

真空回转保湿制氮技术在大豆贮藏中的应用

宁乐乐¹ 刘勇² 渠琛玲¹ 李继海³ 来振利⁴ 陈振攀³ 黄超⁴

(1. 河南工业大学粮食和物资储备学院,河南 郑州 450001; 2. 武汉东昌仓储技术有限公司,湖北 武汉 430074;

3. 商丘市京九粮食储备库,河南 商丘 476299; 4. 双工方程(武汉)科技发展有限公司,湖北 武汉 430011)

摘要: [目的]为解决传统制氮工艺能耗高、设备体积大、需使用压力容器等问题,研发新型工艺模式下的气调防虫技术,并应用于大豆气调贮藏,有效实现防虫目标。[方法]采用一种“常压工况+密闭循环取气”工艺模式下的气调技术(简称真空回转保湿制氮技术)对大豆粮堆(35.7 m×25.6 m×6 m)进行为期3个月的充氮气调,保持98%浓度以上氮气气调28 d,而后保持95%浓度以上气调贮藏至试验结束。对气调过程中充氮降氧效率和仓间低氧维持情况进行监测,评估气调贮藏的杀虫效果;测定充氮前后大豆品质的变化(大豆损伤粒率、水分含量、过氧化值、粗脂肪酸值、碘值、蛋白质溶解比和菌落总数);并分析充氮能耗。[结果]降氧阶段充氮仓各层氧气浓度降至杀虫浓度(<2%)共耗时108 h,其中设备运行时长为67 h,低氧维持阶段粮堆各层氧气浓度能在设备不运行的情形下有效维持最长171 h,设备累计运行38 h。低氧(氧气浓度2%以下)维持20 d以上,虫样死亡率100%。充氮前后大豆损伤粒率、水分含量、过氧化值、碘值、蛋白质溶解比和菌落总数均无显著变化,但对照仓和充氮仓中层和下层大豆粗脂肪酸值变化显著($P < 0.05$),说明氮气气调可延缓大豆酸败。[结论]充氮期间,充氮仓的整体吨粮能耗为0.88 kW·h/t,其中降氧阶段为0.55 kW·h/t,低氧维持阶段为0.33 kW·h/t。

关键词: 真空回转保湿制氮技术; 氮气气调; 杀虫防虫; 品质; 能耗

Application of vacuum rotary nitrogen preparation with moisture control in soybean storage

NING Lele¹ LIU Yong² QU Chenling¹ LI Jihai³ LAI Zhenli⁴ CHEN Zhenpan³ HUANG Chao⁴

(1. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Wuhan Dongchang Storage Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Shangqiu Jingjiu Grain Reserve, Shangqiu, Henan 476299, China; 4. Duplex (Wuhan) Technology Development Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430011, China)

Abstract: [Objective] To solve the problems of high energy consumption, large equipment volume, and the need to use pressure vessels in traditional nitrogen production, this study develops a new pest prevention technology and applies it to the modified atmosphere storage of soybeans to effectively realize pest prevention. [Methods] Soybeans (pile size: 35.7 m×25.6 m×6 m) are stored for 3 months using a modified atmosphere storage technology under atmospheric pressure with a closed gas cycle, referred to as vacuum rotary nitrogen preparation with moisture control. The concentration of nitrogen is maintained at 98% for 28d, and then at 95% for 2 months. The oxygen reduction efficiency and the maintenance of low oxygen are monitored during the modified atmosphere storage. The insecticidal effect is evaluated, and the changes of soybean quality (including soybean damage rate, moisture content, peroxide value, crude fatty acid value, iodine value, protein solubility ratio, and total colony count) are determined before and after nitrogen filling. Finally, the energy consumption of nitrogen-controlled atmosphere storage (N₂-CAS) is analyzed. [Results] The oxygen concentration of each layer of the soybean pile is reduced to the insecticidal concentration (<2%) within 108 h, during which the equipment operates for 67 h. In the low-

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:32372402); VRM 制氮技术在粮食储藏中的应用研究(编号:2024410124000020)

通信作者:渠琛玲(1982—),女,河南工业大学教授,博士。E-mail:quchengling@163.com

收稿日期:2025-04-21 **改回日期:**2025-08-23

引用格式:宁乐乐,刘勇,渠琛玲,等. 真空回转保湿制氮技术在大豆贮藏中的应用[J]. 食品与机械,2025,41(12):117-122.

