

引用本文格式 何龙, 佟灵茹, 潘江如, 等. 尾气回收式烟雾机雾化影响因素及能量回收试验[J]. 农业工程, 2023, 13(3): 14-19. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.03.003. HE Long, TONG Lingru, PAN Jiangru, et al. Factors affecting atomization of exhaust gas recovery type smoke machine and energy recovery test[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(3): 14-19.

尾气回收式烟雾机雾化影响因素及能量回收试验

何 龙, 佟灵茹, 潘江如, 谷 峥

(新疆工程学院机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830027)

摘要: 基于YN系列38CRD2型柴油发动机, 在排气管加装尾气回收式烟雾机进行负荷特性试验, 研究发动机转速、喷头流量和烟雾剂浓度变化对烟雾机雾化效果的影响, 通过排气管前后端温度变化及加装烟雾机前后油耗变化得到尾气能量回收效率。试验结果表明, 发动机转速在2400 r/min时, 雾滴颗粒粒径最佳; 在定发动机转速工况下, 烟雾剂浓度为30%时, 雾滴颗粒粒径最佳; 喷头流量为7.5 L/min时喷头雾化较优。安装烟雾机后, 发动机转速在2200~2400 r/min时, 发动机工作稳定且烟雾机雾滴颗粒粒径均匀; 通过采集发动机排气管前后端温度数据计算出尾气回收再利用率为11%, 即多利用88 g柴油, 提高了燃油利用效率, 实现节能减排。该研究为农业机械的多功能开发提供了新的方向。

关键词: 尾气回收; 烟雾机; 能量回收效率; 雾滴颗粒粒径; 发动机; 负荷特性; 燃油经济性

中图分类号: S220 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2023)03-0014-06

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.03.003

Factors Affecting Atomization of Exhaust Gas Recovery Type Smoke Machine and Energy Recovery Test

HE Long, TONG Lingru, PAN Jiangru, GU Zheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang 830027, China)

Abstract: Load characteristic tests were conducted by installing an exhaust gas recovery smoke engine in exhaust pipe based on a YN series 38CRD2 diesel engine. Influence of engine speed, nozzle flow rate and aerosol concentration changes on atomization effect of smoke machine were studied. Exhaust energy recovery efficiency was obtained by changing temperature at the front and rear ends of exhaust pipe and fuel consumption before and after installing smoke machine. Test results indicated that when engine speed was 2400 r/min, droplet size was the best. Under constant engine speed conditions, when concentration of smoke agent was 30%, droplet size was the best. When nozzle flow rate was 7.5 L/min, nozzle atomization was better. After installing smoke machine, when engine speed was between 2200 to 2400 r/min, engine operated stably and droplet size of smoke machine was uniform. By collecting temperature data from front and rear ends of engine exhaust pipes, it was calculated that exhaust gas recovery and reuse rate was 11%, which meant that 88 g diesel fuel was used more frequently. Fuel utilization efficiency was improved and energy saving and emission reduction was achieved. It provided a new direction for multifunctional development of agricultural machinery.

Keywords: exhaust gas recovery, smoke machine, energy recovery efficiency, droplet size, engine, load characteristic, fuel economy

0 引言

目前, 内燃机普遍存在燃料转化效率低、环境污染严重等问题, 而且燃油是不可再生能源, 柴油发动机的转换效率只有28%~37%, 燃料能量有40%左右被废气散失^[1]。因此, 内燃机余热、余压回收技术领域得到广泛的关注与研究, 众多科研人员都在为节能

减排、提升总能效率做努力。本研究以YN系列38CRD2型4冲程柴油发动机为研究对象, 在发动机排气管加装尾气回收式烟雾机, 使烟雾机与发动机相结合成为一个整体, 发动机作为动力源, 烟雾机作为工作机, 利用发动机排气管尾气的热量和压力使烟雾机达到雾化的目的。对发动机转速、烟雾剂浓度、喷头流量选定和尾气能量回收效率进行了试验验证, 研究

