

发掘 CO₂ 和大气污染物减排技术潜力 ——熔态还原炼铁—汽油合成/联合循环发电集成系统 Discussion on the Strategy of Reduction of Greenhouse ——Integrated Process of Manufacture of Iron, Gasoline and Electricity

郭占成 谢裕生 许志宏

(中科院化工冶金研究所 北京 100080)

1996年,国务院新闻办公室发表的《中国的环境保护》中指出,要在工业污染防治的指导思想上确立3个转变:在污染防治基本战略上,从侧重污染的末端治理逐步转变为工业生产全过程控制;在污染排放控制上,由重浓度控制转变为浓度与总量相结合;在污染治理方式上,由重分散的点源治理转变为集中控制与分散治理相结合。1998年,联合国环境署发表东京宣言,要求工业发达国家到2010年CO₂减排6%。我国是世界煤炭能源消耗的主要国家之一,国际上要求我国减少大气污染物和温室气体排放的呼声越来越强烈。我国的电力工业和钢铁工业是煤炭能源的主要消耗大户,电力工业和钢铁工业降低能耗、减少大气污染物和CO₂排放对全国节能降污有举足轻重作用。

钢铁工业节能与大气污染物 排放控制的重点^[1,2,3]

目前,我国钢铁工业能源消耗量约为13 000万吨标煤,约占全国能源消耗总量的9.5%、工业能源消耗总量的13%,其中大中型钢铁企业吨钢综合能耗为1.13吨标煤,吨钢可比能耗为0.96吨标准煤,吨钢可比能耗比发达国家吨钢净能耗0.59~0.68吨标煤的水平高出大约41%~63%。

引起钢铁工业高能耗问题的原因是多方面的,其中,冗长的生产过程和频繁地加热和冷却物料引起的能量贬值和损失,是钢铁工业能耗高的一个重要原因。即使在技术比较先进的日本,其钢铁联合企业中废热排放损失也约占总能耗的38.5%。对我国钢铁工业余热的分析表明,过程中各种产物的物理余热占总能耗的29%~39%,其中,炼焦废气显热、焦炭显热、烧结矿显热、烧结烟气显热、高炉煤气显热等占有很大比例。这些余热能质较低,一般不能得到充分利用。技术经济分析确定的可以回收

利用的余热资源大约仅占总能耗的10%,炼铁系统又占其中的46%。可见,流程冗长引起的能量损失是非常大的。

我国大中型钢铁企业能源消耗构成中,包括烧结、焦化的炼铁系统消耗的能量占整个钢铁生产消耗能量的58%;而在炼铁系统的烧结和焦化占整个炼铁系统投入能量的25.6%,由于这部分能量在提高原料的物理化学性能后,焦炭和烧结矿又恢复成冷态且热量没有得到有效回收或利用,使得投入过程的大约1/4的能量在炼铁系统中损失掉了,这样,高炉能量利用效率高的优点也就被烧结和焦化部分地抵消了。因此,如果能够缩短生产流程,减少反复冷却和加热物料过程中的能量损失,必将对降低钢铁工业的能耗起到显著作用。

值得注意的是,根据文献统计资料,对20世纪90年代全国工业同钢铁工业万元产值能耗对照,可以发现,钢铁工业万元产值能耗一直高于全国工业平均水平,而且这一差距有逐步拉大的趋势。例如,钢铁工业万元产值能耗与全国工业平均水平的比值由1991年的2.87增加到1996年的4.85。

对90年代全国工业同钢铁工业万元产值主要污染物排放量对照,可以发现,钢铁工业万元产值各种大气污染物的排放量明显高于全国工业平均水平,并且这一差距也呈逐步拉大趋势。例如,钢铁工业万元产值SO₂、烟尘、粉尘的排放量与全国平均水平的比值由1991年的1.41、1.31、3.69,分别增加到1996年的2.79、2.31、7.52。

在钢铁企业内部,炼铁系统(焦化—烧结—高炉)所排放的SO₂和TPS(总悬浮颗粒物)分别占整个钢铁工业的73.7%和68.3%。炼铁系统内的烧结和焦化部分是主要污染源,SO₂和TPS排放量分别占炼铁系统内的67.7%和45.6%。

