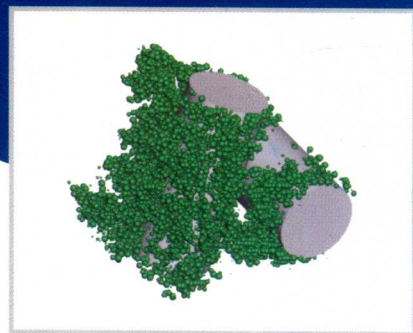


优秀青年学者文库·工程热物理卷

纤维捕集细颗粒物的 数值模拟

赵海波 著

Simulating and Modelling Particulate
Matter Removal by Fibrous Filter



科学出版社

优秀青年学者文库·工程热物理卷

纤维捕集细颗粒物的数值模拟

**Simulating and Modelling Particulate Matter
Removal by Fibrous Filter**

赵海波 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

纤维除尘装置(设备)广泛应用于人类生产和生活的众多领域。纤维过滤器在捕集过程中会在滤料表面形成颗粒枝簇结构,对颗粒物的整体捕集效率高,但是对于细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的分级效率仍然难以满足越来越严格的排放要求,对其进行设计和运行的优化是目前众多纤维除尘应用的实际需求。对纤维除尘过程进行数学建模和数值模拟是对其进行设计和运行优化的理论基础。本书系统介绍了纤维除尘过程的数学物理模型和数值模拟方法,重点是格子 Boltzmann-元胞自动机概率模型。利用这些数值模拟对常规圆形截面纤维、异形截面纤维、多层纤维等稳态和动态纤维除尘过程进行多尺度模拟,揭示不同机理主导下压降、除尘效率、沉积模态、枝簇结构内部孔隙率等动态演变规律,从而对纤维几何结构、排列方式、静电增强等的优化以及实际应用提供理论指导。

本书可供动力工程与工程热物理、环境科学、化学工程、力学、大气物理化学等领域的大专院校教师、研究生的教学参考书,也可作为相关科研人员和工程技术人员的专业学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

纤维捕集细颗粒物的数值模拟 = Simulating and Modelling Particulate Matter Removal by Fibrous Filter / 赵海波著. —北京: 科学出版社, 2019.3

(优秀青年学者丛书·工程热物理卷)

ISBN 978-7-03-060732-4

I. ①纤… II. ①赵… III. ①除尘—数值模拟 IV. ①X513

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第042934号

责任编辑: 范运年 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 师艳茹 / 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>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 13

字数: 250 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

青年多创新，求真且力行(代序)

——青年人，请分享您成功的经验

能源动力及环境是全球人类赖以生存和发展极其重要的因素，随着经济的快速发展和环境保护意识的不间断加强，为保证人类的可持续发展，节能、高效、降低或消除污染排放物、发展新能源及可再生能源已经成为能源领域研究和利用的重要任务。

能源动力和环境是世界各国面临的极其重要的社会问题，我国也不例外。虽然从 20 世纪 50 年代扔掉了“贫油”的帽子，但是“缺油、少气、相对富煤”的资源特性是肯定的。从 1993 年起，随着经济的快速发展，我国便成为石油净进口国，截止到 2018 年，我国的石油进口对外依存度已经超过 70%。远远超过 50% 的能源安全线。我国早已成为世界上二氧化碳的最大排放国。由于大量的能源消耗，特别是化石能源的消耗，环境受到很大污染，特别是空气质量屡屡为世人诟病。雾霾的频频来袭，成为我国不少地区压在头上的难隐之痛。我国能源工业发展更是面临经济增长、环境保护和社会发展重大压力，在未来能源发展中，如何充分利用天然气、水能、核能等清洁能源，加快发展太阳能、风能、生物质能等可再生能源，洁净利用石油、煤炭等化石能源，提高能源利用率，降低能源利用过程中带来的大气、固废、水资源的污染等问题，实现能源、经济、环境的可持续发展，是我国未来能源领域发展的必由之路。

近年来，我国政府在能源与动力领域不断加大科研投入的力度，在能源利用和环境保护方面取得了一系列的成果，也有一大批年青的学者得以锻炼成长，在各自的研究领域做出了可喜的成绩。科学技术的创新与进步，离不开科研人员的辛勤努力，更离不开年轻人的不拘泥于前人、敢于创新的勇气，需要青年学者的参与和孜孜不倦的追求。

近代中国发生了三个巨大的变革，改变了中国的命运，分别是 1919 年的五四运动、1949 年的新中国成立和 1978 年的改革开放。五四运动从文化上唤醒国人，新中国成立后从一个一穷二白的国家发展成初具规模工业国，变成了真正意义上的世界强国。改革开放把中国从一个穷国发展成世界上第二大经济体。涉及国运的三次大事变，年轻人在其中发挥了重要的作用。

