

高硫石油焦循环流化床 清洁燃烧技术

上海市石油学会 编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高硫石油焦循环流化床 清洁燃烧技术

上海市石油学会 编

中国石化出版社

循环流化床电站锅炉

高硫石油焦循环流化床清洁燃烧技术

图书在版编目 (CIP) 数据

高硫石油焦循环流化床清洁燃烧技术 / 上海市石油学会编. —北京: 中国石化出版社, 2008
ISBN 978-7-80229-770-8

I. 高… II. 上… III. 含硫原油-石油焦-流化床-循环锅炉-锅炉燃烧-技术 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 171952 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

金圣才文化发展(北京)有限公司排版

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 362 千字

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

序 言

如何利用好高硫石油焦是国内外炼化企业面临的一个重要课题。我国石油资源紧缺,大量购入相对低价的中东重质高硫原油,对炼化厂而言必然产生更多的高硫石油焦。从国际现有的技术分析,采用循环流化床技术高效、低污染地将高硫石油焦转化为石油化工过程需要的蒸汽和电力是必然选择。

美国福斯特惠勒(Foster Wheeler)公司在大型循环流化床锅炉的开发方面在国际上处于前列。特别是燃用石油焦循环流化床锅炉的技术,从首台商业化的NISCO电厂全石油焦燃料循环床到佛罗里达Jacksonville 300MW世界最大容量燃用全石油焦/全煤循环床锅炉的成功运行,该公司石油焦循环流化床锅炉世界市场占有率达到82%,具有世界一流的经验。

我国石油化工企业燃用石油焦的循环流化床锅炉基本上来自Foster Wheeler公司。自1999年镇海炼化 2×220 吨/小时循环床开始,已有三十余台,总蒸发量近万吨/小时。总结燃用石油焦循环床的选型、设计、运行、排放控制经验,对我国今后大规模高硫焦的消化利用具有重要的现实意义。

上海市石油学会组织石化系统循环流化床锅炉的使用厂家、设计院和Foster Wheeler公司等单位,对燃用石油焦的大型循环流化床锅炉优化与环保技术研讨会,并将论文集正式出版,为该行业做了一件十分有意义的工作。

本论文集收集的文章大体上可以分为几类。第一类文章是探讨循环流化床锅炉在高硫石油焦清洁利用方面的价值,值得注意的是关于何种条件下选用循环流化床锅炉尾部烟气脱硫装置的讨论。Foster Wheeler公司的文章介绍了美国的选取的原则,其本意在于采用现有最佳控制技术(BACT),前瞻性地解决二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳以外的未来可能要加以限制的其他危险污染物(HAPS),如HCl、HF、 H_2SO_4 等。因此这个提示值得我们的决策部门深思。

第二类文章介绍了我国在运行高硫石油焦循环流化床锅炉所遇到的问题及其解决方法。这些工程经验对于新的用户,对锅炉供应商今后的技术改进提供了十分直接、感性的经验。其中值得称道的是由于石化系统企业性质决定了他们较为认真地执行国家环保的排放标准,锅炉长期投用石灰石系统所积累的经验十分宝贵,它为今后电力系统循环流化床锅炉的普及脱硫提供了很好的样板。所报道出的脱硫数据也可以纠正国内一些人认为循环流化床锅炉脱硫不能满足

环保标准的错误认识。当然从这一类文章中也看到循环流化床在燃用 100% 石油焦时飞灰含碳量偏高、料腿易结焦等带有普遍性的问题。而采用石油焦和煤混烧,上述问题可以减轻,然而燃烧室水冷壁磨损,流化床冷渣器流化质量的问题加剧。这个矛盾有待于锅炉设计者和运行人员进一步探索。

第三类文章涉及燃用石油焦循环床污染控制和灰渣利用的问题。多数文章源自国外的经验,他们对飞灰的组分分析较为深入。针对不同组分的飞灰分别采用不同利用方式。我国国情有所差别,目前多考虑含碳量对飞灰利用的影响。研究国外的经验对今后灰渣深度利用可能有借鉴价值。

综上所述本论文集对我国循环流化床锅炉技术的发展具有良好的参考价值,同时也为我国用户在技术选用决策方面提供了国外的重要经验。

祝贺本论文集的出版!

岳光溪

清华大学热能工程系

目 录

高硫石油焦 CFB 锅炉清洁燃烧技术的发展

1. 炼厂高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术 瞿国华(1)
2. 石油焦做 CFB 燃料的电厂经济效益分析 程一步(8)
3. 超临界循环流化床锅炉——高效率、低排放和燃料灵活性相结合的新一代
燃煤发电技术 毛健雄 姜鹏志(16)
4. CFB 锅炉与尾部脱硫塔组合的深度脱硫与超低排放 刘 军(25)
5. 大容量循环流化床电站锅炉技术的发展 陈伟刚 毛健雄(34)
6. 循环流化床锅炉——油页岩发电的有效途径 施国泉(41)

