

# 稻谷平房仓横向通风系统调质 通风实验研究

赵海燕<sup>1</sup>, 沈邦灶<sup>2</sup>, 李倩倩<sup>1</sup>, 姜俊伊<sup>1</sup>, 祝祥坤<sup>1</sup>, 王启阳<sup>1</sup>, 李红波<sup>2</sup>, 石天玉<sup>1</sup>

(1. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037; 2. 浙江中穗省级粮食储备库, 浙江 杭州 311200)

**摘要:**为了探索横向通风系统进行调质通风的可行性,利用稻谷平房仓横向通风系统两侧吸出式调质通风工艺与同样仓型的竖向通风系统进行了调质通风对比测试,分析了2种调质通风的调质速率、均匀性和能耗的差异。结果表明,横向通风系统调质后水分增加了1.26%,均匀度增加了2.28%,调质通风单位能耗为0.511 kW·h/(%·t),横向通风系统两侧吸出式调质通风工艺可以满足粮食收储企业实际作业需求,横向与竖向通风系统均可达到调质通风工艺效果,该实验结果为稻谷平房仓横向通风系统的通风工艺综合应用提供了技术支持。

**关键词:**调质通风; 调质均匀性; 横向通风

中图分类号:S 379.3 文献标识码:A 文章编号:1007-7561(2018)01-0095-06

## Experimental study on tempering ventilation with transverse and vertical ventilation system in paddy warehouse

ZHAO Hai-yan<sup>1</sup>, SHEN Bang-zao<sup>2</sup>, LI Qian-qian<sup>1</sup>, JIANG Jun-yi<sup>1</sup>,

ZHU Xiang-kun<sup>1</sup>, WANG Qi-yang<sup>1</sup>, LI Hong-bo<sup>2</sup>, SHI Tian-yu<sup>1</sup>

(Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037;

2. Zhejiang Zhongsui Provincial Grain Reserve Depot, Hangzhou Zhejiang 311200)

**Abstract:** The contrastive research about the ventilation to improve processing quality in two grain warehouses with different ventilation system, which are the transverse ventilation system and vertical ventilation system is operated to analyze the difference of the ventilation rate, moisture uniformity and energy consumption between the two ventilation systems. The results indicated that the grain moisture increased 1.26%, the moisture uniformity of the grain bulk increased 2.28% and the unit energy consumption of ventilation was 0.511 kW·h/(%·t) as ventilation with transverse systems. Therefore, ventilation by transverse system can meet the demand of grain storage enterprises. Both transverse ventilation system and vertical ventilation system have tempering ventilation effect. The test provides technical support for comprehensive application of transverse ventilation system in rice warehouse.

**Key words:** tempering ventilation; homogeneity of tempering; transverse ventilation

稻谷作为我国的第一大农作物之一<sup>[1]</sup>,产量约为4 170亿斤。稻谷储藏不仅关系着国家的经济命脉,而且关系着国家的粮食安全问题。稻谷在储藏过程中,一般采用机械通风方法进行降温降湿<sup>[2]</sup>,

其水分会发生不同程度的变化。当水分过高时,稻谷易发生霉变、生虫等现象;当水分过低时,稻谷籽粒则显得干瘪、颜色发暗、且碎米率增加、营养价值降低<sup>[3]</sup>,不但给粮食仓储企业带来巨大的经济损失,而且给销售带来一定的影响。因此,在稻谷的储藏过程中,进行科学的调质通风处理是非常必要的。

调质通风是指将高湿空气通入粮堆,利用粮粒

收稿日期:2017-4-11

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0401002);国家重点研发计划(2016YFD0401605-2)

