

旋风分离器内气固分离模型的研究进展

赵兵涛¹, 沈恒根¹, 许文元², 陈东武²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 200051; 2. 常熟市鼓风机有限公司, 江苏 常熟 215511)

摘要: 综述旋风器内气固两相分离模型相关理论研究进展的基础上, 从固相颗粒物浓度的影响、固相颗粒物间的相互作用、实际分离过程中各因素的综合作用以及旋风分离器内部的气固两相流动等方面, 分析和比较了各模型的建模思想和分析方法, 并展望今后分离模型的发展趋势。

关键词: 旋风分离器; 气固分离; 分离模型

中图分类号: TU834.64 **文献标识码:** A

文章编号: 1008-5548(2003)06-0045-04

Progress in Study of Gas-solid Separating Model in Cyclone Separators

ZHAO Bingtao¹, SHEN Henggen¹, XU Wen-yuan²,
CHEN Dongwu²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, 200051; 2. Changshu Fan Co. Ltd, Changshu, 215511, China)

Abstract: Based on the progress in study of gas-solid separating model in cyclone separators, the modeling and analytical methods are compared in the fields of the concentration of solid particles, the interaction of solid particles, the unified affects of different factors during separating process and the gas-solid two-phase flow in the cyclone separator. The modeling trends in the future are also presented.

Key words: cyclone separators; gas-solid separation; separating model

旋风分离器(以下简称旋风器)作为一种主要的气固两相分离和除尘设备已广泛应用于电力、机械、石化、建材、冶金以及纺织等领域。随着应用场合特殊化(例如在高温高压的操作条件下)和结构微型化(例如可吸入颗粒物的采样)等的发展趋势, 旋风器已显示了独特的不可替代的作用, 而且对其技术经济指标的要求愈来愈高。因此, 提高性能价格比已成为当今旋风分离技术发展的关键。

在旋风器的技术经济指标中, 分离效率(包括分级效率和总效率)是重要的指标之一, 也是对旋风器性能的预测评价和结构优化的重要参数。而作为分离效率的预测模型即分离模型, 也从 20 世纪 60 年代以后取得广泛的研究。本文就将对旋风器分离模型的研究进展做较为系统全面的描述和分析, 并展望今后分离模型的发展趋势。

1 分离理论的研究

旋风器内气固两相的分离模型是建立在分离理论的基础上的。目前, 旋风器内气固两相分离理论大致可分为以下几种:

(1) 沉降分离理论: 该理论与水平重力沉降室的分离状况相似, 根据固相颗粒由于离心力作用而沉降到旋风器壁面所需要的时间, 与气流在气固两相分离区域所停留的时间相等来确定能完全分离的固相颗粒直径 d_{c100} 。该理论实质是一种无混合(柱塞流)模型, 以 Rosin、Rammner 和 Intelmann^[1]等的研究为代表。

(2) 平衡分离理论: 是根据在旋转流作用下, 固相颗粒所受的离心力与气流作用于颗粒上的流体阻力相平衡的分离理论, 确定固相颗粒分割粒径 d_{c50} 。假想圆锥、圆柱学说均属于这一理论, 以 Lapple 及 Shepherd^[2]、Stairmand^[3]、Barth^[4]以及 Muschelknautz^[5]等的研究为代表。

(3) 边界层分离理论: 认为在旋风器任一截面上, 固相颗粒的浓度分布是均匀的, 但在近壁面处的边界层内是层流流动, 只要颗粒进入边界层即视为被捕集, 以 D. Leith 和 W. Licht^[6]等的研究为代表。

2 分离模型的研究

2.1 国外研究进展

国外关于旋风器分离模型的研究始于 20 世纪 60 年代, 并分别基于上述分离理论从不同的角度采用不同的方法进行研究, 较为全面、系统和详细。代表性的研究有:

收稿日期: 2003-02-16, 修回日期: 2003-04-23

第一作者简介: 赵兵涛(1976-), 男, 博士研究生。

综述

白井^[5]于1969年假设旋风器内气固两相的分离过程是一次分离、二次分离及过渡区域内分离过程的综合值,进而给出了效率分离模型的综合表达式。

Spruill^[7]于1970年采用与电除尘器相类似的方法,给出了旋风器效率的分离模型计算公式,该式的表达形式与Deutsch公式一致。

D. Leith 和 W. Licht^[6]于1972年考虑湍流扩散对固相颗粒分离的影响,基于边界层分析理论,把气流中悬浮颗粒的横向混合理论与旋风器内气流的平均停留时间相结合,从理论上严格推导出了分级效率模型,该模型把旋风器的分级效率表示为由旋风器结构参数确定的无因次特性系数 C 、由运行参数确定的修正惯性系数 Ψ 以及切向速度分布指数 n 的函数。

水田和木村典夫^[5]于1974年结合实验数据,给出了旋风器分级效率的计算式,该式把分级效率表示为固相颗粒粒径与分割粒径 d_{c50} 的指数函数形式。

Dietz^[8]于1981年基于ter Linden的实验结果,将旋风器内的气固两相分离区域划分为3个区域即:入口分离区域、下降流分离区域和上升流分离区域,并根据D. Leith 和 W. Licht的横向混合模型的思想,推导出了旋风器内气固两相分离模型。在筒径为200 mm的旋风器上,采用燃煤飞灰作为固相颗粒进行分离实验时,模型的预测结果与实测结果比较吻合。

Mothes 和 Löffler^[9,10]于1988年将Dietz三分离区域的假设扩展为四分离区域,即在原有基础上增加了排气芯管分离区域,从而修正了Dietz模型对于分离过程预测的不连续性,引入粒子沉降系数修正了旋风器内、外涡固相的浓度扩散效应,并考虑了排尘口底部的返混现象和浓度的径向梯度变化,提出了另一分离模型,模型的假设条件比较接近旋风器内实际的分离状况且考虑较为全面。在筒径为190 mm的旋风器上,该模型的预测结果与实测结果相吻合。

Clift^[11]等于1991年根据已有的实验数据比较了以上3种旋风器内气固两相分离模型。结果表明,D. Leith 和 W. Licht模型在计算气流在旋风器内的平均停留时上有一定的局限性,并在其假设条件下重新推导了D. Leith 和 W. Licht模型,计算结果表明分级效率图为S形曲线;Dietz模型亦存在同样的问题,但在小直径旋风器的固相颗粒物分级效率预测上,Dietz模型仍具有一定的准确性;而Mothes 和 Löffler模型总体上优于其它两个模型。

Li. E 和 Y. Wang^[12]于1989年假设在外涡内固相颗粒的沉降可被忽略,且壁面上固相颗粒的浓度梯度

为0,仅存在有限的湍流扩散,并考虑了固相颗粒的径向浓度分布并在不同的分离区域做出不同的假设,推导了新的分离模型,尽管该模型在理论上与Dirgo 和 Leith^[13]于1985年的实验数据较为吻合,但其边界条件的假定在一定程度上仍值得商榷。

R. L. Salcedo^[14]1993年从理论上分析了L-L模型、Dietz模型、M-L模型和L-W模型4种旋风器气固分离模型的优缺点,并在筒径为305 mm的旋风器上实验加以比较验证,结果表明,Mothes 和 Löffler模型在理论考虑的相对完备性和估算结果的准确性使它的描述与旋风器内部的气固两相流动较为接近并优于其它几种模型。

Zhao Zhong-ming 和 R. Pfeffer^[15]于1997年以D. Leith 和 W. Licht分离模型为基础,按照旋风器分离模型与重力沉降室的横向混合分离模型表达形式的相似性,将L-L模型中的参数 Ψ 运用固相颗粒服从对数正态分布的规律进行积分简化,推导出了以 Ψ_{50} 为参数的旋风器总分离效率简化模型,与经典研究结果的对比表明,结果比较一致,但该模型仅能在一定程度上反映旋风器的总体分离能力。

