

膜分离器及其机载应用

蒋东升^{1,2} 孙兵² 刘文彪¹ 方玲¹

(1. 中航工业合肥江航飞机装备有限公司, 合肥, 230035; 2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京, 100083)

摘要: 为了满足飞机防火防爆要求, 膜分离器作为机载油箱惰化系统的关键部件在国外军、民机已经装机使用, 在国内膜分离器处于研制阶段, 正逐步向军、民用飞机推广应用。分析了国内外现状, 对膜分离器工作机理进行了阐述, 详细论述了膜分离器研制过程中涉及到的膜材料、膜制备工艺、膜分离器, 总结了影响膜分离器性能的主要参数; 进行了膜分离器在机载惰化中应用的试验研究, 总结了研发和应用中得到的经验, 有利于膜分离器今后的研发和机载惰化中的应用。

关键词: 膜分离器; 机载油箱惰化; 防火防爆; 膜材料; 膜制备工艺; 试验研究

中图分类号: V288 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)S-0168-05

Membrane Separator and Its Application to Airborne Inerting

JIANG Dongsheng^{1,2}, SUN Bing¹, LIU Wenbiao¹, FANG Ling¹

(1. Hefei Jianghang Aircraft Equipment Co. LTD, Aviation Industry Corporation of China, Hefei, 230035, China;
2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing, 100083, China)

Abstract: In order to meet the requirements of fire-proof and explosion-proof, membrane separator, the key part of an aircraft fuel tank inerting system, has been widely used in foreign countries and in the development stage within china. Next, it will gradually be applied to military and civil aircraft. We analyze present situations at home and abroad, expound the working mechanism of the membrane separator, and discuss the membrane material, membrane fabrication technology and the membrane separator in detail. The main parameters affecting the performance of membrane separator are summarized. The experimental study on the application of the membrane separator in the air conditioning system was carried out. The results show our study is beneficial to the future development and application of the membrane separator.

Key words: membrane separator; aircraft fuel tank inerting; fire-proof and explosion-proof; membrane material; membrane preparation technology; experimental study

随着膜分离技术的快速发展, 技术日益成熟, 2003 年 7 月 29 日, 波音公司公布了一套膜分离器以消除飞机油箱爆炸风险。空客公司生产的 A320 飞机油箱空气惰化系统中采用了膜分离器组件进行氧氮分离, 制取富氮气体, 引入油箱使其惰化, 将富氧气体作为废气排出舱外。

国外近年来对于飞机燃油惰性化系统中膜分离器的研究开展了大量的工作, 其技术成熟度已达

到较高的水平, 并应用在了各种军用飞机及商用飞机的机型上^[1-7]。而国内在膜分离器研发及飞机油箱的惰化应用方面还处于初级阶段。高秀峰, 刘卫华等人^[8]采用微分计算方法建立了燃油箱气相空间冲洗惰化的数学模型。汪明明等人^[9]采用数积分方法建立了燃油冲洗和洗涤的数学模型。刘小芳等人^[10]通过建立地面燃油洗涤模拟实验台, 对燃油洗涤引射器展开较为系统的理论分析与实

收稿日期: 2017-05-15; **修订日期:** 2017-06-20

通信作者: 蒋东升, 男, 博士, E-mail: jiangds922@163.com。

引用格式: 蒋东升, 孙兵, 刘文彪, 等. 膜分离器及其机载应用的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S): 168-172. JIANG Dongsheng, SUN Bing, LIU Wenbiao, et al. Membrane separator and its application to airborne inerting [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 168-172.

