

高炉煤粉预热性能的研究

摘 要

高炉喷吹煤粉工艺可以降低焦比、合理利用煤炭资源、减少环境污染、降低生产成本等作用。然而随着煤粉喷吹量的增加，煤粉由于加热和裂解而消耗的热量也随之增加，致使冶炼过程中应补偿的风温加大，从而加大热风炉的生产压力，以至于增加了生产成本。因此，完善高炉喷煤技术、改进喷煤技术细节成为广大炼铁工作者的努力方向。

实践证明，在高喷煤比条件下常常出现未燃煤粉从炉顶逸出现象，未能实现煤粉的充分利用。因此提高煤粉在风口的燃烧率，解决煤粉在高炉内的利用问题是高喷煤操作中必须面对的重要问题。

本课题以宝钢高炉喷吹原料条件为基础，在实验室进行煤粉加热后性能变化的研究，从而分析得出煤粉加热后安全性能以及对煤粉输送过程的影响，并根据高炉的实际生产条件，通过理论和实验研究确定煤粉的合理预热方式和预热装置。研究结果表明：

1. 煤粉失重实验结果表明，预热的煤粉要比没有预热的失重快。且预热温度越高，失重率和失重速度也越大；

2. 从煤粉的流动性和喷流性来分析，升高温度至 200℃，有利于改善煤粉的流动性和喷流性。可以预测，在低于煤粉燃点条件下，煤粉预热不会对煤粉的输送产生过大的影响；

3. 煤粉的燃烧率主要由煤种决定。烟煤的燃烧率明显高于无烟煤，但热值低于无烟煤，而混合煤喷吹有利于煤粉燃烧和满足高炉热量需求。采用直接加热和间接加热两种方法预热煤粉并喷吹，结果表明：煤粉燃烧率普遍呈上升趋势，一般煤粉燃烧率提高 10%~30%不等。相比而言，采用预热温度为 200℃时，提高煤粉燃烧率的效果较明显。

关键词：高炉；煤粉；预热；失重；流动性；燃烧率

Research on performance of preheated coal for blast furnace injection

Abstract

PCI could reduce coke ratio, utilize coal resource effectively, decrease environment pollution and reduce the costs of hot metal production if the technics of powder coal injection into blast furnace is used. However with the quantity of powder coal increasing, the heat consumed on heating and cracking the powder coal is also increased. In order to compensate the heat consumed, the Hot-blast furnace must provide the wind in higher temperature, and the cost of production increases accordingly. Now most puddling operator put their emphases on perfecting the technology of blast furnace blowing coal powder and improving the details of it.

It has been proved that the powder coal couldn't be used fully, and the unburned coal would be liberated from furnace roof in the condition of high coal ratio. So raising coal combustion rate in the blast furnace is the key for powder coal injection.

Based on the injection materials of BF used by Baosteel, the experiment studied the transformation of coal properties after heating in laboratory. The safety of heating process and the influence of coal transportation were analyzed. According to the actual conditions of BF, the reasonable preheating way and heating devices were determined through the theoretical and experimental study. The results were showed as follows:

1. Coal weightlessness experimental results show that the weightlessness of coal preheating is faster than that without preheating. The higher the preheat temperature is, the greater the rate of weight loss and weight loss are;

2. From the analysis of the flow ability of coal and jet ability of Coal, the flow ability and jet ability of coal are improved when the temperature is up to 200℃. We can confirm that coal transportation can't be influenced by coal preheating if the temperature is lower than the coal ignition point;

3. Coal combustion rate is mainly decided by the coal. Soft coal combustion rate is obviously higher than Anthracite coal, but lower on calorific value. Injection of Mixed pulverized coal can not only improve the combustion (rate) of coal, but also satisfy the heat requirement of BF. Powder coal is preheated by direct or indirect way

and then injected into BF, the results showed that: Coal combustion rate is generally upward trend. Coal combustion rate can enhance from 10% to 30%. Generally speaking, the effect of enhancing the pulverized coal combustion rate is obviously when preheated temperature is 200°C.

Key word: Blast furnace; powder coal; preheating; weightlessness; flow ability;
combustion rate

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 

日 期：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

(如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。)

学位论文作者签名：

导师签名：

签 字 日 期：

签字日期：

第1章 文献综述

世界炼铁业普遍存在着高能耗、高成本、焦炭短缺以及生产环境恶化等问题,因此,21世纪炼铁工业发展的重点是节能和环保。炼铁的能量消耗成为吨钢成本中的重要组成部分,而污染物的排放也对环境造成严重影响。炼铁的节能和环保对整个钢铁行业的健康发展是十分重要的。

就全世界范围来说,炼焦用煤的资源也日益短缺,全球都感到了炼焦用煤资源的危机。在我国,煤炭资源虽然丰富,但炼焦用煤的资源状况并不乐观,焦煤的紧张制约着我国钢铁生产的发展。由于存在着焦煤资源日益短缺而造成的焦炭价格昂贵,炼焦工序对环境污染严重,对新建和改造焦炉也很困难等问题。所以如何降低焦比便成了高炉炼铁工作者最关心的问题。目前,降低焦炭消耗的最经济有效的途径就是大量喷吹煤粉,以煤代焦来降低焦炭的消耗量。而且喷煤有利于降低生铁成本,调剂炉况热制度,改善炉缸工作状态,为高炉提高风温和富氧鼓风创造了条件。因此喷吹煤粉在高炉炼铁生产中被广泛地应用,并且收到了明显的效果。

随着高炉喷煤比不断增加,煤粉在整个燃料中所占比例越来越高,最高可以达到50%。然而,实践证明,在高喷煤比条件下常常出现未燃煤粉从炉顶逸出的现象,未能实现煤粉的充分利用,因此提高煤粉在风口的燃烧率,解决煤粉在高炉内的利用问题是大喷煤操作中必须面对的重要问题^[1-4]。

为了解决高炉进行大喷煤时遇到的问题,完善高炉喷吹煤粉这项技术,应该对高炉喷吹煤粉的发展历程、现状及其发展前景有一定的了解。

1.1 高炉喷吹煤粉的提出及贡献

高炉喷吹煤粉技术从它的出现、发展到应用,经历了一段很长时间。早在1831年,英国人奥恩·戴维斯发明了高炉风口喷煤,1840年由S.M.Banks获得了专利,并且于1840~1845年在法国的Haut-Marne得到实现。但是由于煤粉易堵塞,所以在当时没能实现稳定操作^[5]。19世纪,在法国和比利时的高炉上进行了喷煤的生产实践,喷吹燃料达总燃料的10%。19世纪中期,又有人试用风力给煤方式喷吹,未取得成功^[6]。

现代第一次大规模的工业高炉喷煤试验是由国际钢铁联合会于1961年在北美汉纳公司的2号高炉上完成的。该高炉炉缸直径5m(现已停炉),采用欧洲和日本改进的石油碳化物喷吹系统。试验用煤的挥发分为17%~40%,灰分为4%~8%,记

录的喷煤量为 12kg/t 铁, 相当于高炉所需焦炭量的 15%。接着, 在威尔顿钢铁公司的 4 号和 3 号高炉也进行了喷煤试验。据记载, 最大喷煤量达到 43kg/t 铁, 煤粉颗粒对风口造成严重侵蚀, 因此喷吹工艺没能继续进行。

阿姆科钢铁公司的阿什兰工厂于 1966 年利用巴布科克-威尔科克斯公司共同开发的喷吹系统在贝勒丰特高炉上连续喷煤, 在 60 年代后期平均喷吹量约 45kg/t 铁。阿曼达高炉被认为是阿姆科钢铁公司的第一座完全喷吹煤粉应用于工业规模的高炉, 它的喷吹系统是在 1972 年安装的, 1973 年其平均喷煤量为 58.3kg/t 铁, 相当于燃料总消费量的 12.5%。

美国钢铁公司于 1968~1969 年在是芝加哥厂 12 号高炉选用石油碳化物喷吹系统进行煤粉喷吹的试验, 记载的最大喷吹量为 112kg/t 铁, 平均喷吹量为 90kg/t 铁。

在北美进行试验的同时, 欧洲、亚洲及澳大利亚也进行了类似的试验^[7]。

我国是世界上使用喷煤技术较早的国家之一, 我国是从 1964 年开始喷煤。当时, 鞍山钢铁公司、首钢钢铁公司先后建立了工业喷煤装置并进行了喷煤工业试验。1966 年以来首钢的高炉喷煤量经常保持在约占总燃料 25%(煤比曾达 270kg/t 铁)。到 70 年代, 全国重点钢铁企业的许多高炉都建立了喷煤装置, 平均喷煤比达到 41kg/t 铁^[6,8]。

高炉喷吹辅助燃料技术是现代高炉炼铁生产广泛采用的新技术, 它也是现代高炉炉况调节所不可缺少的重要手段。喷吹的燃料可以分为三大类: 液体燃料, 如重油、焦油等; 固体燃料, 如无烟煤、烟煤、褐煤等; 气体燃料, 如天然气、焦炉煤气等^[9,10]。高炉喷煤是在世界石油危机以及炼焦资源、投资、环保等方面的影响下开始大规模实施的。

高炉喷煤对现代高炉炼铁技术来说是一项重要的技术革命。高炉喷煤的意义在于:

(1) 以低价的煤代替日趋贫乏且价格昂贵的冶金焦, 降低了焦比, 使高炉炼铁成本大幅下降;

(2) 高炉喷煤可以作为一种调剂炉况的手段;

(3) 高炉喷煤可以改善炉缸工作状态, 使高炉顺行;

(4) 为高炉提供高温风和富氧鼓风创造条件;

(5) 喷吹煤粉中的氢含量比焦炭带入的多, 氢气提高了煤气的还原能力和穿透扩散能力, 有利于矿石的还原和高炉操作指标的改善;

(6) 喷吹煤粉代替了部分焦炭, 不仅缓解了焦煤的供需紧张状况, 也减少了对炼焦设施的投资和建设, 更降低了炼焦生产对环境的污染^[10,11]。

1.2 国外高炉喷煤技术的发展状况

近年来,高炉喷煤技术有了很大的进展,主要表现在:喷吹煤种的多样化;重视制粉工艺的选择;喷吹工艺以浓相输送为主要特征;高炉采用富氧和低焦比操作。

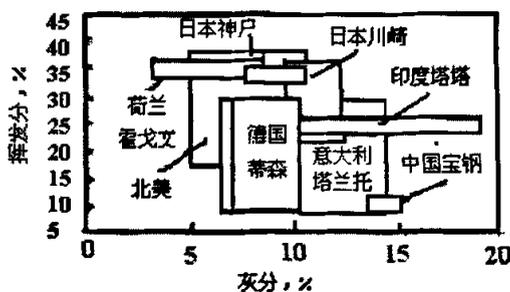


图 1.1 世界主要钢厂高炉喷吹的用煤情况

Fig 1.1 The use instance of powder coal injection into the BF in the world

从喷吹的煤种上看,国外喷吹用煤的十分广泛,不是仅限于低硫、高挥发性能的煤(如图 1.1 所示),当然,低灰分,低水分的煤仍是高质量的喷吹用煤。

从制粉工艺上看,国外的制粉工艺有多种流程,很多工厂不仅关注磨煤机的形式及能力的选择外,更注重制粉工艺流程的选择。主要的制粉工艺有如下三种:

(1) 自惰化制粉工艺。其流程为:原煤经过分选机选分后送入磨煤机研磨和干燥,磨制好的粉煤输送到布袋箱收集,然后再送入粉煤仓;

(2) 外惰化制粉工艺。其流程基本上同自惰化制粉工艺相同,所不同的是烘干风采用热风炉废气;

(3) 无惰化制粉工艺。系统采用正压操作,烘干风为外界空气经燃烧炉加热^[12]。喷吹工艺一般分为两类。

一类是多管直吹方式。其特点是:①喷吹罐为串联方式,一个系列或二个系列。②喷吹罐直接与风口数(或 1/2 风口数)相等的支管联接,一根喷吹管接一个风口或两个风口。③每根支管上装有煤粉流量计和调节装置,用以自动测量和调节每个风口的喷煤量。④由于要装流量计数目多,仪表和控制系统的投资比较高。⑤管道阻损较大,因此喷吹距离相对要短一些,一般不超过 200~300m。

另一类是总管加分配器方式。其特点是:①喷吹罐一般为并罐方式(两个或三个罐),也可以用串罐方式。②从喷吹罐接出一根总管经设在高炉附近的分配器分成若干根支管,每根支管分别接到每个风口。③在总管上和分配器后的支管上一般不装流量计。由于支管上不设流量计,无法在生产过程中实行自动调节。这种系统虽不如多管直接自动调节每个风口喷煤量那样精确,但通过一次或几次检查

调整也能获得较好的分配均匀度。由于不装流量计，投资比较低。④由于总管加分配器方式的管道阻损相对比较小，喷吹距离可到达 800 多米。

下面介绍一些国外的主要喷吹工艺流程。

据不完全统计，目前国外喷煤高炉已达 100 座以上，有一批高炉的最高月平均喷煤量达到了 190~200kg/t 铁，喷煤率为 35%~40%。例如德国 Schwelgern No.1, 英国 Scuniorpe No.Victoria, 荷兰艾莫依登 No.B, 法国 Dunkirk No.4, 日本神户 NO.3 高炉等。月平均喷煤量 200kg/t 铁，喷煤率在 40% 以下的高炉都在制定下一步继续提高喷煤率到 50% 的计划。例如德国 Thyssen 公司正在解决制粉能力不足问题，预计在二年内实现喷煤率 50%。英国钢铁公司 Scunthorpe 厂原定于 1993 年 7 月开始进行喷煤率 50% 的试验，计划前 4~5 周用氧煤喷枪，后 4~5 周试一般富氧方法同时调整炉子的顺行。由英国钢铁公司，荷兰霍戈文公司，意大利 ILVA 公司联合在英国克里夫兰厂 600m³ 高炉上进行的大喷煤量试验已经达到了喷煤率 50%(焦炭 300kg/t 铁，煤粉 300kg/t 铁)，试验的最终目标是达到煤粉 400kg/t 铁，焦炭 200kg/t 铁。

概括来说，年平均喷煤率 35%，月平均喷煤率 40%，下一步的目标是喷煤率 50%，这就是当前国外高炉喷煤率的先进水平^[13]，表 1.1, 1.2 列出了国外一些高炉的喷煤量和低焦比操作指标。

表 1.1 1991~1993 年西欧和日本一些高炉的年平均喷煤量和喷煤率

Table 1.1 Average quantity and ratio of injected coal powder in Occident and Japan from 1991 to 1993

国家	工厂	炉号	年平均			时间
			焦比 / kg/t	喷煤量 / kg/t	喷煤率 / %	
德国	施维灵根	1	320	179	35.9	1992
	海姆波恩	4	350	145	29.3	1992
	海姆波恩	9	357	143	28.6	1992
法国	鲁尔区厂	6	360	146	28.9	1992
	敦刻尔克	4	309	170	35.5	1992
英国	斯肯索普厂	维多利亚	332	165	33.2	1991
日本	神户	3	323	175	35.7	1991

表 1.2 国外主要钢厂高炉的低焦比操作指标^[12]

Table 1.2 The manipulated index of low coke ratio in the overseas main BF

国别及高炉(时间)	煤比 / kg/t	焦比 / kg/t	燃料比 / kg/t
日本 新日铁津君1号(1993.11)	203	294	497
德国 蒂森施韦根1号(1994)	197	297	494
法国 敦刻尔克4号(1992.6)	194	287	481
荷兰 霍戈文6号(1992.12)	212	272	484
英国 斯肯索普厂维多利亚号(1992.1~2)	208	289	497
美国 内陆7号(1995.10~12)	158	319	477

1.3 国内高炉喷煤技术的发展状况

我国高炉继喷吹重油之后,于1963年初开始了喷吹煤粉试验研究,最早起步的企业是鞍钢、首钢。在首钢、鞍钢喷煤成功之后,武汉钢铁公司、太原钢铁公司、本溪钢铁公司等企业都开始喷煤工业生产,80年代以前我国高炉在喷煤的座数和喷煤比上都处于世界领先地位。

“九五”期间,我国高炉喷煤技术的开发和应用取得了突破性的进展。有了一批拥有自主知识产权的科技成果,实现了高炉喷吹煤粉工艺技术装备的国产化,开发成功了一整套喷吹烟煤技术和富氧超高量喷煤技术,带动了高炉炼铁工序的结构优化,促进了围绕高炉喷吹煤粉的制备和喷吹工艺技术装备的进步。高炉用耐火材料、冷却技术、遥控喷补技术、喷吹计算机控制和高炉操作指导、煤粉配煤和氧枪强化燃烧技术、高炉原料和焦炭质量改进,以及与此相关的安全技术等和这些技术的集成,有力地促进了我国喷煤技术进步^[14]。

5年间,我国高炉喷煤技术的开发和应用取得突破性进展。宝钢1号高炉实现月平均喷煤260.6kg/t铁,焦比249kg/t铁,高炉利用系数 $2.2\text{t}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$,达到世界先进水平。全国重点企业98%的高炉均有喷煤设施。2000年我国喷煤总量已超过1000万吨,创出历史最好水平。一批炼铁企业依靠科技进步,喷煤量大幅度增长,创出了本企业历史最好水平,为企业节能降耗、降低生产成本做出了突出贡献。

