

张钢原料厂增产降耗试验研究

摘 要

张店钢铁总厂有 128 立方米高炉 4 座，420 立方米高炉 1 座，24 平方米烧结机 4 台。长期以来，由于种种原因，没有炼钢，产品主要是高炉生产的炼钢生铁。所以，企业盈利空间受到很大限制。本文就是针对张钢实际情况探讨增产降耗的途径，使其在市场竞争中处于优势。

通过压辊布料技术的应用，大大抑制了边缘效应，改善了料面点火质量，增加了烧结有效风量，提高了烧结矿的转鼓强度，降低了入炉含粉和 FeO 含量，改善了烧结矿的粒度组成和外观质量，提高了炼铁水平。

针对原料供应情况的变化，大比例配加 PB 粉，通过改进烧结生产工艺，控制烧结工艺参数，可以提高烧结透气性，稳定和改善烧结技术经济指标，满足炼铁生产需要。该技术增大了可用矿石资源，解决了矿石紧张的问题。

在全粗粉烧结、烧结矿碱度不太高（1.80 左右）的情况下，配加蛇纹石粉替代白云石粉作为 MgO 矿源，能够有效地提高烧结矿转鼓强度，改善粒级组成和冶金性能，起到增产降耗的作用。

通过在烧结机上使用高炉废弃物的生产试验，烧结料中配加除尘灰后，烧结矿化学成分波动不大，烧结机利用系数略有提高，烧结过程中固体燃料降低，且设备简单，成本不高，取得了满意的效果。

按照张钢的资源状况及实际生产情况，提出了十组烧结试验配矿方案，分别进行了烧结杯试验，并对所得的烧结矿进行了性能检测。通过不同配矿方案下烧结杯试验、冶金性能测定对比表明：(1)地方精矿粉中 MgO 含量明显高于其他矿粉，其中的 MgO 与其他矿相的反应明显好于单纯配加蛇纹石的效果，因此烧结物料结构中配加适量精粉有利于提高烧结矿转鼓强度。(2)原料厂目前生产的成品烧结矿 900℃还原性、低温还原粉化率分别与方案 9、方案 1 相近，能够满足高炉生产需要。(3)若成品烧结矿中 FeO 含量偏高，则烧结矿还原性较差，如果这时烧结矿的碱度较低，将生成较多的硅酸铁，烧结矿的还原性会更差，但

低温还原粉化率指标较好；若烧结矿中 FeO 含量偏低，则烧结矿还原性较好，但低温还原粉化率指标较差。因此 FeO 控制在合理范围内，并适当提高烧结矿碱度，更有利于高炉生产。

关键词：压辊布料；蛇纹石；PB 粉；除尘灰；烧结配矿

An Experimental Study on increasing production and reducing consumption in The Sintering Plant of Zhangdian Iron and Steel

General Works

ABSTRACT

Zhangdian I & S complex owns four 128 cubic meters BF, one 420 cubic meters BF and four 24 Square meter sinter machine. Its main production is pig iron to make steel. Due to various reasons, we don't make steel during the long time, so the profit is limited. In order to make Zhangdian I & S complex take advantage in the market competition, this paper discusses the way to increasing production and decreasing consumption basing on the actual situation.

With the application of the roll distribution techniques ,we have Significantly developed our ironmaking level by restraining the edge effect, improving the firing quantity of material surface, adding the effective wind amount of sintering ,increasing the drum strength of sinter , reducing the content of the FeO and the powder in the charging materials, and improving the size distribution and the appearance quality of the sinter.

For the purpose of satisfying the need of iron production, we improve the sintering technique, control the sintering process parameters,and add in a large scale with PB power according to different materials. Then the air permeability of sinter can be increased, sintering economic indexes can be stabilized and improved. This technique can solve the problem of ore-short by increasing usable ore resource.

In the condition of totally coarser powder sintering and sinter's pH isn't high (about1.80). Using the serpentine power instead of dolomite power as MgO ore resource can not only improve the drum strength of sintering effectively,but also improve the size fraction and the metallurgical property, then we can raise output and depress consumption.

We have achieved satisfactory results through the production test of using BF wastes in sinter machine .The sinter's chemical components changed little after adding precipitator dust in sintering material. The productivity of sinter machine increased slightly .The solid fuel consumption is lowered during the sintering process. And the equipments are also simple and cheap.

According to Zhanggang's resource situation and practical produce, we made ten sinter ore blending plan, and we have done sinter cup experiments and tested the properties.The conclusion : (1) The content of MgO in local place is higher than other place.The reactions between MgO and other mineral phase are Obviously better than serpentine's. So adding appropriate concentrate in sinter material Structure is help for increasing the drum strength of sinter.(2)At 900°C,the present sinter production made in raw material factory is similar to plan 1 in flat sintering, and is similar to plan 9 in belt sintering. This can meet the need of BF production. (3)If the sinter production has higher content of FeO, the sinter's reducibility will become bad. When the sinter's pH is low, many Fe_2SiO_4 will be made, the sinter's reducibility will become worse. When we reduced at low temperature,the pulverization rates become bad. So we can control FeO in reasonable range and moderately increase the sinter's pH .That's will be better to BF production.

Keywords : roll distribution,serpentine,PB power,precipitator dust,sintering ore blending

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：郑念星 日期：2009.10.30

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：郑念星 导师签名：郑念星 日期：2009.10.30

第一章 文献综述

钢铁工业作为国家的支柱产业，是衡量一个国家工业化水平高低的重要标志之一，在国民经济中占有举足轻重的地位。随着我国科学技术的进步和现代化建设的迅猛发展，钢产量由改革开放之初的 43327 万吨增加到 2006 年粗钢产量 4.188 亿 t 吨^[1]，使得钢铁市场趋于饱和，钢铁工业面临着激烈的竞争^{[2] [3]}，不仅包括钢铁企业内部的竞争，还存在与其他材料工业的竞争。这就意味着钢铁企业必须降低成本，节约能源，向高产、优质、低耗和低成本的方向发展。对于高炉炼铁而言，为了适应发展的需要，必须采取新技术、新工艺以提高高炉利用系数，降低焦比和能耗。如高压操作，高风温，富氧，喷煤等^[4]。烧结矿作为我国高炉炼铁生产的主要人造富矿原料之一，它的质量对冶炼过程及效果具有很大的影响。“精料”是高炉操作的基本内容之一，高炉操作指标离不开烧结矿的质量。生产实践证明^[5]，没有“精料”作基础，高炉是不可能有效的接受大风量、高风温和喷吹燃料等新技术、新工艺的，不可能有高产、优质、低耗的冶炼效果。

1.1 烧结的目的及意义

在钢铁联合企业中，烧结生产具有举足轻重的地位。一方面是因为烧结矿的质量直接影响高炉生产的产量、质量；另一方面，烧结厂不仅是能耗大户，而且它所生产的烧结矿质量将直接影响高炉炼铁的焦比^{[4] [5] [6] [7] [8]}。

铁矿粉烧结是一种铁矿粉造块方法，其是将细粒含铁原料与燃料、熔剂按一定比例配合，加水润湿、混匀而制成烧结料，然后布于烧结机上，通过点火、抽风，并借助烧结料中燃料燃烧产生高温，进而发生一系列的物理化学变化，生成部分低熔点物质，并软化熔融产生一定数量的液相，将铁矿物颗粒润湿粘结起来，冷却后形成具有一定强度的多孔块状产品——烧结矿^[4]。

1.1.1 烧结生产的主要目的

由于在铁矿石开采过程中产生了大量的铁矿粉，特别是贫矿富选为铁精矿粉

的生产发展，使铁矿粉的烧结成为规模最大的造块作业，是现代钢铁工业中重要的生产环节。其主要目的如下^[4]：

(1)将粉状料制成具有高温强度的块状料以适应高炉冶炼、直接还原等在流体力学方面的要求；

(2)通过烧结改善铁矿石的冶金性能，提高高炉冶炼技术经济指标；

(3)通过烧结去除某些有害杂质，回收有益元素，达到综合利用资源和扩大炼铁矿石原料资源。

1.1.2 烧结生产的意义

烧结生产的意义在于^{[7][8]}：

(1)充分合理地利用铁矿石资源，满足钢铁工业发展的需要。由于很多矿石入炉之前都需要进行选矿处理，选矿所获精粉及天然富矿在开采、准备处理过程中会产生粉末，这些粉末不能直接入炉，必须通过造块处理才能供高炉使用。

(2)通过烧结，可进一步改善铁矿石的冶金性能，为强化高炉冶炼提供更好的原料条件。铁矿粉在烧结前经过仔细的混合，成分更均匀；烧结中因固体燃料消失，熔剂分解，液相冷凝收缩，形成大量的孔隙，石灰石、白云石提供的CaO、MgO与矿粉中的其它组分反应，生成有利于还原、造渣的矿物成分；硫、氟、砷等有害杂质能部分去除，使之含量减少，从而使烧结矿具有比天然矿石更好的冶金性能。这样，高炉可以少加或不加生熔剂，使高炉内还原、造渣过程得以改善，同时，也有助于高炉操作制度的稳定，为优质、高产、低耗创造条件。

(3)通过烧结造块，可有效地回收利用冶金、化工等生产部门产生的含铁废料，如矿尘、轧钢皮、钢渣、硫酸渣等，即充分利用了资源，又消除了环境污染，还可以降低成本，增加经济效益和社会效益。

1.2 烧结反应机理

1.2.1 抽风烧结过程概述

目前各烧结厂所使用的烧结机，几乎都是从下部抽风的带式烧结机。

抽风烧结是将准备好的含铁原料、燃料、熔剂，经混匀制粒，布到烧结台车上，台车沿着烧结机的轨道向排料端移动，台车移动的同时用点火器在烧结料面点火并开始抽风，于是烧结反应便开始。点火时和点火后，下部风箱强制抽风，通过料层的空气和烧结料中燃料燃烧所产生的热量，使烧结混合料经受物理和化学的变化，生成烧结矿。到达排料端时，烧结料层中进行的烧结反应即告终结。

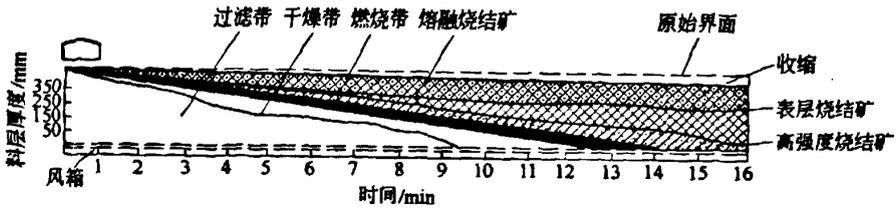


图 1-1 带式烧结机烧结过程进行情况

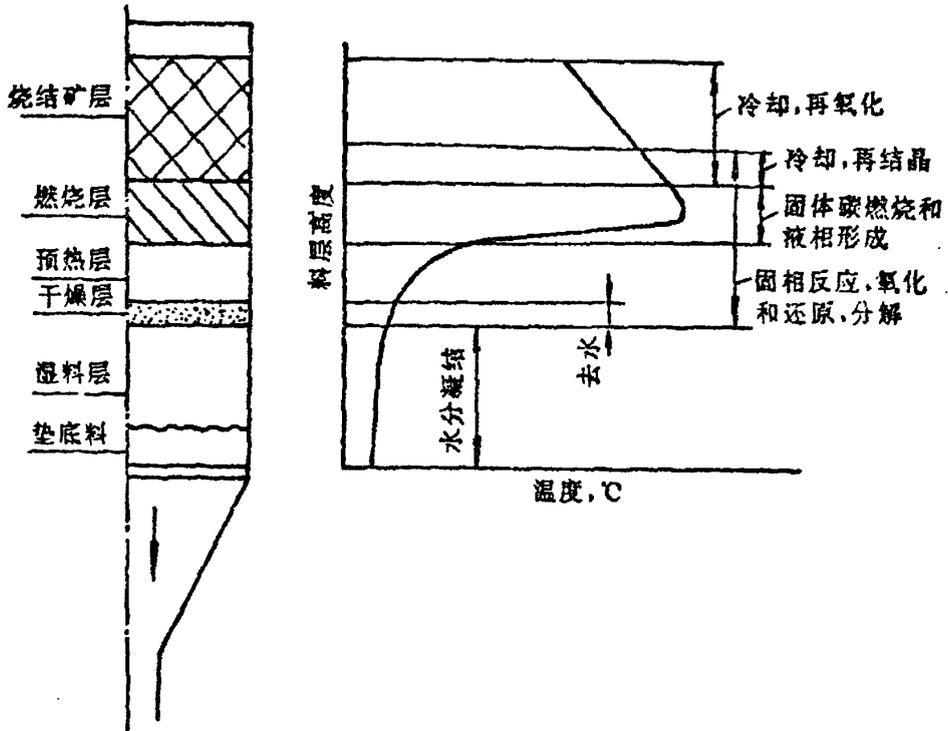


图 1-2 烧结过程各层反应示意图

烧结过程是复杂的物理化学反应的综合过程。在烧结过程中进行着燃料的燃

烧和热交换，水分的蒸发和冷凝，碳酸盐和硫化物的分解和挥发，铁矿石的氧化和还原反应，有害杂质的去除，以及粉料的软化熔融和冷却结晶等。其基本现象是：混合料借点火和抽风使其中的碳燃烧产生热量，并使烧结料层在总的氧化气氛中，又具有一定的还原气氛，因而，混合料不断进行着分解、还原、氧化和脱硫等一系列反应，同时在矿物间产生固液相转变，生成的液相冷凝时把未熔化的物料粘在一起，体积收缩，得到外观多孔的块状烧结矿。

按烧结料层中温度的变化和烧结过程中所产生的物理化学反应，烧结料层可分为五个带（或五层）。点火后，从上往下依次出现烧结矿层、燃烧层、预热层、干燥层、过湿层。这些反应层随着烧结过程的发展而逐步下移，在到达炉算后才依次消失，最后只剩下烧结矿层，如图 1-1 所示。各层中的反映变化情况如图 1-2 所示。

(1) 烧结矿层

在烧结料中燃料燃烧放出大量热量的作用下，混合料中的脉石和部分含铁矿物在固相下形成低熔点的矿物，在温度提高后熔融成液相。随着燃烧层的下移及冷空气的通过，物料温度逐渐下降，熔融液相被冷却凝固成多孔结构的烧结矿。高温熔体在凝固过程中进行结晶，析出新矿物。烧结矿层透气性较混合料好，因此，烧结矿层的逐渐增厚使整个料层的透气性变好，真空度变低。

烧结矿层的主要变化是，高温熔融物凝固成烧结矿，伴随着结晶和析出新矿物。同时，抽入的空气被预热，烧结矿被冷却，与空气接触的低价氧化物可能被再氧化。

(2) 燃烧层

又称高温带，该层燃料激烈燃烧，产生大量的热量，使烧结料层温度升高，部分烧结料熔化成液态熔体。燃烧层温度一般为 1300~1500℃，该层厚度为 15~50 mm，其厚度决定于燃料用量、粒度和通过的空气量。由于熔融物液相对空气穿透阻力很大，所以，为强化烧结过程，人们总设法减弱该层厚度。

燃烧层是烧结过程中温度最高的区域。这里除碳的燃烧、部分烧结料熔化外，还伴随着碳酸盐的分解，硫化物和磁铁矿的氧化，部分赤铁矿的热分解、还原等。燃料燃烧和上部下来的空气显热一起产生的热量，将烧结料加热到一定温度，同时供给下层料以热的气体。

(3) 预热层

空气通过燃烧层参加反应后即携带一部分热量进入下部料层，在燃烧排出的热废气作用下，料层中的水分被蒸发，并使烧结料被加热到燃料的着火温度（700℃），这一区域称为预热层。

预热层的厚度较薄，一般为 20~40 mm，与燃烧层紧密相连，温度一般为 400~800℃。在预热层中由于高温的发展，开始发生碳酸盐的分解、硫化物的分解和着火氧化、结晶水分解、燃料中挥发物的分解和固体碳的着火、部分低价铁氧化物的氧化，以及组分间的固相反应。

(4) 干燥层

从预热带进入下层烧结料的热废气，迅速将物料加热到 100℃以上，因此烧结料中水分激烈蒸发，这一区域称为干燥层，干燥层的厚度一般为 5~25 mm。

在实际烧结过程中预热层与干燥层难于截然分开，因此有时统称干燥预热层，干燥层虽然很薄，但由于水分激烈蒸发，成球性差的物料团粒易被破坏，使整个料层透气性变差。

(5) 过湿层

从烧结开始，通过烧结料层中的气体含水量就开始逐渐增加，这是因为点火后部分烧结料所蒸发的水汽进入气流中。当下部烧结料温度低于“露点”温度（一般为 60~65℃）时，气流中的水汽冷凝。因此，这部分的烧结料含水量就超过了原始水分而出现了过湿现象，所以这一区域称为过湿层，它位于干燥层之下。

由于水汽冷凝，使得料层的透气性恶化，对烧结过程产生很大的影响。

1.2.2 燃料的燃烧与热交换

烧结料层中碳的燃烧特点：一是料层中燃料较少而分散，按质量计燃料只占总料重的 3%~5%，按体积计不到总体积的 10%；小颗粒的炭分布于大量矿粒和熔剂之中，致使空气和炭接触比较困难，为了保证完全燃烧需要较大的空气过剩系数（通常为 1.4~1.5）。二是燃料燃烧从料层上部向下部迁移，料层中热交换集中，燃烧速度快，燃烧层温度高。并且燃烧带较窄（15~50 mm），料层中既存在氧化又存在还原区，炭粒表面附近 CO 浓度高，O₂ 及 CO₂ 浓度低；同时铁的氧化物参与了氧化还原反应，燃烧废气离开料层时还存在着自由氧等，