青年人是创造力最丰富的人生阶段，科学的未来在于青年。

经过数十年的发展，我国已经成为世界上最大的高等教育人才的培养国，每

年不仅国内培养出大量优秀的青年人才，随着国家经济实力不断壮大，大批学成的国外优秀青年学者也纷纷回国加入到祖国建设的队伍中。在“不拘一格降人才”的精神指导下，涌现出一大批“杰出青年”“青年长江学者”“青年千人”“青年拔尖人才”等优秀的年轻学者，成为所在学科的领军人物或学术带头人或学术骨干，为学科的发展做出重要贡献。

科学的发展需要交流，交流的最重要方式是论文和著作。古代对学者要求的“立德、立功、立言”的三立中，其中的立言就是著书立说。一个人成功，常常谦虚地表示是站在巨人的肩膀上，就是参照前人的研究成果，发展出新的理论和方法。我国著名学者屠呦呦之所以能够发现青蒿素的作用，就是从古人葛洪的著作中得到重要启发。诺贝尔物理学奖获得者的杨振宁教授，除了与李政道合作的宇称不守恒理论之外，他提出的非阿贝尔规范场论以及杨-巴克斯特方程，为后来的获诺贝尔物理奖奠定了很好的基础，他在统计力学和高温超导方面的贡献也为后来的工作起到重要的方向标作用。因此，著书立说，不仅对于个人的学术成熟和成长有重要的作用，对于促进学科发展，带动他人的进步也至关重要。

著名学者王国维曾在其所著的《人间词话》中对古今之成大事业、大学问者提出人生必经三个境界，第一境界是‘昨夜西风凋碧树，独上高楼，望尽天涯路’；第二是‘衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴’；第三是‘众里寻他千百度，回头蓦见，那人正在灯火阑珊处’。这里指出，做学问，成大事首先是要耐得住孤独。第二是要守得住清贫，要坚持。在以上基础上，获得的成功自然就会到来。当然，著书是辛苦的。在当前还没有完全消除唯论文的现状下，从功利主义出发，撰写一篇论文可能比著一本书花费的时间、精力要少很多，然而，作为一个真正的学者，著书立言是非常必要的。

科学出版社作为国家最重要的科学文集的出版单位，出于对未来发展、对培养年青人的重大担当，提出了《优秀青年学者文库·工程热物理卷》出版计划。该计划给大家一个非常好的机会，为青年学者的成长提供了很好的展现能力平台，也给大家一个总结自己学术成果的机会。本套丛书就是立足于能源与动力领域优秀青年学者的科研工作，将其中的优秀成果展示出来。

国家的经济快速发展，能源需求日盛。化石能源消耗带来的资源和环境的担忧，给我们从事能源动力的研究人员一个绝好的发展机会，寻找新能源，实现可持续发展是我们工程热物理学科的所有同仁的共同追求。希望我们青年学者，不辱使命，积极创新，努力拼搏，创造出一个美好的未来。

姚春德

2019年2月27日

前 言

细颗粒物(PM_{2.5})对环境以及人类健康都有很多危害,大气中的细颗粒物污染问题已经越来越受到人们关注。纤维过滤器在捕集过程中会在滤料表面形成颗粒枝簇结构,对 PM_{2.5} 的捕集效率更高,是目前应用最广泛的高效除尘器之一,大到燃煤电厂的布袋除尘器、小到空气净化器和口罩,均属于纤维过滤器。为了进一步提高纤维过滤器对细颗粒物的分级效率并降低压降,在传统纤维过滤理论的基础上人们进行了大量工作,如对纤维形状、大小、排列等进行优化,以及利用多场强化(如静电场等)原理来进一步提升纤维过滤器的性能。对纤维除尘过程进行数学建模和数值模拟是对其进行设计和运行优化的理论基础,相比较而言,这方面的研究较为缺乏。

本书系统介绍了纤维除尘过程的数学物理模型和数值模拟方法,重点是利用格子 Boltzmann-元胞自动机概率模型模拟纤维除尘过程,该模型具有易于处理复杂且动态变化的边界条件、模型简单、易于实现等优点,非常适合于纤维过滤模拟。本书利用该模型对常规圆形截面纤维、异形截面(椭圆形、矩形、三叶形、十字形、三角形等)纤维、多层纤维、静电增强纤维等稳态和动态纤维除尘过程进行数值模拟,揭示不同机理(布朗扩散、拦截、惯性碰撞)主导下压降、除尘效率、沉积模态、枝簇结构内部孔隙率等动态演变规律,并提出了对应的系统压降和扩散捕集效率的拟合公式,这些工作有助于对纤维几何结构、排列方式、静电增强模式等进行优化,为纤维除尘装置(设备)的优化设计提供直接的理论基础。

