

## 展望观察

## 过热蒸汽干燥技术的研究进展

史勇春<sup>1, 2</sup>, 李捷<sup>2</sup>, 李选友<sup>2</sup>, 吴茂刚<sup>2</sup>, 赵改菊<sup>2</sup>, 尹凤交<sup>2</sup>

(1 山东大学能源与动力工程学院, 山东济南 250061;

2 山东省科学院工业节能研究中心, 山东济南 250103)

**摘要:** 过热蒸汽干燥技术具有安全、节能、环保等诸多优点, 越来越受到广泛关注。对过热蒸汽干燥技术进行了简介, 分析了其优缺点。总结了过热蒸汽干燥的理论研究进展, 并对过热蒸汽干燥技术在食品、木材、纸张、污泥和褐煤等物料的应用现状进行了综合评述。总而言之, 过热蒸汽干燥技术是一种先进的干燥技术, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 过热蒸汽; 干燥; 理论; 应用

中图分类号: TQ028.6

文献标识码: A

文章编号: 1727-3080 (2012) 01-0003-07

## 引言

过热蒸汽干燥(Superheated Steam Drying)是指利用过热蒸汽直接与物料接触而去除水分的一种干燥方式。过热蒸汽干燥具有节能效果显著、干燥品质好、传热传质效率高、无失火和爆炸危险等特点<sup>[1]</sup>, 特别适合于粮食、蔬菜、水果等高湿物料的干燥, 是一种具有较大潜力的新型干燥技术。近年来, 过热蒸汽干燥技术被广泛用于各种物料的干燥过程, 应用研究取得了较大的进展。

早在 1908 年德国科学家 Hausbrand 就提出了过热蒸汽干燥的设想, 1920 年瑞典工程师 Karren 研制了以过热蒸汽为干燥介质的批式煤炭干燥机。20 世纪 50 年代开始人们才逐渐注意到过热蒸汽干燥的优点。1978 年第一次出现了工业用的过热蒸汽干燥机。20 世纪 80 年代以来许多发达国家致力于开发这项新技术的商业应用。国际干燥会议主席 A. S. Mujumdar 把过热

蒸汽干燥称为是一种在未来具有巨大潜力、实用可行的干燥技术<sup>[1]</sup>。近年来美国、加拿大、德国、日本、新西兰、丹麦和英国等发达国家已将过热蒸汽干燥技术广泛应用于食品、木材、纸张、褐煤等多种物料的干燥, 并且有多家干燥机制造厂提供商业用的过热蒸汽干燥设备。国内外学者也针对过热蒸汽干燥开展了大量的研究工作, 发表了诸多文献<sup>[2~11]</sup>。

## 1 过热蒸汽干燥技术简介

过热蒸汽干燥技术是利用物料内水分蒸发所形成的过热蒸汽与物料接触的干燥介质, 通过再热器或间接提供干燥所需要的能量。系统闭路循环, 全部为惰性无氧气氛环境。干燥所产生的物料内水分蒸发所形成的过热蒸汽被排出系统后, 可以回收全部干燥所供给的热量, 蒸汽耗量小, 热效率大大提高。过热蒸汽干燥技术原理图

收稿日期: 2012-3-5。

作者简介: 史勇春 (1961-), 男, 研究员, 主要从事干燥理论和技术的研究。Email: [shiyong-tl@hotmail.com](mailto:shiyong-tl@hotmail.com)。

