

铁矿石的直接还原

中国科学技术情报研究所 編譯

冶金工业出版社

铁矿石的直接还原

中国科学技术情报研究所 編譯

冶金工业出版社出版 (北京市灯市口甲45号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第093号

冶金工业出版社印刷厂印 新华书店发行

—— * ——
1960年1月第一版

1960年1月北京第一次印刷

印数2,612册

开本850 × 1168 • 1/32 • 70,000字 • 印张3 $\frac{2}{32}$

—— * ——
统一书号 15062 • 2022 定价0.42元

本书为铁矿石直接还原方面的译文集，共包括八篇有代表性的文章，可供从事直接炼铁及矿石炼钢的研究工作者及大专学校冶金专业教学人员参考。各篇文章的排列顺序，基本上是按照原文发表的先后（这也间接反映了发展的趋势），并适当照顾各篇之间的联系。

参加本书译校工作的为中国科技情报研究所阎庆甲、左锡熊、趙可夫等同志。

目 录

铁矿石在迴轉爐中的不熔化还原.....	(1)
“旋渦煉鋼法”——用铁矿石直接煉鋼.....	(24)
不用高爐的冶煉.....	(28)
美国的铁矿石直接还原法.....	(31)
氢-铁法	(48)
R—N直接还原法.....	(62)
新的直接还原法.....	(74)
铁矿石的直接还原.....	(80)

鐵矿石在迴轉爐中的不熔化还原

导 言

供炼鋼用的海绵鉄如今已在几家鋼鉄厂中用大家所熟知的 Sieurin-Högan's 法和 Wiberg-Söderfors 法进行了工业規模的生产。这些方法目前主要是在瑞典加以使用,这主要是由于用来代替越来越贵的木炭生鉄去生产優質鋼,尤其是用于酸性炼鋼法的低磷低硫原料的需要日益增长的緣故。在瑞典对海绵鉄感兴趣的另一原因是越来越难于获得供炼鋼电爐使用的含镍、铬和銅等合金元素的大量废鋼。

最近,对于利用海绵鉄来达到普遍降低鋼(包括普通商品鋼)的生产成本的可能性,給予了較大的注意。海绵鉄法比高爐法节省热量,并且在某些情况下能够使用比一般高爐焦炭便宜的还原剂。

本文中提出近年来瑞典 Domnarfvef 鋼鉄厂在迴轉爐中用还原法进行实验的結果的簡要报告。此种研究工作的主要目的不在于制取供優質鋼生产用的特純产品,而在于探寻一种便宜的还原方法。

过去在进行鉄矿石还原时常常考虑到迴轉爐,并常常用来作試驗。美国矿务局在这方面已进行了好多年的有价值的研究工作。該局发明了一种新方法,即将鉄矿石与細粒煤混合,并在混合料从迴轉爐中通过时利用从插入迴轉爐卸料端的煤气燃烧咀中出来的煤气的燃烧予以加热。所发表的实验結果是值得注意的,但似乎尚未在工业生产上加以应用。安那昆达銅矿公司則在工业規模上使用一种类似的方法来把黄鉄矿灰渣部分地还原成为鉄粉,后者以后用来置換銅。挪威的 AS 二氧化鈦公司則利用迴轉爐部分地还原一种富鈦的酸性矿石,但主要是回收鈦。

瑞典 Avesta 鋼鐵廠在1928到1935年間多次地進行了在迴轉爐中還原鐵礦石的試驗工作。所需熱量係由通過設在爐內的兩個環形金屬電極引入的電流供給，而使電流從位於電極之間的爐料中通過。此法尚未應用於工業生產，雖然 Avesta 工廠有時用迴轉爐來生產鐵粉（參閱圖4）。

各種迴轉爐還原法所以只能取得有限的成功，主要是由於難於避免爐內礦石料在還原時期的粘結成球，或在最熱帶的爐壁上形成環形結瘤；後者似乎是更難避免的。在礦石充分迅速而完全地還原所需的溫度和還原時礦石趨向於發生粘結（這通常因燃料所含灰份而增強）的溫度之間的邊緣溫度範圍是很狹窄的。

