

文章编号:1000-8055(2012)12-2660-06

含氧生物燃料的雾化性能测试及分析

张 弛¹, 傅奇慧¹, 荣 龙², 林宇震¹, 许全宏¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用离心喷嘴对含氧生物燃料及其与传统航空煤油 RP-3 不同比例混合燃料的雾化性能进行测试, 并分析了该燃料的组分和理化性质对雾化性能的影响。同时, 对含氧生物燃料体积分数在 50% 以下的混合燃料, 发展了具有较高精度的雾化颗粒索太尔平均直径(SMD)预估模型。试验结果表明: 随着含氧生物燃料比例的减少, 混合燃料的雾化性能得到改善, 并且随着供油压差的增大, 不同比例混合燃料间的雾化性能差距缩小; 供油压差高于 1.0 MPa 后混合燃料的 SMD 均可达到小于 40 μm 的水平。经分析, 目前该含氧生物燃料还不能直接应用于航空发动机, 需要通过燃料氢化处理或者飞行器硬件改造, 才可用于长远期的未来航空。

关 键 词: 航空发动机; 航空燃料; 含氧生物燃料; 离心喷嘴; 索太尔平均直径

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Measurement and analysis of atomization characteristics of oxygenated bio-fuel

ZHANG Chi¹, FU Qi-hui¹, RONG Long², LIN Yu-zhen¹, XU Quan-hong¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on

Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Energh and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Biological Science and Medical Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A pressure-swirl atomizer was adopted to measure the atomization characteristics of oxygenated bio-fuel and its different blends with conventional kerosene RP-3. The study was conducted to analyze the effect of the chemical composition and physical-chemical properties on the atomization characteristics of the oxygenated bio-fuel. For the blends with 50% or less oxygenated bio-fuel, a Sauter mean diameter (SMD) prediction model was developed. The experimental results show that decrease the oxygenated bio-fuel in the blends, the atomization would be improved. In addition, increase the supply pressure drop, the difference of atomization among the fuel blends would be reduced. When the supply pressure drop is larger than 1.0 MPa, SMD of the fuel blends can achieve less than 40 μm . By analysis, currently the oxygenated bio-fuel can not be directly used for aero-engine, and the fuel-

收稿日期: 2011-12-09

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2660_004.html

基金项目: 北航“唯实”人才培养基金(青年教师人才培养)(YWF-11-03-Q-023)

作者简介: 张弛(1979—),男,四川成都人,讲师,博士,主要从事航空发动机燃烧及传热传质研究。

hydroprocessing or aircraft modification is necessary for meeting the demands of the long-term future aviation.

Key words: aero-engine; aviation fuel; oxygenated bio-fuel; pressure-swirl atomizer; Sauter mean diameter (SMD)

随着全球军事航空和民用航空业的迅速发展,本世纪初欧美等国家意识到自身对石油基航空燃料的过分依赖,给国防和经济安全留下严重隐患.同时,全球气候变化也给航空运输业提出了新的要求,要达到国际航空运输协会(IATA)提出的减排目标,在现有的燃油机制下仅仅依靠航空器轻量化和高效环保航空动力技术是不够的,还需要依靠更加环保的航空生物燃料技术.

因此,实现航空燃料多样化和可持续性,是保证航空业快速发展的重要前提.

1 航空生物燃料发展概要

目前国外大力发展的航空替代燃料主要包括两大类:一种是合成燃料(synfuel);另外一种生物燃料(biofuel)^[1].与合成燃料相比,尽管目前生物燃料技术还不成熟,和传统航空燃料的差异也较大,但其来源的可再生性和制备过程的环保性,注定了其可作为航空替代燃料的中长期发展目标.按照不同的原料来源和制备工艺,航空生物燃料主要包括氢化处理喷气燃料(HRJ)、气化物合成喷气燃料(Bio-SPK)、发酵喷气燃料,以及糖转烷烃(STA)喷气燃料等^[2-3].而生物燃料的温室气体排放量比传统航空燃料将减少50%~90%^[4].

