

# 我国储粮机械通风技术发展

赵会义<sup>1</sup>,张宏宇<sup>2</sup>,李福君<sup>1</sup>,曹 阳<sup>1</sup>,马春云<sup>3</sup>,

王远成<sup>4</sup>,祝祥坤<sup>1</sup>,石天玉<sup>1</sup>,汪中明<sup>1</sup>,魏雷<sup>1</sup>

(1. 国家粮食局科学研究院,北京 100037; 2. 山东费县鲁南国家粮食储备库,山东 临沂 273400;  
3. 沈阳师范大学 粮食学院,辽宁 沈阳 110034; 4. 山东建筑大学,山东 济南 273400)

**摘要:**详细论述了我国储粮通风技术发展历程,储粮通风技术在控温储粮、节能减损、智能控制、就仓干燥、害虫防治、通风方式以及通风理论研究方面的进展,对了解储粮通风最新理论和应用技术具有重要参考价值。

**关键词:**储粮通风;横向通风;通风降温;粮堆;通风道

**中图分类号:**TS 210.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)S-0004-07

## Development of the mechanical ventilation technology in grain warehouse in China

ZHAO Hui-yi<sup>1</sup>, ZHANG Hong-yu<sup>2</sup>, LI Fu-jun<sup>1</sup>, CAO Yang<sup>1</sup>, MA Chun-yun<sup>3</sup>,

WANG Yuan-cheng<sup>4</sup>, ZHU Xiang-kun<sup>1</sup>, SHI Tian-yu<sup>1</sup>, WANG Zhong-ming<sup>1</sup>, WEI lei<sup>1</sup>

(1. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037;

2. Shandong Feixian Lunan State Grain Reserve Depot, Linyi Shandong 273400;

3. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang Liaoning 110034;

4. Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong 250101)

**Abstract:** The development process of grain storage ventilation technology in China was discussed in detail, including progress in grain storage in controlling temperature, saving energy, decreasing loss, intelligent control, in-store drying, pest control and research on ventilation mode and theory, which provided reference for understanding the latest theory and application of ventilation technology.

**Key words:** stored grain ventilation; transverse ventilation; aeration-cooling; grain heap; ventilation duct

## 1 我国储粮通风技术的发展历程

我国储粮机械通风技术,已有 50 余年的历史,早在 20 世纪五十年代,武汉、北京、南京、苏州等地的粮食部门就采用前苏联的机械通风装置,对稻谷和玉米进行了机械通风降温的试验,取得了一些经验。原粮食部粮食科研所在 1958 年编写的《贮粮机械通风参考资料》中,选编了原苏联的“仓库和大谷仓中谷物机械通风”和“玉米穗的机械通风”两篇文章和美国 1957 年《农业工程》杂志“储藏谷物的通风冷却”一文。该时期是我国储粮机械通风的起步时期<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2015-01-30

基金项目:2013 年粮食行业公益科研专项(201313001,201313004),  
“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD17B01)

作者简介:赵会义,1974 年出生,男,副研究员。

通讯作者:魏雷,1959 年出生,男,研究员。

20 世纪五十年代后期,江苏省粮食部门就开始对储粮进行单管通风降温试验。六十年代予以推广,并在单管通风的基础上,进行了多管通风。到了七十年代初进行了地槽通风试验,七十年代末又摸索运用存气箱进行机械通风,并在八十年代迅速发展。据统计到 1985 年底,江苏全省机械通风设备已有 2450 台套,其中:单管通风机 1604 套,多管通风机 38 套,离心式通风机 808 台。配备机械通风设备的仓容和用机械通风方法处理的粮食数量逐年增加,1965 年机械通风储粮约 15 万 t;1978 年机械通风仓容为 95 万 t,机械通风储粮已达 75 万 t;20 世纪八十年代,储粮机械通风技术在我国得到研究和推广应用,到 1985 年,机械通风仓容达 250 万 t,机械通风储粮达 200 万 t<sup>[2]</sup>。