以上分析表明,钢铁工业既是高耗能产业,又是严重污染环境的产物;而在钢铁企业内部,炼铁

系统的焦化和烧结是造成能耗高污染严重的主要环节。因此,革新炼铁工艺是煤铁节能和控制污染的根本途径。

钢铁、电力工业改造与煤炭能源 转化工业的结合

目前,越来越迫切地需要利用新工艺改造电力工业和钢铁工业,以减轻它们对环境的污染。

据预测,2010年我国汽油需求量将分别达到6 024万吨标煤^[4],而当前我国汽油市场上的产品在质量和结构上都存在严重缺陷,无铅汽油所占比例小,低辛烷值70号汽油所占比例大。为减少汽车尾气的污染,我国要淘汰70号以下汽油,生产90号以上汽油,且无铅汽油比例要求达到40%以上。但是我国石油资源少、储采比下降、开采条件日益恶化,石油的供需关系日趋紧张,原油储量和产量的增长将明显低于需求量的增长^[5]。从1993年开始,我国由石油出口国变为进口国,预计2010年进口量将达8 000万吨^[6]。因此,从丰富的原料煤合成汽油是很有必要的;而且,在我国无油或严重贫油但富煤的省份适度发展合成燃料工业亦是可行的。

我国供电平均标准煤耗约为410g/KWh^[7],比先进国家几乎高出100g/KWh,按供电平均能耗计算的我国平均发电热效率仅30%,大大低于国外先进的带烟气脱硫的发电热效率37%;而我国大部分电厂尚未引入烟气脱硫技术^[8,9]。按国家规划,为了控制污染,在二氧化硫污染和酸雨控制区,燃用硫分大于2%和1%~2%的煤炭的火电厂应分别在2005年和2010年之前安装烟气的脱硫设施,2000年后,禁止城市市区民用炉灶直接燃用原煤。因此,发展洁净高效的发电技术已成为今后电力工业的重大课题。

熔态还原技术是针对炼铁中存在的焦炭资源短缺、环境污染严重及降低投资费用等问题而开发的一项新工艺。但由于生产中产生大量高热值尾气所造成的系统能量过剩,已成为制约这种工艺发展的一个重要因素,因此,对降低能耗具有重要意义。因此,对降低能耗具有重要意义的尾气利用问题就显得非常突出。

在煤间接液化技术中,采用FT合成(Fischer-Tropsch synthesis)时,煤气化部分的投资和操作费用分别占总投资和总操作费用的53%和44%;采用MTG工艺(methanol to gasoline)时,煤气化部分的投资占总投资的55%左右,操作费用则因产品结构而不同,大约介于总操作费用的45%~51%之间^[10,11,12]。在煤气化联合循环发电(IGCC)工艺中,煤气化部分的投资占总投资的42%~47%^[13]。可见,经济地制取原料气是影响合成汽油与联合循环发电应用、推广的重要因素。

为解决阻碍以上几种新技术推广应用的问题,本文提出了由熔态还原炼铁、发电、汽油合成等模块组成的熔态还原炼铁—汽油合成—发电集成系统^[11,14],将熔态还原炼铁产生的低硫煤气在净化后,用来发电或经改质后用来合成汽油。这样,既可以解决熔态还原炼铁尾气的合理利用问题,又可以解决汽油合成或联合循环发电的原料气供应问题,还可以解决炼铁、合成汽油以及发电等单独生产过程中的气体脱硫问题。系统生产的电力在满足系统内部需要的前提下,还可外供民用代替燃煤,以减少民用燃煤引起的室内污染和高强度地面污染。

熔态还原炼铁—汽油 合成/联合循环发电系统集成

1. 节能效应

熔态还原炼铁—汽油合成—发电系统集成包括4个子系统:熔态还原炼铁、煤气初步净化、汽油合成及发电。系统的工艺技术构成见文献[1,14]。熔态还原炼铁子系统不仅生产生铁,而且产生大量富含H₂和CO的煤气,煤气经除尘脱硫净化后全部或部分供给汽油合成子系统,汽油合成子系统在产出油品的同时,也产生相当数量的富含H₂和CO的尾气,这部分尾气与熔态还原炼铁子系统分流过来的煤气一起供给发电子系统,发电子系统产生的部分电力供系统消耗,大部分输出入网。考虑到经济规模性问题,当有合成汽油时,需采用蒸汽轮机发电;当没有合成汽油时,采用联合循环发电。

系统模拟主要参数取自工业化的COREX法熔态还原炼铁生产、中科院山西煤炭化学所的MFT煤制汽油工业试验、IGCC联合循环发电工业试验。

以我国储量较大的典型铁矿石(63.35% TFe, 13.69% FeO, 0.03% P, 0.06% S, 0.03% MnO, 9.99% SiO₂, 0.31% Al₂O₃, 0.16% CaO, 0.54% MgO)和典型煤种(工业分析为5.76% H₂O, 10.22% Ash, 27.05% Vol, 0.71% S, 元素分析为80.57% C, 4.60% H, 0.87% N, 13.39% O)为主要原料,计算机系统模拟结果如下。

