

[美] J. A. 安台生 編
A. W. 阿尔考克



谷物及其加工品的貯藏分冊之二

谷物的干燥

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本書是“谷物及其加工品的貯藏”一書中的第九分章。內容首先介紹測定谷物含水量的方法，谷物與空氣的平衡，完全暴露的谷物的干燥，散裝谷物的干燥，比熱和蒸發熱。其次討論散裝谷物干燥時各個因素間的相互關係，其中用數學說明各種干燥過程中水分變化的一般現象。最後介紹干燥谷物所使用的各種方法，如分批與分段干燥，連續干燥，以及干燥對農作物質量的影響，如對發芽的影響，對營養價值的影響。

本書可供公社及國營農場、糧食保管、加工部門的幹部、農業技術人員，以及科學研究機關工作人員、農業院校師生等參考。

谷物及其加工品的貯藏

分冊之二

谷 物 的 干 燥

原編者 J. A. Anderson, A. W. Alcock

原著者 W. V. Hukill

原出版者 American Association of Cereal Chemists

忻 介 六 譯

上海科學技術出版社出版

(上海瑞金二路450號)

上海市書刊出版業營業許可證出093號

新華書店上海發行所發行 各地新華書店經售

商務印書館上海廠印刷

開本 850×1168 1/32 印碼 1 8/32 字數 30,000

1959年2月第1版 1961年11月第2次印刷

印數 2,001—3,930

統一書號：16119·288

定 價：(十二) 0.23元

譯者的話

本書是 J. A. Anderson 与 A. W. Alcock 所編的“谷物及其加工品的貯藏”(Storage of Cereal Grains and Their Products, 1954)一書中的第九章。原書各章均由專門人員就其实地經驗加以詳細敘述,極有參考價值。苏联 Н. Козьмина 与 Л. Любарский 兩教授曾將此書譯成俄文(Хранение Зерна и Зерновых Продуктов),由外国文書籍出版社出版(1956)。

为使讀者能早日讀到此項較新的資料,批判地运用到目前的工农业生产大跃进中去,因將此章單獨先行印行。

由于譯者外文及业务水平有限,对于文中很多新的專門名称及各种技术上的問題不能很精确地傳達出来,这是譯者引为遺憾的。希望讀者多加指正,以便有机会再版时予以更正。

折介六 1958年12月

目 录

著者的話

目 言	1
一 一般的考察	2
记录含水量的方法	2
谷物与空气的平衡	2
完全暴露的谷物的干燥	5
散装谷物的干燥	8
比热和蒸发热	10
小 結	11
二 理論的考察	12
湿球温度的意义	12
热的平衡	12
完全暴露的干燥率	14
散堆干燥时的空气温度变化	14
各种因素間的个别关系	15
各种因素中的一般关系	16
一般方程式的简化形式	17
一般方程式的应用	18
非断热干燥	19
热效率	19

干燥的均匀性·····	20
一般的说明·····	21

实用的考察·····	22
------------	----

分批与分段干燥·····	22
--------------	----

分批干燥时的发汗·····	23
---------------	----

連續干燥·····	23
-----------	----

干燥的影响·····	25
------------	----

对磨硬质量的影响·····	25
---------------	----

对发芽的影响·····	28
-------------	----

对营养价值的影响·····	28
---------------	----

关于稻谷干燥应注意之点·····	29
------------------	----

田間干燥·····	29
-----------	----

玉米穗的干燥·····	30
-------------	----

小粒谷物的田間干燥·····	33
----------------	----

不加热空气的干燥·····	35
---------------	----

化学干燥剂·····	35
------------	----

一般評述·····	35
-----------	----

参考文献·····	36
-----------	----

引 言

谷物的含水量对谷物在收割、貯藏、发芽及各种加工过程等的正常处理上是否适宜，具有一定的影响。谷物对許多处理有一个适宜的或临界的含水量，超过或未达到此量，处理結果就会不能令人滿意。谷物在生長期內的含水量是很高的。当其成熟时，水分的百分率就降低；在成熟后，水分仍繼續不断地从谷物中消失，直至谷粒达到所謂“干燥”的程度为止。然而谷物在这状态中仍含有令人惊奇的水分。例如：1蒲式耳(bushel)^①的“干燥”小麦，約含有0.5~1加侖^②的水分(每100磅^③中含7~15磅)。