本书共分 9 章,第 1 章介绍了纤维过滤器主要研究方法、纤维过滤机理,并提出本书研究工作的出发点和主要目标;第 2 章介绍格子 Boltzmann-元胞自动机(LB-CA)气固两相流模型,详细描述颗粒-流体相互作用的双向、四向耦合模型,并对多种模型进行验证;第 3 章利用 LB-CA 模型研究圆形截面纤维捕集颗粒物的稳态过程,研究了清洁工况下不同过滤机制、不同纤维布置方式(错列、并列)对细颗粒物捕集过程的影响;第 4 章重点研究了异形截面纤维过滤细颗粒物的性能,并提出了系统压降和捕集效率的拟合公式;第 5 章从清洁工况扩展到了粘污工况(动态荷尘过程),研究了圆柱纤维、椭圆截面纤维等动态过滤过程中系统压降、捕集效率的演变;第 6 章从二维模拟进一步扩展到三维模拟,针对圆柱纤维和椭圆截面纤维,详细讨论了沉积颗粒形成的枝簇的生长过程及其内部结构(孔隙率);第 7 章利用 LB-CA 模型研究单极性的椭圆驻极体纤维捕集细颗粒物的捕集效率,分析颗粒粒径、椭圆驻极体纤维长短轴、流体入口速度、颗粒和纤维的带电量对

细颗粒物捕集效率的影响；第 8 章对静电增强布袋除尘器的非稳态除尘过程进行数值模拟，定量获得了烟尘颗粒尺度谱在除尘器中的演变过程；第 9 章对全书内容进行总结，并对未来的发展方向做展望。

本人指导的王浩明博士、王坤硕士、黄浩凯硕士、博士生贺永翔对本书工作作出了实质性贡献，硕士生郑朝和协助整理了文献和相关研究工作，在此对他们工作表示由衷的感谢。作者在最初开展该项工作时，得到了本实验室郭照立教授的无私帮助，他最早启发作者关注格子 Boltzmann 方法，并提供了模拟顶盖驱动方腔流的格子 Boltzmann 源程序，在此基础上作者才发展出可准确定量模拟气固两相流的格子 Boltzmann-元胞自动机概率模型，并且把其应用于纤维过滤领域，郭照立教授在格子 Boltzmann 领域深厚的理论功底和研究积累令我受益匪浅。我的博士生导师郑楚光教授一直关注和支持该方面的工作，并为本人工作的深入和拓展提供了有价值的建议，在此表示深深的致谢。本书中相关工作得到了国家自然科学基金重大项目课题“气固湍流燃烧多尺度耦合模拟与设计方法”(51396094)、基金委面上项目“格子 Boltzmann-格子气-直接模拟 Monte Carlo 的四向耦合介观模型”(50876037)；以及基金委优秀青年基金项目(51522603)、中组部“万人计划”青年拔尖人才支持项目(组厅字[2015]48 号)、教育部长江学者特聘教授青年学者项目等人才项目的资助，在此一并致谢。

纤维过滤领域的研究内容十分广泛，涉及数学、物理、力学等多学科领域，我们也一直处于不断地探索和学习的过程中，书中定有一些不妥之处，恳请广大读者不吝赐教。联系方式：华中科技大学煤燃烧国家重点实验室赵海波(hzhao@mail.hust.edu.cn)，邮编 430074。

赵海波

2018 年 9 月 10 日

目 录

青年多创新, 求真且力行(代序)

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 纤维过滤机理	9
1.3 纤维除尘器捕集颗粒物的研究现状	10
1.3.1 经典纤维过滤理论	10
1.3.2 异形纤维捕集颗粒物的研究进展	14
1.3.3 纤维非稳态捕集颗粒物的研究进展	16
1.3.4 静电增强纤维过滤技术的研究进展	16
1.4 纤维除尘器捕集颗粒物的数值模拟方法	18
1.4.1 常规数值模拟方法	19
1.4.2 格子 Boltzmann 气固两相流模拟方法	21
1.4.3 宏观数值模拟方法	23
1.5 本书的主要结构及内容	23
参考文献	24
2 气固两相流的格子 Boltzmann-元胞自动机概率模型	33
2.1 引言	33
2.2 格子 Boltzmann 方法	33
2.2.1 基本原理	33
2.2.2 边界处理	36
2.2.3 曲面边界处理	39
2.2.4 边界作用力的计算	40
2.3 颗粒运动模型	41
2.4 双向耦合的 LB-CA 模型	43
2.5 四向耦合的 LB-CA 模型	44
2.5.1 等权值 DSMC 方法	44
2.5.2 异权值 DSMC 方法	47
2.6 LB-CA 模型验证	53
2.6.1 LB 模型验证	53
2.6.2 CA 模型验证	55