这些燃烧特点，决定着料层的气氛；而不同的气氛组成对烧结过程将产生极大的影响。总之，宏观讲烧结料层的气氛是氧化性气氛，但在炭粒附近存在局部还原性气氛。

燃烧带是温度最高区域，其温度水平主要取决于固体燃料燃烧放出的热量，同时与空气在上部被预热的程度有关。因而，在烧结过程中，随着燃烧带下移，由于上层烧结矿层具有“自动蓄热”作用，最高温度逐渐升高。

1.2.3 水分的蒸发、分解与冷凝

水分是影响烧结过程的又一因素。烧结混合料中水的来源有两个方面，一是物料自身带入的，二是烧结料混合制粒时加入的。

当烧结过程开始后，在料层的不同高度和不同的烧结阶段水分含量将发生变化，出现水分的蒸发和冷凝现象。

在过湿层，冷凝水充塞料粒之间的空隙中使料层过湿，增加了气流阻力，而且过湿现象会破坏下部料层松散的小料球，过湿严重时甚至会变成糊状，进一步恶化了料层的透气性，影响烧结过程的正常进行。

1.2.4 碳酸盐分解及氧化钙的矿化作用

烧结料常常配入石灰石（ CaCO_3 ）、白云石（ $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ）等，尤其生产熔剂性烧结矿配入的熔剂就更多。这些碳酸盐类矿物在烧结过程中被逐渐加热，当温度达到一定值时，碳酸盐发生分解，并进入渣相。如果没有分解或者分解后没有造渣，烧结矿带有“白点”影响烧结矿的品质。

生产熔剂性烧结矿时，不仅要求添加的石灰石完全分解，而且分解产物 CaO 与矿石中的某些矿物应很好的化合。这就是说不希望在烧结矿中存在着游离的 CaO ，否则游离的 CaO 与水消化： $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$ ，其结果使体积膨胀一倍，致使烧结矿粉化。

CaCO_3 的分解产物 CaO 与 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等矿化作用分别形成 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2 \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。反应生成新的化合物，使石灰石的开始分解温度降低。

1.2.5 烧结过程中金属氧化物的分解、还原与氧化

在烧结过程中，由于温度和气氛的影响，金属氧化物要发生热分解、还原与氧化反应，这些反应的发生对烧结熔体的形成，烧结矿的强度和冶金性能关系极大。

(1) 金属氧化物的分解

铁、锰与氧生成一系列氧化物。铁的氧化物有 FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 。在同一金属氧化物中，高价氧化物比低价氧化物的分解压大，就是说高价氧化物稳定性差，容易分解。在铁的三个氧化物中，只有 Fe_2O_3 在冶金温度下可以分解。由于烧结物料在高温区停留时间短及 Fe_2O_3 大量被还原，因此 Fe_2O_3 分解率小；而磁铁矿在烧结温度下理论上是不可能进行热分解的，但有 SiO_2 存在的条件下，大大的改善了分解条件，在高于 1300°C 温度时，有可能分解。在烧结条件下， FeO 的分解是不可能的。烧结中有少量金属铁出现是铁氧化物被还原的结果。

(2) 金属氧化物的还原

烧结料层中由于碳的燃烧，在炭粒周围具有还原气氛，铁氧化物还原是以碳的质点为中心进行的。料层的固体碳及 CO 是很好的还原剂， C 、 CO 能够夺取铁氧化物中的氧，使其变成低价氧化物或金属铁。铁的三种氧化物 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO 的还原顺序是从高价氧化物到低价氧化物逐级进行的。

(3) 铁氧化物的氧化

烧结料层总的气氛是弱氧化性的，特别是远离炭粒的混合料处和在烧结矿的冷却过程中，都会发生 Fe_3O_4 和 FeO 的再氧化现象。烧结矿中 Fe_3O_4 和 FeO 的再氧化，提高了烧结矿的还原性，因此在保证烧结矿强度条件下，发展氧化过程是有利的。

1.2.6 固相之间的反应

所谓固相反应是指物料在没有熔化前，两种固体在他们接触面上发生的化学反应。反应产物也是固体。

1.2.7 液相生成与冷却结晶

固相反应速度慢，其反应产物晶格发展不完善，结构疏松，烧结矿强度差。因此，对铁矿粉来说，属于液相型烧结，也就是说烧结过程中，液相生成是烧结料固结成型的基础。液相的组成、性质和数量在很大程度上决定了烧结矿的产量和品质。

(1) 液相生成概念

固相反应生成的化合物，其熔点要比单体矿物低。例如 Fe_3O_4 的熔点 1597°C ， SiO_2 的熔点 1713°C ，而固相反应产物 $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 的融化温度只有 1205°C 。这有利于液相的生成。

在烧结过程中，由于燃料燃烧放出大量热量，加热烧结料，当其温度超过固相反应的温度时，就有低熔点化合物生成、低熔点共熔物生成，如 $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ， $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等。矿物的熔点低，首先熔化，较早形成液相。由于液相的存在，固体颗粒被一层液相所包围，在液相表面张力的作用下，使颗粒互相靠紧。因此，烧结料密度增加、空隙缩小、颗粒变形、冷凝时颗粒质点重新排列，生成具有一定强度的烧结矿。随着烧结过程的发展，烧结温度迅速提高，初期形成的液相不断扩大，与此同时，又形成新的化合物继续熔化；液相量不断增加，使液相区进一步扩大，各液相区互相合并连通成为黏接相。

(2) 烧结过程的主要液相

烧结过程中主要液相有：铁—氧体系、硅酸铁体系、硅酸钙体系、铁酸钙体系、钙铁橄榄石体系等。

由于烧结料中的组分多种多样，其数量也是各不相同的，烧结料层的温度和气氛也是变化的。因而形成的化合物和液相组成也是极为复杂的。

液相的数量和性质，密切关系着烧结矿的产量和品质。显然，为了获得强度好的烧结矿，就必须具有足够数量的液相作为烧结过程中的胶结相。

(3) 液相冷却结晶

随着燃烧带下移，料层上部烧结矿便开始冷却结晶。烧结矿在冷却过程中仍发生许多物理化学变化，冷却过程对烧结矿品质影响很大。

随着烧结矿层的温度降低，其液相中的各种化合物开始冷却结晶。结晶的原则是：熔点高的矿物首先开始结晶析出，所剩液相熔点依次越来越低，然后才

是低熔点矿物析出。

1.3 烧结生产工艺

目前生产上广泛采用带式抽风烧结机生产烧结矿。烧结生产的工艺流程如图 1-3 所示。主要包括烧结原料的准备和加工处理，配料，混合与制粒，烧结和产品处理等工序。

1.3.1 烧结原料的准备和加工处理

烧结生产对铁矿石、熔剂、燃料的粒度都有一定的要求，当原料粒度较大不符合要求时，需要对原料进行破碎和筛分处理

1.3.2 配料

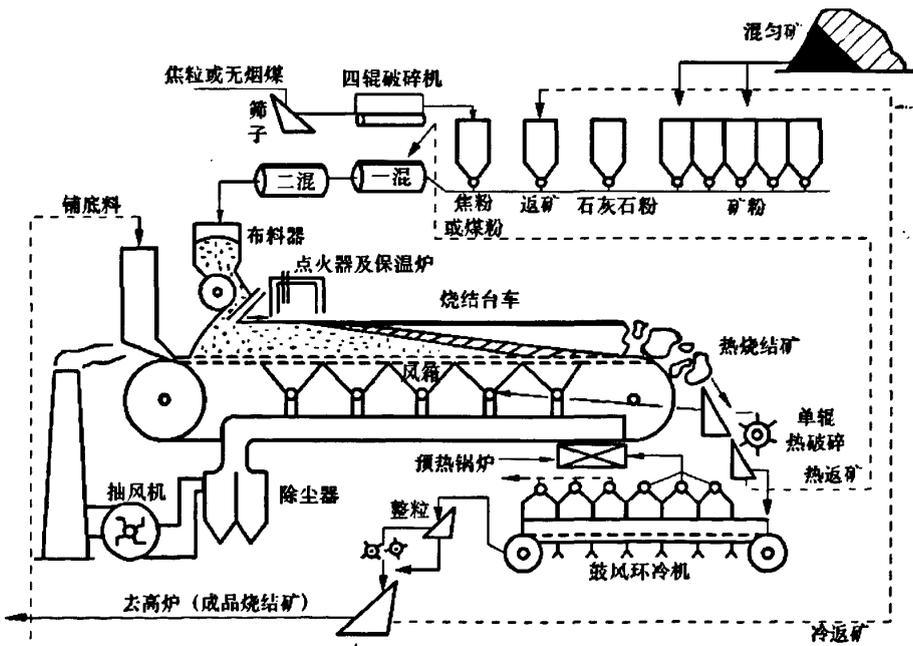


图 1-3 抽风烧结工艺流程

所谓配料就是根据高炉对烧结矿的产品质量要求及原料的化学性质，将各种原料、熔剂、燃料、代用品及返矿等按一定比例进行配加的工序。

配料是高炉优质、高产、低耗的先决条件，是获得优质烧结矿的前提。烧结矿使用的原料种类多，物理化学性质各不相同。烧结厂必须根据本厂原料的供应情况及物理化学性质选择合适的原料，通过计算确定配料比，并严格按配比确定每条电子称皮带下料量，经常进行重量检查及时调整。

目前国内常用的配料方法有两种，即容积配料法和重量配料法。

1.3.3 混合与制粒

混合制粒的目的有三：第一，将配料配好的各种物料以及后来加入的返矿进行混匀，得到质量比较均一的烧结料；第二，在混合过程中加入烧结料所必须的水分，使烧结料为水所润湿；第三，进行烧结料的造球，提高烧结料的透气性。总之，通过混合得到化学成分均匀、粒度适宜、透气性良好的烧结料。

为了达到上述目的，将原料进行两次混合。一次混合主要是将烧结料混匀，并起预热烧结料的作用。二次混合主要是对已润湿混匀的烧结料进行造球并补充水分。我国烧结厂一般都采用两次混合工艺。

物料在混合机混匀程度和造球的质量与烧结料本身的性质、加水润湿的方法、混合制粒时间、混合机的充填率及添加物有关。

1.3.4 烧结生产

一般烧结生产时，首先要在烧结机的台车炉篦上铺上一层较粗粒级的（10~25mm）的烧结料。这部分料被称为铺底料。采用铺底料后，台车篦条粘料基本消除，无需专门设清料装置，便于实现烧结机自动控制。

铺底料之后，紧接着就进行烧结混合料的布料。布料时，应使混合料在粒度、化学成分及水分等沿台车宽度均匀分布，并且具有一定的松散性。烧结机上布料均匀与否，直接影响烧结矿的产量、质量，是烧结生产的基本要求。

为了使混合料内燃料进行燃烧和使表层烧结料粘结成块，烧结料的点火必须满足：

- (1) 有足够高的点火温度和点火强度。
- (2) 适宜的高温保持时间。
- (3) 沿台车方向点火均匀。

所以，点火操作也是烧结过程的基础，点火的好坏将直接影响烧结过程能否顺利进行以及表层烧结矿的强度。点火时间一般为 60 秒。点火温度，对于铁矿石烧结，一般介于 1150~1300℃。

带式烧结机抽风烧结过程是自上而下进行的。烧结过程是以在混合料表层的燃料点火开始的。点火开始以后，依次出现烧结矿层，燃烧层，预热层，干燥层和过湿层。然后后四层又相继消失，最终只剩烧结矿层。

1.3.5 烧结矿的冷却与整粒

烧结矿在烧结机上烧成后从机尾卸下时其温度大约在 600~1000℃，对这样的赤热烧结矿，一般要将其冷却到 150℃ 以下，这是因为以下几个原因：

- (1) 保护运输设备，使厂区配置紧凑；
- (2) 保护高炉炉顶设备及高炉矿槽；
- (3) 改善高炉、烧结厂的劳动条件；
- (4) 为烧结矿的整粒及分出铺底料创造了条件；
- (5) 为实现高炉生产技术现代化创造条件。

烧结矿的冷却方式很多，从方法上来分，有自然冷却和强制通风冷却两类；从冷却的地点和设备来分，有烧结机外冷却和烧结机上冷却两种。烧结机外冷却，即烧结矿在烧结机上烧成之后卸出来，另外进行冷却。机上冷却，机上冷却的方法是将烧结机延长，将烧结机的前段作为烧结段，后段作为冷却段，当台车上的混合料在烧结段已烧成为烧结矿后，台车继续前进，进入冷却段，通过抽风将热烧结矿冷却下来，一般情况下烧结段与冷却段备有专用的风机。

烧结矿的整粒，就是对烧结矿进行破碎、筛分，控制烧结矿上、下限粒度，并按需要进行粒度分级，以达到提高烧结矿质量的目的。烧结机的铺底料也在筛分过程中分出。经过整粒后的烧结矿粒度均匀、粉末少、强度高，这对改善高炉冶炼指标有很大作用。一般情况下，烧结矿整粒后保持在 50~5mm（或 60~5mm，对于小型高炉可保持在 35~5mm）范围内，其中经整粒后的粉末含量（5~0mm），不超过 5%。

1.4 国内外烧结发展概况

1.4.1 国外烧结发展概况

烧结法是迄今除北美以外使用最广的铁矿石造块方法^{[1][9][10]}。在过去十几年中，世界上烧结矿年产量维持在 530~586Mt 范围内^{[11][12]}。从 1989 年起，由于前苏联和其它部分东欧国家发生巨变，导致其整个钢铁工业的重新调整，致使世界烧结矿产量有所下降。同时，欧洲和日本的经济衰退也影响到世界烧结矿的产量。但近年来，随着中国、朝鲜等国家的烧结矿产量持续增加及东欧国家经济的回升，使世界烧结矿产量呈上升的态势。

铁矿石烧结工艺是将细粒含铁物料进行造块，以保证高炉料柱的良好透气性，它不仅是将细粒物料造块，而且要对高炉原料进行初步的热加工，以提高高炉炼铁的技术经济指标。自 1887 年英国人 F. 格别尔列因(F. Heberlin)和 T. 汗金顿汀(T. .Huntington)在伦敦获得世界上第一项关于硫化矿烧结培烧法和用这种方法的烧结盘设备专利以来，烧结设备及工艺发生了较大地变化。特别是德怀特、劳埃得和贝尼特于 1906 年在美国取得抽风带式烧结机的专利权，这在冶金工业发展史中具有里程碑的作用，该设备一经出现，就很快取代了压团机和烧结盘设备。目前在世界上正在运行的带式烧结机共约有 100 多台，世界烧结矿总产量在上世纪 90 年代达到每年 5.3 亿吨以上^{[13][14]}。

烧结生产除要满足高产、低耗的技术指标外，其生产的烧结矿还需满足高炉冶炼提出的诸如机械强度、还原性等性能指标。高炉炼铁的生产实践表明，炉料质量最佳化是炉料结构合理化的基础，烧结矿质量的微小改善即可使高炉冶炼成本明显下降^[15]。所以，长期以来对烧结技术和基础理论的研究一直为国内外冶金界所重视。特别是 20 世纪 80 年代以来，烧结技术得到了快速地发展，主要体现在烧结工艺和新技术的研究开发和应用。烧结工艺方面如自动化配料、混合机强化制粒、偏析布料、冷却筛分、整粒技术及铺底料技术等；新技术主要表现为球团烧结技术、小球烧结技术、低温烧结技术、低硅烧结技术等^[16]^{[13][17]} ^[18] ^{[19][20][21]}。但是在基础理论方面，由于烧结过程伴随着许多复杂的物理化学变化，致使以往对烧结过程基础理论的研究主要停留在定性水平。近年来随着电子计算机应用技术的普及，实现烧结生产过程中的最优控制，以进一步

争取优质、高产、低耗已经引起冶金界的广泛关注。与此同时，烧结过程基础理论的定量研究及烧结过程数学模型的开发应用得到迅速发展。日本、西欧、北美、澳大利亚等国均就此投入了相当的研究力量，并取得了显著成就^{[22][23][24][25]}，不少研究成果已在生产中初步得到应用并取得了显著的经济效益。

1.4.2 国内烧结发展概况

我国自上世纪 70 年代以来，铁矿粉造块工业取得了很大的成就。1970 年以前，我国烧结机的机型都在 75m^2 以下。70 年代以后，特别是 1985 年宝钢从日本引进的 450m^2 大型烧结机投产，使我国烧结机的大型化上了一个台阶。到 2003 年底，我国已建成并投产的特大烧结机(450m^2 以上)5 台，全国拥有烧结机 330 台，总面积约 26827m^2 ，年产烧结矿 2.26 亿吨以上，使我国已成为世界上烧结矿生产第一大国。其发展情况及成就如下^{[18][26][27][28][29][30]}：

(1) 自 1978 年马钢冷烧技术攻关成功后，“六五”、“七五”期间一批重点企业和地方骨干企业基本完成热烧改冷烧工艺。相当部分企业建成并使用原料中和混匀料场，绝大部分厂家实现了自动化配料、混合机强化制粒、偏析布料、冷却筛分、整粒技术及铺底料技术等；

(2) “七五”、“八五”以来，在传统烧结工艺基础上开发了一批新工艺和新技术，并在国内各大钢铁企业推广应用，如高碱度烧结技术、球团烧结技术、小球团烧结技术、低温烧结技术、低硅烧结技术等。

