

沸腾床干燥设备的结构研发与展望

刘巍, 李枫, 杨松祥, 王守芳

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对工业上应用广泛的沸腾床干燥器, 在简要阐述其操作机理与生产特性的基础上, 综述了其工艺与结构改型及零部件结构优化方面的最新进展, 其中重点介绍了新兴的惰性粒子沸腾床干燥设备及新型气体布风板的研发成果. 此外, 分析并指明了当前该类研究中的主要瓶颈与不足, 且结合文献调研, 初步明确了下一步的研发重点.

[关键词] 沸腾床干燥器, 结构改进, 研发展望

[中图分类号] TQ 051.13 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)04-0044-05

Structure Development and Its Prospect of Fluidized Bed Dryer

Liu Wei, Li Feng, Yang Songxiang, Wang Shoufang

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract Aiming at fluidized bed dryer, one of the widely applied industry equipments, the operational mechanism and production characters were elucidated in brief. And then, the latest developments of the craft and structure modification and the structure optimization about the equipment parts were summarized, in which the research achievements concerning the newly emerging inert-particle fluidized bed dryer and its novel gas distributors were emphatically introduced. Based on it, the main bottlenecks and deficiencies existing in the current works were analyzed and pointed out to help the further similar researches. Moreover, the clear direction of further development was also put forward preliminarily after much investigation.

Key words fluidized bed dryer, structure modification, development prospect

干燥作为一种历史悠久的生产操作技术, 是指通过气化而除去湿物料中湿分的化工分离过程. 在现代工业中, 干燥技术仍有着十分广泛的应用, 诸多的工业产品都是经干燥分离而制得. 工业上, 干燥操作不仅影响着产品的生产效率与操作能耗, 且通常作为产品加工的最后道工序, 对产品的最终质量起着重要的保证作用.

近些年来, 随着世界人口的大幅增加、能源的日益紧张以及对环保型生产技术的强烈追求, 人们对于干燥技术也提出了更高的期望或要求, 即不再单纯满足于干燥产品的低含水量指标, 同时对干燥操作的热效率、生产强度、生产周期及环境污染等均也制定了相应的指标要求, 故而有效促进了大量新型干燥工艺、设备得以快速地研发与推广. 目前, 国内外已实现工业化生产的干燥技术主要有: 喷雾干燥, 气流干燥, 沸腾床干燥, 回转圆筒干燥, 旋流闪蒸干燥, 圆盘干燥, 带式干燥, 双锥回转真空干燥, 桨叶式干燥, 微波真空干燥和冷冻干燥等^[1, 2]. 其中, 沸腾床干燥作为工程优势最为显著的高效干燥技术之一, 在工业上的应用正日趋广泛^[3-6], 已逐渐成为诸多产品生产的主要干燥方法.

1 沸腾床干燥器的操作机理与特性

沸腾床干燥, 又称流化床干燥, 是一种典型的流态化操作过程, 属流态化技术范畴. 流态化技术是指利用流动流体的作用, 促使大量固体颗粒悬浮于流体介质中, 从而使得固体颗粒呈现出类似于流体的某些表现特性的过程操作. 流态化技术自 1921 年发明以来, 干燥是应用最早的领域之一, 世界上第一套工业化的流化床干燥装置于 1948 年在美国出现, 设计用于白云石的干燥处理^[7, 8]. 此后, 针对该种类型的生产操

收稿日期: 2009-09-19

通讯联系人: 刘巍, 博士, 副教授, 研究方向: 干燥技术及其设备制造. E-mail: zydhd@sohu.com

作, 各国学者相继开展了大量的实验与理论研究, 我国学者也于 20 世纪 60 年代开始了相关的研发工作, 当时的华东化工学院、浙江大学、成都工学院等科研单位在流化操作、流化机理及理论计算等方面均进行了不同深度地探索, 并形成和积累了大量珍贵的文献资料, 从而为国内后期的沸腾床干燥研究奠定了良好基础^[1]。

