

# 无电晕高温静电除尘技术的最新进展

杨亚平, 黄蕙芬, 魏启东

(东南大学热能工程研究所, 江苏南京 210096)

**摘要:** 无电晕静电除尘技术是一种在高温条件下, 以阴极的热电子发射使烟气中的粉尘荷电, 然后靠电场力的作用将粉尘捕集, 适合高温场合下应用的新颖除尘技术。本文介绍了它的最新研究成果。

**关键词:** 无电晕静电除尘; 性能试验; 阴极中毒

中图分类号: TU834.6 文献标识码: A

## 1 引言

无电晕静电除尘技术是利用某些表面逸出功较低的材料制成除尘器的平板式发射阴极, 而除尘器的收尘阳极则与常规电晕式静电除尘器基本相同。在高温烟气中, 位于荷电区的热阴极内部自由电子逸出材料表面产生热发射, 同时在极间电压的作用下, 它们沿垂直于烟气中流动的粉尘运动方向行进并与之相遇, 从而使粉尘荷电, 当荷电的粉尘受电场力作用定向运动到收尘区阳极板壁上面被捕集, 使得烟气得到了净化。

由此可见, 这种新颖除尘技术的开发中阴极材料的研制是关键, 它直接关系到该技术的性能优劣

和设备的使用寿命以及工业应用的前景等问题。

## 2 无电晕高温静电除尘技术的几个发展阶段

无电晕高温静电除尘技术由东南大学首创。十几年来, 我们对该技术进行了系统的探索试验和分析研究, 其中包括如下内容。

### 2.1 阴极材料筛选和制造工艺的研究

我们先由单一材料的筛选逐步发展到复合材料的研制, 曾开发出多种低逸出功的阴极材料。目前又研制成功一种在 850 °C 高温条件下常压空气环境中能产生电流密度(本文提及的电流密度均是指阳极板面电流密度)达 120 mA/m<sup>2</sup>, 高压空气环境中(P=0.6 MPa)电流密度 92 mA/m<sup>2</sup> 的性能稳定、品质优良的复合阴极材料<sup>[1]</sup>。采用该材料使得无电晕双区电除尘器的荷电区在极间电压低于 3 000 V 条件下可形成 10<sup>16</sup>~10<sup>17</sup> 个/m<sup>3</sup> 的自由离子密度。这样的粉尘荷电环境比常规电晕式静电除尘器(ESP)中的自由离子密度在 10<sup>14</sup>~10<sup>15</sup> 个/m<sup>3</sup> 的条件要优越 2

收稿日期: 2002-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5860028)和(597760499)

作者简介: 杨亚平(1952-), 男, 江苏南京人, 东南大学副教授。

state of the power generation gas industry [J]. *Global Gas Turbine News*, 2000 (2): 234-242.

[2] LEE S LANGSTON. Gas turbine industry overview [J]. *Global Gas Turbine News*, 1999(2): 123-125.

[3] CAPSTONE TURBINE CORPORATION. Capstone low emissions micro turbine technology [R]. White Paper, 2000. 1-18.

[4] CAPSTONE TURBINE CORPORATION. Capstone low emissions micro turbine tech-

nology [R]. Product Datasheets, 2002. 1-11.

[5] Advanced microturbine system-program plan for fiscal years 2000 through 2006 [R]. U. S. DOE. Office of Power Technologies; 1-15.

[6] Fuel cell and gas turbine. A marriage of efficiency [R]. Siemens Research and Innovation, 2000. 1-15.

[7] 赵士杭. 新概念的微型燃气轮机的发展 [J]. *燃气轮机技术*, 2001, 14(2): 8-

13.

[8] 刁正纲. 微型燃气轮机走向商业化 [J]. *燃气轮机技术*, 2000, 13(4): 13-25.

[9] 关于小功率燃气轮机在 863 专项中立项的建议 [R]. 上海: 上海交通大学, 2002.

[10] 国家高技术研究发展计划(863 计划)重大专项可行性报告 [R]. 北京: 科技部能源办公室, 2002.

