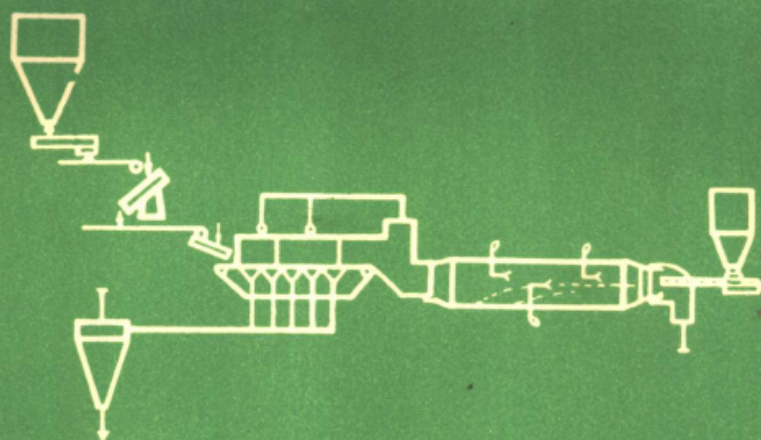


冶金参考资料(2)

国外回转窑还原



中国科学技术情报研究所重庆分所

1974年5月

国外回转窑还原

编辑者 中国科学技术情报研究所重庆分所

出版者 中国科学技术情报研究所重庆分所
重庆市市中区胜利路91号

印刷者 宝鸡市人民印刷厂

1974年5月出版

毛主席语录

深挖洞，广积粮，不称霸。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

要采用先进技术，必须发挥我国人民的聪明才智，大搞科学实验。外国一切好的经验，好的技术，都要吸收过来，为我所用。学习外国必须同独创精神相结合。

目 录

用固体还原剂生产海绵铁——SL/RN方法	(1)
生产回转窑的各种测定 (铁矿砂用回转窑预还原的研究——I)	(6)
回转窑内炉料移动及温度分布 (铁矿砂用回转窑预还原的研究——I)	(12)
回转窑内的还原过程和碳素还原剂的行为 (铁矿砂用回转窑预还原的研究——I) ...	(19)
回转窑内的造粒、再氧化及异常现象 (铁矿砂用回转窑预还原的研究——IV)	(26)
还原窑的热平衡 (铁矿砂用回转窑预还原的研究——V)	(37)
关于还原处理回转窑的改良法 (铁矿砂用回转窑预还原的研究——VI)	(45)
回转窑中铁矿还原试验 (克虏伯海绵铁法)	(56)
半还原海绵铁的脱硫试验	(67)
海绵铁的电炉炼钢	(70)
直接还原	(77)
电炉炼铁法	(85)
氧化铁球团矿的脉动还原	(89)

用固体还原剂生产海绵铁——SL/RN方法

SERBENT H. JANKE W.

引言

在近几年中,铁矿石直接还原的重要性已有重大的增长。其已生产的和正在建设的工厂生产能力大约是每年500万吨铁,而1960年的相应数字则是35万吨/年。虽然与世界生铁产量相比,前一数字仅为生铁的1%,但较之1960年来说,它却标志着—个实质性的增长。其发展原因是非常明显的。

就作为传统炼钢过程的一个中间过程——生铁生产来说,不希望的成份也同时被还原并被金属所吸收,而且必须在以后处理生铁时再除掉以获得钢。

此外,许多国家缺乏甚至没有高炉炼铁所必需的高质量焦煤,但许多这样的国家却具有富铁矿床和非焦煤田,而这些资源可用以建立其本国的钢铁工业。在许多工业国家,海绵铁可用作废钢代用品来改善钢的质量,并具有稳定废钢价格的作用。

还应该进一步考虑到,在很长时期内焦炭价格上涨的趋势还将在世界范围内继续,而同时电费的降低却是可以期待的。

由于很早对这一形势的认识,几个公司在十多年以前就开始了广泛的研究工作,这些工作导致了用固体还原剂在回转窑中生产海绵铁方法的产生〔1—5〕。

鲁奇化学和冶金技术公司(西德)多年来从磁化焙烧、威尔兹等金属挥发法中取得了回转窑方法的经验。

在SL/RN方法中铁矿石与固体含碳还原剂以及必要时还有脱硫物料一起连续给入倾斜的回转窑中。炉料一般与废气逆流通过回转窑移动并被加热至还原温度以还原氧化铁矿石。

从回转窑卸出的炉料被直接间接水冷后,用筛分和磁选分离成海绵铁、返回碳和尾矿。最终产品是金属化的、不发火的低硫海绵铁。

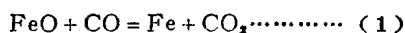
SL/RN法的特性

回转窑操作

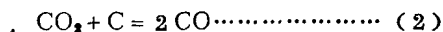
与其他冶金过程类似,控制给料的物理和化学的一致性生产海绵铁的回转窑最佳操作的先决条件。

输入回转窑的矿/石还原剂混合物首先经过干燥和预热带,然后进入还原带,在还原带中炉料进一步提高温度,氧化铁就逐步分解出氧而获得金属铁。

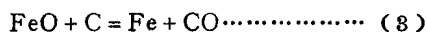
用沿回转窑长度取气体样并测定其CO/CO₂比的方法可以观察到,在还原带的料层内是还原气氛包围着氧化铁,而在同一个截面的炉料上部则是氧化气氛〔6〕。炉料间发生的反应可以两个分过程的互作用来描述,即氧化铁分解及被CO还原:



以及CO₂被过剩C还原,因此CO再用于(1)式的还原:



作为两个分过程的和的联合反应相当于高温下的直接还原:



决定还原能力的总还原速度和两个分反应的动力,一方面是由碳和CO/CO₂气体混合物间(Boudouard)以及另一方面是由碳和氧化铁间(Baur-Glassner)的平衡状态所确定的。

上面所提到的两种气相在回转窑中的必要的分离,由在规定的生成压力下离开炉料并在料层表面燃烧的部分生成的CO所保证。所提及的反应序列是在过剩的固体还原剂条件下实现的,这些还原剂除了较小的损失外,可以全部回收。此外,还原剂的过剩具有对炉料的松散作用,因而防止了单个的矿石颗粒的烧结。

为了保持两个气相间的相互反应最小,增加料层内的还原气氛,减少了回转窑出料端的断面积。这导致了回转窑装料量的增加,改善了回转窑的热稳定性

并使作业条件和效果保持稳定。

由于炉料的拥挤,床层厚度从回转窑装料端到出料端逐步增大,这符合过程的两个基本要求。在装料端,床层较薄,物料被迅速干燥和加热至还原温度。床层厚度逐步增大,随后的还原条件就逐步改善。

