

低低温电除尘器实验与数值模拟研究进展

郭俊¹, 杨丁¹, 郭宝玉², 苏寅彪¹, 叶兴联¹, 余艾冰², 李水清³

¹福建龙净环保股份有限公司, 福建龙岩, 36400, 中国

²新南威尔士大学材料科学与工程学院, 悉尼, 2052, 澳大利亚

³清华大学机械工程学院, 北京, 100084, 中国

作者: 郭俊 邮箱: junguo318@139.com

摘要 低低温电除尘器是近期中国燃煤电厂实现烟气超低排放控制的重要设备, 为了揭示低低温电除尘器的除尘机理和性能影响因素, 龙净环保开展了大量的研究工作。研究工作包括在实验室和工程条件下的实验测试及低低温电除尘器的数值模拟。在低低温电除尘器实验研究部分, 详细论述了在实验室条件下以及工程中温度对粉尘比电阻、分级脱除效率及荷电量的影响, 测试结果表明降低烟气温度, 粉尘比电阻减小, 粉尘的分级脱除效率和荷电量得到提高, 工程应用的电除尘器除尘效率显著提高。在数值模拟部分, 回顾了电除尘器数值模拟的历史、技术进展及存在问题, 详述了数值模拟采用的主要方法和工作进展, 并对模型产生的结果进行了分析。研究表明, 低低温电除尘器通过提高工作电压, 降低粉尘比电阻, 对提高电除尘器性能具有显著作用; SO₃酸冷凝效应增大了粉尘颗粒的有效介电常数, 可提高粉尘的饱和荷电量; 烟气温度的降低, 改变了气流密度、粘度、电场、粉尘比电阻、SO₃沉积状况, 从而提高电除尘器效率。

关键词 低低温电除尘器, 机理研究, 实验, 数值模拟

1 背景

电除尘器具有除尘效率高、设备阻力小、处理烟气量大、运行费用低且无二次污染等优点, 是目前燃煤电厂除尘的主导设备^[1]。粉尘比电阻是影响电除尘器除尘性能的敏感因素, 理想的粉尘比电阻为 10⁴~10¹¹Ω·cm 一般燃煤电厂的电除尘器运行在 120℃~150℃, 在此温度范围粉尘比电阻较高, 被收尘极板捕集时不易释放电荷, 以致清除极

板上的飞灰需增大振打强度, 增加了二次扬尘。同时, 当粉尘比电阻高到一定程度会产生“反电晕”现象, 造成电除尘器效率急剧下降。

从温度角度降低粉尘比电阻的方法有两种: 1) 提高电除尘器工作温度; 2) 降低电除尘器工作温度。根据此思路形成了两种不同类型的电除尘器。提高电除尘器工作温度, 可以使粉尘体积比电阻减小而降低粉尘比电阻, 基于此原理产生了高温电除尘器。在上世纪 60~80 年代期间美国建造了许多高温电除尘器, 将它们置于燃煤电厂空预器前端, 工作温度为 300℃~450℃。然而这种电除尘器由于种种弊端现在已不多采用了。降低电除尘器工作温度(一般从 120℃~150℃降低至 90℃左右), 可以使粉尘表面比电阻减小而降低粉尘比电阻, 基于此原理产生了低低温电除尘器^[2,3]。

2 低低温电除尘技术

低低温电除尘器是利用以水为媒介的低温省煤器或 GGH 换热器作用回收烟气余热, 使烟气温度降低至 90℃低低温状态, 烟气质减小, 粉尘性质得以改变, 从而提高电除尘器性能^[4]。

2.1 低低温电除尘器特点

与常规电除尘器相比, 低低温电除尘器具有明显的技术优势。

(1) 提高除尘效率

低低温电除尘器降低温度后, 首先减小烟气体积流量, 即降低风速, 增加了粉尘在

电场的停留时间；其次，烟气粘度减小，粉尘受气流阻力也减小；另外，烟气密度增大，电除尘器工作电压得到提高；同时，飞灰比电阻一般可以减小至适宜除尘区间。降低温度后产生的这些作用对提高电除尘效率都是有利的，因此低低温电除尘器比常规电除尘器具有更高的除尘效率，可实现燃煤电厂减排。

(2) 有助于 SO₃ 捕集，减少低温腐蚀

在常规电除尘器中，SO₃ 为气态，难以被电除尘器捕集，后续的石灰石-石膏湿法脱硫系统对 SO₃ 捕集效率也不高。SO₃ 极易引起下游烟道和烟囱低温腐蚀。在低低温电除尘器中，烟气温度降低至酸露点，烟气中大部分 SO₃ 冷凝形成酸雾黏附在粉尘表面，SO₃ 随粉尘一起被电除尘器捕集（SO₃ 冷凝对粉尘还有调质作用），因而减少烟道和烟囱的低温腐蚀。

(3) 节能效果显著，可降低电厂运行成本

若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；若换热装置回收的余热用于加热湿法脱硫后烟气，脱硫后烟温升高可减少湿烟囱腐蚀和可见烟羽。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。加装换热装置会产生部分阻力，但因烟气体积流量减小，引风机的电耗基本不变，而湿法脱硫的增压风机电耗减少，可降低湿法脱硫用电成本。因此低低温电除尘器可实现节能，降低电厂运行成本。

2.2 低低温电除尘器的产生及发展

低低温电除尘器最早出现在上世纪 70 年代（1970s），应用于澳大利亚 Liddell 电厂。该电厂燃用澳大利亚 Bayswater 低硫煤，飞灰属于高比电阻粉尘，为了解决排放问题，电厂尝试采用主空预器和二级空预器将烟气温度降低至 90℃ 左右，电除尘效率得到显著提高，代表电除尘器性能参数的粉尘有效驱进速度比 160℃ 时提高 70%^[2]。在 80 年代（1980s），丹麦 Ensted 电厂为解决改燃低硫煤的飞灰高比电阻问题，借鉴了 Liddell 电厂

经验，将电除尘器工作温度由 130℃ 降低至 105℃，并采用半波间歇供电，粉尘的有效驱进速度提高了 2 倍^[5]。在 90 年代，日本开发了低低温电除尘器，在空预器后采用无泄漏 GGH 将烟气温度降低至低于 100℃，电除尘器出口粉尘浓度可达到小于 5mg/Nm³，而 GGH 回收的烟气热量用于加热湿法脱硫后烟气避免了湿烟囱和可见烟羽的产生。至此以后，低低温电除尘器在日本得到大规模应用^[6]。

2.3 低低温电除尘器在中国的应用

近些年在中国，随着经济快速发展，燃煤电厂装机容量也持续快速增长，成为大范围雾霾污染的重要因素之一。为了改善环境，中国政府发布《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 30mg/m³，重点地区烟尘排放浓度限值为 20mg/m³。新标准的提出，对电除尘技术带来了新挑战。为了适应新排放标准的要求，燃煤电厂需寻求新的技术途径实现粉尘超低排放。国外成功应用经验表明低低温电除尘器可实现节能、减排的双重目标^[7]，这为中国燃煤电厂节能减排提供了新思路。

大唐宁德电厂#4 炉 600MW 机组、江西新昌电厂#1 炉 660MW 机组等一批低低温电除尘器工程案例的成功实施，开启了低低温电除尘器在中国燃煤电厂的大规模应用，目前低低温电除尘器已成为中国燃煤电厂实现烟气超低排放控制的重要设备^[8]。

2.4 龙净环保低低温电除尘技术

福建龙净环保股份公司（文中简称龙净环保）是中国最大环保设备供应商，公司于 2006 年在中国率先开展了低低温电除尘器的研究工作，2010 年取得样机突破，形成了龙净低低温电除尘器新产品（LSC 低低温电除尘器），2012 年全国首台 600MW 机组低低温电除尘器在大唐宁德电厂提效改造工程中应用，各项指标均达到了较好水平。目前公司已投运低低温电除尘器的装机容量累计达到 30GW，工程业绩全球领先。

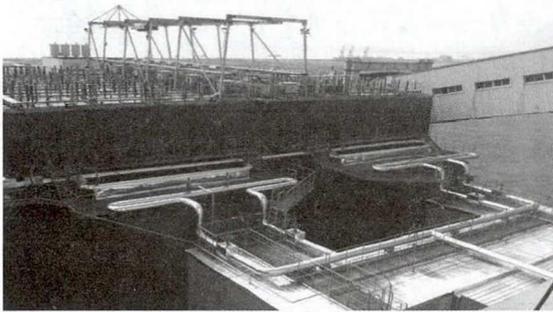


图1 龙净低低温电除尘器示范工程
(大唐宁德电厂 600MW 机组低低温电除尘器)

2.5 低低温电除尘技术需要研究的问题

低低温电除尘器在中国的大量工程应用给技术研究提出了一个挑战,工程师急需了解这种条件下的除尘机理,需要研究分析性能影响因素的定性和定量关系,这包括以下几方面:

