

823967

FEITENGRANSHAOGUOLU
WENJI

5842

7167

沸腾燃烧锅炉文集

马国卿 田子平 主编

12

67



劳动人事出版社

内 容 提 要

本书是一本论文集,以有关沸腾燃烧学术讨论会的部分论文为主体,并征集近两年的新论文,介绍国内外发展概况,冷热态试验研究,设计、制造、运行方面的经验,几种典型的沸腾燃烧锅炉,防止磨损、提高效率、综合利用、减轻污染方面的成果等。

本书可供从事沸腾炉试验研究、设计、制造,运行方面的有关人员参考。

沸 腾 燃 烧 锅 炉 文 集

马国卿 田子平主编

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

河北省故城县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 1/16开本 15印张 384千字

1986年12月北京第1版 1986年12月河北省故城县第1次印刷

印数: 1—2700 册

书号: 15238·0174

定价: 3.50元

前 言

沸腾燃烧是一项正在迅速发展的新技术。沸腾燃烧锅炉具有高的传热和放热效率；煤种适应性强，特别是能燃用多灰分低热值高硫分的劣质煤；沸腾床温低，能有效地脱硫除硝，有利于减轻对大气的污染等优点，已日益引起国内外的重视。

我国从1964年起，近20年来，在沸腾燃烧的研究和实践方面都取得了很大成绩。目前全国使用的沸腾燃烧锅炉已为数不少，蒸发量小至0.5吨/时，大到130吨/时，能燃用各种各样的劣质燃料。在能源紧缺的今天，这类锅炉对促进工业的发展将起到一定的作用。

本文集是以第一次沸腾燃烧学术讨论会的论文为主体，并征集了近几年来关于运行实践方面的文章，涉及的面有：国内外发展概况；综合性论述；冷热态试验研究；设计、制造、运行方面的经验；几种典型的沸腾燃烧锅炉；防止磨损，提高效率，综合利用，减轻污染方面的成果等。

本文集在征稿、汇编过程中，得到全国有关专家、学者热情的支持和帮助，提出了不少宝贵意见，我们深表感谢。

本文集由劳动人事部锅炉压力容器安全监察局高级工程师李毅和江西省劳动人事厅锅炉处工程师马国卿发起征稿；由马国卿工程师和上海发电设备成套设计研究所田子平工程师负责主编；由哈尔滨工业大学秦裕琨副教授和清华大学张绪祎副教授审阅。

编 者

1984年4月

74000/06

目 录

沸 腾 燃 烧 的 发 展

上海锅炉厂 萧庆穆..... (1)

我国沸腾燃烧锅炉发展中应注意的问题

哈尔滨工业大学热能工程教研室 程 韧..... (11)

沸腾燃烧锅炉试验研究的进展

上海发电设备成套设计研究所 田子平..... (20)

沸腾燃烧是利用劣质燃料的有效途径

华中工学院燃烧研究室 林志杰、刘焕彩..... (44)

提高沸腾炉燃烧效率的几个问题

重庆大学 王致均、王维东、刘 石..... (58)

提高沸腾燃烧效率的途径

上海工业锅炉研究所 王介泉..... (69)

严格控制筛分范围和运行参数是提高锅炉效率的有效方法

江西锅炉厂 陈应明..... (83)

对沸腾炉埋管受热面影响因素的分析

哈尔滨工业大学热能工程教研室 范柏樟..... (86)

沸腾燃烧锅炉的埋管受热面积和燃烧份额的关系

哈尔滨工业大学热能工程教研室 陆慧林、秦裕琨、陈崇枢..... (94)

劣质煤沸腾燃烧锅炉的沸腾层燃烧份额

上海同济大学机械系热工教研室 张鹤声

上海工业锅炉研究所 汤志贤..... (101)

大颗粒低速浅循环床流化特性的实验研究

西安交通大学动力工程一系

温 龙、黄祥新、张永照、俞建洪、张建民、惠世恩..... (113)

试论电站沸腾燃烧锅炉的几个技术问题

广东江门甘蔗化工厂 郁云龙

上海发电设备成套设计研究所 田子平..... (118)

褐煤沸腾炉

哈尔滨工业大学 鲍亦令、杨明新、杨历丹、秦裕琨..... (123)

防止沸腾锅炉磨损的技术措施

江西省劳动人事厅 马国卿..... (131)

关于沸腾炉埋管的磨损及其防止措施

东方锅炉厂研究所 鲍栋文、阮奕绍..... (138)

沸腾燃料破碎——干燥——气力分选试验台进展和沸腾燃烧试验台设想

水电部西安热工研究所 还博文、朱桂根..... (142)

可作调峰负荷运行的电站沸腾燃烧锅炉

上海发电设备成套设计研究所 田子平..... (158)

35吨/时沸腾锅炉燃烧低热值石煤

益阳石煤发电综合利用试验厂 李普生 刘定宇..... (162)

20吨/时前后串接两床沸腾锅炉的运行特性分析

浙江省电力试验研究所 吴德诚、李建中..... (170)

双床沸腾炉初步分析

杭州余热锅炉研究所 许晋璇..... (178)

并联灰床沸腾燃烧锅炉探讨

福建省泰宁合成氨厂 王茂春..... (188)

12吨/时沸腾炉总结

江西省东乡化肥厂 向时义..... (200)

SHF10-13W型沸腾燃烧锅炉技术小结

福建省厦门橡胶厂 许作长..... (207)

SHF35-39/450型沸腾锅炉点火和燃烧控制

江西锅炉厂 沈治平..... (217)

沸腾燃烧锅炉炉渣的综合利用

南票矿务局..... (221)

美国沸腾炉研制概况

上海发电设备成套设计研究所 田子平..... (231)

沸 腾 燃 烧 的 发 展

上海锅炉厂 萧庆穆

内 容 提 要

本文介绍了沸腾燃烧锅炉的特点和几个主要工业国家的试验情况,采用沸腾燃烧对我国燃料利用、能源节约和环境保护等方面会起积极作用。

一、概 况

沸腾燃烧用于锅炉燃烧方面,还是五十年代的事,是现代锅炉燃烧方式中的一项正在发展的新技术。其特点是使用具有一定压力的空气,自炉床下部,经过特制的布风板或风帽吹入炉室,在足够的气流速度下,将炉床上的碎煤粒托起。这些煤粒与周围的粒子接触时,发生强烈的碰撞,不断交换位置,使表层煤粒出现上下翻滚的现象,形似液体沸腾状态,因此名为沸腾燃烧。由于在沸腾过程中,煤粒有充足的机会与空气、已燃烧的煤粒接触、混合,引燃着火快,燃烧效率高,其放热与传热速率,远远超出于一般燃烧方式所能获得的效果之上。同时炉内蓄热量极大,通常可使炉床灰渣中的可燃物含量降低到1%以下,燃用多灰、多水的劣质煤和一般不适宜在现有机组上燃烧的燃料,提供了特殊有利的燃烧条件。当前几乎世界各国都在积极努力从事这方面的工作,并已取得相当富于实际成果的进展。

