

圆环形对撞流干燥器的流体动力学特性分析

段 续, 朱文学

(河南科技大学食品与生物工程系, 洛阳 471003)

摘 要: 为了得出颗粒状物料在对撞流中的运动规律, 以及对撞流干燥器加载后流动特性的变化规律, 设计了圆环形对撞流干燥试验台, 并进行了流动特性的试验研究。试验测定了系统压力降随载带率的变化情况, 并利用高速摄影技术, 对颗粒物料在对撞室内的运动速度沿运动方向的变化规律进行了分析。建立了物料颗粒的动力学模型, 计算了颗粒在对撞室内的穿透深度, 并将计算结果与试验结果进行了对比。结果表明, 颗粒动力学模型计算结果与试验结果基本吻合, 能较好地反映颗粒在对撞区内的流动特性。同时, 该模型可用来确定加速管长度和端面距离、颗粒平均滞留时间等干燥器重要参数。另外颗粒在对撞区内作减幅振荡运动, 在第一次振荡时气固相对速度较大, 干燥强度最高。

关键词: 对撞流; 流体动力学特性; 干燥; 动力学模型

中图分类号: TP028 672; S375

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0046-04

1 引言

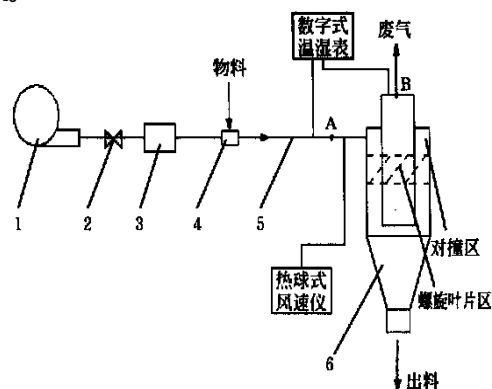
对撞流干燥是一种新兴的具有广阔应用前景的干燥技术。它利用两股相向气流对撞所形成的高度湍流, 以及湿物料在对撞区内的快速非稳态运动来增强传热传质过程, 具有快速、高强度干燥的特点, 并能很好保持产品的品质^[1,2]。目前, 白俄罗斯、以色列和加拿大等国家在这一领域取得了显著进展, 并将其应用于药品、谷物、城市污泥等的干燥, 取得了很好的效果。国内在这方面的研究近几年才刚刚开始, 还处于初步探索阶段^[3]。国内外近几年的研究主要集中在以下方面: 提出了多种对撞流干燥器的结构形式, 对不同物料干燥的实际应用研究, 基本干燥规律的研究等等^[4]。但对对撞流干燥器内部传热传质规律的研究还不多见, 而干燥过程中的质热传递与对撞流干燥过程中的流动特性是密切相关的。本文通过对颗粒物料在对撞流中运动规律的研究揭示其流动特性, 进而可充分认识对撞现象, 为进一步研究对撞流的干燥特性, 以便为干燥器的设计提供理论依据。

对撞流适合干燥散粒状物料^[5], 本文采用圆环型对撞流干燥器来干燥酱糟。干燥器采用有机玻璃制成, 酱糟颗粒在对撞室的运动过程采用高速摄影^[6]进行拍摄, 然后利用分析放映机对影像进行分析, 得出颗粒的运动规律, 并与颗粒的动力学模型计算结果进行比较, 验证模型的准确程度。

2 试验装置和方法

试验系统装置如图 1 所示, 风机 1 通过两对称安装的管道 5, 使气流切向送入到环形空间 6, 调节阀门 2 可使两管道中气流相同。用安装在离反应器进口大约 0.6

m 处的加料器 4 将分散的颗粒送入气流中, 所要求的这个距离是为了使颗粒加速到一个足够大的速度, 而不使其下沉并立即排出。图 2 为对撞室 6 与加速管 5 的截面图, 如图示, 颗粒从一股气流冲入另一股气流中, 首先停止, 然后受另一股气流作用向相反方向加速冲入到原来的气流中, 经过几次振荡后颗粒丧失了其速度, 并被气流带出对撞区。由数片螺旋叶片粘于对撞室壁上构成螺旋叶片区, 使气流在此产生旋转, 从而完成气固分离, 颗粒通过锥形出口从对撞室排 6 出。对撞室 6 是由有机玻璃制成的, 这样通过高速摄影机能拍摄到颗粒在对撞区的运动。



