

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-119-07

玉米出库前蒸发式冷气机调质通风实验

蒋苏贤¹ 黄翔¹ 武茁苗¹ 褚俊杰¹

杜善慧² 贺琳² 李锋² 张文锦³ 陈桂洋³ 万锦程⁴

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 陕西西瑞粮食储备库有限公司 咸阳 712000;

3. 澳蓝(福建)实业有限公司 福州 350000;

4. 陕西天山西瑞面粉有限公司 咸阳 712000)

【摘要】 分析了粮仓热环境对粮食存储的影响, 提出将蒸发冷却技术与粮仓相结合, 通过对蒸发式冷气机应用于玉米出库前调质通风实验可得, 在调质数小时后实验测试的两组玉米平均水分分别增加了0.5%、1%, 在一定程度上增加了玉米净重, 有效地降低储备过程中因水分损耗造成的亏损, 提高了经济效益, 在加湿的同时, 也可有效降低粮堆内部的温度, 实现对粮堆加湿降温的双重效果。同时指出将蒸发冷却技术应用于粮食储藏方面是一种高效且节能为一体的运用。

【关键词】 粮仓热环境; 玉米; 蒸发式冷气机; 调质通风; 水分

中图分类号 TU99 文献标志码 A

Experiments on the Conditioning and Ventilation of Evaporative Coolers for Maize before Leaving the Warehouse

Jiang Suxian¹ Huang Xiang¹ Wu Zhuomiao¹ Chu Junjie¹

Du Shanhui² He Lin² Li Feng² Zhang Wenjin³ Chen Guiyang³ Wan Jincheng⁴

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an polytechnic University, Xi'an, 710048;

2. Shaanxi Xirui Grain Storage Co., Ltd, Xianyang, 712000;

3. AoLAN (Fujian) Industrial Co., Ltd, Fuzhou, 350000;

4. Shaanxi Tianshan Xirui Flour Co., Ltd, Xianyang, 712000)

【Abstract】 This paper analyzes the influence of thermal environment of granary on grain storage, and proposes the combination of evaporative cooling technology and granary, through the application of evaporative air conditioner to the conditioned ventilation experiment of corn before discharging from the granary, the average moisture of the two groups of corn in the experiment test increased by 0.5%, 1%, respectively, after a few hours of conditioning, and the net weight of corn increased to a certain extent. It can effectively reduce the loss caused by water loss in the storage process and improve the economic benefit. While humidifying, it can also effectively reduce the internal temperature of the grain pile and achieve the double effect of humidifying and cooling the grain pile. At the same time, it is pointed out that the application of evaporative cooling technology in grain storage is an efficient and energy-saving application.

作者简介: 蒋苏贤 (1997.02-), 女, 硕士, E-mail: 1073101237qq.com

通讯作者: 黄翔 (1962.07-), 男, 硕士, 二级教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-09

【Keywords】 Granary thermal environment; corn; evaporative air conditioner; Quality and ventilation; Moisture content

0 引言

民以食为天,粮食是关乎我国社会稳定,国家安全的重要保障。从粮食生产、储藏到最终流向市场,每一环节都是至关重要的。其中粮食储藏是粮食流通的关键一步,据测算,我国每年仅储藏环节粮食损耗约 400 亿斤,因此降低储藏环节的粮食损耗对于保障我国粮食安全起着至关重要的作用^[1]。玉米具有丰富的营养价值,相比于其他农作物,其总产量位居世界第一,也是我国最重要的农作物之一。在储存玉米时,热环境是影响其储藏质量的关键因素,从储粮热环境角度出发,其中对粮食安全起到决定性作用的是温度和湿度,但其易受到气候环境、仓库条件等因素的影响,在存储方面有一定的风险与难度。温湿度对粮食呼吸作用、粮食虫害的生长以及微生物的繁殖等均有不同程度的影响^[2],如何改善粮仓热环境成为不可忽略的问题。近年来,相关学者从不同的存储环境^[3]、通风方式^[4,5]等方面进行探讨,以便有效控制粮仓内湿度和温度,调节储藏环境,保证粮食品质。

