

# 电蓄热粮食干燥专用热风炉工艺参数测试与数据分析

刘国辉<sup>1,2</sup>,王 赫<sup>1,2</sup>,任丽辉<sup>1,2</sup>,赵学工<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁省粮食科学研究所,沈阳 辽宁 110032;

2. 国家粮食—玉米干燥工程中心,沈阳 辽宁 110032)

**摘要:**通过对电蓄热粮食干燥专用热风炉进行生产运行工艺参数测试及数据分析,证明了电蓄热热风炉作为粮食干燥机的新干燥热源,热风温度波动范围 $\leq \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、热转换率 $\geq 95\%$ 、无污染物排放,达到了粮食干燥热风输出温度和热量的精准控制水平,解决了长期困扰粮食干燥行业能耗高、热效率低、污染物排放严重超标的难题。并通过工艺参数的选择,确定了理论工况下电蓄热热风炉的配置功率。

**关键词:**电蓄热;粮食干燥;参数测试;新热源

中图分类号:S 379.5 文献标识码:A 文章编号:1007-7561(2017)02-0095-04

## Process parameters test and data analysis of electric heat – storage air heater for grain drying

LIU Guo – hui<sup>1,2</sup>, WANG He<sup>1,2</sup>, REN Li – hui<sup>1,2</sup>, ZHAO Xue – gong<sup>1,2</sup>

(1. Liaoning Grain Science Research Institute, Shenyang Liaoning 110032;

2. National Engineering Center of Grain – Corn Drying, Shenyang Liaoning 110032)

**Abstract:** The electric heat – storage air heater as a new drying heat source for grain dryer was proved by comprehensive evaluation and data analysis of the production process parameters. The fluctuate of hot air temperature range  $\leq \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and thermal conversion rate  $\geq 95\%$  without pollutant emission reached the accurate control level of output temperature and heat quantity, and solved the problems of high energy consumption, low thermal efficiency and serious pollutant emission. The allocating power of electric storage heaters for grain drying under the normal condition was determined by selection of process parameters.

**Key words:** electric heat – storage; grain drying; parameter test; new heat source

电热储能技术是将夜间闲置的、廉价的低谷电或弃用风电转换成热能储存起来,然后通过温度调控装置将电蓄热热风炉内的高温热能转换成稳定的、满足粮食干燥需求的热风输出,具有节能环保、平衡优化电网、消纳弃用风电等特点。

课题组在新能源利用方面进行了有效的探索,运用此项技术开发粮食干燥新热源,成功研发了电蓄热粮食干燥专用热风炉,成功地将 10 kV 以上高电压大功率电蓄热热风技术应用于粮

食干燥领域。填补了国内外粮食干燥行业技术空白。

2016 年 3 月课题组对电蓄热粮食干燥专用热风炉进行了工艺参数生产试验,全面测试了电蓄热热风炉系统的产品质量、工艺指标、各项经济技术指标、能耗、物耗以及主要设备的能力和运行状况。通过本次测试,证明电蓄热热风炉作为粮食干燥机的干燥热源,解决了常规电热炉功率小的技术瓶颈,实现了大规模的供热能力,达到了粮食干燥热风输出温度和热量的精准控制水平,解决了长期困扰粮食干燥行业能耗高、热效率低、污染物排放严重超标的难题。

收稿日期:2016-08-01

基金项目:2014 年国家粮食行业公益科研专项(201413006)

