

气体射流冲击技术在食品领域中的应用

李文峰, 肖旭霖*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 在食品领域中, 气体射流冲击技术主要应用于食品的干燥和焙烤等方面。作为一种新的干燥技术, 相比传统的热风干燥不仅具有更高的对流换热系数、干燥速度, 以及更低的能耗, 而且加工品品质大大提高, 有着广泛的应用前景。本文对射流冲击新技术应用于食品热加工领域的应用研究现状进行分析综合, 概括该技术的主要技术特点, 对发展前景及研究方向进行阐述。

关键词: 气体射流冲击; 食品干燥; 进展

Applications of Air-impingement Jet Technology in the Field of Food

LI Wen-feng, XIAO Xu-lin*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In the food industry, air-impingement jet technology is mainly used for food drying and baking. Compared to the traditional hot-air drying method, this novel drying technology has multiple advantages such as higher heat-transferring coefficient and drying rate, lower power consumption, and improved product quality. In this paper, the current applications of air-impingement jet technology in food thermal processing are systematically reviewed. Its major technical characteristics are summarized and future development trends are discussed.

Key words: air-impingement jet technology; food drying; progress

中图分类号: TQ 028.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)19-0349-04

食品的人工干燥常用方法有^[1]: 常压空气对流干燥法、接触式干燥法、升华干燥法、辐射干燥法、真空冷冻干燥。以上方法中, 虽然真空冷冻干燥是保持食品品质最好的方法^[2], 但是其生产能耗高于热风干燥的4~8倍^[3], 其他干燥方法虽成本较低, 但产品品质较真空冷冻干燥差。气体射流冲击干燥新技术, 相比传统的热风干燥技术在保证品质的基础上具有更高的对流换热系数、干燥速度, 以及更低的能耗^[4-5]。Yamato^[6]发明的滚筒式气体射流冲击干燥机, 其传热、传质速率是常规式滚筒干燥机的2倍, 且设备生产成本低。气体射流冲击焙烤技术作为一种新的焙烤手段, 也同样具有高效率、低能耗等特点。气体射流冲击技术在食品干燥与烘焙领域应用在世界上也仅有10多年。本文就目前国内外一些气体射流冲击技术在食品领域中的应用现状进行阐述。

1 气体射流冲击技术

气体射流冲击技术, 最早应用于航天和一些高密度

的电器设备及高集成的电子元件等工业领域的快速冷却系统中, 以后逐渐将冷气流转变为热气流, 从而渗透到纸张、纺织和胶片等一些主要含表面水物料的工业领域干燥中^[7]。目前, 逐渐用于研究食品的焙烤^[7]、烫漂^[8]、干燥^[9]等领域, 但工业化生产仅限于小食品的干燥。

1.1 气体射流冲击技术原理

气体射流冲击技术是将具有一定压力及温度的气体, 通过狭缝形或圆形喷嘴直接喷射到待干燥物料表面, 从而对物料进行加热^[10]。由于气体具有极高的喷出速度, 且喷嘴距物料表面距离较近, 流体的流程短, 当其直接冲击到物料表面时, 气流与物料表面之间会产生很薄的气体边界层^[11]。这大大提高了热质交换速率, 因而传热系数比一般热风干燥高出几倍乃至一个数量级^[12]。从干燥原理看, 气体射流冲击干燥的原理与穿流干燥原理相近, 但气体射流冲击干燥的干燥速度高于穿流干燥^[8]。气体射流冲击技术在脱壳^[11]和烫漂^[5]等方面的原理也是运用其良好的加热性能。

收稿日期: 2011-09-11

作者简介: 李文峰(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工工程。E-mail: 840920095@qq.com

*通信作者: 肖旭霖(1955—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品加工工程。E-mail: xliao@snnu.edu.cn

