

引用格式:

张爱琪, 许林云, 金晶, 武玉柱, 樊凯华. 土壤蒸汽消毒机的脉动燃烧器喷管结构及工作特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 92-99.

ZHANG A Q, XU L Y, JIN J, WU Y Z, FAN K H. Structure and working characteristics of pulsating burner nozzle for soil steam sterilizer[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 92-99.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



土壤蒸汽消毒机的脉动燃烧器喷管结构及工作特性

张爱琪¹, 许林云^{1,2*}, 金晶¹, 武玉柱¹, 樊凯华¹

(1.南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037; 2.南京林业大学林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 为解决因连作障碍等引起的设施园艺中土壤病虫害防治问题, 拟开发一种以脉动燃烧器为热动力源的土壤蒸汽消毒机。根据土壤蒸汽消毒机的最小蒸汽量为 100 kg/h, 确定脉动燃烧器的最小功率为 28.2 kW。脉动燃烧器主要由燃烧室与喷管组成, 采用长度为 200、400、800、1 000 mm 的直喷管和 800 mm 的弯喷管, 通过法兰拼接组合成不同长度的直喷管(600、800、1 000、1 400、1 600、1 800、2 200、2 600、2 800、3 000 mm)和弯喷管(800、1 600 mm), 研究不同喷管结构对脉动燃烧器启动性能、工作稳定性能等的影响。结果表明: 喷管长度在 800~2 600 mm 启动; 工作频率与压力振幅呈线性关系, 频率高, 压力幅值大; 同一长度直喷管的燃油消耗率、频率与压力振幅均大于弯喷管的, 且油门开度 2、3、4 时弯喷管燃烧器压力振幅标准差小, 具有更好的稳定性; 喷管长度为 1 800 mm 左右的直喷管脉动燃烧器性能最佳。故选择喷管长度为 1 800 mm 的弯喷管脉动燃烧器作为土壤蒸汽消毒机蒸汽发生装置热源, 既能保证脉动燃烧器的工作特性, 又能促使蒸汽发生装置小型化。

关键词: 脉动燃烧器; 土壤蒸汽消毒机; 喷管结构; 工作稳定性能; 启动特性

中图分类号: S497; TK223.23

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)02-0092-08

Structure and working characteristics of pulsating burner nozzle for soil steam sterilizer

ZHANG Aiqi¹, XU Linyun^{1,2*}, JIN Jing¹, WU Yuzhu¹, FAN Kaihua¹

(1.School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2.Collaborative Innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forestry Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: To address the issue of soil pests and diseases in facility horticulture caused by continuous cropping obstacles and other factors, a soil steam sterilizer powered by a pulse combustor as a heat source was developed in this study. Based on the minimum steam requirement of 100 kg/h for the soil steam sterilizer, the minimum power of the pulse combustor was determined to be 28.2 kW. The pulse combustor mainly consists of a combustion chamber and a nozzle and used straight nozzles of 200, 400, 800, 1 000 mm, as well as an 800 mm bent nozzle. They could be combined via flanges into different lengths of straight nozzles(600, 800, 1 000, 1 400, 1 600, 1 800, 2 200, 2 600, 2 800, 3 000 mm) and bent nozzles (800 and 1 600 mm). The impact of different nozzle structures on the startup performance and operational stability of the pulse combustor was studied. The results showed that nozzles ranging from 800 to 2 600 mm could be activated. Working frequency and pressure amplitude had a linear relationship and higher frequency correlates with higher pressure amplitude. For straight nozzles of the same length, the fuel consumption rate, frequency and pressure amplitude were higher than those of bent nozzles. Under throttle conditions 2, 3, 4, the standard deviation of the pressure amplitude for the bent nozzle

收稿日期: 2023-01-16

修回日期: 2024-04-10

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2020-19)

作者简介: 张爱琪(1998—), 女, 江苏江阴人, 博士研究生, 主要从事植保机械装备与技术研究, zhangaiqi@njfu.edu.cn; *通信作者, 许林云, 博士, 教授, 主要从事植保机械装备与技术研究, lyxu@njfu.edu.cn

combustor was smaller, suggesting its better stability. The straight nozzle pulse combustor with a nozzle length of around 1 800 mm had the best performance. Therefore, selecting the bent nozzle pulse combustor with a nozzle length of 1 800 mm as the heat source for the steam generation unit of the soil steam sterilizer could ensure the operational characteristics of the pulse combustor while also promoting miniaturization of the steam generation unit.