以集成系统生产1 000万吨铁为基准,消耗780万吨标煤,产出产品:生铁1 000万吨,汽油87.3万吨,电力20.5亿KWh;能量利用效率:熔融还原炼铁子系统82.74%,汽油合成子系统55.50%,联合循环发电子系统42.36%,全系统能量利用率60.83%。而若采用传统技术独立生产,产生相同数量的铁、电、油,则煤耗为:765万吨(高炉流程)+436万吨(山西晋城MFT法煤间接液化工业试验指标:1吨油综合能耗5吨标准煤^[15])+84万吨(蒸汽轮机发电)=1 285万吨标煤;能量利用效率为:高炉炼铁系统64.8%,汽油合成系统32%,发电系统

30%，全系统能量利用率 51.4%；扣除高炉炼铁流程每吨铁副产约 3.6GJ 的其它形式能量输出(煤气、焦油、笨)^[16]，按热值折合成标准煤约 120 公斤，实际消耗能量约 1 165 万吨标煤。

如果集成系统仅由熔态还原炼铁和联合循环发电构成，以生产 1 000 万吨铁为基准，消耗 780 万吨标煤，则产出产品：生铁 1 000 万吨，电力 145.7 亿 KWh；能量利用效率：熔融还原炼铁子系统 82.74%，联合循环发电子系统 49.07%，全系统能量利用率 62.58%。而若采用传统技术独立生产，产生相同数量的铁、电，则煤耗为：765 万吨(高炉流程) + 597 万吨(蒸汽轮机发电) = 1 362 万吨标煤；能量利用效率：高炉炼铁系统 64.8%，发电系统 30.0%，全系统能量利用率 49.5%；扣除高炉炼铁流程副产其它形式能量输出，实际消耗能量约 1 242 万吨标煤。

表 1 集成系统与独立系统在等量产品时
能量利用率和污染物排放的比较

系统1: 铁—油—电 铁: 1 000万吨 油: 87.3万吨 电: 20.5亿度 系统2: 铁—电 铁: 1 000万吨 电: 145.7亿度	能耗与能量利用率				污染排放					
	铁—油—电		铁—电		铁—油—电			铁—电		
	能耗 (万吨 标煤)	能效 (%)	能耗 (万吨 标煤)	能效 (%)	SO ₂ 排放 (万吨)	粉尘 排放 (万吨)	CO ₂ 排放 (万吨)	SO ₂ 排放 (万吨)	粉尘 排放 (万吨)	CO ₂ 排放 (万吨)
	1 165	51.4	1 242	49.5	9.78	9.12	3 344	22.82	19.41	3 867
独立系统 (传统技术)										
集成系统 (新技术)	780	60.8	780	62.6	0.04	0.11	2 100	0.04	0.11	2 336

2. 环境效应

熔融还原产生的煤气硫含量很低，煤气经预还原炉后尾气硫含量仅有几十 PPM 氮氧化物含量与高炉流程相比几乎可以忽略不计，加之汽油合成或联合循环发电之前对煤气进一步深脱硫和精除尘，实际废气中排放的 SO₂和粉尘几乎可以忽略不计。由于集成系统能量效率的提高，温室气体 CO₂排放量大大降低。假若全国的 1亿吨铁有 50% 采用熔融还原炼铁—汽油合成—尾气蒸汽发电集成系统生产，则 SO₂排放可减少 49万吨、粉尘排放可减少 45万吨，占全国 SO₂和粉尘排放总量的各约 1/40，SO₂和粉尘排放的减少相应地可挽回因酸雨和粉尘造成的国民经济损失的 1/40；CO₂排放可减少 6 220万吨，相当于少烧 1 925万吨标准煤，全国 CO₂排放总量可减少约 2%。

如果全国的 1亿吨铁有 50% 采用熔融还原炼铁—联合循环发电集成系统生产，则 SO₂排放可减少 114万吨、粉尘排放可减少 96.5万吨，占全国 SO₂和粉尘排放总量的各约 1/20，SO₂和粉尘排放的减少相应地可挽回因酸雨和粉尘造成的国民经济损失的 1/20，CO₂排放可减少 7 555万吨，相当于少