Citation:NING Lele, LIU Yong, QU Chenling, et al. Application of vacuum rotary nitrogen preparation with moisture control in soybean storage[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 117-122.

oxygen maintenance stage, the oxygen concentration in all layers of the soybean pile is kept stable for up to 171 h without operating the equipment, which only operates for a total of 38 h. When the hypoxia (oxygen concentration of 2% or less) is maintained for 20d, the mortality rate of the insects is 100%. Before and after N₂-CAS, there are no significant changes in soybean damage rate, moisture content, peroxide value, iodine value, protein solubility ratio, and total colony count. However, there is a significant difference in the crude fatty acid value of soybeans in the middle and lower layers of the control and N₂-CAS ($P < 0.05$) piles. It indicates that N₂-CAS is able to delay the rancidity of soybeans. [Conclusion] The overall energy consumption per ton of the soybean for N₂-CAS is 0.88 kW·h/t, including 0.55 kW·h/t in the oxygen reduction stage and 0.33 kW·h/t in the low oxygen maintenance stage.

Keywords: vacuum rotary nitrogen preparation with moisture control; modified atmosphere storage of nitrogen; pest killing and prevention; quality; energy consumption

氮气气调储粮技术是当前国内外绿色储粮技术的重要发展方向^[1]。该技术利用高浓度氮气在粮仓内形成不利于害虫及霉菌生长发育的生态环境,实现抑制粮食呼吸,虫霉防治,延缓粮食品质变化的目的^[2]。

充氮气调技术在实际应用中仍存在一些局限性^[3]。传统制氮主要是分子筛(PSA)和膜分离两种设备^[4]。分子筛制氮技术生产的氮气纯度高,产量大,但需要压力容器,维护成本和能耗也比较高。膜分离制氮技术生产的氮气浓度低,设备成本低,但产量小,膜组件更换费用高^[5]。气调储粮仓气密性应满足GB/T 25229—2024中的规定,粮仓整仓和仓内薄膜密封粮堆的气密性压力半衰期均应符合三级及以上的规定。目前,中国绝大多数仓房气密性达不到气调储粮的要求,需要进行气密性改造^[6]。

研究拟使用一种独特的“常压工况+密闭循环取气”工艺模式下的气调防虫技术,该技术可实现“常压运行工况下的充氮防虫、节能降耗模式下的机械调控”双重功能,简称真圆回转保湿制氮技术。该技术以真空泵吸工艺替代传统的空气压力注入工艺(图1),运行压力<100 kPa,属于常压运行设备,设备不再使用压力容器、不需要特种压力设备的管控与备案,节约了人力、物力及成本^[7]。此外,该设备既能够联动运行,也可以各自独立控制和运行,设备在充氮降氧阶段同时开启主、辅机进行协同充氮降氧,可以在最短时间内达到气调防虫指标;在氮气浓度维持阶段,根据氧气回升情况适时开启辅机进行接续的控氧,辅机可以单独10 kW左右低功耗模式运行,能够最大限度降低气调防虫能耗。

研究采用真圆回转保湿制氮技术对粮堆进行气调,监测气调过程中粮温、充氮降氧效率和仓间低氧维持情

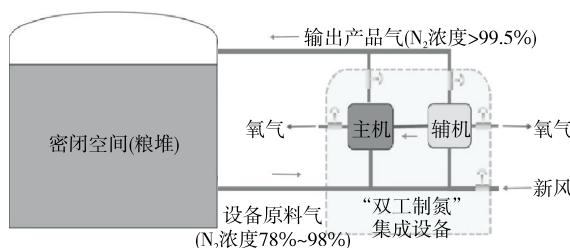


图 1 “常压工况+密闭循环取气”工艺流程图

Figure 1 Atmospheric pressure with a closed gas cycle

况,测定大豆损伤粒率、水分含量、过氧化值、粗脂肪酸值、碘值、蛋白质溶解比等品质指标,并对充氮能耗进行分析,旨在为该技术在粮食贮藏中的推广应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验仓房