作者简介:刘国辉,1971 年出生,男,工程师。

通讯作者:王赫,1983 年出生,女,工程师,硕士研究生。

### 1 材料与方

#### 1.1 电蓄热粮食干燥专用热风炉

##### 1.1.1 电蓄热热风炉主要技术指标

适用电压范围:10 ~ 66 kV

最大储热能力:400 MW/3 000 000 kWh 单台

热能输出方式:100 ~ 300 °C的常压热风

热转换:≥95%

设备运行方式:自动/手动/远程

##### 1.1.2 电蓄热热风炉工作原理图、结构示意图和控制界面

电蓄热热风炉工作原理图见图1、图2、图3。

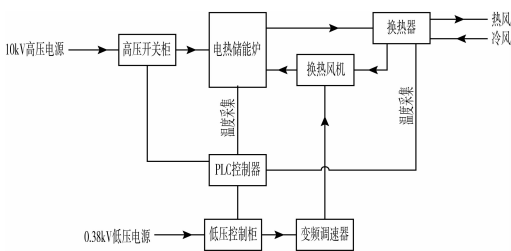


图1 电蓄热热风炉工作原理图

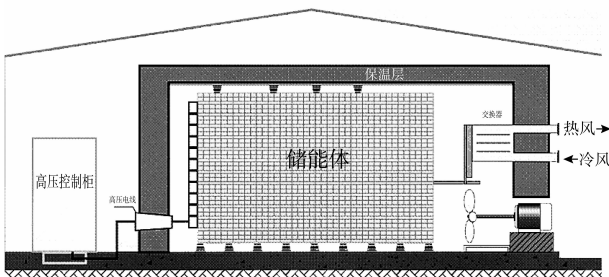


图2 电蓄热热风炉结构示意图



图3 电蓄热热风炉控制界面

#### 1.2 材料与设备

玉米:当地当年产玉米,水分23.4%;粮食干燥机:每小时处理量15 t;电蓄热热风炉:功率2 000 kW。

#### 1.3 测试条件

电蓄热热风炉正常运行,达到满足粮食干燥机使用要求和温度稳定的热风;粮食干燥机连续正常运行10个班次以上;环境温度、相对湿度以及大气压力应符合电蓄热热风炉和粮食干燥机正常工作对环境条件的要求;粮食水分不均匀度不大于3%,含杂率不大于2%,发芽(生活力)率大于等于80%。测试仪器、仪表在检验有效期内并检验合格。

#### 1.4 测试方法

根据GB/T 5497—1985《粮食、油料检验 水分测定法》,准确测定测试期间进机湿粮水分、出机干粮水分。

根据GB/T 6970—2007《粮食干燥机试验方法》,准确测定并记录测试期间外部环境温度、电蓄热热风炉蓄热体温度、热风输出温度、处理量。

根据GB/T 1236—2000《工业通风机 用标准化风道进行性能试验》,准确测定并记录测试期间实际工况下的热风温度和热风动压值,并计算风量。

准确记录每工作日电蓄热热风炉作业时间、粮食干燥机作业时间。

热风管道测点布置。根据标准GB/T 1236—2000,使用皮托静压管测定热风流量,皮托静压管的头部中心定位在沿着热风管道三个对称分布的直径上依次间隔的24个测点上,如图4。

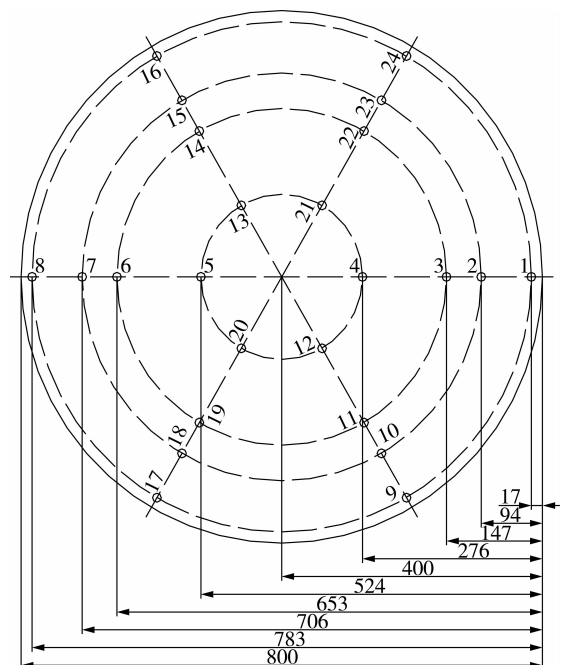


图4 热风管道测点位置分布图

## 2 结果与分析

### 2.1 工作环境与系统工艺参数

经过多组数据的测试,证明电蓄热热风炉提供热风输出稳定,选取以下3个时间点的工作环境和系统工艺参数记录如表1。

表1 工作环境与系统工艺参数

测定项目	测定结果			
	9:30	11:30	13:30	平均值
工作环境 温度/℃	6.0	11.0	11.0	9.3
大气压力/Pa	1.01 × 10 <sup>5</sup>			
进机湿粮水分/(湿基)	23.7	22.8	23.6	23.4
出机干粮水分/(湿基)	13.9	14.3	14.4	14.2
热风温度/℃	105.0	111.0	105.0	107.0

### 2.2 出机粮食水分测定计算

连续5h出机粮食水分测定与计算结果见表2。

表2 出机粮食水分测定记录计算结果

取样时间	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	平均值
含水率/%	13.9	14.0	14.3	14.6	14.4	14.2	14.2