如图1所示。

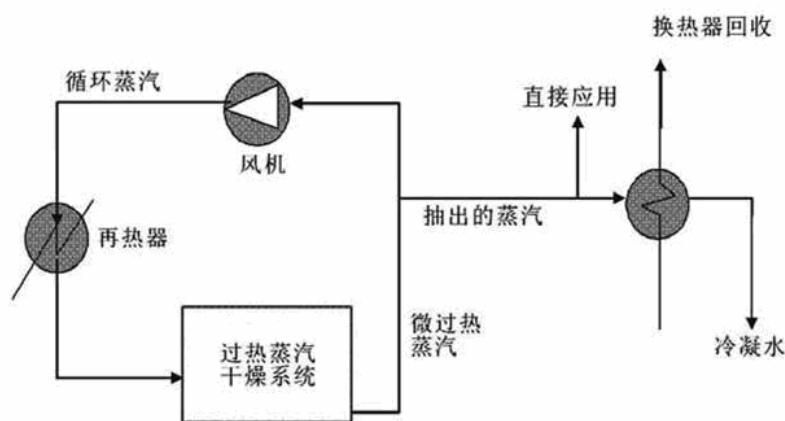


图1 过热蒸汽干燥技术原理图

## 2 过热蒸汽干燥优缺点<sup>[1, 12]</sup>

### 2.1 过热蒸汽干燥的优点

作为一种新型的干燥技术，过热蒸汽干燥主要具有以下优点：

(1) 热效率高、节能。过热蒸汽干燥的尾气仍然为蒸汽，可以回收其潜热。而传统的热风干燥的尾气中的蒸汽潜热则很难回收。

(2) 安全、无失火和爆炸危险。过热蒸汽干燥中不存在氧化和燃烧反应。

(3) 干燥速率快。过热蒸汽干燥的导热性和热容量高，因而物料的表面水分干燥速率快。

(4) 干燥后产品质量好。过热蒸汽干燥能够提高产品的品质和等级。

(5) 具有消毒灭菌作用。过热蒸汽干燥过程中物料的温度超过100℃，能对一些食品和药品进行消毒和灭菌。

### 2.2 过热蒸汽干燥的缺点

过热蒸汽干燥也存在一些缺点，具体如下：

(1) 设备复杂。过热蒸汽干燥过程不允许泄露，喂料和卸料时不能有空气渗入，因此需要采用复杂的喂料系统和产品收集系统，有时还需要废气回收系统，这导致过热蒸汽干燥设备复杂、费用高。

(2) 启动和停车时容易出现凝结现象。过热蒸汽温度高于100℃，而物料进入时的温度通常为环境温度，因此物料在被加热到蒸发温度过程中会不可避免地产生凝结。

(3) 不适合干燥热敏性物料。过热蒸汽干燥过程中物料温度超过100℃，有些物料可能会熔化、玻璃化或产生其它破坏。

## 3 过热蒸汽干燥的理论研究<sup>[1, 12~14]</sup>

和空气干燥相比，过热蒸汽干燥存在一个干燥逆转点。逆转点温度是在比较过热蒸汽干燥速度与传统空气干燥速度中而产生的概念。传统的观点认为，在热风干燥中，随着干燥过程的进行，干燥介质中湿含量将逐步增大，因而干燥速度会下降。在过热蒸汽干燥中，在其他条件相同的情况下，当蒸汽温度超过某一定值时，过热蒸汽的干燥速度要高于空气干燥的速度，相反低于此温度时，过热蒸汽的干燥速度低于空气干燥的速度。该温度点即被称之为逆转点温度。目前，大家公认过热蒸汽干燥逆转点温度在160~230℃之间。

过热蒸汽干燥过程也分成预热段、恒速段和降速段三个阶段，但其干燥曲线特点与热风干燥曲线略有不同。

预热段：过热蒸汽干燥中，湿物料温度上升

直到对应压力下的沸点温度。另外由于过热蒸汽是可凝结气体,所以当被干燥物料温度低于干燥操作压力下的饱和蒸汽温度时,干燥过热蒸汽在物料表面产生凝结现象,凝结放出的热量使得在干燥的预热段过热蒸汽与物料间存在更多的热量传递。但蒸汽的凝结使物料的湿度增加,所以需要重新干燥,从而加长了总干燥时间,因此了解蒸汽的凝结特性是非常必要的。由于蒸汽的凝结潜热非常大,因此过热蒸汽通过凝结换热来预热物料的过程是非常短暂的,在实际操作中难以精确测定。由于蒸汽的凝结增加了物料的初始含水量,因而干燥速率在起始段出现负增长,但时间极为短暂。

