

扩散火焰中丁醇对排放中粒子数量的影响

张克松¹, 丁文浩², 崔福兴³

1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东琦瑞能源科技有限公司, 山东 济南 250101;

3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250014

摘要:为研究正丁醇对甲苯的稀释作用及正丁醇中的氧对尾气中粒子数量 (particle number, PN) 的影响, 以正庚烷/甲苯/正丁醇为燃料, 利用扩散充电式颗粒计数器测量自然对流扩散火焰中的 PN, 分析无正丁醇时二元燃料中甲苯体积分数对粒子数密度的影响, 评估稀释作用对 PN 的影响; 保持正庚烷和甲苯的体积比为 83/17, 分析添加正丁醇时三元燃料产生的粒子数密度, 通过三元燃料与二元燃料产生的粒子数密度的差评估氧的作用对 PN 的影响。结果表明: 稀释效应对减少 PN 的作用更大; 当正丁醇体积分数大于 6% 时, 燃料中的氧开始促进颗粒的氧化, 当正丁醇体积分数为 13% 时, 燃料氧促进颗粒氧化的效果最大。

关键词:正丁醇; PN; 扩散火焰

中图分类号:TK407.9

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0075-05

引用格式:张克松, 丁文浩, 崔福兴. 扩散火焰中丁醇对排放中粒子数量的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 75-79.

ZHANG Kesong, DING Wenhao, CUI Fuxing. Effect of butanol on the particle number emission in diffusion flame[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 75-79.

0 引言

含氧燃料比传统化石燃料产生的污染物更少, 酒精、乙醚、醇、酯等可作为汽、柴油中的含氧添加剂。Zhang 等^[1]分析了不同含氧燃料在定容燃烧弹中的喷雾和燃烧性能, 结果表明, 醇在喷雾、雾化和燃烧方面性能最好, 其中正丁醇是最佳醇燃料。近年来, 正丁醇的燃烧性能和颗粒物排放特性吸引了越来越多的关注。一般认为, 正丁醇中的氧有利于颗粒物的氧化, 降低颗粒物排放^[2-4]。在不同燃烧装置上开展的研究同样表明, 正丁醇可以降低颗粒物排放^[5-8]。但也有少量研究发现与之相反的情况。Camacho 等^[9]在试验中发现丁醇火焰比丁烷火焰成核时间更早, 颗粒物体积分数更高。Ghiassi 等^[10]发现随着燃料中正丁醇含量的增加, 颗粒物氧化速率有所降低。同时, 也有学者注意到丁醇对颗粒物排放的作用不仅限于其中的氧, 燃料中的芳香烃会增加颗粒物排放。Liu 等^[11-12]通过试验研究, 认为正丁醇降低颗粒物排放主要机理是燃料中的芳香烃被稀释。

燃烧过程中, 含氧燃料中的芳香烃等不饱和化合物被正丁醇稀释, 同时额外的氧也被正丁醇带入火焰中, 两方面的因素都影响颗粒物排放, 目前尚无对这两个因素的研究分析, 因此有必要对这两个因素开展定量研究。

1 试验方法和材料

传统上采用称质量法或光学法测量颗粒物, 存在系统复杂、成本高、操作不便等缺点。近年来, 为了

收稿日期: 2024-10-21

第一作者简介: 张克松 (1985—), 男, 济南人, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放与控制技术、内燃机制造工艺学, E-mail: vimcanna@126.com。

适应车辆实际行驶排放测量的要求,扩散充电式(diffusion charging, DC)颗粒计数器因具有使用方便、维护简单、测量范围广等优势,得到广泛应用。Ntziachristos 等^[13]的研究表明,DC 计数器的准确性、重复性和可靠性均较为理想。因此本研究中使用 Pegasor PPS 型 DC 计数器测量燃烧产物中的粒子数量(particle number, PN)。试验中,采样频率为 10 Hz,连续记录 300 s 的数据并取其平均值作为 PN 结果。