Keywords: pulsating burner; soil steam steriliser; nozzle structure; operational stability performance; starting characteristics

设施园艺在中国迅速发展, 设施栽培中连作、连茬的土地利用方式具有作物高收益性, 但连作、连茬加上设施内高温、高湿的环境条件, 导致土壤中易产生多种病虫害^[1]。目前, 设施作物主要以蔬菜、瓜果为主, 传统化学防治方法防治病虫害^[2-4]不仅对土壤环境有污染, 且易产生较多农残问题, 影响食品安全, 对人体健康造成危害。如果采用蒸汽消毒这种物理消毒^[5-9]方法, 则更为实用、安全、可靠。因设施园艺内部空间小, 地块分散, 如果能设计一种小型移动式土壤蒸汽消毒机, 具有体积小、移动方便、就地消毒等特点, 则较适合于设施园艺的土壤消毒。

脉动燃烧器具有结构简单、燃烧强度高、产热系数高及尾气排放污染小等特点, 可将其作为热动力源构成蒸汽发生装置, 应用于土壤蒸汽消毒。基于脉动燃烧器的土壤蒸汽消毒机的基本原理为将脉动燃烧器完全浸没在水筒体中, 脉动燃烧器产生的热能传递给水, 使水沸腾产生热蒸汽, 再通过蒸汽输送装置将热蒸汽输送至土壤中, 进行消毒作业。脉动燃烧器由燃烧室与喷管组成。脉动燃烧可分为 5 个基本工作过程^[10-12], 即进气、点火燃烧、膨胀排气、进气充填及重新点火燃烧。

国外主要针对脉动燃烧器基于瑞利准则的频率与压力变化特性进行了大量的试验研究与理论分析^[13-15]; 国内主要对应用于病虫害防治的脉冲烟雾机的热动力源即脉动燃烧器进行了声学条件^[16-19]与加热条件^[20-22]、工作稳定性^[23-24]、噪声排放^[25-26]、热力雾化性能等工作特性做了大量研究。这些研究表明, 只有当声学条件与加热条件耦合时, 脉动燃烧器才能持续稳定工作。

目前, 脉动燃烧器的工作原理非常清晰明了, 但脉动燃烧器的许多工作机理尚未清楚。要设计出一种新型脉动燃烧器, 没有明确的理论依据和成熟的理论计算公式或设计原则可参照。针对应用于土壤蒸汽消毒机的脉动燃烧器需进行重新设计, 不仅要使脉动燃烧器能自激自吸、耦合稳定可靠工作,

而且需将脉动燃烧器产生的热能尽可能转化为热量, 实现能量的有效利用。脉动燃烧器结构主要由燃烧室与喷管构成, 燃烧室大小决定了热功率, 喷管长度必然影响着传热量与传热效率。笔者着重研究在满足一定燃烧放热强度基础上, 不同喷管长度与形状的脉动燃烧器的工作特性, 优化脉动燃烧器设计参数, 以期为进一步优化设计适用于设施园艺的土壤蒸汽消毒机提供依据。

1 试验装置与测试系统

1.1 脉动燃烧器结构参数的确定

根据土壤蒸汽消毒机的设计要求, 蒸汽量为 100 ~ 150 kg/h。按最小蒸汽量为 100 kg/h 计算, 则最少需要吸收 73.2 kW h 热量。如果采用单一脉动燃烧器, 则会由过大的燃烧室与过长的喷管构成, 必然使蒸汽发生装置体积过大, 故采用 4 个相同的脉动燃烧器并联组合方式, 每个脉动燃烧器最小功率为 18.3 kW。依据工业蒸汽锅炉的热效率为 65%, 则脉动燃烧器最小功率为 28.2 kW。

燃烧室的燃烧容积由燃烧放热强度决定。脉冲发动机功率为 30 kW; 参照文献[11], 燃烧容积热强度取 2.14×10^4 kW/m³, 根据燃烧容积热强度公式^[11,13]计算出燃烧室容积为 1.4×10^{-3} m³; 参照文献[13], 燃烧室长径比设定为 2 : 1 有利于脉动燃烧器稳定工作, 因而燃烧室内径和长度分别为 95、190 mm。根据预试验结果, 燃烧室壁厚为 1 mm 脉动燃烧器的性能较好, 故将壁厚设为 1 mm。

