

超低排放时代电除尘器流场设计及分析

叶兴联^{1,2}, 李立锋¹, 苏寅彪¹, 郭俊^{1,2}, 郭宝玉³

1. 福建龙净环保股份有限公司, 福建 龙岩 364000; 2. 国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心, 福建 龙岩 364000; 3. 莫纳什大学化工学院, 澳大利亚 200331

作者: 叶兴联, 邮箱: 15206070144@163.com

摘要 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, 在超低排放时代, 为了实现电除尘器高效稳定运行, 流场设计是关键手段之一。本文基于 CFD 数值模拟方法, 并结合工程实际应用从流量分配、本体气流分布设计、电场极配型式、绝缘系统热风吹扫设计等方面对电除尘器流场设计进行阐述和对比分析。研究表明, 电除尘器入口烟道导流板的合理设计不但可以解决流量分配平衡问题, 也可以使粉尘量的偏差得到大幅度改善; 进出口喇叭角度不但对除尘器本体阻力有影响, 同时也对本体流场均匀性有较大影响; 灰斗阻流板的合理设计有助于减轻收尘区下沿的高速区与灰斗的强回流现象; 优选方案的极配型式具有更高的电压和更均匀的板电流密度; 绝缘系统的热风吹扫的改进有助于解决绝缘系统短路现象。流场设计对工程设计、运行及诊断分析具有重要的参考意义。

关键词 电除尘器, 数值模拟, 流场设计, 超低排放

引言

电除尘器因其阻力小、效率高、运行稳定可靠等优点在工业烟气除尘中广泛应用^[1]。随着经济和科技的发展, 以及环保意识的提升, 环保的排放要求也越来越严格。流场优化设计是电除尘器能否高效稳定运行的关键因素之一, 一直以来都受到科研人员和工业界的重视^[2]。早期电除尘器流场设计主要依赖于设计者的经验或者是按一定比例物理模型进行实验研究从而获得较为理想的流场设计方案^[3-4]。随着计算科学和计算流体力学的发展, 数值模拟技术逐渐被应用

于电除尘器研究中, 并用来为电除尘器流场进行优化设计服务。Nielsen 等人^[5]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^[6]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 A. 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^[7]。Ye 等人采用多尺度数值模拟方法对电除尘器内部气流分布进行了预测并通过实验验证, 该方法广泛应用在工程优化设计中^[8]。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, 未见有超低排放下电除尘器流场设计工程应用方面的研究。本文结合工程实际应用, 对电除尘器进口烟道、除尘器本体、电场通道及绝缘系统流场设计优化进行研究分析, 对电除尘器流场设计优化的关键点进行探讨, 为工程设计、运行及诊断分析提供参考依据。

1 流量分配和粉尘量分配优化设计

根据 JB/T 7671-2007《电除尘器气流分布模拟试验方法》标准, 电除尘器各室的

流量分配相对偏差不超过±5%。若流量偏差太大,风量大的烟道容易磨损,并且将使电场风速高于设计值导致除尘效率下降。为了使电除尘器各室流量分配均匀,需要在电除尘器进口烟道设置导流板,并采用数值模拟方法调整导流板结构、尺寸、位置,达到优化电除尘器流量分配的目的。由于流量分配均匀性并不意味着电除尘器各收尘室的粉尘收集量也能达到平衡,通常情况下电除尘器粉尘量分配偏差大于烟气流量偏差,这是因为粉尘密度大于烟气密度,粒径大的粉尘惯性大,气流的携带作用较弱,因此在超低排放要求下,流场设计过程中在解决流量平衡的同时也要解决电除尘器各个收尘室的粉尘量的平衡,也就是说烟气量和粉尘量都达到相对平衡的状态是发挥电除尘器最佳性能的关键点之一。图1是某电厂电除尘器前烟道流场优化前后的流量分配比较,通过CFD模拟优化后,电除尘器两室流量偏差由±14.4%降低至±0.4%,粉尘量偏差由±24.3%降低至±1.8%,实现了电除尘器烟气流量和粉尘量均匀分配。

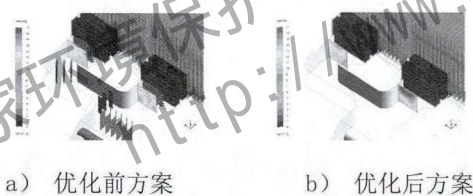


图1 入口烟道的导流板设计及流场

2 本体气流分布的优化及分析

2.1 进口喇叭扩张角的影响

为了了解电除尘器进口喇叭扩张角对电场内部流场的影响,在进口喇叭大小口尺寸不变的条件,单边横向扩张角分别为30°、45°和60°时的流场分布进行模拟分析,进口喇叭布置如图2所示。

