

高炉燃料喷射

陈大受 秦民生 刘述临 編譯

中国工业出版社

76.2125
289

高 炉 燃 料 喷 射

陈大受 秦民生 刘述临 編譯



近年来，高炉燃料喷射（综合鼓风）在国外得到了很大的发展。向高炉中喷射各种燃料（天然气、重油、粉煤等），可以显著降低焦比，提高产量。因此，推广这项新技术是有着重要意义的。

本书编者根据国外大量有关高炉燃料喷射方面的资料，采用自编、翻译和节译等方式，介绍了国外在高炉燃料喷射方面的生产实践经验和理论研究成果。

本书可供炼铁工程技术人员及有关冶金院校的师生、学生参考。

高炉燃料喷射

陈大受 秦民生 刘述临 编译

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊编辑室编辑
(北京东直门内大街72号)

中国工业出版社出版(北京东直门内大街10号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $7\frac{3}{4}$ ·字数171,000
1963年12月北京第一版·1963年12月北京第一次印刷
印数0001—1,340·定价(10-6) 1.00元

*

统一书号：15165·2534 (冶金-431)

15165·2534

目 录

高炉燃料喷射简要评述——代序·····	编者 (1)
高炉冶炼中综合鼓风的应用·····	(苏)A.H.拉姆 (6)
高炉喷射——使用柴油	
和天然煤气喷射的经验·····	(法)J.A.考笛尔 (58)
高炉喷射气体燃料·····	秦民生編譯 (110)
高炉喷射液体燃料·····	刘述临編譯 (145)
高炉喷射固体燃料·····	刘述临編譯 (167)
喷射燃料对高炉接受风温	
及炉腹煤气成分的影响·····	陈大受 (179)
喷射物质中的氢在高炉中的作用·····	陈大受 (198)
高炉喷射燃料效果的计算·····	秦民生 (216)
高炉喷射燃料装置·····	刘述临 (232)

06715

高炉燃料喷射简要评述——代序

所谓高炉风口喷射（或综合鼓风），是泛指通过高炉风口向高炉炉缸送入一切大气以外的物质，因此也包括一般所谓的“富氧送风”及“蒸气送风”。但是，在苏联“综合鼓风”一般仅指喷射气体物质而言。

对于高炉来说，综合鼓风常可兼得多种好的效果。但由于鼓入物质不同，常有一个主要的效果。一般鼓入含氧物质如蒸气、氧及二氧化碳等，主要是提高冶炼强度；鼓入燃料如天然煤气、焦炉煤气、柴油、粉煤等，主要是降低焦比；鼓入熔剂如石灰石、石灰粉等，则可以改善生铁质量。由目前发展趋势来看，鼓入氧和燃料应用最广，而以喷射燃料以降低焦比的意义最为重要。本书则集中讨论了对我国最有实际意义的综合鼓风的一部份——燃料喷射，包括喷射气体的、液体的及固体的工业燃料。这一技术近10年来得到很大发展，有些国家已由工业试验阶段进入推广阶段。如1960年底苏联已有46座高炉（当时苏联约有117座高炉）鼓入天然气，其生铁产量约占全国产量的41.3%〔1〕。到1961年乌克兰97%的炼钢生铁是高炉用天然气冶炼的〔2〕。美国在1961年约有26座高炉（当时美国约有265座高炉）装有喷射燃料的设备〔3〕。

目前已试验的燃料喷射都取得了良好的效果。根据提高风温（或降低湿度）的程度不同，每取代高炉中1公斤焦炭约需要天然气0.7~1米³，焦炉气1.2~2米³，重柴油0.5~

1 公斤，无烟煤 1.0~1.2 公斤，烟煤 1.0~1.25 公斤。喷射燃料的总量可取代炉顶加入焦炭总重的 5~30%。更大的喷射量目前尚无试验。

燃料喷射目前所以被推广，主要因为它是继精料之后第二个能大幅度降低焦比的措施。而喷入燃料又能和提高风温互相促进。从这一措施本身分析，它不像精料、高压等措施需要设置或更换大量设备或主要是原料、设备等部门的工作。它是直接放在高炉上的措施，而且工艺性较强，故特别为高炉工作者感到兴趣。另外，从目前看来，有效的喷射或制氧设备的制造已经过关。