我国喷煤制粉工艺,过去均移植发电行业制粉工艺,喷吹工艺多数为间接喷吹,只有新建的宝山钢铁公司、酒泉钢铁公司和部分中小企业采用直接喷吹工艺。在喷吹形式上,大多数采用重叠式串联罐多管路喷吹,中小企业采用并联罐单管路加分配器的喷吹形式。自1990年鞍钢开始采用了串罐单管路加分配器的喷吹方式后,宝钢3号高炉、酒钢、包头钢铁公司等企业高炉也先后采用了单管路加分配器喷吹方式。

在喷吹煤种上,90年代前几乎都是喷吹无烟煤,1981年马鞍山钢铁公司小高

炉，苏州钢铁公司小高炉曾试验喷吹烟煤，但没有广泛推广。1990年鞍钢试验喷吹烟煤成功，从此结束了我国喷吹单一无烟煤的历史。

90年代以来我国喷吹煤粉或富氧喷吹煤粉技术发展更迅速，主要表现在：①新型制粉，喷吹工艺的形成和完善及其装备水平的提高；②储量丰富的烟煤得到利用；③自动化水平得到提高；④高喷煤比的不断提高和富氧高煤比的喷吹成功；⑤全国喷煤总量提高(见表 1.3)；⑥氧煤燃烧技术等一批新技术得到实现；⑦高炉喷煤已成为炼铁系统工艺结构优化、能源结构变化的核心^[15,16]。

表 1.3 1998~2002 年我国喷煤增长情况
Table 1.3 The instance of the increasing of powder coal injection quantity
in our country from 1998 to 2002

年份	1997	1998	1999	2000	2001
全国重点企业喷煤总量 / 万 t	684.5	652.4	1072	1365	1645
全国重点企业生铁产量 / 万 t	8775.2	9454.7	10214	11025	11947
平均煤比 / kg · t ⁻¹	78	69	105	123	136

1.4 近年来高炉喷吹新工艺

高炉喷煤的发展方向是高风温、低富氧、大喷煤量。为了实现这些目标各国炼铁工作者都在努力发展新技术。近年来，高炉喷吹煤粉在输送、喷吹工艺等方面取得了进展。

1.4.1 无烟煤和烟煤的混合喷吹

与无烟煤相比，烟煤具有燃烧性能好、煤质软、资源广等优点，很受高炉工作者的欢迎。过去，由于缺乏可靠的安全监测手段和防爆措施，喷煤系统普遍喷吹挥发分含量较低(小于 10%)的无烟煤。喷吹混煤的影响有：

(1) 减少炉内的未燃煤粉。烟煤的挥发分高，着火点比无烟煤着火点低，烟煤中的结晶水较多，煤粉颗粒在风口前遇到高温容易爆炸、分解、燃烧。烟煤混喷煤粉在风口前分解需大量热量，必须有一定风温作基础，风温能够补偿喷吹煤粉引起理论燃烧温度的降低，让煤粉在风口前有足够热量进行分解、燃烧，大大地减少炉内的未燃煤粉，改善料柱透气性。

(2) 使氢浓度增加，改善炉内间接还原。随着烟煤混喷的比例增加，煤气还原性成分(CO、H₂)增加，氢浓度增加，煤气黏度减少，扩散速度和反应速度加快，促进间接还原反应。喷吹煤粉增加后，冶金焦用量减少，冶金焦的冶炼强度提高，单位生铁炉料容积减少，使炉料相对在炉内停留时间增长，也改善间接反应，使得燃料比下降，料速明显加快，提高高炉利用系数。

(3) 烟煤喷煤技术参数分析。当烟煤的比例增加时,煤粉的灰分降低,而挥发分增加,着火温度也随着降低,煤粉的可磨性指数也提高。而这些都是有利于高炉煤粉喷吹和制粉。但是需要采取安全措施。

喷吹烟煤所采取的安全措施主要有:采用热风炉废气作为干燥煤粉的介质;采用惰性气体进行流化和充压;全系统消除有可能积粉的死角;监测制粉系统和煤粉仓内的温度和烟气中氧气和一氧化碳气体的浓度等。实践表明,采取以上措施完全可以保证喷吹烟煤的系统长期、安全运行。由于能够喷吹烟煤的系统必然可以喷吹混合煤和无烟煤,生产企业可灵活地根据煤炭市场的价格变化调整喷吹煤种,达到降低生产成本的目的^[17-19]。

1.4.2 浓相输送

喷煤按粉—气混合比例可分为浓相和稀相,即煤粉输送时煤粉输送固气比在 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下一般认为是稀相输送,大于 $40\text{kg}/\text{kg}$ 则为浓相输送。传统的稀相输送煤粉空气耗量大、喷吹浓度低、喷吹管路气粉流速快、管路磨损严重、在喷吹计量方面,由于均压气体的浮力干扰,倒罐期间易出现计量偏差,而且压力波动大,易出现堵枪、堵管,对高炉影响大,另外喷吹能力低。浓相输送完全避免了稀相输送的弊端,是现代高炉提高煤比、降低成本、优化炼铁工艺、改善原燃料结构的主要措施之一。管道末端喷吹固气比达到 $35\sim 40\text{kg}/\text{kg}$ 和管道始段喷吹流股的速度达到 $1\sim 4\text{m}/\text{s}$ 是浓相喷吹的主要特征。与传统喷吹方式相比,浓相喷吹具有载气消耗量少、对管道和阀门的磨损小、煤粉喷吹或输送能力高等特点,是国内目前大力推广的一项喷煤新技术。

应该指出,计算实际喷吹固气比时应该考虑喷吹罐出口煤粉的含气量。忽略这部分气体流量,而仅考虑补气流量,可能导致固气比的计算值偏高。较高的喷吹压力、良好的流化条件、良好的煤粉质量、适宜的补气方法及口径和长度适宜的喷吹管道是实现浓相喷吹的前提条件。只要能够满足以上条件,上出料和下出料型喷吹罐都能够实现浓相或高浓度喷吹^[20,21]。

1.4.3 两段式喷吹工艺

从风口喷吹煤粉是目前高炉普遍采用的工艺,但随着喷吹量的增加,部分煤粉在回旋区内不能充分燃烧,形成未燃煤粉,使炉缸堆积、料柱透气性变差、煤气分布失常,甚至发生悬料等事故,限制了大量喷吹煤粉的实施。因此,为了突破传统喷煤工艺难于增加喷煤量的现状,提出了两段式喷吹的工艺。

所谓两段式喷吹,是指在风口喷煤的同时在高炉炉身下部、软融带上方区域

内设置第一段喷煤枪，进行粉煤喷吹，使煤粉分两段入炉。在保证高炉顺行的前提下，达到提高喷煤量和保护焦炭强度的作用。其工艺图如图 1.5 所示。

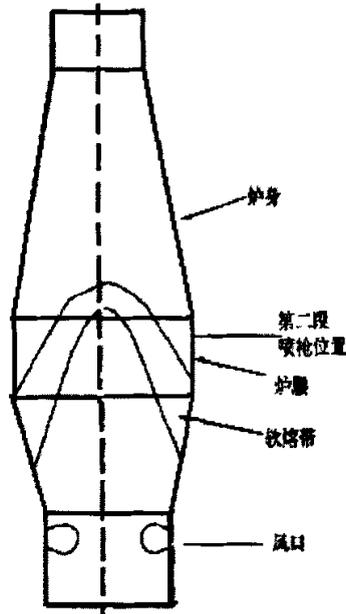


图 1.5 两段式喷吹煤粉新下艺示意图

Fig. 1.5 Biserial pulverized coal injection process

采用两段式喷吹工艺，缓解了高炉下部的煤粉积蓄量，有效地保证了下部的透气性，降低风口前压差，有利于高炉炉料顺行及正常操作。虽然高炉上部积粉量有所增加，但总压差的增加量较传统一段式喷吹是降低的^[22,23]。

1.4.4 一个喷吹系统供 3 座高炉喷煤

梅山钢厂对高炉改造后引进了德国 KÜTTNER 公司的“一喷三”（一个喷吹系统向三座高炉同时喷煤）浓相输送技术及部分配套设备。

该喷吹系统由煤粉仓、旋转给料器、振动筛、喷吹罐、分配器、装煤风机、保温风机及仪控系统等主要设备组成。输送、保安、冷却、吹扫、动力气源均为氮气。一个未装满煤粉的喷吹罐满足解锁(Release)条件并被解锁后，可实现自动装煤操作。为实现浓相输送，采用了上出料的输送工艺。在喷吹过程中，流化器流化阀的开度根据罐压自动进行调整。该系统煤粉仓容积为 1000m³，仓顶设有用于卸压的除尘布袋，将煤粉仓中的剩余气体过滤后排入大气。煤粉仓顶部还设有保温风机，可手动启动，将制粉系统的高温烟气引入粉仓内，不但对煤粉起到保温作用，还在一定程度上惰化了煤粉仓内的气氛。

梅钢根据自己的情况对系统适当的进行了改造,改造后的“一喷三”技术在梅山应用近半年来的实践表明,通过工程技术人员的不努力以及操作人员的精心操作,新喷煤系统可以满足高炉大喷吹的需要,有利于进一步降低生产成本。但煤粉流量计的检测计量比对调整还有待进一步摸索,以确保其检测计量的精确。另外,单体设备故障时,没有充足的检修时间,这对喷煤生产是一个制约,应该进行改进^[24]。

1.4.5 喷煤系统的计算机自动控制

近年来,经过技术改造,许多高炉喷煤系统取消了全部或大部分二次仪表(如温度、压力、流量显示仪和长图记录仪等),实现了计算机自动控制。喷煤系统采用计算机控制不仅可以减轻工人劳动强度,也有利于系统平稳高效地运行。喷煤系统计算机自动控制的主要内容有:在喷吹系统实现自动倒罐、自动稳压、自动计量、自动调节喷煤量以及自动统计喷煤数据等。一些喷煤站还实现了制粉系统自动控制,包括自动控制烟气升温炉温度,自动调节干燥气温度和流量等^[15]。

煤粉总量的控制是根据工艺要求对单位时间内喷进高炉的总煤粉量进行控制,使之达到稳定,总量符合要求。这一控制过程包括流量检测单元、控制伺服单元和控制单元。

喷吹煤粉流量控制工艺流程由喷煤罐、电子秤、计算机系统、手操器、可调量混合器、过滤器、分配器等组成。喷吹煤粉流量由电子秤提供的煤粉重量信号计算得到。控制信号由计算机发出,经手操器送给执行器,调节混合器内活动喷枪控制开口和流化风量的大小,对煤粉流量进行调节控制。

喷吹煤粉制备系统的计算机过程控制的目标是消除人为误操作,确保喷吹煤粉系统长期安全、可靠运行,以适应高富氧、大喷煤量喷吹的需要^[25,26]。

1.5 课题的提出

随着高炉喷煤比不断增加,煤粉在整个燃料中所占比例越来越高,最高可以达到 50%。然而,实践证明,在高喷煤比条件下常常出现未燃煤粉从炉顶逸出的现象,未能实现煤粉的充分利用,因此提高煤粉在风口的燃烧率,解决煤粉在高炉内的利用问题是大喷煤操作中必须面对的重要问题。

近年来,国外的一些钢铁厂正在开发煤粉预热的新技术,以改善煤粉在风口的燃烧状况^[27~29]。鞍山钢铁公司的何大华等人设计了专用的煤粉喷枪以实现煤粉预热喷吹^[30,31]。从喷煤对高炉的影响分析,将煤粉预热后喷吹有利于减轻喷煤对热风的冷却效应,加速煤粉的燃烧过程从而提高煤粉利用率。但是,煤粉预热喷

吹会给喷吹带来多方面的影响，如煤粉性能的变化、喷煤系统的安全、气体膨胀对输送过程的影响、加热后设备的承受能力等。

本课题以宝钢高炉喷吹原料条件为基础，在实验室进行煤粉加热后性能变化的研究，从而分析得出煤粉加热后安全性能以及对煤粉输送过程的影响，并根据高炉的实际生产条件，通过理论和实验研究确定煤粉的合理预热方式和预热装置。

第2章 煤粉预热的理论研究

高炉喷吹煤粉需要对煤粉的理化性能进行研究分析,煤粉的理化性能包括煤的空隙率、可磨性、比表面积、黏结性、结焦性、着火温度、煤灰熔融性、流动性、粒度(细度)、爆炸性、煤对CO₂的反应性。为了达到更好的喷吹效果,应该对煤粉的这些性能有很好的了解。对于煤粉的预热喷吹,在煤粉预热后理化性能也会随着预热而改变,为了探讨煤粉预热喷吹的可实施性,应该对预热后煤粉的性能进行研究^[32]。

2.1 煤粉的物理性能和工艺性能

2.1.1 煤粉的物理性能

在高炉喷吹生产中,为了获得更好的经济技术指标,保证安全顺行的生产,应根据煤的物理性质对它进行检测。煤的物理性质有空隙率、可磨性、比表面积、黏结性、结焦性等^[7,33]。

(1) 煤的空隙率

它反映煤的反应性能和强度的性质。空隙率大的煤其表面积也大,反应性能好,但强度较小。这种煤的可磨性和燃烧性好,炉内未燃煤气化反应好。有利于高炉稳定顺行和提高煤焦置换比。根据煤的视(相对)密度和煤的真(相对)密度可以计算出煤的空隙率,计算公式为:

$$\text{空隙率}(\%) = \frac{\text{真(相对)密度} - \text{视(相对)密度}}{\text{真(相对)密度}} \times 100\% \quad (2.1)$$

煤的视(相对)密度是指20℃时煤(包括煤的空隙)的质量与同体积水的质量之比,其表示符号为ARD(Apparent Relative Density)。它表示煤的物理特性的一项指标。

煤的真(相对)密度是指20℃时(不包括空隙)的质量与同体积水的质量之比,其表示符号为TRD(True Relative Density)。它是表示煤的性质和计算煤层平均质量的一项重要指标。它的大小与煤的变质程度、煤的岩相组成、煤的成因、煤中矿物质有关。

(2) 煤的可磨性

煤的可磨性是指把煤研磨成煤粉的难易程度。它主要与煤的变质程度有关,不同牌号的煤具有不同可磨性。一般来说,烟煤可磨指数高,即易碎。无烟煤和

褐煤可磨指数较低，即不易磨碎。此外同一种煤的可磨指数，随煤的水分和灰分的增加而降低。

某一种煤的可磨性，用此种煤磨到与标准煤同一细度所消耗电能的比值来表示，称为该煤种的可磨性指数 K ：

$$K = \frac{\text{标准煤磨碎到一定细度所消耗的电能}}{\text{某种煤磨碎到一定细度所消耗的电能}} \quad (2.2)$$

所谓标准煤，是指收到状态的煤完全燃烧后的燃烧产物使水蒸气冷却到 20°C 时放出的热量。标准煤收到基低位发热量规定为 29288kJ/kg 。

工业上常采用的有苏式可磨性指数 K^{BT} 及哈德格罗夫法可磨系数(HGI)两种。HGI 是以美国宾夕法尼亚州某煤矿易磨烟煤作为标准煤，并规定其可磨指数为 100。 K^{BT} 是用前苏联顿巴斯无烟煤作为标准煤样，并规定其可磨指数为 1。两种可磨性指数互换关系为：

$$HGI=70K^{\text{BT}}-20 \quad (2.3)$$

现在国际规定使用哈氏指数。

(3) 煤的比表面积

煤的比表面积是指单位重量的煤粒的表面积的总和，它叫做这种煤在该粒度范围内的比表面积，单位为 mm^2/g 。

煤的比表面积是煤的重要性质，对研究煤的破碎、着火、燃烧反应等性能均有重要意义。

比表面积的测定是用透气式比表面积测定仪测定。其测定原理是根据气流通过一定厚度的煤层受到的阻力而产生压力降来测定的。

不同煤化度煤的比表面积是两头大，中间小，即褐煤和无烟煤比表面积大，中等变质程度的烟煤比表面积小。

(4) 煤的黏结性

把粉碎的煤隔绝空气并逐渐加热到 $200\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时，煤中会析出一部分气体并形成黏稠状胶质，再继续加热黏稠状胶质体继续分解，一部分分解为气体，其余部分逐渐固化将炭粒结合在一起成为焦块，这种结合牢固的程度叫黏结性。用黏结指数 $G_{\text{R-1}}$ 表示，它是评价炼焦用煤的主要指标。

按煤的黏结性将煤分为黏结性煤和非黏结性煤。属于黏结性煤的有：气煤、肥煤、焦煤和瘦煤；而属于非黏结性煤的有：长焰烟煤、烟煤以及不是烟煤的褐煤和无烟煤。高炉喷吹用煤的黏结性强，则易在高炉风口结焦造成风口烧坏或堵塞喷枪，因此，应选黏结性差的煤。