在航空发动机中,航空生物燃料将对燃烧室、燃油管路和燃油喷嘴等部件性能产生显著影响作用,例如雾化效果、点火、熄火等,特别需要关注燃用航空生物燃料的燃油喷嘴结焦积炭问题^[5].与传统石油基航空煤油相比,航空替代燃料中芳香烃与硫含量极低,可以大大减少燃烧气态污染物和颗粒物的生成^[6],但带来的负面作用是对橡胶等密封件的溶胀性不佳,需要经过严格测试才能安全使用^[7].

从麻风树、亚麻荠和海藻等植物中提炼的生物柴油(主要成分是酯类和脂肪酸)为含氧生物燃料,美国霍尼韦尔 UOP 公司利用催化剂经过除氧、加氢和裂解过程,制得的 Bio-SPK 航空燃料,与传统航空煤油混合使用,可以满足现有航空燃料标准中的密度、热值、橡胶兼容性等使用性能要求.目前已与国内外多家飞机、航空发动机制造商

和航空公司合作开展部件、发动机和飞行验证,对其推力、起动、稳定性和污染排放等性能进行了详细测试^[1,8].

国外对含氧生物燃料也进行过雾化、蒸发及燃烧的研究,表明燃用生物燃料的燃气轮机燃烧室 NO_x 和 CO 排放量均有减少,但欲获得更佳的燃烧效果,需要在喷雾和预热方面采取必要措施^[9-11].

为了发展基于本国资源的航空生物燃料,本文利用航空发动机中与燃料性能密切相关的重要部件——燃油喷嘴,对含氧生物燃料进行雾化特性试验,同时对其开展了组分分析和理化性质测试,研究其对雾化性能的影响作用.尽管目前含氧生物燃料的诸多性质与传统航空燃料还有很大差距,但从长远的燃料发展角度来看,开展其雾化性能的研究是必要的.

2 燃料组分及理化性质

本次研究的含氧生物燃料是利用棉籽油和甲醇进行酯化反应获得,采用固体碱催化的方法,主要成分以酯类为主.采用气相色谱法进行组分分析,仪器是 GC-14 型气相色谱仪,测得该含氧生物燃料的组分如表 1 所示,脂肪酸甲酯体积分数占 95%.

表 1 含氧生物燃料气相色谱法分析结果
Table 1 Gas chromatogram spectrometry results of aviation bio-fuel natural oil

序号	组分	体积分数/%
1	脂肪酸甲酯	95
2	甘油一酯	2.6
3	甘油二酯	0.8
4	甘油三酯	0.6
5	甲醇	0.31
6	水	0.05
7	其他	0.64

在航空发动机燃料的基本性质指标中,密度、闪点、冰点、表面张力、黏度、净热值等都是直接关

系到燃料雾化与燃烧性能的重要理化性能,对航空发动机总体性能有较大的影响,因此按照 GB 6537-2006 规定的测试方法测量了该含氧生物燃料的基本理化性质.与传统航空煤油 RP-3 的理化性质对比见表 2.

表 2 含氧生物燃料与 RP-3 理化性质比较

Table 2 Comparison of physical-chemical properties of aviation bio-fuel natural oil and RP-3

性质	RP-3 (GB 6537-2006)	生物燃料
密度/(kg/m ³)	775~830	915
闪点/℃	不低于 38	170
冰点/℃	不高于 -47	0
(20℃)黏度/(mm ² /s)	不小于 1.25	7.8
(-20℃)黏度/(mm ² /s)	不大于 8.0	
表面张力/(mN/m)	24.1(测试值)	16
净热值/(MJ/kg)	不小于 42.8	39.6

可以看出该含氧生物燃料的密度和黏度较高,在发动机管路和喷嘴中流动阻力会较大,所需的供油压力也会增高,同时雾化困难,油雾颗粒度较大.生物燃料较小的表面张力可以在一定程度上弥补黏性对雾化的影响.该生物燃料的闪点较高,在存储、运输及使用时有着比 RP-3 更好的安全性能.生物燃料的冰点过高,其低温流动性差,关系到高空飞行中燃料供给系统的正常工作以及寒冷地区的储藏、运输等问题,应考虑采取措施(例如加氢处理或掺入添加剂)降低其冰点^[12].另外,生物燃料的热值较 RP-3 偏低.

