

脉动气流喷雾干燥的数值模拟

吴中华, 刘相东

(中国农业大学)

摘 要: 利用 CFD 模型对脉动气流喷雾干燥过程进行了数值模拟, 得到了干燥过程中干燥室气体流场和颗粒运动轨迹、气体局部湿度和温度变化及不同初始直径颗粒在干燥室内干燥情况的详细信息, 解决了由于难以动态测量上述参数而不能清楚了解该干燥过程的难题。模拟结果表明脉动气流喷雾干燥具有干燥时间短, 蒸发速度大等特点。

关键词: 脉动燃烧; 喷雾干燥; 数值模拟

中图分类号: S375

文献标识码: A

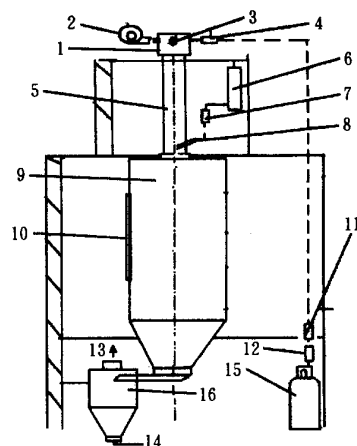
文章编号: 100226819(2002)0320018204

脉动燃烧干燥是以脉动燃烧装置自激产生的高频(30~200 Hz)及高温(600~1200 K)振荡气流为干燥介质对物料进行干燥的一种新型干燥技术。与常规的热力干燥过程比较, 具有能源效率高、污染排放低、热质传递强度大、结构简单、成本低、干燥物料范围广泛等优点^[1]。但由于目前对其干燥过程, 尤其是干燥室内的气体运动状态的了解还不够充分, 缺乏必要的设计依据, 限制了它的工业应用。为了深入了解脉动气流下的干燥过程, 本文利用喷雾干燥过程的计算流体动力学(CFD)模型^[2]对脉动气流喷雾干燥过程进行了数值模拟。

1 脉动燃烧喷雾干燥装置

本文模拟的脉动燃烧喷雾干燥装置如图 1 所示。该装置包括脉动燃烧器, 圆柱型干燥室和旋风分离器; 其工作机理是燃料(人工煤气)和空气通过各自进口进入脉动燃烧器的燃烧室形成混合气体, 混合气体在燃烧室中爆炸, 使得燃气流的温度和压力急剧上升; 当达到一定程度时, 燃气流便从燃烧室传播到尾管, 形成高温高频振荡的尾气流。因为尾气流传递的动量具有强烈的振荡性, 因此, 能够直接雾化液态物料。本文中, 液态物料经进料管注入尾管, 脉动燃烧器产生的高频振荡尾气流在尾管内将料液雾化成细小的颗粒并将这些颗粒带入干燥室进行干燥; 干燥后的产品由旋风分离器进行收集。该装置中采用 Helmozel 型燃烧器, 燃烧室体积为 1962.5 cm^3 , 热负荷为 25 kW, 脉动频率为 83 Hz, 脉动周期为 0.012 s。喷雾干燥室长 1.5 m, 直径 0.3 m, 锥底部分长 0.4 m, 出口直径 0.12 m。实验用的料液是

质量分数为 10% 的 NaCl 水溶液, 其流量为 0.005 8 kg/s, 密度为 1070.7 kg/m^3 , 初始温度为 23 °C; 料液被尾气流雾化后, 液滴平均直径为 44.02 μm 。



1. 脉动燃烧器 2. 风机 3. 火花塞 4. 燃气入口 5. 尾管 6. 料桶
7. 液体转子流量计 8. 进料管 9. 干燥室 10. 玻璃窗 11. 气体转子流量计 12. U 型压力计 13. 废气 14. 干燥产品 15. 煤气瓶 16. 旋风分离器