1836 年美国由炉顶装入 100% 的无烟煤代替木炭炼铁成功，五年之后得到大量推广。而另一些国家则试用低强度焦炭或半焦自炉顶装入。今天则进步到由风口直接喷入廉价的代用燃料。同样，由近几十年推广蒸汽鼓风来促进提高风温、冶炼强度和煤气中增氢。今天则进步到用氧和高碳氢燃料的综合鼓风去代替它。这的确标志着炼铁技术的一大飞跃，方向是对的。何况实践的结果又是如此地使高炉工作者充满信心。

燃料喷射不仅能改善高炉指标，而且对整个冶金工业来说还有下述意义：

(1) 扩大了高炉冶炼用的燃料品种，部分地代替了昂贵而又稀缺的焦炭。

(2) 节约了冶金厂总的投资——减少焦炉的数目。对苏美等石油与燃气已超过燃料组成一半以上的国家来说，由焦炉获得化工副产品已日益不感兴趣。

(3) 某些综合鼓风可以富化高炉煤气，使全厂燃气紧张有所缓和，有利于解决热力装置感到高温热量不足和热效

率下降的問題。

由冶煉原理分析，給高爐帶來好處的原因是：

- (1) 代替了焦炭中的碳提供熱量。
 - (2) 富化了爐內的還原氣體，改善間接還原。
 - (3) 由於對爐缸的冷化作用和使沿爐缸半徑上的溫度分布均勻，為高爐接受風溫提供了條件。
 - (4) 操作穩定，爐缸內的溫度均勻，生鐵質量提高。
- 目前存在的主要問題是受料柱透氣性的限制，料柱中的焦炭還不易減少到 20~25% 以上。

在理論和實踐中目前還有下列問題不夠清楚或看法不一致：

- (1) 燃料噴射時提高風溫的作用。
- (2) 噴射物質中的氫對高爐反應的作用。
- (3) 噴入不同燃料對增產的作用。
- (4) 改進生鐵質量特別是降低生鐵含硫量的机理。
- (5) 燃料噴入量的極限。

從推廣情況來看，由於各國的具體條件不同，故各國推行了不同的燃料噴射。

在蘇聯由於發現大量的天然氣和建成了天然氣管網，首先推廣天然氣鼓風。重油和粉煤只在一些固定的工廠中試點採用。而對於氧的同時噴入，有些工廠已準備了小時產量為 10,000 米³的制氧設備，並在進行 30,000 米³/時的設備的設計和試制。在新的標準高爐設計上都作了富氧 35% 和天然氣同時使用的考慮。

美國的冶金工業在過去一段時期擁有較大數量的制氧設備，首先在大型高爐上用氧生產。目前對探求代用燃料十分重視，認為這是降低鋼材成本的重要手段之一。在高爐生產

中使用了一部分天然气、焦炉气和重油。但目前最引起注意的还是粉煤，他们认为由国内资源看，煤比油的来源好解决。同时这也可挽救煤矿工业在近半世纪被石油工业逐步代替而一蹶不振的趋势。另外，煤的成本也是較低的。

西欧沒有天然气，但这地区的炼油能力在战后增加了四倍以上〔7〕，使用由亚洲和非洲进口的原油炼制。故西欧国家高炉的燃料喷射方向主要是利用柴油（特别是比重达0.95以上，进一步处理在经济上不合算的重油）。并强调以此作为使高炉接受风温的手段，因此喷入油量常只限于风温所能补偿的范围。在西欧的具体条件下，喷入柴油而不补偿风温，在经济上是不合算的。

在苏联和西欧还做了一些特殊的試驗，例如将粉煤、炉尘、石灰石粉悬浮在柴油中喷入〔4〕；二氧化碳和氧在保持固定煤气量的条件下喷入〔5〕；以压缩空气解决冶炼锰铁时的炉缸堆积〔6〕等等。

