



第六届国际钢铁会议 炼铁文集(选译)

中国金属学会

一九九一年

第六届国际钢铁会议 炼铁文集(选译)

1990年10月21至26日

日本 名古屋

中国金属学会炼铁专业委员会译

第六届国际钢铁会议

(1990年10月21至26日在日本名古屋)

炼铁文集选译目录

一、原料部份：(烧结、焦炭)

1. 先进的铁矿石准备技术
日本 东北大学Y、Omori等..... (1)
2. 矿石特性与烧结矿性能的相关模型
德国 鲁奇股份有限公司F、Cappel等..... (12)
3. 烧结矿生产中富针铁矿的同化行为及其控制
日本 新日本钢铁公司Y、Hida等..... (18)
4. 福山钢铁厂小球烧结法的工业生产
日本 钢管公司S、Nagano等..... (25)
5. 高铁特种烧结矿——一种先进的高炉含铁炉料
瑞典 皇家工学院J.O、Edstrom等..... (33)
6. 铁矿烧结过程的数值模拟
法国 钢铁研究院F、Patisson等..... (42)
7. 用计算机控制的x射线层析摄影法分析形成最佳烧结矿层所需条件
日本 日铁商事公司S、Kasama等..... (52)
8. 烧结过程断面控制技术的开发
日本 钢管公司R、Nakajima等..... (60)
9. 日本钢铁工业中炼焦技术最近的发展趋势及对未来的展望
日本 新日本钢铁公司M、Tateoka等..... (68)
10. 冶金焦炭在高温下的行为
日本 钢管公司N、Suzuki等..... (75)

二、高炉冶炼：

11. 日本炼铁技术的近期进展
日本钢管公司T、Shibuya等..... (81)
12. 展望高炉未来
比利时 冶金研究中心A、Poos..... (89)
13. 大分二号高炉先进的用于操作控制的知识工程系统的开发
日本 新日本钢铁公司H、Kanoshima等..... (97)
14. 加谷川二号高炉的中心加焦方法和高喷煤量

日本 神户制钢公司Y、Matsui 等.....	(104)
15.根据死焦区内焦炭动力学控制高炉内煤气和铁水的流动	
日本 神户制钢公司M、Shimizu等.....	(111)
16.高炉炉缸的内部状况	
法国 钢铁研究院R、Nicolle 等.....	(119)
17.对喷煤的限制	
德国 蒂森公司K、H、Peters等	(126)
18.延长鹿岛三号高炉的一代炉龄	
日本 住友金属公司A、Koike等.....	(134)
16.采用蓄热室高温转化技术的金属化工艺	
苏联 科学院V.M.Zaichenko等.....	(142)
20.高炉风口喷吹铁矿粉和熔剂粉及其对风口燃烧带的影响	
日本 川崎钢铁公司N、Takashima等.....	(146)
21.日产十吨的新炼铁法的操作结果	
日本 川崎钢铁公司H、Momokawa 等	(154)
22.氧气高炉法的发展	
日本 钢管公司M、Matsuura 等.....	(161)

先进的铁矿石准备技术

Y. Omori E. Kasai

选矿与冶金研究所

日本东北大学 仙台市 片平

摘要：铁矿的造块技术在近十年内有了显著的进步。换句话说，这个从前被认为是工业“艺术”跃进成为一门科学。但是由于它们的极端复杂性，因此我们在造块过程中还有许多东西不能确定。在这个报告中，我们回顾一下最近造块过程所取得的进步，强调烧结原料的基础研究和预处理技术，以便试图说明哪些是“关键”的未确定因素，并提供一些意见以帮助今后解决问题。

关键词：铁矿石，造块，烧结，球团，技术革新，高炉。

1. 前言（造块技术在炼铁过程中的作用）

铁矿石是自然界给人类的礼物，具有各种各样的特性，而人类所建立的高炉是挑食者，它希望获得稳定和良好的食物。因此我们必须准备这些食物来获得高炉高效的及稳定的作业。随着高炉容积的扩大及燃料费用的增长，对原料的需求也更加严格。因此我们正在力求了解什么是好的食物和如何制备这些食物，并运用我们目前的各种可能的方法来实现它。

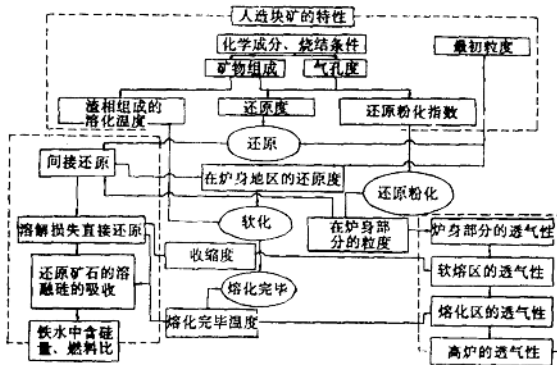


图1.人造块矿的特性和高炉内现象的相互关系

铁矿石造块的作用十分简单：

- 1) 利用细的或质量不好的铁矿石，
 - 2) 提高或改进高炉炉料性质的均匀性。
- 人造块矿的各种特性影响高炉的作业见(图1)。〔1〕为了控制在有限条件下的复杂交叉的因素，在过去40年中我们已经积累了大量的技术。但是，在技术的提高和发展上还有很大潜力，我们必须进一步面对最近出现的和十分迫切的问题，即原料供应的变化和污染环境的对策。

2. 过去十年中技术革新简介

2.1 球团生产

在1970年底，世界上建立的球团生产能力将近3亿吨。但是，第二次石油危机进一步提高了球团生产的每年能耗费用。它的燃料主要是石油，因此低成本和低能耗工艺的开发

已成为十分紧迫的需求。球团矿一直根据它在高炉内的特性与烧结矿进行对比并且两者都在竞争中提高了。

以下的技术课题已被提出:

1) 添加含MgO的物料以提高其性能: 石灰熔剂性球团矿有一个缺点, 就是软化和熔化温度比烧结低, 所以导致还原的减慢。这是因为在球团中小部分的富FeO渣相通过气孔挤压到表面并在此处, 形成一个稠密的金属壳⁽²⁾, 减少这种渣相的技术是通过增加含MgO物料而获得成功⁽³⁾, 这项技术已在世界推广, 并改进高炉作业。

2) 使用碳添加剂: 焦炭、煤和木炭在球团生产过程中作为燃料和改进结构而起着重要作用。一些工厂成功地用固体燃料替换石油和天然气以节省燃料费用, 并且用增加孔隙度来提高球团矿性能。这种技术的历史和发展被阿普尔贝(Appleby)和肖(Shaw)⁽⁴⁾作了详细总结。另一方面把固体燃料作为可选择的一种方法用于焙烧直接点火, 这种方法毫无疑问地可以节省相当多的燃料费用⁽⁵⁾。

3) 多孔球团矿的发展: 锯木⁽⁶⁾和泥炭藓⁽⁷⁾与原料相混合。一种纤维质为基础的有机粘结剂也已经被研究⁽⁸⁾, 它在造球过程中在矿石微粒之间构成聚合的联络桥, 这种材料在焙烧期间燃烧, 产生高孔隙度, 这也导致了更好的矿石还原性。

4) 其它: 许多基础研究工作已经完成, 例如: 粉碎强度, 还原动力学和矿物学。其结果是: 成粒的数学模型, 焙烧和还原过程都逐步地取得进展。模型的准确性仍然高度依赖丰富可靠的物理的、化学的和动力学的数据, 以及在建立模型过程中可利用的精确的取样和检测设备。对膨胀机理进行了广泛研究发现, 较高的碱度和渣量以及非局部化学还原反应⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾可获得膨胀较小的结果。

2.2 烧结过程

原料的不均匀性及最终烧结料层的不均匀性是铁矿石烧结过程中不可避免又十分必要的特征。这是因为原料有比较广泛的粒度分布, 作为主要燃料的焦炭在短暂的燃烧过程中需要充足气流速度, 而物料只能部分非全部熔化所致。不管怎样, 极度的不均匀性当然不是我们所需要的。例如, 很容易想象到, 如果在烧结料层中燃烧和熔剂的不均匀性增加, 那么, 某部分将会充分大量熔化而其它部分又不能结块。更进一步, 这种充分的熔化会促进某部分气流通道的发展以及由此而引起热的不均匀性, 所以, 对原料的不均匀性的控制和利用是改进烧结技术的关键。并不夸张地说, 在过去十年中烧结技术的进步是与不均匀性控制搏斗的结果。

关于物料的混合与制粒, 在过去十年的前五年中, 我们的主要课题是建立一种烧结环境以及通过使原料均匀而产生低SiO₂和低FeO的烧结技术。在后五年中, 主要是开发并确实利用这种可控性不均匀性和偏析的技术。原料配比的设计是一种工艺技术, 它在一定温度下建立所需要的孔隙度、烧结结构及矿物组成。因此, 我们通过复杂的研究工作把它们之间的关系定量化, 如建立原料、温度分布、矿相的形成和烧结料层的结构的彼此关系。有些设计者建议其中应考虑使用的矿石和熔剂的粒度和种类。

我们已不断努力控制烧结料层的温度状态。热的均匀性可以得到以下的优点: 1) 增加烧结产品的成品率以及 2) 降低燃料和熔剂材料的消耗。第(1)项是由于减少烧结不完全那部分。第(2)项相当于减少混合料不起作用的部分。

降低成本和节约能耗在烧结过程中也已成为重要课题。温度均衡的烧结过程是一种节

约开支的技术，因为它直接导致产品成品率的增加以及降低焦炭消耗。点火效率的改善，烧结料层温度的增加，漏风的防止和废热的回收都是有效的技术。我们已看到工厂作业中综合使用这种技术的许多报告，在这里由于篇幅有限就不再作介绍。

图2⁽¹¹⁾显示了最近十年中这些技术的项目的变化。具体情况下文记叙。

卸料	模拟模型		专家系统			
	使用机器人					
中和混匀场	模拟模型	遥 控		专家系统		
	控制系统		自动控制			
烧结矿的特性	低混烧结 (低FeO和SiO ₂)	高还原度	高生产率 (增加使用褐铁矿)			
原料混合和制粒	细粒酸性熔剂的使用 造微型球	使用粗粒石灰石 预成球	颗粒设计	球团烧结矿(HPS) 分别成球		
混合料的布料	双层布料 (布料偏析控制)	多缝棒式流槽 (密度控制)	强化筛分布料器(ISF)			
烧结过程	温度状态均匀化	增加料层高度	增加产品成品率			
节能环保	从冷却机回收热量 NO _x 的脱除	从废气中回收热量 NO _x 生成的抑制	减少废气泄漏			
测量和控制	料层温度	气流量	三维结构分析(x射线层析扫描(CTS))			
		操作指导	(自动控制)	专家系统		
模拟模型	对操作状态和特性的 预测	统计预测	料层和团块结构的定量分析			
年	1980	1982	1984	1986	1988	1990

图2. 过去十年铁矿石烧结过程中显著的技术进步

3. 基础研究

存在于熔剂性烧结矿中的主要矿物有：赤铁矿(H)，磁铁矿(M)，铁酸钙(CF)和玻璃质以及结晶的硅酸盐(S)。矿物组成的构成已用图象分析器测量出来，典型的是：体积15~35%的赤铁矿，15~25%磁铁矿，25~50%铁酸钙和10~25%结晶硅酸盐。