在九十年代,我国的机械通风储粮技术不断提高。1991年商业部粮食储运局制定了“机械通风储粮技术规程(试行)”。自1998年以来,通过三批大规模国家粮食储备库建设,推广储粮“四合一”技术,机械通风的设计、应用都得到显著提高。2002年1月国家粮食局对原“机械通风储粮技术规程(试用)”进行了修订,作为新的粮食行业标准进行实施,标志着我国储粮通风技术应用进入了一个新阶段。

到2005年底,全国有16910万t仓房实现了机械通风,12575万t仓房实现了计算机粮情检测,9071万t仓房配备了环流熏蒸设备,配备有谷物冷却机751台<sup>[3]</sup>。2010年“四合一”储粮新技术获得国家科技进步一等奖。

目前,储粮通风技术是“四合一”储粮技术中应用广且效果显著的储粮技术,普及率几乎达到100%<sup>[4]</sup>。

## 2 储粮通风技术应用进展

### 2.1 控温储粮通风技术

控温储粮通风技术是利用冬季通风,降低粮堆温度并在粮堆内部储存大量冷源的技术。利用该技术可以提高夏季粮堆热稳定性,是行之有效的节能减损方法。

#### (1) 均温补冷控温储粮技术

均温补冷技术是利用粮堆自然冷源,采用粮堆内部环流和在需要时利用小型谷冷机补充一定冷源的均温补冷方式,以降低局部高温粮层粮温为主,降低整体粮温为辅,以最小的能耗达到低温储粮目的。

均温补冷技术装备涵盖了均衡粮温技术、补充冷源技术、保温隔热技术,充分利用了粮堆固有冷量,当回流空气温度较低时谷冷机自动关闭压缩机运行环流均温模式,当回流空气温度高于一定值时,小型谷冷机自动开启压缩机补充部分冷源,高效节能。高彬彬等采用小型谷冷机环流均温补冷技术,单位耗能为国家标准的12%~60%<sup>[5]</sup>,受环境影响小,适用范围广,自动化程度高,方便快捷,满足多种通风降温模式。该技术逐步推广到浙江省和江苏省广大粮库,成为稻谷低温和控温储粮的主要技术装备。

#### (2) 浅层地能控温储粮技术

传统的谷冷机采用气源式制冷机,由于谷冷机一般在夏季使用,受高温影响,降低了制冷效率。如果采用水冷式制冷机,利用埋管式水循环系统采集浅层地能的冷量保持冷却水温处于较低的恒温状态,可提高制冷机效率,节约能源。黄丽波等应用该技术的单位能耗为0.2 kWh/t℃,比国家谷物冷却机标准节能60%,系统的能效比达到了3.05<sup>[6]</sup>。

浅层地能是一种环保、可持续发展的低温资源,浅层地能控温储粮技术利用浅层地能作冷源,为仓房提供持续、稳定、高效的冷量,可以实现低温、保鲜、节能等目的,是一种绿色科学的储粮技术。

#### (3) 膜下环流通风控温技术

2009年4月,中储粮总公司在北京、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、西安、兰州、新疆等分公司辖区全面应用膜下环流通风技术,该技术特征是:在仓房内每组地上笼通风道上连接一组粮面环流管和一台环流风机,作业时采用薄膜压盖封闭粮堆,利用环流风机和布设在粮堆内的通风管道,将粮堆内冬季降温通风蓄存的冷源,与粮堆表层在夏季高温季节形成的积热适时的进行交换,使粮堆内各部位粮温基本达到平衡,有效控制和降低表层粮温,从而实现整仓粮食全面低温(准低温),同时控制水分损失。

### 2.2 储粮节能减损通风技术

在储粮通风时,减少储粮水分损耗,降低通风能耗,保持储粮食用品质,在安全储存粮食的前提下,争取效益的最大化,成为近年研究的重要课题。2008年,王远成等利用节能保水轴流通风机开展节能保水通风应用试验,取得良好效果和显著经济效益,一个通风季节能耗和储粮水分损耗均降低1.7倍<sup>[7]</sup>。2010年崔忠艾等阐述了保水降温通风的技术特点为:控制通过粮堆的通风量小于临界单位通风量,逆温度梯度方向通风,选择适合的温湿度时机,及时判断通风过程状态、确定合理的目标粮温,控制合理的气流温差,选用节能保水双向风机<sup>[8]</sup>。保水通风技术在全国粮库开始大规模推广应用,节能保水通风技术现已成为粮库安全保质储粮的基本操作工艺。