我国疆幅域广,不同地区海拔不同,也造成不同的气候环境。同时由于不同环境,不同的气候,也就导致各地区湿度不同,根据蒸发冷却技术应用区域可分为干燥地区、中等湿度地区、高湿度地区,不同地方有各自划分标准^[6]。其中在干燥地区,粮仓需要增加储粮水分,保证储粮安全,尤其是在夏季炎热时节,正是粮仓最需要调解的时候。同时,也是蒸发冷却技术使用最佳的时机。利用蒸发冷却技术,不仅可达到粮仓所要求的温度和湿度,以此防止粮仓因温湿度失衡导致对储粮带来的不利影响,同时还可有效减少能耗。目前越来越多的粮仓可达到低温仓、准低温仓的要求,但低温密闭的粮仓在降温降湿的同时也导致粮食在储存过程中水分的散失。

陕西西瑞粮食储备库有限公司位于陕西省咸阳市兴平,该地区在秦岭-淮河线以北,地处暖温带,属于中等湿度地区,夏季炎热高温以及冬季干燥的气候对粮食储备造成了一定的影响。通过对西瑞粮仓的测试数据分析,储存两年以上的玉米水分平均降低 1%~1.5%,这不仅会对公司造成严重的经济损失,还会对玉米质量带来严重的影响。为使得粮仓内湿度、温度达到玉米出库要求,并确保在安全的储藏条件下,因此利用蒸发式冷气机对粮堆进行调质通风。调质通风一般用于即将出仓的粮食,在粮食出仓前,向粮堆内通入湿度较高的空气,使粮食水分在一个适合于加工的标准,达到增大粮食加工品质的效果^[7]。而蒸发式冷气机采用直接蒸发冷却技术原理,可对粮仓进行加湿降温处理,补足因储粮水分热温蒸发而造成的储粮质量损失,通过调质通风技术,将储粮水分调至到要求标准,将会极大改善仓储粮食的品质,与此同时,蒸发式冷气机不仅具有良好的加湿冷却性能,同时也有很好的节电性能,进而节省了公司运行成本^[8-10]。

1 材料与方法

1.1 仓房基本情况

陕西西瑞粮仓储备库有限公司粮库 11 号仓为 2007 年 9 月建设的高大平方仓,仓房构造(长×宽×高)41.72m×23.46m×8m,隔热保温措施采用混凝土处理。在仓房外部安装有三台蒸发式冷气机,并在每个冷气机出口处加装一台耐高温高湿低噪声混流风机,以便将被处理后的空气送入仓房内部。风道形式采用鱼鳞板地上笼通风道,仓房内有三个通风口,采用一机五道的布置方式。

1.2 储粮情况

储粮情况如表 1 所示。

表 1 粮食入库基本情况

Table 1 Basic information of grain storage

仓号	产地	品种	数量 (t)	入仓时间 (年·月)	入库水分 (%)	粮堆平均密度 (kg/m ³)	粮食体积 (m ³)	粮食高度 (m)
11	山西	玉米	3407.08	2021·5	13.5	764.4	4367.62	4.49

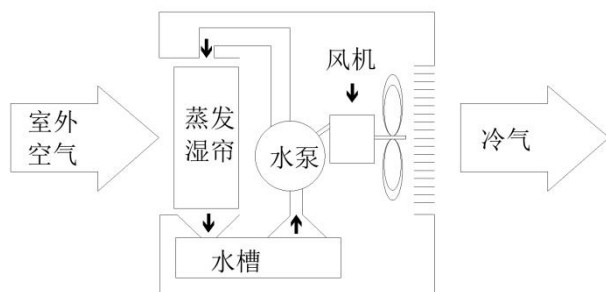
1.3 设备与仪器

1.3.1 蒸发式冷气机设备

设备置于 11 号粮仓门口(见图 1),蒸发式冷

气机采用直接蒸发冷却原理,主要由底盘、立柱、顶盖、水泵、布水管、蒸发湿帘、风机、电机、电器控制板等零部件构成。其工作过程是给水泵将水

输送到喷淋系统中, 由喷嘴将水均匀地喷洒在蒸发冷却填料上, 此时室外空气由风机输送到蒸发湿帘处, 并在填料层中与水进行热湿交换, 最终将被加湿冷却后的室外空气送入室内^[11]。