高硫石油焦 CFB 锅炉生产运行技术

7. 全烧石油焦 CFB 锅炉运行分析 郑伟军(47)
8. FW 紧凑型 CFB 锅炉烘炉方法分析 于 川 张映伟(53)
9. 310t/h 循环流化床锅炉冷态试验及启动 黄 琛(61)
10. 410t/h 循环流化床锅炉煤焦混烧热力性能试验研究 邓雨生(68)
11. 循环流化床锅炉掺烧石油焦的试验及运行调整 牛万忠 张学军(73)
12. 采用飞灰再循环技术的石油焦/煤混烧 410t/h CFB 锅炉性能试验及
分析 陈晓平(81)
13. CFB 锅炉飞灰再循环在镇海炼化的应用 郑伟军 李 忠(90)
14. CFB 锅炉飞灰残碳复燃技术试验与研究 蔡昌忠(94)
15. CFB 锅炉发电机组能耗及节能分析 何建国(109)
16. RELIABILITY AND MAINTENANCE IMPROVEMENTS IN LATEST
GENERATION IN FLUIDIZED - BED BOILERS Eero Halikkä(115)
17. 影响循环流化床料锅炉正常运行的主要问题及对策 方航明(124)
18. 浅谈提高 CFB 锅炉排渣系统运行可靠性的措施 邓雨生 郑文凯(129)
19. 310t/h CFB 锅炉冷渣器排渣故障初步分析及对策 杨 杰 龚志松(134)
20. 循环流化床锅炉控制系统的分析、设计与投运 赵伟杰(137)
21. 310t/h 煤焦混烧 CFB 锅炉风系统控制与运行优化 万金山(147)
22. 循环流化床锅炉选择性冷渣器存在的问题及对策 黄鹏飞(155)
23. 循环流化床锅炉的磨损原因分析及解决对策 朱 强(160)
24. FWE0Y - 310/9. 8 型 CFB 锅炉运行技术与经验 龚志松(165)
25. 75t/h 石油焦循环流化床锅炉试运初探 杨 帆 胡坤后(171)

26. 关于循环流化床锅炉工程设计的几点看法 史华光(178)

27. 炼化自备电站 CFB 锅炉一次风机国产化的开发与应用 袁军国 董绍平(186)

高硫石油焦 CFB 锅炉灰渣利用技术

28. 循环流化床锅炉控制污染物排放的能力 陈伟刚 毛健雄(190)

29. 循环流化床锅炉燃烧高硫石油焦的脱硫效率及有关的问题 ... 陈伟刚 毛健雄(202)

30. 循环流化床锅炉低 NO_x 排放特性及炉内脱氮技术 姜鹏志(212)

31. 燃烧石油焦的 CFB 锅炉灰渣的综合利用 陈伟刚 毛健雄(217)

32. CFB 灰的有益利用 Lin - Jiuan(Lily) Young(223)

封面图片：中国石化茂名分公司动力厂，2×410t/h CFB 锅炉，由福斯特惠勃公司供货，燃料为石油焦、煤和油页岩，2005 年投运。

炼厂高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术

瞿国华

(上海市石油学会, 上海 200020)

摘 要 本文分析了我国高硫石油焦的生产形势, 讨论了炼厂高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧的 3 个问题和我国石化系统 CFB 锅炉运行所达到的实际水平。指出高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧不仅解决了我国炼油工业加工劣质原油时高硫石油焦的出路问题, 也符合新世纪我国国民经济节能减排重大战略方针。

关键词 高硫石油焦 CFB 锅炉 可靠性 环保性 经济性

21 世纪原油质量的重质化和劣质化倾向越来越严重, 资源因素决定了世界炼油工业的重要发展方向之一就是大力发展重质原油(超重质原油)的加工。表 1 是 2000~2015 年世界原油质量趋向。主要表现是原油密度越来越大, 含硫量越来越高, 除此之外, 有些原油还含有大量的金属, 有的含有大量有机酸, 很难用常规的加工方法进行炼制。

表 1 世界原油质量高硫化、重质化趋向

年 份	原油平均 API 度	原油平均含硫量/%
2000	32.5(西半球 28.1 东半球 34.0)	1.14(西半球 1.33 东半球 1.08)
2010	32.4(西半球 27.6 东半球 34.0)	1.19(西半球 1.42 东半球 1.12)
2015	32.3(西半球 27.3 东半球 33.8)	1.25(西半球 1.43 东半球 1.19)

重质原油加工的核心是重油加工。重油加工是一个复杂的系统工程, 涉及许多炼油工艺, 它的目的就是渣油轻质化, 通过它将重质原料油转化为有广泛用途的各种轻质清洁油品和化工原料。重油加工过程可以有二个方向即脱碳(carbon rejection)和加氢(hydrogen addition)。延迟焦化、渣油流化床催化裂化(RFCC)和渣油加氢是世界上三种主要的渣油升级改质工艺过程。对于加工劣质原油比例较高的国家如美国、加拿大、拉美和中国等, 其焦化产能在炼油加工能力中占有较大的比例, 近年来发展速度也最快。中国工程院院士侯英生指出, 延迟焦化是中国第一位的重油加工工艺。