2.6.3 考虑双向耦合的 LB-CA 模型验证	57
2.6.4 考虑四向耦合的 LB-CA 模型验证	63
2.7 本章小结	82
参考文献	82
3 圆柱形纤维捕集颗粒物稳态过程的数值模拟	85
3.1 引言	85
3.2 圆形截面单纤维捕集颗粒物性能模拟	85
3.2.1 模拟条件	85
3.2.2 系统压降	87
3.2.3 纤维捕集效率	87
3.3 圆形截面纤维层捕集颗粒物性能模拟	91
3.3.1 模拟条件	92
3.3.2 清洁工况系统压降	92
3.3.3 清洁工况纤维捕集效率	93
3.3.4 不同布置方式性能比较	95
3.3.5 纤维捕集能力比较	96
3.4 本章小结	97
参考文献	97
4 异形纤维捕集颗粒物稳态过程的数值模拟	99
4.1 引言	99
4.2 模拟条件及数据处理方法	99
4.2.1 模拟条件	99
4.2.2 莱温伯格—马卡特方法	99
4.3 椭圆纤维系统压降	101
4.4 椭圆纤维捕集效率	103
4.4.1 纤维填充率对椭圆纤维捕集效率的影响	104
4.4.2 椭圆纤维扩散捕集效率	104
4.4.3 椭圆纤维拦截捕集效率	106
4.4.4 椭圆纤维惯性捕集效率	108
4.5 椭圆纤维性能参数研究	110
4.6 其他 4 种异形纤维捕集细颗粒物性能研究	112
4.6.1 4 种异形纤维的系统压降	113
4.6.2 4 种异形纤维的扩散捕集效率	123
4.6.3 4 种异形纤维性能比较	128
4.7 本章小结	130

参考文献	131
5 纤维捕集颗粒物非稳态过程的数值模拟	132
5.1 引言	132
5.2 纤维非稳态捕集颗粒物的模拟方法	133
5.3 圆形纤维非稳态捕集颗粒物模拟	134
5.3.1 不同捕集机制下的沉积模态	134
5.3.2 不同捕集机制下枝簇结构分形维数	135
5.3.3 不同捕集机制下枝簇结构的孔隙率	136
5.3.4 纤维粘污过程中压降和效率变化	137
5.4 多纤维过滤器非稳态过程模拟	138
5.4.1 沉积颗粒枝簇结构生长过程	138
5.4.2 捕集过程压降变化	140
5.4.3 捕集过程效率变化	140
5.4.4 捕集过程性能变化	141
5.4.5 捕集过程中各纤维捕集能力变化	142
5.5 椭圆纤维非稳态捕集颗粒物模拟	143
5.6 本章小节	144
参考文献	145
6 纤维捕集颗粒物的三维数值模拟	146
6.1 引言	146
6.2 圆柱纤维捕集颗粒过程	146
6.3 椭圆截面纤维捕集颗粒过程	149
6.3.1 颗粒沉积模态	149
6.3.2 系统压降的动态变化特性	156
6.3.3 捕集效率的动态变化特性	158
6.4 两正交圆柱纤维多分散颗粒捕集过程	160
6.4.1 清洁工况	160
6.4.2 单分散颗粒沉积模态	163
6.4.3 多分散颗粒沉积模态	164
6.4.4 真实捕集过程压降和效率变化	168
6.5 本章小结	170
参考文献	171
7 驻极体纤维静电增强捕集细颗粒物数值模拟	172
7.1 引言	172
7.2 驻极体纤维周围电势分布模拟	172

7.2.1	格子 Boltzmann 方法求解电势分布	172
7.2.2	驻极体纤维周围的电势分布	173
7.3	清洁工况下驻极体纤维的捕集效率	176
7.3.1	圆形驻极体纤维清洁捕集效率	176
7.3.2	椭圆驻极体纤维清洁捕集效率	177
7.4	本章小结	181
	参考文献	181
8	静电布袋混合除尘器整体捕集性能的宏观数值模拟	182
8.1	静电纤维混合除尘器的数学模型	182
8.2	静电纤维混合除尘器除尘过程模拟	185
8.3	本章小结	191
	参考文献	192
9	总结和展望	194
9.1	总结	194
9.2	展望	197

1 绪 论

1.1 研究背景

最近十几年来,随着化石能源的消耗不断增加,空气污染问题越来越突出。空气污染物包括可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、硫化物、氮氧化物和臭氧等^[1]。其中,颗粒物是最受关注的大气污染物,对环境和人类健康威胁极大。治理细微颗粒物的空气污染、减少雾霾天气是当前重要的课题。