显然，燃料喷射在我国也将得到推广，特别是用非結焦煤代替焦炭，和在轉炉炼鋼的企业中利用焦炉煤气。估計在我国条件下，每吨生鉄喷入120公斤粉煤或120米³焦炉煤气，将使生鉄成本下降4~5元左右。从基建投資估計扣除燃料喷射设备投資后，焦炉投資还可下降10%左右。在一些出产天然气和大量出产目前尚不能更好利用的重油地区，它們也将是良好的高炉代用燃料。

本文集对燃料喷射問題作了普及性的初步介紹；收集了三种类型的文章。第一部分是国外对綜合鼓风及燃料喷射的理論分析；第二部分是国外有代表性試驗研究的綜合节譯；第三部分是我院炼鉄教研組部分同志对高炉燃料喷射的計算、見解、实验和分析。对于一些尚沒有得到結論的問題，

本书有意地介绍和保留了各种不同的观点和看法，以引起读者对这些问题的注意和进一步研究。本书内容，特别是第三部分，不妥之处，希望批评指正。

編 者

参 考 文 献

[1] Фундамент современной промышленности, Металлург, 1961, 10.

[2] По пути технического прогресса, Металлург, 1962, 7.

[3] Blast Furnace Practice of Tomorrow, Journal of Metal, 1962, 4.

[4] Tuyere Injection, Iron and Steel, 1962, 2.

[5] Steigerung der Leistung eines Versuchshochofens durch Zusätze von Sauerstoff und Kohlendioxyd zum Wind, Eisen und Stahl, 1931, Heftz.

[6] Выплавка Ферромарганца На Заводе "Запорожсталь" Металлург, 1961, 12.

[7] 石油工业的若干情况，人民日报，1962，8，23.

高炉冶炼中綜合鼓风的应用

(苏) A.H. 拉姆

在最近十年間，关于高炉冶炼中下列两个最重要問題的理論和实验研究方面的著作不断增多：

(1) 改变鼓风成分，其办法是将氧、水蒸汽、二氧化碳等气体加入鼓风中，或者把上述在空气中不含的各种气体的混合物加入鼓风中。

(2) 向高炉內吹入各种固体、液体和气体燃料。

这些問題在很早以前就提出了。例如，在卡尔斯登（19世紀上半期）的著名的指导书中已討論了采用水蒸汽問題〔1〕；亨利在1894年提出干燥鼓风問題〔2〕；貝塞麦在1876年建議使用富氧鼓风〔3〕；巴尔涅特在1838年建議吹入含有碳氢化合物气体和魚油；彭克斯在1840年建議吹入木炭、魚炭和无烟煤粉〔4〕。在法国某一高炉曾在1840~1845年間使用过将碎木炭吹入炉缸的設備。根据維金特的資料，美国在19世紀也实行过将石油吹入高炉的办法。而根据別尔特拉姆的資料，欧洲許多工厂也曾进行过吹入石油的試驗，但是效果总是不好的。別尔特拉姆还认为，兰斯提出的往高炉鼓风中送入含有27%CO和33% H_2 发生炉煤气的建議也是沒有发展前途的。基普斯略格支持将燃料吹入高炉炉缸的观点〔4〕。

在这方面应当提出的新的理論著作还有：布列洛赫的使

用氧和二氧化碳进行冷风炼铁的計算分析〔7〕；包特士关于应用氧、一氧化碳和二氧化碳混合气体进行高炉操作的观点〔8〕；萊依克和勃拉席尔特关于吹入天然煤气或液体燃料和富氧鼓风等冶炼过程的計算分析〔9〕。后一論文的作者們沒有叙述他們所制定的計算方法，而論文中列出的計算結果（例如，一吨生鉄应用 210 米³天然煤气和 200 米³氧时，焦比降低一半，产量提高一倍），則是不可靠的。M.A. 沙包瓦洛夫所采用的关于吹入焦炉煤气的計算方法也不能令人十分滿意〔10,11〕。

