

87

• 高等学校教学用书

铁矿石造块理论 及 工 艺

MAODENG



冶金工业出版社

高等学校教学用书

铁矿石造块理论及工艺

北京科技大学 周取定 孔令坛 编

冶金工业出版社

高等学校教学用书
铁矿石造块理论及工艺
北京科技大学 周取定 孔令坛 编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷99号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张14 3/4 字数350千字
1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数00,001~2,400册

ISBN 7-5024-0479-1

TF·103 (课) 定价2.95元

前 言

本书较系统论述铁矿石造块的基本理论及其工艺，主要内容有高炉精料的发展，冶炼对人造富矿冶金性能的要求，冶金性能的检验方法；烧结热过程、物理化学过程、气体力学、成矿机理以及矿物组成等烧结理论；烧结原料的特性、加工处理、配料计算、混合及点火，影响烧结工艺的因素及烧结过程热平衡；铁精矿的成球机理、生球的干燥、焙烧固结理论以及球团生产工艺。

本书是在作者多年为钢铁冶金专业大学本科生、研究生开设《钢铁原料造块原理》《炼铁原料》讲稿的基础上整理而成，其中包括作者的生产实践及部分科研成果。本书第一~十四章由周取定编写、第十五~十九章由孔令坛编写。

本书作为钢铁冶金专业大学本科生的参考教材，也可供有关工程技术人员及研究生参考。

本书在编写过程中得到许多工厂、设计、科研单位的大力支持和帮助，在此谨致敬意。

由于我们水平有限，书中存在不足之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

1988.2.

目 录

第一章 高炉精料的发展	1
第二章 高炉冶炼对人造富矿冶金性能的要求	4
2.1 前言	4
2.2 含铁品位的影响	5
2.3 机械强度及粉末含量	7
2.4 还原性	8
2.5 低温还原粉化性	9
2.6 化学成分的稳定性及粒度的均匀性	13
2.7 软化及熔滴性	13
2.8 有害元素的影响	16
第三章 铁矿石（烧结矿、球团矿）冶金性能检验方法	19
3.1 概述	19
3.2 铁矿石的机械强度检验方法	19
3.3 球团矿的抗压强度检验方法	21
3.4 铁矿石还原性能检验方法	23
3.5 铁矿石低温还原粉化性能检验方法	28
3.6 球团矿还原膨胀性能检验方法	31
3.7 铁矿石高温软化与熔滴性能检验方法	34
第四章 烧结热过程	42
4.1 固体燃料燃烧	43
4.2 烧结过程的传热与蓄热	50
第五章 烧结物理化学过程	59
5.1 烧结过程水分的蒸发	59
5.2 结晶水及碳酸盐的分解	62
5.3 铁氧化物的分解、还原与再氧化	67
第六章 烧结过程气体力学	73
6.1 烧结料层结构的物性参数	73
6.2 料层的阻力损失	76
6.3 沃伊斯公式的实际应用	80
6.4 烧结料层各带的阻力损失	82
第七章 烧结成矿机理	84
7.1 固相反应理论	84
7.2 液相的形成及结晶过程	89
第八章 烧结矿的矿物组成、结构及其对烧结矿质量的影响	98
8.1 烧结矿的矿物组成及结构	98
8.2 矿物组成及其结构对烧结矿质量的影响	105
第九章 烧结原料及其特性	109

9.1 铁矿石	109
9.2 锰矿石	111
9.3 燃料	111
9.4 熔剂	113
9.5 工业废弃物	116
第十章 烧结原料的准备及加工处理	118
10.1 原料的贮存及中和混匀	118
10.2 破碎与筛分	124
第十一章 配料工艺及计算	129
11.1 配料目的与要求	129
11.2 配料方法	129
11.3 现场配料计算及配料操作	130
11.4 设计时常用配料计算及物料平衡	134
11.5 以100千克烧结矿氧变平衡为基础的配料计算	140
11.6 矿石、熔剂消耗量以及烧结矿中含铁的计算	143
第十二章 混合、布料及点火工艺	147
12.1 混合的目的与方法	147
12.2 影响物料混合及造球的因素	147
12.3 混匀及造球效率的检查	150
12.4 布料的要求及布料效果的检查	151
12.5 铺底料的作用及获得铺底料的方法	153
12.6 烧节点火工艺	153
12.7 点火燃料及燃烧计算	159
第十三章 影响烧结的工艺因素	170
13.1 烧结料的透气性	170
13.2 合适风量及负压的选择	172
13.3 返矿对烧结的影响	174
第十四章 烧结过程热平衡	180
14.1 烧结过程的热量收入	180
14.2 烧结过程的热量支出	182
14.3 烧结机热效率	185
14.4 计算结果及分析	186
第十五章 铁矿球团的基本概念	190
15.1 团矿的概念	190
15.2 球团矿的发展	190
第十六章 铁精矿的成球机理	192
16.1 物料的表面性质	192
16.2 液体和固体的作用	194
16.3 精矿粉的成球	197
第十七章 生球的干燥	202
17.1 生球干燥的意义	202
17.2 生球干燥的机理	202