收稿日期: 2022-10-09 修回日期: 2023-02-07

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01B20)

作者简介: 何龙, 硕士生, 主要从事农业机械研究 E-mail: 1135980740@qq.com

在线投稿
www.d1ae.com

结果可为减少农机作业中碳排放、提高燃料转化效率提供新的思路。

1 试验材料与方法

1.1 试验仪器和试验材料

基于YN系列38CRD2型柴油发动机台架进行试验，在其排气管加装尾气回收式烟雾机，利用发动机排气管尾气的热量和压力来实现烟雾机发烟雾化，试验布置如图1所示。主要试验装置与测试仪器参数如表1所示^[2]。对于雾化评价方式采用雾滴测试卡（A6）及雾滴分析软件（WJL-602）进行采样分析。



1. 药箱 2. ET-4500型智能油耗仪 3. YN38CRD2型柴油发动机
4. DWD160型电涡流测功机 5. 温度传感器 6. 喷头
7. 尾气能量回收式烟雾机

图1 尾气回收式烟雾机试验台

Fig. 1 Test-bed of exhaust gas recovery type smoke machine

1.2 试验方法

在原有发动机排气管道上加装一台烟雾机，在固定喷头安装位置和喷头型号的条件下，研究发动机转速、烟雾剂浓度及喷头流量的变化对尾气回收式烟雾机雾化效果的影响，通过排气管前后端温度变化及加装烟雾机前后油耗变化得到尾气能量的回收效率。加装的烟雾机喷药装置结构如图2所示，试验方法如下。

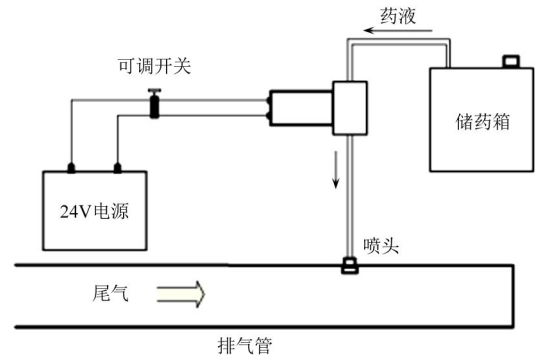


图2 烟雾机喷药装置结构

Fig. 2 Spraying device structure of smoke machine

(1) 将发动机以200 r/min的递增速度由2000 r/min提升至2800 r/min，做负荷特性试验^[3]。用雾滴测试卡收集样本分析数据，找到尾气回收式烟雾机的最佳发烟工况，然后选择5个烟雾剂浓度（10%、20%、30%、40%、50%）进行试验并采集样本密封留存，以备后期软件处理^[4]。喷头流量选择的原则是与发动机尾气中的余热、余压相匹配，避免药物浪费，试验采用数显PWM控制供药泵，设置4个不同的工作电压（6、12、18和24V）控制喷头流量，进行样本采样。发动机转速、烟雾剂浓度和喷头流量作为尾气回收式烟雾机雾化的影响因素，通过试验筛选出最佳的3个数值，目的是提升作业雾化效果、减少环境污染和提高农药利用率^[5]。

(2) 对于尾气回收式烟雾机的能量回收情况，从两个方面进行试验研究。①发动机的燃油经济性试验。在发动机台架上做两次负荷特性试验，先通过测控仪控制台收集发动机没有加装烟雾机时的油耗，再收集加装烟雾机后的油耗，两组数据进行对比，研究发动机单位燃料的变化情况。②发动机排气管的余热变化试验。在发动机排气管前端与排气管末端安装尾气温度传感器，温度采集是在改变发动机工况的情况下进行的，通过判断排气管前后端温度差来判断尾气余热