(5) 煤的结焦性

煤的结焦性是指煤在工业焦炉或模拟工业焦炉的炼焦条件下结成一定块度和

足够强度焦炭的能力，人们把具有这种性能的煤叫炼焦煤。炼焦煤必须是黏结性煤。

(6) 煤的冲刷磨损指数

煤的冲刷磨损指数用 Ke 表示，用于判断煤在破碎时对金属件的磨损程度。 Ke 值越大，表示煤的磨损性越强，也就是说煤对磨煤机的磨煤部件磨损越厉害。 Ke 值与煤的磨损性评价如表 2.1 所示。

表 2.1 Ke 值与煤的磨损性评价
Table 2.1 Ke and appraise of coal abrasion capability

Ke	煤的磨损性评价
<1.0	轻微
1.0~1.9	不强
2.0~3.5	较强
3.6~5.0	很强
>5.0	极强

2.1.2 煤的工艺性能

煤粉是由 1~300 μ m 各种不同尺寸、形状的微粒按一定的分布规律组成的颗粒群。它的工艺性能的好坏直接影响高炉喷吹，高炉喷吹用煤的工艺性能有：着火温度、煤灰熔融性、流动性、粒度(细度)、爆炸性、煤对 CO_2 的反应性。

(1) 煤的着火温度

煤的着火温度是指在氧化剂(空气、氧气)和煤共存条件下，把煤加热到开始燃烧的温度叫煤的着火温度，也叫煤的燃点。换句话说，煤释放出足够的挥发分与大气形成可燃混合物的最低着火温度，所以又叫煤的着火点。

煤被空气中的氧气氧化是煤自燃的根本原因。煤的着火点越低就越容易自燃，煤的自然造成煤粉制备、输送、喷吹过程中爆炸等事故的主要原因。

煤的着火温度与煤的变质程度相关。一般变质程度高的煤，挥发分低，着火温度比较高；变质程度低的煤，挥发分高，着火温度比较低。我国各类煤的着火温度范围如表 2.2。

表 2.2 我国各类煤的着火温度范围
Table 2.2 Kindling point range of every kind of coal in China

煤种	褐煤	长焰煤	不粘煤	弱粘煤	气煤
着火点 / $^{\circ}C$	267~300	275~330	278~315	310~350	305~350
煤种	肥煤	焦煤	贫瘦煤	无烟煤	
着火点 / $^{\circ}C$	340~365	355~365	360~390	365~420	

煤的着火点的变化可以用来判断煤的氧化程度，煤氧化后的着火点明显下降。可以通过测定煤的着火点来测定煤的氧化程度，即分别测定原煤样、氧化煤样的

着火点，然后按 2.4 计算煤的氧化程度：

$$\text{氧化程度 (\%)} = \frac{\text{还原样着火点 (}^\circ\text{C)} - \text{原煤样着火点 (}^\circ\text{C)}}{\text{还原样着火点 (}^\circ\text{C)} - \text{氧化样着火点 (}^\circ\text{C)}} \times 100\% \quad (2.4)$$

(2) 煤灰熔融性

煤灰熔融性是指在规定条件下，随加热温度的变化，煤的灰分的变形、软化和流动特征的物理状态。

煤的灰分是由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 等多种金属氧化物及化合物构成的复杂混合物。当其加热到一定温度时就开始局部熔化，随温度升高，熔化部分增加，到某一温度时全部熔化。这种逐渐熔化过程使煤灰试样产生变形、软化和流动变化的相应温度来表征煤灰的熔融性。

按煤质优劣评价划分：煤中灰分(A)含量 $A \leq 15\%$ 为低灰分煤；A 在 $15\% \sim 25\%$ 之间的为中灰分煤；A 在 $25\% \sim 45\%$ 之间的为高灰分煤。

煤灰熔融性是动力用煤的重要质量指标。一般根据它来选择合适的燃烧或气化设备，或根据燃烧和气化设备类型来选择具有合适软化温度的原料煤，煤灰的熔融温度高，燃烧成本高；煤灰的熔融温度低，炉内易结渣。

一般固态排渣的燃烧炉或气化炉，要求使用灰的熔融温度较高的煤，以免炉内结渣，影响生产正常运行。而液态排渣炉则要求使用灰熔融温度低的煤。高炉属于液态排渣的设备，炉内温度较高，灰熔融温度高低的煤一般都能适应。但喷吹灰熔融温度低的煤会造成风口挂渣，喷枪堵塞，燃烧不充分，影响喷吹效果。

煤灰熔融温度通过测试得出，但也可以根据煤灰成分数值(质量分数)计算灰熔融温度。常用的经验公式有下列两个：

$$FT = 200 + 21\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{SiO}_2 + 5[\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}] \quad (2.5)$$

$$FT = 200 + (2.5b + 20\text{Al}_2\text{O}_3) + (3.3b + 10\text{SiO}_2) \quad (2.6)$$

式中 $b = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ，式 2.5 适用于以 Al_2O_3 和 SiO_2 含量为主(两者之和 $> 70\%$)的煤灰；式 2.6 适用于 $b > 30\%$ 的煤灰。

(3) 煤粉的流动性

煤粉具有较好的流动性，这是因为新磨碎的煤粉能够吸附气体(如空气)，是气体在煤粒表面形成气膜，它使煤粒颗粒之间的摩擦阻力变小，另外煤粒均为带电体，且都带同性电荷，同性电荷具有相斥作用，所以煤粉具有流动性。

在一定速度的载体中，煤粉能够随载体一起流动，这就是煤粉能被气力输送的原理。但随着煤粉存放时间的延长，煤粒表面的气膜减薄，静电逐渐消失，煤粉的流动性逐渐变差，是过来喷吹煤粉需要大的气力输送。所以，为保证煤粉有良好的流动性，要求煤粉贮存时间不宜过长，一般规定小于 8h。

(4) 煤粉的细度(粒度)

煤粉的细度(粒度)是煤粉颗粒群粗细程度的反映,它对磨煤制粉的能耗和喷吹煤粉的燃烧速度以及不完全燃烧的热损失都具有决定性的意义。此特性一般用筛分分析来表示。目前,世界各国采用的筛分分析法有:公制和英制。公制用筛上的剩余量用 $R(\%)$ 表示:

$$R = \frac{a}{a+b} \times 100\% \quad (2.7)$$

式中 a ——筛子上剩余的燃料量, g;

b ——通过筛子的燃料重量, g。

在筛上剩余的煤粉愈多,煤粉就越粗。筛网的号数相当于每厘米筛网上的格孔数。

通常煤粉磨得越细,燃烧率越高。但若是考虑到制作煤粉的成本和煤粉燃烧特性则喷吹的煤粉并非越细越好。

(5) 煤粉的爆炸性

煤的爆炸性决定着喷煤系统安全措施采用。可燃粉尘爆炸的必要条件有:

- ① 燃粉尘浓度处于爆炸上、下限的爆炸区间;
- ② 有足够的氧化剂支持;
- ③ 有足够能力的点火源点燃粉尘;
- ④ 分散悬浮的粉尘处于定容的空间。

满足上述 4 个条件就有使包围体被爆破的危险。而用来喷吹煤粉的各种煤粉仓、贮煤罐、喷吹罐等都为定容或部分密闭空间。

影响爆炸性的因素有:

- ① 可燃粉尘的化学和物理性质,如化学组成和粒度;
- ② 可燃粉尘的浓度和气相组成;
- ③ 爆炸的初始条件和外界条件。

悬浮的煤粉与空气或其它氧化剂混合极易发生爆炸,最为明显的规律是随着挥发分含量增加其爆炸性也增大。一般认为,煤粉的可燃基挥发分小于 10% 为基本无爆炸性煤;大于 10% 为有爆炸性煤;大于 25% 为强爆炸性煤。煤粉爆炸性也与其粒度有关,煤粉愈细,愈易于爆炸。但是在同样的挥发分和粒度情况下,由于比表面积不一样,其爆炸性也不一样。因此,必须通过仪器测定煤种煤粉的爆炸性。

我国测量煤粉爆炸性的方法主要是长管式的测定装置来测定,根据爆炸火焰的返回长度来确定煤粉有无爆炸性及爆炸性的强弱。

煤粉爆炸是在高温或一定点火能的热源作用下,在空气中氧气的作用下煤粉急剧氧化的反应过程,是一种非常复杂的链式反应,一般认为其爆炸机理及过程

如下:

① 煤本身是可燃物质, 当它以粉末状态存在时, 总表面积显著增加, 吸氧和被氧化的能力大大增强, 一旦遇见火源, 氧化过程迅速展开;

② 当温度达到 300~400℃时, 煤的干馏现象急剧增强, 放出大量的可燃性气体, 主要成分为甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、氢和 1%左右的其他碳氢化合物;

③ 形成的可燃气体与空气混合在高温作用下吸收能量, 在尘粒周围形成气体外壳, 即活化中心, 当活化中心的能量达到一定程度后, 链反应过程开始, 游离基迅速增加, 发生了煤粒的闪燃;

④ 闪燃所形成的热量传递给周围的煤粒, 并使之参与链式反应, 导致燃烧过程急剧地循环进行, 当燃烧不断加剧使火焰速度达到每秒数百米后, 煤尘的燃烧便在一定临界条件下跳跃式地转变为爆炸。

关于评价煤粉爆炸性能的标准, 高炉煤粉喷吹常采用长管式煤粉爆炸性能测定仪测定的煤粉返回火焰长度。一般认为, 返回火焰长度大于 400mm 时为强爆炸性煤, 小于 400mm 时则为弱爆炸性煤, 若仅在火源处出现稀少火星或无火星的属无爆炸性煤。

(6) 煤对 CO₂ 的反应性

煤对 CO₂ 的反应性是指在一定温度下, 煤中的碳与 CO₂ 进行还原反应的反应能力。其反应式为:



或者说是煤将 CO₂ 还原成 CO 的能力。它以被还原成 CO 的 CO₂ 量占参加反应的 CO₂ 总量的百分数来表示。在一定温度下, 该反应速度愈大, 表明煤粉的可燃性愈好。

煤的反应性与煤的气化和燃烧有着密切的关系, 它直接反映了煤在炉中作用的情况。反应性强的煤在气化和燃烧过程中, 反应速度快, 效率高。反应性的强弱直接影响炉子的耗煤量、耗氧量及煤气中的有效成分。因此, 煤的反应性是评价气化或燃料用煤的一项重要指标。此外, 测定煤的反应性, 对于进一步探讨煤的燃烧、气化机理有一定的价值。

特别值得注意的是高炉喷吹反应性强的煤, 不仅可以提高煤粉的燃烧率, 扩大喷煤量。而且, 风口区未燃烧的煤粉在高炉其它部位参加了与 CO₂ 的气化反应, 减少了焦炭的气化反应。很多研究表明煤的气化反应活性比焦炭的气化反应性强, 这就在某种程度上对焦炭的强度起到了保护作用, 有利于提高炉料的透气性。

另外, 煤的反应性也与煤的挥发分含量有关, 挥发分含量高的煤反应性强, 如挥发分高的褐煤反应性最强, 烟煤较强, 无烟煤反应性最小。

2.1.3 高炉喷吹对煤的性能要求

高炉喷吹用煤应能满足高炉冶炼工艺要求，对提高喷吹量和置换比有利，以便代替更多的焦炭。为了满足以上要求，对高炉的喷吹用煤的性能要求主要为以下几点：

(1) 煤的灰分越低越好，灰分含量应与使用的焦炭灰分相同，一般要求 $A \leq 15\%$ 。

(2) 为改善生铁质量，煤的硫含量越低越好，煤的含硫量应与使用的焦炭含硫量相当，一般要求小于 0.7% ，最高不大于 0.8% 。

(3) 胶质层越薄越好，胶质层的最大厚度应小于 10mm ，以免在喷吹过程结焦，以至于堵塞喷枪和风口而影响喷吹和高炉正常生产。

(4) 煤的可磨性要好，高炉喷煤需要将煤磨到一定细度，可磨性好，则制粉消耗的电能就少，可降低喷吹费用。

(5) 煤的燃烧性能好，即其着火温度低，反应性强等，这可以使喷入高炉的煤粉能在有限空间和时间内尽可能多地气化，少量未气化的煤粉也因反应性好而与高炉煤气中的 CO_2 和 H_2O 反应而气化，不给高炉冶炼带来麻烦。另外燃烧性能好的煤也可以磨得粗一些，即 -200 目占的比例少一些，这为降低磨煤能耗和费用提供了条件。

(6) 煤的发热值越高越好，喷入高炉的煤粉是以其放出的热量和形成的还原剂 CO 、 H_2 来代替焦炭在高炉内提供热源和还原剂。因此煤的发热值越高，在高炉内放出热量越多，置换的焦炭量也越多。

(7) 爆炸性越低越好，低爆炸性的煤粉便于贮备、输送以及安全喷吹。

(8) 配煤，即两种或三种煤，根据高炉喷煤质量要求，按不同比例混合在一起，磨到一定粒度向高炉喷吹。任何单一种煤都不可能满足高炉喷煤的要求，另一方面各种煤由于产地远近、运输方式等不同，为了获得最好经济效果，高炉应喷吹配煤。国内外通常采用含碳量高和发热值高的无烟煤同挥发分高和燃烧性好的烟煤配合，使配煤的平均挥发分控制在 20% 左右，灰分 $< 15\%$ 以下，充分发挥两种煤的优点，可获得良好的喷吹效益。

2.2 煤粉燃烧的理论

2.2.1 煤的组成

煤是由有机物和无机物两部分组成的。也可以说是由可燃成分、灰分及水分组成的。

(1) 可燃成分

可燃成分中主要化学元素有碳、氢、氧、氮、硫，各种煤质中的含碳量见表 2.3。

① 碳。碳占 65%~95%，它以碳氢化合物和碳氧化合物的形态存在。碳是煤中主要的可燃成分，它在燃烧时释放出大量的热。通常煤的发热量与碳含量的多少有关，含碳量愈高，发热量愈高。

表 2.3 煤中可燃质的含碳量
Table 2.3 The carbon proportion in all kinds of coal

煤的种类	含碳量 / %	煤的种类	含碳量 / %
泥煤	约 70	黏结性煤	83~85
褐煤	70~80	强黏结性煤	85~90
弱黏结性煤	78~80	无烟煤	90 以上
非黏结性煤	80~83		

② 氢。氢占 2%~7%，它大多以碳氢化合物的状态存在(水中氢不计)。氢也是煤中的主要可燃元素，氢燃烧时会释放出大量的热，它的发热量约为碳的 3 倍，它的含量比碳小得多，且氢易于燃烧和爆炸。氢存在于挥发分中，且碳化程度愈高的煤，氢含量愈少。

③ 氧。氧占 3%~5%，它在煤中大多数以氧化物的形态存在。因为它与碳、氢等可燃元素构成氧化物而使它们失去燃烧的可能性。因此，它使煤中不可燃元素。

④ 氮。氮占 1%~2%，是煤中不可燃元素，在一般情况下不参加化学反应，是燃煤中的惰性元素。

⑤ 硫。硫占 10%，在煤中硫以三种形态存在，即有机硫、黄铁矿硫和硫酸盐。前两种参与燃烧放出热量，但会形成二氧化硫和三氧化硫，硫酸盐不参与燃烧反应。

(2) 灰分

灰分是煤中不能燃烧的矿物质，灰分中大多数成分是由氧化物组成的。它在煤中含量高时，使煤中可燃成分含量减少，降低了煤的发热值。同时，在燃烧中由于部分灰包围了可燃成分，影响了可燃成分的燃烧。喷入高炉的煤粉中的灰分进入炉渣，既增加了石灰石的消耗，又增加了吨铁的渣量，使焦比大幅度升高。煤粉中灰分的大致成分是： SiO_2 40%~60%、 Al_2O_3 15%~35%、 Fe_2O_3 5%~25%、 CaO 1%~15%、 MgO 0.5%~8%、 Na_2O+K_2O 1%~4%。因此，灰分大的煤是劣质煤。

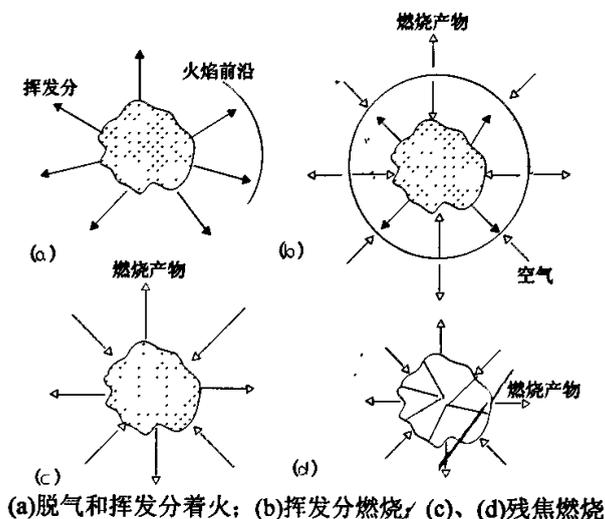
(3) 水分

存在于煤外表面的水称为煤的外在水，它随外界环境变化而发生变化。存在

于煤的毛细管中的水称为煤的内在水。煤的外在水和内在水之和叫煤的全水。煤中的水通常认为是杂质^[34,35]。

2.2.2 煤粉的热分解及挥发分的析出

煤粉燃烧是一个极为复杂的过程，由于近些年来人们对煤粉燃烧进行深入的研究探讨，在燃烧机理和规律方面已提出了被人们接受的理论。煤粉燃烧是煤分子和氧气之间发生的激烈氧化反应。从物理过程上可以把煤粉燃烧分为以下几个步骤：在加热过程中首先析出水分和挥发分(脱气过程)；当煤粉被加热到着火温度也就是着火点时挥发分着火和燃烧；最后是固定碳或残焦着火和燃烧。燃烧后残留下来的是煤灰(图 2.1)。



