

营养液加热消毒机的设计与灭菌性能试验

宋卫堂^{1,2}, 袁小艳¹, 王冬华¹, 周立刚³

(1. 中国农业大学农业部设施农业生物环境工程重点开放实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学理学院, 北京 100094;
3. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094)

摘要: 设计了一种专用于营养液消毒的加热消毒机, 可以自动实现排液流量 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、营养液由室温加热至 85°C 、保温滞留 $0\sim 3 \text{ min}$ 的任务。杀菌试验结果表明本机对番茄萎蔫病病原菌、黄瓜枯萎病病原菌、番茄细菌性青枯病病原菌都有较好的杀灭效果; 同时性能稳定、可靠。在杀灭营养液中的这 3 类病原菌时(起始病原菌浓度为 $3.9\times 10^5\sim 8.3\times 10^5 \text{ cfu/mL}$), $75^\circ\text{C}/90\text{s}$ 的杀菌组合, 可以达到 100% 的杀菌效果。

关键词: 营养液; 加热消毒机; 灭菌

中图分类号: S317; S477+.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0111-05

宋卫堂, 袁小艳, 王冬华, 等. 营养液加热消毒机的设计与灭菌性能试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 111-115.

Song Weitang, Yuan Xiaoyan, Wang Donghua, et al. Design and disinfection performance test of a heating installation for nutrient solution from closed system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 111-115. (in Chinese with English abstract)

0 引言

封闭式无土栽培系统就是将灌溉排出的渗出液进行收集, 经消毒、检测、调整后重新利用。此方式可以大大节约水、肥资源, 减少因肥料向地下水富集而引起的环境污染, 但营养液在循环使用前, 必须进行彻底的灭菌消毒, 否则一旦栽培系统中有一株感染根传病害, 病原将会在整个栽培系统内传播, 从而造成毁灭性的损失^[1]。

目前比较有效的、非农药的营养液灭菌方法主要有: 加热处理^[2-5]、慢沙过滤^[6-9]、紫外线处理^[10, 11]、臭氧处理^[12]、生放灭菌^[13, 14]等^[15, 16]。Runia W T^[2]介绍了一套营养液的加热灭菌系统。该系统将营养液加热到高温(高于 90°C)并滞留一段时间(大约 10 s)。杀菌试验发现烟草花叶病毒 TMV 和 *Verticillium dahliae* 得到了有效的控制, 杀菌率达 99.9%。Runia W T^[3]等对设备进行了改进, 经过对滞留时间和加热温度的正交试验, 得出了将营养液加热到 85°C , 滞留时间为 3 min , 就能完全消除营养液内的镰刀属真菌 (*Fusarium oxysporum*) 和烟草花叶病毒 TMV 的结论; 并且通过

实验室实验, 验证了加热温度分别为 48°C 、 50°C 和 52.5°C , 滞留时间分别为 5 min 、 2 min 和 30 s 时, 就能杀死根结线虫。在其后来的加热处理研究中, 设备基本没有改进, 只是通过改变加热温度和滞留时间等参数, 达到消除病毒和真菌的效果, 从而找出最低的加热温度和最短的滞留时间以达到节约能源的目的。Sportelli G^[4]采用加热处理控制致病的腐霉属、疫霉属等真菌, 而且效果不错。在 Howell W^[5]等的试验中, 进一步验证了加热处理的效果, 因此加热处理方法是一种很好的循环利用营养液的灭菌方法。

加热消毒方法具有消毒彻底、栽培风险小等优点, 但也存在设备及运行成本高等缺点。中国目前尚未在营养液的加热消毒技术研究和设备研制方面开展工作。

本研究据 W. T. Runia^[3]的研究成果, 将营养液加热到 85°C 并滞留杀菌 3 min , 可以实现对营养液的彻底消毒的原理, 自行设计了加热消毒机, 要求加热温度可调节(由常温至 85°C); 加热杀菌时间可调节(6 min 以内); 系统采用自动控制, 并测定了该机的灭菌效果。

1 加热消毒机的构造与工作原理

设计的加热消毒机主要由增压水泵、循环水泵、热交换器、电加热炉、滞留罐、单向阀、电磁阀、电磁阀、流量计、控制与测量系统等组成(图 1)。

消毒机的基本工作过程是利用电加热炉加热待消毒的营养液, 初始营养液(20°C 左右)在加热炉中被加热至 85°C 后, 进入滞留罐。 3 min 后(病原体被杀死)排入热交换器高温通道; 在热交换器中将余热传给低温通道

