水浸控温式水稻种子浸种催芽设备温度场分析*

陶桂香[1]　衣淑娟[2]　李佐同[3]　史德慧[4]

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院，大庆 163319；2. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院，大庆 163319；
3. 黑龙江八一农垦大学农学院，大庆 163319；4. 黑龙江省勤得利农场，同江 156400)

【摘要】 利用有限元方法对寒地水稻浸种催芽过程中种子温度场进行仿真。通过分析可知，水稻浸种催芽过程中最高温度出现在水稻边缘与水接触处，温度为 31℃，水稻中心温度最低。随着催芽时间的增加，热量不断向水稻中心处传递，当催芽 23 h 后中心温度达到了 25℃，最高温度仍然保持为 31℃，此时水稻整体温度达到了催芽的最适宜温度 25～31℃。试验结果和仿真一致。

关键词： 水稻种子　浸种催芽　温度场

中图分类号： S223.1⁺2　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2011)10-0090-05

Temperature Field Analysis of Water Immersion Temperature Rice Seed Soaking Germination Equipment

Tao Guixiang[1]　Yi Shujuan[2]　Li Zuotong[3]　Shi Dehui[4]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *College of Information Technology*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
3. *College of Agronomy*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
4. *Heilongjiang Province Qindeli Farm*, *Tongjiang* 156400, *China*)

Abstract

Temperature field analysis of water immersion temperature rice seed soaking germination equipment was analyzed by finite element method. Simulation analysis showed the highest temperature during soaking appeard in the edge of rice in contact with water. The lowest temperature appeared in the center of rice seed. With the increasing of germination time, the heat transferd to the center of rice seed continuedly. The center temperature reached to 25℃ and the highest temperature reached to 31℃ after 23 h, then the temperature of rice seed reached to the optimum tempreture of 25～31℃. Experiment result was consistent with the simulation results.

Key words　Rice seed, Soaking germination, Temperature field

引言

我国辽宁、吉林、黑龙江、内蒙 4 省区均属于冬季冻土层厚度达 1 m 以上的寒地，特别是黑龙江省，农作物生育期短，年活动积温少，水稻欲取得高产，必须采用旱育稀植技术，即先在棚室内依靠苗床育秧。育秧的种子发芽有一定的温度要求，温度过高或过低都会影响种子的发芽率，使其发芽率降低[1～3]。进行大批量催芽时，每年有大量种子在催芽过程中烧芽而重新购种补播，这样既增加农业生产成本，又影响产量，因此种子发芽过程中，准确计算不同催芽时间下水稻温度场的分布具有实际意义。

催芽技术是提高育秧质量的保障，过去黑龙江

收稿日期：2010－11－04　修回日期：2011－01－19

* 高等学校博士点专项科研基金资助项目(305110002)、黑龙江省 2011 年研究生创新项目(YJSCX2011－251HLJ)和黑龙江省农垦总局科技计划资助项目(HNK10A20－07－03)

作者简介： 陶桂香，讲师，博士生，主要从事水稻机械化研究，E-mail：tgx1996@163.com

通讯作者： 衣淑娟，教授，博士生导师，主要从事水稻机械化研究，E-mail：yishujiuan_2005@126.com

省大都采用传统的土法催芽技术[4~6]，如地窖催芽法、煤灰催芽法、土温室催芽法等，这些土法催芽技术只适用于少量催芽，如大批量催芽易发生烧种、烂种等现象。为了克服土法催芽的种种弊端，部分地区采用了水稻集中浸种、催芽方法[7~8]。该方法根据水稻栽培措施的要求及水稻种子浸种、催芽阶段的生长特性，利用水作为导热介质，将水稻种子通过水来升温、降温、控温、保温等过程，实现其在浸种催芽箱内一次性完成标准化、机械化的浸种、破胸、催芽等生产过程。该设备在应用过程中没有考虑种箱内部温度的分布及热传导过程，本文采用有限元方法对水浸控温式水稻种子浸种催芽设备催芽过程中水稻种子温度场进行分析，得到水稻浸种过程中种箱内温度场分布规律。通过感温探测器进行水稻实际加温过程的温度测试，验证理论分析温度场分析的正确性，为水稻浸种催芽设备的设计提供参考。

