

·研究简报·

(50) 136-140

多孔物料干燥过程中的体积收缩特性

The Volume Shrinkage Characteristics of
Porous Materials During Drying Process

李友荣

Li Youyong

(重庆大学热力工程系, 重庆, 630044)

TS 205

靳明聪 ✓

陈源强

唐经文

Jin Mingcong

Chen Yuanqiang

Tan Jingwen

(重庆大学资源综合利用研究中心)

摘要 分析了多孔含湿物料干燥过程中体积收缩产生的原因, 实验研究了三种典型多孔物料体积收缩特性, 讨论了多孔物料毛细孔半径、固体间架强度和外部干燥条件等对体积收缩率的影响。

关键词 多孔物料; 体积收缩特性; 干燥

中国图书资料分类法分类号 TK124

ABSTRACT In this paper, elementary mechanism and experimental results are analysed on the volume shrinkage characteristics of the wet porous capillary materials during drying process. At the same time, the influence is discussed of mean pore radius and solid matrix strength of the wet porous material, as well as the temperature and velocity of hot air on the volume shrinkage rate on the basis of the experimental results.

KEYWORDS porous material; volume shrinkage characteristic; drying

0 引 言

由于在工业生产中, 存在着大量的毛细多孔物料的干燥过程, 因此, 对其干燥特性的研究就引起了人们的极大关注。目前, 对多孔物料干燥特性的研究大多以实验为主, 而理论研究较少^[1~3], 主要原因在于物料结构和干燥过程本身的复杂性, 使得理论模型难以准确描述干燥过程中出现的多种复杂现象, 如物料干燥时的体积收缩特性等。文献[4~6]在建立干燥理论模型时曾考虑到物料的体积收缩, 但只简单地认为在整个干燥过程中物料体积随含湿量呈线性减少, 没有深入分析体积收缩产生的原因。

由于体积收缩特性是多孔物料在干燥过程中的一个固有属性, 它直接影响干燥过程中

的热质传递规律,进而涉及干燥过程的组织及干燥设备的设计^[7],因此,对多孔物料干燥时体积收缩特性的研究有着极其重要的理论意义和实用价值。为此,本文对多孔物料干燥时体积收缩产生的原因、物料种类和外部干燥条件对体积收缩的影响进行了初步的研究。

1 体积收缩的物理机制

湿多孔物料主要由固体间架和水分组成,在毛细多孔体中,水的存在方式是毛细管水分和表面附着水分^[8],因此,在干燥开始时,湿物料吸收干燥介质的热量,一方面用于表面附着水分蒸发,一方面使其自身温度提高。由于表面水分的蒸发,在物料表面和内部间将产生湿度差。在湿度差的推动下,内部水分将以液态水的形式向表面扩散,在此阶段,由于蒸发过程在表面上进行,在确定的干燥条件下,蒸发速度为常数,干燥过程处于恒速干燥阶段。干燥至一定时刻,当内部液态水的扩散速度小于表面蒸发速度后,在物料表面上就会形成干斑,蒸发过程开始向物料内部深入。随着干燥过程不断进行,干斑面积不断扩大,此阶段即为干燥过程第一降速段。当物料表面全部被干燥时,第一降速段结束,第二降速段开始,此时,蒸发过程全部在物料内部进行。在降速段毛细管内水分的蒸发速度主要取决于蒸发面的位置和蒸发弯液面上水蒸汽分压力 p_v ,按照开尔文定律,在半径为 r_1 、湿润角为 θ 的毛细管中,弯液面上蒸汽分压 p_v 与相同温度 T 下对应的饱和蒸汽压力 p_∞ 间有如下关系

$$p_v = p_\infty \exp\left(-\frac{2\sigma \cos\theta}{RT\rho r_1}\right) \quad (1)$$

式中, σ 为表面张力, R 为通用气体常数, ρ 为密度。由式(1)知,毛细管半径 r_1 愈小,蒸汽分压 p_v 愈低,传质势愈小,水分蒸发速度愈慢。由于在多孔体中毛细管孔径大小不一,因此,在不同毛细管中蒸发过程出现差异,大毛细管内水分蒸发较快,小毛细管内水分蒸发较慢。