1 延迟焦化快速发展导致高硫石油焦产量急增

1963 年抚顺石油二厂建成了第一套国产延迟焦化装置, 能力 0.30Mt/a。1989 年锦州石化建成了我国第一套 1.0Mt/a 大型化延迟焦化(二炉四塔), 单套装置能力首次突破百万吨大关。2000 年 1 月上海石化建成了我国第一套 1.0Mt/a“一炉二塔”流程的大型延迟焦化装置, 焦炭塔直径 8.4m, 达到了国际大型焦炭塔水平。该装置采用了一系列的新工艺和新设备, 如第一次采用配置低 NO_x 火嘴的大型双面辐射加热炉, 加热炉管采用多点注汽技术, 在线清焦技术; 采用新型换热流程; 新型水力除焦器; 高扬程的切焦水泵; 国产中子料位

计等。此后，有多套百万吨级装置大型焦化装置(一炉二塔)顺利建成投产，最大的焦炭塔直径为9.4m(金陵石化、扬子石化)，产能1.6 Mt/a。

新世纪中国焦化能力得到迅速发展，2001 年全国焦化产能 21.64Mt/a，2002 年 25.25Mt/a，2003 年 29.3Mt/a，2004 年 37.25Mt/a，2005 年 42.45Mt/a。表 2 是我国焦化加工能力近年增长情况。在三种主要重油加工工艺中延迟焦化是产能发展最快的一种。

表 2 我国焦化加工能力近年增长情况

年 份	装置套数	能力/(10 ⁴ t/a)	年能力增加/(10 ⁴ t/a)
1990	15	7.91	
1995	23	13.48	
1999	29	20.63	
2001		21.64	
2002		25.25	3.61
2003	33	29.30	4.05
2004		37.25	7.952
2005		42.45	5.20

我国延迟焦化加工能力的快速发展是为了适应加工重质、劣质原油的需要，也导致原油加工深度不断增加。我国延迟焦化加工能力占原油一次加工能力的比例已从 1995 年的 6.64% 增长到 2005 年的 12.94%，10 年间增长 6.3 个百分点，2005 年我国延迟焦化加工能力占原油一次加工能力的比例远高于同年世界

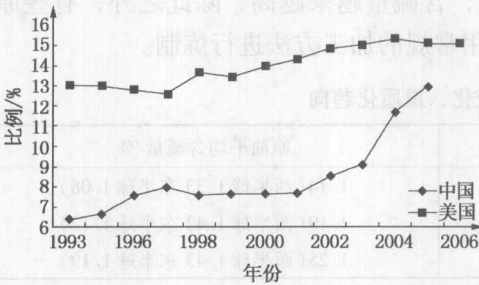


图 1 中国焦化产能和美国焦化产能占原油一次加工能力比例的比较

焦化加工能力占原油一次加工能力的平均比例 (5.65%)，说明我国原油的加工深度已处于世界先进水平行列，也反映我国炼油工业加工劣质原油的能力有了大幅度提升。图 1 是我国延迟焦化加工能力和美国焦化能力占原油一次加工能力比例的比较，由图可见，近年来我国延迟焦化加工能力占原油一次加工能力比例增加很快，已经接近美国水平，美国基本上处于持平状态。

石油焦是延迟焦化的一种主要的副产品。石油焦的产率一般为延迟焦化进料的 14% ~ 30%，主要取决于所加工原油的残炭值和操作条件。有资料综合多种原油加工数据后给出一个估算延迟焦化石油焦产率公式：

石油焦产率(%) = 1.6 × 原料残炭值(%)

按硫含量不同石油焦可分为高硫焦、中硫焦和低硫焦(表 3)。硫含量大于 4% 的高硫焦主要作为水泥和锅炉燃料等用途，虽然焦的热值比煤炭高一倍左右，但排放烟气中大量的 SO₂ 是造成大气污染的重要来源，因此清洁燃烧就成为高硫石油焦燃烧时需要解决的一个最重要的课题。

表 3 石油焦分类

石油焦种类	硫含量/%	主要用途
高硫焦	>4	燃料
中硫焦	2~4	制铝电极
低硫焦	<2	高级焦

延迟焦化过程中，焦化原料中 60% 硫进入到焦化干气和焦炭中，因此劣质高硫原料焦化时不可避免地会产生大量的高硫焦。图 2 是延迟焦化产品硫含量和原料硫含量关联图。

近年来世界焦化产能发展较快，石油焦的产量有较大增长，2000 年为 53.9Mt，2005 年为 66.9Mt。其中美国石油焦产量 2000 年为 35.5Mt，2005 年为 40Mt，占世界石油焦总产量的 60% 以上。含硫量大于或等于 3% 的含硫石油焦在世界石油焦产量中占较大比例，据 1997 年全世界石油焦产量统计，含硫石油焦产量占石油焦总产量的比例为 64%。含硫石油焦产量增长较快，2010 年该比例将增长到 72%，说明期间世界石油焦增加产量的 90% 将属于含硫石油焦，低硫石油焦的产量预计不会有明显增长，详见表 4。