1　浸种催芽原理

1.1　水稻催芽的生物学特性

要使种子早出苗，除种子本身具有发芽能力外，还需要温度、水分和空气等外界条件[9]，催芽就是控制温度、水分、氧气等参数，使种子在适宜的环境条件下提早发芽的一项措施。

种子催芽是在一系列酶的催化作用下完成的，酶促反应与温度密切相关[10]，因此温度是影响种子催芽的一个重要的外界因素。一定范围内提高温度，可以增强酶活性，提高其催化能力；降低温度，酶活性则会减弱，降低其催化能力。当低于某一温度时，酶活动几乎完全丧失。过高温度会破坏酶结构，使其失去催化能力。所以种子催芽对温度的要求表现为 3 个基点，即最低温度、最高温度和最适温度。低于最低温度或高于最高温度都将使种子失去发芽能力。最适温度是指能使种子在最短时间内获得最高发芽率的温度，只有最适温度才是种子催芽的理想温度条件。实践证明，水稻种子催芽的最低温度为 10℃，最高温度为 43℃，最适温度为 25 ~ 31℃。

1.2　工作原理和流程

水浸控温式水稻种子浸种催芽设备如图 1 所示。水稻浸种催芽的过程中，利用水作为导热介质，对温室进行升温、降温、控温、保温，流程如图 2 所示。具体过程如下：①浸种过程，首先把经过盐选处理好的水稻种子装入浸种催芽箱内，并将温度监控系统的感温探测器插入箱内上、下、左、右、中各个部位，以监控各个部位种子的温度（此时种子的温度不超过 10℃）。然后，将水温调到 15℃左右，再通过给、回水系统把调好温度的水供到准备浸种的浸种催芽箱内，使种子升温并稳定在 11 ~ 12℃。如果感温探测器监测到的实际温度不符合这一要求，则把浸种催芽箱中的水返回调温箱重新调温，然后再加入浸种催芽箱内，直至种子温度符合上述标准。②破胸过程，将浸种箱中的水放掉，把调温箱中的水加热、调温到 33℃左右，再通过给、回水系统把调好温度的水供到准备破胸种子的浸种催芽箱内，使水温稳定在 30 ~ 32℃。③催芽过程，随时监测水稻各点温度，使水稻温度保持在 25 ~ 28℃，观察出芽情况。当水稻的温度高于 35℃且有上升趋势时，用 29℃或 30℃水注满浸种催芽箱进行降温，降到 30 ~ 32℃后将水排干，进行催芽；当水稻的温度温度低于 25℃且有下降趋势时，用 35℃水注满浸种催芽箱进行升温，升到 25 ~ 28℃后将水排干，进行催芽。

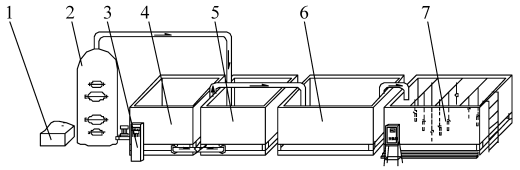

图 1　水浸控温式水稻种子浸种催芽设备示意图

Fig. 1　Schematic diagram of flooding soaking rice seed germination temperature control device