作者简介:赵海燕,1990年出生,女,硕士。

通讯作者:石天玉,1980年出生,男,副研究员,博士。

较强吸湿特性,恢复粮食水分含量的一种通风方式<sup>[4]</sup>。调质通风一般在粮食出仓前一个月内利用温湿度合适的自然空气进行通风操作<sup>[5]</sup>,也有采用调质机进行调质通风作业的方式。近年来,相关学者对粮食储藏过程中的调质通风技术进行了一些研究。徐玉斌等<sup>[6]</sup>在研究调质通风保水机组对稻谷的调质通风效果中发现,水分可进入糙米中,且调质后整仓稻谷增水1%,有效提高了调质效益。张来林等<sup>[7]</sup>对小麦进行调质通风实验研究表明,小麦平均增加水分0.69%,粮食增重39.064 t,单位能耗0.407 kW·h/(%·t),实验的直接运行费为2500元,保水调质的通风效果较好,有利于提高粮食企业的储粮效益。陈玉增等<sup>[8]</sup>对早籼稻在出库前进行升温增湿调质通风的实验表明,实验仓早籼稻水分增加0.7%,稻谷加工品质有所改善,经济效益显著。因此,研究调质通风技术对于增加粮仓水分、提高粮食品质、降低能耗具有非常重要的现实意义。

调质通风前期研究和应用都是基于地上笼或地槽竖向通风系统的作业方式,而新型横向通风系统中调质通风作业还未有研究报道。由于横向通风的均匀性显著优于地上笼竖向通风,可以更好地满足调质通风的需要<sup>[9]</sup>。本研究将横向调质通风技术应用于平房仓稻谷,研究其调质通风工艺和效果,并对横、竖向通风系统中调质通风效能进行对比分析,为调质通风在稻谷储藏上的应用提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验仓库

#### 1.1.1 浙江中惠省级粮食储备库43号仓

实验仓东西向,单廒间仓内净长29.5 m,仓内净宽17.5 m,檐高7 m,设计堆粮线高5 m,实际堆粮4.7 m。粮堆体积约2450 m<sup>3</sup>,仓内空间体积约1200 m<sup>3</sup>,仓容1966 t。仓墙为砖混结构,厚度0.5 m,采用横向通风系统。

#### 1.1.2 浙江中惠省级粮食储备库44号仓

44号仓房尺寸与43号仓相同,采用3组“U”字型地槽吸出式竖向通风系统。

### 1.2 供试材料

实验材料为金华上虞江山的2013年产早籼谷。43号平房仓和44号平房仓的稻谷数量和主要品质参数如表1。

表1 供试粮食基本情况

项目	仓号	
	43号	44号
品种	早籼谷	早籼谷
入仓时间	2013.12.31	2013.04.05
数量/t	1395.00	1400.00
水分/%	11.6	10.6
杂质/%	0.7	0.8
出糙率/%	76.2	75.6
谷外糙/%	0.9	1.5

### 1.3 通风系统

#### 1.3.1 通风道布置形式

43号实验仓采用横向通风<sup>[10]</sup>系统,檐墙每侧设置2个通风口,每侧檐墙布设主风道和11条呈梳形对称固定安装在檐墙上的立式支风道,支风道距地面高4.3 m,支风道间距2.52~2.62 m,途径比约1.14:1,主风道规格为0.5 m半径的四分之一圆,支风道规格为0.4 m×0.26 m。详见图1~图3。

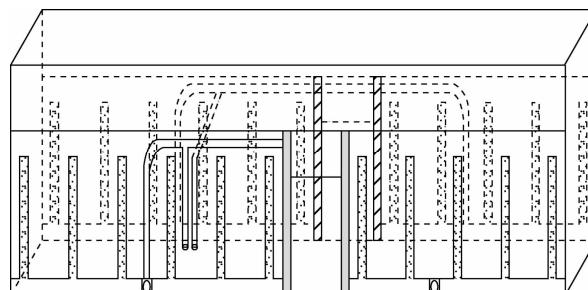


图1 横向通风系统风网布置整仓立体示意图

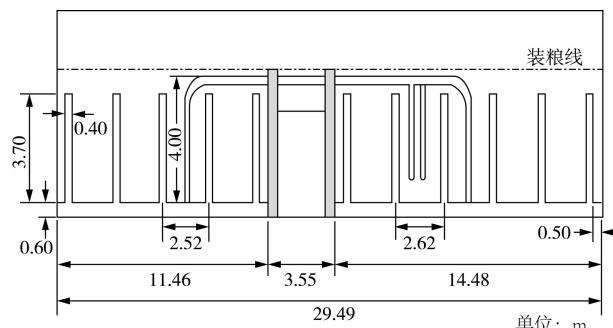


图2 横向通风系统檐墙风道布置示意图

44号平房仓采用竖向通风系统,山墙一侧设置3个通风口,采用一机2道的地槽通风道,风道间距2.34 m,途径比约1.25:1,每组支风道均匀布设28个分配器,各分配器间距1.65 m,分配器尺寸为0.58 m×0.52 m,全仓共设84个分配器,详见图4。