1.2 气体射流冲击加热工艺流程

气体射流冲击加工工艺一般流程为^[9-11]: 原料选取→原料清洗→切分→护色处理→气体射流冲击加热→后处理。当然, 对于不同的食品原料和加工目的, 工艺流程会有一些调整。

1.3 气体射流冲击加热技术特点

由于气体射流技术与其他技术相比有传热系数高、传热速率可控的内在优势, 主要技术特点体现在: 1) 传热效率高、干燥速度快, 比普通热风干燥节约能源, 比普通烤箱节能20%^[11]; 2) 由于气流加压、加热后以较高的流速冲击物料表面, 气流与物料表面的边界层非常薄, 获得的传热特性使物料在较短时间内达到或接近冲击流的温度, 达到干燥或熟化的目的, 在干燥和焙烤领域有广阔应用前景; 3) 由于气流速度高, 且高速通过物料表面, 物料在干燥室内处于游动状态, 避免了辐射热源对物料辐射能量传递的不均匀和局部过热的矛盾, 不会造成物料边角局部焦糊问题。产品色泽均匀一致; 4) 此方法热交换迅速、干燥时间短, 与一般热风干燥方法相比, 产品营养成分损失少、收缩倾向减少、组织蓬松度增加、酥脆性较常规干燥品好、加工成本相对减少; 5) 在物料脱壳与烫漂工艺中有其独特的优势。在原料脱壳方面, 气体射流冲击能很好地解决板栗脱壳的难题^[13], 经此方法处理不仅脱壳效率高且产品品质优秀, 在脱壳的同时, 还起到了高温灭酶的作用^[11]。在物料烫漂工艺中, 该方法的传热介质为高温气流, 既满足了物料对高温烫漂的要求, 又可利用冷气流冷却烫漂后的物料, 既不产生污水, 而且产品品质好^[5]。不仅如此, 由于作用时间短且烫漂过程原料不与水或水蒸气接触, 从而使产品营养素得到较好保存^[5]。

2 气体射流冲击技术在肉类产品加工中的应用

气体射流冲击技术的高效性, 可使食品加工时间缩短。传统北京烤鸭在高温下长时烤制, 表皮及环境易被强致癌、致突变物质污染, 气体射流冲击烘烤技术, 使鸭坯在较短的时间内获取足够热量, 达到降低污染的目的。气体射流冲击烤鸭设备^[14-16], 经烤制工艺优化后发现该设备不仅加工时间短且能保持烤鸭特有风味和口感^[14-17, 18], 还能有效减少多环芳烃(PAHs)的产生^[14-15, 19], 安全性优于传统方法, 且比传统方法更适合于烤鸭的烤制。

Bórquez^[20]研究发现气体射流冲击干燥与传统植物回转式干燥机相比, 射流冲击干燥能很好地防止原有鱼子中的 n -3脂肪酸被氧化, 得到较高品质的干鱼子。他还通过对鱼饼的干燥, 发现在恒率干燥阶段, 干燥气体温度和鱼饼大小对干燥有明显影响, 增加鱼饼含水量, 可防

止鱼饼在干燥时的氧化^[21]。

从以上研究可知, 气体射流冲击技术在肉类加工领域的研究主要集中在烤鸭设备及焙烤和鲭鱼制品干燥两个方面, 其中又以营养安全研究为重点, 如表1所示。

表1 气体射流冲击在肉类研究中的应用
Table 1 Applications of air-impingement jet technology in meat product processing

分类	内容	原料	应用
	设备	烤鸭	针对烤鸭特点的气体射流冲击焙烤装备 ^[14-16]
焙烤	工艺	烤鸭	对比传统烤制与气体射流冲击烤制对“北京烤鸭”品质的影响并探讨最佳焙烤条件 ^[16-17]
	安全	烤鸭	气体射流冲击烤鸭加工中多环芳烃的安全性 ^[14-15, 17]
干燥	营养	鲭鱼	鱼子中 n -3脂肪酸的稳定性 ^[20] ; 鱼饼在干燥工程中的氧化 ^[21]

