

高温气体 过滤技术与设备

姬忠礼 著



科学出版社

(TH-1087.31)

高温气体 过滤技术与设备



科学出版社互联网入口

能源与动力分社: (010)-64003151 销售: (010)-64031535

E-mail: wanqunxia@mail.sciencep.com

销售分类建议: 热能工程 化工机械

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-062996-8



9 787030 629968 >

定价: 168.00 元

高温气体过滤技术与设备

姬忠礼 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书综合分析了近30多年来高温气体过滤技术与设备方面的研究与进展。首先回顾了高温气固分离技术的发展历程和应用背景,比较了各种高温气固分离设备的性能特点和适用范围;然后着重介绍了由金属过滤元件和陶瓷过滤元件组成的高温气体过滤器,阐述了过滤元件的制备工艺和性能特点,分析了过滤元件表面粉尘层的结构特性、脉冲反吹系统组成及过滤元件的循环再生性能,论述了由高温过滤元件组成的过滤器结构型式、现场试验和工程应用概况。

本书适合高等院校石油化工设备、煤化工和环保设备等相关技术领域的教师和研究生阅读,也可作为从事气固分离设备设计、技术研发及工程应用的技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高温气体过滤技术与设备 / 姬忠礼著. —北京: 科学出版社, 2020.1

ISBN 978-7-03-062996-8

I. ①高… II. ①姬… III. ①高温气体—空气过滤器 IV. ①TQ051.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第253183号

责任编辑: 万群霞 冯晓利 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年1月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2020年1月第一次印刷 印张: 22

字数: 443 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

20 世纪 60 年代开始的洁净煤发电技术研究主要包括增压流化床燃烧 (pressurized fluidized bed combustion, PFBC) 联合循环发电和整体煤气化联合循环 (integrated gasification combined cycle, IGCC) 发电, 这两种联合循环发电技术均可实现煤的能量高效利用及达到环保排放要求, 但对高温燃气和高温合成气内的颗粒物含量提出了极为严格的要求。高温气体净化技术指在 260°C 以上时, 气体中颗粒物、硫、硝、碱金属蒸气、可挥发性有机物 (VOCs) 及痕量重金属元素的脱除。高温气固分离技术则专指高温气体中颗粒物的分离技术, 主要包括旋风分离器、高温静电除尘器、颗粒床过滤器和高温陶瓷过滤器等, 其中高温气体过滤技术可以完全满足燃气轮机等下游设备及严格的新能源环保排放标准, 被认为是最具发展潜力的高温气固分离技术。

高温气体过滤技术自 20 世纪 60 年代以来, 在高温过滤材料方面经过了早期的金属多孔材料、均质陶瓷多孔材料、纤维增强陶瓷复合材料、金属合金及金属间化合物多孔材料四个阶段的探索, 逐渐形成了陶瓷粉末、陶瓷纤维、金属纤维、金属粉末和金属丝网等多种高温气体过滤元件。同时, 在高温过滤元件的脉冲反吹循环再生、高温过滤器结构设计及过滤基础理论研究方面都取得了重大的技术进展。目前高温气体过滤技术已在煤气化、石油催化裂化、冶金及垃圾焚烧处理等方面得到了广泛的应用。其适用的温度范围为 $260\sim 650^{\circ}\text{C}$, 压力范围为常压到 6.0MPa , 过滤效率达到了 99.9% 以上, 可有效除净 $1\mu\text{m}$ 以上的颗粒, 净化后气体中的颗粒物含量低于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。随着国家经济转型和环保排放要求的提高, 高温气体过滤技术在产品质量升级、高温余热利用和颗粒物排放控制等领域具有更加广泛的应用前景。

笔者自 1984 年毕业以来, 在我国著名的化工设备专家时铭显院士指导下参加了国家有关 PFBC 两个五年计划的科研攻关工作, 此后一直从事高温气体过滤方面的研究工作, 在高温过滤元件的研制、高温脉冲反吹研发和高温过滤机理等方面进行了一些研究工作。希望将多年来积累的国内外有关高温气体过滤方面的技术进展进行总结和整理, 能为从事高温气固分离技术方面的研究人员和工程技术人员提供参考。