3 燃料雾化性能试验

试验用燃油喷嘴采用航空发动机中常用的离心喷嘴,流量数为 2.3 kg/(h·MPa^{0.5}),实心喷雾全角为 60°.利用马尔文激光粒度测试仪对该含氧生物燃料的雾化特性进行测试,并且采用了与作者早期研究相同的雾化试验系统^[13].在常温常压条件下进行雾化试验,室内温度为 10℃.

液滴尺寸分布的数学表达式为最广泛的罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布函数

$$Q = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{\bar{D}}\right)^N\right] \quad (1)$$

式中 Q 为累积分布,即尺寸小于 D 的液滴体积占总液雾体积百分数; $\bar{D}$ 为在液滴尺寸分布 $Q = 0.632$ 时的特征尺寸,代表液雾细度(单位为

μm); N 为液滴尺寸分布指数,表明液滴尺寸分布的均匀度.

液滴雾化颗粒度常用 SMD(记为 D_{sm}) 计量,即在液体的总质量相等的前提下,按照液雾总表面积不变的原则求得的平均直径. SMD 直接影响燃烧室的燃烧性能,例如:点火、熄火、燃烧效率及出口温度分布等.

3.1 平均粒径 SMD

图 1 展示了纯含氧生物燃料与传统航空煤油 RP-3 的雾化颗粒平均粒径 SMD 的试验结果.可以看出,当供油压差小于 0.2 MPa 时,传统航空煤油 RP-3 的 SMD 随供油压差的变化很大;供油压差在 0.2 MPa 到 0.5 MPa 之间时,RP-3 的 SMD 减小速度缓慢;当供油压差继续增大, SMD 趋于稳定;当供油压差达到 0.4 MPa 时,RP-3 的 SMD 已经减小到 40 μm 左右.而纯含氧生物燃料在低供油压差下基本没有雾化现象,超出了马尔文激光粒度测试仪的测试范围;当供油压差增大到 0.4 MPa 以后, SMD 为 475 μm ,并随供油压差的增大而减小;在供油压差为 0.95 MPa 时,纯含氧生物燃料的 SMD 减小到略高于 40 μm .

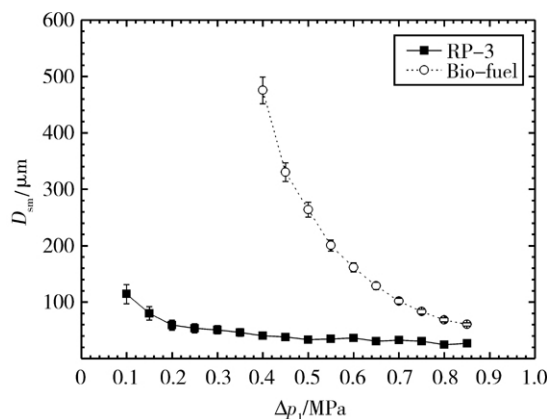


图 1 含氧生物燃料与 RP-3 的 SMD 对比

Fig. 1 Sauter wean diameter (SMD) comparison of oxygenated bio-fuel and RP-3

随后,将含氧生物燃料与传统航空煤油 RP-3 按不同比例混合,对其雾化特性也进行了测试,如图 2 所示.对于含氧生物燃料与传统航空煤油 RP-3 的混合燃料,随着含氧生物燃料体积分数的增加,其雾化性能越来越差,表现出相对较差的低温性能.随着供油压差的增大,各燃料的雾化性能之间的差距越来越小,并趋于稳定,最终可达到下于 40 μm 的水平.

