

谷物低温干燥的节能效果

李元瑞

R. O. Pierce

(西北农业大学)

(美国内布拉斯加州立大学)

摘 要

本文分析了影响谷物干燥性能的若干因素(如谷物含水量与通风量等),提出了低温干燥的优化工作指标,在此基础上进行了玉米低温干燥的实验研究并给出了谷物低温干燥能量消耗的计算公式。作为对照,本文利用数学模拟的方法对高温干燥的能量消耗进行了模拟计算,以图线的形式给出了低温干燥和高温干燥能量消耗的数量上的关系,表明了低温干燥是可以节约能源消耗的干燥方法。

关键词: 低温干燥; 谷粒; 含水量; 通风量; 能量消耗

物料的干燥处理是农产品和一些副产品产后贮藏和加工的一个重要环节。由于加热的介质具有较高的干燥势,可以使物料在较短的干燥时间内达到预期的效果,所以加热升温干燥得到了很多的应用。但是,对于热敏性物料,高温往往会使其营养成分、品质等受到破坏,如谷物这样一类物料经高温干燥后,由于热应力等因素常常使其表皮龟裂,影响其贮藏价值和商品价值,而且加热升温干燥要加热干燥介质,能耗大,干燥成本高,这就限制了它的应用。

自然通风干燥是利用环境大气或仅升温 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的大气做为除湿载体而使物料得到干燥处理,相对于高温干燥,通常把此方法称谓低温干燥。由于谷物经低温干燥后的品质较好,处理过程能耗低,所以在谷物干燥中低温干燥得到了愈来愈广泛的应用。以下以玉米自然通风干燥为例进行论述。

1 干燥过程参数分析

在低温干燥中,空气是干燥介质,又是载湿体,所以,空气流量的大小是干燥过程的主要参数。在一个特定的条件下,如进气温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,露点温度为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,排气温度 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,露点温度为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,蒸发 1 kg 的水分需要 370 m^3 的空气,要把 250 T 玉米的含水量由 25% 降到 15% 约需去除 30 T 的水,则所要求的风量是很大的。确定通风量的一个基本原则是保证仓内谷物不因霉变而损失,谷物的霉变将导致干物质的分解,具体的指标规定为:当干燥仓内所有谷物的含水量达到 15% 时,谷物干物质的分解损失不超过 0.5% ^[1]。通风量的大小依赖于所通空气的干燥势而言,这里使用一个最小通风量^[2]的概念,即是按照上述指标在对干燥最为不利的气候条件下完成谷物干燥所要求的最低限度的通风量。Pierce et al.^[2]分析了美国内

文于1987年4月23日收到。

布拉斯加州林肯地区1964~1973年的气象资料后指出,每十年中有1~2个年头的气候条件不利于低温干燥。按最为不利的气候条件得到了最小通风量与收获日期和玉米的水分含量之间的关系如图1所示。

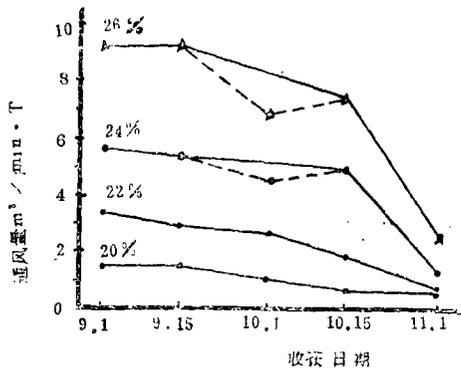


图1 收获期与通风量的关系

收获时玉米的含水量在18~24%之间时,含水量每增加2%,谷物的霉变损失就会增加一倍。通风量在 $0.55\sim 2.2\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{T}$ 范围时,通风量减少50%,谷物的霉变损失就会增加一倍。他们二人提出了适合在美国25个玉米生产地区的低温干燥通风量的推荐值^[2]。