W. S. Kim 和 J. W. Lee^[16]于1989年同时考虑湍流扩散和边界层固相颗粒的沉降作用,将旋风器内部分为两个主要的分离区域即湍流核心区 and 近壁边界层区,根据Mothes 和 Löffler 以及 Enliang 和 Yingmin 分离模型,推导出了基于边界层特性的旋风器气固两相分离模型,并于2001年在此基础上进行了改进^[17]。与实验对比的结果表明该模型的实用性较好。但其边界层条件的简化仍需进一步探讨。

2.2 国内研究进展

国内关于旋风器分离模型的研究较晚,大都始于20世纪90年代,并有相当一部分借鉴了国外旋风器分离模型的研究思想,代表性的研究有:

向晓东^[18]于1990年考虑固相颗粒在旋风除尘器内的输运过程,引入了分离空间的概念。通过建立气体流动和颗粒运动的数学模型,得出在适当边界条件下的旋风器分离效率计算公式,并与国内外典型的实验结果比较验证,结果较为一致。

张吉光等^[19]于1991年根据旋风器内气流的轴向速度分布规律确定尘粒在旋风器内的平均停留时间,分析了旋风器内气体的三维速度分布规律对固相颗粒分离的影响及旋风器各主要结构参数和运行参数的影响,并考虑筒体与锥体边界层内颗粒的分离效应,建立了旋风器分级效率的数学模型,通过实验表明,该模型

估算旋风器的分离性能计算值与实测值符合较好。

陈建义、时铭显^[20]于1993年认为Leith和W. Licht以及Mothes和Löffler模型对于尺寸较大、流量也较大的旋风器计算结果误差较大,并在PV型高效旋风分离器旋风器内部流场及浓度场测定的基础上,考虑了旋风器的短路流、颗粒间的相互碰撞、返混等对分离性能的影响,建立了旋风器分级效率的多区计算模型,该模型在PV型旋风器上与实测结果较为一致,但在其他类型旋风器上的适用性仍需进一步探讨。

张从智等^[21]于1996年在边界层分离理论的基础上,考虑了旋风器内部主要结构参数以及固相颗粒的特性和运行参数的影响,以及旋风器内的三维速度(尤其是轴向速度和径向速度)分布规律,建立了旋风器分级效率的数学模型。该模型计算结果与在长锥型和直锥型旋风器的实验结果符合较好,而且与D型、B型旋风器的实验结果也符合较好。

杨兴森等^[22]于1997年根据Dietz的假设条件,在实验研究的基础上,建立了火力发电厂制粉系统中细粉分离器分离效率的理论模型,并以不同工况下的分离效率进行了比较。该模型基本承袭了Dietz模型的思想。

沈恒根等^[23]于1998年应用平衡尘粒模型分析给出了旋风器分割粒径 d_{c50} ,并对木村典夫模型为基础,给出了旋风器分级效率的计算方法,对反应分级效率分布的参数切割粒径 d_{c50} 和切向速度分布指数 n 进行了讨论,并以筒径为203 mm的Stairmand旋风器为例,与D. Leith和W. Licht、向晓东、张吉光和张从智的分离效率模型进行了对比,结果表明该模型更接近于实测值。

刁永发等^[24]于2000年以平衡尘粒模型以及相似理论原理分析为基础,根据木村典夫分离模型,给出了该分离器高温旋风分离的分级效率的计算方法,对反映其在高温状态下分离特性的参数分割粒径 d_{c50} 和分布指数 n 进行了分析,并以Stairmand高效旋风器试验对照。

王政和周学林^[25]针对环流式旋风器的特点,推导出了其内筒分级效率的数学模型,并与L-L横混模型相结合,把环流式旋风除尘器看作部分环流的两个常规旋风除尘器的串联,进行其分离效率的研究。分析比较结果表明,该数学模型基本反映了环流式旋风器内固相颗粒的流动、分布以及分离的实际情况,但模型仅局限于环流式旋风器的预测。