试验仓房位于河南省商丘市京九粮食储备库,仓房均为普通房式仓,长约35.7 m,宽约25.6 m,装粮高度为6 m,在库容量5 077 t。1#仓为充氮仓,4#仓为对照仓。

1.2 材料与试剂

大豆:2024年4月入库,美国进口;

石油醚、异丙醇、乙醚、酚酞、可溶性淀粉、硫代硫酸钠、冰乙酸、三氯甲烷、碘化钾、环己烷、韦氏试剂、硫酸铜、硫酸钾、硫酸、硼酸、氢氧化钠等均为国产分析纯。

1.3 仪器与设备

制氮机:SG-400S型,武汉东昌仓贮技术有限公司;

手持式氧气检测仪:MS-400 O₂型,深圳市逸云天电子有限公司;

手持式二氧化碳检测仪:MS-400 CO₂型,深圳市逸云天电子有限公司;

热合机:FR1500型,山东鼎冠机械设备有限公司;

电子天平:PL203型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

色差计:AC-A305型,日本柯尼卡美能达公司;

低温连续锤式旋风磨:TDW-5000型,北京同信天博科技发展有限公司;

全自动凯氏定氮仪:KJELTEC2300型,上海瑞玢国际贸易有限公司;

恒温水浴锅:DZKW-D/S型,北京市永光明医疗仪器有限公司;

水浴振荡器:SHZ-C型,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司。

1.4 试验方法

1.4.1 仓房密封方法 试验前对仓房可能泄露的区域和位置进行巡检,对存在泄露的点位采取密封处理措施,包括玻璃胶填充、薄膜密封、胶槽密封、透明胶带密封等,尽可能减少仓房内的氮气泄漏。

粮面处理:用单层12 mm尼龙复合膜进行覆盖,用密

封胶槽和橡胶条进行连接,拐角处用硅酮玻璃胶进行填塞密封;仓房大门处理:采用双层12 mm尼龙复合膜进行贴合,用密封胶槽和橡胶条进行连接,拐角处用硅酮玻璃胶进行填塞密封;管线处理:对于穿过薄膜的电源线、电缆线,先用透明胶进行初步固定密封,再用硅酮玻璃胶填塞密封;地笼口处理:更换全新的密封垫圈,关紧出口门后用硅酮玻璃胶沿着门缝密封一圈;缝隙处理:对于延伸到粮面以上的墙体缝隙,用硅酮玻璃胶填塞密封、找平。

1.4.2 充氮方式 对1#仓进行充氮,使氮气浓度上升至98%以上后气调28 d后,保持仓内氮气浓度95%以上气调2个月,至试验结束。采用环流充氮方式,利用底部通风地笼将仓间气体抽回设备,并通过设备产生高浓度氮气注入仓房内部粮面。粮面铺设“m”形导流管,导流管直径160 mm,导流管延伸至仓房四角留出气口。充氮降氧阶段设备“主机+辅机”联动全功率运行,低氧维持阶段根据需求选择“主机+辅机”联动运行或单辅机低功率运行。充氮期间保持上方帐幕的鼓胀状态,避免出现粮仓内部负压状态。

1.4.3 粮温检测方法 采用粮仓粮情智能监测系统进行粮温及环境温湿度的监测与采集。

1.4.4 氧气浓度检测方法 充氮降氧及通风复氧过程中,采用氧气巡检系统对各监测点的氧气浓度进行逐一巡检,检测频次为30 min/次。在粮面密闭前布置测气点,在粮面4个角距墙面1.5 m处及粮面正中间共5个位置,每个位置在不同粮层深度布置3个检测点,分别位于粮堆上层(距离粮面1 m)、中层(3 m)、下层(距地面1 m),覆膜下方的粮面正中间也布置1个检测点。

1.4.5 虫样布置及杀虫效果评价 挑选谷蠹、米象等6种实验室饲养虫样各3组,按照对角线分三点置于粮堆中(距粮面20~30 cm),虫样采用打孔容器盛装并置于虫笼内,做好防逃逸措施。充氮结束后,对试验虫样进行检查记录,分析虫样死亡率。在充氮前后,对粮食虫情进行筛选检查,根据GB/T 29890—2013《粮油储藏技术规范》要求进行虫情评价,综合判定杀虫效果。