验研究。而在膜分离器研发方面未见报道。为此,本文对膜分离器工作机理进行了阐述,详细论述了膜分离器研发过程中涉及到的膜材料、膜制备工艺、膜分离器,进行膜组件不同输入条件下的试验,总结了研发和应用中得到的经验,有利于膜分离器今后的研发和机载惰化中的应用。

1 膜分离器工作机理

膜的工作原理是利用一种高分子聚合物薄膜来选择“过滤”进料气而达到分离的目的。当两种或两种以上的气体混合物通过聚合物薄膜时,各气体组分在聚合物中的溶解扩散系数的差异,导致其渗透通过膜壁的速率不同。由此,可将气体分为“快气”(如 H_2O 、 H_2 、 He 等)和“慢气”(如 N_2 、 CH_4 及其它烃类等)。当混合气体在驱动力—膜两侧相应组分分压差的作用下,渗透速率相对较快的气体优先透过膜壁而在低压渗透侧被富集,而渗透速率相对较慢的气体则在高压滞留侧被富集。膜分离器的工作原理如图 1 所示。

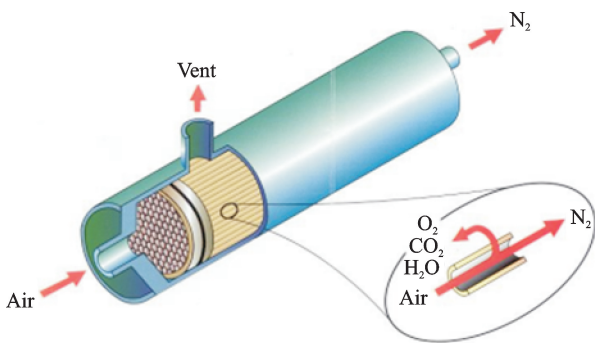


图 1 膜分离器的工作原理

Fig. 1 Working principle of membrane separation

各气体渗透量可表示为

$$Q_i = P_i / L S_m (P_{i2} - P_{i1}) \quad (1)$$

式中, Q_i 为 i 组分的渗透量; P_i 为 i 组分的渗透系数; L 为膜的有效厚度; S_m 为膜面积; P_{i2} 为在膜的高压侧 i 组分分压; P_{i1} 为在膜的低压侧 i 组分分压。

从式(1)可以看出:膜的各气体组分渗透系数、膜的有效厚度、膜面积和膜两侧的分压差构成了膜分离的四要素。其中,膜的各气体组分渗透系数取决于制造商选用的膜材料,膜的有效厚度取决于膜的制备工艺,膜面积取决于膜结构形态(板式、管式、中空纤维式等)和装填的数量,膜两侧的分压差取决于气源的引气压力和富氧气体排空的环境压力之差。

渗透系数(P)是一定温度和一定压力下,各种膜-气体系统的特性常数。其值一般在 $10^{-12} \sim$

10^{-4} 之间。

气体渗透速率(J):对于无法准确估算出膜厚度 L 的情况下,通常不考虑它的厚度而采用 J 的形式表述。其计算公式

$$J = P/L \quad (2)$$

J 值可以根据气体 A 、 B 透过膜的分析测试得到。

分离系数 α : α 是评价气体分离膜性能的另一重要指标。混合气中的 X 、 Y 均可独立从膜透过,则它的(P)或(J)之比就是分离系数

$$\alpha = P_A / P_B, \alpha = J_A / J_B$$

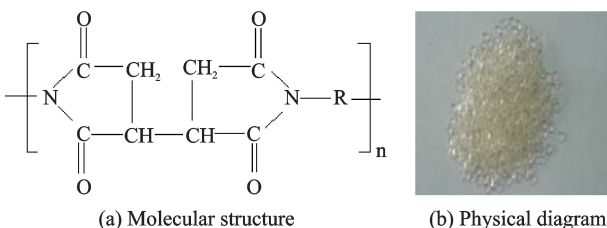
为了提高混合气体的分离效率,一定要选用渗透系数差较大的膜,即分离系数 α 较大的膜。 α 值越高,说明其分离性能越好。

2 膜分离器的研究

膜分离器的核心是膜,膜的性能主要取决于膜材料、膜的结构形态和制膜工艺。其次,要考虑膜分离器的结构形式、使用的引气条件以及富氧排气口的环境压力。

2.1 膜材料

膜材料是研发膜分离器的关键问题之一,理想的气体分离膜材料应该同时具有高的透气性和良好的透气选择性,高的机械强度,优良的热和化学稳定性以及良好的成膜加工性能。但在实际工业应用中,往往很难找到能同时满足上述要求的膜材料,选择和寻找具有优异性能的膜材料一直是膜技术开发与研究的热点课题。目前在机载惰化中常用的膜材料有:聚苯醚(PPO)、聚砜和聚酰亚胺等,聚酰亚胺的分子结构图和实物图如图 2 所示。