如果熱量是由爐內位於礦石料上面的燃料的燃燒所供給的話，那末，爐膛內的溫度和礦石料上方的爐壁上的溫度必須保持比在礦石料內部的溫度高得多，以保證有充分快速的熱傳遞；這就意味着此法可實際應用的溫度範圍更加縮小了。生產量越高，此種困難越顯著，而許多試驗都因為在滿意的技術條件下的最高生產量太低而失敗。

在 Avesta 工廠，由於用通過礦石爐料內部的電流加熱，以避免爐膛過熱，就避免了爐壁上環形結瘤的生成。但是在這種情況下，在得到滿意生產結果所必需的通過爐料的電流密度下，難於避免爐料的粘結成球。尤其是難於避免在電極與爐料接觸地點的局部過熱和因而產生電極上熔結層的形成。

Domnarfvet 法的原理

Domnarfvet 鋼鐵廠所發展的方法和其使用迴轉爐的方法不同之點，主要在於供熱的方法。和其方法一樣，爐料係由礦石和細粒焦或煤的混合物組成。焦炭不但作為還原劑，而且也作為操作過程所需的燃料，因此必須循環地使用大量過剩的燃料，而且很大一部分必須是很細的粒度。此法的一個重要的特點，是供焦炭和還原時所生一氧化碳燃燒所需的空氣係由插入爐

內的中央管引入。由此使空气通过配置在管子上的許多小风口直接吹向还原带爐料的表面上。Domnarfvet 工厂的試驗裝置簡图示于图 1。

这种燃烧方法最重要的优点是热量都集中在爐料表面或紧靠表面之处。在处于燃烧带的那部分表面上形成极高的温度，但因爐料的表面是在迴轉爐內連續地运动，表面的过热层很快就与下面的爐料混合起来，因此获得迅速的热传递和均一的温度。此加热方法使得能保持爐料温度和爐壁温度一样高，并且能大大地消除爐壁結瘤的危险。

但是，預防环形結瘤的生成不仅依靠爐內的温度条件，避免在还原带的任何地点有过量的氧气也是很重要的。一些細粒的并多少还原了的矿石，将不可避免地气相中涡旋或粘附于砖縫內或爐壁上其它不平整处。如果这一部分鉄和游离氧接触，就立即直接燃烧，而促使温度严重地局部增高和爐壁上形成粘結层。而在新方法中，当空气直接吹向爐料时，燃烧进行得非常快而完全，因此在燃烧带外面的爐气中没有氧气。

可能会以为当向爐料表面吹游离氧时，难于得到产品充分高的还原度，但是事实并不是那样，而是能够达到很完全的还原。

这种通入空气的方法使得能够在爐內实际上完全地燃烧一氧化碳，而使燃料的全部热量都能利用于还原——这对于操作过程的经济而言是十分重要的。

試驗裝置

此法的最早的一些初步試驗是在 1939 年于 Avesta 鋼鉄厂的小型爐子上进行的。虽然这些試驗都成功了，却并未繼續下去，但是到 1950 年，在 Domnarfvet 鋼鉄厂恢复試驗，目前此法在该厂有了进一步的发展，并已設立了試驗裝置（參閱图 1 及 2）。

