

降低烟气温度对电除尘器性能影响的数值模拟研究

苏寅彪¹, 郭宝玉², 杨丁¹, 郭俊¹

1. 福建龙净环保股份有限公司 福建 龙岩 364000 2. 莫纳什大学 澳大利亚 维多利亚 3800

作者: 苏寅彪, 邮箱: csu.biao@163.com

摘要 低低温电除尘器的成功应用为电厂节能减排提供了新思路, 与常规电除尘器相比, 低低温电除尘器具有独特的技术优势, 两者的差别在于烟气温度的不同。对电除尘器建立电场模型、气流运动模型、颗粒运动模型、颗粒荷电模型, 研究了降低烟气温度对电场、气-颗粒流的影响。烟气温度由 150 °C 降低至 90 °C, 粉尘比电阻降低, 电除尘器允许最大操作电压升高有利于提高电场场强, 空间电荷密度分布变均匀且电荷量增大有利于粉尘颗粒荷电, 电除尘器除尘效率得到了提高, 细微粉尘颗粒 PM_{2.5} 去除效率也得到了显著提升。因此, 低低温电除尘器除尘性能优于传统电除尘器。

关键词 低低温电除尘器 烟气温度 除尘效率 数值模拟

引言

电除尘器通过气体电离使粉尘颗粒荷电, 在电场力作用下荷电粉尘颗粒向收尘极板运动并在收尘极板被收集, 从而使烟气得到净化, 是目前燃煤电厂除尘的主导设备^[1-3]。

近些年, 随着我国对环境保护的日益重视, 国家对燃煤电厂污染物排放提出了越来越严格的要求, 《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011) 规定一般地区烟尘排放浓度限值为 30 mg/m³, 重点地区烟尘排放浓度限值为 20 mg/m³。GB 13223—2011 的提出, 对电除尘器技术带来了新挑战。

传统电除尘器的入口烟气设计温度为 120~160 °C, 而我国现役许多燃煤电厂锅炉排烟温度普遍高于设计值, 使得机组发电效率低、烟气体积流量大、引风机耗电大、湿法脱硫降温水耗大及造成发电成本高。另外, 烟气温度偏高引起烟尘比电阻升高, 使

电除尘器容易产生反电晕, 随之电除尘效率下降、粉尘排放不达标。

为了满足 GB 13223—2011 的要求, 需对传统电除尘器进行提效改造。当前, 采用低低温电除尘器是燃煤电厂提效改造的有效手段之一, 低低温电除尘器已成为国内外研究的热点。

1 低低温电除尘器技术

低低温电除尘器是在传统电除尘器前增设热回收装置, 使电除尘器的入口烟气温度由 120~160 °C 降低至酸露点温度以下的低低温状态 (一般为 85~90 °C), 使烟气体量减小, 粉尘性质得以改变, 从而提高电除尘器性能^[4-5]。

同传统电除尘器相比, 低低温电除尘器具有明显的技术优势:

(1) 降低粉尘比电阻, 可提高除尘效率

电除尘器的除尘效率与粉尘比电阻密切相关, 粉尘比电阻过高, 容易出现反电晕现象, 电除尘效率将急剧下降。一般而言, 粉尘比电阻在烟气温度为 150 °C 时达到最大值, 如果烟气温度从 150 °C 降低至 100 °C, 粉尘比电阻降幅可达一个数量级以上^[6]。低低温电除尘将烟气温度降低至 90 °C 以下, 粉尘比电阻大大降低, 电除尘器电流密度增大, 从而大幅提高了电除尘效率。

(2) 降低烟气流速, 提高 PM_{2.5} 捕集率
烟气温度降低后, 烟气体积流量相应下降, 电除尘器电场风速降低, 增加了粉尘在电场的停留时间, 有利于提高对 PM_{2.5} 捕集率。温度降低后, 烟气密度增大, 电场击穿

