

174336

TH6
0226

(L)

(H)

华中理工大学 刘德昌 主编

中国电力出版社

(C)

(R)

(S)

燃
工烧
业技流
应术化
用的床

前 言

流化床燃烧具有燃烧效率高、污染小和对燃料适应性强、负荷调节范围大及灰渣可综合利用等优点,近 10 余年来在电站锅炉、工业锅炉和各种窑炉以及对旧锅炉的改造等方面都得到了迅速的发展。35 万 kW 电功率带飞灰燃尽床的常规流化床锅炉已在日本投入运行。25 万 kW 电功率的循环床锅炉已在法国投入运行。在处理固体废物的流化床燃烧方面,近几年更是发展迅速。可以预计,下一个世纪将是流化床燃烧技术在工业上各个领域得到更加迅速发展的世纪。

我国流化床燃烧技术近 30 年来也得到了十分广泛的发展。10t/h、35t/h、75t/h、130t/h 的流化床锅炉已有 3000 余台投入运行。目前正在发展 5 万 kW 和 12.5 万 kW 的循环床锅炉。在应用流化床燃烧技术对固体废物进行处理方面,近 10 余年来也取得了可喜的成绩。

为适应流化床燃烧技术在工业上更加广泛发展的需要,为了满足从事流化床燃烧的研究单位,流化床锅炉、流化床焚烧炉的设计、制造、运行等单位的工程技术人员和管理人员的需要,我们编写了这本书。本书总结了流化床燃烧技术的一些国内外的最新成果。

本书由华中理工大学刘德昌(编写第 1、12、13 章、第 6 章第九节),陆继东(编写第 2、3、14 章),陈汉平(编写第 6、8 章,第 9 章第 2 节,第 15 章第 2 节),林志杰(编写第 4、5 章),伍蔚恒(编写第 10、11 章),刘皓(编写第 16 章,第 15 章第 1 节和第 4 节),张世红(编写第 9 章第 1、3、4、5 节和第 15 章第 3 节),赫俏(编写第 7 章)和黄琳(编写附录 1~3)编写。全书由刘德昌任主编,陆继东、陈汉平任副主编。

本书由清华大学郑洽余教授审阅,他提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心感谢。

由于水平所限,书中缺点和错误难免,欢迎批评指正。

编 者

1998 年 5 月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 流化床燃烧的发展	1
第二节 流化床燃烧的原理、系统及组成	2
第三节 循环流化床燃烧的优缺点	3
第四节 循环床燃烧在电站锅炉领域的应用与发展	5
第五节 流化床燃烧在工业锅炉、窑炉、废物焚烧 和水泥工业中的应用与发展	7
第六节 发展流化床燃烧的意义与结论	8
第二章 流化床燃烧流体力学	10
第一节 气固流态化	10
第二节 鼓泡床内气固两相流体力学特性	16
第三节 循环床内气固两相流体力学特性	23
第三章 流化床传热	28
第一节 流化气体和固体颗粒之间的传热	28
第二节 鼓泡流化床的传热	29
第三节 循环流化床的传热	35
第四章 流化床燃烧	41
第一节 流化床燃烧的特点	41
第二节 流化床燃烧机理	42
第三节 流化床中煤粒的燃烧过程	48
第四节 循环流化床锅炉的燃烧区域	51
第五节 影响流化床燃烧的主要因素	53
第六节 炉膛内燃烧份额和一、二次风的分配	56
第五章 流化床燃烧污染物排放控制	59
第一节 流化床燃烧对烟尘及可燃物的排放控制	59
第二节 流化床燃烧对 SO_2 的排放控制	61
第三节 流化床燃烧对 NO_x 的排放控制	64
第四节 流化床燃烧对 N_2O 的排放控制	68
第五节 流化床最佳低污染燃烧过程的组织	74
第六章 循环流化床锅炉典型炉型及大型化	76

第一节	概述	76
第二节	鲁奇 (Lurgi) 型循环床锅炉	77
第三节	Pyroflow 型循环床锅炉	90
第四节	Foster Wheeler 公司的循环床锅炉	98
第五节	Circofluid 型循环床锅炉	100
第六节	MSFB 型循环床锅炉	105
第七节	国外几种惯性分离式循环床锅炉	111
第八节	我国几种电站循环床锅炉型式	115
第九节	循环床锅炉大型化及需要研究的问题	119
第七章	小型工业流化床锅炉	125
第一节	炉膛形式特殊的流化床锅炉	125
第二节	粒子螺旋运动的流化床锅炉	126
第三节	日本株式会社荏原制作所三循环流化床锅炉	127
第四节	两级燃烧的流化床锅炉	128
第五节	热解气化、燃烧相结合的流化床锅炉	130
第六节	英国立、卧式火管、水火管流化床锅炉	131
第七节	美国 A 型、D 型流化床锅炉	132
第八节	工业微型流化床锅炉发电	133
第九节	带飞灰回燃的 10t/h 流化床锅炉	135
第十节	三旋风燃烧室内循环流化床锅炉	137
第八章	循环床锅炉的设计	138
第一节	循环床锅炉的设计程序	138
第二节	燃料特性和蒸汽参数对循环床锅炉设计的影响	139
第三节	锅炉的炉型及吸热量的分配	141
第四节	主要设计参数的选择	142
第五节	燃烧室的设计	146
第九章	流化床燃烧系统主要部件及设计	151
第一节	布风装置的结构及设计	151
第二节	粒子分离装置的种类与设计	157
第三节	回料器的种类	170
第四节	“L”型阀的设计	173
第五节	流化密封回料器的设计	175
第十章	流化床锅炉的运行	178
第一节	流化床锅炉冷态试验	178
第二节	流化床锅炉点火启动	182
第三节	流化床锅炉的运行	186