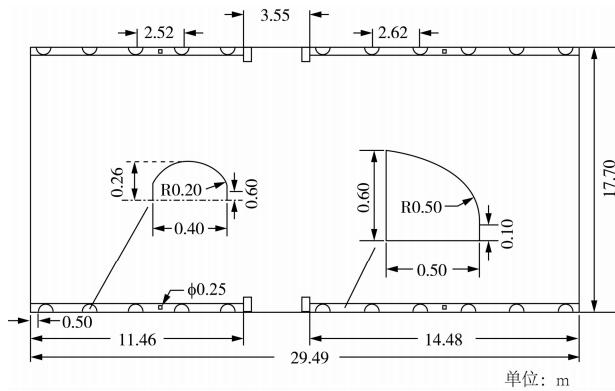


图3 横向通风系统支风道与主风道俯视示意图

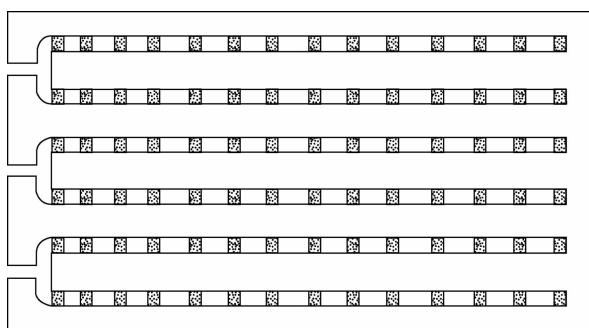


图4 坚向通风3组“U”字型风道布置示意图

### 1.3.2 通风机

43号横向通风系统实验仓在2侧檐墙的4个通风口安装4台3 kW轴流通风机;44号竖向通风系统实验仓在山墙两侧2个通风口安装2台轴流通风机,在山墙中间安装1台7.5 kW离心风机。3 kW轴流风机型号均为:HLT-III-3,额定风压486~670 Pa,额定风量7 136~11 993 m<sup>3</sup>/h,额定转速1 450 r/min。7.5 kW离心风机型号为:4-72N06C,额定风压1 116~1 760 Pa,额定风量8 288~16 576 m<sup>3</sup>/h,额定转速1 800 r/min。

### 1.3.3 通风系统参数

43号实验仓和44号对照仓通风设施的主要参数见表2。

表2 实验仓与对照仓通风方式

项目	仓号	
	43号仓	44号仓
风道形式	竖向立式风道	3组U字形风道
通风途径比	1.14:1	1.25:1
通风机	3 kW轴流风机×4 kW离心风机×1	3 kW轴流风机×2+7.5
通风方式	横向吸出式负压通风	下行吸出式负压通风

### 1.4 粮堆温湿度检测系统

43号实验仓和44号实验仓,均安装有数字式

粮情测控系统和温湿度检测系统各1套。

数字式粮情测控系统,每套35根测温电缆分4层,共140个检测点,检测精度±0.2℃。布点符合LS/T 1203—2002的规范要求。

温湿检测系统在粮堆内设置13个检测位置,每个位置分别在距离粮面0.5、1.73、2.96和4.2 m的层面上设置检测点,共计52个检测点。另在仓内空间和进出风口及仓外按需各设相应检测点。温湿度检测系统布点情况<sup>[11~12]</sup>见图5。