玉米收获期的先后对于自然通风干燥的影响是很大的。收获日期早,日平均气温高,而空气的湿度低,其干燥势较高,但温度高又使谷物易在仓内产生霉变,就要求更高的通风量。Teter et al.^[3]对不同收获期的玉米用 $1.1\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{T}$ 的通风量进行处理,结果表明十月一日收获的玉米干物质的分解超过0.5%,而十月十五日后收获的玉米在相同的处理条件下干物质的分解都低于0.5%。但收获期晚田间损失有可能增加,且玉米在植株上干燥得慢,以致使收获入仓时玉米的含水量仍较高,入冬前在仓内难以用低温干燥法使其含水量降至18%以下,在来年春季也难以完成干燥(含水量降到15~15.5%)而影响质量。

风机风量和风机的运行管理。当气流通过谷物层时会产生压力降,风机必须产生足够高的风压以克服气流通过谷物层时产生的静压损失而保证仓内谷物都均等地获得足够的风量。气流通过谷物层时产生的静压损失与谷物层厚度和风量大小有关。如表1所示,当粮层厚度同为2.44m时,风量由 $1.1\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{T}$ 增加到 $3.3\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{T}$,静压损失有较大的增加。为此,要求风机提供更高的风压而增加动力消耗,提高作业成本。关于风机的运行管理,Morey et al.^[4]的研究表明,秋季玉米收获入仓后,风机就要连续工作向仓内供风,直到达到干燥标准为止(玉米含水量达到15%)或至少使干燥带穿过整粮仓厚度(仓内顶部玉米含水量低于18%),如果上层玉米含水量低于18%而未达到15%,那么因为冬季空气的干燥势较低,为了减少能耗,可以使风机每天工作2小时,以使仓内粮温不致升高且使温度均匀一致,当来年春季,日平均气温高于 13°C 时重新使风机持续运行,直到含水量达到标准为止。

表1 玉米层厚度和静压损失

风量 ($\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{T}$)	粮层厚度 (m)	静压损失 (m水柱)
3.3	2.44	0.034
1.1	2.44	0.010
1.1	3.66	0.025

2 试验设备和方法

试验是在位于北纬 40.90° 的美国内布拉斯加州立大学农工系的综合能源农场的金属筒仓中进行的,试验用金属筒仓的直径不等(在8~14m范围之内),仓内设有均料器,以

使仓内粮食上面呈平面分布，筒仓配套5 HP的轴流风机一台。试验仓谷物（玉米）厚度为4~6 m。其他测试设备有真空取样器、谷物湿度计、烘箱、数字天平、IBM-PC处理机等。

自最早（10月12日）的一批玉米入仓始，就按上述的干燥过程参数使风机持续工作，第一次取样是十月三十日，以后每7天取样测定一次。为了取得粮仓内各处气流分布和干燥带移动的资料，对每个筒仓进行了多位置点多水平的样品测定，测定仓内不同方位，不同位置及不同深度处玉米的含水量变化情况、干物质分解量及品质，直到完成干燥为止。

3 结果分析

上述试验同时在全州的另外五个试验站同时进行，结果由各站试验人员测定，其中两个试验点的测定结果如表2所示。

表2 低温干燥结果测定

地点	入仓日期 (月/日)	初始含水量 (%)	终了含水量 (%)	风机运行 时数	地点	入仓日期 (月/日)	初始含水量 (%)	终了含水量 (%)	风机运行 时数	
	10/01	20	13.1	1049		10/01	20	13.3	962	
辛 奥	10/15	20	13.7	1466	林 青	10/15	20	13.5	1405	
		22	13.5	1879			11/01	20	13.2	1680
格 斯 市	11/01	20	12.9	1900	市		24	12.9	2000	
		22	12.4	2490			11/15	20	12.8	1988
	11/15	20	12.4	2394			24	12.5	3680	
		24	12.6	3297						

