

稻谷种子安全干燥温度模型研究

刘木华¹, 曹崇文²

(1. 江西农业大学, 南昌 330045; 2. 中国农业大学, 北京 100083)

摘 要: 以稻谷干燥时的活力退化动力学方程为基础, 结合稻谷玻璃化转变理论建立了稻谷种子安全干燥温度模型。并通过稻谷种子的发芽率试验确定了种子安全干燥温度模型方程的系数。数学模拟结果表明, 稻谷干燥过程中随着水分的降低, 种子安全干燥温度曲线存在一个最低点; 依据稻谷初始含水率由高到低, 其最低安全干燥温度由低到高, 而且种子通过最低安全干燥温度曲线最低点以后所能承受的温度则有所提高; 当稻谷初始含水率低于 13% (w. b.) 时, 种子安全干燥温度曲线后半段近似为一直线, 不再有拐点(最低点)。论文最后提出了稻谷种子安全干燥温度和操作工艺, 以及选择种子安全干燥温度时应注意的问题。

关键词: 稻谷种子; 安全干燥温度; 玻璃化转变; 发芽率

中图分类号: S339.33; S375; S511

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0174-04

1 引 言

种子加工是事关农业生产可持续发展的大事, 因此, 种子干燥后依然具有旺盛的生命力是干燥作业的基本要求。种子的生命力常用种子的活力来表示, 它有许多指标如发芽率、发芽势、酶活力等。干燥时种子与干燥介质进行湿热交换, 种子从介质中吸收热量, 并向介质环境排出水分, 因此种子本身温度升高, 其内部的淀粉和酶等物质会产生热变性, 且组织结构可能会遭到破坏。这些变化都对种子的活力有很大影响。因此, 干燥过程中稻谷种子存在有允许的最高温度, 这个温度称为种子安全干燥温度。

国内有关学者对谷物种子安全温度进行了一些研究^[1, 2, 5, 9, 10]。有的学者将种子进行密闭加热(企图使水分固定)的方法来进行试验, 从而探讨临界安全温度与水分、时间的关系^[1, 2]。朱文学^[3]研究大豆等种子发芽率时, 注意到干燥温度对种子发芽率的影响不是线性的, 有一临界点存在, 在发芽率和干燥温度曲线上明显出现拐点。日本有关学者则通过试验来确定稻谷不产生爆腰和化学变性的安全干燥温度^[10, 11]。由于不同品种和地域的谷物会呈现不一样的耐热性质, 因此, 这些通过对一定品种谷物的试验数据确定的安全干燥温度在推广性上存在局限性。

如果我们通过确定谷物的固有物理特性(这种性质是共有的)来找到谷物的安全干燥温度, 则可望得到一种确定安全干燥温度的通用方法。近几年的研究表明^[4, 7], 谷物种子的一种固有物理特性——玻璃化转变对其活力有很大的影响, 并能通过这种玻璃化转变特性得到温度对种子活力的影响规律数学模型。Sun^[4]利用玻璃化转变理论研究了, 当谷物种子(豌豆、大豆)储藏温度大于其玻璃化转变温度时种子活力的退化及临界

贮藏温度。本文则试图通过稻谷种子的玻璃化转变来研究其干燥过程的安全干燥温度模型。

2 稻谷种子安全干燥温度模型研究

2.1 种子安全干燥温度模型推导

为了得到稻谷种子安全干燥温度模型, 并体现干燥过程中水分变化的特点, 采用 Sun^[4]的研究方法(即玻璃化转变理论的方法)来探讨谷物种子安全干燥温度是可取的。因为玻璃化转变温度 T_g 是谷物水分的函数, 所以水分的变化可反映在 T_g 的变化中, 而且 T_g 还能反映品种的不同。

设种子发芽率的变化服从一阶反应方程。所以我们可用一阶动力学反应来表示谷物种子在干燥中的发芽率退化:

$$-\frac{dQ}{dt} = kQ \quad (1)$$

式中 Q ——品质指标; k ——反应常数, 它与谷物内部的物理状态直接相关, 可用式 2 表示。Sapru^[5]研究得出化学反应的反应常数 k 与玻璃化转变直接相关, 可用自由体积理论加以推导。 t ——反应时间, min。反应常数用 Arrhenius 方程表示:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

式中 k_0 ——频率系数; E_a ——与浓度和温度无关的活化能, kJ/mol; T ——反应温度, K; R ——通用气体常数, 8.314 kJ/(mol·K)。