17.3	生球干燥过程中强度的变化与裂纹和爆裂	204
17.4	影响生球干燥的因素	205
第十八章	球团矿的焙烧固结	207
18.1	球团矿焙烧过程	207
18.2	球团矿中磁铁矿的氧化和硫的氧化	208
18.3	球团矿的固结机理	209
18.4	球团矿的矿物组成与显微结构	215
18.5	影响球团矿焙烧固结的因素	217
第十九章	球团矿生产工艺	221
19.1	球团矿生产工艺流程	221
19.2	造球前原料的准备	221
19.3	配料、混合和造球	222
19.4	球团矿焙烧	223
19.5	球团矿品质的控制	226

第一章 高炉精料的发展

早在1937年，世界高炉原料主要还是天然矿，烧结矿只占1%；到了1957年天然矿占69%，人造富矿占31%；七十年代，天然矿占33%，而人造富矿已占67%；进入八十年代，天然矿只占27%，人造富矿高达73%。人造富矿有这样大的发展是因为世界上富矿日益减少。根据资料统计全世界铁矿石资源已探明的有7825亿吨，但富矿不多，目前除南非、澳大利亚有较多的富矿（含铁60~65%）外，其它国家90%以上的矿石是贫矿，不能直接进入高炉^[1]。随着钢铁工业的发展，贫矿的开采愈来愈多，由于人造富矿经过人们的研究改进能提供比天然富矿冶金性能更好的矿石，因而使人造富矿工业得到迅速发展。图1-1为国外烧结矿和球团矿1960年以来产量的变化^[2]，图1-2为世界各主要国家人造富矿的发展状况^{[3][7]}。

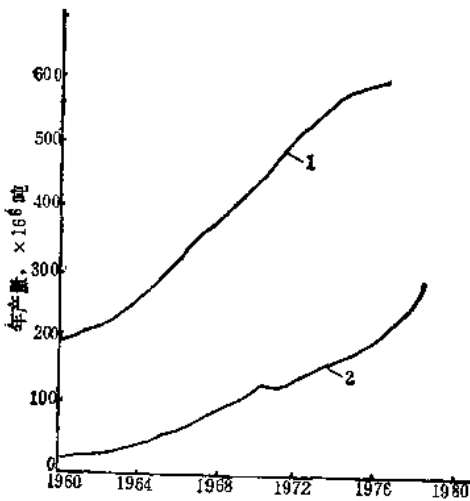


图 1-1 国外人造富矿的发展
1—烧结矿；2—球团矿

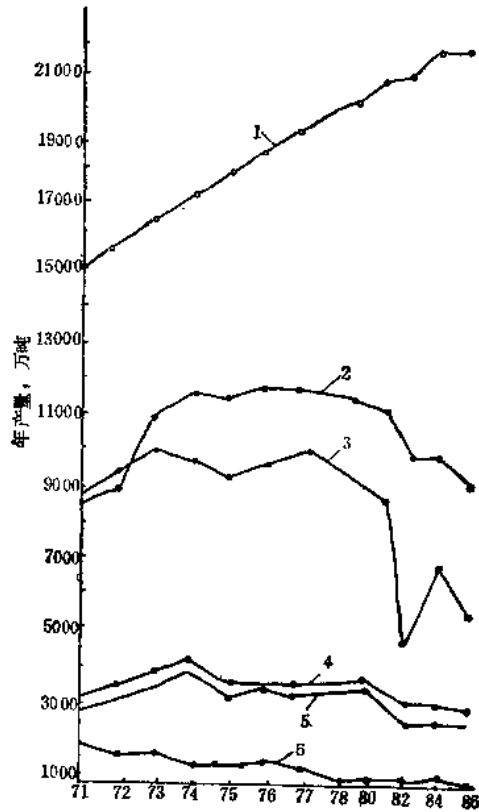


图 1-2 世界各国人造富矿的发展

1—苏联；2—日本；3—美国；4—西德；5—法国；6—英国

由于人造富矿的发展，高炉入炉矿石的熟料率有大幅度的提高。1980年统计：美国为86%，日本为89.6%，西德83.6%，苏联95.7%。由于熟料率的增加，入炉含铁品位提高，人造富矿的冶金性能有所改进，高炉各项技术经济指标得到大幅度的提高，1960年以来世界各主要国家的高炉的年平均焦比见表1-1^[4]。

高炉焦比大幅度地降低，除了高炉使用高风温、高压炉顶及喷吹燃料等技术外，主要

各国高炉焦比的变化

表 1-1

国名	年	1960	1965	1970	1975	1976	1980	1981	1982	1983	1984
美国		749	656	630	611	594	569	550	538	539	528
日本		619	507	478	445	427	450	476	480	492	487
苏联		729	619 (64年)	575	546.5	573	512	—	—	—	—
西德		824	668	559	497	482	515	540	528	585	531
英国		825	680	625	608	576	588	577	569	553	558
法国		971	784	626	593	521	521	536	523	512	511

的原因是采取了精料的方针，其中包括入炉原料品位的提高，烧结矿及球团矿冶金性能的改进以及焦炭质量的提高。例如美国，入炉原料含铁品位从1952年的51%上升到1969年的59%，焦比从922kg下降到626kg，其中由于使用精料焦比降低197kg。1970年后期他们在新建及改建企业时，在原料准备上投入了大量资金。美国伯利恒钢铁公司伯恩港厂及雀点厂建立了计算机控制的中和及混匀系统，为新建的烧结厂提供化学成分及物理性能均一的混合料。