沸沸燃烧具有下列突出的优点:

1. 对煤的种类、灰分和水分的适应性很广,能烧在一般锅炉上不能燃烧或不利于燃烧的高灰分或高硫分劣质煤。如矸石、浮选尾煤和煤泥等,为节约和充分利用燃料资源开辟了一条新的重要途径。

2. 沸腾燃烧原是一种受控的低温燃烧。由于炉床内温度较低,烟气中的碱金属盐类释放量小,可以减轻锅炉受热面腐蚀和结渣等不利因素和影响。同时也避免了产生只有在高温条件下才能形成的氧化氮,有利于改善对大气的污染。

3. 含硫量高的煤采用沸腾燃烧运行时,只要在燃用的碎煤中添加适量的石灰石或白云石,就可大量降低排烟中的二氧化硫含量,有效地达到防止污染大气的目的。不需要煤粉炉在锅炉尾部的烟道中装设庞大的烟气脱硫净化装置。

4. 沸腾燃烧具有很高的放热率,可以大幅度地减少锅炉受热面,还能节约磨煤费用和电站的基建投资。与普通煤粉炉相比,锅炉受热面可减少30%,体积可缩小三分之二,造价可降低15%,运行费用可节约25%。

5. 提高送入沸腾炉中的空气压力,即增压沸腾燃烧。增压沸腾炉是用燃气轮机与燃煤系统直接结合,组合联合循环,用沸腾炉的燃气驱动燃气轮机,而产生蒸汽则推动蒸汽轮机,其综合煤耗可比一般的蒸汽循环系统降低5~10%。美国威斯汀豪斯电气公司研究结果认为:燃烧压力为10大气压的66万千瓦沸腾炉的体积,仅为同容量煤粉炉的1/6,造价可降低29%。

6. 沸腾炉的灰渣具有“低温烧透”和较佳抗腐蚀性的结构特点,可用以作水泥等建筑

材料，也可作为沥青和塑料的填料以及制砖铺路等。此外，灰渣尚有各种综合用途，如提取聚合氯化铝，炼制稀有金属钒和生产肥料等。

二、沸腾燃烧锅炉的特性

1. 半沸腾炉——最早投入使用的沸腾炉，是由炉排炉派生出来的燃用多灰分燃料的“流化”锅炉。这种锅炉是在一般链条炉的基础上将炉篦稍加更改，装上一些蘑菇形的风帽，用具有相当压力的空气自炉篦下风箱经风帽两侧小孔吹入炉内，托起煤粒，造成沸腾燃烧。炉篦两旁堆积有赤热的倾斜料堆，积蓄起一定热量，为引燃提供有利条件。燃烧温度在 $1100\sim1200^{\circ}\text{C}$ 之间。在沸腾床中，多灰的燃料部分燃烧，部分气化，而产生的低热值气体，汇同二次空气在炉室上部再燃。煤灰以半熔融状态结成焦块，由床层下的链式炉排带往一端，然后排入灰斗。灰篦倾斜布置，下部为分段送风，尾部区域送风压力较低，形成局部层状燃烧，故有半沸腾炉之称。如果适当控制送入沸腾床中的一次空气量，也能在灰熔点以上温度、灰渣呈凝聚的状态下安全运行。半沸腾炉实际上是一种采用“流化床”燃烧装置的常规锅炉，它的传热过程与普通锅炉没有显著差别。

2. 全沸腾炉——它是在半沸腾炉的基础上发展起来的，吸取了风帽炉篦沸腾燃烧的优点，同时也克服了后者的一些缺点。这种锅炉不用结构复杂的倾斜炉篦，而是采用一水平固定的多孔布风板来代替。空气自炉下分段风箱内经多孔板吹入炉室，使堆积在炉床上的煤粒和惰性物质呈高度涡流状，沿炉床截面全面沸腾。层床厚度通常为 $0.5\sim1.0$ 米，沸腾速度为 $0.3\sim4.0$ 米/秒。燃料粒度为 $1.5\sim6.5$ 毫米。飞灰通过炉膛后由旋风式除尘器捕集，然后经布置于炉床上部的喷嘴，均匀喷入炉内循环再燃。炉床上的灰渣仍由炉下排出。

沸腾层内的温度控制在 $750\sim950^{\circ}\text{C}$ 之间，即低于灰熔点的温度，这样便可以避免灰分溶解或烧结而破坏沸腾。控制床温的办法是在沸腾层内埋设水管，吸收炉内热量。埋设的冷却水管也就是锅炉受热面的一部分。由于沸腾燃烧的传热效率高，可以借此节省大量钢材。如用空气冷却炉床，产生的热风也可用于烘干燃料与供燃烧之用。

全沸腾炉显然优于半沸腾炉。按照进入燃烧室内空气压力的大小，全沸腾炉又可分为常压沸腾炉和增压沸腾炉两种。在常压沸腾炉内，燃烧是在大气压力或接近于大气压力的情况下进行；在增压沸腾炉中，燃烧却是在相当大的压力下（例如10个大气压），在一密闭的容器内进行的。它特别适用于大容量机组。采用增压沸腾炉的电站，实际就是一个蒸汽——燃气联合循环的燃烧系统装置，它具有蒸汽轮机和燃气轮机的双重特点。不过通常的联合循环系统都需要燃用轻油或天然气。增压沸腾炉不仅能燃劣质煤，并且它的发电热效率还比单独的蒸汽或燃气系统高出很多，据称可达40%以上。

由于各国共同努力的结果，尤其是英美两国的密切合作，使常压沸腾燃烧锅炉机组已接近于走向商业化的阶段。但增压沸腾燃烧锅炉的发展，尚有不少技术问题，主要是取决于它是否能成功地与燃气轮机联合使用。

三、几个主要工业国家对沸腾燃烧的研究情况

1. 英国——英国中央电力局早在六十年代初期，就已着手对沸腾燃烧在实际应用方面进行研究，他们对常压和增压的全沸腾炉在技术上做了大量工作，曾先后建造了十余种各种小型试验装置，用以了解和研究沸腾燃烧技术，取得必要的数据和经验以及评定工业应用的可能性等。试验结果证明：通常在电厂中无法燃用的劣质固体燃料和液体燃料，都可以在沸腾炉内正常燃烧。

1974年，拔柏葛公司将所属耐佛鲁（Renfrew）厂的一台抛煤机锅炉改装成沸腾

炉，于1975年正式投产，一年后即已成功地运行了3000小时以上。这台锅炉的炉床面积为9.3米²，蒸气压力为82公斤/厘米²，气温293℃。它是用来扩大较小试验台上所获得的知识，并确定更大锅炉的设计参数的。它的系统结构，如图1所示。

