

GANGTIE YEJIN QIANYAN JISHU

李正邦 著

钢铁冶金前沿技术

冶金工业出版社

序 言

当前正值世纪之交，高新技术进入产业，引发了新的产业革命，出现了一系列令人瞩目的新动向。钢铁工业发展的关键在于采用新流程—新技术—新装备，实现制造流程的重构，促进钢厂结构优化，并以此为基础，增强市场竞争力。

本书就钢铁冶金前沿技术的九个方面做了系统的论述，其中包括：直接还原与熔融还原、直流电弧炉、炉外精炼、近终形连铸、等离子冶金、真空冶金、电渣冶金、毛坯近终成形及人工智能控制等，涉及众多科技突破点。

李正邦教授从事钢铁冶金研究近40年。本书系作者根据科研实践、文献调研撰写而成，其取材客观，内容丰富，涉及面广，并融入了作者的心得体会。鉴于作者系我国特种冶金领域的专家，因此在真空冶金、等离子冶金、炉外精炼等章内，从理论到实践及今后发展方向都有深入的见解，值得从事钢铁冶金研究与生产人员、高校冶金专业师生及相关决策人员一读。

中国工程院院士
冶全部钢铁研究总院院长 殷瑞钰
1997年8月27日

前 言

1 钢铁生产状况综述

人类历史上从铁器时代开始,钢铁就是制作兵器及生产工具的主要材料。这是由于地壳中铁的资源丰富,约占地壳总资源的5%;铁矿石中铁主要以氧化物及碳酸化合物形式存在,因铁与氧亲和力不强,较容易被还原制取,生产成本较低;铁碳合金有较优良的性能。20世纪产业革命以后,世界钢产量迅速增长,钢铁企业日益扩大,优质钢及合金钢比率增大,出现空前繁荣局面。钢产量是一个国家综合国力的标志,在第一次及第二次世界大战中人们公认“战争是钢铁生产的竞赛”。1945~1970年,世界钢铁工业仍处于高速发展阶段,平均每年增长率6.3%。

1970年以后世界钢产量增长缓慢,停滞不前,1987~1996年出现了十年徘徊,世界粗钢产量在7.5亿t左右波动,难免有“钢铁工业是夕阳工业”之说。产生这一现实的背景是:(1)工业发达国家钢铁产量已达到社会所需饱和值,日本人均钢材消费量已达680kg/a,美国已达660kg/a。(2)两次石油危机造成能源短缺,钢铁工业必须在降低能耗才能盈利,这促使钢铁工业流程、工艺进一步革新,传统全流程钢铁企业处于萎缩状态。(3)90年代世界格局发生变化,冷战时期军备竞争告一段落,出现“和平与发展”的新阶段,高新技术发展要求钢铁工业从“产量型”往“质量型”转化。(4)有色金属及合金、陶瓷材料、塑料、复合材料的发展一定程度上取代了钢材。

当前正处于从20世纪跨入21世纪的时期,在这个划时代的前夜,由于高新技术进入产业,引发了“第三次产业革命”、“第

四次浪潮”，出现了一系列令人瞩目的新动向。新材料是高新技术的基础，优质合金钢及超级合金在新材料中占相当比重。1990～1995年欧共体先进材料计划（简称EURAM）84个重点项目中，优质合金钢及铁基超级合金经费占45%。1995年世界新材料贸易中新型合金材料占贸易额的47%。以切削刀具为例，高速钢刀具在刀具总销售额中占67%，硬质合金刀具占28.5%，各类陶瓷刀具（氧化铝陶瓷、氮化硅-氧化铝陶瓷、立方氮化硼聚晶）仅占0.5%。高速钢之所以常盛不衰基于以下三点原因：（1）强韧性和可加工性比硬质合金等超硬工具高一档次；（2）高速钢冶炼工艺、冶金质量、合金化和微合金化以及凝固控制，使高速钢刀具使用性能大为提高；（3）价格低廉。因此，认为钢铁工业是“夕阳工业”，可谓“杞人忧天”！

2 钢铁工业发展关键

下个世纪钢铁工业发展的关键在于：

（1）采用新流程、新技术、新装备代替传统的全流程生产方式，达到高生产率、高效率、产品优质。

（2）节约资源、能源，降低制造成本、投资成本及劳动成本。

（3）满足国民经济各部门对钢材使用性能及质量上不断提高的要求，例如汽车用深冲钢板要求：钢中 $[C] + [P] + [S] + [O] + [N] + [H]$ 总和不大于0.01%。