(3) 设备大型化和自动化。20 世纪 70 年代初以前，我国最大烧结机为 75m^2 ，80 年代初，我国在宝钢引进了 450m^2 的大型烧结机及其配套设备，同时引进了烧结机的制造技术。到 2003 年底，我国已建成和投产 14 台 $265\sim 450\text{m}^2$ 的大型烧结机和 49 台 $90\sim 180\text{m}^2$ 的中型烧结机，大中型烧结机的总面积达到 11068m^2 ，占烧结机总面积的 54%。同时，一些钢铁企业都逐步在提高烧结机的单机面积以适应烧结技术的发展。我国自 1989 年以后投产的大中型烧结机的工艺技术装备和自动化水平得到提高，实现了较为完善的过程检测和控制项目，并采用计算机控制系统对生产过程自动进行操作、监视、控制及生产管理。

1.4.3 国内烧结增产降耗发展现状

为了满足高炉冶炼对精料日益增长的要求，烧结生产必须不断提高其产量和质量，降低能耗及生产成本，改善技术经济指标，从而为高炉生产提供数量充足，强度高，粉末少，粒度均匀，还原性好和成份稳定的烧结矿。烧结生产受着原燃料特性、烧结工艺参数、设备状况及操作条件等多种因素的影响，应通过精心备料，强化混合制粒，优化烧结工艺参数，提高操作条件和水平，采用新技术、新工艺，强化烧结生产。目前主要通过以下几个方面措施^[31]，以达到增产降耗之目的。

(1)加强原料准备，改善料层透气性。通过改善烧结透气性，可以在不增大抽风能力和电耗的条件下，增加烧结风量，提到垂直烧结速度，改善料层烧结的均匀性，从而提高烧结生产率和烧结矿的机械强度。长钢、鞍钢集团鞍山矿业公司东鞍山烧结厂采用小球烧结技术^[32]，济钢、莱钢采用热风烧结节能技术^{[33][34]}等都属于这种方法。

(2)采用大风量、高负压烧结，并减少漏风损失，增大有效风量。石钢提高风量的方法，使其烧结矿的产量和成品率都得到了提高^[35]。

(3)发挥烧结矿层自动蓄热作用，采用厚料层烧结，如鞍钢、武钢^{[36][37]}。

(4)采用余热利用技术。余热是指热设备或系统排出的热量中可以回收利用的那部分热量，余热的利用有的采用余热发电^[38]，有的利用余热生产蒸汽^{[39][40]}。

1.5 研究的目的和意义及主要内容

张店钢铁总厂位于山东淄博，隶属于山东钢铁集团，主要生产设备有 128 立方米高炉 4 座，420 立方米高炉 1 座，24 平方米烧结机 4 台。长期以来，由于种种原因，没有炼钢，产品主要是高炉生产的炼钢生铁。所以，企业盈利空间受到很大限制，如何增产降耗显得比其他企业更为重要。提高烧结生产的产量就可以创造更大的生产效益，降低烧结过程中的原材料和能源消耗就能很好的降低成本，就可以使自己在市场竞争中处于优势。烧结生产如何增产降耗？张钢原料厂进行了增产降耗试验研究。根据张钢的实际情况，主要从以下几个方面展开试验研究，以期达到使张钢原料厂增产降耗的目的。

- (1)应用压辊布料技术;
- (2)烧结配料中添加蛇纹石代替白云石;
- (3)烧结生产配加 PB 矿粉试验;
- (4)烧结生产中加入除尘灰;
- (5)优化烧结物料结构,进行烧结矿配矿试验。

第二章 实验设备及实验方法

2.1 烧结设备

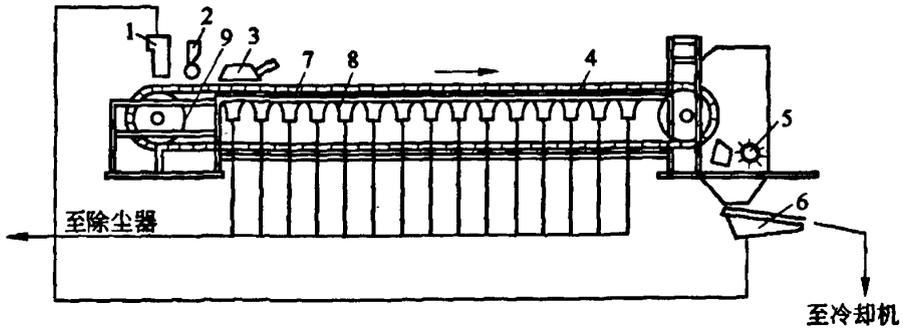


图 2-1 烧结机示意图

- 1—铺底料布料器；2—混合料布料器；3—点火器；4—烧结机；5—单辊破碎机；
6—热矿筛；7—台车；8—真空箱；9—机头链轮

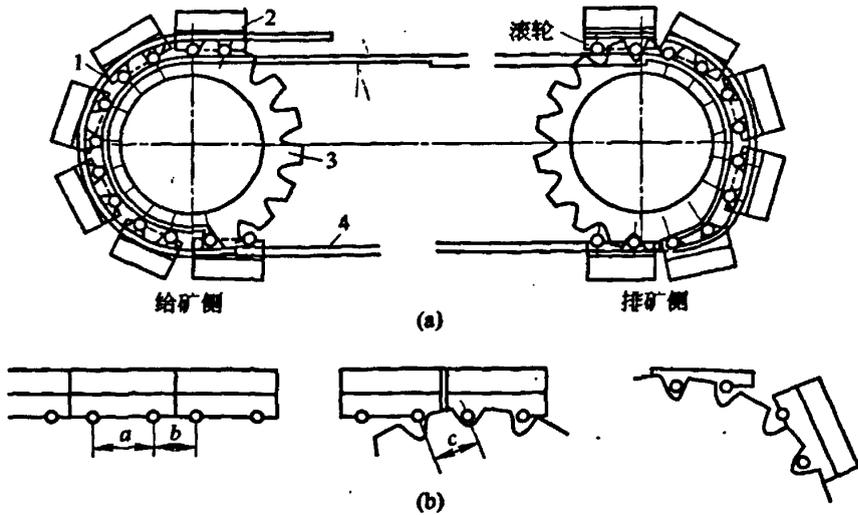


图 2-2 台车运动简图

- a—台车运动状态；b—台车尾部链轮运动状态

- 1—弯轨；2—台车；3—链轮；4—导轨

张钢原料厂有两种类型的烧结机：带式烧结机和步进式平面烧结机。

2.1.1 带式烧结机

张钢有两台 24m² 烧结机。带式烧结机由烧结机本体和布料器、点火器、抽风除尘设备等组成，图 2-1 为烧结机示意图。

烧结机本体主要包括：传动装置、台车、真空箱、密封装置。

烧结机的传动装置，主要靠机头链轮（驱动轮）将台车由下部轨道经机头弯道，运到上部水平轨道，并推动前面台车向机尾方向移动。如图 2-2 所示，链辘与台车的内侧滚轮相啮合，一方面台车能上升或下降，另一方面台车能沿轨道回转。烧结机头部的驱动装置由电动机、减速机、齿轮传动和链轮等部分组成，机尾链轮为从动轮，与机头大小形状都相同，安装在可沿烧结机长度方向运动的并可自动调节的移动架上。

带式烧结机是由许多台车组成的一个封闭式的烧结带，所以，台车是烧结机的重要组成部分。它直接承受装料、点火、抽风、烧结直至机尾卸料，完成烧结作业。烧结机有效烧结面积是台车的宽度与烧结机有效长度的乘积。台车由车架、拦板、滚轮、算条和活动滑板（上滑板）五部分组成，如图 2-3 所示。

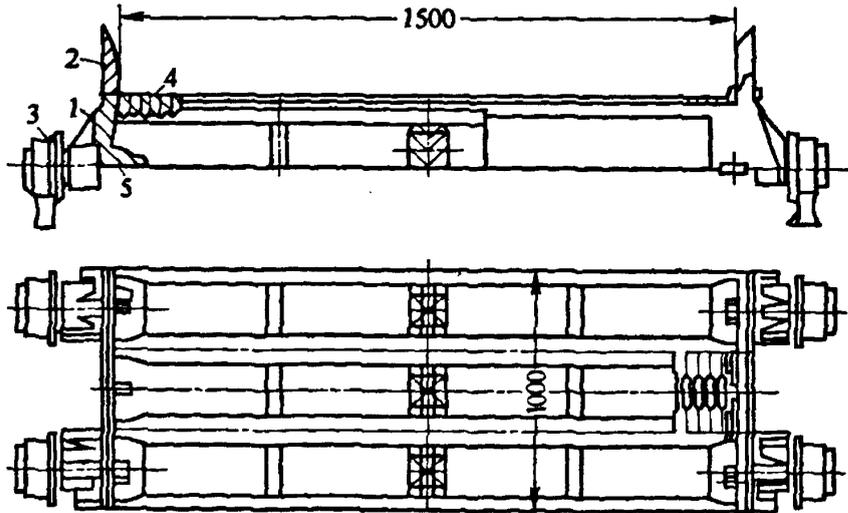


图 2-3 烧结机台车

1—车架；2—拦板；3—滚轮；4—弊条；5—滑板

真空箱装在烧结机工作部分的台车下面，风箱用导气管（支管）同总管连接，其间设有调节废气流的蝶阀。

台车与真空箱之间设有密封装置。

2.1.2 步进式平面烧结机

张钢有两台 24m² 步进式平面烧结机。步进式平面烧结机主要由烧结台车、机前渡车、机尾翻车、液压推车、回车装置、给料装置、点火器、端部密封、风箱滑道、除尘系统、干油润滑系统、风机等几个主要部分组成，如图 2-4 所示。

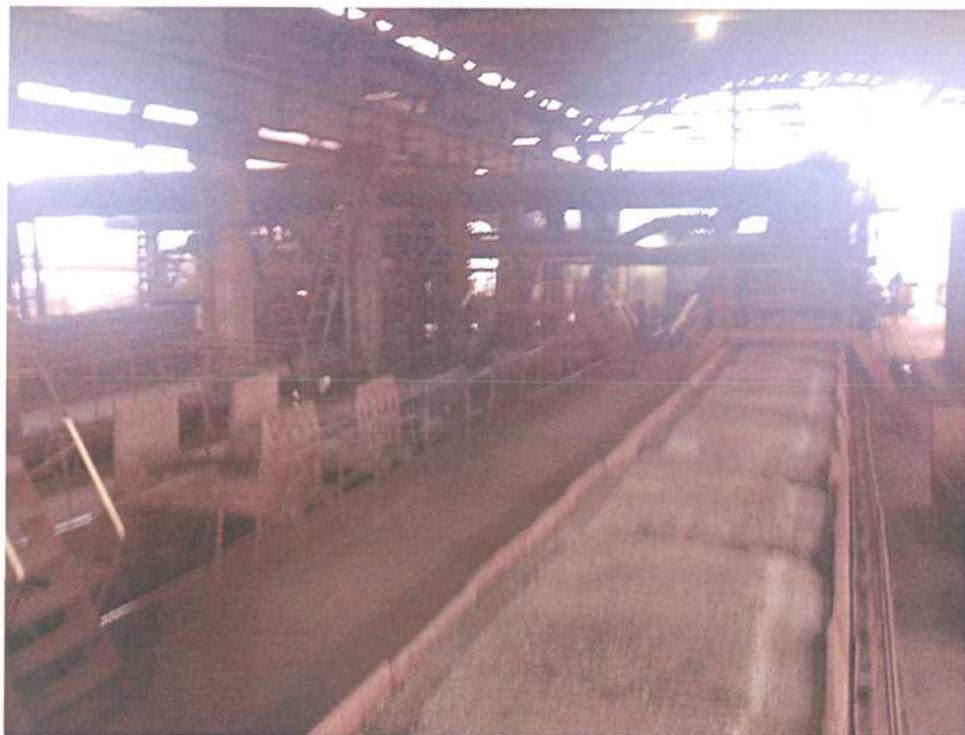


图 2-4 步进式平面烧结机图

2.2 烧结性能测试方法

对烧结矿和球团矿的质量要求和检验项目，不仅限于化学成分、粒度组成和常温机械强度，还必须包括高温冶金性能，如低温还原粉化率，中温还原强度，中、高温还原性以及高温软化熔滴性等。本文主要对烧结矿的化学成分及其稳定性、转鼓强度、还原性、低温还原粉化性、高温软化与滴落性能等质量指标进行检测。

2.2.1 烧结矿化学成分及其稳定性

成品烧结矿的化学成分主要检测： TFe ， FeO ， CaO ， SiO_2 ， Al_2O_3 ， TiO_2 ， S 等。烧结矿碱度 R 一般用烧结矿中的 CaO 与 SiO_2 质量百分数的比值表示。

化学成分使用 Simultix 11 型 X 射线荧光光谱仪采用粉末压片法检测。

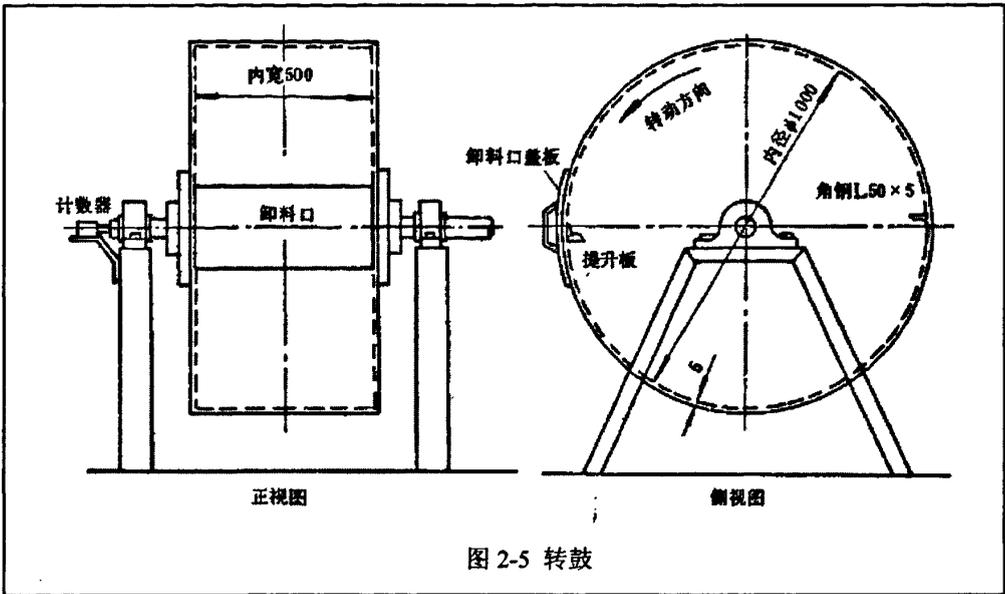


图 2-5 转鼓

2.2.2 转鼓强度

转鼓强度是评价烧结矿常温强度的一项重要指标。我国烧结矿转鼓指数和抗磨指数的测定方法按 YB / T5166 执行。

转鼓强度用转鼓试验机测定。转鼓用 5 mm 厚钢板焊接而成，转鼓内径 $\Phi 1000$ mm，内宽 500 mm，内有两个对称布置的提升板，用 50 mm \times 50 mm \times 5 mm，长 500 mm 的等边角钢焊接在内壁上，如图 2-5 所示。转鼓由功率不小于 1.5 kW \cdot h 的电动机带动，规定转速为 (25 ± 1) r / min，共转 8 min，200 转。

测定方法：取烧结矿试样 15 ± 0.15 kg，以 40.0 \sim 25.0 mm、25.0 \sim 16.0 mm、16.0 \sim 10.0 mm 三级按筛分比例配制而成，装入转鼓，进行试验。试样在转动过程中受到冲击和摩擦作用，粒度发生变化。转鼓停后，卸出试样用筛孔为 6.3

mm×6.3 mm 和 0.5 mm×0.5 mm 的机械摇动筛，往复 30 次，对各粒级质量进行称量，并按下式计算转鼓指数：

$$\text{转鼓指数} = \frac{\text{转鼓后} > 6.3 \text{ 的质量}}{\text{入鼓烧结矿质量}} \times 100\%$$

转鼓指数越高，烧结矿的机械强度越好。

2.2.3 烧结矿的还原性

烧结矿的还原性是模拟炉料自高炉上部进入高温区的条件，用气体还原剂从烧结矿中夺取与铁结合氧的难易程度的一种度量，以还原度和还原速率（即每分钟的还原度）表示。它是评价烧结矿（或铁矿石）冶金性能的主要质量指标。

(1) 试验设备

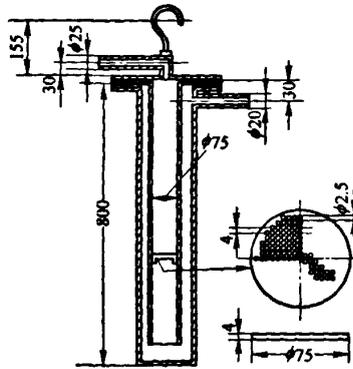


图 2-6 还原管示意图

（多孔板：孔径 2.5 mm；孔距 4 mm；空数 241；

总孔面积 1180 mm²；板厚 4 mm）

还原管：双壁 $\Phi_{\text{内}} 75 \text{ mm}$ ，由耐热不起皮的金属板（如 GH44 镍基合金板）焊接而成，能耐 900℃ 以上的高温，为了放置试样，在还原管中装有多孔板，还原管的结构和尺寸如图 2-6 所示。