全书共 6 章, 包括高温气体气固分离技术的应用领域、各类高温气固分离技术的性能比较、高温气体过滤元件、过滤元件表面粉尘层形成过程、脉冲反吹清灰过程及其动态特性, 以及高温过滤的结构型式和应用等。本书内容既包括高温

过滤技术方面的基础研究工作，也包括过滤元件性能评价、高温试验和工程应用情况，此外也简要介绍了催化与过滤复合技术和新型脉冲反吹技术等方面的最新技术进展。

本书内容引用了笔者所在的过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室多年来各届研究生所做的研究工作，先后有多位硕士研究生和博士研究生参与了高温气体过滤技术方面的研究，并承担了国家自然科学基金、国际合作项目、教育部高等学校博士学科点专项科研基金博士点基金，以及国家重点研发计划课题等科研项目。衷心感谢笔者科研工作的领路人时铭显院士 20 余年的指导和培养。感谢冯家迪、马长欢、况春江和李建保等多位企业家和著名专家连续多年的合作与支持。在本书撰写过程中，天津大学朱企新教授、中国科学院过程工程研究所刘开琪研究员及上海化工研究院有限公司都丽红教授仔细审阅了书稿，并提出了宝贵意见和修改建议；本书还得到了中国石油大学(北京)毛羽、孙国刚、陈建义、魏耀东和吴小林等多位教授的支持和鼓励；栾鑫、刘龙飞、齐强强和苗林丰等研究生在本书资料收集、书稿修改及图表制作等方面做了很多工作；刘震、常程和陈锋博士在近 3 年协助笔者完成了不少日常科研事务，使笔者可以集中精力从事书稿写作，在此一并表示感谢。

由于高温气体过滤技术涉及多孔陶瓷材料、多孔金属材料、洁净煤燃烧、煤灰化学和粉体力学等多个学科，其研究的尺度从微纳米膜层到内装数千根过滤元件的大型工程过滤设备，由于笔者本人知识面的限制，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正！

姬忠礼

2019 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 高温气体净化与气固分离技术	1
1.2 高温气固分离技术的发展历程	3
1.3 高温气固分离技术的工程应用领域	8
1.3.1 燃煤增压流化床燃烧联合循环发电技术	8
1.3.2 整体煤气化联合循环发电技术	12
1.3.3 煤气化技术	15
1.3.4 粉煤热解技术	17
1.3.5 催化裂化烟气能量回收系统	18
1.3.6 催化裂化汽油吸附脱硫工艺	20
1.3.7 生物质气化工艺	21
1.3.8 垃圾焚烧和热解工艺	22
1.3.9 冶金过程高温烟气和煤气的余热利用	23
1.4 高温气固分离要求及相关标准	24
1.4.1 燃气轮机叶片等部位的气固分离要求	24
1.4.2 燃料电池等对生物质燃气的净化要求	26
1.4.3 环境排放标准对气体净化的要求	26
参考文献	27
第 2 章 高温气固分离设备的性能对比	30
2.1 高温气固分离技术的主要类型和特点	30
2.2 高温旋风分离器	33
2.2.1 高温旋风分离器的结构型式及应用	33
2.2.2 高温旋风分离器的性能测定与分析	39
2.2.3 高温旋风分离器内的流动特性	44
2.3 高温静电除尘器	46
2.3.1 主要结构型式	46
2.3.2 温度对静电除尘器性能的影响	49
2.3.3 高温静电除尘过程的影响因素分析	52
2.4 颗粒层过滤器	56
2.4.1 颗粒层过滤器的特点	56

