

季节交替期粮堆结露机理分析及综合防控技术研究

许发兵

中央储备粮酒泉直属库有限公司

DOI:10.32629/as.v9i5.3966

[摘要] 粮食在仓储保管过程中,季节交替阶段气温、湿度剧烈波动,极易引发粮堆结露,进而导致粮食吸湿、发热、霉变、品质劣变甚至数量损失,是影响储粮安全的主要隐患之一。本文以粮食湿热传递理论为基础,系统分析粮堆内部气流运动方向与水汽迁移规律,阐述粮食对水分的吸附与解吸动态平衡过程,结合ID函数图(等温吸湿曲线)特征,深入探讨相对湿度、绝对湿度、平衡水分与粮食湿含量之间的线性耦合关系,揭示季节交替期粮堆结露的热力学与动力学成因。在此基础上,从控温、控湿、控气流、密闭隔热、通风管理、智能预警等方面构建一套可落地、可操作的防结露综合防控体系,为一线粮食仓储保管员提供理论依据与实践指导。研究表明,控制粮堆内外温差、阻断水汽定向迁移、维持吸附解吸动态平衡、稳定仓内温湿度场是预防结露的核心关键,科学实施分层控温、精准通风、密闭压盖等措施可显著降低结露发生率,保障粮食长期安全储存。

[关键词] 粮食仓储; 结露防控; 粮堆气流; 吸附解吸; ID函数; 平衡水分; 温湿度耦合

中图分类号: F762.1 文献标识码: A

Mechanism Analysis and Comprehensive Prevention Technology of Grain Pile Condensation During Seasonal Transition Period

Fabing Xu

Central Grain Reserve Warehouse Jiuquan Directly Affiliated Depot Co., Ltd.

[Abstract] During the storage and preservation of grain, the drastic fluctuations in temperature and humidity during seasonal transitions can easily induce condensation within the grain pile. This subsequently leads to moisture absorption, heating, mold growth, quality deterioration, and even quantitative losses, making it one of the main hazards affecting the safety of grain storage. Based on the theory of heat and moisture transfer in grain, this paper systematically analyzes the direction of airflow movement and the pattern of moisture migration within the grain pile. It elaborates on the dynamic equilibrium process of moisture adsorption and desorption by grain. By incorporating the characteristics of the ID function graph (isothermal sorption curve), it deeply explores the linear coupling relationship among relative humidity, absolute humidity, equilibrium moisture content, and grain moisture content, thereby revealing the thermodynamic and kinetic causes of condensation in grain piles during seasonal transitions. On this basis, a comprehensive, implementable, and operational prevention and control system against condensation is constructed from the aspects of temperature control, humidity control, airflow control, sealing and insulation, ventilation management, and intelligent early warning. This system aims to provide theoretical basis and practical guidance for frontline grain warehouse keepers. Research shows that the core keys to preventing condensation are controlling the temperature difference between inside and outside the grain pile, blocking directional moisture migration, maintaining the dynamic equilibrium of adsorption and desorption, and stabilizing the temperature and humidity field within the warehouse. Scientific implementation of measures such as layered temperature control, precise ventilation, and sealing and covering can significantly reduce the incidence of condensation, ensuring the long-term safe storage of grain.

[Key words] Grain storage; Condensation prevention and control; Airflow in grain pile; Adsorption and desorption; ID function; Equilibrium moisture content; Temperature-humidity coupling

1 引言

粮食安全关乎国计民生,仓储是保障粮食数量与质量安全的关键环节。我国粮食储备体量、储存周期长,受气候、仓房设施及管理等因素影响,储粮隐患频发,其中结露问题季节性突出、隐蔽性强、扩散快、危害大。春秋季节交替时,气温波动大、昼夜温差显著、湿度变化剧烈,易在仓体与粮堆之间、粮堆上下层间形成较大温度梯度,推动粮堆孔隙内湿热空气定向移动,当气温降至露点以下,水汽便在粮粒、仓壁、仓顶及粮堆内部凝结,形成结露。