表1 试验装置与测试仪器参数

Tab. 1 Parameters of test equipment and instrument

名称	规格型号	参数
柴油发动机	YN系列38CRD2型	额定功率85 kW，额定转速3000 r/min，外形尺寸895 mm×622 mm×745 mm，净质量240 kg，排量3.7 L/min
电涡流测功机	DWD160型	额定功率160 kW，额定扭矩600 N·m，额定转速6000 r/min
智能油耗仪	ET-4500型	测量精度0.2%F.S，测量时间2~50 s，被测发动机功率范围2~500 kW
测控仪控制台	ET2100型	
尾气温度传感器	K型探头式热电偶	测量范围0~1000 °C，丝径18 mm，供电电压220 V，输出电流0.25 mA
供药泵	普兰迪微型直流隔膜水泵	供电电压24 V
稳压电源	TPR3005T	输入电压220 V，输出电压0~30 V，输出电流0~5 A，输出功率150 W
数显电调		
45°七眼喷头		最大流量2.7 L/min，喷洒直径2~5 m
烟雾剂	水性溶剂	试验测得发烟临界温度为(125±1) °C

的回收转化情况^[6]。

(3) 烟雾雾化效果依据雾滴颗粒粒径的体积中值直径 VMD 值、数值中值直径 NMD 值及均匀度 DR 值指标来评判。通过雾滴分析软件对样本的分析取值, 选取颗粒粒径范围在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 的 VMD 值与 NMD 值, 因为 $<20\ \mu\text{m}$ 的雾滴颗粒会漂浮在空气中, 很难下沉到作物标靶上, 雾滴颗粒粒径太大会造成雾滴连片、药液浪费和药物残留多等问题。 DR 值代表喷洒的雾滴颗粒是否均匀, 一般为 $0.67\sim 1.00$, 越接近 1 说明雾滴颗粒越均匀, <0.67 可能会出现雾滴不均匀造成漏打、雾滴覆盖密度不足的现象, 因此要找到最佳的发动机转速、烟雾剂浓度、喷头流量和尾气能量回收效率情况, 通过 VMD 值、 NMD 值和 DR 值 3 个数值进行交叉对比筛选出最优组合。

2 尾气回收式烟雾机雾化影响因素

2.1 发动机转速对雾化效果的影响

尾气回收式烟雾机是利用发动机尾气的热量及压力进行发烟, 不同工况的发动机, 其尾气能量回收程度不同。对发动机进行负荷特性试验, 通过雾滴测试卡采集的数值研究尾气回收式烟雾机发烟效果, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 雾滴颗粒直径和发动机转速成正比关系, 转速越大, 雾滴颗粒直径越大, 造成这一现象的原因是当增加发动机转速时, 排气量增加, 尾气温度和压力也随之增大, 排气管内气体雷诺数增大, 紊流激烈, 使烟雾剂破碎, 因此雾化程度和药剂颗粒数也会越来越明显^[7]。发动机转速在 $2000\sim 2800\ \text{r/min}$ 时, 发动机尾气排出的余热、余压都可以使烟雾机发烟。

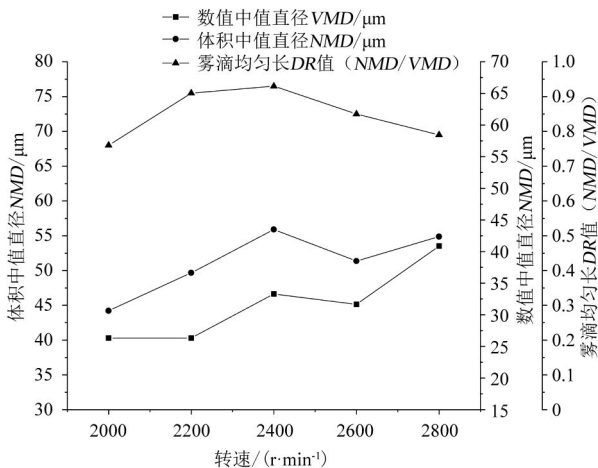


图 3 发动机不同转速下尾气回收式烟雾机 VMD 、 NMD 和 DR 值

Fig. 3 VMD , NMD and DR values of exhaust gas recovery type smoke machine under different engine speeds