(2) 还原性的测定

还原性的测定采用我国 GB / T 13241—91 国家标准试验方法。其测定的基本原理是：将一定粒度范围（10.0~12.5mm）的烧结矿置于还原管中，用 CO 和 N₂ 组成混合气体，在 900℃ 下等温还原。还原 3 小时后计算失重量（即为还原过程的失氧量），将此失重量与还原前试样中同铁结合的总氧量（Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 含氧量之和）之比，作为衡量还原度的指标；还原度越高越好，FeO 含量越高还

原度越低。标准规定，以 180 min 的还原度指数作为考核指标，用 RI 表示。

2.2.4 烧结矿低温还原粉化性能检测

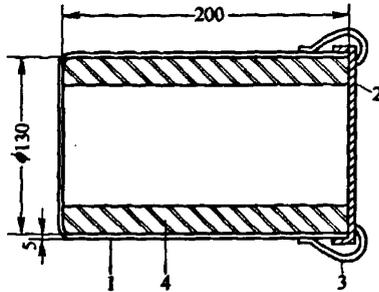


图 2-7 转鼓

1—转鼓圆筒；2—密封盖；3—固定卡子；4—提料板（200 mm×20 mm×2 mm）

烧结矿低温还原粉化性能是指烧结矿在 400~600℃ 的温度下还原时，产生粉化的程度。我国测定烧结矿低温还原粉化性能采用静态法。静态法是将一定粒度（10.0~12.5mm）的试样置于一固体床中，在 500℃ 下，用 CO、CO₂ 和 N₂ 组成的还原气体进行静态还原。还原 1 小时后，将试样冷却至 100℃ 以下，在室温下用小转鼓(如图 2-7)转 300 转，然后用筛孔为 6.3mm、3.15mm、0.5mm 方孔筛筛分，用大于 3.15mm 的试样与其总量相比所得的百分数代表低温还原粉化指数，称为 RDI_{+3.15}；用大于 6.3 mm 的试样与其总量相比所得的百分数代表还原强度指数，称为 RDI_{+6.3}；用小于 0.5mm 的试样与其总量相比所得的百分数代表磨损指数，称为 RDL_{0.5}。

2.2.5 高温软化与熔滴性能

高炉内软化熔融带的形成及其位置，主要取决于高炉操作条件和炉料的高温性能。而软化熔融带的特性对炉料还原过程和炉料透气性将产生明显的影响。为此，许多国家对铁矿石软化性的实验方法进行了广泛深入研究。但是，到目前为止试验装置、操作方法和评价指标都不尽相同。一般以软化温度及温度区间，滴落开始温度和终了温度，熔融带透气性，熔融滴下物的性状作为评价指标。熔融特性试验装置简图见图 2-8。

通常测定时，将规定粒度和质量的矿石试样，经预还原 60%（或不经预还原）后，放入底部有孔的石墨坩埚内，试样上下各铺有一定厚度的焦炭，焦炭除起直接还原和渗碳作用外，下层焦炭还起气体交换、调整试样高度和保持渣、铁滴落的作用；然后上面荷重 50~100 kPa，并从下部通入还原气体（CO / N₂ = 30 / 70）。还原气体自下而上穿过试样层，按一定的升温速度升温至 1400~1500℃。以试样在加热过程中某一收缩值的温度，表示开始软化温度和软化終了温度；以还原气体压差陡升的拐点温度表示熔化开始温度，第一滴液滴落下时温度表示滴落温度；以气体通过料层的压差变化表示软熔带对透气性的影响；滴落在下部接收试样盒内的熔化产物，冷却后，经破碎分离出初渣和铁，测定相应的回收率和化学成分，作为评价熔滴特性指标。过程中的有关测定参数（测定温度、料层收缩率及还原气体通过料层的压差）和还原气体成分都可自动记录和分析显示出来。

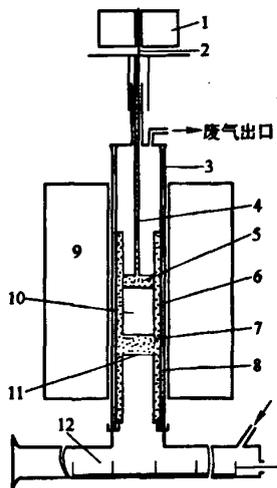


图 2-8 铁矿石熔化特性试验装置

- 1—荷重块；2—热电偶；3—氧化铝管；4—石墨棒；5—石墨盘；
6—石墨坩埚， $\phi 48$ mm；7—焦炭（10~15mm）；8—石墨架；
9—熔滴炉；10—试样；11—孔（ $\phi 8$ mm $\times 5$ ）；12—试样盒

2.3 烧结产量和质量指标计算

垂直烧结速度 = 料层高度 / 烧结时间

烧成率 = (烧结矿质量 - 铺底料质量) / 装料量 $\times 100\%$

$$\text{成品率} = (\text{成品矿质量} - \text{铺底料质量}) / (\text{烧结矿质量} - \text{铺底料质量}) \times 100\%$$

2.4 烧结主要原材料

精矿粉是含铁贫矿经过细磨选矿处理后除去一部分脉石和杂质使含铁量提高的极细的矿粉。张钢烧结使用铁矿粉有澳大利亚矿粉、印度矿粉、本地精矿粉、智利矿粉等。

烧结生产过程中配加熔剂的目的主要有三个：一是将高炉冶炼时高炉所配加的一部分或大部分熔剂和高炉中大部分化学反应转移到烧结过程中来进行，从而有利于高炉进一步提高冶炼强度和降低焦比；二是碱性熔剂中的 CaO 和 MgO 与烧结料中的氧化物及酸性脉石 SiO₂、Al₂O₃ 等在高温作用下，生成低熔点的化合物，以改善烧结矿强度、冶金性能和还原性；三是加入碱性熔剂，可提高烧结料的成球性和改善料层透气性，提高烧结矿质量和产量。张钢烧结用熔剂主要是生石灰和蛇纹石。

烧结所用燃料主要为焦粉。

第三章 平烧压辊布料技术应用研究

随着炼铁水平的不断提高，对烧结矿质量提出了更高的要求，尤其是烧结矿上仓料质量和转鼓强度，而在烧结过程中台车两侧生料现象严重影响着烧结矿质量。平烧目前烧结是采用褐铁矿烧结，透气性好、垂直烧结速度和冷却速度过快，在冷却过程中，一些矿物来不及结晶析出，致使烧结矿中玻璃质含量增加、脆性大，转鼓强度低。为了解决生料现象，提高烧结矿转鼓强度，对压辊布料技术进行了充分的讨论和研究，压辊布料很适合平烧目前的生产。通过使用压辊布料技术，可以解决台车两侧生料现象，有效地抑制边缘效应，均匀在烧结矿过程的气流分布，增加烧结有效风量，降低中上部的冷却速度，提高烧结矿的转鼓强度，同时为高炉增铁节焦、炉况顺行创造条件。

3.1 工作原理

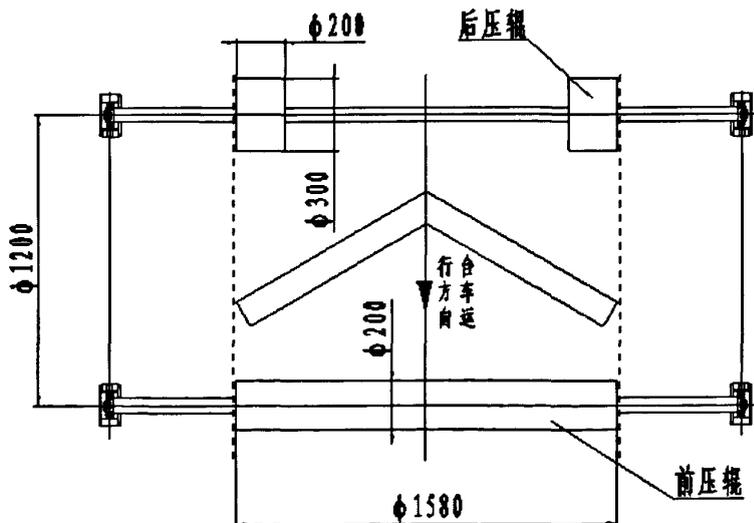


图 3-1 压辊安装图

布料的均匀合理性，既受烧结混合料缓冲料槽内料位高度、料的分布状态、混合料水分、粒度组成和各组分堆积密度差异的影响，又与布料方式密切相关。

当缓冲料槽内料面平坦而料位高度随时波动时，因物料出口压力变化，使

布于台车上的料时多时少，若混合料水分也发生波动时，会沿烧结机长度方向形成波浪形料面；当混合料定点卸于缓冲料槽形成堆尖时，则因堆尖处料多且细，四周料少且粗，不仅加重纵向布料的不均匀性，也使台车宽度方向布料不均。在料层高度方向，因混合料中不同组分的堆密度有差异，以及水分的变化，布料操作的影响，会产生粒度、成分偏析，从而使烧结矿内上、中、下各层及边部成分和质量很不均一。布料不均匀时，空气通过料层时的阻力就不一样，使得通过料层的气流不均匀。不均匀的气流分布会造成不同的垂直烧结速度，而料层各处的不同垂直烧结速度又会加重气流分布的不均匀性。这就必然产生料层中有些区域烧得好，有些区域烧得不好，势必产生烧不透的夹生料。这不仅减少了烧结矿成品率，而且也降低了返矿品质，容易破坏正常的烧结过程。

为了克服和减轻不良影响，实现较理想布料，应改进布料操作和方式。将两组压辊安装在布料器与点火室之间，在压辊两端安装轴承，压辊随台车向前移动方向自由转动，从而达到压料和平整料面的目的。后压辊安装在台车两内侧 200mm，料面压下 60~70mm，前压辊平整台车料面，料面下压 20mm。在使用过程中，料面起鱼鳞，影响了料面的点火质量，在压辊布料后采取了刮料器，消除了鱼鳞带来的影响。通过后压辊两侧压料，有效地抑制了边缘效应，使烧结过程的气流分布趋于合理，增加了烧结过程的有效风量，解决了台车两侧生料现象；通过前压辊全面平整压料，改善了点火质量，使混合料更加密实，降低了混合料的透气性，从而达到降低垂直烧结速度和冷却速度的目的，彻底解决了烧结速度和冷却速度过快的问题，在一定程度上提高了烧结矿转鼓强度。

3.2 压料装置的选择

通过考察和论证，结合平烧生产实际，对两组压辊进行了选型，前压辊 $\Phi 200 \times 1600 \text{mm}$ ，后压辊 $\Phi 300 \times 200 \text{mm}$ ，安装如图 3-1 所示。

3.3 压辊布料的使用效果

3.3.1 烧结工艺参数的变化

使用压辊布料后，烧结工艺参数的变化如表 3-1。通过表 3-1 可以看出：使

用压辊布料后,吸风机电机电流下降了 2~3A,总管负压上升了 0.3 KPa,点火温度提高了 25~40℃,主机总管负压上升了 0.3~0.4 KPa,垂直烧结速度下降了 4.07mm/min。这说明使用压辊压料后,烧结料透气性下降,边缘效应减轻,烧结有效风量增加,同时点火质量得到了一定改善。

表 3-1 烧结工艺参数的变化

	吸风机电流 (A)		吸风机总管负压 (KPa)		点火温度 (℃)		总管负压 (KPa)		垂直烧结速度 (mm/min)	
	1#烧	2#烧	1#烧	2#烧	1#烧	2#烧	1#烧	2#烧	1#烧	2#烧
使用后	91	90	10.6	9.7	1070	1020	8.7	8.9	34.89	34.89
使用前	94	92	10.3	9.4	1030	995	8.3	8.6	38.96	38.96
比较	-3	-2	+0.3	+0.3	+40	+25	+0.4	+0.3	-4.07	-4.07

3.3.2 压辊布料使用前后的物料结构

表 3-2 压辊布料使用前后物料结构的变化

	澳粗 57	印粗 60	澳粗 60	返矿粉	球粉	印粗 64	印混 59
使用后	8.84%	15.69%	66.41%	4.73%	4.33%		
使用前	28.11%		31.02%	5.42%	5.96%	24.71%	4.79%

压辊表布料使用前后的物料结构的变化见表 3-2。从表 3-2 看,压辊布料使用后物料结构较压辊布料使用前合理,压辊布料使用后主要使用了印粗 64,烧结矿的转鼓强度得到了提高,烧结过程燃耗降低,烧结矿中 FeO 含量减少。

3.3.3 烧结生产技术指标的变化

表 3-3 压辊布料使用前后烧结生产技术指标的变化

	利用系数 (t/m ² ·h)	固体燃耗 (kg/t 矿)	FeO 含量 (%)	转鼓强度 (%)	含粉 (%)	烧结矿粒度组成 (%)			
						>40mm	40-16mm	16-10mm	<10mm
使用后	48.93	55.93	9.05	72.21	6.5	11.6	54.4	23.7	10.3
使用前	48.84	61.56	10.38	70.55	7.05	17.1	47.0	20.7	15.2
比较	+0.09	-5.63	-1.33	+1.66	-0.55	-5.5	+7.4	+3	-4.9

压辊布料使用前后烧结生产技术指标的变化见表 3-3。通过表 3-3 可以看出:

(1) 压辊布料使用后比压辊布料使用前烧结矿转鼓强度提高了 1.66 个百分点,除采用压辊布料外还有两个原因,其一,使用压辊布料后物料结构改善,烧结矿转鼓强度可提高约 0.66 个百分点;其二,通过职工培训,提高职工责任

心，加强四班统一操作等措施，烧结矿转鼓强度提高了约 0.5 个百分点。抛去两个因素影响，使用压辊布料后，平烧矿的转鼓强度提高了约 0.5 个百分点。

(2) 压辊布料使用后比压辊布料使用前烧结固体燃耗降低了 5.63 kg/t 矿、烧结矿中 FeO 含量降低了 1.33 个百分点，除采用压辊布料外还有两个原因，其一，使用压辊布料后物料结构改善，烧结过程固体燃耗降低了约 3 kg/t 矿、烧结矿中 FeO 含量降低了 0.8 个百分点；其二，通过职工培训，提高职工责任心，加强四班统一操作、厚铺低炭操作等措施，烧结过程固体燃耗降低了约 0.63 kg/t 矿、烧结矿中 FeO 含量降低了 0.3 个百分点。抛去两个因素影响，使用压辊布料后，平烧矿的固体燃耗降低了 2 kg/t 矿、FeO 含量降低了 0.23 个百分点。

(3) 从烧结矿的粒度组成看得到了明显改善 40mm 以上的比例下降了 5.5%，10mm 以下比例降低了 4.9%，10~16mm 比例增加了 3%，16~40mm 比例增加了 7.4%。

(4) 压辊布料使用后比压辊布料使用前烧结矿平均台时产量提高了 0.7t/h，约提高产量 1%。

3.3.4 经济效益分析

平烧通过使用压辊布料技术，解决了台车两侧生料现象，降低了烧结固体燃耗和 FeO 含量，提高了烧结矿转鼓强度，减少了烧结返粉，降低了成本，效果明显。

(1) 烧结燃耗降低 2kg/t 矿，烧结矿按年产 83 万吨计算，焦粉价格为 427 元/吨，年创效益为： $83 \text{ 万} \times 2 \text{ kg/t 矿} \times 427 \text{ 元} / 1000 = 70.88 \text{ 万元}$ 。

(2) 烧结矿 FeO 降低了 0.23%，根据经验：FeO 降低 1%，生铁产量提高 1%，焦比降低 1.5%，生铁费用 208 元/吨，焦炭 875 元/吨。计算，年创效益： $0.23 \times 1\% \times 56.4 \times 208 + 0.23 \times 1.5\% \times 56.4 \times 0.54 \times 875 = 119.16 \text{ 万元}$

(3) 由于产量提高 1%，烧结矿按年产 83 万吨计算，烧结矿加工费 20 元/吨，年创效益： $83 \text{ 万} \times 1\% \times 20 = 16.6 \text{ 万元}$ 。

(4) 设备投资费用：4000 元。

年净效益 = $70.88 + 119.16 + 16.6 - 0.4 = 206.24 \text{ 万元}$

3.4 本章小结

通过对压辊布料使用的后工艺参数、物料结构、生产技术指标的分析可以得出：

(1)通过使用压辊布料，从吸风机的电流和负压来看，烧结有效风量增加，边缘效应得到抑制，在一定程度上杜绝了台车两侧生料现象，大大提高了烧结矿的外观质量。

(2)通过使用压辊布料，转鼓强度提高 0.5%，FeO 含量降低了 0.23%，烧结返粉降低了 0.55%，垂直烧结速度虽然降低，但产量反而有所提高，这是因为转鼓强度提高后成品率提高所致。

(3)通过使用压辊布料，点火温度提高 25~40℃，同时料面的点火强度得到了提高。

(4)通过使用压辊布料，烧结矿的粒度组成明显改善 40mm 以上的比例下降了 5.5%，10mm 以下比例降低了 4.9%。

总之，通过压辊布料技术的应用，大大抑制了边缘效应，改善了料面点火质量，增加了烧结有效风量，提高了烧结矿的转鼓强度，降低了入炉含粉和 FeO 含量，改善烧结矿的粒度组成和外观质量，提高了炼铁水平。这说明压辊布料技术在张钢平烧的应用是相当成功的，效果明显。

