

μ 子源超导俘获线圈测试杜瓦设计与校核^{*}

闫朝辉^{1,2}, 侯治龙^{3,4}, 文伟^{1†}, 刘志宏¹, 吴杰峰¹, 朱自安^{3,4}, 韦俊^{1,5}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

4. 中国科学院大学, 北京 100049;

5. 合肥聚能电物理高技术开发有限公司, 合肥 230031

收稿日期: 2021-01-27; 接收日期: 2021-02-18

【摘要】 根据高 μ 子源超导俘获线圈整体测试系统的要求, 设计了 μ 子源超导俘获线圈测试杜瓦系统. 包含液氦杜瓦、真空杜瓦及绝热冷屏, 采用 Solid works 软件对测试杜瓦系统进行 3D 建模. 通过对绝热冷屏进行了详细的传热学计算, 绝热冷屏可以满足 μ 子源超导俘获线圈测试过程的漏热需求; 根据 μ 子源超导俘获线圈测试实际工况, 对真空杜瓦和液氦杜瓦进行了 Ansys 有限元软件分析与校核, 得到杜瓦详细的应力及变形结果, 分析表明, 测试杜瓦的设计较为合理, 可以作为工程设计的理论计算依据.

关键词: μ 子源, 俘获线圈, 测试杜瓦, 校核

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.06.005

Design and Verification of Muon Source Superconducting Capture Magnet Test Dewar

YAN Zhaohui^{1,2}, HOU Zhilong^{3,4}, WEN Wei^{1†}, LIU Zhihong¹,
WU Jiefeng¹, ZHU Zian^{3,4}, WEI Jun^{1,5}

1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230031;

3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

5. Hefei Juneng, Electrophysics High Technology Development Co., Ltd Hefei 230031

Received date: 2021-01-27; accepted date: 2021-02-18

【Abstract】 According to the source of high muon captured by the superconducting coil overall requirements of the testing system, designed the muon source captured by the superconducting coil test dewar system, contains the liquid helium dewar, vacuum dewar and adiabatic theater, the adiabatic theater system carried on the detailed heat transfer calculation, adiabatic theater can satisfy muon source captured by the superconducting coil heat leakage testing requirements; According to the actual conditions of the muon source superconducting capture coil test, the

^{*} 国家自然科学基金(批准号:11527811,1235012,10975150)科技部国家重点研发计划(批准号:2017YFE0106100)、中国散裂中子源大科学工程、中美高能物理联合研究基金(KJZD-EW-TZ-M02)资助的课题.

[†] wenwei@ipp.ac.cn

vacuum dewar and liquid helium dewar were analyzed and checked by ANSYS finite element software, and the detailed stress and deformation results of the dewar were obtained. The analysis shows that the design of the test dewar is reasonable and can be used as the theoretical calculation basis for engineering design.

Keywords: Muon source, Capture coil, Test dewar, Check

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.06.005

Reference method: YAN Zhaohui, WEN Wei, HOU Zhilong, LIU Zhihong, WU Jiefeng, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0285 (2020)

1 引言

实验型 μ 子源 (Experimental Muon Source, EMuS) 是将在中国散裂中子源上延伸的重要应用平台, 在多个基础科学和应用科学研究方面具有很重要的应用^[1]. μ 子源方案设计在靶区采用高场强的超导螺线管线圈以提高粒子收集效率, 该超导线圈处于高辐照环境下, 采用覆铝卢瑟福 NbTi 超导电缆采用拉绕的方式完成线圈绕制, VPI 的方式进行绝缘固化. μ 子源超导俘获线圈在 4.2 K 液氮稳定运行时可产生 5 T 中心最高场强.

μ 子源超导俘获线圈的测试需满足线圈正常运行必须温度、真空及绝热环境, 测试杜瓦系统包含真空杜瓦、液氮杜瓦和绝热冷屏. 本研究将针对 μ 子源超导俘获线圈的测试需求, 完成真空杜瓦、液氮杜瓦及绝热冷屏的设计及性能仿真.

2 测试杜瓦整体设计

2.1 测试杜瓦系统需求

μ 子源超导俘获线圈外直径 1445 mm、内直径 1000 mm, 长度 1050 mm, 线圈冷质量约为 2680 kg; 俘获线圈需要在 4.2 K 临界温度以下实现超导运行, 测试系统的真空度、绝热水平直接影响线圈的稳定运行; 测试杜瓦各部件的详细设计需求如下:

(1) 液氮杜瓦故障态结构强度满足 304 L 材料 1.5 倍的安全系数要求, 最大变形不超过 1 mm, 系统总漏率不高于 $1 \text{ E} \sim 10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

(2) 真空杜瓦系统真空度优于 $3 \text{ E} \sim 5 \text{ Pa}$, 在 0.1 MPa 大气压力及线圈重力作用下, 最大变形量不超过 1 mm, 系统总漏率不高于 $1 \text{ E} \sim 10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

(3) 绝热冷屏采用液氮冷却, 整体漏热不超过 15 W;

2.2 总体设计方案

根据 μ 子源超导俘获线圈的测试需求, 完成如图 1 所示 μ 子源超导俘获线圈测试杜瓦系统设计, 主要结构包含: 液氮杜瓦、真空杜瓦、绝热冷屏、线圈吊杆等. 线圈测试系统整体水平放置, 线圈浸泡在液氮杜瓦中并通过 G10 杆支撑固定, 液氮杜瓦通过 G10 吊杆安装在真空杜瓦的吊装法兰上, 绝热冷屏安装在液氮杜瓦和真空杜瓦之间. 采用 Solid Works 进行总体方案的三维建模, 对绝热冷屏的各种漏热工况进行详细的设计计算. 结合实际工况, 设置边界条件对液氮杜瓦和真空杜瓦采用 Ansys 有限元分

析软件进行模拟仿真, 根据仿真结果进一步优化结构设计.