### 2.3 就仓干燥通风技术

#### (1) 插管式就仓干燥技术应用

为解决粮食收获时水分高,粮食晾晒困难和机械烘干能力不足的问题。2004年,插管式就仓干燥技术和成套设备得以应用和推广,该成果填补了我国粮食干燥技术的一项空白,为解决高水分粮食干燥问题开创了一条经济、合理、有效的技术途径。插管式就仓干燥技术设备主要部分是由立体插管风道和主风道通风软管组成。设备移动灵活,适应性广,对粮堆大小、高低不限。根据粮堆情况,立体插管可单组使用或多组并用,而且可以打入粮堆不同的深度;可以消除地上笼通风死角,解决无地上笼需通风降水的问题和风道堵塞、地上笼布置不合理的降水问题;通过逐步提管分层进行通风,降水较均匀,解决了底部粮食水分丢失严重的问题;可以对粮堆任何部位的粮食进行处理,如粮食在储藏期间由于湿热扩散等原因,造成水分转移分层并引起局部发热。

但是该项技术应用时需要进行大量埋插管工作,降水通风过程中还需要逐步提管分层进行通风,操作繁琐,劳动强度大,通风时机要求高,加热装置不节能等,使技术推广应用受到影响。

#### (2) 太阳能辅助热泵就仓干燥的技术应用

2006年“太阳能辅助热泵就仓干燥项目”列入国家十一五国家科技支撑计划项目(粮食干燥新技术装备和设施研究开发),2007年开展了太阳能辅助热泵就仓干燥技术实仓应用试验。代彦军等总结了太阳能辅助热泵就仓干燥系统设计和实仓应用取得的成果<sup>[9-10]</sup>。2010年该项目在郑州通过国家科技部验收。

太阳能辅助热泵就仓干燥系统由太阳能辅助热泵加热装置、粮仓送回风装置、通风地上笼和翻粮机械组成。环境空气经太阳能辅助热泵加热装置被加热,被处理后的气流经粮仓送风装置送入粮仓,经仓内通风地上笼系统进行气流分配,形成均匀通风,对粮食自下而上进行干燥,干燥期间合理使用翻粮机械翻动粮食,以降低干燥过程的不均匀性。太阳能集热器采用全并联形式排列,集热器与热泵系统采用并联方式运行,热泵系统的冷凝器与蒸发器都为铝翅片铜管式换热器。考虑到粮堆的阻力,分别单

独设立太阳能集热器风机、冷凝器风机以及蒸发器风机,与粮仓送风系统组成整个干燥通风系统。工作模式分太阳能集热器与热泵联合加热通风,热泵单独加热通风,以及热泵除湿干燥通风等几种方式。太阳能辅助热泵就仓干燥流程工艺由太阳能辅助热泵干燥系统、通风地上笼送风系统以及粮食翻滚机械三大系统组成。加热系统可以保证干燥的高效性、低能耗以及安全性;通风地上笼保证了粮食水平方向上的干燥均匀性,搅拌机械则可以实现粮食垂直方向的干燥平均性,以及达到提高干燥效率,缩短干燥时间的效果。

太阳能辅助热泵就仓干燥技术是我国新能源利用政策中的一个重要组成部分,利用太阳能对粮食就仓干燥,不仅对能源的可持续发展有重要意义,而且可以充分发挥粮食就仓干燥温度要求低的特点,实现太阳能的高效利用,可以弥补太阳能的间歇性与能量密度低的缺点,而且利用热泵可以回收一部分从粮仓内出来的空气潜热。这将对实现高效、快速、安全的干燥作业非常有意义。

