

# 首钢高炉喷吹粒煤的可行性研究

单洵华

(首钢技术中心)

**摘要** 与喷吹粉煤相比,喷吹粒煤具有磨煤设备投资少、出力高、磨煤费用低、粒煤制备与喷吹安全性提高等优点。

本文对首钢高炉喷吹粒煤的可行性进行了研究。

**关键词** 高炉 喷吹 粒煤

## 1 前言

目前世界上喷煤高炉绝大部分喷吹粉煤,只有英、法、美及墨西哥等国十几座高炉喷吹粒煤。与喷吹粉煤相比,喷吹粒煤具有磨煤设备投资少、出力高、磨煤费用低、粒煤制备与喷吹安全性提高等优点。本文主要对首钢高炉现用无烟煤粉与烟煤粒煤的燃烧性、爆炸性进行了测试与比较,对首钢条件下高炉喷吹粒煤所需富氧率及粒煤的输送参数进行了计算,对首钢高炉喷吹粒煤的可行性进行了分析。

## 2 燃烧性测试

### 2.1 试验用煤

测试采用大柳塔烟煤和晋华宫烟煤制备的粒煤。作为比较,无烟煤采用宁夏煤与京西煤各 50% 之混煤。成分见表 1。

### 2.2 试验条件

试验采用首钢技术中心的煤粉燃烧性热模拟装置。热风温度 950℃,燃烧炉温度 1150℃,喷煤量相当于高炉煤比 50~70kg/t。

### 2.3 试验结果

粒煤的燃烧试验结果见表 2。

煤粉燃烧率采用下式计算:

$$I = (A - A_0) / [A(1 - A_0)]$$

式中: I——燃烧率%,  $A_0$ ——原煤灰份%, A——残煤灰份%。

### 2.4 测试分析

2.4.1 比较粒煤与无烟煤粉的燃烧结果可知,粒煤燃烧率明显高于无烟煤粉。即使平均粒径最大( $d_p = 0.53\text{mm}$ )的粒煤,其燃烧率也明显高于平均粒径 0.043mm 的无烟煤粉。

无烟煤变质程度较深,其主要显微成分镜质组基本上是完全失去细胞结构的均一镜质体,结构较致密。其燃烧方式是由外向内层层推进的层状燃烧。由于高炉内供燃烧的氧化区间有限,煤粉流速过快(首钢高炉 200m/s 左右),不能完全燃烧,燃烧率受到限制。当风温、富氧条件不变时,无烟煤粉细磨,比表面积增大,可加速燃烧过程,是提高燃烧率的有效途径。

表 1 测试煤成分

|     | 工业分析  |       |       | 元素分析  |      |       |      | Std  | Mj/kg |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|
|     | FCd   | Vd    | Ad    | Cd    | Hd   | Od    | Nd   |      |       |
| 大柳塔 | 58.70 | 35.86 | 5.44  | 74.76 | 4.90 | 13.88 | 0.74 | 0.28 | 26.84 |
| 晋华宫 | 65.10 | 27.86 | 7.04  | 78.69 | 4.60 | 8.02  | 0.78 | 0.86 | 30.88 |
| 无烟煤 | 80.85 | 4.45  | 14.70 | 81.27 | 1.19 | 2.35  | 0.33 | 0.16 | 27.59 |

表 2 燃烧性能测试结果

| 试样号 | -200 目<br>% | 质量平均径<br>$d_p$ mm | 大柳塔粒煤    | 晋华宫粒煤    |
|-----|-------------|-------------------|----------|----------|
|     |             |                   | 燃烧率<br>% | 燃烧率<br>% |
| 1   | 5           | 0.53              | 28.05    | 18.74    |
| 2   | 10          | 0.48              | 43.09    | 37.50    |
| 3   | 15          | 0.43              | 45.70    | 32.52    |
| 4   | 20          | 0.39              | 37.69    | 37.73    |
| 5   | 25          | 0.34              | 54.91    | 52.21    |
| 6   | 30          | 0.30              | 58.25    | 41.69    |
| 7   | 40          | 0.19              | 60.65    | 49.15    |
| 8   | 60          | 0.08              | 85.31    | 62.24    |
| 9   | 80          | 0.06              | 79.14    | 63.40    |