(a) Molecular structure

(b) Physical diagram

图 2 聚酰亚胺的分子结构图和实物图

Fig. 2 Molecular structure and physical diagram of Polyimide

常见的膜结构形态有中空纤维式,螺旋卷式,平板式和管式等。中空纤维式膜组件具有填充密度大、承压能力强等优点。对于机载惰性气体发生系统来说,由于飞机环境的特殊性,例如空间有限、要求高压操作以提高发动机引气的利用率等,中空纤维式膜分离器目前已广泛应用于机载惰性气体发生系统中。

中空纤维膜具有很薄的致密分离层以及多孔网状支撑层使得膜在能承受两侧较大压差的同时,气体通过膜壁的阻力很低,有较高的渗透速率;同时,在细小的空间中提供巨大的分离面积,使膜分离器紧凑高效;通过真空涂层工艺修复以防止机械缺陷产生孔道筛分而降低分离系数。

2.2 制膜工艺

合理先进的制膜工艺和最优化的工艺参数,是制作优良性能中空纤维膜的重要保证。应用于机载油箱惰性化的中空纤维膜通常采用干湿法纺丝工艺制备的。膜丝制备工艺:铸膜液的制备(原料树脂、致孔剂、溶剂三者高温搅拌混溶,过滤,保温脱泡)和芯液通过喷头(喷丝板)挤压喷出,空气间隙中膨胀、拉伸成型,进入凝胶浴浸泡脱除添加剂固化,进行后处理。膜丝制备工艺流程图如图3所示。

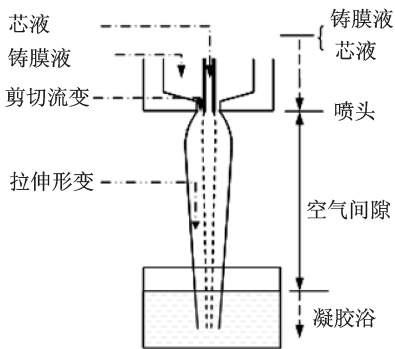


图3 膜丝制备工艺流程图

Fig. 3 Procedure of spinning threads

制膜过程中,对纺丝的压力、纺丝的温度、缠绕速度等参数的控制,则影响着中空纤维膜的几何形状,如直径、壁厚等,影响膜质量的关键因素是:树脂的粘度,致孔剂和溶剂的品种,制膜液的配比,拉伸速度、凝固浴的温度、组成等。

中空纤维膜的丝封装工艺,中空纤维膜组件的真空涂层工艺,环氧树脂端头的切割工艺,等等工艺过程和参数的控制至关重要,对膜分离器的性能产生了重大影响。

2.3 膜分离器

为了最大限度的增加膜面积,将高分子聚合物纺成中空纤维丝,这样在细小的空间中提供巨大的分离面积,而数万根细小的中空纤维丝浇铸成管束而置于构型承压管壳内即膜分离器。膜分离器结构形式如图1所示。

压缩空气进入分离器后,压缩空气走中空纤维丝内,沿纤维丝的一侧轴向流动,“快气(O_2 等)”不断透过膜壁通过渗透气出口排出,而“慢气”(N_2 等)滞留在纤维丝内,则从与气体入口相对的另一端非渗透气出口排出。

膜分离器的性能是由膜纤维分离性能和膜芯结构(长度、粗细、疏密)决定的。膜芯结构长、粗、密有利于提高膜分离的技术指标,一定的压力、温度、氧浓度条件下,产品气流量随着膜芯结构变长、变粗、变密会有相应增加。

膜分离器的性能指标受膜壳体的空气口、富氮口、富氧口的位置及口径大小的影响,为了提高膜分离器的性能指标,优化膜壳体设计,有利于膜分离器性能指标的提高。

在膜分离器生产过程中,膜芯端头浇注、膜封装以及使用耐高低温材料的密封圈是需要确保的环节,这对膜分离器的性能指标产生间接影响,若存在缺陷,会对膜分离器的性能指标产生重大影响。