### 2.4 储粮通风新技术应用

#### (1) 平房仓圭字形通风系统实仓应用技术

传统U型通风系统易在仓房底部和四角产生通风不均匀和存在通风死角问题。圭字形通风系统是一种新型通风道结构形式,满足通风降温、降水、谷物冷却和就仓干燥的工艺技术要求,2010年黄丽波等首次试验证实了平房仓圭字形通风系统具有良好均匀性<sup>[6]</sup>。实验测试表明,其通风阻力与一机三道相似,优于一机两道,但通风均匀性优于所有U字形通风道,避免了通风死角。该技术现已在全国大范围推广。

#### (2) 平房仓横向通风技术

传统平房仓竖向通风系统存在的主要问题是仓房地面遍布通风道,进出粮时需人工装拆,严重影响机械化进出仓作业,作业环境差,劳动强度大。粮堆横向通风是一种全新的储粮通风方式<sup>[11-12]</sup>,它是利用直接安装并固定在房式仓相对两侧内墙壁上的,高度低于装粮线的通风道,替代垂直通风系统中水平布置于地面的地上笼或地槽通风道,在粮面实施薄膜密封后,通风时使气流从一侧风道吸入并横向

穿过粮堆后从另一侧风道排出,实施整个粮堆的不揭膜通风作业的一种新型储粮通风系统;该系统也可使排出的气流通过风机再送入另一侧的风道,实施环流均温通风、环流谷物冷却、环流熏蒸和气调储粮等现代节能储粮新技术。由于该系统通风时使气流横向水平穿过粮堆,因此称之为粮仓横向通风系统。平房仓横向通风与竖向通风具有完全不同的技术特征:一是所有支风道固定安装在两侧檐墙上,免去粮食进出仓时装拆地上笼,仓房地面整洁,有利于实现粮食进出仓全程机械化作业;二是通风和储粮周期粮面可全程覆膜,免去以前一个储粮周期需要多次覆膜、揭膜的麻烦;三是通风气流途径比减小到1.16以下,通风均匀性比竖向通风更好;四是采用负压吸出式通风,气流在粮堆内水平横向流动,粮堆单位面积通风量比竖向通风提高3~5倍,通风气流在粮堆内的流动路径比竖向通风增加3~5倍,进入粮堆的气体介质冷量、有效浓度等利用率大大提高,尾气浪费极少,湿热交换强度增强,峰面迁移速度和通风效率大幅度提高,有利于提高通风和环流各项安全储粮工艺技术应用效果,达到储粮期间节能减排与保质减损目的。

平房仓横向通风技术的实施应用,不但是储粮通风方式的一次变革,也将对房式仓粮食进出仓和收储工艺技术带来革命性影响,对推动房式仓实现粮食储运机械化、自动化、智能化和绿色保鲜储粮具有重要意义。

### 2.5 储粮通风智能控制技术

智能通风系统技术是近十年快速发展的储粮通风控制技术,其特点是:通过粮情测控系统自动采集粮堆的粮情数据,利用专家的知识 and 经验建立数学模型,根据不同通风目的,准确判断通风条件,捕捉最佳时机,远程控制轴流风机、离心风机等粮仓通风设备和粮仓门窗的开启,进行智能化通风,避免低效通风、无效通风、过度通风和有害通风现象的发生,系统还可自动积累通风经验,提高智能水平,能够在粮库通风决策与通风控制方面起到一个通风专家的作用,通过合理组合不同通风模式,提高通风效率、降低通风能耗,有效控制粮仓的储粮环境和粮食品

质,降低储粮成本,从而实现节能减损安全储粮的目标,同时大幅度减轻粮库保管人员的劳动强度,改善粮库工作环境。

1987年吴子丹等报道了储粮机械通风的计算机控制系统<sup>[13-15]</sup>,随后又提出了窗口理论和CAE方程<sup>[16-17]</sup>。2006年中储粮总公司在全国不同生态储粮区建立了10个智能通风示范库,掀起了在全国推广应用的高潮。目前智能储粮通风技术已在全国大范围推广应用,但离智能化的目标还相差甚远,主要问题是粮仓缺乏即时检测粮堆温度、湿度、水分、气体等多参数检测系统,不能全面了解和判断粮堆粮情状况;缺乏建立在综合粮情基础上的专家分析决策系统,不能根据实时粮情改变通风模式和参数,无法做到精准通风。因此,完善粮堆多参数检测技术、建立专家分析决策系统及发展粮堆通风气流组织理论和多场耦合理论,是储粮通风智能化的关键。