铁酸钙是主要的粘结相，它是含有 SiO_2 和 Al_2O_3 的固体熔体。因此常称为：复合铁酸钙或四元铁酸钙。

一些报告发现有关铁酸钙固熔体的状态，但彼此间并不相符。井上和池田^[15]报导在 1250°C 下进行固相反应得到合成CF，它是一种含有 $\text{CaSiO}_3\text{—Ca(Fe, Al)}_2\text{O}_6$ 的固熔体，而且 SiO_2 的最大固熔限度为12.5mol%（图3）。并且，他们通过x光衍射确认CF单晶体的结构是三斜晶系。达伍桑（Dawson）等人^[16]模拟实际过程热状态下合成CF，并且用x光显微分布仪测量了它的化学成份。他们断言CF是一种部分 Fe_2O_3 被 SiO_2 和 Al_2O_3 取代的铁酸半钙。不管怎样，他们没有确认其结晶构造。如果在不平衡条件下固熔体状态的CF结构和平衡条件下的结构不同的话，这个问题会是很有意思的。

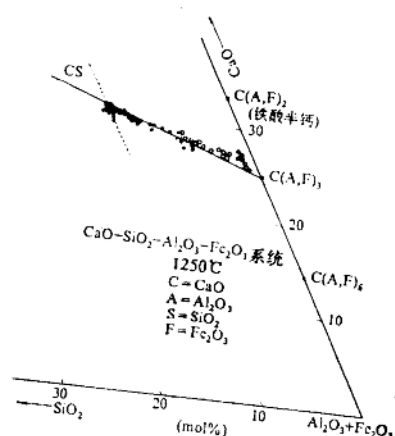


图3. 在 1250°C 下CF的平衡固熔体状态

CF的还原性已经被研究过。石川（Ishikawa）等人^[17]检查了从运行的高炉中取出的烧结矿发现“针状”CF还原性较好。板本（Sakamoto）等人指出“纤细”CF根据还原^[18]和还原粉化学性能要求^[19]作为粘结相基体是合适的。这是因为CF的冶金性能决定于其自身的形态，CF的形成机理已经被研究过。肥田（Hida）等人^[20]通过一种运用“动态”SEM研究结果证明针状CF的形成按照以下顺序：1）通过固相反应生成铁酸一钙，2）随后的熔化作为初始熔体，3）针状CF的形成是通过已形成的熔体和 Fe_2O_3 之间的反应。

CF的还原机理也进行过研究。志恒（Shigaki）等人^[21]已经示出CF 650°C 以下不开还原。

可以肯定地说，CF不是低温还原粉化开裂的一个原因。达伍桑等人^[22]已提议CF的还原机理如图4所示。

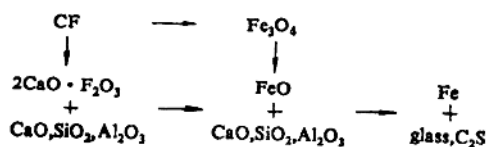


图4. 建议的CF还原机理

与此同时，烧结矿中每个矿物比例和气孔（P）或缩孔（V）以及它们的形态的定量工作有了很大的进步。这主要由于图象分析的软硬件的迅速发展的结果。约伊林（Jevlin）^[23]研研了烧结矿的形态和还原粉化性能之间的关系，并获得了粉化随 Fe_2O_3 与P之间的接触面积增加而增加。而疏松的

Fe_2O_3 比再生的 Fe_2O_3 对粉化的严重更起重要作用。佐藤（Sato）等人^[24]报导还原粉化指数（RDI）由 $100\text{—}300\mu\text{m}$ 之间的 Fe_2O_3 数量来展示，而还原指数（RI）由CF的数量和少于 $150\mu\text{m}$ 的气孔来描述。再者，约伊林（Jevlin）^[25]获得结论，限制P或矿物数量的数据不是关系到烧结的冷矿强度而是气孔之间的长度。涩谷（Shibuya）^[26]等人报导了孔隙度和残余矿石在烧结料层中的分布（图5）。这些是光学图象分析的结果，而“元素定量”技术已得到发展，使我们可以通过显微光谱分析仪定量测得二维空间的化学组成。

毫无疑问，属多孔介质的烧结矿性质即透气性、强度和还原性，它们受气孔及矿物结

构系统的三维分布的影响。从二维图象很难预测出三维的结构，还没有很好的方法来处理这种复杂的结构。作者们⁽²⁷⁾通过烧结矿切片和运用图象分析仪来分析一系列的薄片从而成功地获得了烧结矿的三维结构特性。一个计算机层析扫描器（CTS）用来对烧结团块进行结构分析。这种方法的长处在于它可以获得三维的特性而不会有任何破坏。⁽²⁸⁾这将是一个有力的工具，例如：可找出高产和提高烧结产品强度的有效操作方法。

控制混合料中加入焦炭的状态，使废气中减少 H_2O 的可能性已经在基础研究中指出来了。⁽²⁹⁻³¹⁾ 排出废气的净化，即同时去除 H_2O 和 SO_2 得到了检查⁽³²⁾。

大量的研究人员已评价了铁矿石的特性，这是因为获得优质烧结矿的熔剂和烧结条件依赖于所使用的铁矿石的性质。野板(Shozaki)等人⁽³³⁾已提议一种关于铁矿粉的熔融性估