电压将升高,有利于增加电场强度和粉尘荷电量,从而提高除尘效率。

(3) SO_3 捕集效率高,可减少低温腐蚀
在传统电除尘器中, SO_3 为气态,无法被电除尘器捕集。经电除尘后的烟气进入湿法脱硫系统,湿法脱硫系统虽能除去 SO_2 ,但对 SO_3 捕集效率低, SO_3 极易引起下游烟道和烟囱的低温腐蚀。在低低温电除尘器中,烟气温度降低至酸露点温度以下,烟气中大部分 SO_3 冷凝形成酸雾黏附在粉尘表面, SO_3 随粉尘一起被电除尘器捕集。低低温电除尘器对 SO_3 的捕集效率可达 90% 以上^[7],因此低低温能够有效解决湿法脱硫工艺中 SO_3 低温腐蚀难题。

(4) 节能效果显著,可降低电厂运行成本

低低温电除尘器换热装置回收的余热用于加热锅炉冷凝水,可节约电煤消耗,提高锅炉效率。烟气温度降低,可减少湿法脱硫工艺降温耗水量,降低了湿法脱硫的用水成本。另外,由于烟气体积流量减小,湿法脱硫的增压风机电耗减少,可降低湿法脱硫用电成本。

2 研究及思路

低低温电除尘器较传统电除尘器在技术上取得了重大突破,但它仍属于电除尘器范畴。低低温电除尘器与传统电除尘器的本质差别在于降低烟气温度导致烟气特性、粉尘特性、电除尘器电气特性等发生改变,进而引起除尘性能的变化,因此研究烟气温度对电除尘器性能影响是研究低低温电除尘器的基础,具有重要意义。

王金旺等^[8]定性讨论了电厂锅炉排烟温度升高对粉尘比电阻、烟气流量、烟气黏度及驱进速度的影响,并以多依奇公式为基础,定量分析了温度对电除尘效率的影响。由于多依奇公式是在一定假设条件下推导的经验公式,现场电除尘器运行情况一般是难以满足这些假设条件的,因此采用多依奇

公式计算得到的结果与实际情况存在较大偏差。NAOKI 等^[9]实验测得了 $90\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 不同烟气温度时电除尘器的伏安特性及除尘效率,但实验流程较复杂。相对于实验,数值模拟可获得更加全面的数据,并且具有经济性,是研究电除尘过程的一种有效方法。LUO 等^[10]采用数值模拟方法主要研究了烟气温度对高温电除尘器中粉尘颗粒行为的影响,模拟过程未考虑烟气温度对粉尘比电阻的影响,而实际电除尘器中烟气温度通过粉尘比电阻对电除尘器性能会产生十分重要的影响,不可忽视。

本研究根据电除尘各物理过程建立了数值模拟模型,研究了烟气温度对电场、气-颗粒流的影响,为深入低低温电除尘器研究提供新途径。

具体研究思路为:用电场模型研究降低烟气温度对电场的影响,用气流运动模型、颗粒运动模型和颗粒荷电模型研究降低烟气温度对气-颗粒流的影响,最后综合考虑确定降低烟气温度对电除尘器性能的影响。

3 模拟条件

由于电除尘涉及模型众多,计算量大,本研究仅选取线板式电除尘器单通道结构作为研究对象进行数值模拟。电晕线为 $\phi 8\text{ mm}$ 光滑圆线,线间距为 240 mm ,收尘极板间距为 400 mm ,如图 1 所示,对该二维结构进行网格划分如图 2 所示。