回转窑温度由沿炉长度装设的风机通过一些管子向窑内自由空间直至回转窑中心线吹入一定体积的空气来控制。这样,造成从炉料逸出的一氧化碳和必要时所加入的高挥发性煤的挥发物的燃烧。上述风管在必要时也可设计成煤气或油的喷咀。这些风管或喷咀要这样调整,使得炉料尽可能快地加热至还原温度,而且接着在窑身长度的大部分区域内保持均匀的高温。为达到充分高的还原速度,炉料温度应当尽可能地高。在一般情况下,由于炉料组分的软化行为,它限于1100℃左右。

由于插入回转窑壁的热电偶既不能提供炉料温度也不能提供气体温度的精确数值,回转窑的温度测量是困难的。它仅能提供例如回转窑某一点的截面的温度是否正常的指示。而且,凸出于回转窑内的“热井”被气流过热,并被通过的细粒物料所粘着、覆盖,使测量误差加大。因此,通过单位回转窑长度所给入的空气量来控制操作条件要更方便一些。

除了上述的控制給料速度外,其他的重要操作参数是:海绵铁的金属化程度(金属铁的总铁的比率),回转窑排料速度(要定时记录)、排出产品中过燃料含量、废气温度和组分、窑速、窑驱动机的输入功率以及抽风条件等等。抽风条件最好在排料端调节得稍为正压,这样做将防止空气的进入以及出料端海绵铁的再氧化。

在除化学条件外,窑的生产能力还取决于过程所需要的热的传递速度。这个问题将在另一文中着重讨论。我们知道,回转窑可被视为一种效率低的热交换器。这特别是指炉料干燥和加热至还原温度的低温条件而言。

单位时间窑的給料愈多,为保证必须的热速传递度窑的废气温度则必须愈高。因此,废气温度在600℃以下时,经济上较为可行的产量是达不到的。因此,在特定的情况下,回转窑废气中所含热量的利用可能是有益的。当然,这是一个必须综合考虑燃料费用和废气热利用的可能性来决定的问题。

原矿石

一般来说,回转窑不应给入很细的矿石。随着矿石粒度的减小,由于它的相对大的比表面积单个的矿石颗粒过热的危险性就会增加,因之,它就会与其他矿粒或炉料中别的细粒组分特别是燃料中的灰分烧

结。由于回转窑中堆积物的生成,可能导致操作故障。矿石中的大量细粒矿粉可以另外导致与废气同时排出回转窑的粉尘体积增加,并影响铁的回收率。但是,在某些特殊情况下,如对铁钛矿精矿和砂铁矿来说,由于它们的化学组分和颗粒形状而具有较小的烧结趋向,因此,虽然其粒度小至0.1毫米也是可以入炉的,只要保持规定的操作温度即可〔7〕。

因此,在前一种情况下,粒度范围为8~20毫米的筛分块矿或球团矿对本过程是合适的。不消说,矿石粒度上限的选择是取决于矿石的还原性能的。

在处理精矿或磨细的矿石时,可使之制团并在回转窑前的链篦式焙烧机上用回转窑废气中所含的部分热使之硬化。在这两种情况下,由于生球的干燥和硬化不在窑内进行,这就意味着额外的窑容积变为空闲。

在规定的情况下,将球团硬化工序与还原系统分开可能是可取的。这种作法尤其是对那些由一个制团厂供给几台回转窑球团矿的大工厂是可取的。

这样,采取通常球团矿所需要的硬化温度就不必要了,因为通常的球团矿必须经受送往高炉的长距离运输而不产生显著的磨损粉尘和碎球。对回转窑过程来说,球团矿需要的破碎强度因原料类型不同而仅为30Kp/球团左右。在大多情况下,这一破碎强度值在硬化温度约为1000℃时就已经能够达到。对球团还原时磨损性质的改善还可以向制团的矿料内加入细磨的海绵铁粉来达到〔8〕。给入回转窑的球团最适当的粒度范围是6~15毫米。

如果有粉矿可以利用,也可考虑在给入回转窑以前使炉料经传统的抽风烧结处理。对这种烧结矿质量的要求不如高炉所要求的烧结矿那样严格。在这种情况下,只要控制烧结条件使烧结矿通过对辊破碎机后所获得的主要部分是5~20毫米就可以了,这种粒级的烧结矿通常是作为热底料用品。

还原剂

SL/RN法可以使用从褐煤、低温焦炭到焦粉以至无烟煤的多种固体燃料。各种还原剂的配合使过程具有大的灵活性,这对一种冶金方法来说是不寻常的。它可以采用不适于生产高炉冶金焦的各种烟煤。

依据挥发组分含量不同,还原剂可部分地与矿石一起给入窑内或从出料端喷入。在采用高挥发分煤时,那将是碳化和还原的联合过程,其中碳化的气体用于加热,而较活泼的低温焦则保证充分的还原。挥发分实际上不参于还原过程〔6〕。过程中添加高挥发分煤的方法和速度取决于煤的碳化行为、挥发分含量以及其粒度分析和窑的大小。

假若只有低挥发分还原剂可用时,则根据需要或

者从窑的排料端或者通过空气管给入重油或天然气使窑加热。各种固体还原剂的可利用性的限制与灰分的软化行为的关系较小，主要与其组成有关。在还原达到浮氏体相时，可能形成低熔点共熔物。

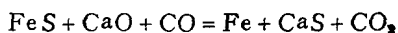
一般说来，还原剂的大部分灰分可用筛分和磁选方法从窑产品中分离出来。假若在长期生产中，燃料颗粒中的灰分的矿物学分布导致返回的过剩燃料中的灰分富集，则这种循环有时必须停止，而这种灰分富集的燃料则必须用于其他目的。

去 硫

为使海绵铁适于炼钢，它应当具有较低的硫含量。一般地说，进入过程中硫的主要部分是来自还原剂。

含硫0.03%以下的低硫海绵铁，可以在添加5%（以矿石为100%）的石灰石或白云石的条件下达到。去硫剂应尽可能是非晶质的，因为晶体形态将导致颗粒的分解。极细的去硫剂特别是小于0.2毫米的部分应尽可能的少。虽然由于细颗粒的大的比表面积能充分地吸收硫，但这些“硫富集”的颗粒具有一种优先与细海绵铁颗粒烧结的趋向并粘着于粗粒的海绵铁上。因此，一般地说细粒海绵铁较之粗粒有着较高的硫含量，这一点对下一步处理可能是重要的。所用去硫剂的粒度范围是由回转窑产品的制备方法即筛分和磁选方法的需要所确定的。一般地说，去硫剂的粒度不应超过8毫米，通常它取决于所回收的过剩燃料的粒度和从这一部分燃料中分离出较多的灰分的必要性。

如沿回转窑的轴取样，就可观察到硫是首先从还原剂传递给海绵铁的。仅仅在去硫剂已锻烧并变得有效后，其反应机理才受炉料内部占优势的CO/CO₂比例所控制。其完整的过程可用下面的总反应式描述：



如果处理的含硫矿石的脉石主要是碱性的，生产低硫海绵铁将会引起某些问题。

假如使用主要是碱性灰分的褐煤，在多数情况下，为调整海绵铁的低含硫量不必要添加去硫剂。这时，由于褐煤总硫含量中的大部分硫从一开始就是在灰分中呈无机化合形态存在，因此它不被海绵带走。