王广军、陈红^[26]于2001年考虑了径向浓度梯度

以及重力沉降和径向加速过程对固相颗粒分离的影响,建立了锅炉细粉分离器分离效率的计算模型。该模型认为,当分离器进口风速较低及固相颗粒粒径较大时,重力沉降及径向加速过程对分离效果的影响不容忽视,并对已有的分离模型中有关简化条件的适用范围进行了分析。

3 结 论

综上所述,各研究者基于不同理论,运用不同方法,从不同角度阐述了各自理论,或者在前人的研究上进行改进,使模型更趋于合理化。尽管各模型在描述旋风器内气固分离状况都有一定的准确性,但与实际分离过程相比,仍存在一定的局限性,具体表现在各种影响因素的全面性和定量性仍需进一步的研究,主要包括:

(1) 固相颗粒物浓度即粉尘负荷的影响:各分离模型都基本未考虑在变粉尘负荷状况下分离效率的定量变化规律。例如,粉尘负荷在一定范围内的增加,可使旋风器分离效率有所增加。

(2) 固相颗粒物间的相互作用:固相颗粒在旋转变流中会因凝并、粉碎等相互作用的影响而改变分离效率,这一点许多分离模型都进行了简化。

(3) 实际分离过程是由于诸多影响因素共同作用的综合结果。分离模型在建模时应考虑各因素综合作用后的定量影响。

(4) 由于旋风器内部是复杂的气固两相流动,因此,分离模型的发展必将随着湍流气固两相流动模型的发展而发展,模型的复杂程度及计算量也势必会增加,但现代计算技术及工具的发展将降低它的解决难度。

参考文献:

- [1] Rosin P, Rammler E, Intelmann W. Grundlagen und grenzen der zyklonentstaubung[J]. Z Ver Dtsch Ing, 1932, 76(16): 433—438.
- [2] Lapple C E. Gravity and centrifugal separation[J]. Ind Hyg Q, 1950, (1): 40—45.
- [3] Stairmand C J. The design and performance of cyclone separators[J]. Trans Inst Chem Eng, 1951, 29: 356—383.
- [4] Barth W. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations[J]. Brennst Waerme Kreft, 1956, 8: 1—9.
- [5] [日]井伊谷刚一. 马文彦译. 除尘装置的性能[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
- [6] Leith D, Licht W. The collection efficiency of cyclone type parti-