图 1 示意了典型的沸腾床干燥器的操作流程^[9]。操作时, 粒状湿物料由床侧加料器加入, 与通过气体布风板的热气流充分接触。只要气流速率保持在颗粒的临界流化速率与带出速率之间, 颗粒便能在床内形成沸腾状的翻动, 彼此碰撞与混合, 并与热气流间进行充分的热质传递, 从而达到物料干燥的目的。干燥后的物料由床侧出料管卸出, 气流则由顶部经旋风分离器和袋滤器回收细粉后排出。

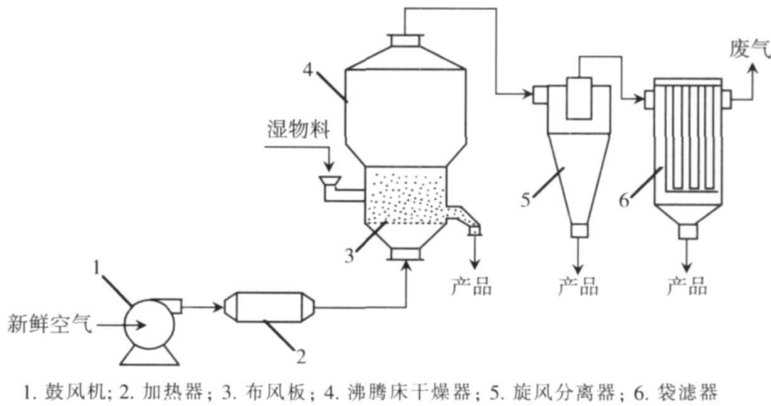


图 1 沸腾床干燥器的操作流程示意^[9]

Fig.1 Schematic diagram of operational flow for fluidized bed dryer^[9]

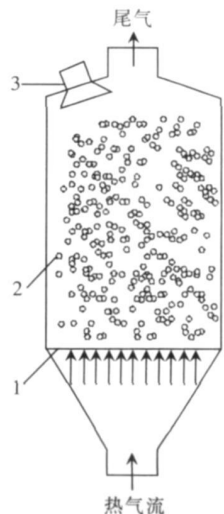
在沸腾床干燥过程中, 由于待干燥物料被悬浮于介质气流之中, 故物料与气流间可保持充分的接触, 两者的相际接触面积甚大, 故干燥的热容系数较高。又由于物料在流化过程中呈沸腾状翻滚, 即物料自身的运动十分剧烈, 传热的气膜阻力也较小, 故流化干燥的热效率也较高。与其他类型的干燥装置相比, 沸腾床干燥器的密封性能通常也十分优异, 其传动机械一般并不与物料直接接触, 故杂质不易掺入和污染被处理的物料, 这一特性对于纯度要求较高的制药生产尤为实用。此外, 沸腾床干燥还普遍具有操作温度低、设备结构简单、维护及检修方便等诸多优点, 但传统的沸腾床干燥技术也存有一些自身的不足之处, 主要表现为物料在床内的停留时间分布不均, 易引起物料的短路与返混, 故难以获取湿含量相对均一的干品, 且一般亦不适于高含水量或易结块及高黏度物料的处理, 同时操作的能耗较高^[8-10]。

2 改进的沸腾床干燥器

2.1 工艺与结构的改型

针对传统沸腾床干燥器的不足, 各国学者开展了大量艰苦而细致的改进研究, 先后研制出搅拌式、离心式、振动式、脉冲式、热泵式、内热式、卧式及加载惰性粒子式的沸腾床干燥机, 从而极大拓展了该类干燥器的工业应用及提升了相应的操作品质。其中, 文献 [3] 已就上述前 5 种改型沸腾床干燥器做了较详细的技术介绍并给出了结构图示, 而文献 [8] 和 [11] 也已分别针对内热式和卧式沸腾床干燥器进行了详细报道, 故此处笔者将基于进一步的文献调研, 仅重点向读者引介加载惰性粒子式的改型沸腾床干燥器。