爐子是連續装入矿石和燃料的混合料，后者应有大量的过

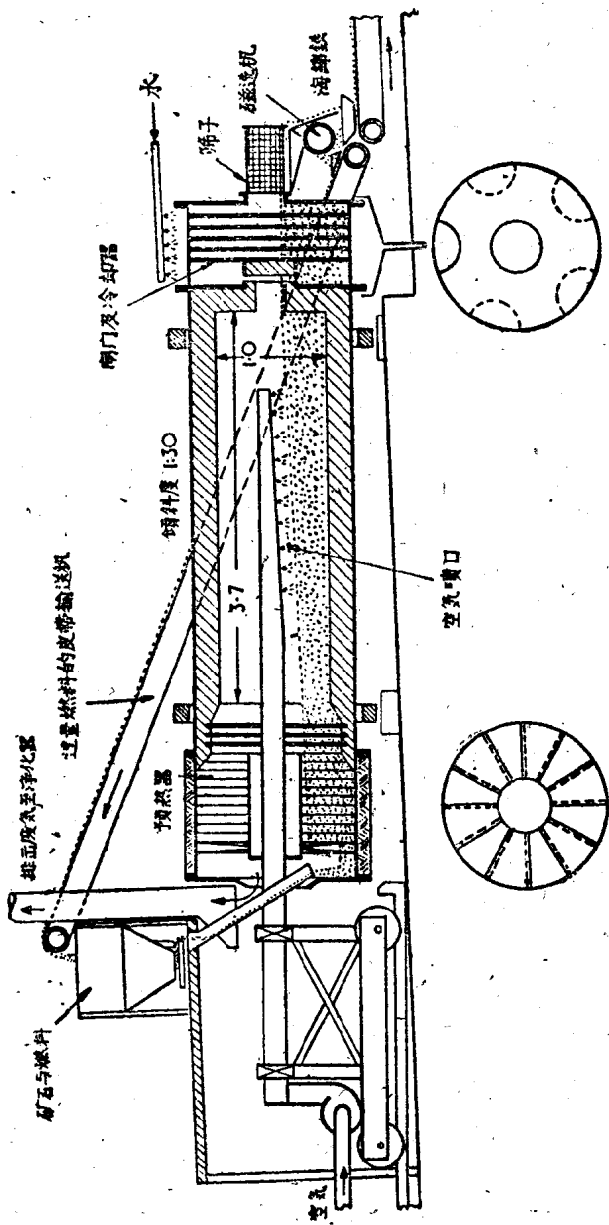


图 1 Domnarvet 钢铁厂烟筒筒图 (尺寸以米计)