(a) 实验台原理图



(b) 实验台实物图

图 1 实验台

Fig.1 Experimental Table

蒸发冷却空调属于气象空调, 加湿效果与室外的气象参数的变化密切相关, 同时也利用干空气能充足的地区的空气对室内进行降温。

1.3.2 混流风机

仅依靠蒸发式冷气机内部的送风机无法将加湿降温后的空气压入粮仓, 同时根据实验测试^[12], 混流风机具有良好的保水效果, 因此在蒸发式冷气机出口处加装一台混流风机, 将对储粮企业经济效益产生正面影响, 使用单台功率 3kW 的混流风机可对粮库提供足够的风压和风量, 满足粮库的实际应用。

1.3.3 通风网络

地上笼通风系统, 仓内布置形式为横向设置的地上笼 (见图 2), 共有 3 个通风口, 15 道地上笼, 为一机五道, 单道间距为 2.7m, 距墙 1.3m, 地上笼为半圆形, 开孔为鱼鳞状镀锌板, 高 0.2m, 直

径 0.4m, 开孔率 35%, 开孔的最大尺寸保证粮食的不泄漏为标准。



图 2 地上笼通风系统

Fig.2 Above-ground cage ventilation system

1.3.4 仪器

表 2 测点位置与测量仪器

Table 2 Measurement point position and measuring instrument

测点位置	测试内容	测试仪器
蒸发式冷气机进风口	干球温度、相对湿度	Testo174H 温湿度自计仪
蒸发式冷气机通风口	度、风速	Testo405V 热敏式风速仪
仓温	干球温度、相对湿度	Testo174H 温湿度自计仪
下层玉米表层玉米	水分	粮食水分快速测量仪

1.4 测试方法

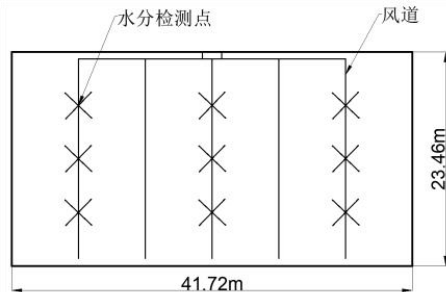
1.4.1 蒸发式冷气机的设定

本次测试共选择三个测点安装 Testo174H 温湿度自计仪, 分别在蒸发式冷气机进风口、蒸发式冷气机通风口以及仓温。选取夏季 6 月中一天, 天气晴朗, 测试时间为 10:30-14:00, 每隔 2 分钟记录一组干球温度和相对湿度数据。同时为防止因玉米水分快速升高而引起的粮堆结露问题^[13], 在调质通风中, 出风口温度必须大于粮堆所在空气环境的露点温度, 根据绝对湿度、相对湿度、露点温度和空气饱和水气量查定方法, 粮堆目标水分值为 13.5%, 粮堆粮温为 25℃, 露点温度为 17.3℃, 因此确保在调质通风时露点温度≥18℃。