**恒速段:**在该阶段,干燥气体传递给物料的显热恰好等于水分从物料表面汽化所需的潜热,干燥速率维持不变,物料表面保持湿润。但在此过程中热空气干燥与过热蒸汽干燥的传热传质机理存在一些不同:在热空气干燥中,物料温度保持在相应温度下的湿球温度,热量通过边界层从热气流传到物料湿表面,水蒸汽也是通过该边界层从湿表面扩散到热气流中,传递过程的驱动力分别是热气流与物料湿表面的温度差和蒸汽分压差。而在过热蒸汽干燥中,物料温度始终维持在对应压力下的沸点温度,其热传递的驱动力仍然是热气流与湿表面的温度差。对于传质,由于只有一种气体即水蒸汽存在,水分从湿表面移动不是靠蒸汽分压差产生的扩散,而是通过压力差产生的体积流。

**降速段:**当干燥进行到物料表面不能维持湿润时,物料干燥速率开始下降,干燥过程进入降速干燥段。在此阶段,被干物料内部水分和热量的传递称为干燥速率的主要限定因素。干燥速率主要有干燥物料的性质而不是蒸汽的性质决定。降速干燥段用过热蒸汽物料会形成多孔的表皮,渗透性好,同时由于温度高,水分子更加活跃,使其干燥速率比热风的快。

泰国国王大学研究者对过热蒸汽干燥动力

学模型进行了研究<sup>[15~17]</sup>。建立一个半经验模型以估计过热蒸汽干燥过程中的有效扩散系数、预测肉片的水分变化及中心温度变化情况。分三个阶段建立:预热段、恒速段和降速段。预热段蒸汽冷凝速率通过由蒸汽传递的热量与蒸汽释放的全部热量的平衡关系得出。恒速段和降速段的水分变化均采用扩散方程得出。

## 4 过热蒸汽干燥的应用

### 4.1 食品干燥

目前过热蒸汽干燥技术应用较多的对象为食品,如稻米<sup>[18, 19]</sup>、玉米<sup>[20]</sup>、土豆<sup>[20, 21]</sup>、香蕉<sup>[22, 23]</sup>、大豆<sup>[24]</sup>、甜菜渣<sup>[25]</sup>、鱼<sup>[26]</sup>等。Rordprapat等<sup>[18]</sup>分别采用热风 and 过热蒸汽作为流化床干燥的介质,对稻米干燥进行了比较研究,结果表明过热蒸汽干燥由于初始阶段蒸汽的冷凝,导致过热蒸汽恒速段干燥速率不如热风干燥。同热风干燥产品相比,过热蒸汽干燥产品的峰值粘度、惯性粘度等较低,而蛋白质溶解度较高。Taechapairoj等<sup>[19]</sup>对稻米的过热蒸汽流化床干燥建立了数学模型,在不同工作状况下采用该模型的数值计算结果均与实验结果相吻合。Moreira<sup>[20]</sup>分别采用热风 and 过热蒸汽冲击干燥对玉米饼和土豆片等食品进行干燥,结果表明:当干燥温度高于130℃时,玉米饼的过热蒸汽干燥速率大于热空气干燥速率;与热风干燥相比,过热蒸汽冲击干燥的土豆片产品褪色少、营养损失少。Sotomea等<sup>[21]</sup>采用热水滴、过热蒸汽喷雾干燥以及它们的联合干燥方式对土豆进行干燥,发现采用热水滴干燥后的土豆变得柔软、易碎,且光电度和色质变差,相反过热蒸汽干燥和联合干燥则无此现象发生。Nimmol等<sup>[22, 23]</sup>采用低压过热蒸汽—远红外辐射联合干燥方式对香蕉进行干燥,结果表明:与真空—远红外辐射联合干燥方式相比,在干燥温度80℃时低压过热蒸汽—远红外辐射联合干燥方式干燥香蕉需要更长一些的干燥时间,而干燥温度90℃时正好相反;虽然干燥温度90℃时低压过热蒸汽—远红外辐