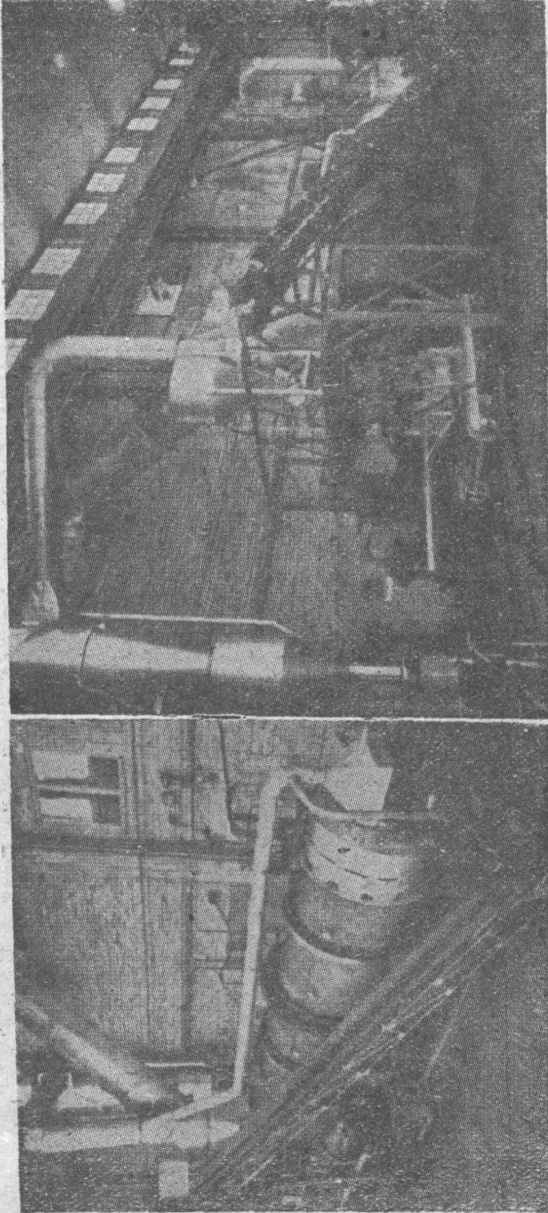


图 2 Donnafvet 细转锭的两个底图

剩。最常使用的矿石是細碎的燒結矿，用焦屑作还原剂。

混合料通过一个换热器加入到还原室，混合料在换热器內預热，排出的反应气体則在其中进行有效的冷却。换热器系由許多具有大的扇形开口的橫隔板組成，这些隔板安放得使气体从每一个隔板通过时必须改变方向，靠爐膛最近的三块隔板是用耐热鋼鑄成的。为了使物料在换热器中得到滿意的料面高度，把靠装料口最近的一个隔板制成鏟輪的形状。

鼓风管是結構中的一个主要的零件。它从装料口插入并安装在爐外的車架上，这使得可以把风管取出来进行检查。风管上有許多孔口，空气流通过这些孔口吹向爐料的表面。风管上孔口的配置法使得还原带的任何部分都不会有剩余氧气存在。

已处理好的物料通过水冷閘門从爐內卸出，該閘門同时防止气体从同一通路逸出。

在卸料端物料首先通过一个篩子，而分成大于或小于3毫米左右的两部分。粗粒物料全为海绵鉄而不再需要分选。由海绵鉄和过剩燃料組成的細粒物料則通过磁选机选出細粒的海绵鉄；其余的焦炭用皮带式运输机回运到装料端。

通常含有大量焦粉的燃烧废气在旋风除尘器內淨化；这可分离出大部分的粉尘，并能加以回用。

爐膛的内径仅1000毫米，长度为3700毫米。爐膛用普通的粘土耐火砖砌衬；內衬的强度証明是令人滿意的。爐子的傾斜度为3.6%，旋轉速度約为4轉/分。

一般操作結果

矿 石

許多种矿石已經在进行不同的預先处理的情况下作了試驗。粒度极小的矿石，至少在原来的形态下，不适用于此法，因为最細粒級（粒度約在0.05毫米以下的）会由于鼓风及旋轉的关系而

在爐膛內产生渦旋作用，因而即使在燃燒帶外面的爐氣不含有过量氧气的情况下也会粘附在爐壁上。但是，也能够还原未燒結过的精矿，虽然在把最細粒級篩除后会得到較好的結果。

用加入前破碎到 15 毫米以下的普通燒結矿能得到最好的結果。但是矿石的粒度和还原性不是影响操作过程的唯一因素。已发现采用球形团矿比采用燒結盘生产的燒結矿，較难获得滿意的还原度，虽然在實驗室試驗中前者具有較好的还原性。一个原因是主要含 Fe_2O_3 的球形团矿在还原时具有比普通燒結矿为低的强度，而燒結矿至少在硬燒的形态（应已发现是最好的形态）下是氧化得很不完全的。加之，由球形团矿粉碎而得到的矿粉細小得多，因为造球时所用精矿粒度比其它燒結法所用的为小。

矿石的条件对操作进程还有进一步的影响。如果矿石是重的，并且是圓形或圓片状的，則爐料将成为較密实的，于是焦屑将被挤开，矿石与还原剂之間的必要的紧密接触就不可能达到。从这方面來說，具有不規則形状的疏松顆粒比由燒結盘生产的較輕的燒結矿是好得多的。

对一些块矿也做了試驗，多半都得到了好的結果。矿石的适用性主要决定于它的成份。虽然磁鉄矿和赤鉄矿都难于还原，但通常应优先采用磁鉄矿，由于它在还原时不破碎得那么厉害。矿石的适用性也决定于脉石的成份，有些脉石太容易熔化，以至于难于或不能进行还原。

块矿在有些情况下比球形团矿得到較好的还原結果，这似乎是奇怪的，因为矿石的比重通常較高。但是块矿的顆粒往往比球形团矿更扁平一些，这是一个优点，并且它不像球形团矿那样破碎成很細的矿粉，破碎的数量也較少。

