

旋风分离器两相流研究综述

刘子红, 肖波, 杨家宽

(华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:综述了旋风分离器内部流场、颗粒运动和数值计算模型的理论研究发展历程。

关键词:流场; 旋风分离器; 平衡尘粒模型; 两相流

中图分类号: TQ172.6⁺88.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-5548(2003)03-0041-04

Review on Study of Inner Gas-solid Two-phase Flow Field and Numerical Calculation Model of Cyclone Separator

LIU Zi-hong, XIAO Bo, YANG Jia-kuan

(School of Environment Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The development course of the theoretical research of the inner flow field, the particle motion and the numerical calculation model of the cyclone separator are reviewed and summarized.

Key words: flow field; cyclone separator; equilibrium model of dust particle; two-phase flow

旋风分离器具有结构简单、设备紧凑、造价低、维修方便等优点, 适于高温、高压和腐蚀性环境, 被普遍应用于化学、炼油、冶金、煤碳、电力等工业部门。随着科学技术的发展, 人们对旋风分离器的研究也越来越深入, 其理论也越来越完善, 目前普遍认为, 旋风分离器内部的气固两相流动特别是它们的相对运动是决定旋风分离器分离效率的关键因素。因而, 研究和掌握旋风分离器内部的两相流动状况具有重要的意义。本文对旋风分离器的理论研究历程进行归纳总结, 以方便相关领域的科研工作者。

1 旋风分离器内部流场的研究^[1,2]

自 1886 年 Morse 的第一台圆锥形旋风分离器

问世以来的百余年里, 国内外众多学者和科研人员对分离器的结构、尺寸、流场特性等进行了大量的研究。

旋风分离器是利用离心力从气体中除去粒子的设备, 其气流型式很复杂。因为旋风分离器把尘粒从气体中分离出去是依靠气体的旋转, 所以, 要研究分离器的结构和尺寸对其性能的影响, 要计算旋风分离器的效率和阻力, 要正确地设计旋风分离器, 就必须知道除尘器内气流形式的实际状况。

范登格南于 1929~1939 年期间对旋风分离器的气流型式进行了广泛研究。他发现在旋风分离器中存在双涡流。其一围绕排气管, 另一则从排气管底部一直延伸到圆锥下端。其后, 西菲尔德和拉普尔于 1939 年报告了对旋风分离器中气流型式的研究结果。

1951 年, 西菲尔德和拉普尔的实验结果有一些被斯泰尔曼发表的报告证实, 但还有一些和他的发现不一致。斯泰尔曼发现, 在分离器内, 外围气体切向速度的平方和半径成反比, 这和西菲尔德等发表的数值相同。但斯泰尔曼报告, 在大约相当于排气管直径一半的范围内存在着气体以恒定角速度旋转的中央核心。这和西菲尔德等以排气管直径为内外螺旋流界限是不一致的。杰克逊根据他们的实验结果作出了关于气流型式的一些较有新意的推断。

1953 年, 特林丹在论文中以他测出径向和轴向分速度为依据, 画出了旋风分离器内的流线。弗斯特在他的实验中发现, 离开分离器出口至少相当于连接管道直径 27 倍的地方还存在着旋流。随后, 波格丹诺夫发表了对靠近圆筒壁气流型式的一些看法, 他认为: 旋转气流中的分子受到离心力的作用, 构成压力梯度, 从轴向壁压力逐渐增加。在壁上的分子处在停滞层中, 不再受离心力影响, 势必要对压力梯度起反应。这样, 在圆筒形旋风分离器中, 边界层的气流就会经过端头表面向内移动。因此, 必然产生某种沿圆筒壁向端头表面的流动。在通常的圆锥形旋风分离器中, 则将有沿着壁向顶板和圆锥顶

收稿日期: 2002-12-31 修回日期: 2003-04-14

第一作者简介: 刘子红(1975-), 男, 硕士研究生。

点两方向的流动。这种流动循着范登格南所指出的方向,但只限于边界层,而不是像他的双涡流型式那样扩展到气流的主体中。

70年代,中科院力学研究所、上海化工研究院在 $\Phi 400\text{ mm}$ 及 $\Phi 800\text{ mm}$ 旋风分离器模型上,用五孔球形探针及热线风速仪对进行了测试。80年代,许宏庆在 $\Phi 288\text{ mm}$ 模型上,用双色激光多普勒测速仪进行了测试。这些流场测试图呈现出的规律大致与特林丹所得结果相同,但他们都认为非对称的切向进口造成了涡流中心与几何中心不一致,径向速度分布呈现非轴对称性等现象,同时还证实了上涡流的存在^[3,4]。