1. 风机 2. 阀门 3. 电加热器 4. 加料器 5. 加速管 6. 对撞室

图 1 对撞流干燥系统装置示意图

Fig. 1 Schematic of drying experimental system

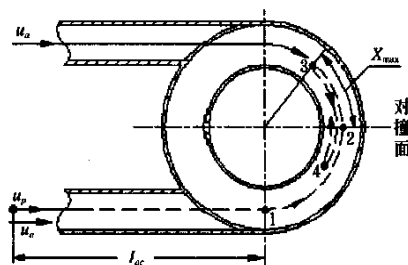


图 2 颗粒在对撞流中的运动示意图

Fig. 2 Particle movement in impinging stream

收稿日期: 2002-06-05

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目 (994041500)

作者简介: 段 续 (1973-), 硕士, 洛阳市 河南科技大学食品与生物工程系, 471003

通讯作者: 朱文学, 博士, 教授, 河南科技大学食品与生物工程系, 471003

分别进行了以下两方面试验:

1) 含水率为 35.2% (w. b) 的酱糟为物料, 用热式风速仪及 U 形管压差计测量反应器内气流速度 u_a 和压降 ΔP (A、B 之间的压降为系统压降), 得出系统空载与带载时的欧拉数 E_u 之比 η 与载带率 μ 的关系。

2) 以单个直径 3 mm 的酱糟颗粒为物料, 采用

16DJL-10 型高速摄影机拍摄下物料在对撞区中运动的全过程, 胶片冲洗出来后在 FFW 16 型分析放映机上放映, 投射到数字化仪上采点并输入微机进行判图, 得出颗粒在各位置时的切向运动速度见表 1。高速摄影有关参数选择及计算见表 2。

表 1 高速摄影判读结果

Table 1 Judging results of high speed photography

运动距离 s/m	0	0.05	0.13	0.17	0.26	0.3	0.35	0.38	0.41	0.46
速度 $u_p/m \cdot s^{-1}$	-8.6	-5.02	0	2.1	4.8	3.2	0	-2.2	-2.9	0

表 2 高速摄影有关技术参数选择及计算

Table 2 Selected and calculated technical parameters about high-speed photography

物方视场宽度 /mm	主透镜焦距 /mm	摄影距离 /m	快门系数	底片允许模糊量 /mm	摄影频率 /幅 $\cdot s^{-1}$	启动片长 /m	启动时间 /s	预置片长 /m
300	38	0.909	1/5	0.02	3327	13.85	1	63.09

3 颗粒动力学模型

在对撞流中有如下几种力作用于悬浮颗粒: 1) 重力; 2) 摩擦力; 3) 离心力; 4) 浮力: 平行于重力, 方向相反; 5) 空气阻力: 平行于颗粒运动方向, 方向相反。颗粒在对撞流中可简化为如图 2 所示圆周运动, 且与空气阻力相比其它类型的力可忽略, 根据牛顿定律, 有

$$m_p = \frac{du_p}{dt} = -\frac{1}{2} C_f \rho_a A_p |u_p - u_a| (u_p - u_a) \quad (1)$$

式中 m_p ——物料质量, kg; ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ; C_f ——空气阻力系数; A_p ——颗粒在垂直于运动方向的平面投影面积, m^2 ; u_a, u_p ——气流和颗粒速度矢量, m/s 。

将 $m_p = (\pi/6) d_p^3 \rho_p, A_p = (\pi/4) d_p^2$, 代入式(1), 有

$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{0.75 C_f \rho_a}{\rho_p d_p} |u_p - u_a| (u_p - u_a) \quad (2)$$