谷物在大多数用途中，即使能够做到將水分完全除去，也无此必要。谷物含水量所以引人关心，其最主要的原因可能是由于霉菌及其他微生物的生長都需要水分的緣故。如果谷物中沒有較高的水分，这些微生物就得不到所需要的水分。能使微生物形成破坏的谷物最低含水量，約在10~15%之間，至其正确的标准，則依谷物种类、温度和微生物的性質而不同。

下文对谷物干燥的討論分为三个部分：一般的考察，理論的考察及实用的考察。处理理論考察，必然帶有一些專門性，有些讀者或許不愿深入研究。因此，我們力求使每个部分尽量保持其独立性。

① 1蒲式耳約合86升。

② 1加侖(美)合3.7853升。

③ 1磅合453.6克。

一 般 的 考 察

谷物干燥与其他固体物質的空气干燥相类似。然而,其他物質如鮮果及蔬菜等,經干燥后,含有較多的水分。有关干燥湿潤物質的一般討論(10, 26, 47, 48, 60, 74)*指出:在谷物水分的正常范围内,干燥速度受谷粒内水流阻力的限制,較受表面气流阻力的限制为大。在干燥谷物时,一般只去除有限量的水分。在实践中,谷物在原始水分約 35% 以上或約 10% 以下时(按湿标准 wet basis),不需要干燥,因此,本文的討論將只限于这个水分的实践范围之内。

记录含水量的方法 谷物内的含水量通常是按重量的百分率表示的。一个用重量表示的含水量百分率可以具有两种意义。例如,我們說谷物有 25% 的含水量,这就是說 100 磅谷物中含有 25 磅的水分;如果这个含水量是按照湿标准表示的百分率,那是正确的。另一方面,假定这个 25% 是按干标准(dry basis)表示的,則 100 磅的谷物中所含有的是 20 磅的水和 80 磅的干物質,这也同样是合理的,因为 20 是 80 的 25%。因此,以百分率记录含水量时,必須說明是采用哪种标准。这两个标准同样正确也同样合理。对某些目的以采用湿标准較為便利,而对另一些目的,則以采用干标准为佳。在美国,特別在商业上,习惯上采用湿标准来表示含水量的百分率,而联邦谷物标准也是采用湿标准的。

谷物与空气的平衡 (grain-air equilibrium) 谷物是有吸湿性的,長期暴露在較干燥的空气后,仍能保持少許水分。若空气的相对湿度增加,谷物就吸收水分。因此,薄层的谷物暴露在湿度漲落的空气中,就会吸收和放出水分,从而与空气形成平衡。图 1 就是說明暴露在大气湿度变化下但不受雨打的脫粒玉米和帶穗玉米的含水量的典型变化。

* 本书括弧内数字系指参考文献號碼

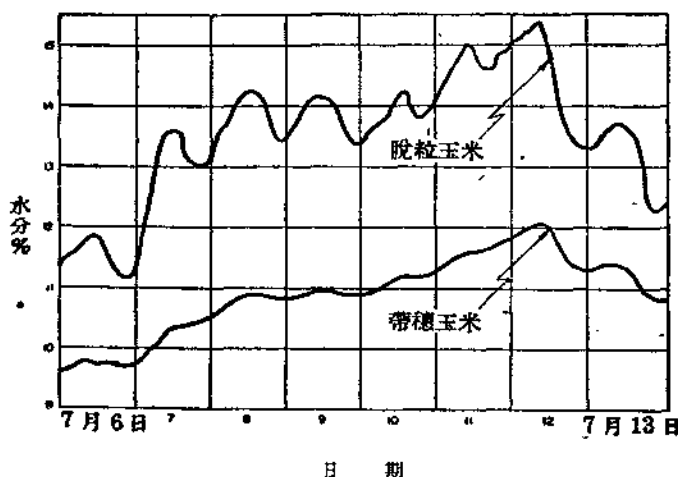


图 1 完全暴露在大气中的脱粒玉米和带穗玉米的含水量的典型
连续变化(Hukil, 27)