2.4.2	颗粒层过滤器的主要类型	57
2.4.3	温度对颗粒层过滤器性能的影响	69
2.5	高温刚性过滤器	70
2.5.1	高温刚性过滤元件的特点	70
2.5.2	高温过滤器的结构型式	72
	参考文献	74
第3章	高温过滤元件的类型和性能	78
3.1	高温过滤元件的分类及发展概况	78
3.1.1	高温过滤元件的分类	78
3.1.2	高温过滤元件的发展历程	80
3.2	高温过滤元件的主要性能及其检测方法	83
3.2.1	过滤元件的主要性能要求	83
3.2.2	过滤元件的力学性能检测方法	86
3.2.3	过滤元件的抗热震性检测方法	99
3.2.4	过滤元件的抗腐蚀性检测方法	101
3.2.5	过滤元件的抗热疲劳性能检测方法	102
3.2.6	过滤元件的过滤性能检测方法	103
3.3	陶瓷粉末过滤元件	107
3.3.1	试管式过滤管	107
3.3.2	通管式过滤管	119
3.3.3	错流式陶瓷过滤元件	123
3.3.4	蜂窝式陶瓷过滤元件	126
3.3.5	其他型式的陶瓷过滤元件	128
3.4	陶瓷纤维过滤管	132
3.4.1	各种纤维过滤袋的耐温性能	132
3.4.2	陶瓷纤维刚性过滤管的材料组成和性能	134
3.5	催化与过滤复合元件	136
3.5.1	烟气脱硝与颗粒物分离的催化过滤元件	136
3.5.2	合成气中焦油脱除与颗粒物分离的催化过滤元件	139
3.5.3	烟气中挥发性有机物脱除与颗粒物分离的催化过滤元件	142
3.6	金属材料过滤元件	142
3.6.1	多孔金属材料过滤元件的发展概况	142
3.6.2	金属粉末烧结过滤管	143
3.6.3	金属纤维烧结过滤元件	148
3.6.4	多层金属丝网过滤元件	149
	参考文献	151

第 4 章 粉尘层的形成及其结构特性	157
4.1 过滤元件表面粉尘层的形成及清除过程	157
4.1.1 粉尘层的形成与脉冲反吹清灰过程	157
4.1.2 表面粉尘层结构和脉冲反吹清灰性能的试验测定	162
4.2 粉尘层的主要物性参数	164
4.2.1 粉尘层的颗粒物性	164
4.2.2 粉尘层的孔隙结构参数	167
4.2.3 粉尘层颗粒间的团聚强度及其测试方法	169
4.3 过滤气体参数对粉尘层结构的影响	174
4.3.1 粉尘层的动态压缩特性	174
4.3.2 操作参数对粉尘层结构的影响	179
4.3.3 粉尘层的压降计算模型	187
4.4 粉尘层架桥现象及其分析	190
4.4.1 粉尘层内颗粒的高温烧结特性	190
4.4.2 粉尘层内颗粒间的低温共熔现象	196
4.4.3 粉尘层架桥现象	200
参考文献	208
第 5 章 脉冲反吹清灰过程及其流动特性	211
5.1 脉冲反吹清灰过程	211
5.1.1 刚性过滤管脉冲反吹系统的组成	211
5.1.2 刚性过滤管脉冲反吹清灰过程	213
5.1.3 清灰效率的测定方法	215
5.2 脉冲反吹清灰过程瞬态压力特性	224
5.2.1 脉冲反吹系统的瞬态压力变化	225
5.2.2 过滤管的渗透性对动态压力波形的影响	232
5.2.3 刚性过滤管内外压力差波形评价方法	235
5.2.4 过滤管表面粉尘层对压力差波形的影响	237
5.2.5 脉冲反吹清灰过程中的流动特性	239
5.2.6 脉冲反吹系统流动模型	242
5.3 脉冲反吹过程中过滤管内外瞬态流动特性	246
5.3.1 过滤管内外瞬态流动特性的测试方法	246
5.3.2 过滤管内外压力差波形的测定	248
5.3.3 过滤管内外瞬态速度场的测定与分析	250
5.3.4 过滤管内外瞬态流场的模拟与分析	253
5.3.5 过滤管脉冲反吹引射性能的测定与分析	256
5.3.6 脉冲反吹清灰过程的图像分析	259