第四节	流化床锅炉常见故障及处理	190
第十一章	流化床高温烟气炉	192
第一节	高温烟气炉的发展概况	192
第二节	流化床高温烟气炉的特点和计算	194
第三节	流化床高温烟气炉的设计	200
第四节	流化床高温烟气炉的应用实例	202
第十二章	老电厂改造增容	205
第一节	美国电站锅炉改流化床锅炉示范工程	205
第二节	法国循环床锅炉改造工程	211
第三节	日本竹原 (Takehara) 35 万 kW 常规流化床锅炉改造工程	214
第四节	波兰特隆 (Turon) 电站 23.5 万 kW Pyroflow 循环 床锅炉改造工程	214
第五节	乌克兰两个电站煤粉锅炉改造工程	217
第六节	FW 和 B&W 锅炉公司设计的煤粉锅炉改循环床锅炉炉型	221
第七节	中国的旧煤粉锅炉的改造方向	222
第十三章	流化床焚烧废物	223
第一节	流化床焚烧废物的优缺点	223
第二节	流化床焚烧城市垃圾	224
第三节	流化床锅炉烧洗煤泥和煤矸石	228
第四节	流化床锅炉烧废木头和林业废物	230
第五节	流化床焚烧带放射性的废物	232
第六节	流化床燃烧废轮胎	235
第七节	流化床燃烧谷壳和其他农业废物	236
第十四章	流化床燃烧技术在水泥工业的应用	239
第一节	流态化技术应用于水泥生产	239
第二节	流化床灰渣和煤矸石制水泥	241
第三节	流化床燃煤固硫渣制水泥	243
第十五章	流化床锅炉主要辅机和耐火材料的选择	245
第一节	流化床锅炉用风机选择	245
第二节	灰渣冷却设备的种类与设计	249
第三节	物料破碎设备	256
第四节	耐磨、耐火材料的种类、特性和选用	262
第十六章	燃煤流化床燃气—蒸汽联合循环发电	266
第一节	概述	266
第二节	常压流化床燃煤联合循环发电	268
第三节	增压流化床燃煤联合循环发电	271

第四节	整体煤气化联合循环发电.....	275
第五节	燃煤燃料电池联合循环发电.....	278
附录		280
附录一	循环流化床锅炉热力计算例题（带埋管）.....	280
附录二	SO ₂ 与 NO _x 排放换算表	301
附录三	筛子系列.....	301
参考文献		304

第一章 绪 论

第一节 流化床燃烧的发展

流化床燃烧具有对燃料适应性好,有害气体排放量低等优点,自它问世以来在世界各主要工业化国家得到了迅速的发展。流化床燃烧在电站锅炉、工业锅炉、窑炉和焚烧各种废物、烧水泥等领域得到了广泛的应用。流化床燃烧是介于层燃燃烧与煤粉燃烧之间的一种燃烧方式。层燃燃烧燃烧效率低;煤粉燃烧燃烧效率高,但气体污染排放物多。流化床燃烧则克服了二者的某些缺点,保留了它们的优点,是一种很有竞争能力和优势的洁净燃烧技术。专家们估计,下一个世纪将是流化床燃烧在大型电站锅炉、工业锅炉和各种废物焚烧炉等方面得到广泛应用的世纪。

一、常规流化床燃烧

弗里茨·温克勒(Fritz Winkler)于1921年建立了第一个小型流化床燃烧试验台,进行了流态化技术的试验研究,申请了专利。道格拉斯·埃利奥特(Douglass Elliott)于60年代初与英国煤炭利用研究协会和煤炭局一起开发流化床燃煤锅炉,几年之后第一台常规流化床锅炉投入了运行。接着中国和美国先后投运了他们的常规流化床锅炉。

二、循环流化床燃烧

常规流化床燃烧宽筛分煤粒时,带离燃烧室的细颗粒份额较大,炭未完全燃烧损失大,燃烧效率不高。为了克服燃烧效率不高的缺点,收集飞灰再循环燃烧的流化床技术就应运而生。第一台由鲁奇(Lurgi)公司开发的燃煤循环床锅炉于1982年在德国的鲁能(Luenen)投入运行,其热功率为84MW。经由奥斯龙(Ahlstrom)公司开发的热功率为15MW,由烧油改烧泥煤的循环床锅炉在皮拉瓦(Pihlava)建成并于1979年投入运行。中国于1982年开始循环流化床燃烧技术的研究,至今已有200多台35t/h、75t/h的循环床锅炉投入运行。420t/h蒸发量的循环床锅炉正在开发之中。

三、增压流化床燃烧

增压流化床燃烧,是当今发展起来的煤清洁利用技术之一,它具有巨大的发展潜力。

在增压流化床燃烧技术发展中,ABB公司处于领先地位。他们的技术已在斯德哥尔摩市中心的凡登(Vartan)热电厂(电力输出为13.5万kW,区域供热为22.4万kW)和西班牙的爱斯卡曲(Escatron)电站(电功率为8万kW),以及美国俄亥俄州的梯达(Tidd)电厂(电功率为7.3万kW)得到了应用。这些电站都于1990年后投入运行。增压流化床燃烧与常压流化床燃烧相比,其燃烧效率、发电效率更高,污染控制性能更好,锅炉设备极为紧凑。在建造上述三个第一代增压流化床联合循环发电厂的同时,正在积极发展第二代增压流化床燃烧技术。第一代增压流化床联合循环电厂,其发电效率可达45%。第二代增压流化床联合循环电厂,发电效率可达50%。燃煤增压流化床锅炉除用