当发动机转速为 $2600\ \text{r/min}$ 时, 雾滴颗粒直径出现下降的趋势, 之后又出现上升的趋势。出现这种情况的原因: 一是烟雾剂喷入排气管, 与排气管中的尾气碰撞摩擦, 造成排气减少、排气背压增大, 同时发动机的充气效率下降、氧气含量减少, 导致燃油燃烧不充分, 输出功率降低, 使数值中值直径呈现减小的趋势; 二是测量数据的误差^[8]。

当发动机转速为 $2800\ \text{r/min}$ 时, VMD 值 $>50\ \mu\text{m}$, 其值为 $53.32\ \mu\text{m}$, 原因是发动机转速过快, 流速过大, 发动机排气管中的能量来不及被回收就直接排出管外, 导致发动机转速达到 $2800\ \text{r/min}$ 时, VMD 值超出 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径范围。说明此时雾滴粒径较大, 会造成雾滴连片、药液浪费、药物残留多及防治效果不佳等问题。

发动机转速在 $2000\sim 2800\ \text{r/min}$ 时, DR 值分别为 0.76 、 0.91 、 0.93 、 0.85 和 0.79 , DR 值都在 $0.67\sim 1.00$ 范围内, 说明尾气回收式烟雾机在正常运行时都有较好的均匀度且 DR 值都较高。其中发动机转速 $2400\ \text{r/min}$ 时, VMD 值与 NMD 值分别为 46.63 、 $43.5\ \mu\text{m}$, 均在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径范围内, DR 值为 0.93 , 最接近于 1, 在雾化体系的评价指标中属较高的均匀值。因此, 发动机转速在 $2400\ \text{r/min}$ 的工况下, 尾气回收式烟雾机的雾滴颗粒粒径最佳。

2.2 烟雾剂浓度对雾化效果的影响

烟雾机通过烟雾剂雾化的方式使药液悬浮在农作物周围, 减少喷洒不均匀、漏喷的情况, 烟雾剂雾化情况的好坏直接影响施药效果。结合试验条件, 选用水性溶解剂作为烟雾载体, 其主要以水为介质, 有较好的发烟效果及扩散性和附着性, 而且成本较低、药效持久性好, 应用范围较广。

一般情况下, 烟雾剂浓度与尾气回收式烟雾机的发烟量成正比, 但不能说明发烟量越大防治效果就越好。防治效果不仅需要发烟量的指标判定, 还需要雾滴颗粒的指标来评定, 以此选择较优的烟雾剂浓度。在固定发动机转速为 $2400\ \text{r/min}$ 条件下, 选取 5 个烟雾剂浓度, 分别设为 10% 、 20% 、 30% 、 40% 和 50% 进行试验, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 不同的烟雾剂浓度都可以使尾气回收式烟雾机发烟, 烟雾剂浓度在 $10\%\sim 40\%$ 时, 雾滴颗粒直径呈增大的趋势。这是因为发动机工况在 $2400\ \text{r/min}$ 时, 发动机排气管的温度远高于烟雾剂的临界温度, 随着烟雾剂浓度的增加, 发烟量也随之增加。烟雾剂浓度在 $10\%\sim 30\%$ 时, VMD 值与 NMD 值均在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径范围内, 而且 DR 值分别达到 0.92 、 0.91 、 0.93 , 说明发动机工况在 $2400\ \text{r/min}$ 时, 烟雾剂浓度调整至 $10\%\sim 30\%$ 范围内效果最佳, 可以达到较

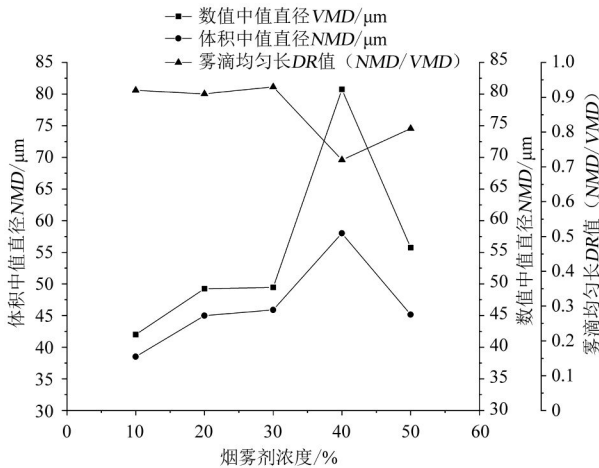


图4 不同烟雾剂浓度下尾气回收式烟雾机VMD、NMD和DR值

Fig. 4 VMD, NMD and DR values of exhaust gas recovery type smoke machine under different aerosol concentration