射联合干燥方式的干燥速率比干燥温度 80℃时的大,但其干燥产品更卷曲、颜色更黑。Prachayawarakorn 等<sup>[24]</sup>采用过热蒸汽流化床对大豆进行了干燥试验,研究表明大豆合适的干燥温度为 120℃~135℃,随着温度的升高尿素酶灭活、水分转移和褐色素生成都有所增加。Pronyk 等<sup>[25]</sup>采用过热蒸汽对甜菜渣、土豆片、面条、酒糟进行薄层干燥实验,结果表明过热蒸汽干燥速率大于热风干燥。Shigeru 和 Kazuo<sup>[26]</sup>对鲑鱼和墨鱼进行了过热蒸汽干燥和热风干燥实验,结果表明:过热蒸汽干燥能有较好的表面杀菌效果;随着干燥介质温度增加,物料表面硬度相应增大。

用过热蒸汽干燥食品时,物料的温度高达 100℃,因而对于热敏性食品容易产生热变性问题。解决的方法是采用低压过热蒸汽干燥,降低其饱和温度,使物料中的水分在 50~60℃时就能蒸发。对于食品干燥而言,过热蒸汽干燥的一个优点是干燥介质中没有氧气,干燥时不会产生氧化反应,因而可以避免褐变或降解问题。此外,由于干燥过程中除水蒸气之外没有其它气体,物料的结壳和收缩较少<sup>[20]</sup>。

#### 4.2 木材干燥

采用过热蒸汽对木材干燥具有无失火和爆炸危险、无氧化变色现象、裂纹和翘曲减少、不产生色斑和霉变等优点<sup>[1]</sup>。Rasmuson 等针对木材的过热蒸汽干燥进行过较为系统的研究<sup>[27~29]</sup>。实验研究了木材过热蒸汽干燥的平衡含水率,认为平衡含水率与过热蒸汽、温度和物料的特性有关;建立了二维数学模型,对木材过热蒸汽气力输送干燥机进行了模拟,描述了干燥过程中水分、蒸汽、空气和热量的传输过程;采用该模型对木材的热风和过热蒸汽干燥进行了比较,与热风干燥相比,过热蒸汽的最大干燥速率大、干燥时间短。

#### 4.3 纸张干燥

利用过热蒸汽干燥纸张,除具有干燥速率

快、能耗低等优点之外,还具有无起火危险和产品质量好等优点。Douglas 等<sup>[30~32]</sup>对纸张过热蒸汽干燥的工业潜力进行了研究,结果表明:与热空气干燥相比,纸张经过热蒸汽干燥后粘合度更高,表面特性变优,抗张强度增加约 23%;过热蒸汽冲击干燥的速率是热空气冲击干燥的两倍,并采用过热蒸汽冲击干燥和传统的转筒干燥相结合对纸张进行工业干燥。

#### 4.4 污泥干燥

Fitzpatrick<sup>[33]</sup>采用厌氧消化和过热蒸汽干燥联合方式对污泥进行处理。厌氧消化减少污泥的体积,并产生沼气提供热干燥所需的热能。在过热蒸汽干燥阶段,干燥机的热能一部分可以被回收,用于保持沼气池工作温度。热能分析显示厌氧消化和过热蒸汽干燥联合,通过调整操作参数可以实现系统热能的自平衡。

#### 4.5 褐煤干燥

Bongers 等<sup>[34, 35]</sup>通过实验研究分析了过热度对澳大利亚褐煤水分去除的影响。此外,还采用压汞仪、CO<sub>2</sub> 表面积分析仪和透射电子显微镜对高压过热蒸汽干燥的褐煤的收缩程度和产品的物理结构进行了研究。Chen 等<sup>[36, 37]</sup>首先针对褐煤过热蒸汽干燥建立了一个单颗粒模型,对褐煤的干燥过程以及逆转点温度进行了预测。在此基础上,建立了一个两相流体力学模型,来模拟褐煤过热蒸汽流化床的连续干燥过程。值得一提的是,该单颗粒模型建立时仅考虑了褐煤的外在水分(重力水和毛细水),而未考虑褐煤的内在水分(物理结合水和化学结合水),但实际干燥过程中内在水分的蒸发占据重要的作用,因此该模型仍不能准确地描述褐煤过热蒸汽干燥的实际过程。