近些年来, 国内外兴起了一种高效低耗的新型沸腾床干燥器, 即惰性粒子沸腾床干燥器, 它与传统沸腾床干燥器的不同主要在于其内部填充有某种惰性粒子, 具体结构如图 2 所示。操作时, 料液将覆盖在惰性粒子的表面并随之一起翻滚, 其间通过与气流间的相际接触, 达到干燥除湿的目的。因这些惰性粒子的存在, 显著增大了干燥传热与



1. 气体布风板; 2. 惰性粒子; 3. 加料器
图 2 惰性粒子沸腾床干燥器的结构示意图
Fig.2 Structural demonstration of inert-particle fluidized bed dryer

传质的表面积,且由于粒子间的彼此连续碰撞,不断破坏了物料变干后的料膜,使得干燥过程多数维持于恒速干燥阶段操作,故与传统的沸腾床干燥器相比,该类干燥器的操作性能较为优异,其生产效率普遍较高。另有研究表明^[12-13],该类干燥器还具有流体力学状况稳定、操作可靠、装置体积小、防垢效果好等诸多优点。此外,与其他类型的工业干燥器不同,惰性粒子沸腾床干燥器可尚好地适于膏状、液状和浆状等较难干燥物料的处理^[14-15]。在惰性粒子沸腾床干燥器出现以前,有关膏状物料的干燥,多采用厢式干燥、喷雾干燥和旋转闪蒸干燥等,而对于液状和浆状物料的干燥,则多采用喷雾干燥和滚筒干燥等。厢式干燥的缺点主要是干燥周期长、热利用率低,物料在干燥过程中易氧化而使得产品的外观颜色偏深。喷雾干燥技术的操作工艺虽相对成熟,干燥时间短,可制得粉状或粒状产品,但其体积传热系数偏小、体积庞大、投资费用偏高,且当处理膏状物料时,雾化前一般还另需加水和打浆处理。旋转闪蒸干燥虽可直接处理膏状物料,无需加水打浆,且脱水速率较快,但易出现物料挂壁和结疤等问题。此外,喷雾干燥与旋转闪蒸干燥对于膏状物料的黏稠度也均有一定的限制要求。滚筒干燥虽可用于液状或浆状物料的干燥,热利用率较高,但因干燥深度有限,同时由于物料在滚筒表面常因过热而脱水焦化,故产品质量一般难以得到保证^[16-17]。就目前的工业生产状况而言,惰性粒子沸腾床干燥器的研发与推广,无疑为膏状、液状和浆状等物料的干燥提供了一条新的途径。

2.2 布风板等零部件的结构优化

有关沸腾床干燥器的技术改造与升级,除上述提及的各种重大的工艺与结构改型外,针对设备内部某具体零部件的结构优化亦是一个重要而实效的研究命题。例如,王怀彬^[18]针对内循环沸腾床气固分离器中的喷嘴角度及其布置方式开展了实验优化,从而获得了床内粒子的最小带出率;清华大学^[19]采用于单相流喷嘴和输水管间装设三通球阀的方式,成功设计了可用于循环沸腾床生产的防堵喷嘴装置。芬兰福斯特公司^[20]亦成功研制了一新型的格栅式喷嘴,该喷嘴可有效地清除飘移至沸腾床熔炉底部的固体微粒。在诸如上述的有关沸腾床零部件结构优化的众多研究成果中,当属气体布风板的结构研发最为活跃,极富成效。