(渠源 编辑)

~3 个数量级<sup>[2]</sup>。在复合阴极材料与阴极基座之间的连接上考虑到高温条件下的材料性能差异也由涂敷改进为镶嵌工艺, 使用效果良好。

## 2.2 热态实验装置的发展

在两届国家自然科学基金的支持下, 我们已将无电晕高温静电除尘技术的热态试验由乙炔燃烧为热源, 含尘烟气只能在常压高温(大于 1000 °C)条件下的试验装置, 改进扩展成以轻柴油燃烧为热源, 含尘烟气可在 0~1.0 MPa 高压、800~1 200 °C 高温条件下的试验装置, 不仅在装置的规模上扩大了 2.5 倍, 而且在功能上适应性更强, 能够模拟高温高压含尘烟气条件, 为诸如增压流化床锅炉、燃煤燃气轮机技术和煤气化技术等特殊应用场合的高温除尘技术研究创造了条件。

目前建成的无电晕式高温高压双区静电除尘装置外貌如图 1 所示。这套装置于 1999 年落成, 其烟气侧工作压力 0~1.0 MPa, 工作温度 ≤ 1 200 °C, 烟气流通面积 9 800 mm<sup>2</sup>, 场内烟气流速 0.5~2.9 m/s, 电气侧荷电区耐压 7 000 V, 收尘区耐压 12 000 V, 有效电场长度荷电区为 420 mm, 收尘区为 960 mm, 装置已稳定运行两年时间, 累计运行 2 000 多小时。

## 2.3 在不同应用场合无电晕高温除尘技术的性能试验

图 1 所示试验装置建成之后, 为无电晕高温除尘技术应用条件的研究创造了有利条件, 我们先后开展了下述各类试验研究, 获取了对该技术全面考验的完整资料。

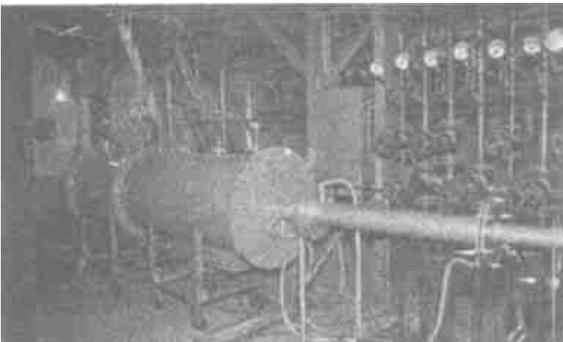


图 1 无电晕高温静电除尘实验装置

### 2.3.1 高温高压烟气环境下的荷电特性

荷电特性是衡量电除尘器性能的关键因素之一。如前所述, 该阴极材料在静止的空气环境中发射性能十分优良。而在流动的高温高压烟气环境中阴极发射性能如图 2~图 3 所示。

这个动态试验结果与文献[1]所介绍的静态试验结果相比, 两者定性规律基本相同, 但阳极电流密度的绝对值却明显小得多。这是因为: 烟气中含有一定的 SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O(气) 等气体杂质, 它们不仅能捕捉自由电子, 而且还会导致气流中离子迁移率的显著下降。

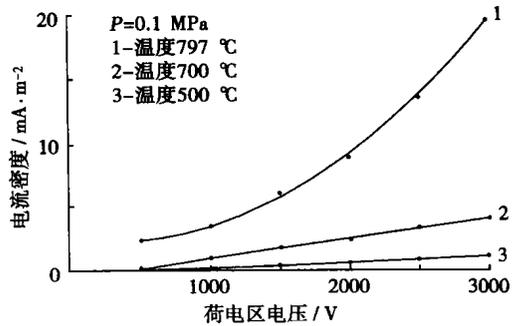


图 2 常压高温烟气中荷电区的伏—安特性

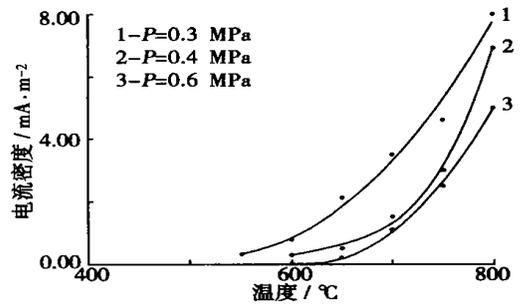


图 3 不同压力下温度对荷电区电流密度的影响(荷电区电压 2 500 V)

然而, 通过不同的温度和压力组合成的烟气环境下的试验, 看到即使在较高的压力(0.6 MPa)下, 温度为 720 °C 时, 只要在荷电区施加 2 500 V 的电压, 电流密度就可高达 4 mA/m<sup>2</sup>, 比常规 ESP 高出一个数量级, 显示了该技术的优势。

### 2.3.2 不同粉尘条件下的装置除尘性能

为考验无电晕高温除尘技术在各种应用场合下的技术性能, 我们分别模拟了燃煤电站、水泥生产窑以及钢铁冶炼炉烟尘条件进行除尘试验。除冶炼烟尘因装置结构设计问题, 试验未获成功, 亟待改进之外, 其它试验均获得成功。