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-12-25

基金项目: “十五”国家科技攻关计划项目(2004BA521B01); 北京市教育委员会共建计划项目(XK100190650)

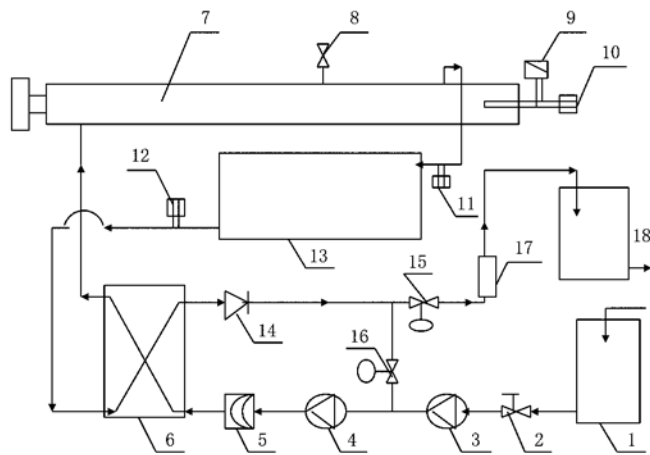
作者简介: 宋卫堂(1968-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 设施园艺中营养液物理消毒技术及消毒机研制。北京 中国农业大学农业部设施农业生物环境工程重点开放实验室, 100083。

Email: songchali@cau.edu.cn

中的待处理营养液。高温通道中的营养液温度降至常温排放至容器中备用。热交换器中低温通道的常温营养液,被已消毒的热营养液加热至高温(80℃左右)后进入加热炉,再次被加热到要求的处理温度(如85℃),然后进行下一步循环。

营养液进液、排液过程:待处理营养液(罐)(1)→手动阀(2)→增压泵(3)→循环泵(4)→过滤阀(5)→板式热交换器(6)冷端入口→板式热交换器(6)冷端出口→电加热炉(7)入口→电加热炉(7)出口→温度传感器2(11)→滞留罐(13)入口→滞留罐(13)出口→温度传感器3(12)→板式热交换器(6)热端入口→板式热交换器(6)热端出口→单向阀(14)→电磁阀1(15)→转子流量计(17)→待利用罐(栽培床入口)(18)。

营养液滞留杀菌过程:循环泵(4)→过滤阀(5)→板式热交换器冷(6)端入口→板式热交换器(6)冷端出口→电加热炉(7)入口→电加热炉(7)出口→温度传感器2(11)→滞留罐(13)入口→滞留罐(13)出口→温度传感器3(12)→板式热交换器(6)热端入口→板式热交换器(6)热端出口→单向阀(14)→电磁阀2(16)→循环泵(4)。此循环过程,可以保证滞留罐中的营养液温度维持在设定温度(如85℃)。



1. 待处理罐 2. 手动阀 3. 增压泵 4. 循环泵 5. 过滤阀 6. 板式热交换器 7. 电加热炉 8. 减压阀 9. 压力控制继电器 10. 温度传感器与温控仪 1 11. 温度传感器与温控仪 2 12. 温度传感器与温控仪 3 13. 滞留罐 14. 单向阀 15. 电磁阀 1 16. 电磁阀 2 17. 转子流量计 18. 待利用罐

图1 加热消毒机的整机结构

Fig. 1 Sketch of the designed heating and sterilizing installation

2 加热消毒机的设计及参数确定

以满足排液流量为1 m³/h、加热至85℃、保温滞留3 min、进口水温20℃、排液温度25℃为设计指标。

本加热消毒机的主要工作部件是:热交换器、电加

热炉和滞留罐。

2.1 热交换器

板式热交换器与管壳式热交换器相比,具有以下优点:总传热系数约为管壳式热交换器的3~5倍,加热交换率高;同一工况下,占地面积只有管壳式热交换器的1/5左右;便于清洗、维修;温度交叉、末端温度小(约1℃)。因此,选择采用板式热交换器。

经考察分析,选择沈阳太宇机电设备有限公司生产的TS8A-4G16-62-TLA型板式热交换器:抗酸碱的AISI316号、0.5 mm厚不锈钢板材;热效率92%;最大承压能力1.0~1.3 MPa。根据设计任务,可计算出被预热出口液体温度 T_{l2} 和加热通道(被冷却)出口排液温度 T_{r2} 。

$$T_{l2} = (T_{r1} - T_{l1}) \times \eta + T_{l1} \\ = (85 - 20) \times 0.92 + 20 = 79.8^\circ\text{C}$$

$$T_{r2} = (T_{r1} - (T_{r1} - T_{l1}) \times \eta) \\ = 85 - (85 - 20) \times 0.92 = 25.2^\circ\text{C}$$