1.4.6 大豆品质指标测定方法

- (1) 损伤粒率:参照GB 1352—2023。
- (2) 水分含量:参照GB 5009.3—2016。
- (3) 过氧化值:参照GB 5009.227—2023。
- (4) 粗脂肪酸值:参照GB 5009.229—2016。
- (5) 碘值:参照GB/T 5532—2022。
- (6) 蛋白质溶解比:参照GB/T 31785—2015。
- (7) 菌落总数:参照GB 4789.2—2022。

2 结果与分析

2.1 充氮期间粮情的变化

2.1.1 充氮期间粮堆温度变化 整个充氮期间,充氮仓和对照仓温在22.0~30.9 °C之间波动;最高粮温为26.7~29.8 °C,最低粮温为12.8~13.4 °C,粮堆平均粮温基本维持稳定,维持在(19.6±0.6) °C。

2.1.2 充氮降氧效率 由图2可知,充氮降氧过程中,降氧前期氧气浓度呈上层<中层<下层的规律。充氮降氧阶段,设备停机后,粮堆内氧气因气体均衡及气温变化有所回升。充氮仓各层氧气浓度降至杀虫浓度(<2%)共计耗时108 h,其中设备运行时长为67 h。

2.1.3 仓间低氧维持能力 粮堆氧气浓度下降至2%且氮气分布均衡后,需根据粮堆氧气浓度变化适时开启设备进行充氮,充氮仓低氧维持阶段氧气浓度变化情况如图3所示。由图3可知,粮堆各层氧气浓度降至1.5%以下后停机,进入低氧维持阶段。通过对粮堆氧气浓度的持续监测结果表明,粮堆各层氧气浓度能在设备不运行的情况下最长有效维持171 h,然而受到仓房气密性及气候变化条件的影响,低氧维持阶段浓度有所回升,需适时开机运行使粮堆各层氧气浓度均在1.5%以下,在低氧维持阶段设备累计运行38 h。

2.2 充氮期间杀虫效果

2.2.1 粮食筛选检查 充氮前对充氮仓进行筛选虫计数(选取仓间四角加中间5个点位),统计充氮仓主要虫害为印度谷螟,害虫密度为4头/kg,虫粮等级为一般虫粮。充氮后采用同种方式对充氮仓进行筛选,筛选未发现活虫,表明充氮杀虫效果明显。

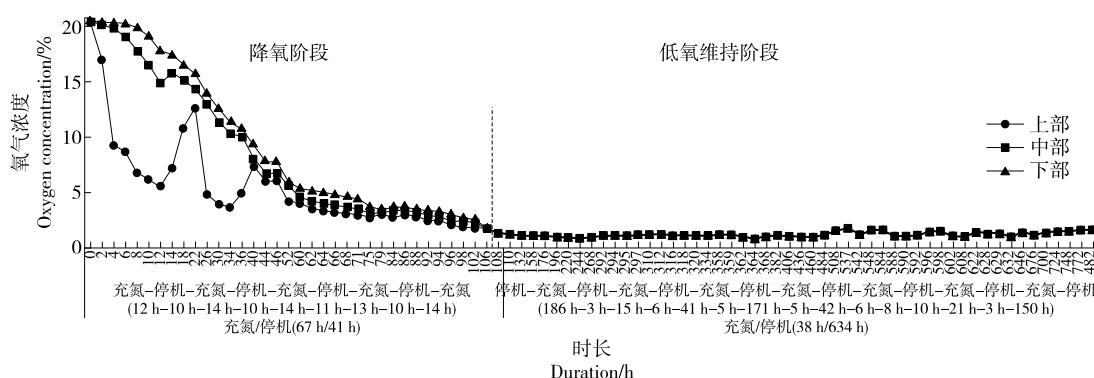


图2 充氮仓粮堆不同位置氧气浓度变化

Figure 2 Variation of oxygen concentration at different locations in N₂-CAS soybean pile