轻微结露会出现粮面出汗、表层发黏;严重结露可引发仓壁滴水、粮堆结块、局部水分快速升高,进而促使微生物大量滋生,导致粮食发热霉变、酸度与脂肪酸值上升,甚至出现结顶、自燃等安全事故。对小麦、玉米、稻谷等主储粮种而言,结露不仅大幅提升通风、翻倒、烘干等处置成本,还会降低出糙率、容重、食用品质等关键指标,直接影响储粮轮换与经济效益。

当前国内外粮堆结露研究多侧重现象描述、单一措施试验或数值模拟,对气流运动、水汽迁移、吸附解吸、温湿度参数耦合等内在机理缺乏系统整合,与基层仓储实操结合不足。部分仓储单位仍依赖经验管理,存在盲目通风、密闭不严等问题,结露防控被动滞后。

本文结合仓储一线实践,以传热传质学、空气动力学与粮食吸湿理论为基础,系统剖析季节交替期结露生成演化机理,厘清关键参数量化关系,构建机理明确、目标清晰、措施精准、可操作性强的粮堆防结露技术体系,为科学储粮、绿色储粮与安全储粮提供理论参考与技术支持。

2 粮堆结露相关基础理论

2.1 结露的定义与本质

结露是指空气中的水汽达到饱和状态后,因温度降低转变为液态水的相变过程。在粮食仓储体系中,粮堆由大量粮粒堆积形成复杂多孔介质,孔隙中充满空气与水汽。当孔隙空气温度下降至露点温度,实际水汽压大于该温度下的饱和水汽压时,多余水汽便会凝结,形成粮堆结露。从能量角度,结露本质是粮堆系统内热量与质量不平衡的外在表现:温差驱动热量传递,水汽压梯度驱动质量传递,二者耦合作用导致局部区域水汽过饱和并析出液态水。

2.2 粮堆气流运动方向与水汽迁移规律

粮堆内部气流是水汽迁移的主要载体,运动方向由温差与密度差主导,季节交替阶段表现更为突出。升温季节外界气温快速上升,粮堆表层升温快、内部升温滞后,形成上热下冷的温度分布,热空气受浮力作用向上聚集,遇冷粮面后气流自上而下运动,水汽随气流进入表层孔隙并遇冷饱和,易引发粮面与表层结露。降温季节外界温度下降迅速,粮堆内部余热留存形成下热上冷格局,内部湿热空气向上对流,水汽由中下层向粮面、膜下及仓顶迁移,易出现上层、膜下与内部结露。此外,仓门、窗口及通风口开启会引发水平气流,墙角、柱边、设备周边及进出口等处易形成涡流与气流死角,水汽不断积聚进而产生仓壁与局部

角落结露。可见,气流方向直接决定水汽迁移路径,温差越大,气流运动越剧烈,粮堆结露风险随之升高。

2.3 粮食的吸附与解吸作用

粮食属于天然多孔亲水胶体,主要由淀粉、蛋白质与脂肪构成,表面富含大量亲水基团,对水汽具备较强吸附能力。在储藏期间,粮食与周围空气持续进行水分交换,呈现吸附与解吸两种动态过程。环境空气相对湿度偏高、水汽压大于粮粒表面水汽压时,水汽在范德华力与毛细管力作用下附着于粮粒表面及内部微孔,粮食含水量上升形成吸湿吸附,该过程依次包含单分子层吸附、多分子层吸附与毛细管凝结三个阶段。当粮食自身含水量偏高或环境湿度偏低时,粮粒内部水汽压高于空气水汽压,水分向外释放即为解吸,会提升粮堆孔隙空气湿度,为结露提供水汽条件。在温湿度稳定时,吸附与解吸速率趋于一致,粮食水分保持稳定,此时的含水量为平衡水分,可作为判断粮食吸湿或解吸的核心依据。季节交替时温湿度波动频繁,平衡水分持续改变,吸附解吸平衡被打破,粮堆内部水汽含量剧烈变化,进而为粮堆结露创造了条件。

2.4 ID函数图(等温吸湿曲线)特征

ID函数图,即等温吸湿曲线(Isothermal Desorption / Adsorption),是指在恒定温度下,粮食平衡水分与空气相对湿度之间的关系曲线,是研究粮食结露的核心工具。典型粮食等温吸湿曲线呈反“S”形,分为三个阶段:一是低湿区($RH < 50\%$)。