扩散火焰容易生成颗粒物。Botero 等^[14]研究表明,自然对流扩散火焰易于控制,干扰因素少,是测量颗粒物的理想对象。本文中使用煤油烟点测定仪获得自由对流扩散火焰,燃料罐中的液体通过灯芯进入燃烧室,空气由燃烧室底部小孔进入,在燃烧室内形成扩散火焰,废气自燃烧室顶部进入排气管道,DC 计数器安装在排气管道上,空压机为 DC 计数器提供清洁的压缩空气,测量的数据上传至上位机保存。试验系统示意图如图 1 所示。

作为一种常见的芳香烃,甲苯挥发性较好,适宜用作扩散燃烧的燃料。研究甲苯被正丁醇稀释对颗粒物排放的影响时,应设法排除正丁醇中氧的干扰。正丁醇在自然对流扩散火焰中产生的颗粒极低,若选择一种类似性质的不含氧燃料代替正丁醇稀释甲苯,可以实现上述目的。Botero 等^[14]研究发现,正庚烷在自然对流扩散火焰中燃烧产生的颗粒物可以忽略,因而可以作为正丁醇的替代品,研究其对甲苯的稀释作用对颗粒物排放的影响。

测量不同比例的正庚烷/甲苯二元燃料燃烧排放中的 PN,可以定量研究燃料中甲苯体积分数对颗粒物排放的影响,从而评估稀释作用对颗粒物减排的作用;对比添加正丁醇后的正丁醇/正庚烷/甲苯三元燃料燃烧排放的 PN,得到包含稀释作用和燃料中的氧作用的总体减排效果,可单独评估燃料中氧对 PN 的影响。

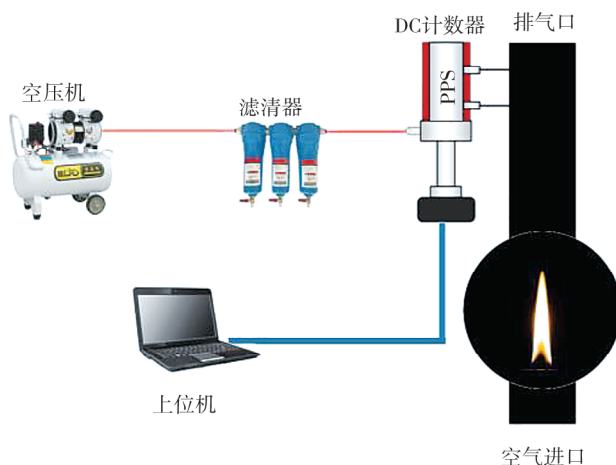


图 1 试验系统示意图

2 试验结果与分析

2.1 甲苯体积分数对 PN 的影响

正庚烷/甲苯二元燃料燃烧排放的粒子数密度(单位体积 PN)如图 2 所示。由图 2 可知:当甲苯体积分数小于 14% 时,粒子数密度接近于零,忽略不计;甲苯体积分数大于 14% 时,粒子数密度迅速增加。采用普通市售柴油进行对比测试,发现甲苯体积分数为 17%、正庚烷体积分数为 83% 的二元燃料燃烧产生的粒子数密度与柴油相同,约为 $60 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 。因此,当甲苯体积分数为 14% ~ 18% 时,对甲苯体积分数 x 与粒子数密度 y 进行拟合,得到两者关系为 $y = 24.19x + 342.93$,利用该式可以估计甲苯稀释后燃烧排放的粒子数密度。

2.2 稀释效应和燃料中的氧对 PN 减排的作用

正丁醇稀释作用对 PN 的影响比率

$$p_{\text{dil}} = (n_{\text{PN,ref}} - n_{\text{PN,est}}) / (n_{\text{PN,ref}} - n_{\text{PN,mea}}) \times 100\%$$