(1) 从机理上,低低温电除尘器除了降低粉尘比电阻外,其他影响除尘效率的因素(如粉尘荷电量、工作电压、SO₃沉积、凝并等)是如何变化的。

(2) 对不同粒径的颗粒物,除尘效率影响如何,特别是细颗粒物的捕集特性有哪些变化。

(3) 工程应用(不同煤种、不同工况)条件下,在降低烟温时电除尘器的性能改善对比测试。

(4) 从长远来看,逐步建立一个较为完善的分析性能影响和预测性能的数字模型。

以下将叙述我们在这方面的工。

3 低低温电除尘器实验研究

为了揭示低低温电除尘器的除尘机理和性能影响因素,龙净环保和清华大学合作开展了低低温电除尘器分级除尘效率、粉尘荷电、细颗粒物捕集、SO₃脱除等方面的实验研究工作,分别对实验室条件和工程现场条件低低温电除尘器进行了性能影响因素研究。

3.1 实验室条件下温度对粉尘脱除效率及荷电量影响的研究

为了比较分析不同烟气温度对电除尘器性能的影响,建立了可控制温度的电除尘器实验台进行电除尘过程实验,通过改变入口温度,研究其对粉尘脱除效率及荷电量的影响规律。

电除尘器实验台如图2所示。加热器对气流加热温度最高可达150℃,烟道及电除尘器壳体设有保温层,保证电除尘器进出口温差在3℃以内。粉尘与气流混合后一起进入电除尘器。

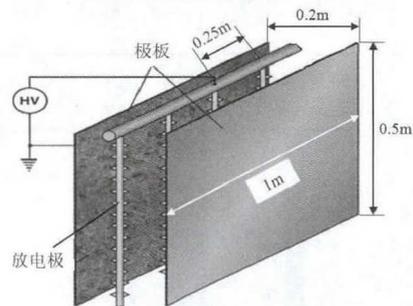
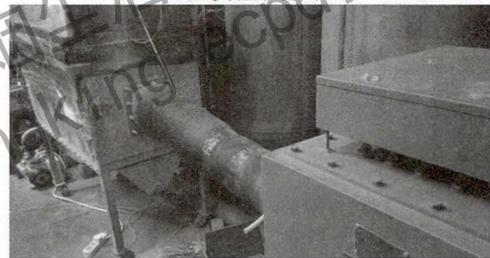
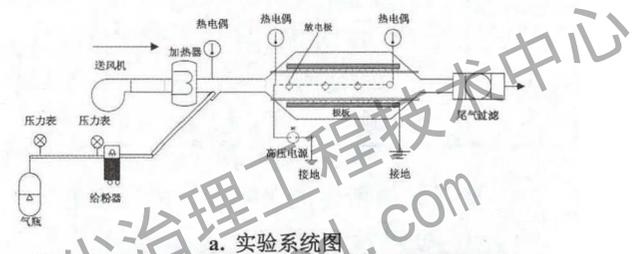


图2 电除尘器实验台

实验电除尘器尺寸、气体流速的选取按照电除尘器除尘过程中的主要控制方程原理,以保证实验台与实际电除尘器停留时间相近,并有相似的流场、空间电荷分布和电晕风为基本原则,具体过程略去。实验所用灰样成分如表1所示。采用马尔文激光粒度分

析仪对实验所用灰样进行粒度分析，得到灰样粒径分布如图3所示。

表1 实验所用灰样成分分析

成分	含量 (%)	成分	含量 (%)	成分	含量 (%)
Fe ₂ O ₃	6.55	K ₂ O	1.00	SiO ₂	51.11
CaO	4.87	Na ₂ O	0.42	Al ₂ O ₃	29.26
MgO	0.99	MnO ₂	0.06	TiO ₂	1.07

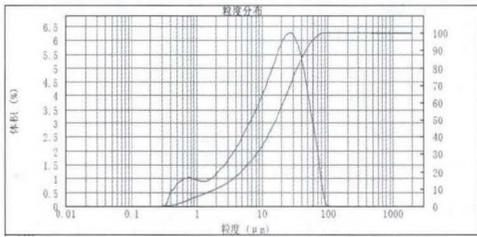


图3 实验所用灰样粒度分析

对实验中所用的飞灰进行离线比电阻分析，得到如表2和图4所示的结果，图5中的蓝色和红色线条表示本实验中的烟气温度（90℃和130℃）。粉尘离线比电阻在低温阶段随温度升高而增大，在157℃达到最大值，之后随温度升高而降低。90℃时粉尘离线比电阻比130℃时小一个数量级。

表2 飞灰离线比电阻与温度的关系

温度 (°C)	80	105	120	130	157	185
比电阻 (Ω·cm)	3.16×10 ⁹	4.36×10 ¹⁰	8.44×10 ¹⁰	1.02×10 ¹¹	2.07×10 ¹¹	1.73×10 ¹¹

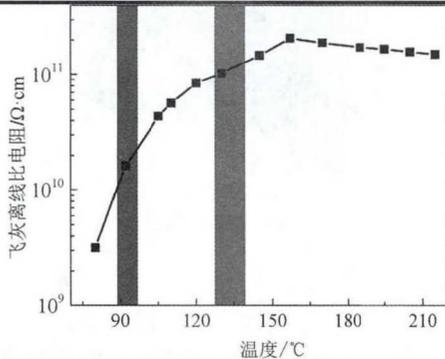
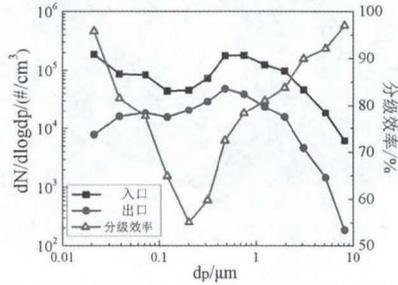


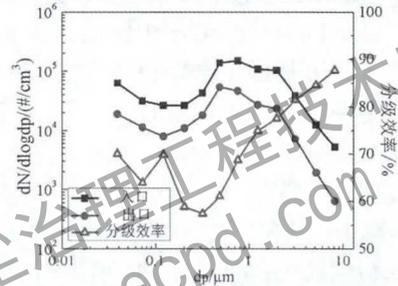
图4 实验所用飞灰离线比电阻

实验采用荷电低压撞击器（ELPI）对电除尘器出入口粉尘数浓度和出口荷电量进行测试，测得工作电压为20kV、电场风速为

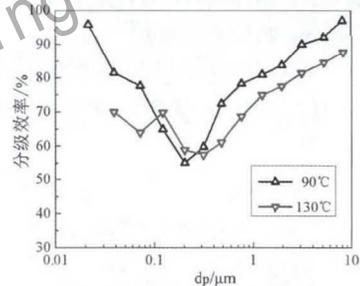
0.31m/s、温度为90℃和130℃时电除尘器出入口粉尘数浓度及粉尘分级脱除效率和出口粉尘荷电量结果如图5和图6所示。



a. 90℃电除尘器出入口粉尘数浓度及分级脱除效率



b. 130℃电除尘器出入口粉尘数浓度及分级脱除效率



c. 90℃和130℃粉尘分级效率对比
图5 温度对粉尘分级脱除效率的影响

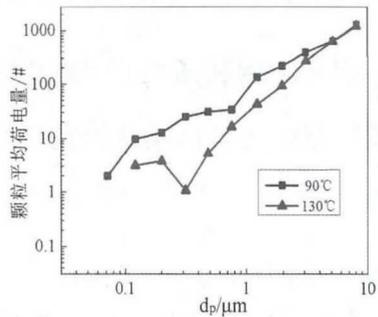


图6 温度对出口粉尘荷电量的影响

图5显示90℃和130℃温度下粉尘分级脱除效率的最低值均出现在0.1-0.3μm区间，除

了这个区间外，90℃工况下其他粒径的脱除效率在均比130℃更高。

图6显示，与130℃相比，90℃下颗粒的平均荷电量明显增加，2.5μm以下颗粒物荷电量增加尤为明显。

3.2 低低温电除尘器工程应用测试

某电厂300MW机组为了满足排放要求，对原电除尘器进行了低低温工程改造，通过在电除尘器前加设烟气换热器实现烟气降温。此低低温电除尘器通过改变换热器的投运状况，可将烟气温度分别调整至130℃、93℃、84℃。对各温度工况下粉尘在线比电阻、粉尘分级脱除效率和电除尘器出口粉尘荷电量进行测试。

(1) 温度对粉尘在线比电阻的影响

在离线条件下，粉尘所处烟气条件发生改变，使实验室测试的粉尘比电阻难以反映出工况条件下粉尘的真实比电阻，因此需要对工况条件下粉尘比电阻进行在线测试。对不同温度工况下电除尘器入口粉尘比电阻进行现场在线测试结果如表2所示。烟气温度由130℃降低至93℃、84℃时，粉尘在线比电阻随温度降低而降低。

表2 不同温度粉尘在线比电阻

烟气温度 (°C)	测定电压 (V)	飞灰比电阻 (Ω·cm)
130	100、250、500、1000	6.09×10 ¹¹
93	100、250、500、1000	2.46×10 ¹¹
84	100、250、500、1000	1.60×10 ¹¹