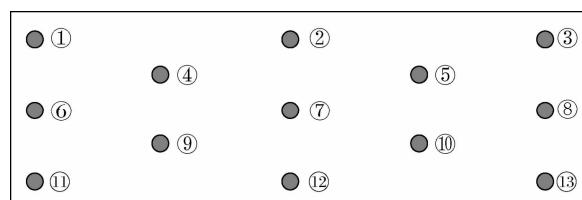


图5 检测点布置图

## 1.5 实验方法

### 1.5.1 调质通风方法

44号仓地槽竖向通风系统调质通风方式:采用下行吸出式通风,打开粮仓窗户,粮面进风,通风口吸出式通风<sup>[9]</sup>。

43号仓横向通风系统调质通风方式:采用粮面局部覆膜,粮面进风,仓库两侧吸出式通风的方式,如图6所示<sup>[13]</sup>。调质通风时在仓库两侧的通风口安装吸出式风机,先覆盖仓库两侧各三分之一部分粮面进行双侧吸出式调质通风,当中心部分粮堆水分增加到目标水分时,揭开仓库两侧覆膜,继续进行双侧吸出式调质通风,两侧粮堆水分升高到与中心部分粮堆相同时停止调质通风<sup>[14]</sup>。

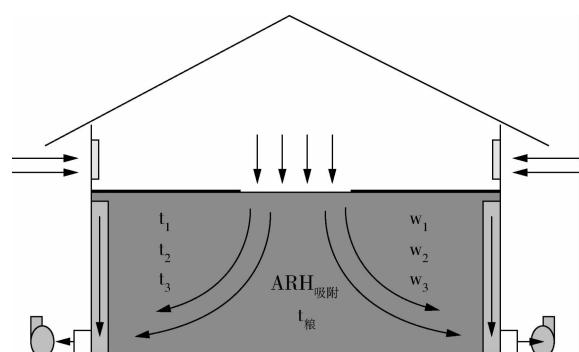


图6 横向通风系统调质通风控制参数示意图

### 1.5.2 通风时机的选择

按照储粮机械通风技术规程(LS/T 1202—2002)中7.1条款的规范性要求执行。开始通风条件:粮

食出仓前一个月内,温度条件为 $t_{粮} - 2 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_{气} \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度条件为 $P_{s1} > ARH_{\text{吸附}+1\%}$ 。结束通风条件:粮堆平均水分增幅 $\leq 1\%$ ,且粮堆水分 $\leq$ 安全水分;且粮堆水分梯度 $\leq 0.5\%/\text{m}$ ;粮堆温度梯度 $\leq 1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

### 1.5.3 数据采集及分析方法

利用实验仓和对照仓通风口安装的轴流通风机,当满足通风条件时同步开启和关闭通风机进行通风,记录累计通风时间和耗电量。

通风降温期间,原数字测温系统和温湿检测系统都设置每1 h 自动检测一次粮堆温度、相对湿度及水分变化情况,并自动保存到后台数据库。

用粮食平衡水分均匀度(Ventilation evenness degree of grain)来衡量粮堆全部水份检测点水份分布均匀程度,即用100%减去粮堆所有水份检测点(按照标准粮堆水份检测点布置)实测水分变异系数的百分数,用 $J_m$ 表示,单位为%,如公式1、公式2所示<sup>[15-16]</sup>:

$$\begin{aligned} J_m &= 100\% - C_m = 100\% - \frac{S_m}{\bar{m}} \times 100\% \\ &= 100\% - \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}}{\bar{m}} \times 100\% \quad (1) \end{aligned}$$

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (2)$$

式中: $J_m$ 为粮堆平衡水分均匀度,%,其值越接近于100%,表示均匀度越好; $C_m$ 为粮堆水分的变异系数,等于所有检测点的水份标准差与平均水分的比值,反映了各检测点粮食平衡水分的离散程度的相对大小,值越小均匀性越好; $S_m$ 为称为样本标准差(Standard deviation),如式(2)所示,与样本均值量纲相同,反映了样本离散程度,在此为所有检测点粮食平衡水分的标准差; $m_i$ 为任一检测点的粮食平衡水分实测值,m/s; $i$ 为检测点的序号, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ; $\bar{m}$ 为所有测点粮食平衡水分的平均值,m/s; $n$ 为检测点总数量,个。

## 2 结果与分析

### 2.1 调质通风参数测试结果

由表4、表5可知,43号横向通风仓调质通风过程的单位通风量为 $16.69 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ ,大于 $15 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ ,且满足通风的温度条件<sup>[16]</sup>,调质通风参数适宜。