（4）保护环境，根治污染，保持生态平衡。

3 钢铁冶金前沿技术

传统炼铁流程系由焦化、烧结、高炉工序组成，投资大，流程长，能耗高是其通病。特别是高炉要用焦煤，而全球炼焦煤的储量仅占煤总储量的10%，随累年消耗已告匮乏。炼焦排放大量有害气体（ CO_2 、 CO 、 NO_x 、 SO_2 ……），造成温室效应。21世纪严格的排放标准出台后，焦化工序将首先被淘汰。因而各国冶金工作者致力于开发用烟煤或天然气作还原剂，不用高炉，将铁矿

石还原成海绵铁的直接还原炼铁法。熔融还原有更深一步的发展，它同样用优质铁矿石和烟煤作原料，用还原性气体在竖炉段还原固态铁矿石成金属化率 90% 的海绵铁，海绵铁与煤块及熔剂加入熔融气化炉中，吹氧助熔，在流化床中铁-渣分离，完成终还原，产生优质煤气，故统称熔融还原。就资源及生态环境而言，熔融还原适合我国国情，预计在本世纪末下世纪初，将有一批工业规模熔融还原装置在我国投产。

20 世纪 60 年代，为提高生产率，降低电耗，缩短冶炼时间，与炉外精炼匹配，超高功率电炉问世，而比功率逐年提高，达到 $1000\text{kV}\cdot\text{A/t}$ 以上水平。大功率交流电弧炉的电弧稳定性差，对电网冲击大，产生强烈的电压闪烁，对环境造成噪音污染。为克服上述弊端，随着 70 年代大功率可控硅日趋完善，直流电弧炉迅速发展，目前全世界有直流电弧炉 82 台之多。

20 世纪 60 年代多种炉外精炼法投入生产，到现在炉外精炼仍然稳步增长，锐势不减，其主要背景是：(1) 国际钢材市场的竞争。炉外精炼是提高质量，增加产量，降低成本的有效手段，甚至超高功率电炉与炉外精炼匹配其吨钢成本也低于转炉。(2) 超高功率电炉及超高功率直流电弧炉快速发展。没有炉外精炼，超高功率电炉无法发挥优势，在炉外精炼配合下，超高功率电炉冶炼周期缩短到 $37\sim 60\text{min}$ 。(3) 世界制钢生产中连铸比日益增长，已达 72.7%，炉外精炼在炼钢炉与连铸之间起衔接与缓冲作用，特别是连铸对钢水成分、温度和纯净度要求极高，离开炉外精炼很难满足。(4) 科学技术发展对钢材质量要求日益严格，如超纯铁素体不锈钢 00Cr26Mo1 要求 $[\text{C}] + [\text{N}] \leq 0.015\%$ ，石油管线用钢 $[\text{N}] \leq 0.005\%$ ，轴承钢 $[\text{O}] \leq 0.001\%$ ，必须依靠炉外精炼来实现。

连铸技术的发展和扩大应用引发了钢铁工业又一次重大革新，它显著地提高了钢材生产效率、质量与效益。高效连铸及近终形连铸对现代高效炼钢与高速连轧起衔接作用，是短流程的核心，使工业流程更紧凑，速度趋向临界值，导致产品专业化、系

列化、优化及高附加值。

等离子作为热源具有温度高 ($5000\sim 30000^{\circ}\text{C}$)、能量高度集中、工作气体离子化状态、离子流速度快 ($100\sim 500\text{m/s}$) 等特点,用于冶金有潜在优势,近年成功用于连铸中间包加热。

真空冶金是生产超级合金的重要手段,长期以来真空条件下元素的挥发及坩埚反应影响工艺的推广,近年来在凝壳熔炼、悬浮熔炼、冷坩埚熔炼及真空电弧双电极重熔等方面都有新突破。

电渣冶金在特种冶金中无论产量及品种均居首位,电渣重熔在 21 世纪仍然在以下五个方面具有优势:

(1) 电渣重熔在优质大型及中型铸件生产中,将处于垄断地位。

(2) 在优质工具钢、模具钢、不锈钢耐热钢、超高强钢、管坯及冷轧轧辊生产中占绝对优势。

(3) 在超级合金(高温合金、耐蚀合金、精密合金、电热合金)生产中电渣重熔与真空冶金处竞争势态,但在 80 年代末电渣重熔在产量上已超过真空电弧重熔。据美国国家材料咨询委员会分析,因受过去技术鉴定所限制,沿袭真空电弧重熔的均系老牌号合金,而新材料方面电渣占绝对优势。