第四章 蛇纹石烧结技术在烧结系统的应用

近年来,国内很多钢铁企业通过配加 MgO 矿源来提高烧结矿 MgO 含量,使烧结返矿率下降,固体燃耗量降低,烧结矿的还原性和软熔性等冶金性能得到改善,提高了烧结矿质量,同时提高了高炉冶炼水平。目前,烧结普遍使用的 MgO 矿源主要有白云石和蛇纹石两种,以国内精矿粉为主的烧结厂大多采用白云石,取得了较好的效果。以进口富粗粉为主烧结厂大多采用蛇纹石。宝钢、马钢、攀钢、南钢等钢铁企业都在大型烧结机烧结生产中使用了蛇纹石。

张店钢铁总厂原料厂现有两台 24m^2 带式烧结机,负责为 5# 高炉 (400m^3) 供应烧结矿。烧结用料主要以进口富矿粉为主(绝大多数属褐铁矿),一直采用白云石作为 MgO 矿源。由于白云石在烧结过程中的分解是吸热反应,烧结温度高,高温保持时间长,增加了固体燃耗,烧结矿玻璃相增加,不利于铁酸钙的生成,降低了烧结矿强度;白云石与硅酸盐矿物常混在一起,生成镁橄榄石,其结晶小,一般以玻璃相的物相存在,影响烧结矿强度。由于受工艺配置所限,烧结矿碱度控制在 1.80 左右,因此带烧烧结矿的质量相对较差。

4.1 蛇纹石的物化特性及烧结性能

蛇纹石的分子式为 $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MgO 含量达到 38% 左右,是一族层状结构的硅酸盐矿物的总称。单体少见,多呈致密块状、层状或纤维状集合体。具有各种色调的绿色、浅黄色,常呈似蛇皮的绿黑相间的花纹,条痕白色,块状蛇纹石呈油脂光泽或蜡状光泽。

参与烧结后,高活性的 MgO 易与其它组分形成低熔点化合物,有利于提高烧结矿强度。其镁源以氧化物的形式存在,由于减少了碳酸盐分解,消耗热量低,故有利于降低燃耗。 SiO_2 含量在 38% 左右,在烧结混合料 SiO_2 过低时,可

适当增加烧结液相量，有利于提高烧结矿强度，改善粒级组成。

4.2 蛇纹石烧结技术的基本原理

4.2.1 烧结中的固相反应

烧结过程中，固相反应是在液相生成前进行。固相反应和液相生成是烧结粘结成块并具有一定强度的基本原因，任何物质间的化学反应都与分子或离子的运动有关。固体分子与液体和气体分子一样，都处于不停的运动状态之中。只是因为固体物质质点间结合力较强，其质点只能在平衡位置上做小范围的振动。因此，在常温下，固相间的化学反应即使发生，反应速度也是很缓慢的。但是，随着温度升高，固体表面晶格的一些离子（或原子）获得愈来愈多的能量而激烈运动起来。温度愈高，就愈易于取得进行位移所必需的能量（或化学能）。当温度高到使质点（离子或原子）具有参加化学反应所必需的能量时，这些高能量质点就能够向所接触的其他固体表面扩散。这种固体质点扩散过程，就导致了固相反应的发生。

已经证实，固相中只能进行放热反应。而且两种物质间反应的最初产物，无论如何只能形成同一种化合物，它的组成通常与反应物的浓度不一致。要想得到组成与反应物质量相当的最终产物，往往需要很长时间。在烧结过程中，烧结料处于 500~1500℃ 的高温区间一般不超过 3mm。因此，对烧结具有观察意义的是固相反应开始的温度以及最初形成的反应产物。

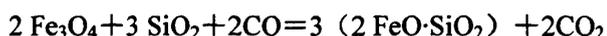
表 4-1 固相反应的最初产物

固相反应	混合物中分子比例	反应的最初产物
CaO—SiO ₂	3:1;2:1;3:2;1:1	2 CaO·SiO ₂
MgO—SiO ₂	2:1;1:1	2MgO·SiO ₂
CaO—Fe ₂ O ₃	2:1;1:1	CaO·Fe ₂ O ₃
CaO—Al ₂ O ₃	3:1;5:3;1:1;1:2;1:6	CaO·Al ₂ O ₃
MgO—Al ₂ O ₃	1:1;1:6	MgO·Al ₂ O ₃

表 4-1 列出了固体组分不同配比时，有关固相反应的实验数据。从表 4-1 可以看出，不论混合料中的 CaO 和 SiO₂ 的比例如何变化，固相中的最初产物总是 2CaO·SiO₂。同样，在烧结条件下 2CaO+Fe₂O₃ 及 CaO 与 Fe₂O₃ 的反应，在固相反应中只能得到最初产物 CaO·Fe₂O₃。

表 4-2 列举了在烧结过程中，常见到的某些固相反应产物开始出现的温度。

从表 4-2 可以看出， Fe_2O_3 和 SiO_2 混合后没有生成化合物。从 575°C 开始， Fe_2O_3 溶于 SiO_2 中形成少量的固溶体。因此，在缺乏还原气氛时（如燃料用量少于或远离燃料的区域），非熔剂性烧结料中的 Fe_2O_3 不可能与 SiO_2 相互作用。这就使得 Fe_2O_3 在开始分解（温度约 1350°C ）以前，不可能形成液相。要它产生液相——铁橄榄石型（ $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ），必须创造还原性气氛使 Fe_2O_3 还原或分解为 Fe_3O_4 才能形成。铁橄榄石生成反应为：



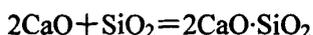
如果燃烧用量较大时， SiO_2 与 FeO 可直接形成铁橄榄石，但是，在燃料普通用量条件下，烧结料层中游离的 FeO 不多，这种反应几乎没有发生。

CaO 与 Fe_2O_3 反应生成铁酸一钙（ $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ），在固相中，反应开始温度为 $500\sim 700^\circ\text{C}$ ， $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。在烧结时， Fe_2O_3 与烧结料中的石灰石、石灰接触机会很多，有利于铁酸钙的生成。 Fe_3O_4 不与 CaO 发生固相反应，只有 Fe_3O_4 被氧化成 Fe_2O_3 才能出现固相反应。在正常燃料用量时，烧结赤铁矿生产熔剂性烧结矿以及在较低燃料用量，在氧化性气氛中烧结磁铁矿生产熔剂性烧结矿时都有利于铁酸钙的形成。

表 4-2 固相反应产物开始出现的温度

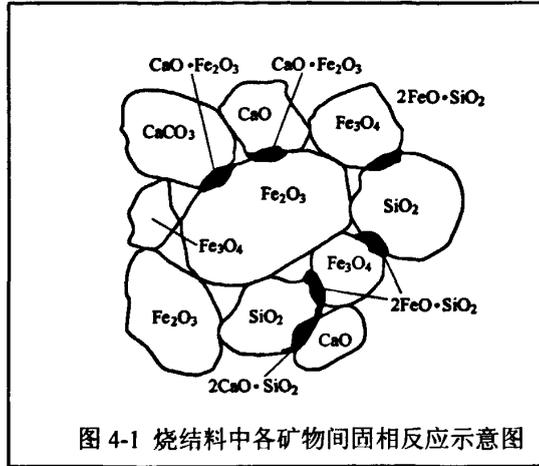
反 应 物	固相反应产物	反应产物开始出现的温度/ $^\circ\text{C}$
$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Fe_2O_3 在 SiO_2 中的固溶体	575
$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4$	$2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 铁橄榄石	990, 995
$\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 铁酸一钙	500, 600, 610, 650
$2\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 铁酸二钙	400
$\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 铁酸一钙	590
$2\text{CaO} + \text{SiO}_2$	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 正硅酸钙	500, 610, 690
$2\text{MgO} + \text{SiO}_2$	$2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ 镁橄榄石	680
$\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 铁酸镁	600
$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$	$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 偏硅酸钙 + Al_2O_3	530

图 4-1 是烧结料中主要矿物之间的固相反应图。除了上述铁橄榄石、铁酸钙固相化合物生成外。当温度在 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 时，在 SiO_2 与 CaO 的接触处有正硅酸钙出现，其反应：



在赤铁矿生产熔剂性烧结矿时，烧结料中 SiO_2 与 CaO 的接触数目比起 Fe_2O_3 与 CaO 的接触数目要少得多。虽然 SiO_2 对 CaO 的化学亲和力比 Fe_2O_3 对 CaO

的亲合力大得多，但在相同的温度下，铁酸钙（ $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）的生成速度快，固相中铁酸钙的数量就多些。



4.2.2 烧结过程中的主要液相

烧结过程中主要液相有：铁—氧体系、硅酸铁体系、硅酸钙体系、铁酸钙体系、钙铁橄榄石体系、钙镁橄榄石体系等。

在生产实践中，有些烧结厂在烧结料配入少量的白云石（ $\text{MgCO}_3\cdot\text{CaCO}_3$ ）代替部分石灰石生产熔剂性烧结矿，这种作法的目的就是生成钙镁橄榄石体系化合物。

MgO 与 SiO_2 可以形成两种化合物，镁橄榄石（ $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ ）和偏硅酸镁（ $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ ），它们的熔化温度分别为 1890°C 和 1557°C 。 $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ 可形成共熔混合物，其熔点为 1543°C 。

当烧结矿碱度为 1.0 时，在烧结料中添加一定数量的 MgO （10%~15%），可降低硅酸盐的熔点，液相流动性好，而且 MgO 的存在可以阻碍 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的形成并抑制其晶型转变。这不仅对提高烧结矿强度有良好作用，而且由于 MgO 的加入生成钙镁橄榄石，而阻碍了难还原的铁橄榄石形成，使烧结矿的还原性能得到提高。

4.2.3 烧结矿矿物组成

非自熔性烧结矿含铁矿物主要有磁铁矿、浮氏体、赤铁矿；黏结相矿物有铁

橄榄石, 钙铁橄榄石, 铁酸钙、硅钙石、石英、玻璃体、金属铁等。主要的黏结物是铁橄榄石及少量的钙铁橄榄石、玻璃体等。

自熔性烧结矿含铁矿物主要有磁铁矿、浮氏体、赤铁矿; 黏结相矿物有钙铁橄榄石、玻璃体、金属铁、橄榄石类(铁橄榄石、钙镁橄榄石的固溶体)。主要黏结物为钙铁橄榄石、玻璃体等。

高碱度烧结矿(如碱度 >2.0)的矿物, 主要是磁铁矿、钙质浮氏体; 黏结相矿物有铁酸钙、硅酸三钙、硅酸二钙。主要黏结物是铁酸钙。

上述矿物组成, 对于某一烧结矿来说, 不一定全部矿物都有, 而且矿物数量有多有少。磁铁矿和浮氏体是各种烧结矿的主要矿物。磁铁矿从熔融体中最早结晶出来, 形成完好的自形晶。浮氏体的含量随烧结料中含碳量增加而增加, 烧结矿冷却时, 浮氏体局部氧化为磁铁矿, 或分解成磁铁矿与金属铁。烧结矿中非铁矿物以硅酸盐类矿物为主。

赤铁矿、磁铁矿、铁酸一钙、铁橄榄石等均具有较好的强度, 铁酸二钙强度差, 玻璃质强度最差。要得到强度好的熔剂性烧结矿, 需要使烧结矿的黏结相矿物中具有较多的低氧化钙的钙铁橄榄石和铁酸一钙、铁酸半钙等。

各种矿物的机械强度和还原性并不是完全一致的。铁橄榄石和某些钙铁橄榄石虽有较好的强度, 但还原性都差, 只有铁酸一钙机械强度和还原性都好。铁酸一钙属于低级晶系, 晶格能小, 易于分解和还原, 而玻璃质的机械强度和还原性都最差。

4.2.4 烧结矿矿物结构

(1) 烧结矿的宏观结构

宏观结构指肉眼能看见孔隙的大小、孔隙的分布状态和孔壁的厚薄等。烧结矿的宏观结构可分以下三种:

①疏松多孔、薄壁结构: 疏松多孔薄壁的烧结矿强度差、易破损、粉末多, 但易还原。这种结构的烧结矿, 一般是在配碳低、液相量少、液相黏度小的情况下出现。

②中孔、厚壁结构: 中孔厚壁结构的烧结矿强度高, 粉末少, 还原性一般。

这种结构的烧结矿是我们所希望的，一般在配碳适当，液相量充分的情况下出现。

③大孔、厚壁：大孔厚壁结构的烧结矿强度较好，但还原性差。当配碳过高、过熔时，常出现大孔薄壁结构的烧结矿层度、还原性都差。

(2) 烧结矿的微观结构

微观结构指借助于显微镜观察矿物的结晶情况，含铁矿物与液相矿物数量和分布情况、微气孔的种类、数量及分布情况，单个相的界面种类和大小等。

①多孔结构：烧结矿呈海绵状多孔构造。一般来说，烧结反应进行越充分，气孔越少；固结加强，气孔壁加厚。因此，气孔率达到一定值也是烧结矿固结的要求之一，其值与烧结矿性质有密切的关系。烧结矿气孔率越低，粘结情况好，烧结矿强度也越高；相反，气孔率越低，与煤气接触面越小，烧结矿的还原性越差。因此，气孔率过大、过小都不好，有一最佳值。

②组织不均匀：从微观上看，烧结矿组织不均匀，除相当于烧结矿平均成分的矿物组织外，一般在局部区域不分散地存在于平均成分不同的矿物组织。这种组织上的不均匀性造成烧结矿性质不稳定。一般烧结矿中均含有比平均成分碱度高或低的组织以及未同化而残留的原来的矿石。烧结矿成分越是不均匀，其品质（低温还原粉化性）越差。烧结矿越接近平均成分，其品质越好越稳定。

③生成矿物：烧结矿品质与构成烧结矿的矿物种类及性质直接相关。因此，在某种意义上说烧结生产本质就是制造矿物。根本问题在于如何在短时间内，高效率地形成液相并进行固结，以及如何更多的生产出品质良好的矿物。

(3) 熔剂性烧结矿常见的显微结构

①粒状结构：当熔融体冷却时磁铁矿首先析晶出来，形成完好的自形晶粒状结构，这种磁铁矿也可以是烧结矿配料中的磁铁矿再结晶而产生的。有时由于熔融体冷却速度较快，则析晶出来的磁铁矿为半自形晶和他形晶粒状结构分布

均匀，烧结矿强度好。

通常磁铁矿晶体中心部分是被熔融的原始精矿粉颗粒，而外部是从熔融体中结晶出来的。即在原始精矿粉周围又包上薄薄一层磁铁矿。

②共晶结构：磁铁矿呈圆点状存在于橄榄石的晶体中，磁铁矿圆点状晶体是 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Ca}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{SiO}_4$ 系统共晶部分形成的。

③斑状结构：烧结矿中含铁矿物与细粒黏结相组成斑状结构，强度较好。

④骸晶结构：早期结晶的含铁矿物晶粒发育不完全，只形成骨架，中间由黏结相充填，可看到含铁矿物结晶外形和边缘呈骸晶结构。这是强度差的一种结构。

⑤交织结构：含铁矿物与黏结相矿物（或同一种矿物晶体）彼此发展或交叉生长，这种结构强度最好。高品位和高碱度烧结矿中，此种结构较多。

⑥熔融结构：烧结矿中磁铁矿多为熔融残余他形晶，晶粒较小，多为浑圆状，与黏结相形成熔融结构，在熔剂性液相量高的烧结矿中常见，含铁矿物与黏结相接触紧密，强度最好。

4.2.5 加入蛇纹石的作用

在烧结中，利用蛇纹石带入活性较高的 MgO ，固溶进入 Fe_3O_4 ，使磁铁矿不易再氧化为赤铁矿，从而使烧结矿的磁铁矿含量有所增加，也使含镁磁铁矿与铁酸钙形成的交织熔蚀结构增多，有助于矿物结构均匀化，改善了烧结矿物反应的条件和速度，抑制了部分矿物的相变，降低了烧结矿低温还原粉化，提高了烧结矿利用系数和转鼓强度，同时降低了烧结固体能耗。其次，蛇纹石较高的 SiO_2 含量（36~38%）可适当增加烧结液相量，有利于提高烧结矿强度，改善粒级组成。

4.3 蛇纹石烧结技术应用于张钢 24m² 烧结机上所具备的基本条件

(1)张钢带烧烧结原料以罗泊河粉、安吉拉斯粉、印度粉等进口富矿粉（均属褐铁矿）为主，同时消耗部分烧结返粉、酸性球团粉、瓦斯灰等循环物料（各种物料成分见表 4-3）。烧结矿 SiO₂ 在 4.8%左右，TFe 在 58%左右。褐铁矿占全部含铁原料的比例达到 80%左右，故烧损较高，受总体工艺配置所限，烧结矿碱度控制在 1.80 左右，再加上烧结机整体装备水平不高，因此烧结矿的转鼓强度、粒级组成和冶金性能等方面指标相对较差。

表 4-3 各种物料成份表 (%)

品种	TFe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	H ₂ O	烧损
罗泊河粉	56.45	5.85	0.16	2.42	1.20	10.3	10.8
印度粗粉	62.20	3.88	0.13	1.96	1.8	8.8	4.7
安吉拉斯粉	61.20	3.58	0.15	2.21	1.02	8.2	6.8
烧结返粉	57.39	5.24	9.45	2.49	1.93		
蛇纹石		38.27	0.96	0.71	38.3	6.2	14.2
白云石		2.02	31.9	0.98	17.0	5.6	44

(2)利用蛇纹石粉替代白云石粉参与烧结，一方面由于蛇纹石粉带入的高活性 MgO 易于其他组分形成低熔点化合物，抑制部分矿物相变，提高烧结矿强度，降低粉化率；另一方面与使用白云石相比，减少了碳酸盐的分解，消耗热量少，有利于降低能耗；再者，其 SiO₂ 含量高，在烧结矿碱度不高，混合料 SiO₂ 偏低时，可明显增加烧结液相生成量，保证强度；此外，可以降低烧结混合料烧损，在一定程度上减轻因烧损大，料层收缩率高对烧结矿强度的不利影响。因此可以改善烧结矿质量，尤其在转鼓强度和冶金性能方面比较明显。