(2) 温度对粉尘分级脱除效率的影响

采用ELPI对不同温度工况下电除尘器入口和出口粉尘数浓度随粒径分布的变化情况开展测试，并计算相应的粉尘分级脱除效率，结果如图7所示。

在相同温度工况下，0.1μm附近的脱除效率与其它粒径范围相比更低，随着粒径不断增大，分级效率整体向着增加的趋势发展，特别是当粒径大于1μm时，粉尘脱除效率有明显增加。

对比各温度下粉尘分级脱除效率可知，随着烟气温度的降低，粉尘脱除效率增加。烟气温度为84℃时，在各个粒径段粉尘分级脱除性能均高于130℃和93℃运行工况。

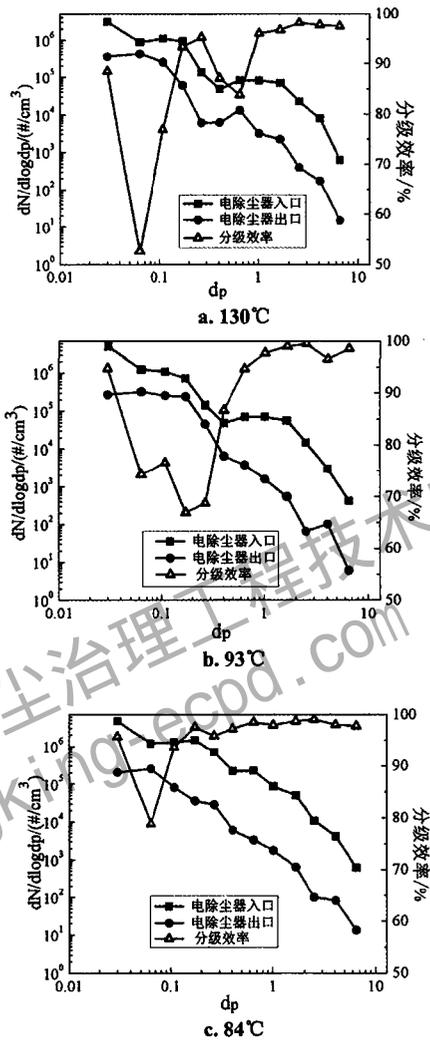


图7 温度对粉尘分级脱除效率的影响

(3) 温度对PM10、PM2.5质量脱除效率的影响

ELPI对电除尘器入口及出口测试的是粉尘的数浓度分布，可根据式(1)计算得出电除尘器入口和出口的粉尘分级质量浓度：

$$M_i = \frac{\pi}{6} (D_i)^3 \rho N_i \quad (1)$$

其中，*i*表示级数； ρ 表示粉尘密度，取值为2600kg/m³；*D_i*为每一级的几何平均粒径。

PM10、PM2.5的质量脱除率按式(2)计算。

$$\eta = (1 - m_{outlet,j} / m_{inlet,j}) \times 100\% \quad (2)$$

其中 *m_{inlet,j}*、*m_{outlet,j}* 分别表示电除尘器入口和出口PM10或PM2.5的质量浓度。

各温度工况下电除尘器入口和出口的PM10、PM2.5质量浓度及其脱除效率如表3所示。可以看出，随着烟温降低，PM10和PM2.5的脱除效率均提高，特别是PM2.5的脱除效率提高十分显著。

表3 不同温度PM10、PM2.5质量浓度及脱除效率

烟气温度 (°C)	PM10质量浓度 (/mg/Nm³)		PM10效率 (%)	PM2.5质量浓度 (mg/Nm³)		PM2.5效率 (%)
	入口	出口		入口	出口	
130	904.4	29.4	96.7%	276	11.3	95.9%
93	632.1	12.3	98.0%	225.4	5.5	97.5%
84	645.3	11.9	98.2%	224.5	4.5	98.0%

通过PM10和PM2.5的脱除效率得到其穿透率(1-η)，如图8所示。从图中可以看出，烟气降温后，PM10和PM2.5的穿透率明显减小，说明了与常规电除尘器相比，低低温电除尘器对细颗粒脱除性能具有显著的技术优势。

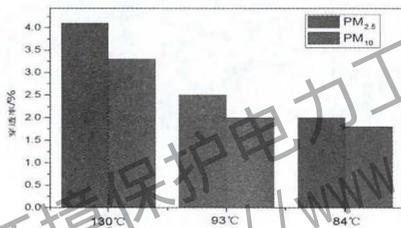
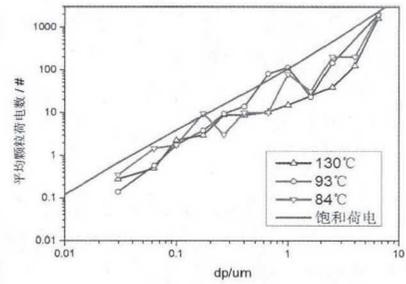


图8 不同温度PM10、PM2.5的穿透率

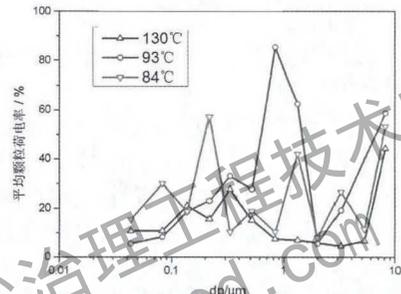
(4) 温度对粉尘荷电量的影响

不同温度工况下电除尘器出口粉尘荷电量和荷电率（粉尘实际荷电量与饱和荷电量的比值）如图9所示。在同一温度下，粉尘荷电量随粒径增大而增大，但各粒径范围内的颗粒均难以达到饱和荷电；实验结果的总体趋势是，烟气温度降低后粉尘平均荷电量得到提升。

(5) 低低温电除尘器工程测试结果对比 为了获得不同煤种、不同工况条件下低低温电除尘器的除尘性能的改善关系，龙净环保对多个电厂的低低温电除尘器在不同温度下的除尘效率进行测试，其中4个电厂的测试结果如表4所示。对不断积累的工程应用测试结果进行总结、分析可以掌握不同煤种、不同工况条件下低低温电除尘器的性能改善系数，可用于指导新设计的低低温电除尘器（含改造）的方案选型。



a.不同温度粉尘荷电量



b.不同温度粉尘荷电率

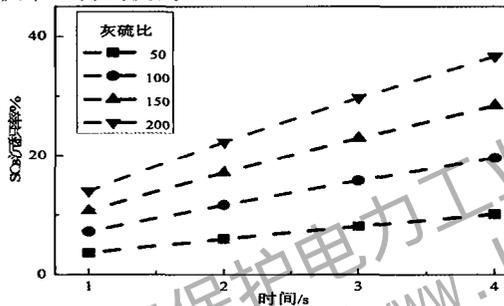
图9 温度对粉尘荷电量的影响

表4 不同电厂低低温电除尘器效率

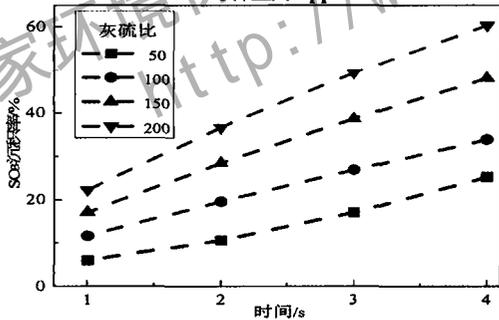
	温度 (°C)	入口浓度 (mg/Nm³)	出口浓度 (mg/Nm³)	除尘效率 (%)
No.1 电厂 600MW 低低温电除尘器	120	7895	90.6	98.85 2
	97	7860	29.3	99.62 7
No.2 电厂 660MW 低低温电除尘器	147	40021	42.6	99.89 4
	103	39820	13.1	99.96 7
No.3 电厂 135MW 低低温电除尘器	154	2275	15.2	99.33 2
	122	2102	9.8	99.53 4
No.4 电厂 135MW 低低温电除尘器	148	23760	98.2	99.55 8
	117	20300	16.3	99.91 8

(6) 灰硫比、 SO_3 浓度对 SO_3 沉积率的影响

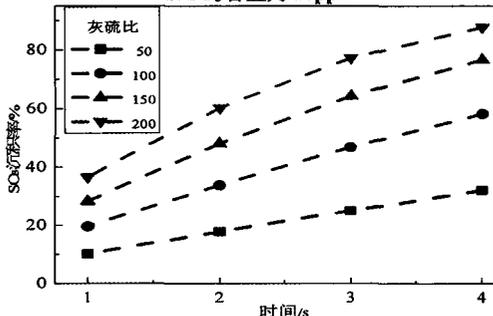
为了研究低低温电除尘器中 SO_3 在粉尘中沉积率的影响因素, 我们建立了硫酸液滴与颗粒团聚作用的理论模型, 对烟气中不同 SO_3 含量、不同灰硫比时 SO_3 沉积情况进行计算, 结果如图 10 所示。计算结果表明 SO_3 沉积率随时间而增大, 灰硫比和 SO_3 浓度对 SO_3 沉积都会产生重要影响。在相同 SO_3 含量条件下, 灰硫比增大时, 在相同时间里 SO_3 沉积率得到提高, 例如 SO_3 含量为 10ppm, 灰硫比为 50 时 SO_3 最大沉积率为 20%, 当灰硫比增大至 200 时 SO_3 最大沉积率可提高至 60%。另外, 在相同灰硫比条件下, SO_3 含量增大时, SO_3 沉积率也得到提高。