对不同扩张角的电除尘器流场模拟结果如图3所示,不同方案时电场断面流场分布均匀性统计和进口喇叭阻力的对比情况见表1。从模拟结果可以看出,随着进口喇叭

扩张角的变大,电除尘器内的流场分布变差,存在大范围涡流且局部风速高,电场断面流场分布均匀性也变差,影响电除尘器的除尘效率。而随着扩张角变大,进口喇叭阻力也随之明显增大。当扩张角过大时,收尘区的流场均匀性极差,这时候即使采用更小开孔率的气流分布板,也难以改善收尘区的气流分布。进口扩张角越小,气流在电除尘器内流线性越好,流场越均匀,阻力系数越小。在工程流场设计中,扩张角的大小对该区域的阻力尤其是气流分布均匀性的好坏有直接关系,因此,进口喇叭扩张角的合理控制对于减少除尘器本体阻力、提高收尘区的气流分布均匀性具有积极的意义。

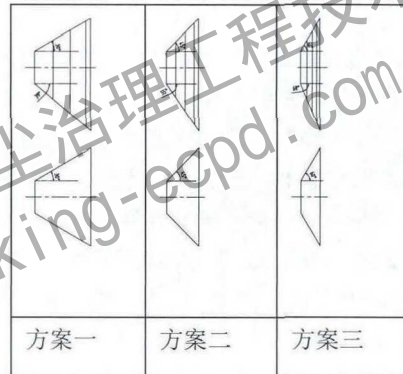


图2 进口喇叭扩张角方案示意图

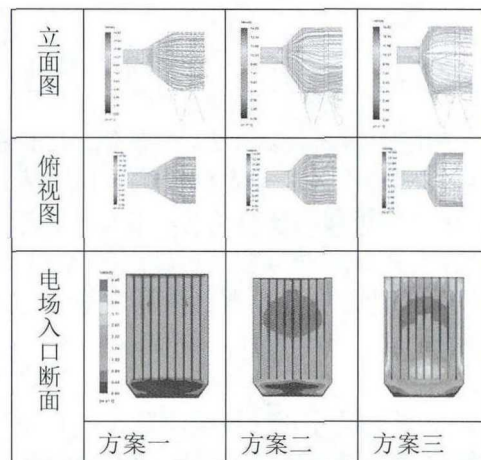


图3 不同扩张角方案流场数值模拟结果

表1 不同扩张角方案流场统计结果对比

方案	方案一	方案二	方案三
电场断面均匀性	0.182	0.387	0.521
进口喇叭阻力 (Pa)	101	134	238
阻力系数	1.15	1.52	2.70

2.2 出口喇叭的影响

不同的出口喇叭收缩角方案见图4, 图5给出了不同出口喇叭收缩角条件下除尘器出口喇叭区域和末电场出口断面的速度分布云图的对比情况。从速度分布云图里可以看出, 当出口喇叭收缩角为30°时, 该区域的速度分布相对比较均匀, 随着收缩角的增大, 末电场中间断面中间区域的速度开始增大, 末电场出口断面中间局部区域流速过大容易把该区域的细粉尘颗粒夹带走, 从而影响电除尘器对细颗粒粉尘的捕集效果。表2给出了不同收缩角条件下, 出口喇叭的阻力对比情况, 对比结果表明, 收缩角越大, 该区域的局部阻力也越大。由此可见, 出口喇叭合理设计不但对电除尘器本体的阻力有影响, 同时也对末电场的分布均匀性有影响。

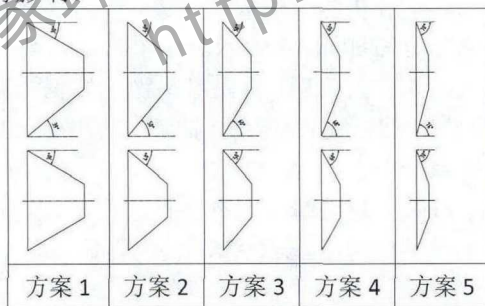


图4 出口喇叭收缩角方案示意图

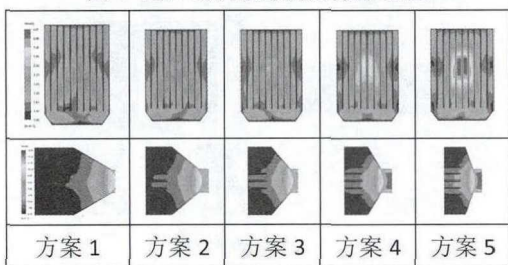


图5 出口喇叭收缩角对流场的影响

表2 不同方案电场断面流场分布均匀性及阻力情况

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
末电场断面均匀性	0.31	0.32	0.36	0.48	0.58
出口喇叭阻力 Pa	12	19	26	33	41
阻力系数	0.14	0.22	0.30	0.37	0.47