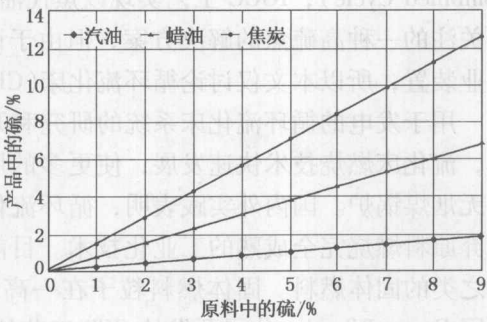


图 2 延迟焦化产品硫含量和原料硫含量关联图

表 4 世界石油焦产量统计及预测 10⁴ t/a

年 份	美 国	其 他 地 区	总 计
1992	2740	870	3610
1997	3350	1500	4850
1998	3420	1510	4930
1999	3510	1570	5080
2000	3550	1840	5390
2005	4000	2690	6690
2010	4270	3020	7290
平均年增长率/%			
1992 ~ 1997	4.1	11.5	6.1
1997 ~ 2005	2.2	7.3	4.1
2005 ~ 2010	1.3	2.3	1.7

随着我国延迟焦化新增加工能力的增加，石油焦产量也大幅度增加，可见表 5。2000 ~ 2005 年间石油焦的年均增长率为 10%。其中 2000 年我国石油焦产量 4.52Mt/a，2005 年我国石油焦的产量为 9.8Mt，以中、低硫石油焦为主，高硫石油焦产量为 1.81Mt，占石油焦总产量 18%，加上中硫石油焦，二者总计在 60% 以上。

表 5 中国石油焦的产量

年 份	石油焦产量/(10 ⁴ t/a)	年 份	石油焦产量/(10 ⁴ t/a)
1994	203	2001	486
1996	291	2002	508
1998	357	2003	603
2000	452	2005	980

2 炼厂高硫石油焦循环流化床锅炉的清洁燃烧

解决高硫石油焦出路可以有多种工业方案。结合我国具体情况，一种方案将高硫石油焦用于循环流化床(CFB)锅炉发生蒸汽或发电。另一种是通过焦气化转化成蒸汽、电力或合成气等联产多品种方案，即石油焦气化联合循环 IGCC 工艺(IGCC - Integrated Gasification

Combined Cycle), IGCC 工艺实现以焦代油的燃料替换,从而提高炼厂整体效益,是当前倍受关注的一种高硫焦的解决方案,但由于该方案流程复杂,投资庞大,我国至今没有一套工业装置,所以本文仅讨论循环流化床(CFB)锅炉清洁燃烧这一比较成熟的方案。

用于发电的循环流化床系统的研究和开发工作始于 20 世纪 70 年代早期,到最近的十年,流化床燃烧技术快速发展,使更多的用户采用这个技术用于发电,以替代传统的小规模无烟煤锅炉。国内外实践表明,循环流化床(CFB)锅炉燃烧工艺是一个利用固体燃料和废弃原料燃烧完全成熟的工业化技术。目前大型流化床锅炉燃烧技术主要烧煤或高硫石油焦之类的固体燃料。固体燃料粒子在一高炉型燃烧室内燃烧,并通过鼓风维持流化状态。美国 Foster Wheeler 公司开发的 CFB 工艺的特征是,在炉子的最初几英尺处,存在一个明显的固体床层,紧接着是一个稀固体床层。由于在燃烧室内加入了石灰石(CaCO_3)和燃烧效率最大化,流态化燃烧提供了 SO_2 、 NO_x 最低化排放的条件。

在炼厂中 CFB 锅炉可以用高硫石油焦和煤为燃料,因而极大地增加了炼厂原油加工的灵活性。CFB 工艺可以有效地把高硫和高金属含量的石油焦转化为蒸汽和电,供炼厂自用

或输出,这种灵活性使得炼厂在加工低价劣质原油时,可不用考虑将低质量的高硫石油焦进行出厂处理,从而使炼厂能获得更好的经济效益(在中国,一个千万吨级年加工量的炼厂,如果原油价格下降 1 美元/桶,全年原油成本可下降 5 亿人民币左右)。同时 CFB 锅炉也可以设计成为兼处理炼厂的废渣和低价值高硫含量的炼厂气、贮罐底部的废渣油等废料,减少炼厂三废排放。

CFB 锅炉联合装置一般由下列单元组成。包括原料石油焦、煤和石灰石料仓;炉子燃烧室;旋风分离器;内循环返回换热器;热回收区;鼓风机;蒸汽透平发电机;灰渣出料系统和烟囱等。图 3 是 2002 年中在美国佛罗里达州 JEA 电厂投产的以高硫石油焦和煤作为原料