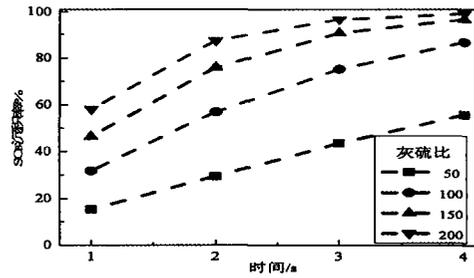
a. SO_3 含量为 5ppm



b. SO_3 含量为 10ppm



c. SO_3 含量为 20ppm



d. SO_3 含量为 40ppm

图 10 不同 SO_3 含量时灰硫比对沉积率的影响

4 低低温电除尘器数值模拟研究

电除尘是一个十分复杂的物理过程, 近几十年来, 国内外研究人员在电场、粒子荷电、含尘气流运动、粉尘沉积等方面的理论研究取得了许多进展, 但就整体而言, 迄今尚未能够从理论上充分认识电除尘过程。许多研究仍然依靠实验测试和现场调试, 这对于电除尘器整体的研究是远远不够的。作为与理论研究、实验研究并重的研究方法, 数值模拟一方面可以加深对理论的分析, 另一方面可以给出实验无法得到的数据, 从而探究到电除尘器具体现象的本质。

4.1 电除尘数值模拟基本情况历史回顾

随着数值计算学科的发展, 数值模拟技术逐渐被应用于电除尘器研究中。上世纪七十年代 (1970s), 数值计算方法最早开始被应用于求解电场 Poisson 方程和电流连续性方程。Yabi 等人^[9], Yamaoto 和 Velkoff^[10] 以及 Ushimaru 和 Butler^[11] 采用有限差分的方法求解了上述控制方程, 但是他们的实验模型需要板面电流密度和外加电压以确定电晕线上电流密度的边界条件。随后, McDonald、Smith 和 Spence^[12] 也采用了有限差分法计算线-板式电除尘器内的控制方程。Sekar 和 Stomberg^[13] 采用正交变换的方法模拟了平板电除尘器内电气分布情况。Kallio 和 Stock^[14] 用有限差分和有限元相结合的方法 (即在电晕线附近用有限元的方法, 在远离电晕线的地方用有限差分的方法) 对线-板式电除尘器内的电场和空间电荷的分布进行了数值计

算。

随着计算机计算能力的提升，数值模拟技术越来越多被用于电除尘器内流场的预测。Nielsen 等人^[15]对电除尘器气流分布板等部件流场进行数值模拟，模拟结果与模型试验结果进行了比较，指出数值模拟技术是电除尘器内部气流分布的有效检测工具，可以代替模型试验，缩短气流分布的试验时间。Veronique Arrondeli 等人^[16]采用 Fluent 软件和 N3S 软件计算一个电除尘器气流分布三维模型，模拟范围包括进口管道、进口喇叭、电场内部、出口喇叭，分别给出了除尘器进、出口垂直断面的气流流速的水平分量，计算结果和模型试验的结果基本一致。加拿大的 Arthur G.Hein 利用 CFD 二维模型对电除尘器斜气流技术进行了研究，结果表明 CFD 数值模拟技术有助于烟尘运动和气流优化研究，能够成功预测斜向气流技术的除尘器性能的改善^[17]。

纵观过去，电除尘器数值模拟技术得到的发展，但大部分研究主要偏向于电场、气流、电流体某一现象过程的数值模拟，缺乏对电除尘器进行系统性数值模拟研究。

4.2 本研究的主要方法及创新点

龙净环保与澳大利亚新南威尔士大学从2007年起合作开展电除尘器数值模拟研究，开发了气流模型、电场模型、气-颗粒流模型、电除尘器综合模型，为低低温电除尘器研究提供了新技术支持。

本研究^[18-22]的主要方法是建立电除尘数学理论模型，采用有限体积法对电除尘过程所遵循的各种传递方程进行数值求解，以此实现对电除尘过程各物理量的定量计算。同其他众多电除尘器数值模拟研究相比，本研究的创新点在于：

(1) 提出电除尘器气流分布多尺度 CFD 模拟研究方法，解决了电除尘器孔板、槽型板等微尺度流动难以建模的难题；

(2) 对电除尘器数值模拟研究所做工作更具系统性、综合性，涵盖了气流、电场、气-颗粒流等多个子模型和综合模型。

(3) 全面考虑了几何、温度、酸吸附、颗粒荷电、反电晕等因素对收尘效率的影响。

4.3 低低温电除尘器数值模拟研究内容及结果

(1) 气流分布数值模拟

气流分布对电除尘效率具有重要影响，电除尘器气流分布的均匀程度将使电除尘效率发生 20%~30%变化。对电除尘器气流分布进行数值模拟的难点在于用于气流均布作用的孔板和槽型板建模，由于孔板、槽型板微孔数量多、尺寸小，难以进行网格划分，以往研究人员一般根据经验对孔板、槽型板的参数进行设置，缺乏可靠性。本文提出多尺度研究方法，分别从微尺度、中等尺度、大尺度对电除尘器内气流分布进行数值模拟研究，如图 11 所示。在微尺度上，建立微孔单元模型对孔板、槽型板微孔单元内流动进行数值模拟研究，确定孔板、槽型板的阻力系数；在中等尺度上，利用微尺度的微孔单元模型获得的孔板、槽型板参数对除尘单元内流动进行数值模拟研究，确定除尘单元的流动特性和参数；在大尺度上，利用中等尺度的除尘单元模型获得的除尘单元参数对整个电除尘器气流分布进行数值模拟。

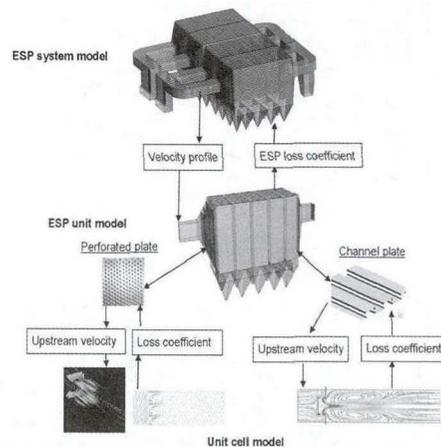


图 11 电除尘器气流分布多尺度 CFD 模拟方法

气流分布数值模拟时，假定烟气为牛顿不可压缩气体，气流处于稳态，烟气流动遵循质量守恒方程和动量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla \cdot (p + \frac{2}{3} \rho_f k) + \nabla \cdot [(\mu + \mu_r)(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)] \quad (4)$$

ρ_f 表示烟气密度, kg/m³; \mathbf{U} 表示烟气流速度, m/s; P 表示压力, Pa; k 表示紊流动能 m²/s²; μ 表示气体动力粘度, N·s/m²; μ_r 表示湍流粘度, N·s/m²。

另外, 选用 $k-\varepsilon$ 双方程模型作为烟气流湍流模型。

某 1000MW 机组低低温电除尘器气流分布数值模拟结果如图 12 所示, 通过布置烟道导流板、孔板、导流叶片的措施对流场进行优化, 使得各室流量偏差小于 5%, 电场前气流速度均方根差值小于 0.2。将每个管道中烟气平均速度数值模拟结果与物模试验结果对比, 二者偏差在 3% 以内。

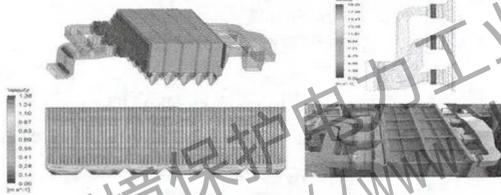


图 12 某 1000MW 机组电除尘器气流分布数值模拟结果及物理模型

(2) 电场分布数值模拟

电除尘器通电后, 电晕线与收尘极建立电场, 为粉尘与烟气的分离提供了动力。电场分布影响着电晕产生、粒子荷电以及粒子在电场中的迁移运动, 是决定电除尘器运行性能的主要因素。

作为描述电场的基本控制方程—泊松方程和电流连续方程为:

$$\nabla^2 V = -\rho_{ion} / \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{ion} b \mathbf{E}) = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = b \rho_{ion} \mathbf{E} \quad (8)$$

V 表示电势, V; ρ_{ion} 表示空间电荷密度, C/m³; ε_0 表示介电常数, F/m; b 表示离子迁移率, m²/(s·V), 与温度和气体成分有关; \mathbf{E}