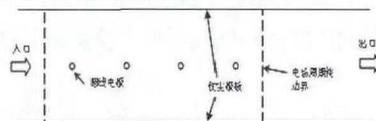


图 1 电除尘器单通道二维结构示意图

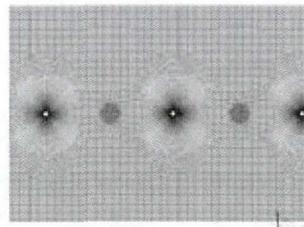


图 2 电除尘器单通道二维结构网格划分

4 数值模拟结果及分析

4.1 温度对电场的影响

烟气温度主要通过烟气密度和离子迁移率对电场产生影响，烟气密度主要影响起晕电压，而离子迁移率主要影响电流密度。另外，烟气温度也可通过粉尘比电阻对电场产生影响。

对电场模型进行数值计算得到不同烟气温度条件下收尘极板有无粉尘层时的电场伏安特性，如图3所示（虚线表示收尘极板无粉尘层，实线表示收尘极板有粉尘层）。由图3可见，与无粉尘层情况相比，有粉尘层的允许操作电压范围更小，在超出范围工作时电除尘器将因粉尘层最大场强超过粉尘介电强度而产生反电晕；在有粉尘情况，烟气温度为150℃时电除尘器的允许操作电压范围极小，电场起晕后再提高电压将产生反电晕，此时电除尘器工作不稳定；烟气温度由150℃降低至90℃时，电场起晕电压增大，受电场击穿和反电晕限制的最大允许操作电压也增大，此时电除尘器的允许操作电压范围扩大，有利于电除尘器稳定工作，并且操作电压的提高有利于提高除尘效率。由于烟气温度降低时粉尘比电阻减小，粉尘不易产生反电晕，因此最大允许操作电压提高。

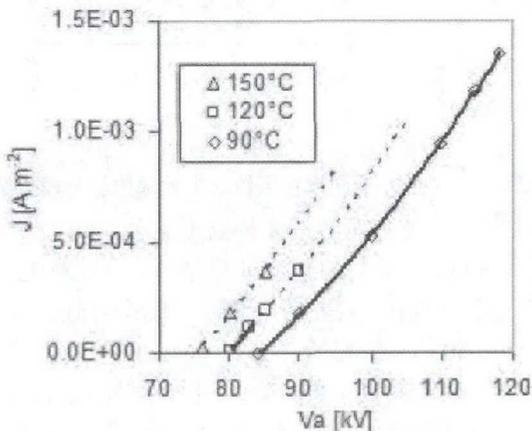


图3 不同温度的电场伏安特性

图4示出不同温度的电场空间电荷分布，在150℃时，空间电荷集中分布在狭小区域内，不利于粉尘颗粒荷电。温度降低至90℃时，电场空间电荷量增大且电荷分布更均匀，可提高粉尘颗粒的荷电量，有利于提高除尘效率。

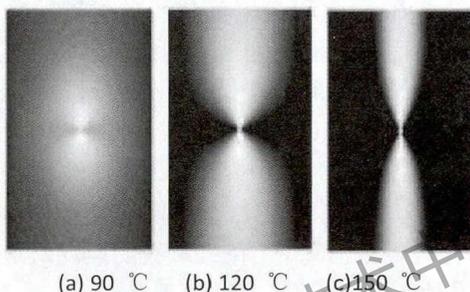


图4 不同温度的电荷密度分布

4.2 温度对颗粒流的影响

烟气从图1入口进入电场经过电除尘后从出口流出，温度可通过烟气密度和黏度两个参数对气-粉尘颗粒两相流直接影响。此处将电场设定为一固定值，通过气流运动模型、颗粒运动模型、颗粒荷电模型对不同温度下气-粉尘颗粒两相流进行数值模拟，得到0.05~25.00 μm不同粒径(ρ)粉尘颗粒在不同温度条件下的除尘效率，如图5所示。

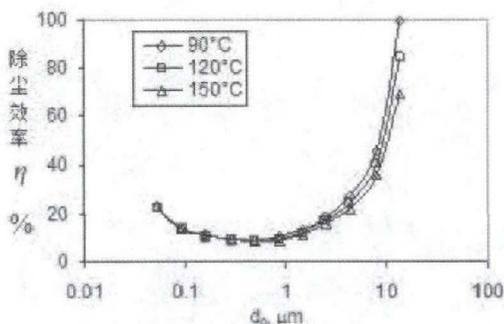


图5 不同粒径颗粒的除尘效率
(定场强条件)