5.3.7	过滤器内气固两相流动特性的模拟分析	262
5.4	粉尘层脉冲反吹清灰模型	263
5.4.1	基于粉尘层压降动态变化的清灰模型	263
5.4.2	基于粉尘层厚度分布的清灰模型	265
5.4.3	基于粉尘层形成年龄的清灰模型	267
5.4.4	基于断裂力学理论的粉尘层清灰模型	271
5.4.5	基于粉体力学应力理论的粉尘层清灰模型	275
5.5	新型脉冲反吹系统	278
5.5.1	压力脉冲耦合清灰系统	278
5.5.2	旋风分离器与过滤器耦合装置	280
	参考文献	282
第 6 章	高温气体过滤器的结构型式	287
6.1	试管式过滤器	287
6.1.1	单层结构过滤器	288
6.1.2	多束多层结构过滤器	300
6.1.3	倒置式结构过滤器	317
6.1.4	两端支撑结构的多层过滤器	321
6.2	通管式过滤器的结构型式	322
6.3	错流式和蜂窝式过滤器的结构型式	327
6.3.1	错流式过滤器	327
6.3.2	蜂窝式过滤器	330
6.4	高温过滤器的设计	332
6.4.1	高温过滤器的设计参数	332
6.4.2	PFBC 和 IGCC 工艺用高温过滤器的主要设计参数	334
	参考文献	339

第1章 引言

自 20 世纪 80 年代以来,随着洁净煤联合循环发电技术的发展和环境保护要求的提高,高温气固分离技术取得了重要进展。用多孔陶瓷材料和多孔金属材料制备的过滤元件具有过滤效率高、耐高温性能好和抗腐蚀强等特点,已广泛应用于煤气化、石油催化裂化、生物质气化、垃圾焚烧和热解及冶金等各个行业。目前高温气固分离技术已可以除净 $1\mu\text{m}$ 以上的固体颗粒,净化后气体浓度小于 $5\text{mg}/\text{m}^3$,但在大型工程用过滤分离设备的设计和温度在 600°C 以上过滤元件的运行可靠性等方面,仍存在不少亟待解决的关键难题。

1.1 高温气体净化与气固分离技术

高温气体净化(gas cleaning)既包括高温气体中颗粒物的分离,也包括高温气体中所含二氧化硫(SO_2)、氮氧化物、微量碱金属、碱土金属及痕量重金属等组分的脱除^[1,2],气体中需要净化的产物可分为以下几个方面。

1. 颗粒物

燃煤过程中产生的颗粒物浓度较高,粒径范围分布宽。高温燃气中直径大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒会对燃气轮机叶片等设备部件产生磨损,严重影响燃气轮机的运行寿命;直径小于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒则会沉积在燃气轮机叶片上,降低燃气轮机运行效率。此外,排放到大气中粒径范围为 PM_{10} (空气动力学当量直径不大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒物)的固体颗粒物可能会进入人体呼吸通道,而直径更小的 $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学当量直径不大于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物)则能够进入人体肺泡甚至血液系统中,直接导致心血管病等。

2. 二氧化硫

燃煤过程中产生的 SO_2 会导致城市空气质量恶化和大规模的酸雨污染。大气中的 SO_2 等硫氧化物,在有水雾、含重金属的悬浮颗粒物或氮氧化物存在时,发生一系列化学或光化学反应生成硫酸烟雾或硫酸盐气溶胶,而硫酸烟雾引起的刺激作用和生理反应等危害,要比 SO_2 气体大得多。此外, SO_2 及其生成的酸雾等还会在金属设备表面产生严重的腐蚀。

3. 氮氧化物

氮氧化物(NO_x)包括一氧化氮、二氧化氮及其他氮氧化物,又简称为硝,其中造成大气污染的 NO_x 主要是 NO 和 NO_2 , NO_x 会损伤人类肺部组织。 NO 毒性不太大,但进入大气后可被缓慢地氧化成 NO_2 。 NO_2 的毒性约为 NO 的5倍,当 NO_2 参与大气中的光化学反应,形成光化学烟雾时,其毒性更强。

4. 痕量重金属元素

煤中还含有锗(Ge)、镉(Cd)、钴(Co)、锰(Mn)、铅(Pb)、镍(Ni)、钡(Ba)、锶(Sr)、汞(Hg)、铬(Cr)等痕量重金属元素。在煤的燃烧过程中,这些元素根据各自本身的化学性质及其在煤中的赋存形式,经过一系列物理和化学过程得到不同的形态,最后以烟气、炉渣或粉煤灰形式排出锅炉系统。这些重金属元素及其化合物不仅污染大气、水体及土壤,甚至危害人类健康。近年来,燃煤过程中的汞排放受到广泛关注,汞不仅毒性极大,而且是最易挥发的重金属,绝大多数的汞以不同的形态赋存于烟气中,如不加以有效脱除,会危害人体健康^[3]。

