

◀ 炼油与化工技术 ▶

高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术

瞿国华

(上海石油学会,上海 200020)

摘 要 讨论了炼厂高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术和我国石化系统循环流化床锅炉运行所达到的较高水平。指出该技术不仅解决了我国延迟焦化加工劣质原料时产生的大量高硫石油焦的出路,而且符合我国国民经济在新世纪的节能减排重大战略方针。

关键词 石油焦 循环流化床锅炉 可靠性 环保 经济性

1 我国延迟焦化能力快速增加导致高硫石油焦产量急增

近年来我国延迟焦化加工能力迅速发展,2001 年全国延迟焦化加工能力为 $2164 \times 10^4 \text{t/a}$,2002 年 $2525 \times 10^4 \text{t/a}$,2003 年 $2930 \times 10^4 \text{t/a}$,2004 年 $3725 \times 10^4 \text{t/a}$,2005 年 $4245 \times 10^4 \text{t/a}$ 。表 1 反映了我国延迟焦化加工能力近年的增长情况。在延迟焦化、重油催化和渣油加氢 3 种主要重油加工工艺中,延迟焦化是加工能力发展最快的一种工艺^[1]。

表 1 我国延迟焦化加工能力近年增长情况

年 份	装置/套	能力/($10^4 \cdot \text{a}^{-1}$)	年能力增加/($10^4 \cdot \text{a}^{-1}$)
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	7.95
2005		42.45	5.20

石油焦是延迟焦化工艺的一种主要副产品。焦化过程中焦化原料中 60% 的硫进入到焦化干气和焦炭中。石油焦可按硫含量进行分类(见表 2)。硫含量大于 4% 的高硫焦主要用于水泥和锅炉燃料等,虽然焦炭的热值比煤炭高一倍左右,但焦炭燃烧时排放烟气中大量的 SO_2 是造成大气污染的主要来源,因此炼厂加工高硫劣质原油时所产生的高硫石油焦的出路就成为炼厂的一个重要难题。

硫含量大于或等于 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%。世界含硫石油焦产量增长较快,2010 年该比例将增长到 72%,期间世界石油焦产量增量的 90% 将属于含硫石油焦,低硫石油焦的产量预计不会明显增长。世界石油焦产量见表 3。

表 2 石油焦的分类和用途

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

表 3 世界石油焦产量统计及预测

项 目	年 份	美 国	其他地区	总 计
产量/ ($10^4 \cdot \text{a}^{-1}$)	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
年均 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

近年来我国延迟焦化新增能力增长很快,石油焦产量也大幅度增加(见表 4)。2000~2005 年石油焦

作者简介:瞿国华,教授级高级工程师,1960 年毕业于北京石油学院石油炼制系,长期从事石油炼制和石油化工的生产及技术开发工作,曾任上海石油化工股份有限公司副总经理兼总工程师,现任上海市石油学会顾问。 E-mail: qugh66@hotmail.com

产量年均增长率为 10%。2000 年我国石油焦产量 452×10⁴t, 2005 年为 980×10⁴t, 后者以中、低硫石油

焦为主, 高硫石油焦产量为 181×10⁴t, 占石油焦总产量 18%, 加上中硫石油焦, 总计在 60% 以上。

表 4 中国石油焦的产量

10⁴t/a

年 份	1994年	1996年	1998年	2000年	2001年	2002年	2003年	2005年
石油焦产量	203	291	357	452	486	508	603	980

2 高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术

结合我国具体情况, 目前有两种具有产业意义的解决高硫石油焦出路的方案。一种方案是将高硫石油焦用于循环流化床 (CFB) 锅炉发生蒸汽或发电。另一种方案是通过焦炭气化转化成蒸汽、电力或合成气等多品种联产方案, 即一体化石油焦气化联合循环 (IGCC) 工艺方案。IGCC 工艺实现以焦炭代油的燃料替换, 从而提高炼厂整体效益, 是当前倍受关注的一种解决高硫焦出路的方案。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, 所以本文仅讨论国内已广泛推广的循环流化床 (CFB) 锅炉清洁燃烧技术这一比较成熟的方案。

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采用流化床燃烧的完全成熟的工业化技术。目前大型流化床锅炉燃烧工艺主要烧煤或高硫石油焦等固体燃料。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 (1ft=0.3048m) 处, 有一个明显的固体床层, 接着是一个稀固体床层。因燃烧室内加入石灰石 (CaCO₃) 和实现循环燃烧效率最大化, 流态化燃烧提供了 SO₂、NO_x 最低排放的条件。