式中 T_{r1} ——加热通道入口水温,℃; T_{l1} ——冷通道进口水温,℃; η ——热交换器热效率,%。

2.2 加热炉

按流量 $q_m = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 即0.278 kg/s、加热炉进口水温为预热通道温度 $T_{l2} = 80^\circ\text{C}$,到达滞留罐前温度要求 $T_{r3} = 85^\circ\text{C}$ 要求,则加热功率应为:

$$W = q_m \times C_p \times (T_{r3} - T_{l2}) = 0.278 \times 4.18 \times (85 - 80) = 5.8 \text{ kW}$$

式中 C_p ——水的比热,kJ/(kg·℃)。

经修正选择6 kW的加热功率。

加热炉满足:内胆材质采用不锈钢316号(AISI316),内胆承压约1000 kPa;内胆长1.8 m,直径200 mm,外保温直径300 mm;有压力控制开关接口、温度控制开关接口,以及减压阀与排液阀。

加热炉外面包裹5 mm厚的橡塑海绵保温材料,以减少炉体的热量损失。经测试,其表面温度在加热炉工作时不超过30℃。

2.3 滞留罐

按设计任务要求,在滞留罐滞留3 min,以流量 $q_m = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 即0.278 kg/s排液,则罐的容量应为 $V = 0.278 \times 3 \times 60 = 50.04 \text{ (kg)}$ 即50.04 L。最后取50 L容量并满足良好保温。

滞留罐设计为圆柱体。为便于整个系统的运行,入口在罐的底部,出口在罐的顶部。设有放水阀,并在入口和出口处设有温度传感器的安装孔(图1)。罐的外面层包裹5 mm厚的橡塑海绵保温材料,以防止罐内的液体降温。

2.4 自动控制设备

加热消毒机需要完成的控制功能主要有: 电加热炉的开启控制功能; 营养液温度、滞留时间、是否排出的工艺控制功能。其中后者必须按照作业顺序进行, 先加热到病原菌的致死温度, 然后保温 3 min, 再将处理完的营养液排出, 各作业步骤不能混乱。除此之外, 还有启动、停止等基本功能。

1) 电热炉的开启控制电路

电加热炉电路通断, 由压力控制开关、温度传感器及温控仪、继电器控制。当加热炉中水压未达到设定值, 如水没有充满炉内, 加热电路不会接通, 保证加热丝周围充满水而避免“干烧”; 或者加热炉中营养液已达到温控仪设定温度, 则加热炉电路断开不再加热, 以节能并保证安全工作温度范围。

2) 加热杀菌工艺控制电路

由温度传感器、温控仪、交流接触器、时间继电器、电磁阀等构成, 结构简单、成本低。为方便操作、便于检查工作中的故障, 所有操作部分设计在同一面板上, 如控制系统的开启和关闭等, 由指示灯显示各工作状态以及对系统各参数的设置。

3 加热消毒机的杀菌性能试验

3.1 材料与方法

3.1.1 试验条件

2005 年 4 月至 9 月在中国农业大学农学与生物技术学院植物病理实验室内采用自行设计的加热消毒机进行试验。供试材料为番茄萎蔫病病原菌 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycoersici*)、黄瓜枯萎病病原菌 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*) 和番茄细菌性青枯病病原菌 (*Pseudomonas solanasearum*)。每个试验设 4 次重复。

3.1.2 杀菌效果的检验

将加热处理后的样品, 稀释为 2 个梯度: 10 和 100 倍, 在盛放固体培养基的培养皿中接种, 在 28℃ 恒温条件下培养 48 h。然后对培养的菌株进行计数, 通过对比热处理前、后病原菌浓度, 来检验、判断热处理的杀菌效果。

3.1.3 试验方案

分别在不同加热温度、不同滞留时间的条件下, 处理含有番茄萎蔫病、黄瓜枯萎病、番茄细菌性青枯病病原菌的营养液。①加热的温度, 有 65℃、75℃和 85℃ 3 个水平; ②滞留时间的长短, 即达到设定的加热温度后, 含菌营养液在此温度下的滞留时间, 有 90、120、150、180 s 4 个水平。