貧块矿也能还原为高度还原的海綿鉄。在还原后进行破碎和选別常常能得到很純的产品，因此当把难于磨碎和选別的矿石拿来还原时，可以取得下列的有利之点：可在还原以后再行破碎和选別，而避免了矿石的預先处理。

燃烧与还原剂

在大多数的試驗中是用焦屑作还原剂，其粒度一般应在 2 毫米以下。焦炭粒度不太大这一点是很重要的，因为焦炭同矿石以及空气中的氧气的反应能力是随着粒度的增大而迅速降低。因此，如果焦炭粒度太大，还原程度将很低，并且燃烧不佳，且产生过量的氧，而会有粘結的危险。另一方面，如果焦炭粒度过小，焦炭的消耗量就增高，因而废气中 CO 含量过大和烟尘損失較大。小于 0.1 毫米的部分主要随着从爐子中排出的废气进入旋风除尘器中。当确定工艺过程时选定适当粒度的焦炭是很重要的，并且作为在这方面进行調整的一种手段，最好是采用两种不同粒度的焦炭。

本文作者在最近的試驗中所用的細粒焦屑，是把来自高爐焦炭篩分裝置的碎焦篩除掉 2 毫米以下的焦粉后得到的。但是此法不拟加以推荐，因为这一部分将含有最大部分的杂质。应当把全部焦屑破碎成所需要的粒度，但須产生最少量的焦粉。在輓式破碎机中破碎可能得到适宜的粒度分布。

焦屑的成份能大大地影响操作进程。在大多数焦炭中，所含灰分在大約 1275°C 以下不会开始熔化，但在有氧化鉄存在的情况下，則在低得多的溫度下会引起熔化或燒結現象。然而在正常的还原溫度 (1050—1100°C) 下很少直接由于焦炭質量而产生燒結現象。爐內最热带具有 1100°C 的溫度，即使对于难还原矿石來說通常都是足够的。

如果焦炭的粒度分布情况和燃烧用空气的分布情况調整得适当的話，在爐膛內实际上完全地燃烧一氧化碳是无任何困难的。但是在这些試驗中已証明把操作过程調整成使废气含有 2—3% 未燃烧的一氧化碳是有利的，二氧化碳的含量在正常情況下是 28~30%，尽管气体燃烧得比較完全，还原把废气的溫度保持得低到 250°C 左右。

从还原带末端刚刚在最后一个空气喷出口后面的地方取出的煤气样，通常含約 20% 的 CO_2 和 10—15% 的 CO 。虽然这种成份的气体对海绵铁有氧化作用，但仍然得到了高达 95% 甚至更高的还原度；这是在爐料中含有碳时能够在爐膛內存在有氧化气氛的情况下进行还原的証明。

除焦屑以外的其它燃料能有效地用于此法中；例如，与焦屑粒度相同的无烟煤屑已得到良好的結果。无烟煤屑的灰分比一般焦屑具有稍高的熔点。煤粉也試驗过了，但难于在此法中滿意地利用蒸馏煤气的热值。在这种情况下最好在用于海绵铁爐中以前先在特殊爐子內对这种燃料进行低温焦化，并且对还原过程中的蒸馏产物加以收集。这样就得到一种很好的还原剂。此种低温焦炭不需要很大的强度，但其在还原爐中破碎成細粉的傾向必須不太大。在焦化过程中可以便利地使用在旋风除尘器中收集到的粉尘。

油或其它較輕的碳氢化合物也可以少量加入，来促进还原作用，特别是如果已經发现固体燃料的反应能力因其粒度太大而太低时，油最好从卸料端給入。

氧气能够部分地代替空气，并获得很好的結果，但是用氧气或富氧空气連續地进行处理，其有利点似乎不能弥补成本的增加。然而已經发现氧气的使用对于在必要时迅速提高温度而言是很有用的。

生产能力

用含 Fe60% 的烧结矿作爐料时的正常生产率約为 3 吨铁/昼夜。由于装料容积約为 1 米³，这就相当于 3 吨/米³/昼夜。按爐子整个容积來說生产率为 1 吨铁/米³/昼夜。