1. 煤箱　2. 锅炉　3. 控电柜　4. 冷水箱
5. 热水箱　6. 调水箱　7. 浸种催芽箱

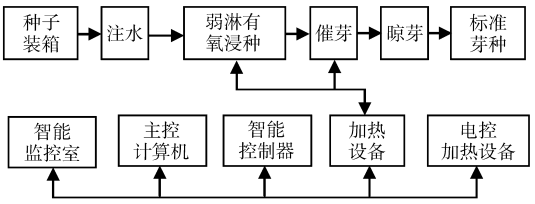

图 2　设备流程图

Fig. 2　Flow chart of equipment

2　浸种催芽设备催芽过程瞬态热分析

水稻种子瞬态传热分析的具体步骤为：

（1）设置分析标题

在瞬态热分析中，首先应确定工程文件名、工作标题和单位制，然后定义单元类型并设置选项、定义单元实常数。

（2）定义单元类型

在有限元分析过程中热分析常用的二维实体有 plane77、plane55、plane35、plane75、plane78，其中 plane77 是二维 4 节点热单元的高阶版本，每个节点都有一个自由度——温度，8 节点单元都有一致的温度形函数，可以较好地适应具有不规则边界的模型，适合于二维瞬态热分析。本文所涉及到的单元形状为四边形，节点采用 8 节点，维数是二维，自由

度是温度,因此单元类型选择 plane77。

(3)定义材料性质

已知水稻含水率为 12%,根据文献[11~12]可得水稻和水的热学参数如表 1 所示。

表 1 水稻和水的热学参数

Tab. 1 Thermal parameters of rice and water

热学参数	水稻	水
导热系数/W·(m·K)$^{-1}$	0.10	0.61
密度/kg·m^{-3}	572.8	996.0
比热/J·(kg·K)$^{-1}$	1 034.6	4 185.0

(4)创建几何模型

在浸种过程中纵向和横向水稻种子的分布情况相同,因此只建立纵向的二维分析模型,具体结构参数如下:矩形水箱为 5 m×1.5 m;水稻是通过袋装后叠加在一起,叠加后可近似看成矩形,沿箱体纵向共放置 9 列,每列为 0.45 m×0.96 m,间隔 100 mm,与水箱壁间隔 450 mm,为了使水进行循环,水稻放置在距离箱底 200 mm 处;为了充分使水稻充分加热,水箱中水位高过水稻 200 mm;水箱壁为绝缘玻璃钢。图 3 为建立的几何模型。

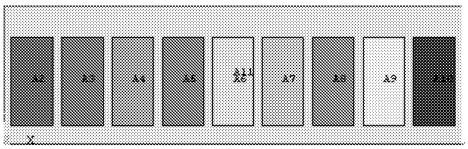

图 3 水箱及水稻的几何模型

Fig. 3 Geometric model of water tanks and rice

(5)设定网格密度并划分网格

根据模型的形状,水稻采用映射网格划分,水箱内水采用自由划分网格,经过反复尝试,最终的网格划分如图 4 所示。

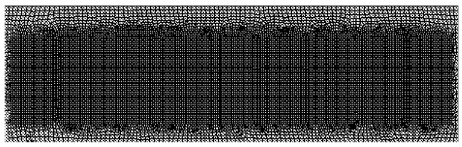

图 4 水箱及水稻的网格图

Fig. 4 Tanks and grid map of rice

(6)定义求解类型并确定瞬态热分析初始条件

在瞬态热分析中,节点温度可以设定为不同的值,因水稻和水初始温度不一致,因此直接在实体模型上施加的热荷载是初始温度。

(7)设定荷载步选项

荷载步选项包括每一个荷载步结束时的时间、每个荷载步的荷载子步数、迭代次数、自动时间步长、时间积分效果等。对于非线性分析,每个载荷步需要多个载荷子步。时间步长关系到计算的精度,步长越小,计算精度越高,同时计算时间越长。本文每一个子步默认的迭代次数为 25 次,自动时间步长选项打开,在求解过程中将自动调节时间步长。

(8)进行求解

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程,在这个过程中系统的温度、热边界条件以及系统内能随时间都有明显的变化。基于传热学经典理论能量守恒原理的热平衡方程,求解一定边界条件和初始条件下每一节点处的热平衡方程,由此计算出各节点的温度。