前两种粉尘的粒径分级特性见表 1。

动态试验是在维持装置的荷电区电压为 2 500 V, 收尘区电压为 6 000 V 不变的条件下进行的, 装置内的烟气流速 2 m/s。含尘浓度 8 g/m<sup>3</sup>, 试验的结果

表 1 采用巴柯离心法测得的粒径分布

电厂灰	粒径 $\mu\text{m}$	<2.9	2.9~6.3	6.3~13.4	13.4~17.7	17.7~25.1	25.1~30.2	30.2~34.1	>34.1
	质量比/%	3.3	9.2	35.2	11.7	11.3	5.7	3.7	19.9
水泥粉	粒径 $\mu\text{m}$	<2.5	2.5~5.4	5.4~11.7	11.7~15.4	15.4~21.8	21.8~26.2	26.2~29.6	>29.6
	质量比/%	1.8	7.7	22.2	10	12	6.9	3.9	35.5

如图 4 所示。由图 4~图 6 可见,水泥厂粉尘比火电厂粉尘更容易去除一些。这是因为尽管两种粉尘的比电阻在 700 °C 高温下差别不大,但是前者的密度和粒径都比后者大。这两项因素将使其在电场中的重力沉降速度和荷电效果优于后者,从而呈现出较高的被捕集效率。

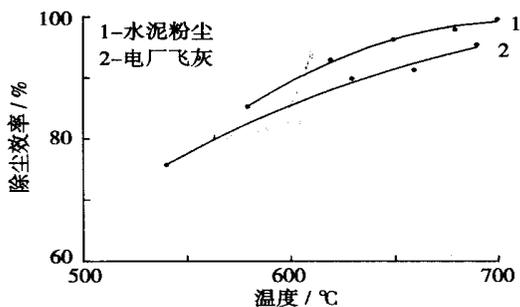


图 4 常压下温度对除尘效率的影响

### 2.3.3 不同电场条件下的装置除尘性能

图 2 是常压下荷电区的伏-安特性,由图可见,随着荷电区阴、阳极之间电压的增加,阳极电流密度也随之增加,这是因为随着阴、阳极间电压的增加,阴极板发射的电子向阳极运动速度增大,到达阳极的电子数也随之增多所致。电流密度增加,粉尘荷电条件改善,装置性能变化。电场作用对装置的除尘性能影响规律如图 5 和图 6。

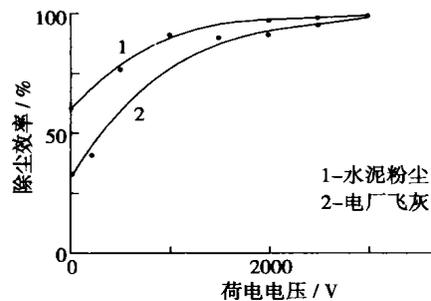


图 5 常压下除尘效率与荷电电压的关系

试验是在常压下,维持发射温度为 720 °C,烟气流速 2 m/s 和烟尘浓度 8 g/m<sup>3</sup> 条件不变,分别改变荷电区和收尘区电压来进行。试验结果表明在荷电区电压达到 2500 V 和收尘区达到 6000 V 之后装置的除尘性能就可达到 92% 以上,并且趋于这个稳定的数值。由此可见,该技术对电场条件的要