好的发烟效果，因此机器作业时烟雾剂的浓度可在此范围内适当进行调整选择。

当烟雾剂浓度为30%时，雾滴DR值达到0.93，DR值最接近于1，表明烟雾剂浓度为30%时最均匀，因此选择烟雾剂浓度为30%^[9]。烟雾剂浓度为40%时，VMD值与NMD值上升到80.75和58.01 μm ，造成这一现象的原因是，40%浓度的烟雾剂发烟吸收的热量大于发动机排气管产生的热量，在烟雾剂喷射出的一刹那产生了大量的烟，使VMD值不在最佳粒径范围20~50 μm ，因此也验证了发烟量大小并不能直接决定防治效果好坏的判断。烟雾剂浓度达到50%时，VMD值与NMD值呈下降趋势，这是因为发动机排气管中的能量不足以供给烟雾剂全部反应，导致烟雾剂直接被排出管外，雾滴颗粒粒径下降。因此，烟雾剂浓度为40%~50%时，造成雾滴颗粒粒径突然上升后又下降的原因是发动机排气管的能量与烟雾剂浓度不匹配，烟雾剂浓度过大。

2.3 喷头流量对雾化效果的影响

为使尾气回收式烟雾机达到最佳的发烟效果，同时避免药物浪费、提升化学防治效果，在获得发动机最佳工况与烟雾剂浓度的情况下，还需试验获取最佳的喷头流量。采用数显PWM直流电机调速器调整工作电压以控制喷头流量，试验发现喷头流量与雾滴粒径呈正相关关系，表明喷头流量会对雾滴颗粒粒径产生直接影响，不同喷头流量下烟雾机的VMD、NMD和DR值如图5所示。

由图5可知，工作电压为6~12 V时，VMD值与NMD值均在20~50 μm 粒径范围内，DR值分别为0.64、0.74，说明虽然工作电压在这个范围内可以正常发烟，但是雾滴均匀度相对不理想，会造成漏打、雾

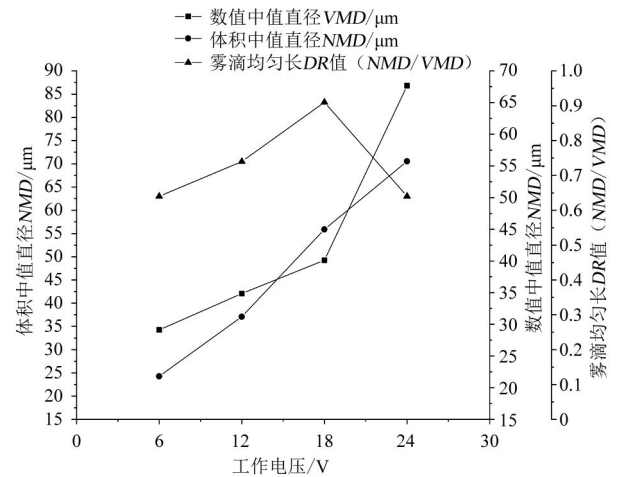


图5 不同喷头流量下尾气回收式烟雾机VMD、NMD和DR值
Fig. 5 VMD, NMD and DR values of exhaust gas recovery type smoke machine under different nozzle flow rate