球团矿的工业生产是五十年代开始发展起来的。在美国有大量的贫铁矿——铁燧岩 (Taconite)，其铁矿物嵌布粒度很细，要选出矿石中的铁矿物必须把铁矿石细碎到325目者达90%以上，此种细精矿用于烧结很困难，因此积极发展了当时在试验室已取得成功的造块新工艺——球团矿的生产，到1960年全美国球团矿的产量达到1500万吨。球团矿的粒度均匀，含铁品位高，强度高、还原性好，便于储存及运输，世界各国如瑞典、加拿大、苏联、日本也相继发展了球团矿。1980年全世界球团矿年产约2.781亿吨。各国发展球团的情况见图1-3[3][5][7]。与此同时，世界上高炉炉料结构也发生很大的变化。

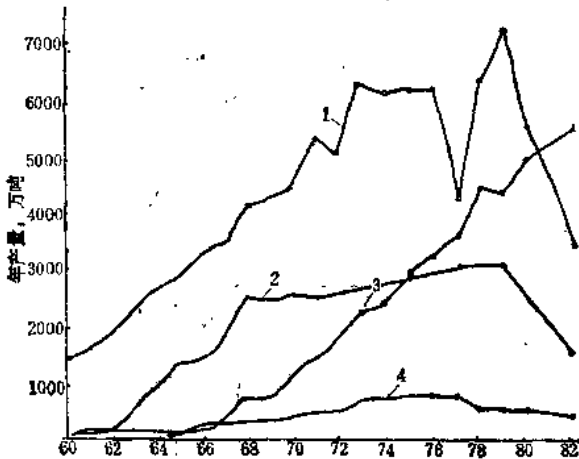


图 1-3 各主要国家球团矿产量
1—美国；2—加拿大；3—苏联；4—日本

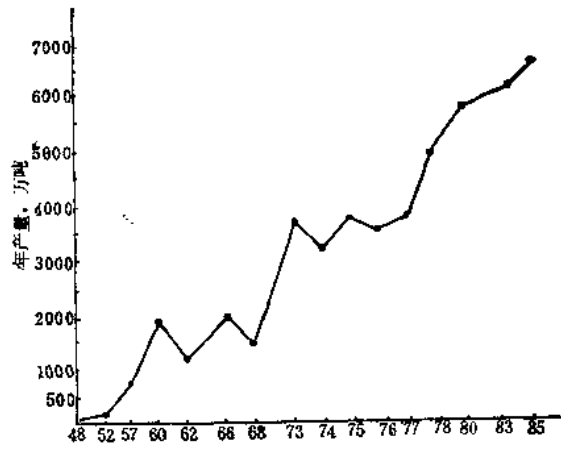


图 1-4 我国人造富矿生产的发展

1978年苏联高炉炉料中烧结矿占74.45%，球团矿占21.25%；1981年日本高炉炉料中烧结矿占76.5%，球团矿占10.6%，1981年美国高炉炉料中烧结矿占23.3%，球团矿占68.7%。

1949年全国解放时，我国只有鞍钢两台破旧的50m³烧结机，经过三年恢复时期，烧结矿年产量达到138万吨。第一个五年计划（1953~1957年）新建鞍钢二烧、本钢二铁厂烧

结机，增加生产能力610万吨。第二个五年计划（1958~1962年）新建东鞍山烧结厂、首钢一烧、马钢一烧、武钢一烧、重钢一烧、鞍钢二烧及球团厂，增加生产能力870万吨。从1965年起开始筹建攀钢、酒钢、马钢二烧、太钢烧结厂，第三、四个五年计划（1966~1975年）新增生产能力4000万吨。1983年底全国有烧结球团设备142台，生产能力达6375万吨。图1-4列出我国历年人造富矿生产的情况^[6]。

我国重点企业高炉技术经济指标

表 1-2

年 指标	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
利用系数 (t/m ³ ·d)	0.994	1.10	1.429	1.487	1.556	1.471	1.547	1.591	1.649	1.698	1.738
焦 比 (kg/t铁)	640	623	562	553	535	540	538	535	524	519	513
油 比 (kg/t铁)	38.4	36.4	32.6	16.2	12.3	2.2	0	—	—	—	—
煤 比 (kg/t铁)	18	21	27	35	39	45.5	48.2	50.1	58.1	61.7	66.5
综合焦比 (kg/t铁)	700	683	623	601	585	579	577	575	571	568	556
热风温度 (°C)	828	832	914	933	978	976	992	1006	1003	997	1005
入炉料含铁品 位(%)	50	50.68	52.8	53.72	53.74	53.33	52.52	52.26	52.41	52.77	53.61
熟 料 率 (%)	88.80	89.20	88.06	86.73	88.37	90.02	90.68	90.45	90.17	89.61	89.88
焦 炭 灰 分 (%)	14.27	14.36	13.77	13.60	13.55	13.61	13.72	13.81	13.86	13.95	13.89
生铁合格率 (%)	94.64	96.29	99.41	99.81	99.92	99.94	99.94	99.95	99.95	99.97	99.97

党的十一届三中全会以来，我国高炉生产各项指标创造了新水平。重点企业综合焦比自700kg下降到585kg，下降了16%。利用系数提高5%，产量上升70%，见表1-2^[4]。