3 气体射流冲击技术在果蔬加工中的应用

3.1 气体射流冲击技术在水果加工中的应用

表2 气体射流冲击在水果研究中的应用
Table 2 Applications of air-impingement jet technology in fruit product processing

分类	内容	原料	应用
		葡萄	干燥工艺及干燥过程中营养成分变化 ^[23, 25]
	工艺	苹果	利用感官评价和成分变化优化干燥工艺 ^[10]
		板栗	通过色泽优化板栗气体射流冲击干燥工艺 ^[22]
		板栗	不同条件下板栗的气体射流冲击干燥曲线 ^[22]
干燥	干燥特性	葡萄	无核紫葡萄气体射流冲击干燥曲线、水分有效扩散系数以及干燥活化能 ^[23]
		杏子	杏子气体射流冲击干燥曲线、水分有效扩散系数以及干燥活化能 ^[9]
		哈密瓜	哈密瓜片气体射流冲击干燥干燥曲线、水分有效扩散系数以及干燥活化能 ^[24]
	设备	葡萄	利用气体射流冲击干燥无核紫葡萄 ^[25]
脱壳	工艺	板栗	气体射流冲击板栗破壳工艺流程 ^[11]
	设备	板栗	板栗破壳气体射流冲击设备 ^[11]
烫漂	工艺	葡萄	气体射流冲击烫漂对葡萄外观的影响 ^[5]

如表2所示, 气体射流冲击技术在水果方面的研究, 主要是对水果的干燥工艺和干燥特性进行研究, 且主要是对葡萄和板栗2种水果进行探讨。通过对杏子^[9]、板栗^[22]、葡萄^[23]、哈密瓜^[24]干燥特性的研究, 发现气体射流冲击干燥的整个干燥过程属于降速干燥, 风温和风速对板栗的干燥速率均有显著影响, 但风温对其影响比风速更为突出。气体射流冲击干燥技术与传统热风干燥技术相比, 不仅产品品质优良, 而且干燥速度明显加快, 节约了时间和能源^[9-10, 25]。目前, 该技术在葡萄的干燥加工中

比较成熟, 已有气体射流冲击干燥无核紫葡萄成功中试投产^[25]。且气体射流冲击加工技术, 不论是对水果原料的干燥还是烫漂, 对营养素的破坏程度均很小^[5,23]。

常见的剥壳方法^[26]有: 碾搓法、摩擦法、撞击法、剪切法、挤压法、气爆法等。而气体射流冲击技术也可用于脱壳。如今板栗的剥壳难题已经利用气体射流冲击技术解决了, 且利用该技术生产的开口板栗具有剥壳容易、安全卫生、保存长期的特点^[11,13]。

3.2 气体射流冲击技术在蔬菜加工中的应用

表3 气体射流冲击在蔬菜研究中的应用

Table 3 Applications of air-impingement jet technology in vegetable processing

内容	原料	应用
烘烤	工艺	气体射流冲击烘烤甘薯流程及优劣分析 ^[7] 通过物料温度变化来优化工艺 ^[28] 利用物料温度及成分变化进行工艺优化 ^[27]
		马铃薯 通过物料温度及淀粉显微结构进行气体射流冲击烤制工艺优化 ^[29]
		玉米 主要依据物料显微结构优化工艺 ^[30-31]
干燥	干燥特性	玉米 玉米气体射流干燥温度分布及水分活度特性 ^[32] ; 玉米气体射流干燥曲线 ^[30-31] 线辣椒 线辣椒气体射流冲击干燥曲线、水分有效扩散系数以及干燥活化能 ^[33]
		杏鲍菇 依据感官评价和酶活优化烫漂工艺 ^[5] ; 利用酶活优化气体射流冲击烫漂工艺 ^[34] 胡萝卜 通过复水率和色泽优化胡萝卜的气体射流冲击烫漂工艺 ^[8] 扁豆 通过感官评价和酶活优化烫漂工艺 ^[5]