由此可見，关于高炉冶炼应用各种还原气体問題，还必须全面的而且尽可能精确的进行理論分析。

吹入还原性气体的鼓风，可以看作是高炉冶炼应用綜合鼓风中的个别情况。关于綜合鼓风这一术语，可以理解为大气鼓风与各种工业气体以及水蒸汽的混合气体。因此綜合鼓风中包括着富氧鼓风，加湿鼓风（蒸汽鼓风）、“二氧化碳”鼓风（空气或氧与二氧化碳或含有二氧化碳燃烧产物的混合物），以及空气或富氧鼓风与各种还原气体的混合物（天然煤气、焦炉煤气、发生炉煤气和高炉煤气等）。

本文将叙述綜合鼓风时計算高炉冶炼过程的通用方法，并且介紹几个在某些一定冶炼条件下，利用这种方法計算的結果。

（一）計算方法

綜合鼓风的成分

綜合鼓风一般是由下列成分組成：含 21% O₂ 和 79% N₂ 的空气；蒸汽（由空气带入的或外加的）；工业用氧一此后将认为它的成分是 96% 的 O₂ 和 4% 的 N₂；規定成分的还

原气体（或任何其他气体）。

在任何情况下，当用大气中空气作为综合鼓风的主要组成时，以下列方式来表示其余成分最为方便：

φ ——蒸汽量（空气带入的和加湿鼓风时加入的），米³/米³干空气；

D ——还原气体消耗量，米³/米³干风；

或者：

m ——还原气体消耗量，米³/公斤风口燃烧焦炭的碳素；

n ——工业氧的消耗量，米³/米³鼓入煤气。

加入普通鼓风中的各种气体，不论它先与鼓风混合然后送入高炉，还是单独的鼓入炉缸（燃烧带），对于总的分析此种气体对炉况和冶炼过程指标的影响是没有差别的。

还原气体的主要性能

焦炭的碳素与综合鼓风中各成分，在风口燃烧带进行着各种反应，在表 I—1 中用化学方程式表示出它们的最后结果。

焦炭中碳素与综合鼓风各成分的燃烧产物（与碳素在普通湿度鼓风中燃烧时的燃烧产物相同），是由 CO、H₂、N₂ 三种成分组成。

由表 I—1 所列燃烧热效应来看，甲烷和其他碳氢化合物中一公斤碳素燃烧成 CO 时所放出的热量，比焦炭中碳素燃烧时少得很多。这是因为分解碳氢化合物用去了大量热的缘故。

我们用 H₂O、O₂、CO₂、CO、N₂、H₂、CH₄、C₂H₆、C₃H₈、C₄H₁₀、C₆H₁₂ 代表所吹入气体中各成分的含量

焦炭中碳与综合鼓风各成分的反应

表 I—1

反 应	热 效 应 (仟卡)		
	一 公 斤 克 分 子	一 米 ³ 气 体	一 公 斤 碳 素
$C_{\text{固}} + 0.5 O_2 = CO$	+28080	—	+2340
$C_{\text{固}} + H_2O = CO + H_2$	-29730	—	-2480
$C_{\text{固}} + CO_2 = 2CO$	-39600	—	-3300
$CH_4 + 0.5 O_2 = CO + 2H_2$	+8870	+396	+740
$C_2H_6 + O_2 = 2CO + 3H_2$	+32380	+1445	+1350
$C_3H_8 + 1.5 O_2 = 3CO + 4H_2$	+54120	+2416	+1500
$C_4H_{10} + 2O_2 = 4CO + 5H_2$	+73820	+3295	+1540
$C_5H_{12} + 2.5O_2 = 5CO + 6H_2$	+96800	+4312	+1610

(米³/米³)。

按照气体分析来计算其下列性能:

①碳氢化合物中碳素燃烧成 CO 时所消耗鼓风中的氧
(米³O₂/米³气体)

$$\omega = 0.5CH_4 + C_2H_6 + 1.5C_3H_8 + 2C_4H_{10} + 2.5C_5H_{12} - 0.5H_2O - 0.5CO_2 - O_2 \quad (1)$$

②气体燃烧时所产生一氧化碳的数量(米³CO/米³气体)

$$V'_{CO} = CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} \quad (2)$$

③气体燃烧时所产生的氢的数量,其中包括由鼓风中水分生成的氢在内(米³H₂/米³气体)

$$V'_{H_2} = H_2O + H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + 6C \frac{\varphi}{0.21 + 0.5\varphi} \cdot \omega \quad (3)$$

