

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0047-05

国内外铁矿选矿技术进展及对炼铁的影响^①

余永富

(长沙矿冶研究院, 长沙 410012)

摘 要: 阐述了铁矿山选矿厂开展提铁降硅对钢铁工业发展的必要性; 介绍了国内外近期铁矿山选铁技术的进展情况, 指出选矿技术发展对促进炼铁高炉利用系数的提高、生产成本的降低有重大意义。

关键词: 铁矿; 选矿技术; 炼铁

Advance in iron ore dressing technology at home and abroad and their influence on iron smelting

YU Yong-fu

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China)

Abstract: The necessity of iron increasing and silicon reduction for the development of the iron and steel industry was expounded. Recent advances in iron ore dressing technology at home and abroad were introduced. It is suggested that the advances in iron ore dressing technology are of great importance to the increase of utilization factor of blast furnace and reduction of production cost.

Key words: iron ore; mineral dressing technology; iron making

1 国内外铁矿山选矿技术的进展

在市场经济条件下, 炼铁企业为追求更高的经济效益及利润, 对铁精矿质量提出了越来越高的要求。目前国际上优质球团矿的主要质量指标已提高到铁含量 $\geq 65\%$, SiO_2 含量 $\leq 3\%$, P 含量 $\leq 0.05\%$, S 含量 $< 0.01\%$, 等, 这就要求铁矿选矿技术不断进步和发展。

1.1 国外选铁技术近期的进展

1.1.1 磁选铁精矿阳离子反浮选脱硅技术及工业应用

20 世纪 60~70 年代北美磁性铁燧岩, 从单一弱磁选工艺研制开发出弱磁选、细筛、阳离子反浮选联合工艺。反浮选能有效地从铁精矿中排除含硅的铁矿物连生体, 降低硅含量。

美国和加拿大的选矿研究工作者发现, 磁性铁

燧岩磁选铁精矿细度 $< 0.044 \text{ mm}$ (325 目) 占 89% ~ 90% 时, 由于含硅和磁铁矿的连生体存在, 使得磁选铁精矿中仍含有 5% ~ 9% 的 SiO_2 , 即使对其进行多次弱磁选和水力分选也不能除去这种含硅杂质, 而用阳离子反浮选能够将这种含硅连生体浮起从而与铁矿物得到有效分离, 使铁精矿中的 SiO_2 降低到 4% 以下, 满足冶炼要求, 在铁矿选矿中得到了广泛应用。

加拿大格里菲思选矿厂对含铁 66.5%、 SiO_2 含量 $\geq 6.5\%$ 的磁选铁精矿, 用胺盐 (ADMAG-83) 进行阳离子反浮选, 得到了含铁 69%、 SiO_2 3.5% 的浮选铁精矿, 浮选作业回收率为 96%。1980 年美国银湾选矿厂对含铁 65%、 SiO_2 8% 的磁选铁精矿, 采用阳离子反浮选, 得到含铁 68%、 SiO_2 4.7% 的反浮选精矿。

1.1.2 铁精矿反浮选中广泛使用浮选柱取代传统浮选机

① 作者简介: 余永富 (1932-), 男, 教授, 中国工程院院士。
通讯作者: 陈 雯; 电话: 0731-8657199

浮选柱具有特定的几何形状, 单位体积容量占地面积小, 泡沫密集, 泡沫高度可达 1~2 m, 当用冲洗水冲洗泡沫时, 能降低铁精矿中的硅含量, 而又能使尾矿含铁降低, 使铁的损失保持最低, 同时分选性能好; 充气用空气鼓泡, 能够调整气泡大小及充气速度; 浮选回路简单。所以, 近期在铁矿石反浮选建设中已被广泛应用。巴西萨马尔库 (SAMARCO) 矿业公司第一家于 1990 年采用 15 台浮选柱作粗选、扫选或精选用, 以增加生产能力, 降低尾矿铁品位。目前, 世界上有巴西、加拿大、美国、委内瑞拉和印度等国的矿业公司在铁精矿反浮选工业中采用浮选柱, 表明浮选柱反浮选脱硅较传统浮选机分选性能好, 且建设投资低 (一般低 20%~30%)。这 2 种浮选设备的反浮选脱硅效果比较见表 1。