图 1 脉动燃烧喷雾干燥装置示意图

Fig 1 The pulse combustion spray drying system

考虑干燥器的几何形状及各种操作参数, 可认为干燥器内的两相流流场具有轴对称性, 故干燥室内气粒两相流问题近似按轴对称处理, 这样, 该问题可以简化为 2 维问题; 由于干燥室进口处气体速度随时间成正弦函数变化, 故该问题也是非定常问题。本文中采用喷雾干燥过程的 CFD 模型来模拟脉动燃烧喷雾干燥过程。CFD 技术可以解决复杂空间几何形状内的流体动力学问题和气流均匀性问题, 是近年来出现的新型模拟技术。它可以同时解决喷雾干燥过程中干燥介质与雾滴间的传热传质和动量传递, 并考虑湍流扰动对传递过程的影响。本文中, 该 CFD 模型采用标准 k- ϵ 模型来描述干燥室内的气体

收稿日期: 2001210219

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59776037)

作者简介: 吴中华, 硕士, 北京清华东路 17 号 中国农业大学(东区)机械工程学院, 100083

湍流流动,应用颗粒轨道模型追踪颗粒在干燥室内的运动轨迹和沿运动轨迹的质量、动量、能量变化^[2]。目前,国内利用 CFD 技术模拟干燥过程尤其脉动气流喷雾干燥过程尚未见报道。

2 模拟结果和分析

2.1 干燥室气体动力学分析

与传统喷雾干燥不同,脉动燃烧喷雾干燥过程的干燥介质,即燃烧器尾气流呈周期性脉动特性,其脉动频率及振幅可通过燃烧室内的压力测量获得^[5]。本文中,热空气在干燥室入口的速度 $[23+59\sin(512.24t)\text{m}\ddot{\text{o}}\text{s}]$ 呈正弦函数变化。图 2 表示气体进口速度在一个周期内的变化。当气体进口速度为正值时,表示尾气流通过尾管进入干燥室;而当进口速度为负值,则表示停留在干燥室内部分气体向尾管回流。图 2 中,选取了具有代表意义的 5 个点(A、B、C、D、E 点)。A 点表示一个周期的开始;B 和 D 点分别对应于气体最大进口速度和最大回流速度的时刻;C 点表示气体进口速度为零的时刻;E 点表示一个周期的结束。上述 5 个时刻干燥室内的气体流动状态和颗粒轨迹如图 3 中 a、b、c、d、e 所示。从图 3 中,可以看出喷雾干燥室内的气体流动状态和颗粒轨迹在一个周期(该周期为 1.000 s 后的第一个周期)内是不断变化的,当气体进口速度为正时,尾气流将雾滴带入干燥室并进行干燥;当进口速度为负时,干燥室内的热空气将向尾管回流,此时,不仅尾管内被雾化的颗粒不能进入干燥室,而且干燥室进口部分的一些颗粒也将随气流进入尾管。由于尾气流的平均速度为正值,这些颗粒在尾管内短暂停留后,最终将进入干燥室。图 3 中,在干燥室的上部有一个明显的涡流区;该涡流区的大小对颗粒的轨迹有很大的影响,图 3a 中,当涡流区扩展到中心轴附近时,颗粒的轨迹将向中心轴集中而不是向外分散。图 3c 中,颗粒轨迹和干燥室壁面相交,说明干燥过程中有部分颗粒和壁面相碰撞,因而会形成粘壁问题。