在炼厂中, CFB 锅炉可以用延迟焦化产生的高硫石油焦和煤为燃料, 因而很大程度上提高了炼厂原油加工的灵活性。CFB 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, 找到了一条处理高硫石油焦的出路, 从而使炼厂能获得更好的经济效益 (一个加工千万吨级劣质原油的炼厂, 如果原油价格下降 1 美元/bbl, 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可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。

CFB 锅炉联合装置一般由下列单元组成: 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。

我国第一批以烧高硫石油焦为主的 CFB 锅炉 (蒸发量 2×220t/h) 1999 年于中国石化镇海炼化投产以来, 较好地实现了锅炉运行的可靠性, 锅炉最长的运行周期已超过 450d。在解决了可靠性问题以后, 中国石化集团公司广泛使用燃烧石油焦 (煤) 的 CFB 锅炉, 无论是应用数量还是运行水平在世界上都位于前列。目前中国石化集团公司下属的镇海炼化、金陵石化、上海石化等 8 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。另外还有在建的天津石化等 6 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, 对 CFB 锅炉的具体要求有以下 3 项。

2.1 具有高运行可靠性

对装备 CFB 锅炉的炼厂而言, 其 CFB 锅炉主要任务是供汽和供电, 一般是以汽定电, 这与大型发电厂不同。由于炼油和石化行业具有长周期安全、稳定生产的特点, 炼油厂开工周期长达 3a 左右, 所以要求 CFB 锅炉必须保证运行的高度可靠性。一方面要求 CFB 锅炉达到长周期运行, 另一方面要求最大限度地减少锅炉的非计划停工, 也就是要求实现可控的长周期运行, 而不是单纯追求长周期运行。中国石化集团公司所属某石化企业的两台 410t/h 紧凑型循环流化床锅炉, 自 2003 年 12 月开始建成投产近 4 年多以来, 经过实施多项技改措施和不断优化调整工况, 使锅炉处于良好的运行状态。最长连续运行时间已达到 450d, 平均炉子负荷率大于 100% 最大连续额定功率, 平均锅炉热效率大于 91%, 锅炉脱硫性能良好, 平均烟气中 SO₂ 浓度小于 400mg/L, 符合国家烟气排放标准。为了实现长周期运转, 他们主要解决了锅炉运行中存在的床压高、冷渣器排渣能力低和水冷壁管等锅炉内部磨损等问题。

总之,通过实施多项切实有效的技术改造和优化调整工况,提高了国内石化企业的几套大型 CFB 锅炉的运行可靠性,满足了炼厂供热、供汽的要求。而正是由于实现了高运行可靠性,才能保证锅炉的高效率。

2.2 具有高环保性

前已指出 CFB 锅炉清洁燃烧的主要优点是可实现节能减排,尤其在减排方面具有良好的脱硫、脱硝(NO_x)性能。CFB 锅炉的炉膛温度低于常规煤粉炉,因此其脱硝性能是毋庸置疑的。根据《GB 13223—2003 火电厂大气污染物排放标准》国家标准,我国 CFB 锅炉烟气二氧化硫最高允许排放浓度是 $400\text{mg}/\text{m}^3$ (标准),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,烟气中 SO_2 平均浓度可达到 $400\text{mg}/\text{L}$ 以下。如果有更高脱硫要求(如要求 CFB 锅炉烟气中 SO_2 浓度小于 $200\text{mg}/\text{L}$,或者当地环保条例有特殊要求),则可采取二级脱硫措施。美国联邦法要求新建电站锅炉排放标准要

逐步达到基于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,该措施最早在美国 JEA 电厂实施的,我国新建的几套 CFB 锅炉(如燕山石化等)也有采用了该技术。表 5 是美国 JEA 电厂 $2\times 300\text{MW}$ 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%的情况下,锅炉的热效率为 91.7%,烟囱 SO_2 排放浓度为 $135\text{mg}/\text{m}^3$ (标准),烟囱 NO_x 排放浓度为 $86\text{mg}/\text{m}^3$ (标准)。也有观点认为,既然如此,是否可采用将石油焦在煤粉炉中燃烧再加上烟气脱硫处理方案。要注意的是,石油焦的燃烧特点是灰分少、挥发分不多、固定炭含量高、热值高。与煤比较,石油焦着火较难、燃烧速度慢、燃烧性能相对较差。石油焦燃烧时第一阶段燃烧很快,第二阶段十分缓慢,因此,在作常规 PC 炉燃料时会出现灰渣太少和燃烧不透的现象,尤其是煤焦混烧时更容易产生这种情况^[1]。