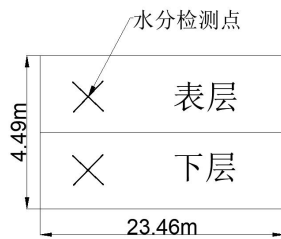
1.4.2 水分检测点的设置

在 11 号粮仓内选择铺设有地上笼通风系统的

粮堆，分为南中北三个方位，并在每个方位均等选取 3 个测点。根据标准化扦样的要求，保证试验样品的代表性，为了便于观察通风过程中各个区域粮食水分的变化情况，在调质通风完成后，利用粮食水分快速测量仪对玉米水分增加值进行检测，在粮堆下层（0.2m）、表层（0.2m）分别设置了 9 个、9 个共 18 个水分检测点，检测点分布如图 3 所示。



(a) 粮堆俯视图



(b) 粮堆侧视图

图 3 抽检取样点

Fig.3 Sampling points

2 测试数据分析

2.1 测试蒸发式冷气机在粮仓的应用情况

本次测试所在地点为陕西西瑞粮仓储备库有限公司粮库 11 号仓，测试内容为开启蒸发式冷气机对粮仓的加湿降温效果。

表 3 测试基本参数设定

Table 3 Test the basic parameter setting

测试参数	湿度、温度
测试仪器	Testo174H 温湿度自计仪
测试时间	10:30-14:00
时间间隔	每两分钟采集一组
测点布置	①蒸发式冷气机进风口处 ②蒸发式冷气机通风口处 ③仓内

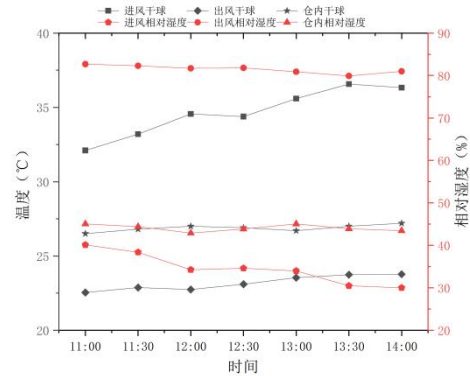


图 4 机组进/出风状态测试结果

Fig.4 Test results of unit in / out air state

从图 4 可看出，机组进风相对湿度随时间的推移逐渐减低，由 40.2%降低至 29.99%，进风干球温度随时间的推移逐渐升高，最高温度可达到 38.8℃。在开启机组运行稳定后，相对湿度稳定在 80%-83%，出风干球温度在 22-24℃。粮仓内部平均相对湿度为 44.19%，仓内干球温度波动较为平缓。

从图中可分析对比出，在机组开启一段时间后，机组进出风干球最大温降可达 12.83℃，进风平均含湿量为 11.88g/kg，随着时间推移，机组出风平均含湿量为 14.59g/kg，机组进出风平均相对湿度增加 47.09%。

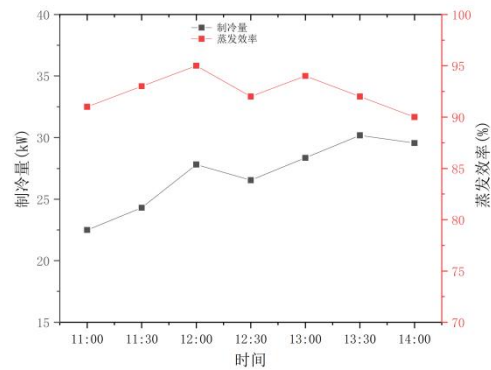


图 5 机组蒸发效率及制冷量测试结果

Fig.5 Test results of unit evaporation efficiency and

Refrigeration capacity

机组蒸发效率及制冷量测试结果，从图 5 可以看出，在同一风速下，随着时间变化，机组制冷量由 22.5kW 逐渐增加至 30.2kW，随后又缓慢降低至 29.6kW，机组蒸发效率由 91%增加至 95%，随后又降低至 90%。

2.2 测试玉米水分

本次测试内容为在开启 8 小时蒸发式冷气机

后, 测量两组玉米水分增加的情况, 测试数据如表 4、表 5 所示。

表 4 不同方位玉米水分的测试 (第一组)

Table 4 Test of corn moisture in different directions (Group I)