④气体燃烧产物中的含氮量,其中包括鼓风中的氮(米³N₂/米³气体)

$$V'_{N_2} = N_2 + \frac{0.79}{0.21 + 0.5\varphi} \cdot \omega \quad (4)$$

⑤吹入气体燃烧后的燃烧产物总量 (米³/米³气体)

$$\begin{aligned} V' = V'_{CO} + V'_{H_2} + V'_{N_2} = CO_2 + CO + N_2 + H_2O + H_2 + \\ + 3CH_4 + 5C_2H_6 + 7C_3H_8 + 9C_4H_{10} + 11C_5H_{12} + \\ + \frac{0.79 + \varphi}{0.21 + 0.5\varphi} \cdot \omega \end{aligned} \quad (5)$$

⑥吹入气体在风口前燃烧时放出的热量 (仟卡/米³气体)

$$\begin{aligned} q = 396CH_4 + 1445C_2H_6 + 2416C_3H_8 + 3295C_4H_{10} + \\ + 4312C_5H_{12} - 3022CO_2 - 2580H_2O \end{aligned} \quad (6)$$

众所周知,由丙烷C₃H₈开始,碳氢化物只在它热分解的温度下,才能与氧开始发生显著的反应。反应的结果得到含烟的火焰,并有部分热分解出来的碳素在一定的条件下仍能保持着未燃烧状态。往炉缸内吹入含有大量重碳氢化合物的气体时,这一现象不但使炉缸内产生的热量减少,还会使碳素微粒混入渣中而造成冶炼上的困难。因此适当地将加入的气体与鼓风混合起来,具有很重要意义。在下面的讨论中我们假定,在遵守这一条件以及高风温和富氧的情况下,将能保证所有碳氢化合物的碳素完全变成气体。

向高炉炉缸吹入还原性气体,毫无疑问地要对焦炭在风口处燃烧条件以及风口燃烧带的大小发生很大影响。而这一因素的意义只有用试验方法才能确定。

在风口处燃烧一公斤焦炭中碳素所消耗的鼓风量

由于可燃气体的消耗量可用 D (米³/米³干燥鼓风) 来表示,也可用 m (米³/公斤在风口处燃烧的焦炭中碳素) 来

表示，因而可用下列二式之一来计算在风口处燃烧 1 公斤焦炭中碳素所消耗的鼓风量：

$$V_{\pi} = \frac{0.9333}{0.21 + 0.5\varphi + 0.96nD - \omega D} \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (7)$$

或

$$V_{\pi} = \frac{0.9333 + m\omega - 0.96mn}{0.21 + 0.5\varphi} \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (7a)$$

式中 $0.9333 = \frac{22.4}{2 \times 12}$ —— 1 公斤碳素燃烧成 CO 所用的氧量，米³。

在风口处燃烧 1 公斤焦炭碳素所消耗的湿风为

$$V'_{\pi} = V_{\pi}(1 + \varphi) \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (8)$$

富氧鼓风的消耗量为（湿风加工业用氧）

$$V''_{\pi} = V_{\pi}(1 + \varphi + nD) \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (9)$$

$$\text{或 } V''_{\pi} = V_{\pi}(1 + \varphi) + mn \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (9a)$$

综合鼓风消耗量

$$V'''_{\pi} = V_{\pi}(1 + \varphi + D + nD) \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (10)$$

$$\text{或 } V'''_{\pi} = V_{\pi}(1 + \varphi) + m(1 + n) \text{米}^3/\text{公斤 } C. \quad (10a)$$

使 (7) 与 (7a) 等式的两端相等，则可确定出如下的 m 与 D 关系式：

$$m = \frac{0.9333}{\frac{0.21 + 0.5\varphi}{D} + 0.96n - \omega} \quad (11)$$

$$D = \frac{0.21 + 0.5\varphi}{\frac{0.9333}{m} + \omega - 0.96n} \quad (11a)$$

由 (7) 及 (7a) 式看出，在吹入还原性气体时，如果所消耗的工业氧量 $n < \omega/0.96$ ，则在风口处燃烧 1 公斤焦

炭中碳素所消耗的鼓风量是增多的。

当 $n > \omega/0.96$ 时, 则鼓风消耗量是减少的, 而当

$$n = \frac{0.9722}{m} + \frac{\omega}{0.96} \text{ 米}^3/\text{米}^3 \text{ 气体} \quad (12)$$