从1976年到1980年入炉原料含铁品位上升3.74%，风温提高150°C。仅就原料提高品位一项指标，焦比下降7.5%，占这一期间焦比下降的50%，由此可见五、五期间（1976~1980年）原料工作的改进占有显著的作用。在这五年中我国在原料工作方面进行了以下的改造：

（1）鞍钢、本钢及首钢等矿山公司采用细筛再磨选矿新工艺，使铁精矿的品位由62~64%提高到65~68%。

（2）普遍采用提高烧结料层及保温的措施，逐步由生产热烧结矿改为冷烧结矿，同时提高了烧结矿的碱度，因而提高了烧结矿的强度，减少烧结矿粉末，改善了烧结矿的高温冶金性能。

1980年以后，高炉入炉料含铁品位变化不大，但入炉烧结矿的碱度及冶金性能有很大的提高，高炉的炉料结构有很大的改进。

参 考 文 献

- [1] 国外金属矿山编写组：《国外金属矿山》冶金工业出版社，1973，p1，p339。
- [2] 孙君泉、曾国华：国外烧结球团技术发展方向《国外烧结球团》1982 No1，p15。
- [3] 唐先觉、李希超主编：《烧结》冶金工业出版社，1984，p1。
- [4] 徐炬良：《炼铁文集》中国金属学会炼铁学术委员会出版，1984，p1。
- [5] 长沙矿山设计研究院：七十年代国外球团矿生产技术水平概况，《烧结球团》1978，No2 p7。
- [6] 张志勋：关于发展我国烧结生产的几点意见，《烧结球团》1980，No1，p1—5。
- [7] 联合国贸易与发展会议资料，1987。

第二章 高炉冶炼对人造富矿冶金性能的要求

2.1 前言

现代高炉生产对原料提出严格的要求，这是因为高炉使用昂贵的焦炭以及要求炉料有很好的透气性。现代高炉对人造富矿冶金性能的要求是：

- (1) 含铁品位高；
- (2) 机械强度高，入炉粉末少；
- (3) 有良好的还原性；
- (4) 低温还原粉化率低；
- (5) 化学成分稳定及粒度均匀；
- (6) 有较好的软化及熔滴性能；
- (7) 有害杂质少。

例如：

日本福山钢铁厂烧结矿^[1]：

化学成分：CaO/SiO ₂	1.75±0.03
TFe, %	55.8~56.2
CaO, %	9.8~10.4
MgO, %	0.9~1.0
Al ₂ O ₃ , %	1.95~2.10
Fe ⁺⁺ , %	7.8~8.2*
Ti, %	0.45~0.5
P, %	0.055~0.06
S, %	0.014~0.018
粒度组成	5~50mm
<5mm	<2%
转鼓指数(+10mm)	58~61%
还原粉化率(<3mm)	<35%

* 最新的生产水平：FeO 4.54%

西德斯威尔根 (Schwelgen) 4000m³高炉^[2]：

化学成分	规定	平均	波动	86年3月№3烧结机
CaO/SiO ₂	1.75	1.74	0.04	1.75
SiO ₂	6.0	6.03	0.12	5.89
Al ₂ O ₃	1.7	1.74	0.07	1.23
MgO	0.8	0.8	0.07	1.77
TFe	≤58	56.93	0.28	56.88
Fe ⁺⁺	≤6.25	6.18	0.54	4.28
P	≤0.05	0.05	0.01	0.04
Mn	≤0.30	0.24	0.01	0.19

Pb	≤0.015	0.012	0.001	—
Zn	≤0.015	0.010	0.001	—
Na ₂ O	—			
粒度组成				
<5.0mm	≤3	1.8	0.4	2.0
<6.3	≤6	4.7	0.8	—
<16	≤50	46.1	3.1	—
<40	≤90	85.6	3.3	—
转鼓指数(ISO)				
>6.3mm	>75	78.3	0.6	78.5
<0.5	—	4.6	0.3	—
500°C还原粉化率				
>6.3mm	>25	27.8	3.7	—
<0.5	<5	4.9	0.3	—
1050°C还原性				
$(\frac{dR}{dt})_{10}$ %/分	—	1.3	—	—

可见，现代高炉对原料在化学成分的稳定性、粒度组成、机械强度、还原性及还原粉化率方面都有严格的要求。这样才能使高炉达到最好的经济效益。

2.2 含铁品位的影响

入炉矿石的含铁品位与高炉冶炼的关系已为众所周知。提高含铁品位1%，高炉焦比下降2%，产量提高3%。鞍山矿山设计研究院对首钢大石河精矿、鞍钢大孤山精矿及本钢南芬精矿的含铁品位的经济效果进行计算与研究。计算结果见表2-1〔3〕。

表2-1计算结果表明：达三个矿山的精矿含铁品位提高1%，高炉焦比将下降2.0%左右，高炉利用系数提高3%。当把这些精矿制成自溶性烧结矿，其含铁品位提高1%时，可降低焦比1.5%左右，产量提高约2~2.5%。