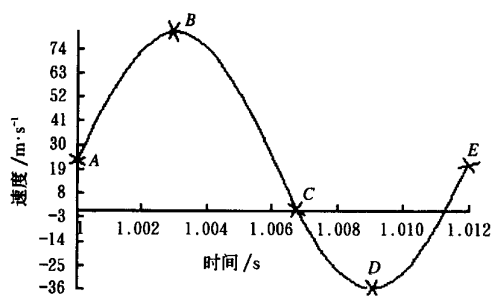


图 2 脉动气流速度变化图

Fig 2 The curves of the gaseous inlet velocity

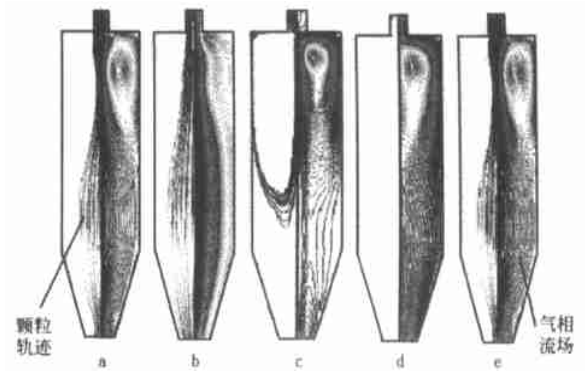


图 3 干燥室内气相流场和颗粒轨迹图

Fig 3 The flow field and particle locus in drying chamber

干燥室内局部气体湿度在一个周期内的变化如图 4 所示。图 4 中,选取了干燥室中 16 个位置点,其中 x 表示该点离干燥室进口的轴向距离(m),1,2,3,4 分别表示该点离中心轴径向距离为 0.00,0.05,0.10,0.12 m,曲线表示该处气体湿度随时间的变化。图 4 中,可以看出在干燥室上部,湿度变化非常大,尤其靠近中心轴附近,湿度变化更激烈;而在干燥室底部,湿度变化趋于平缓,因此气体湿度在干燥室的上部变化比较激烈。图 4a 和 4b 中, $r=0.12\text{m}$ 处的湿度比 $r=0$ 处的湿度高;这是因为气体沿中心轴进入干燥室被加湿后,大部分气体向干燥室尾部运动,而部分加湿后的气体在干燥室上部形成涡流;干燥室壁面附近涡流区的存在,使得干燥室壁面附近的气体湿度比中心轴附近的气体湿度高。

干燥室内局部气体温度在一个周期的变化如图 5 所示。图 5a、5b 和 5c 中,干燥室内气体温度沿轴向和径向都是逐渐降低的;在径向,中心轴的气体温度比干燥室壁面附近的气体温度约高 10 。图 5d 中,中心轴与干燥室壁面附近的气体温度差随时间变化比较大,当 $t=1.000\text{ s}$ 时,温差为 58 ,而当 $t=1.007\text{ s}$ 时,温差为 10 ;说明由于外部冷空气的回流,不仅造成干燥室锥底部分气体总体温度的降低,而且其锥底部分气体径向温差也比较大。干燥室锥底部分气体温度的降低,使得颗粒运动到锥底部分时,颗粒温度比没有回流时低,因而冷空气的回流有利于干燥产品质量的保护。

2.2 溶液干燥情况分析

本文中,料液被脉动尾气流雾化后形成不同初始直径的颗粒群。为了研究不同直径颗粒在干燥室的干燥情况,本文选取了 11 种不同直径的颗粒,每种直径的颗粒代表 4.586 Lm 范围内的所有颗粒,其流量百分率为该种直径的颗粒质量流率与料液质