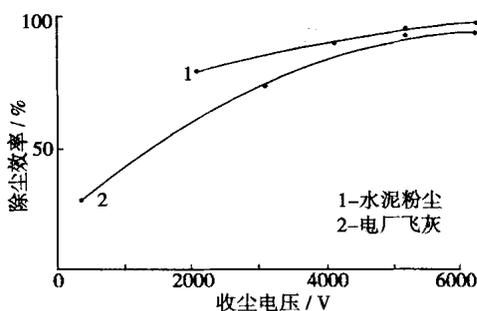


图 6 常压下除尘效率与收尘电压的关系

难和频繁电击穿等棘手问题。

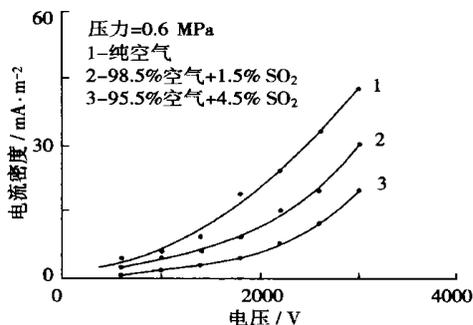


图 7 环境气氛对阴极伏-安特性影响的静态试验

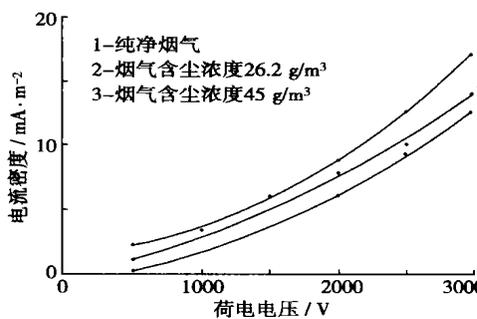


图 8 含尘浓度对阴极伏-安特性影响的动态试验

求相对常规 ESP 来说是很低的,这将有利于解决高温场合下应用电除尘器时碰到的电绝缘困

### 2.3.4 烟气性质对装置性能的影响

试验中我们从烟气含尘浓度和气体组成成分两方面改变条件以便来测试该复合材料的电

极性能变化规律。在压力为 0.6 MPa,温度为 750 °C 时气体组成成分对阴极伏-安特性的影响参见图 7,从中可看出在含有 4.5% SO<sub>2</sub> 气体的环境下,电流密度大幅下降,比同样热力状态下的纯净空气下降了约 50%,这是由于 SO<sub>2</sub> 能有效地捕捉自由电子,且其离子迁移率比空气低的

安特性的影响参见图 7,从中可看出在含有 4.5% SO<sub>2</sub> 气体的环境下,电流密度大幅下降,比同样热力状态下的纯净空气下降了约 50%,这是由于 SO<sub>2</sub> 能有效地捕捉自由电子,且其离子迁移率比空气低的

缘故。

烟气含尘浓度对阴极伏—安特性的影响见图 8, 从中可见无电晕高温静电除尘器可以在一个较宽的含尘浓度变化范围内工作, 虽然含尘量对荷电性能有一定的影响, 但是荷电区的电流密度仍然保持在较高的水平且比较稳定。即使在较高的含尘浓度下它也没有出现类似电流短路, 或常规 ESP 中易出现的“电晕闭塞”似的发射屏蔽等现象, 这将有利于该技术在恶劣环境中的应用。

### 2.3.5 阴极抗中毒特性和时效考验

阴极在实际运用中会因某些原因使发射电流比较快地下降, 这一现象叫中毒<sup>[3~4]</sup>。造成中毒的原因很多, 诸如环境气体的性质、压强、作用时间和工作温度等。

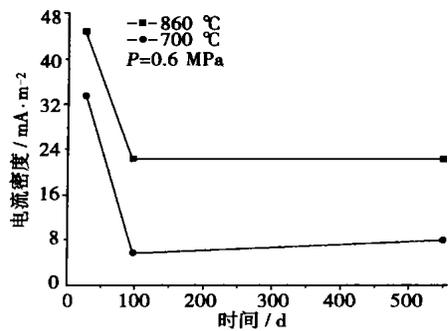


图 9 在高温高压下空气环境中电流密度随时间的衰减关系

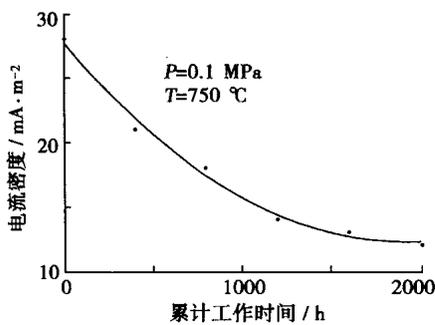


图 10 在高温常压烟气气氛中荷电区电流密度随时间的衰减关系

而表面逸出功较低的材料其活性较好, 尤其是在采用复合工艺制成的阴极材料中其化学成分的稳定性的变化特性是一项重要指标, 它将直接

关系到阴极的使用寿命和工业应用成本以及生产要求的认可程度等问题。我们将该阴极材料分别在空气环境中和烟气环境中加以时效考验, 结果如图 9 和图 10 所示。

试验表明尽管高温烟气对阴极有一定的毒化作用, 但是由该发射极组成的试验装置在常压高温(平均温度 720 °C 以上)下累计工作 2000 h 之后, 荷电区的电流密度仍高达 12 mA/m<sup>2</sup>, 维持比 ESP 板电流密度高 1~2 个数量级的水平, 这不仅说明无电晕静电除尘器可以在高温烟气环境中长期有效地工作, 同时也显示了该技术在静电除尘技术领域独具的优越性能。