(a)脱气和挥发分着火; (b)挥发分燃烧; (c)、(d)残焦燃烧
图 2.1 煤粉燃烧过程示意图

Fig. 2.1 Sketch map for coal powder combustion process

煤是一种组织很不均匀的物质，煤的物理和化学结构都很复杂。而它的热分解也是一个极其复杂的过程，它包括最初的一些化学键的破裂、中间产物的形成以及最终稳定的热分解产物的生成。煤粉的热分解过程与煤的种类、粒度、加热速率、最终温度、加热时间、以及环境气氛等因素有关。

在煤粉的热分解过程中，煤粉会出现失重现象，并挥发出一些气体物质以及伴随有一些极其复杂的化学反应。煤粉挥发出的气体物质随煤种的不同而不同，通常主要有： H_2O 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 、 C_2H_4 、 C_mH_n 以及极少量的 H_2S 、 N_2 等。热分解之后的物质称为焦炭(图 2.2)。

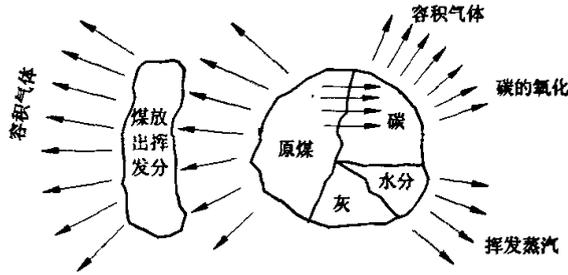


图 2.2 煤粒构成和反应过程示意图
Fig. 2.2 Sketch map for composing and reaction process of coal grain

2.2.3 挥发分的着火和燃烧

一般情况下，挥发分的着火是在离开表面一段距离后才发生的。挥发分从悬浮的颗粒表面向外扩散，颗粒表面的浓度最高，随着距离的增加其浓度不断降低。而煤的颗粒则由于气流的传热而被加热，因此气相温度高于煤的温度，也就是说温度梯度和挥发分浓度梯度的方向是相反的。当温度和浓度都超过某最低极限后才能发生燃烧。由于温度太低，着火地点不会在颗粒的表面，而在远离颗粒表面的地点由于浓度太低，也不会燃烧(图 2.3)。

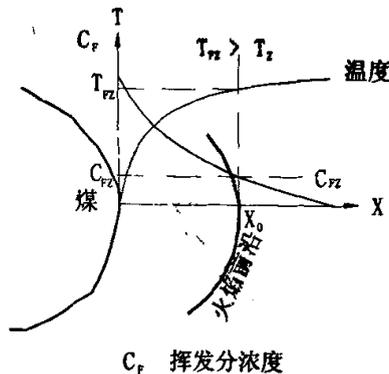


图 2.3 煤粉颗粒挥发分着火示意图
Fig. 2.3 Sketch map for coal grain's volatile burning

在特定条件下挥发分也可能不是在气相中被点燃，而是在离表面极近的界膜着火并立即传递到颗粒表面，或者颗粒表面直接着火。这种情况要求颗粒的升温速度要极快，在挥发分还没来得及离开表面时，表面温度已达到着火温度，挥发分和固定碳同时燃烧。这种条件下，颗粒着火的空间位置主要取决于：煤种、反应活性、颗粒大小。尤其是颗粒大小更为重要，颗粒越小，比表面积也就越大，因而颗粒的升温速度也就越快，更容易形成表面着火。

挥发分着火后, 火焰向颗粒和环境两个方向蔓延, 直至氧气或挥发分浓度低到不足以维持燃烧为止。以后, 火焰就稳定在挥发分析出量和氧气的扩散量符合一定化学关系的范围内。挥发分析出速度越高或氧气的扩散速度越低, 火焰稳定区离煤粉也就越远。随着燃烧的进行, 挥发分的析出速度不断降低, 火焰离颗粒表面越来越近, 直到仅在颗粒表面进行燃烧。

2.2.4 固定碳的燃烧

如果脱去挥发分后的固定碳表面温度足够高, 而氧气又达到一定的浓度, 固定碳就会着火燃烧。含氧气体从表面向颗粒内部扩散, 而颗粒内部生成的燃烧产物通过孔隙向外扩散。随着燃烧的进行, 部分未燃烧的碳被灰分包裹, 与氧气很难接触, 燃烧速度越来越慢, 直至燃尽留下煤灰^[36]。

2.3 煤粉预热对高炉的影响

将煤粉喷入高炉之前, 对煤粉进行预热处理。这一设想涉及的是将煤粉加热至燃烧前, 煤粉发生的变化, 以及预热处理对煤粉燃烧产生的影响。由煤粉在风口前的燃烧机制得知, 煤粉被加热到某一温度时就会分解, 产物为煤焦油和挥发分气体^[37,38]。

2.3.1 煤粉预热对高炉热平衡的影响

高炉的热平衡指的是高炉在运行过程中以热形式表现出的输入量和输出量的数量平衡, 主要是按照能量守恒定律并以物料平衡为基础来计算的。煤粉的预热处理对于高炉的热平衡具有一定的影响。

高炉的热量收入主要来自以下 5 个方面: 碳氧化物放热、鼓风带入热量、氢氧化($H_2 \rightarrow H_2O$)放热、成渣热、炉料物理热。在这 5 个方面中, 煤粉预热处理主要对于炉料物理热要产生一定的影响。炉料物理热通常按下式计算:

$$Q = c_{\text{矿}}^i t_{\text{矿}} G'_{\text{矿}} (1 - b_{\text{天}}) + c_{\text{天}}^i t_{\text{天}} G'_{\text{天}} b_{\text{天}} + \dots + c_{\text{吹}}^i t_{\text{吹}} G'_{\text{吹}} \quad (2.9)$$

式中 $t_{\text{矿}}$ 、 $t_{\text{天}}$ ——矿石、天然矿的入炉温度, $^{\circ}\text{C}$;

$b_{\text{天}}$ ——天然矿的使用率;

$t_{\text{吹}}$ ——喷吹煤粉的入炉温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

假设炉顶装入的炉料温度与环境相同, 则取 $t_{\text{矿}}$ 、 $t_{\text{天}}$ 为常温 25°C ; $b_{\text{天}}$ 取 0.0527; 而生产每吨生铁所消耗的烧结矿量 $G'_{\text{矿}} \cdot (1 - b_{\text{天}})$ 、天然矿量 $G'_{\text{天}} \cdot b_{\text{天}}$ 、焦炭量 K' 、石灰石量 $G'_{\text{焙}}$ 、喷吹煤粉量 $G'_{\text{吹}}$ 、水分 $G'_{\text{H}_2\text{O}}$ 以及它们的比热容见表 2.4。

表 2.4 生产每吨生铁消耗的原料量及其比热容

Table 2.4 Material wastage of producing one ton pig iron and material specific heat holding

	烧结矿	天然矿	焦炭	石灰石	煤粉	水分
数量 / kg	1514.15	84.23	386.905	3.85	124.702	19.935
比热容 / $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.4187	0.6687	0.8499	0.9043	1.256	4.8168

将表 2.4 数据代入式 2.9 中可得到炉料物理热 Q 与喷吹煤粉的入炉温度 $t_{\text{吹}}$ 的关系:

$$\begin{aligned}
 Q &= 1514.15 \times 0.4187 \times 25 + 84.23 \times 0.6687 \times 25 + 386.905 \times 0.8499 \times 25 + 3.85 \times \\
 &\quad 0.9043 \times 25 + 19.935 \times 4.8168 \times 25 + 124.702 \times 1.256 \times t_{\text{吹}} \\
 &= 27651.88 + 156.63 t_{\text{吹}} \tag{2.10}
 \end{aligned}$$

煤粉入炉温度与炉料物理热的关系见图 2.4 所示。

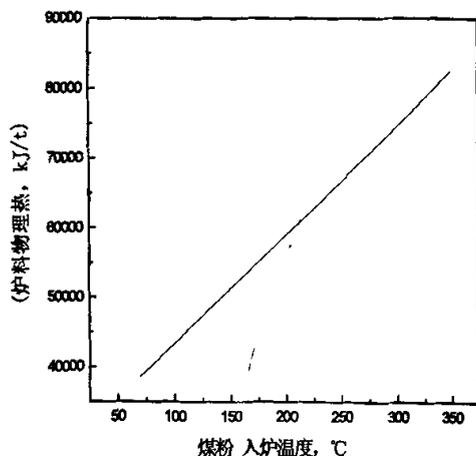


图 2.4 煤粉入炉温度与炉料物理热的关系

Fig 2.4 The relation of coal power's temperature and charging physical heat

通常炼铁生产中煤粉的入炉温度为 80℃左右, 通过式 2.10 可以计算出炉料物理热为 40182.28kJ, 而若将煤粉的入炉温度提高到 300℃, 则计算出的炉料物理热为 74640.88kJ, 几乎是煤粉入炉温度为 80℃时炉料物理热的 2 倍。可见, 煤粉的预热处理对于高炉生产中炉料物理热的影响是比较大的。

2.3.2 煤粉预热处理对于焦比的影响

高炉喷吹煤粉时, 由于吹入常温的煤粉代替灼热的焦炭, 风口前燃烧焦炭量减少, 煤粉加热和分解消耗部分热量, 从而致使理论燃烧温度降低, 需要进行热补偿, 一般采用提高风温的办法。

由热平衡公式 $V_{\text{风}} \cdot C_{\text{P}}^{\text{风}} \cdot t = Q_{\text{分}} + Q_{1500}$ 可以导出下式:

$$t = \frac{Q_{\text{分}} + Q_{1500}}{V_{\text{风}} \cdot C_{\text{P}}^{\text{风}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.11)$$

式中 t ——喷吹煤粉时应补偿的风温, $^\circ\text{C}$;

$V_{\text{风}}$ ——风量, m^3/t ;

$C_{\text{P}}^{\text{风}}$ ——热风温度在 $t_{\text{风}}$ 时的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

$Q_{\text{分}}$ ——喷吹煤粉的分解热, kJ/kg , 其计算方法如下:

$$Q_{\text{分}} = 33411\text{C} + 121019\text{H} + 9261\text{S} - Q_{\text{低}} \quad (2.12)$$

式中的 C、H、S 是喷吹煤粉的化学组成, 单位为 kg/kg , 元素前面的系数是各组分完全燃烧产生的热量;

$Q_{\text{低}}$ ——喷吹煤粉的低发热值, kJ/kg ;

式 2.11 中的 Q_{1500} 为喷吹煤粉升温到 1500°C 时所需要的物理热 [$\text{kJ}/\text{kg}(\text{m}^3)$], 其计算方法如下:

$$Q_{1500} = \sum C_p^i \cdot \Delta t \cdot i \quad (2.13)$$

式中 C_p^i ——各组分 Δt 时的平均热容;

Δt ——温度的变化范围;

i ——煤粉中各组分的含量。

由公式 2.11、2.12、2.13 可得出如果在其它条件均已知的情况下, 煤粉喷入高炉时的温度 $t_{\text{煤}}$ 与应补偿的风温之间的关系。假设已知煤粉中 C、H、S 的含量分别为 73.60%、3.33%、0.58%; 风量 $V_{\text{风}}$ 为 $1000\text{m}^3/\text{t}$; 风温 $t_{\text{风}}$ 为 1200°C , 则 $t_{\text{煤}}$ 与应补偿风温 t 之间的关系如图 2.5 所示。

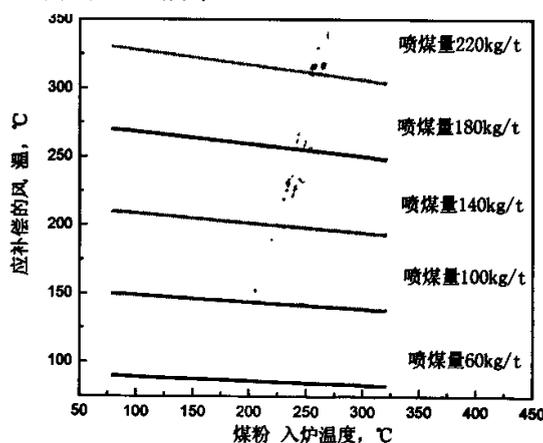


图 2.5 煤粉入炉温度与应补偿风温的关系

Fig 2.5 The relation of coal powder's temperature and compensatory wind temperature

由图 2.5 可以看出在喷煤量一定的条件下应补偿的风温随煤粉入炉温度的升高而降低。此外，喷煤量越大，喷吹煤粉的入炉温度 $t_{\text{煤}}$ 对于应补偿的风温 t 的影响也就越大。

举一例说明 $t_{\text{煤}}$ 对于应补偿风温 t 的影响。在煤粉喷吹量为 220kg/t 的条件下，若将煤粉入炉温度从 80℃ 提高到 320℃ 再喷入高炉，通过计算可得出，节省的补偿风温为 26.2℃。如果热风炉的工作条件没有改变，而仅仅增加了预热煤粉这道工序，则在高炉冶炼中实际反应出来的便是风温提高了，而提高的这部分风温就是原本被用来作为补偿热使用的那部分温度，也就是 26.2℃。

本例得出煤粉入炉温度由 80℃ 提高到 320℃ 可提高风温 26.2℃，这个结果对于高炉冶炼是有很影响的，主要反应在对于焦炭量的节省方面上。提高风温与节省焦炭量有如下的经验公式：

$$\Delta K = b_i(t_f - t_0) K_0, \text{ kg/t} \quad (2.14)$$

式中 K_0 ——基准干风温度时的焦比，kg/t；

b_i ——不同风温影响焦比的系数；

t_0 、 t_f ——变化前后的干风温度，℃。

$$t_1(t_0) = t_B - \frac{Q_{\text{H}_2\text{O}}}{C_p^i} (1 - \eta_{\text{H}_2}) \phi' \quad (2.15)$$

式中 t_B ——进入高炉的热风温度，℃；

$Q_{\text{H}_2\text{O}}$ ——每克水分解消耗的热量，kJ/g；

C_p^i ——风温为 t 时的比热容，kJ/(m³·℃)；

η_{H_2} ——高炉内氢的利用率；

ϕ' ——鼓风湿分，g/m³。

假设 K_0 为 480kg/t， b_i 取 0.0003， η_{H_2} 取 0.4，鼓风湿分 ϕ' 设为 16g/m³，根据上例计算结果，由公式 2.14、2.15 计算，便可得出对比煤粉入炉温度为 80℃ 时，节省焦炭量与煤粉入炉温度之间的关系，参见图 2.6。

由于现今国内炼铁厂的煤粉入炉温度就是在 80℃ 左右，在其他条件不变情况下，将煤粉预热到 320℃，理论上可降低 3.8kg/t 的焦炭。若每日产铁 10000t，则可节省 38000kg 的焦炭，一年便可节省约 13300 吨焦炭，按每吨焦炭 1200 元人民币估算，则煤粉预热技术一年可带来约 159.6 万人民币的效益。

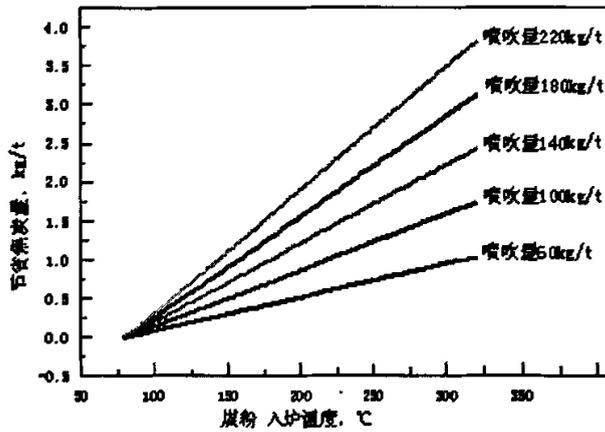


图 2.6 煤粉入炉温度与节省焦炭量的关系

Fig 2.6 The relation of coal powder temperature and quantity of coal saved

理论计算表明：喷煤量一定的条件下应补偿的风温随煤粉入炉温度的升高而降低。喷煤量越大，喷吹煤粉的入炉温度 $t_{煤}$ 对于应补偿的风温 t 的影响也就越大。当煤粉喷吹量为 220kg/t 的条件下，若将煤粉入炉温度从 80°C 提高到 320°C 时，可节省的补偿风温为 26.2°C，相当于降低焦比 3.8kg/t。