参照文献[11], 脉动燃烧器喷管直径(d)与燃烧室直径(D)的关系为 $d=0.36D$, 可计算出 d 为 34 mm。

经预试验可知, 喷管长度低于 600 mm, 燃烧器无法启动, 故选择喷管最小长度为 600 mm, 采用长度为 200、400、800、1 000 mm 的喷管进行拼接组合, 最终设定 600、800、1 000、1 400、1 600、1 800、2 200、2 600、2 800、3 000 mm 等 10 种长度的直喷管进行试验。同时, 设定 800、1 600 mm 共 2 个长度的弯喷管, 1 600 mm 弯喷管为 2 个 800

mm 弯喷管拼接而成,如图 1 所示。将相同长度的直喷管和弯喷管的脉动燃烧器工作特性进行对比,验证弯曲后是否产生不利影响。所有不同长度喷管均与同一燃烧室相连,构成各自独立的脉动燃烧器。各喷管相互之间的连接及喷管与燃烧室的连接均采用可拆卸的法兰连接方式。

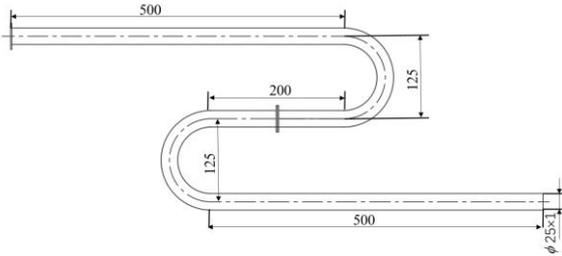
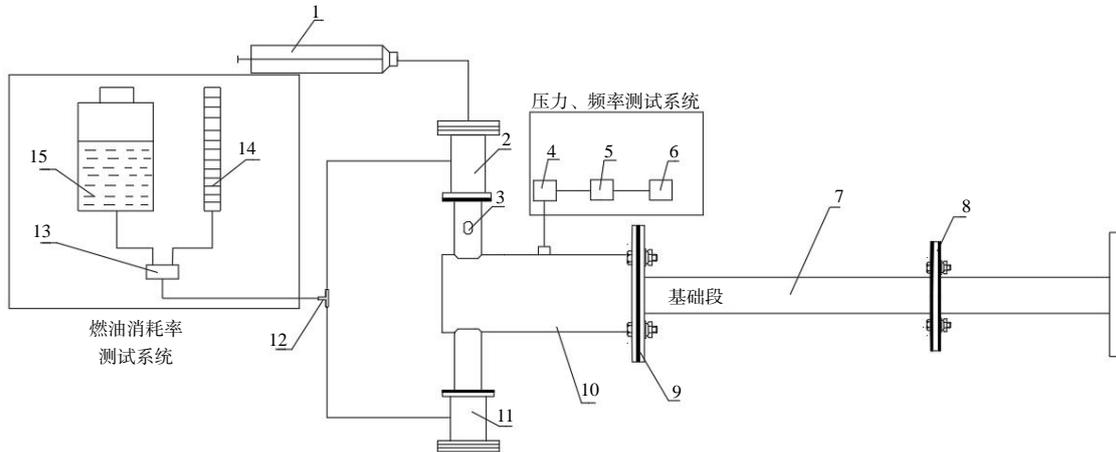


图 1 长度为 1 600 mm 的脉动燃烧器的弯喷管

Fig.1 Bent nozzle for pulsating burner with a length of 1 600 mm

1.2 测试系统

描述脉动燃烧器工作特性的主要参数有压力、频率、燃油消耗率。试验测试系统如图 2 所示,主要包括 2 个测试系统。压力测试系统由压力传感器(PCM300)、数据采集盒(NI-9215)、终端计算机组成。压力传感器位于燃烧室中部壁面上,可测试燃烧室内可燃混合气的脉动燃烧工作过程。燃油消耗率测试系统由滴定管、油箱和二位三通阀组成,用以测量进入化油器的燃油消耗量,同时记录对应的燃油消耗量的时间,可计算得到脉动燃烧器的燃油消耗率。本试验采用 100 mL 的滴定管作为燃油消耗率计量器,完成测试阶段的燃油消耗率测量。非测试阶段则由油箱供油。试验用燃油为 92 号汽油。



1 打气筒; 2 化油器 1; 3 火花塞; 4 压力传感器; 5 数据采集盒; 6 计算机; 7 喷管(基础段与连接段); 8 喷管-喷管法兰; 9 燃烧室-喷管法兰; 10 燃烧室; 11 化油器 2; 12 三通阀; 13 二位三通阀; 14 滴定管; 15 油箱。

图 2 脉动燃烧器的试验系统

Fig.2 Test systems for pulsating burner

油门开度可以通过手动调节化油器油针与油嘴之间的间隙来调节过流面积,实现燃油供应量的调节,如图 3 左图。油针上端的旋钮调节范围为 90°;