自由体积理论认为, 物料由两部分组成: 一部分是被分子占据的体积(称为已占体积); 另一部分为未被占据的自由体积。正是由于自由体积的存在, 分子链才有可能通过转动和位移而调整构象, 从而发生结构变化和化学反应。当物料由橡胶态向玻璃态转变时, 自由体积不断缩小, 达到玻璃态时自由体积达到最低值, 分子链和自由体积被冻结, 没有足够空间来进行分子链构象的调整。所以物料发生玻璃化转变是因为物料温度引起的自由体积变化的结果, 而自由体积正是水分扩散过程和化学反应能力的控制因素^[5, 6], 在玻璃态下化学反应能

收稿日期: 2002-04-27

作者简介: 刘木华(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事农产品干燥。南昌市 江西农业大学工程技术学院, 330045。Email: suike1mh@sohu.com

力达到最低值。

下面先来推导基于玻璃化转变理论的 k 值表达式。在温度 T 条件下干燥时的退化动力学常数可表述为基于自由体积的表达式:

$$k = A \exp(-B/f_T) \quad (3)$$

式中 f_T ——玻璃化转变温度以上的某温度 T 时的自由体积分数(即自由体积与已占体积的比率), 而 A, B 为常数。类似地, 玻璃化转变温度时的退化动力学常数可表示为:

$$k_g = A \exp(-B/f_g) \quad (4)$$

式中 f_g ——玻璃态高分子物料的自由体积分数。于是, 玻璃化转变温度以上的某温度 T 时的自由体积分数可以由下式表示:

$$f_T = f_g + \alpha_f(T - T_g) \quad (5)$$

式中 α_f ——玻璃化转变温度以上时的自由体积膨胀系数。

对式(3)和式(4)两边取对数:

$$\ln k = \ln A - B/f_T \quad (6)$$

$$\ln k_g = \ln A - B/f_g \quad (7)$$

两式相减得:

$$k = k_g \exp[-B(1/f_T - 1/f_g)] \quad (8)$$

把式(5)代入式(8)得:

$$k = k_g \exp[C_1(T - T_g)/(C_2 + T - T_g)] \quad (9)$$

其中, $C_1 = B/f_g, C_2 = f_g/\alpha_f$ 为待估参数。

式(1)在 $t = 0$ 到 t 之间积分得到:

$$\frac{Q}{Q_0} - \frac{dQ}{Q} = \int_0^t k dt \quad (10)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \exp(-kt) \quad (11)$$

式中 Q ——干燥到某一时间时的种子发芽率;
 Q_0 ——对照组稻谷种子发芽率, $\frac{Q}{Q_0}$ 其实就是种子相对发芽率, 这里用 I_c 来表示相对发芽率。则

$$-\ln I_c = kt \quad (12)$$

将式(9)代入式(12)得

$$-\ln I_c = k_g t \exp[C_1(T - T_g)/(C_2 + T - T_g)] \quad (13)$$

对上式进行整理:

$$T = T_g - \frac{C_2[(\ln(-\ln I_c) - \ln k_g) - \ln t]}{C_1 + \ln(-\ln I_c) - \ln k_g - \ln t} \quad (14)$$

式中由于 I_c 小于 1, $\ln I_c$ 小于 0, C_1, C_2, k_g 为待估常数。为简化方程起见, 对方程(14)进一步进行整理可得

$$T = T_g - C_2 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + \ln k_g - \ln(-\ln I_c) + \ln t}$$

令 $C = C_1 + \ln k_g$, 则

$$T = T_g - C_2 + \frac{C_1 C_2}{C - \ln(-\ln I_c) + \ln t} \quad (15)$$

式(15)即为种子安全干燥温度模型。式中 C_1, C_2, C

均为待估常数, I_c ——相对发芽率; t ——干燥时间, min; T ——种子安全干燥温度, $^{\circ}\text{C}$; T_g ——种子玻璃化转变温度, $^{\circ}\text{C}$ 。这里需要说明的是 $T > T_g$ 。上式表明, 当干燥温度在稻谷种子的玻璃化转变温度以上时, 种子能承受的临界温度(也即是安全干燥温度)可通过式(15)计算得到。

2.2 方程待估常数的确定

我们可以根据种子发芽率试验数据来求得式(15)的系数。试验材料选用北京市郊区唐家岭 2000 年 10 月收获的水稻(金稻 305)。试样手工清选干净后, 室温晾干表面水, 用广口瓶盛放, 中间经常摇动以利水分均匀。水稻含水率用电热鼓风干燥箱测定。试验用薄层干燥试验台为垂直式试验台。干燥过程中, 间隔一定时间取样, 一部分用于测定含水率, 另一部分用于发芽试验。