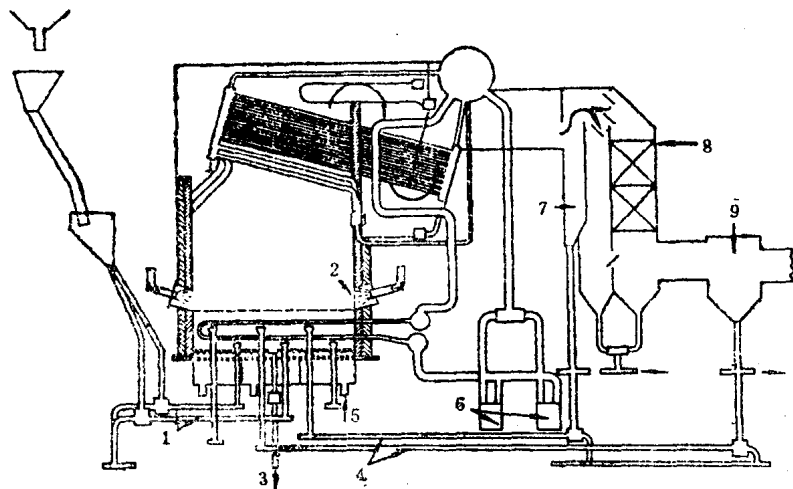


图1 英国投伯葛公司的沸腾燃烧锅炉

- 1 燃煤喷管 2 重油点火燃烧器 3 排渣口 4 飞灰回燃管道
5 空气入口 6 循环水泵 7 粗灰捕捉装置 8 省煤器 9 除尘器

燃烧的沸腾速度为1.22米/秒时，锅炉蒸发量为9吨/时；沸腾速度达到最大值2.44米/秒时，蒸发量为18吨/时，与此相对应的发电量为4000千瓦。锅炉能烧灰分为25~80%的劣质煤，即使灰分达60%以上，燃烧仍是易于操作和控制的。沸腾床内埋有水平的“U”型蒸发管束，50~60%的热量由此管束吸收，其余热量则自烟气直接传予对流热面。锅炉燃用较粗的煤粉（3毫米的占95%），尾部烟道中沉降的灰粒与除尘器中捕获的飞灰，由气力管道输送至炉下，经布置炉床内的喷嘴，均匀喷回炉室再燃烧。

该试验炉为大型工业锅炉的设计提供数据，其研究项目包括：点火、负荷调节、使炉温保持均匀的方法，燃料的颗粒度和给煤装置，沸腾速度，排渣和飞灰的损失，传热效率，腐蚀和磨损，脱硫与消除氧化氮等等。

通过这一试验，所有在小型试验装置上作出的有关传热、脱硫和燃烧效率等的预测都已得到证实。英国对常压沸腾锅炉的未来是充满信心的，尤其在燃烧范围的广泛适应性方面，更是认为这种燃烧方法已具备良好的商业和技术基础。

虽然如此，英国机械工程学会认为，在英国大型电站锅炉上采用沸腾燃烧，还须做不少工作。不过许多经济指标的论证指出，电站沸腾燃烧锅炉今后可能在降低发电成本方面起到重大的作用。

有关增压沸腾燃烧，英国煤炭研究院曾在莱塞海德实验室建立了一台1500千瓦机组的试验性增压沸腾炉，一直在为美国能源研究发展署及其他单位提供有关增压沸腾炉特性的重要资料。煤炭利用研究协会也建立了一台2000千瓦机组的试验性增压沸腾炉，炉内燃烧压力为6大气压，用于燃气——蒸汽联合循环发电装置。

在国际能源协会（IEA）的发起下，以英国的经验为基础，美国、联邦德国和英国三国合作，在英国格利姆索普（Grimsthorpe）建造一台85,000千瓦的直流沸腾炉，其总体

布置情况见图2。该炉燃烧三个国家的不同煤种，并在常压及增压（10大气压）下运行。

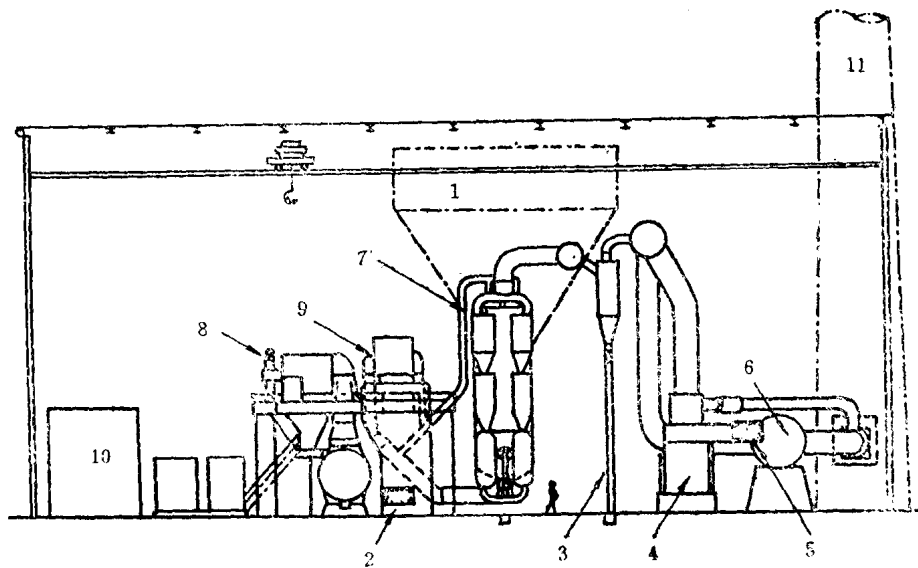


图2 沸腾燃烧试验厂

1 煤仓 2 主空气吸入口 3 烟气净化系统 4 最后投入试验的燃气轮机位置 5 燃气轮机空气入口
6 废热锅炉 7 压力燃烧装置和给煤装置 8 汽轮机 9 压气机 10 控制室 11 电厂烟囱

设计中考虑加装一台燃气轮机，组成燃气——蒸汽联合循环。曾在各种操作条件和燃烧不同煤种的情况下，研究下述问题：

- (1) 在高压下试验沸腾燃烧系统的燃烧、热交换、烟气净化、腐蚀和能量回收等。
- (2) 在广泛运行条件下精密测定燃烧装置的详细数据。
- (3) 提供分析模化数据，对试验机组上获得的结果进行推广，以协助取得工业性大型组的设计资料。

关于沸腾燃烧锅炉中使用的金属材料问题，英国国家煤炭委员会进行过研究，对广大范围内的22种锅炉合金（包括铁素体、奥氏体、钴基和镍基）和16种汽轮机合金（包括一些涂覆试样）进行了两次1000小时的试验。试验是在一种特殊设计的0.3米方形燃烧室中进行的，燃用美国的高硫煤。沸腾床的燃烧温度为900°C，过量空气10%，床中埋管的金属温度保持在540~850°C之间。燃烧室操作自动化，可以在最少的监督下进行长期试验。