表2结果证明,应用电蓄热粮食干燥专用热风炉代替燃煤热风炉的干燥系统控制精准、运行稳定,完全满足粮食干燥系统要求。

### 2.3 处理量测定计算

干燥系统运行稳定后,进行处理量测定,计算结果见表3。

表3 干燥机处理量测定记录计算结果

测定项目	测定次数		平均值
	1	2	
进机粮食含水量/%	23.4	23.4	23.4
出机粮食含水量/%	14.2	14.2	14.2
接样时间/min	6	6	6
接取出机粮食量/t	1.41	1.43	1.42
处理量/(t/h)	15.79	16.02	15.91

表3测试结果与对应烘干周期的处理量相吻合,证明用电蓄热粮食干燥专用热风炉可以满足粮食干燥系统要求,保证干燥系统运行稳定,完全可以代替燃煤热风炉。

### 2.4 单位耗电量测定

干燥系统运行稳定后,从9:30至11:30的4h内出机干粮重量为56.92t,折合进机湿粮63.76t;这段时间内根据电蓄热热风炉蓄热体温度的变化折算出耗电量为7625kWh,平均耗电量为119.6kWh/t粮。

### 2.5 电蓄热热风炉工作工况下风量风压测定计算

通过测定热风管各测点的动压,按下列公式进行计算,结果记录至表4。

$$\text{气体密度 } \rho = 355 / (273 + t), \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{风速 } v = (2H_{\text{动}}/\rho)^{0.5}, \text{ m/s};$$

$$\text{容积风量 } V = 3600vA, \text{ m}^3/\text{h};$$

$$\text{质量风量 } L = \rho V, \text{ kg/h}。$$

式中: $t$ —热风温度,℃; $A$ —热风管截面积,m<sup>2</sup>; $A = 0.503 \text{ m}^2$ 。

表4 电蓄热热风炉热风风压测定记录计算结果

测定时间	大气压力 /Pa	风温 /℃	动压 /Pa	风量计算			
				气体密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	风速 / (m/s)	容积风量 / (m <sup>3</sup> /h)	质量风量 / (kg/h)
9:30	1.01 × 10 <sup>5</sup>	105	60.3	0.939	11.3	20 512	19 264
11:30	1.01 × 10 <sup>5</sup>	111	69.1	0.924	12.2	22 118	20 448
13:30	1.01 × 10 <sup>5</sup>	105	60.3	0.939	11.3	20 512	19 264
平均值	1.01 × 10 <sup>5</sup>	107	63.2	0.934	11.6	21 043	19 659

### 2.6 干燥机系统所需总热量计算

干燥机所需总热量  $Q_r = L \cdot (t - t_h) = 19 659 \times (107 - 9.3) = 1 920 684 \text{ kJ/h}$

式中: $L$ —质量风量,kg/h; $t$ —热风温度,℃; $t_h$ —环境温度,℃,见表1。

### 2.7 电储能炉放热量计算

根据原材料供应商提供的数据,电蓄热热风炉蓄热体温度在400至500℃时,蓄热体比热容为1.1kJ/(kg·℃),质量为175t,在9:30起4h的测试时间内电蓄热热风炉温度下降55℃,电蓄热热风炉热效率按95%计算,根据公式  $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$ ,计算结果见表5。

表5 电蓄热热风炉储热能力计算结果

测定项目	平均值
电储能炉储能固体比热容 $c / (\text{kJ/kg} \cdot \text{℃})$	1.1
电储能炉固体质量 $m / \text{t}$	175.0
电储能炉温差 $\Delta t / \text{℃}$	55.0
小时储能炉放热量 $Q / (\text{kJ/h})$	2 514 531

### 2.8 干燥系统热效率

$\eta = Q_r / Q \times 100\% = 1 920 684 / 2 514 531 \times 100\% = 76.3\%$

式中: $\eta$ —干燥系统热效率,%; $Q_r$ —干燥系统所需总热量,kJ/h; $Q$ —电蓄热热风炉放热量,kJ/h。

### 2.9 理论工况电蓄热热风炉装机容量计算

#### 2.9.1 干燥机主要工艺参数设定

处理量:15t/h;进机湿粮水分:30.0%;出机

干粮水分:14.5%;降水幅度:15.5%;环境温度:  
-20℃

### 2.9.2 有关计算

小时水分蒸发量

$$W = 1\ 000P \cdot (w_1 - w_3) / (100 - w_3)$$

$$= 1\ 000 \times 15 \times (30 - 14.5) / (100 - 14.5)$$

$$= 2\ 719.2 \text{ kg/h}$$

式中:W—在一次干燥过程中粮食小时水分蒸发量,kg/h; $w_1$ —出机粮食含水率,%; $w_3$ —进机粮食含水率,%。

烘干机所需总热量

$$Q_r = Q_1 + Q_2$$

$$= 2\ 719.2 \times 4.2 \times (100 - (-20)) + 2\ 257.2 \times 2 \times 2\ 719.2$$