5. 微量碱金属和碱土金属元素

燃煤过程中的燃气中所含的微量碱金属和碱土金属元素钾(K)、钠(Na)、钙(Ca)等,会与烟气中气态的 SO_3 、 Cl_2 等发生化学反应,生成 Na_2SO_4 、 NaCl 、 K_2SO_4 等多种盐类,沉积在燃气轮机叶片表面,同时与叶片的金属表面进行复杂的化学反应,形成热腐蚀,严重影响燃气轮机的运行寿命^[4]。

高温气固分离技术是指在高温和一定压力工况下,实现含尘气体中气体与固体颗粒物分离的技术。该技术既可以净化气体,又可以达到回收贵重颗粒物或重污染颗粒物的目的。高温气体种类繁多,既包括煤化工、石油化工、冶金及水泥等行业中各种工艺气,又包括排向大气环境的高温烟气和废气。

目前有关高温气固分离技术的气体温度定义略有差别。国际上有关高温气体净化或气固分离的温度范围多数依据德国标准(VDI 3677)中的定义,将气体温度高于 260°C 的称为高温气体(hot gas),低于该温度的则称为中温(warm gas)^[5,6]。Sharma等^[7]将气体净化划分为高温(过滤气体温度大于 300°C)、中温(过滤气体温度低于 300°C)及常温(过滤气体温度低于 25°C)。在环保领域中选用布袋过滤时,一般将气体温度为 $220\sim 260^\circ\text{C}$ 时的气固过滤称为高温气固分离,该定义主要基于布袋过滤材料多数为聚酯类、聚丙烯纤维和芳香族聚酰胺等有机纤维材料,其所能承受的温度低于 260°C ^[1,8]。当过滤气体温度高于 260°C ,则需要选用多孔陶瓷材料或多孔金属材料过滤元件。

当气体温度较低时,粉尘易吸湿,主要影响其过滤分离设备的阻力和粉尘层的脱落特性;而在高温工况下,粉尘颗粒的热力学特性则影响其过滤分离性能。例如,颗粒的熔融软化和烧结特性,会使粉尘层黏结在过滤分离元件表面,导致过滤性能不稳定,影响过滤分离设备的长周期稳定运行。

高温气固分离设备主要包括旋风分离器、静电除尘器及过滤器三种类型,其中过滤器又可分为颗粒层过滤器和阻挡式过滤器^[2,9],表 1.1 给出了高温气固分离技术的分类及其特点^[1,10]。

表 1.1 高温气固过滤与分离技术的分类及其特点

分离器型式		效率	压降	处理流量	适用温度/℃
旋风分离器	传统	低(>90%)	中—高	很高	1000
	高效	>90%(粒径大于5 μm)	中—高	很高	
静电除尘器		>99%(粒径为0.1~100 μm)	很低	低—中	500
颗粒层过滤器		>99%	中	高	
陶瓷纤维滤袋		>99%	低	低—中	370
刚性过滤器	陶瓷过滤管	>99.5%	中—高	中—高	1000
	金属过滤管	>99.5%	中—高	中—高	600
错流式过滤器		>99.5%	低—中	中—高	600

1.2 高温气固分离技术的发展历程

20 世纪 70 年代末至 80 年代初,为了应对世界范围内的石油危机及解决燃煤效率 and 环境污染控制之间的矛盾,提出了增压流化床燃烧联合循环发电和整体煤气化联合循环发电两种新型发电技术^[11-13]。