试验的目的在于选择一批抗腐蚀性能良好的合金来作进一步的长期试验，以便最后选出适宜于沸腾炉上使用的材料。有较多的合金是适合在650°C的金属温度下工作的。即使在炉床温度达900°C和金属温度达850°C的情况下，也有足够数量的金属表明能适于制造炉床埋管。

2. 美国——美国曾做过许多埋管沸腾床的燃烧试验，证实锅炉管埋置于沸腾床中，其传热远比辐射和对流的传热效率高。根据他们的经验，认为直接采用沸腾燃烧的电站锅炉，其容量可能达到120万千瓦。

美国能源研究发展署于1976年底，在里维斯维尔（Rivesville）建成一座采用常压沸腾燃烧的试验性电站，试验多种燃料的燃烧。

该炉共有A、B、C、D四个沸腾燃烧室，如图3所示。三个为主燃烧室，一个为飞灰燃烬室，炉室四周都由膜式水冷壁组成，各室之间则用水冷壁隔开。燃烧室的沸腾床面为 3.5×3.6 米²，其总布风板面积为 44.6 米²。炉室的长为 11.6 米，宽 3.65 米，高 7.6

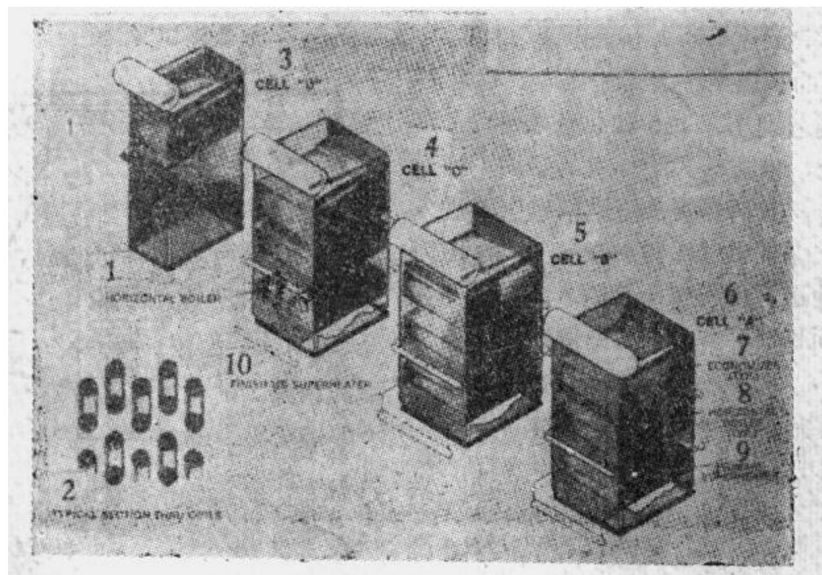


图3 里维斯维尔示范装置

1 水平蒸发管束 2 管圈的典型断面 3 D炉室 4 C炉室 5 B炉室
6 A炉室 7 省煤器 8 水平蒸发管束 9 一级过热器 10 末级过热器

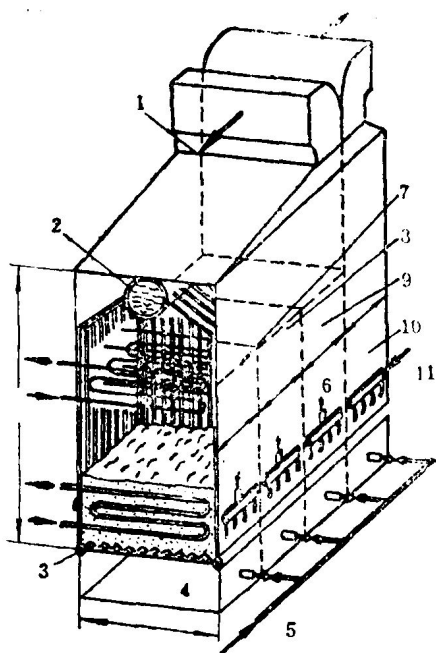


图4 里维斯维尔3万千瓦沸腾炉结构示意图

1 到除尘器 and 空气预热器去的 380°C 烟气 2 汽包
3 水冷壁管集箱 4 风室 5 预热空气 6 煤与石灰石的气力输送管 7 一级过热器室 8 末级过热器室
9 蒸发管束室 10 飞灰燃烬室 11 煤与回收飞灰

米。锅炉额定蒸发量为 136 吨/时，蒸气压力 9.2 公斤/厘米²，气温为 496°C ，相当于 $30,000$ 千瓦的功率。在满负荷工况下，三个主燃烧室的燃煤量为 12.7 吨/时。主燃烧室的沸腾层中都埋有水平蛇形受热管组，埋管的吸热量均占总吸热量的 50% 。A、B、C炉室中的受热面分为上、中、下三组布置，最上面一组为省煤器，中间一组为蒸发管束，下面一组为埋管。选择这样的连接系统，是为了确保锅炉的低负荷特性。炉室中的埋管为一级过热器，炉室B中的为末级过热器，炉室C中的蒸发管束，炉室D的容积较小，其中没有埋管，只有最上面一组省煤器，该室主要是用来燃烬回收飞灰中的可燃物的。为保证水平管束内具有适当的流速，在下降管系统中装有两台强制循环水泵。

前三室中的燃烧温度均设计为 850°C ，唯第四室中的为 1100°C 。由旋风式除尘器内分离出来的含炭量约为 $10\sim 15\%$ 的飞灰，以 25% 的过量空气系数与碎煤一起引回D室再燃。每

一主燃烧室的下部都装置有8根碎煤和石灰石混合后的加料管，可以单独调节进入每一燃烧室的燃料和空气量，从而可以将前三室内的燃烧温度维持在最佳的脱硫温度——850℃。

这台实验装置是用来验证一台20万千瓦装置的，经过十个月的调整改进，成功地达到了额定满负荷。图4为这台锅炉的结构示意图。试烧的结果表明，锅炉的放热率能成功地达到现有烧煤炉室放热率的10倍以上，同时可以降低运行费用25%。

锅炉房中的加煤系统表示于图5。煤和石灰石被破碎到分别小于13和3毫米的粒度后，存入储仓，借旋转式给煤机的帮助，送进一公共落煤管，然后经管部下端的锁气器进入振动分配器，在此由0.14公斤/厘米²压力的压缩空气输送至沸腾床下部喷入。A、B、C三室均为双面供料，仅D室为单侧进煤。