营养液为按照日本山崎配方配制的标准营养液。

$$Dr = (P_1 - P_2) / P_1 \times 100\%$$

式中 Dr ——杀菌率; P_1 ——病原菌原始浓度, cfu/mL; P_2 ——处理后活菌浓度, cfu/mL。

3.2 灭菌结果与分析

3.2.1 番茄萎蔫病原菌

从表 1 可以看出, 在番茄萎蔫病病原菌浓度为 5.1×10^5 cfu/mL 的条件下, 当加热温度为 65℃ 时, 随着营养液滞留时间的增加, 杀菌率呈较快上升趋势: 在滞留时间为 90 s 时, 营养液中病原菌的杀死率不超过 78%; 而当滞留时间达到 180 s, 则营养液中的病原菌的杀死率接近 100%。当加热温度升高到 75℃ (病原菌浓度 4.2×10^5 cfu/mL) 和 85℃ (病原菌浓度 8.3×10^5 cfu/mL) 时, 即使滞留时间为 90 s, 杀菌率也达到了 100%。

可见, 对于番茄萎蔫病原菌, 要达到较好的杀菌效果, 可以采取较低温度 (如 65℃)、较长时间 (如 150 s) 的加热消毒方式, 或者采取较高温度 (75℃或更高)、较短时间 (如 90 s) 的加热消毒方式。

表 1 65℃、75℃、85℃ 热处理对番茄萎蔫病病原菌的杀菌率

Table Sterilization rates of the machine to treat the tomato wilting germs at 65℃, 75℃ and 85℃ %

加热时间/s	65℃	75℃	85℃
90	95.7	100	100
120	98.3	100	100
150	99.6	100	100
180	100	100	100

注: 65℃、75℃、85℃ 热处理时, 病原菌浓度分别为 5.1×10^5 、 4.2×10^5 、 8.3×10^5 cfu/mL。

3.2.2 黄瓜枯萎病原菌

从表 2 可以看出, 同一温度下, 随着时间的延长, 加热消毒机对黄瓜枯萎病病原菌的杀菌率不断提高。如: 加热温度为 65℃ 时, 浓度为 7.5×10^5 cfu/mL 的黄瓜枯萎病菌, 滞留时间由 90 s 分别增加到 120、150 s, 杀菌率由 95.7% 提高到 98.3%、99.6%。另外, 随着加热温度的提高, 达到相同的杀菌率所需要的时间不断减少: 65℃ 的热处理 180 s 才能达到 100% 的杀菌率, 而 75℃ 分别只需要 90 s。

表 2 65℃、75℃、85℃ 热处理对黄瓜枯萎病病原菌的杀菌率

Table 2 Sterilization rates of the machine to treat the cucumber withered germs at 65℃, 75℃ and 85℃ %

加热时间/s	65℃	75℃	85℃
90	95.7	100	100
120	98.3	100	100
150	99.6	100	100
180	100	100	100

注: 65℃、75℃、85℃ 热处理时, 病原菌浓度分别为 7.5×10^5 、 3.9×10^5 、 5.3×10^5 cfu/mL。

对比表 1 和表 2 可以看出, 番茄萎蔫病病原菌、黄瓜枯萎病病原菌虽然都是维管束病害, 但病原菌的耐热能力有差别。在 65℃ 加热温度时, 150 s 的滞留时间可以将黄瓜枯萎病病原菌全部杀死, 但番茄萎蔫病病原菌的杀死率只有 95%, 因此, 营养液中的黄瓜枯萎病病原菌与番茄萎蔫病病原菌相比, 更容易杀灭。

3.2.3 番茄细菌性青枯病病原菌

从表 3 可以看出, 65℃ 的热处理 120 s 就能达到 100% 的杀灭番茄细菌性青枯病病原菌, 说明此病原菌对热的耐受性比较差, 比真菌性病原菌容易杀灭。

表 3 65℃、75℃、85℃ 热处理对番茄细菌性青枯病病原菌的杀菌率

Table 3 Sterilization rates of the machine to treat the tomato bacteria green withered germs at 65℃, 75℃ and 85℃ %

加热时间/s	65℃	75℃	85℃
90	95.2	100	100
120	100	100	100
150	100	100	100
180	100	100	100

注: 65℃、75℃、85℃ 热处理时, 病原菌浓度分别为 4.9×10^5 、 6.3×10^5 、 5.6×10^5 cfu/mL。

综合上述试验可以看出, 在杀灭营养液中的这 3 类病原菌时, 75℃/90s 的杀菌组合, 可以达到 100% 的杀菌率。根据国外同行的研究^[2-5], 在实际生产中, 可以采取 85℃/180s 的杀菌组合, 来满足 100% 的杀菌率, 使营养液达到无菌化。