机载惰性化应用中膜分离器研究过程中,需要考虑在保证膜分离性能的条件下,减轻膜分离器的质量,对于不需承压的壳体采用了薄的铝件,减轻膜分离器的重量和体积。

3 试验

3.1 试验装置

试验选用一根 $\phi 200\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 材料为聚酰亚胺的膜分离器作为试验样件。

膜分离器试验装置(如图4所示),试验装置包含气源输入处理单元、输出调节单元以及测量单元,气源输入处理单元由空压机、储气罐、冷干机、开关阀1、过滤器、可调减压器、加热器组成;输出调节单元为流量调节阀;测量单元由流量计1、压力表、温度表1、真空表、温度表2、流量计2、测氧仪组成;测量单元的测试设备保证了试验数据的准确性,其它单元为试验功能性单元,确保试验的正常进行。

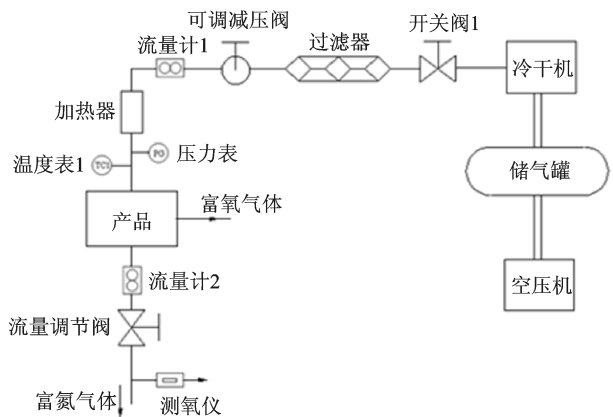


图4 膜分离器试验装置

Fig. 4 Testing devices of the membrane separator

3.2 试验方案

试验的目的是为了测试膜分离器在不同的工作条件下的性能,参数如表1所示。

表 1 膜分离器的试验的工况

Tab. 1 Conditions of the membrane separator test

No.	Input Air Pressure/MPa	Working Temperature/°C	Environment Height(h)/Temperature(°C)	N ₂ Concentration of the Product Gas /%
1	0.3,0.4,0.5,0.6,0.7	90	0/20	88, 95, 98
2	0.5	60,80,100,120	0/20	88, 95, 98

4 试验结果及分析

4.1 误差分析

测量设备的测量范围和精度如表 2 所示,由国家计量部门检定并在有效使用期内,本试验的流量计和测氧仪对试验结果影响较大,经过系统误差不确定度评定,本试验装置的不确定度为 1.72,其不确定度水平是在试验可接受的范围内。

表 2 试验中使用的测量设备

Tab. 2 Measuring equipment in the test

Measuring equipment	Measuring range	Measuring accuracy/%
Flowmeter 1/(kg·h ⁻¹)	0~300	1
Flowmeter 2/(kg·h ⁻¹)	0~200	1
Pressure Gauge/MPa	0~1	0.6
Thermometer 1/°C	0~150	0.5
Thermometer 2/°C	-50~50	0.5
Oxygen measuring meter/%	0~30	0.3

4.2 试验结果及分析

膜分离器试验中,在常温常压下,输入空气压力分别为 0.3,0.4,0.5,0.6,0.7 MPa,工作温度为 90 °C 时,输出的产品气的氮气浓度分别为 88%,95%,98% 条件下,测试膜分离器输入空气的流量以及输出产品气的流量。

当工作温度为 90 °C 时,在同一工作温度、输出的产品气的氮气浓度下,膜分离器的输出产品气的流量与输入空气压力之间的关系如图 5 所示,从图中可以看出:在同一工作温度、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入空气压力的增加,输出产品气的流量逐渐增加且增加的趋势基本相同。

当工作温度为 90 °C 时,在同一工作温度、输出的产品气的氮气浓度下,膜分离器的气源输入流量与输入空气压力之间的关系如图 6 所示,从图中可以看出:在同一工作温度、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入空气压力的增加,气源输入流量逐渐增加且增加的趋势基本相同;