除此以外，在锅炉系统中还有重要的脱硫剂循环使用系统。该系统可以控制石灰石的尺寸和每个炉室中的石灰石存料（见图6）。炉渣自炉室底部经旋转式卸料机排至公用的振动输送机，再由此进入筛选分粒器，将大于3毫米的灰粒排至水冷却器中，经冷却后排出厂外。大部分颗粒适度的灰粒通过气力输送至旋风分离器，然后落入煤仓，重复返回到各炉室中去。但灰粒也可在被气力送回之前由旁路直接排走，不再进入循环系统。整个除灰和回收系统都是按照可以处理床粒最高温度达1100℃而设计的。

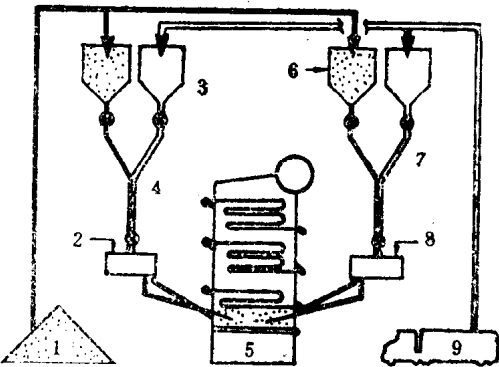


图5 沸腾炉燃料喷入系统

- 1 煤堆 2 输送空气 3 旋转式给料机
- 4 旋转式锁气器 5 风室 6 煤斗
- 7 石灰石料斗 8 振动分配器 9 石灰石堆

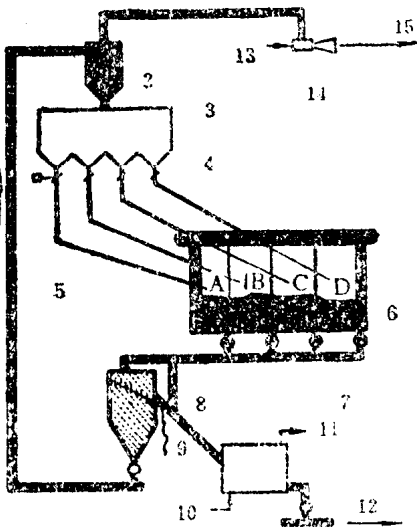


图6 料床再循环系统

- 1 床料再循环 2 旋风分离器 3 床料仓 4 流量控制阀
- 5 床料的重力返回管 6 旋转卸料机 7 振动输送机
- 8 排灰旁路 9 超限颗粒床料 10 冷却水入口
- 11 冷却水出口 12 超限颗粒排放送后干燥处理
- 13 蒸气 14 真空抽气器 15 至静电除尘器

沸腾炉的空气和烟气系统与常规电站锅炉采用的方式基本相同，但自炉室排出的烟气，在未装任何净化设备的情况下，其中二氧化硫与氧化氮的含量，都能完全符合环境污染监督局的标准。从根本上解决了这些有害气体对大气的污染问题。

这台沸腾炉运行情况良好，燃烧稳定，能适应负荷变化，并可与汽机保持协调运行及实现自动控制。在试运转过程中，虽曾多次因故停炉，但这都是由于改进给煤与回收系统或其他设备之故，与沸腾炉本体并无直接关系。然而不幸该示范性沸腾炉于1978年8月发生一次重大事故。问题出现在空气预热器及其以后的设备中，由于大量含炭的飞灰积存在空气预热器及后部烟道中，以致着火燃烧，将空气预热器完全烧毁，电气除尘器及引风机也被烧坏。这次事故使当时世界各国密切注意的美国沸腾炉发展计划受到了不小影响，不得不向后

推迟一年左右。

1976年,美国能源研究发展署与科蒂斯——赖特公司签订了一项合同,在新泽西州的伍德——里奇(Wood-Ridge)建造一座采用增压沸腾燃烧锅炉的工业性联合循环试验电站,将燃烧含硫量大于3%的煤,与燃气轮机联合运行。这一机组的循环系统,如图7所示。

控制沸腾床燃烧温度的方法,是在沸腾床中埋设用空气作冷却介质的管式热交换器,以吸收炉床热量。由燃气轮机带动的压气机中出来的压缩空气,约有 $1/3$ 流量用于沸腾炉床燃烧,其余 $2/3$ 部分则用作控制炉床温度的冷却介质。当冷却空气在热交换器内被加热至接近炉床温度(856°C)后,在尚未进入燃气轮机之前即与自炉室中引出的、经净化后的可燃气(900°C)混合。由于引进了大量空气,避免了在直接燃烧的过程中,使透平叶片遭受来自燃气流中的微粒及碱盐的侵蚀与热腐蚀作用,从而有利于延长透平叶片的使用寿命。此外,采用空气热交换器,尚可简化设计及其控制系统,并获得较高的联合循环热效率。

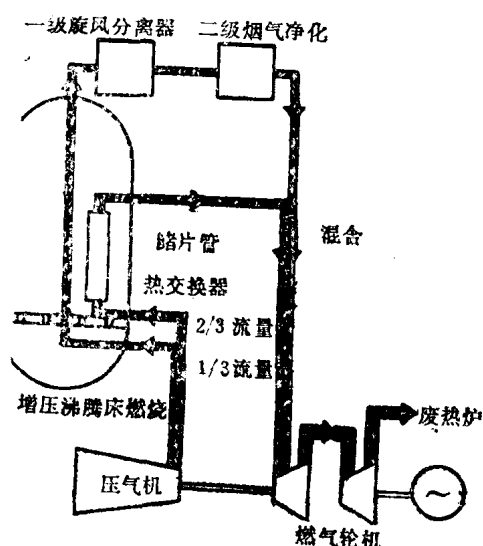


图7 增压沸腾炉
与燃气轮机联合循环系统图

燃气轮机与一只独立的动力透平结合在一起,而动力透平又与一发电机连接,产生约占这一联合循环装置 $2/3$ 的发电量。高温气流自燃气轮机排出后,通向一不需加燃料的废热锅炉,利用锅炉所生蒸汽推动另一汽轮发电机组。全部装置的其余 $1/3$ 发电量,则由该蒸汽循环系统发出。

燃气轮机的压力比为7:1,进口燃气温度为 870°C 。

埋置于炉床中的内外均带鳍片的直立管式热交换器,是用高级合金钢材精密铸造而成,其目的是为使它具有较大的传热面积与较长的使用寿命。这些热交换器都由一布风板支承。压缩空气从板下穿过均匀分布于板面的小孔射入炉室,形成沸腾燃烧。筛过的碎煤粒与吸收剂通过承压的密闭储料斗及输送系统,分别给予计量后,才由空气喷入炉床燃烧地带。采用间歇地从炉床底部排除灰渣的方式,可以保持沸腾炉床的厚度不变。排出的灰渣先送至冷却器,再进入一封闭灰斗,以备定时排出。随燃气自炉床带走的飞灰,将由两级高效率的旋风式除尘器予以捕集。从第一级除尘器中分离出来的粗灰,将被送回沸腾炉室循环再燃。燃气经过高度净化后与热空气混合,然后进入燃气轮机。联合循环电站的简化流程图,如图8所示。