时, 由 (7 a) 式得出, 在规定的 m 值下, 鼓风消耗量等于零; 或者在预先规定出 1 米³ 气体所消耗的工业氧量 (n), 而煤气消耗量为

$$m = \frac{0.9333}{0.96n - \omega} \text{ 米}^3/\text{公斤 } C. \quad (13)$$

鼓风消耗亦等于零。

在这样大量的工业用氧消耗量下, 综合鼓风只由还原性气体和纯氧 (工业用氧) 组成。

在风口处燃烧一公斤焦炭中碳素产生的炉缸煤气量

如果还原性气体消耗量为 D 米³/米³ 干风, 则在风口处燃烧一公斤焦炭中碳素产生出的煤气量 (米³) 如下:

$$V_{CO} = [2 \times (0.21 + 0.5\varphi + 0.96nD - \omega D) + V'_{CO}D]V_A \quad (14)$$

$$V_{H_2} = [\varphi + V'_{H_2}D]V_A \quad (15)$$

$$V_{N_2} = [0.79 + 0.04nD + V'_{N_2}D]V_A \quad (16)$$

$$V_r = [1.21 + 2\varphi + (V' - 2\omega + 1.96n)D]V_A \quad (17)$$

如果还原性气体消耗量为 m 米³/公斤 $C.$, 则 1 公斤焦炭碳素产生的煤气量如下:

$$V_{CO} = 1.8667 + mV'_{CO} \quad (14 a)$$

$$V_{H_2} = \frac{0.9333 - 0.96mn}{0.21 + 0.5\varphi} \cdot \varphi + mV'_{H_2} \quad (15 a)$$

$$V_{N_2} = \frac{0.9333 - 0.96mn}{0.21 + 0.5\varphi} \cdot 0.79 + mV'_{N_2} + 0.04mn \quad (16 a)$$

$$V_r = 0.9333 \frac{1.21 + 2\varphi}{0.21 + 0.5\varphi} + m \left(V' - n \frac{0.75 + 0.94\varphi}{0.21 + 0.5\varphi} \right) \quad (17 a)$$

(17a)式中的第一项是用普通湿鼓风时的煤气量(V_{r0})。当吹入还原性气体而不用富氧鼓风时($n=0$)，煤气量迅速地增加，而且煤气量的增加与在风口处燃烧1公斤焦炭碳素所消耗的还原性气体量成正比。在富氧鼓风时，煤气量是减少的。

在风口处产生的各种气体的百分组成为：

$$\begin{aligned} \text{CO}\% &= \frac{V_{\text{CO}}}{V_r} \times 100\% ; \quad \text{H}_2\% = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_r} \times 100\% ; \\ \text{N}_2\% &= \frac{V_{\text{N}_2}}{V_r} \times 100\% ; \end{aligned} \quad (18)$$

理論燃燒溫度

綜合鼓风时的理論燃燒溫度可用下式算出：

$$T = \frac{2340 + Q + J_a + i_c}{C_o V_r} \quad (^\circ\text{C}) \quad (19)$$

式中 2340——焦炭碳素燃燒成一氧化碳时热量，仟卡/公斤C；

Q ——綜合鼓风中各成分經過在燃燒带的各种变化后所产生的总热效应（碳氢化合物的燃燒热減去 H_2O 和 CO_2 的分解热），仟卡/公斤在风口处燃燒的焦炭碳素；

J_a ——热风中的热量，仟卡/公斤 C_o ；

i_c ——进入燃燒带內焦炭碳素的物理热，仟卡/公斤 C_o 。

随着表示吹入空气消耗量的方法不同，分別得出

$$Q = V_a(D_9 - 2580\varphi) \text{ 仟卡/公斤 } C_o \quad (20)$$

$$Q = m_9 - 2580\varphi V_a \text{ 仟卡/公斤 } C_o \quad (20a)$$