将油门调节范围 90°均分为 3 份,即 4 个开度位置,如图 3 右图。油门开度 1 位置为最小油门开度,也是脉动燃烧器的启动开度位置。

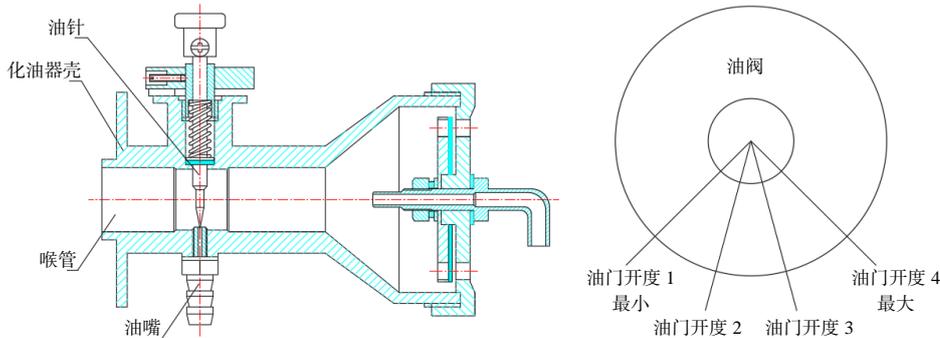


图 3 脉动燃烧器的化油器及油门开度设定

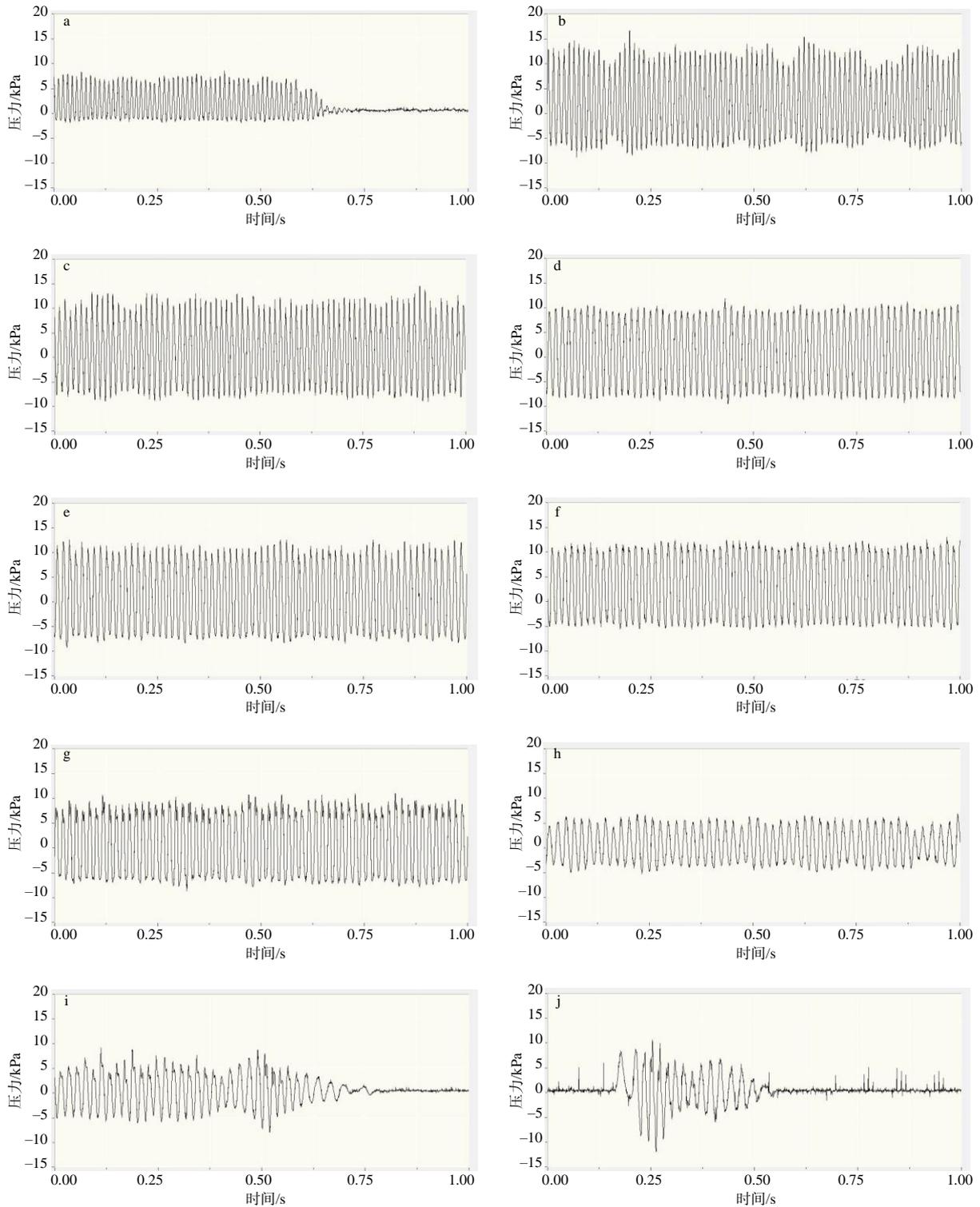
Fig.3 Carburettor and throttle opening setting for pulsating burner