式中 ρ_p ——颗粒密度, kg/m^3 ; d_p ——颗粒直径, m。

空气阻力系数的一般表达式为^[7,8]

$$C_f = A / R e_p^m \quad (0 < m < 1)$$

式中 A, m ——待定常数, 指数, 其值取决于流动状态, 流动状态是按雷诺数 $R e_p$ 划分的。层流区 $R e_p < 0.3$, 过渡区 $0.3 < R e_p < 1000$, 湍流区 $1000 < R e_p < 2 \times 10^5$ 。由于对撞流中颗粒一般都是处于湍流状态, 故只研究湍流区, 此时 $10^3 < R e_p < 2 \times 10^5$, 因此 C_f 中待定常数 $A = 0.44, m = 0, C_f = 0.44^{[7-9]}$ 。

颗粒运动的雷诺数为:

$$R e_p = \frac{d_p |u_p - u_a|}{\nu_a}$$

式中 ν_a ——空气运动粘度, m^2/s 。

对于气流速度和颗粒运动速度方向相反的减速运动, 有

$$|u_p - u_a| = u_a + u_p \quad (3)$$

对于气流速度和颗粒运动速度方向相同的加速运

动, 有:

$$|u_p - u_a| = u_a - u_p \quad (4)$$

1) 第一减速段(图 2 中 2 点与 3 点之间)

如图 2, 当颗粒在点 2 以 u_{p2} 的速度进入减速段后, 受到迎面而来的气流作用连续减速, 到达 5 点处时速度消失, 将式(3), 及 C_f 代入式(2), 得到

$$\frac{du_p}{dt} = -k(u_a + u_p)^2 \quad (5)$$

式中 $k = 0.33 \left(\frac{\rho_a}{\rho_p d_p} \right)$

点 2 处的初始条件为: $t = 0, u_p = u_{p2}, x = 0$, 于是可得出颗粒在该段中的飞行时间 t_d 及飞行距离 x_d :

$$t_d = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{u_a + u_p} - \frac{1}{u_a + u_{p2}} \right) \quad (6)$$

$$x_d = \frac{1}{k} \left[\ln \left(\frac{u_a + u_{p2}}{u_a + u_p} \right) + u_a \left(\frac{1}{u_a + u_{p2}} - \frac{1}{u_a + u_p} \right) \right] \quad (7)$$

2) 第一加速段

从图 2 点 3 处开始, 停滞的颗粒被加速, 利用式(2), C_f , (4), 且点 3 处的初始条件为: $t = 0, u_p = 0, x = 0$, 可得颗粒在该加速段中的飞行时间 t_{ac} 和飞行距离 x_{ac} :

$$t_{ac} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{u_a - u_p} - \frac{1}{u_a} \right) \quad (8)$$

$$x_{ac} = \frac{1}{k} \left(\frac{u_p}{u_a - u_p} - \ln \frac{u_a}{u_a - u_p} \right) \quad (9)$$

利用迭代法对上述方程进行求解, 可得出实际颗粒的运动速度及停留时间。

4 结果与讨论

4.1 加载时对撞流的流动特性

在两切向进气管气速为 30 m/s 的工况下做 27、43、55、96 kg/h 4 种加料率的流动特性试验。

加载状态以颗粒浓度 μ 表示, 颗粒进入对撞流产生的影响可用下面的无因次分析结果的比值 η 进行流体

动力学分析^[1]

$$\eta = Eu_p / Eu_a = \Delta P_p / \Delta P_a \quad (10)$$

$$\mu = W_p / W_a \quad (11)$$

式中 Eu_p ——气流中有颗粒时的欧拉数; Eu_a ——气流中无颗粒时的欧拉数; ΔP_p ——气流中有颗粒时的压力降, Pa; ΔP_a ——气流中无颗粒时的压力降, Pa; W_p ——颗粒的质量流量, kg/s; W_a ——空气的质量流量, kg/s。

试验结果见图 3, 结果表明: η - μ 是线性关系, 且下面的等式成立:

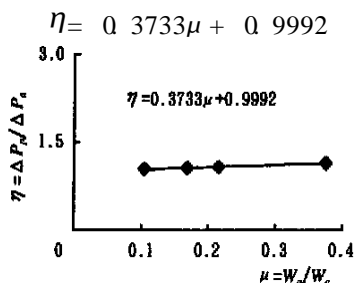


图 3 η 和 μ 的关系曲线

Fig 3 Relationship between η and μ

4.2 颗粒速度分布

在两切向进气管气速为 30 m/s 的工况下, 以单个直径 3 mm 的酱糟颗粒为物料, 进行高速摄影试验及模型计算。物性参数及初始条件如下:

粒径为 $d_p = 3 \times 10^{-3}$ m, 密度 $\rho_p = 543.6$ kg/m³, 空气密度为 $\rho_a = 1.205$ kg/m³, 空气的运动粘度为 $\nu_a = 15.11 \times 10^{-6}$ m²/s, 气流速度 $u_a = 30$ m/s, 加速管长度 $l_{ac} = 0.6$ m, 反应器直径 $\varnothing = 0.3$ m。计算结果及试验结果如图 4 所示。

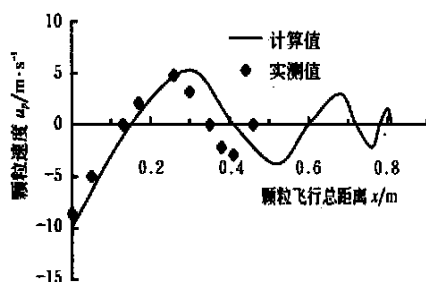


图 4 颗粒速度沿运动方向的变化

Fig 4 Variations of particle's speed along its track

计算与试验都以颗粒第一次进入对撞面为起始点。由图可知, 颗粒进入对撞区后, 受反向气流的阻力作用而经历了减幅振荡运动, 其运动速度及渗入反向气流中

的距离在振荡运动中急剧衰减, 振荡频率逐渐加快。计算与试验结果基本吻合, 尤其在第一次振荡发生时, 试验结果与模型计算吻合较好。而这段过程气固相对速度大, 干燥强度高, 是干燥过程研究的主要目标, 对该段颗粒运动特性的预测便具有重要意义^[10]。该模型还可以为干燥器的设计提供初步的理论依据, 如加速管长度的选择。计算结果表明颗粒作 3 次振荡运动, 而高速摄影结果显示颗粒只经历 2 次振荡便离开对撞区, 这是因为模型忽略了摩擦力及重力影响, 颗粒速度降到一定程度便沉降下去。因此可通过适当提高气流速度使颗粒振荡次数增加, 从而强化干燥。

5 结 论

1) 颗粒动力学模型计算结果与试验结果基本吻合, 能较好地反映颗粒在对撞区内的流动特性, 该模型可预测颗粒在对撞区中各位置的速度值, 进而可用来确定加速管长度和端面距离、颗粒滞留时间等重要参数。

2) 颗粒在对撞区内作减幅振荡运动, 气固相对速度较大, 可强化干燥。

3) η - μ 曲线的重要性在于其可应用于和本文设计的干燥器结构相似的对撞流干燥器中。也就是说, 对于所设计的干燥器, 可先空载试验, 然后在此条件下得到的压力降 ΔP_a , 就可预测加入颗粒后的压力降 ΔP_p 。

参 考 文 献

- [1] 潘永康 现代干燥技术[M] 北京: 化学工业出版社, 1998, 621~ 636
- [2] 淮秀兰, 刘登瀛 半环对撞流干燥的试验研究[J] 工程热物理学报, 1999, 20(2): 199~ 204
- [3] 张 阳 同轴对撞流干燥的理论与试验研究[D] 北京: 中国农业大学, 1998, 5~ 68
- [4] Tamir A. 撞击流反应器——原理和应用[M] 伍 沅译 北京: 化学工业出版社, 1999
- [5] 张 岩, 曹崇文 对撞流干燥散粒状物料的研究[J] 农业工程学报, 2000, 16(3): 84~ 87
- [6] 夏祖同 高速摄影总论与间歇式高速摄影[M] 北京: 科学出版社, 1983
- [7] 周乃如, 朱风德 气流输送原理与设计计算[M] 郑州: 河南科学技术出版社, 1987
- [8] Preey R H, Chilton C H. Chemical engineer hand book [M] 5th edition. McGraw-Hill, 1973
- [9] 吕子剑, 曹文仲 不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试[J] 化工工程, 1997, (5): 32~ 46
- [10] Kitron Y, Tamir A. Characterization and scale-up of co-axial impinging stream gas-solid contactors[J] Drying Technology, 1990, 8(4): 781~ 810