海绵铁的性质

由回转窑还原产出的海绵铁尽管有着较大的多孔结构，但它是不“发火”的。然而，当露天贮藏时，应当防止水分的直接影响。这时实际上可不产生再氧化。海绵铁贮存和处理问题将在另一文中详细讨论。在此期间，从加拿大至日本船运大量海绵铁已经证明，海绵铁可以看成是没有运输困难的适于世界市场

的大宗产品。

至于涉及到海绵铁的处理问题，将在另一文中叙述其广泛的实际经验。

工业生产的工厂

到现在为止，鲁奇化学和冶金技术公司已建设了有9个回转窑的五座工厂，其总矿石处理量为220万吨/年。正在巴西建设第6个工厂。有关工厂规模、矿石和产品性质以及下一步处理方法示于表中。

表中示出了从原料到生产目的都不相同的一些工厂对此种方法的应用情况，有关工厂配置的一些文献可以参考〔9、10〕。因此，下面仅讨论这些工厂开工初期所发生的一些困难及现在的工艺条件。

南非海威德 (Highveld) 钢和钼公司

对此工厂鲁奇公司仅供给回转窑，技术过程由该公司自己负责。1972年该厂将4个窑增为5个，生产已达设计能力。

南朝鲜仁川钢铁公司

1970年底，回转窑工厂达到了额定的生产能力。由于原料的改变和价格形势的变化，在回转窑中部分还原块矿和球团矿在电炉中最终还原以生产生铁的这一原用方法的技术经济合理性越来越成问题了。因此，在1971上半年电炉和回转窑大修之后没有再生产。现正考虑将此厂改改用另一种矿石生产高金属化海绵铁直接炼钢。

新西兰新西兰钢公司

这个厂的主要问题是由于生球给料及用褐煤加热。

干球团强度必须在7公斤/球团以上，这时球团才能经受运输和在回转窑中干燥而不造成过量的磨碎粉尘。假若球团强度低于此极限值，生成的粉尘将强烈增加而降低矿石回收率。因此，合适的生产条件的调整要求对原料性质进行稳定控制。这一要求起初未能得到满足，只是在获得了某些实际经验后，才对原料实行了有效地控制。

另一个讨厌的因素是回转窑所用的加热方法。原来曾打算从排料端吹进干燥（水分10%）的褐煤，用其挥发组分加热而用其固定碳还原。

但是，事实证明燃烧条件实际上是不能控制的，以致于常常产生炉结和空气管过早损坏。现在的操作方式，则仅从出料端吹一小部分煤而主要部分是和生球一起给入回转窑。这样，该厂在防止炉结生成方面

几乎是完全成功的，同时空气管的寿命也有了显著的延长。该厂现在以75%设计能力生产，按照计划，今年将达到设计生产能力。

加拿大鹰桥镍矿公司

与新西兰钢公司相似，最初的困难首先是原料的控制和加热方法。一个不利的因素是这个工厂必须与一些别的也采用新工艺的工厂联合生产，因此这些厂子遇到困难时也影响直接还原厂的生产。这些困难现已克服了大部分。现在该厂正以75%设计能力进行生产。它已能达到指定的大于95%的金属化程度和少于0.025%的硫含量。

澳大利亚西方钛公司

该工厂将预氧化的钛铁矿精矿所含的铁直接还原，进一步浸出而生产人造金红石。这个厂当初仅为试验而设计的，现在已稳定生产几个月了。该厂一个重要特点是细磨的物料不经过预烧结而直接给料。

巴西南美Acos Finos Piratini公司

该厂正在建设中，块矿用高挥发分煤金属化。设计规定该厂向本公司的一小型优质钢厂供料。

在谈到上述各厂开工阶段所发生的问题时，应当了解，这些厂都是这一类型的第一批工厂，又几乎全部是在同一时间内建立的。因此，没有类似规模、原料基础和任务的工厂的经验可资利用。因此，开工期间只是涉及到长期性问题的解决，这是一个新方法在工业上采用时所不可避免的。

如上所述，除了机械上的问题以外，下述困难是必须克服的：

1. 机械、设备以及操作条件与真实的原料性质的适应性问题，原料性质往往是和以前的实验工作中所取样品不同的；
2. 原料条件的稳定和控制在；
3. 以尽可能地避免局部过热为目的的回转窑加热系统的改进。

已生产和建设中的SL/RN法工厂

公 司 名	Highveld钢 和钒公司(南非)	仁川铁厂 (南朝鲜)	新西兰钢公司 (新西兰)	鹰桥镍矿公司 (加拿大)	西方钛公司 (澳大利亚)	Acos Finos Piratini (巴西)
工厂规模	5座窑, 4×60米	1座窑, 4×60米 链篦式焙烧机 (14平方米)	1座窑, 4×75米	1座窑, 5×50米 链篦式焙烧机 (49平方米)	1座窑, 2.4×30米	1座窑, 3.6×50米
矿石处理量 (吨/年)	1,250,000	230,000	190,000	425,000	50 吨/日*	95,000
原 料	块 矿	块矿和球团	砂铁精矿 生球团	磁黄铁矿焙烧 球团	钛铁矿精矿石 团球	块 矿
矿 石	55%Fe 1.6%V ₂ O ₅	平均60%Fe	60.0%Fe 8%TiO ₂	66.5%Fe 1%Ni		67%Fe
煤	高挥发分煤	无 烟 煤	硬 褐 煤	高挥发分煤	烟 煤	高挥发分煤
产 品 及 加工方法	40%预还原矿石 电炉炼铁	75%预还原矿石 电炉炼铁	高金属化球团 电炉炼钢	高金属化球团 卖给钢厂	高金属化精矿 浸出以制造 人造金红石	高金属化矿石 电炉炼钢

* 原文不清

参 考 文 献

1. Babcock, D.E., The R-N direct iron process Regional technical meetings 1958 American Iron & Steel Inst., New York,

page 2—49

2. Moklebust, O., The R-N rotary kiln process for reduction of iron ore Pre-print

59 B 70. Soc. Min. Eng. of AIME annual Meeting, San Francisco, February 15—19, 1959

3. Smith, R. P.: R-N process 55th annual Meeting American Inst. Chem. Eng. Dec. 1962

4. Sibakin, J. G.: Development of the SL Direct reduction process Blast Furnace & Steel Plant 50 (1962) page 977—989

5. Meyer, K. Heitmann, G. Janke, W.: SL/RN Process for production of metallized burden J. Metals, June 1966, page 748—752

6. Serbent, H. Krainer, H.: Congres international sur la production et l'utilisation des minerails reduits Evian (France), May 1967, page 1—12

7. Hockin, H. W.: The development of direct reductionleach process for ilmenite^a up-grading Soc. Min. Eng. of AIME, February 1972

8. Meyer, K.: Die Herstellung und Eigenschaften gangartarmer Eisenerzpellets unter Zusatz von Eisenschwamm Thesis—Techn. Universität, Aachen November 23, 1968

9. Janke, W.: Reduktion von Eisenerzen mit festen Reduktionsmitteln im Drehrohrföfen XVII. Berg-u. Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 1966.