2 结果与分析

2.1 脉动燃烧器的启动特性

从压力传感器采集到的燃烧室内气流压力信

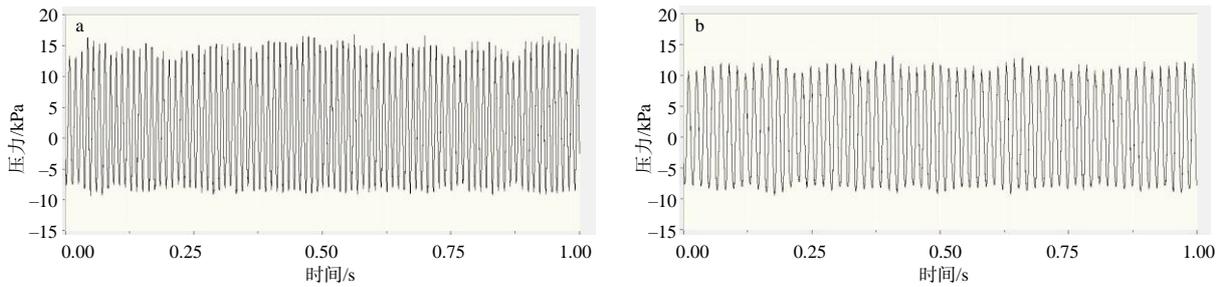
号中截取 1 s 时长，信号起始点均为人工打气启动完成时刻点，直喷管和弯喷管的压力波形分布如图 4 和图 5 所示。



a-j 的直喷管长度分别为 600、800、1000、1400、1600、1800、2200、2600、2800、3000 mm。

图 4 直喷管脉动燃烧器燃烧室内的压力波形

Fig.4 Pressure waveform in the combustion chamber of straight nozzles pulsating burner



a、b的弯喷管长度分别为800、1600 mm。

图5 弯喷管脉动燃烧器燃烧室内的压力波形

Fig.5 Pressure waveform in the combustion chamber of bent nozzles pulsating burner

当脉动燃烧器直喷管长度为600 mm时极难启动,有时在打气时脉动燃烧器能发出不连续的燃烧工作声音,一旦停止打气,脉动燃烧器无法自激自吸工作,处于熄火停机状态,偶尔能够启动,但只运行几秒就会自动熄火,图4-a为其中某次能手动启动后的压力波形图;当直喷管长度为800~2600 mm时,脉动燃烧器均较易启动,启动后也易形成稳定的振荡关系,如图4-b至图4-h所示;当喷管长度为2800 mm时,脉动燃烧器可以启动,但发出的声音低沉,频率相对较低(图4-i),无法持续稳定工作,很容易熄火;当喷管长度为3000 mm时完全无法启动,图4-j为其中一次打气过程对应的

燃烧室内压力波动信号,只有打气时才有压力信号,一旦停止打气,压力信号就归于零。可见,喷管太短或太长均不能正常启动或稳定工作,长度为800~2600 mm的直喷管脉动燃烧器启动性能较好。长度为800、1600 mm的弯喷管脉动燃烧器均易启动,且声音均匀有力,运行平稳,如图5所示。选择可稳定工作的800~2600 mm的直喷管及800、1600 mm的弯喷管的脉动燃烧器进行后续试验。