于装备新联合循环电厂外，该技术对改造煤粉锅炉电厂，提高其发电效率并降低污染排放亦是适宜的。

第二节 流化床燃烧的原理、系统及组成

流化床燃烧是一种燃烧化石燃料、废物和各种生物质燃料的燃烧技术。它的基本原理是床料在流化状态下进行燃烧。一般粗粒子在燃烧室下部燃烧，细粒子在燃烧室上部燃烧。被吹出燃烧室的细粒子采用各种分离器收集下来之后，送回床内循环燃烧。

循环流化床燃烧系统由流化床燃烧室、飞灰分离收集装置、飞灰回送器组成。有的还有外部流化床热交换器。燃料在燃烧系统内完成燃烧和大部分热量传递过程。

一、燃烧室

流化床燃烧室以二次风入口为界分为两个区。二次风入口以下为大粒子还原气氛燃烧区，二次风入口以上为小粒子氧化气氛燃烧区。燃料的燃烧过程、脱硫过程、NO 和 N_2O 的生成及分解过程主要在燃烧室内完成。燃烧室内布置有受热面，它完成大约 50% 燃料释热量的传递过程。流化床燃烧室既是一个燃烧设备、热交换器，也是一个脱硫、脱氮装置，集流化过程、燃烧、传热与脱硫、脱硝反应于一体。所以流化床燃烧室是流化床燃烧系统的主体。

二、飞灰分离收集装置

循环流化床飞灰分离收集装置是循环床燃烧系统的关键部件之一。它的形式决定了燃烧系统和锅炉整体布置的形式和紧凑性。它的性能对燃烧室的气动力特性、传热特性、飞灰循环、燃烧效率、锅炉出力 and 蒸汽参数，对石灰石的脱硫效率和利用率，对负荷的调节范围和锅炉启动所需时间及散热损失和维修费用等均有重要影响。

国外普遍采用的飞灰分离收集装置有高温耐火材料内砌的旋风子分离器、水冷或汽冷旋风子分离器、各种形式的惯性分离器和多管旋风子分离器。国内采用的主要有华中理工大学研制的下排气中温旋风子分离器、清华大学研制的方形水冷旋风分离器、中国科学院研制的百叶窗惯性分离器，也有用耐火材料内砌的高温旋风子分离器，还有东北电力学院开发的卧式内旋风子分离器。

高温耐火材料旋风分离器收集效率高，阻力较大，燃烧系统布置欠紧凑。各种惯性分离器收集效率低，阻力小，但燃烧系统布置紧凑。下排气中温旋风子分离器收集效率较高，阻力较小，能使锅炉整体布置呈传统的 Π 形布置，锅炉紧凑，占地面积小。

三、飞灰回送装置

飞灰回送装置是带飞灰回燃的鼓泡床锅炉和循环床锅炉的重要部件之一。它的正常运行对燃烧过程的可控性、对锅炉的负荷调节性能起决定性作用。

飞灰回送装置的作用是将分离器收集下来的飞灰送回流化床循环燃烧，而又保证流化床内高温烟气不经过送灰器短路流入分离器。送灰器既是一个飞灰回送器，也是一个锁气器。如果这两个作用失常，飞灰的循环燃烧过程建立不起来，锅炉的燃烧效率将大为降低、燃烧室内的燃烧工况变差，锅炉也将达不到设计蒸发量。

流化床燃烧系统中常采用的飞灰回送装置是非机械式的。设计中采用的送灰器有两种类型。一种是自动调整型送灰器，如流化密封送灰器（Fluoseal）。另一种是阀型送灰器，如“L”阀。自动调整型送灰器能随锅炉负荷的变化，自动改变送灰量，不需调整送灰风量。阀型送灰器要改变送灰量则必须调整送灰风量。也就是说，随锅炉负荷的变化必须调整送灰风量。

四、外部流化床热交换器

德国鲁奇型和美国巴特尔型、FW型和ABB-CE型循环床燃烧系统均采用了外部流化床热交换器。芬兰奥斯龙型和中国循环床燃烧系统均没有采用外部流化床热交换器。外部流化床热交换器的作用是，使分离下来的飞灰，部分或全部（取决于锅炉的运行工况和蒸汽参数）通过它并将其冷却到500℃左右，然后通过送灰器送至床内再燃烧。外部流化床热交换器内的流化速度是0.3~0.45m/s，布置的受热面可有省煤器、蒸发器、过热器、再热器等受热面。

外部流化床热交换器实质上是一个细粒子鼓泡流化床热交换器，它具有传热系数高，磨损小的优点。采用外部流化床热交换器的优点如下：

- (1) 解决了大型循环床锅炉流化床内受热面布置不下的困难。
- (2) 为过热蒸汽温度和再热蒸汽温度的调节提供了很好的手段。
- (3) 加大了循环床锅炉的负荷调节范围。
- (4) 加大了同一台锅炉对燃料的适应性。
- (5) 节约了锅炉受热面的金属消耗量。

其缺点是它的采用使燃烧系统、设备及锅炉整体布置比较复杂。

我国目前开发的20t/h、35t/h和75t/h中小循环床锅炉均没有采用外部流化床热交换器。华中理工大学与武昌锅炉容器厂联合开发的下排气中温旋风子分离器循环床锅炉，其蒸汽过热器起了部分外部流化床热交换器的作用。

第三节 循环流化床燃烧的优缺点

流态化技术在煤燃烧领域的应用产生了鼓泡床锅炉与循环流化床锅炉。鼓泡床锅炉燃烧效率不高。循环床锅炉采用飞灰循环燃烧，克服了燃烧效率不高的缺点。人们普遍认为：流化床燃烧将是工业锅炉、电站锅炉和工业窑炉的一种很有前途和竞争能力的燃烧方式。循环流化床锅炉与常规锅炉相比有如下优缺点。