无烟煤粉: -200 目 85%, 质量平均径 0.043mm, 燃烧率 11.49%。

烟煤含有较高挥发份,热解时挥发份析出,在其主要结构镜质组中形成气孔,因此烟煤燃烧以内孔燃烧为主,内孔与表面燃烧同时进行。由于煤受热后挥发份首先析出、燃烧。烟煤挥发份明显高于无烟煤,大量析出后可使煤的着火时间提前,其燃烧面积又大大高于无烟煤,因此在相同燃烧条件下其燃烧率明显高于无烟煤。

2.4.2 由表 2 可知,在燃烧条件基本相同时,两种粒煤均呈现燃烧率随煤的平均粒径变粗而下降的规律。这与烟煤燃烧所需时间基本上与其粒径平方成正比的规律吻合。

从提高喷煤燃烧率和喷煤量的角度看,高炉喷吹粒煤比无烟煤粉有利。

### 3 爆炸性测试

3.1 采用长管式煤粉爆炸性测定仪对不同粒度的大柳塔烟煤进行火焰返回长度测试,结果见表 3。同时对宁夏煤与京西煤各 50% 之混煤煤粉(-200 目 100%)测试,爆炸火焰返回长度为 0。

表 3 煤粉爆炸火焰返回长度(mm)

| 粒度 | -200 目 | 200~180 目 | 180~160 目 | 160~120 目 | 120~80 目 | 80~40 目 | +40 目 |
|----|--------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|-------|
|    | 大柳塔煤   | 820       | 450       | 220       | 190      | 50      | 25    |

3.2 结果显示,无烟煤粉没有爆炸性;烟煤随着粒度增大,爆炸性明显降低。可见,就烟煤而言,制备和喷吹粒煤爆炸的可能性明显降低,这就是高炉喷吹粒煤比粉煤更安全的原因。

尽管如此,就使用烟煤而言,在生产中制备和喷吹粒煤仍然需要具备与制备和喷吹粉煤同样的安全防护措施。因为:① 粒煤也是烟煤,制备的粒煤由各粒级组成,其中不可避免的存在-200 目的粉煤。如英钢斯肯索普厂制备的粒煤中-200 目的粉煤通常占到 10~30%。② 粒煤在输送过程中有明显的细化现象。法国洛尔丰特厂曾作试验,采用洛林长焰煤制备的粒煤 95% < 2mm,平均粒度 0.5mm,当输送至模拟风口内部时,<0.5mm 的煤占 90%,平均粒度约 0.1mm[文献 1]。华东冶金学院采用大屯烟煤做实验室试验同样证明粒煤在输送过程中存在细化现象[文献 2]。可见粒煤中存在-200 目的粉煤是喷吹粒煤需要安全防护措施的根本原因。

### 4 高炉喷吹粒煤所需富氧率分析

#### 4.1 喷吹粒煤需要提高热补偿

日本山口一良等利用装入铁矿石的冶炼实验装置进行了喷吹粗、细粒煤的燃烧试验。试验条件:喷吹浓度 0.15~0.20kg/m<sup>3</sup>,风温 1250℃,富氧率 2~3%,火焰温度 2150~2200℃。试验结果:

- ① 粗粒煤燃烧率低于细粒煤;
- ② 喷吹粗粒煤时煤气温度比细粒煤低 100~150℃,可能是粗粒煤升温、分解慢的原因;
- ③ 在喷枪前端超过 100mm 处发现粗粒煤分裂后的未燃煤及粗粒煤焦化和形成的焦炭颗粒;
- ④ 粗粒煤进入死焦堆后优先于焦炭消耗,未在该区域堆积。

该试验证明喷吹粒煤后煤气温度降低,需要提高热补偿[文献 3]。

#### 4.2 所需富氧率分析

目前国内没有大型高炉喷吹粒煤,现分析日本喷吹粒煤高炉生产数据并结合首钢条件进行估算。

表 4 列出了喷吹粒煤的日本室兰 2 号高炉生产数据[文献 3]。与之相比,目前首钢高炉平均风温 1080℃,比室兰高炉低 120℃;年均鼓风湿分 10g/m<sup>3</sup>,比室兰高炉低 20g/m<sup>3</sup>。按 100℃ 风温影响 t<sub>理</sub> 80℃,1g/m<sup>3</sup> 鼓风湿分影响 t<sub>理</sub> 6℃,1% 富氧率影响 t<sub>理</sub> 40℃ 折算[文献 4],120℃ 风温影响 t<sub>理</sub> 100℃,20g/m<sup>3</sup> 鼓风湿分影响 t<sub>理</sub> 120℃,其差值 20℃ 尚需 0.5% 的富氧率补偿。可以大致说,在首钢目前条件下年均喷吹粒煤 150kg/t,平均富氧率约需 2.0%。