空气的相对湿度虽未表示在此图中,但在正常日子里,下午湿度低落,早晨上升。谷物在低湿的时期变干,而在湿度高时吸收水分。因此,水分一般在正午前后最高,而在午夜之前最低;含水量曲线大致随相对湿度的变化而变化,但其高峰则稍落后数小时。脱粒玉米随湿度的变化,较带穗玉米更为紧密。

实验表明:每种谷物在谷物含水量与使谷物保持水分平衡的空气相对湿度之间存在着一定的关系。这就是说,对任何一个一定的谷物水分百分率,有一个一定的空气相对湿度,谷物暴露在这个相对湿度中,不减少亦不增加水分。与一定的相对湿度保持平衡的谷物含水量,可称为这个湿度的“平衡含水量”(equilibrium moisture content)。当空气温度变化时,一定相对湿度的平衡含水量也略微变化。表 1 表示 77°F 时各种湿度中若干种谷物的平衡含水量。温度较高时,各种湿度的含水量将较表中所示的为低(12, 18, 19, 43)。

表 1 室温(約 77°F)下各种湿度的空气平衡中的含水量

	相 对 湿 度					实 驗 者	
	15%	30%	45%	60%	75%		90%
	含 水 量 (湿 标 准)						
大麦	6.1	8.5	10.0	12.1	14.4	19.5	25.8
高粱	6.7	9.1	10.9	12.7	15.0	19.1	24.5
脱粒玉米, YD	6.4	8.4	10.5	12.9	14.8	19.1	23.8
脱粒玉米, WD	6.6	8.5	10.4	12.9	14.7	18.9	24.6
炒熟的脱粒玉米	6.8	8.5	9.8	12.2	13.6	18.4	23.0
苡麻子	4.5	5.6	6.3	7.9	10.0	15.2	21.4
燕麦	5.7	8.1	9.6	11.8	13.8	18.5	24.1
已加工的米	6.8	9.0	10.7	12.6	14.4	18.1	23.6
黑麦	7.0	8.7	10.5	12.2	14.8	20.6	26.7
鹰粟	6.5	8.6	10.5	12.0	15.3	18.8	21.9
大豆		6.2	7.4	9.7	13.2		
白小麦	6.8	8.6	9.9	11.8	15.0	19.7	26.3
做通心粉用的小麦	6.6	8.5	10.1	11.5	14.1	19.3	26.7
软质红色冬小麦	6.3	8.6	10.6	11.9	14.6	19.7	25.6
硬质红色冬小麦	6.4	8.5	10.5	12.5	14.6	20.1	25.4
硬质红色春小麦	6.8	8.5	10.1	11.8	14.8	19.7	25.0

① Coleman 及其合作者(11a) 含水量由水罐法(water-oven method)测定。

② Coleman, Rothgeb 及其合作者(11b) 含水量由气罐法(air-oven method)测定。

③ Rarstad 与 Geddes(53a) 含水量由真空罐法(vacuum-oven method)测定。上列表中的数据系引自己发表过的图表。

完全暴露的谷物的干燥 当谷物水分的蒸气压和空气的蒸气压相等的时候，谷物和空气成为平衡；谷物水分的吸入和放出为零，而其含水量保持不变。当含水量高于平衡值时，水分就从谷物内流出，使谷物干燥(3, 4)。水分脱离谷物的速度是依谷物与四周空气失却平衡的程度、温度、及谷粒的性质、大小与形状而定。

许多不同的实验者曾测定在空气温度和湿度不变状态中各种谷物的干燥速度。图2即系典型的干燥曲线。在这实验中，厚约一粒谷的燕麦薄层暴露在温度 129.5°F 相对湿度 30.3% 的空气中。按时测定谷物重量，并按干标准计算其含水量。如这些干燥速度实验所示，含水量在开始时迅速下降，然后渐趋缓慢。在实验结束当含水量几乎和空气成平衡时，干燥极为迟缓，致不能在重量变化中测知。