44号竖向通风仓调质通风过程的单位通风量为 $13.05 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ ,基本满足调质通风参数。

表4 43号横向通风系统调质通风参数

序号	全压 /Pa	静压 /Pa	动压 /Pa	风速/ (m/s)	总风量/ (m <sup>3</sup> /h)	单位通风量/ (m <sup>3</sup> /h·t)
风机1	-428.50	-474.81	46.22	8.77		
风机2	-468.81	-497.50	28.35	6.87	23 285.60	16.69
风机3	-362.56	-398.06	35.33	7.67		
风机4	-337.88	-365.50	26.99	6.70		

表5 44号竖向通风系统调质通风参数

序号	全压 /Pa	静压 /Pa	动压 /Pa	风速 /(m/s)	总风量/ (m <sup>3</sup> /h)	单位通风量/ (m <sup>3</sup> /h·t)
风机1	-441.58	-522.17	80.01	11.54		
风机2	-672.42	-842.00	167.25	16.68	18 273	13.05
风机3	-400.17	-484.92	89.30	12.19		

### 2.2 横向和竖向通风系统仓调质通风过程中粮堆水分变化

横向、竖向仓房调质通风同时进行,分两个阶段。第一阶段5月2日~5月7日,进行了42 h的调质通风;第二阶段7月9日到12日,进行了36 h的调质通风。调质通风总共累计通风时间为78 h。调质通风过程中43号、44号仓房粮堆水分变化如图7~图8所示,调质通风开始和结束后粮堆水分数据如表6~表7所示。

从图7、图8可以看出,无论横向调质通风还是竖向调质通风,粮仓都存在着上下层水分差的问题,若增湿方式或操作不当时,其水分差还会更大,容易造成粮食霉变。在我国《储粮机械通风技术规程》<sup>[17]</sup>中明确指出,通风降水操作的粮层不宜超过3 m。与降水通风一样,调质通风要求的粮堆也不能太厚,否则也会存在上下层水分不均匀的问题。因此,宜改变操作方法给以保证:①压入式送风增加底部粮食水分,吸出式送风增加顶部粮食水分,两种方式交替进行<sup>[7]</sup>;②及时调整湿空气与干空气的通风时间,促使底部粮食水分朝上迁移;③在调质通风的后期要求设备能够严格控制空气湿度,防止底部粮食过湿或出现坏粮事故发生;④调质后的粮食水分已增高,不宜继续存放,需马上出仓或送至加工厂。