(9)计算结果分析

读取计算结果,得出模型中任意点的温度时间历程及任意时刻种箱中的温度场状态。

3 仿真结果分析

3.1 仿真条件

初始时刻的水稻温度为 11℃,注入水的温度分别为 25、30、33、35、40℃。

3.2 仿真结果

(1)在注水温度 33℃时分别在催芽 1、8、12、23 h 对水稻温度场进行仿真分析,如图 5 所示。从仿真云图中可以看出,水稻温度场从中心到边缘共分为 9 个温度层,温度从中心向边缘不断递增,最高温度出现在水稻边缘与水接触处,温度为 31.1℃,水稻中心温度最低,最低温度为 11℃。随着时间增加,热量不断向水稻中心处传递,中心温度不断升高,例如当催芽 1 h,由水稻温度场分布图可知大部分水稻温度变化不大,只有边缘一小部分温度达到 31.2℃;当催芽 12 h,中心温度达到了 17.2℃,其所占比例逐渐减少,最高温度为 31℃,其所占比例逐渐增加;当催芽 23 h,中心温度达到了约 24.2℃,最高温度为 31℃,此时整个水稻温度变化范围为 25~30℃,即水稻各部分温度达到了催芽的温度 25~28℃,此时水稻催芽箱进入保温状态。

(2)水的温度分别为 25、30、35、40℃条件下,催芽 8 h 时对水稻温度场进行仿真分析,如图 6 所示。通过对比分析可知,在相同的催芽时间里,注入水的温度越高水稻内温度越高,即水稻温度升高的程度与注入水的温度呈正比,水的温度每提高 5℃,水稻边缘温度提高 5℃,水稻中心温度提高 0.5℃。因而提高注入水的温度是缩短催芽时间的有效途径,也是调节水稻温度场分布的方法,因此可以通过感温探测器的反馈结果,依据水稻催芽的特性适当注入一定的水进行温度调节,以达到水稻在最适宜的温度催芽。