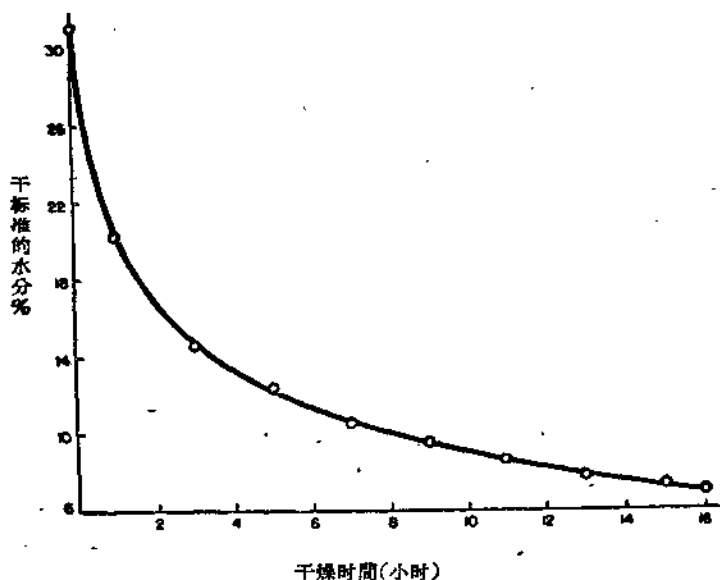


图2 完全暴露在温度和相对湿度不变的气流中的燕麦样品的含水量(Holman, 24)

这种趋势适用于完全暴露在温度和湿度不变的空气中的各种谷类的干燥。一般说来,若原始含水量高,空气温度高或相对湿度低,则干燥较快。在空气流动非常迟缓的情况下,若增加空气流速,亦能引起较快的干燥;在其他情况下,空气流速变化的影响很小。此种变异因子的个别影响结合起来形成谷物干燥的特殊情况,例如图2所示的燕麦实验。然而上述各个变异因子对完全暴露的样品的干燥速率的影响尚未充分研究,因此还不能正确预测在各种变异因子组合的条件下的干燥率。

图2指出:当含水量下降时,干燥率就下跌。根据实验的资料可以检视每一时期的干燥率是否与当时待除去的水分成正比。最简便的实验是将记录资料作成半对数图(semilogarithmic plot)。若图中的点落在一条直线上,则全部时间的干燥率是与尚待除去的水分成正比,且可由一简单公式来表示含水量与暴露时间的关系。以图2的资料,按照上述方法作成如图3。时间仍如前以小时为单位,但平衡含水量则先从所观察的水分中减去,然后将尚待除去的水分百分率的对数配载在纵标上。图中的含水量系以干标准的百分率表示,在此种图表中是不适用湿标准的百分率的。

这些记录资料的半对数图不是一条直线。若系一条直线,则含水量与时间之间的关系可以下式表示之:

$$M - M_E = \Delta M e^{-Kt} \quad (1)$$

上列公式中, M 系任何时间的水分; M_E 系平衡含水量; ΔM 系原始水分(M_0)减去 M_E (以干标准的百分率表示的全部含水量); e 系自然对数的基数; K 系表示作图线斜度的一个常数, t 系以小时为单位的时间。在某些情况下,所观察的干燥率可以将其记录资料画或几乎成一直线。 K 线的斜度可以表示在特殊暴露条件下所观察的特种谷物的特有的干燥率。Sherwood氏(60)曾论述一般固体的干燥中水分与时间之间的关系,他建议将上述方程式加以变更,以便可用作描述某些干燥情况。Newman氏(47, 48)指出