第3章 煤粉预热性能实验研究

为了更进一步的研究煤粉预热后性能的变化,对煤粉在加热前后的流动性、喷流性、煤粉的失重进行实验研究。实验所采用的煤种依然是神府煤、阳泉煤、太西煤、永城煤、宝钢1[#]高炉用煤、宝钢3[#]高炉和鞍钢用煤。将各种煤用球磨机磨制成粉,筛分后成实验用煤。各种煤的工艺分析见表3.1。

表 3.1 各种煤的工业分析
Table 3.1 The technical analysis of coal powder

	神府	阳泉	太西	永城	宝钢1 [#]	宝钢3 [#]	鞍钢
灰分	4.92	9.70	7.68	10.09	9.06	8.75	8.00
挥发分	29.32	5.62	6.78	6.07	14.37	14.32	14.89
固定碳	56.99	82.69	83.27	81.44	72.72	73.60	74.81
水分	8.78	1.99	2.26	2.40	3.85	3.33	2.30

3.1 煤粉失重实验

燃烧过程可以分为两个阶段,第一个阶段燃料和氧化剂进行缓慢氧化作用积累活化分子和提高可燃物温度,第二个阶段反应速度进行的非常迅速并释放出强烈的光和热。按照现代理论,碳粒的燃烧是在碳的吸附表面进行,首先氧气通过气流边界层在灰层中扩散和在煤粒内部微孔中扩散,并在煤的表面上发生化学吸附与氧化反应,解析后的产物通过内部微孔扩散到达煤的外表面,通过灰层进而通过气流边界层进入主气流进行扩散。煤的整个燃烧时间由化学反应时间和扩散时间构成。化学反应时间主要取决于煤的本性和温度,扩散时间取决于气流速度和灰层厚度。

理论分析表明,影响煤粒燃烧的主要变量包括煤种(挥发分含量、灰分、水分、岩相结构等)、煤的粒径、传热条件、加热速率、氧化剂含量、初始温度、压力等。燃烧过程从物理化学过程来讲,主要是来自气体和热颗粒对煤的加热速率;煤的热解速率;气体燃料和氧化剂组分的扩散速率以及热解产物与氧的气相反应速率等。

挥发分的析出与数量受到许多因素的影响,比如加热速率、温度、煤粒大小以及环境压力等等。提高加热速率可以缩短挥发分析出时间,提高加热终温也可以增加挥发分析出的数量和缩短析出时间。挥发分析出的起因是化学键的断裂,决定断键的起因在于温度,因此加热终温是影响挥发分析出的因素之一。加热速度越高,化学键的断裂更容易发生在键能较高的键上,而且升温速率快使得热量在煤粒中的传递更加迅速,释放挥发分速度也就越快。

灰分对着火的影响主要体现在阻碍挥发份的析出和影响氧气向煤粒内部的扩散^[39-41]。

本实验通过快速升温 and 预热升温两种方式，测定煤粉在氧化气氛条件下的失重量，探讨煤粉的氧化速度与加热温度之间的关系。

3.1.1 煤粉失重实验装置

该装置由煤粉燃烧炉、热天平和计算机测温采样系统组成。煤粉燃烧炉的加热元件是铁铬铝丝，燃烧炉由测温偶、控温偶和温控仪组成，温控仪能控制温度误差在±2℃。放煤粉的吊篮挂在天平上，煤粉燃烧的失重量由热天平(精度 0.001g)称重，并通过标准 232 口，存储到计算机中。

本次实验采用的下部为多孔耐热不锈钢板封装的石英管，能够使煤粉与空气充分接触，克服了托盘中煤粉与空气中的氧接触不畅的弊病。将煤粉式样装入φ8mm 的玻璃管中，用一个小电炉加热到预定的实验温度，再用气体吹入燃烧炉中的石英管中。石英管底部装有 10mm 厚的粒度在 5mm 左右的 Al₂O₃ 颗粒，既透空气又避免喷进的煤粉漏出。试验装置见图 3.1。

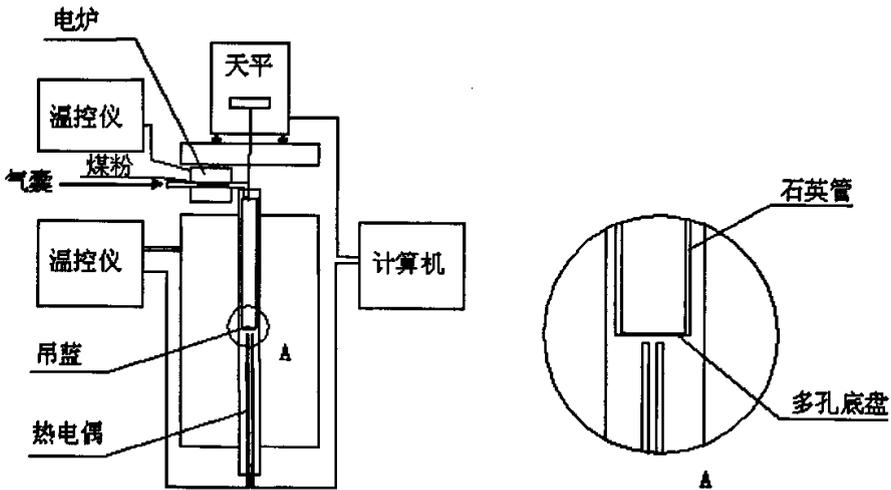


图 3.1 煤粉失重实验装置

Fig 3.1 Equipment for testing the lost weight of coal

3.1.2 试验原料

本试验采用神府煤、阳泉煤、太西煤、永城煤以及宝钢 1 号和 3 号高炉用煤这 6 种煤作为原料，各种煤的工业分析见表 3.1。

3.1.3 试验方法及方案

本试验通过快速升温 and 预热升温两种方式，测定煤粉在氧化气氛条件下的失重量，讨论煤粉的氧化速度和加热温度之间的关系以及煤粉预热的意义。

两种试验方法分别是：

a、快速升温试验方法：先把吊盘放入电炉内，然后将电炉升至设定的试验温度，再将煤粉装在 L 型玻璃管内用气囊迅速洒到吊盘上，测定煤粉式样失重。设定的试验温度分别是 300℃，400℃，500℃，600℃，700℃。

b、预热煤粉的快速升温试验：先把煤粉式样放入 L 型玻璃管内，之后将玻璃管插进温度可调的小电热炉管内预热，预热好之后，再用气囊迅速喷到 a 方法中各温度区的吊盘上，测定煤粉式样的失重。煤粉预热温度分别 100℃，160℃，220℃，280℃。

煤粉失重试验的方案见表 3.1。

表 3.1 煤粉失重试验方案
Table 3.1 Project of testing the lost weight of coal

实验方法		神府煤	阳泉煤	太西煤	永城煤	宝钢 1 号	宝钢 3 号
快速升温试验	实验温度 300℃	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	实验温度 400℃	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	实验温度 500℃	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	实验温度 600℃	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	实验温度 700℃	✓	✓	✓	✓	✓	✓
预热煤粉的	预热温度 100℃		✓	✓	✓	✓	✓
快速升温实验 (实验温度 700℃)	预热温度 160℃		✓	✓	✓	✓	✓
	预热温度 220℃		✓	✓	✓	✓	✓
	预热温度 280℃		✓	✓	✓	✓	✓

3.1.4 煤粉失重实验的结果和分析

神府煤粉、阳泉煤粉、太西煤粉、永城煤粉、宝钢 1 号煤粉和宝钢 3 号煤粉在 300℃、400℃、500℃、600℃、700℃ 下的失重曲线分别如图 3.2、3.3、3.4、3.5、3.6、3.7 所示。

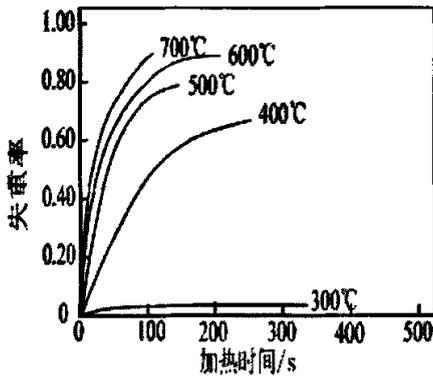


图 3.2 神府煤粉的失重曲线

Fig 3.2 The lost weight curve of Shenfu coal

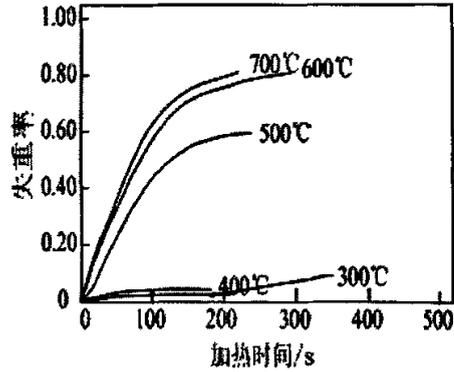


图 3.3 阳泉煤粉的失重曲线

Fig 3.3 The lost weight curve of Yangquan coal

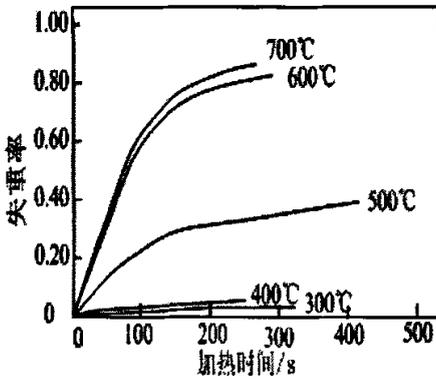


图 3.4 太西煤粉的失重曲线

Fig 3.4 The lost weight curve of Taixi coal

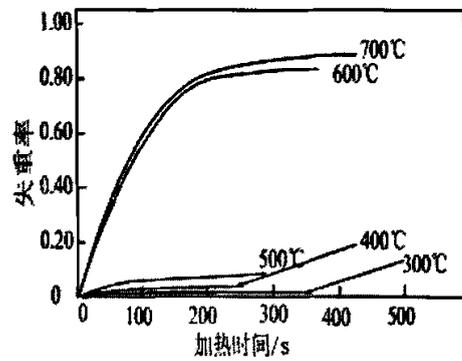


图 3.5 永城煤粉的失重曲线

Fig 3.5 The lost weight curve of Yongchen coal

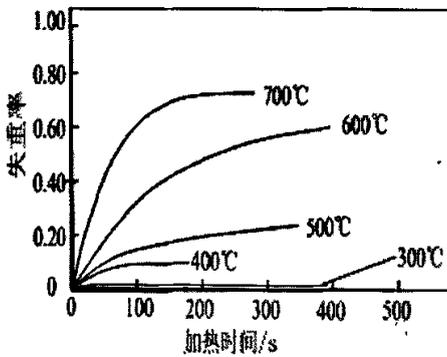


图 3.6 宝钢 1 号煤粉的失重曲线

Fig 3.6 The lost weight curve of Bao Steel's No.1 coal

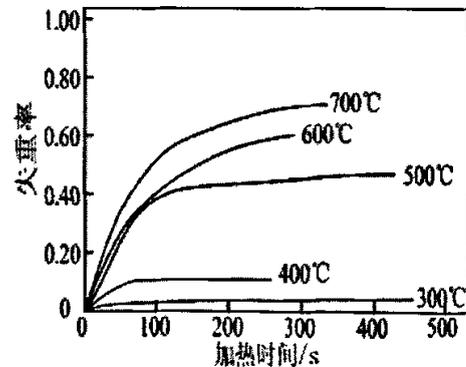


图 3.7 宝钢 3 号煤粉的失重曲线

Fig 3.7 The lost weight curve of Bao Steel's No.3 coal

各种煤粉在 400℃、500℃、600℃、700℃下的失重曲线分别如图 3.8、3.9、

3.10、3.11 所示。

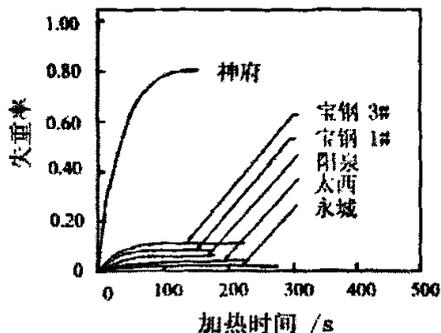


图 3.8 各种煤粉在 400℃ 的失重曲线

Fig 3.8 The lost weight curve of different coal in the temperature of 400℃

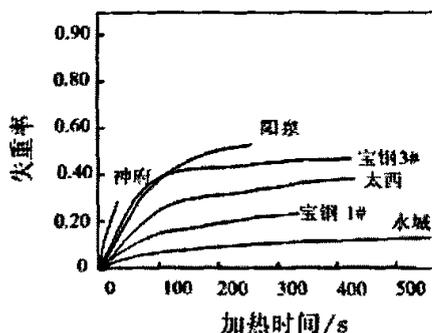


图 3.9 各种煤粉在 500℃ 的失重曲线

Fig 3.9 The lost weight curve of different coal in the temperature of 500℃

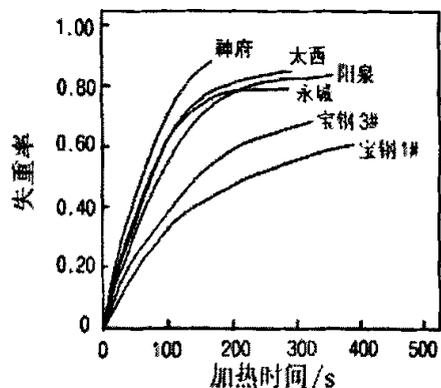


图 3.10 各种煤粉在 600℃ 的失重曲线

Fig 3.10 The lost weight curve of different coal in the temperature of 600℃

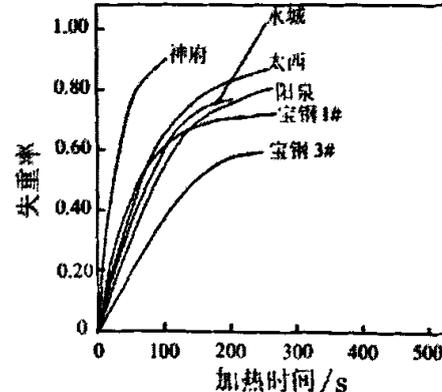


图 3.11 各种煤粉在 700℃ 的失重曲线

Fig 3.11 The lost weight curve of different coal in the temperature of 700℃

阳泉煤粉、太西煤粉、永城煤粉、宝钢 1 号煤粉、宝钢 3 号煤粉在预热后的失重曲线分别如图 3.12、3.13、3.14、3.15、3.16 所示。

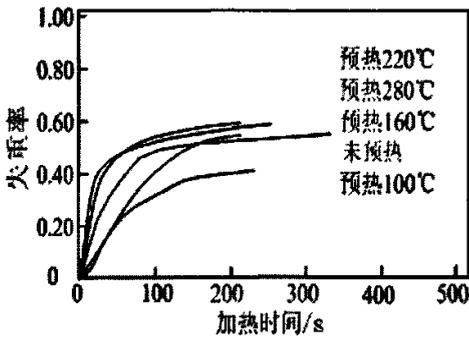


图 3.12 阳泉预热煤粉在 500℃ 的失重曲线
Fig 3.12 The lost weight curve of Yangquan coal
in the temperature of 500℃

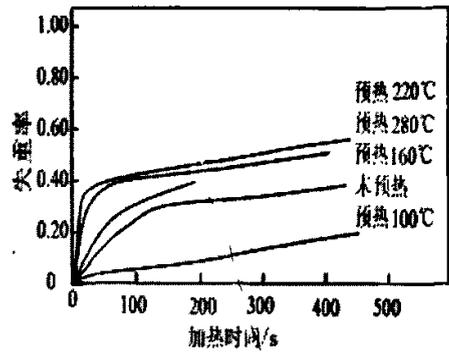


图 3.13 太西预热煤粉在 500℃ 的失重曲线
Fig 3.13 The lost weight curve of Taixi coal
in the temperature of 500℃

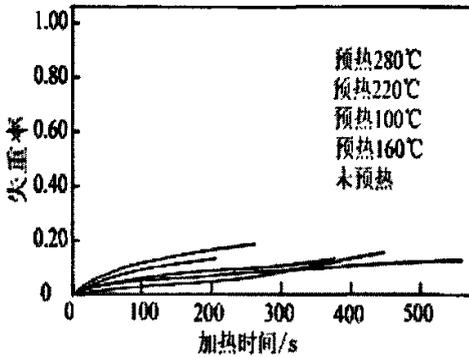


图 3.14 永城预热煤粉在 500℃ 的失重曲线
Fig 3.14 The lost weight curve of Yongcheng coal
in the temperature of 500℃

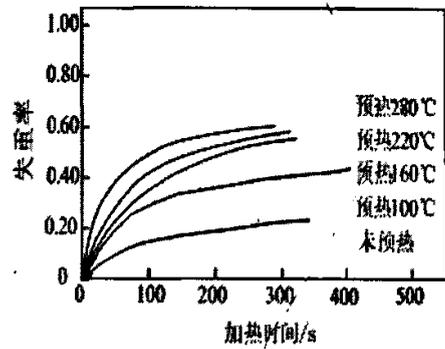


图 3.15 宝钢 1 号预热煤粉在 500℃ 的失重曲线
Fig 3.15 The lost weight curve of Bao steel
No.1 coal in the temperature of 500℃