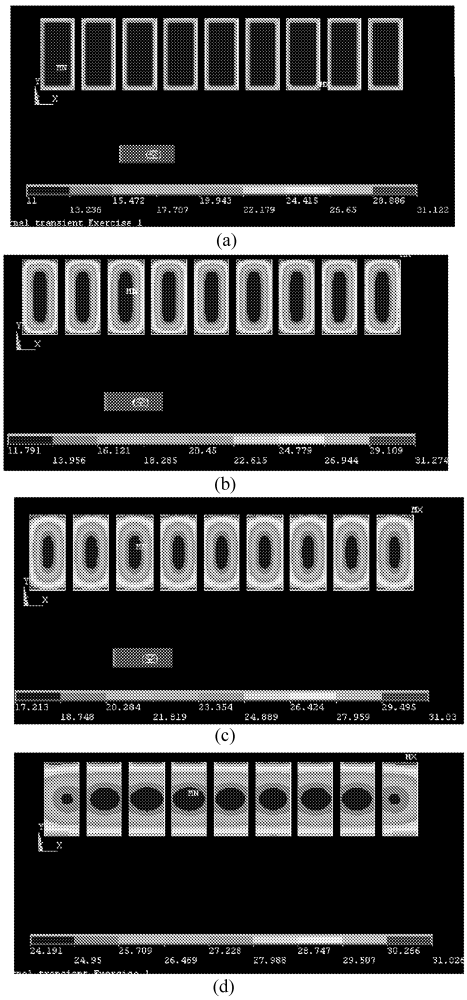

图 5　不同催芽时间下种子节点温度分布云图

Fig. 5　Temperature contours seed node

(a) 1 h　(b) 8 h　(c) 12 h　(d) 23 h

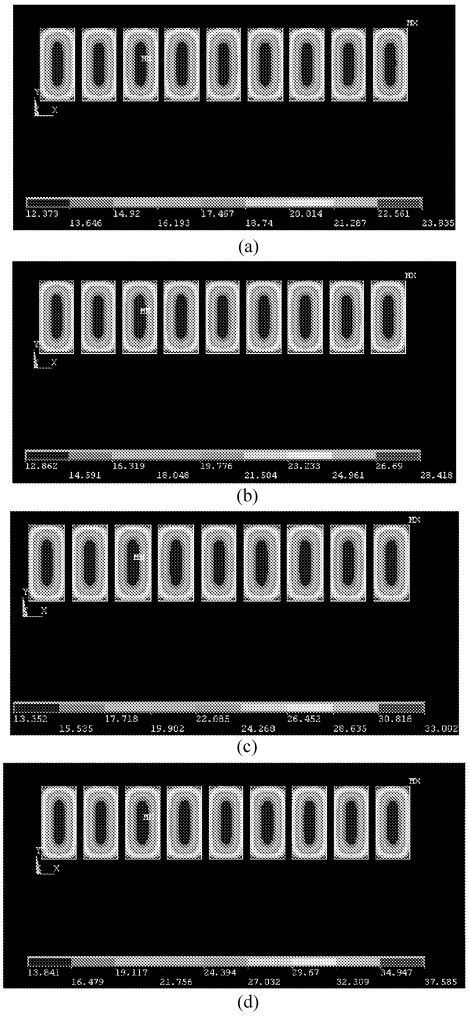

图 6　不同浸水温度条件下节点温度分布云图

Fig. 6　Seed nodes under different heat water temperature contours

(a) 25℃　(b) 30℃　(c) 35℃　(d) 40℃

4　试验验证

4.1　试验方法和条件

(1)试验方法

采用水浸控温式水稻种子浸种催芽设备进行试验。为了掌握该设备催芽过程中水稻各点的适时温度,在不同催芽时间条件下对水稻各点温度进行了监测,具体过程:首先用机械加工的方法对种子初清、除芒、风筛选、比重选(重复 2 次)、谷糙分离、达到规定的水稻种子标准后,把经过盐选、包衣处理的水稻种子装入浸种催芽箱内,并将温度监控系统的感温探测器探头插入箱内,感温探测器探头用热电偶作为传感元件(K 型、镍铬-镍硅热电偶、铠装、直径 ϕ1 mm),共计 8 个温度监测点位分别按图 7 上、中、下位置放入种子袋中,以监控各个部位种子的温度,其中 A、D、G 位于水稻的边缘,B、E 位于水稻的中心,C、F、H 介于中心和边缘之间。

(2)试验条件

初始时刻水稻温度为 11℃,水温为 33℃。

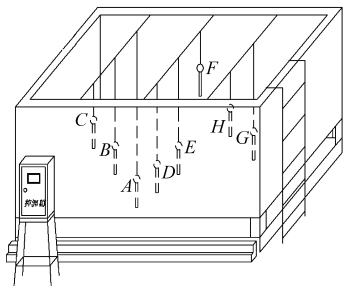

图 7　浸种催芽箱内感温探测器位置图

Fig. 7　Location of germination temperature detectors inside soaking

4.2　试验结果

通过试验得出各点的温度在催芽过程的变化曲线如图 8 所示。与仿真结果(图 5)进行对比分析可知,试验结果与仿真结果得出的催芽过程中水稻温度场整体变化规律一致。位于水稻的边缘 A、D、G 3 点温度最高,当催芽 1 h 温度为 31℃左右,当催芽 23 h温度为 31℃左右; B、E 两点位于每组水稻的中

心,温度最低,当催芽 12 h 温度为 17.2℃,当催芽 23 h温度为 25℃。*C*、*F*、*H* 3 点介于中心与边缘中间,因此温度介于中间。随着催芽的时间增加,*A*、*D*、*G* 3 点温度降低,*B*、*E*、*C*、*F*、*H* 5 点温度升高,温度降低和升高的幅度随催芽时间的增加而增加。当催芽时间为 23 h,各点温度均达到了催芽的适宜温度25 ~31℃。试验和仿真结果表明:此时催芽箱内进入了保温状态,感温探测器随时监控催芽箱内的温度,如果温度过高,则通过注入冷水进行降温,如果温度降低,则注入热水进行升温。以便达到恒温催芽的目的。