表 1 生产直接还原级铁精矿中间试验结果 (%)

设备	给矿		浮选铁精矿		产率	回收率
	Fe _T	SiO ₂	Fe _T	SiO ₂		
机械浮选机	56.87	15.07	67.84	0.76	66.00	79.50
浮选柱	55.40	18.30	66.95	0.82	71.00	87.50

1.1.3 高频振动细筛

美国 Derrick 公司研制成功的聚胺酯筛网高频振动细筛 (筛孔 0.15 mm、0.1 mm、0.074 mm), 筛网开孔率高且耐磨, 对于铁矿物单体解离度高的产品, 经细筛隔除粗粒硅铁连生体后, 筛下产品即为高质量铁精矿。

2001 年美国 Derrick 公司推出了重叠式高频振动细筛, 其聚胺酯筛网开孔率高 (35%~45%), 使用寿命长 (10~12 个月), 在美国明尼苏达地区铁矿选矿厂大部分应用该细筛来控制 and 降低最终铁精矿中的硅含量。一般采用细筛来控制最终铁精矿中含硅高的粗粒连生体, 筛上粗粒硅、铁连生体返回再磨, 筛下铁精矿可降低 SiO₂ 0.5%~2% 或更多, 磨机能力提高 8%~9%, 磨矿能耗降低 9%~10%。

表 3 磁-重选矿机分选列别金采选公司矿石的分选结果 (%)

入选精矿	工作制度		分选产品	产率	含铁量	铁回收率
	$H/(kA \cdot m^{-1})$	$V/(cm \cdot s^{-1})$				
III段磁选精矿 ($\leq 45 \mu m$ 粒级占 70%)	8.0	1.0	溢流	7.30	26.00	2.90
			精矿	92.70	69.30	97.10
			入选矿石	100	66.10	100
V段磁选精矿 ($< 45 \mu m$ 粒级占 91%)	9.0	1.0	溢流	4.80	27.80	1.90
			精矿	95.20	70.30	98.10
			入选矿石	100	68.30	100

我国本钢歪头山铁矿属于鞍山式磁铁矿石岩, 该矿现生产的弱磁铁精矿 (Fe_T 67.12%, SiO₂ 6.5%), 不同粒级铁和 SiO₂ 含量差异很大 (见表 2)。可见, 若采用德瑞克筛孔为 0.074 mm 的高频振动细筛, 将大于 0.074 mm 的硅铁粗粒连生体的筛上产品筛出入球磨再磨, 筛下产品即为高质量铁精矿, 铁品位由 67% 提高到 70%, SiO₂ 由 6.5% 降低到 2.71%。此外, 该设备也可用于磨矿分级回路以提高磨矿分级效率。目前德瑞克高频振动细筛在巴西阿莱里铁矿、加拿大铁矿石公司、美国球团钢铁公司、印度古德雷穆克等公司都得到了广泛的应用。

表 2 本钢歪头山铁精矿粒度组成 (%)

粒级/mm	产率	Fe _T	SiO ₂
0.10~0.15	9.04	36.47	37.40
0.076~0.10	9.33	64.32	9.50
0.044~0.076	22.14	69.22	4.10
0.038~0.044	16.78	70.54	2.70
0.030~0.038	0.99	71.09	2.0
< 0.030	41.72	71.09	2.0

1.1.4 磁-重选矿机

磁选铁精矿中硅铁连生体主要为粗粒级, 单体磁铁矿粒度范围大, 在弱磁选机的磁场范围内, 二者磁性相近。但在俄罗斯研制的磁-重选矿机的 4~16 kA/m 电磁场内, 二者在质量上有明显差别。在一定的上升水流条件下, 硅铁连生体被上升水流搬运至悬浮体上部, 并以溢流形式排出。而加入分选区的电磁场能使单体磁铁矿形成磁絮团及向下的磁场力从底部排出作为最终铁精矿。该机内部可带叶轮也可以不带叶轮, 并安装有保证铁磁颗粒层在规定水平和密度的自动调节系统。在俄罗斯列别金、科斯托穆什及奥列涅戈尔等公司生产采用的 MrC-1.5 型磁重选矿机是 1993 年由挪威的“休德瓦其格尔”公司生产的, 其选矿效果见表 3。