90年代末期,上海理工大学动力工程学院也在这方面作了一些研究,他们认为在分离器中心处存在滞流和回流现象^[5]。

2000~2001年,浙江大学热能工程研究所和华中科技大学煤燃烧国家重点实验室应用三维颗粒动态分析仪(3D PDA)对方形下排气分离器内的气固两相流场进行了测试,得到了几种工况条件下的流场矢量分布。研究发现分离器方腔内的流场偏离其几何中心,并呈中间为强旋流动和边壁附近为弱旋的准自由涡区的特点,且在边角处存在局部小旋涡^[6]。

另外,我国许多科研院所和高等院校对此也做了许多工作,如清华大学、西安交通大学、西安建筑科技大学、石油大学、华北工学院等^[7]。

2 湍流计算模型的研究及当前几种常用计算模型^[8,9,10]

1962年,勒沃伦把不可压缩流体的连续性方程和Navierstokes方程在圆柱坐标系和轴对称定常流动情况下进行了简化,通过引入流函数和环量,得到了强旋转简化层流模型。中科院力学所贾复等人曾利用此模型对旋风分离器内流场进行了解析计算,由于模型过于简化,仅能作一些定性的说明。

1975年,布洛尔、因格罕运用普朗特提出的混合场理论确定湍流表观粘度,并对水力旋流器流场进行了分析,建立了适合于工程应用的初级湍流模型。

1982年,波夷萨等人利用若迪推得的关于雷诺应力的近似代数关系式,得到了高级湍流模型,用这些模型计算得到的切向速度数值解与实验测定结果吻合得较好。

1997年,S. M. Fraser, A. M. Aabdel Raxek 和 M.

Z. Abdullah 等人用修正过的 $\kappa-\epsilon$ 模型对分离器内的速度矢量分布作了研究,所得结果与实际测量结果基本吻合^[11]。

在工程界,有以下几种湍流计算模型较为常用^[8]:

(1) $\kappa-\epsilon$ 模型:用途较为广泛。然而由于采用了同向性湍流输运的假设,故它不适应于具有非同向性湍流输运的强旋流分离器流场。在分离器流场中,因切向速度分量远大于径向和轴向速度分量,因而常常采用完全雷诺应力模型(RSM)或者代数应力模型(ASM)或RNG模型来代替 $\kappa-\epsilon$ 模型。

(2)ASM模型:假设雷诺应力的传输与湍流应力的传输成正比,把单个独立的应力方程数减少成各计算单元的代数关系式。在柱坐标系中,由于实施ASM公式的假设存在着概念上的困难,因此波夷萨等人从输运方程中求解出2个雷诺应力,而从代数关系式中求解出其他应力。当然,这是他们使用该模型较早期的成果。

(3)RSM模型:它可计算各独立的雷诺应力分量,因而更加适用于强旋流旋风分离器流场计算。它对湍流进行较为完整的描述,也考虑了非同向性湍流输运的特性,效果也比较好。不过它有6个方程要求解,与其它模型相比太复杂。

(4)RNG模型:和 $\kappa-\epsilon$ 模型一样,也是二方程湍流模型,它是从原始的基本方程推导而来。其中,使用了Kolmogorov数学技巧。Kolmogorov定律: $E(\kappa) = \kappa^{-5/3}$ 。RNG模型是一个更一般、更基本的模型,尤其对强旋流流场及高曲率流线的旋风分离器有着很好的改进效果。

3 分离器内颗粒运动的研究

旋风分离器内颗粒流体的流动属于稀浓度颗粒流体力学,应该在分析了纯气体流场并建立起数学模型后的基础上对其展开研究。并且研究颗粒运动和研究气体流动不一样,因为研究气体流动时可以完全不考虑颗粒的存在,而研究颗粒运动时却不得不考虑气体流动对它的影响。

关于旋风分离器内的灰尘流动型式,范登格南也曾加以研究,提出了分离器顶板下的灰环问题。特林丹曾经从玻璃模型中观察到,虽然在旋风分离器进气管横截面上均匀地分布着灰尘,但当进入分离器后灰尘却立即形成比较狭窄的带状盘旋下降,此外,他还确定了分离器内不同点的分离效率。他还在实验中发现分离器中央仍有高的分离效