10. Janke, W.: The SL/RN Process—Development and Experience International Symposium New Delhi, February 1972

[张若平译自 « SEMINAR ON DIRECT REDUCTION OF IRON ORE; TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS » Bucharest (Romania), 18—23 Sept, 1972; STEEL/Scm. Dir. Red/I—14, 1~9]

生产回转窑的各种测定

(铁矿砂回转窑预还原的研究——I)

荒川秀雄

伊与田 隆藏

绪 言

近来随着高炉的大型化和操作方法的改进与发展,逐渐加强了整个工厂设备的性能。但是在另一方面,由于世界上矿石及燃料供应的紧张,以及对品位的要求逐渐提高,故长期以来成为争论中心的直接制铁法的兴趣,至今仍然未见减少。过去多使用回转窑作为直接炼铁法的还原炉(1~5),曾有不少关于这方面的文献报导。但内容大多为操作结果和概论,很少有涉及到深入内部的构造或者分析的研究。回转窑系回转着的倾斜圆筒,由上端加入炉料,由下端加热并通过窑内而完成热处理工作,看来似乎是很单纯的炉子,但是如果观察内部结构,就会发现意外的复杂现象。几年来,我们进行过的所谓半还原海绵铁法,系将电炉与回转窑组合,以铁矿砂为主要原料,先在窑内半还原处理后,再由电炉冶炼成为熔融生铁。此次使用了窑身长46米,外径2.3米的生产规模的试验回转窑,并在窑上装设了若干的测定设备,进行了综合性的分析试验。通过数次的测定研究,得到了结论,以下分为几次报告,主要以铁矿砂的半还原海绵铁的处理为中心,依各项目分别进行分析讨论。

半还原海绵铁法

本方法系以铁矿砂为单纯冶炼对象而发展出来的一种预处理法。铁矿砂主要为钛铁矿,其中含有大量的钛,在日本只用电炉来冶炼这种矿石,而在世界上亦作为特殊矿石加以冶炼。由于铁矿砂粒度很细,炉内反应气体逸出时易产生喷射等现象,以致炉况不稳定,每吨生铁耗电达2500度。近来电炉大型化(10000千伏安以上)之后,炉况不稳定仍然存在,故有必要将铁矿砂进行预处理。由此,本公司从1956年以来,采用了56公尺长的回转窑和14100千伏安的大型电炉

相配合的生产生铁的炼铁方法。用回转窑生产半还原海绵铁的炼铁法,具有许多优点,今举其中主要看法如下。

(1) 高价的电力和电炉用焦,可用价廉的回转窑还原剂和重油来代替。适用于回转窑的还原碳的种类很多,由焦炭以至原煤都适用。电炉熔炼还原度为60%的海绵铁时,单位耗电量下降约800度。

(2) 因在窑内作了适当的造粒,故电炉产生的气体很易逸出,另外减少了电炉的还原负担,故产生的气体亦减少。其结果是炉况稳定,抑制了烟尘飞扬。原料实收率提高4%。

(3) 电炉生产每吨生铁的电耗自然下降,而且由于使用海绵铁,电极电流密度可适当提高,电力负荷可能增加30%,就整体而言,生产能力则提高60%。由此可见,回转窑处理时对提高还原度有利,但在实际冶炼时,海绵铁的还原度提高到一定程度时,电炉的熔化速度和渗碳速度之间就产生不平衡,产品生铁的含碳量下降,这对熔铁处理或对以后的炼铁炼钢都不利,故海绵铁的还原度不超过某种程度为宜。采用半还原海绵铁的原因就在于此。

制造半还原海绵铁,具有提高还原度和造粒的两个目的,在窑内处理时,还原度保持在一定程度,以窑的本身来说,则有另外的好处,首先为处理能力。图1为回转窑的内容积和处理能力的关系,依还原方式示出其概略(6—7)。窑的处理能力随原料的品位、特性、处理方式不同而有影响,只讨论这种关系是不恰当的,还原铁矿砂时,在同一容积的窑内,成品还原度和处理能力并非成直线关系。还原度在某种程度以内,处理能力急剧增加。以图中虚线所示的水泥回转窑为例作参考(8),它与处理还原铁矿砂时很相似。生产还原度60%的海绵铁所需的热量为530千卡/公斤海绵铁,与水泥熟料平均烧成热量(560千卡/公斤熟料)极为相近,这一点意义很深。如果希望在回转窑内达到完全还原,则在高还原区内需要高浓度的

一氧化碳气氛，故需配入过量的碳，结果在排除的成品中含有残余的碳。再则在高还原区的还原速度下降，处理时间延长。由于这些原因，处理能力就下降，而且还会导致热效率的减低。

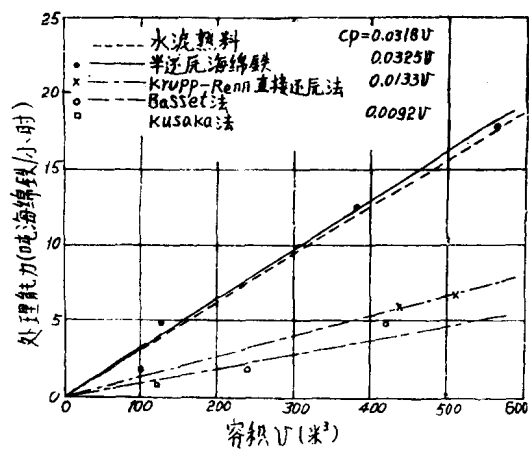


图1 回转窑的容积与处理能力的关系

其次是造粒，造粒本身不需要热，与还原度无关。因此在还原窑中，半还原处理所需的热量较小，因而可以增大窑的处理能力，其价值也相应的增大。图2所示为选择实际生产的铁矿砂海绵铁粒度，求出在自由充填的条件下，海绵铁粒度和透气性的关系。与成品海绵铁的粒度分布，是有一定的差别的，若由实物的透气性来估量造粒效果，则现在生产中未经筛分的海绵铁成品的粒度相当于0.8毫米。粒度有差别的海绵铁粒子，由于含有微粒分子，很明显地妨害了它的透气性。但在前所举出的粒度范围内，其透气性比铁矿砂改善了约40倍。为了现场管理方便，将海绵铁粒度简单定为+8毫米，并以重量%作为管理指标，正常作业时，所得到的+8毫米的粒子达70%以上。若将这样粒度的海绵铁装入电炉，在操作上不会发生什么障碍。