## 3 结束语

在国家自然科学基金两次支持之下, 经过多年的努力, 我们在复合阴极材料的组分优化、合成工艺研究、性能测试和无电晕高温静电除尘技术的应用条件与不同应用条件下的特性规律以及装置的使用寿命与运行可靠性等方面进行了全面的试验研究。结果表明, 无电晕高温静电除尘技术是完全适合于高温高压条件下应用的先进除尘技术。它在对电场条件较低的要求下可获得很高的电子发射强度, 使粉尘在电场中的荷电效果显著增强, 这一优良性能正好可以弥补电晕式静电除尘器在高温条件下应用时, 因电晕电压与电弧电压之间随高温烟气密度变小而差距变小, 致使电除尘器工作范围变窄, 性能稳定性下降, 以及电绝缘困难等技术不足之处, 从而为高温静电除尘技术的发展另辟了新径。同时, 所开发的新型阴极材料已通过了两千多个小时的毒化试验性能考验, 仍保持良好的性能特色, 证明其具有良好的工业应用前景。

### 参考文献:

- [1] 杨亚平. 复合阴极材料电子发射特性的基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 53-55.
- [2] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [3] 薛增泉. 电子发射与电子能谱[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.
- [4] 刘元震. 电子发射与光电阴极[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.

(渠源 编辑)

先进微型燃气轮机的特点与应用前景 = **Specific Features of Advanced Micro Gas Turbines and Their Application Prospects** [刊, 汉] / WENG Yi-wu, SU Ming, WENG Shi-lie (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 111—115

A new type of heat engines, advanced micro gas turbines pertain to a category of clean, high-efficiency, low-cost and highly reliable energy supply system. They have attracted considerable attention from academics and witnessed to date a spectacular development. Concerning the worldwide research and development efforts as well as the current usage situation of these turbines, the authors have focused on their technical advances and features. Furthermore, an exploratory study was carried out of a small-sized distributed energy system with a micro gas turbine serving as its core and also of a hybrid gas turbine / fuel cell system. The usage prospects of micro gas turbines in China have been briefly evaluated. **Key words:** micro gas turbine, distributed power generation, cogeneration of cooling energy, process heat and electric power, fuel cell

无电晕高温静电除尘技术的最新进展 = **Recent Advances in the Technology of Non-corona High-temperature Electrostatic Precipitation** [刊, 汉] / YANG Ya-ping, WEI Qi-dong (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), HUANG Hui-fen (Department of Electronics Engineering, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 116—119

The technology of non-corona high-temperature electrostatic precipitation involves an innovative method of dust particle removal suited for use at elevated temperatures. It utilizes the cathode emission of thermal electrons to get the dust particles in flue gases electrically charged. The electrically charged particles are then captured and collected under the action of an electric field. The most recent results of research of the above-cited technology are presented in detail. **Key words:** non-corona electrostatic precipitation, performance test, cathode poisoning

循环流化床中气固两相流动特性的可视化研究 = **A Visual Study of the Gas-solid Dual-phase Flow Characteristics in a Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / TIAN Zi-ping, ZHONG Zhi-qiang, CHEN Yong-guo, CHEN Jun (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 120—124

Through the use of a charge-coupled device's function of fast image acquisition on a self-designed and built test rig obtained were the images of flow conditions in a fluidized bed under different airflow rates, followed by an effective processing of these initial images by using an image processing method. Furthermore, a series of phenomena were studied, including the turn-down flow adhered on a wall, gas local-diffusion coefficient, the profile of local voidage along the longitudinal and transverse axis, and the ascending velocity of bubbles. Also given is the fractal dimension of the boundary curve of bubbles during tests. As a result of the above, realized was the visualization of gas-solid dual-phase hydrodynamic characteristics in a circulating fluidized bed, thus fulfilling a fruitful attempt to use image processing techniques on a circulating fluidized bed. **Key words:** circulating fluidized bed, boiler, gas-solid two-phase flow, hydrodynamics, image processing, visual study

不同煤种燃烧生成多环芳烃的研究 = **A Study of the PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) Emissions Resulting from the Combustion of Different Ranks of Coal** [刊, 汉] / LI Xiao-dong, FU Gang, YOU Xiao-fang, YAN Jian-hua (National Key Lab of the Ministry of Education on Clean Utilization of Energy Sources and Environmental Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 125—127