## 3 储粮通风理论进展

### 3.1 大粮堆具有各向异性

国家粮食局科学研究院通过对180t模拟仓进行小麦、玉米、稻谷三大粮种的多向通风试验研究,获得了大量试验数据,发现各粮种不同通风方向单位粮层阻力具有明显差异,大粮堆具有显著各向异性,一些粮种横向通风单位粮层阻力远低于竖向通风,这一发现为横向通风技术应用奠定了理论基础。研究同时发现,产生各向异性的原因是有效孔隙率的不同,各方向的有效孔隙率可采用测量该方向单位粮层阻力的方法获得。这一方法为粮堆多场耦合理论研究和计算机模拟仿真提供了重要手段。

### 3.2 粮堆阻力计算方法

(1)各粮种的粮堆各个通风方向的阻力特征完全符合多孔介质的力学规律,阻力计算公式的形式各方向完全相同,可以用多孔介质的渗流二项式定律即Hunter(1983)二项式公式精确的描述计算<sup>[18]</sup>,也可以用近似的Shedd(1953)及储粮机械通风技术规程(LS/T 1202-2002)中的幂函数形式公式描述计算<sup>[18-19]</sup>,且精度可以满足工程需要。但各通风方向计算公式的系数各不相同。

(2)竖向通风粮堆存在明显的表层附加阻力,

定义为粮堆表层阻力,粮堆表层阻力与粮堆高度无关,可以用 Shedd(1953)形式的幂函数公式近似描述计算,且精度可以满足工程需要。

(3)竖向通风粮堆阻力为表层阻力与内部粮层阻力之和,由于粮层阻力与粮堆高度成正比,而粮堆表层阻力与粮堆高度无关,粮堆总阻力并不与粮堆高度呈严格的正比关系,因此粮堆阻力的正确计算方法为粮堆内部粮层阻力与表层阻力两部分之和,为储粮通风系统的设计和使用提供了理论支撑,具有重要的理论和工程价值。

### 3.3 通风设施阻力计算方法

2013年4月至8月,通过对实仓不同通风设施在不同风量条件下的大量测试试验研究,获得平房仓一机二道、一机三道、一机四道和圭字形布置时,支风道直径为500 mm和400 mm两种标准形式地上笼风网的管网特性曲线,以及浅圆仓梳状通风道风网的管网特性曲线。试验表明各种通风系统的管网特性曲线可由相同形式的幂函数公式精确的描述;试验确定了各类风网阻力的工程化计算公式,解决了不同风网设施的阻力计算问题,为储粮通风系统的设计和使用提供了理论支撑,具有重要的理论和工程价值。

### 3.4 横向通风理论

相关实验室研究得出的横向通风主要理论结果是:

(1)同样单位通风量条件下,横向通风单位面积通风量即粮堆内表观风速比竖向通风提高3~5倍,这是横向通风过程中湿热传递规律不同于竖向通风的关键影响因素。

(2)横向通风的阻力约与该方向粮堆有效孔隙率 $\beta_B$ 及粮食平均粒径 $d$ 的 $\left(\frac{1-\varepsilon_B}{d_s \varepsilon_B^3}\right)$ 成正比,稻谷和玉米等粮种横向通风的有效孔隙率比竖向通风大1.2~1.4倍,这些粮种的横向通风单位粮层阻力是竖向通风的40%~50%。