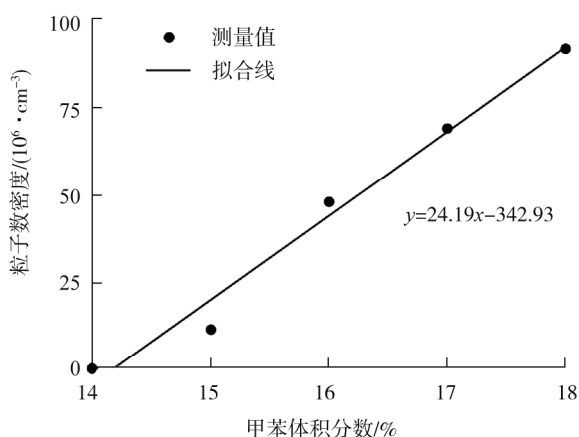


图 2 正庚烷/甲苯二元燃料排放的粒子数密度

式中: $n_{\text{PN,ref}}$ 是甲苯体积分数为 17%、正庚烷体积分数为 83%的基准二元燃料排放的粒子数密度, cm^{-3} ; $n_{\text{PN,est}}$ 是根据拟合方程和正丁醇/正庚烷/甲苯三元燃料中甲苯体积分数计算得到的粒子数密度, cm^{-3} , 代表稀释作用; $n_{\text{PN,mea}}$ 是实测三元燃料排放的粒子数密度, cm^{-3} , 代表稀释与燃料中氧的共同作用。

燃料中氧的作用对 PN 的影响比率

$$p_{\text{oxy}} = (n_{\text{PN,est}} - n_{\text{PN,mea}}) / (n_{\text{PN,ref}} - n_{\text{PN,mea}}) \times 100\%。$$

三元燃料中甲苯/正庚烷的体积比固定为 17/83。3 种组分的实际体积分数、实测和估计的 n_{PN} 、 p_{dil} 、 p_{oxy} 如表 1 所示。根据表 1 绘制三元燃料的粒子数密度随正丁醇体积分数变化曲线如图 3 所示, 燃料中氧的作用比例随正丁醇体积分数的变化曲线如图 4 所示。

表 1 三元燃料试验信息

体积分数/%			$n_{\text{PN}} / (10^6 \cdot \text{cm}^{-3})$		$p_{\text{dil}} / \%$	$p_{\text{oxy}} / \%$
正丁醇	甲苯	正庚烷	实测	估计		
3.0	16.49	80.51	56.326 9	55.963 1	109.9	-9.9
5.0	16.15	78.85	48.310 9	47.738 5	104.9	-4.9
10.0	15.30	74.70	21.566 8	27.177 0	85.4	14.6
13.3	14.74	71.96	0.198 8	13.606 4	77.6	22.4
16.4	14.21	69.39	0.004 3	0.858 3	98.6	1.4
20.0	13.60	66.40		0.027 5	-13.9	

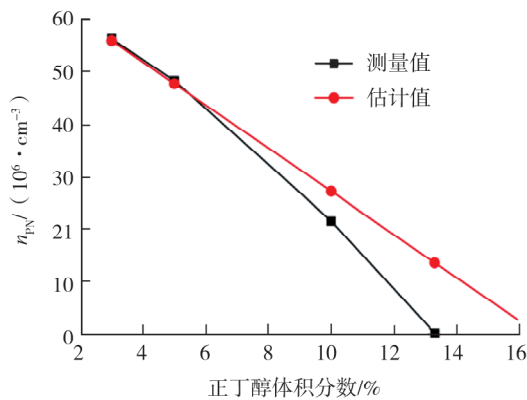


图 3 三元燃料的 PN

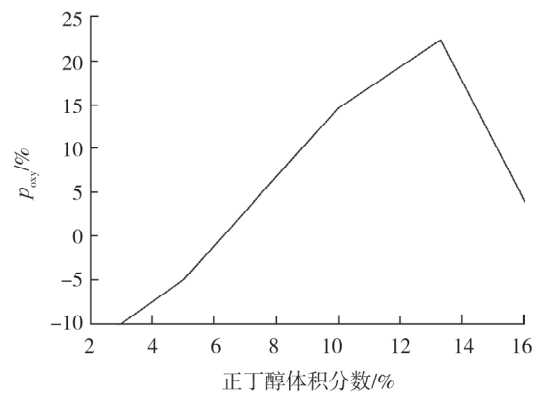


图 4 燃料氧作用比例随正丁醇体积分数的变化

由表 1 和图 3、4 可知: 粒子数密度随着燃料中正丁醇体积分数的增加而降低, 当正丁醇体积分数高于 13% 时, 粒子数密度在排气中几乎消失; 当正丁醇体积分数小于 6% 时, 实测粒子数密度和估计粒子数密度非常接近, 而当正丁醇体积分数大于 6% 时, 实测粒子数密度总是低于估计值, 额外减排的粒子数密度来自于正丁醇带入燃料中的氧的作用; 燃料氧作用比例随正丁醇体积分数先升高后降低。