Analysis of hydrokinetics characteristics in circular impinging stream dryer

Duan Xu, Zhu Wenxue

(Department of Food and Biology Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract In order to study the movement of granular material in impinging stream and the flowing characteristics of material in impinging dryer during drying, a circular impinging stream dryer was designed, and experiments were also carried out with the dryer. Variations of the system pressure-drop versus ratio of material taken were measured. The material velocity variation along its movement direction was analyzed with high-speed photograph camera. Kinetic model of the material was developed, and the material penetration length and its velocity at various positions were calculated. The calculated results agreed well with the experimental results, thus the model can be used to analyze the flowing characteristics in impinging dryer. This model can also be used to obtain parameters, such as accelerating pipe length, the distance between end-faces, mean residence time of particle, etc. Moreover, the particles vibrated with damping amplitude in the impinging section, and during the first vibration, drying rate was the highest with high relative velocity between the airflow and the particles.

Key words: impinging stream; hydrokinetics characteristic; drying; kinetic model

中国科协“关于进一步提高期刊学术论文英文摘要写作质量以及在有关期刊编辑部开展英文摘要达标荐优活动的通知”的部分内容

为了让中文学术期刊学术论文以更高的质量走向国际, 以利于国际科技界对中国科技事业的了解和交流, 有必要规范英文摘要的质量标准并在各期刊编辑部开展适当的活动, 促进提高英文摘要的质量。对英文摘要的写作要求如下:

1) 英文摘要是应用符合英文语法的文字语言, 以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地论述文献重要内容的短文。

2) 英文摘要必须符合“拥有与论文同等量的主要信息”的原则。为此, 英文摘要应重点包括4个要素, 即研究目的、方法、结果和结论。在这4个要素中, 后2个是最重要的。在执行上述原则时, 在有些情况下, 英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围, 以及具有情报价值的其它重要的信息。当前学术期刊上英文摘要的主要问题是要素不全, 繁简失当。

3) 英文摘要的句型力求简单, 通常应有10个左右意义完整, 语句顺畅的句子。

4) 英文摘要不应有引言中出现的内容, 也不要对论文内容作诠释和评论, 不得简单重复题名中已有的信息; 不用非公知公用的符号和术语, 不用引文, 除非该论文证实或否定了他人已发表的论文, 缩略语、略称、代号, 除了相邻专业的读者也能清楚理解的以外, 在首次出现时必须加以说明; 科技论文写作时应

注意的其他事项, 如采用法定计量单位, 正确使用语言文字和标点符号等, 也同样适用于英文摘要的撰写。

两年时间内, 将在中国科协系统的学术期刊中开展英文摘要达标活动, 以及在收录于《中国学术期刊文摘》中的各期刊中开展英文摘要每期荐优活动。这两个活动同时是为期刊创优和论文创优作准备。

对于90%以上学术论文的英文摘要达到上述质量水平(达标准则见第一、二、三条)的期刊, 中国科协学会学术部将发达标证书以资区别和鼓励。

为了配合提高英文摘要质量的活动, 特决定首先在收录于《中国学术期刊文摘》的各学术期刊中开展英文摘要荐优活动。具体做法是, 各刊物每一期刊物出版后, 在送各中文摘要到《中国学术期刊文摘》编辑部时, 各编辑部要认真负责地推荐本期各篇学术论文中编辑部认为最值得推荐的一篇英文摘要。《中国学术期刊文摘》编辑部负责在文摘内容中加以醒目标注或作专栏检索, 以使该篇英文摘要可供读者们学习和研究之用。每年, 中国科协学会学术部将在荐优活动的基础上开展“百篇英文摘要”评选活动, 并向入选的各编辑部和作者颁发荣誉证书。

(引自中国科协学会学术部:
科协学发[2002]054号文件)