膜分离器试验中,在常温常压下,工作温度分别为 60,80,100,120 °C,输入空气压力为 0.5 MPa 时,输出的产品气的氮气浓度分别为 88%,95%,

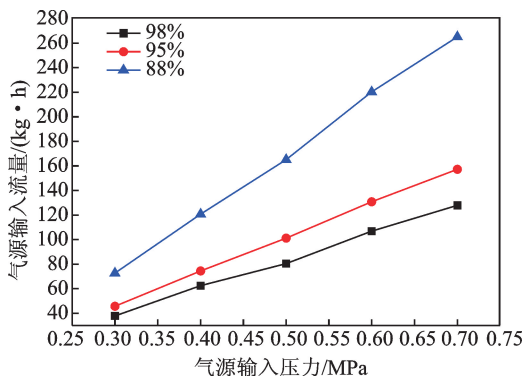


图 5 输出产品气的流量与气源输入压力之间的关系图(90 °C)
Fig. 5 Relationship between the flow of output product gas and the pressure of input air(90 °C)

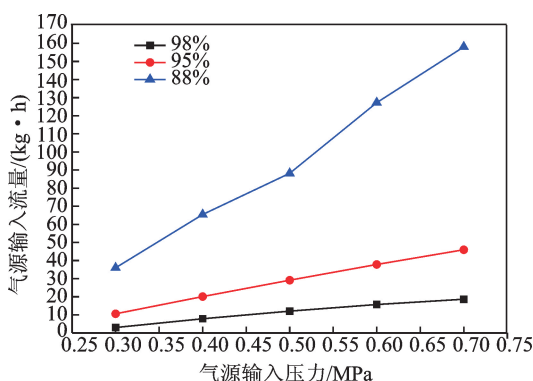


图 6 气源输入流量与气源输入压力之间的关系图(90 °C)
Fig. 6 Relationship between the flow of input air and the pressure of input air(90 °C)

98% 条件下,测试膜分离器输入空气的流量以及输出产品气的流量。

当工作压力为 0.5 MPa 时,在同一工作压力、输出的产品气的氮气浓度下,膜分离器的输出产品气的流量与输入温度之间的关系如图 7 所示,从图中可以看出:在同一工作压力、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入温度的增加,输出产品气的流量变化趋势不一样;当输出的产品气的氮气浓度为 98% 时,随着输入温度的增加,输出产品气的流量逐渐减小且减小的趋势基本相同;当输出的产品气的氮气浓度为 95% 时,随着输入温度的增加,输出产品气的流量基本保持不变;当输出的产品气的氮气浓度为 88% 时,随着输入温度的增加,输出产品气的流量逐渐增加且增加的趋势基本相同。

当工作压力为 0.5 MPa 时,在同一工作压力、输出的产品气的氮气浓度下,膜分离器的气源输入流量与输入温度之间的关系如图 10 所示,从图中可以看出:在同一工作压力、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入温度的增加,输入流量逐渐增加且增加的趋势基本相同。

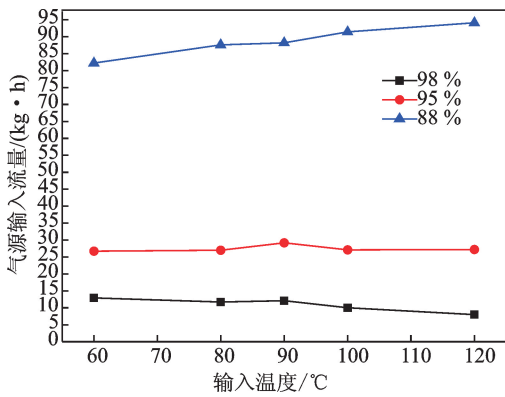


图7 输出产品气的流量与输入温度之间的关系图(0.5 MPa)
Fig. 7 Relationship between the flow of output product gas and working temperature(0.5 MPa)