2.3 颗粒物排放机理分析

以上研究表明: 对于正丁醇体积分数中等 (10.0%、13.3%) 的三元燃料排放的 n_{PN} , 稀释效应起主要作用, 燃料中的氧起次要作用; 当正丁醇体积分数约为 13.0% 时, 正丁醇中氧的作用比率最大, 约为 22.0%; 对于正丁醇体积分数较大 (16.4%) 的三元燃料, 燃料中氧的作用极小, 这是由于燃料中较少的甲苯使颗粒排放大大降低, 不再需要燃料中的氧参与颗粒物的氧化; 但当正丁醇体积分数低于 6.0% 时, 氧对减少 PN 的作用为负, 正丁醇中的氧促进了颗粒物形成。

解释体积分数低于 6.0% 时正丁醇中氧的作用为负的现象, 需对燃料分子的详细氧化过程进行分析。

燃料分子在扩散火焰的高温富油区裂解成小的活性物质,正丁醇的裂解引入了活性氧或氧化性基团。在富油区中,这些活性物质既可能与较大的燃料分子反应,也可能与较小的裂化产物发生反应。正丁醇体积分数较小时,只有少量的活性成分出现,由于富油区内燃料分子体积分数很高,因此其与燃料分子之间的反应是主要反应。这些反应促进了燃料分子分解,形成不饱和烃,如乙烯和乙炔^[15-16],然后聚合成多环芳烃。多环芳烃的生长和凝聚正是颗粒物生成的主要原因^[17]。因此,正丁醇中的氧促进了火焰中颗粒物的形成。随着燃料中正丁醇体积分数的增加,产生更多的氧化性基团,其与小分子不饱和烃的反应逐渐成为主流,多环芳烃的形成受到抑制,正丁醇中的氧表现出降低颗粒排放的效果。

3 结论

分析正丁醇作为添加剂对自然对流扩散火焰中粒子数密度的影响。利用正庚烷/甲苯二元燃料研究甲苯稀释对PN的影响,然后加入正丁醇,通过比较三元和二元燃料的PN排放数据,估算正丁醇中氧对PN的影响。

1) 粒子数密度随着燃料中正丁醇体积分数的增加而降低,当正丁醇体积分数高于13%时,粒子数密度约为0;当正丁醇体积分数小于6%时,实测粒子数密度和估计粒子数密度非常接近,而当正丁醇体积分数大于6%时,实测粒子数密度总是低于估计值,额外减排的粒子数密度来自于正丁醇带入燃料中的氧的作用。

2) 当正丁醇作为燃料添加剂时,甲苯稀释对于减少PN起着决定性作用,特别是当燃料中正丁醇体积分数较小时。

3) 正丁醇中的氧对PN的影响取决于混合燃料中正丁醇的体积分数,当燃料中正丁醇的体积分数大于6%时,燃料中的氧具有减少PN的作用。

4) 正丁醇体积分数中等(13%左右)时,燃料中氧的作用比例最大,正丁醇体积分数继续增大,其燃料中氧减少PN的作用逐渐降低。

本研究的结果可以解释为什么不同的研究对正丁醇效应给出了不同的结论,有助于深化含氧燃料的相关研究,促进清洁燃料的发展。

参考文献:

- [1] ZHANG P, SU Xin, YI C S, et al. Spray, atomization and combustion characteristics of oxygenated fuels in a constant volume bomb: a review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition), 2020, 3: 7.
- [2] 计维斌, 楼狄明. 电喷汽油机燃用丁醇-汽油混合燃料超细颗粒排放特性[J]. 内燃机工程, 2014, 35(1): 20-25.
- [3] 陈鹏, 郑尊清, 刘海峰, 等. 正丁醇部分预混燃烧及其颗粒物排放特性试验[J]. 内燃机学报, 2020, 38(6): 481-489.
- [4] 韩伟强, 卢耀, 黄泽远, 等. 预混比和喷油定时对异丁醇/柴油 RCCI 燃烧与排放特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 88-96.
- [5] ZHU M M, SETYAWAN H, ZHANG Z Z, et al. Effect of n-butanol addition on the burning rate and soot characteristics during combustion of single droplets of diesel-biodiesel blends[J]. Fuel, 2020, 265: 117020.
- [6] RAULT T M, VISHWANATH R B, GÜLDER M L. Soot formation in turbulent swirl-stabilized spray flames in a model combustor fueled with n-butanol/Jet A-1 blends[J]. Fuel, 2020, 287(4): 119452.
- [7] NOUR M, SUN Z, CUI M, et al. Effect of flash boiling injection on combustion and PN emissions of DISI optical engine fueled with butanol isomers/TPRF blends[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2020, 38(4): 5923-5931.
- [8] YING Y Y, LIU D. Soot properties in ethylene inverse diffusion flames blended with different carbon chain length alcohols[J]. Fuel, 2020, 287(113): 119520.
- [9] CAMACHO J, LIEB S, WANG H. Evolution of size distribution of nascent soot in n- and i-butanol flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(1): 1853-1860.
- [10] GHIASSI H, TOTH P, LIGHTY J S. Sooting behaviors of n-butanol and n-dodecane blends[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(3): 671-679.

- [11] LIU F S, HUA Y, WU H, et al. Experimental and kinetic investigation on soot formation of n-butanol-gasoline blends in laminar coflow diffusion flames[J]. *Fuel*, 2018, 213:195–205.
- [12] LIU H S, ZHANG P, LIU X L, et al. Laser diagnostics and chemical kinetic analysis of PAHs and soot in co-flow partially premixed flames using diesel surrogate and oxygenated additives of n-butanol and DMF[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 188:129–141.
- [13] NTZIACHRISTOS L, SAMARAS Z. The potential of a partial-flow constant dilution ratio sampling system as a candidate for vehicle exhaust aerosol measurements[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2010, 60(10):1223–36.
- [14] BOTERO M L, MOSBACH S, KRAFT M. Sooting tendency and particle size distributions of n-heptane/toluene mixtures burned in a wick-fed diffusion flame[J]. *Fuel*, 2016, 169:111–119.
- [15] ZHANG K S, LIANG Z, WANG J X, et al. Diesel diffusion flame simulation using reduced n-heptane oxidation mechanism[J]. *Applied Energy*, 2013, 105:223–228.
- [16] 应遥遥. 掺醇乙烯扩散火焰碳烟颗粒的生成演化特性与调控研究[D]. 南京:南京理工大学, 2019.
- [17] NOBILI A, CUOCI A, PEJPICHESTAKUL W, et al. Modeling soot particles as stable radicals: a chemical kinetic study on formation and oxidation: Part I: soot formation in ethylene laminar premixed and counterflow diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 243:112073.

Effect of butanol on the particle number emission in diffusion flame

ZHANG Kesong¹, DING Wenhao², CUI Fuxing³

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Qirui Energy Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250014, China

Abstract: To investigate the dilution effect of n-butanol on toluene and the influence of oxygen in n-butanol on particle number (PN), using n-heptane/toluene/n-butanol as fuel, a diffusion charging particle counter is used to measure PN in a natural convection diffusion flame. Firstly, the effect of toluene volume fraction in binary fuel without n-butanol on PN is studied, and the effect of dilution on PN is evaluated; then maintain the volume ratio of n-heptane to toluene at 83/17, study the PN generated by ternary fuel adding n-butanol, and evaluate the effect of oxygen on PN by the difference in particle number density between the binary and ternary fuel. The results indicate that the dilution effect has a greater effect on reducing PN. When the volume fraction of n-butanol is greater than 6%, oxygen in the fuel begins to promote particle oxidation. When the volume fraction is 13%, the effect of fuel oxygen on promoting particle oxidation is the greatest.

Keywords: n-butanol; PN; diffusion flame

(责任编辑:臧发业)