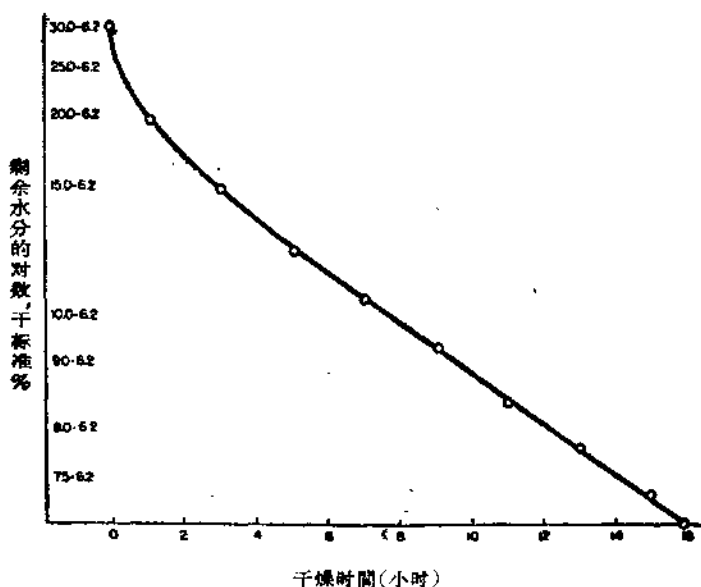


图3 图2资料的半对数图

另一种的变更,使适用于有各种形状的颗粒物体。

假若改变温度另作实验,使产生 K 的不同的值,或者对所观察的 K 值对温度有一定的关系,则可写成一个包括温度影响的干燥公式。同样的,假若可以包括原始水分、相对湿度以及空气速率的影响,则就能写成一个完整的公式,以预测暴露样品的干燥率。上述方程式(方程式1)只能描述近似的干燥率,且在某些条件下,它的近似性是不强的,但是尚无其他可一般适用的代数公式出现。

最近有两个实验者(24, 51)曾各别应用下列公式分析其所获得的结果:

$$M - M_E = \Delta M e^{-K_2 t^n} \quad (2)$$

根据他们有限的报告材料, K_2 和 n 的值可以在描述所观察的全部实例的干燥曲线中找到。在每一实例中, n 小于1, 在所有实验的报告中, n 变动于0.55~0.85之间。至于这个公式是否对所有干

干燥状态都可适用，則尚待決定。如果这个公式可适用于所有干燥状态，則我們可以預期不久將有各类谷物的 K_2 值和 n 值，和在这种常数上对温度、湿度及空气速度所起的影响的公式出現。

干燥率由于温度的增加而增高。与湿度有关的干燥率 K 的变化也可以表示湿球与干球温度的函数。为了表示湿度变化对 K 的影响的近似率，曾提出这样的情况：在一个已知湿球温度下， K 与干球温度和另一温度之間的差数成比例，而后者就是在这已知湿球温度下可以使谷物水分与空气成平衡的温度。对具有 100% 相对湿度平衡的非常潮湿的谷物，这差数將等于空气干湿球温度之間的差数；而对較干的谷物，其差数較小。

散装谷物的干燥 以上的討論只限于完全暴露的谷样的干燥率。这就是說，使每粒谷物处于連續与具有一定湿度和湿度的空气相接触的状态中。但在实际的干燥过程中，并不如此。以前所报告的大多数关于谷物干燥率的实验都是考虑到实际应用的。文献中关于干燥率的資料很少可用于建立支配暴露干燥率的法则。在实践中，在某些恒定的原始温度和湿度下的空气流經或通过谷物，并吸取一些水分。这种空气再流經更多的谷物，但已不再具有原始的条件，因此只有最初和空气接触的谷粒才能获得最大的干燥率。其余谷物的干燥率不只受谷物的性質和空气的原始情况所限制，而且受谷物的数量和流通空气的容积所限制。然而，即使是干燥大批谷物，尽管和谷物接触的空气温度和湿度在不断地变化，但每粒谷物在任何時間都好象是个別地被干燥着。

当空气流經一批谷物时，空气温度和湿度变化的速度視谷物蒸发水分的速度而定。因此，圓筒仓内所发生的一切变化（谷物水分含量的减少，空气湿度的增加，空气温度的降低）是受水分从个别谷粒发散的速度所調节。根据这个理由，为了了解谷物干燥在各种处理中的进展情况，必須掌握谷物含水量、谷物的特性、空气的温度和湿度以及空气速度对完全暴露的干燥率的影响。但遺憾