率。关于粉尘对气体流动的影响和其使含尘气流压降、粉尘之间的碰撞以及团聚对分离效率的影响等, Mothes 和他的同伴做了较全面的研究^[1]。另外, 在排气管下口附近, 有很大的向心径向速度, 这种径向速度会将大量颗粒带入排气管, 这样在排气管下口附近形成了短路流, 从而大大影响分离效率; 普通旋风除尘器的下旋气流与净化后的上旋气流容易混合, 虽然除尘器锥体下部直径减小可使离心力增加以强化分离, 但另一方面也使混合现象加剧, 使净化后的上旋气流重新被污染, 这种现象叫做偏心流现象^[12]。

1992 年, 哥罗宁根大学的 A. C. Hoffmann、A. van Santen 和 R. W. K. Allen 等人对粉尘浓度、压力降与分离效率之间的关系进行了研究, 认为: 当粉尘浓度增加时, 压力降和分离效率都将增加; 压力降、分离效率和粉尘浓度之间的相互影响变化与 Smolik 和 Zenz 根据他们丰富的工作经验所得出的结论完全一致^[13]。西班牙的 M. Comas 等人通过研究发现: 对于较大的颗粒, 分离效率不受入口环流影响; 而对于直径较小的颗粒, 入口环流则对其有轻微的负面影响。

我国研究人员张学旭通过研究认为: 旋风筒内颗粒所受的阻力不仅仅有粘性力的影响, 也有粘性力和体形力共同作用的情况。也就是说, 并不是所有的旋风分离器内固体颗粒的运动都处于层流区内, 也有处于过渡区的情况^[14]; 我国张民权利用 Dietz 提出的模型分别进行了理论计算和实验验证^[15]。

在气固两相流中, 气体总是对固体颗粒施加一作用力, 当颗粒速度大于气体速度时, 气体的作用力为阻力; 当颗粒速度小于气体速度时, 气体的作用力为推动力, 又称为曳力。在旋风分离器内固体颗粒沿径向向器壁沉降, 而径向气流的方向是指向旋风筒的中心, 因此, 旋风分离器内, 固体颗粒在径向上受到气体的作用力是阻力。其阻力的大小与性质取决于下列因素^[16]:

- (1) 固体颗粒的大小与形状;
- (2) 气体的粘度与密度;
- (3) 固体颗粒与气体间的相对运动速度。

这一段的论证也说明: 研究颗粒的运动与研究气象流动紧密相关。

西安交通大学能源动力学院的沈恒根在分析气尘分离模型时, 作了如下一些假设^[17]:

- (1) 不考虑边界层作用和影响;

- (2) 忽略边壁作用, 尘粒到达外边壁就被捕集;
- (3) 进入旋风除尘器前, 尘粒浓度分布均匀;
- (4) 不考虑重力作用。

在这些假设的基础上, 他提出了平衡尘粒模型的观点: 运用涡汇升降流三维气流场分析尘粒运动, 提出平衡尘粒分布; 给出了平衡尘粒计算公式, 可以定量反映出分离器空间点的分离能力; 旋风分离器中平衡尘粒主要分布在轴向气流分速度为零的升降流交界面上, 随着远离芯管排气口截面, 平衡粒径逐渐减小。这种模型简单有效, 包含了主要的运行参数和结构参数^[20]。

我国清华大学的王连泽、彦启森均认为: 旋风除尘器内的流动主要受切向速度支配, 旋风除尘器的性能, 也主要与切向速度相关。并且他们应用粘性流体力学理论, 推导出了旋风除尘器内切向速度的计算公式, 该公式的计算结果能与实验结果很好吻合; 同时他们基于绕流理论, 推导出安装减阻杆后的切向速度计算公式, 该式计算结果能与实验结果较好吻合^[19]。

4 总 结

本文在查阅了大量资料后, 对旋风分离器的计算机仿真所必需的理论进行了归纳整理, 基本上将两相流动理论和数值计算模型包含在其中。

随着旋风分离器理论研究的不断深入、计算机技术的不断发展和各种数学模型理论的不完善, 利用在数学模型基础上开发出的仿真软件代替具体的试验环境进行旋风分离器的研究与设计不仅可以节省大量的人力、物力和资金, 而且可以更快地得到结果, 并且所得结果也更合理、更全面、更有效。目前已有许多单位和科研院所将计算机仿真技术引入了旋风分离器的研究与设计, 这将为广大科研工作者带来了极大的方便^[20]。

参考文献:

- [1] 嵇敬文. 除尘器[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [2] 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1985.
- [3] 刘金红. 旋风分离器的发展与理论研究现状[M]. 化工装备技术, 1998, 19(5): 49—50.
- [4] Raser S M, Abdullah M Z. LDA measurement on modified cyclone [J]. Laser Anemometry ASME, 1995, 229: 395—403.
- [5] 娄新生. 旋转分离器的实验研究及其 CAD[D]. 硕士学位论文. 华中科技大学动力系, 1993.
- [6] 苏亚欣, 周劲松, 骆仲决, 等. 方形旋风分离器内部两相流场的 PDA 实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 42—49.