方位	南						中						北					
	下层			表层			下层			表层			下层			表层		
测点	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
水分 (%)	13.1	13.5	13.9	12.5	12.6	12.6	14.0	13.9	13.9	11.8	12.0	11.8	13.1	13.1	13.4	12.9	12.6	12.7

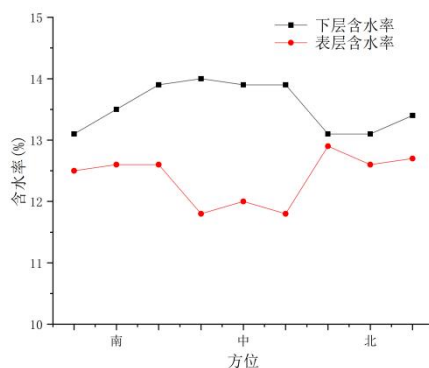


图 6 不同方位玉米水分测试 (第一组)

Fig.6 Moisture test of maize in different directions (Group 1)

表 5 不同方位玉米水分的测试 (第二组)

Table 5 Testing of corn moisture in different directions (Group II)

方位	南						中						北					
	下层			表层			下层			表层			下层			表层		
测点	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
水分 (%)	13.4	13.0	13.3	11.8	12.0	12.1	14.3	14.4	14.2	12.2	12.5	12.7	13.0	13.0	13.3	11.3	11.2	11.4

注: 下层: 选取玉米测量点是在距离地面 20cm 处; 表层: 选取玉米测量点是在距离粮堆表面 20cm 处^[14]。

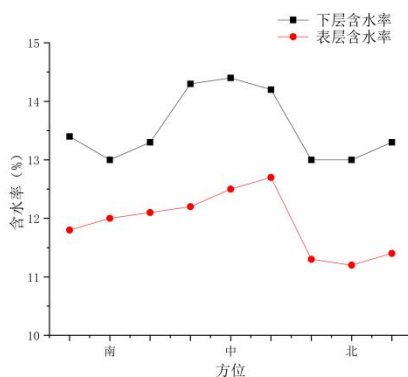


图 7 不同方位玉米水分测试 (第二组)

Fig.7 Moisture Test of Corn in different directions (Group 2)

通过蒸发式冷气机的增湿调制, 累计加水 0.53t, 通风时长 8h, 实现对玉米水分增加的目标。利用粮食水分快速测量仪对玉米水分的测试数据

分析可得, 调质通风稳定后, 下层两组玉米水分都有明显的增加, 第一组下层玉米水分最高可达到 14.0%, 下层玉米平均水分为 13.0%, 因表层玉米

距离蒸发式冷气机送风管道距离较远,对玉米水分没有明显的增加作用,表层玉米平均水分为 12.4%,其中表层与下层水分最大差值为 2.2%。第二组下层玉米水分最高可达到 14.4%,下层玉米平均水分为 13.5%,表层玉米平均水分为 11.9%,其中表层与下层水分最大差值为 2.1%。在设备运行稳定后,玉米下层水分均有明显的增加,与表层玉米水分相比,平均水分有 0.6%~1.1%的增长。第一组、第二组下层粮堆水分平均增加 0.5%、1%,因此可证明在不改变玉米品质的条件下可通过蒸发式冷气机调质通风的方法提升玉米水分,在一定程度上降低储粮的损耗,提高公司经济效益,实现了安全储粮、科学保粮、经济出粮的要求,不仅为储备粮管理提供了相关的技术支持,也为陕西咸阳地区储粮给出一定的参考意义^[15]。

蒸发式冷气机具有良好的加湿性能,经等焓加湿后送风平均相对湿度可提高 47%,在第一组下层铺设送风管道的玉米水分均值约为 13%,其蒸发式冷气机可达到的最大温降为 12℃。由此可见,蒸发式冷气机提高粮仓内部的相对湿度,对粮食的水分有明显的提升作用,可以带来很大的经济效益,在提供加湿的同时也有很好的制冷效果。在低能耗