的是能够正确体现暴露干燥率而能使上述各变数都能适用的总公式尚未形成。上面所讨论的若干实验者所提出的各种试行公式指出,某些近似率是可以获得的。在更正确的完全暴露干燥率(fully exposed drying rates)的分析尚未定式以前,这些近似率只可用以预测散装谷物干燥的可能进展情况。换言之,由于暴露的干燥率只是近似的,因而由此得出的散装干燥率亦将是一个近似率。

根据真实的暴露干燥率的近似率来预测散装干燥率的方法已有叙述(28)。计算出来的散装干燥率虽只能预测近似的比率,但在实际应用上已经足够。图4表示圆筒仓中整批干燥的谷物连续层的近似含水量。这些数值适用于具有均匀原始含水量,且有恒定的原始温度和湿度不变的气流速定向吹过的谷物。

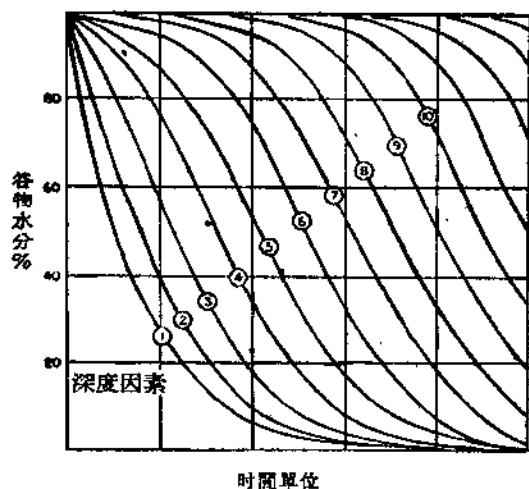


图4 谷物含水量、干燥时间与深度之间的估计关系(Hakill, 28)

使用图表测定经过某一时间的干燥措施后干燥圆筒仓内任意一点的含水量时,必须说明谷物的含水量,到达谷物这一点的深度以及以适当单位表示的干燥工作的进行时间。然后所求的含水量即可从这图表上读出。计算适当单位的方法,将在讨论整批干燥

处理的发生情况之后予以介绍。

比热和蒸发热 文献中关于谷物水分的蒸发热 (heat of vaporization) 及谷物比热 (specific heat) 的资料极不全面。Kelly 氏 (35) 曾报导过若干水分和温度下的小麦比热。为求得近似值, Siebel 氏的公式 (62) 或可应用于谷物。但其正确性则尚无人确认。假定谷物含水量的比热为 1.0, 而干燥物质的比热为 0.2, 其公式如下:

$$S = 0.2 + 0.008 M_w \quad (3)$$

公式中 S 是以英热单位^① Btu/磅^{°F} 计算的物质比热, M_w 是以湿标准计算的含水量的百分率。

谷物水分的蒸发热较在同一温度下的自由水的蒸发热为高。两者间的不同假定是与润湿热 (heat of wetting) 相等, 但关于润湿热的实验资料也不多。潜热 (latent heat) 在含水量低时最大, 与含水量高时自由水的潜热极相接近。Winkler 氏和 Geddes 氏 (76) 曾测量面粉和淀粉的水化热 (heat of hydration)。他们测量结果是以每一单位重量干物质的热单位表示, 不能直接换算成为在各种程度含水量时所吸收每磅水分的英热单位, 因为这样换算需要分析水化热的改变率。但是这种资料包括各种原始含水量的物质被过度水分润湿时的水化热的总量。其结果指出: 含水量极低的面粉和淀粉 (低至 1.7%) 加水后所发散的热量约为每克 200 卡左右。这些结果也指出: 含水量超过 16% 时, 加入水分能发散的热量将大为减少。每克 200 卡即等于每磅 360 英热单位。如果我们假定 (这是合乎逻辑的), 水化热是面粉内水分蒸发热和自由水的蒸发热间之差 (difference), 我们就可断定: 干燥面粉所需的热量一定是自由水的蒸发热 (每磅约为 1000 英热单位) 加上 360 英热单位。这是含水量极低时除去水分的情况。干燥 10~20% 的