提高精矿及入炉烧结矿含铁1%对高炉冶炼指标的影响

表 2-1

项 目	首 钢 大石河精矿四高炉	鞍 钢 大 孤 山 精 矿	本 钢 南芬精矿五高炉
精矿含Fe↑1%			
精矿中SiO ₂ ↓%	1.26	1.29	1.28
烧结矿中Fe↑%	1.73	1.7	1.6
高炉渣量(kg/t)↓			
精矿Fe↑1%	43~50	42.7	—
烧结矿Fe↑1%	29~33	25~29	—
焦比%↓			
烧结矿Fe↑1%	1.681	—	1.8
利用系数↑			
烧结矿Fe↑1%	2.79	—	冶炼强度↑2.5%

合理的人炉矿石含铁品位要根据自矿山开始到炼铁加工完毕的综合经济效益而定。在我们国家里，每个大企业都有自己的矿山，能否提高品位决定于矿石选别的难易程度以及投资的经济效益。鞍钢、本钢、首钢矿山多属于含铁石英岩，原矿含铁品位一般在30%左右。以前采用两段磨矿，两次磁选，其含铁品位只能达到63~64%。如果细磨，则可提高含铁品位，但降低了球磨机的台时产量，降低了回收率，很不经济。1977年开始首钢迁安铁矿对选矿进行技术改造，采用国外先进的细筛再磨流程（使用筛孔为0.3mm塑料筛），仅将筛上物返回球磨，而筛下物约35%送往磁选机，其结果精矿粒度由-200目的占60%提高到75%，品位由64%上升到68.5%，回收率不但不降低还有提高。1977年全部改造完成，细精矿每吨耗电量、原料费及设备折旧费有增加，每提高1%铁含量，选矿成本增加1.09元，但由于精矿含铁品位提高，入炉矿比下降，生铁原材料费不仅没有增加反而降低了。以1980年与1976年相比，假设高炉使用的原料都是352吨，由于精矿品位由63.72%提高到68.86%，则可多得生铁20万吨，节焦16万吨，节约灰石40万吨。由于消除了烧结矿的粉化现象以及高炉渣减少了200kg，可提高冶炼强度20%，又多增产生铁40万吨。此外，国家铁路运输量减少150万吨，使炼铁受益达7528万元，而矿山方面由于降低台时处理量13%，选矿加工费每吨精矿增加3.24元，共损失1006万元，结果高炉受益为矿山付出代价的七倍^[4]。

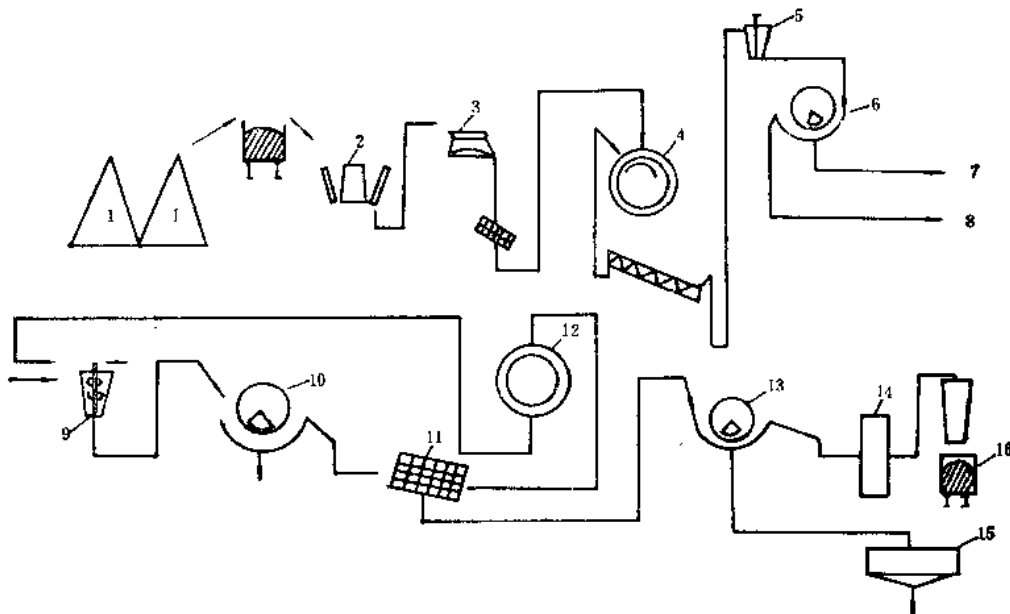


图 2-1 首钢迁安铁矿选矿流程（细筛、再磨、精选）

- 1—矿山；2—初碎；3—中碎；4—球磨；5—脱水；6—磁选；7—尾矿；8—初精矿（TFe 60~62%）；
9—水力旋流器；10—磁选机；11—尼龙网筛；12—再磨；13—磁选机；14—过滤器；15—尾矿浓缩池；16—精矿（TFe 67~68%）

当前我国提高入炉矿石含铁品位存在一些问题，主要是一部分使用红矿或褐铁矿的企业，由于这些矿石缺乏磁性，提高品位比较困难。酒泉钢铁公司桦树沟铁矿是由镜铁矿、褐铁矿、菱铁矿及脉石所组成，含铁品位为36%左右。即使通过磁化焙烧及磁选后，其精

矿含铁品位也只有56%。采用强磁机对粉矿进行选别所得精矿含铁品位只有47~48%。水城、重钢使用的褐铁矿或菱铁矿原料，其矿石经过水洗后，所得品位只有45~48%。