表 4 日本室兰 2 号高炉生产数据

| 有效容积           | 粒煤比    | 煤粒径 | 风温   | 鼓风湿分             | 富氧率 | t <sub>理</sub> | 粒煤        |
|----------------|--------|-----|------|------------------|-----|----------------|-----------|
| m <sup>3</sup> | kg/t   | mm  | ℃    | g/m <sup>3</sup> | %   | ℃              | 置换比       |
| 1249           | 1994.6 | 150 | 0.35 | 1200             | 30  | 1.5            | 2100 0.85 |

#### 4.3 喷粒煤富氧后对生铁成本的影响

通过前面估算可知,喷吹 150kg/t 粒煤需富氧率 2%,而喷同量的粉煤需富氧率 1%。现以首钢 1 号高炉

为例计算。1号高炉正常生产日产5500t,风量 $5300\text{m}^3/\text{min}$ ;工业氧纯度99.5%, $0.55\text{元}/\text{m}^3$ ;鼓风 $0.025\text{元}/\text{m}^3$ 。粒煤比 $150\text{kg}/\text{t}$ 时耗氧: $5300 \times 60 \times 2 / (99.5 - 21) = 8100\text{m}^3/\text{h}$

比喷粉煤多耗氧: $8100/2 = 4050\text{m}^3/\text{h}$

吨铁多耗氧: $4050 \times 24 / 5500 = 17.7\text{m}^3/\text{t}$

生铁成本增加: $17.7 \times 0.55 - (17.7/0.21) \times 0.025 = 7.6\text{元}/\text{t}$

## 5 制备粒煤费用降低对生铁成本的影响

### 5.1 制粉加工

目前首钢无烟煤制粉加工费为 $61\text{元}/\text{t}$ 。国内烟煤制粉加工费约 $50\text{元}/\text{t}$ ,若制备粒煤,加工费可降低 $1/3$ 。在煤比 $150\text{kg}/\text{t}$ 时,与制备无烟煤比,生铁成本可降低: $[61 - (50 \times 2/3)] \times 0.15 = 4.2\text{元}/\text{t}$

与制备烟煤粉煤比,生铁成本可降低: $(50 \times 1/3) \times 0.15 = 2.5\text{元}/\text{t}$

### 5.2 粒煤干燥费用

为便于输送,通常将粉煤干燥至含水1%左右。一些文献认为由于无需也无法将粒煤干燥至含水1%以下,通常粒煤含水 $1.4 \sim 7.7\%$ (英钢斯肯索普厂数据)并不影响粒煤的输送与喷吹。这样可节省干燥气体,还有利于稳定风口前理论燃烧温度。西欧、北美、日本等先进高炉由于风温高( $1150 \sim 1270^\circ\text{C}$ )、富氧,风口前理论燃烧温度较高,往往要加湿鼓风,因此喷吹含水较高的粒煤对稳定理论燃烧温度有利。

对首钢而言,目前风温仅 $1050 \sim 1100^\circ\text{C}$ ,无富氧,喷吹 $130\text{kg}/\text{t}$ 煤粉后热补偿已显不足。如喷吹含水高的粒煤,风口前理论燃烧温度的下降将会影响顺行。

据英国钢铁公司资料介绍,在初始总水份含量相同时,干燥粉煤需能量 $400\text{MJ}/\text{t}$ 煤以上,干燥粒煤需 $300\text{MJ}/\text{t}$ 煤,假设每 $\text{t}$ 煤可节能 $150\text{MJ}$ 。以煤比 $160\text{kg}/\text{t}$ 计算,干燥粒煤可节能: $150\text{MJ} \times 0.16 = 24\text{MJ}/\text{t}$ 铁。