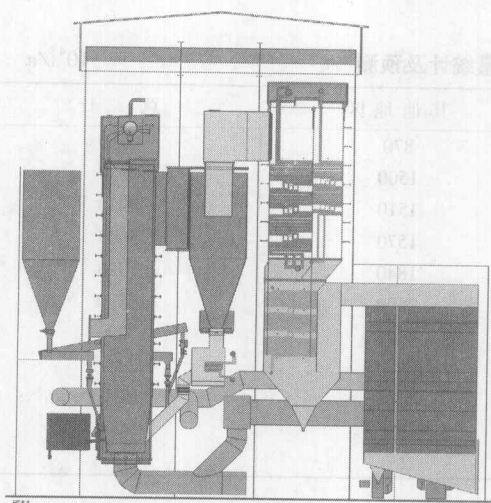


图 3 美国 JEA 2×300MW 循环流化床锅炉

的当前世界上容量最大的循环流化床锅炉(JEA 2×300MW 循环流化床锅炉)的简图。

我国第一批 2 台以烧高硫石油焦为主的 CFB 锅炉 1999 年于镇海石化投产(蒸发量 $2 \times 220\text{t/h}$)以来,锅炉最长的运行周期已超过 450 天,在提升了 CFB 锅炉运行的可靠性和各项技术经济指标以后,中国石化总公司广泛使用了燃烧高硫石油焦(煤)的 CFB 锅炉,无论是数量还是运行水平方面在世界上都属于前列。目前中国石化总公司有下属的镇海炼化、金陵石化、上海石化、武汉石化、荆门石化、茂名石化、燕山石化、齐鲁石化八家企业已建成投产燃石油焦(煤)CFB 锅炉 17 台,总蒸发量 4535t/h ,单台平均蒸发量 267t/h ,最高单台蒸发量 420t/h 。另有在建的天津石化等六家石化企业合计 14 台 CFB 锅炉,总蒸发量 5300t/h ,单台平均蒸发量 379t/h 。

高效、清洁燃烧是 CFB 锅炉今后发展的最主要任务,具体要求主要表现在:

(1) 高运行可靠性要求

炼厂 CFB 锅炉是炼厂主要的供汽、供电手段,由于炼油石化行业具有长周期安全、稳

定生产的特点，一般炼油厂开工周期长达3年左右，要求CFB锅炉必须保证达到高运行可靠性。具体而言，一方面要CFB锅炉达到长周期运行，另一方面则是要最大限度减少锅炉非计划停车，也就是实现可控的长周期运行，而不是为了单纯追求长周期。中国石化总公司所属某石化企业两台410t/h紧凑型循环流化床锅炉，自2003年12月开始建成投产四年多以来，经过多项技改措施的实施和不断的工况优化调整，锅炉处于良好的运行状态。最长连续运行时间已达到450d，平均炉子负荷率为 $>100\text{MCR}\%$ ，平均锅炉热效率为 $>91\%$ ，锅炉脱硫性能良好，平均烟气中 SO_2 浓度为 $<400\text{mg/L}$ ，能满足国家烟气排放标准要求。

为了实现长周期运转，他们主要解决了以下3个问题，即锅炉运行中存在床压高，冷渣器排渣能力低和水冷壁管等锅炉内部磨损严重等问题。

① 解决CFB锅炉运行中存在床压高问题。

避免造成CFB锅炉运行中产生床压高的根本措施是要确保炉子流化工况处于正常状态。在加强运行管理的基础上，重要的是使炉内保持合理的循环床料量，并及时将粗床料和杂物排出，避免局部喷嘴堵塞。在日常管理中，应在保证锅炉燃烧工况良好的前提下，尽量降低循环床料量，控制床温在 $870\sim 900^\circ\text{C}$ 左右，保持连续排渣，勤调细操，确保流化工况处于正常状态。

② 提升锅炉冷渣器排渣能力。

冷渣器是CFB锅炉运行的关键设备之一，正常运行时，入炉燃料、石灰石和原有床料形成了炉内循环床料，床料经分离器后，细颗粒逃逸进入尾部烟道以飞灰的形式排出炉外，炉底粗床料则部分进入冷渣器冷却后排出，以保持锅炉进出物料的平衡。冷渣器工作异常时，将破坏锅炉进出物料的平衡，造成床料积聚，流化不良，破坏锅炉循环动力场，床温下降，最终导致锅炉非计划停车。不少石化企业的CFB锅炉在运行初期都遇到过这个问题，虽然各有差别，但通过分析原因和采取各种措施后这个问题基本得到了解决。

③ CFB锅炉内部磨损问题。

磨损是循环流化床锅炉固有的特性，不可能从根本上予以消除。循环流化床锅炉主要的磨损部位包括炉膛水冷壁磨损、布风板风嘴磨损和耐火衬里的磨损等。经过不断总结经验，可以采取的措施一是针对不同类型的磨损，采用相应防磨措施，提高锅炉各部件抗耐磨性。二是在保证锅炉正常工作参数的前提下，通过优化运行方式，降低物料对锅炉各部件的磨损量。