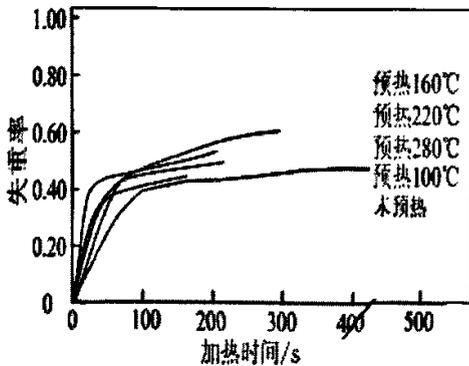


图 3.16 宝钢 3 号预热煤粉在 500℃ 的失重曲线
Fig 3.16 The lost weight curve of Bao steel No.3
coal in the temperature of 500℃

通过对预热煤粉的理论研究和对宝钢 1 号高炉用煤、宝钢 3 号高炉用煤、神府煤、阳泉煤、太西煤和永城煤这六种煤进行的快速升温 and 预热快速升温试验研究, 可以得出以下结论:

(1) 在快速加热的条件下, 随着温度的升高, 各种煤粉的失重速度都增大, 且每种煤粉的最大失重量也增加。

(2) 在快速加热到 400℃、500℃ 的温度下, 宝钢煤失重率较高, 其次是太西煤、阳泉煤和永城煤, 而在 600℃、700℃ 的温度下, 太西煤、阳泉煤和永城煤失重率都要比宝钢煤高。这六种煤粉中神府的烟煤, 无论是失重速度还是最大失重量, 都要优于其它煤。

(3) 从以上预热煤粉的失重曲线上, 可以看出预热的煤粉要比没有预热的失重快。且预热温度越高, 失重率和失重速度越大。

(4) 试验装置的改进, 减少了供氧不足而产生的影响, 燃烧时间普遍加快。

3.2 煤粉流动性和喷流性实验

煤粉预热后理化性能会改变, 为了研究煤粉预热后因煤粉性能的变化对煤粉输送、喷吹的影响, 本实验对煤粉在预热前后流动性和喷流性的变化进行比较研究。

3.2.1 实验方法

(1) 实验原理

本实验是用卡尔(Carr)指数法来测定煤粉的流动性和喷流性。卡尔(Carr)指数法是卡尔教授通过大量的实验, 在综合研究了影响粉体流动性和喷流性的几个单项粉体物性值的基础上, 将其每个特征值指数化并累加以指数方式表示的表征粉体综合特性的方法^[42]。其中单项粉体的物性包括各种安息角、压缩度、抹刀角、内聚力、均匀度, 利用这些指标, 可以从不同的角度了解粉体的流动性, 而利用 Carr 指数这一综合指数可以判断粉体的流动性的好坏。

根据 Carr 流动性指数, 通过测定样品的每一项流动性指数和喷流性数, 并把其结果累加。即可得到卡尔指数。得出对流动性状和喷流性状的综合评价。

(2) 流动性指数的测量原理和方法

工程中应用的安息角有多种定义和测量方法, 本文采用的安息角的测定方法是自然堆角法, 根据 GB/T18702-2002 煤炭安息角的测定方法^[43]进行测定。通过测量煤粉的安息角可以了解煤粉的流动性——安息角越小流动性越好。

压缩度是由松装堆密度到振实堆密度的相对减少量确定的, 压缩度计算公式

为：

$$\text{压缩度} = (\text{振实堆密度} - \text{松装堆密度}) / \text{振实堆密度} \times 100\% \quad (3.1)$$

其中堆密度是单位体积自然堆积的煤或煤粉(包括空隙)的质量,而振实堆密度是指将粉体装入容器中振实后的堆密度;松装堆密度是指粉体自然堆积状态下的堆密度。测量压缩度时将煤粉放入容器中,测量其体积,然后进行振动压缩,直到体积不再变化为止,记录此时的煤粉体积。粉体的压缩度越大流动性就越差,当压缩度大于20%时,粉体就不易自然流动。

抹刀角是将一定宽度的抹刀水平插入自然堆起的煤堆中,然后垂直提起,煤粉与抹刀的夹角为抹刀角。抹刀角越小粉体的流动性越好,当抹刀角大于40度时粉体的流动性极差,不易自然流动。

内聚力指存在于细粉颗粒表面上(或颗粒之间)的表观粘着力,因此对于干燥的粉体来说没有内聚力,实验前将煤粉烘干,因此不考虑内聚力。

本实验主要研究煤粉在高温和常温下流动性的比较,因为在两种情况下煤粉的粒度不会改变,因此不考虑煤粉的均匀度。实验时每个指数的测定均在常温和高温(200℃左右)下进行。

(3) 喷流性指数的测量原理和方法

粉料的喷流性是指粉体在流动、输送、喷吹过程发生喷涌乃至喷溅的倾向。反应喷流性的指数有粉料的流动性、落角、差角和弥散度。

落角的测量是在测量安息角的托盘上用煤粉做成一个具有自然安息角的煤堆,让测定用的重物(246.76g)自由落下冲击托盘,在冲击作用下煤堆形成的新的角度为落角。落角是由于粉体在冲击振动下颗粒沿料堆斜面落下而形成的,由此可知,落角越小,粉体的流动性就越好。安息角与落角之间的差值为差角。某些喷流性强的粉体安息角和落角都不是太大,但差角可能会很大。所以,差角更能反应粉体的喷流性,差角越大,喷流性也越大。弥散度的测量是将一定量的煤粉(10g)从圆形套筒上方投入套筒内,使其下落到下方盘内,收集煤粉称量。弥散度的计算公式如下:

$$\text{弥散度} = (\text{样品总重} - \text{盘内总重}) / \text{样品总重} \times 100\% \quad (3.2)$$

弥散度越大,粉体的喷流性就越强^[44,45]。

同流动性的测定一样,煤粉的喷流性也在常温和高温(200℃左右)两个温度下进行。

3.2.2 实验结果及分析

表3.2为不同煤种在常温和200℃温度下的Carr流动性指数、Carr喷流性指数,括号内的数字为两种指数的得分值,得分是根据Carr流动性指数表(表A.1)和Carr

喷流性指数表(表 A.2)查得。

表 3.2 不同煤种的 Carr 流动性指数和 Carr 喷流性指的分值

Table 3.2 Score of the Carr flow ability and Carr flood ability of different coal

煤种	温度	安息角 度(得分)	压缩度 %(得分)	抹刀角 度(得分)	流动性 综合指数	落角 度(得分)	差角 度(得分)	喷流性 综合指数
阳泉	常温	39 (18)	26.1%(15)	70(12)	45	29(18)	10(10)	28
	200℃	36.5(19)	32.8%(10)	75(10)	39	25(20)	11.5(12)	32
神府	常温	36(19.5)	25.2%(15)	70(12)	46.5	31(17)	5(3)	20
	200℃		30.2%(14.5)					
太西	常温	43(16)	29.2%(14.5)	74(12)	42.5	36(16)	7(6.25)	41
	200℃	35(20)	29.5%(14.5)	75(10)	44.5	25(20)	10(10)	30
永城	常温	44.5(16.5)	34.4%(9.5)	80(7)	33	33(16)	11.5(12)	28
	200℃	37.5(18)	25.9%(15)	65(12)	45	25(20)	12.5(12)	32
宝钢 1	常温	36.5(19)	25.3%(15)	70(12)	36	30(17.5)	6.5(6)	23.5
	200℃	27.5(24)	25.4%(15)	52(16)	55	20(22.5)	7.5(6.25)	28.75
鞍烟	常温	45(15)	24.6%(15)	80(7)	37	33(16)	12(12)	28
	200℃	25(25)	33.3%(9.5)	60(15)	49.5	15(24)	10(10)	34
阳 75%+ 神 25%	常温	43.5(16)	31.3%(11)	77(7)	34	36(16)	7.5(6.25)	22.25
	200℃	33(21)	33.3%(9.5)	75(10)	40.5	27(18)	6(6)	24

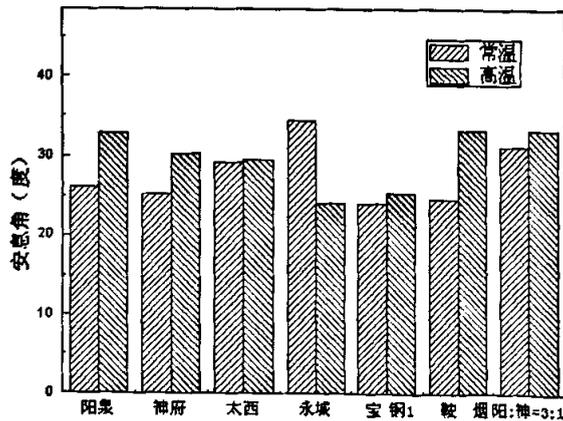


图 3.17 不同煤种的安息角与温度的关系

Fig 3.17 Relationship between angle of repose and temperature of different coal

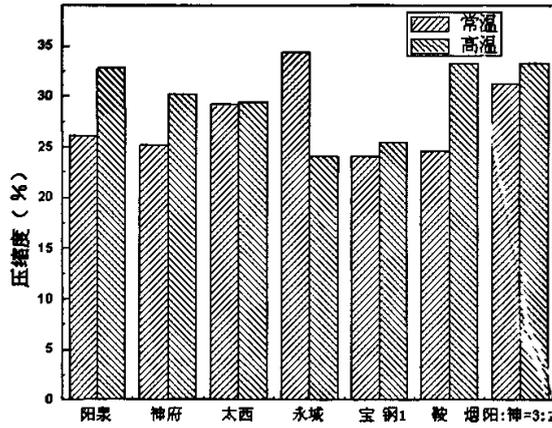


图 3.18 不同煤粉在两种温度下的压缩度的比较

Fig 3.18 Compare the degree of compression of different coal in two temperatures

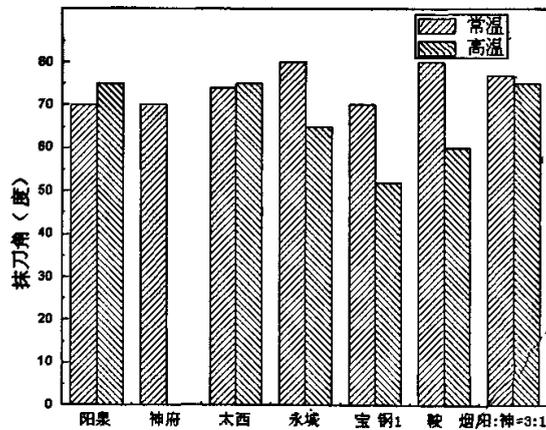


图 3.19 不同煤粉在两种温度下抹刀角的比较

Fig 3.19 Compare the spatulate angle of different coal in two temperatures

从表 3.2 中可以看出,各种煤粉在 200℃下的安息角均比常温下安息角减小(除神府煤在烘到 200℃时有挥发现象,故没有测定),从图 3.17 可以看出,鞍钢烟煤的变化最为明显,阳泉煤的变化最小。从图 3.18 可以看出,除了永城煤粉的压缩度在常温时比 200℃时的高外,其余煤粉的常温时压缩度,都比 200℃的大,其中鞍钢烟煤的变化量最大。从图 3.19 可以看出,抹刀角的变化是有升有降。

表 3.3 各种煤粉在高温和低温下流动性和喷流性综合得分的差值

Table 3.3 D-value of flow and flood ability aggregative indicator of different powder coal between high temperature and normal temperature

煤种	常温	高温	流动性差值	常温	高温	喷流性差值
阳泉	45	39	-6	62.00	63.00	1.00
神府	46.5			58.00		
太西	42.5	44.5	2	54.25	63.50	9.25
永城	33	45	12	50.00	62.00	12.00
宝钢 1	46	55	9	53.50	67.25	13.75
鞍烟	37	49.5	12.5	56.00	70.00	14.00
阳 75%+神 25%	34	40.5	6.5	46.25	65.00	18.75

按照 Carr 流动性指数表对煤粉流动性的各个指标(安息角、压缩度、抹刀角)打分,将所的分相加得到流动性的综合指数。从图 3.20 可以看出,除了阳泉煤的流动性在高温下变差,其余煤粉的流动性在高温下均较常温下的好。从煤种上看,烟煤的流动性的变化要大于无烟煤的。

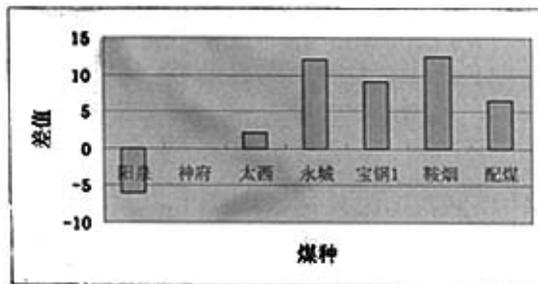


图 3.20 不同煤种在高温和常温下流动性综合指标的差值

Fig. 3.20 D-value of flow ability aggregative indicator of different powder coal between high temperature and normal temperature

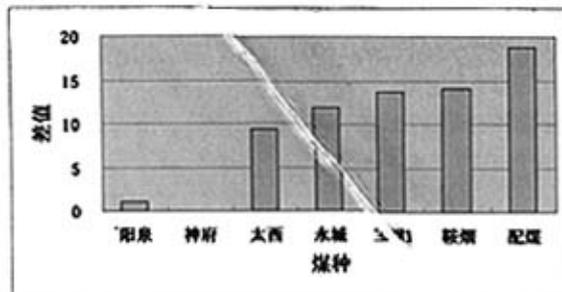


图 3.21 不同煤种在高温和常温下喷流性综合指标的差值

Fig. 3.21 D-value of flood ability aggregative indicator of different powder coal between high temperature and normal temperature

按照 Carr 喷流性指数表对煤粉喷流性指标(流动性、落角、差角、弥散度)进行打分,将所分数相加得到喷流性的综合指数。从图 3.21 可以看出,高温下所有煤粉的喷流性都有所增加,其中鞍钢烟煤的增加幅度很大,混和煤粉的喷流性变化最大。

3.2.3 结论

- (1) 煤粉在 200℃下的流动性比在常温下要好,同等条件下宝钢 1 号煤的流动性最优。
- (2) 煤粉在 200℃下的喷流性都比在常温下的有所增强,在相同的条件下鞍钢煤的增幅最大。
- (3) 配煤的流动性较单一煤种的流动性有所下降,同时喷流性也下降。

第 4 章 煤粉燃烧实验

前面对煤粉预热后的性能进行了实验研究，但也只能在一定程度上反应煤粉预热后的性能。影响预热煤粉燃烧的仍有多种因素，如煤粉预热的方式，预热的温度等。本实验在两种预热方式下对实验用煤种进行两种温度的预热后喷吹并测定其燃烧率。

4.1 实验内容

首先进行无预热条件下的煤粉燃烧试验，以测得的煤粉燃烧率作为基准。

分别采用两种预热方法，进行煤粉燃烧实验，通过比较其燃烧效果，探讨生产中预热喷吹的可行性。

喷吹用煤采用阳泉煤、神府煤、太西煤、永城煤和宝钢 1#高炉喷吹用煤和鞍山烟煤，煤的工业成分见表 3.1。考虑到高炉喷吹混合煤的情况，考察两种混煤(混 1: 75%阳泉+25%神府，混 2: 50%阳泉+50%神府)的燃烧效果。

4.2 实验设备

喷煤燃烧模拟实验装置如图 5.1 所示。该设备由送风系统、控温系统、燃烧系统、喷吹系统、燃烧产物收集系统等几个部分组成，可以模拟煤粉在高炉风口、直吹管段的燃烧过程。

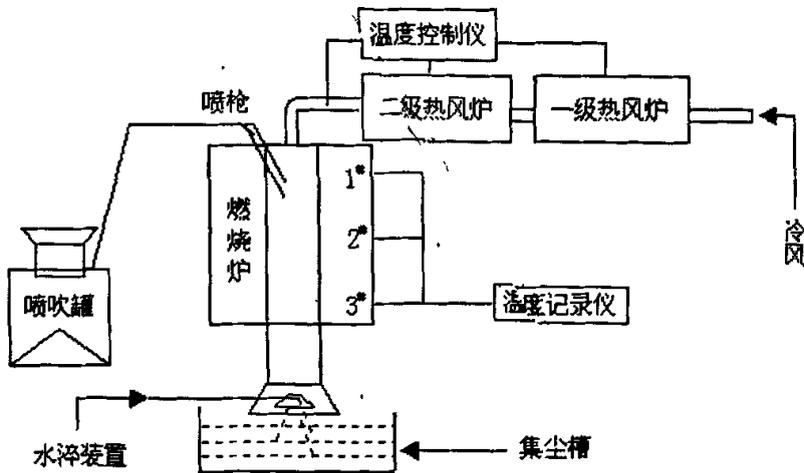


图 4.1 高炉喷煤模拟燃烧实验装置简图

Fig 4.1 Sketch map of equipment for simulate the coal burning in blast furnace

4.2.1 送风系统

由二级热风炉构成。一级热风炉采用 500VA 三组 Fe-Cr-Al 电热丝加热，炉内填充 40mm 高铝球作为蓄热和鼓风换热介质，炉内最高温度可达 900℃。二级热风炉采用二硅化钼作为加热元件，炉内最高温度可达 1300℃。