(3)蛇纹石粉产于江苏东海县，采用汽车运输快捷方便，其质量较好，MgO 含量≥38%，≤3mm 粒级所占比例在 90%以上。

(4)利用闲置的一个带烧配料仓配加蛇纹石，将圆盘给料机出料口改小，基本不增加设备投资和运行费用。保留原白云石仓，以备急用；使用圆盘给料机加核子秤自动控制蛇纹石流量，流量易于控制，下料量准确。

总之，蛇纹石烧结技术应用于张钢 24m² 烧结机有理论依据，又具备基本条件，是切实可行的。

4.4 方案的制定

我们根据蛇纹石的物化特性和烧结性能，结合我厂实际确定了烧结物料结构、蛇纹石用量及主要生产工艺参数。

带烧烧结物料结构，主要以进口富矿粉为主（约占 80%左右），其中罗泊河粉约 15%，安吉拉斯粉约 50%，印度粉约 15%，剩余部分为厂内循环物料，其中烧结返粉 14%左右。蛇纹石烧结技术应用后除印度矿的品种有所变化外，其他物料的比例与应用前基本相同。

由于蛇纹石粉 SiO₂ 含量达 36~38%，用量过高时对烧结矿品位影响较大。结合我厂烧结用料的实际情况，经多次试验，将蛇纹石配加量控制在含铁原料总量的 1~1.2%。若烧结矿 SiO₂ 含量过低时，可逐渐增至 1.5~2%。

烧结机主要生产工艺参数要求：

混合料水分： 7~8%

料层厚度： 550mm

点火温度： 1050±50℃

烧结负压： 11.5KPa

4.5 方案实施及效果

4.5.1 配料控制

由于蛇纹石配比仅为 1~1.2%，流量较难控制，将圆盘给料机出料口尽可能减小，同时加强操作工的跑盘称量次数，保证蛇纹石下料量准确，以稳定烧结矿成份。

4.5.2 烧结过程的控制

加强各工序之间的联系，搞好同步操作。稳定水碳和料层厚度，根据机尾断面烧成情况，控制好烧结终点，确保烧结矿结好烧透。

4.5.3 蛇纹石使用前、后有关指标变化情况

(1) 烧结矿转鼓强度和粒度组成变化

蛇纹石使用前、后烧结矿转鼓强度和粒度组成变化见表 4-4

表 4-4 烧结矿转鼓强度和粒度组成变化

时间	转鼓强度 (%)	粒度组成 (%)					
		> 40mm	40~25mm	25~16mm	16~10mm	10~5mm	< 5mm
使用前 1 组	65.1	6.50	16.9	24.0	30.7	11.7	8.2
使用前 2 组	65.3	13.9	22.9	20.1	23.4	13.1	7.6
使用前 3 组	66.3	10.6	19.6	18.7	25.3	16.4	8.1
使用前 4 组	65.6	7.70	22.2	20.6	28.8	14.9	7.2
使用前 5 组	66.2	14.0	24.3	20.7	25.0	10.1	7.0
平均	65.7	10.50	21.29	20.80	26.60	13.20	7.6
使用后 1 组	65.7	8.0	23.0	21.2	28.4	12.6	6.8
使用后 2 组	67.4	7.9	22.0	22.4	30.6	10.0	7.1
使用后 3 组	68.6	7.87	26.2	24.4	23.8	10.7	6.9
使用后 4 组	67.0	8.05	23.44	23.08	26.6	11.3	7.0
使用后 5 组	67.5	7.79	24.14	22.28	28.6	10.9	6.9
平均	67.25	7.92	23.74	22.68	27.61	11.12	6.93
比较	+1.55	-2.58	+2.45	+1.88	+1.01	-2.08	-0.67

(2) 蛇纹石使用前、后带烧有关经济技术指标变化

蛇纹石使用前、后带烧有关经济技术指标变化见表 4-5。

表 4-5 使用前、后带烧有关经济技术指标变化表

时间	MgO /%	SiO ₂ /%	R /倍	TFe /%	燃烧 /Kg.t ⁻¹	利用系数 /t.h ⁻¹ .m ⁻²	FeO /%
使用前 1组	1.90	5.07	1.8	57.2	61.0	1.71	9.76
使用前 2组	1.89	4.80	1.81	57.61	61.7	1.82	9.74
使用前 3组	1.95	4.73	1.86	57.65	60.5	1.75	9.82
使用前 4组	1.87	4.66	1.82	58.36	62.0	1.70	10.05
使用前 5组	1.97	4.86	1.85	57.96	60.3	1.62	10.21
使用前平均	1.91	4.82	1.83	57.76	61.1	1.72	9.92
使用后 1组	2.00	5.06	1.80	57.16	61.0	1.81	9.79
使用后 2组	1.91	5.26	1.79	57.24	60.0	1.79	9.34
使用后 3组	1.95	5.10	1.81	57.18	61.0	1.90	9.17
使用后 4组	1.98	5.08	1.80	57.32	60.0	1.86	9.58
使用后 5组	1.92	5.19	1.80	57.10	59.0	1.82	9.28
使用后平均	1.95	5.14	1.80	57.19	60.2	1.83	9.43
比较	+0.04	+0.32	-0.03	-0.57	-0.9	+0.11	-0.49

4.5.4 结果分析

蛇纹石烧结技术应用后与应用前相比：

- (1) 烧结矿转鼓强度平均提高了约 1.55 个百分点；
- (2) 粒级组成：烧结矿 10~40mm 比例提高了 5.33 个百分点，>40mm 比例降低了 2.58 个百分点，<10mm 比例降低了 2.75 个百分点，粒度组成趋于合理。
- (3) MgO 含量使用前为 1.91%，使用后 1.95%，提高了 0.04 个百分点。
- (4) SiO₂ 含量由 4.82% 提高到 5.14%；烧结矿品位由 57.76% 降低到 57.19%。
- (5) 烧结固体燃烧使用前为 61.1Kg/t 矿，使用后为 60.2Kg/t 矿，降低了 0.9Kg/t

矿。

(6) 烧结利用系数使用前为 1.72 t/h.m^2 ，使用后为 1.83 t/h.m^2 ，提高了 0.11 t/h.m^2 。

(7) 烧结矿 FeO 含量使用前为 9.92%，使用后为 9.43%，降低了 0.49 个百分点。

自从原料厂开始在带烧配加蛇纹石粉后，烧结矿质量指标改善，炼铁厂 5#高炉 (400m^3) 顺行有所改观，炉况稳定，产量增加，消耗降低。蛇纹石烧结技术应用后与应用前相比：

(1)高炉综合入炉品位由 58.55%下降到 58.24%，下降了 0.31 个百分点。

(2)高炉利用系数由 $2.58 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$ 提高到 $2.68 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$ ，提高了 $0.10 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$ 。除去入炉焦炭质量改善、操作水平提高等因素，因配加蛇纹石粉烧结矿质量改善原因，高炉利用系数提高约 $0.06 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$ 。

(3)高炉综合焦比由 $572 \text{ Kg/t} \cdot \text{Te}$ 降低到 $557 \text{ Kg/t} \cdot \text{Te}$ ，降低 $15 \text{ Kg/t} \cdot \text{Te}$ 。除去入炉焦炭质量改善、操作水平提高等因素，因配加蛇纹石粉烧结矿质量改善原因降低焦比约 $6 \text{ Kg/t} \cdot \text{Te}$ 。

烧结矿每增产一吨的效益为 34 元/吨，焦粉的价格为 427 元/吨。带烧作业率取 90%。则：

(1)烧结利用系数提高 0.11 t/h.m^2

烧结矿产量提高： $365 \times 0.90 \times 24 \times 24 \times 2 \times 0.11 = 41628 \text{ t}$

效益为： $41628 \times 34 = 143.08 \text{ 万元}$

(2)能耗平均降低了 0.9 Kg/t ，效益为：

$365 \times 0.90 \times 24 \times 24 \times 2 \times 1.83 \times 0.9 / 1000 \times 427 = 26.47 \text{ 万元}$

烧结总效益： $(1)+(2) = 169.55 \text{ 万元}$

4.6 本章小结

(1)带烧使用蛇纹石粉替代白云石粉后，尽管烧结矿品位有所下降，但烧结矿转鼓强度提高了约 1.55 个百分点，粒级组成明显改善，10~40mm 所占比例平均提高了 5.33 个百分点，烧结机利用系数提高 $0.11 \text{ t/m}^2 \cdot \text{h}$ ，烧结能耗降低了约 0.9 Kg/t ，烧结矿 FeO 含量下降了约 0.49 个百分点。随烧结矿质量改善。5#

高炉利用系数提高了约 $0.06 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$ 、焦比降低了约 $6 \text{ Kg/t} \cdot \text{Te}$ 。

(2)我厂带烧系统配加蛇纹石粉替代白云石粉作为 MgO 矿源进行烧结,在全褐铁矿粗粉烧结、烧结矿碱度为 1.80 的情况下,有效地提高了烧结矿转鼓强度,明显改善了烧结矿粒级组成和冶金性能,起到了显著的增产降耗作用。该项技术在与我厂条件类似的烧结厂均具有较好的推广应用价值。

第五章 烧结生产配加 PB 矿粉的试验研究

近年来，张钢所用烧结含铁原料主要以安吉粉（50%左右）为主，再适当配加部分印粉、罗泊河粉、地方精粉和厂内循环物料。近年来由于钢铁联合企业产能迅速扩大，传统铁矿石品种产量已不能满足市场需求。由于力拓公司为了扩大生产能力，停止了安吉粉对张钢的供应，将安吉粉与皮尔巴拉地区的小矿山铁矿按照一定比例进行混合，形成单一含铁原料即皮尔巴拉混合矿（简称 PB 粉）。根据国内兄弟单位的使用情况，PB 粉配加量在 20~30%比较合适，张钢考虑价格方面的因素，将 PB 粉用料增加至 50%，全部代替安吉粉进行烧结。

为了尽快掌握 PB 粉的烧结和冶金性能，更好的指导烧结生产，决定进行了烧结杯试验。根据试验结果在平烧进行了生产试验。

5.1 实验条件

5.1.1 物化性能

表 5-1 PB 粉与安吉粉的比较

成分 种类	粒度组成 mm %				H ₂ O	烧损
	<1	1~3	3~5	>5		
PB 粉	49.1	18.4	17.3	15.2	10.5	4.5
安吉粉	40.5	20.4	15.2	23.9	10	6.5
成分 种类	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	P
PB 粉	61.3	3.80	2.36	1.74	0.036	0.08
安吉粉	61.6	3.60	2.28	1.77	0.026	0.064

PB粉是一种黄褐色粉矿，属于赤铁矿和褐铁矿的混合矿，烧损4.5%，比安吉粉烧损低2个百分点。粒级组成方面，PB粉与安吉粉相比粒度偏细，1mm以下增加8.6个百分点，5mm以上减少8.7个百分点，1~5mm部分变化不大。

化学成分，PB粉TFe=61.4%，SiO₂=4.00%，P=0.08%，与安吉粉相比TFe降低0.2个百分点，SiO₂高0.4个百分点，P高0.016个百分点，Al₂O₃略高。

PB粉与安吉粉的比较见表5-1。

5.1.2 试验原料

烧结杯试验含铁原料：PB粉、安吉粉、印粉、罗粉和返粉。熔剂：生石灰和蛇纹石。燃料：焦粉。试验各种原料的化学成分见表5-2。

表5-2 各种原料的化学成份

成分 种类	TFe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S	P	H ₂ O	烧损
PB粉	61.4	4.00		2.36	1.74	0.036	0.08	10.5	4.5
安吉粉	61.6	3.60		2.28	1.77	0.026	0.064	10	6.5
罗粉	56.0	5.96		2.47	1.87	0.037	0.043	11	10
印粉	61.2	4.1		2.73	1.8	0.028	0.041	11	4.4
返粉	56.50	5.70	8.80	2.10	1.95	0.033	0.063		2.00
生石灰		2.30	80.0						11.5
蛇纹石		38.50	4.50		38.00			8.00	12.5

5.2 烧结杯试验过程

5.2.1 试验条件

烧结杯直径为200mm，高为500mm；点火负压5KPa，点火时间3~4min。烧结矿碱度R=1.80，MgO=2.00%。

5.2.2 烧结杯试验方案

根据我厂含铁原料库存和进厂情况，确定4套烧结杯试验方案（见表5-3）。

烧结矿理论计算化学成分见表 5-4。

表 5-3 烧结杯试验方案

配 方 案	安吉粉	PB 粉	罗粉	返粉	印粉	生石灰	蛇纹石
方案 1	100					9.25	1.2
方案 2		100				10.1	1.2
方案 3	50		15	15	20	9.2	1.2
方案 4		50	15	15	20	9.6	1.2

表 5-4 烧结矿理论计算化学成份

成份 方案	TFe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P	R
方案 1	58.87	4.50	8.11	2.20	2.14	0.061	1.80
方案 2	57.13	4.78	8.60	2.27	1.97	0.074	1.80
方案 3	57.17	5.16	9.28	2.27	2.06	0.058	1.80
方案 4	56.54	5.29	9.49	2.31	1.98	0.064	1.80

5.2.3 试验结果

(1) 烧结工艺指标的变化

表 5-5 烧结工艺指标的变化

指标 方案	垂直烧结 速度	终点 温度	烧成率	粒度组成				转鼓强度
				>40	40~25	25~10	<10	
方案 1	20	263	79.8	10	17.6	31.4	41	42.6
方案 2	19.23	234	81.6	11.6	17.3	30.9	40.2	43.7
方案 3	21.59	268	82.3	9.2	15.4	32.5	42.9	41.2
方案 4	20.83	248	83.5	11.7	16.6	31.8	39.9	42

烧结工艺指标的变化见表 5-5。由表 5-5 可以看出，从垂直烧结速度看方案 1 比方案 2 快 0.77mm/min，方案 3 比方案 4 快 0.76mm/min。烧成率方面方案 1 比方案 2 低 1.8 个百分点，方案 3 比方案 4 低 1.2 个百分点。粒度组成方面，10mm 以下方案 1 比方案 2 提高 0.8 个百分点，方案 3 比方案 4 提高 3 个百分点。转鼓

强度方案 1 比方案 2 降低 1.1 个百分点，方案 3 比方案 4 降低 0.8 个百分点。

(2)冶金性能

烧结矿也进行能见表 5-6。从表 5-6 可以看出，900℃还原性方案 1 比方案 2 降低 2.53 个百分点，方案 3 比方案 4 降低 3.34 个百分点。低温还原粉化率 3.15mm 以上，方案 1 比方案 2 降低 3.67 个百分点，方案 3 比方案 4 降低 3.06 个百分点。开始软化温度方案 1 比方案 2 降低 92℃，方案 3 比方案 4 降低 51℃。软化区间方案 1 比方案 2 降低 21℃，方案 3 比方案 4 降低 32℃。

表 5-6 烧结矿冶金性能

冶金性能 方案	900℃ 还原性	500℃低温还原粉化率			荷重软化温度		
		+6.3 mm	+3.15 mm	-0.5 mm	T4	T40	区间
方案 1	76.35	24.25	59.53	11.08	1044	1183	139
方案 2	78.88	23.35	63.2	8.92	1136	1296	160
方案 3	77.44	36.53	62.31	7.61	1116	1259	133
方案 4	80.78	30.45	65.37	9.23	1167	1332	165

5.3 PB 粉在张钢 24m² 平烧的生产实践

5.3.1 基准期和试验期的配料结构

根据烧结杯试验结果，张钢根据进厂矿粉及库存情况，制定基准期和试验期的配料结构，见表 5-7。

5.3.2 烧结过程参数控制

在试验期间，根据试验结果，对工艺参数进行了相应调整，烧结工艺参数控制见表 5-8。由于在试验期间使用的 PB 粉 SiO₂ 含量较安吉粉高 0.4 个百分点，为了将烧结矿的 SiO₂ 控制在 5.1% 左右，蛇纹石配比由基准期的 1.3% 降到试验期的 1.0%，生石灰用量提高了 0.2 个百分点。考虑到 PB 粉比安吉粉的烧损少 2 个百分点，焦粉用量降低 0.2 个百分点，混合料水分由基准期的 10.8% 降到试验期

的 10.3%，混合料粒度 3mm 以上部分减少 6.76 个百分点，料层透气性下降，烧结料层降低了 20mm。

表 5-7 基准期和试验期物料结构

配比 方案	安吉粉	印粉	PB 粉	罗粉	返粉	总计
基准期	50	25		10	15	100
试验期		25	50	10	15	100

表 5-8 烧结工艺参数控制

工艺参数 方案	混合料		蛇纹石 %	生石 灰%	焦粉 %	料层厚度 mm	点火温度 ℃
	H ₂ O	+3mm					
基准期	10.8	72.44	1.3	10.2	5.7	670	950~1150
试验期	10.3	65.68	1.0	10.4	5.5	650	950~1150
对比	-0.5	-6.76	-0.3	+0.2	-0.2	-20	