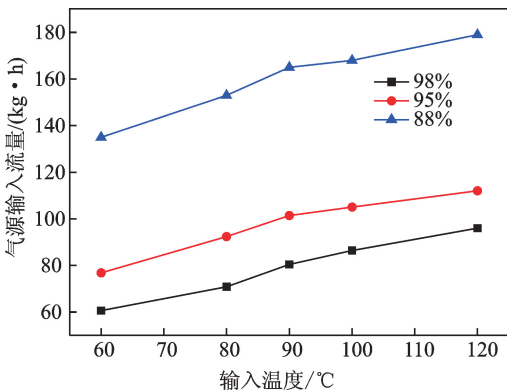


图8 输入流量与输入温度之间的关系图(0.5 MPa)
Fig. 8 Relationship between input air flow and working temperature(0.5 MPa)

5 结 论

通过对膜分离器研制过程的论述,重点论述了膜材料、制膜工艺、膜分离器三个阶段,针对设计参数与性能指标的相互关系进行了理论分析,对膜分离器在不同输入条件下,进行了试验研究,通过试验结果及分析,得出的结论为:(1)在同一工作温度、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入空气压力的增加,输出产品气的流量逐渐增加且增加的趋势基本相同;(2)在同一工作温度、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入空气压力的增加,气源输入流量逐渐增加且增加的趋势基本相同;(3)在同一工作压力、输出的产品气的氮气浓度下,随着输入温度的增加,输出产品气的流量变化趋势不一样;当输出的产品气的氮气浓度为98%时,随着输入温度的增加,输出产品气的流量逐渐减小且减小的趋势基本相同;当输出的产品气的氮气浓度为95%时,随着输入温度的增加,输出产品气的流量基本保持不变;当输出的产品气的氮气浓度为88%时,随着输入温度的增加,输出产品气的流量逐渐增加且增加的趋势基本相同;(4)在同一工作压力、输

出的产品气的氮气浓度下,随着输入温度的增加,输入流量逐渐增加且增加的趋势基本相同。

通过膜分离器研制和试验研究,提高膜分离器在机载惰化中的应用的水平,促进膜分离器在机载惰化中的应用。

参考文献:

- [1] WILLIAM M C. Developing a fuel-tank inerting system [M]. Aircraft Survivability, the Joint Aircraft Survivability Program Office, 2005: 20-23.
- [2] MICHAEL B, WILLIAM M C. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen enriched Air[R]. FAA Report DOT/FAA/AR-01/6, 2001.
- [3] WILLIAM M C. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank [R]. AIAA 2005-4906, 2005.
- [4] BURNS M, CAVAGE W M, HILL R, et al. Flight-testing of the FAA onboard inert gas generation system on an Airbus A320 [M]. Atlantic City, New Jersey, USA: William J. Hughes Technical Center, 2004: 5-8.
- [5] CAVAGE W M. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank [M]. Toronto, Canada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005: 35-42.
- [6] THORMAN J M, RHIM H, HWANG S. Gas separation by diffusion through silicone rubber capillaries [J]. Chem Eng Sci, 1975, 30(7): 751-754.
- [7] DESMARAIS L A, TOLLE F F. Integrated aircraft fuel tank inerting and compartment fire suppression system. Volume 2; Evaluation of advanced airplane fire extinguishants [R]. AIAA-83-1141, 1983.
- [8] 高秀峰,刘卫华,能斌. 飞机燃油箱冲洗惰化过程的理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 16-20.
GAO Xiufeng, LIU Weihua, XIONG Bin. Theoretical study on the process of aircraft fuel tank flushing [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2010, 44(9): 16-20.
- [9] 汪明明,冯诗愚,蒋军晶. 飞机燃油箱冲洗与洗涤惰化技术比较分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 614-619.
WANG Mingming, FENG Shiyu, JIANG Junchang. Comparison and analysis of the technology of washing and washing of aircraft fuel tank [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(5): 614-619.
- [10] 刘小芳,刘卫华,钱国诚. 燃油洗涤引射器充氮性能实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 735-740.
LIU Xiaofang, LIU Weihua, QIAN Guocheng. Fuel scrubbing ejector filling performance of nitrogen experiment [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 735-740.