在沸腾床干燥器中,气体布风板通常起着均布气流和支撑固相颗粒的重要作用,其结构与尺寸显著影响着操作的热质传递性能。Depyere^[21]针对德国 Glat 公司的 GPCG-1 型沸腾床,在未添加固体床层的工况下,开展了气体布风板的结构优化与改进,结果有效提高了操作的布气均匀性。赵弦^[22]结合数值计算,模拟了各风帽间的流量分配及风帽内部的阻力分布,从而获得了循环沸腾床中内嵌逆流柱形风帽布风板的优化结构,且得到了实验的较好验证。魏新利^[23]亦探讨了沸腾床中气体布风板的不同布孔排列及开孔直径对流化流场的影响,且据此确定了实验考察范围内的最优布风板结构。张宏丹^[24]通过计算与实验发现,改进的倾斜布风板可较传统的水平布风板显著强化沸腾床内固相颗粒的横向混合,且当倾斜角愈大时,颗粒的混合愈均匀。郭文^[25]则专门针对处理微小颗粒的振动式沸腾床,设计开发了一种配备多层烧结网的复合型布风板,亦得到了使用者的青睐。笔者课题组也曾针对惰性粒子沸腾床干燥器,开展了新型斜孔布风板的性能考察与结构改进研究,结果发现改进的斜孔布风板可较传统的直孔布风板更利于床内气固相间的热质传递^[26]。无疑,以上这些探索性的研究,在很大程度上进一步促成或丰富了沸腾床干燥器布风板结构的多样化,从而为实际的工业生产提供了更多的可能选择。

3 存在的不足与研发展望

综上所述,沸腾床干燥器在工艺与结构上的每一次改型及相应零部件的结构优化,均有效拓展了该类干燥器的适用范围或强化了设备的热质传递等操作性能。但由于沸腾床干燥操作的本身过程机理异常复杂,造成了对其进行精准地理论描述尚较为困难,常存在模拟结果的失真或不唯一,从而亦导致了相关结构的研发难以深入与继续,具体表现为其工程放大设计尚缺乏切实的推算依据,多数情况下仍需依赖逐级规模的人工实验而展开。可以说,当前沸腾床干燥器的研制水平尚不能完全满足现代工业生产的需求,仍处于“为适应而改造或改型”的发展时期,并未真正进入“全面述及节能与环保”的后续完善阶段。为此,笔者结合文献调研,针对该类工业设备的进一步结构研发,提出如下建议:

(1) 可进一步借助激光多普勒测速仪、颗粒动态分析仪、高速摄影、图像处理及示踪离子等诸多先进的检测仪器或技术手段,开展床内气液固各相流动参数的瞬态及多维监控与测量,以便能更深入地了解床

内各相独自流动的形态及相互间的传递作用机理. 只有待更深刻地认知了该类操作的过程本质后, 方可在其设备的研发过程中做到有的放矢, 事半功倍.

(2) 为扩展该类设备的工业应用及充分发挥其操作优势, 可在已有改型的基础上, 进一步加大组合机型的研发力度, 如已见报道的内热-搅拌、卧式-搅拌、振动-惰性粒子等组合形式的沸腾床干燥器即已取得了良好的实际使用效果. 此外, 喷雾-沸腾床、气流-沸腾床以致流化-结晶器等不同干燥机型或不同操作类别间的组合工艺研究, 目前也已取得了阶段型的突破.

(3) 可充分利用当前先进的计算机模拟技术及相关的数值计算平台, 如 Ergun 和 Fluent 等 CFD (Computational Fluid Dynamics) 商用软件, 系统地开展设备内部流场的分析与优化, 进而大幅提高各零部件结构研发的工作效率与准确性. 有关这一方面, 已有不少学者^[27-29]做了前期的探索和尝试, 如褚开维^[30]即利用 Fluent 软件对二维气固沸腾床进行了动态模拟, 成功获得了压降与进风速率间的变化规律, 从而为实验布风板的结构优化提供了直接依据; Méndez^[31]利用 FIRE 软件, 亦成功地对多鼓风口沸腾床布风板进行了流场分析与尺寸优化.

总之, 有关沸腾床干燥器的结构研发, 本身乃一项极具生产实践意义的科研命题, 同时亦属一项长期而艰巨的探索性课题. 随着人们对于多相流理论认知水平的逐步深入, 及现代计算机数值模拟技术的日臻完善, 我们完全有理由相信, 今后的沸腾床干燥器势必具有更为实用、可靠的结构型式, 相应的工业应用亦将得以极大地延伸与拓展.