如水冷壁磨损是困扰所有CFB锅炉用户的主要问题，严重制约了锅炉的长周期运行，这也是CFB锅炉燃烧特性本身所决定的不可避免的问题。针对水冷壁管的磨损采取一系列措施包括采用高频脉冲超音速电弧喷涂技术，在未燃带以上 $3\sim 5\text{m}$ 的范围内，对水冷壁管壁进行喷涂防磨防腐金属合金材料，以延长使用寿命。实践证明该方法是目前解决水冷壁管磨损的技术含量较高、解决时间较短而且比较经济的方法。

总之经过实施多项切实有效的技术改造措施和工况优化调整，国内石化系统的几套大型CFB锅炉运行可靠性有了很大提高，满足了炼厂供热、供汽的要求，实现锅炉高运行可靠性是保证锅炉达到高效率的基础。

(2) 高环保性能要求

前已指出CFB锅炉清洁燃烧的主要特点是节能减排，在减排方面CFB锅炉具有良好的脱硫、脱硝(NO_x)性能。由于CFB锅炉的炉膛温度低于常规煤粉炉，因此其脱硝性能是母

庸置疑的。对于脱硫性能, 根据有关国家标准(《火电厂大气污染物排放标准》GB 13223—2003), 我国 CFB 锅炉烟气二氧化硫最高允许排放浓度是 400mg/Nm³, 通过调整石灰石比例和其他条件后锅炉脱硫率可以达到 90% 以上, 平均烟气中 SO₂ 浓度可达到 400mg/L 以下。如果有更高脱硫要求, 如要求 CFB 锅炉烟气中 SO₂ 浓度小于 200mg/L, 或者当地环保条例有特殊要求的话, 则可以采取二级脱硫措施, 这也是美国联邦法要求新建电站锅炉排放标准要逐步达到基于所谓现有最佳排放控制技术 BACT(Best Available Control Technology) 水平的要求。

二级脱硫措施可在循环流化床锅炉尾部烟道后增加污染物吸收塔, 最早是在美国 JEA 电厂实施的, 表 6 是美国 JEA 电厂 2×300MW 循环流化床锅炉有关运行参数和各项污染物排放值的实测数据, 在烧石油焦和煤各 50% 情况下, 锅炉热效率为 91.7%, 烟囱 SO₂ 排放浓度为 135mg/Nm³, 烟囱 NO_x 排放浓度为 86mg/Nm³。美国现在已有三套新建的 250 ~ 300MW 循环流化床锅炉配置了烟气吸收塔, 被认为是现有最佳控制技术(BACT) 的先例。也有的观点认为, 既然如此是否可以采用将石油焦在煤粉炉中燃烧再加上烟气脱硫处理的方案, 要注意的是石油焦的燃烧特点是灰分少, 挥发分不多, 固定碳含量高, 热值高, 和煤比较石油焦着火较难, 燃烧速度慢, 燃烧性能相对较差。石油焦燃烧特点是第一阶段燃烧很快, 第二阶段十分缓慢, 同时由于很少灰分, 因此, 在常规的 PC 炉中用石油焦作燃料时会出现灰渣太少和燃烧不透的现象, 在煤焦混烧时更容易产生燃烧不透现象, 一般焦的混入比例不超过 30%。

表 6 美国 JEA 电厂 2×300MW 循环流化床锅炉实测的有关运行参数和各项污染物的排放值

项 目	100% 匹兹堡 8 号煤	50% 石油焦和 50% 匹兹堡 8 号煤 ^①	100% 依利诺 6 号煤
锅炉过热蒸汽流量/(t/h)	905	840	905
硫含量/%	4.84	5.86	3.17
高位热值 HHV/(kcal/kg)	7150	7360	6480
锅炉效率(HHOV) ^② /%	90.6	91.7	88.3
石灰石流量/(t/h)	26.1	33.2	29.0
钙硫比(Ca/S)	1.77	2.25	2.68
锅炉出口 SO ₂ 浓度/(mg/Nm ³)	290	340	340
烟囱 SO ₂ 排放浓度/(mg/Nm ³)	125	135	131
锅炉本身石灰石脱硫效率/%	96.8	96.8	95.0
烟气脱硫的脱硫效率/%	1.8	1.9	3.2
NO _x /(mg/Nm ³)	91	86	106
CO/(mg/Nm ³)	32	20	24
不透明度/%	1.1	1.8	1.5
固体颗粒, PM10/(mg/Nm ³)	5	5	2.3

① 目前锅炉用 80% 石油焦和 20% 煤进行混烧。

② 以低位热值为基础的锅炉效率要高 2% ~ 4%。

3 高经济性要求

高经济性是对 CFB 锅炉一个基本的要求, 主要有:

① 高发电效率和高锅炉热效率。

燃煤 CFB 锅炉发电效率一般可达 38% ~ 45% (蒸汽为亚临界参数 16.5MPa, 550℃ 到高压临界参数 32MPa, 595℃)。发电效率和常规 PC 炉基本相同, 比热电联合循环(IGCC)的效