目前对红矿选矿已从试验室试验研究进入现场技术攻关阶段。对鞍钢齐大山，冀东司家营的磁、赤混合矿采用重选—磁选—浮选联合流程可以使它的精矿含铁品位提高到63%，（原矿含铁30%），回收率达到75%。此外，对付铁矿物嵌布特细的矿石，则采用选择性絮凝脱泥流程，可以从含铁28.26%的原矿中获得含铁品位62~65%的精矿。使用的药剂为腐植酸氨，它是由褐煤与氨水混合而成。目前对包钢含氟红矿也用浮选，选择絮凝法处理，可使精矿品位达到61%，含氟<0.5%， $K_2O + Na_2O < 0.4%$ ，已通过工业性试验〔5〕。

此外如攀钢钒钛磁精矿的含铁品位是根据高炉冶炼效果而定。如果高炉允许更高的 TiO_2 炉渣冶炼，那么提高含铁品位还有潜力。

2.3 机械强度及粉末含量

烧结矿及球团矿的机械强度直接影响高炉中的粉末数量。这些人造富矿在进入高炉料仓前，经过多次转运、碰撞摔打及本身之间的摩擦产生了许多粉末。酒钢曾经对烧结矿在运输过程中的破损作过测定。自环冷机出口通过皮带运输到高炉矿槽料面，再经矿槽料面至卸料口，电磁振动给料机出口，总落差前者为18.7米，后者为12.14米。烧结矿<5mm的由原来的2.48%增加到10.60%，而<10mm者则从12.74%增加到36.2%，说明烧结矿的机械强度还需要进一步提高。当高炉上料槽下没有设置过筛系统时这些粉末全部进入高炉。在设有槽下筛分系统时，这些粉末以返矿形式返回烧结料，造成恶性循环，使烧结矿产质量下降。

烧结矿的机械强度一般用转鼓指数或落下指数表示，球团矿的机械强度也有用转鼓指数来表示的，主要用抗压强度来表示。

烧结矿转鼓指数与高炉冶炼指标有密切的关系。例如西德克虏伯钢铁公司№7及№8高炉的生产实践说明烧结矿的机械强度与高炉产量存在着较好的线性关系〔6〕。如图2-2所示。

首钢提高烧结矿强度的工业试验表明：由于烧结矿的自然粉化率（<5mm的粉末）减少10%，高炉焦比下降5%，产量上升10%〔7〕。

人造富矿的机械强度与原料条件及生产工艺有密切的关系。特别是炼铁原料从国外进口的国家，它们可以通过配矿来达到最好的烧结矿的强度。例如，日本的川崎钢铁公司在菲律宾棉兰老岛建立了一个烧结厂，为了避免转运到日本本土千叶厂时在途中的粉碎，除

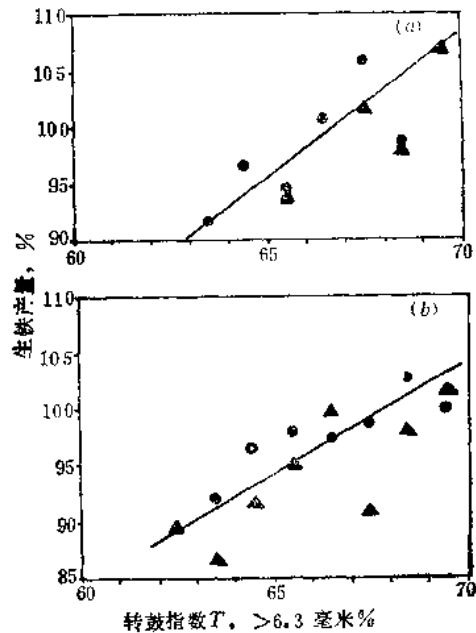


图 2-2 烧结矿机械强度与高炉产量的关系
 ●——鼓风温度 950~1000°C；▲——鼓风温度 900~950°C；(a)№7高炉；(b)№8高炉

了改进烧结作业、采取许多外部措施以减轻碰撞、跌落外，选择烧结原料的配比是获得烧结矿强度的一个重要手段。其配比为：澳大利亚纽曼山铁矿粉(newman's)25%，海姆斯莱(Hamsley) 25%，巴西列澳多西(RioDoce) 40%，加拿大卡洛湖(Carol Lake) 10%⁽²⁾。我国由于运输及供矿的困难，只能依靠自己的矿山来供给原料。因此要获得机械强度好的烧结矿必须因地制宜，针对本地铁矿粉的特点采取其他措施，以提高其强度。

2.4 还原性

为了降低焦比，应尽可能以间接还原的方式从矿石中夺取氧，这就要求入炉矿石有良好的还原性。

影响矿石还原性的主要因素是它本身的气孔率及矿物组成。铁矿物的还原首先是还原气体能进入矿物的表面。颗粒小及开口微气孔高的矿石有助于还原气进入其内部并将其反应产物扩散出来，有较好的还原性。闭气孔使还原速度下降并造成孔壁破裂的可能性。球团矿的气孔率比烧结矿高得多，因此还原速率高而有较低的孔壁破裂。