在 PFBC 和 IGCC 两种发电技术中,均涉及高温燃气和高温合成煤气中的固体粉尘分离这一关键难题。在 PFBC 工艺中,由 PFBC 锅炉产生的高温燃气需要经过高温气固分离设备,分离出其中的粉煤灰等固体颗粒后进入燃气轮机发电,操作压力为 1.1~2.6MPa,高温燃气的温度可达 850℃,为氧化性气氛。而在 IGCC 发电工艺中,由气化炉产生压力为 2.0~3.0MPa 中低热值的合成粗煤气,需要经过高温气固分离装置将粗煤气中的固体灰分除去,经过除尘和脱硫后的净化煤气作为燃料气在燃气轮机中做功发电。IGCC 发电所需要的高温气固分离设备操作温度为 350~400℃,气体组分主要为 H₂ 和 CO,为还原性气氛。因此在 PFBC 和 IGCC 两种发电技术中,高温气固分离设备不仅能满足燃气轮机保护和运行寿命要求,还能使由燃气轮机排出的烟气经过余热锅炉后能直接满足环境排放标准,节省余热锅炉后的常温过滤设备投资和运行费用。

20世纪70年代,美国环境保护署发布的新排放源环保标准(new source performance standards, NSPS),对大于70MW_e(megawatt electric,兆瓦电)的燃煤电站颗粒物排放限值(higher heating value, HHV)为13mg/MJ^[14],可折算为40mg/Nm³①,采用传统的布袋过滤器或静电除尘器可以满足要求。当时考虑到未来燃煤电站颗粒物排放的要求会更加严格,提出了颗粒物浓度的严格限定值为当时排放限值的1/10^[15]。根据高温燃气中颗粒物对燃气轮机的运行寿命和运行效率的影响,尽管各个燃气轮机制造商给出的颗粒物要求略有不同,但均要求燃气轮机进口烟气满足:没有粒径大于10μm的颗粒物;5~10μm的颗粒物质量浓度低于总质量浓度的10%;5μm以下的颗粒物质量浓度低于总质量浓度的90%^[16-18]。综合环保排放和燃气轮机两个方面,PFBC联合循环发电工艺用高温气固分离设备净化后的燃气中颗粒物含量应满足以下要求^[19]。

- (1) 各种不同粒径的颗粒物总浓度小于29ppmw^②。
- (2) 大于10μm的颗粒,其浓度小于1ppmw。
- (3) 大于5μm的颗粒,其浓度小于8ppmw。

由于高温气固分离设备要达到以上燃气轮机净化要求,难度相当大。1978年,美国能源部开展了针对PFBC和IGCC两种发电技术需求的高温高压颗粒物分离方面的研究工作。国际上早期的PFBC锅炉出口高温燃气采用单级或多级旋风分离器无法满足燃气轮机的寿命要求,后来改为旋风与陶瓷过滤器两级或多级组合技术方案,由此促进了高温气体过滤技术的发展。

研究表明,为了达到PFBC联合循环电站燃气轮机的寿命要求,应使燃气轮机入口燃气的含尘量低于30mg/Nm³,即要求除净粒径大于5μm的颗粒,则必须采用高温过滤或多种过滤分离设备组合方式。1982年,在Curtiss-Wright PFBC电站进行了陶瓷毡布袋过滤器和静电除尘器方面的试验。1986年,美国和欧洲等相继开展了颗粒床过滤器、新型静电除尘器及错流式陶瓷过滤器在PFBC试验电厂工况下的性能评价研究。在英国的Grimethorpe PFBC试验电站、德国和芬兰的相关实验室则开展了陶瓷粉末过滤管的性能试验工作^[20]。1989年,小型陶瓷粉末过滤器的性能试验初步表明,高温陶瓷过滤器在PFBC和IGCC工艺中具有突出的技术优势和广泛的应用潜力,随后在美国的Tidd PFBC示范电站进行了长周期运行考核。

1984年,美国能源部委托Gilbert/Commonwealth公司对10种高温气固分离技术进行商用规模的技术经济分析,表1.2给出了统一基准工况的参数对比^[18,21]。通过将10种高温气固分离技术折算到操作气体温度为900℃、压力为0.95MPa和

① Nm³指0℃、1个标准大气压下的气体体积,N代表标准条件。

② part per million weight,按质量计算的百万分之一。

功率为 672MW 的商业 PFBC 电站用高温气固分离装置工况下, 若以两级旋风分离器为基准, 从总成本和运行可靠性等方面综合考虑, 认为静电除尘器、移动床颗粒层过滤器、错流式陶瓷过滤器及陶瓷纤维袋过滤器具有较好的发展潜力。20 世纪 90 年代以来, 陶瓷过滤器和金属粉末过滤器得到了快速发展, 逐步进入了示范电站试验阶段。