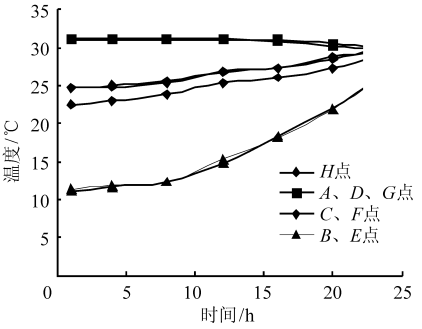

图 8 催芽过程中测试点温度变化曲线

Fig. 8 Test point temperature curves of germination process

5 结论

(1)将有限元方法应用到水稻浸种催芽温度场的研究中,进而解决了催芽过程中温度场分布问题,该方法经试验验证具有较高的拟合精度。

(2)建立了水稻在浸种催芽的传热模型,得出水浸控温式水稻种子浸种催芽设备内部温升情况和不同时刻的温度场状态,以及相同时间下不同浸水温度对温度场分布的影响,为水稻浸种催芽过程的温度场控制提供理论根据。

参 考 文 献

1 Basra S M A, Farooq M, Tabassum R. Physiological and biochemical aspects of seed vigor enhancement treatments in fine rice (*Oryza sativa* L) [J]. Seed Science and Technology, 2005, 33(3):623 ~628.

2 李学. 不同温度条件对三个水稻品种种子催芽效果的影响[J]. 宁夏农学院学报,1988,1(1):84 ~88.
Li Xue. Three different temperature conditions on rice seed germination effect[J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 1988,1(1):84 ~88. (in Chinese)

3 Farooq M, Basra S M A, Cheema M A, et al. Integration of pre-sowing soaking, chilling and heating treatments for vigor enhancement in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Seed Science and Technology, 2006,34(2):499 ~506.

4 顾松华. 水稻浸种催芽同步法[J]. 中国稻米, 2002,8(4):29.
Gu Songhua. Synchronous germination of rice seed soaking method[J]. China Rice, 2002,8(4):29. (in Chinese)

5 徐小荣. 水稻种子浸种催芽技术[J]. 种子科技,2009,27(8):33 ~34.
Xu Xiaorong. Soaking and pregermination technique of rice seed[J]. Seed Science & Technology, 2009,27(8):33 ~34. (in Chinese)

6 Ashraf M, Foolad M R. Pre-sowing seed treatment—a shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions[J]. Advances in Agronomy, 2005,88:223 ~271.

7 毛欣, 衣淑娟,于立河,等. 大型智能控温水稻集中浸种催芽设备的研制[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2011,23(2):66 ~68.
Mao Xin, Yi Shujuan, Yu Lihe, et al. Design on large-scale concentrated soaking germination equipment in intelligent temperature control for rice[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011,23(2):66 ~68. (in Chinese)

8 王宝芹,郭艳玲,范长胜. 水稻浸种催芽温室保温与加热系统的研究[J]. 农机化研究,2008,30(9):66 ~68.
Wang Baoqin,Guo Yanling,Fan Changsheng. The research of the heat preservation and the heating system of the paddy rice presoaking and germ ination greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(9): 66 ~ 68. (in Chinese)

9 Hsu C C, Chen C L, Chen J J, et al. Accelerated aging-enhanced lipid peroxidation in bitter gourd seeds and effects of priming and hot water soaking treatments[J]. Scientia Horticulturae, 2003,98(3):201 ~212.

10 夏吉庆,郑先哲. 稻谷热变性温度的试验[J]. 农业机械学报,2000, 31(1):76 ~78.
Xia Jiqing, Zheng Xianzhe. The experimental research on paddy thermal denaturation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1):76 ~78. (in Chinese)

11 龚红菊. 稻谷物性参数的实验测定[D]. 南京:南京农业大学,2004.
Gong Hongju. Experimental measurement of physical parameters of paddy[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004. (in Chinese)

12 陈坤杰, 龚红菊. 基于非稳态热探针法的稻谷导热系数的测定[J]. 农业机械学报,2005, 36(1):65 ~67.
Chen Kunjie, Gong Hongju. Experiment measurement of the thermal conductivity of paddy by a tin heat probe[J] Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005, 36(1):65 ~67. (in Chinese)