[参考文献] (References)

- [1] 汪喜波, 萧成基. 我国干燥技术和装备的发展及待开发的课题 [J]. 南京林业大学学报, 1997, 21(增刊): 1-3
Wang Xibo, Xiao Chengji. Development of drying technology and equipment in China [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1997, 21(Sup): 1-3 (in Chinese)
- [2] Walle S G, Velu V, Jyothimayit, et al. Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74: 108-115.
- [3] 李晓兰, 叶京生, 罗乔军. 流化床干燥技术的研究与进展 [J]. 通用机械, 2007(8): 61-64
Li Xiaolan, Ye Jingsheng, Luo Qiaojun. Research and development of fluidized bed drying technology [J]. General Machinery, 2007(8): 61-64 (in Chinese)
- [4] Prachayawanakom S, Prachayawasin P, Soponmonnarit S. Heating process of soybean using hot air and superheated-steam fluidized-bed dryers [J]. IWT, 2006, 39: 770-778.
- [5] Petersen L, Werther J. Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(7): 717-736.
- [6] 杜旭光, 蒋国光, 刘少杰. 利用埋管流化床干燥 PTA 的可行性初探 [J]. 化纤与纺织技术, 2007(2): 44-46
Du Xuguang, Jiang Guoguang, Liu Shaojie. Preliminary feasibility study on application of fluidized bed with immersed tube for drying PTA [J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2007(2): 44-46 (in Chinese)
- [7] 张玉. 搅拌流化床干燥器流体力学和传热性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000
Zhang Yu. Investigation of hydrodynamics and heat transfer characteristics in agitation fluidized bed dryer [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [8] 伍沅. 干燥技术的进展和应用 [J]. 化学工程, 1995, 23(3): 47-57.
Wu Yuan. Advances and applications of drying technologies [J]. Chemical Engineering, 1995, 23(3): 47-57. (in Chinese)
- [9] 王志祥, 史益强, 黄德春. 制药化工原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Wang Zhixiang, Shi Yiqiang, Huang Dechun. Principles of Pharmaceutical and Chemical Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 江涛, 徐皓. 惰性粒子流化干燥机的研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 81-86
Jiang Tao, Xu Hao. Fluidized bed drier with inert granules [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 81-86 (in Chinese)
- [11] 阎红, 王喜忠. 我国干燥技术和装备的研究及应用 [J]. 化学工程, 1997, 25(5): 6-14
Yan Hong, Wang Xizhong. Development and application on drying technology and equipment in China [J]. Chemical Engineering, 1997, 25(5): 6-14 (in Chinese)
- [12] Benali M, Amazouz M. Drying of vegetable starch solutions on inert particles: quality and energy aspects [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74: 484-489.
- [13] 赵思昆, 刘巍, 戴琳, 等. 惰性粒子流化干燥技术及其应用 [J]. 化工时刊, 2008, 22(12): 46-48
Zhao Sikun, Liu Wei, Dai Lin, et al. Drying technique of inert-particle fluidized bed and its application [J]. Chemical In-