(3)粮堆传热和传湿速度与单位面积通风量(粮堆表观风速)的0.49次方成正比,由于横向通风时单位面积通风量较大,可以采用较小的单位通

风量达到相同通风效果。

(4)粮堆有效孔隙率可以通过测定粮堆单位孔隙率的方法获得。

(5)归纳提出了工程化的横向通风设施及粮堆阻力计算方法和公式。

以上成果为横向通风技术实仓应用奠定了理论基础。

### 3.5 通风条件和状态判别控制理论

吴子丹等<sup>[11-13]</sup>对粮食水分吸着“S”型曲线的线性区段进行数学拟合,产生了经验式的EMC/ERH方程,即CAE方程。该方程用于计算机控制的粮食通风过程。将CAE方程输入计算机,建立控制模型,并且与检测粮温、气温和相对湿度的粮情检测系统结合,可以实现粮食通风的智能化控制。通过跟踪气温、粮温和湿度的变化,根据通风模型和通风窗口理论判断结论控制通风机的运行<sup>[19]</sup>。

### 3.6 储粮保水通风理论

王远成等通过深入研究粮堆通风失水的原理,得出储粮通风失水数学模型及工程化计算公式和保水通风临界单位通风量计算方法<sup>[7-8]</sup>,创立了一套保水通风工艺,为保水通风技术应用奠定了理论基础。

### 3.7 粮堆模拟仿真实理论进展

数值模拟技术在储粮通风中应用的历史并不长,国外从上个世纪八十年代开始应用CFD(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)技术对粮食储藏过程中流动、热湿传递等现象进行数值模拟研究,国内则是近几年才开始应用CFD对粮食储藏通风过程进行数值模拟分析。

Metzger J F等人<sup>[20]</sup>1983年提出了针对通风储存小麦的一个模型,并使用CFD模拟了强迫对流换热和水分在垂直方向的传递及分布。Chang C S等人<sup>[21-22]</sup>1993年和1994年提出了一个基于热质平衡理论的数学模型,并采用CFD方法预测了小麦通风储藏过程中温度和水分含量的分布规律,该数值研究是基于有限差分方法,包括代表强迫对流传热传质的源项。Smith E A<sup>[23]</sup>1996年采用有限元的方法对就仓干燥通风时底部具有水平通风道的锥形粮

仓内部的速度和压力场进行了模拟分析。SUN DA WEN 等人<sup>[24-25]</sup>1997年提出了一个针对谷物冷却的数学模型,并应用该模型模拟了冬季英国东南部的圆筒仓内谷物冷却过程中温度、水分的变化规律。基于热量和质量守恒定律,2001年 Jia Cancun<sup>[26]</sup>等人模拟了就仓通风过程中粮仓内储藏小麦的温度变化,但是没有模拟小麦水分的变化。Iguaz A 等人<sup>[27]</sup>2004年提出了一个针对周期通风的储藏大米的模型,并采用 CFD 方法预测了仓内温度的变化。Garg D 和 Maier D E<sup>[28]</sup>2006年使用 CFD 软件(Fluent6.3)模拟分析了大型圆筒仓中粮粒非均匀分布时通风过程中粮仓内部的流场的分布规律。Daniela de Carvalho Lopes 等人<sup>[29]</sup>2006年基于 CFD 的方法编制一个软件程序(AERO)模拟使用变环境参数做条件的圆筒仓粮食通风过程中的温度的变化规律,而且粮食发热因素也被考虑。Lukasse L J S 等人<sup>[30]</sup>2007年建立了农产品就仓通风时仓内微气候动力学模型,并对土豆储存过程中的温度和水分进行了预测分析。Lukaszuk J 等人<sup>[31]</sup>2009年采用数值模拟的方法研究了几种粮粒在不同堆积方式情况下的通风阻力。