压缩空气机的最大供风量为 80Nm³/h。鼓风量设为 50Nm³/h 时，输出风温为 1050℃左右。

4.2.2 控温系统

燃烧炉内不同位置的温度用 Pt-Rh 热电偶测定。热电偶距燃烧管顶端分别为：1#30mm、2#60mm、3#90mm(图 4.1)。使用温度记录仪记录各点温度。通过可控硅温度控制器调节热风炉输出热风温度，保证风温稳定。

4.2.3 喷吹系统

采用专门设计的煤粉给料器。该给料器使用锥体旋转出料、气力输送等技术，实现给料过程均匀、稳定。通过调节直流电机转速控制煤粉喷吹量。给粉重量误差不大于 3%。喷枪采用 $\phi 12\text{mm}$ 的不锈钢耐热钢管。

4.2.4 燃烧系统

煤粉在立式燃烧炉的炉管内燃烧，炉管为 $\phi 70 \times 1000\text{mm}$ 高铝管，管外由 24 支 $3.2 \Omega 150 \times 150 \times 8\text{mm}$ 的硅碳棒加热。

4.2.5 燃烧产物收集系统

燃烧产物通过立式燃烧炉炉底的雾化喷水装置淬熄收集，经过滤、干燥、灰化后，用于燃烧率的计算分析。

4.3 实验过程

4.3.1 煤粉的制备过程

将宝钢运来的原煤磨制成粉，制成的煤粉细度为-200 目的比例占 50%左右。为防止煤粉潮湿而堵塞煤粉给料器，实验前在 105℃ 恒温干燥箱内鼓风烘干煤粉 1.5 小时，干燥煤粉用塑料袋密封保存备用。

4.3.2 煤粉预热的两种方案

本实验对煤粉的预热采用两种方案，实验时并对未预热的煤粉进行喷吹实验，以作为比较的基准。

预热方式 1—外加热源加热煤粉和载气：

煤粉和煤粉载气压缩空气经过加热炉加热后，再喷进燃烧炉内燃烧(图 5.2)。通过预备实验，调整并确定加热炉的电压，控制煤粉及载气通过加热炉后的温度分别为 200℃ 和 300℃。

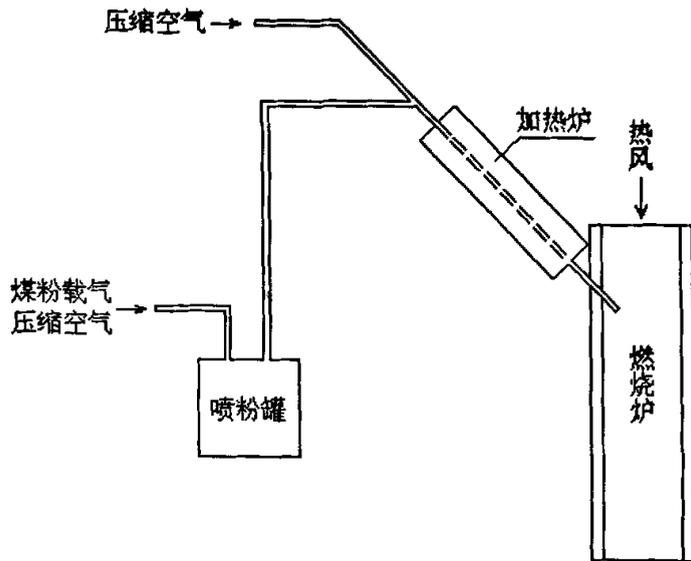


图 4.2 煤粉和煤粉载气压缩空气一起加热的预热方式

Fig 4.2 Preheating measure of heating the coal and the constrigent air at the same time

预热 2—用热空气加热煤粉和载气：

采用加热炉加热空气，然后与煤粉及载气混合，再喷进燃烧炉内燃烧(图 4.3)。通过预备实验，调整并确定加热炉的电压，控制输出的热空气的温度，使其与煤粉及载气混合后的温度分别为 200℃ 和 300℃。

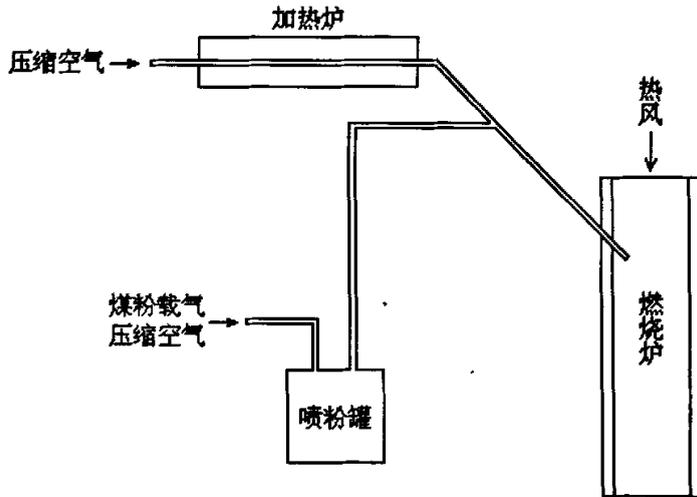


图 4.3 用热空气加热煤粉和煤粉载气压缩空气的预热方式

Fig 4.3 Preheating measure of heating the coal with the hot air

4.3.3 实验步骤

实验前将热风炉和煤粉燃烧炉通电加热，将煤粉预热的电阻炉通电，调节电压使其温度控制在需要的范围，当调节到电压为 47V 时温度为 200℃，电压为 64V 时温度为 300℃。当热风炉炉温为 900℃ 时送冷风，当燃烧炉顶部温度到 1050℃ (1# 热电偶) 时开始实验，每次喷吹一定量(300g)的煤粉，给煤速度为 60/min，喷吹时间 4 分钟。一组实验结束后，待燃烧炉顶部温度恢复至 1100℃ 后，进行下一组实验。改变煤种时，吹净给料器内存留的煤粉，以保证实验数据的可比性。

炉底燃烧残余物喷水淬熄后过滤收集。

4.3.4 煤粉燃烧率的计算

燃烧炉内的燃烧残余物通过炉底的喷水淬熄，过滤、收集。每组残余物试样取 50g，在恒温干燥箱内 105℃ 下鼓风干燥；然后用光电天平称取干燥的试样约 2g，置于瓷舟内，厚度不超过 1.5mm。试样送入马弗炉中升温至 500℃，恒温半小时后继续升温至 815℃，恒温 2~3 小时进行灰化。最后用光电天平称量灰样重量，记录数据。

根据记录的瓷舟空重、灰化前、灰化后的重量，可计算出灰样中灰分含量，并由此计算燃烧率。

煤粉燃烧率采用灰分平衡法计算：

$$I = \frac{A(1 - W_0^f) - A_0^f}{A(1 - W_0^f - A_0^f)} \times 100\% \quad (4.1)$$

式中 I ——煤粉燃烧率；

A_0^f 、 W_0^f 、 A 分别为分析基煤粉灰分、水分含量和燃烧残余物灰分含量。

4.3.5 实验结果及分析

不预热和两种预热方式下的煤粉燃烧率见表 4.1、4.2、4.3。

表 4.1 无预热时煤粉燃烧实验结果

Table 4.1 Experiment result of coal burning without preheating

煤种	热风温度 / °C	预热温度 / °C	喷吹结束炉膛温度 / °C	燃烧率 / %
阳泉	1057	0	1268	20.63
神府	1058	0	1307	53.60
太西	1056	0	1380	12.51
永城	1058	0	1380	18.94
宝钢 1	1051	0	1397	22.26
鞍烟	1059	0	1398	35.81
配 1	1056	0	1402	21.95
配 2	1053	0	1421	34.94

表 4.2 预热方法 1 的燃烧实验结果

Table 4.2 Experiment result of coal burning with the No.1 preheating measure

煤种	热风温度 / °C	预热温度 / °C	喷吹结束炉膛温度 / °C	燃烧率 / %
阳泉	1056	200	1417	24.94
神府	1056	200	1400	60.00
太西	1051	200	1420	15.99
永城	1053	200	1410	23.87
宝钢 1	1049	200	1429	26.02
鞍烟	1052	200	1390	40.72
配 1	1051	200	1428	34.22
配 2	1050	200	1428	42.95
阳泉	1052	300	1440	27.47
神府	1048	300	1400	60.93
太西	1048	300	1432	16.11
永城	1048	300	1471	24.71
宝钢 1	1048	300	1441	28.92
鞍烟	1050	300	1440	39.94
配 1	1050	300	1424	37.12
配 2	1050	300	1412	43.11

表 4.3 预热方法 2 的燃烧实验结果

Table 4.2 Experiment result of coal burning with the No.2 preheating measure

煤种	热风温度 / °C	预热温度 / °C	喷吹结束炉膛温度 / °C	燃烧率 / %
阳泉	1054	200	1417	25.81
神府	1056	200	1400	58.26
太西	1050	200	1420	13.34
永城	1057	200	1410	18.38
宝钢 1	1050	200	1429	23.01
鞍烟	1050	200	1390	37.48
配 1	1047	200	1428	33.26
配 2	1051	200	1428	39.65
阳泉	1056	300	1440	24.40
神府	1052	300	1400	59.38
太西	1050	300	1432	13.43
永城	1052	300	1471	21.51
宝钢 1	1050	300	1441	25.02
鞍烟	1054	300	1440	39.13
配 1	1056	300	1424	31.71
配 2	1050	300	1412	42.75

(1) 煤种对燃烧效果的影响

从表 4.1 中可以看出：在实验室模拟实验条件下，煤粉的燃烧率主要由煤种决定。烟煤的燃烧率明显高于无烟煤。其中，无烟煤的燃烧率各不相同，太西煤燃烧率最低，其次是永城、阳泉，烟煤中神府煤比鞍钢煤容易燃烧。

从表 4.1 可知，烟煤燃烧结束时炉膛温度明显低于无烟煤，其原因是烟煤热值低于无烟煤。因此，混合煤喷吹既有利于煤粉燃烧，亦有利于高炉满足热量需求。实验结果表明，烟煤和无烟煤混合比例不同，混合煤粉的燃烧率不同。由混 1、混 2 实验结果可见，烟煤配比增加，混煤燃烧率提高。

(2) 不同预热方式对煤粉燃烧效果的影响

预热方法和温度对煤粉燃烧率的影响见图 4.4。

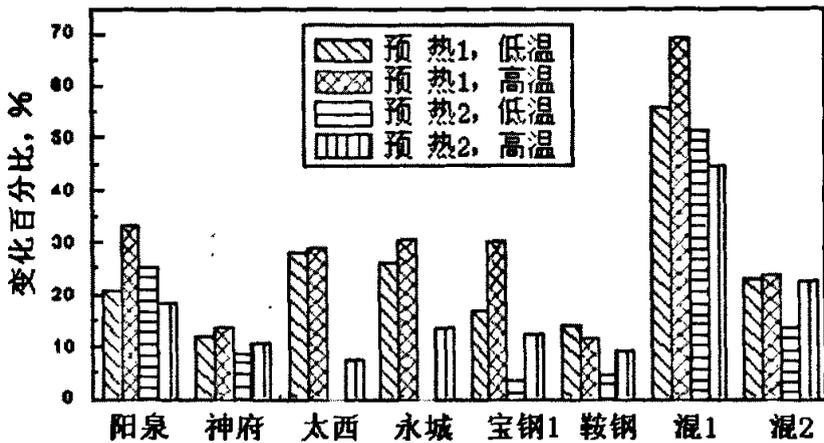


图 4.4 不同预热方式和温度下煤粉燃烧率相对变化率

Fig 4.4 Comparatively change rate of the coal's combustion rate in different preheating measures and temperatures

由图 4.4 可见，采用两种方法对煤粉进行预热并喷吹后，煤粉燃烧率普遍呈提高趋势，多数情况下，煤粉燃烧率提高 10%~30% 不等。仅有太西、永城煤在热空气预热条件下改善效果不明显。

两种预热方式下，不同预热温度的实验结果见图 4.5、4.6 由图可见，预热方式 1 中，随预热温度升高，煤粉燃烧率均呈增加趋势。但从增加效果来看，采用 200℃ 的提高幅度较明显。将预热温度从 200℃ 增加到 300℃，各种煤粉燃烧率的提高幅度都不大。

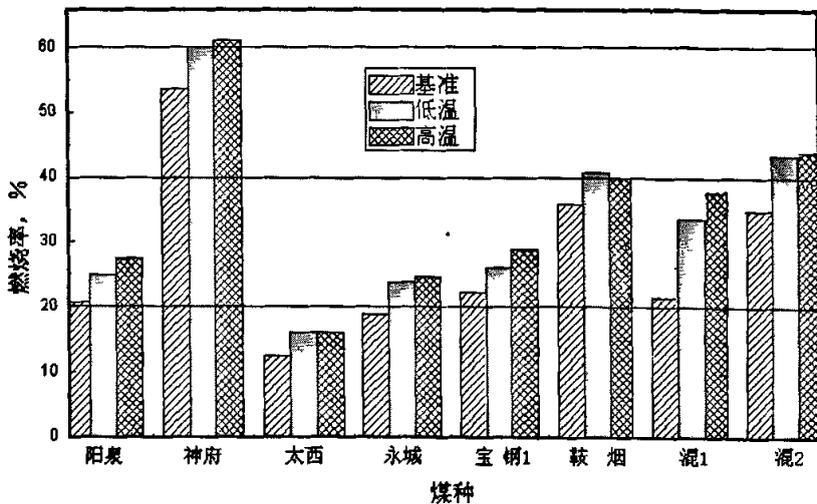


图 4.5 预热方式 1，煤粉燃烧率与预热温度的关系

Fig 4.5 Relationship between the coal's combustion rate and the preheating temperature in No.1 preheating measure

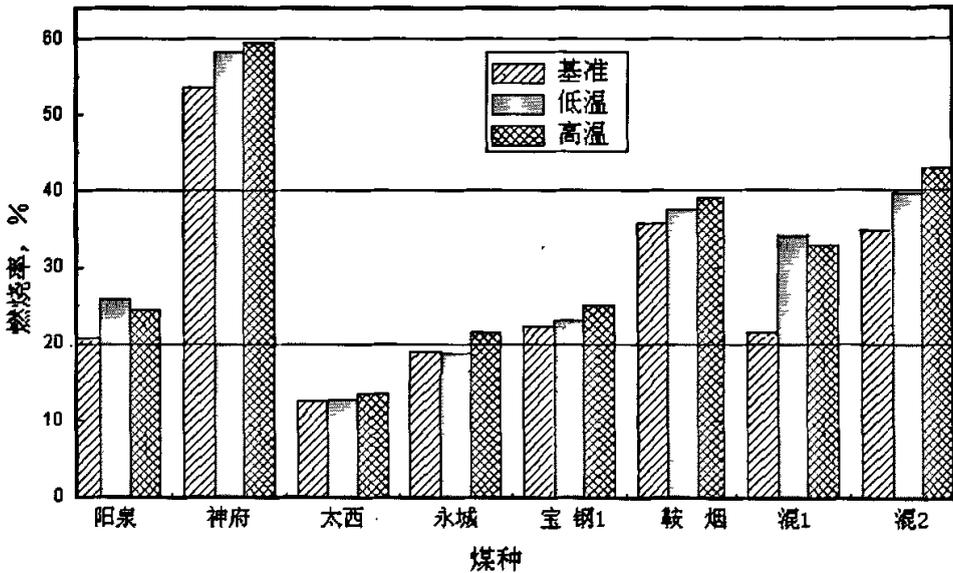


图 4.6 预热方式 2，煤粉燃烧率与预热温度的关系

Fig 4.6 Relationship between the coal's combustion rate and the preheating temperature in No.2 preheating measure

预热方式 2 的情况与预热方式 1 基本相同，即随预热温度升高，煤粉燃烧率均呈增加趋势。但太西、永城煤的燃烧率变化不大。对燃烧率增加的煤粉而言，亦是采用 200℃ 的提高幅度较明显。

图 4.7、4.8 分别为不同预热方式、相同预热温度下的煤粉燃烧实验结果。由图可见，在 200℃ 或 300℃ 时，预热方式 1 条件下的煤粉燃烧率普遍比预热方式 2 高。因此，从提高燃烧率的角度分析，采用方式 1 预热煤粉对提高燃烧率的效果较好。

但从预热方式对煤粉爆炸的影响分析，采用预热方式 1 时对喷吹稳定性有较高要求，煤粉断流时必须立即调整外加热源，以保证炉内温度不致过高。否则在煤粉流恢复时，煤粉将在加热段开始燃烧，产生安全问题。

从能量利用的角度分析，采用方式 2 预热煤粉的可操作性更高。通过热交换器加热空气，可充分回收钢铁厂内高温废气的热量；加热空气的温度和喷入量可根据煤粉喷吹量灵活控制和调节。