综述

- cle collectors a new theoretical approach[J]. AICHE Symp Ser, 1972, 126: 196-206.
- [7] Sproull W T. Air Pollution and Its Control[M]. New York: Exposition Press, 1970.
- [8] Dietz P W. Collection efficiency of cyclone separator[J]. AICHE J, 1981, 27: 888-892.
- [9] Mothes H, Löffler F. Investigation of cyclone grade efficiency using a light scattering particle size measuring technique[J]. J Aerosol Sci, 1982, 13: 184-185.
- [10] Mothes H, Löffler F. Prediction of particle removal in cyclone separators[J]. Int Chem Eng, 1988, 28: 231-240.
- [11] Clift R, Ghadiri M A, Hoffman C. A critique of two models for cyclone performance[J]. AICHE J, 1991, 37: 285-289.
- [12] Li E, Wang Y. A new collection theory of cyclone separators[J]. AICHE J, 1989, 35: 666-669.
- [13] Dirgo J, Leith D. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental result with theoretical prediction[J]. Aero Sci Technol, 1985, 4: 401-415.
- [14] Salcedo R L. Collection efficiency and particle size distribution from sampling cyclones — comparison of recent theories with experimental data[J]. Can J Chem Eng, 1993, 71: 20-25.
- [15] Zhao Zhongming, Robert Pfeffer. A simplified model to predict the total efficiency of gravity settlers and cyclones[J]. Power Technol, 1997, 90: 273-280.
- [16] Kim W S, Lee J W. Collection efficiency model based on boundary layer characteristics for cyclones [J]. AICHE J, 1997, 43(10): 2446-2455.
- [17] Kim C H, Lee J W. A new efficiency model for small cyclones considering the boundary layer effect[J]. J Aerosol Sci, 2001, 32: 251-269.
- [18] 向晓东. 计算旋风器分离效率的一种新方法[J]. 通风除尘, 1990, (2): 1-7, 47.
- [19] 张吉光, 叶 龙. 高效旋风器分级效率理论计算的新方法[J]. 青岛建筑工程学院学报, 1991, 12(4): 41-48.
- [20] 陈建义, 时铭显. 旋风分离器分级效率的多区计算模型[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(2): 54-58.
- [21] 张从智, 叶 龙, 沈恒根, 等. 高效旋风分离器分级效率理论计算的新方[J]. 通风除尘, 1996, (2): 14-19.
- [22] 杨兴森, 刘福国, 尹 静, 等. 火力发电厂细粉分离器分离效率的理论模型[J]. 电站辅机, 1997, (3): 29-31.
- [23] 沈恒根, 刁永发, 许晋源. 平衡尘粒模型用于旋风分离器分级效率的计算[J]. 环境工程, 1998, 16(6): 29-31.
- [24] 刁永发, 沈恒根, 许晋源, 等. 高温旋风分离分级效率的理论计算及其分析[J]. 化工机械, 2000, 27(1): 16-19.
- [25] 王 政, 周学林. 环流式旋风除尘器分离效率数学模型的研究[J]. 青岛化工学院学报(自然科学版), 2000, 21(1): 78-80.
- [26] 王广军, 陈 红. 电厂锅炉细粉分离器性能分析数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 53-57.

信息之窗

美立法促进纳米技术研 究开发

美国国会众议院日前通过法案, 提出在今后 3 年政府将投资约 24 亿美元, 以促进纳米技术的研究开发。

来自美国国会的消息说,《2003 纳米技术研究开发法案》于日前以绝对多数在众议院获得通过。该法案就如何推进美国国家级的纳米技术研究开发计划出台了一些新措施, 其中包括: 建立一个跨部门委员会, 以协调美国各政府机构的纳米技术究开发活动, 该委员会必须每年向国会提交报告; 设立由总统任命的顾问委员会, 每半年就美政府机构纳米技术究开发活动提交评估报告; 设立由全职雇员组成的国家纳米技术协调办公室, 为跨部门委员会和顾问委员会提供服务。另外, 法案还规定要制订出有关计划, 研究与纳米技术相关的社会经济和伦理问题。

法案同时提出, 未来 3 年中, 美全国科学基金会、能源部、宇航局、国家标准与技术研究所和环保局的纳米技术研究开发项目总预算, 将分别为 7.13 亿、7.845 亿和 8.64 亿美元, 保持逐年稳步递增之势。

据美全国科学基金会的预测, 未来 10 年, 全球纳米技术市场规模将达到 1 万亿美元左右。

国家超微粉碎示范工程在昆山建成

国家超微粉碎示范工程近日在江苏昆山密友实业有限公司落成投产。该工程竣工投产将密友的产量和销量增加 3 倍以上。

超微粉碎是近年来世界材料加工工业的一项新技术, 广泛应用于化工、冶金、制药、矿产等领域。我国超微粉碎研究起步较晚, 原国家于 2002 年立项在昆山密友建成现代中药超微粉碎成套装备示范工程, 欲以此为突破口, 建设我国高水平的超微粉碎产业基地。随后, 密友投资 1 亿元在昆山民营科技工业园建设新厂房, 从美国、英国、日本进口先进仪器设备。该企业与国内知名科研院所合作, 实施技术创新, 开发出填补国内外空白的超低温超微气流粉碎工艺技术, 为化工、生物等领域特殊材料的超微粉碎开辟了新的途径。