2.2 脉动燃烧器的稳定工作特性

取10个周期的燃烧室内气流压力信号,对压力均值、压力振幅进行平均处理,结果列于表1。

表1 脉动燃烧器的工作特性参数

Table 1 Pulsating burner operating characteristics parameters

喷管类型	喷管长度/mm	油门开度	燃油消耗率/(kg h ⁻¹)	压力均值/kPa	压力振幅/kPa	频率/Hz
直喷管	800	1	1.40	1.87	12.95±0.91	90.0
		2	1.58	1.89	13.97±1.09	97.7
		3	1.93	1.98	14.51±1.96	98.7
		4	2.01	1.99	14.61±1.37	102.8
	1000	1	1.32	1.33	12.81±1.02	80.1
		2	1.83	1.56	13.02±1.09	85.9
		3	1.93	1.60	13.41±1.07	86.9
		4	2.06	1.78	14.00±1.58	87.9
	1400	1	1.14	0.79	11.94±0.63	70.3
		2	1.66	0.89	12.63±0.86	72.2
		3	1.84	0.96	13.10±1.00	73.9
		4	2.37	1.01	13.91±0.93	74.1
	1600	1	1.23	0.78	11.48±0.59	63.5
		2	1.66	0.89	12.29±0.82	69.3
		3	2.10	0.99	12.34±1.01	71.3
		4	2.19	1.24	13.04±1.00	72.3
1800	1	1.10	0.70	11.30±0.64	60.4	
	2	1.31	0.81	12.17±0.62	62.3	
	3	1.85	0.90	12.99±0.93	63.4	
	4	2.36	0.94	13.66±0.87	64.3	

表 1(续)

喷管类型	喷管长度/mm	油门开度	燃油消耗率/(kg h ⁻¹)	压力均值/kPa	压力振幅/kPa	频率/Hz
直喷管	2 200	1	1.08	0.52	11.20±0.93	55.5
		2	1.49	0.73	12.12±0.94	57.4
		3	1.66	0.83	12.86±1.01	58.4
		4	1.80	0.90	13.23±1.36	60.7
	2 600	1	1.01	0.42	10.34±0.97	50.7
		2	1.27	0.47	11.36±0.94	51.6
		3	1.36	0.48	11.44±0.95	52.6
		4	1.66	0.50	11.52±0.99	53.6
弯喷管	800	1	1.31	1.46	11.46±1.31	87.9
		2	1.45	1.50	12.95±0.85	93.7
		3	1.75	1.53	13.26±0.94	95.7
		4	1.93	1.68	14.11±1.37	96.8
	1 600	1	1.14	0.84	10.25±0.86	61.5
		2	1.84	0.93	10.50±0.62	65.3
		3	2.01	1.21	11.01±0.85	68.3
		4	2.19	1.38	11.28±0.90	70.3

2.2.1 燃油消耗率

由表 1 可知,对于同一长度喷管的脉动燃烧器,随着油门开度的增大,燃油消耗率均呈线性增长趋势;喷管长度为 1 800 mm 脉动燃烧器最大与最小燃油消耗率之间差值最大,可调节范围最大。经线性回归分析,得各型号喷管燃油消耗率拟合方程列于表 2,式中, y 为燃油消耗率, x 为油门开度。除 1 000 mm 直喷管与 1 600 mm 弯喷管的拟合优度 (R^2)较低(分别为 0.86、0.87)外,其他喷管的 R^2 均大于等于 0.93。根据拟合方程斜率可知,不同喷管长度的燃油消耗率与油门开度的线性增长率差异较大,最短(800 mm)与最长(2 600 mm)喷管的斜率均较小,只有 0.218、0.204,而 1 800 mm 喷管的斜率

(0.432)为最小斜率的 2.12 倍。同样长度的弯喷管与直喷管具有较一致的拟合直线关系,其中长度 1 600 mm 直喷管与弯喷管的拟合曲线一致,说明将直管处理成弯管后对燃油消耗率的影响非常小。

2.2.2 压力特性

基于脉动燃烧器工作原理,理论上燃烧室内压力应为简谐信号,而实际信号不完全符合,且不同长度喷管下压力信号存在较大差异。

压力幅值上下波动的中心线对应的值即为压力均值。从表 1 可知:压力均值均为正偏值,燃烧室内气流压力波动时并不是以大气压力 0 值为均值进行正负压力交替脉动,而是以一定的正压力值为脉动中心,因均值均为正值,负压时长均略短于正压时长,负压下打开阀门并吸入燃料的时长较短;喷管长度越长,均值偏离大气压 0 值越小,而油门开度越大,均值偏离大气压 0 值越大,其中最大与最小压力均值分别为 1.99、0.42 kPa,分别对应直喷管长 800 mm 油门开度 4 及喷管长 2 600 mm 油门开度 1 的状况。

压力振幅体现了脉动燃烧器的强度。从表 1 可知:喷管长度对燃烧室压力振幅影响较大,喷管长度越长,则压力振幅越小,且直喷管比弯喷管幅值大;压力幅值与油门开度之间基本呈线性关系,压力振幅随着油门开度的增大而线性增大,只不过增长幅度较小;弯喷管脉动燃烧器燃烧室内的压力振幅于

表 2 脉动燃烧器的燃油消耗率与油门开度的拟合方程和拟合优度

Table 2 Fitting equations and goodness of fit of fuel consumption rate to throttle opening for pulsating burner