1.2 国内铁矿选矿技术近期进展

我国铁矿石的平均品位为 32.67%，采出的矿石品位重点矿山为 31.5%，地方中小矿山为 37.37%，选后的铁精矿品位为 52.65%~67.57%，SiO₂ 含量为 12%~6.5%，平均铁品位为 62%。而澳矿多为赤铁富矿，粉矿品位 62%、块矿品位 64%，其中 SiO₂ 含量为 3%~4%。巴西也是赤铁富矿，粉矿品位为 65%~66%，块矿品位为 66%~67%，SiO₂ 含量 1%~2%。我国铁精矿质量与国外成品矿石质量有明显大的差距，所以我国钢铁公司大量使用进口优质铁矿石。近年来我国国产铁矿石、进口铁矿石及其钢铁发展情况见表 4。

表 4 我国铁矿石、进口铁矿石、钢铁发展情况(万 t)

年份	国产铁精矿	进口铁矿石	生铁	粗钢
1994	24 061	3 734	9 741	9 261
1995	26 190	4 115	10 529	9 536
1996	25 228	4 387	10 531	10 002
1997	26 861	5 510	11 511	10 891
1998	24 689	5 177	11 836	11 459
2000	24 000	6 997	13 103	12 894
2001	21 701	9 230	14 893	15 266
2002	23 143	11 149	17 074	18 155

2002 年进口铁矿石为 1.115 亿 t，2003 年估计将增加到 1.4~1.5 亿 t。进口矿石每年以 20% 左右的速度增加的原因有二：一为国产铁精矿质量差，用之炼铁的效益远远低于国外进口铁矿石；二为近年来钢铁产量增加迅猛，也以年 15%~20% 的速度增加，仅靠国产铁矿石产量不能满足需求。我国选矿工作者针对我国铁精矿质量低，影响矿山持续发展及炼铁成本的问题，提出了我国铁矿选矿厂今后应以提高铁精矿品位，降低 SiO₂、Al₂O₃ 等有害杂质(即提铁降硅)为发展方向。近几年来在选矿技术及装备进展有以下 4 个方面。

1.2.1 新型高效 SLON 立环脉动高梯度强磁选机
该机于 1995 年较成功地应用于马钢姑山氧化

铁矿和攀枝花选钛厂回收<0.045 mm 的钛铁矿。该机的分选介质由网介质改变为棒介质后，在分选性和维修简易化方面有了突破性进展。在使用中影响最大的是 2001 年在鞍钢齐大山选矿厂工业生产试验中所表现出来的优越性，结果见表 5。

表 5 SLON 强磁机与现场生产的 SHP 强磁选机
分选指标的比较(%)

设备名称	台时能力	给矿铁品位	精矿铁品位	尾矿铁品位	作业回收率	作业率
SLON-1500	34.43	15.49	29.63	8.93	60.62	99.03
SHP-2000	34.55	15.04	25.86	10.96	47.08	89.50

1.2.2 磁选柱-电磁式脉动低弱磁场磁重选矿机
该设备采用顺序交替供电励磁机制，在分选腔内脉动顺序下移磁场力，由分选腔下部引入高速上升水流，上升水流向上的冲带力及下移的磁场力对矿浆形成截然相反的二股力，使单体磁铁矿在连续向下的磁力、磁团聚、磁链重力作用下，沉向底锥排矿口排出作为高品位铁精矿。而单体脉石、粗粒硅铁连生体(脉石)由溢流排出成为尾矿，该尾矿再磨再选。该机的分选原理和 20 世纪 80 年代在首钢水厂使用的磁聚机和俄罗斯 90 年代开发的磁-重选矿机的分选原理相似。该机 1994 年在选矿厂使用以来，已经在通城板石沟铁矿、鞍钢弓长岭铁矿、辽宁灯塔纪家选矿厂应用，效果良好，已引起我国选矿厂的关注。试验结果见表 6。