设备启动之前,须先使用燃烧液体或气体燃料的辅助燃烧器来发动燃气轮机,并且另一辅助燃烧器来加热沸腾炉床。当炉床温度升高至足够程度时,可将煤喷入,使煤粒着火燃烧,待燃煤进入量增至满负载后,逐渐关闭辅助燃烧器。

采用上述联合循环系统所产生的全部电力,其热效率可高于40%。无论与单独的燃气循环或蒸汽循环系统任何一种比较,都将远超出它们之上。

设计沸腾燃烧的燃气——蒸汽联合循环电站,其基本条件:一是要求能燃用高硫燃料,但排烟中的氧化氮、二氧化硫及微粒含量,都必须满足环境保护机构允许逸出的规定;二是

3. 德意志联邦共和国——在联邦德国由于燃料所处的特殊地位和电站锅炉在燃用化石燃料方面已能达到较高的水平之故，沸腾燃烧的各种有利因素在经济上所产生的刺激作用相应减小，曾一度使沸腾燃烧锅炉的研究发展受到限制。1976年以前，仅有联邦德国煤矿研究中心在小型的试验装置上进行过一些沸腾燃烧的试验研究工作，而且性质往往还是针对某种特殊市场或某种燃烧的。但近来因环境保护的要求日趋严格，同时更重要的是考虑到今后应如何更经济合理地使用那些储量很大而又含有较多有害惰性物质（如硫、碱等）的劣质燃

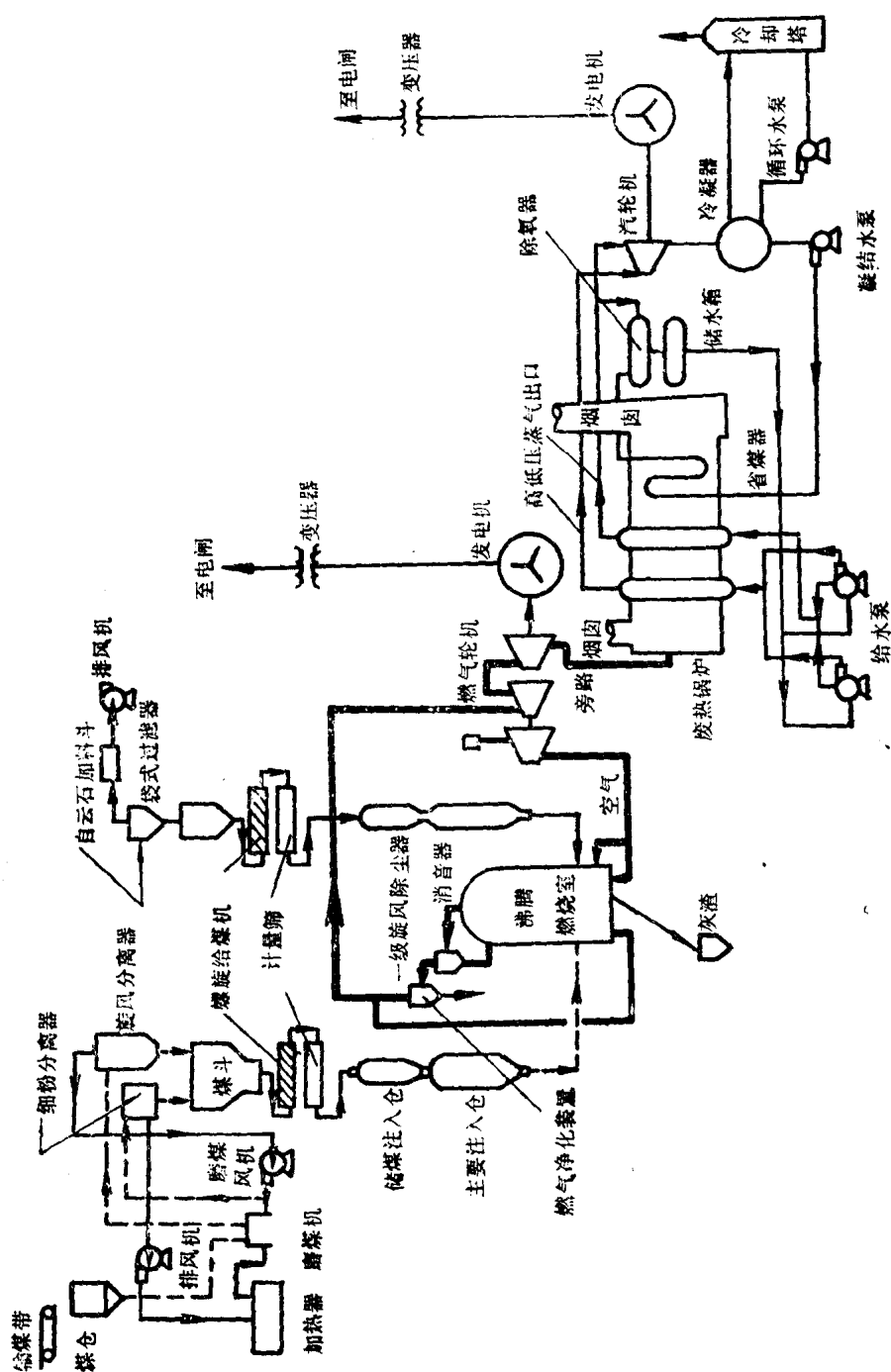


图 8 联合循环电站简化流程图

料问题，沸腾燃烧才开始获得较快的发展。

根据联邦德国过去在实验室及半工业性试验台上所积累的经验，决定先在一台35000千瓦的试验机组上进行常压燃烧的示范性验证。在联邦研究技术部（BMFT）的支持下，这台机组由鲁尔煤业公司装在杜塞道尔夫电力公司的弗林葛（Flingern）电站，已于1978年底投入运行。

联邦德国的埃森采矿研究公司和多塞尔多夫联合锅炉厂合办的沸腾炉 联管（AGW）在蔡赫、汉尼尔的史坦（Steng）电站建立了一台30000千瓦的增压沸腾燃烧试验机组，设计的主要目的是验证增压沸腾炉对3000~4000千瓦的燃气轮机循环在长期运行中的经济性。它的循环系统如图9所示。