(4) 在有色金属生产方面,电渣重熔处于方兴未艾的阶段,预计将是一个广阔的领域。

(5) 电渣重熔空心锭和电渣熔铸异形件具有独到之处,发展前景良好。

(6) 电渣技术与冶金流程相结合成为工序的一个环节,如连铸中间包加热、Osprey 钢水精炼。

近终成形是金属毛坯制备的新技术,其特点是:

(1) 一次成形,不再进行热加工,大量减少切削加工,达到提高金属利用率、节约工时、缩短生产周期的效果。

(2) 近终成形将金属合成、精炼、凝固、成形集中于一道工序,是物性转变最佳短流程,能有效控制污染,使金属性能显著提高。

近终成形包括微电弧成形、电渣转铸成形、喷射沉积成形、金属泥成形、电磁铸造成形及自蔓延成形等。目前领域边界尚不分明，但毫无疑问它将是金属毛坯制备的新方向。

人工智能控制即以神经网络的人工智能为基础进行控制，能像人脑那样做出决定。与人相似，人工智能需先学会如何进行控制，软件神经原 (softwar neurons) 网络，学习如何分析工作条件和做出决定，借助网络判断各种输入信息。人工智能用于电弧炉熔炼，效果显著。

4 感谢

《钢铁冶金前沿技术》一书系作者根据科研实践、文献调研撰写而成，在撰写过程中得到李文采院士、邵象华院士、王崇愚院士的指导和鼓励，在此一并感谢。本书以作者给博士生讲课的讲义为基础改写而成，考虑到教材客观性，故资料性内容较多，评述不足。

本书的出版特别要感谢我院院长殷瑞钰院士的支持、指导，并作序。

冶金工业部钢铁研究总院

李正邦

1997年5月

目 录

1	直接还原和熔融还原	(1)
1.1	直接还原	(1)
1.2	熔融还原	(8)
	参考文献	(12)
2	直流电弧炉	(13)
2.1	直流电弧炉发展态势	(13)
2.2	直流电弧炉设备结构特点	(20)
2.3	直流电弧特性	(28)
2.4	直流电弧炉的优点与不足	(31)
2.5	直流电弧炉新发展	(36)
2.6	发展我国直流电弧炉的设想	(37)
	参考文献	(40)
3	炉外精炼	(42)
3.1	前言	(42)
3.2	炉外精炼的历史与现况	(43)
3.3	炉外精炼的理论基础	(43)
3.4	炉外精炼方法	(56)
3.5	炉外精炼技术发展的趋势	(83)
	参考文献	(84)
4	近终形连铸	(86)
4.1	CSP 技术	(87)
4.2	ISP 技术	(90)
4.3	薄钢带连铸	(94)
	参考文献	(96)
5	等离子冶金	(97)

5.1	等离子的理论研究	(97)
5.2	等离子冶金发展状况	(101)
5.3	等离子技术的新发展	(115)
5.4	等离子冶金应用中存在问题及解决途径	(123)
5.5	等离子冶金未来的展望	(129)
	参考文献	(132)
6	真空冶金	(135)
6.1	真空冶金发展历程	(135)
6.2	真空冶金过程特点	(137)
6.3	真空感应熔炼	(141)
6.4	真空电弧重熔	(149)
6.5	电子束熔炼	(158)
6.6	真空冶金的新进展	(168)
6.7	真空冶金未来展望	(175)
	参考文献	(175)
7	电渣冶金	(177)
7.1	品种及产品规格的发展	(180)
7.2	提高技术经济指标	(197)
7.3	提高电渣钢质量	(204)
7.4	电渣冶金未来的展望	(211)
	参考文献	(212)
8	毛坯生产新技术——近终成形	(213)
8.1	微电弧熔炼成形	(214)
8.2	电渣精密熔铸	(217)
8.3	喷射沉积成形	(231)
8.4	金属泥成形	(234)
8.5	电磁铸造	(235)
8.6	自蔓延成形	(236)
8.7	近终成形的展望	(240)
	参考文献	(241)

9	计算机集成系统与人工智能控制	(243)
9.1	概况.....	(243)
9.2	钢铁企业计算机集成制造系统 CIMS	(244)
9.3	人工智能控制.....	(249)
9.4	发展与展望.....	(257)
	参考文献	(258)