率稍低，可见表7。但在石油、石化行业中，CFB 锅炉主要功能是汽电并发，以汽定电，主要功能是发汽，这点和发电厂大型锅炉是有差别的。从发汽角度分析，提高 CFB 锅炉热效率十分重要。

表 7 各种燃煤锅炉的发电效率和相对投资

炉 型	发电效率/%	相对投资/%	炉 型	发电效率/%	相对投资/%
常规 PC 炉 + FGD(粉灰)	38	100	增压流化床(CFBC)	42 ~ 43	108
循环流化床(CFB)	38	98	热电联合循环(IGCC)	43 ~ 45	120 ~ 150

国内最前面投用的几套 CFB 锅炉的焦炭燃净率不是很高，表现是飞灰含碳量较高。通过提高炉内物料循环倍率，延长颗粒在炉膛内的燃烧停留时间，使物料在炉膛内能充分燃烧后，燃烧效率有很大改善，最近投用的几台发汽量 410t/h 的紧凑型循环流化床锅炉的飞灰含碳量问题得到解决，炉子燃烧效率可达 95% ~ 99%。

② 低设备投资。

如表 7 所示，常规 CFB 锅炉投资和煤粉炉相近。由于 CFB 锅炉在石化系统使用日益普遍，设备本土化程度不断加大，锅炉单位投资水平已有一定程度的下降。

总之，高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术不仅较好地解决了我国炼油工业加工劣质原油时高硫石油焦的出路问题，提升了炼厂经济效益和竞争能力，也符合我国国民经济在新世纪的节能减排重大战略方针。

参 考 文 献

1 章柏洋．世界原油质量变化趋势及非常规石油开发．石油知识，2007(1)：4
2 程之光主编．重油加工技术．北京：中国石化出版社，1994
3 李春年编著．渣油加工工艺．北京：中国石化出版社，2002
4 瞿国华主编．延迟焦化工艺与工程．北京：中国石化出版社，2007. 1 ~ 49；288 ~ 294

石油焦做 CFB 燃料的电厂经济效益分析

程一步

(中国石油化工集团公司经济技术研究院, 北京 100029)

摘 要 介绍了全烧石油焦 CFB 锅炉在中国石化行业应用情况。讨论了近期国内外石油焦市场及价格变化趋势。认为燃料级石油焦应以煤价为基准, 采用等热值等价原则, 并考虑脱硫成本的变化后, 来估算其价格。通过案例分析讨论了运行 CFB 锅炉热电站主要经济指标及烧石油焦带来的附加效益。初步分析烧高硫石油焦 CFB 锅炉的环保效益。

关键词 石油焦 价格预测 CFB 锅炉 技术经济指标 经济效益

1 前言

石油焦是一种重要的燃料和原料, 主要用于有色金属、冶金和化肥、水泥等行业; 按用途划分可作为炼铝、炼钢电极原料, 生产超高功率石墨电极和做化肥、水泥原料与燃料。石油焦分类参见表 1、表 2。

表 1 石油焦分类

种 类	硫含量/%	主要用途
高硫焦	>4	燃料
中硫焦	2~4	制铝电极
低硫焦	<2	高级焦

表 2 国产石油焦质量标准 (SH 0527—92)

项 目	一级品	合 格 品						
		1 号		2 号		3 号		
		A	B	A	B	A	B	
硫含量/%	≤	0.5	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0
挥发分/%	≤	12	10	14	14	17	18	20
灰分/%	≤	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.8	1.2
水分/%	≤	3						
真密度/(g/cm ³)	≤	2.08 ~ 2.13						
粉焦量(块粒 8mm 以下)/%	≤	25						
硅含量/%	≤	0.08						
铁含量/%	≤	0.08						
钒含量/%	≤	0.015						

中国石化集团公司镇海炼化、金陵石化、上海石化、武汉石化、荆门石化、茂名石化、

燕山石化、齐鲁石化八家企业燃石油焦 CFB 锅炉已建成投产, 合计 17 台锅炉, 总蒸发量 4535t/h。另有天津石化、镇海炼化、广州石化、青岛炼化、长岭炼化、洛阳石化六家企业在建燃石油焦 CFB 锅炉, 合计 14 台锅炉, 总蒸发量 5300t/h。参见表 3。中国石化集团公司 CFB 锅炉燃石油焦数量 2006 年达到 1.6Mt, 数量逐年上升, 参见图 1。目前国内石油焦价格在每吨 900 元左右, 在这种情况下, CFB 热电厂效益如何, 如何降低石油焦价格波动带来的风险, 本文对此做了一些探讨。