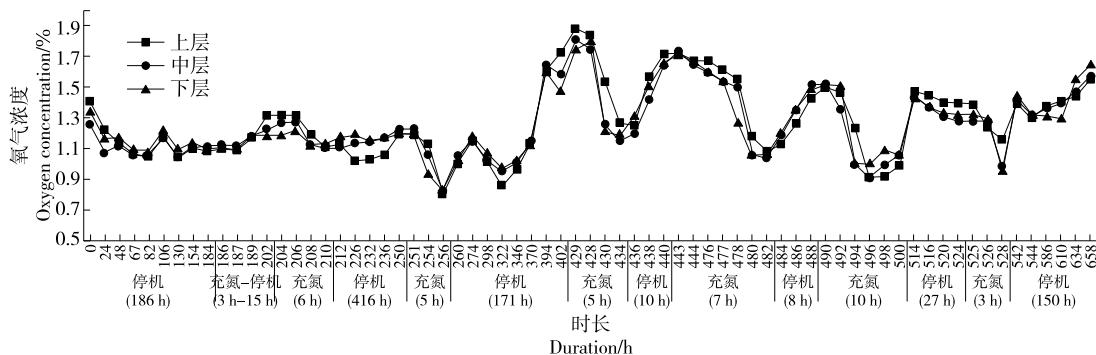


图 3 充氮仓低氧维持阶段氧气浓度变化

Figure 3 Changes in oxygen concentration during low-oxygen maintenance phase in N_2 -CAS soybean pile

2.2.2 试验虫样杀灭效果 充氮过程中对充氮仓布置的虫样进行观察,虫样死亡情况见表1,低氧(氧气浓度2%以下)维持20 d以上,虫样死亡率100%。所有虫样取出

后于28℃、65%恒温条件下培养,未见孵化的活虫。结果表明,低氧(氧气浓度2%以下)维持20 d以上,虫样死亡率为100%。

表1 充氮仓充氮杀虫虫样死亡情况

Table 1 Mortality of insects in N_2 -CAS soybean pile

| 储粮害虫 | 低氧维持时间 | | | | | | 培养后 | | | | |
|-------|--------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-------|
| | 20 d | | | 24 d | | | | | | | |
| | 虫样数 | 死亡数 | 死亡率/% | 虫样数 | 死亡数 | 死亡率/% | 虫样数 | 死亡数 | 死亡率/% | 活虫数 | 死亡率/% |
| 玉米象 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 0 | 100 |
| 锈赤扁谷盗 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 0 | 100 |
| 米象 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 0 | 100 |
| 谷蠹 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 0 | 100 |
| 赤拟谷盗 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 0 | 100 |
| 印度谷螟 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 30 | 30 | 100 | 0 | 100 |

2.3 充氮前后粮食的品质变化

大豆的损伤粒率是评估大豆质量和储存状况的重要指标^[8]。由表2可知,贮藏3个月后,充氮仓和对照仓大豆的损伤粒率均无显著性差异。李伶俐等^[9]研究发现,充氮体积98%和88%储存环境对大豆损伤粒率影响较小。水分是影响储粮安全的重要因素,大豆易吸湿生霉,从而影响其食用品质和经济价值^[10]。贮藏3个月后,充氮仓和对照仓大豆水分含量均无明显变化,根据GB/T 43994—2024中规定,充氮仓和对照仓大豆在贮藏期间的水分含量始终保持在安全水分范围内。

在大豆油中,过氧化值的高低直接关系到油脂的品质和新鲜度,过氧化值越高,油脂中过氧化物含量越多,油脂的氧化程度越高,品质也就越差^[11]。贮藏3个月后,对照仓和充氮仓大豆的过氧化值未出现显著性差异。张崇霞等^[12]研究表明,充氮气调对抑制低水分大豆油脂过氧化值升高作用不明显。随着贮藏时间的延长,大豆中的油脂可能发生水解酸败和氧化酸败,导致游离脂肪酸含量增加,粗脂肪酸值升高,进而导致大豆酸败,产生不良气味^[13]。对照仓大豆的粗脂肪酸值升高幅度大于充氮