1.2.3 分选技术指标思维观念上的提高和突破
提出了选矿厂合理精矿品位不应该只局限在选矿厂范围内讨论，而应该扩展到选矿、烧结、炼铁这个大范围内来研究，在大系统内取得经济效益最高时的铁精矿品位才能算是合理铁精矿品位。优质铁精矿的评价标准应该用铁、硅、铝 3 种元素来评价，不应该只用铁的含量来评价。鉴于这种认识，对于一直公认为优质铁精矿(Fe 67.5%，SiO₂ 6.5%)的本钢南芬铁精矿又进一步深选，使铁精矿品位提高到 69%~70%，SiO₂ 含量降低到 4% 左右。经计算，质量提高后对炼铁将带来可观的效益。鞍钢弓

表 6 磁选柱精选中低品位磁铁矿精矿工业试验结果

应用厂家	设备型号及规格	产品	产率/%	品位/%	回收率/%	备注
鞍钢弓长岭选矿厂一选 (<0.3 mm 磁铁矿精矿)	CXZ 60 (d600 mm)	精矿	83.45	66.23	90.10	1999 年工业试验
		尾矿	16.55	36.68	9.90	
		给矿	100	61.34	100	
辽宁灯塔纪家选矿厂	CXZ 45	精矿	74.33	67.00	96.52	1995 年 6 月应用
		尾矿	25.67	7.00	3.48	
		给矿	100	51.60	100	

长岭磁铁矿、齐大山氧化矿选矿厂都已进行了改造,近期正在设计的云南大红山铁矿,铁精矿品位也由前期设计的 Fe_T 64%,修改为 Fe_T 67%、 SiO_2 3.5%。

1.2.4 磁选铁精矿阴离子或阳离子反浮选成功地应用于工业生产大幅度提高了我国铁精矿的技术指标

1) 阴离子反浮选工艺

鞍钢调军台选矿厂年处理氧化矿石 900 万 t,采用连续磨矿—弱磁选—强磁选—阴离子反浮选工艺流程,1998 年建成投产后,对含铁 29.69% 的原矿石,就取得了铁精矿品位 66.5%、 SiO_2 6%、铁回收率 84% 的优异分选指标,为阴离子反浮选在我国铁矿选矿厂的推广应用起到了示范作用。阴离子反浮选工艺及阴离子捕收剂是我国创新性的工作成果。

齐大山贫红铁矿年处理原矿 800 万 t,2001 年前为粗粒级重选、细粒级磁选精矿(弱磁选、强磁选)采用石油磺酸钠酸性正浮选的工艺流程,原矿含铁 28.49%,全厂铁精矿品位 63.60%, $\text{SiO}_2 > 10\%$,铁回收率 73.20%。2001 年工艺流程改造为阴离子反浮选后,全厂铁精矿品位提高到 66.5%~67%, SiO_2 降低到 5%~6%,达到了红铁矿选矿的国际先进水平。

2) 阳离子反浮选工艺

鞍钢弓长岭选矿厂年处理磁铁矿石 950 万 t,2001 年前的生产工艺为阶段磨矿、单一弱磁选、细筛筛上再磨,筛下产品含铁 64.5% (粒度 $< 0.074 \text{ mm}$ 占 90%),过滤后最终的铁精矿品位为 65.55%, SiO_2 8.31%。2001 年后将筛下产品进行阳离子反浮选,改造后工业生产铁精矿品位为 68.89%, SiO_2 降低到 4.09%,浮选作业回收率为 98.5%,作业产率 92%,铁精矿质量达到了国际先进水平。

2 铁矿山选矿技术的发展对我国炼铁工业的影响

2.1 铁精矿质量的提高,促进了高炉利用系数的提高

如前所述,我国不仅铁矿资源品质差,更重要的是对“合理铁精矿品位”及“优质铁精矿质量”的认识和评价标准上的错误或不全面、不到位,导致我国铁精矿品位不高,而 SiO_2 含量居高不下,没有刻意的在降低 SiO_2 上下工夫,造成入高炉的炉料不精,影响高炉利用系数的提高。高炉炉料的配比中铁精矿粉占 75%~80%,因而铁精矿(粉矿)的质量高低是影响入炉铁品位的关键因素。从表 7 可明显