- dusty Times 2008, 22(12): 46-48 (in Chinese)
- [14] Costa Jr E F, Frère F B, Freire J T, et al Spouted beds of inert particles for drying suspension[J]. Drying Technology 2006, 24(3): 315-325.
- [15] 陈国桓, 张健飞, 刘雁, 等. 膏状物料在惰性粒子流化床中的干燥试验研究[J]. 化工机械, 1997, 24(5): 254-257.
Chen Guohuan, Zhang Jianfei, Liu Yan, et al Experimental investigation of drying paste-like materials in an inert particle fluidized bed[J]. Chemical Engineering & Machinery, 1997, 24(5): 254-257 (in Chinese)
- [16] 高炎武, 李艳红. 旋转闪蒸干燥装置设计、制造及应用[J]. 染料工业, 1995, 32(2): 43-49.
Gao Yanwu, Li Yanhong Design, manufacture and use of spin flash dryer[J]. Dyestuff Industry, 1995, 32(2): 43-49 (in Chinese)
- [17] 陈国桓. 干燥、粉碎一体化装置[J]. 化工进展, 1993(3): 11-14.
Chen Guohuan A combined drying-pulverizing apparatus[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 1993(3): 11-14 (in Chinese)
- [18] 王怀彬, 赵广播, 王永武, 等. 内循环流化床下旋流喷嘴角度的优化及其布置方式[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(2): 4-7.
Wang Huabin, Zhao Guangbo, Wang Yongwu, et al The optimization and arrangement of the angle of the below-rotational flow nozzle in the internal-cycle fluidized bed[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(2): 4-7 (in Chinese)
- [19] 清华大学. 用于循环流化床烟气脱硫系统的防堵喷嘴装置: 中国, 200420121017[P]. 2006-02-22
Tsinghua University A anti-blocking nozzle for flue gas desulfurization system of circulating fluidized bed China 200420121017[P]. 2006-02-22 (in Chinese)
- [20] 福斯特韦勒能源股份公司. 流化床反应器的格栅喷嘴: 中国, 200580011983[P]. 2007-05-09
Fos- wchle Energy Stock Company A grid nozzle for fluidized bed reactor China 200580011983[P]. 2007-05-09 (in Chinese)
- [21] Depypere F, Pieters J G, Dewettinck K. CFD analysis of air distribution in fluidised bed equipment[J]. Powder Technology, 2004, 145(3): 176-189
- [22] 赵弦, 包绍麟, 贺军. 内嵌逆流柱形风帽的冷态模化试验和三维流场的数值模拟[J]. 锅炉技术, 2005, 36(3): 32-37.
Zhao Xian, Bao Shaolin, He Jun Experiments and numerical simulation on the resistance characteristics of the cap with inner tube and down-flow[J]. Boiler Technology, 2005, 36(3): 32-37. (in Chinese)
- [23] 魏新利, 马新辉. 应用 Fluent 软件研究流化床中布风板结构[J]. 能源工程, 2006(2): 15-19.
Wei Xinli, Ma Xinhui The structural choice and optimum of distributor in fluidized bed by Fluent software[J]. Energy Engineering, 2006(2): 15-19 (in Chinese)
- [24] 张宏丹, 李巍, 何玉荣, 等. 倾斜布风板对流化床内颗粒流化特性影响的研究[J]. 节能技术, 2005, 23(130): 116-117.
Zhang Hongdan, Li Wei, He Yurong, et al Effect of inclining distributor on the fluidized characteristics of particles[J]. Energy Conservation Technology, 2005, 23(130): 116-117 (in Chinese)
- [25] 郭文, 刘峰, 马训强, 等. 一种用于振动流化床的布风板[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(5): 258-260.
Guo Wen, Liu Feng, Ma Xunqiang, et al A air distribute plank which used in vibrating fluidized bed[J]. Drying Technology & Equipment, 2007, 5(5): 258-260 (in Chinese)
- [26] 刘巍, 汤文成. 气体分布板开孔结构对流化床干燥性能的影响[J]. 中国工程科学, 2006, 8(2): 47-50.
Liu Wei, Tang Wencheng Effects of structure of opening hole in gas distributor on drying property for fluidized bed dried[J]. Engineering Science, 2006, 8(2): 47-50 (in Chinese)
- [27] Owoyemi O, Lettieri P. Stability analysis and CFD validation of a new fluid-particle interaction force for mono-component gas-solid fluidized beds[J]. Powder Technology, 2008, 183(1): 27-36
- [28] Panneerselvam R, Savithri S, Surender G D. CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid fluidised bed reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(6): 1119-1135
- [29] Pei Pei, Zhang Kai, Lu Enwei. CFD simulation of bubbling and collapsing characteristics in a gas-solid fluidized bed[J]. Petroleum Science, 2009, 6(1): 69-75
- [30] 褚开维. 流化床中气固两相相互作用行为的数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
Chu Kaiwei Numerical simulation of the interaction behavior between gas phase flow and solid phase flow in fluidized bed [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2001 (in Chinese)
- [31] Méndez C, Luusta R, Castro E. Study of the gas velocity field generated by a multi-tuyere fluidization gas distributor in the absence of particles[J]. Powder Technology, 1998, 98(1): 54-60

[责任编辑: 严海琳]