仓。对照仓和充氮仓中、下层大豆的粗脂肪酸值变化差异显著($P<0.05$),说明氮气气调可延缓大豆酸败,与王晓东^[14]的研究结论类似。

大豆碘值的高低对于评估大豆油的品质、营养价值以及加工性能具有重要意义^[15]。贮藏3个月后,对照仓和充氮仓大豆碘值无显著性差异,与张来林等^[16]的结论一致。蛋白质溶解比是大豆加工和利用的核心参数,综合反映蛋白的天然状态、加工适宜性、功能性质及营养价值,对优化生产工艺和产品开发具有重要意义^[17]。贮藏3个月后,充氮仓和对照仓大豆的蛋白质溶解比均小幅降低,但二者之间无显著性差异。刘锦^[18]研究表明,高水分、高温、低氮气浓度时大豆蛋白质溶解比下降速率更快,对大豆蛋白质溶解比的影响顺序为贮藏温度>水分含量>氮气浓度。粮食的菌落总数是衡量粮食卫生质量的重要微生物指标,反映了粮食中需氧微生物的总体污染程度^[19]。贮藏3个月后,对照仓和充氮仓大豆的菌落总数无显著性差异,与张崇霞等^[12]的结论一致。

综上,贮藏3个月后,充氮仓和对照仓的大豆损伤粒率、水分含量、过氧化值、碘值、蛋白质溶解比和菌落总数

表2 充氮气调对大豆品质变化的影响[†]
Table 2 Effect of N₂-CAS on soybean quality

| 位置 | 组别 | 损伤粒率/% | 水分含量/% | 过氧化值/(mmol·kg ⁻¹) | 粗脂肪酸值/(mg·g ⁻¹) | 碘值/(10 ⁻² g·g ⁻¹) | 蛋白质溶解比/% | 菌落总数/(CFU·g ⁻¹) |
|----|-----|---------|----------|-------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------|-----------------------------|
| 上层 | 初始值 | 1.9±0.6 | 10.4±0.4 | 0.42±0.03 ^b | 1.1±0.2 ^a | 136.0±0.1 ^a | 90.8±0.3 ^a | 248±38 |
| | 对照仓 | 1.5±0.8 | 10.6±0.3 | 0.54±0.02 ^a | 1.3±0.1 ^a | 134.6±0.4 ^b | 86.5±0.8 ^b | 255±18 |
| | 充氮仓 | 1.2±0.3 | 10.8±0.2 | 0.54±0.01 ^a | 1.3±0.2 ^a | 134.5±0.4 ^b | 87.1±0.7 ^b | 246±23 |
| 中层 | 初始值 | 1.6±0.9 | 10.7±0.4 | 0.42±0.08 ^b | 0.8±0.1 ^c | 135.6±0.4 ^a | 89.4±1.7 ^a | 219±16 |
| | 对照仓 | 1.8±0.4 | 10.6±0.6 | 0.54±0.01 ^a | 1.5±0.1 ^a | 134.7±0.4 ^b | 87.3±1.6 ^a | 227±16 |
| | 充氮仓 | 1.4±0.4 | 10.7±0.1 | 0.54±0.03 ^a | 1.3±0.1 ^b | 134.5±0.6 ^{ab} | 86.4±1.6 ^a | 219±14 |
| 下层 | 初始值 | 1.8±0.6 | 10.9±0.4 | 0.39±0.03 ^b | 0.8±0.1 ^c | 135.6±0.4 ^a | 90.7±1.3 ^a | 228±4 |
| | 对照仓 | 1.5±0.3 | 10.5±0.7 | 0.53±0.02 ^a | 1.5±0.1 ^a | 135.0±0.2 ^b | 86.8±1.2 ^b | 237±29 |
| | 充氮仓 | 1.2±0.3 | 10.6±0.2 | 0.55±0.02 ^a | 1.2±0.1 ^b | 134.7±0.2 ^b | 87.5±0.5 ^b | 221±13 |

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

均无显著差异。但对照仓大豆的粗脂肪酸值高于充氮仓,且对照仓和充氮仓中、下层大豆的粗脂肪酸值差异显著($P<0.05$)。

2.4 充氮能耗

充氮仓各层氧气浓度降至杀虫浓度($<2\%$)后,因仓房气密性条件的限制,需根据粮堆氧气浓度回升情况适时开机运行进行“补氮”。由表3可知,充氮仓本轮充氮过程设备运行累计能耗为4 238 kW·h,折合吨粮能耗为0.88 kW·h/t。其中,充氮降氧过程设备运行67 h,折合吨粮能耗0.55 kW·h/t;低氧维持阶段需根据氮气气体平衡情况开机主机+辅机运行短时间运行“补氮”维持粮堆内低氧杀虫浓度,低氧维持阶段开机运行38 h,折合吨粮能耗0.33 kW·h/t。