1 直接还原和熔融还原

通常钢铁企业的炼铁系由焦化、烧结、高炉工序组成，投资大、流程长、能耗高是其通病。特别是要用焦炭，全世界炼焦煤仅占煤总储量的 10% 左右，随累年消耗已告匮乏！据联合国环保组织调查，传统的钢铁工业是严重的污染源，所排放的有害气体（ CO_2 、 CO 、 NO_x 、 SO_2 ）造成使全球变暖，海洋扩大的“温室效应”。进入 21 世纪，国际上更严格的排放标准将出台，焦化的污染势必威胁高炉的生存！

近年来，人们致力于开发用烟煤或天然气作还原剂，不用焦炭，不用庞大的高炉，将铁矿石在固态还原成海绵铁（Sponge Iron），这种炼铁方法称为直接还原，所得产品称为直接还原铁 DRI（Direct Reduction Iron）。直接还原是在固态温度下进行，渣铁不能分离。DRI 中含有脉石（ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量 5%~8%），直接用于电炉将使电炉炼钢渣量增大，电耗增加。

在全球天然气资源有限，优质铁矿石与天然气资源往往不相邻，迫使人们进一步探索用铁矿石和普通烟煤作原料，经流化床直接生产铁水，使铁与渣分离，统称熔融还原（Smelting Reduction）。

采用直接还原或熔融还原生产的铁，供超高功率电炉炼钢，经二次精炼、连铸连轧，形成最佳短流程，对于 15~30 万 t 特钢厂是具有无限生命力的。

1.1 直接还原^[1~3]

直接还原工业化试验起始于 20 世纪 50 年代，出现工艺方法很多，专利令人眼花缭乱，但成功的极少，处于徘徊状态。到 60 年代后天然气大量开采，1968 年美国 Midrex 法成功，直接还原才

得到迅速发展,1975 年全世界 DRI 海绵铁年产量 269 万 t,1985 年达到 1116 万 t;1995 年增至 3075 万 t,开工率 66%,比 1994 年增长 12.31%,20 年增长 10.4 倍,在冶金史上实属罕见。促成这种发展的直接原因是,客观需要及技术进步。

1.1.1 直接还原发展的背景

直接还原生产海绵铁发展的客观原因有:

(1) 世界多数国家严重缺乏焦煤,其中不少国家有优质丰富的铁矿以及天然气和烟煤资源,它们因地制宜地借助本国资源发展直接还原工厂,如委内瑞拉、印度尼西亚、墨西哥等国丰富天然气及优质铁矿,主要发展气基竖炉,以 1995 年统计为准产量达 2829 万 t/a,占直接还原铁总产量 92%。而南非、印度、新西兰有丰富的烟煤及优质铁矿石,直接还原以煤基回转窑法为主,虽然产量仅为 246 万 t/a,但从近年发展趋势看,大规模的煤基回转窑法生产的直接还原厂正在纷纷建立,印度格尔德斯塔(Goldstar)公司建立了生产能力 22 万 t/a 的直接还原厂,采用 Codir 法;南非伊斯科尔(Iscor)公司建立了生产能力 723 万 t/a 的直接还原厂,采用 SL/RN 法;新西兰格伦布鲁克(Glenbrook)厂建立了生产能力 90 万 t/a 的直接还原厂,采用 SL/RN 法。

(2) 随着电炉短流程生产线的发展,电炉钢产量日益增长,预计到 1997 年世界钢产量 7.8 亿 t,氧气转炉钢占 57%,电炉钢占 30%,平炉钢占 13%。近年来世界制钢生产中连铸比迅速增长,已占 72.7%,钢铁联合企业自产优质废钢减少,发展中国家由于废钢量不足,势必发展直接还原,发达国家涂层钢用量日增,使拆除返回中有害杂质急增(据美国材料咨询局统计,美国近 25 年内废钢中锡、锌增加两倍,废钢中铜增加 20%),必须采用掺入 30%~50% 的 DRI 海绵铁来稀释。

(3) 近十年来钢铁工业受到高分子材料及硅酸盐材料的竞争,世界钢的总产有停滞不前的趋势,自 1988 年达到 7.83 亿 t 后,始终未有突破。但以质量、性能及品种产品取胜的小型特殊钢厂如