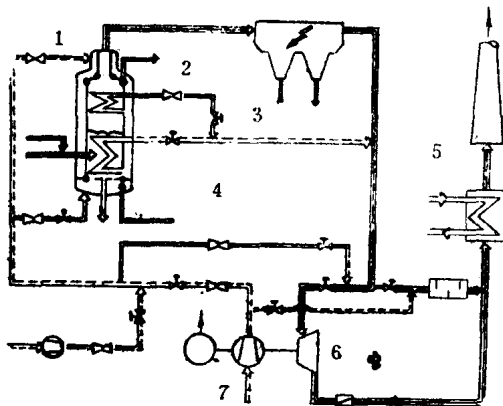


图9 AGW试验装置的系统图

- 1 压缩空气入口 2 电气除尘器 3 热空气
- 4 沸腾炉燃烧室 5 废热锅炉 6 燃气轮机
- 7 空气压缩机

来自空气压缩机的压力为4.5大气压的空气分为两路：一路作为燃烧空气直接送入沸腾炉床；另一路则进入埋设在沸腾床中的热交换器以控制炉床燃烧温度。经加热后的热空气，与经电气除尘器净化后的约860℃的沸腾炉燃气混合，然后过入燃气轮机。从燃气轮机排出的废气通向废热锅炉。该系统与美国科蒂斯——赖特公司的试验装置基本相同，但在增压沸腾燃烧室外壳的设计方面，则有其独创之处。为了使热应力和压应力分开，采用了双层套壳的设计结构。图10为双层燃烧室的示意图。外层套壳虽然承受总的负荷压力，但温度不高；炉膛内层套壳有水管冷却，其强度只须能承受空气入口处与燃烧室空间的压差即可。埋设在沸腾床中的空气热交换器采用高镍铬合金钢材制造，并按照沸腾燃烧的温度设计。

以上的试验装置是由联邦德国单独进行的。除此以外，尚有由联邦德国与英、美三国联合投资，建造在英国格利姆索普的一台研究机组，主要为研究与验证增压沸腾炉的蒸发受热

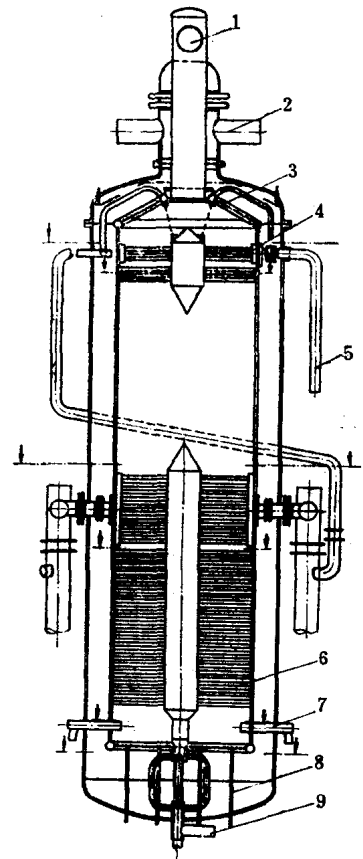


图10 AGW试验装置的沸腾燃烧室

- 1. 燃气出口 2. 空气入口 3. 冷却水管
- 4. 上部热交换器 5. 热空气出口 6. 下部热交换器
- 7. 燃烧器 8. 煤和石灰石入口 9. 排渣口

面在运行参数改变时的特性。

4. 日本——日本因受能源限制的关系，电站锅炉一直是以石油为主要燃料，烧油的约占火力发电总量的85%以上。但是自从1973年发生石油危机以后，也不得不开始研究扩大用煤的问题，尤其是沸腾燃烧，客观上就存在着对日本极为有利的发展因素，因此，在工业和科研方面很快便引起了广泛的注意。各有关单位曾多次派遣代表团出国考察，与英美等国进行技术交流，并考虑采用大型常压沸腾炉燃烧作为煤炭利用技术近期研究的重点项目，其目的在于希望能以煤代替石油来应付能源危机。通过由国家统一安排的试验研究计划，他们打算研究出一种既可满足实用需要，又能适合日本国情的电站沸腾锅炉。三菱重工业公司参考了美国里维斯维尔的135吨/时沸腾炉试验装置，在自行研究的基础上，已设计好一台蒸发量为125吨/时的沸腾炉。此外，日本还研究50万千瓦级沸腾锅炉在工业上实施的可能性。

他们的研究课题为：

- (1) 研究提高燃烧效率的方法，如采用的二段燃烧法。
- (2) 研究不同燃料在沸腾炉中的燃烧情况，尤其着重劣质煤的燃烧。
- (3) 研究沸腾炉的脱硫情况，并探讨其脱硫机理，以便寻求较佳的天然脱硫剂或合成脱硫剂。
- (4) 对各种能降低 NO_x 的措施进行试验比较，以确立降低 NO_x 的技术。
- (5) 研究给煤的方法，以改善目前采用的管道结构复杂的风力送煤方法，希望能研究一种机械式的供煤方法。
- (6) 研究灰渣的综合利用方法，以解决日本处理灰渣的困难情况。

四、结束语

当前几乎世界各工业先进国家都在为使沸腾燃烧能获得进一步发展，积极进行研究，其目的不外有二：一是充分利用各国现有的煤炭资源，以解决能源不断增加的需要，这对一向依赖大量进口燃料的国家显得尤为关切；二是保护环境，减少电厂排烟对大气日趋严重的污染。由于沸腾燃烧能够成功地使用那些在一般锅炉上无法燃用或不适宜燃用的多灰高硫的劣质燃料，同时通过添入附加剂的作用和控制低温燃烧的特点，可以除去燃煤中生成的绝大部分有害隋性气体，所以无论是从燃料利用，节约能源的经济观点出发，还是为人类健康，保持生态的长远利益着想，发展沸腾燃烧将是十分理想而渴望取得巨大成效的最佳方法。

过去曾有人预言，沸腾燃烧将来很有可能完全代替目前的煤粉燃烧方式。看来绝不是一种幻想。

在两种全沸腾燃烧的方式中，增压沸腾燃烧与燃气轮机联合循环系统的发展前景，尤为令人鼓舞。

我国地大物博，煤矿资源虽然十分丰富，但品位较低的劣质煤藏很不少，有的就因为质量过差而被看作是没有开采价值，任其弃置不用。这种情况在华东及华中、华南等地区都常有出现。然而即使在已经开采的一般大型煤矿中，也不可避免地在接近正常煤层的边沿地带存在着大量的矸石，被当作废料处理。若能将这些低质燃料用于沸腾炉上燃烧，在矿区建立大型坑口电站，仅就发电成本一项而论，就一定能够获得惊人的成绩。

我国沸腾燃烧锅炉发展中 应注意的问题

哈尔滨工业大学热能工程教研室 程 初

内 容 提 要

本文从环境保护、提高燃烧效率,减少沸腾锅炉体积以及减少灰磨损等方面介绍了有关沸腾燃烧方面的一些情况,并指出向大中容量的电站沸腾锅炉发展中值得注意的一些问题。

一、前 言

自从石油危机以来,世界各国又重新提出以煤代替石油的课题。从实用性、经济性和低公害性等方面来看,在各种煤的利用技术中,沸腾燃烧具有独特的优点,因而倍受重视。许多国家目前正大力开展研究工作,把沸腾燃烧看作一种新型的燃烧方式并付诸实现。

沸腾炉具有的突出特点是:

1. 由于炉料(包括石灰石或白云石)占全部沸腾床粒子的98~99%,热容量很大,所以即使低品位、水分大、燃烧性能差的粗粒煤,也能在较低温度的沸腾床内稳定燃烧。

2. 用石灰石或白云石作脱硫剂,可以实现高效率的炉内脱硫,而且低温燃烧又控制了 NO_x 的生成,从而达到了保护环境的目的。

3. 沸腾床埋管高效传热,可节省大量金属受热面,使锅炉结构紧凑体积减小,特别是采用增压沸腾炉进行蒸汽—燃气联合循环发电,其热效率更高。

各国在发展沸腾炉过程中,因各自的情况不同,研究重点也不相同。我国重点在于燃用劣质煤方面。英国在于利用沸腾炉埋管的高效传热,炉膛热负荷大的特点来减小大容量锅炉的体积和降低成本。而美国发展沸腾炉则侧重于保护环境,控制 SO_2 和 NO_x 的污染问题。分析他们的做法,对我国沸腾炉的发展无疑是有帮助的。对上述三方面的问题,在我国沸腾炉的研究中都应兼顾,决不可顾此失彼。

二、保护环境,控制污染

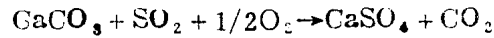
国外发展沸腾炉,有些是作为保护环境,控制污染的一种有效措施。而我国认为它污染环境,公害严重。其实沸腾燃烧方式对控制 SO_2 和 NO_x 等污染物都创造了有利条件。我国未取得正面效果的原因主要是设计时考虑不够全面,设备不成套,以及其他种种因素的限制等。

1. SO_2 的控制

国外环境保护法严格地限制火电厂 SO_2 的排放数量。美国环境保护局EPA标准为1.2磅 SO_2 /10⁶英热单位(2.16公斤 SO_2 /百万大卡)。日本限定锅炉排烟中 SO_2 的浓度低于100ppm。

常规燃煤锅炉要达到上述标准极为困难,一般需要在锅炉尾部增设庞大且昂贵的脱硫装置。在沸腾炉内利用附加剂直接脱硫是非常容易达到标准的。这是由于:

高硫煤在含有定量的石灰石 (CaCO_3) 或白云石粉 (MgCO_3) 的床料中进行沸腾燃烧时, 燃烧过程中产生的 SO_2 可直接被转化为盐类, 由床料所捕获。其化学反应方程式如下,



若超过锻烧反应 (与 CO_2 分压有关) 的平衡温度时:

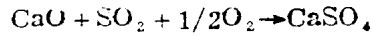


图 1 是联邦德国矿业研究所沸腾炉燃烧的除硫试验曲线。由图 1 可见, 在添加白云石期间, SO_2 的排放量迅速下降。

褐煤沸腾炉的脱硫效率更为良好。因为褐煤及其灰渣中都含有相当数量的钙, 它们在沸腾炉内对硫份的捕捉十分有效。据测定, 美国塔克隆斯 (Texas) 矿区的几种褐煤和褐煤矿渣中的自然钙 Ca/S 分子比率为 0.71~1.86。摩根能源研究中心褐煤沸腾燃烧的除硫试验曲线如图 2、图 3 所示。从图 2 可见, 在上述褐煤燃料中的 Ca/S 值下, 硫在沸腾燃烧床料中的保留能力可以达到 ~90%。当然, 随着床温的增加 (由 788°C 到 954°C), 这种保留能力明显下降。有的资料介绍, 当 $\text{Ca}/\text{S} \approx 4$ 时, 除硫效果可达 100%。图 3 表明, 褐煤沸腾燃烧在不加或少加石灰石添加剂的情况下, 可以达到满意脱硫效果。从这点出发, 发展我国褐煤沸腾炉是很值得重视的。

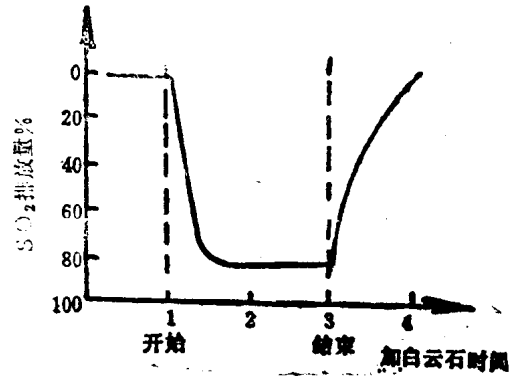


图 1 沸腾床添顺白云石控制 SO_2 生成 ($\text{Ca}/\text{S} = 2$ 克分子比)

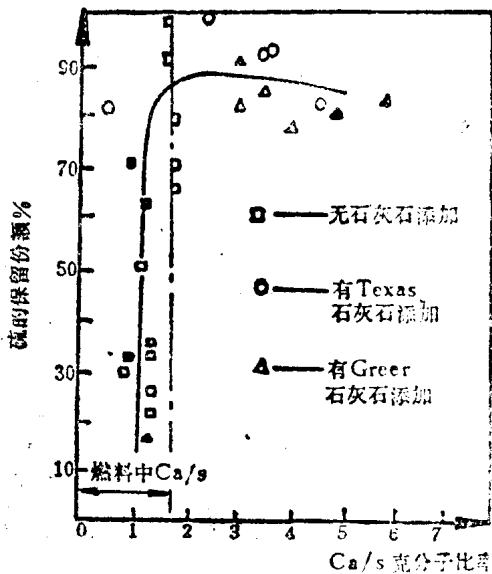


图 2 褐煤沸腾燃烧时硫的保留能力

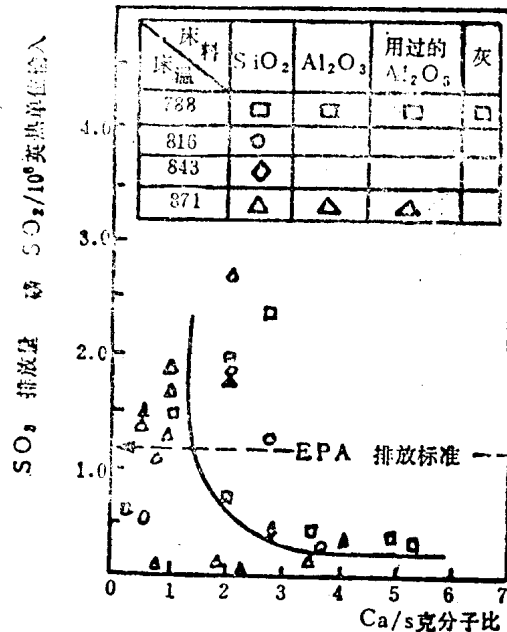


图 3 褐煤及褐煤渣沸腾燃烧时 SO_2 排放量

2. NO_x 的控制

国外环境保护法严格地限制电厂 NO_x 的排放量。美国 EPA 标准对固体燃料为 0.7 磅