4 结论与讨论

1) 设计了专用于营养液消毒的加热消毒机。本机主要由水泵、热交换器、电加热炉、滞留罐、电磁阀、流量计、测量与控制系统等组成, 可以自动实现排液流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、加热营养液由室温至 85℃、保温滞留 0~3 min 的任务。

2) 杀菌试验结果表明: 本机对番茄萎蔫病菌、黄瓜枯萎病菌、番茄细菌性青枯病菌都有较好的杀灭效果; 同时性能稳定、可靠。在杀灭营养液中的这三类病原菌时, 75℃/90s 的杀菌组合, 可以达到 100% 的杀菌率。

3) 经加热处理后的营养液成分的变化有待做进一步的检测; 同时对于其他根传病害, 如病毒病害、根结线虫等, 以及其他类型的细菌性、真菌性病害, 需做进一步的研究, 以确定合适的杀菌温度和营养液滞留时间。

[参 考 文 献]

[1] Van Os E A. Design of sustainable hydroponic systems in

relation to environment-friendly disinfection methods [J]. *Acta Horticulturae*, 1988, 548: 341–348.

- [2] Runia W T, Amsing J J. Disinfection of recirculation water from closed cultivation systems by heat treatment [J]. *Acta Horticulturae*, 1988, 548: 215–222.
- [3] Runia W T, Van Os E A, Bollen G J. Disinfection of drainwater from soilless cultures by heat treatment [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1998, 36: 231–238.
- [4] Sportelli G. A boost from the project "Tepore" for soilless culture [J]. *Culture-Protette*, 2002, 31: 47–50.
- [5] Howell W, Eastwell K, Tsc L, et al. Heat treatment, chemo-therapy and hydroponic culture for obtaining virus-free trees of sweet cherry [J]. *Acta Horticulturae*, 2001, 550: 455–457.
- [6] Wohanka W. Disinfection of recirculating nutrient solution by slow sand filtration [J]. *Acta Horticulturae*, 1995, 382: 246–255.
- [7] Van Os E A, Van Kuik F J, Runia W T. Prospects of slow sand filtration to elimination pathogens from recirculating nutrient solutions [J]. *Acta Horticulturae*, 1998, 458: 377–382.
- [8] Van Os E A, Amsing J J, Van Kuik A J. Slow sand filtration: a potential method for the elimination of pathogens and nematodes in recirculating nutrient solutions from glasshouse-grown crops [J]. *Acta Horticulturae*, 1999, 481: 519–525.
- [9] Van Os E A, Postma J, Pettitt T. Microbial optimization in soilless cultivation, a replacement for methyl bromide [J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 635: 47–58.
- [10] Runia W T. Elimination of root-infecting pathogens in recirculation water from closed cultivation systems by Ultra-Violet radiation [J]. *Acta Horticulturae*, 1994, 361: 361–371.
- [11] Runia W T, Boonstra S. UV-oxidation technology for disinfection of recirculation water in protected cultivation [J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 644: 549–555.
- [12] Runia W T. Disinfection of recirculation water from closed cultivation systems with ozone [J]. *Acta Horticulturae*, 1994, 361: 388–402.
- [13] Postma J. Suppressiveness of root pathogens in closed cultivation systems [J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 644: 503–510.
- [14] Postma J, Rattink H. Disease suppressive soilless culture system: characterization of its microflora [J]. *Acta Horticulturae*, 2001, 554: 323–331.
- [15] Runia W T. A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless cultures [J]. *Acta Horticulturae*, 1995, 382: 221–229.

- [16] Tu J C. An integrated control measure for *Phythium* root rot for hydroponically grown greenhouse cucumbers[J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 644: 571– 574.

Design and disinfection performance test of a heating installation for nutrient solution from closed system

Song Weitang^{1,2}, Yuan Xiaoyan¹, Wang Donghua¹, Zhou Ligang³

(1. Key Laboratory in Bioenvironmental Engineering of Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: A heating sterilized machine was designed, which was specially used for disinfection of nutrient solution from closed system. The following tasks were automatically realized: 1 m³/h treatment flow quantity, nutrient solution temperature to be heated up to 85~ 86℃ from circumstance temperature and time of 0~ 3 min to keep water at this high temperature. Tests showed that this machine had better killing effect for tomato wilting germs, cucumber withered germs and tomato bacteria green withered germs. And disinfection performance of this installation was stable and reliable. It was inferred that when the equipment was applied to kill these three pathogens (starting concentration is $3.9 \times 10^5 \sim 8.3 \times 10^5$ cfu/mL) in nutrient solution, 75℃/90s could meet the demand of 100% sterilization rate.

Key words: nutrient solution; heating sterilized machine; disinfection