细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)表示空气动力学直径小于等于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物,它可以分为一次粒子和二次粒子。其中,一次颗粒物包括粉尘、碳黑、有机碳等,也被称为原生颗粒物;二次颗粒物是指硝酸铵、硫酸铵(亚硫酸铵)、有机气溶胶等,它们是由 NO_x 、 SO_x 、挥发性有机化合物(VOC)等在大气中经过光化学反应形成的二次污染物^[2]。燃料燃烧形成的颗粒物是一次颗粒物的重要来源,且以细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为主;燃料燃烧产生的 SO_2 、 NO_x 和 VOC 则是二次颗粒物的主要来源。

细颗粒物的粒径小、质量小,难以沉积,可以在大气中长期滞留,并随着大气环流运动到很大范围,对环境、人类健康以及安全生产等造成巨大危害^[3]。提高燃烧源细颗粒物的脱除性能,是除尘器研究的关键所在。

燃烧前和燃烧中的颗粒物排放控制措施显然都无法满足越来越严格的环保标准,而且,在很多情况下,有非常多的实施限制因素,如对于已经设计运行的煤粉锅炉,为了满足生产的要求和经济性,通过调整负荷或燃烧温度等措施来限制颗粒物的排放存在较大的难度。目前,最重要的颗粒物控制措施毫无疑问是燃烧后的除尘技术。

1. 常规除尘器的分类与原理

根据所除尘器对固体颗粒(或雾滴)的净化机理不同,习惯上将常规除尘设备分为四大类。

1) 机械式除尘器

机械式除尘器是依靠机械力(重力、惯性力、离心力等)将尘粒从气流中去除的装置。按照除尘颗粒粒径的不同可设计为重力尘降室、惯性除尘器和旋风除尘器。这类除尘器的特点是结构简单,设备费用和运行费用均较低,但除尘效率不高,适用于含尘浓度高和颗粒粒径较大的气流^[4]。一般而言,机械式除尘器对粒

径较大的悬浮颗粒的除尘效果较好,如重力沉降一般只对于粒径在 $50\mu\text{m}$ 以上的颗粒有效,而旋风分离器能够较好去除的颗粒粒径也在 $15\mu\text{m}$ 以上。

2) 过滤式除尘器

过滤式除尘器是利用过滤材料来捕集颗粒物的装置。布袋除尘器是最常见的过滤式除尘器,以纤维织物作为过滤材料,也被称为纤维过滤器。纤维过滤器的适应性很强,不仅可以捕集电厂尾部烟气中的颗粒,也可以用于室内除尘,日常使用的口罩也可以归类为纤维过滤器^[4]。相比其他几类除尘器,纤维过滤器在捕集过程中会在滤料表面形成颗粒枝簇结构,因此对 $\text{PM}_{2.5}$ 的捕集效率更高,是目前应用最广泛的高效除尘器之一。虽然纤维过滤器的整体捕集效率很高,但是它对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的分级效率仍然难以满足越来越严格的细颗粒排放要求。如何提高传统布袋除尘器对于细颗粒物的捕集效率,越来越受到研究人员的关注。近些年来,研究者发现,非圆截面的异形纤维构成的纤维过滤器相比于圆形纤维过滤器,对细颗粒物的捕集效率会有比较明显的提升^[5,6]。

3) 湿式除尘器

湿式除尘器是将含有颗粒的气流与液体接触,通过颗粒与液滴之间的惯性碰撞、扩散等机理,颗粒与液体发生接触而被捕集^[7]。湿式除尘器具有结构简单、设备成本低、除尘效率高及能够有效去除烟气中的二氧化硫等优点,在众多领域中得到了应用。但是,目前的湿式除尘器普遍具有以下问题:①耗能较大;②产生废液;③由于液体存在,其使用环境受到限制。

4) 静电除尘器

静电除尘器是利用高压电场使烟尘颗粒荷电,在静电力的作用下将颗粒从气流中分离出来。与机械式除尘器和湿式除尘器相比,静电除尘器具有更高的颗粒捕集效率,适用于各种除尘环境,其缺点在于造价高,除尘效率受到粉尘比电阻的影响很大,尤其是粒径较小的颗粒难以荷电,同时也存在占地面积大的问题。而且,通过研究发现,虽然静电除尘器整体捕集效率可以高达 99%,但是对于细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的平均捕集效率偏低^[8],尤其是对于粒径在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 范围内的颗粒的捕集效率更低。

以上分类是基于起主导作用的除尘机理。在实际的颗粒污染物的净化中,很少单独运用某一种机理,常常是把两种以上的机理同时运用于除尘过程。几乎所有的火电厂均安装了各种除尘器,包括静电除尘器、湿式除尘器、旋风除尘器、布袋除尘器等,其中 90% 以上为静电除尘器^[4,9]。这些除尘器的整体质量除尘效率通常很高,甚至可以达到 99% 以上,但是对于危害性极大、尺度范围在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 的细颗粒物,除尘效率往往只能达到 50%~70%^[4,10]。