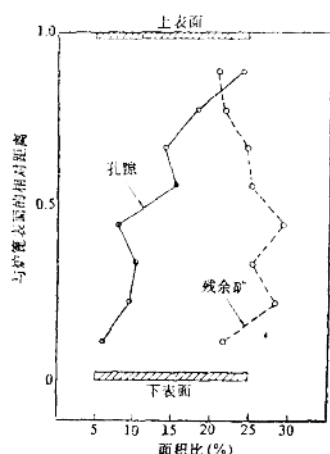


图5. 一个烧结团块截面的孔隙与残余矿(残余)的分布

价的方法，它是观察由一定量的铁矿石与石灰石组成的熔融液滴在一个氧化铝坩埚中的流动性。成球能力、“熔融性”、还原度和其它性能等对粗粒矿进行评价，此粗粒矿在混合料制粒作为成球核心。⁽³⁴⁾ “熔融性”由其在高温下不配熔剂时的重结晶程度来表示。再者，原料的粒度或化学成份对烧结作业的影响已经被广泛的研究。文卡蒂森(Venkatesan)等人⁽³⁵⁾研究了用预成球的方法，利用含铁粉尘和极细的粉料来制成小粒状产品。对帕尼齐拉(Panigrahy)和里戈(Rigaud)⁽³⁶⁾研究了镜赤铁矿精矿粉的粒度分布对烧结性能和产率的影响，并得出结论。在碱度低于2.0时，粗粒精矿比较合适，但碱度高2.0时，粒度的影响似乎不显著了。长野(Nagano)等人⁽³⁷⁾发现烧结料的体积收缩，在 CaO 含量相同情况

下，与烧结产品的强度和还原程度有关。再者，收缩率主要取决于所用的铁矿石的化学成份及烧损。铁矿石的性质常常的相等的条件下评价，例如如上所述的熔剂配加量和烧结温度。不管怎样，作者⁽³⁸⁾最近发现铁矿石的“熔融性”的顺序不仅取决于矿石的性质也取决于共存的 CaO 量。为了有效设计原料配比，包括“熔融性”和“同化作用”术语的定义，对矿石和熔剂的反应进一步研究是十分必要的。含大量针铁矿的褐铁矿通常被归类为“易熔的”。但是可以想象得出，烧结料层结构的改变很难发生，因此当大量褐铁矿被利用时，产品的强度会不足。⁽³⁸⁾ 铁资源中褐铁矿藏量是丰富的，因此人们更多地注意到利用褐铁矿的有效方法。

Al_2O_3 、 SiO_2 、 FeO 等成份对烧结性能的影响已被广泛研究。其结果概括如下： Al_2O_3 增加，使还原性变好，但强度和还原粉化性变坏，因为它使细状的CF增加。我们已认识到 FeO 含量程度与混合料中焦炭含量有关，并且还原性和还原粉化降低但强度随 FeO 含量升高而增强。然而，蟹沢(Kanisuwa)等人⁽³⁹⁾发现还原粉化与 FeO 的关系有一个峰值(图6)。相马(Soma)等人⁽⁴⁰⁾成功地用细磨石英粉在制粒时粘附在矿石表面来降低烧结矿中 SiO_2 的含量，并保持烧结矿产品的性能和还原性。与此相反卡佩卡(Cappel)和马吉丹茨(Magedanz)⁽⁴¹⁾报告说酸性熔剂、沙子和橄榄石的磨细不能增加烧结矿的机械程度。

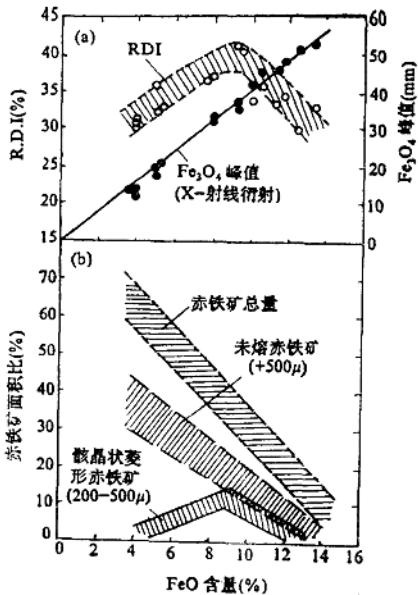


图6.通过烧结杯试验获得的各种矿物含量与FeO及RDI的关系

以上提到的结果只是许多研究工作中的一部分。

这些大量的基础资料已经或将会直接和迅速地 在烧结过程中实际应用并获得成果。以下一部分中将讲述原料的制粒。

4. 原料的加工处理

4.1 中和混匀技术

人们做了很多努力来建立自动及远距离操作混匀装置和技术以降低混合物中各种化学成份的波动。科森 (Corson) ^[42] 报导有关在微机帮助下供身的快速计算及供料速度与添加水分的控制系统的研究结果。住友金属 (Sumitomo Metal) ^[43] 及科斯塔 (Costa) 等人 ^[44] 也宣布了运用适当的取样技术实现最佳给料速度的计算系统。新田 (Niffa) 等人 ^[45] 开发了一种新的料层监测系统 和一种先进的造堆机, 这种机器能控制料堆的偏析, 因而可降低混合物中SiO₂的波动。还有, 看到许多关于自动化作业和完整的遥控堆矿机和取料机, 并且最近看到了原料堆料场的专家系统的应用。

4.2 原料的制粒

自从烧结过程发展之后, 人们认识到了制粒的重要性。制粒的程度严重影响着混合料料层的透气性, 因此也影响生产率。古井 (Furui) 等人 ^[47] 提出了一种衡量制粒程度即制粒指数 (GI) 的建议, 他们报导了制粒指数与透气性有明显的联系。山冈 (Yamaoka) 等人 ^[48] 提出了一个修正的指数, 它是建立在干燥状态下的小球的颗粒尺寸。

制粒技术已经由于小球定量的评价方法的开发得到了发展。许多研究者们都对制粒的软硬件进行了开发。针对细矿粉造微球已经有了很多的研究。松冈 (Matsuoka) 等人 ^[49] 报告了配加矿石球核对细粉预制粒的作用。出口 (Deguchi) 等人 ^[50] 考察了通过配加良好制粒能力的矿粉而提高原料成粒了方法。更进一步开发了通过配加返矿或返料使粉矿预制粒及压块的方法。彼得斯 (Peters) 等人 ^[51] 通过使用粗加工的焦粉来提高生产率。 ^[52] 振到制粒设备已经得到开发并在实际中使用, 它与传统的制粒机不同。