曲线上升平缓,粮食以单分子层吸附为主,吸附水量小,对湿度变化不敏感;二是中湿区($RH 50\% \sim 75\%$)曲线斜率明显增大,多分子层吸附与毛细管作用增强,粮食吸湿速率加快,平衡水分快速上升。此区间为储粮临界湿度区,也是结露易发区间;三是高湿区($RH > 75\%$)曲线急剧上升,毛细管凝结占主导,粮食吸湿剧烈,短时间内水分可大幅升高,极易引发结露与霉变。

同一粮食,温度越高,平衡水分越低;温度越低,平衡水分越高。因此降温过程中,即使相对湿度不变,粮食平衡水分上升,也会促进水汽凝结。

2.5 温湿度及水分参数的线性关系

粮堆结露分析中,相对湿度、绝对湿度、平衡水分与粮食湿含量之间存在显著的线性耦合规律,可用于结露风险的科学预判。温度保持稳定时,空气相对湿度与绝对湿度呈近似线性正相关,绝对湿度越大,相对湿度越接近饱和状态,结露风险随之线性上升。在 $40\% \sim 70\%$ 的中低湿度区间内,粮食平衡水分与相对湿度同样呈现近似线性关联,相对湿度每提升一定幅度,平衡水分同步增加,粮堆孔隙内水汽负荷呈线性增长。在恒定温度条件下,粮食实际湿含量与平衡水分的差值同水汽解吸强度、单位时间解吸水量呈线性关系,湿含量越高、平衡水分越低,粮堆向空气中释放的水汽量越多,仓内绝对湿度线性升高,更易达到结露临界条件,为储粮结露防控提供了量化依据。

3 季节交替期粮堆结露成因机理系统分析

3.1 温差是结露的根本驱动力

季节交替期昼夜温差可达 $8 \sim 15^\circ\text{C}$,月度温差更高,形成三

类关键温差:一是仓内外温差:外界气温骤升骤降,仓房隔热性能不足,导致仓内气温剧烈波动;二是粮堆表层与内部温差:粮食导热系数小,热惰性强,表层温度随环境快速变化,内部温度滞后,形成明显垂直温差;三是围护结构与粮堆界面温差:仓壁、仓顶、门窗导热快,温度接近外界,与粮堆之间形成冷界面,成为水汽凝结优先区域。

温差导致水汽压梯度,水汽从高温高压区向低温低压区扩散,当温度降至露点,结露随即发生。

3.2 气流定向运动导致水汽定向聚集

结合前文气流方向规律:春季升温,气流自上而下→水汽在粮面富集→表层结露;秋季降温,气流自下而上→水汽在上层富集→上层/膜下结露;水平气流,水汽向墙角、仓壁移动→侧壁结露。

气流越强,水汽输送量越大,局部相对湿度线性升高,快速越过饱和临界点。

3.3 吸附解吸失衡加剧水分重分布

季节交替期湿度日变幅大,平衡水分频繁跳变:高湿时段,粮食快速吸附,湿含量上升;降温时段,饱和水汽压下降,水汽过饱和凝结;解吸释放的水汽进一步提高孔隙湿度,形成恶性循环。

最终表现为:低温部位水分升高,高温部位水分降低,粮堆水分重新分布,局部形成高水分区,结露与霉变风险急剧增加。

3.4 温湿度线性耦合突破露点阈值

根据线性关系:温差增大→上层空气降温→饱和湿度下降;解吸增强→绝对湿度线性上升;相对湿度快速逼近100%→达到露点→结露。

可以认为,季节交替期结露是温湿度线性变化累积到临界值后的相变突变。

3.5 仓储管理因素对结露的放大作用

一是入仓粮食水分偏高,解吸气量过大;二是杂质过多,形成湿热聚集核心;三是仓房密闭差,外界湿热频繁侵入;四是通风时机不当,加剧温差与湿度波动;五是粮面未压盖,表层温度波动剧烈;六是巡检不及时,轻微结露发展为严重霉变。