表 7 1997~2002 年我国高炉入炉品位和高炉利用系数

企业名称	入炉铁品位/%				高炉利用系数/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)				渣铁比/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	矿耗/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
	1997 年	1999 年	2001 年	2002 年	1997 年	1999 年	2001 年	2002 年	1999 年	1999 年
宝钢	58.86	60.17	60.61		1.983	2.257	2.258			1 612
首钢	57.22	58.60	59.07		2.059	2.139	2.154		320	1 670
鞍钢	54.31	54.26	55.44	57.50	1.71	1.840	1.943	2.013	497	1 875
武钢	57.45	57.72	58.33		1.879	1.951	2.064		339	1 651
唐钢	54.50	55.27	56.74		2.00	2.09	2.067			1 741
包钢	56.01	56.62	57.29		1.519	1.716	1.721		488	1 708
重钢	48.71	51.68	53.78		1.462	1.673	1.940		358	1 845
酒钢	49.70	50.48	52.51		1.628	1.936	2.023			1 861
本钢			58.56		1.730	1.883	2.283			1 744
马钢			57.89		2.001	2.205	2.536			
邯鄹	56.03	58	58.30		2.144	2.332	2.160			
安阳	55.84	57.81	58.60		2.780	2.902	3.244			
青岛		63.57	59.38		1.853	2.789	3.064			
涟源	53.46	56.09	57.89		1.94	2.237	2.493			
杭州	54.63	56.73	60.08		2.427	2.811	3.138			
三明	55.72	58.77	60.27		2.268	2.936	3.572			
石家庄	54.60	58.19	58.60		2.258	2.94	3.554			
全国	54.97	55.35	57.28	58.18	1.920	2.140	2.321	2.448		
国家重点企业	54.86*	54.88	56.35		1.736*	1.993	2.152			
地方骨干企业	54.11*	56.10	57.65		1.921*	2.412	2.774			

* - 1995 年数据

看出: 入炉铁品位直接影响着高炉利用系数的提高, 如 1997 年全国入炉铁品位为 54.97%, 高炉利用系数为 $1.912 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; 2001 年入炉铁品位提高到 57.82%, 全国高炉利用系数提高到 $2.321 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

2.2 铁精矿质量的提高促进了高炉炼铁经济效益的提高、生产成本的降低

近期, 我们对某年产铁精矿 485 万 t 的选矿厂进行提铁降硅的试验研究, 该公司依据试验结果按工业生产技术改造后能达到的技术指标进行选矿-烧结-炼铁整个系统的效益进行计算。技改后的铁精矿品位由 67.5% 提高到 69%, SiO_2 由 6.5% 降低到 4.5%, CaO 0.2%, H_2O 8.5%; 烧结矿铁品位升高 3.36%, 烧结铁精矿配比升高 3.84%, 烧结石灰配比降低 3.84%。炼铁效益经计算, 该公司铁的选矿经进一步降硅提铁后达到真正的优质铁精矿, 铁系统效益合计为 8 716 万元, 说明选矿开展提高铁精矿品位, 降低 SiO_2 杂质含量对高炉炼铁效益是巨大的, 对降低炼铁成本, 增加我国冶金产品在市场中的竞争能力具有非常重要的意义。

3 建议

1) 鉴于我国铁矿资源不足, 使用两种铁矿资源已属必然。但是, 必须认识到我国年产铁矿石还有 2.2~2.5 亿 t, 可供生产生铁 6 500~7 500 万 t/a。所以, 加强我国铁矿选矿技术进步, 提高铁精矿质量对我国钢铁行业的整体效益的提高仍是至关重要的, 其中有很多关键性的技术还需要不断研究、开发与实施(如铁精矿反浮选阳离子捕收剂的研究, 铁反浮选浮选柱), 希望国家及行业各级领导高度重视。首先, 使我国大部分铁矿山选矿厂都能生产优质品铁精矿, 为我国铁矿山持续发展创造条件, 改写我国铁精矿质量低、杂质高的历史。

2) 在铁精矿降硅反浮选中使用浮选柱比用传统的浮选机具有很多优点, 国外已普遍使用, 而我国在铁精矿反浮选技术这方面还未开展研究和工业应用, 希望能加强这方面的研究, 并尽快使其在工业生产中应用, 以提高反浮选降硅效果, 提高铁精矿回收率。

(编辑 袁赛前)