在恒速干燥阶段,由于内部液态水的扩散过程和表面附着水分的蒸发过程对固体间架本身影响较小,因此,多孔物料体积收缩较小。当干燥过程进入降速阶段后,由于毛细孔中蒸发弯液面的形成,将会使毛细管壁的受力状况发生根本性的变化,如图 1 所示,根据力平衡有

$$\Delta p = p_v - p_c = 2\sigma \cos\theta / r_1 \quad (2)$$

即在蒸发弯液面两侧,由于表面张力 σ 的作用将产生压差 Δp ,孔隙半径 r_1 愈小,压差 Δp 愈大。若此毛细管内蒸发气相侧与相邻的充满空气和水蒸汽的大毛细管贯通,或者与此相邻的较大毛细管内水分已蒸发完,则可近似认为此毛细管壁外侧压力也为 p_c ,这样,在毛细管内液体段管壁两侧将承受一个较大的压差作用力 $\Delta p = p_v - p_c$,在此力的作用下,毛细管壁被压缩变形,从而使得整个物料产生体积收缩。由于第一降速阶段是弯液面的形成期,因此,体积收缩较大;在第二降速阶段,蒸发过程均在物料内部进行,弯液面仍然存在,但在此阶段新的弯液面形成较少,因此,体积收缩相对较小。

综上所述,在降速干燥期,多孔物料体积收缩率主要取决于孔隙率和毛细孔半径 r_1 的大小以及固体间架(毛细管壁)的强度,毛细孔径愈小、固体间架强度愈低,则体积收缩率愈

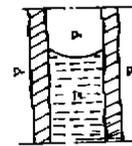


图 1 典型毛细管壁受力状况

大,反之亦然。

2 实验工况与物料

实验装置和实验程序与文献[1]相同。实验物料是鲜蘑菇、白炭黑和煤球。在这三种典型多孔物料中,鲜蘑菇属生物类物品,其平均毛细孔径较小,初始含水量较大,且固体间架质地柔软,强度很低;白炭黑是一种化工产品,主要成份为二氧化硅,其平均毛细孔径也较小,初始含水量也较大,但固体间架强度较高,煤球主要是由中梁山烟煤和粘土按一定比例配制而成,其平均毛细孔径较大,固体间架强度也较高。为了系统研究毛细多孔物料干燥时体积收缩特性,探讨各种参数对体积收缩率的影响,拟定的实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况

序 号	物 料 种 类	初 始 含 湿 量 $W_0/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	温 度 $t/^\circ\text{C}$	速 度 $u/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1	鲜蘑菇	12.4	50	2.5
2	鲜蘑菇	12.4	70	2.5
3	鲜蘑菇	12.4	70	0.75
4	白炭黑	8	110	0.79
5	白炭黑	8	110	1.51
6	白炭黑	8	90	0.91
7	白炭黑	8	120	0.78
8	煤球	0.29	70	0.64
9	煤球	0.29	50	0.7

为了准确而方便地测量干燥过程中物料的体积,白炭黑和煤球都预先制成直径约为 30 mm 的球形,鲜蘑菇取其自然形状。本实验中,体积收缩率 φ 定义为

$$\varphi = (V_0 - V) / V_0 \quad (3)$$

式中, V_0 为物料初始体积, V 为干燥至任意含湿量 w 时物料的体积。

3 实验结果与分析

3.1 体积收缩特性

图 2 和图 3 分别给出了鲜蘑菇和白炭黑干燥过程中的干燥速率 R 曲线和体积收缩率 φ 曲线的部分典型实验结果,由图可见,在不同的干燥阶段,多孔物料体积收缩特性完全不同。在干燥的预热阶段和恒速阶段(I 区),由于水分蒸发只在物料表面上进行,因此,体积收缩率 φ 较小;当干燥过程进入到第一降速阶段(II 区)时,干燥过程开始向物料内部深入,在毛细孔内将形成弯液面,此时,体积开始急剧收缩, φ 值随含湿量呈线性关系迅速增大;而当干燥过程进入到第二降速阶段(III 区)后,整个蒸发过程均在物料内部进行,体积收缩速度开

始下降, φ 值上升速度变慢。

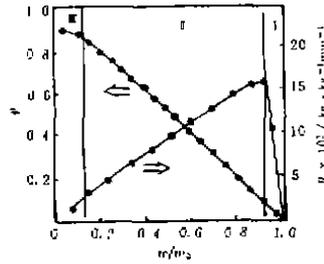


图 2 鲜蘑菇体积收缩特性
 $u = 0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t = 70^\circ\text{C}$

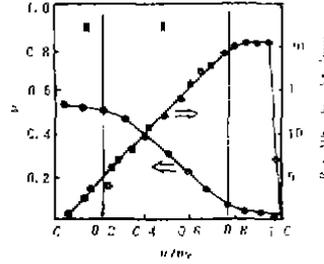


图 3 白炭黑体积收缩特性
 $u = 0.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t = 90^\circ\text{C}$