4 基于机理的粮堆防结露综合防控体系

基于粮堆结露形成机理,可构建一套覆盖源头、过程、监测与应急的综合防控体系。总体防控以消除温差、稳定湿度、平衡气流、维持吸附解吸稳定为核心,将粮堆垂直温差控制在3℃以内、仓内相对湿度稳定在60%~70%,确保粮食湿含量低于安全水分且无明显水汽定向迁移。源头控制环节严格把控入粮水分,小麦不高于12.5%、玉米不高于14.0%,高水分粮先行烘干达标,同时强化清理除杂以减少自动分级,并对仓房地坪、墙体屋面及开口部位实施防潮隔热与密封改造,降低初始结露风险。控温方面采取分层控温策略,按季节实施保冷、缓降、蓄冷与隔热调控,配合粮面压盖保温减小表层温变与冷热交换。控湿以维持适宜相对湿度为目标,结合平衡水分科学指导通风作业,避免粮食吸湿或过度解吸。气流管控遵循季节通风原则,严格依据温湿度与露点条件判定通风时机,通过翻动粮面、增设导风设施消除气流死角与水汽滞留。同时实施全仓密闭隔热,阻隔外界湿热侵入,营造稳定

储粮小环境。配套智能监测预警系统,实时采集粮温、仓温、仓湿等参数,依据温差、湿度及露点阈值触发预警。针对不同程度结露建立分级处置机制,轻微结露以翻动散湿为主,中度结露采取通风排湿与清杂处理,严重结露及时翻倒烘干并防霉控险,全方位保障储粮安全稳定。

5 季节交替期防结露保管员作业规范

春季(升温期)作业重点,一是全仓密闭,封堵通风口;二是粮面压盖保温,减少热空气侵入;三是严禁白天开窗通风;四是每日检查粮面、墙角、膜下是否出汗;五是控制仓内湿度,避免湿热积聚。秋季(降温期)作业重点,缓慢通风,均衡粮温,避免昼夜温差过大导致上层结露,适时翻动粮面,排出膜下湿气,监测上层粮温与水分变化。日常巡检要点,重点部位:粮面、四角、仓壁、柱边、通风口;重点参数:温差、湿度、露点、粮面触感;记录趋势,提前预判,避免被动处置。

6 结论

季节交替期粮堆结露是温差驱动气流运动、水汽定向迁移、吸附解吸动态失衡、温湿度线性耦合突破露点阈值共同作用的结果,气流方向直接决定结露发生位置与发展速度。未来结合物联网、智能通风、露点实时计算等技术,可进一步提升结露防控智能化水平,实现绿色、低耗、高效储粮。

[参考文献]

- [1]王若兰.粮油储藏学[M].北京:中国轻工业出版社,2018.
- [2]卞科.粮食科学与工程导论[M].北京:科学出版社,2020.
- [3]李兴军.粮食湿热平衡机理及储藏品质变化研究[J].农业工程学报,2020,36(11):267-275.
- [4]国家粮食和物资储备局.LS/T1220-2020平房仓横向通风技术规程[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [5]王旭峰.粮堆结露成因分析及综合防控技术[J].农业工程技术,2024(16):55-58.
- [6]王水寒,李瑞敏.基于温湿度场的粮堆结露风险评估[J].粮油食品科技,2021,29(4):219-224.
- [7]张瑞迪,王若兰.偏高水分稻谷湿热迁移与结露临界参数研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2020,41(4):89-94.
- [8]GB/T29890-2013粮油储藏技术规范[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [9]褚春燕.气象因素对粮仓结露的影响及防控对策[J].粮油食品科技,2025,33(6):112-117.
- [10]王远成.粮堆湿热耦合传递与结露防控数值模拟[J].农业工程学报,2022,38(4):297-304.
- [11]张宏.粮食平衡水分与等温吸湿曲线应用研究[J].粮食储藏,2022,51(2):34-38.
- [12]刘志强.季节交替期平房仓粮堆结露规律及防控措施[J].现代食品,2023(10):145-148.

作者简介:

许发兵(1974--),男,汉族,甘肃酒泉人,大专,技师,工程师,研究方向:科技储粮开发与应用。