2.3 灰斗阻流板的影响

电除尘器内的气流短路通常认为是气流绕过电场区, 而从灰斗、顶梁等区域通过, 不仅这部分烟气携带的粉尘不会被收集, 还可能将已收集的粉尘带走, 所以要想实现电除尘器的超低排放, 电除尘器的气流短路问题必须要重视。电除尘器内气流在经过进口喇叭的扩散后, 会有一部分气流进入灰斗形成短路, 会使沉积于灰斗中的粉尘发生二次飞扬, 使之重新回到气流中, 甚至直接带出电除尘器, 使电除尘器效率降低。图6给出了某600MW机组在不同灰斗阻流板方案下的流场数值模拟结果。数值计算结果表明, 当灰斗内部没有设计阻流板或设计不合理时, 灰斗区域形成了大范围的回流现象, 在某些局部区域气流组织紊乱, 极板下部区域有高速出现, 这些现象一方面容易把灰斗里的飞灰卷起形成二次扬尘, 另一方面高流速容易把扬尘带走从而造成大量的粉尘逃逸。灰斗阻流方案优化后的数值模拟结果见图6中的方案三, 从图中明显可以看出, 极板下沿的高流速区消失, 灰斗内的回流强度也减弱了许多, 这对于减少二次扬尘和粉尘逃逸有利。

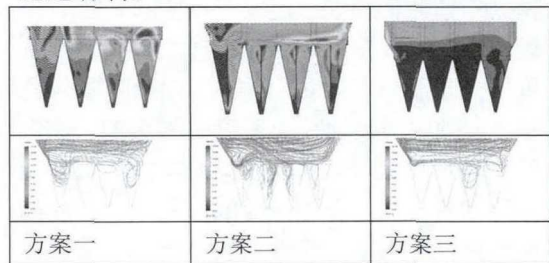


图6 不同灰斗阻流方案的流场数值模拟结果

3 电场及颗粒捕集

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。电晕线与极板的极配型式对电除尘器电场分布有重要影响,对针刺线垂直于极板、针刺线平行于极板两种极配型式下的电场进行三维数值模拟。模拟结果显示针刺线的放置方向对电场击穿电压、电流密度分布都会产生影响,针刺线平行于极板的击穿电压比针刺线垂直于极板的击穿电压高,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7所示。由于电场击穿电压更高、板电流密度更均匀,选择针刺线平行于极板比针刺线垂直于极板更具优势,这样数值模拟结果可以为电除尘器极配型式选择提供参考依据。

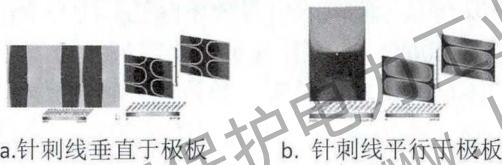


图7 针刺线电场数值模拟结果

将粉尘颗粒运动与电场耦合数值计算,可以揭示粉尘颗粒在电除尘器中的运动情况。图8给出了不同粒径粉尘颗粒在电场通道内的运动轨迹。从图中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。除尘效率与颗粒运动轨迹有关,颗粒运动轨迹能够达到收尘极,表明颗粒能被捕集。数值模拟对比结果显示,颗粒粒径 $dp=0.5 \mu m$ 时,颗粒轨迹线很少能到达收尘极,颗粒去除效

率最低,这主要是由于颗粒粒径小于 $0.5 \mu m$ 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)使颗粒的去除效率提高;颗粒粒径大于 $0.5 \mu m$ 时,颗粒去除效率随粒径增大而增大。

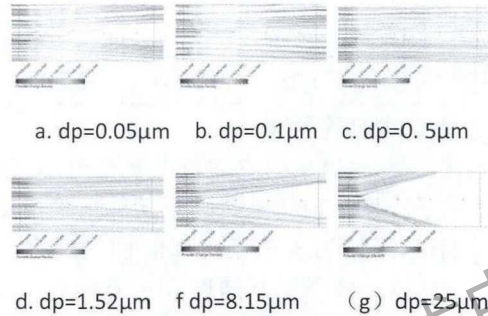


图8 不同粒径颗粒的运动轨迹

4 绝缘系统热风吹扫

绝缘子瓷缸内含尘烟气温度和湿度随着主设备运行工况时刻变化,如果烟气温度在露点温度以下,水蒸气在绝缘件表面结露,同时发生粉尘的粘附,当粉尘达到一定厚度时,容易造成绝缘件表面短路。为了保证电除尘器稳定运行,在保温箱中引入热风对绝缘子进行吹扫以消除结露和粉尘黏附。图9是对某600MW电除尘器绝缘子热风吹扫流场优化分析的数值模拟结果,不同监测断面速度分布如图10所示。结果显示:吹扫热风进入保温箱后,首先对绝缘子外表面进行吹扫,然后通过绝缘子盖板上的小孔,进入绝缘子内部,对内壁进行吹扫,吹扫热风基本可做到对绝缘子内外表面进行吹扫,防止绝缘子积污,延长绝缘子使用寿命。因此,对绝缘系统热风吹扫的方式改进对于电除尘器的稳定运行具有重要的意义。