将干燥过程中取出的试验样品用塑料袋密封放在广口瓶中, 室温放置 24 h, 然后进行发芽试验; 同时进行发芽试验的样品还有未干燥的原始水稻。

发芽床在玻璃皿中用水洗的细沙均匀地铺设, 厚度为 1 cm, 并注入清水到饱和为止。发芽种子随机分成 4 组, 每组为 50 粒。种子间距为 1~2 倍种长。种子与细沙压平, 玻璃皿用玻璃片盖好, 并留有通气口。

发芽箱内温度控制在 30°C 。发芽试验开始后, 每天保持水分、温度外, 检查发芽情况, 总共试验 10 d。记录下每天的发芽颗粒数, 并得到 10 d 内的总数。种子发芽率的计算公式如下:

$$\text{种子发芽率}(\%) = \frac{N_1}{N} \times 100$$

式中 N_1 ——10 d 内正常发芽的种子颗粒数; N ——种子颗粒总数。

根据发芽率数据, 利用 SPSS 统计分析软件进行曲线回归, 并把玻璃化转变温度 T_g 的模型待入^[7], 可得到种子安全干燥温度的计算公式。玻璃化转变温度 T_g 的模型为(种子水分 M 为干基含水率, kg/kg):

$$T_g = 89.075 - 202.555M$$

通过上述试验所得的发芽率数据并利用 SPSS 统计分析软件进行曲线回归得到的种子安全干燥温度方程为:

$$T = 89.075 - 202.555M + \frac{45824.37}{85 - \ln(-\ln I_c) + \ln t} - 499.42 \quad (16)$$

3 稻谷种子安全干燥温度模拟和结果讨论

为了建立种子安全干燥温度的动态方程, 必须知道干燥过程中的水分变化。人们曾经根据自己的试验结果建立了较多的水稻薄层干燥方程。这里我们选用 Page 方程^[7], 由此得到种子安全干燥温度计算公式:

$$M = M_e + (M_0 - M_e) \exp(-kt^N)$$

$$T = 89.075 - 202.555M + \frac{45824.37}{85 - \ln(-\ln I_c) + \ln t} - 499.42 \quad (17)$$

利用 Matlab 语言编制了稻谷种子安全干燥温度模

拟程序。图 1 是保证水稻种子相对发芽率为 98% 的品质指标条件下, 通过稻谷安全干燥温度模拟程序得到的水稻种子安全干燥温度。稻谷的初始含水率(% , w. b.) 分别为 25%、21%、17%、13%。

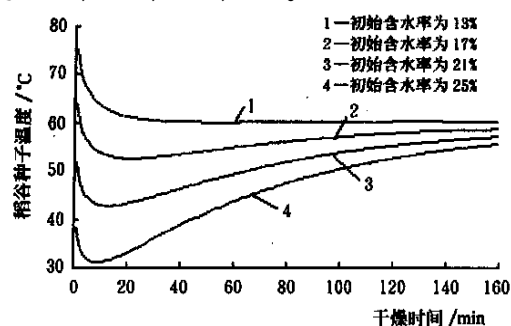


图 1 不同初始含水率(% , w. b.) 的稻谷种子安全干燥温度
Fig 1 Safe drying temperature of rice seed
in different water content(% , w. b.)

图 1 可看出, 随着稻谷初始含水率由高到低, 其最低安全干燥温度由低到高, 而且种子通过最低安全干燥温度以后所能承受的温度则越来越高。稻谷含水率为 25% (w. b.) 时, 最低点温度已达到 32 ; 当稻谷初始含水率低于 13% (w. b.) 时, 种子的安全干燥温度随着干燥时间的延长将缓慢降低, 降低趋势几乎不明显, 安全干燥温度曲线后半段近似为一直线, 不再有拐点(最低点), 此时的安全干燥温度接近 61.5 。对金稻 305 这个品种而言, 我们推荐的种子安全干燥温度如图 2 所示。图中的安全干燥温度为稻谷种子安全干燥温度曲线中的最低点值。从图 2 来看, 当稻谷含水率为 13% (w. b.) 时, 其安全干燥温度曲线中的最低点值为 61.5 ; 含水率为 26% (w. b.) 时, 其安全干燥温度曲线中的最低点值 29.5 。表明高含水率时稻谷所能忍受的温度比较低, 所以建议稻谷应在较低含水率时(如 21% , w. b.) 收获以避免干燥对种子发芽力的损伤, 保证发芽率。如果干燥时间控制在极短的情况下(以稻谷种子安全干燥温度曲线的最低点为参考), 则稻谷忍受的温度是可以较高的; 如果干燥工艺能保证稻谷种子安全通过安全干燥温度曲线的最低点, 则随后可适当提高干燥温度。