3.2 不同物料体积收缩特性比较

图 4 给出了三种多孔物料体积收缩特性的比较结果。显然, 由于煤球的平均毛细孔径最大, 固体间架强度最高, 因此, 体积收缩率最小; 相反, 鲜蘑菇的毛细孔径最小, 固体间架强度最低, 因此, 体积收缩率最大; 白炭黑位于两者之间。另外, 由于蘑菇和煤球在整个干燥过程中预热段和恒速段极短, 可以视为基本上都处于降速阶段, 因此, 其体积收缩率 φ 随含湿量的变化可近似作线性处理。相反, 由于白炭黑在整个干燥过程中预热段和恒速段较长, 因此, 必须分阶段处理其体积收缩特性。

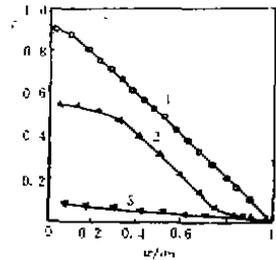


图 4 不同物料的体积收缩特性

- 1 蘑菇 $u = 0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t = 70^\circ\text{C}$
- 2 白炭黑 $u = 0.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t = 90^\circ\text{C}$
- 3 煤球 $u = 0.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t = 70^\circ\text{C}$

3.3 干燥介质速度和温度对体积收缩率的影响

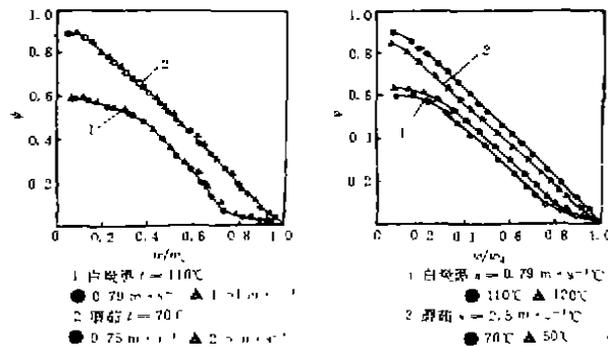


图 5 干燥介质速度和温度对体积收缩率的影响

图5给出了干燥介质速度和温度对多孔含湿物料体积收缩率影响的典型结果。由图可见,由于干燥介质速度的大小不影响固体间架强度及受力状况,因此,速度对体积收缩特性无影响;而干燥介质温度增加,将会使体积收缩加剧, φ 值增大,风温的影响可以从两方面加以说明,一方面,温度增加,将使物料温度上升。由式(2)知,作用于毛细管壁上的压差作用力增大,故 φ 值增大;另一方面,物料温度的上升还会使固体间架强度下降, φ 值也会增大。

4 结 论

1) 通过对干燥过程的机理分析指出,在多孔物料干燥过程中,由于毛细孔内弯液面形成而产生的作用于毛细管壁上的压差作用力是多孔物料体积收缩的主要原因;

2) 对三种典型多孔物料体积收缩特性的实验研究表明,鲜蘑菇 φ 值最大,煤球最小,白炭黑居中;

3) 多孔物料干燥过程中体积收缩率 φ 随风温的提高而增大,风速的变化对 φ 无影响。

参 考 文 献

- 1 靳明聪,李友荣等. 湿蚕蛹干燥过程的实验研究. 重庆大学学报1993,16(2),133~136
- 2 Zhao Yuzheng, Diffusion in Potato Drying, J. of Food Engineering, 1988, 7, 249~262
- 3 田小亮等. 因脯类物料干燥特性的研究. 工程热物理论文集, 西安交大出版社, 1990, 125~128
- 4 Misra. R N, Young J H. Numerial Solution of Simultaneous Moisture Diffusion and Shrinkage During Soybean Drying, Trans. of the ASAE, 1980
- 5 V. Pascual et al. Drying of Shrinkage Bodies, AIchE. J., 1985, 31(9), 1566~1588
- 6 李蔚,涂颖. 苹果片干燥过程扩散和收缩的模拟研究. 中国工程热物理学会第八届年会论文集, 第三分册, 北京, 1992
- 7 金国焱主编. 干燥设备设计. 上海科技出版社, 1986
- 8 A. C. 金兹布尔格著. 高奎元译. 食品干燥原理与技术基础. 北京, 轻工业出版社, 1986