滴覆盖密度不足的现象。当工作电压增加到18 V时，VMD值与NMD值分别为49.25和44.99 μm ，DR值达到0.91，最接近于1，表明工作电压为18 V时的喷头流量雾化最均匀，喷头流量为7.5 L/min，相较于其他喷头流量发烟效果最好，因此推荐烟雾机喷头流量为7.5 L/min。工作电压为24 V时的喷头流量不建议采用，这是因为发动机排气管余热不足以提供足够的热量，而且喷管直径相对固定，没有足够的压力把喷头流量全部压缩喷出，导致出现VMD值突然上升至86.81 μm ，超出50 μm 粒径范围，雾滴颗粒粒径过大，引发雾滴连片、药液浪费和药物残留增多等问题。

3 发动机尾气能量回收效率

发动机在运行过程中，大部分的能量通过冷却系统、润滑系统及排气散失到大气中，只有少部分的燃料燃烧能量转化为有用功，在造成能源浪费的同时，对大气环境也产生了严重污染^[10]。一般柴油发动机的转换效率为28%~37%，40%左右的燃料能量被废气散失。因此，加装烟雾机通过发动机排气管热量及压力实现二次雾化的同时增加柴油发动机的单位燃料可用功，提高燃料利用率以达到节能减排的效果。本研究用尾气温度传感器、智能油耗仪及测控仪控制台做负荷特性试验，对排气管余热回收及燃油经济性进行评价。

3.1 发动机燃油经济性

发动机燃油油耗与发动机工况变化关系如图6所示。可以看出，油耗与发动机转速成正相关关系，转速增加，油耗增加。加装烟雾机后，相同转速下，油耗虽保持上升趋势，但增幅为2.552%~3.882%，增幅较小。油耗增加是因为加装的烟雾机相当于外挂负载，烟雾机在没有附加动力源的情况下实现发烟，增加了发动机单位燃料的可用功，所以不能单一证明油耗增

加就是发动机燃油经济性的下降,而要通过烟雾机发烟效果与发动机尾气余热回收效率来衡量。

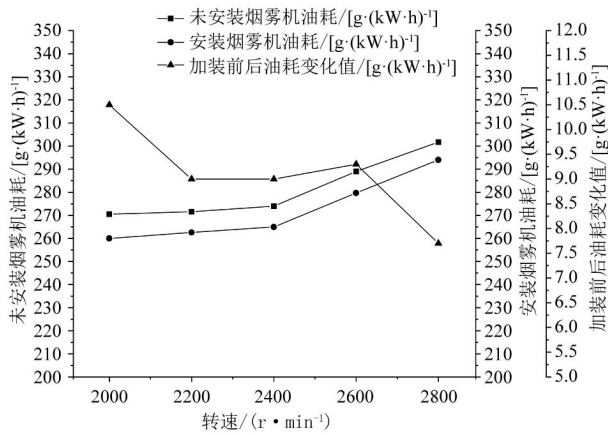


图6 发动机燃油油耗与发动机工况变化关系

Fig. 6 Relationship between engine fuel consumption and changes in engine operating conditions

由图6可知,发动机转速在2200~2400 r/min时,加装烟雾机前后油耗变化平缓稳定,增幅分别为3.314%和3.285%,说明在这个工况下发动机工作稳定,烟雾机雾滴颗粒粒径均匀,这也印证了发动机转速在2400 r/min的工况下,烟雾机的雾滴颗粒粒径是最佳的试验结果。

3.2 发动机排气管余热回收效率

在加装烟雾机的排气管前端与末端安装尾气温度传感器采集温度变化数据,通过判断排气管前后端温度差来判断尾气余热的回收转化情况,结果如图7所示。可以看出,发动机转速从2000 r/min上升到2800 r/min时,烟雾机在药剂破碎过程中吸收了排气管中的热量使得排气管温度明显下降,从前后端温差曲线可以看出,在2400~2600 r/min范围内,前后端温度差值变化逐渐减小。这是因为随着发动机转速的增大,发动机状态逐渐趋于稳定,发动机的排气温度远大于烟雾机雾化所吸收的温度值,发动机转速增大的同时导致排气速率加快,尾气中一部分能量来不及回收,因此温度变化越来越小。当发动机转速增加到2800 r/min时,排气管前后端温差增大,原因是随着转速的增加,发动机稳态破坏,处于高转速、中低负荷区域,导致排气管温度突然升高,之后又趋于稳定。