一、循环流化床锅炉的优点

(1) 对燃料的适应性特别好。飞灰再循环量的大小可改变床内的吸热份额，所以循环床锅炉对燃料的适应性特别好。只要燃料的热值大于把燃料本身和燃烧所需空气加热到稳定燃烧温度所需的热量，这种燃料就能在循环床内稳定燃烧，不需使用辅助燃料助燃，就能达到高的燃烧效率（此时床内不布置受热面）。循环床锅炉能烧优质燃料，也能烧劣质燃料，这对一些燃料来源、种类和质量多变的锅炉用户，是十分适宜的。

(2) 燃烧效率高。常规工业锅炉和流化床锅炉，燃烧效率为85%~90%。循环流化

床锅炉由于采用飞灰再循环燃烧，烧劣质燃料和优质燃料时，其锅炉燃烧效率可达 95%~99%，能与煤粉燃烧锅炉相媲美。

(3) 由于飞灰再循环燃烧，克服了常规流化床锅炉床内燃烧释热份额大，悬浮段释热份额小的缺点，提高了锅炉的炉膛截面热强度和容积热负荷。常规流化床锅炉的炉膛截面热强度为 $1\sim 3\text{MW}/\text{m}^2$ ，而循环流化床的截面热强度为 $3\sim 8\text{MW}/\text{m}^2$ 。常规流化床锅炉的炉膛容积热强度为 $0.1\sim 0.2\text{MW}/\text{m}^3$ ，而循环流化床锅炉的炉膛容积热强度为 $0.16\sim 0.32\text{MW}/\text{m}^3$ 。

(4) 由于飞灰的再循环燃烧过程，床料中未发生脱硫反应的石灰石能再回到床内与 SO_2 反应，提高石灰石的利用率。当钙硫比为 1.5~2.0 时，脱硫效率可达 85%~90%。而常规流化床，当钙硫比为 3~4 时，脱硫效率才能达到 85%~90%。后者的钙的消耗量增加一倍多。

(5) NO_x 排放量低。由于循环流化床锅炉采用分级燃烧，温度控制在 $830\sim 850^\circ\text{C}$ 范围之内， NO_x 的生成量显著减少，其排放浓度为 100~200ppm，而常规流化床燃烧和煤粉燃烧其 NO_x 的排放浓度分别为 300~400ppm 和 500~600ppm。

(6) 负荷变化范围大，调节特性好。当锅炉负荷变化时，只需调节给煤量和流化速度就可满足负荷的变化。在低负荷时，不需像常规流化床锅炉那样，采取分床压火，也不需像煤粉锅炉那样用油助燃。一般情况下，循环流化床锅炉的热负荷变化范围为 100%~25%，其变化速率为 5%~10%。这一优点使循环流化床锅炉用于电网的调峰机组、热负荷变化大的热电联产机组和供热工业锅炉是特别适宜的。

(7) 给煤点数量少。循环床内由于粒子浓度较小（与鼓泡床相比），横向粒子混合特性较好，不需要鼓泡床锅炉那么多的给煤点。130t/h 蒸发量的鼓泡床锅炉有 6 个给煤点，而循环床锅炉有 1~2 个给煤点就够了。这大大简化了炉前给煤点的布置，为流化床锅炉的大型化创造了有利条件。

(8) 无埋管磨损。鼓泡床锅炉由于浓相床内燃料燃烧释热份额大，必须布置埋管。埋管受热面磨损严重是鼓泡床锅炉的缺点。循环床锅炉由于飞灰再循环和床料平均粒径较小，床内下部与上部燃料燃烧释热较均匀，因而在燃烧室内受热面的布置方面可取消埋管，而采用膜式水冷壁和其它附加受热面，从而消除了鼓泡床锅炉埋管受热面的磨损问题。

二、循环流化床锅炉的缺点

任何事物总是一分为二的，有优点也有缺点。最近几年来的发展和实践表明循环流化床锅炉有如下缺点。有些缺点是发展中的，经过努力可以克服。有的缺点是该技术所固有的，难以克服。

(1) 飞灰的再循环燃烧，一次风机压头高，电耗大。另外还有一次风机、二次风机、送灰风机之分，布置复杂。

(2) 膜式水冷壁的变截处和裸露在烟气冲刷中的耐火材料砌筑部件亦有磨损。

(3) 高温分离器和飞灰回送器有笨重的耐火材料内砌体，冷热惯性大，给支承和快速启停带来了困难。

(4) 循环床锅炉对燃煤粒径及其分布有一定要求,与常规流化床锅炉相比要严格一些。否则难保证达到设计出力和设计效率。

(5) N_2O 生成量高。与高温煤粉燃烧过程相比,流化床燃烧过程中 N_2O 的生成量高 10~40 倍。而循环流化床燃烧过程中 N_2O 生成量又比常规流化床燃烧高,一般达 200ppm 以上。 N_2O 是一种温室效应气体,还对大气圈中臭氧层有破坏作用。近年来的研究结果表明:通过对燃烧工况的调整能较好控制 N_2O 的生成量。

(6) 循环床燃烧室内的微正压燃烧和高温分离器的局部正压区,加上某些连接处的膨胀及密封设计不妥,漏灰较严重,给锅炉房的清洁卫生和文明生产带来不利影响。

(7) 我国制造的中小型循环流化床锅炉,由于燃煤制备系统较简单,燃煤中大于 1mm 的颗粒偏多,加之较普遍地采用的惯性分离器的分离收集效率较低,带来较普遍的问题是:锅炉达不到设计出力,磨损严重,燃烧效率不高和运行可靠性差。