烧 2 335万吨标煤，全国 CO₂排放总量可减少约 2.4%。

3. 工业化前景分析

集成系统能否产业化，主要取决于 3个因素：一是技术可靠性，二是经济规模性，三是产品市场需求性。

技术可靠性 熔融还原炼铁、煤炭间接液化、联合循环发电虽然是新技术，但都取得了工业化的技术突破，其技术可靠性不大可能成为集成系统产业化的限制性环节。

经济规模性 集成系统的经济规模性主要取决于联合循环发电或汽油合成的经济规模。对于独立的系统，一般认为联合循环发电的最小经济规模为 500MW功率，煤基汽油合成最小经济规模为 10 万吨油品/年。以此为最小经济规模要求，则对于熔融还原炼铁—汽油合成—尾气蒸汽发电集成系统，要求熔融还原炼铁最小规模为 110万吨铁/年；对于熔融还原炼铁—联合循环发电集成系统，要求熔融还原炼铁最小规模为 300万吨铁/年。实际上，由于熔融还原炼铁为汽油合成或联合循环发电提供了气源，以及未来技术的不断进步，其经济规模要求可大大降低。

市场需求性 在可预见的时期内，油产品属短缺商品，不会成为市场限制性因素；在中短期内，电产品仍有较大潜力；铁产品目前市场已经饱和，要实现集成系统的产业化，必须关停地方小高炉炼铁，这和国家钢铁冶金政策是相符的。

结论与展望

采用熔融还原炼铁—汽油合成—蒸汽发电集成系统和熔融还原炼铁—联合循环发电集成系统，可比传统工艺的煤炭能源利用率分别提高 10% 和 13%，对于控制 SO_x、NO_x、粉尘及温室气体 CO₂排放具有重要意义。集成系统是推广应用熔融还原炼铁、联合循环发电、煤基汽油合成新技术，降低投资和生产费用的有效途径。熔融还原炼铁、联合循环发电、煤基汽油合成新技术日渐成熟，随着对节能和环境要求的不断提高，这种集成系统已逐步具备了工业化的条件。

参 考 文 献

[1] 张夏. 熔融还原炼铁—汽油合成—发电系统集成与模拟: [学位论文]. 北京: 中国科学院化工冶金研究所, 1999

[2] 张夏, 郭占成. 我国钢铁工业能耗与大气污染物排放量. 钢铁, 2000, 35(1) 63-68

[3] 张春霞, 齐渊洪, 刘广林. 钢铁制造流程中的环境污染负荷影响的分析评价. 北京科技大学学报, 2000, 22(增刊): XX—YY

[4] 国家计划委员会, 中国科学院能源研究所, 清华大学技术经济和能源系统分析所. 中国能源开发项目中

- 的环境问题. 北京: 中国建材工业出版社, 1993
- [5] 曹新元, 陈小宁, 彭利生. 21 世纪初期中国矿产资源形势分析. 中国地质矿产研究院编. 走向 21 世纪的地学与矿产资源. 北京: 地质出版社, 1996: 1-7
- [6] 钟炳. 万吨级煤基合成液体燃料技术软件包的研究开发. 中国科学院应用研究与发展局. 中国科学院研究与发展重大项目可行性研究报告. 1996
- [7] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1998
- [8] 李师仑. 关于我国煤炭转化研究的几点看法. 煤炭转化, 1992, 15(2): 1-7
- [9] 于涌年. 煤气化联合循环效率分析及评价. 煤炭转化, 1993, 16(2): 17-22
- [10] Hunt V D. Synfuels Handbook. New York: Industrial Press Inc.
- [11] Meyers R A. Handbook of Synfuels Technology. New

- York: McGRAW-HILL Book Company
- [12] 铃木隆史. 合成ガスがろの炭化水素燃料油制造の問題点. 燃料协会志, 1987, 66(6): 399-409
- [13] 焦树建. 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC). 北京: 中国电力出版社, 1996
- [14] 张夏, 郭占成, 许志宏. 熔融还原炼铁—汽油合成—发电系统集成与模拟. 化工冶金, 2000, 21(2): 164-170
- [15] 周敬来, 张碧江. MFT 法煤制合成汽油. 煤炭综合利用, 1994, (1): 1-6
- [16] Yi Ruiyu, Cai Jiuju. Steel Production Process and Emission in Atmosphere. International Symposium on Global Environment and Iron and Steel Industry (ISES'98) Proceedings. Beijing: China Science and Technology Press, 1998: 15-21 (责任编辑 王宏章)