4.3 制粒机理及制粒模型

罗勒 (Roller) 及弗思 (Firth) ^[53]、佐藤等人 ^[54] 几乎在同时发现制粒的重要特性, 其球粒尺寸、因而其料层的透气性可以用有效湿度来评价, 它是由总水分减去原料吸的水分得到的。

一些以质量平衡为基础的数学模型已提供出来, 这些模型包括有效湿度及制粒过程的转动时间和转动动力。利斯特 (Litster) 等人 ^[55] 已发现在核心与附着颗粒之间的分离粒度是有效湿度的函数, 并且还开发了一个引入分离粒度曲线的模型。

这些研究结果给我们一个明确的结论就是在转动一定时间之后, 粒度的增加是在减

慢，这是烧结混合料的一个特点。它的粒度分布与球团料不相间。因此制粒动力学只在有限的条件下十分重要，即制粒设备中没有充足的停留时间才重要。

4.4 混合料的设计（球粒设计）

石灰石很明显是在铁矿石烧结过程中一个主要的熔剂，因此设计一种使用石灰石来控制化学成份偏析的方法是十分有用的。古宅（Furututaku）等人⁽⁵⁶⁾和志恒等人⁽⁵⁷⁾曾通过使用粗加工石灰石来提高生产率及降低还原粉化。

为了更大地偏析CaO成分和控制它，川口（Kawaguchi）等人⁽⁵⁸⁾发展了铁矿石和石灰石的预成球的方法。从类似的角度出发，进行了一个石灰石间歇给料的试验操作⁽⁵⁹⁾。在一个颗粒内控制物料偏析的技术通常被称作“球粒设计”，并且在一些工艺过程中已制定出来⁽⁶⁰⁻⁶⁴⁾。球团烧结法已在商业上应用。该工艺在烧结过程中不需要原料成为大量熔体（表1），其它工艺⁽⁶⁰⁻⁶³⁾⁽⁶⁴⁾针对控制化学成份和在烧结过程中熔体形成的数量。因此通过设计方法把粘结基体的矿物结构区分为两个不同部分，即被熔融及残余部分。要建立这样的颗粒设计技术，必须要进行关于颗粒构造、料层温度状态与烧结产品特性之间的关系研究和定量研究。

5. 混合料的布料技术

烧结机的烧结过程可以被看做一个二维稳定状态过程而实际上是一个与台车运动方向一致的一维不稳定状态过程。因此，除非燃料的分布有适当的控制，在料层的上部热量不足而下部则热量过剩。

从这个角度看，原料、尤其是焦炭沿料层的高度分布的偏析控制是十分重要的技术。物料在横向的分布需要同样均匀，与此同时，靠近墙边的一侧防止漏风的措施是十分重要的。

为了分析偏析现象已经做了许多研究调查，并开发了有效的布料方法。深水（Fuka-

表1 从制粒和熔体流动的角度对球团、烧结和球团烧结法过程的比较

过程	制 粒	原料的粒状组成	熔化运动
球团	完 全	狭窄（细）	少 量
烧结	不 完 全	宽	大 量
球团烧结法	完 全	以上两个过程之间	

mi）等人⁽⁶⁵⁾报导以下因素对布料的偏析有影响：

- 1) 增加混合料给料的水平速度，减小垂直速度，
- 2) 促进在流槽中的细颗粒的偏析，
- 3) 牢固地控制混合料下降的位置。

各种各样的设备都被试验过，双层布料、空气偏析和多缝棒式流槽。最近强化筛分布料机已得到发展，它能防止大烧结机中观察到的混合料的“雪崩”现象，为了增加产品的

成品率，增加料层上部的密度的努力已在进行。

6. 测量和控制

一个迅速和良好的操作控制需要一个定时提供足够信息的测量系统。混合料的湿度、点火炉的温度、每个或几个风箱的负压及温度以及返矿率都要经常测量及进行信号处理。以下是经常及附加的测定：通过料层空气流量的分布，⁽⁶⁷⁾料层的温度分布⁽⁶⁸⁾，烧结机尾断面的“红区”面积比例。⁽⁶⁹⁾此外，因为评价产品的化学成分和冶金性能需要一定的时间，从现厂测量这些数据目前为止仍十分困难。FeO测量计是一个例外，它测量磁的敏感性，因而测量到磁铁矿的含量。

目前，使用获得的关系式，把测量的数据与生产率和产品性能比较，作为操作状态和运转的准则。斋野(Saino)等人⁽⁷⁰⁾已开发了一个简化的在线数学模型，用来从有限的感应器中获得的测量数据，来估计燃烧带的纵向的分布和排出气体的温度，并把它作为操作指导系统。弗格森(Ferguson)等人⁽⁷¹⁾报导使用一个统计过程控制以改进工艺生产。于盖(Huguet)及帕兹杰(Pazdej)⁽⁷²⁾提出两个总体指数，即稳定性和质量作为操作的准则。这些准则是一系列从“加权处罚记分法”的准数中获得的。

最近，人工智能(AI)已在操作控制中广泛使用，同时也在目前许多领域内得到使用。这些控制系统⁽⁷³⁻⁷⁵⁾主要是在专家系统的基础上发展起来的，有着模糊的逻辑。通常建立在人类经验基础上的推理，其正确性是难以理解的而有时是错误的。换言之，失败是多半由经验导到的。更进一步讲，很难对付新的和罕见的操作情况。另一方面，理论模型的正确及有效性依赖于我们所采用的假设和给定的计算条件，所需要的基础数据和方程式都还是不足的，因此现在控制系统要利用控制理论及操作人员帮助两者的优点才能取得进步。