2.5 真空回转保湿制氮系统(VRM)与分子筛制氮系统(PSA)投资及运营成本对比

VRM和PSA设备均包括制氮设备机组、设备保障用房、配套管网系统、仓房气密性升级和智能监测系统。由表4可知,VRM设备机组的投资高于PSA的,但设备保障用房、配套管网系统和仓房气密性改造的投资均低于PSA的。VRM的设备运行能耗也低于PSA的,且VRM

表3 充氮仓充氮能耗

Table 3 Energy consumption of N₂-CAS soybean pile

| 充氮阶段 | 运行模式 | 充氮时间/h | 能耗/(kW·h) | 吨粮能耗/(kW·h·t ⁻¹) |
|------|-------|--------|-----------|------------------------------|
| 降氧 | 主机+辅机 | 67 | 2 663 | 0.55 |
| 低氧维持 | 主机+辅机 | 38 | 1 575 | 0.33 |
| 合计 | | 105 | 4 238 | 0.88 |

不涉及压力容器的使用,所以相比传统PSA减少了特种设备管理的费用。

3 结论

通过采用常压制氮设备及创新充氮技术模式,依靠真空回转保湿制氮技术及成套设备,立足于经过便捷气密性改造后的普通房式仓,验证利用该设备及技术开展充氮气调杀虫防虫的可行性和经济性。结果表明,采用真空回转保湿制氮技术对大豆粮堆进行气调贮藏3个月,设备累计运行105 h,能耗较低。使用此充氮技术杀虫防虫效果好,能延缓大豆酸败。该研究仅针对高大平房仓这一仓型开展了试验,未验证不同仓容、仓型的适用性;

表4 真空回转保湿制氮设备与分子筛制氮设备系统一次性投资及年均运营费用对比

Table 4 Comparison of one-time investment and average annual operation cost between nitrogen preparation equipment VRM and PSA

| 项目 | VRM | PSA | 费用对比 |
|---------|----------------------|-----------------------|---------|
| 制氮设备机组 | 制氮主、辅机各1套 | 制氮主机1套 | VRM>PSA |
| 设备保障用房 | 配置基础平台及防护雨棚 | 配套专用设备房 | VRM<PSA |
| 配套管网系统 | 需整体增配1路回风管网 | 每个仓间内部需配置环流管网系统、强排气风机 | VRM<PSA |
| 仓房气密性升级 | 三级气密性以上即可 | 需气密性二级以上 | VRM<PSA |
| 智能监测系统 | 含氮气浓度自动控制及检测系统一体柜相配套 | 含氮气浓度自动控制及检测系统一体柜相配套 | VRM=PSA |
| 设备运行能耗 | 吨粮能耗1.0 kW·h | 吨粮能耗2.9 kW·h | VRM<PSA |
| 特种设备管理 | 不涉及压力容器的使用 | 含压力容器,需专人持证管理及安全附件年检 | VRM<PSA |