注：风量 $1.1\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{T}$

设需要的风机功率为 P (KW)，工作时数为 t (小时)，谷物量为 W (T)，初始含水量 i_1 (%)，干燥终了含水量 i_2 (%)，则每吨谷物每降低1%水分的能耗为

$$E_1 = \frac{W \cdot n}{i_1 - i_2} \cdot \frac{P \cdot t}{100} \quad (1)$$

如此可以计算出自然通风干燥的能耗。关于加热升温干燥，因为涉及的过程可变参数较多，按下述的数学模拟计算能耗。

Thompson^[5]提出了能更准确反映实验数据的平衡水分方程式：

$$1 - n = \exp[-(i + 50)^m] \quad (2)$$

其中， $n = 3.82 \times 10^{-5}$ ， $m = 2.0$

如果已知热风温度 T_1 ，热风含湿量 d_1 ，风量 V （容积风量）、 Q （质量风量）；玉米初始含水量 M_1 ，温度 T_{a1} （在未开始干燥前与外界空气温度相同），谷物厚度为 L ，应用薄层干燥理论进行分析，分层数为 n （自定），薄层厚度为 $\Delta L = L/n$ 。热风是依次通过谷物薄层完成干燥的，从第一薄层排出的热空气做为第二薄层的干燥热风，依次类推。需要求解的是经 Δt 时间后空气和谷物的状态参量：薄层谷物经 Δt 时间后的含水量 M_2 ，温度 T_{a2} ，排气温度 T_2 （认为 $T_{a2} = T_2$ ）和排气的含湿量 d_2 。

一般认为谷物的热风干燥过程包括谷物和热风达到平衡温度 T_e ，在平衡温度下水分的

蒸发和因谷物水分蒸发而冷却。根据热量平衡原则有:

$$\begin{aligned} C_a T_1 + H_1 (1060.8 + 0.45 T_1) + C_g T_{a1} R \\ = C_a T_e + H_1 (1060.8 + 0.45 T_e) + C_g T_e R \end{aligned} \quad (4)$$

式中: C_a , C_g 分别为空气和谷物的比热; $R = \text{谷物重} / \text{热风重}$

由上式求解平衡温度

$$T_e = \frac{T_1 (C_a + 0.45 H_1) + C_g T_{a1} R}{C_a + 0.45 H_1 + C_g R} \quad (5)$$

而相对湿度

$$\begin{aligned} RH &= \frac{p}{p_s} \\ &= \frac{23.63 H_1 / (1 + 1.608 H_1)}{\exp(54,6329 - 12301,69 / T_e - 5.16923 / n T_e)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, T_e 为平衡温度的绝对温标 $^{\circ}R$ 。

在深床谷物的干燥过程中, 谷物某一层的干燥温度是指某一层的干燥热风温度, 不可与进入干燥器的热风温度相混淆。由于某一谷层的干燥温度是变化的, 干燥温度不一样, 干燥曲线就不同, 因此, 在计算干燥速率时必须从原有的干燥曲线转换到新的干燥曲线, 此转换可以通过计算当量时间 t_{e0} 来实现^[8]。

$$t_{e0} = A \ln(MR) + B [\ln(MR)]^2 \quad (7)$$

式中: $A = -1.862 + 0.00488 T_e$, $B = 427.4 e^{-0.0033 T_e}$,

T_e —— 干燥温度 $^{\circ}F$ 。(此即为平衡温度);

$$MR = \frac{M - M_e}{M_1 - M_e}, \text{ 开始干燥时 } M_1 = M,$$

M —— 在时间 t_{e0} 时的谷物水分含量。

干燥时间 = $t_{e0} + \Delta t$, 按薄层干燥理论可以用下式计算干燥终了的水分比:

$$MR = \exp\left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4}}{2A}\right) \quad (8)$$

然后可以计算薄层经过 Δt 时间干燥以后的终了水分:

$$M_t = (M_1 - M_e) MR + M_e$$

把 t_{e0} 的谷物, 其含水量由 M_1 干燥到 M_t , 蒸发水分所用的热量为

$$J_1 = 529.76 Q_g (M_1 - M_t) \quad (BTU) \quad (9)$$

$$j_1 = 529.76 (M_1 - M_t)$$

谷物失去的水分迁移到热风中去了, 热风的湿含量的变化为

$$\Delta H = (M_1 - M_t) R / 100 \quad (10)$$

所以热风经第一层谷物后的含湿量为

$$H_t = H_1 + \Delta H$$

热风(谷物)干燥终了的温度是由下列的平衡方程求解的, 即

$$C_a T_o + H_i (1060.8 + 0.45 T_o) + C_g T_o R + \Delta H (T_o - 32) = C_g T_f + H_f (1060.8 + 0.45 T_f) + C_g T_f R + j_1$$