排气管前后端温度发生变化验证了尾气中的能量得到了回收,烟雾机能量回收效率计算方式如下。柴油的燃烧热量为43070 kJ/kg,柴油密度为0.84 kg/L,可计算出柴油释放的热量 Q 为36178.8 kJ/L,本研究按柴油发动机最高转化效率37%计算,通过无利用热量公式 $Q_{\text{费}} = (1-37\%)Q$ 计算出柴油浪费的热量为22792.644 kJ/L。通过TN16型红外测温仪测得烟雾剂

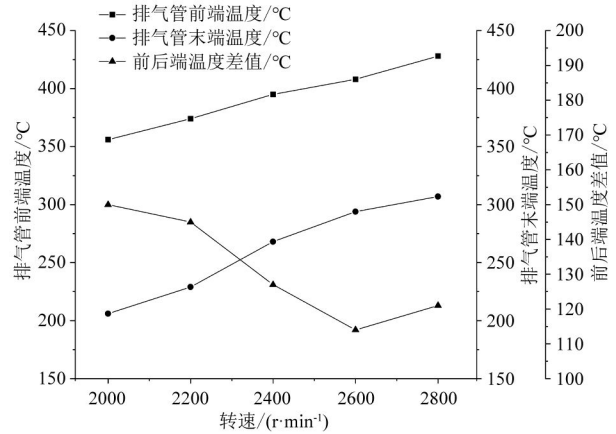


图7 安装烟雾机前后尾气温度变化情况

Fig. 7 Changes of exhaust gas temperature before and after installing smoke machine

发烟的临界温度为 $(125 \pm 1)^\circ\text{C}$,室温 25°C 时,在烟雾剂、水、药液3者的混合溶液中,以水为代表测得吸收能量 $Q_{\text{吸}}$ 为2520 kJ/L。通过再利用率公式 $\eta = Q_{\text{吸}}/Q_{\text{费}}$ 计算出烟雾机能量回收效率为11%,即多利用88 g柴油。这说明烟雾机不仅回收了尾气中的余热,还有效提高了燃料利用率,起到节能减排的效果。

4 结论与分析

(1) 发动机转速对雾化效果的影响试验表明,在固定喷头安装位置和喷头型号的条件下,随着发动机转速的不断递增,雾滴颗粒直径呈增大趋势。其中发动机转速在2400 r/min时, VMD 值与 NMD 值分别为46.63、43.5,均在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 粒径范围内,而且 DR 值达到0.93,最接近于1,在雾化体系的评价指标中属较高的均匀值。通过 VMD 、 NMD 和 DR 值交叉筛选,认为发动机转速在2400 r/min的工况下,烟雾机的雾滴颗粒粒径最佳。

(2) 烟雾剂浓度对雾化效果的影响试验表明,在确定喷头安装位置、喷头型号、发动机转速的情况下,烟雾剂浓度在10%~30%时, VMD 值与 NMD 值均在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 粒径范围内,而且 DR 值分别达到0.92、0.91、0.93,说明烟雾剂浓度在此范围内都可以达到较好的发烟效果及较好的均匀度。当烟雾剂浓度为30%时,雾滴 DR 值达到0.93,最接近于1,表明雾滴颗粒最均匀,因此推荐烟雾剂浓度为30%。

(3) 喷头流量对雾化效果的影响试验表明,喷头流量与雾滴粒径呈正相关关系,工作电压为6~12 V时, VMD 值与 NMD 值均在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 粒径范围内, DR 值分别为0.64、0.74,说明这个工况下虽然可以正常发烟,但是雾滴均匀度相对不理想。当电压增加到18 V时, VMD 值与 NMD 值分别为49.25和44.99 μm , DR 值达到0.91,最接近于1,表明喷头流量雾化最均匀,