矿石的矿物组成及显微结构对其还原性有很大的影响。褐铁矿比赤铁矿还原性高，而赤铁矿又比磁铁矿的还原性高。烧结过程形成铁酸钙，其还原性很高，但铁橄榄石几乎是不还原的。矿石的显微结构对其还原性也有很大的影响。铁氧化物氧化过程由固相扩散及化学反应所形成的晶粒长大与晶桥联接结构，一般开口微气孔较多，对还原气体有较大的暴露面，这种结构都发生在高铁品位的球团矿中，所以还原性较好。另一种矿石是液相结构，它是由低熔点的液相粘结而成，其含铁矿物嵌入渣相的基体中，一般有较大闭气孔率。这种结构妨碍还原气体进入铁矿物表面，因而还原性较低。目前所研究的，以发展易还原硅铝铁酸钙(SFCA) 粘结相为主的低温烧结新工艺以及多孔球团矿，其目的是获得还原性良好的人造富矿。

矿石还原性的表示方法是以矿石试样还原到一定时间内的失氧率来表示，也有用还原

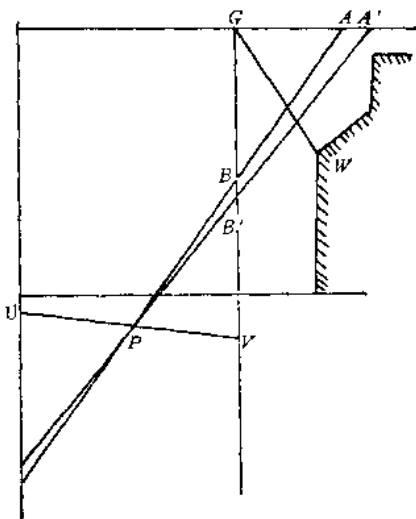


图 2-3 烧结矿还原性改善对高炉操作线的影响

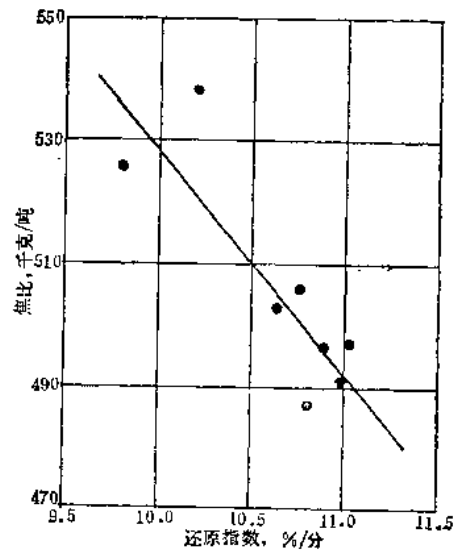


图 2-4 烧结矿还原指数的变化对高炉焦比的影响

到 Fe_2O 时的还原速率来表示, 即 $\left(\frac{dR}{dt}\right)_{t_0} \%$, 或称还原指数。烧结矿的还原性对于高炉冶炼的影响比较明显, 图2-3表示烧结矿还原性的改善, 高炉操作线的变化, 图2-4表示炉料还原指数的变化对高炉焦比的影响。

2.5 低温还原粉化性

1958年R. 林德 (Linder) 在研究烧结矿的还原强度及它的临界指标时, 发现瑞典格兰吉山 (Grangeberg) 的赤铁矿还原性比该矿山的磁铁矿好, 但有较高的还原粉化率。1963年日本八幡制钢所户畑高炉发现炉况不顺, 放风坐料次数增加, 其原因是烧结矿的 FeO 降低了2%, 还原粉化率大有上升的缘故。因此, 从1965年开始, 日本多数钢铁厂把低温还原粉化率作为评价烧结矿的质量之一。简称为RDI%。

为什么烧结矿发生低温还原粉化? 最根本的原因是烧结矿中的再生 Fe_2O_3 在低温(450~550℃)时, 由 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 还原成 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。由于前者为三方晶系六方晶格, 而后者为等轴晶系立方晶格, 在还原气的作用下发生了晶格的改变, 造成了结构的扭曲, 产生极大的内应力, 导致在机械作用下严重的碎裂。

Edstrom报导赤铁矿在温度1000℃时, CO-CO_2 混合气体还原过程中体积变化如下^[9]:

原始氧化物	赤铁矿
产物	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}_x \rightarrow \text{Fe}$
视体积	100 \rightarrow 125 \rightarrow 132 \rightarrow 127
原始氧化物	磁铁矿
视体积	100 96

磁铁矿及浮士体的晶格都是立方晶格, 在第二阶段还原时体积变化很小。最后从浮士体还原为铁伴随着体积的收缩, 因为铁的分子体积比氧化物的小。

影响低温还原粉化的因素:

(1) 矿石的种类。一般以赤铁矿为原料的烧结矿其低温还原粉化率较高, 以磁铁矿为原料的烧结矿其低温还原粉化率较低。在烧结澳大利亚矿粉时, 当其配比由45.3%增加到60.6%, 烧结矿的矿物组成中 Fe_3O_4 维持在15~20%, 而赤铁矿则由10%增加到15~20%, 见图2-5。