### 5 结语

经国内外研究者的研究,过热蒸汽干燥技术已经取得了很多的研究成果,在理论和应用方面均有重要进展。但是,由于过热蒸汽干燥过程的复杂性,对该技术的研究还远未成熟,在理论和

应用中仍存在大量工作需要开展。因此,针对过热蒸汽干燥技术的研究仍将继续和深入。

## 参考文献

- [1] 潘永康, 王忠喜, 刘相东. 现代干燥技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 曹崇文, 连政国. 过热蒸汽干燥的机理与特性. 南京林业大学学报, 1997, 21(增刊): 35-38.
- [3] 孟令利. 氢氧化铝过热蒸汽气流干燥的设计研究. 硕士学位论文, 东北大学, 2003.
- [4] 宋洪波, 安凤平. 胡萝卜过热蒸汽膨化干燥工艺优化. 农业机械学报, 2010, 41(2): 127-131.
- [5] 袁佳丽, 郭宏伟. 过热蒸汽污泥干燥的机理与经济性分析. 化工装备与技术, 2010, 31(1): 5-7.
- [6] 宫英振, 牛海霞, 肖志锋, 刘相东, 杨德勇. 油菜籽过热蒸汽流化床常压干燥过程的数学模拟. 农业工程学报, 2010, 26(4): 351-356.
- [7] Z. Pakowski, A. Druzdzal, J. Drwiega. Validation of a model of an expanding superheated steam flash dryer for cut tobacco based on processing data. Drying Technology, 2004, 22(1-2): 45-57.
- [8] Z. Pakowski, R. Adamski. On prediction of the drying rate in superheated steam drying process. Drying Technology, 2011, 29(13): 1492-1498.
- [9] Ram Yamsaengsung, Surapit Tabtiang. Hybrid drying of rubberwood using superheated steam and hot air in a pilot-scale. Drying Technology, 2011, 29(10): 1170-1178.
- [10] Poomjai Sa-adchom, Thanit Swasdisevi <sup>†</sup>, Adisak Nathakaranakule, Somchart Soponronnarit. Drying kinetics using superheated steam and quality attributes of dried pork slices for different thickness, seasoning and fibers distribution. Journal of Food Engineering, 2011, 104: 105-113.
- [11] Shivmurti Shrivastav, B. K. Kumbhar. Drying kinetics and ANN modeling of paneer at low pressure superheated steam. J Food Sci Technol, 2011, 48(5): 577-583.
- [12] Arun S. Mujumdar. Handbook of Industrial Drying, Third Edition. CRC, 2006.
- [13] 刘玉容. 杨木真空过热蒸汽干燥规律的研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 2008.
- [14] 刘义明. 过热蒸汽流化床内反应干燥制备 MAP 的实验研究. 硕士学位论文, 四川大学, 2007.
- [15] P. Suvarnakuta, S. Devahastin, A. S. Mujumdar. A mathematical model for low pressure superheated steam drying of a biomaterial. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(7): 675-683.
- [16] S. Kittiworrawatt, S. Devahastin. Improvement of a mathematical model for low pressure superheated steam drying of a biomaterial. Chemical Engineering Science, 2009, 64(11): 2644-2650.
- [17] P. Sa-adchom, T. Swasdisevi, A. Nathakaranakule, S. Soponronnarit. Mathematical model of pork slice drying using superheated steam. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 499-507.
- [18] Wathanyoo Rordprapat, Adisak Nathakaranakule, Warunee Tia and Somchart Soponronnarit. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam. Journal of Food Engineering, 2005, 71(1): 28-36.
- [19] Chaiyong Taechapairoj, Somkiat Prachayawarakorn and Somchart Soponronnarit. Modelling of parboiled rice in superheated-steam fluidized bed. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 411-419.
- [20] Rosana G. Moreira. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 291-295.
- [21] Itaru Sotomea, Makiko Takenaka, Shigenobu Koseki, Yukio Ogasawara, Yoshitaka Nadachi, Hiroshi Okadome and Seiichiro Isobe. Blanching of potato with superheated steam and hot water spray. LWT -