从图5可以看出，温度主要对大颗粒的除尘效率有影响，温度越低，颗粒除尘效率越高，而，对小颗粒的影响较小；同温度条件下，大颗粒的除尘效率高，随着颗粒粒径

减小，除尘效率降低，粒径为 0.50 μm 的颗粒除尘效率最低，小于 0.50 μm 的颗粒除尘效率又逐渐提高，这种趋势与 MCCAIN 等^[11]的研究结果是相吻合的。

实际电除尘过程与上述假定分析存在一定偏差的：首先，颗粒是逐渐荷电的；其次，颗粒饱和荷电量与所处位置的场强有关，而各点的场强是不同的。因此，各个位置的颗粒饱和荷电量不同。实际上，悬浮颗粒的荷电量是处于增加或保持不变的。将温度为 120 °C 电场模型的数值计算结果引入气-颗粒流模型中，对不同粒径颗粒运动过程进行数值计算，得到颗粒的运动轨迹如图 6 所示。

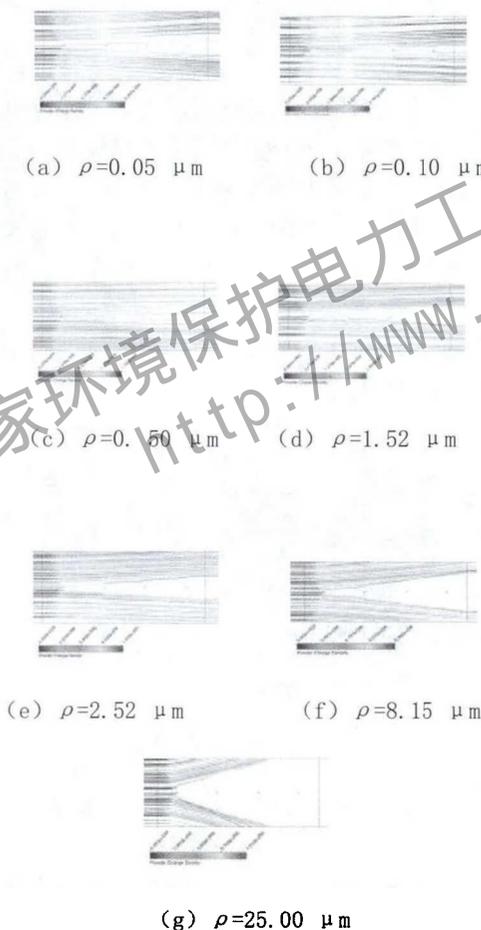


图 6 不同粒径颗粒的运动轨迹

4.3 综合数值模拟结果

温度变化时，电场分布随之改变，因此温度也可通过电场对气-粉尘颗粒产生作用。在电除尘器数值模拟中，对电场模型、气流运动模型和颗粒运动模型进行耦合数值计算，得到 0.05~25.00 μm 不同粒径颗粒在不同温度的除尘效率，如图 7 所示。对于相同粒径的颗粒，烟气温度从 150 °C 降至 120 °C 时，除尘效率增加 4%~11%；烟气温度从 120 °C 降至 90 °C 时，除尘效率增加 22%~50%。显然，在较低烟气温度时降低相同幅度的温度对提高除尘效率作用更加明显。当烟气温度为 150 °C 时，低除尘效率的颗粒粒径范围为 0.10~2.50 μm。随着烟气温度降低至 90 °C 时，低除尘效率的颗粒粒径范围变小为 0.20~0.50 μm，其他粒径范围的颗粒都具有较高的除尘效率。因此，降低烟气温度将提高不同粒径粉尘颗粒整体的除尘效率，低低温电除尘器除尘效率比常规电除尘器除尘效率高。