7. 烧结产品的成品率和强度

烧结过程不可避免地产生10—30%的返矿，这是与球团生产不同的一个特点。因为返矿数量的减少会自动地减少燃料率和生产率，所以为了减少返矿已经作出了持久的努力。然而已经指出由于返矿的不规则形状使原料的制粒能力更好。一个烧结块破碎后的产品有一定粒度组成，而成品率基本上是由高炉使用的粒度来决定的。通常粒度超过5毫米的烧结矿被使用，粒度超过3毫米的烧结矿的使用也已进行过确实的检验。倘若破碎系统不变则破碎后烧结矿的粒度组成主要依赖于烧结块的强度。这就要求生产强度高的烧结块。然而，我们必须注意到如果破碎系统有选择可能的话，粒度组成将会变化，换句话说，一个软弱的团块最好“轻轻”地破碎。因此，要获得更大的成品率，以下顺序将是合理的策略：1)掌握产品在输送过程和在高炉炉喉装料阶段的足够强度，2)适合于强度的最佳破碎系统，3)改进烧结工艺。团块和烧结矿最大的缺陷是孔隙和裂隙，因此断口受它的控制。然而，如果我们成功地控制缺陷网络，那么很有可能控制破碎产品的粒度组成和减少返矿的数量。通过对烧结矿及团块断面的观察和图象分析已对这些进行了研究。最近通过稻角(Inazumi)⁽²⁸⁾等人的研究将可提供一个基本的方法掌握团块和烧结矿结构的特点。一个烧结内部的成品矿分布已通过把烧结机的台车拉出进行了检验而得到⁽⁷⁶⁾。这些情况将也会给改进操作带来好处。

颗粒的聚合现象已经研究过,它是孔隙结构发展的一个基础。作者们大胆建议为了良好的烧结反应和破碎工艺两者的需要,孔隙必须得到合理的控制,即使他们自己也不知道是否有这种可能性。

关于烧结产品的强度与孔隙度的关系已发现与通常多孔物体一样,它与化学成分和熔体形成数量的关系早就指出来了。也许就是这些因素控制着气孔的形成。从这观点出发,人们已讨论了气孔形成的机理^[78]。施加于高炉炉料的应力及对炉料行为的观察与研究正提供了有效的信息。

8. 在高温下的特性

8.1 还原粉化

在第二部分中所描述的矿物结构的影响已得到了广泛的验证^[79]。1971年报导了在烧结中形成的骸晶状赤铁矿是主要原因,在此基础上对骸晶状赤铁矿的还原粉化性进行了研究。惠恒(Shigaki)等人^[80]认为还原粉化由于骸晶状赤铁矿所具有形状的结果。浅田(Asada)等人^[81]测量了骸晶状赤铁矿在还原中的宏观变形并报告了它随还原气种类而不同。与之相反,一些报告^{[82][83]}通过赤铁矿总量来解释还原粉化性。

裂缝的形成和它的延续与发展,可使碎裂现象得以发生。因此矿物相的机械特性,它虽非碎裂的原由,^{[10][84]}同样非常重要的。于是人们又提出了还原粉化性与各矿物的综合韧性成反比的关系(图7)^[84]。

通过高炉及模拟装置中取出的烧结样品对粉化行为进行了研究。RDI对高炉操作实质的影响是十分重要的,同时也包括试验条件还在不断地讨论着。这些研究课题如配加氯化物于混合料中或把烧结产品用氯化物浸泡处理等。氯化物的效果是为高炉控制碱金属而进行烧结去碱时发现的。后来才报导了^[46]用 FeCl_3 处理的球团矿,在低温(550°C)下还原速

率的减缓。科特曼(Kortman)等人^[87]发现球团矿和烧结矿使用 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 水溶液处理后对RDI产生的作用。田口(Taguchi)等人^[88]报导了烧结矿在 CaCl_2 水溶液处理后,用矿物学分析方法研究其还原行为。综上所述,氯化物的效果是由于在 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 范围内还原的减缓,但超过 600°C 时氯化物挥发,因此还原性恢复。

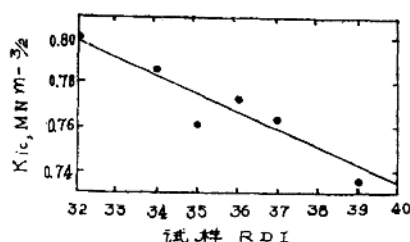


图7.综合断裂韧性 K_{Ic} 作为烧结矿RDI的函数

8.2 还原度

人们已经对还原度在理论、工业上都做了许多的研究工作,即矿物学、动力学及机理方面的研究,虽然他们不可能篇在这篇文章里分别谈及。增加炉料的还原性导致高炉工业的提高如改进生产的稳定性及燃烧。烧结矿的还原性主要是由孔隙和矿物结构决定的。还原性通常由烧结过程的温度状态, FeO 含量以及或由渣相的数量来解释,虽然它可能是间接的,因为孔隙和矿物的形成与它们都有紧密的联系。再者,因为孔隙结构影响强度,而强度也是对孔隙结构易于敏感的

特性,这两种特性实际上有效地控制团块及烧结矿产品的结构。

8.3 软化和熔化完毕

各种各样的测试设备都得到开发,炉料的研究和试验也和很活跃地进行。这是因为日本在70年代曾几次对操作高炉的冷却和解剖而提供了大量的炉料和高炉内的行为和状态的情报,并且认识到了软熔带的形成及已还原由炉料的熔化的重要性。主要评价的指标是料层收缩率、透气性和渣铁的熔毕温度。然而于这些数据与试验条件和设备特点密切相关,因此在这些数据之间也很难作出比较。因此,人们致力选择一个作为高炉模拟器和操作设备有效性相协调的试验条件。软化开始后的还原性和还原过程中熔体的粘度也得到研究。

〔含MgO原料的使用〕含MgO原料,即白云石、橄榄石及蛇纹石都用来改善或控制高炉渣的流动性。含MgO原料对还原粉化的抑制效果也已发现。现在我们已知道白云石的增加会提高熔化开始的温度^[90]。