$$= 7\ 508\ 255 \text{ kJ}$$

其中,水的比热容为4.2 kJ/kg·℃,100℃时的汽化潜热为2 257.2 kJ/kg

式中: $Q_1$ —一次干燥过程中粮食小时水分蒸发需要的热量; $Q_2$ —10℃水变为10℃水蒸气需要的热量。

### 2.9.3 电蓄热热风炉装机容量

根据经验<sup>[1]</sup>,电蓄热热风炉的热转换率为95%,粮食干燥机系统的热效率按75%计算,则按照以上工艺参数的选择,正常工况下电蓄热热风炉需要为粮食干燥机提供的热量为:

$$Q = Q_r / (95\% \times 75\%) = 7\ 508\ 255 / (95\% \times 75\%) = 10\ 575\ 007 \text{ kJ/h}$$

电蓄热热风炉的装机容量  $P = Q / 3\ 600 = 2\ 937 \text{ kW}$

因此,使用电蓄热热风炉作为热源,为处理量15 t/h干燥机提供热量时,其装机容量应不小于3 000 kW。

## 2.10 经济效益分析

### 2.10.1 设备投资情况

处理量为15 t/h的粮食干燥机需配套的电蓄热粮食干燥专用热风炉总装机容量(即蓄热能力)为3 000 kW,一次性投资为240万元左右。

同等供热能力的燃煤型热风炉其热风室前工作单元装机容量为40.5 kW,投资为100万元左右;脱

硫和除尘单元装机容量一般为50 kW左右,投资40万元/套。

### 2.10.2 生产运行成本

生产运行成本仅计算煤、电的成本,操作人员工资,脱硫除尘成本。设备配件、维护等其他费用仅作参考,不按天计入生产运行成本。详见表6。

表6 电蓄热粮食干燥专用热风炉与燃煤热风炉生成运行成本对比分析

项目	电蓄热粮食干燥专用热风炉 燃煤热风炉			
	波谷电价	政策电价		
热功率/kJ/h	$1.25 \times 10^7$		$1.25 \times 10^7$	
主要燃料性质	电		煤	
装机容量/kW	3 000		90.5	
燃料发热值/(kJ/kg)	/		$2.1 \times 10^4$	
燃料消耗量	电/(kWh/t)	119.6	7.3	
	煤/(t/d)	/	20.4	
燃料价格	电/(元/kWh)	0.43	0.21	
	煤/(元/t)	/	450	
燃料支出	电支出/(元/t)	51.5	25.2	
	煤支出/(元/t)	/	30.6	
	其他支出/(元/t)	/	0.3	
人数/个	1	1	4	
人员	班次/(班/天)	1	1	3
工资	工资/(元/班)	240	240	240
	单位工资,元/t	0.8	0.8	9.6
单位运行成本/(元/t)	52.3	26.0	45.7	
其他费用	每3到5年更换 排污、清灰、除渣、一次加热元件 维修、场地费			

注:①根据能源部国家物价局能源经[1992]473号文件《关于东北电网实行峰谷分时电价的批复》规定,谷电价为0.43元/kWh。如执行辽宁省《全省“煤改电”试点工作方案》,电价不分时段一律为0.21元/kWh。

②表中其他支出为:燃煤热风炉脱硫除尘单元补水及使用生石灰等费用。

## 3 结论

在整个试验过程中,电蓄热热风炉连续释放供热,设备自动运行稳定,没有任何废气、废水、废渣产生,实现了二氧化碳零排放,电蓄热热风炉的热效率在95%以上,具备清洁、低碳、环保的特点。如果执行辽宁省《全省“煤改电”试点工作方案》对应用煤改电的清洁能源进行电价补贴,电蓄热热风炉的运行成本低于燃煤热风炉,节约运行费用、降低运行成本,具有较大的推广应用前景。

### 参考文献:

[1]中国储备粮管理总公司,辽宁省粮食科学研究所编.粮食干燥系统实用技术[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2005. 98