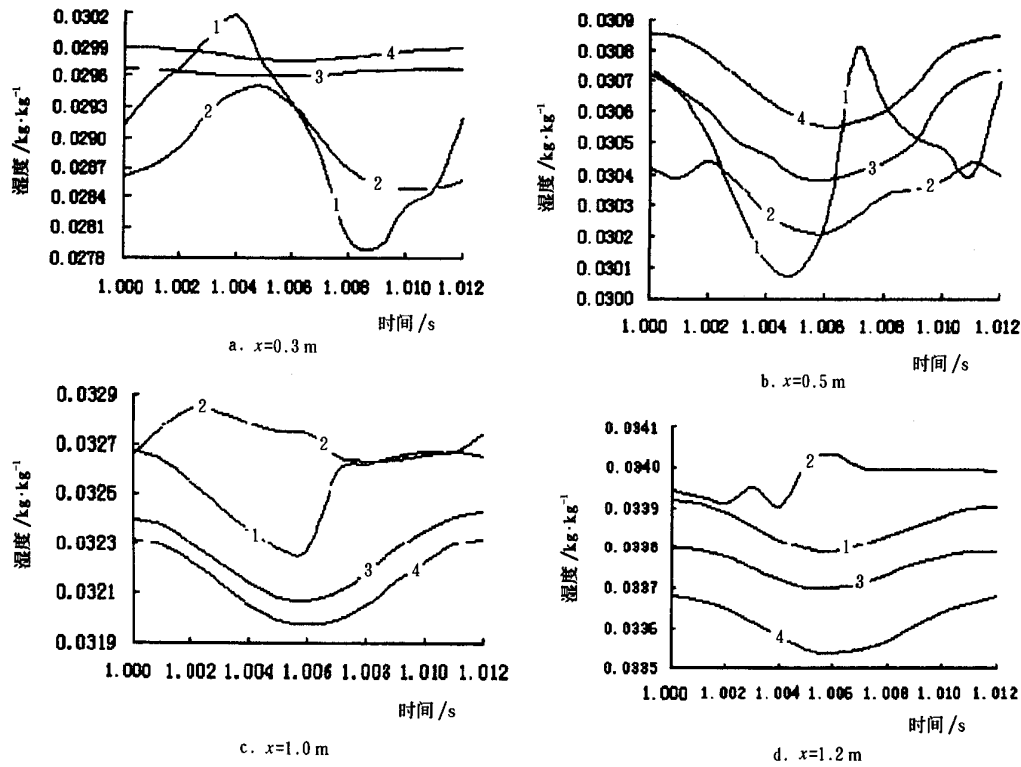


图 4 干燥室局部气体湿度变化图

Fig 4 Changes of local air moisture in the drying chamber

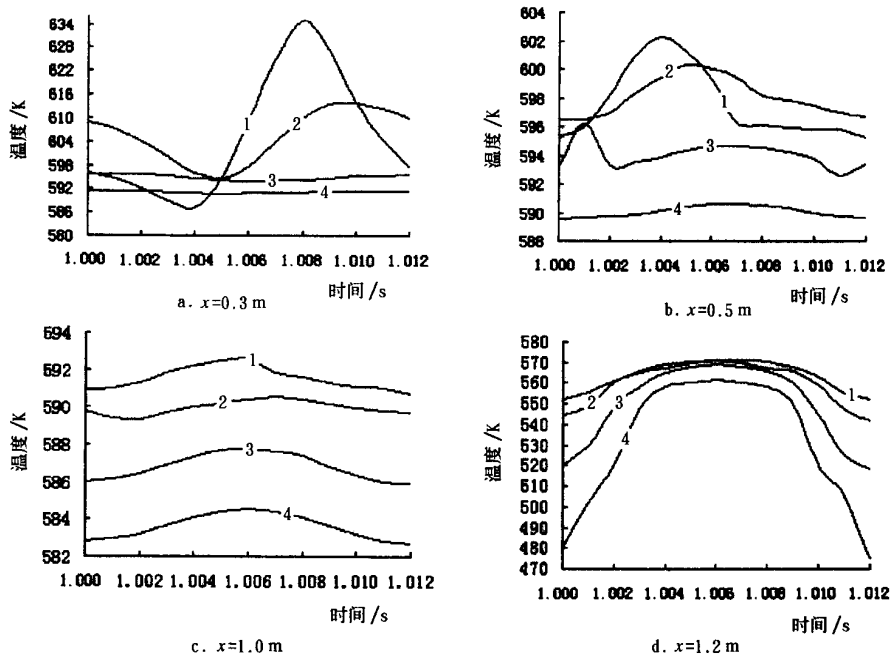


图 5 干燥室局部气体温度变化图

Fig 5 Changes of local air temperature in the drying chamber

量流率的百分比, 11 种颗粒总流量百分率为 99.4%, 因此这些颗粒的干燥情况可以表示整个颗粒群的干燥情况。模拟表明, 颗粒在干燥室内的停留时间约为 0.119 s, 颗粒初始直径对颗粒的运动轨迹, 干燥时间和出口处的颗粒性质有重要影响。为了

比较不同直径颗粒干燥完全所需的时间, 本文定义了颗粒湿含量(湿基)达到 3% 时干燥时间, 此时颗粒湿含量接近颗粒最终湿含量。表 1 列出了不同初始直径的颗粒干燥到 3% 干燥时间和出口处颗粒的干燥情况。