喷管类型	喷管长度/mm	拟合方程	R^2
直喷管	800	$y=0.218x+1.185$	0.95
	1 000	$y=0.232x+1.205$	0.86
	1 400	$y=0.387x+0.785$	0.97
	1 600	$y=0.332x+0.965$	0.94
	1 800	$y=0.432x+0.575$	0.97
	2 200	$y=0.233x+0.925$	0.93
弯喷管	2 600	$y=0.204x+0.815$	0.97
	800	$y=0.216x+1.070$	0.98
	1 600	$y=0.332x+0.965$	0.87

各油门开度下均稍小于直喷管脉动燃烧器,且增长趋势几乎一致,长度为800、1600 mm的直喷管的平均压力振幅比对应相同长度弯喷管的分别大8.4%、13.7%。

压力信号振幅的波动幅度可说明压力信号的稳定性程度,可用振幅的标准偏差衡量脉动燃烧的稳定性程度。由表1中压力振幅标准偏差可以看出:同种喷管长度,大油门开度(油门开度3、4)下压力振幅标准差大,压力振幅波动较大,脉动燃烧稳定性变差;同种油门开度,直喷管1800 mm脉动燃烧器的压力振幅标准偏差最小,直喷管1400 mm与1600 mm压力振幅标准偏差也较小,说明喷管长度不宜太短或太长,否则会影响其运行稳定性,选取合适的喷管长度对单喷管脉动燃烧器的运行稳定性至关重要;同种油门开度(油门开度1除外)下,弯喷管脉动燃烧器的振幅标准偏差小于直喷管脉动燃烧器的,即弯喷管脉动燃烧器运行较直喷管脉动燃烧器稳定,且弯喷管燃烧器能较好地利用空间,在增加接触传热面积的同时,能使蒸汽发生装置结构尽可能紧凑,减小土壤蒸汽消毒机体积。

2.2.3 频率特性

频率主要受脉动燃烧器的结构影响,通过对压力测试系统测得的压力信号进行频谱分析,得到脉动燃烧器的工作频率,列于表1。由表1可知:在同一油门开度下,燃烧器的工作频率均随着喷管长度的增加而减小,喷管长度为2600 mm燃烧器的工作频率约为长度800 mm燃烧器频率的一半;在同一喷管长度下,工作频率随油门开度的增加而增加,但是增加的幅度不大;在相同油门开度和喷管长度条件下,弯喷管脉动燃烧器的工作频率都略小于直喷管的,说明喷管形状对工作频率有一定的影响。可能是由于弯喷管相对于直喷管而言,喷管热气流阻力增加,热燃气向喷管出口排出的时间增加,使脉动燃烧器的工作周期增加,从而导致工作频率减小。

由表1还可知,脉动燃烧器工作频率和压力振幅均与油门开度呈线性关系,频率与压力幅值亦呈线性关系,频率高,压力幅值大;同一油门开度下,800 mm直喷管、800 mm弯喷管、1600 mm直喷管、1600 mm弯喷管的工作频率和压力幅值均依次减小。从表2和表3可知,800 mm喷管脉动燃烧器的

压力振幅与工作频率随油门开度变化的变化率较1600 mm的大,而燃油消耗率的变化率却较1600 mm的小,故喷管长为800 mm的燃烧器的性能较1600 mm的差;1600 mm弯喷管燃烧器的燃油消耗率随油门开度变化的变化率与1600 mm直喷管的一致,压力振幅随着油门开度变化的变化率差距也较小。

表3 工作频率和压力振幅与油门开度的拟合斜率

Table 3 Slope of the fit of operating frequency and pressure amplitude to throttle opening

喷管类型	喷管长度/mm	工作频率拟合斜率	压力振幅拟合斜率
弯喷管	800	2.87	0.826
直喷管	800	3.94	0.552
弯喷管	1600	2.94	0.360
直喷管	1600	2.84	0.473

3 结论

本研究中,对脉冲发动机功率为30 kW、喷管长度为600~3000 mm的直喷管和长度为800、1600 mm的弯喷管的脉动燃烧器的4种油门开度下的启动特性与稳定特性进行了试验研究,结论如下。

1) 喷管长度对脉动燃烧器启动性能有较大影响,喷管太短或太长均不能正常启动、稳定运行,对于直喷管脉动燃烧器,喷管长度为800~2600 mm时启动性能较好。

2) 同一长度下,弯喷管燃烧器的燃油消耗率、工作频率与压力振幅均小于直喷管燃烧器的,但燃油消耗率差异不大;且油门开度2、3、4工况下弯喷管燃烧器压力振幅标准差小,具有更好的稳定性。弯喷管燃烧器能较好地利用空间,在增加接触传热面积的同时,能使蒸汽发生装置结构尽可能紧凑,减小土壤蒸汽消毒机体积。