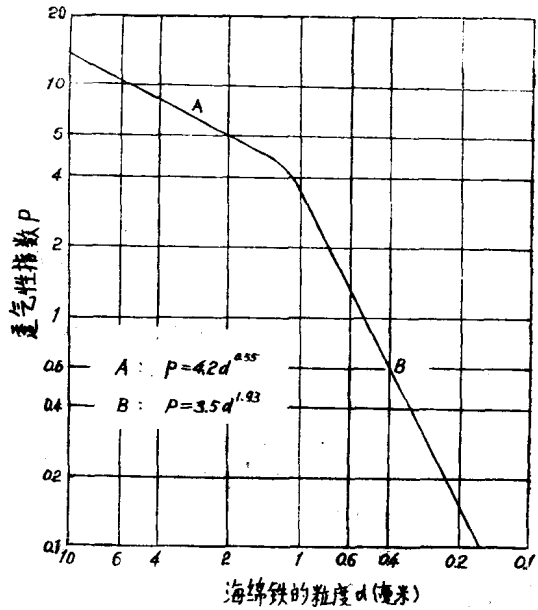


图2 在自由填充的条件下，海绵铁粒度与透气性的关系

测定用回转窑的数据

测定用窑为圆筒型，这是回转窑的基本型式，因此在分析上很方便。图3为试验用窑设备的概略图，表1示出本窑的主要规格。原料为铁矿砂和还原用的还原剂，分别贮于20米³的料仓内，用默扎克式输送机计量器连续称量各自的重量，由皮带给料机送到皮带运输机上混合。混合后的炉料，送上倾斜的皮带运输机，经过集尘室上的溜槽给入窑的上端。炉料借窑的回转移动和由排料端喷出燃烧的火焰对流受到加热、还原、造粒处理并从排料端排出，经过烟罩内的炉篦的溜槽而投入冷却器。冷却器系水平回转圆筒，内壁装有螺旋叶片，海绵铁被连续输送同时被设在内部的洒水冷却。冷却了的海绵铁被排出至坑内，然后用吊桶吊车运至仓库贮存。加热系用内部混合或重油

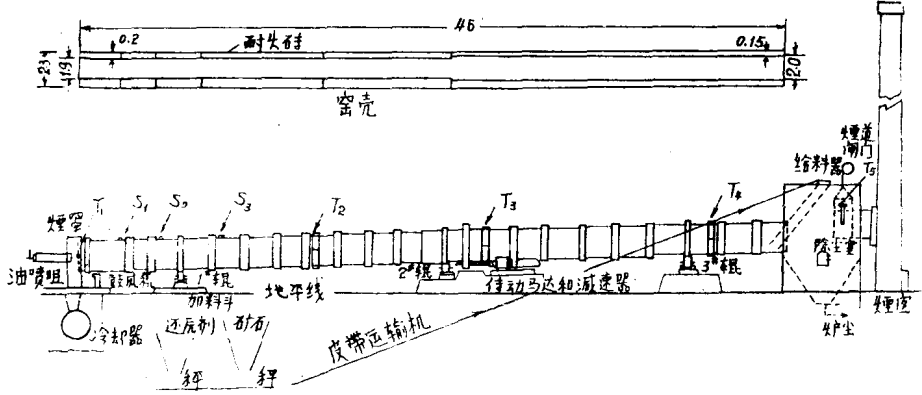


图3 试验回转窑的结构

表1 试验回转窑的规格

类 型	直圆筒型	燃烧器	烧油器
窑壳直径	2.3米	燃烧器容积	600升/小时 (最大)
窑壳厚度	16毫米	焙烧温度	1250℃(最高)
窑壳长度	46米	废气温度	300℃
倾 斜	2.5%	烟 囱	直径1.5高30 米
转 数	0.22~1.2 转/分, 四 种转速	冷却器容积	41.7米×5米
传动马达	50马力	冷却器转速	3 转/分
耐火材料	硅线石砖 及粘土熟 料砖	冷却器传动 马达	7.5马力
内 容 积	130米 ³	料斗	20米 ³ ×2
窑壁面积	281米 ²	物料称重	Merrik×2
支 点	三 点	生产能力	120 吨海绵 铁/日 (DR 60%)

喷嘴, 废气则在集尘室内滤尘后由烟囱排出。窑内负压则借设在烟道中的气流调节器来调节。图3的上部示出窑内砌砖施工。从排料端至8米深处用高铝砖(Al_2O_3 80%), 8~24米之间用SK32粘土熟料砖, 24~46米之间用SK30粘土熟料砖横砌。施工厚度SK30为150毫米, 其他均为200毫米。窑体由三个辊圈支撑在托轮上, 用50马力的电动机驱动, 可以作每分钟0.24、0.57、0.89、1.23转四级变速。窑长与直径比 $l/d=20$, 还原窑或干式水泥窑多采用这种比数。

测定设备及测定操作

窑内的物料取样孔开在何处, 是测定的重要问题, 曾由各方面研究, 决定开在距离窑的排料端3、5、9、15、23、41米处六个位置。窑的还原带压缩到靠近排料端, 后半段不起任何化学反应仅起干燥预热作用, 可按以上选别开孔。炉料温度的测定和记录, 亦属重要事项, 但在砌砖之间, 放置这些测量物件, 在作业中, 测定孔与砌砖之间产生很大的内部应力, 易引起砌砖脱落, 故希望开孔数尽量减少。因此决定上述六个孔, 既可作测量温度用, 又可作取试样和炉气或测定压力共用。但在3、5、9米处的高温带的三个孔, 由于窑壁的粘结层很厚, 并无测温的意义, 故温度计主要设在15、23、41米处及废气烟道

内, 此四处用热电偶测温, 在排料口处装有幅射高温计测定距离排料端一米处的料的温度。在3、5、9米处的高温带的孔, 测定时需将窑壁上的粘结层打破, 临时插入PR-13(铂铑-13)热电偶来测温, 随测定次数增加孔的变形逐渐严重, 未能得到良好的效果。其他的常设热电偶是带有低碳钢保护管的铬-铝热电偶(CA), 用ER记录仪作连续记录。热电偶的热端伸出窑的内壁约50毫米, 当窑运转时, 此端所表示的温度示于图4。使用反应灵敏的ER记录仪,

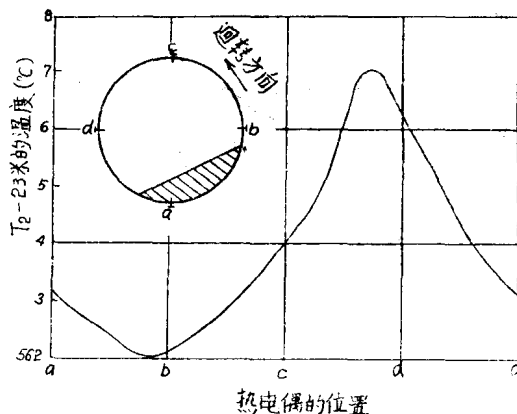
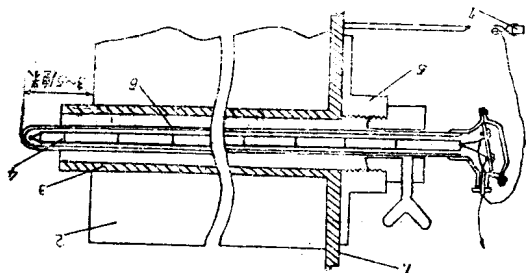