如表3所示, 气体射流冲击技术在蔬菜加工方面主要用于甘薯的烘烤和玉米制品的干燥以及一些蔬菜原料的烫漂。

气体射流烘烤技术在薯类作物中应用较多。气体射流冲击技术烘烤的甘薯产品品质优良, 且在加工中无污染、加工速度快、能耗低, 还使烤制过程实现了机械化作业^[7,27-28]。甘薯在气体射流的烘烤中, 甘薯内部温度变化曲线, 分为温度迅速上升和熟化两个阶段^[27]。气体射流冲击技术在马铃薯的烤制中也有运用, 其产品口感良好, 并了解了烤制过程中其淀粉粒的显微结构变化情况^[29]。

气体射流干燥技术在外国玉米制品的研究中运用广泛。它与水果干燥特性一样, 蔬菜的干燥速度主要也是受空气温度的影响^[30-33]。但不同干燥介质对干燥速度也有影响, 就热空气和过热蒸汽两种干燥介质对干燥速度的影响而言, 在相同的条件下使用过热蒸汽比热空气干燥玉米片速度更快, 且过热蒸汽冲击干燥比用热风干燥使色泽和营养损失更小^[35]。气体射流冲击干燥技术加工的玉米薄饼, 具有质地脆、微观结构更加平整、营养损失小的特点, 可用于生产具有良好风味和质地的低油玉米

薄饼^[30-31,35]。但射流冲击干燥玉米制品时, 会由于过度局部的不均匀干燥, 导致玉米制品品质、组织结构变差、营养损失增加等^[32]。

气体射流烫漂对胡萝卜的品质影响因素中, 烫漂温度起着主要的作用, 烫漂温度越大, 色泽越佳^[8]。通过对杏鲍菇^[5,34]和扁豆^[5]的烫漂实验发现, 气体射流烫漂蔬菜具有烫漂效果好、能耗低、节约用水; 可起到杀菌、护色、钝化酶活等优点。

4 气体射流冲击技术在食品领域的数学模型及其他研究

随着计算机技术的发展, 用数学模型模拟对射流冲击加工过程中的一些规律进行研究日益增多。在这些研究中, 国外一般采用了 κ - ω 等湍流模型对气体射流冲击加工食品时的流体进行数学模型模拟研究^[36-37]。如Olsson等^[36]用 κ - ω 、 κ - ω 、SST模型对片状食品进行数学模型研究, 发现SST模型好于其他两种。而国内主要是对食品干燥的数学模型进行研究, 发现哈密瓜^[24]和无核紫葡萄^[38]薄层干燥的水分比的预测模型为Modified Page模型。数学模型在板栗的气体射流冲击脱壳研究中也有利用, 并在进一步的实验中证实其预测可行性^[13]。但在低温蒸汽干燥下的蒸汽冷凝不能被预测模型对水分含量的预测结论所解释^[39]。因此在气体射流冲击的数学模型研究方面还有许多待解决的问题。

其他方面, 高振江等^[4]研究了气体射流冲击下物料的流化现象, 为食品原料的气体射流冲击——流化加工奠定了基础。Sarkar等^[40]为了便于观察气体射流冲击时流体的状态, 对气体射流流体可视化技术进行了研究, 为进一步高效地研究气体射流技术在食品工业中的应用做了技术指导。

5 结语

气体射流冲击技术在食品领域中已有了较多的应用, 但应用还不够广泛和深入。气体射流冲击技术在干燥、烘烤、烫漂和脱壳等方面具有良好的加热性能和传热系数, 且与传统技术相比, 不仅具有效率高、成本低、污染小等特点, 而且具有较高的加工品质, 还可以广泛用于畜产品和果蔬加工。但对气体射流冲击技术在各个加工工艺及不同物料加工中的传热系数和传热机理、加工中产品的营养变化等方面的研究还不够深入。目前气体射流技术还运用在搅拌发酵罐的开发和应用中^[41]。该技术不仅在食品领域中运用广泛也运用于中药材领域, 如肉苁蓉^[42]的干燥。气体射流冲击技术除文中所述的一些加工领域外, 还有更为广泛的应用空间, 例如在节能工艺设备研究、传统食品的射流加工、杀菌、面条粉条的干燥、保