的前提下,有效地改善了粮仓的热环境,保证粮仓内稳定的储存条件,降低粮食损失以便于公司更好的发展。

3 经济性分析

粮食(如玉米)在储藏过程中,水分是较为重要品质指标之一,在粮食(如玉米)入库、储藏、销售过程中水分是重要的参考指标,安全的水分可以有效防止小麦发霉和害虫生长。同时,根据实测可得,玉米存储过程中,其入仓时的水分是在 13.5%,经过一段时间内的存储,玉米出库时的水分降低至 12.5%,有 1.0%水分的折损,这些水分的损失将直接对公司效益造成严重的影响。

根据玉米水分实测数据显示,在开启 8 个小时的蒸发式冷气机后,粮仓内第一组下层玉米的平均水分为 13.0%,与玉米出库水分 12.5%相比,增长约为 0.5%,开启 8 个小时的冷气机耗电量 6.4kWh。根据 11 号仓粮食实际数量 3407.08t,玉米水分从 12.5%增至 13.0%,按照存粮数计算,粮食增量为 17.0t,以一斤玉米 1.2 元收价,扣除一天调质通风消耗 234.6 元后(见表 6),一个粮仓可为公司节省 40650 元。

表 6 调质通风消耗费用

Table 6 Cost of quality ventilation

序号	设备	功率/kW	耗用	台数	费用单价/元	合计总价/元
1	蒸发式冷气机	0.8	8h	1	0.73 (元/kWh)	4.7
2	混流风机	3	8h	1	0.73 (元/kWh)	17.5
3	水	—	0.528t	—	4.50 (元/t)	2.4
4	设备折旧	—	—	—	—	10
5	人工成本	—	—	—	—	200
合计	—	—	—	—	—	234.6

4 改进意见

(1) 优化送风系统,目前粮仓内仅在下层铺设送风管道,根据实测数据发现,靠近风口的通风效果是明显优于其他位置,即仅有下层玉米水分增加较多,显然这样的通风降温效果差强人意,造成这样的结果主要是因为粮仓一般属于高大平方仓,粮食堆积较高,仅依靠压入式送风无法满足粮仓内其余部分玉米调质要求,而风道的设计和通风形式存在一定的弊端从而导致送风不均匀。因此提出对粮仓内送风管道优化,首先该粮仓内风道采用的是

一机五道的“U”形式,其沿程阻力随着风速加大而加大,此外该风道有着较多的 90°转角,这也带来通风不均匀的问题。因此提出采用环形风道,以达到解决通风均匀问题和减少阻力的目的,该风道设计形式为反对称,通过压力差在风道形成的横向流动来使通风达到均匀的效果,主风道的连接是光滑切向曲面,没有三通和转向弯道,减少了阻力和流动干扰,在不用风量调节阀的情况下风量依旧能够均匀地分配到每一个出风口,等截面设计的地槽对于各种送风方式都能很好的适用,整个系统对风

机的要求也不高,节省了初投资^[7]。同时根据粮堆高度分上、中、下三个位置进行调质通风,在对中、下层粮堆进行调制通风时可选择保水效率较好的混流风机,在对上层粮堆进行调制通风时可选择风网阻力较大的离心式风机,用于通风作业。

(2) 优化蒸发式冷气机喷淋时间,按照玉米储存要求,其水分不得超过14%,根据第二组玉米水分的测试,在使用蒸发式冷气机后,其中玉米水分最高已达到14.4%,已超过规定要求,因此在对粮仓进行调制通风时,要注意对粮仓内湿度的准确控制,为防止玉米水分过高,在使用蒸发式冷气机时,可合理采取间歇式喷淋方式。