图4 热电偶 T_2 (23米处)的温度周期

对窑每转一转记录出 T_2 (23米)的电位差轨迹。温度计埋入炉料中的时间, 当炉料充填率为10%时为每转时间的1/4, 其余3/4的时间, 自然是和煤气相接触。因此, 应该得出比炉料高的温度数值, 但实际相差很小。这是由于热电偶伸出太短, 同时炉料经常把窑壁冷却所致。图4中a位置为窑停止转动时测得的温度, 图上的温度周期, 示出了a点与d点之间的温差约为4℃。此时的温度测定时间为40秒, 在运转时的电位差系用点记或记录仪来记录, 虽不准确, 但取较低的数值比最低值要好些。即使发生误差, 亦不致很大, 其实影响最大的是炉料内温度分布问题。其他各点的温度计的倾向, 亦大致相同。

这些热电偶的测定端头, 在其他测定作业时要容易拆卸。因此热电偶用螺钉固定在窑体的法兰上, 导线则与窑体的滑环用卡子连接。测定孔部份的构造如图5所示。当幅射高温计测定排料端炉料温度时, 有必要先决定海绵铁的黑度。将标准海绵铁和石墨片一起放在充满 N_2 气的试验窑中, 使用光学高温计作比较测定, 以决定其黑度。结果, 在1100—1200℃时, 多孔海绵铁的黑度为0.92的数值。并在ER记录仪内用黑度进行校正。在窑的排料端附近, 由于冷却器发生的水蒸气或燃烧生成的 CO_2 , 以及发生的微尘, 使得气氛的变化不规则。因此, 辐射线的吸收很不规则,

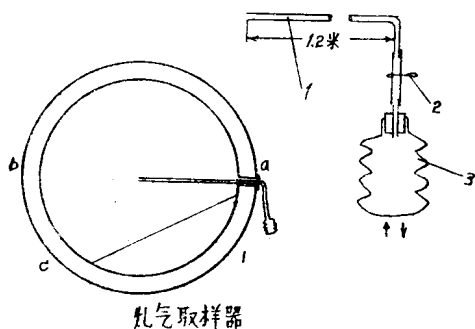
温度计指示的波动极大。其波动幅度达100℃以上。读出记录用包络线的最大值。



1.窑壳 2.衬砖 3.铁管 4.热电偶(CA)
5.法兰 6.保护管 7.滑环 8.调节螺栓
图5 取样点及热电偶安装点

由窑内取试样时，将热电偶卸出，窑回转时排出的炉料，即承接在急冷箱内。此时应注意窑内炉料产生偏析的地方，如后所述在每一偏析波长中排出的炉料具有不同的成份，因此必须观察试样。取样时最少取8个周期以上的试样。距排料端3米以内的试样，则用8米长的杓子通过烟罩插入采取。试样放在密闭的容器内急冷，缩减后保存在玻璃瓶内，供随后试验之用。每次取样重量为数公斤。试样分析按日本标准及学术振兴法规规定的原铁分析方法进行。由于炉料中混杂有很多未燃碳，在测定全碳时，先用海绵铁和石墨的人造试样试验，确定无误差时，才用燃烧容量法测定。

煤气在径向上的取样位置，如图6所示。炉气取



1.钢管 2.弹簧夹 聚乙烯取样瓶
图6 炉气取样方法及取样器

样管由图中a点插入窑内的中心轴位置，用炉气压缩清洗聚乙烯析皱瓶数次，在测定孔转到C位置前取炉气样品。若操作熟练，可在B—C之间取样。炉气迅速用奥萨特气体分析器分析三个组份，必要时再用爆发量管分析5个组份。窑内压力（静压）的检查，则

将气体取样管和倾斜管压力计连接读取压力。

以上的测定，都是在窑况稳定和不停窑的情况下进行的。但因这些测定孔并非永久性的，故常在孔的位置发生砌砖脱落事故，又由于砌砖不密合，以致测定孔变形而使测定困难。高温带上的测定孔曾被粘结层堵塞，故需用氧气将其烧通。

窑体铁板表面温度，主要以铜镍合金热电偶用电位差法测定，详细情况将于热平衡项目下叙述。由于驱动系统发生事故而停窑，炉料未经排出，任其在窑内冷却，然后在窑内进行特殊测定，对炉料、窑环及粘结层等作了精确调查。由于留存有多量的炉料在窑内冷却，对窑危害很大，这些调查资料甚为难得也是很有价值的。至于在正常操作时，记录炉料配合、出料、水份测定、喷咀重油燃烧量、一次二次空气压及流量、成品粒度、品位等数值的附属设备，则照旧使用。本回转窑未设置自动控制系统。

测定结果

在各种操作条件下，进行了数次测定，大体上得到了预期的数据。以这些测定为基础，依下列项目作了分析研究，验证了试验窑试验的结果：

- (1) 炉料的移动及温度分布
- (2) 还原反应及碳素还原剂的行为
- (3) 造粒过程及炉料再氧化
- (4) 异常现象（炉料的偏析及粘结）
- (5) 硫及其他成分的行为及废气和炉尘等
- (6) 物料平衡及热平衡
- (7) 还原窑作业改善及新方法的发展

以上测定的目的，是将以往凭经验判断的还原窑操作，改进成为合理作业，并掌握计量和测量控制系统的特性，以便进一步获得发展新设备的依据。本报告只提出上述测定的结果，作为以后研究的基础。

窑内取出的试样是测定分析基本数据的重要资料。图片1（略）为窑内取出试样的照片，示出2—2测定（铁矿砂—鸿基无烟煤作业）时的一部份。在窑的排料端，炉料的粒子增大，超过取样孔的直径，不能取样。但急剧造粒系在5—0米之间，由排料端到5米处，取样不成问题。表2为各种测定的结果（2—2），表中直接还原度D.R.%，依惯例由下式算出：

$$DR_{\text{海绵铁}} = \left(1 - \frac{\text{海绵铁中的氧}}{\text{铁矿砂中的氧}}\right) \times 100$$

表2

2—2分析

测定结果

(铁矿砂-鸿基无烟煤 1961年6月)

燃 油 器			炉 料			
用 油 量	一次空气压力	温 度	给 料	水 分	煤 比	煤 的 名 称
540升/小时	3.9公斤/(厘米) ²	97℃	7.5吨/小时	6.5%	0.26	鸿基无烟煤