由表6和表7可知,43号仓调质后其平均水分

由 11.57% 增加至 12.83%，水分增幅为 1.26%；44 号仓调质后其平均水分由 10.63% 增加至 12.30%，水分增幅为 1.67%。

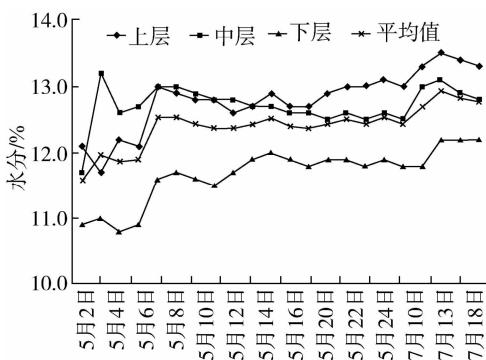


图 7 43 号仓在调质通风过程水分变化趋势图

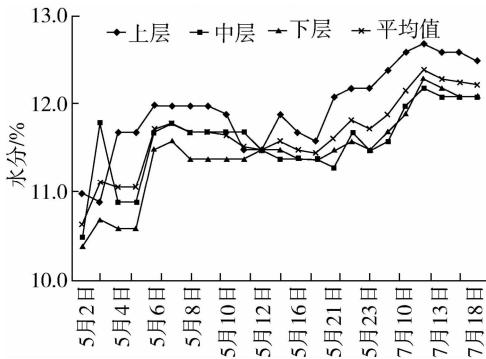


图 8 44 号仓在调质通风过程水分变化趋势图

表 6 43 号横向通风系统仓实验前后粮堆水分数据 %

监测点	第一层		第二层		第三层	
	调质前	调质后	调质前	调质后	调质前	调质后
1	11.9	13.7	12.8	12.9	11.4	11.5
2	12.1	13.1	12.8	13.4	10.9	10.9
3	12.3	14.0	12.7	13.2	10.6	11.6
4	11.6	14.4	12.7	13.1	11.0	11.2
5	12.3	12.9	10.9	12.8	10.1	12.4
6	12.1	13.2	10.7	12.2	11.4	12.6
7	12.6	13.4	11.1	13.1	9.9	12.3
8	11.9	13.1	10.7	12.5	10.3	12.2
9	11.9	12.9	11.6	13.3	10.7	12.7
10	11.8	13.4	10.8	12.6	11.3	13.0
11	11.4	13.3	10.2	12.1	10.2	12.0
12	11.7	13.1	10.9	12.4	10.4	12.1
13	12.3	13.4	12.1	13.7	11.8	13.6
14	11.4	13.4	10.9	12.5	10.6	12.5
15	12.2	13.3	12.1	13.3	11.1	12.4
16	11.3	13.1	11.1	12.9	10.6	12.2
17	13.3	13.4	13.0	13.4	11.9	12.8
18	13.2	13.3	13.1	12.9	11.9	12.0
层平均值	12.1	13.4	11.7	12.9	10.9	12.2
仓平均值	调质前		11.57	调质后		12.83

表 7 44 号竖向通风系统仓实验前后粮堆水分数据 %

监测点	第一层		第二层		第三层	
	调质前	调质后	调质前	调质后	调质前	调质后
1	11.0	12.7	10.2	11.8	9.9	12.8
2	10.6	12.4	10.1	11.8	10.0	10.9
3	10.7	12.6	10.3	12.0	10.2	11.4
4	10.6	12.2	10.0	11.6	9.8	12.4
5	11.4	12.9	10.7	12.4	11.0	12.3
6	11.2	12.4	10.5	12.1	10.3	11.8
7	10.8	12.6	10.3	12.1	10.6	11.8
8	10.6	12.7	10.7	12.1	10.0	12.7
9	11.4	12.8	11.0	12.6	10.5	12.4
10	11.1	12.5	10.9	12.5	10.6	12.3
11	11.0	12.7	10.6	12.3	10.4	12.0
12	10.8	12.8	10.3	12.1	10.8	12.1
13	11.4	12.7	11.0	12.6	10.5	12.3
14	10.9	12.6	10.6	12.2	10.8	12.3
15	11.1	12.5	10.2	11.9	10.2	12.9
16	11.1	12.8	10.4	12.1	10.3	12.3
17	11.0	12.7	10.1	11.9	9.9	11.5
18	10.5	12.1	10.6	11.9	10.6	12.7
层平均值	11.0	12.6	10.5	12.1	10.4	12.2
仓平均值	调质前		10.63	调质后		12.30

43号仓为横向通风覆膜密闭储藏仓库,仓内粮堆保水效果较好,初始稻谷水分较高为11.57%,调质通风过程中水分增长速率为 $0.016\%/\text{h}$ 。44号仓为竖向通风仓库,仓内粮堆储藏期间水分损失较大,初始稻谷水分较低为10.63%,稻谷颗粒水分较低时,粮粒表面水分吸附速率较快,调质通风过程中水分增长速率较高为 $0.021\%/\text{h}$ 。

由 43 号仓调质通风后粮堆水分测试数据可以，可以看出横向通风系统满足调质通风工艺实施要求。

### 2.3 横、竖向通风系统调质通风后粮堆水分均匀性

由表 8 可知,在对浙江中穗省级粮食储备库进行的横向调质通风和竖向调质通风的实仓实验中,调质后 43 号仓的粮堆水分均匀度由 92.40% 增加到 94.68%,增加了 2.28%,而 44 号仓的粮堆水分均匀度由 96.16% 增加到 96.59%,增加了 0.43%。结果表明横向通风系统调质通风后粮堆水分均匀度有明显提高,满足实际应用需求。这是因为横向通风系统通风途径比为 1.14,支风道相对竖向通风