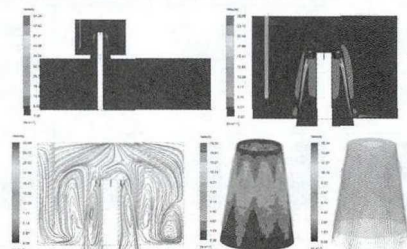


图9 吹扫系统速度分布数值模拟结果

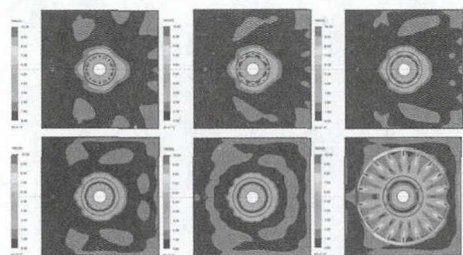


图10 不同高度水平截面绝缘子热风吹扫效果

5 总结与展望

电除尘器在我国燃煤电厂除尘中广泛应用,具有阻力小、效率高、运行稳定可靠等显著优点。本文采用数值模拟方法研究了流量分配、本体气流分布设计、电场极配型式、绝缘系统热风吹扫设计等方面的作用和影响。电除尘器入口烟道导流板的合理设计不但可以解决流量分配平衡问题,也可以使粉尘量的偏差得到大幅度改善,烟气量和粉尘量都达到相对平衡的状态更有助于发挥电除尘器的最佳性能;进口喇叭扩张角变大,进口喇叭阻力也随之明显增大,当扩张角过大时,收尘区的流场均匀性极差,这时候即使采用更小开孔率的气流分布板,也难以改善收尘区电场断面的气流分布均匀性;出口喇叭收缩角越大,本体阻力越大,同时末电场断面中间区域易形成高速区;灰斗阻流板对收尘区下沿和灰斗区域的气流分布影响较大,合理设计灰斗阻流板有助于减轻收尘区下沿的高速区与灰斗的强回流现象;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,针刺线平行于极板可以获得更高的击穿电压和更均匀的电流密度分布;颗粒粒径小于 $0.5\mu\text{m}$ 时,由于扩散荷电占主导地位气流曳力减小而使颗粒的捕集效率提高,颗粒粒径大于 $0.5\mu\text{m}$ 时,颗粒除尘效率随粒径增大而增大;绝缘系统的热风吹扫的改进有助于解决绝缘系统短路现象,延长绝缘子寿命。由此可见,超低排放时代,流场设计对工程设计、运行及诊断分析具有重要的参考意义。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。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]VARONOS, A. A., "Prediction of the cleaning efficiency of an electro-static precipitator", *J. Electrostatics*, 55: 111-133.
- [2]S. 小奥格尔斯比, G.B. 尼科尔斯, 谭天祐(译). 电除尘器[M]. 水利电力出版社. 1983
- [3]B.Y. Guo, X.L. Ye, D.D. Liu and A.B. Yu, "Application of multi-scale approach in the gas flow simulation through electrostatic precipitators", Ninth Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 Dec 2012.
- [4]Hou, Q.F., Guo, B.Y., Li, L.F., "Numerical simulation of gas flow in an electrostatic precipitator", Proc. Seventh Int. Conf. CFD in Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, Dec 9-11, 2009.
- [5]N.F. Nielsen, L.Lind. Numerical modelling of gas distribution in electrostatic precipitators. The 8th International conference on Electrostatic Precipitation, May. 15(2001).
- [6]Veronique Arrondel, Gianluca Bacchiega, Ivo Gallimberti. ESP Modelling: From University Studies to Industrial Application. The 8th International Conference on Electrostatic Precipitation, May. 15(2001).
- [7]A.G. Hein. Electrostatic Precipitation, Dust Movement and Gas flow Optimization. The 8th International Conference on Electrostatic Precipitation, May. 15(2001).
- [8]Ye Xinglian et, Multi-scale simulation of the gas flow through electrostatic precipitators[J], *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(21-22):9514-9526
- [9]李立锋, 黄三明, 叶兴联等. LNE-CFD 数值模拟技术的研究与应用[J]. *电力科技与环保*, 2011, 27(4): 24-27