- [7] 王连泽. 旋风除尘器下降流量的研究[J]. 暖通空调, 1999, 29(5): 74—75.
- [8] 彭维明. 切向旋风分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 20—24.
- [9] Boysan F, Swithenbank J, Ayers W H. Mathematical Modelling of Gas—particle Flows in Cyclone Separators. Encyclopedia of Fluid Mechanics[M]. Houston: Gulf Publ. Co., Book Division, 1986.
- [10] Pericleous K A. Mathematical simulation of hydrocyclone[J]. Math Modelling, 1987, 11(E8): 242—255.
- [11] Fraser S M, Abdel Raxek A M, Abdullah M Z. Computational and experimental investigations in a cyclone dust separator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1997, 211(E4): 247—257.
- [12] 张艳辉, 刘有智, 霍红, 等. 旋风除尘器的研究进展[J]. 华北工学院学报, 1998, 19(4): 324—328.
- [13] Hoffmann C, van Santen A, Allen R W K. Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones[J]. Powder Technology, 1992, 70(1): 83—91.
- [14] Comas J, Chetrit C. Cyclone pressure drop and efficiency with and without an inlet vane[J]. Powder Technology, 1991, 66(2): 143—148.
- [15] 张学旭. 旋风分离器的模型试验方法[J]. 中国粉体技术, 2000, 6(3): 12—14.
- [16] 张学旭. 旋风分离器内颗粒运动阻力的特性[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(4): 8—10.
- [17] 沈恒根, 张玮. 旋风分离器进口回转通道气尘分离模型[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(1): 44—46.
- [18] 沈恒根, 叶龙, 许晋源, 等. 旋风分离器平衡尘粒模型[J]. 动力工程, 1996, 16(1): 33—36.
- [19] 王连泽, 彦启森. 旋风除尘器内切向速度的理论计算[J]. 暖通空调, 1998, 28(3): 70—72.
- [20] 林玮, 王乃宁. 旋风分离器内三维两相流场的数值模拟[J]. 动力工程, 1999, 19(2): 72—80.

信息之窗

第九届全国粉体工程学术会暨相关设备、产品交流会通知(第二轮)

全国粉体工程学术会已开过8届了,在社会各界的支持、关心和帮助下取得了很大的成绩,产生了很大的影响,为我国粉体工程技术的发展起到了积极的作用。为了进一步推动我国粉体工程技术的发展,促进相关领域的交流与合作,有关单位经协商决定,2003年9月1~3日,在辽宁省沈阳市召开第九届全国粉体工程学术会暨相关设备、产品交流会。

征文主要内容和征文范围

①粉体制备的基础理论,粉体制备的机械设备,粉体测试及仪器。②矿物功能材料的制备与处理技术。③非金属矿深加工技术及应用研究。④非金属矿填料在塑料、橡胶、涂料、油漆、造纸、陶瓷、阻燃剂、耐火材料及环境工程中的应用。⑤纳米矿物材料的物理、化学性质及制备技术研究。⑥纳米金属材料的制备技术。⑦粉体检测及制备过程中的控制技术。⑧粉体技术在医药、环境、能源、生物、食品及农业等方面的应用研究。⑨宝石的开发与应用研究。⑩粉体制备技术、设备及产品交流。

会议还将邀请:中国科学院院士叶大年研究员、国家纳米材料科学专家组首席科学家张立德研究员、国家级有突出贡献科技专家刘英俊教授级高工、中国矿业大学郑水林教授、清华大学盖国胜教授、东北大学韩跃新教授、辽宁省宝玉石协会会长刘永春教授及中国非金属矿工业协会碳酸钙专业委员会副理事长刘伯元教授级高工等到会做专题报告;还将有20多篇论文在大会上交流;拟就大家关心的问题专题讨论和专家咨询;提供小型交流展示平台及信息发布。

会议时间、地点及费用

- (1)时间:2003年8月31日~9月3日 会期3天
(2)地址:沈阳市,具体宾馆将在第三轮通知中告知。
(3)费用:会务费800元/每人,宿费自理。

联系单位:东北大学矿物材料与粉体技术研究中心 **联系人:**苗春省、印万忠、韩跃新

通讯地址:沈阳市东北大学139信箱 **邮编:**110004

电话:(024)83680162 **传真:**(024)83680162 **E-mail:**dongdafulong@163.com