在试验期间，为保证烧结矿经济技术指标稳定，我们采取了以下措施：

(1)严格控制混合料水分，加强同步操作和四班统一操作，稳定机内返粉用量，提高成品率。

(2)适当降低烧结料层厚度，在料层中上部安装松料器，以提高烧结料层中上部的透气性。

(3)对焦粉粒度进行严格控制，3mm 以下比例在 80%以上。

(4)采用边缘压料技术，抑制边缘效应，保证台车料层横向之间风量均匀。

5.3.3 试验结果及分析

表 5-9 基准期与试验期的主要技术经济指标变化

成份 方案	TFe	SiO ₂	FeO	R	出矿率	利用 系数	固体 能耗	转鼓 强度
基准期	57.52	5.09	9.30	1.83	92.51	2.44	52.12	72.1
试验期	57.12	5.13	8.82	1.8	93.73	2.42	50.3	72.9
对比	-0.4	+0.04	-0.48	-0.03	+1.22	-0.02	-1.82	+0.8

基准期与试验期的主要技术经济指标变化见表 5-9。试验结果表明，与基准

期相比, 烧结矿 TFe 降低 0.4 个百分点, 这与 PB 粉 SiO₂ 高、烧损低有关, 出矿率提高 1.22 个百分点, 利用系数降低了 0.02t/m²·h, 烧结固体燃耗降低了 1.82kg/t 矿, FeO 含量降低了 0.48 个百分点, 转鼓强度提高了 0.8 个百分点。

5.3.4 烧结效益分析

烧结固体燃耗降低了 1.82kg/t 矿, 烧结矿年产量 152 万吨, 焦粉价格为 773 元/t, 效益为: $152 \times 1.82 / 1000 \times 773 = 213.8$ 万元。

5.4 本章小结

(1) 从矿粉的物化性能分析, 与安吉粉相比, PB 粉的品位略低、SiO₂ 偏高、粒度偏细、成球效果差, 但赤铁矿比例增加, 烧损比安吉粉低。

(2) 从烧结杯试验结果看, 使用 50%PB 粉后, 垂直烧结速度略有下降, 烧成率略有提高, 烧结矿转鼓强度有所提高, 冶金性略有改善, 荷重软化温度略高于安吉粉。

(3) 从工业生产实践看, 使用 50%PB 粉后, 烧结矿 TFe 和利用系数略有降低, 出矿率和转鼓强度提高, 固体燃耗降低。

第六章 在烧结生产中应用除尘灰试验研究

张店钢铁总厂炼铁系统在生产过程中,经布袋除尘器收集起来的大量含铁灰尘,粒度比较细(≤ 200 网目的比例占90%以上),除尘灰的化学成分如表6-1。由表6-1可见,高炉灰化学成分波动较大,特别是CaO、TFe和烧损变化大且无规律,因此除尘灰的使用成了一大难题,在未找到更合适的办法前只能作为工业废物处理。随着高炉灰尘储量越来越多,存放空间越来越小。一方面受矿石价位逐步升高和厂里资金紧张的影响,另一方面为了合理利用资源,变废为宝,开始向烧结原料中配加高炉灰的试验。

6.1 除尘灰的物化特性及烧结性能

高炉除尘灰特点是粒度细,易吸水,化学成分波动较大。由于粒度比较细,在烧结过程中只需较低温度就可熔化,润湿周围矿粒,增强颗粒间的连接力,提高烧结矿强度,减少返矿量,提高烧结利用系数,降低固体燃耗。另外由于CaO和SiO₂含量高,在烧结过程中有利于形成液相,在一定程度上增强了烧结矿的转鼓强度。

表 6-1 除尘灰化学成份

CaO (%)	SiO ₂ (%)	TFe (%)	烧损 (%)
16.32	6.78	50.2	6.4
8.48	6.24	56	7
8.48	7.09	56.2	4.1
14.72	5.74	52.6	6.3
11.6	6.72	54	7.5
12.64	6.65	58	6.8
15.2	6.31	50.6	5.9
12.4	6.65	53	13
7.6	6.72	58.4	5.2
13.66	6.77	52	6.9
14.64	6.51	58.2	1.83

6.2 除尘灰烧结技术的基本原理

(1)高炉除尘灰含铁平均值在 50%以上,烧损在 12%左右,从理论上来说可以直接作为烧结原料。

(2)CaO 含量在 8.5%以上, SiO₂ 含量在 6.5%以上,在烧结过程中可以产生大量液相,提高烧结矿粒之间的联结力,在烧结过程中可以减少一部分溶剂的配比。

(3)由于其粒度较细,在烧结过程中有燃料产生的高温高热条件下,矿粒易于提前熔化,并在氧化性气氛中生成 Fe₂O₃, Fe₂O₃ 再与 CaO 反应生成 CaO·Fe₂O₃,提高了烧结矿的还原性和抗压强度,同时还降低了一部分固体燃耗。另外由于张钢烧结原料粒度较粗,搭配上除尘灰后,在制粒效果方面得到改善,提高了烧结料层的透气性,因此不会影响产量。

6.3 除尘灰应用于张钢烧结机上所具备的基本条件

除尘灰应用于张钢烧结机上所具备的基本条件如下:

(1)除尘灰运输方便。

(2)含铁量在 50%以上,有较高的利用价值,在铁矿石涨价的情况下,可以给厂里节约一部分资金。

(3)CaO 含量在 8.5%以上, SiO₂ 含量在 6.5%以上,可以降低一部分熔剂配比,且生产出来的烧结矿强度高,抗压性能好,给高炉内气体流动创造了条件。

(4)粒度细,稀释后可以直接使用泥浆泵输入混料筒,设备简单,投资少。

(5)操作工劳动强度小,便于操作。

6.4 方案的制定

最初方案是将除尘灰运到预配料料仓,按铁料的 4%~7%配比比加,由于除尘灰粒度细、流动性好,经常流到皮带外面,既造成配比不准又给工人增加了劳动强度,另外对环境的污染也比较严重。后来采用入仓前在表面上洒水的方法,这样虽然解决了环境污染和“跑料”的问题,但由于料湿经常造成“悬料”现象,致使配比也不准,烧结化学成分波动大,于是制订了第二方案。第二方

案是采用在泥浆罐中加水稀释、搅拌成泥浆，使用泥浆泵通过管路输入到一号混料筒，使用这个配加办法解决了“跑料”、“悬料”和环境污染这三个影响生产和环境的问题。

6.5 方案实施及效果

6.5.1 方案实施

除尘灰稀释成泥浆工程正式投入生产，设备如图 6-1，由一个直径为 3m、高为 3m 的地下泥浆罐和直径为 3m、高为 4m 的地上泥浆罐组成，在两个罐内对安装有搅拌机和泥浆泵，泥浆管路由 6cm 的钢管焊接而成。试验器除尘灰和水的比例为 4: 8（重量比），由于浓度大，经常堵塞管路，引起混合料水波动。后来比例改为 3: 9（重量比），从而解决了堵塞管路的问题。一天使用 16 吨除尘灰。

6.5.2 效果

(1)使用高炉除尘灰前、后的技术经济指标见表 6-2、表 6-3。由表可以看出：

- 1)配加除尘灰后烧结参数变化不大，化学成分波动不大；
- 2)烧结机利用系数略有提高。
- 3)烧结固体燃耗降低 5kg/t 烧结矿。

(2)经济效益分析

根据当时焦粉价格 637 元/吨。带烧平均日产 2200t 烧结矿，燃耗平均降低了 5kg/t 烧结矿，效益为：

$$11 \times 30 \times 2200 \times 5 \times 637 = 231.231 \text{ 万元}$$

2) 除尘灰每天消耗 14 吨，节约铁矿粉每吨价格为 750 元，为厂里节约资金：

$$12 \times 30 \times 14 \times 750 = 378 \text{ 万元}$$

烧结效益为：609.231 万元

3) 设备投资 10 万元。

4) 年总经济效益总额：599.231 万元。

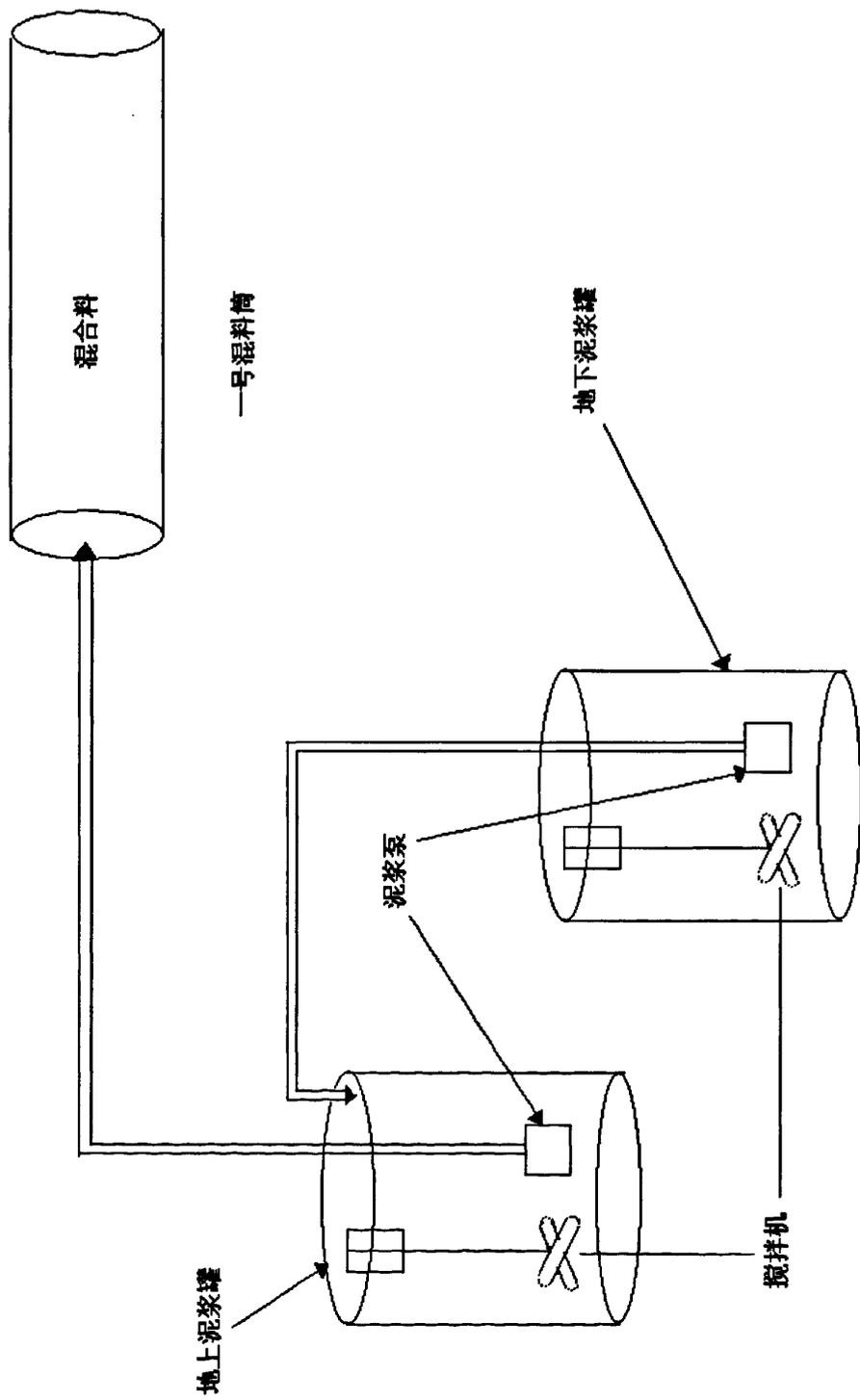


图 6-1 除尘灰泥浆配加工程示意图

表 6-2 使用前的经济技术指标

组别 指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R 合格率 (%)	77.9	85.5	82.5	90	89.4	82.54	93	94	87.6	87.0	89.4	93.4
TFe 合格率 (%)	92.5	92.4	89.9	95.8	91.1	93.3	96.1	92.9	91.24	95	95.2	96.5
FeO 合格率 (%)	95.8	95.3	91.2	75.5	95.7	90	95.4	95.9	93.8	88.9	91.6	94
燃料(kg/t)	56	58	57	61	55	57.5	58	56.5	57	60	61	56
利用系数(t/m ² h)	1.73	1.82	1.79	1.75	1.81	1.85	1.8	1.78	1.76	1.76	1.69	1.79

表 6-3 使用后的经济技术指标

组别 指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R 合格率 (%)	93.0	94.8	99.1	96.9	95.7	98.9	99.6	96.7	96.7	99.6	96.1	98.1
TFe 合格率 (%)	97.83	97.8	97.8	100	99.4	100	99.2	97.8	100	99.6	98.6	100
FeO 合格率 (%)	93.3	93.3	94.4	93.9	92.5	93.9	96.5	92.6	94.4	91.92	92.8	92.4
燃料(kg/t)	49	54	51	47	50	49	48	50	49.5	51	49	50
利用系数(t/m ² h)	1.83	1.91	1.84	1.8	1.76	1.82	1.79	1.82	1.85	1.92	1.89	1.98

6.6 本章小结

通过在张钢 $2 \times 24 \text{m}^2$ 带式烧结机上使用高炉废弃物的生产试验, 烧结料中配加除尘灰后, 烧结矿化学成分波动不大, 烧结机利用系数略有提高, 烧结过程中固体燃耗降低, 且设备简单, 成本不高, 取得了满意的效果。

第七章 优化烧结物料结构,进行烧结矿配矿的试验研究

随着现代钢铁生产的发展以及在市场经济的推动下,生产成本和经济效益的矛盾十分突出,对于各大钢铁企业来说,降低成本,提高产品质量已迫在眉睫。因此,单一矿种的烧结已经难于满足企业的要求,当今大部分企业已经采用几种矿粉合理搭配进行烧结,这样即可以降低烧结成本,又能提高烧结矿质量。尤其最近各大企业相继增加进口粉和外来铁矿粉的用量,并且随着进口粉和外来粉种类增多,探讨各种原料的合理配比已势在必行,所以对烧结配矿的研究具有很重要的实践作用。烧结配矿就是将几种铁矿粉合理搭配并与熔剂、燃料等,根据烧结过程和烧结质量的要求进行配料和烧结。

选择合理的配矿应具有固体燃耗低、原料费用低、烧结矿品位合理、造渣组分适宜、转鼓指数和成品率高、返矿率低、低温还原粉化率低、还原性能好、利用系数及烧结矿产量高的特点。

为进一步优化物料结构,提高烧结矿质量,改善烧结矿的烧结性能和冶金性能,到莱钢对成品烧结矿及十种物料结构进行了烧结杯试验。本次试验对烧结过程的工艺参数和烧结所得烧结矿的冶金性能进行了测试。

7.1 实验条件

7.1.1 烧结杯试验主要工艺流程

烧结杯试验主要工艺流程:

- (1)配料:按预先制定的方案,准确称取相应的原料。
- (2)混料:各种原料称量完毕后,进行混料,混料分两步进行。首先一次混料,在钢板上用锹将混合料倒数遍,并加入适量的水进行混匀,一次混料的目的是混匀及加水湿润。然后进行二次混料,将混合料装入圆筒混料机内盖好端盖进行混料,时间为4分钟。

(3)装料:在烧结杯底部首先加入一层粒度为10~16mm,重1kg的烧结矿作为铺底料铺平,以保护烧结杯炉算。将经过二次混料机制粒的烧结混合料采用

多点加入法加到烧结杯中。

(4)点火烧结：开启煤气与助燃风机。点火将点火器推到烧结杯上面，同时启动主抽风机。点火温度控制在 1000℃左右，调整点火抽风负压到 5000Pa，点火时间 3~4min。点火完毕移开点火器，进行抽风烧结，抽风负压 5000Pa，每隔 5min 记录一次废气温度和抽风负压变化。以废气温度达到最高点时为烧结终点。然后冷却到废气温度为 200℃时卸矿→破碎→称量→筛分测出各个粒级所占的重量百分数。

(5)进行烧结矿强度指标检测。

(6)进行烧结矿的还原度的检测。

(7)进行烧结矿低温还原粉化性能检测。

7.1.2 设备型号

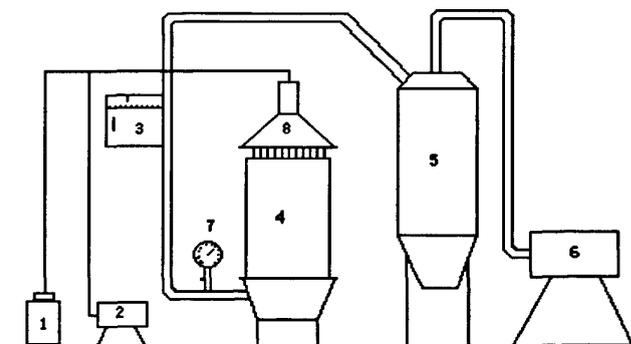


图 7-1 烧结实验装置示意图

1——点火煤气；2——助燃风机；3——尾气温度测试仪；4——烧结杯；5——除尘器；6——主抽风机；7 负压计；8 点火器

烧结试验一般采用间歇式烧结杯来完成，烧结方法为抽风烧结法。国内外的烧结试验设备形状、尺寸大小没有统一的规格，我国的烧结试验标准草案规定烧结杯为圆形。一般有 $\Phi 150\text{mm}$ 、 $\Phi 200\text{mm}$ 、 $\Phi 300\text{mm}$ 等几种规格。本试验使用的烧结杯为 $\Phi 200\text{mm}$ ，高 500mm，原料量为 30~35kg。抽风风机，要求具有一定的风量和抽风压力；除尘器，用来除去抽风烧结过程中废气中的颗粒粉尘，以防损坏风机；煤气、点火器、助燃风机，用来保证实验顺利进行、能够成功点火烧结；废气温度记录仪和负压表，记录废气温度变化和烧结完成时间的确定，记录烧结过程中的负压变化情况。