健食品的快速加工等领域。虽然前人已对气体射流冲击技术作了广泛研究,但在传热和传质转换同时发生时的相互依存关系以及流体动力学方面还需要全面分析及深入研究^[37]。特别是在农产品和食品加工领域引入射流冲击技术加热后,由于其原料形状规格的差异、冷却或加热对象的改变,使得环境和条件发生了一定变化,因而在食品领域中,射流技术应用研究具有特殊性,在其理论研究和实践中传热传质及流体动力学需作深入探讨;另外,射流振荡方式对湍流流线、湍流程度及传热特性的影响研究,对增强热效率减少能量输入节约能源有重要意义^[43];开展连续多重射流冲击干燥系统及其机理的研究,以便为工业化连续射流干燥(加热)系统的研发提供理论依据;其次,余热回收利用的射流冲击干燥系统的研究和探索更为高效节能的射流冲击加工系统均具有重要意义。相信在广大专家和学者的共同努力研究下,气体射流冲击技术在我国的食品领域中的研究和应用将达到更高的水平。

参考文献:

- [1] 马长伟, 曾名勇. 食品工艺学导论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 164-179.
- [2] IRZYNIEC Z, KLIMEZAK J, MICHALOWSKI S, et al. Freeze-drying of the black currant juice[J]. *Drying Technology*, 1995(13): 417-424.
- [3] 乔晓玲, 闫祝炜, 张原飞, 等. 食品真空冷冻干燥技术研究进展[J]. *食品科学*, 2008, 29(5): 469-474.
- [4] 高振江, 曹崇文, 王德成. 气体射流冲击下颗粒物料流态化参数的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2001, 6(2): 82-86.
- [5] 吴薇, 高振江, 杜志龙. 环保型气体射流冲击烫漂技术的研究[J]. *粮油加工与食品机械*, 2003(11): 63-64.
- [6] YAMATO Y. Aeration-type rotary dryer: US, 5996245[P]. 1999-12-07.
- [7] 魏泉源, 高振江, 魏秀青, 等. 气体射流冲击技术及其在甘薯烘烤中的应用[J]. *粮油加工与食品机械*, 2003(10): 15-17.
- [8] 杜志龙, 高振江, 温朝晖, 等. 胡萝卜的气体射流冲击烫漂与干燥试验研究[J]. *粮食与食品工业*, 2010, 17(1): 22-26.
- [9] 肖红伟, 张世湘, 白峻文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 318-323.
- [10] 孟庆辉, 肖旭霖, 吕晓东. 苹果片气体射流冲击干燥工艺的优化[J]. *农产品加工: 学刊*, 2008(11): 56-59.
- [11] 魏秀青, 高振江, 吴薇. 气体射流冲击板栗破壳技术与开口即食板栗加工试验研究[J]. *粮油加工与食品机械*, 2003(5): 55-56.
- [12] 高振江. 气体射流冲击颗粒物料干燥机理与参数试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
- [13] 林海, 高振江. 响应曲面法优化气体射流冲击锥栗脱壳工艺[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(4): 71-75.
- [14] 杨文侠, 张世湘, 姜新杰, 等. 气体射流冲击烤鸭加工技术及抑制多环芳烃研究[J]. *食品科技*, 2009, 34(7): 90-95.
- [15] 杨文侠, 张世湘, 高振江, 等. 气体射流冲击烤鸭加工装备技术及食用安全性评估[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(2): 116-120.
- [16] 隋美丽, 高振江, 方小明, 等. 基于气体射流冲击技术北京烤鸭机的实验研究[J]. *食品科技*, 2008(8): 88-90.
- [17] 隋美丽, 高振江, 倪志江, 等. 气体射流冲击“北京烤鸭”烤制过程皮下温度与膨化关系的研究[J]. *食品科技*, 2008(10): 68-70.
- [18] 马玲娟, 高振江, 姜新杰. 气体射流冲击“北京烤鸭”鸭皮膨化试验研究[J]. *食品科技*, 2006(8): 142-162.
- [19] 姜新杰. “北京烤鸭”烤制过程中抑制多环芳烃产生的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [20] BÓRQUEZ R. Stability of *n-3* fatty acids in fish particles during processing by impingement jet[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2/3): 245-247.
- [21] BÓRQUEZ R, WOLF W, KOLLER W D, et al. Impinging jet drying of pressed fish cake[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 40(1/2): 113-120.
- [22] 姜正, 高振江, 肖红伟, 等. 板栗气体射流冲击干燥特性研究和工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 368-373.
- [23] XIAO Hongwei, PANG Changle, WANG Lihong, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 233-240.