系统间距较短,通风时气流分布更为均匀。

表8 43、44号仓调质前后粮堆水分均匀度 %

粮仓	粮堆水分均匀度			%
	调质前	调质后	均匀度增幅	
43号仓	92.40	94.68	2.28	
44号仓	96.16	96.59	0.43	

## 2.4 横、竖向通风系统调质通风能耗

由表9可知,43号仓4台3kW轴流风机用电899 kW·h,调质通风单位能耗0.511 kW·h/(%·t),能耗满足粮库实际应用要求。44号仓2台3kW轴流风机和1台7.5 kW离心风机用电1 132 kW·h,调质通风单位能耗0.484 kW·h/(%·t),调质通风单位能耗较低的主要原因是粮堆初始水分较低,调质水分增幅较高。

表9 43、44号仓的调质通风能耗数据

仓号	原始水分 /%	调制后水分 /%	水分增幅 /%	耗电量 /(kW·h)	单位能耗 /(kW·h/%·t)
43	11.57	12.83	1.26	899	0.511
44	10.63	12.3	1.67	1 132	0.484

## 3 结论

在浙江中惠省级粮食储备库(仓库条件为长29.5 m,宽17.5 m,堆粮高4.7 m)进行实仓实验的结果表明,横向通风系统采用两侧吸出式通风能满足调质通风所需单位通风量及系统性能要求,横向调质通风后水分增加了1.26%,均匀度增加了2.28%,调质通风单位能耗为0.511 kW·h/(%·t),调质后达到了均匀程度更好,增加了粮堆水分目的,单位能耗与竖向通风系统相近,因此横向通风系统和竖向通风系统采用调质通风工艺均能较好实现稻谷出仓前的调质目的,达到提高加工品质要求,为平方仓横向通风系统调质通风操作提供了技术支持。

## 参考文献:

- [1]曹阳,魏雷,赵会义,等.我国绿色储粮技术现状与展望[J].粮油食品科技,2015,23(Z1):11-14.
- [2]沈邦灶,王飞,王会杰,等.平房仓横向与竖向通风系统降温试验对比研究[J].粮食储藏,2015(5):23-27.
- [3]俞一夫,朱师明,李兰芳.散装稻谷整仓调质通风的试验[J].粮油食品科技,2006,14(3):10-11.
- [4]张来林,谢康章,刘志麟,等.低水分粮调质通风试验研究[J].河南工业大学学报自然科学版,2007,28(4):7-11.
- [5]徐留安,张来林,李祥利,等.小麦调质通风工艺参数研究[J].粮食加工,2014(3):18-21.
- [6]徐玉斌,倪晓红,曹海军,等.平房仓稻谷调质通风实仓试验[J].粮食与饲料工业,2005(7):25-27.
- [7]张来林,王斌,连桂荣,等.小麦调质通风试验研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2009,30(4):21-23.
- [8]陈玉增,范帅通,杨国峰,等.早籼稻升温和增湿调质通风试验[J].粮食储藏,2016,45(2):9-11.
- [9]赵会义,尹君,魏雷,等.玉米横向和竖向通风粮层阻力对比研究[J].粮油食品科技,2015,23(z1):43-46.
- [10]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,2011,27(2):19-23.
- [11]潘钰,张中涛,王远成,等.密闭粮堆中水分和温度变化的模拟研究[J].粮油食品科技,2015,23(21):24-27.
- [12]高帅,王远成,邱化禹,等.横向通风过程中粮堆内热湿耦合前沿规律研究[J].粮食储藏,2015(4):6-9,32.
- [13]CAO Yang,ZHAO Huiyi,SHI Tianyu,LI Fujun,WEI Lei,WU Zidan. Testing of cross ventilation system in granary[C]. 11th International Working Conference on Stored Product Protection, 2014: 270-278.
- [14]张传洪,王远成,段海峰,等.储粮加湿调质通风的原理及试验研究[J].粮油加工,2010(3):54-57.
- [15]祝祥坤,石天玉,沈波,等.稻谷平房仓储藏的横向通风技术工艺研究[J].粮油食品科技,2015,23(z1):33-37.
- [16]李福君.粮食储藏横向通风技术[M].北京:科学出版社出版,2016.
- [17]LS/T 1202—2002,储粮机械通风技术规程[S].