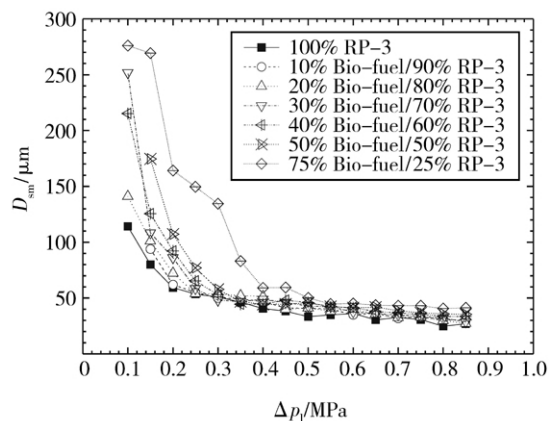


图 2 不同比例含氧生物燃料与 RP-3 混合燃料 SMD 对比

Fig. 2 SMD comparison of different blends of oxygenated bio-fuel and RP-3

3.2 分布指数 N

从图 3 可以看出,对于含氧生物燃料与传统航空煤油 RP-3,以及不同比例的混合燃料,在不同供油压差下的液滴尺寸分布指数 N ,随供油压差增大都呈增大趋势。但相对于航空煤油 RP-3,生物燃料的液滴尺寸分布更不均匀,并且随着生物燃料的体积分数增大,液滴分布更加不均匀。

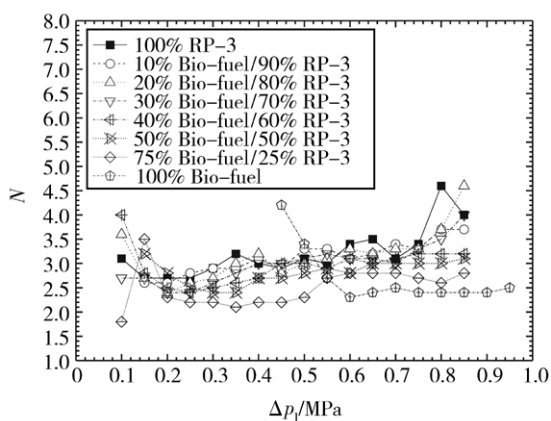


图 3 不同比例含氧生物燃料与 RP-3 混合燃料的分布指数对比

Fig. 3 Distribution parameters comparison of different blends of oxygenated bio-fuel and RP-3

总的来讲,该含氧生物燃料具有较差的流动性,冰点达到 0°C ,远未满足国家标准中航空喷气燃料冰点不大于 -47°C 的要求,同时黏度也较大。所带来的后果是在常温或低温进口条件下,航空发动机燃烧室燃油喷嘴的雾化性能不佳,这将

严重影响发动机的地面和高空点火起动性能。另外,由于含氧生物燃料在燃油管路和喷嘴中的流动性不好,容易造成局部温度偏高,结焦、积炭现象将比较突出,大大降低航空发动机的使用寿命。因此,燃料进一步改进优化和燃烧室部件适应性改造是必需的,特别是燃油系统。

4 燃料雾化 SMD 预估模型

针对本文采用的离心喷嘴,其 SMD 与燃油的张力、黏度以及供油压力参数等有密切关系,估算模型可参考以下公式^[12]:

$$D_{sm} = \text{constant} \sigma^a \mu_l^b \dot{m}_l^c \Delta p_l^d \rho_a^e \quad (2)$$

式中 σ 为燃油表面张力(单位为 N/m); μ_l 为燃油动力黏度(单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$); Δp_l 为供油压力(单位为 MPa); ρ_a 为环境空气密度(单位为 kg/m^3)。

但由于纯含氧生物燃料以及体积分数为 75% 的混合燃料的张力及黏度受温度影响很大,以上估算模型很难适用,因此本文仅对体积分数为 50% 以下的混合燃料及航空煤油 RP-3 的雾化试验数据进行了拟合,得到以下计算模型:

$$D_{sm} = 0.7 \sigma^{1.544} \mu_l^{0.409} \dot{m}_l^{0.25} \Delta p_l^{-0.835} \rho_a^{-0.25} \quad (3)$$

图 4 是 SMD 试验结果与计算结果的比较,其中横坐标为试验数据,纵坐标为公式(3)的计算数据。从图中可以看出 64% 的数据点分布在 $\pm 10\%$ 误差带内,而分布在 $\pm 15\%$ 误差带内的数据点占 86%,说明该公式对于 50% 体积分数以下的混合燃料及航空煤油 RP-3 所处的张力和黏度范围内的 SMD 具有较高的估算精度。