表示场强, V/m; \mathbf{J} 表示电流密度, A/m²。

根据 Lawless 和 Sparks 实验结果, 离子迁移率与温度的定量关系^[23]如式 (9) 所示:

$$b(T) = b_0 (T/273.16)^\beta \quad (9)$$

式中 b_0 和 β 。

按水分含量对实验数据进行拟合得到^[21]:

$$b_0 = 2.092 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{mf_{H_2O}}{16.59}\right)^{0.261} \quad (10)$$

$$\beta = 1.43 + \ln\left(1 + \frac{mf_{H_2O}}{1.1425}\right)^{0.6} \quad (11)$$

T 表示气体绝对温度, K; mf_{H_2O} 表示水的质量分数。

电场起晕场强采用 Peek 方程^[24]:

$$E_0 = 2.7 \times 10^6 [V \cdot m^{-1}] \delta m \left(1 + \frac{0.054 [m^{0.5}]}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (12)$$

$$\delta = \frac{P T_0}{P_0 T} \quad (13)$$

E_0 表示起晕场强, V/m; δ 表示相对密度, 即实际状态气体密度与标态密度之比; T_0 表示标态温度, 273K; P_0 标态大气压, 101325Pa; r 表示电晕极曲率半径, m; m 表示污染系数。

收尘极板无粉尘层时, 电除尘器最大工作电压决定于电场击穿电压。当收尘极板上最大场强达到其起晕场强, 即可认为电场击穿^[21]。收尘极板的曲率半径 $r \rightarrow \infty$, 在标准大气压状态下, 按式 (12)、(13) 得到收尘极板起晕场强为:

$$E_{0(r \rightarrow \infty)} = \left(\frac{T_0}{T}\right) 2.72 \times 10^6 [V/m] \quad (14)$$

电晕区的电荷密度:

$$\rho_0 = ab \varepsilon_0 E_0 (E - E_0), E \geq E_0 \quad (15)$$

ρ_0 表示电晕区电荷密度, C/m³; a 为经验常数, 0.05 s²/m²^[20]。

选取线板式电除尘器单通道结构 (图 13) 为研究对象, 对电除尘器电场进行数值计算。电晕线为直径 $\phi 3.5$ mm 光滑圆线, 相邻

两线间距为 200mm，两收尘极板间距为 400mm。电场边界条件：收尘极板电势为 0kV，电晕线电势为给定输入电压（负值）。在 ANSYS CFX 软件中对电场进行数值计算，改变温度可以得到不同温度（90℃，120℃，150℃）电场特性的数值模拟结果。图 14 示出了 90℃ 电场数值模拟结果：在电晕线周围极小空间内形成了高场强电晕区，电场场强由电晕线向收尘板逐渐减小。

不同温度的电场击穿电压数值计算结果如表 5 所示，温度由 150℃ 降低至 90℃ 时，电场击穿电压由 72.8kV 提高至 85kV，这与实验结果相接近。实验装置按图 13 布置电极型式，放在加热箱中加热至所需温度测得电场击穿电压。因此，数值模拟结果显示温度降低时电除尘器具有更高的工作电压。

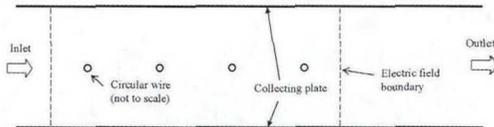


图 13 线板式电除尘器单通道结构

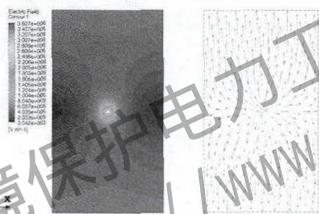


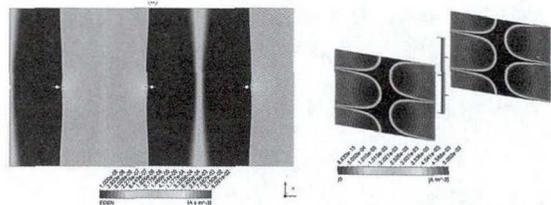
图 14 90℃ 电场数值模拟结果

表 5 电场击穿电压数值模拟结果与实验结果对比 (m=0.25)

温度 (℃)		90	120	150
3.5mm 光滑圆	实验值 (kV)	94.3	86.5	77.5
	模拟值 (kV)	85.0	78.4	72.8
针刺线 (针尖垂直于板)	实验值 (kV)	82.0	70.6	63.8
	模拟值 (kV)	85.6	78.8	73.1
针刺线 (针尖平行于板)	实验值 (kV)	84.0	71.3	69.5
	模拟值 (kV)	91.8	84.7	78.4

将电晕线由圆线换为针刺线，相邻极线、极板间距保持不变，对针刺线垂直于极板、针刺线平行于极板进行三维电场数值模拟。针刺线垂直于极板和针刺线平行于极板电场击穿电压都随温度降低而升高；相同温度条件下，针刺线平行于极板的电压比针刺线垂直于极板的电压高，这与实验结果相符，如表 4 所示。针刺线的放置方向除了对电场击穿电压有影响外，对收尘板电流密度分

布也有影响，针刺线平行于极板的电流密度比针刺线垂直于极板的电流密度更均匀，如图 15 所示。由于电场击穿电压更高、板电流密度更均匀，工程实际中低低温电除尘器可选用针刺线平行于收尘极板作为电除尘器极配型式。



a. 针刺线垂直于极板

b. 针刺线平行于极板

图 15 针刺线电场数值模拟结果

(3) 颗粒荷电与运动数值模拟

颗粒荷电采用 Lawless 模型 [25]：

$$\frac{dv}{dt_q} = \begin{cases} f(w) \frac{v-3w}{\exp(v-3w)-1}, & v > 3w \\ \frac{3w}{4} \left(1 - \frac{v}{3w}\right)^2 + f(w), & -3w \leq v \leq 3w \\ -v + f(w) \frac{-v-3w}{\exp(-v-3w)-1}, & v < -3w \end{cases} \quad (16)$$

$$v = \frac{qq_e}{2\pi\epsilon_0 d_p k_0 T} \quad w = \frac{\kappa_p}{\kappa_p + 2} \frac{Ed_p q_e}{2k_0 T} \quad \tau_q = \frac{b\rho_{ion} t}{\epsilon_0}$$

$$f(w) = \begin{cases} (w+0.475)^{-0.575}, & w \geq 0.525 \\ 1, & w < 0.525 \end{cases}$$

q_e 表示单位离子电荷，C； κ_p 表示颗粒相对介电常数。

颗粒相对介电常数：

$$\kappa_p^{\frac{1}{2}} = \sum_{i=1}^n v_i \kappa_i^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

κ_i 表示成分*i*的相对介电常数, v_i 表示成分*i*的质量分数。根据表1计算得到该电厂飞灰的相对介电常数为6.6。

颗粒运动方程为:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{1}{8} C_D \pi d_p^2 \rho_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) + \frac{1}{6} \pi d_p^3 g (\rho_p - \rho_f) + q\mathbf{E} + \mathbf{F}_{dis} \quad (18)$$

$$C_D = \frac{24}{C_c Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (19)$$

m_p 表示颗粒质量, kg; \mathbf{u}_p 表示颗粒速度, m/s; \mathbf{u}_f 表示气流速度, m/s; d_p 表示颗粒直径, m; ρ_p 表示颗粒密度, kg/m³; ρ_f 表示烟气密度, kg/m³; q 表示颗粒荷电量, C; \mathbf{F}_{dis} 表示扩散力, N; Re_p 表示颗粒雷诺数。 C_c 表示坎宁安修正系数。

坎宁安修正系数^[26]:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4 \exp(-\frac{1.1d_p}{2\lambda})) \quad (20)$$

分子平均自由程:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d_{mol}^2 P} \quad (21)$$

k_B 表示玻尔兹曼常数, J/K; d_{mol} 表示气体分子直径, m; P 表示气体压力, Pa。

根据电除尘器烟气温度和压力条件, 可将烟气视为理想气体, 烟气密度遵循理想气体状态方程即式(11)。烟气动力粘度与温度关系按分子运动理论公式(kinetic theory)^[27]计算。

含尘烟气以1m/s速度(标态)从入口进入电场经过电除尘后从出口流出, 对以上气流模型、颗粒荷电模型、颗粒运动模型进行耦合数值求解, 得到0.05-25 μm不同粒径粉尘颗粒的运动轨迹如图16所示。

从图16可以看出颗粒表面荷电密度在靠近电晕极位置达到最大, 靠近电晕极区域是最有利于颗粒荷电的。大颗粒尚未达到饱和荷电时就在电场力作用下被收尘极捕集, 其表面电荷密度较小, 而小颗粒则停留时间更长, 连续荷电更久。随着粒径减小, 扩散充