① 英热单位 Btu 是 British thermal unit 的缩写, 一个英热单位合 0.252 大卡——编者。

含水量时,蒸发热就大为减少。由于尚无正确的資料可資应用,一般采用每磅 1120 英热單位的数值(28)。

Schrenk 氏等(56)曾测定淀粉的水化热,发现其测定的值較 Winkler 和 Geddes 氏所测定的为高,虽然其資料并不能严格地加以比較。Schrenk 氏等测定各种淀粉的結果是每克淀粉的水化热約为 23~30 卡,而 Winkler 和 Geddes 氏所测定的約为 20 卡。这些实验都是以完全干燥的淀粉为材料进行的,因此无法估計其各种含水量的水化热。

蒸发热或可根据 Clausius-Clapeyron 的下列方程式从谷物水分蒸气压的資料加以計算:

$$H_{fg} = V_{fg} T \frac{\delta P}{\delta T} \quad (4)$$

式中 H_{fg} 为蒸发热,每磅以呎-磅(ft.-lb.)表示; V_{fg} 为蒸气的容积,每磅以立方尺(cu. ft.)表示; T 系绝对温度,以 °R 計算; P 为蒸气压,每平方尺以磅表示。可惜还没有正确测量谷物水分蒸气压的方法。

小結 以上的討論提供了谷物干燥基本研究的一般情况。一切能影响干燥率的主要因素似均已发现。但尚未有足够的实验資料可用以建立正确的干燥谷物的数学法則。这里有可供进一步从事实验工作的广闊領域。其中关键問題显然是关联到一个最簡單的問題,就是每粒谷物完全暴露于具有恆温和恆湿的空气中的問題。在这个問題未解决以前,也就是說,在尚未能对包括一切有关变数的状态建立一个公式以前,散装谷物的干燥實質上仍将停留在以經驗为基础的操作上。在下一节中将明显地暴露我們知識的不足,該节將討論散装谷物干燥的几个基本概念并根据我們現有的知識尽可能用数学分析发展成为数学理論。

理論的考察

这一节是討論散裝谷物干燥时各个因素間的相互关系。其中的数学处理說明各种干燥过程可被解釋为各种谷堆中水分变化的一般形式，虽然只推論了大批过程的一些簡單現象。表现为微分方程式的热平衡，在任何断热的(adiabatic)散裝干燥过程中是正相符合的(不論是整堆处置，或是連續对流，或是逆空气的流动等)，而且是散裝干燥的工程分析的主要部分。本节力求与其他各节保持不相关联，这就使某些重复无法避免。

湿球温度的意义 現以垂直面圓筒仓中一批具有均匀原始含水量的潮湿谷物为例。將干燥空气通过有洞地板挤入谷堆中。这种空气以不变的速度向上方移动，通过谷物上层表面后离去。假定进入谷物的空气其温度和湿度是恆定的。当这空气向上流动时，空气湿度由于谷物水分蒸发的結果而上升。空气湿度的上升是与空气温度的下降相伴随的。湿度上升和温度下降是同时发生的，而且两者都和蒸发水分所需的热量几成比例，因此空气的总热量实际上保持不变。湿球温度(wet bulb temperature)是与空气总热量的表現极接近的，因此当空气通过谷物时，湿球温度几乎保持恆定。在实用方面可以認為是恆定的。所以通过谷物时的空气情况，在一定湿图(psychrometric chart)上是依着湿球綫的。空气温度下降的速度是依水分自谷物蒸发的速度而定。

热的平衡 由于热的平衡(heat balance)經常存在于圓筒仓內每一点中，这就有可能在散堆进行干燥过程中的任何時間、任何地点測定含水量。谷粒蒸发水分所耗的热量一定等于空气温度下降所給与該谷粒的热量，加上谷物温度改变所供給的一切热量，再加上四周谷物或仓壁所傳導或放射的一切热量。在实用上，通过仓壁所获得或散失的热量很小，一般可不計；为了簡化起見，本文对此亦不予考虑。这就剩下蒸发热空气、显热(sensible heat)和