人们对MgO在烧结矿的软化和熔毕特性的影响上做了许多研究,但结果并不都一致。一般来说,大家都认识到含MgO原料能增加还原性,因为它们在高温下抑制熔体的形成。根据这一观点人们又试用了细磨的蛇纹后,但由于它减弱烧结矿强度而未奏效。

9. 能量回收、环保措施

大量的含有显热的废气、炉尘和各种有害气体,如CO、H₂O、SO₂和碳氢化合物都是由烧结厂排出来的。当然为了环境保护和能量节约,热量的回收和气体循环是十分重要的。在烧结过程中,大约带1.3mJ/t烧结矿的热量,28%的热量消耗于废气的显热与潜热中,28%的热量消耗在烧结矿的显热中,30%的热量消耗于烧结过程的反应中。烧结矿显热的回收技术,即从冷却器中收回废气使之成为蒸气,然后再发电,这些已在70年代建立起来了。然而,对主烟道废气的利用,因为其平均温度低200℃,并且包含各种腐蚀性气体而被推迟。

以下是利用主烟道废气显热可能的方法:1)在点火炉中作为附加燃烧空气使用。2)在烧结料层上循环^[91-93],预热和干燥原料^[94]。燃料消耗率的降低〔(1)(2)(3)〕各种污染气体排出率的降低〔(1)(2)〕和在点火过程中在烧结料层表面的颗粒爆裂的防止(3),都可以从以上方法中得到好处。方法(2)主要在80年代建立起来的,然而即使在建立有冷却机和主要废气回收装置的工厂中,只能有50%的热量能够回收利用。尤其是100℃以下气体热量的回收利用将是今后的一个课题。与此同时,降低CO和/或其潜热的回收利用也必须进行试验。

用最少能量在料层表面进行均匀地点火是点火技术中的主要课题。据报导,一系列新开发的点火炉和粉煤燃烧系统得到了发展^[95-96]。

在第3部分中已讲到减少和去除废气中的NO_x和SO_x的研究。酸雨目前已成为全世界的争论问题,在不久的将来,降低NO_x和SO_x排出将成为烧结过程中的一个严重的和不可避免的问题。总能耗的迅速减少对CO₂排出的迅速减少是十分必要的而CO₂的减少又与另一个全球性的争论“温室效应”有关。研究与开发和从全球的角度来讨论这些问题都是为了摆脱困境而寻求一种方法的手段。不必要说其中包括开发一个新流程来代替传统的炼铁工艺流程。

10. 烧结过程的理论模型

评价与估计操作状态，在工业的离线分析中已使用了理论模型。目前这些模型对改进操作是十有用的⁽⁹⁷⁾⁽⁹⁸⁾。因为用很低的成本可以模拟在各种各样情况下的操作。

威尼斯基(Wgnnycky)和贝塔哈姆(Batterham)的总结⁽⁹⁹⁾使我们从理论上和铁矿石的造块工艺中了解科学与技术的进步。一个理论模型中的假设和数学描述决定人们想从模型中获得的東西而定。然而计算机的容量和速度将会迅速地发展，但目前我们不能“完美”地描述整个烧结过程。因此，人们必须经常选择恰当的描述。

另一个作者们认为烧结结构和它在料层中的变化的描述是不充分的。这已在威尼斯基和贝塔哈姆的总结中指出了⁽⁹⁹⁾。通过烧结料层的气体流量控制着热量转换和化学反应。由于料层的结构反过来又在本质上影响了气体量，因而它的准确的估计是使模型有效而正确地工作的关键。再者烧结产品的成品率和特性都受烧结团块结构的严重影响。柴田(Shibata)等人⁽¹⁰⁰⁾从试验中获得了烧结料层中的几个特征带，即过湿带、干燥带、燃烧带和烧结带的透气性。作者们⁽¹⁰¹⁾测量了烧结料层压降的变化并提出了一个连续计算料层的透气性的模型。然而，这些只不过是一个主观的填补空白的探讨。结构分析最近取得的进步，已在第3部分中描述，它将进一步提高人们对烧结团块结构特性的理解。在烧结料层中对三维孔隙网络定量模型的开发只是一个时间问题。

研究人员和工程师们在致力于铁矿石准备过程中，必须要记住最重要的目标是总成本的降低，但它至少要与炼铁过程中的污染问题相对照。如果准备过程中由于研制的新技术而成本增加，但它导致高炉燃耗更多的降低，那么这种技术的使用当然是值得的。铁矿石准备技术的革新只可能在如此的策略基础上产生。

参考文献略

周琚译 周取定校

矿石特性与烧结矿性能的相关模型

F. Cappel, E. Pfaff

德国缅因州, 法兰克福, 鲁奇股份有限公司

摘要: 一项目的在于确定一种矿石混合料特性与各种烧结指标之间关系的研究, 导致建立了一个模型, 该模型能够确定为达到一组指定的烧结特性需要什么样矿石。研究表明, 一个高的烧结矿强度将导致低的烧结利用系数。如果矿石混合料中粗粒物料的比例高且粒度在 $0.1\sim 1\text{mm}$ 的原料的数量有限时, 则将得到一个高的烧结利用系数。低的燃料需要一个低的 Al_2O_3 含量和有限的粉料含量。在高 Al_2O_3 含量的情况下, 也应该有一个低的粉料含量。

关键词: 烧结, 矿石特性, Al_2O_3 、 Fe_3O_4 , 颗粒粒度分布, 料层高度, 模型。

从1986年4月1日至1988年12月3日在奥特弗里森的选矿研究会(the ore research Institute Studiengesellschaft für Erzaufbereitung in Othfesen)和鲁奇有限公司(Lurgi GmbH)执行了一项研究课题, 由欧州煤钢联营提供部分资助。以便探讨通过在欧洲市场上能够买到最佳的矿石和精矿粉的混合料, 在不降低烧结矿强度情况下, 进一步减少烧结时的燃料消耗和改善烧结矿的还原特性。在该项研究中, 应用最优化技术, 用11种矿石混合料进行了111次烧结杯实验。这些矿石混合料由5种细矿粉和2种精矿粉配制而成。