雨后春笋，蓬勃发展。电炉钢选择原料，自然更多优择直接还原铁，如不锈钢厂首先选择低碳粒铁或煤基回转窑生产的低碳海绵铁作原料。为发展精品，提高附加值，直接还原低碳海绵铁用于直接生产电工纯铁、铁氧体及工业铁料。

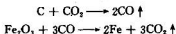
(4) 世界焦煤储量仅占煤储量 10%，随着逐年大量开采，储量锐减，价格上涨。国外大部分焦炉已接近寿终，特别焦化、烧结及高炉炼铁排放 CO_2 、 SO_2 、 CO 、 HF 量的限制日益严格，迫使企业选择新的生产流程。

(5) 直接还原技术上的新突破，促使其发展。多年困扰回转窑的结圈问题及烟气余热利用等问题最近获得解决。竖炉废热处理技术的提高，对天然气硫含量要求更宽松。

鉴于以上原因 DRI 得到钢铁企业的重新认识和重视。

1.1.2 煤基回转窑直接还原

煤基回转窑直接还原流程见图 1-1。用优质铁矿石（天然块或人造球团矿），用煤作还原剂，煤与反应产物 CO_2 反应形成 CO ，在回转窑内反应温度 1100°C 下，矿石 (Fe_2O_3) 呈固态，保持原形， CO 还原 Fe_2O_3 ，使矿石内部失氧，出现许多微孔，故称海绵铁，其反应式为：



煤基回转窑直接还原工厂由配料仓、还原窑、冷却筒、产品分筛、电除尘几个部分组成。铁矿石、煤、熔剂（白云石或石灰石）经配料仓计量加入回转窑尾，在 1100°C 温度下，物料旋转并向窑头转移，经 8~10h 完成还原反应，再送往冷却筒冷却至 100°C 以下，最后经筛分磁选分离，去除剩余碳和残渣，得到纯净的 DRI。DRI 产品 3~25mm 以块状形式使用，小于 3mm 的粉压成 $\phi 8\sim 16\text{mm}$ 的球状料或 $60\text{mm}\times 40\text{mm}\times 20\text{mm}$ 压块使用。DRI 产品含铁量 90% 以上，金属化率 92% 以上，S、P、Sn、Sb、As 极低，是电炉理想原料。

直接还原铁内含有一定数量的脉石，因直接还原是固态反应，

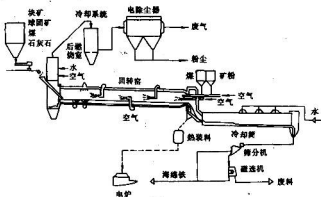


图 1-1 煤基回转窑直接还原流程图

不能使铁与渣分离，对 DRI 产品脉石含量有一定限制，对酸性脉石 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) 应不大于 5%，对碱性脉石 ($\text{MgO} + \text{CO}$) 应不大于 7% 为宜，否则使电炉炼钢渣量增加，电耗加大。

此外，煤基直接还原流程副产物有：<5mm 铁矿粉、煤粉，<3mm 废渣、环保除尘粉及返回碳。每生产 1tDRI，有副产物 200kg。需要综合利用，用于烧结、制砖、制水泥，否则浪费资源，造成环境污染。

煤基直接还原流程成熟的工艺是德国的 SL/RN 法、英国的 DRC 法、法国的 Codir 法。最新的有印度鲁奇冶金化学工业公司提出的鲁奇法。

1.1.3 气基竖炉直接还原

气基 Midrex 法工艺流程见图 1-2，由供料系统、还原竖炉、烟气处理、天然气重整炉组成。铁矿石经计量后从炉顶布入炉内。经过预热，在还原区与工艺燃料天然气反应，反应约 6h 即完成冶炼，再由冷空气直接冷至 100℃ 以下，最后产品由炉底排出。冶炼产生

废气仍含 $\text{CO} + \text{H}_2$ 约 70%，通过重整炉，加入补充天然气裂化处理，使气体中 $\text{H}_2 + \text{CO}$ 浓度上升到 90%~95%，温度为 900℃，重

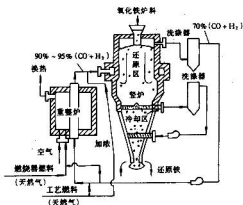
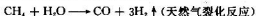