- Food Science and Technology, 2009, 42(6): 1035–1040.
- [22] Chatchai Nimmol, Sakamon Devahastin, Thanit Swasdisevi and Somchart Soponronnarit. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(3): 624–633.
- [23] Chatchai Nimmol, Sakamon Devahastin, Thanit Swasdisevi and Somchart Soponronnarit. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14-15): 2483–2494.
- [24] Somkiat Prachayawarakorn, Paveena Prachayawasin and Somchart Soponronnarit. Effective diffusivity and kinetics of urease inactivation and color change during processing of soybeans with superheated-steam fluidized bed. *Drying technology*, 2004, 22(9): 2095–2118.
- [25] C. Pronyk, S. Cenkowski and W. E. Muir. Drying foodstuffs with superheated steam. *Drying Technology*, 2004, 22(5): 899–916.
- [26] Abe Shigeru and Miyashita Kazuo. Surface sterilization of dried fishery products in superheated steam and hot air. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology*, 2006, 53(7): 373–379.
- [27] Hans Bjork, Anders Rasmuson. Moisture equilibrium of wood and bark chips in superheated steam. *Fuel*, 1995, 74(12): 1887–1890.
- [28] Christian Fyhr and Anders Rasmuson. Some aspects of the modelling of wood chips drying in superheated steam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(12): 2825–2842.
- [29] Anders Johansson, Christian Fyhr and Anders Rasmuson. High temperature convective drying of wood chips with air and superheated steam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(12): 2843–2858.
- [30] W. J. M. Douglas. Drying paper in superheated steam. *Drying technology*, 1994, 12(6): 1341–1355.
- [31] J. M. McCall and W. J. M. Douglas. Enhancement of properties of diverse grades of paper by superheated steam drying. *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 1255–1262.
- [32] James M. McCall, Elizabeth Cacchione and W. J. Murray Douglas. Superheated steam drying of paper from chemithermomechanical pulp, *TAPPI JOURNAL*, February 1994, 77(2): 115–122.
- [33] J. Fitzpatrick. Sludge processing by anaerobic digestion and superheated steam drying. *Water Research*, 1998, 32(10): 2897–2902.
- [34] G. D. Bongers, W. R. Jackson, F. Woskoboenko. Pressurised steam drying of Australian low-rank coals. Part 1. Equilibrium moisture contents. *Fuel Processing Technology*, 1998, 57(1): 41–54.
- [35] G. D. Bongers, W. R. Jackson, F. Woskoboenko. Pressurised steam drying of Australian low-rank coals. Part 2. Shrinkage and physical properties of steam dried coals, preparation of dried coals with very high porosity. *Fuel Processing Technology*, 2000, 64(1–3): 13–23.
- [36] Z. Chen, W. Wu, P. K. Agarwal. Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle. *Fuel*, 2000, 79(8): 961–973.
- [37] Z. Chen, P. K. Agarwal, J. B. Agnew. Steam drying of coal. Part 2. Modeling the operation of a fluidized bed drying unit. *Fuel*, 2001, 80(2): 209–223.

# Research progress of the Superheated Steam Drying Technology

*SHI Yong-chun<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, LI Xuan-you<sup>2</sup>, WU Mao-gang<sup>2</sup>,*

*ZHAO Gai-ju<sup>2</sup>, YIN Feng-jiao<sup>2</sup>*

(1 School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2 Industrial Energy Conservation Research Center of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250103, China)

**Abstract:** The superheated steam drying technology has lots of advantages such as safe, energy-saving, pollution-free and so on, so it causes more and more extensive concern. The superheated steam drying technology is introduced and its merits and faults are analyzed. The theoretical research progress of the superheated steam drying is summarized and the recent application of the materials including the food, wood, paper, sludge and lignite is stated. In brief, the superheated steam drying technology is an advanced drying technology and it has wide application prospects.

**Key words:** superheated steam; drying; theory; application