第四节 循环床燃烧在电站锅炉领域的应用与发展

循环床燃烧是介乎鼓泡床燃烧与煤粉悬浮燃烧之间的一种燃烧方式。它兼有这两种燃烧方式燃烧效率高,低污染的优点,克服了鼓泡床锅炉难大型化和煤粉燃烧脱硫、脱硝费用高等缺点,近 15 年来得到了快速的发展。下面简要介绍该技术在德国、美国、芬兰、法国和中国的发展。

一、德国

德国鲁奇公司于 1970 年将循环床技术应用于燃煤锅炉并取得成功之后,经过 15 年的发展,锅炉容量由 50t/h 发展到 270t/h。杜易斯堡 270t/h 循环床锅炉带 10 万 kW 发电机组和区域供热,是世界上运行时间最长的 10 万 kW 级的热电联产机组。

西柏林 11 万 kW 循环床锅炉于 1989 年投入运行。该炉在杜易斯堡大型电站循环床锅炉的基础上作了如下的改进:

- (1) 飞灰分离器每侧由两个高温旋风分离器串联改为只用一个。
- (2) 燃烧室用膜式水冷壁,除燃烧室上部外,其余部分砌有 100mm 厚的耐火衬里。
- (3) 高温旋风分离器也设计成水冷壁形式,减小了耐火绝热层厚度。
- (4) 外部流化床热交换器亦用水冷壁作墙,以减少启动过程中的热惯性。

到 1995 年,在德国和北美等国已有 40 多座电厂采用了此种型式的循环床锅炉。电功率在 10 万 kW 以上的锅炉有 10 余台。到 2000 年,将研制蒸发量为 1000t/h 的大型循环床锅炉。

二、美国

美国 FW (福斯特惠勒) 从 80 年代开始循环流化床锅炉的研制工作。他们开发的带 Intrex 外部流化床热交换器的循环床锅炉已投入运行。蒸发量为 374t/h 的 Nisco 循环床锅炉(烧石油焦)是属于这种型式的锅炉。该锅炉的特点:采用汽冷式旋风分离器;选择性

排渣器；气力播煤装置；大型锅炉采用全分隔炉膛结构；独特的 Intrex 外部流化床热交换器。

三、芬兰

芬兰奥斯龙公司自 1979 年首台循环床锅炉改造成功以来，至今已制造了 120 多台循环床锅炉。这种型式的循环床锅炉没有外部流化床热交换器，结构比较简单。1987 年在美国纽克拉 (Nucla) 电厂投运的 420t/h 循环床锅炉是最有代表性的。为加拿大诺娃斯科夏 (Nova Scotia) 电力公司提供的 18 万 kW 电功率的循环床锅炉也是正在运行中的这种型式的有代表性的大容量的锅炉。另外，将波兰特隆 (Turow) 电厂 2 台 20 万 kW 的煤粉锅炉改造成 23.5 万 kW 电功率的循环床锅炉是奥斯龙公司接到的最大容量的循环床锅炉定货。美国 FW 锅炉公司于 1995 年全部买下了奥斯龙公司的锅炉股份，接管了奥斯龙在世界各地的锅炉业务。今后该种型式循环床锅炉的发展落到了美国 FW 锅炉公司的身上。

四、法国

法国电能生产以核能为主，燃油、燃气、燃煤电厂起调峰作用。法国为了争夺国际锅炉市场，改造原有燃用化石燃料污染严重的锅炉成为循环床锅炉，法国电力部和 GEC Alsthom Stein Industrie 锅炉公司对发展循环床锅炉态度十分积极，发展速度快。他们与德国鲁奇公司合作，分三步发展大型电站循环床锅炉。第一步是将法国艾米路希 (Emile Huchet) 电厂的一台 12.5 万 kW 的 4 号燃煤锅炉改为烧洗煤泥的循环床锅炉。该炉已于 1991 年投入运行。第二步是将法国普罗旺斯 (Provence) 电厂的 25 万 kW 的 3 号燃煤锅炉改为循环床锅炉，继续燃用电厂附近煤矿提供的高硫煤。该锅炉于 1995 年 5 月开始调试运行。1995 年 10 月 29 日并网发电。1996 年 4 月 17 日完成了 30 天工业运行。第三步是开发 60 万 kW 级的循环床燃煤锅炉。普罗旺斯 25 万 kW 循环床锅炉的开发成功为第三步的发展打下了基础。

五、中国

1988 年由中国科学院工程热物理所与济南锅炉厂研制的山东明水热电厂的 35t/h 循环床锅炉投入运行之后，清华大学与四川锅炉厂研制的 35t/h、75t/h 循环床锅炉，华中理工大学与武昌锅炉容器厂研制的 35t/h、75t/h 循环床锅炉，浙江大学、哈尔滨工业大学分别与杭州锅炉厂、北京锅炉厂研制的 35t/h、75t/h 循环床锅炉先后都投入了运行。这些循环床锅炉所采用的飞灰分离器各有特色，形成了各自的流派。这些锅炉一个共同的特点是锅炉的整体形状呈传统的 II 型布置，锅炉紧凑。到 1994 年全国 10t/h 和小于 35t/h 的循环床锅炉有 300 多台，35t/h、75t/h 的循环床锅炉有 200 多台在安装和运行中。

大连化学工业公司与哈尔滨锅炉厂引进的 Pyroflow 型 5 万 kW 的循环床锅炉和四川内江电厂与国家电力公司引进的 10 万 kW 的 Pyroflow 型循环床锅炉都已进入运行阶段。这些锅炉在运行中也暴露了不少问题。