王远成等人<sup>[32]</sup>2010年基于 CFD 技术对就仓降温冷却通风以及非人工干预情况下粮堆内部的温度和水分的变化过程进行了数值模拟研究并与实验结果进行了比较。主要研究成果包括:(1)根据局部热质平衡原理和吸湿解吸湿理论,建立了深层粮堆内部热湿耦合传递的数学模型。(2)采用计算流体力学技术(CFD)对浅圆仓内粮堆的温度和水分随通风气流温度和水分改变而变化的规律进行了数值模拟研究。(3)采用 CFD 的方法,对横向谷冷通风时粮堆空气内部流动、热量传递和水分迁移过程进行了数值分析,证实了大型房式仓横向通风时粮堆内部具有快速降温效果和良好均匀性。(4)采用 CFD 的方法,对横向充氮气调时粮堆空气内部氮气流动扩散过程进行了数值分析,证实了大型房式仓横向充氮时粮堆内部氮气具有快速分布和良好均匀性。(5)建立和验证了熏蒸剂(磷化氢)的对流扩散和吸附模型,并采用 CFD 方法对圆筒仓内谷物熏蒸

过程中磷化氢浓度进行了数值预测。(6)基于有限元的方法模拟分析了外界气温和小麦分别为 273 K 和 293 K、293 K 和 293 K,小麦初始水分为 14% 和 18% 时直径为 10 m 和高度为 10 m 的充满小麦的圆筒仓内部的自然对流流动和热湿迁移过程,重点研究了近似冬季和夏季仓储粮堆内部温度和水分的动态变化规律。(7)采用 CFD 的方法,对平房仓圭字形通风系统通风时粮堆空气内部流动过程进行了数值分析,证实了圭字形通风道具有快速降温效果和良好均匀性。

#### 4 储粮通风技术展望

我国储粮通风技术装备经历了从简陋的竹笼通风和储气箱通风装置发展到全金属地上笼和地槽通风系统;从以离心风机为主体的通风机械到以混流风机、轴流风机和双向风机为主体的通风机械。储粮通风的方式从以 U 字形通风道和圭字形为代表的竖向通风方式发展到最新的横向通风方式。储粮通风技术的操作控制方式从移动式人工连接风机、人工判断通风时机和通风过程发展到自动判断通风时机、自动完成通风操作的全自动通风过程。通风过程控制参数从定性分析凭经验选择到定量分析自动计算。储粮通风的目标从安全保质发展到节能减损和保量保鲜。随着近期储粮多参数粮情检测技术、信息技术、智能控制技术和粮堆多场耦合控制理论发展,以及太阳能光伏和浅层地能等新型能源利用技术及横向通风技术在粮库的推广应用,储粮通风技术必将朝着以保持储粮商品价值和口感等食用品质为目标的智能化方向发展。

储粮机械通风技术今后的研究方向:建立健全适合于工程应用的粮堆空气流动及传热传质基本理论和多场耦合应用理论体系,完善储粮通风过程中各种参数之间的关系方程和工程计算公式,解决储粮通风过程中定量分析各种参数变化规律和计算问题,建立以多参数粮情检测数据为基础的专家分析决策控制系统,建立和完善以太阳能光伏等新型能源利用技术为背景和保量保鲜储粮为目标的储粮通风控制模型和控制方法及配套的硬件系统,真正实现储粮通风操作精准化和