另据计算,在首钢条件下,当煤比 $160\text{kg}/\text{t}$ 时,粒煤含水每增加1个百分点,因置换比下降,焦比升高 $1.2\text{kg}/\text{t}$ 。如假设粒煤含水比粉煤高3个百分点计算,焦比将升高 $3.6\text{kg}/\text{t}$ ,焦炭热值为 $29\text{MJ}/\text{kg}$ , $3.6\text{kg}$ 焦炭能量为 $29 \times 3.6 = 104\text{MJ}/\text{t}$ 铁。

可见,粒煤含水比粉煤高可节省干燥费用并稳定理论燃烧温度的说法在首钢目前条件下是毫无意义的。

## 6 关于粒煤的输送与喷吹

### 6.1 粒煤输送

以新五制粉仓式泵向1号高炉输送粒煤进行计算。仓式泵气源压力 $\geq 0.5\text{MPa}$ (表压),每台仓式泵空气用量 $2000\text{Nm}^3/\text{h}$ 。输送管道总长 $1100\text{m}$ ,内径 $\Phi 124 \sim 152\text{mm}$ 。按文献[4]中P280公式:

煤的沉降速度 $V_{\text{沉}} = 2.72 \times d^{0.155} \times \mu^{0.294}$ ,煤的悬浮速度 $V_{\text{浮}} = 1.3V_{\text{沉}}$ 。

式中粒煤最大当量直径分别取: $d_1 = 2.0\text{mm}$ , $d_2 = 1.0\text{mm}$ , $d_3 = 0.5\text{mm}$ ;

输送浓度 $\mu$ 取 $20\text{kg}/\text{kg}$ 气。代入后得: $V_{\text{浮}1} = 9.5\text{m}/\text{s}$ , $V_{\text{浮}2} = 8.5\text{m}/\text{s}$ , $V_{\text{浮}3} = 7.7\text{m}/\text{s}$ 。

经分段计算压力损失后,得出管道中煤的最低流速为 $7.3\text{m}/\text{s}$ 。该值低于 $V_{\text{浮}1} \sim V_{\text{浮}3}$ ,说明目前的输煤设备和管道不能输送当量直径 $0.5\text{mm}$ 以上的粒煤。由五制粉至3、4号高炉的输煤管道比1号高炉短 $200 \sim 300\text{m}$ ,但计算结果相近,其中3号高炉输煤管道煤粉最低流速为 $7.8\text{m}/\text{s}$ ,4号高炉为 $8.0\text{m}/\text{s}$ ,均低于 $V_{\text{浮}3}$ 值,说明也不能输送粒煤。

1999年1~3月技术中心测定了当时首钢煤粉的粒度组成,其中+40目( $>0.45\text{mm}$ )为0%,+80目( $>0.18\text{mm}$ )为0.2%。可以认为煤粉最大当量直径为60目,即 $0.28\text{mm}$ 。以 $d = 0.28\text{mm}$ 计算,其 $V_{\text{浮}} = 7.0\text{m}/\text{s}$ ,可见首钢的输煤管道是按输送粉煤设计的,煤粉上限粒度不宜超过 $0.3\text{mm}$ 。

如欲实现输送粒煤,一个办法是降低输送浓度 $\mu$ ,这意味着要降低单位时间输煤量,使磨制粒煤提高制粉能力失去意义。另一个办法是购置功率更大的空压机以提高输送压力,这需要增加投资。

英钢斯肯索普厂的制粉车间与高炉喷吹站之间距离 $1000 \sim 1600\text{m}$ ,如果喷粉煤,无疑可采用先进的气力输

送,但由于喷吹粒煤而被迫采用了落后的汽车运输。首钢由于五制粉与高炉的距离已定,气力输送粒煤很困难。若不用气力输送,按煤比 150kg/t 计算,1、3、4 号高炉合计需煤粉约 100t/h,汽车运输根本不能考虑。

## 6.2 粒煤喷吹

以 1 号高炉为例,喷吹气源的表压为 0.6~0.7MPa,混合器出口表压 0.4~0.5MPa,喷吹支管内径 27mm,支管长度 85~120m。按文献[4]P286、P289 中公式计算,假设粒煤最大当量直径 1.0mm,计算结果喷吹支管起点压力(即混合器出口压力, $P_{起}$ )应 $\geq 0.92\text{MPa}$ (绝对压力)。目前首钢高炉用混合器压力降约为 0.2MPa,要喷吹最大粒径 1.0mm 的粒煤,喷吹气源表压应 $> 1.02\text{MPa}$ 。在提高气源压力的同时相应的高压容器需重新打压检验或设计制造。