烧结矿中的赤铁矿有原生的, 即未还原而残留的赤铁矿, 以及再氧化的赤铁矿。特别是那种骸晶状菱形赤铁矿是造成还原初期破碎的主要原因。稻角忠弘研究各种赤铁矿生成路线时发现, 这种骸晶状菱形赤铁矿系赤铁矿在高温下变成磁铁矿, 共存于液相中的铁的氧化物, 在降温过程中经过相变和氧化很快转变而成。主要分布在气孔周围及粗粒赤铁矿周围以平行连晶的形状生成。其晶形为骸晶状, 晶体中包裹着其它矿物(玻璃相、铁酸钙和磁铁矿)。此种赤铁矿在还原时外部发生还原膨胀, 而内部的包裹矿物的还原速度较慢, 仍旧保持原状。由于两者膨胀系数的差别, 使烧结矿产生许多还原裂纹。此外这种组织存在于烧结矿气孔周围或表面附近, 在还原过程中表面赤铁矿层产生还原膨胀应力高度集中, 使得裂纹都从表面通到内部气孔。抑制此种赤铁矿矿物生成, 必须控制降温过程中由磁铁矿向赤铁矿的相变, 急冷是防止此种相变手段之一^[10], 此外使用喷洒卤化物溶液于

烧结矿表面有助于降低烧结矿的低温粉化率^[11]。

(2) 烧结矿的碱度。

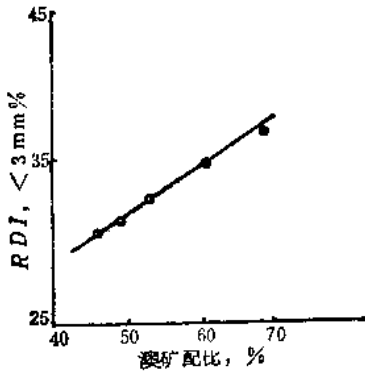


图 2-5 配加赤铁矿对 RDI 的影响

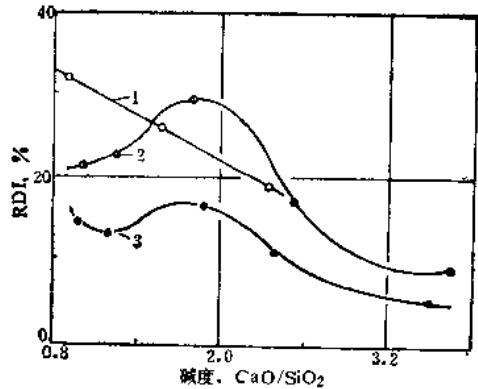


图 2-6 烧结矿碱度与 RDI % 的关系
1—澳矿；2—马钢烧结矿；3—首钢烧结矿

从图2-6可以看到烧结矿的低温还原粉化率随着碱度的上升而下降，澳矿、马钢及首钢烧结矿都是如此。其中马钢与首钢烧结矿在碱度1.7~1.8时出现峰值，这是因为在此碱度范围内由细磁精矿制成的烧结矿其显微结构很不均匀，物相组成复杂，结构应力较大所致。正如图2-7所示，它们的冷转鼓指数的峰值（即最低值）亦在该碱度范围内。

碱度提高后烧结矿低温还原粉化率下降的原因是由于再生 Fe_2O_3 含量的减少（因为物相中出现较多的铁酸钙）所致。

(3) 还原温度及还原气体成分的影响。

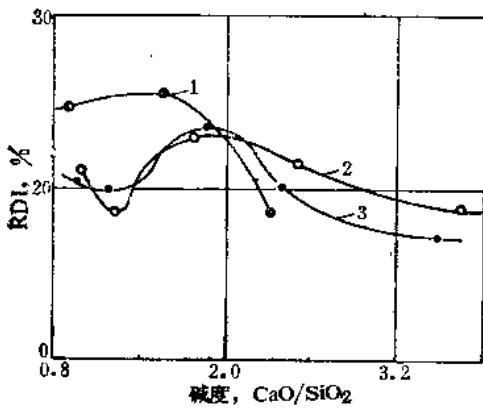


图 2-7 烧结矿的碱度与转鼓指数 (<5mm%) 的关系
1—澳矿；2—马钢烧结矿；3—首钢烧结矿

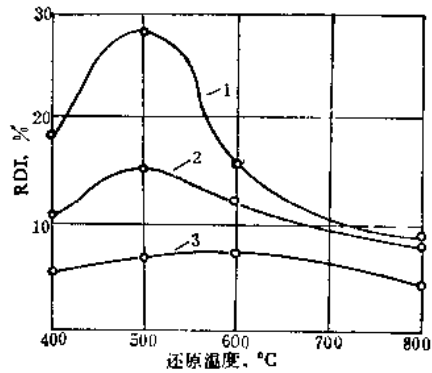


图 2-8 还原温度与 RDI % 的关系
1—R=1.71；2—R=2.46；3—R=3.28

图2-8为马鞍山精矿制成的烧结矿低温还原粉化率随还原温度的变化。在500°C左右存在着 RDI 的峰值。高于或低于此值，粉化率减轻。对于其它矿种，此峰值一般也在 450~550°C 之间。

岩相分析表明在500°C还原后的烧结矿其 $\gamma-Fe_2O_3$ 的碎裂带宽度有最高值。而600°C还原后的烧结矿中 $\gamma-Fe_2O_3$ 碎裂带宽度减少， Fe_2O 含量较多，此外还有最高的碳素沉积。图2-9(a)表明不同温度还原时以500°C时的碳素沉积量最高，此时从废气中所得的 CO_2 减