独立自主研制与引进、吸收、消化国外循环床技术相结合，发展具有中国特色的循环床锅炉，并使其大型化是我们下个世纪的任务。

第五节 流化床燃烧在工业锅炉、窑炉、废物焚烧和水泥工业中的应用与发展

一、在工业锅炉中的应用与发展概况

常规流化床和循环流化床具有清洁、高效和对燃料适应性好等优点，在工业锅炉、窑炉、废物焚烧和水泥工业各领域得到了发展，呈现了很大的生命力。

英国在发展工业流化床锅炉方面是走在世界前列的。60年代就开发了各种立式、卧式火管流化床锅炉，水、火管流化床锅炉，内循环床锅炉。

美国也继英国之后开发了A型、D型流化床锅炉、模块式流化床锅炉。目前在美国能源部的资助下正在开发各种形式的小型工业循环床锅炉和边远无电网地区微型电厂用循环床蒸汽发生装置。

日本株式会社荏原制作所也推出了他们的床内两个循环燃烧与床外大循环燃烧相结合的新型循环床锅炉。

中国自60年代开始就研制工业流化床锅炉。目前全国有20多个锅炉厂生产20t/h蒸发量以下的常规流化床锅炉和循环流化床锅炉。至今全国累计有近3000多台工业流化床锅炉在运行中，其数量在世界上排第一位。流化床锅炉能烧化肥厂造气炉炉渣，在我国几乎每个小化肥厂有一台常规流化床锅炉或循环床锅炉。

二、流化床燃烧在窑炉中的应用

流化床燃烧的显著优点是能烧劣质煤，也能烧优质煤。窑炉工业为了经济利益往往使用劣质煤和工业锅炉炉渣，这为流化床燃烧技术在窑炉中的应用创造了条件。

流化床燃烧高温烟气炉产生的高温烟气用来干燥水泥厂的物料和建筑材料在英国得到了广泛的应用。英国Babcock锅炉公司生产的流化床高温烟气炉遍及欧洲各国。英国开发的超高温烟气炉产生的1300~1600℃的超高温烟气可供各种焙烧装置作为热源。

华中理工大学开发的流化床高温烟气炉在水泥厂用来干燥物料、在化工厂用来干燥原料中得到了广泛推广与应用。该技术获国家专利，并被国家科委列为“八五”期间重点节能推广项目。目前该技术已在全国大多数省市得到了推广应用，为国家带来了显著的经济效益、社会效益和环保效益。

三、流化床燃烧在焚烧废物中的应用与发展

各种具有不同热值的固体、液体、气体废物污染环境，占据可用土地面积。这些废物的热值一般偏低，还由于燃烧产物给大气带来污染，不宜用其它燃烧方式燃烧。流化床燃烧能烧低热值燃料，又属低温燃烧，对燃烧产物中的有毒气体成分易于控制，近几年来得到了世界各国的重视。

流化床焚烧废物的优点是炉子结构紧凑，设计简单，燃烧效率高，可达到清洁燃烧的目的。另外各种废物可单烧，混烧，也可与煤混烧，对废物的适应性很好。

通常的固体废物包括：城市垃圾、农业废物、林业废物、洗煤泥、污泥、废轮胎及各种有害的医院废物和被放射性污染了的固体废物等。

烧各种废物的示范性研究装置——流化床焚烧炉已在美国和瑞典的有关能源公司建立起来,并进行了大量的试验研究。商业性的焚烧各种废物的流化床锅炉发电厂在美国、瑞典等国得到了快速的发展。瑞典的 Kvaerner 环境动力公司自 80 年代以来共制造了 12 台鼓泡床废物焚烧锅炉和 6 台循环床废物焚烧锅炉装在美国、瑞典和欧洲各国。有的用来发电,有的用来热电联产。垃圾处理容量不等,从 1t/h 到 31t/h。

1. 流化床焚烧城市固体垃圾

美国 Foster Wheeler 动力系统公司和费城 Reading 能源公司正在为芝加哥南郊的 Robbins 工程提供两台循环床锅炉焚烧城市垃圾。每台锅炉的蒸发量为 104t/h。两台锅炉配 1 台 5 万 kW 的汽轮发电机组。该厂已于 1997 年投运。日处理城市固体垃圾 1600t。Robbins 工程除垃圾循环流化床锅炉发电厂之外,还包括一个废金属回收工厂和一个堆肥厂。Robbins 工程是一个城市固体垃圾的综合利用工程。

瑞典 Kvaerner 环境动力公司为美国北卡罗莱纳州的 Fayetteville 提供 2 台鼓泡床锅炉焚烧城市固体垃圾。锅炉的热功率为 30MW。电厂装一台汽轮发电机组,电功率为 1.8 万 kW。这个流化床锅炉垃圾电厂在 1995 年投入运行,它是目前世界上运行中最大的焚烧城市固体垃圾的发电厂。该电厂年处理城市固体垃圾 24.5 万 t。

中国可耕地占世界的 7%,养活了占世界上 20% 的人口。中国的各种废物处理量将是世界上最多的国家之一。中国目前还没有流化床焚烧城市固体垃圾的技术。发展此种技术,对保护环境,节约土地,开发能源有重要作用。

2. 流化床焚烧洗煤泥

浙江大学开发的烧洗煤泥的 35t/h、10t/h 的流化床锅炉在“七五”计划末期和“八五”计划期间先后投入了运行。法国烧洗煤泥的 12.5 万 kW 的循环床锅炉发电厂——艾米路希电厂于 1990 年投入运行。1992 年这个电厂获得了美国给予的“最佳电站”国际奖。