为了进一步提高净化效果,特别是为提高对亚微米粒子的净化效率,研制了

许多种多机理复合的除尘器,如静电强化过滤除尘器、电凝聚除尘器、磁力净化器等新型净化设备,从而极大地推动了除尘技术的发展。

2. 新型除尘器的分类和原理

目前已经发展了诸多燃烧后颗粒物捕集策略来控制其排放,总体而言,可分为四大类。一类是预团聚技术,即采取电、磁、声、热等外加场的作用使细微颗粒预团聚长大,从而被常规除尘装置高效脱除;一类是复合除尘技术,如静电与布袋混合除尘系统等,目标是通过几种除尘机理的协同作用,增强细微颗粒物的脱除效率;一类是传统除尘技术的改进;最后一类是新型除尘技术。

1) 预团聚技术

预团聚技术包括电团聚、声团聚、磁凝并等几种。

电团聚技术的基本原理是利用电场的作用驱使荷电颗粒运动,由于颗粒相对运动的速度差异以及荷电颗粒之间的库仑力和镜像力,使得颗粒之间发生相互碰撞或黏附而聚结成较大颗粒。

电团聚技术主要的技术方案包括^[11]同极性荷电粉尘在直流电场中的凝并、异极性荷电粉尘在直流电场中的凝并、同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并、异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并。对于 $0.06\sim 12\mu\text{m}$ 的飞灰颗粒,采用同极性荷电粉尘在交变电场中电凝并的方案,比常规电除尘器的效率提高 3%(由 95%增到 98%)^[12];而相关的对比研究认为^[13,14],异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并比同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并更为高效。向晓东等^[11]发展了一种双区式异极性荷电粉尘在交变电场中的电凝并技术,在交流电场内同时实现芒刺电晕预荷电和预凝并,除尘效率和投资成本均优于普通的三区式(荷电区、凝并区和收尘区)电凝并技术。

声团聚技术的基本原理是利用高强度声场引起空气分子的震动,并通过气体分子数密度变化对亚微米颗粒物产生相互作用而产生相对运动,增加亚微米颗粒物的碰撞、黏附和团聚长大的概率。Tiwary 等^[15]报道了冷态试验中声波团聚亚微米颗粒的最佳操作参数,包括声强 $150\sim 160\text{dB}$ 、频率 $1\sim 2\text{kHz}$ 、 $2\sim 4\text{s}$ 的声波辐射时间等,此时颗粒尺度可由 $0.2\mu\text{m}$ 长大到 $20\mu\text{m}$ 。Rodríguez-maroto 等^[16]在中试尺度的电厂进行的热态实验研究表明,采用 10kHz 或 20kHz 、 400W 或 80W 的功率、2 或 4 个声波发生器(振子)进行声波预团聚然后再进入静电除尘器,可以比没有声团聚时减少 40%的颗粒数量和 37%的颗粒质量。沈湘林、袁竹林和盛昌栋等^[17-22]、郑世琴等^[23]对亚微米颗粒的声团聚进行了相应的数值模拟和实验研究,采用分形维数(fractal dimension)来考虑不规则团聚颗粒,并发现存在一个最佳声场频率。虽然在声团聚方面进行了包括声团聚机理和理论模型的建立、试验测量、数值模拟等卓有成效的工作,但是目前仍然存在诸多问题。如 Ezekoye 等^[24]利用分区法

对声凝并过程进行数值模拟并与实验结果进行比较,认为低频声场的团聚过程可以采用同向团聚机理和动力学团聚机理(orthokinetic and hydrodynamic coagulation mechanisms)来进行合理预测,而在中频和高频声场中的团聚则需要进一步研究团聚机理和相应的模型;另外,声团聚技术存在产生声场的电能消耗和噪声污染问题;声波声强、频率等与复杂尺度分布的烟尘颗粒群的团聚效果之间的相互关系复杂的问题;声团聚与颗粒簇团的破碎之间的相互竞争等问题也值得进一步研究和解决。

磁凝并技术的基本原理是在磁场的作用下磁性或弱磁性颗粒之间产生相对运动,发生碰撞、黏附和团聚长大。Prakash 等^[25]从布朗扩散凝并核模型出发,考虑颗粒之间的磁偶极子相互作用力,提出了颗粒磁团聚核的理论表达式。而 Yiacoumi 等^[26]和 Tsouris 等^[27]均独立提出了考虑颗粒之间磁力、范德华力、静电力和流体颗粒相互作用力等的凝并核模型。赵长遂等^[28]的实验发现燃煤飞灰颗粒呈弱磁性,粒径越小磁凝并效率越高,但是磁凝并效果整体并不理想,这表明磁凝并技术是脱除亚微米颗粒物的一种潜在的有效方法,但是需要通过一些适当的措施使得飞灰颗粒上磁以增强细颗粒物的脱除效果。磁凝并技术目前存在的主要问题是如何提高弱磁性和非磁性颗粒的团聚速率、如何清除和解磁被收集的颗粒等^[29]。