表 7-1 各种原料成分 (%)

成分 原料	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	S	P	Al ₂ O ₃	H ₂ O	烧损
返粉	57.00	5.45	8.40	1.95	0.40	0.033	0.055	2.40	0.50	2.00
澳粗 56	56.60	6.00	0.16	1.10	0.13	0.026	0.074	2.40	10.50	10.50
瓦斯灰	52.00	7.50	5.60	1.05	0.15	0.034	0.046	2.65	5.00	30.00
墨西哥粉	60.50	5.90	0.24	0.92	0.15	0.030	0.050	3.85	5.70	3.50
智利矿粉	63.00	6.10	1.20	2.50	0.10	0.230	0.033	1.60	3.50	3.00
印三井 60	61.70	4.10	0.16	1.35	0.89	0.023	0.034	1.67	10.50	4.50
印粉 63	62.00	4.20	0.16	1.65	0.11	0.030	0.045	3.65	8.00	3.50
PB 粉	61.60	4.00	0.16	1.50	0.21	0.025	0.080	2.03	10.00	4.50
金岭精粉	66.00	4.00	1.20	3.10	0.15	0.060	0.015	1.20	10.00	0.50
蛇纹石	3.00	38.50	4.50	38.11	0.10	0.000	0.001	1.80	5.50	12.50
生石灰		3.10	80.00	0.00			0.001		0.00	11.00
焦粉		6.50							10.00	86.00

烧结试验装置如图 7-1。烧结实验的其它主要设备还包括 $\Phi 600\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 圆筒混料机一台，转速为 120 转/min，用于烧结混合料的混匀和制粒；烧结矿性能检测装置主要包括落下、筛分装置及转鼓(直径为 1000mm，厚度为 100mm，转速为 25 转/min)。

混合机直径为 600mm，长为 1200mm，转速为 120 转/min。

7.1.3 各种原料成分

进行烧结杯试验的各种原料成分见表 7-1。

7.1.4 烧结物料结构

烧结物料结构见表 7-3。

7.1.5 烧结矿理论计算化学成分

我们对进行配矿的十套方案进行了计算，所得的理论化学成分见表 7-3。

针对张钢目前的原料条件，我们提出了十套配料方案(见表 7-2)进行试验。

表 7-2 烧结物料结构 (%)

原 料 方 案	澳粗 57	PB 粉	地 方 精 粉	墨 粉 61	返 粉	瓦 斯 灰	智 利 粉	印 粗 60	印 粗 63	生 石 灰	蛇 纹 石	焦 粉
方案 1	13	40			17			30		9.3	1	6.3
方案 2	15	52	15		18					10.4	1	6.0
方案 3		39		15	16			30		7.6	1	6.3
方案 4	13	54			18		15			9.8	1	6.2
方案 5		45	12		18			25		9.7	1.2	6.0
方案 6	12	31	10		17		10	20		10.5	1	5.8
方案 7		37	10		17	3	13		20	10.2	1	4.8
方案 8	10	38			17		15	20		9.8	1	6.1
方案 9	13	30	15		17			25		9.9	1	5.8
方案 10		37	10	15	18			20		8.0	1	6.0

表 7-3 烧结矿理论计算化学成分 (%)

成 分 方 案	TFe	SiO ₂	CaO	R	MgO	Al ₂ O ₃	P
方案 1	56.49	5.36	9.62	1.8	1.79	1.93	0.057
方案 2	57.04	5.26	9.5	1.8	2.00	1.93	0.061
方案 3	56.58	5.23	9.44	1.8	1.9	1.87	0.055
方案 4	56.32	5.61	10.08	1.8	1.97	1.96	0.063
方案 5	57.29	5.06	9.13	1.8	2.04	1.81	0.053
方案 6	56.83	5.43	9.8	1.8	2.01	1.84	0.051
方案 7	57.32	5.38	9.7	1.8	2.12	2.17	0.051
方案 8	56.43	5.56	10	1.8	1.95	1.88	0.055
方案 9	56.96	5.26	9.45	1.8	1.92	1.88	0.053
方案 10	57.05	5.16	9.32	1.8	2.05	1.83	0.053

7.2 试验结果

按照计划, 分别对十套配矿方案的烧结矿进行了烧结杯试验, 并对烧结过程

中的各种参数及烧结后的烧结矿进行了性能检测，得到物理指标见表 7-4，十种烧结矿的化学成分见表 7-5，现行成品烧结矿化学成分、物理指标见 7-6。

表 7-4 十套方案的物理指标

工艺参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8	方案 9	方案 10
终点温度 ℃	276	264	256	246	262	270	274	287	246	278
垂直烧结速度 mm/min	21.2	20.15	20.51	19.95	19.38	18.52	19.12	18.05	20.17	19.32
转鼓强度	39.2	50.6	43.6	39.7	40	48.7	45.4	39.7	46.6	45.6
烧成率 %	83.5	83.5	86.2	83.6	83.2	87.4	84.9	84.9	86.1	85.2
成品率 %	79.5	89.4	72.5	82.2	82.4	72.8	84.0	78.8	77.6	82.2
900℃还原性	75.9	73.2	58.2	72.2	76.9	73.8	74.4	75.7	73.6	74.3
RDI+6.3 %	22.9	22.3	54.9	31.4	28.1	19.9	31.6	30.7	30.2	35.6
RDI+3.15 %	54.9	58.2	77.6	64.5	62.1	56.3	63.8	62.6	61.7	64.3
RDI-0.5 %	14.3	10.6	4.9	10.0	10.3	11.3	8.6	10.2	11.0	10.7
成本 元	1063	1115	1046	1061	1131	1129	1194	1083	1143	1096

表 7-5 十种烧结矿的化学成分 (%)

成分 方案	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	FeO	TiO ₂	R(倍)
方案 1	58.4	6.07	8.67	1.24	2.8	0.008	11.3	0.13	1.43
方案 2	56.9	5.41	9.86	1.27	2.48	0.009	9.63	0.11	1.82
方案 3	59.42	5.81	7.55	1.04	2.62	0.017	11.85	0.12	1.30
方案 4	57.65	6.13	9.31	1.29	2.60	0.006	11.49	0.14	1.52
方案 5	57.55	5.62	9.08	1.39	2.74	0.005	10.78	0.13	1.62
方案 6	57.63	5.17	9.26	1.18	2.44	0.006	8.98	0.13	1.79
方案 7	57.88	5.44	9.10	1.12	2.60	0.008	13	0.15	1.67
方案 8	58.21	5.51	9.13	1.13	2.57	0.009	12.79	0.15	1.66
方案 9	57.61	5.41	9.07	1.17	2.65	0.003	9.66	0.12	1.68
方案 10	58.13	5.52	9.16	1.14	2.59	0.007	12.72	0.14	1.66

7.3 实验结果分析

从以上烧结试验数据可以看出：

(1) 十个方案中配加了地方精粉的方案 2、6、7、9、10 其转鼓强度相对较高。分析其原因，地方精矿粉中 MgO 含量明显高于其他矿粉，MgO 与其他矿相的反应明显好于其他配加蛇纹石的效果，因此烧结物料结构中配加适量地方精粉有利于提高烧结矿转鼓强度。

表 7-6 成品烧结矿的化学成分 (%)、物理指标

带 烧 矿	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	FeO	TiO ₂	R
	56.84	5.28	10.18	1.12	2.68	0.014	12.36	0.12	1.93
	900℃ 还原性	RDI+6.3	RDI+3.15	RDI-0.5	转鼓强度				
	73.3	44.7	62.7	16.8	73				
平 烧 矿	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	FeO	TiO ₂	R
	55.74	5.3	10.68	1.49	2.55	0.008	8.84	0.12	2.02
	900℃ 还原性	RDI+6.3	RDI+3.15	RDI-0.5	转鼓强度				
	76.6	34.4	58.1	15.9	72.7				

(2) 成品烧结矿所用配比带烧矿与方案 9、平烧矿与方案 1 接近，从试验结果看成品烧结矿 900℃还原性、低温还原粉化率分别与方案 9、方案 1 相近，因 R 差别较大等因素，其转鼓强度差距较大。因此原料厂目前生产烧结矿应该能够满足高炉生产需要。

(3) 成品带烧矿中 FeO 为 12.36%，其 900℃还原性为 73.3%，RDI+3.15 为 62.7%；平烧矿中 FeO 为 8.84%，其 900℃还原性为 76.6%，RDI+3.15 为 58.1%，FeO 偏高烧结矿还原性较差，低温还原粉化率指标较好，如果这时烧结矿的碱度较低，生成更多的硅酸铁，烧结矿的还原性会更差（如方案 3）；FeO 偏低烧结矿还原性较好，低温还原粉化率指标较差。因此 FeO 控制在合理范围内，并适当提高烧结矿碱度，更有利于高炉生产。

(4)方案 1-5 适用于平烧, 方案 6-10 适用于带烧, 综合各方案理化指标、烧结成本考虑, 适用于平烧生产的方案 1、4, 适用于带烧生产的方案 9、10, 既能稳定烧结矿产、质量, 满足高炉用料, 又能合理控制烧结矿成本。

7.4 本章小结

(1)烧结物料结构中配加适量精粉有利于提高烧结矿转鼓强度。

(2)原料厂目前生产烧结矿应该能够满足高炉生产需要。

(3)若成品烧结矿中 FeO 偏高, 则烧结矿还原性较差, 低温还原粉化率严重, 如果这时烧结矿的碱度较低, 烧结矿的还原性会更差; 若成品烧结矿中 FeO 偏低, 则烧结矿还原性较好, 低温还原粉化率较差。因此 FeO 控制在合理范围内, 并适当提高烧结矿碱度, 更有利于高炉生产。

(4)方案 1-5 适用于平烧, 方案 6-10 适用于带烧, 综合各方案理化指标、烧结成本考虑, 适用于平烧生产的方案 1、4, 适用于带烧生产的方案 9、10, 既能稳定烧结矿产、质量, 满足高炉用料, 又能合理控制烧结矿成本。

第八章 结论

本文从张钢原料厂的实际情况出发，在压辊布料、向烧结料中添加蛇纹石、大量配加 PB 粉、烧结中使用除尘灰及烧结配矿等方面进行了增产降耗的试验研究，得出如下结论：

(1)通过压辊布料技术的应用，大大抑制了边缘效应，改善了料面点火质量，增加了烧结有效风量，提高了烧结矿的转鼓强度，降低了入炉含粉和 FeO 含量，改善烧结矿的粒度组成和外观质量，提高了炼铁水平。

(2)针对原料供应情况的变化，大比例配加 PB 粉，通过改进烧结生产工艺，控制烧结工艺参数，可以提高烧结透气性，稳定和改善烧结技术经济指标，满足炼铁生产需要。该技术增大了可用矿石资源，解决了矿石紧张的问题。

(3)在全粗粉烧结、烧结矿碱度不太高（1.80 左右）的情况下，配加蛇纹石粉替代白云石粉作为 MgO 矿源，能够有效地提高烧结矿转鼓强度，改善粒级组成和冶金性能，起到增产降耗的作用。

(4)通过在烧结机上使用高炉废弃物的生产试验，烧结料中配加除尘灰后，烧结矿化学成分波动不大，烧结机利用系数略有提高，烧结过程中固体燃耗降低，且设备简单，成本不高，取得了满意的效果。

(5)通过不同配矿方案下烧结杯试验、冶金性能测定对比可知：原料厂目前生产烧结矿应该能够满足高炉生产需要，烧结物料结构中配加适量精粉有利于提高烧结矿转鼓强度，成品带烧矿中 FeO 控制在合理范围内更有利于高炉生产。

参考文献

- [1] 王维兴. 钢铁企业发展循环经济的技术支撑[J]. 中国钢铁业, 2007, 6: 25-27
- [2] 张寿荣. 进入21世纪我国钢铁工业面临的机遇与挑战—兼论中国需要产多少钢[A]. 中国金属学会. 中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2003:3-9.
- [3] 单尚华, 张壮志, 关克正. 中国钢铁工业发展战略思考[A]. 中国金属学会. 2003中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2003:10-15.
- [4] 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分第二版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [5] 徐矩良. 我国高炉合理炉料结构探讨[J]. 炼铁, 2004, 23(4):25~26.
- [6] 石川安土. 烧结工艺的最新发展[C]. 第二届国际造块会议论文集, 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- [7] 中南矿冶学院团矿教研室. 铁矿粉造块[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
- [8] 麻苗田, 张景智. 高炉炼铁原料制备技术[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1992.
- [9] Vlack L H V. Geometry of Microstructure[M]. Proc. Symp. On Microstructure of ceramics Material, 1964.
- [10] Dawson P R. Recent Developments in Iron Ore Sintering New Development for Sintering[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1993, No.2:135-136.
- [11] BRISTOW NJ, GOSS J and WATERS AG. Iron steelmaker[M]. 1991.
- [12] Brussels. Steel statistical yearbook[C]. International Iron and steel Institute, 1991.
- [13] [苏联]BerMaH E Ф. 烧结一百年[J]. 烧结球团, 1989, 24(1):42-44.
- [14] Cappel F, Lurgi GmbH. The History and Development of Iron Ore Sintering[J]. Ironmaking Conference Proceeding, 1989, 3322~3329.
- [15] 许满兴. 铁矿石冶金性能及高炉炉料结构论文集[C]. 北京, 北京科技大学, 1996.
- [16] BRISTOW NJ, GOSS J and WATERS AG. Iron steelmaker[M]. 1991.
- [17] 孙君泉、曾国华. 国外烧结球团发展方向[J]. 国外烧结球团, 1982(1):15~18.
- [18] 朱德庆. 强化制粒对高铁低硅混合料烧结的影响[J]. 烧结球团, 2003, 28(1):10-13.
- [19] 谭金馄. 低温烧结及其技术措施[J]. 烧结球团, 1992, 27(3):1~4.
- [20] 杨李香. 澳大利亚的烧结研究[J]. 矿冶工程, 196(10):10-16.
- [21] 贺真. 低硅烧结矿试验研究[J]. 湘钢科技, 2001 (3):26~32.
- [22] Satskii V A, Tarasov V P, LNabona V. Results of Operating the Bell Charging Apparatus with Delivery of Part of the Coke into the Axial Zone of the TOP[J]. Coke and Ironmaking congress, 2001, 31(11):1-5.
- [23] Loo C E, Wan K T, Howes V R. Mechanical Properties of natural and Synthetic mineral

- Phases in sinters having varying reduction on degradation indices[J].Ironmaking and Steelmaking, 1998, 25(6):279-285.
- [24] Kasai E. Influence of properties of fluxing materials on the flow of melt formed in the sintering process[J]. ISIJ International, 2000, 40(9):857-862
- [25] Kowaldki W, Kersting K and Werner P. The Influence of sinter Composition on Sintering Rate and Physical Quality of sinter[C]. Ironmaking Conference Proceedings, 1997: 415-425.
- [26] 唐先觉. 我国烧结工业现状及面临的问题[J]. 烧结球团, 1995, 20(6):1-6.
- [27] 许满兴. 论烧结矿质量进步与高炉操作技术的发展[J]. 烧结球团, 2000, 25(1):1-6.
- [28] 技术信息. 1997年钢铁企业烧结技术经济指标[J]. 炼铁, 1998, (3):53-55.
- [29] 技术信息. 1996年钢铁企业烧结技术经济指标[J]. 炼铁, 1997, (3):57-59.
- [30] 唐先觉. 喜迎我国烧结行业的大发展[J]. 烧结球团, 2003, 28(3):1-3.
- [31] 王悦祥. 烧结矿与球团矿生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 136-226
- [32] 陈平, 王常秋. 浮选赤铁矿烧结节能降耗的实践[J]. 烧结球团, 2004, (5):51-54.
- [33] 邹琳江, 李洪福, 段锋. 济钢热风烧结节能技术的实验研究[J]. 工业炉, 2007, 29(4):9-11
- [34] 吴志军, 高斌, 曹斌. 热风烧结技术在莱钢3#105m²烧结机上的应用[J]. 山东冶金, 2006, (3).
- [35] 王立平, 杨占林, 游华章. 提高石钢烧结矿产质量的研究与分析[J]. 烧结球团, 2004, 29(1):11-13
- [36] 夏铁玉, 李政伟, 颜庆双. 鞍钢三烧车间600mm厚料层烧结生产实践[J]. 烧结球团, 2005, 30(1):45-47.
- [37] 李井成. 武钢一烧降低工序能耗的实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(1):55-57.
- [38] 汪保平, 吴朝刚, 顾云松. 马钢300m²烧结机带冷烟气余热发电工程[J]. 2007, 32(2):8-12.
- [39] 冯娟. 首钢烧结节能的实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(1):53-54.
- [40] 王珂, 夏建刚, 张惠王. 莱钢烧结厂265 m²烧结系统环冷烟气的余热利用[J]. 烧结球团, 2007, 32(4):47-49.

致 谢

本课题所进行的研究工作是在导师于化顺教授的悉心指导下完成的。于老师渊博的学识、严谨的治学态度、诲人不倦的工作作风和高尚的品德都使我获益匪浅，终身难忘。学生深信从导师那里学到的专业知识、科研学术方法将受益无穷。在此，学生向导师表示最诚挚的感谢和崇高的敬意。

感谢山东工业职业学院的领导和同事在这三年学习中的给予的理解和帮助。

感谢家人，尤其是我的爱人和孩子，在这三年学习中给予的理解和支持。