此时喷头流量为 7.5 L/min, 因此推荐这个流量的喷头。

(4) 发动机燃油经济性的影响试验表明, 安装烟雾机后, 发动机油耗有所上升, 增幅为 2.552%~3.882%, 但增幅较小, 油耗量增加主要受烟雾机外挂负载的影响。发动机转速在 2 200~2 400 r/min 时, 发动机工作稳定且烟雾机雾滴颗粒粒径均匀, 验证了发动机在 2 400 r/min 转速下烟雾机雾滴颗粒粒径最佳的试验结果。

(5) 发动机排气管余热回收试验表明, 室温 25℃ 时, 在烟雾剂、水、药液 3 者的混合溶液中, 以水为代表测得吸收能量为 2 520 kJ/L。通过再利用率公式计算出烟雾机能量回收效率为 11%, 即多利用 88 g 柴油。这说明烟雾机不仅回收了尾气中的余热, 还有效提高了燃料利用率, 起到节能减排的效果。

5 应用展望

根据我国农机目前发展现状, 未来应全力提升主要农作物生产全程机械化技术、大力发展应用绿色环保机械化技术、拓宽农机化发展领域。尾气能量回收式烟雾机是绿色环保机械化装置, 可以作为拖拉机出厂时的一个选配配件, 使用户有更多的选择。很多农机的功能都不是单一的, 如中耕施肥机, 在中耕作业的同时进行施肥。本研究设计的尾气回收式烟雾机就是拖拉机进地一次完成 2 种作业, 如棉花地进行除草作业的同时, 可以利用烟雾机进行病虫害防治; 果园进行施肥作业的同时进行病虫害防治等。

本研究设计的烟雾机由发动机排气管改装而来, 使排气管不单单只是排气管, 同时也是尾气能量回收装置烟雾机。需要烟雾机作业时, 打开药泵开关, 此时就是烟雾机; 不需要工作时, 它就是排气管的作用。本设计优化了农艺, 增加了拖拉机的功能, 提高了发动机燃油转化效率, 减少碳排放, 为农业机械的发展提供了新的方向。

参考文献

- [1] ANT NIO D, HELEDR S, M RIO C. Analysis of vehicle exhaust was teheat recoverypotentia lusinga Rankinecycle[J]. *Energy*, 2013, 49: 71-85.
- [2] 俞小莉, 李婷. 发动机热平衡仿真研究现状与发展趋势[J]. *车用发动机*, 2005(5): 1-5.
YU Xiaoli, LI Ting. Research and development in thermal balance simulation for the engine[J]. *Vehicle Engine*, 2005(5): 1-5.
- [3] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 朱增强, 王冉冉. 烟雾机喷嘴雾化仿真研究[J]. *装备制造技术*, 2018(7): 51-54.
ZHU Zengqiang, WANG Ranran. Study on atomization simulation of smoke machine nozzle[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018(7): 51-54.
- [5] 邹国亮, 吴国权, 杨晓平, 等. 提高农药利用率的探索与实践[J]. *农业与技术*, 2018, 38(8): 44.
- [6] 张锐, 楼狄明. 发动机性能台架试验自动化系统的开发[J]. *柴油机设计与制造*, 2017, 23(3): 42-49.
ZHANG Rui, LOU Diming. Development of engine performance bench test automation system[J]. *Design & Manufacture of Diesel Engine*, 2017, 23(3): 42-49.
- [7] 贾卫东, 刘欢, 薛新宇, 等. 对靶喷雾机喷雾参数对雾滴沉积分布的影响试验[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(12): 53-56, 93.
JIA Weidong, LIU Huan, XUE Xinyu, et al. Influence test of spraying parameters of target sprayer on droplet deposition distribution [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(12): 53-56, 93.
- [8] 齐苗苗. 便携式常温烟雾机的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
QI Miaomiao. Development of portable normal temperature smoke machine[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.
- [9] 李慧. 常温烟雾机雾滴沉积数值模拟及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
LI Hui. Numerical simulation and experimental research for the determination of deposition parameters for a cold sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [10] 杨春雨. 利用烟雾机提高防治效率[J]. *现代农村科技*, 2012(12): 23.