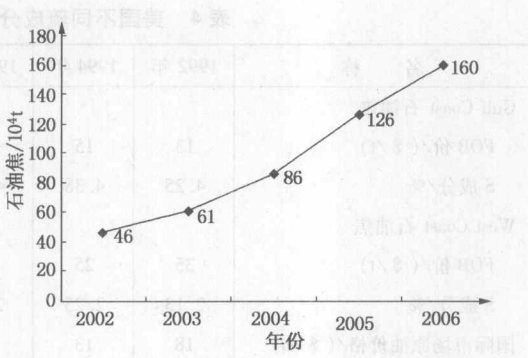


图 1 中国石化 CFB 燃料石油焦消耗统计

表 3 中国石化集团公司燃石油焦锅炉统计

序号	企 业	锅炉台数(台)	单炉蒸发量/(t/h)	总蒸发量/(t/h)	投 产 日 期
1	镇海炼化	2	220	440	1999 年
2	武汉石化	1	75	75	2001 年
3	金陵石化	2	220	440	2002 年
4	上海石化	2	310	620	2002 年
5	镇海炼化	2	410	820	2003 年
6	荆门石化	2	130	260	2004 年
7	茂名石化	2	410	820	2005 年
8	燕山石化	2	310	620	2006 年
9	齐鲁石化	2	220	440	2006 年
10	广州石化	2	420	840	在建
11	镇海炼化	5	410	2050	在建
12	天津石化	3	420	1260	在建
13	青岛炼化	2	310	620	在建
14	长岭炼化	1	220	220	在建
15	洛阳石化	1	310	310	在建
	小计	31		9835	

2 2006 年国外石油焦市场、价格水平和价格波动

2.1 国外石油焦市场、价格水平

据有关资料报道, 2006 全球石油焦消费量约为 87Mt, 其中燃料消费量约为 68Mt, 约占 78.2%。美国是世界主要石油焦生产国, 其石油焦生产量的 70% 以上为燃料级石油焦, 硫含量在 2.0% ~ 5.0%。在每年的世界石油焦贸易量中, 燃料级石油焦约占总量的 80%。目前, 美国市场燃料级石油焦价格约为 55 美元/吨左右。

2.2 燃料石油焦价格波动性分析

美国 1992 年 ~ 2001 年 10 年石油焦价格变化趋势参见表 4。从表 4 可看出, 美国 West Coast 石油焦由于含硫量较低(平均约为 2.56%), 价格较高, 10 年平均值约为 25.43 美元/t, 波动幅度 +42% ~ -72%; Gulf Coast 石油焦由于含硫量较高(平均约为 4.51%), 价格较低, 10 年平均值约为 12.43 美元/t, 波动幅度 +37% ~ -76%。

表 4 美国不同硫成分石油焦 FOB 价格波动分析

名 称	1992 年	1994 年	1996 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	平 均
Gulf Coast 石油焦								
FOB 价/(\$/t)	13	15	17	10	3	13	16	12.43
S 成分/%	4.25	4.38	4.38	4.69	4.88	—	4.5	4.51
West Coast 石油焦								
FOB 价/(\$/t)	35	25	36	27	7	21	27	25.43
S 成分/%	2.13	2.25	2.63	2.69	2.63	—	3.00	2.56
国际市场原油价格/(\$/b)	18	13	17	15	10	25	24	17.43
欧洲动力煤到岸价/(\$/t)	38.53	37.18	41.25	32.00	28.79	36.03	39.45	36.18

为分析石油焦波动产生的原因，我们在表 4 中列出了同期国际市场原油价格和欧洲动力煤到岸价(6000kcal/kg)，石油焦价是随着原油价格和煤价波动而波动的，而且变化趋势基本上是一致的。

美国 2001 年~2006 年石油焦 FOB 平均价格从 2001 年约 20 美元/t 上升到 2006 年约 55 美元/t，上升幅度较大。

由于我国已加入 WTO，石油焦价格波动将与国际石油焦价格波动相适应，故我们认为，国内石油焦价格也会有较大波动的可能。CFB 锅炉对燃料的灵活适应性，则可为焦价波动提供有力的消化市场风险手段。

3 2006 年国内石油焦市场及价格分析

3.1 石油焦的市场分析

由于我国目前石油焦含硫量大部分低于 3%，相对较低，故用途与国外有较大不同，石油焦主要用于碳素行业、炼铝、锅炉和出口，参见表 5。

表 5 2006 年国内石油焦产量及表观消费量统计 10⁴t

序 号	名 称	数 量	序 号	名 称	数 量
1	石油焦产量	1233		其中：碳素制品	460
2	进口石油焦	70		中铝公司	180
3	出口石油焦	-143		中国石化 CFB	160
4	表观消费量	1160		其他	360

据有关专家分析，随着国内加工进口含硫原油数量的增加，估计未来国内增加的石油焦产量将主要为燃料级石油焦(高硫石油焦)，参见表 6。从市场看，低硫石油焦数量由于生产量增加不多，需求量相对增长较快，所以仍然紧俏。而高硫石油焦则需要寻找出路，解决过剩问题。

表 6 未来几年中国石化部分企业新增石油焦产量及硫含量预测

名 称	石油焦产量/(10 ⁴ t/a)	石油焦最高含硫量/%	名 称	石油焦产量/(10 ⁴ t/a)	石油焦最高含硫量/%
A 企业	30	5	F 企业	59	8.2
B 企业	39	6.5	G 企业	45	4
C 企业	33	5.5	平均		5.9
D 企业	31	5.5	小计	314	
E 企业	77	6.7			