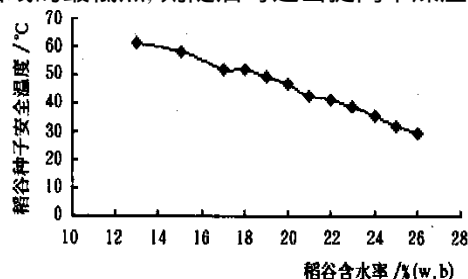


图 2 稻谷种子安全干燥温度推荐值(品种为金稻 305)
Fig 2 Recommended value of safe drying
temperature for variety of Jingdao 305

4 结 论

1) 稻谷种子安全干燥温度受许多因素的影响, 这些因素互相交叉, 错综复杂, 它们以不同的方式起作用。不同干燥工艺的干燥机, 不同的干燥介质条件下, 稻谷的活力损伤程度有很大的差别。单纯根据稻谷原始含水率及干燥时间来确定稻谷种子安全干燥温度是不够的, 还应考虑稻谷种子的本身玻璃化转变等物理特性、种子活力退化规律和干燥介质等条件, 这样才能更全面地分析稻谷种子安全干燥温度。本文推导的稻谷种子安全干燥温度模型较全面地考虑到了以上因素。

2) 本文通过稻谷颗粒干燥时的活力退化动力学方程(以发芽率作为活力标准), 结合稻谷玻璃化转变温度建立了稻谷种子安全干燥温度模型; 通过稻谷种子的发芽率试验确定了种子安全干燥温度模型方程的系数。模拟结果表明, 稻谷干燥过程中随着水分的降低, 种子安全干燥温度曲线存在一个最低点。文中对稻谷种子的干燥工艺提出了建议。

3) 在生产实践中, 还应根据当时当地的品种和具体情况对干燥温度参数加以适当修正, 在保证稻谷种子干燥质量的前提下, 最大限度发挥干燥机的效率。此外, 还应注意的一个问题是要兼顾稻谷爆腰情况, 即可能在一定温度和干燥时间条件下, 能满足保证种子发芽率的要求, 而不能保证爆腰率在允许范围内。

[参 考 文 献]

- [1] 斯美绮 谷物干燥中的“安全温度”[J] 北京农业机械学院学报, 1984, (2): 26~ 35
- [2] Nellist M E Safe temperature for grain drying[J] N IAE Report, 1978, No. 29
- [3] 朱文学 干燥过程中谷物应力裂纹和发芽率的模拟与试验研究[D] 北京: 中国农业大学博士学位论文, 1997
- [4] Sun, Leopold Glass state and seed storage stability: a viability equation analysis[J] Annals of Botany, 1994, 74: 601~ 604
- [5] Sapru V, Labuza T P. Glassy state in bacterial spores predicted by polymer glass-transition theory[J] Journal of Food Science, 1993, 58(2): 445~ 448
- [6] Sun Glass state and seed storage stability: the WLF kinetics of seed viability loss at $T > T_g$ and the plasticization effect of water on storage stability[J] Annals of Botany, 1997, 79: 291~ 297
- [7] 刘木华 水稻干燥品质的模拟和控制机理研究[D] 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2001
- [8] 傅家瑞 种子生理[M] 北京: 科技出版社, 1985
- [9] 孟宪玲, 褚治德, 李春英等 蔬菜种子干燥的临界安全温度及动力学分析[J] 农业机械学报, 2000, 31(4): 57~ 60
- [10] 村田敏, 田川彰男 示差热分析(DTA)对谷物热变性的测定[J] 农业机械学会志, 1989, 51(3): 75~ 80
- [11] 郑先哲 水稻干燥机理、品质及合理干燥工艺参数的试验研究[D] 哈尔滨: 东北农业大学博士学位论文, 1999

Model of safe drying temperature for paddy rice seed

Liu Muhua¹, Cao Chongwen²

(1. College of Engineering and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract The model of safe drying temperature for rice seed was developed based on kinetic models of germination and the glass transition temperature model using free-volume theory of polymer, and proper temperature of rice seed drying can be calculated in order to obtain proper germination rate using this model. In order to determine the coefficient of the model of safe drying temperature of rice seed, the drying experiment of rice seed was completed using thin-layer drying experiment device at various initial moisture contents of rice kernel and heated air temperatures, and germination experiment of rice seed was carried out in constant temperature tank. The computer simulated safe temperature during drying that ensures high germination ratio was given based on the model of rice seed safe drying temperature. The results indicate that the curve of safe drying temperature has the bottom and the bottom increases as the moisture content of rice seed decreasing. In the end, some suggestions for rice seed drying temperature were given.

Key words: paddy rice seed; safe drying temperature; glass transition; germination ratio