所以

$$T_f = \frac{(C_a + 0.45 H_i) T_o - \Delta H (1060.8 + 32 - T_o) + C_g T_o R - j_1}{C_g + 0.45 H_f + C_g R} \quad (12)$$

把 \$T_o\$ 的谷物由温度 \$T_{o1}\$ 加热到 \$T_{o2}\$ (\$= T_o\$) 需要热量

$$J_2 = Q_g C_g (T_o - T_{o1}) \quad (BTU) \quad (13)$$

所以加热升温干燥须用热量为

$$J = J_1 + J_2 \quad (BTU)$$

按Thompson^[5]和Pierce^[2]的研究认为，热风干燥风机能耗可按 \$0.5 \text{ KW} / t \cdot pt\$ 计算，故总能耗为

$$E_2 = \left[\frac{J}{Q_{gt}} / (M_1 - M_f) \quad (100) \right] \frac{0.293248 \times 10^{-3}}{1} + (0.5) t \quad (KW - hr / t - pt) \quad (14)$$

式中：\$Q_{gt}\$——以吨计的谷物重量；\$t\$——以小时计的干燥时间。

根据当地的气候条件和实验条件，按上述的试验和分析，低温干燥和加热升温干燥的能耗比较如图2所示，可以看出低温干燥有较好的节能效果。

4 结 论

4.1 谷物的加热升温干燥是一种能耗较高的处理措施，与之相比，低温干燥有较好的节能效果。

4.2 低温干燥受到诸如气候条件，收获期早晚，干燥系统的结构参数，通风量等因素的影响，适当地选择和匹配这些因素就能获得较好的节能效果。

4.3 通过大量试验资料分析，可以对干燥过程进行模拟，以便于对干燥过程进行描述和分析，在这方面尚需做许多工作。

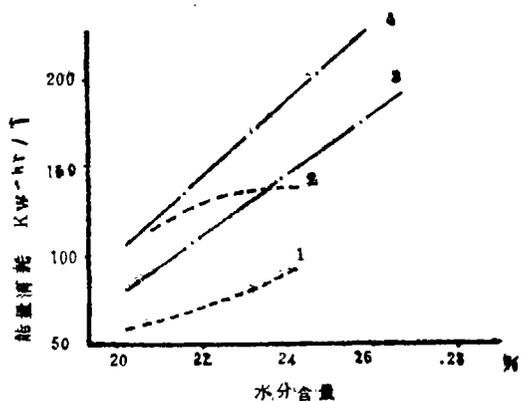


图2 两种干燥方法的能耗对比

- 1—最好年份的自然通风干燥；
- 2—最坏年份的自然通风干燥；
- 3—最好年份的热风干燥；
- 4—最坏年份的热风干燥

参 考 文 献

- 1 Bloome P D, Shove G C. *Transaction of the ASAE* 1972 (15) : 310-316
- 2 Pierce R O, Thompson T C. *Transaction of the ASAE* 1982 (25) : 469-474
- 3 Teter N C, Thompson T L. *Nebguide* 1974 (95) :
- 4 Morey R V et al. *Transaction of the ASAE* 1979 (22) : 1418-1425
- 5 Thompson T L, Peart R M, Foster G H. *Transaction of the ASAE* 1968 (15) : 582-586

RESULT OF SAVING ENERGY CONSUMPTION IN GRAIN DRYING OF LOW TEMPERATURE

Li Yuanrui

(*Northwestern Agricultural University*)

pierce R.O.

(*University of Nebraska-Lincoln, U.S.A*)

Abstract

This paper described an analysis to the factors for example the moisture content of grain and flow rate in bin, which have an influence on the properties of grain drying and presented an optimum operating parameters for grain drying of low temperature. Based on the experimental study on the low temperature drying of corn was conducted and the equation of calculating the energy consumption was brought. For comparison the way of mathematical simulation was used to conduct a simulant calculating on high temperature drying of corn and the mathematical relation of energy consumption between low temperature drying and high temperature drying was figured. It is concluded that the grain drying of low temperature is the one of saving energy operation.

Key Words: low temperature drying, grain, moisture content, flow rate, energy consumption