5 展望

陕西西瑞粮仓储备库有限公司的11号粮仓是属于新型国家粮食储备仓,该类粮仓属于高大平方仓,主要特点是设计合理,机械化配置齐全。目前针对储粮有各种节能技术措施,如仓顶轴流风机排积热、仓顶及外墙喷涂热反射涂料技术以及蒸发冷却技术等^[16],这些技术的发展离不开节能、绿源的主题。根据国家对粮油存储的要求以及对节能减排的规定,粮食行业也在大力提倡“绿色粮仓”,以此达到高效、节能的目标。对能源的充分利用,可以保证在保质保量储粮过程中,尽可能减少能源投资,这是粮食储藏技术的发展目标。

蒸发冷却技术是利用水与空气之间的热湿交换来制取冷量,是一种高效且经济的自然冷却技术,该技术之所以能够受到如此重视,不仅是因为其工作原理简单,同时还有较低的冷却设备成本,初期投资是传统制冷空调的一半,并能有效缓解夏季用电高峰的问题^[17]。同时农业建筑在夏季中还有蒸发冷却降温技术有湿热风机降温系统、细雾蒸发降温系统、喷淋降温系统、雾帘降温系统、集中式雾化降温系统^[18],由此可见蒸发冷却技术在粮仓储粮应用也有相当的应用基础。

目前,粮食科技工作者、空调技术研究学者,要把握好国家政策的最新动向,以节能环保为宗旨、以发展低碳经济为目标、以技术革新为手段,借助国家构建节能环保、可持续发展的和谐社会的良好时机^[19],更好的去研究如何将一种绿色、节能、低碳的空调技术应用于粮食存储中,以实现科学储粮,绿色存储的目标。

参考文献:

- [1] 岗强.储藏条件对小麦品质的影响及其变化规律研究[D].郑州:河南工业大学,2022.
- [2] 江春阳.西安市储粮建筑热湿环境的优化研究[D].西安:西安工程大学,2013.
- [3] 胡士义,胡小康,杜志国.浅析辽阳地区粮食贮藏、晾晒与气象[J].科技风,2015,(4):219.
- [4] 童国平.横向通风技术在高大平房仓中的应用研究[D].郑州:河南工业大学,2020.
- [5] 赵海燕,沈邦灶,李倩倩,等.稻谷平房仓横竖向通风系统调质通风实验研究[J].粮油食品科技,2018,26(1):95-100.
- [6] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [7] 汤文良.小麦仓储建筑的热环境现状调查与研究[D].西安:西安工程大学,2012.
- [8] 郭道林,胡光,杨龙德,等.运用低温储粮技术提高仓储效益[J].粮食储藏,2002,(3):27-30.
- [9] 张来林.储粮机械通风技术[M].郑州:郑州大学出版社,2014.
- [10] 国家粮食局人事司.粮油保管员[M].北京:中国轻工业出版社,2016.
- [11] 沈天磊,黄翔,武苗苗,等.渭南市某通信机房蒸发式冷气机实测分析[J].制冷与空调,2023,37(1):124-128,152.
- [12] 孙华保,唐中凯,王维.两种风机通风降温降水的对比性试验[J].粮食加工,2017,42(4):77-79.
- [13] GB/T 29890-2013,粮油储藏技术规范[S].北京:中国质检出版社,2013.
- [14] 国家粮食和物资储备局.《政府储备粮油质量检查扦样检验管理办法》[Z].2023.03.27.
- [15] 冯继明,吴佑思,程发根,等.大米堆垛出库前增湿机调质通风试验[J].粮食加工,2019,44(1):71-73.
- [16] 江春阳,狄育慧.节能空调模式在粮仓中的应用初探[J].粮食储藏,2012,41(5):29-31.
- [17] 黄翔.蒸发冷却:一种绿色、节能、低碳的空调技术[R].中国建材报,2022,10(11版).
- [18] 马承伟,黄之栋,李保明,等.农业建筑蒸发降温技术研究与应用现状及展望[J].农业工程学报,1995,11(3):95-100.
- [19] 张朝辉,陈敬良.新的十年,关于节能环保发展方向的思考[J].制冷与空调,2008,(11)1-8.