矿石通过爐子的还原室的正常时间为 5—6 小时；处于完全还原温度的时间約为其一半。此时间对 15 毫米以上的矿粒來說是不够的。值得注意的是較大的矿粒一般和較小的矿粒一样地还

原，这是由于在处理过程中矿石交替地同还原气氛和氧化气氛相接触所致。

焦炭不像矿石那样重，因此在鼓风带部分地从矿石吹开，并集中在接近于炉壁的一层中。一般说来这不产生什么困难，但是炉料的不均匀度自然不应很大。因此空气的供给必须保持低于一定的数值，而这将会影响最高生产率。

焦炭的循环使用

与矿石一并加入的焦炭的总量通常约为实际消耗量的二倍，因此循环使用的焦炭的重量和所加入的新焦的重量大致相同。但是炉内焦炭的过剩量比按照矿石与焦炭装入量之间的比例算出的过剩量少得多，因为焦炭从中央卸料孔通过的速度比既较重而又大得多的矿石快得多。

此法在经济上的一个重要情况是焦炭灰分不是全部随回用焦一同返回炉内。连续分析表明即使在达到了连续操作之后，回用焦的灰分含量只比新焦的多百分之几，并且其灰分含量常常是相当固定的。回用焦的还原能力并不减低，因此完全能够在此法中加以利用。

根据分析，焦炭灰分大部随同废气一起离开炉子。其粒度非常细小，甚至不能留存于旋风除尘器内，而大部分随烟道排气消失了。一部分的焦炭灰分粘附在较细粒的海绵铁（ < 3 毫米）上，但是粗粒海绵铁上经常不粘附。粘附到海绵铁上的数量决定于焦屑和脉石的成份以及还原温度。大概粘附到海绵铁上的焦炭灰分不超过10%，收集在旋风除尘器中的占5%，其余都消失在烟道中了。在用比较低的还原温度进行的试验中发现，即使细粒的海绵铁也完全不含焦炭灰分。如果使用一种燃料，其灰分的熔点高于焦屑灰分的熔点，可能就不会有灰分作为杂质存在于海绵铁中。

废气中的粉尘有很大一部分是装炉的焦炭。这种焦炭粉尘大

部沉积在除尘器中。废气中的粉尘含量首先取决于所用焦炭的粒度，如果空气的供给量增大，也会增加一些。在最近的试验阶段，进行了准确的称量，结果发现除尘器粉尘中焦炭的含量约为焦炭总耗量的15~20%以上。此数量在用含细粉较少的焦屑时，无疑会大大地减小。但在另一方面，焦炭大概必须含一定数量的细粉以使易于在炉内燃烧。

在使用普通烧结矿时，旋风除尘器中的粉尘除焦粉外，还含有约15%的氧化铁以及百分之几的焦炭灰分。铁的含量为装入精矿量的1—1.5%。在使用球形团矿时铁的损失为此数的三倍，这是由于在此情况下原精矿的粒度小得多。

在某些试验中把旋风除尘器中的粉尘加入到炉料中，使其在操作过程中循环使用。这似乎没有什么缺点，相反的，炉内细粉状物料的增加似乎对操作有利。但是，还不可能完全以这种方式利用除尘器的粉尘，这种焦粉应当加入到炉子内部的炉料中（或许应当从卸料端装进去）。

燃料耗量

根据空气供给量和废气分析，已经能够精确地计算出真正用于炉内而和空气及矿石中的氧起反应的焦炭的数量。装入的焦炭的剩余碳含量是分布于海绵铁、旋风除尘器粉尘和废气之间。曾对除尘器粉尘量较低时的高生产水平（每天生产2,800公斤铁）和低生产水平（每天生产2,200公斤铁）分别计算出碳的分布情况。其结果如下：

	碳的分布	
	高生产率时	低生产率时
燃烧的碳	392	432
废气(主要是除尘器粉尘)中的碳	96	72
海绵铁中的碳	12	12
总计	500	516
相当的焦炭量(按焦炭含C 80%计)	625	645