前5种矿石混合料, 每种含有20%的精矿粉和5%的磁铁矿。在第二种混合料中, 精矿粉B代替了第一种混合料中精矿粉A。从第六种混合料开始, 不再配加磁铁矿。在1~6的混合料中, 变化矿石1~4的配比。混合料7~11的特点是其组份比较特殊, 或是用某种矿石单独进行烧结, 或者采用高比例的精矿粉。

除混合料10以外, 矿石、添加物、燃料的化学组成和粒度范围保持不变。在混合料10中, 仅用 $+1\text{mm}$ 粒级的烧结料, 在某些实验中与矿石2共用。在烧结混合料中, CaO 、 MgO 、 SiO_2 的含量, 点火, 混合料的混料和制粒, 烧结时的抽风负压和烧结矿内应力均保持一定。

料层高度开始时为50cm, 但其后被升至60cm, 部分混合料在这二种料层高度下都进行了试验。在下面的结果论述中, 仅分析了在返矿为30%情况下, 对每种矿石混合料的决定试验, 以便消除返矿率的影响, 由于不同的料层高度和变化矿石2的粒度范围, 得到了16种试验结果, 并进行了分析。在这16次试验中, 每次都确定了30个变量, 包括矿石混合料的矿物组成和粒度范围, 变化的烧结工艺条件, 烧结矿的化学和矿物组成及其性能等。

对这16种选择出来的试验和11种矿石混合料进行了30个变量的简单线性关系和复杂的相关计算。

在这些研究过程中，除了对矿石特性、燃料消耗和还原性之间的关系进行研究以外，同时还发现了一些矿石特性与烧结矿强度与烧结利用系数之间的关系。这就意味着，即使就烧结利用系数和烧结矿强度而言，可以得到过程目标变量与选择的原料之间的依存关系，但仍有必要进一步进行试验来验证这些结论。

图1列出了其相关系数大于或等于90%的各变量间的简单相互关系。

根据这些结果得到，在给定的料层高度下，高岭土和(三)水铝矿含量增加，也就是混合料中 Al_2O_3 含量增加时，将导致焦炭消耗量的增加。当所研究的矿石中(三)水铝矿含量低时，仍在高岭土和矿石混合料中 Al_2O_3 含量间存在密切关系。燃料含量增加时，会导致烧结矿中FeO含量高。当烧结矿FeO含量增加时，它的原生赤铁矿含量将下降。而当 Al_2O_3 含量下降时，烧结矿中赤铁矿总量将升高。赤铁矿量还与三元铁酸盐和铁酸盐总量的增加或减少成反比。随脉石含量的增加，三元铁酸盐含量增加，在前述的条件下，脉石含量也是矿石中高岭土含量的函数。

烧结矿的平均尺寸随着 Al_2O_3 含量、焦炭消耗、FeO含量和三元铁酸盐含量的降低而增加。随着赤铁矿总量的增加而增加。

<3.15mm的还原粉化率随烧结矿中 Al_2O_3 含量，或矿石混合料中高岭土或(三)水铝矿或高岭土含量的下降而降低。

<3.15mm的还原粉化率(ISO4696)和<3.15mm还原粉化指数之间密切相关。

烧结矿中FeO含量，在给定的料层高度下，不仅随焦炭消耗的增加而增加，而且也随混合料中<0.1mm的粒度所占百分率的增加而增加。

值得注意的是，还原性在图1中没有描述出来，然而，图2却描绘了在60cm高料层下，生产出来的烧结矿样中脉石含量与还原性的相关系数为92%，而且还得到，与高岭土含量有关的其它变数和还原性的相关系数要高于80%。对于所有的 R_{40} 值，相关系数低

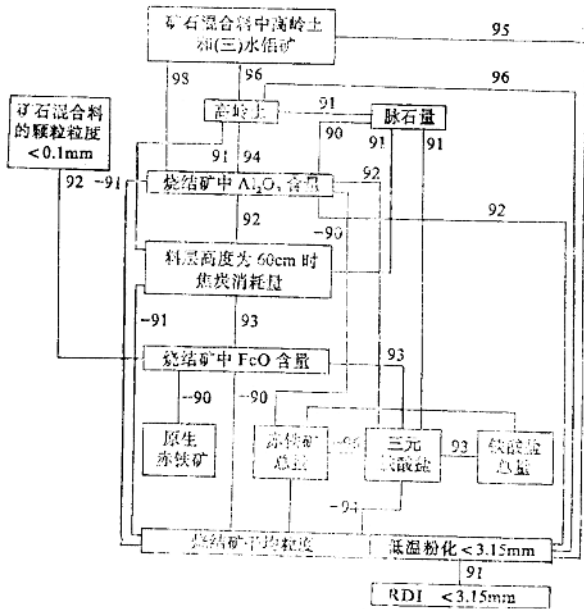


图1.相关系数 $\geq 90\%$

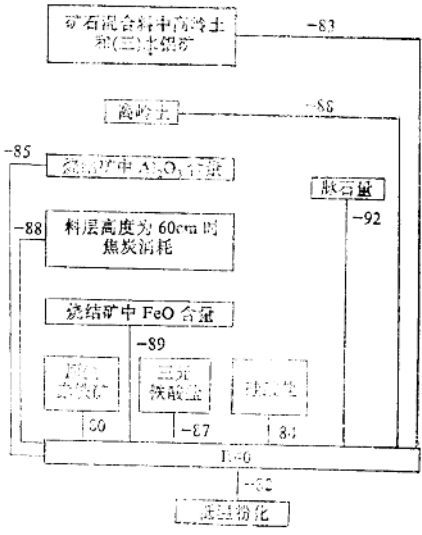


图2.对 R_{40} 和其他数据相关系数 $\geq 80\%$