- [24] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 382-388.
- [25] 杨文侠, 高振江, 谭红梅, 等. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄及品质分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 237-242.
- [26] 张裕中. 食品加工技术装备[M]. 2版. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 100-101.
- [27] 魏秀青. 气体射流冲击传热及甘薯烘烤试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [28] 高振江, 王德成, 吴薇, 等. 气体射流冲击烘烤甘薯的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(2): 55-57.
- [29] 吴薇, 高振江. 马铃薯在气体射流冲击烤制过程中其淀粉粒的显微结构变化[J]. *粮油加工与食品机械*, 2003(10): 18-19.
- [30] LUJAN-ACOSTA J, MOREIRA R G. Reduction of oil in tortilla chips using impingement drying[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1997, 30(8): 834-840.
- [31] LUJAN-ACOSTA J, MOREIRA R G, SEYED-YAGOOBI J. Air-impingement drying of tortilla chips[J]. *Drying Technology*, 1997, 15(3/4): 881-897.
- [32] BONIS M V D, RUOCCO G. An experimental study of the local evolution of moist substrates under jet impingement drying[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(1): 81-87.
- [33] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 线辣椒气体射流冲击干燥特性的研究[J]. *食品科技*, 2011, 36(7): 80-85.
- [34] 吴薇, 高振江, 秦新忠, 等. 气体射流冲击食用菌烫漂新工艺试验研究[J]. *食用菌*, 2004(2): 42-43.
- [35] MOREIRA R G. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 49(4): 291-295.
- [36] OLSSON E E M, AHRNÉL M, TRÄGÅRDH A C. Heat transfer from a slot air jet impinging on a circular cylinder[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63(4): 393-401.
- [37] BONIS M V D, RUOCCO G. Modelling local heat and mass transfer in food slabs due to air jet impingement[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1): 230-237.
- [38] 杨洋, 高振江, 杨文侠. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄的数学模型[J]. *农产品加工: 学刊*, 2010(4): 80-82.
- [39] BRAUD L M, MOREIRA R G, CASTELL-PÉREZ M E. Mathematical modelling of impingement drying of corn tortillas[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 50(3): 121-128.
- [40] SARKAR A, SINGH R P. Air impingement technology for food processing: visualization studies[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2004, 37(8): 873-879.
- [41] 杨瑞, 周肇义, 蒋述曾. 新型高效射流搅拌发酵罐的开发和应用[J]. *食品与发酵工业*, 1999, 25(5): 41-63.
- [42] 杜友, 郭玉海, 崔旭盛, 等. 鲜猪肉苡蓉气体射流冲击干燥工艺[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 334-337.
- [43] BHATT S, AHMED A. A note on unsteady impinging jet heat transfer[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2010, 35(5): 633-637.