕Rausch, H. usw, Stahl und Eisen, 26 (1975), 1266—1272.