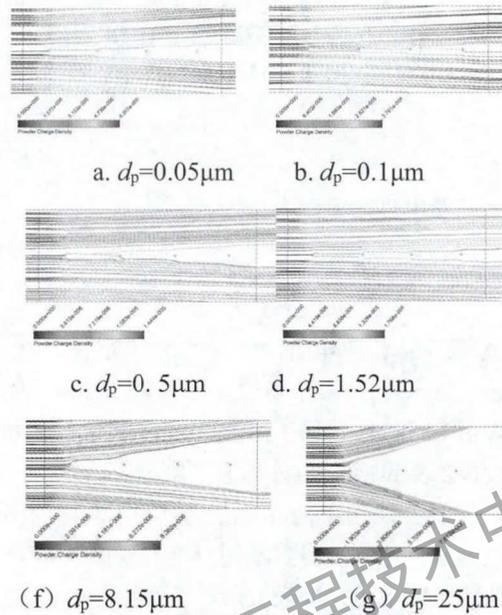


图16 不同粒径颗粒的运动轨迹

电作用越来越大, 使小颗粒可不受限制地吸收更多电荷, 因此随着粒径减小, 颗粒的表面荷电密度是增大的。颗粒的除尘效率颗粒运动轨迹有关的, 颗粒运动轨迹能够达到收尘极, 表明颗粒能被捕集。图16显示颗粒粒径 $dp=0.5\mu\text{m}$ 时, 颗粒轨迹线很少能到达收尘极, 颗粒除尘效率最低; 颗粒粒径小于0.5 μm时, 由于扩散荷电增大、气流曳力减小(此时颗粒粒径与气体分子平均自由程接近)使颗粒的除尘效率提高; 颗粒粒径大于0.5 μm时, 颗粒除尘效率随粒径增大而增大。

(4) 比电阻对低低温电除尘器的影响数值模拟研究

粉尘比电阻与温度密切相关, 并受粉尘成分、烟气湿度等因素的影响。Bickelhaupt^[28]提出了根据粉尘成分来求得粉尘比电阻的计算公式。其中, 体积比电阻为:

$$\rho_v = \exp(3.62876 - 1.8916 \ln X - 0.9696 \ln Y + 1.237 \ln Z - 0.069078 \times 10^5 E + 9980.58 / T) \quad (22)$$

$$\rho_s = \exp(27.59774 - 2.233348 \ln X - 0.00176W - 0.069078 \times 10^5 E - 0.00073895W \exp(2303.3/T)) \quad (23)$$

粉尘总比电阻为:

$$\frac{1}{\rho_d} = \frac{1}{\rho_v} + \frac{1}{\rho_s} \quad (24)$$

ρ_v 表示体积比电阻, $\Omega \cdot m$; ρ_s 表示表面比电阻, $\Omega \cdot m$; ρ_d 表示粉尘总比电阻, $\Omega \cdot m$. X 表示 Li 和 Na 的原子浓度; Y 表示 Fe 原子浓度; Z 表示 Mg 和 Ca 的原子浓度。

采用 Bickelhaupt 计算式对表 1 灰样的比电阻进行计算, 得到不同湿度和温度条件下的粉尘比电阻, 如表 6 所示。

表 6 粉尘比电阻计算值 ($\Omega \cdot m$)

温度 ($^{\circ}C$)	水分体积分数 (%)		
	0	5	9
90	6.886×10^{10}	8.380×10^9	1.546×10^9
120	6.480×10^{10}	1.846×10^{10}	8.926×10^9
150	4.838×10^{10}	2.472×10^{10}	1.342×10^{10}

从式 (22)、式 (23) 可知, 粉尘体积比电阻只受温度影响而与湿度无关, 表面比电阻则同时受温度和湿度的影响。在干烟气中, 水分含量为 0, 粉尘比电阻随温度升高而减小, 如表 6 所示。因此, 对于干烟气, 降低温度反而增大粉尘比电阻, 对除尘不利。但实际锅炉烟气中含有水分, 在有水分条件下, 烟气温度从 $150^{\circ}C$ 降低至 $90^{\circ}C$, 粉尘比电阻随温度降低而减小。另外, 从表 5 可以看出在相同温度条件下, 水分含量越高, 粉尘比电阻越小, 因此烟气含水对降低粉尘比电阻有利。

当在收尘极板上形成粉尘层时, 电除尘器的最大工作电压受电场击穿和反电晕双重限制。收尘极板上形成的粉尘层会产生电压降, 使电除尘器的实际工作电压下降 ΔV :

$$\Delta V = J_d \rho_d d \quad (25)$$

J_d 表示粉尘层电流密度, 其值与收尘极板的电流密度相同, A/m^2 ; d 表示粉尘层厚度, m 。

粉尘层内的场强为:

$$E_d = J_d \rho_d \quad (26)$$

是否产生反电晕决定于粉尘层内的最大电场强度 E_{d-max} , 当电场尚未击穿而粉尘层最大场强 E_{d-max} 超过粉尘介电强度 E_b 时, 反电晕形成; 当电场击穿而粉尘层内最大场强 E_{d-max} 尚未超过粉尘介电强度 E_b 时, 反电晕不能形成。因此反电晕形成的条件为:

$$E_{p-max} < E_0(r=\infty) \quad (27)$$

$$E_{d-max} \geq E_b \quad (28)$$

E_{p-max} 表示收尘板上最大场强, V/m ; E_{d-max} 表示粉尘层的最大场强, V/m ; E_b 表示粉尘介电强度, 为 2.2×10^5 [29] ~ 1.8×10^6 V/m [30]。本研究选用 $E_b = 1.8 \times 10^6$ V/m , 粉层厚度为 $d = 5mm$, 粉尘比电阻为表 6 水分含量 9% 的计算值。

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 $V-I$ 特性, 如图 17 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)。 V_a 表示电场的有效电压, 即电极电压降扣除粉尘层电压降部分。在无粉尘层时, V_a 即为电晕极与收尘极之间的电压降; 在有粉尘层时, V_a 即为电晕极与粉尘层之间的电压降。 J 表示收尘极板的平均电流密度。

图 17 显示: 无粉尘层、温度为 $150^{\circ}C$ 、 $120^{\circ}C$ 、 $90^{\circ}C$ 时, 电场最大有效电压分别为 $72.8kV$ 、 $78.4kV$ 、 $85kV$, 而有粉尘层时对应温度的电场最大有效电压分别为 $25kV$ 、 $34kV$ 、 $66.8kV$, 粉尘层的存在使电场有效电压降低; $90^{\circ}C$ 时有效电压降低幅度比 $150^{\circ}C$ 、 $120^{\circ}C$ 时有效电压降低幅度小, 这是由于粉尘比电阻随温度降低而减小, 相应的粉尘层电压降减小引起的; 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。

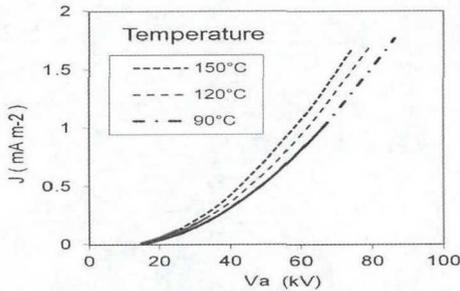


图 17 有无粉尘层时伏安特性数值模拟结果：虚线表示无粉尘层；实线表示有粉尘层

图 18 示出有粉尘层时不同温度的电场空间电荷分布数值模拟结果。由于温度降低使有效电压得到提高，90°C 时电场空间电荷密度比 150°C、120°C 有所增大。

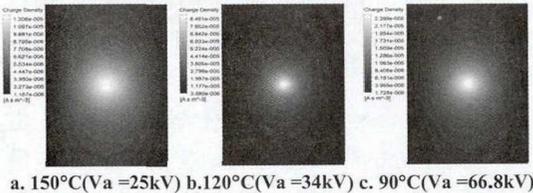


图 18 有粉尘层时不同温度空间电荷分布数值模拟结果

另外，数值模拟得到不同粒径粉尘颗粒的除尘效率如图 19 所示，在全粒径段，颗粒除尘效率呈“U”型分布，粒径介于 0.2~0.5μm 除尘效率最低，粒径小于 0.2μm 或大于 0.5μm 逐渐增大。有粉尘层时，温度通过比电阻对电除尘器有效电压产生重要影响，进而影响到颗粒除尘效率，温度从 150°C 降低 90°C 时，不同粒径粉尘颗粒的除尘效率都得到明显提高。

(5) SO₃ 冷凝对电除尘器的影响数值模拟研究

低低温电除尘器在 90°C 左右温度工作，当烟气温度低于酸露点温度时，烟气中气态 SO₃ 分子与水蒸气结合冷凝形成液态的硫酸雾滴，而低低温电除尘器前的烟气含尘质量浓度却很高，粉尘颗粒比表面积大，因而酸雾

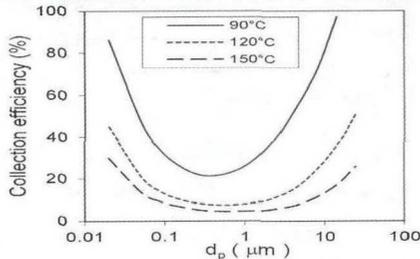


图 19 有粉尘层时不同粒径颗粒除尘效率数值模拟结果

集而被除去。SO₃ 冷凝黏附于粉尘颗粒对降低粉尘比电阻、促进颗粒凝并具有一定作用 [31~33]，但还未有人研究 SO₃ 冷凝对粉尘荷电产生的影响。本文采用数值模拟方法研究了 SO₃ 冷凝通过改变粉尘介电常数对粉尘荷电和除尘效率的影响。