炉 气 及 试 样 的 分 析

取样孔(米)		46	41	23	15	9	5	3	0
炉 料	T·C (全碳)	14.7	13.6	10.3	7.7	10.2	10.4	8.2	3.1
	T·Fe (全铁)	43.9	47.5	48.9	52.4	50.3	52.4	61.4	68.2
	M·Fe (金属铁)	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	7.7	32.1	34.9
	FeO	23.4	26.0	27.8	32.3	33.2	51.2	34.1	34.1
	Fe ₂ O ₃	36.9	38.9	38.9	38.9	34.9	7.0	4.0	4.0
	TiO ₂	9.5	10.2	10.4	10.9	9.9	10.7	12.2	12.9
	SiO ₂	4.6	4.3	3.5	3.6	4.7	4.5	5.2	5.1
	T·S (全硫)	0.095	0.070	0.068	0.056	0.075	0.113	0.151	0.146
	水 分	4.82	0.69	痕迹	—	—	—	—	—
	D.R. (直接还原度)	0.0	0.6	1.3	2.7	4.0	30.5	61.4	63.1
	温度 (℃)	290*	140	620	805	1020	—	—	1140
炉 气	CO ₂	—	17.0	14.4	14.1	11.4	—	—	—
	O ₂	—	5.2	5.8	4.8	12.0	—	—	—
	CO	—	6.3	9.3	8.2	25.9	—	—	—

注：在情况正常时。

*废气温度

46米处温度数值表示烟道废气温度，41—15中系前述热电偶记录的温度，9米位置点测温记录，0米系辐射高温计的指示值。气体分析系用奥萨特法，表示除去水分后的成分。图7为其他因素的测定结果（2—8，铁矿砂-鸿基无烟煤作业），用图表表示，横坐标系沿窑长联结各测定地点数值的曲线。炉料成分%用绝对量表示较为方便，在窑内运转中，假定全长均无铁损失，全铁绝对量不变，故投入窑内炉料的全铁可作为计算基础，与各点的全铁值之比作为系数。将窑中试料成分%作为补正值。作者称该值为第一次补正值。通过数次测定、处理铁矿砂时，全碳的大多数情况，对窑全长而言为凹形，发现窑的中心部分为低值。在初期测定作业，打开测定孔放出炉料试样时，发现常常随着窑回转的某一周期所取出的炉料试样在质和量上均发生变化。当传动系统发生故障停窑时，进入窑内检查，发现炉料有显著的偏析现

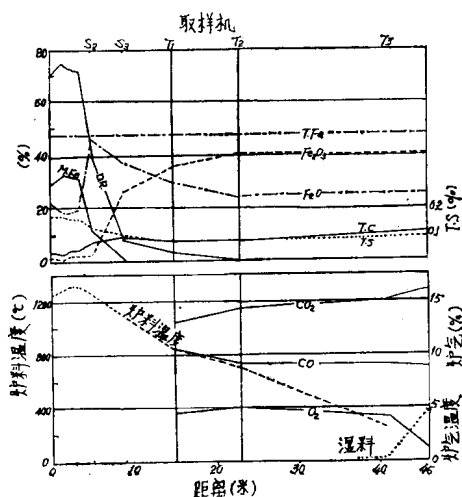


图7 距回转窑排料端的距离与各因素的关系（2—8分析，铁矿砂-无烟煤和焦炭）

象。作者根据窑内特有的炉料偏析现象，将其状态分别称为常状偏析和条状偏析。由于了解这种现象有限，从窑中取出有关偏析的试样，在质和量上不一定能代表窑单位长度的炉料性质。虽然是那样，但在以后可以肯定试样因上述现象发生的原料偏析，仍可以说明某种程度的趋势。当处理与铁矿砂相反的大粒度的矿石时，全碳则反而在中心部或凸状得到高的测定结果。作者为了验证试验室试验，指出回转倾斜圆筒内的粒子移动，容易因静止角而产生偏析，粒子直径则是极大的决定静止角的主要原因。这种现象特别对还原反应有很大的影响，故进行了较详细的分析研究。将在以后的炉料移动和异常现象项目中加以详述。

结 语

以往关于回转窑直接炼铁的文章发表很多，大部

份都是作业上的数据，深入到还原窑内部的分析研究的例子很少。这次借该厂建议46米长的大型试验窑的机会，在窑体上设置六个测定孔进行各种测定，为了对回转窑的各种机理作出解释，根据以下项目作了基本的测定。

- (1) 沿窑长7个点测定炉料的温度。
- (2) 在上述7个点取炉料试样和分析。
- (3) 在上述各点取炉气试样和分析。
- (4) 测定窑体铁皮的表面温度。

对于取出的试样作了各方面的室内试验和测定，並作为分析研究的基础。从以上的研究指出，回转窑倾斜圆筒内粒子的移动容易产生偏析，此种现象对还原窑影响极大。本文是叙述测定的设备、方法和概略结果，以后的报告顺次报导分析结果。

参 考 文 献

- 1) 远藤, 松下. 铁と钢, 48 (1962) 6, P.796~802
- 2) Williams, A Process for the Production of Sponge Iron, (1924)
- 3) Max. J Kennard, Min. Cong. J., (1961) 1, P.34~37
- 4) M. J. Udy, Iron & Steel Eng., (1959) 11, P.109~116
- 5) A.Scortecchi, A. Palazzi, J.Iron & Steel Inst. (U.K.), (1960) 6, P. 267~277
- 6) Iron & Steel Production in Countries Poor in Raw Materials, Iron & Coal Trade Rev., 21 (1956) 12, P.1489~1492
- 7) 高野, 钢管技报, 11 (1958) 1, P.52~60
- 8) 吉井, 窑业, 62 (1954) 694, P.299

[毛达镛译自《铁と钢》，1963，49，No12，1753~1759，李凡夫校]

回转窑内炉料移动及温度分布

(铁矿砂用回转窑预还原的研究——Ⅱ)

荒川秀雄

伊与田隆藏

绪 言

前报告〔1〕叙述了关于用试验回转窑进行各种测定的设备及其测定的方法,示出了窑内的炉料、气体及温度分布等的测定结果。本报告则根据测定结果的研究项目次序,进行分析回转窑内炉料移动及温度分布。

回转窑是以连续处理为其特征,並且在进行热处理的同时,其本身兼有将高温炉料作水平方向移动的传送作用。但在回转的倾斜圆筒内的物料移动比较复杂,其复杂性多半由于炉料性质的不同在移动中发生选择作用。在还原窑中炉料常为被还原的矿石和还原剂的二元混合物,由于两者的性质不同,而在炉料移动过程中容易产生分离。若炉料中还原剂在还原带中发生偏析,则对未与还原气体相接触的炉料会发生重大的影响。炉料移动机理的分析不仅与处理时间有关,而且还关系到回转窑的处理特性。炉料的温度分布,则取决于窑内的传热机理,尤其是与还原带的形状、还原的时间、温度以及常常成为妨碍回转窑操作的窑环有密切的关系。关于窑环的研究将在以后详述。本报告只对炉料的热的测定结果,并根据计算作若干考察。

窑内炉料的移动

(1) 一般法则:

关于窑内炉料通过的时间,以前水泥工作者作过很多研究〔2-4〕。一般多采用Sullivan〔5〕和Warner〔6〕所提出的公式:

$$t = \frac{0.19L}{ND \tan \theta_s} \dots \dots (1) \text{ Sullivan}$$

$$t = \frac{f \times 1.77L \sqrt{\theta_s}}{ND \theta_s} \dots \dots (2) \text{ Warner}$$

式中: t —— 通过窑内的时间 (分)

N —— 转数 (转/分)

L —— 窑长 (米)

θ_s 炉料静止角 (度)

D —— 窑的内径 (米)

f —— 炉料压缩系数

θ_s —— 窑的倾斜角 (度)

现将试验窑的诸数据 $L = 46$ 米, $D = 1.9$ 米, $\theta_s = 1^\circ 43'$, $N = 0.9$, $\theta_s = 36^\circ$, $f \approx 1$ 代入式内计算,则结果(1)式为205分,(2)式为200分。(1)式中可以将 θ_s 省略,系因普通回转窑内炉料静止角 θ_s 约为 36° ,其平方根是一个影响较小的常数,Warner氏所作的模型试验观察,炉料粒度经过造粒后,其流动速度恒定,不受粒度、炉料厚度以及较炉料厚度为小的窑内堰堤的影响,与此相反,Grgi氏〔4〕则认为炉料的充填率对流动速度有影响。

(2) 窑内炉料的状态的推断

今将试验回转窑的各项数据代入(2)式,则得到每分钟炉料移动的距离 S 和静止角 θ_s 的关系式:

$$S = \frac{138.1}{\sqrt{\theta_s}} \dots \dots (3)$$

作业中从窑内各点取出的试样,在室温条件下测定其静止角。测定使用的装置如图1所示。试样多时用A装置,试样少时用B装置。A为直径30厘米的短圆筒,两端面装有玻璃。装入试样后放在台桌上,先作一个方向转动,使试样活动一下,停止在任意位置上,然后再作逆方向回转,当试样开始滑动时读取回转角数字。此角度即为 $2\theta_s$ 。测定箱B是将试样装入其中,试样厚度约4厘米,将试样摊平将测定箱倾斜

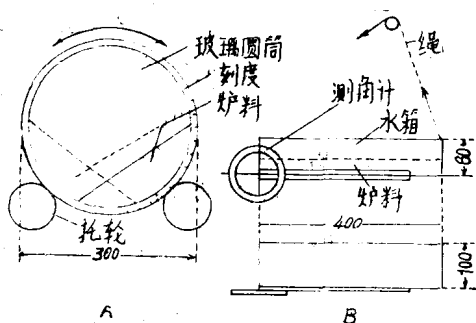


图1 测量静止角的仪器

至试样开始滑动，用分度器测取角度。以上两者均采用10次的平均数值。图2所示为沿窑的长轴方向测得

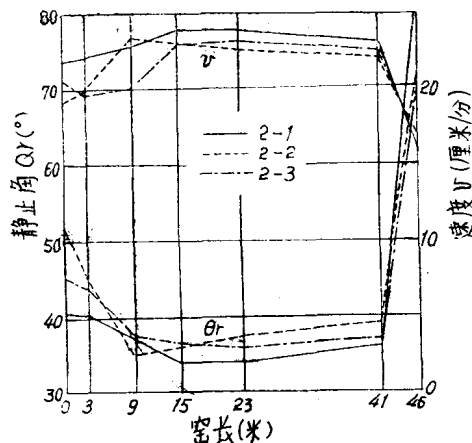


图2 通过速度与炉料在窑中的静止角

的静止角和将它代入(3)式后，得到移动速度 v 的变化的三个例子。求出各点的 v 后，根据给定一定炉料的条件下，由该点窑的单位长度的滞留量，或测出所取试料的容积比重，算出各点滞留的炉料的容积，则能决定窑和炉料之间缺圆的各值。根据求得的窑内炉料厚度 H 与炉料填充率 φ 的变化例子，如图3所示。一般说来，在炉料给入初期，由于湿度关系，其静止角非常大。随着逐渐干燥，静止角就逐渐下降，大约在窑的中段为最低值，继而到还原带时，粒子相互摩擦系数增加，静止角重新增大，整体的形状成为倒梯形。因此，炉料速度与 $\sqrt{\theta_r}$ 成反比，炉料速度为梯形，炉料厚度和填充率则为同倾向的凹型。值得注意的是在窑的后半部填充率急剧增加。以上的结果是以试料冷至室温后所做的测定为基础的，但在实际运转中，窑内炉料因其它因素的影响其形状有所不同，已为调查结果所证实。

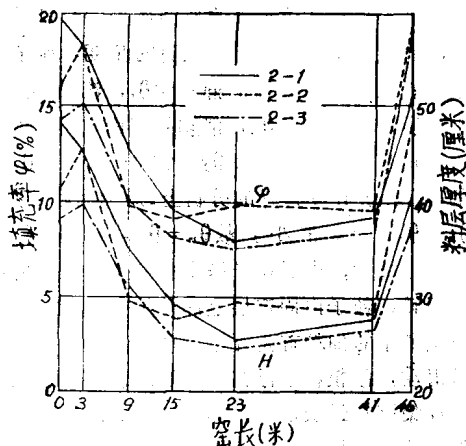


图3 填充率与窑内的料层厚度

(3) 原料组份粒子行为

关于窑内物料的移动，物料的静止角为重要因素。静止角由物质的粒子直径、粒子密度、形状、表面粘着力等所决定[7]，对于窑内的干燥物料，粒径的影响最大，随着窑的回转，因粒度关系而发生偏析。图4示出还原窑使用的物料粒度分布和粒径与静

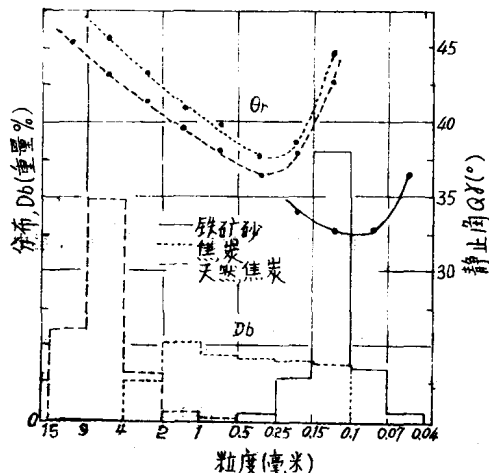


图4 粒度分布与窑内炉料之静止角

止角三者关系，一般说来，当粗充填时，在特定粒度下，静止角将示出最低值。而且最低值决定于物质固有值，在图上可以看出虽然调整碳还原剂的粒度，亦不能得到完全与铁矿砂静止角一致的条件。作者将物料装入玻璃圆筒，反复多次作回转模型试验，看到回转圆筒内的粒子，静止角愈大的则愈被挤出层的外周，静止角愈小则愈靠近回转中心。图片1(略)所示出的将不同粒度的球状颗粒放在圆筒内回转时粒