表 1 不同初始直径的颗粒干燥情况表

Table 1 Drying conditions of particles
with variable diameters

颗粒初 始直径 öLm	流量 百分率 ö%	颗粒干燥 到 3% 所 需时间öS	最终湿含 量(湿基) ö%	颗粒最 终直径 öLm	颗粒出 口温度 ö
18 945 5	2 4	0 010 48	4 70	8 936	179 0
23 531 8	5 0	0 016 40	1 72	10 985 9	171 8
28 118 2	8 8	0 020 84	2 57	13 164 9	165 3
32 704 5	13 2	0 027 43	1 25	15 244 4	162 0
37 290 9	17 0	0 035 21	0 64	17 346	153 5
41 877 3	18 4	0 044 19	1 80	19 555 8	139 0
46 463 6	16 5	0 054 74	0 40	21 572 4	137 6
51 050 0	11 7	0 066 01	0 53	23 761 6	144 2
55 636 4	6 2	0 078 67	2 60	26 055	153 9
60 222 7	2 4	0 093 43	1 53	28 097 6	160 4
64 809 1	0 6	0 109 60	2 26	30 311 4	164 9

表 1 中, 可以看出, 不同初始直径的颗粒干燥时间和最终干燥情况不同。当颗粒初始直径为18 946 Lm 时, 颗粒干燥到 3% 所需时间为0 010 48 s, 接近 1 个脉动周期; 而当颗粒初始直径为 64 809 Lm 时, 颗粒干燥到 3% 所需时间为 0 109 6 s, 接近 9 个脉动周期。干燥室出口处, 99. 4% 颗粒已被完全干燥。颗粒最终湿含量约在1. 6% 左右, 已接近其平衡湿含量。颗粒在干燥室内的停留时间约为 0 119 s, 验证了脉动气流喷雾干燥过程具有干燥速率大, 干燥时间短的特点。以进口风温 650 K 计, 计算结果为该脉动气流喷雾干燥的单位质量水分蒸发能耗为 3 300 kJökg (资料 5 给出一般脉动燃烧干燥的能耗为 3 000~ 3 500 kJökg)。干燥室体积蒸发速率为217. 3 kgö(m³ · h)。

3 结 论

本文利用喷雾干燥的 CFD 模型模拟脉动气流干燥过程, 得到了干燥室内气粒两相流动力和热力学参数分布信息。模拟表明脉动喷雾气流干燥具有以下特点:

- 1) 干燥时间短, 颗粒在干燥室内的停留时间约为 0 119 s;
- 2) 蒸发速率大, 干燥室体积蒸发速率为 217. 3 kgö(m³ · h);
- 3) 干燥室上部存在涡流区, 锥底部分存在外部气体回流;
- 4) 脉动气流干燥过程存在粘壁问题, 数值模拟得到的干燥室内热力学参数分布信息, 可以为脉动气流喷雾干燥器的设计, 干燥过程优化提供参考。

[参 考 文 献]

[1] 李保国 脉动燃烧及脉动燃烧喷雾干燥的理论分析与实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1999

[2] Liu Xiangdong, Cao Chongwen, Li Baoguo, et al Pulse combustion drying [A]. Drying'98 [C]. Beijing: China Agricultural University Press, 1998 496~ 503

[3] Zbicinski, I Development and experimental verification of momentum, heat and mass transfer model in spray drying [J]. Journal of Chemical Engineering, 1995, 58, 123~ 133

[4] Mujumdar A. S, Menon A. S Drying of solids: principles, classification and selection of dryer [A]. In: Handbook of Industrial Drying [M], 1995 1~ 40

[5] 李保国, 曹崇文, 刘相东 脉动燃烧干燥技术研究进展 [J]. 农业工程学报, 1998, 14 (4): 204~ 207.

Numerical Simulation of Spray Drying of Pulsating
Flow Generated by a Pulse Combustor

Wu Zhonghua, Liu Xiangdong

(College of Machinery Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Spray drying generated by a pulse combustor was simulated using the computational fluid dynamics method. The simulated profiles of flow field and particle locus, local temperature and humidity of the air phase in the drying chamber were presented and the drying process of the particles with different initiate diameters was analyzed. The simulation results show that the short drying time and large evaporation rate are characteristics of the pulsating spray drying.

Key words: pulse combustion; spray drying; numerical simulation