电、声、磁团聚是在外力场的作用下促使细微颗粒团聚长大,即使没有任何外力场,在热泳、光泳的作用下,以及在布朗扩散、重力作用、湍流作用下,颗粒之间仍然可能发生团聚现象,这些团聚过程相对较为缓慢,因此需要采取各种措施来增强其团聚。

热团聚也称为热扩散团聚,气体分子的热运动使得细微颗粒物产生相对运动,温度越高,颗粒尺度越小,所受的布朗力相对自身惯性力就越大,越有利于颗粒的热团聚;湍流团聚是指湍流脉动速度对细微颗粒的相互作用所导致的颗粒碰撞而团聚的现象,梯度团聚或边界层团聚是由于流体横向速度梯度所导致的颗粒相对运动速度差异而引起的团聚现象,在边界层中尤其明显,一般对于大尺度颗粒($1\sim 10\mu\text{m}$ 以上)作用较为强烈。重力团聚则是不同尺度的颗粒在重力作用下产生相对运动速度而引起的团聚。一般而言,这些颗粒的自团聚机理对工业除尘效率的提高帮助不大,但是可以用于某些特殊工况中的气体净化过程,如燃煤联合循环发电系统的高温旋风分离器^[30],热团聚对小尺度颗粒($\leq 1\mu\text{m}$)、梯度团聚对于较大颗粒($\geq 1\mu\text{m}$)、湍流团聚对于更大尺度颗粒($\geq 10\mu\text{m}$)的除尘效率的提高均有一定帮助。

另外一种具有工业应用潜力的预团聚技术是喷雾团聚,它通过喷射液滴(水或者添加了某种活性剂的团聚促进剂^[31-33])进入含尘烟气当中,颗粒与液滴碰撞而被黏附,随着液滴不断地捕集颗粒及其水分不断地蒸发,最后形成尺度较大的团聚体;或者液滴浸润颗粒而增大颗粒的黏性,进而增强颗粒碰撞过程的凝并效率,使得其更容易黏附而团聚长大。张军营等^[31,34]开发了性能较高的团聚促进剂,包

括水、团聚活性剂、表面活性剂和 pH 调节剂,搭建团聚实验台架研究了不同类型的团聚活性剂、pH、喷雾流量、团聚促进剂的质量浓度、温度、烟尘浓度、烟尘成分等对团聚效果的影响,简单分析了其团聚机理,并建立了简单的喷雾团聚数学模型。然而,目前尚缺少对团聚促进剂的团聚机理、复杂的喷雾团聚过程的定量描述,难以得到最优化操作条件,无法分析其他因素(如烟气中已存的超微米颗粒物或复杂的两相湍流场等)对团聚过程的影响等。

近年来还有一种蒸汽相变团聚技术也得到关注。蒸汽相变团聚的机理是:过饱和的蒸汽以细微微粒为冷凝核发生异相冷凝,使尺度增大,并通过颗粒之间的相互碰撞和凝并过程继续团聚长大。这种技术的核心是建立过饱和蒸汽气氛,杨林军等^[35]认为,冷却高温高湿烟气或者使得高温含湿气体与低温液体相接触,是实现燃烧源含尘烟气过饱和气氛的可行措施。Bologa 等^[36]进行了蒸汽相变预团聚实验,初始平均尺度 66nm 的木材燃烧源微粒在饱和蒸汽中可以凝结长大到 930nm,然后在静电除尘器中被捕集,捕集效率可以达到 90%~95%。这种技术的局限性在于只适用于高湿烟气以及非憎水的除尘器(如湿式除尘器、湿式静电除尘器等)。

2) 复合除尘技术

复合除尘技术是同时利用几种外力条件、在几种机理的共同作用下实现高效除尘的目标。

黄斌等^[37]较为全面地综述了静电增强旋风除尘器、静电增强布袋除尘器、静电增强颗粒层除尘器等技术。静电增强旋风除尘器主要利用离心力脱除大尺度颗粒,利用静电力脱除小尺度颗粒。目前有学者对静电增强旋风除尘器的除尘机理、结构优化、三维流场数值模拟和分级除尘效率数学模型等均进行了系列研究^[38]。有实验表明,对于柴油机排放的亚微米颗粒,静电增强旋风除尘器可以最高达到 99.6% 的捕集效率^[39],对于中位粒径为 $3.1\mu\text{m}$ 的催化剂厂分子筛尾气的除尘效率可以达到 89.4%^[40]。但是静电增强旋风分离器难以处理大流量和高速度烟气,一般对于细微颗粒的除尘效率较低。