四、流化床锅炉烧水泥

中国的劣质煤和煤矸石资源十分丰富。这些燃料的灰的成分与水泥物料的成分十分相近。我国在流化床利用劣质煤制水泥方面有两条途径:一是在劣质煤中加入一些钙质材料,然后将其磨制成粉,再成球,经流化床煅烧后可直接得到 425 号胶凝水泥。由武汉工业大学配料、成球,在华中理工大学流化床试验锅炉上烧成了该种水泥,证实了其技术路线是可行的。另一种办法是由中国矿冶大学发展的,采用流化床燃烧后的炉渣加一些钙质原料经蒸汽护养和煅烧脱水之后可生产高质量水泥。中国建材研究院水泥研究所还开展了循环床干燥和煅烧水泥的研究。

第六节 发展流化床燃烧的意义与结论

常压和增压流化床燃烧具有高效、低污染、低成本等优点,近 15 年来在世界各主要工业化国家得到了迅速的发展。结合我国国情发展流化床燃烧技术,其意义更为重大。

一、节约能源

近 20 年来的统计表明：我国一次能源结构中煤约占 75%。煤产量的 70% 用于电站锅炉、工业锅炉及窑炉。这些炉窑的燃烧效率一般比世界先进水平低 5~10 个百分点。发展先进的流化床燃烧锅炉对节约煤炭资源有重要作用。

二、利用劣质燃料

中国煤炭资源的分布和质量差异随地区变化大。南方劣质煤居多。北方累积的煤矸石达 10~12 亿 t，并以年增 1 亿 t 的数量增加。原煤入选率将不断提高，洗煤泥越来越多。除煤以外的其它低热值燃料也很丰富。发展流化床燃烧技术，因地制宜地利用这些劣质燃料无疑有十分重要的意义。

三、绿色能源

我国煤炭产量的大约 25% 是含硫超过 2% 的高硫煤。 SO_2 排放总量的 90%，年排放量 500 万 t 来自于煤的燃烧。 NO_x 排放总量的 70%，年排放量 270 万 t 来自于煤的燃烧。 CO_2 总排放量的 85%，年排放量 600 万 t 来自于煤的燃烧，仅次于美国，占世界第二位。流化床燃烧具有燃烧过程中脱硫、脱氮的优点，是一种低污染、低成本的燃烧技术。发展我们称之为绿色能源的流化床燃烧技术，无疑对保护生态环境有重要作用。

四、灰渣综合利用

大量的灰渣要占用土地，且带来二次污染。我国人均可耕面积只有 1.5 亩，远远低于世界人均可耕地面积 4.65 亩。1992 年统计资料表明：仅全国电厂灰场就占用了 20 余万亩可耕地。随着电力工业的发展，灰场占地每年以 10% 的幅度增加。流化床燃烧产生的灰渣活性好，可做水泥掺合料、建筑材料等。这对变废为用、保护土地资源可起到重要的作用。

五、利用流化床燃烧技术改造旧电站锅炉、工业锅炉和窑炉

我国 50、60 年代投运的电站煤粉锅炉燃烧工况恶化，对大气污染严重，已到退役年龄。工业锅炉、窑炉对燃料适应性差，且煤耗高。用流化床燃烧技术改造电站煤粉锅炉，延长服役期，对发展电力，节约投资（只有新建电厂投资的 25%~60%）有很大作用。改造工业锅炉、窑炉，提高燃烧效率，利用当地燃料，对发展地方经济亦有重要作用。

综上所述知：发展流化床燃烧技术，有利于提高燃烧效率，扩大对燃料的适应性，改善环境性能；有利于灰渣综合利用，保护土地资源；有利于对旧锅炉和窑炉的改造。我们可以下结论：流化床燃烧技术是一种洁净燃烧技术、绿色燃烧技术；流化床燃烧设备是一种绿色节能设备；下一个世纪将是流化床燃烧技术在电站锅炉、工业锅炉、窑炉等领域加速发展的世纪。我们国家的各级政府、科研部门、科学研究工作者和锅炉生产厂家及锅炉用户都应重视发展循环流化床锅炉，加大投入，加速国产大型电站循环床锅炉的发展。

第二章 流化床燃烧流体动力学

流化床燃烧是在一个特殊的气固两相流动体系中发生的物理化学过程，其内部的气体 and 固体颗粒运动对于燃烧过程的进行具有十分重要的作用。所以，为了实现流化床燃烧设备的优化设计和正常运行，必须首先对其内部的流体动力学有一个充分的认识 and 了解。

第一节 气固流态化

气固流态化是固体颗粒悬浮在气体中表现为类似流体状态的操作模式。它具有与通常工艺过程所不同的特性。正是由于这些特性，使得流态化在不同的工业过程中得到了日益广泛的应用。

一、流态化现象

如果气体通过一个颗粒床层，该床层随着气流速度的变化会呈现不同的流动状态。在流速较低时，气流仅是在静止颗粒的缝隙中流过，这时称为固定床，如图 2-1 (a) 所示。当气流速度增大到一定值时，所有的颗粒被上升的气流悬浮起来。此时气体对颗粒的作用力与颗粒的重力相平衡。通过床层任意两个截面的压力降与在此两截面间单位面积上颗粒和气体的重量之和相等。这时床层达到起始流态化，如图 2-1 (b)。这时的气流速度称为最小流化速度。当气流速度超过这个值时，除了非常细而轻的颗粒床会均匀膨胀外，一般地会出现气体的鼓泡这样的明显的不稳定性。这样的床层称为鼓泡流化床，这时床层有相当明显的床表面，所以也称为密相流化床，如图 2-1 (c) 所示。气泡在上升过程中会发生合并和长大，在小而深的床层中它们甚至会大得几乎充满床层的整个截面。对于小颗粒的情况，颗粒围绕着上升气体空隙沿着壁面向下流动，称为轴向柱塞流。对于大颗粒床，则