表 1.2 各种高温气固分离技术的试验结果

气固分离技术名称	试验单位	气量 /(m ³ /min)	气体温度 /°C	气体压力 /MPa	除尘效率 /%
静电除尘器+旋风分离器	General Electric (GE)	97	885	0.65	93~96
声波团聚+旋风分离器	Aeroproject/ Pennsylvania State University (PSU)		20	0.1	81.86
陶瓷纤维过滤袋	Acurex Corporation	23	790	0.585	99.9
陶瓷粉末过滤元件	Westinghouse	0.42	800	0.93	99.9
干板洗涤器	Air Pollution Technology (APT)	0.62	600	0.965	70~99.7
移动床颗粒层过滤器	Combustion Power Company (CPC)	46	875	0.1	99.1
静电颗粒层过滤器	General Electric (GE)	14	845	0.1	70
固定床颗粒层过滤器	Westinghouse Ducon	14	845	0.965	77~99
磁稳定颗粒层过滤器	Exxon	1.3	880	0.001	97.5
静电除尘器	Cottrell Environmental Sciences (CES)	31	865	0.655	72~99.6

20 世纪 90 年代, 针对高温气体过滤技术尚不能满足大型 PFBC 电站长周期运行的难题, 可采用改进 PFBC 工艺流程和燃气轮机叶片抗磨性能, 例如, 燃气轮机透平叶片采用防磨防腐蚀的涂层、加厚透平叶片、增加高压透平叶片列数进流道结构, 高温气固分离装置采用两级或三级旋风分离器串联的方式, 使进入燃气透平烟气中的含尘量为 300~350mg/Nm³, 基本除净 10 μ m 以上的固体颗粒。将这类燃气轮机称为坚固型, 主要是指其燃气透平叶片可承受燃气中较高浓度的固体粉尘^[4,22]。此后所建的大型 PFBC 电站多数采用了两级或三级旋风分离器串联除尘方式, 但燃气轮机出口烟气经过余热锅炉后需要安装静电除尘器或布袋过滤器以满足大气环保要求。

IGCC 电站由于需要处理的合成气温度低和处理气量小, 可选用降温除尘和选用小型高温过滤器方式。表 1.3 给出了 IGCC 和 PFBC 工艺所用高温气固分离设备的操作参数对比^[15,23]。此外, IGCC 和 PFBC 用高温气固分离设备所需要处理的气体分别为还原性气氛和氧化性气氛, 这也是在高温过滤元件材料选择和结构设计中需要考虑的问题。

表 1.3 IGCC 和 PFBC 所用气固分离设备参数对比

工艺流程	操作压力 /MPa	操作温度 /℃	所需要处理的气体体积 /(m^3/t 煤)	对应不同发电功率等级的电站所需要的处理气量
常规锅炉	1.0	150	13600	
PFBC	1.2	840	3368	75MW _e 电站: 118800m ³ /h
IGCC (空气为气化剂)	2.6	540	460	100MW _e 电站: 20520m ³ /h
IGCC (氧气为气化剂)	3.4	540	215	100MW _e 电站: 10080m ³ /h

20 世纪 90 年代以来有关高温过滤性能的支线试验和示范电站试验考核结果表明, 高温陶瓷粉末过滤器和金属粉末过滤器应满足以下要求^[21]。

(1) 高效的过滤性能: 净化后气体含尘浓度和粒径, 满足下游设备保护和环保排放要求。

(2) 过滤器操作可靠: 在循环运行过程中, 过滤元件易循环再生, 运行压降稳定。

(3) 过滤元件本身要坚固耐用: 适应氧化与还原环境、碱性或酸性气体、热疲劳等工况。

高温陶瓷过滤元件均能满足过滤性能要求, 但过滤器操作可靠性和过滤元件本身的机械性能则是过滤器能否长周期稳定可靠运行的技术关键。表 1.4 给出了 PFBC 高温高压环境下对高温过滤分离设备的设计要求^[23]。

表 1.4 PFBC 高温高压颗粒要求(净化烟气参数)