静电增强颗粒层除尘器的除尘机理是颗粒层中的大颗粒对烟尘颗粒的布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电吸引。静电增强颗粒层除尘器虽然总质量除尘效率可达到 98.4%~99.9%,但是对于 $0.7\sim 1.0\mu\text{m}$ 的细微颗粒,除尘效率甚至低于 80%^[41]。许世森等^[41]分析了三种类型的静电增强颗粒层除尘器,即粉尘荷电而颗粒层不带外电场、颗粒层带外电场而粉尘不荷电、粉尘预荷电且颗粒层带外电场,认为粉尘荷电和在颗粒层中施加电场可以获得最佳的除尘效果,而粉尘不荷电时的除尘效果可能最差。向晓东等^[42]的实验研究表明,即使只有颗粒层外加电场而颗粒不预荷电,也能有效提高 $0.5\mu\text{m}$ 以下的粉尘的除尘效率。静电增强颗粒除尘器的缺点在于压损较大而过滤风速较低、清灰复杂、体积庞大等。

静电增强布袋除尘器是利用滤料与颗粒之间的布朗扩散、拦截、惯性碰撞和静电吸引(库仑力或镜像力)等实现对细颗粒物的高效捕集,它可以综合静电除尘技术和纤维过滤技术的优点。静电增强布袋除尘器有如下静电增强方式:颗粒荷电而纤维层无外加电场;中性颗粒而纤维层有外加电场;颗粒荷电而纤维层有外加电场等。传统的静电增强纤维过滤器有 Apitron 静电袋式过滤器(一种颗粒预荷电增强袋式滤器)^[43]、TRI 棒帷电极电场增强袋滤器^[44]和中心电场袋式除尘器^[45]。后来又发展了驻极体纤维过滤装置,驻极体纤维是指能够长期储存真实电荷或者偶极电荷的纤维,可以利用荷电纤维的静电力来捕集带电或中性颗粒^[46]。驻极体纤维主要用于捕集难以被传统过滤器捕集的细颗粒物,它的优势在于较高的捕集效率和较低的系统压降^[47]。静电增强布袋除尘器具有许多良好的性能:对细颗粒物,尤其是粒径在 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间的颗粒有很高的捕集效率,一般都超过 90%;与静电除尘器相比,静电增强布袋除尘器对颗粒物的比电阻有更宽的适用范围;与普通布袋除尘器相比,静电增强布袋除尘器运行时阻力更小,所以费用更少^[48]。有研究^[49]表明,双极不对称预荷电布袋除尘器对于焊烟的捕集效果改进明显, $2 \mu\text{m}$ 的细微颗粒的穿透率由不荷电时的 34.2% 下降到预荷电时的 18%,且粉尘粒径越小,静电增强效果越明显。静电增强布袋除尘器的问题在于较大的压损、较低的过滤风速和较大的体积、滤袋的破损以及清灰比较困难等。

类似于静电增强颗粒层除尘器、静电增强布袋除尘器,静电增强纤维(也可称为静电增强无纺纤维)除尘器也属于过滤式除尘器,其除尘机理也非常类似,但是其压损较低,处理烟气体量大^[50]。研究表明^[51],纤维的存在、粉尘的比电阻低、相对湿度高有利于提高除尘效率,而过滤风速、荷电电压存在一个最佳值,这种除尘器对于小尺度粉尘的除尘效率增强更明显。通常认为,静电增强纤维除尘器对小尺度颗粒的捕集效果弱于静电增强布袋除尘器。

其他如静电增强湿式除尘器也广泛应用于冶金、矿山和电力等行业的含尘气体净化,通过或液滴荷电或颗粒荷电或液滴和颗粒同时荷上相反电荷,利用液滴和颗粒之间的镜像力或库仑力更有效地清除颗粒物^[52-55]。有实验结果^[56]表明,相比较于常规喷雾除尘技术,采用喷雾预荷电的方法对于煤矿井下产生的悬浮粉尘进行捕集,总粉尘浓度可以降低 45% 左右,可吸入颗粒物可以降低 50%~70% 左右,可以显著提高 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 粉尘的捕集效率。荷电方式、液气比、气体速度、液滴荷质比、液滴尺度分布、粉尘尺度等因素对静电增强湿式除尘器性能影响显著^[57,58]。

以上静电增强复合除尘系统主要是利用粉尘颗粒与捕集介质(纤维、颗粒层或液滴等)之间的库仑力或镜像力来增强除尘器主体对细微颗粒的捕集效率。同样,利用液滴对与颗粒之间存在的除尘机理(布朗扩散、拦截和惯性碰撞等),也可以增强主体除尘器的除尘效果。王静英^[59]发展的一种小型静电除尘器就是颗粒通过电晕强制荷负电、喷雾液滴通过感应荷正电,液滴捕集颗粒,然后利用湿式风叶