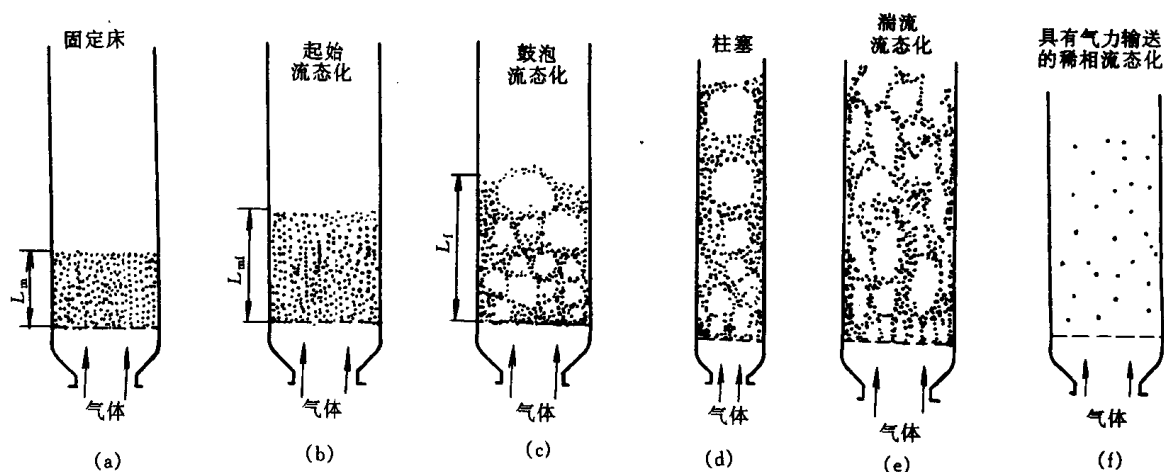


图 2-1 气固接触形式

在气泡上面的那部分床层就像活塞一样被推向上部，然后颗粒从柱塞的顶部向下降落，最后柱塞消散。这时另一个柱塞形成，重复上述过程。这样一种不稳定的脉动的依次重复，我们称之为柱塞流动，如图 2-1 (d) 所示。当小颗粒以相当大的超过颗粒的终端速度流化时，床层的上表面就消失，夹带变得相当明显。可以观察到不同大小和性质的颗粒团和气流团的紊乱运动。这就是如图 2-1 (e) 所示的湍流床。当气体速度进一步增大，颗粒就由气体带出床层，我们称这种状态为颗粒气体输送的稀相流化床，如图 2-1 (f) 所示。在湍流和稀相流态化状态下，有大量的颗粒被携带出去。为了稳定操作，这些颗粒必须用分离器从气流中分离出来，然后再返回床层。这样的床层就成为循环流化床。不过这仅是单一尺寸颗粒时的情况。对于燃煤流化床锅炉，床内为 0~8mm 的宽筛分颗粒，在床的下部会形成主要由较大颗粒组成的鼓泡流化床，而较细颗粒则由气流所携带经分离器和返料器构成颗粒的循环。

一个密相流化床看上去非常像沸腾的液体，在许多方面表现出液体的特性，所以在国内习惯上称流化床为沸腾床。例如，可以很容易地将一块大而轻的物体推入床层，然后它就会浮在床的表面。当容器倾斜时，床层的上表面保持水平。当两个床连在一起时，它们的表面会保持在相同的水平。在床层内任意两点间的压差大致等于这两点间的床层静压头。床层内的颗粒会从容器侧面的孔喷射而出，并能像液体一样从一个容器流向另一个容器。

二、固定床

对于一个有单一筛份尺寸 d_p 的颗粒所组成的空隙率为 ϵ_B 的床层，当气体通过高为 H_m 的床层时的压力降 Δp 可用厄根 (Ergun) 公式来描述：

$$\frac{\Delta p}{H_m} = 150 \frac{(1 - \epsilon_B)^2}{\epsilon_B^3} \frac{\mu_g u}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1 - \epsilon_B}{\epsilon_B^3} \frac{\rho_g u^2}{\phi_s d_p} \quad (2-1)$$

其中 μ_g 、 ρ_g 分别为气体的动力黏度和密度。 ϕ_s 为颗粒的球形度，它表征了非球形颗粒和球形颗粒的差别，它的定义为：

$$\phi_s = \left(\frac{\text{球形颗粒表面积}}{\text{实际颗粒表面积}} \right)_{\text{相同体积}} \quad (2-2)$$

对于球形颗粒， $\phi_s = 1$ ；对于所有其它颗粒， $0 < \phi_s < 1$ 。通常煤颗粒的 ϕ_s 在 0.63~0.73 之间，砂粒在 0.66~0.86 之间。

对于一个随机堆积的颗粒床，表达式 (2-1) 可在 25% 的误差范围内符合实验数据。但对于不是随机排列的固定床或高空隙率床不能适用。如对空隙率为 0.6 到 0.98 的纤维床，床层压力降要远大于由该公式所计算的结果。

一般地，对于工业实际所应用的颗粒床，其颗粒粒径不可能是单一尺寸，而是具有一定的筛份分布。这时就应用一个平均粒径 $\bar{d}_p$ 来取代，其原则是混合颗粒床层的压力降与单一尺寸的颗粒床大致相等。所以，这个平均粒径应定义为对于总的床容积具有相同的总颗粒表面积。通过推导，可用下式来计算平均粒径：

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (x/d_p)_i} \quad (2-3)$$

式中 N 是进行颗粒筛分时的筛分份数， d_{pi} 、 X_i 分别是颗粒在尺寸分布区间 i 中的颗粒直