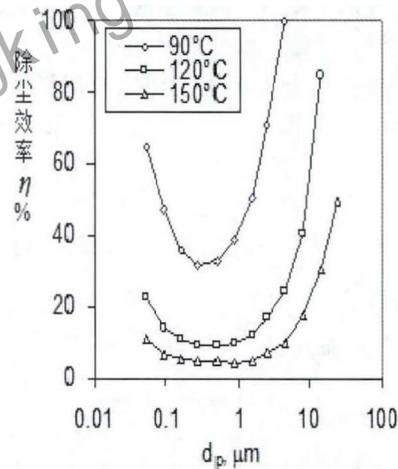


图 7 不同粒径颗粒除尘效率的综合模拟结果

表 1 列出了 3 种温度条件下，电除尘器各性能参数的数值计算结果。温度对电除尘器 PM_{2.5} 捕集及电能消耗影响较大，在 150 °C 时，电除尘器对 PM_{2.5} 的除尘效率低，PM_{2.5} 除尘效率为 7%，电能消耗较低；烟气温度降低至 90 °C 时，电除尘器对 PM_{2.5} 除尘效率提高至 71%，但相应的电能消耗也增大。

表 1 不同温度的电除尘器性能参数

温度 ℃	密度 kg·m ⁻³	动力 粘度 Pa·s	粉尘 比电阻 Ω·m	有效 电压 kV	电功 率 w/m ²	效 率 %
90	0.9237	1.965 ¹⁰ ⁻⁵	1.171 ¹⁰ ⁹	118.4	0.160 0	71
120	0.8526	2.087 ¹⁰ ⁻⁵	1.065 ¹⁰ ¹⁰	82.9	0.010 4	17
150	0.7917	2.206 ¹⁰ ⁻⁵	3.149 ¹⁰ ¹⁰	76.0	0.002 1	7

需要指出的是,烟气温度变化引起实际电除尘器的电功率变化不如表 1 明显。由于电场模型中 Peek 方程计算起晕电压和击穿电压未考虑粗糙度、粉尘黏附等实际因素,使数值模拟得到的起晕电压和击穿电压偏高,进而引起电流密度偏大,相应的电功率与实际偏差较大。在后续研究中,需对模型继续进行完善。

6 结论

(1) 烟气温度由 150 °C 降低至 90 °C 时,电除尘器的允许操作电压范围扩大,有利于电除尘器稳定工作,因此低低温电除尘器提高了允许操作电压。

(2) 对于 0.05~25.00 μm 的粉尘颗粒,大颗粒的除尘效率高,随着颗粒粒径减小,除尘效率减小,粒径为 0.50 μm 的颗粒除尘效率最小。

(3) 烟气温度由 150 °C 降低至 90 °C 时对提高各粒径粉尘颗粒的除尘效率是有利的,因此低低温电除尘器除尘效率优于传统电除尘器。

参考文献

- [1] 郝吉明,马广大,王书肖.大气污染控制工程[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [2] 王春丽.电除尘器的数值模拟与实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2006.
- [3] 岳敏.电除尘器气流分布数值模拟研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [4] 蒋俊.低低温电除尘器的应用及其存在的问题[R].蚌埠:中国环境保护产业协会,2013.
- [5] 熊桂龙,李水清,陈晟,等.增强 PM_{2.5} 脱除的新型电除尘技术的发展[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2217-2223.
- [6] 中国环保产业协会电除尘委员会.节能减排——低低温电除尘技术“技高一筹”[J].中国环境报,2013(6):1-7.
- [7] 叶子仪,刘胜强,曾毅夫,等.低低温电除尘技术在燃煤电厂的应用[J].中国环保产业技术与工程应用,2015(5):22-25.
- [8] 王金旺,张燕,张建中.火电厂锅炉排烟温度升高对静电除尘器效率影响的探讨[J].节能,2013(12):30-34.
- [9] NAOKI N,HISAO M.Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler[J]. Advanced Powder Technology,2010,21:495-499.
- [10] LUO Kun, LI Yan, ZHENG Chenghang, et al. Numerical simulation of temperature effect on particles behavior via electrostatic precipitators[J]. Applied Thermal Engineering,2015,88:127-139.
- [11] MCCAIN J D, GOOCH J P, SMITH W B. Results of field measurements of industrial particulate sources and electrostatic precipitator performance[J]. Journal of the Air Pollution Control Association. 1975,25:117-121.