其次对贮藏期超过 3 个月的大豆生理特性变化及技术长期经济性仍需跟踪评估。

参考文献

- [1] 任紫烟, 魏雯雯, 贾连文, 等. 气调处理对茭白贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 137-142, 164.
- REN Z Y, WEI W W, JIA L W, et al. Effects of controlled atmosphere on storage quality of water bamboo[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 137-142, 164.
- [2] QU C L, LI W H, YANG Q K, et al. Metabolic mechanism of nitrogen modified atmosphere storage on delaying quality deterioration of rice grains[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100519.
- [3] 王睿婷, 邓银凤, 迪丽热巴库尔班, 等. 江苏省粮库害虫防治手段的现状及改进策略分析[J]. 黑龙江粮食, 2023(4): 71-73.
- WANG R T, DENG Y F, Dilraba Kurban, et al. Analysis of the current situation and improvement strategy of pest control means in grain storage in Jiangsu Province[J]. Heilongjiang Grain, 2023(4): 71-73.
- [4] 唐刚, 吴树会, 王东, 等. 湖南省绿色储粮技术应用现状与发展前景[J]. 粮食科技与经济, 2023, 48(6): 79-82.
- TANG G, WU S H, WANG D, et al. Application status and development prospect of green grain storage in Hunan Province [J]. Food Science and Technology and Economy, 2023, 48(6): 79-82.
- [5] SMITH A R, KLOSEK J. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes[J]. Fuel Processing Technology, 2001, 70(2): 115-134.
- [6] 许建双, 王保龄, 陈峰, 等. 平房仓气密性改造对氮气储粮应用效果的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2023(2): 5-8, 20.
- XU J S, WANG B L, CHEN F, et al. The effect of the air tightness renovation of horizontal warehouse on the application effect of nitrogen stored grain[J]. Cereal & Feed Industry, 2023 (2): 5-8, 20.
- [7] 赵淑珍, 刘俊红. 在役压力容器的维修与改造[J]. 设备管理与维修, 2022(1): 54-58.
- ZHAO S Z, LIU J H. Repair and modification of pressure vessels in service[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(1): 54-58.
- [8] 李建雅. 山东地区实仓储藏美国和黑龙江产大豆的品质变化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019: 42-43.
- LI J Y. Study of changes of Heilongjiang soybeans and American soybeans in Shandong grain stores in quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019: 42-43.
- [9] 李伶俐, 滕金玲, 姜建国, 等. 氮气气调对大豆及大豆抽提油脂品质变化研究[J/OL]. 中国油脂. (2024-01-12) [2025-03-03]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230490>.
- LI L L, TENG J L, JIANG J G, et al. Study on the quality changes of soybean an extracting oil from soybean by nitrogen gas conditioning[J/OL]. China Oils and Fats. (2024-01-12) [2025-03-03]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230490>.
- [10] DE S SMANIOTTO T A, RESENDE O, MARÇAL K A F, et al. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2014, 18(4): 446-453.
- [11] 王茹, 常立娟, 陈阳, 等. 滴定法测定菜籽油中过氧化值的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 51-55.
- WANG R, CHANG L J, CHEN Y, et al. Determination of uncertainty in peroxide value of rapeseed oil by titration method[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 51-55.
- [12] 张崇霞, 严晓平, 叶真洪, 等. 氮气气调对不同含水量大豆保鲜效果研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(1): 80-83.
- ZHANG C X, YAN X P, YE Z H, et al. Effects of controlled atmosphere storage with nitrogen on the quality of soybean with different moisture content[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(1): 80-83.
- [13] FAN K, CHEN L B, WEI X H, et al. Antioxidative properties of rapeseed meal extract on soybean oil during accelerated storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2 455-2 465.
- [14] 王晓东. 不同储藏方式对东北地区大豆储藏品质影响的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020: 30-31.
- WANG X D. Study on the effect of different storage methods on soybean storage quality in Northeast China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020: 30-31.
- [15] WANG R X, YANG J Y, FAN Y Q, et al. Microemulsification of peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) seed oil and its fatty acids: a comparative study in antioxidant and storage stability [J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 146: 147-159.
- [16] 张来林, 金文, 周杰生, 等. 充氮气调对大豆制油品质的影响 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 11-14.
- ZHANG L L, JIN W, ZHOU J S, et al. Influence of controlled atmosphere storage with N₂ on oil-making quality of soybeans [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 31(6): 11-14.
- [17] 葛钰鸿, 沈为佳, 赵秀兰, 等. 可溶性大豆多糖对大豆分离蛋白凝胶形成的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 20-28.
- GE Y H, SHENG W J, ZHAO X L, et al. Effects of soluble soybean polysaccharides on the formation of geformation of soybean protein isolate[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 20-28.
- [18] 刘锦. 充氮储藏对大豆品质的影响[D]. 南京: 南京财经大学, 2013: 65-67.
- LIU J. Effects of controlled atmosphere storage with N₂ on quality of soybean[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2013: 65-67.
- [19] 赵锦琦. 粮食表面微生物的多样性分析及其对粮食品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024: 23-24.
- ZHAO J Q. Diversity analysis of microorganisms on grain surface and their impact on grain quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024: 23-24.