传统计算 SO₃ 酸露点的经验公式有 Verhoff 与 Banchero [34]、Akkes [35]、Pierce [36] 公式等，它们仅能用于计算酸露点。本研究提出新的 SO₃ 酸露点计算方法——酸露点热力学模型，模型采用 Perry 手册 [37] 热力学数据进行拟合水、SO₃、H₂SO₄ 在气体中的分压随温度变化的系数，根据质量守恒、相平衡原理迭代计算，以此既可计算酸露点，也可计算酸雾冷凝量及 H₂SO₄ 在冷凝酸液中的浓度。计算得到不同含湿条件下酸露点、硫酸浓度随 SO₃ 浓度变化的关系如图 20 所示。酸露点随 SO₃ 浓度增大而升高，含湿量对酸露点有影响，含湿量越大，酸露点越高；酸雾中硫酸浓度随 SO₃ 浓度增大而增大，含湿量对硫酸浓度也有影响，含湿量越大，硫酸浓度越低。

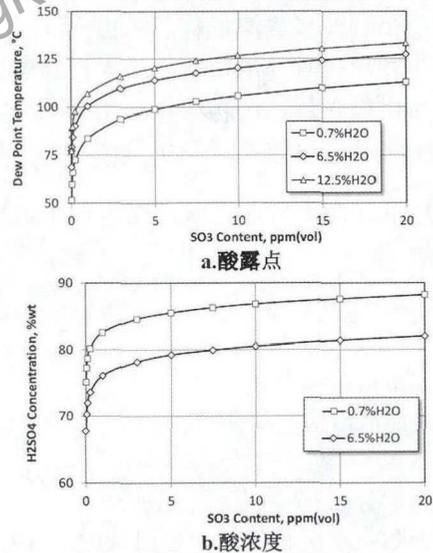


图 20 SO₃ 冷凝热力学模型计算结果

以粉尘浓度为 10g/Nm³、湿度为 9%（体积分数）、SO₃ 浓度为 10ppm 条件为基本工况，进行迭代计算得到酸雾冷凝量随温度变化情况如图 21 所示。温度对酸雾冷凝量有重

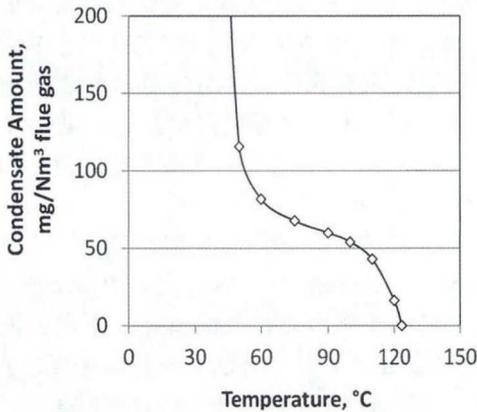


图 21 酸雾冷凝量随温度变化情况

123°C, 水露点温度为 44°C, 当温度从酸露点降低时, 酸雾冷凝量迅速增大, 在 70°C~100°C 酸雾冷凝量较稳定, 当温度接近于水露点温度, 酸雾冷凝量急剧增大。

SO₃ 酸雾冷凝黏附于粉尘颗粒表面时, 核心部分材料为粉尘颗粒, 表面材料是酸雾。由于酸雾的相对介电常数为 80~100, 远大于粉尘颗粒的相对介电常数 (6~8), 当酸雾黏附于粉尘颗粒变成湿颗粒后, 由式 (31) 可知粉尘颗粒相对介电常数将增大; 当酸雾黏附于粉尘颗粒后, 湿颗粒粒径比干颗粒大, 由式 (29) 可知湿颗粒的荷电量比干颗粒大。

对于各向均匀性颗粒, 在电场中的饱和荷电量为:

$$q_s = \frac{3\kappa_p}{\kappa_p + 2} \pi d_p^2 \varepsilon_0 E_0 \quad (29)$$

E₀ 表示外电场场强。

表面荷电密度与 pe 成正比,

$$pe = \frac{3\kappa_p}{\kappa_p + 2} \quad (30)$$

当颗粒由两种材料复合组成时(结构如图 22 所示), 式 (29)、(30) κ_p 改为

κ_{eff}^[43],

$$\kappa_{eff} = \kappa_m \left(1 + \frac{3f\beta}{1-f\beta} \right) \quad (31)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_m}{\varepsilon_c + 2\varepsilon_m} \quad (32)$$

$$f = (r_c/r_m)^3 \quad (33)$$

f 表示体积分数。

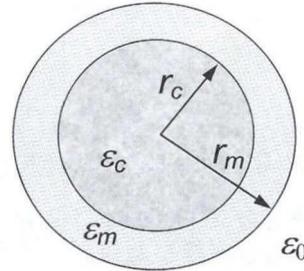


图 22 复合颗粒示意图

附于粉尘颗粒后, 湿颗粒粒径比干颗粒大, 由式 (29) 可知湿颗粒的荷电量比干颗粒大。

当粉尘颗粒的有效相对介电常数 κ_{eff} 由 3.9 增大至 6.6 时, 理论上颗粒的饱和荷电量可提高 16%。有效相对介电常数的变化将导致不同粒径颗粒的除尘效率发生变化, 数值模拟结果如图 23 所示。相对介电常数增大时, 粒径大于 0.1μm 颗粒的除尘效率得到提高, 但粒径小于 0.1μm 颗粒的除尘效率基本保持不变。同图 19 相比, 总体来说, SO₃ 冷凝作用通过改变粉尘颗粒相对介电常数对除尘效率影响与粉尘比电阻对除尘效率的影响相比, 其作用是微小的。

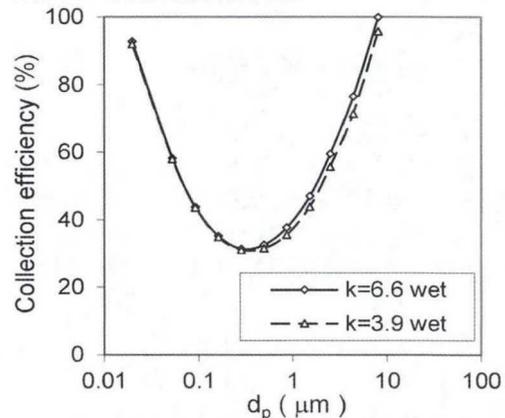


图 23 相对介电常数对颗粒除尘效率的影响

SO₃ 冷凝作用除了增大颗粒有效相对介电常数外, 其对粉尘比电阻也将产生作用。根

据 Bickelhaupt 模型，当有 SO₃ 存在时，粉尘层将产生酸比电阻。酸比电阻为：

$$\rho_a = \exp\left(\frac{54.324 - 0.85472 C_{SO_3}}{0.069078 \times 10^{-5} E - 13049.44 [K] / T}\right) \quad (34)$$

C_{SO₃} 表示 SO₃ 浓度，ppm。

粉尘总比电阻为：

$$\frac{1}{\rho_{total}} = \frac{1}{\rho_v} + \frac{1}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_a} \quad (35)$$

对表 1 灰样在 SO₃ 含量为 10ppm 的比电阻进行计算，结果如表 7 所示。计算结果表明，由于酸比电阻比体积比电阻、表面比电阻小 2~5 个数量级，导致粉尘总比电阻大幅下降，当 SO₃ 冷凝时，粉尘比电阻极小，此时粉尘层的电压降可忽略不计。

表 7 含水 9%vol, SO₃10ppmv 粉尘比电阻计算值 (Ω·m)

比电阻 (Ω·m)	温度 (°C)		
	90	120	150
体积比电阻	1.549×10 ¹²	1.903×10 ¹¹	3.146×10 ¹⁰
表面比电阻	4.665×10 ⁸	1.997×10 ⁹	4.416×10 ⁹
酸比电阻	5.195×10 ³	6.900×10 ⁵	4.582×10 ⁷
总比电阻	5.195×10 ³	6.898×10 ⁵	4.528×10 ⁷

(6) 低低温电除尘器综合模型数值模拟研究

工程中普遍采用多依奇-安德森公式来定量计算电除尘器除尘效率。该公式无法考虑粉尘粒径分布、粉尘成分、粉尘比电阻、烟气温度、烟气成分的影响，存在局限性。

本模型将电场、气流、颗粒荷电、颗粒运动进行数值建模和耦合计算，考虑了温度密度、粘度、比电阻、SO₃ 冷凝对电除尘器的综合影响，得到不同粒径颗粒除尘效率如图 24 所示。

温度主要对粒径大于 0.1μm 的颗粒除尘效率有影响，温度降低时，粒径小于 0.1μm 颗粒除尘效率基本保持不变，而粒径大于 0.1μm 颗粒除尘效率得到提高；对于相同粒径的颗粒，烟气温度从 150°C 降至 120°C 时，除尘效率可增加 0~8%；烟气温度从 120°C 降至 90°C 时，除尘效率可增加 0~5%。从低低温电除尘器综合模型数值模拟得出降低烟气