表 5 美国 JEA 电厂 $2\times 300\text{MW}$ 循环流化床锅炉运行参数和污染物排放的实测值

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/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	905	840	905
硫含量,%(质量分数)	4.84	5.86	3.17
高位热值/ $(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	29.96	30.84	27.15
锅炉效率 ^② ,%	90.6	91.7	88.3
石灰石流量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	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(标准)/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	290	340	340
烟囱 SO_2 排放浓度(标准)/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	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 (标准)/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	91	86	106
CO(标准)/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	32	20	24
不透明度,%	1.1	1.8	1.5
固体颗粒 PM10(标准)/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	5	5	2.3

注:①目前锅炉用 80%石油焦和 20%煤进行混烧;②以低热值为基础的锅炉效率要高 2%~4%。

2.3 高经济性

对 CFB 锅炉的一个基本要求是高经济性,主要有以下两方面的要求。

2.3.1 高发电效率和高锅炉热效率

在发电厂中燃煤 CFB 锅炉发电效率一般可达 38%~45%(蒸汽为亚临界态参数为 16.5MPa 、 550°C ,到高临界态参数为 32MPa 、 595°C)。发电效率和常规 PC 炉基本相同,比热电一体化气化联合循环(IGCC)

工艺的效率稍低,见表 6。但在石油、石化行业中,CFB 锅炉的主要功能是汽、电并发,以汽定电,与发电厂大型锅炉相比是有差别的。从节能角度分析,提高 CFB 锅炉热效率更为现实。

国内石化系统最早投用的几套 CFB 锅炉的焦燃净率不是很高,表现在飞灰含炭量较高。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,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飞灰含炭量问题得到解决,炉子燃烧效率可高达 95%~99%。

表 6 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
常规 PC 炉+FGD(粉灰)	38	100
循环流化床(CFB)	38	98
增压流化床(CFBC)	42~43	108
热电一体化气化联合循环(IGCC)	43~45	120~150

2.3.2 低设备投资

如表 6 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,设备国产化程度加大,单位投资水平已有一定程度的下

降。

3 结语

总之,采用高硫石油焦循环流化床锅炉清洁燃烧技术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,而且提升了炼厂经济效益和竞争能力,同时也符合我国国民经济新世纪的节能减排重大战略方针。

参考文献:

- [1] 瞿国华.延迟焦化工艺与工程[M].北京:中国石化出版社, 2007:1-49.

(编辑 周溪华)

Clean-burning Technology of Circulating Fluidized Bed Boiler with High-sulfur Crude Coke

Qu Guohua

(Shanghai Petroleum Society, Shanghai 200025)

[Abstract] The paper discusses the clean-burning technology of circulating fluidized bed (CFB) boiler with high-sulfur crude coke in refinery, and the higher level for the operation of CFB boiler in China's petrochemical system. The paper also points out that the technology not only provides a solution to the large number of high-sulfur crude coke from delayed coking unit processing inferior oil, but also accords with the important strategic policy of our national economy in the new century—energy saving and emission reduction.

[Keywords] crude coke; circulating fluidized bed (CFB) boiler; reliability; environment friendly; efficiency

· 广告目次 ·

封面: 山东鲁阳股份有限公司

封底: 胜利石油管理局钻井工艺研究院

封二: 烟台冰轮股份有限公司

封三: 上海伊索热能技术有限公司

前插 1: 贺尔碧格(上海)有限公司

前插 2: 奥林能源上海代表处

前插 3: 安徽天大石油管材股份有限公司

前插 4: 华能无锡电热器材有限公司

前插 5: 广州学府设备管理工程顾问有限公司

前插 6: 北京燕山嘉恒电力工程有限公司

前插 7: 丹东华通测控有限公司

前插 8: 江苏中圣高科技产业有限公司

后插 1: 北京光华启明烽科技有限公司

后插 2: 2008 中国(东营)国际石油装备与技术展览会

后插 3: 第三届上海国际石油石化天然气技术装备展

后插 4: 中国石化出版社