理论计算表明,目前的设备条件不能喷吹粒煤。

2000 年后,首钢将改造四制粉,以中速磨取代球磨机,之后将逐步在 2、3 号高炉实现较先进的总管加分配器的喷吹形式并实现直接喷吹。如喷吹粒煤将不能采用总管加分配器,因为无先例;也不能实现直接喷吹,因为喷吹动力严重不足。

## 7 首钢高炉喷煤的发展方向

### 7.1 首钢高炉不适合喷吹粒煤

通过以上分析可知,对同一煤种烟煤而言,粉煤燃烧率高于粒煤,而烟煤粒煤的燃烧性明显高于无烟煤。虽然制备粒煤可降低成本,但由于喷吹粒煤需提高富氧量,导致成本增加量明显超过了制备粒煤的成本降低量。粒煤干燥节省的烟气价值也远远不能补偿因粒煤含水增加导致多耗的焦炭价值。因此首钢高炉喷吹粒煤在经济上是不合理的。由于在粒煤输送和喷吹上存在难点,首钢高炉喷吹粒煤在技术是不可行的。

目前世界上仍有英、法、美、墨等十几座高炉在喷吹粒煤并取得了较好的效果,说明这项技术仍有一定的生命力,因此不应盲目否定。但在决策前一定要结合我们的国情和厂情,进行科学论证,防止盲目照搬造成损失。

### 7.2 混合喷吹是发展方向

高炉单喷无烟煤置换比高,但由于燃烧性差使喷煤量受到限制,单喷烟煤其燃烧性好,但置换比低,二者均限制了高炉的以煤代焦量。实现二者的混合喷吹可以兼顾二者的燃烧性和置换比,明显提高喷煤量和以煤代焦量,同时也可兼顾了国内煤炭资源,而单喷粒煤达不到这样的效果。目前宝钢、鞍钢、包钢、宣钢等不少单位均实现了混煤喷吹并取得了良好效果。这也是首钢喷煤的发展方向。

### 7.3 制备混煤也可提高制粉能力

安钢炼铁厂近年作过工业试验,2 台出力 12t/h 的球磨机由磨 100% 无烟煤改为磨混煤(25% 无烟煤和 75% 烟煤),球磨机出力提高 39.13%,大约每配 10% 烟煤可提高出力 5%。如磨制烟煤和无烟煤各 50%,可提高出力 25%。目前首钢现有球磨机 11 台,按作业率 75% 计算实际出力 102t/h(见《首钢高炉喷吹煤粉总体规划》)。如磨制烟煤和无烟煤各 50%,制粉能力将达 127.5t/h,按全厂日产 21000t 计算,煤比可达 146kg/t。四制粉改造以 2 台 40t/h 的中速磨代替目前 5 台实际出力 8t/h 的球磨机,全厂制粉能力将提高至 132t/t,如磨制烟煤和无烟煤各 50%,出力将达到 165t/h,可保炼铁厂煤比 190kg/t。

首钢高炉喷吹混合煤粉经济上是合理的、技术上是可行的。由于煤场的限制,喷吹煤种过多有困难,但改变目前两种无烟煤混喷为一种烟煤与一种无烟煤混喷应该是可行的。由于要上必要的安全措施,应逐步进行。第一步在四制粉改造后,在 2、3 号高炉实现,第二步在五制粉和其它高炉实现。

注:参加测试工作的还有刘文运、苏毓、竺维春、刘文权等同志,特致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] D. Flamion, 洛尔丰特公司的高炉粒煤, 国外钢铁, 1991 No4
- [2] 薛立基等, 粒煤在高炉内燃烧行为的分析, 炼铁, 1993 No5
- [3] 山口一良等, 高炉中粗粒煤的燃烧及反应行为, 鞍钢技术, 1999 No3
- [4] 汤清华等, 高炉喷吹煤粉知识问答, 冶金工业出版社, 1997