温度将提高粒径大于 0.1μm 颗粒颗粒的除尘效率，从而提高电除尘器总除尘效率。

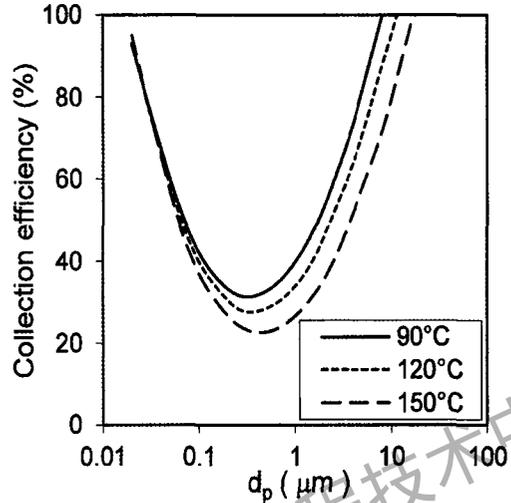


图 24 温度对除尘效率综合影响数值模拟结果

5 总结与展望

低低温电除尘器为中国燃煤电厂实现超低排放提供了新技术手段，具有除尘效率高、SO₃ 捕集效率高、节能等显著优点。

通过实验室和工程现场试验研究表明低低温电除尘器通过降低烟气温度，粉尘比电阻减小，粉尘的分级脱除效率和荷电量得到提高，电除尘器出口粉尘浓度显著下降。

对电除尘过程建立气流、电场、颗粒荷电、颗粒运动、反电晕、比电阻、SO₃ 冷凝的数学模型，采用有限体积方法对低低温电除尘过程进行数值模拟研究，揭示了低低温电除尘器在提高除尘效率的机理，温度从 150°C 降低至 90°C 时，粉尘比电阻减小，电除尘器工作电压提高，对提高各粒径粉尘的除尘效率具有显著作用；SO₃ 冷凝附着在颗粒上，增大了粉尘介电常数，对提高粉尘颗粒饱和和荷电量有一定作用，能使粒径大于 0.1μm 的粉尘颗粒得到部分提高。

本文阐述的实验结果和数值模拟结果总体上是吻合的，但也存在一些差异，需要我們进一步研究其原因。

由于电除尘是一个复杂的物理过程，诸多因素都对除尘性能会产生影响，难以采用

理论、实验方法对单因素的影响作用进行定量化、精细化研究。而数值模拟技术从基本物理意义出发,通过对除尘过程遵循的物理方程进行准确、定量计算,可获取的数据量大、信息全,方便对除尘机理进行分析。随着开发模型精确度的提高,数值模拟对未来电除尘器的性能预测将越来越有价值。

参 考 文 献

- [1] 岳敏.电除尘器气流分布数值模拟研究.西安:西安理工大学,(2007).
- [2] Andreas Bäck. Enhancing ESP efficiency for high resistivity fly ash by reducing the flue gas temperature. 11th International Conference on Electrostatic Precipitation, Hangzhou, China, (2008), 406-412.
- [3] Noda N., Makino H.. Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler, *Advanced Powder Technology*, (2010), 21, 495-499.
- [4] 熊桂龙,李水清,陈晟等.增强PM2.5脱除的新型电除尘技术的发展.中国电机工程学报,(2015), 35(09):2217-2223.
- [5] Porle K., Karlsson R., Kirkegaard B.. Long-term experience with pulsed energization of ESP's at a Danish power station. The 6th Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, New Orleans, USA, (1986).
- [6] Fujishima H., Tsuchiya Y., Onishi S. Colder side electrostatic precipitator of advanced flue gas treatment system for coal fired boiler. ICESP VII, Kyongju, Korea, (1998).
- [7] 廖增安.燃煤电厂余热利用低低温电除尘技术研究与应用.应用技术,(2013), 10,39-44
- [8] 中国环境保护产业协会电除尘委员会.我国电除尘行业2013年发展综述.行业综述.中国环保产业,(2014) 11.
- [9] Yabe A et al. EHD study of the corona wind between wire and electrodes. *AIAA J*, (1978), 15(4), 40-345.
- [10] Yamamoto T., Velkoff H R.. Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator. *Journal of Fluid Mechanics*, (1981),108, 1-18.
- [11] Ushimaru K U, Butler G W. In Gas Solid Flows. Proceedings of the 7th Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition, New Orleans, USA, (February 12-16, 1984), 87~96.
- [12] J.R.McDonald, W.B.Smith, H.W.Spencer III, et al. A mathematical model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitator devices. *Appl.Phys*, (1977), 48(6), 2231-2243.
- [13] Sekar S, Stoberg H. On the prediction of current-voltage characteristics for wire-plate precipitators. *Journal of Electrostatics*, (1981),10, 35~43
- [14] Kallio G A, Stock D E. Computation of electrical conditions inside wire-duct electrostatic precipitators using a combined finite-element and finite-difference technique. *Journal of Applied Physics*, (1985), 59, 999-1005.
- [15] N.F.Nielsen, L.Lind. Numerical modelling of gas distribution in electrostatic precipitators. The 8th International conference on Electrostatic Precipitation, May.15(2001).
- [16] Veronique Arrondel, Gianluca Bacchiega, Ivo Gallimberti. ESP Modelling: From University Studies to Industrial Application. The 8th International Conference on Electrostatic Precipitation, May.15(2001).
- [17] A.G.Hein. Electrostatic Precipitation, Dust Movement and Gas flow Optimization. The 8th International Conference on Electrostatic Precipitation, May.15(2001).
- [18] B.Y.Guo, Q.F.Hou, A.B.Yu, L.F.Li and J.Guo. Numerical modelling of the gas flow through perforated plates. *Chem. Eng. Res. Des.*, (2013), 91, 403-408.

- [19]B.Y. Guo, S.Y. Yang, M. Xing, K.J. Dong, A.B. Yu, J. Guo. Towards the development of an integrated multiscale model for electrostatic precipitation. *I&ECR*, (2013), 52, 82-93
- [20]B.Y.Guo, J.Guo, A.B.Yu. Simulation of the electric field in wire-plate type electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*, (2014),72, 301-310.
- [21]B.Y.Guo, J.Guo, A.B.Yu. Numerical modelling of electrostatic precipitation: Effect of gas temperature. *Journal of Aerosol Science*, (2014), 77, 102-115
- [22]B.Y.Guo, A.B.Yu, L.F. Li and X.L.Ye. Gas-powder flow simulation in an electrostatic precipitator without electric field. Ninth Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 Dec (2012).
- [23]Lawless P.A., Sparks L.E. Measurement of ion mobilities in air and sulfur dioxide-air mixtures as a function of temperature. *Atmospheric Environment*. (1980), 14, 471-483.
- [24]A.M. Meroth, T. Gerber, C.D. Munz, P.L. Levin, et. Numerical solution of nonstationary charge coupled problems. *Electrostat*. (1999), 45, 177-198.
- [25]Lawless P.A. Particle charging bounds, symmetry relations, and an analytic charging rate model for the continuum regime. *Journal of Aerosol Science*. (1996), 7, 191-215.
- [26]Ounis,H.,Ahmadi,G.,McLaughlin,J.B. Brownian diffusion of submicrometer particles in the viscous sublayer. *Journal of Colloid and Interface Science*, (1991), 143, 266-277.
- [27]Chung, T.H., Lee., L.L., and Starling,K.E. "Application of kinetic gas theory and multiparameter correlation for prediction of dilute gas viscosity and thermal conductivity". *Ind.Eng. Chem.Fundamen.* (1984), 23, 8-13.
- [28]R.E Bickelhaupt, Atechnique for Predicting Fly Ash Resitivity, EPA-600/7-79-204, (1979).
- [29]SpencerH.W.Electrostatic precipitators: relationship between resitivity, particle size, and sparkover. U.S. EPA Report No.EPA-600/2-76-144, (1976).
- [30]Mclean K.J. Electric precipitators. *IEE Proceedings*. (1998), 347-361.
- [31]S. Shanthakumar, D.N. Singh, R.C. Phadke. Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations. *Prog Energy Combust. Sci*, (2008), 34, 685-695.
- [32]Bayless DJ, Khan AR, Tanneer S, Birru R. "An alternative to additional SO₂ injection for fly ash conditioning", *J Air Waste Manage Assoc* (2000), 50,169-174.
- [33]Air & Waste Management Association, *Air Pollution Engineering Manual*, (2nd ed), Ed.: W.R.Davis, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, (1992).
- [34]Verhoff F.H., Banchemo J., Predicting dew points of flue gases. *Chem. Eng. Prog.* (1974), 70(8), 71-72.
- [35]Okkes, A. G., "Get Acid Dew Point of Flue Gas," *Hydrocarbon Processing*, (1987),66, 7, 53-55.
- [36]Pierce, R. Estimating Acid Dewpoints in Stack Gases. *Chem. Eng.* (1977), 84, 125-128.
- [37]Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., (1997).