智能化。

### 参考文献:

- [1] 赵思梦. 储粮机械通风技术的功用与发展[J]. 粮食科技与经济, 2002, (5): 39-40.
- [2] 江苏省粮食局. 机械通风储粮技术总结[J]. 粮油仓储科技通讯, 1986, (4): 2-12
- [3] 唐柏飞. 我国粮食储藏的现状与发展趋势[J]. 粮食物流, 2007, (1): 35.
- [4] 张来林, 金文, 朱庆芳. 储粮通风技术的应用及发展[J]. 粮食加工, 2011, 36(3): 67.
- [5] 高彬彬, 陈汐. 膜下内环流均温补冷试验报告[D]. 粮食仓储节能减排会议论文集, 2010, : 617.
- [6] 黄丽波, 邹贵川, 潘建刚, 等. 浅层地能低温储粮降低能耗试验研究[D]. 粮食仓储节能减排会议论文集, 2010: 150.
- [7] 王远成, 魏雷, 刘伟. 储粮保水降温通风关键技术研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(5): 141-145.
- [8] 崔忠艾, 魏雷, 王远成. 储粮保水降温通风原理及应用[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, (1): 74-79.
- [9] 代彦军, 代建国, 汪喜波, 等. 用于就仓干燥的太阳能辅助热泵系统[J]. 中国农业科技导报, 2008, (6): 105-109.
- [10] 代建国, 汪喜波, 代彦军, 等. 太阳能辅助热泵就仓干燥系统的研究与应用[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5): 575-580.
- [11] 曹阳, 魏雷, 赵小津, 等. 粮仓横向通风方法及其系统[P]. 专利号: 200910085093. 2009.
- [12] 王平, 周焰, 曹阳, 等. 平房仓横向通风降温技术研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2011, (2): 19-23.
- [13] 韦公远. 机械通风储粮技术的最新发展[J]. 粮油储藏, 2003, (2): 33.
- [14] 吴子丹. 储粮机械通风的计算机控制[J]. 粮食储藏, 1987, 16(4): 28-31.
- [15] 吴子丹. 再谈储粮机械通风的计算机控制[J]. 粮食储藏, 1991, 20(3): 3-9.
- [16] WU Z D, LI F J. Grain aereation system controlled by computer[C]// Highley E J, Wright H J, Banks B R, et al(Ed), Stored product protection, proceedings of the 6th international Working conference on stored - product protection. Canberra, Australia. United kingdom: CAB internationall Wallingford, 1994, (1): 368-370.
- [17] 吴子丹. 绿色生态低碳储粮新技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 268-305.
- [18] Shlomo Navarro, Ronald Noyes. The mechanics and physics of modern grain aeration management. Boca Raton. CRC Press LLC. 2002: 209-210.
- [19] 储粮技术规程. LS/T 1202-2002 储粮机械通风技术规程[S]. 北京, 中国标准出版社. 2002.
- [20] Metzger J F, Muir W E. Computer model of two dimensional conduction and forced convection in stored grain[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1983, 25: 119-125.
- [21] Chang C S, Converse H H, Steele J L. Modeling of temperature of grain during storage with aeration[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(2): 509-519.
- [22] Chang C S, Converse H H, Steele J L. Modeling of moisture content of grain during storage with aeration[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1891-1898.
- [23] Smith E A. Pressure and velocity of air during acing and storage of cereal grains[J]. Transport in Porous Media, 1996, 23(2): 197-218.
- [24] Sun DaWen, Woods J L. Deep - bed Simulation of the Cooling of Stored Grain with Ambient Air: a Test Bed for Ventilation Control Strategies[J]. Journal of Stored Products Research. 1997, 33(4): 299-312.
- [25] Sun DaWen, Woods J L. Simulation of the heat and moisture transfer process during drying in deep gram beds [J]. Drying technology, 1997, 15(10): 2479-2508.
- [26] Jia Canchun, Sun Da - Wen, Cao Chongwen. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin[J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(1): 165-177.
- [27] Iguaz A, Arroqui C Esnoz A, et al. Modelling and Simulation of Heat Transfer in Stored Rough Rice with Aeration[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1): 69-77.
- [28] Garg D, Maier D E. Modeling non - uniform airflow distribution in large grain silos using Fluent[C]. Proceedings of the 9th International Working Conference for Stored - Product Protection 754 - 762. Campinas, Sao Paulo, Brazil, ABRAPOS. 2006.
- [29] Daniela de Carvalho Lopes, Jose Helvecio Martins, Evandro de Castro Melo, et al. Aeration simulation of stored grain under variable air ambient conditions [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 42: 115-120.
- [30] Lukasse L J S. , Kramer - Cuppen J E, Voor van der A J. A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk - storage of agricultural produce[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30: 195-204.
- [31] Lukaszuk J , Molenda M, Horabik J, et al. Variability of pressure drops in grain generated by kernel shape and bedding method[J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45: 112-118.
- [32] WANG Y C, DUAN H F, ZHANG H, et al. Modeling on Heat and Mass Transfer in Stored Wheat during Forced Cooling Ventilation [J]. Journal of Thermal Science, 2010, 19(2): 167-172. 