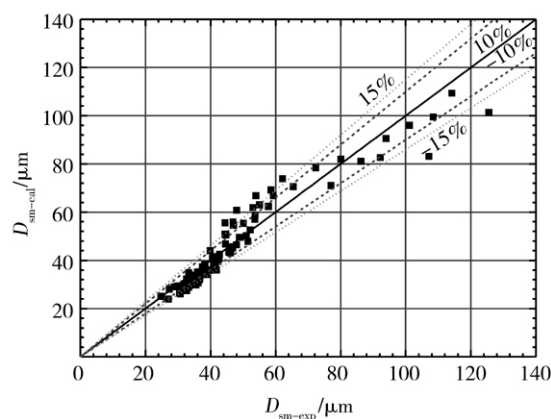


图 4 SMD 试验值与公式(3)计算值比较

Fig. 4 Comparison between experimental and calculated data (equation (3)) of SMD

5 含氧生物燃料应用分析

从理化性质数据来看:本文所研究的含氧生物燃料流动性差,冰点高,黏度大,净热值也偏低,还不能满足现有航空喷气燃料使用要求。正是由于张力和黏度等理化性质的差异,导致了生物燃料的雾化性能较传统航空煤油 RP-3 有很大区别,雾化效果不佳。而这对燃料在航空燃气轮机燃烧室中的雾化、蒸发及混合过程都会产生不利影响。同时,该含氧生物燃料的平均碳链较长(12~16 个碳原子),超过传统航空煤油的平均碳链长度(11 个碳原子左右)。该燃料的这些化学组成和理化性质特点,将导致燃烧室的地面点火、高空再点火、慢车贫油熄火、烟粒生成以及喷嘴结焦积炭等性能无法满足航空发动机适用性要求。另外,该含氧生物燃料的流动性差,对于燃油系统的工作性能和寿命也会产生不良影响。

事实上,航空燃料的化学组分、物理-化学性质以及燃烧性质与飞机和发动机的安全性、性能和寿命息息相关。为了保障替代燃料的适用性,需要经过严格的认证流程^[14],包括规范性质和使用性质评估,燃油系统、燃烧室以及涡轮热端等部件验证,整机验证和飞行验证。国外已经针对合成碳氢燃料在航空发动机上的使用批准了航空燃气轮机燃料标准 ASTM D7566,允许费托合成及氢化生物燃料作为航空替代燃料^[15]。短期内,国外将以“即用(drop-in)”型航空替代燃料为发展重点,但需要解决成本问题^[5]。

欧洲的航空替代燃料和生物燃料发展计划(ALFA-BIRD)已经对氢化植物油以及醇类、脂肪酸甲酯等含氧生物燃料进行了物理特性测试分析和雾化性能试验。研究发现:脂肪酸甲酯这类含氧生物燃料短期内很难直接用作航空燃料,需要通过选择特定原料和优化酯交换反应来控制较合理的链长^[16]。

根据国外及本文的研究结果,可以看出:与“即用(drop-in)”型航空生物燃料相比,含氧生物燃料来源广泛、成本较低,但在短期内无法直接应用于航空发动机。要将其应用于远期的未来航空,还需要在两方面开展深入研究:一是燃料本身的性质改进,包括采取加氢处理和裂解断链等措施;二是航空飞行器和发动机硬件的适应性设计和改造,主要涉及燃油系统、燃油喷嘴和燃烧室等关键部件。

当然,从发展历程来看,将含氧生物燃料首先

应用于地面燃气轮机还是可行的,这对长远的航空领域应用将具有一定的借鉴作用。

6 结论及讨论

本文针对含氧生物燃料及其与传统航空煤油 RP-3 的不同比例混合燃料,开展了雾化性能研究。通过与传统航空煤油 RP-3 的基本理化性质、雾化平均粒径 SMD 和液滴尺寸分布指数 N 试验结果的对比分析,得到如下结论:

1) 纯含氧生物燃料的雾化供油压差大,在 0.4 MPa 以上才能逐渐显现出雾化效果,在 1.0 MPa 时,SMD 可以减小到 40 μm 左右。

2) 对于含氧生物燃料与传统航空煤油 RP-3 的混合燃料,随着含氧生物燃料比例的增加,其雾化性能将变差,但随着供油压差的增大,雾化性能之间的差距变小,供油压差高于 1.0 MPa 时,SMD 均可达到小于 40 μm 水平。

3) 对于 50% 体积分数以下的含氧生物燃料与传统航空煤油 RP-3 混合燃料,以下雾化颗粒平均粒径 SMD 预估模型具有较高的精度

$$D_{sm} = 0.7 \sigma^{1.544} \mu_l^{0.409} \dot{m}_l^{0.25} \Delta p_l^{-0.835} \rho_a^{-0.25}$$

本文所研究的含氧生物燃料还不能满足现有航空喷气燃料使用要求,必须进行加氢处理或者航空发动机适应性改造才能应用于长远期的未来航空。

参考文献:

- [1] Kinder J D, Rahmes T. Evaluation of bio-derived synthetic paraffinic kerosenes (Bio-SPK) [EB/OL]. [2011-12-26]. http://www.boeing.com/commercial/environment/pdf/PAS_biofuel_Exec_Summary.pdf.
- [2] Edwards T. U. S. Air Force alternative fuel efforts: fischer-tropsch and beyond [EB/OL]. [2011-11-24]. http://melchior.usc.edu/fuelsummit/maccr2009/MACCCR_Edwards.pdf.
- [3] Christensen D, Peineke C, Tamboer B, et al. Business case & implementation strategies [R]. European Commission's Directorate General for Mobility and Transport Report, SWAFE D. 7.1 & D. 7.2, 2011.
- [4] Stratton R W, Wong H M, Hileman J I. Life cycle greenhouse gas emissions from alternative jet fuels [R]. Partner Report, PARTNER-COE-2010-001, 2010.
- [5] Edwards T, Moses C, Dryer F. Evaluation of combustion performance of alternative aviation fuels [R]. AIAA-2010-7155, 2010.
- [6] Antonovski V, Rotavera B M, Petersen E L, et al. Combustion measurements of synthetic fuels at gas turbine conditions [R]. AIAA-2007-5667, 2007.

- [7] LIU Yue, Wilson C W, Blakey S, et al. Elastomer compatibility test of alternative fuels using stress-relaxation test and FTIR spectroscopy[R]. ASME Paper GT-2011-46100, 2011.
- [8] Rahmes T F, Kinder J D, Michael H T, et al. Sustainable bio-derived synthetic paraffinic kerosene (bio-SPK) jet fuel flights and engine tests program results[R]. AIAA-2009-7002, 2009.
- [9] Sequera D, Agrawal A K. Combustion performance of liquid biofuels in a swirl-stabilized burner[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(3): 1-9.
- [10] Barata J. Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation[J]. Renewable Energy, 2008, 33(4): 769-779.
- [11] Nozomu H, Yasushi O, Noriyuki M, et al. Fundamental combustion characteristics of palm methyl ester (PME) as alternative fuel for gas turbines[J]. Fuel, 2008, 87 (15/16): 3373-3378.
- [12] Lefebvre A H, Ballal D R. Gas turbine combustion-alternative fuels and emissions[M]. 3rd ed. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 2010.
- [13] 郭新华, 林宇震, 张弛, 等. 离心式同向双旋流器空气雾化喷嘴雾化特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2249-2254.
- GUO Xinhua, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experiment investigation on atomization characteristic of an air-blast atomizer with centrifugal nozzle and co-dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2249-2254. (in Chinese)
- [14] Rodriguez B, Bartsch T M. The United States Air Force's process for alternative fuels certification[R]. AIAA-2008-6412, 2008.
- [15] ASTM. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons (09) [R]. ASTM-D7566, 2009.
- [16] Caillard B, Salvi O. Note on the results and the next step of ALFA-BIRD[EB/OL]. [2011-01-24]. <http://www.alfabird.eu-vri.eu/filedown.aspx?file=7868>.