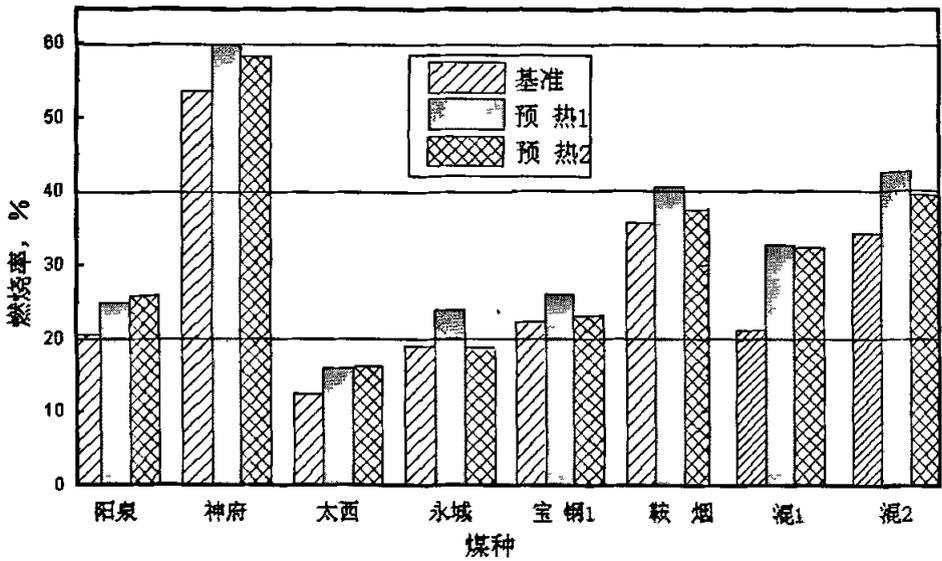


图 4.7 预热方式对煤粉燃烧率的影响(200°C)

Fig 4.7 Preheating measures influenced on the coal combustion rate in 200°C

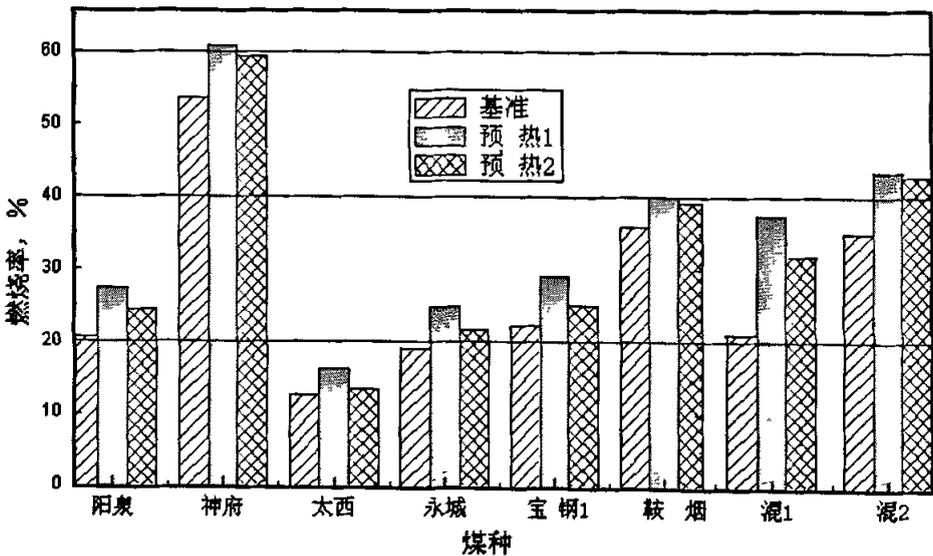


图 4.8 预热方式对煤粉燃烧率的影响(300°C)

Fig 4.8 Preheating measures influenced on the coal combustion rate in 300°C

(3) 预热对混煤燃烧效果的影响

图 4.9 为不同预热方式和温度条件下，混煤燃烧率与烟煤配比的关系。由图可见，与单煤种相比，两种方式预热后混煤燃烧率均有提高，并且在烟煤配比为 25%时，其效果比烟煤配比为 50%时更为明显。

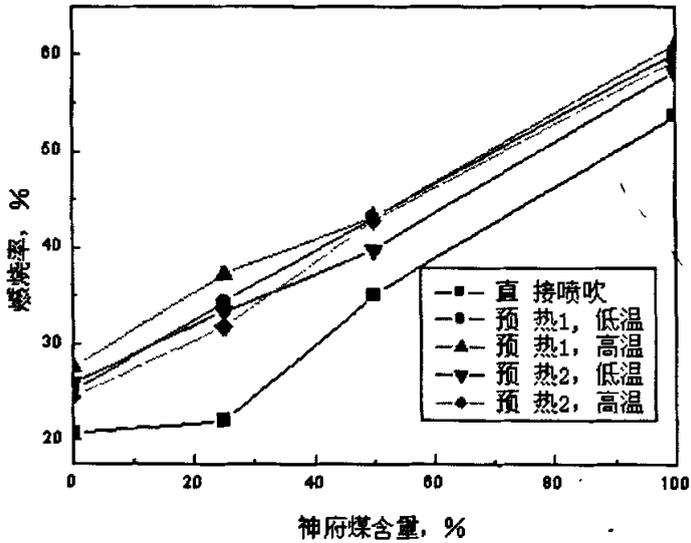


图 4.9 不同预热条件下烟煤配比与混煤燃烧率的关系

Fig 4.9 Relationship between the soft coal's proportions and the coal combustion rate

4.4 结论

根据实验结果及分析, 可得到如下结论:

(1) 煤粉的燃烧率主要由煤种决定。烟煤的燃烧率明显高于无烟煤, 但热值低于无烟煤。混合煤喷吹有利于煤粉燃烧和满足高炉热量需求。

(2) 采用两种方法预热煤粉并喷吹后, 煤粉燃烧率普遍呈提高趋势, 多数情况下, 煤粉燃烧率提高 10%~30%不等。相比而言, 采用预热 200℃时, 提高煤粉燃烧率的效果较明显。

(3) 从提高燃烧率的角度分析, 预热方式 1 提高燃烧率的效果较好。从综合安全性及能量利用角度分析, 采用预热方式 2 的应用性更强。

(4) 两种方式预热时, 混煤燃烧率均有提高, 并且在烟煤配比为 25%时效果更明显。

第5章 结论

本文从理论上对煤粉预热喷吹工艺进行探讨,并用神府煤、阳泉煤、太西煤、永城煤、宝钢1[#]高炉用煤、宝钢3[#]高炉用煤和鞍钢煤这七种煤进行煤的预热和燃烧试验,进一步探讨了预热煤粉性能的变化及燃烧率的计算,通过实验研究得出以下几点结论:

1. 理论计算表明:喷煤量一定的条件下应补偿的风温随煤粉入炉温度的升高而降低。喷煤量越大,喷吹煤粉的入炉温度 $t_{煤}$ 对于应补偿的风温 t 的影响也就越大。在煤粉喷吹量为 220kg/t 的条件下,若将喷入高炉的煤粉温度从 80℃ 提高到 320℃,可节省补偿风温为 26.2℃,相当于降低焦比 3.8kg/t;
2. 煤粉失重实验结果表明,预热的煤粉要比没有预热的失重快。且预热温度越高,失重率和失重速度也越大;
3. 从煤粉的流动性和喷流性来分析,升高温度至 200℃,有利于改善煤粉的流动性和喷流性。可以预测,在低于煤粉燃点条件下,煤粉预热不会对煤粉的输送产生过大的影响;
4. 煤粉的燃烧率主要由煤种决定。烟煤的燃烧率明显高于无烟煤,但热值低于无烟煤,而混合煤喷吹有利于煤粉燃烧和满足高炉热量的需求。采用直接加热和间接加热两种方法预热煤粉并喷吹,结果表明:煤粉燃烧率普遍呈上升趋势,一般煤粉燃烧率提高 10%~30% 不等。相比而言,采用预热 200℃ 时,提高煤粉燃烧率的效果较明显。

参考文献

1. 张寿荣, 毕学工. 关于大量喷煤高炉的某些理论问题的思考[J], 钢铁, 2004, 39(2), 8-13
2. 魏升明. 对炼铁技术发展方向的几点认识[J], 炼铁, 2006, 25(2), 55-58
3. A.Maki, A.Sakai, Noriyoshi Takagai. High rate coal injection of 218kg/t at Fukuyama No.4 blast furnace[J], ISIJ International, 1996, 36(6), 650-657
4. 徐万仁, 李荣壬, 钱晖. 宝钢高炉大量喷煤时煤粉在炉内的利用状况[J], 钢铁, 2000, 35(5), 5-9
5. 余琨. 高炉喷煤[M], 沈阳: 东北大学出版社, 1
6. 杨天钧, 刘应书, 杨珉. 高炉富氧喷煤——氧煤混合与燃烧[M], 北京: 科学出版社, 5
7. 杨天钧, 苍大强, 丁玉龙. 高炉富氧煤粉喷吹[M], 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1-2
8. 宋阳升. 高炉富氧喷煤技术的新进展[M], 冶金工业出版社, 1995: 1
9. 王国雄, 王铁, 沈峰满, 杨佳龙. 现代高炉粉煤喷吹[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002: 1
10. 金艳娟. 高炉喷煤技术[M], 北京: 冶金工业出版社, 2005: 1-2
11. A.Babich, S.Yaroshevskii, A.Formoso. Increase of Pulverized Coal Use Efficiency in Blast Furnace[J], ISIJ International, 1996, 36(10), 1250-1258
12. 周建刚. 国外高炉喷煤状况评述[J], 炼铁, 1997, 16(6): 28-31
13. 唐文泉(执笔). 国外高炉喷煤技术[J], 炼铁, 1993, 6: 45-50
14. 张群. 八钢高炉喷吹烟煤的爆炸性研究(D), 西安, 西安建筑工业大学, 2004
15. 我国高炉喷煤现状及供求趋势分析[DB/OL]. (http://www.sxcoal.com/cn/document/show.asp?typeid=631&f_id=9300&menu=market)
16. 汤清华, 马树涵. 高炉喷吹煤粉知识问答[M], 北京: 冶金工业出版社, 2004: 4-6
17. 张正好, 李小松. 高炉烟煤混合喷吹的试验研究[J], 梅山科技, 2005 炼铁增刊: 36-39
18. 李贵阳, 李新华, 李豪杰. 高炉喷吹煤性能研究及实践[J], 钢铁, 2005, 40(5), 9-13
19. 侯国宪, 胡宾生, 李伟轩. 高炉喷吹煤粉合理配煤的实验研究[J], 河北

- 理工学院学报, 2002, 24(3), 11-16
20. 温大威. 中国高炉喷煤史回顾[J], 宝钢技术, 2005, 1: 6-9
 21. 魏志江. 宣钢 8 号高炉喷煤浓相输送技术实践[J], 炼铁技术通讯, 2005, 11, 11-13
 22. 沈岩松, 朱蒙, 沈峰满. 高炉喷煤新技术——两段式喷吹工艺[J], 材料与冶金学报, 2002, 2(1): 124-127
 23. 沈峰满, 朱蒙, 沈岩松. 高炉两段式喷吹煤粉新工艺[J]. 钢铁, 2002, 37(10): 5-8
 24. 仇彬, 彭福荣. 一个喷吹系统供 3 座高炉喷煤的新工艺[J], 梅山科技, 2005 炼铁增刊: 25-27
 25. J.M.Burgess. Recent Advances in Blast Furnace Ironmaking Technology in Australia[J], ISIJ International, 1991, 31(5), 408-417
 26. 吴晓峰, 王瑞华, 陈玉明. 计算机网络技术在高炉自控系统中的应用[J], 山西建材增刊, 2000, 43-44
 27. P.S.Assis, Cláudio Batista Vieira, Pedro José Nolasco Sobrinho. New Developments for Powder Coal Injection into the Blast Furnaces[J], Process Metallurgy—Ironmaking, 2004, 4, 235-239
 28. T.Kiga, M.Sakai, S.Mochida. Characteristics of Pulverized Coal Combustion in High-Temperature Preheated Air[J], Journal of Propulsion and Powder, 2000, 16(4), 601-605
 29. K.Langner. 蒂森克虏伯公司高炉的喷煤操作[J], 鞍钢技术, 2006, 2, 41-43
 30. 高炉喷吹煤粉用旋流预热喷枪[DB/OL], (<http://www.patent-cn.com/C21B/CN2279363.shtml>)
 31. 吴铿, 魏欣, 张向国. 高炉喷煤交叉式双枪的基础研究[J], 北京科技大学学报, 2003, 25(6), 515-519
 32. 苏展. 高炉喷吹预热煤粉的研究(D), 沈阳: 东北大学, 2004
 33. 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M], 北京: 化学工业出版社, 2001, 281-284
 34. 徐旭常, 毛健雄, 曾瑞良, 陈昌和. 燃烧理论与燃烧设备[M], 北京: 机械工业出版社, 1990, 1-7, 214-219
 35. 韩昭沧. 燃料及燃烧[M], 北京: 冶金工业出版社, 1997: 4-11
 36. J.Zelkowsky. 煤的燃烧理论与技术[M], 上海: 华东化工学院出版社, 1990: 47-51
 37. K.Takeda, F.Clockwood. Integrated in a Blast Mathematical Model Furnace of Pulverised Coal Combustion in a blast furnace[J], ISIJ International, 1997, 5,

432-499

38. 杨福. 未燃煤粉对高炉炉渣性能的影响(D), 武汉: 武汉科技大学, 2005
39. 徐朝芬, 张鹏宇, 夏明, 孙学信. 实验条件对煤燃烧特性影响的分析[J], 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 73-78
40. 王蓉. 对煤粉燃烧与热解的试验研究(D), 杭州: 浙江大学, 2005
41. 陈彩霞, 孙学信, 吕焕尧. 煤粉快速热解规律的试验研究[J], 华中理工大学学报, 1994, 22(3): 36-41
42. 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉粉体特性中的应用[J], 中国粉体技术, 2000, 6(5), 33-36.
43. 煤炭安息角测定方法. 中华人民共和国国家标准.GB/T 18702-2002.
44. 奚新国, 张耀金. 粉体流动性能的测试研究[J], 盐城工学院学报(自然科学版), 2003, 16(1), 4-7
45. 马乃洋, 刘淑华, 薛立基. 煤粉输送性能[J], 华东冶金学院学报, 1997, 14(2), 85-88

致 谢

本文是在杜钢教授的悉心指导、严格要求和亲切关怀下完成的，在此向我的导师表达最由衷的敬意和最真诚的感谢。杜老师严谨的治学态度、渊博的学问知识、扎实的学术理论、不断探索新领域的开拓精神和刻苦钻研的求学精神激励着我发奋图强、不断进取。杜老师浸润着传统文化的儒雅气质、谦和自信的人格魅力、明哲敏锐的思辩才华、博采众长的学术作风、饱满充沛的工作激情、朴实无华的生活态度使我受益匪浅，懂得了许多人生道理。

衷心感谢魏国老师在课题的研究和论文的写作过程中给予了热情、无私的帮助和指导，使我的理论知识得到了长足的进步，科研能力逐步提高，受益良多。

感谢我的同窗挚友：苏展、韩大平、林国海、陈义雄、李光森、马铭、郭满平、侯洪宇，感谢他们对我的学习和生活给予的莫大帮助。

感谢父母给予了我生命和人世间最伟大无私的爱；感谢家人和亲友给我的支持、鼓励和帮助。

附录

表 A.1 Carr 流动性指数表

Table A.1 Index table of Carr flow ability

流动性	安息角		压缩性		抹刀角		均匀度		内聚力	
	度	得分	得分	度	得分	系数	得分	%	得分	
极好	25	25	5	25	25	25	1	25		
90~100	26~29	24	6~9	23	26~30	24	2~4	23		
	30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5		
好	31	22	11	22	32	22	6	22		
80~89	32~24	21	12~14	21	33~37	21	7	21		
	35	20	15	20	38	20	8	20		
中等	36	19.5	16	19.5	39	19.5	9	19		
70~79	37~39	18	17~19	18	40~44	18	10~11	18		
	40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5		
合格	41	17	21	17	46	17	13	17		
60~69	42~44	16	22~24	16	47~59	16	15~16	16		
	45	15	25	15	60	15	17	15	<6	15
差	46	14.5	26	14.5	61	14.5	18	14.5	6~9	14.5
40~59	47~54	12	27~30	12	62~74	12	19~21	12	10~29	12
	55	10	31	10	75	10	22	10	30	10
很差	56	9.5	32	9.5	76	9.5	23	9.5	31	9.5
20~39	57~64	7	33~36	7	77~89	7	24~26	7	32~54	7
	65	5	37	5	90	5	27	5	55	5
极差	66	4.5	38	4.5	91	4.5	28	4.5	56	4.5
0~19	67~89	2	39~45	2	92~99	2	29~35	2	57~79	2
	90	0	>45	0	>99	0	>36	0	>79	0