环境要求 (颗粒物总浓度) /ppmw	燃气轮机保护				总除尘 效率/%	高温高压 系统压降 限定值/kPa	高温高压 系统气体 温度损失 限定值/℃
	最大颗粒 直径/ μm	颗粒大于 5 μm /ppmw	颗粒小于 2 μm /ppmw	颗粒物总 浓度/ppmw			
20~30	20	10	20	15~30	99.4~99.9	15~40	3~6

针对未来更加严格的新排放源环保标准(NSPS)中颗粒物浓度限定值的 1/10 及燃气轮机进口燃气中的颗粒物浓度要求范围, 图 1.1 给出了当时燃煤电厂颗粒物排放的环境保护限定值。此外, 图中还给出了高温过滤器净化后燃气中不同粒径时的颗粒物浓度^[15-17,21]。由图 1.1 可知, 高温过滤器可以同时满足颗粒物环境排放标准 and 燃气轮机进口燃气的要求。

自 20 世纪 80 年代以来, 世界各国从事高温气体净化方面的学术研究机构 and 工业企业的学者基于 PFBC 和 IGCC 工艺、垃圾焚烧等有关高温净化 and 环境保护方面的技术需求, 在开展相关高温气体净化技术研发、小型热态试验及示范装置试验的同时, 也积极开展有关高温气体净化技术的学术交流。1986 年, 在英国的 Surry 大学举办了第一届国际高温气体净化技术会议(International Symposium on

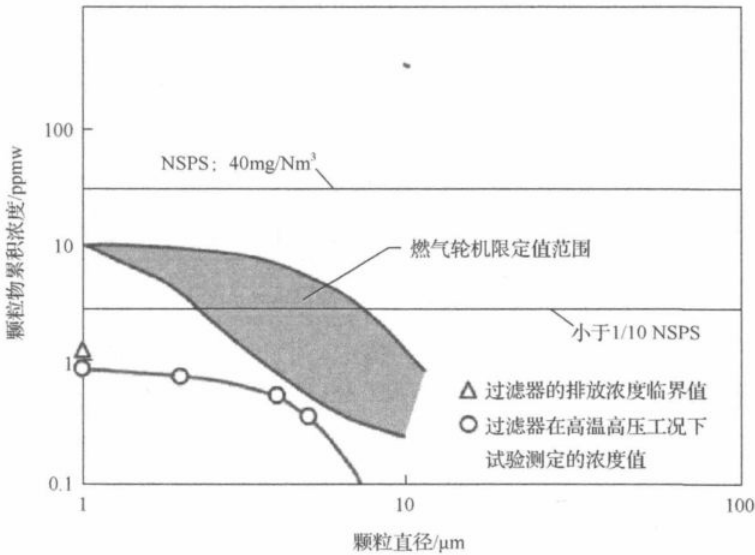


图 1.1 燃气轮机及新能源环保标准中颗粒含量和粒径分布要求

Gas Cleaning at High Temperatures), 会议内容集中在惯性分离器、陶瓷过滤器、静电除尘器、布袋过滤器及颗粒层过滤器等方面, 当时将高温气体的温度定义为高于 200°C 。第二届国际高温气体净化技术会议于 1993 年举行, 截至 2010 年已举办了八届(表 1.5)。

表 1.5 高温气体净化技术会议情况

届次	时间	地点	会议主办方	论文集名称
一	1986.9	英国 Guildford	英国 Surry 大学	Gas Cleaning at High Temperatures
二	1993.9	英国 Guildford	英国 Surry 大学	Gas Cleaning at High Temperatures
三	1996.9	德国 Karlsruhe	Karlsruhe 大学	High Temperature Gas Cleaning (Volume 1)
四	1999.9	德国 Karlsruhe	Karlsruhe 大学	High Temperature Gas Cleaning (Volume 2)
五	2002.9	美国 Morgantown	美国能源部	High Temperature Gas Cleaning
六	2005.10	日本大阪	日本 Ishikawa National College of Technology	Advanced Gas Cleaning Technology
七	2008.6	澳大利亚 Newcastle	澳大利亚 Newcastle 大学	Gas Cleaning at High Temperatures
八	2010.8	中国太原	中国科学院山西煤炭化学研究所	Gas Cleaning at High Temperatures