科技动态

空间尘埃比空间碎片对卫星的威胁更大

据英《新科学家》2000 年 11 月 11 日报道: 一组英国科学家在分析了哈勃空间望远镜太阳能电池板的损坏情况后说, 空间细小的尘埃粒子比大块的空间碎片给卫星造成的危险更大。大多数空间碎片甚至只有几厘米大的, 均受到美国空军的跟踪监视, 并通过地面控制改变飞行轨道, 使受威胁的卫星或飞船避免被空间碎片撞击。但只有几微米大的空间尘埃则很难跟踪, 因此它们对卫星或飞船的撞击很难避免。

在得克萨斯加尔维斯顿举行的超高速撞击专题讨论会上, 牛津布鲁克斯大学和奥彭大学的科学家说, 只有几微米大的空间粒子对卫星的威胁是非常严重的。天然的空间粒子比人为抛弃在空间的碎片即所谓空间垃圾的运行速度要快 7 倍, 因此当它们和卫星或飞船撞击时, 尘埃粒子会蒸发产生炽热的等离子体, 这些等离子体可以感应出电流, 从而严重地干扰卫星或飞船上的电子系统, 甚至导致电子系统瘫痪。

认定空间尘埃对飞船和卫星存在威胁, 是在检查了在轨道上执行任务的哈勃望远镜的太阳能电池板上有微小“陨石坑”后得出的结论。在“陨石坑”中发现了痕量的铁、镍和镁等元素。这表明, 这些微米级大小的“陨石坑”是由来自小行星或彗星的尘埃粒子撞击出来的。在最小的“陨石坑”内还发现了铝和钛, 它们也来自空间粒子。

发现空间尘埃对卫星和飞船的威胁有非常现实的意义。奥彭大学预报, 2001 年地球通过 Tempel-Tuttle 彗星的尾部时, 彗星的碎片有可能落到地球上, 产生所谓的“狮子座流星” (陨石雨), 这将是自 1966 年以来预测的最强的流星雨。北爱尔兰 Armagh 天文观测站的 David Asher 说, 这一次的流星雨可能是大量的微米级的尘埃, 将对卫星造成严重威胁。一颗名为奥林匹斯的卫星在 1993 年报废, 可能就是因为是在 Perseid 陨石雨高峰期遭遇过一次电击故障而造成的。

(刘先曙)

单人飞行器再次升温

据英《新科学家》2000 年 8 月 26 日报道: 加利福尼亚圣克拉拉“黄金时代”喷气式发动机公司研制了一种称为 SoloTrek (意思是单独行军) 的单人飞行器。这种飞行器可以每小时 120 公里的速度飞行, 只用一只汽油箱就能飞行 250 公里。飞行器可以用两台有保护外壳的螺旋桨进行垂直起飞和降落, 飞行员直立在飞行器中通过手动控制和移动身体重心就可控制飞行状态。两台螺旋桨既提供升力, 也能提供推进力。一旦飞行器起飞, 飞行员就能使螺旋桨作俯仰运动, 使飞行器向前飞行。美国航空航天局对这种飞行器很感兴趣, 正在为这一项目提供技术支持, 包括进行计算机模拟, 并准备对这种飞行器进行风洞试验, 以考验其飞行能力。

早在 70 年代, 就有人研制过一种称为“Rocket Belt”的单人飞行器, 但这种飞行器携带的燃料只能飞行 30 秒钟。而“黄金时代”喷气式发动机公司的前海军飞行员

Mike Moshier 在接受前人经验和失败教训的基础上研制出来的 SoloTrek 单人飞行器, 不仅续航时间长得多, 而且有一个让飞行员放心的安全着陆系统。如为了避免事故, 它采用了一种四汽缸的发动机。飞行中即使有一个汽缸发生故障, 其他 3 个仍可以提供足够的动力保持它在空中安全飞行。

这种单人飞行器的用途可能相当广泛, 最早的用户可能是武装部队、警察和各种救援人员。因为它可以在狭窄的空间内起飞和着陆, 不需要跑道。它也可以成为像蹦级跳一样有刺激性的娱乐工具。也有人认为, 它还可以帮助你解除其他烦恼, 比如在旅行中被意外天灾困住或被交通事故阻塞, 你可以用备用的单人飞行器飞离现场。

这种单人飞行器是否能商业化, 目前还有争议。比如曾和 Mike Moshier 一起工作过的加利福尼亚 NASA 埃姆

(下转第 55 页)