图 1-2 气基 Midrex 法工艺流程图

新进入竖炉循环使用。其反应式为：



气基法的能耗低，效率高，质量好，易操作，作业温度低，产品无需再分选。

无疑气基法生产 DRI 对于天然气丰富地区仍具有生命力。

1.1.4 DRI 法主要指标及技术经济优越性

煤基 DRI 法和气基 DRI 法主要指标见表 1-1。

采用煤基和气基 DRI 炼钢技术经济上的优越性：

(1) 钢中有害元素 Sn、Sb、As、Bi 含量大幅度降低，提高了钢材断裂韧性、热加工塑性、冷加工可塑性。

表 1-1 煤基 DRI 和气基 DRI 指标

项 目	煤基 DRI	气基 DRI
单炉生产能力/ (万 t/a)	3~5	15~16
窑利用系数/ (t/ (m ³ · d))	0.3~0.7	9~12
燃 料	煤 800~1000kg/t	天然气 400m ³ /t
熔 剂/ (kg/t)	约 60	
电 耗/ (kW · h/t)	约 130	约 100
热 能/ (GJ/t)	14	11
TFe/%	>89	>93
金属化率/%	>92	>93.4
C 含量/%	0.1~0.25	0.77~1.07
S 含量/%	<0.025	<0.003

(2) 钢中 S、P 含量降低, 提高钢材冲击韧性, 降低脆性转变点温度。

(3) 缩短电炉精炼期, 提高 Ni、Mo 等有价值元素收得率。

(4) 降低钢中 [H] 及 [N] 含量。

(5) 用 DRI 炼优质合金钢热变形能力良好, 适合于作深冲钢板。

(6) 用煤基回转窑法生产 DRI 可不经冷却筒直接热装电炉, 可提高电炉生产率与降低吨钢电耗。

1.1.5 我国发展直接还原的展望

预计 2000 年我国粗钢产量将达 12000 万 t, 其中电炉钢占 25%, 为 3000 万 t。据冶金部规化院推算, 届时全国各行业废钢总消耗量约为 5000 万 t, 其中炼钢消耗约 4000 万 t, 废钢平衡情况见表 1-2。到达 2000 年, 炼钢废钢约缺 1000 万 t/a, 按废钢到岸价格为 170 美元/t 计算, 若全依靠进口一年要消耗外汇 1.7 亿美元, 即相当一个 50 万 t 特钢厂全部固定资产投资, 显然是炼钢企业所难以承受的, 无疑发展 DRI 直接还原铁代替优质废钢的进

口是刻不容缓的任务。

表 1-2 推算 2000 年我国废钢平衡表

序号	项 目	总量/万 t	炼钢消耗/万 t
(1)	总消耗量	5400	4000
(2)	废钢来源: 企业自产	1600	1600
	社会回收	2300	1360
	拆船	55	33
	废钢供应累计	3955	2993
(3)	废钢缺额	1445	1007

根据国家资源勘查委员会统计,我国煤炭蓄量为 782200Mt,可开发水能资为 380GW,石油储量为 7875Mt。我国虽然石油及天然气资源丰富,但人均占有率仍很低,供需仍不平衡。天然气及石油是石化工业主要原料,特别民用严重不足,因此作者认为发展煤基直接还原铁更符合我国资源条件。

为保证炼钢用 DRI 的 $TFe > 90\%$, 则要求磁铁矿 Fe_3O_4 的 $TFe > 68.33\%$, 赤铁矿 Fe_2O_3 的 $TFe > 66.14\%$ 。考虑脉石的影响,采用铁矿石中 $SiO_2 + Al_2O_3$ 含量与 TFe 的比来判断矿石的可用性:

< 5 为优质 DRI 用矿

$$\frac{SiO_2 + Al_2O_3}{TFe} \times 100\% \quad 5 \sim 9 \text{ 为 DRI 可用矿}$$

> 9 为不宜用于 DRI, 仅可用于高炉的矿

直接还原 DRI 过程不能脱磷,故要求矿石含 $P \leq 0.027\%$, DRI 过程可采用脱硫剂脱硫,因此对矿石中以 FeS 形式存在的硫仅要求 $S < 1.0\%$ 即可。在煤基回转窑中对非铁元素 Pb 、 Zn 、 Sn 、 As 可部分去除,而对 Ni 、 Cr 、 Mo 、 Cu 则不能去除,要进入钢中,因此限定非铁元素总量应小于 0.1% 。

国内本钢南芬矿、辽阳棉花堡矿、山东金岭矿、太钢尖山矿、陕西大南沟矿、安徽霍邱矿及海南岛矿均符合 DRI 要求,有一定资源条件。