如果在工业规模的爐子内进行还原操作，可能由于热損失較小而把每吨鉄所用的燃烧的碳量減少約50公斤。应当也可能无任何困难地把爐尘損失降低到上述数量的一半。如果具备了这些条件，含C 80%的焦屑的耗量将仅約 500 公斤/吨鉄。

这样的焦炭耗量的可能性，可由附录中給出的关于此法的理論計算予以証明。

海綿鉄的成份

已經达到的还原度为85—95%，視矿石的还原性而定。如上述所述，粗粒海綿鉄和細粒海綿鉄的还原度是一样高的。

海綿鉄的含碳量变化很大，平均約 1%。这些碳通常多半是和产品机械地混合在一起的，而在对海綿鉄細磨和磁选的情况下，碳含量能減少到百分之零点儿。

海綿鉄的磷含量一般比矿石的磷含量稍高。这是由于焦炭灰分中的磷为海綿鉄所吸收。但是磷含量只增加0.010—0.015%，如果随后在碱性爐中炼鋼，是无关紧要的。

另一方面，还原时从焦炭中吸收的硫是很多的，这是一个缺点。由海綿鉄所吸收的硫的数量是不同的，并且首先决定于矿石的硫含量。在使用其脉石完全由硅酸或硅酸盐組成的矿石时，粗粒海綿鉄所吸收的硫通常約为 2.5 公斤/吨鉄，細粒（3毫米以下）的則稍微高些。这表示焦炭硫分的60%左右轉到海綿鉄中，其余的40%随废气排走了。如果处理的是含石灰的矿石，則海綿鉄的硫含量将更高。

曾试图用加入粒状石灰石、生石灰或白云石到爐料中去的办法来防止海綿鉄对硫的吸收。但是，所加入的物料妨碍了操作过程，因为它和焦炭中的灰分及矿石中的脉石起反应，而生成熔点較低的硅酸盐，后者在必需的还原溫度下形成爐壁上的环形結瘤。这些試驗目前仍在进行中。

在还原后脫硫可能是比較有利的。海綿鉄可以在熔化前的固

态下脱硫，但在这种情况下必须在处理前细破碎。在 Aresta 钢铁厂所已经试验过的一种方法中，是把海绵铁和石灰以及一些焦屑一并在迴轉爐中加热到 800—850°C。因为必须要防止氧化性气体的产生，所以应当采用电力加热。在处理后用磁选法把海绵铁同含硫的石灰分离开来。

用此法对海绵铁进行脱硫已在实验爐中试验过，在该爐内能够有效地进行入爐物料和出爐物料之间的热交换。由于这种型式的爐子也能用来对其它粒状或粉状物料进行加热处理，有关它的结构和所得结果的情况要在这里介绍一下。

这是一个换热式迴轉爐，其原理及其主要尺寸如图 3 所示。换热器用横隔板分成许多小隔间，这些隔间利用周边上的开口交替地沿周边成对连接起来。在这样得到的两个系统中，一个是供装料用，而另一个是供卸料用的；爐料由于料面高度的差别而流入轉动着的爐子中，并从其中流回来。

反应室是利用沿爐壳围绕的电阻丝以电力加热。爐料是由一个螺旋給料机給入到换热器的第一个隔室内，給料速度可通过螺旋給料机加以调整。

在此爐子内，磨碎成 <1.5 毫米并含 Fe90% 的海绵铁，是和 3% 的石灰及 6% 的焦炭混合后于 840°C 下加以处理。在此情况下硫含量从 0.24% 降到 0.03%；生产率为 7.5 公斤海绵铁/小时。耗电量为 1.43 度。卸出物料的温度为 190°C。

这些试验中的能量消耗可区分如下：

	千卡/小时	瓦小时/吨海绵铁
卸出物料的热含量	179	23
反应热	17	3
热损失(差額)	1034	160
总计	1230	191

在这样小的实验爐内的热损失，如按每吨海绵铁计算，自然是不成比例地高的。对每小时能处理 1 吨海绵铁的较大爐子而