3) 对直喷管脉动燃烧器研究后发现,喷管长度为1800 mm脉动燃烧器最大与最小燃油消耗率之间差值最大,可调节范围最大,运行最稳定。

综上,喷管长度为1800 mm左右的直喷管脉动燃烧器性能最佳;同一长度下,弯喷管燃烧器的燃油消耗率、工作频率与压力振幅均小于直喷管燃烧器的,且弯喷管燃烧器具有更好的稳定性及能较好地利用空间。故选择喷管长度为1800 mm左右的弯喷管脉动燃烧器作为土壤蒸汽消毒机蒸汽发

生装置热源, 既能够保证脉动燃烧器的工作特性, 又能够减小蒸汽发生装置的体积, 使蒸汽发生装置小型化。

参考文献:

- [1] 陈元生. 设施园艺土壤消毒技术措施探讨[J]. 现代园艺, 2010(1): 21–22.
- [2] RU Y, LIU Y Y, QU R J, et al. Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(6): 1–6.
- [3] 代祥, 徐幼林, 陈骏阳, 等. 射流混药器改进提高混药均匀性及动态浓度一致性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 65–74.
- [4] 董福龙, 周宏平, 施明宏, 等. 对冲喷头设计与雾化试验[J]. 林业科学, 2019, 55(1): 81–88.
- [5] 曹焯程, 方文生, 李园, 等. 我国土壤熏蒸消毒 60 年回顾[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 325–335.
- [6] 宋彦. 间歇式三七土壤蒸汽消毒机的设计与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [7] 汪小岳, 李成光, 杨振杰, 等. 移动式土壤旋耕蒸汽消毒机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 18–24.
- [8] 许永福. 刺罩式土壤蒸汽除草消毒装置设计及试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [9] 潘四普, 周宏平, 蒋雪松, 等. 基于脉动燃烧技术的土壤消毒蒸汽发生装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 301–307.
- [10] 崔峰, 杨德勇, 宫英振, 等. 80 kW 脉动燃烧器及其测试系统的设计[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 127–131.
- [11] 余兵, 许林云, 陈青, 等. 双尾管脉冲发动机的工作特性[J]. 林业工程学报, 2021, 6(1): 127–135.
- [12] 李保国, 洪新华. Helmholtz 型脉动燃烧器的研制[J]. 郑州工程学院学报, 2001, 22(2): 47–49.
- [13] 程显辰. 脉动燃烧[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [14] 吴云飞, 邓凯, 沈忠良, 等. 脉动燃烧技术进展[J]. 轻工机械, 2013, 31(1): 106–110.
- [15] 沈海涛. 脉动喷气式发动机数值模拟及试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [16] KILICARSLAN A. Frequency evaluation of a gas-fired pulse combustor[J]. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(5): 439–454.
- [17] KILICARSLAN A, ARISOY A. Acoustic analysis of a liquefied petroleum gas-fired pulse combustor[J]. *Applied Acoustics*, 2008, 69(9): 770–777.
- [18] 周宏平, 许林云, 茹煜, 等. 燃烧室柱部直径对脉动发动机工作特性的影响研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 477–482.
- [19] 蒋雪松, 周杰, 许林云, 等. 脉冲式烟雾水雾机工作频率影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 85–91.
- [20] ZHAI M, GUO L, WANG Z, et al. Ignition process in a Helmholtz-type valveless self-excited pulse combustor[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 88: 187–193.
- [21] 潘四普, 周宏平, 蒋雪松, 等. 油门开度对 Helmholtz 型脉动燃烧器温升特性影响的模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 70–77.
- [22] LIU T Y, LI J X, ZHU S S, et al. Determination of the heat conduction transfer function within the thermoacoustic instability limit cycle in a Rijke tube[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118084.
- [23] 徐艳英, 董芑, 翟明, 等. 亥姆霍兹型无阀自激脉动燃烧器频率特性(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 26–31.
- [24] MAQBOOL D, CADOU C P. Acoustic analysis of valveless pulsejet engines[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 33(1): 62–70.
- [25] 徐艳英, 翟明, 董芑, 等. 弯尾管 Helmholtz 型无阀自激脉动燃烧器 NO_x 排放特性[J]. 热力发电, 2015, 44(2): 18–23.
- [26] OKTAV A, YILMAZ C, ANLAS G. The Helmholtz resonator effect of the trunk cavity in the acoustic response of a Sedan[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2017.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正