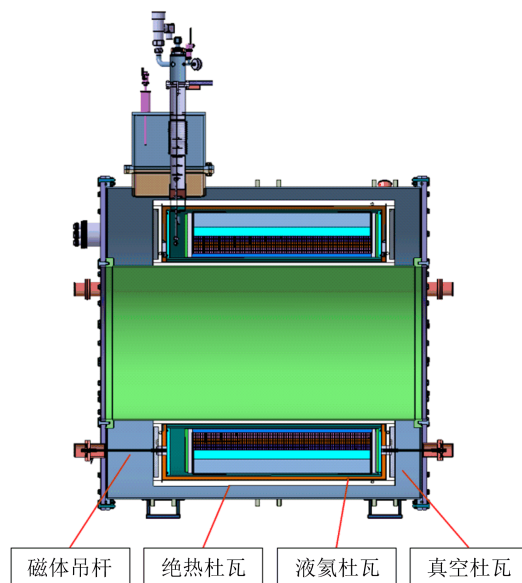


图 1 μ 子源超导俘获线圈测试杜瓦系统设计

3 液氮杜瓦设计与校核

3.1 液氮杜瓦设计计算

根据 μ 子源超导俘获线圈的尺寸及测试要求, 液氮杜瓦设计成圆筒状结构并水平吊装在真空杜瓦内部, 线圈安装在液氮杜瓦内并采用 G10 块填充固定, 杜瓦端板采用焊接的方式与内外筒体连接; 正常态下, 液氮杜瓦内部约为 0.15 MPa 绝压、外部为真空状态; 故障态下, 磁体失超发热引发液氮沸腾, 瞬时大量氦气充满杜瓦内部达到极限后由爆破口泄放; 杜瓦内部承受最高 0.3 MPa 绝压.

液氮杜瓦设计为环形结构, 拟采用 304L 不锈钢板材通过卷弧、焊接的方式进行加工制造, 液氮杜瓦的使用环境为 4.2 K; 液氮杜瓦的相对壁厚 S_0 由以下公式得出^[2]:

$$S_0 = 1.25 D_B \left(\frac{p}{E_t} \times \frac{L}{D_B} \right)^{0.4} \quad (1)$$

式(1)中:

S_0 为圆筒设计壁厚(mm);

D_B 为圆筒直径(mm);

p 为外压设计压力(MPa);

L 为圆筒设计长度(mm);

E_t 为材料温度为 t 时的弹性模量(MPa), 查手册可知 190 GPa.

在圆筒状真空杜瓦设计中, 往往需要考虑材料

的腐蚀时间等因素,圆筒的实际壁厚 S 计算如下:

$$S = S_0 + C \quad (2)$$

式(2)中:

S —圆筒实际壁厚(mm);

S_0 —圆筒计算壁厚(mm);

C —壁厚附加量(mm);

表 1 液氢杜瓦计算结果

液氢 杜瓦	直径 (mm)	计算壁厚 (mm)	壁厚附加 量(mm)	理论值 (mm)	设计值 (mm)
内径	860	3.35	0.22	4.57	8
外径	1500	5.74	0.5	6.24	10

在实际加工过程中筒壁内侧需要抛光减少表面放气率,考虑抛光去除材料对壁厚的影响,考虑到 1.5 倍系统安全系数,拟采用外筒 10mm、内筒 8mm 薄板卷制而成,对接处采用 K 形坡口,焊透并采用射线检测焊缝质量。

3.2 液氢杜瓦故障态分析校核

在故障态,液氢杜瓦的受力状态更苛刻,因此对故障态液氢杜瓦进行 Ansys 有限元仿真计算以验证杜瓦整体力学性能;采用四面体单元格对杜瓦进行网格划分,其中内 & 外筒体网格密度设置为 2 mm,端部法兰的网格密度设置为 3mm,网格划分的单元数及节点数分别为 2007682 和 9887562;以杜瓦吊点设置绑定约束,杜瓦内侧加载 0.3 MPa 压力、外侧为真空环境,杜瓦整体添加重力加速度,环境温度设置为 22 °C。304L 不锈钢的材料属性如下^[3]。

表 2 304L 材料属性

材料特性	参数	材料特性	参数
强度极限(MPa)	483	弹性模量(GPa)	195
屈服极限(MPa)	172	泊松比 σ	0.3

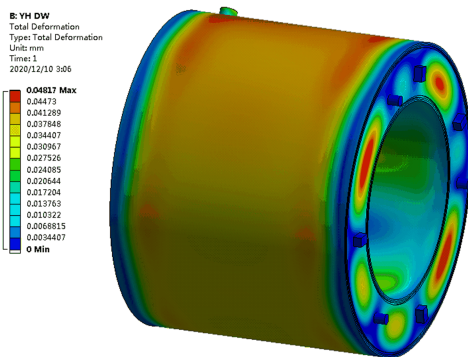


图 2 故障态形变云图

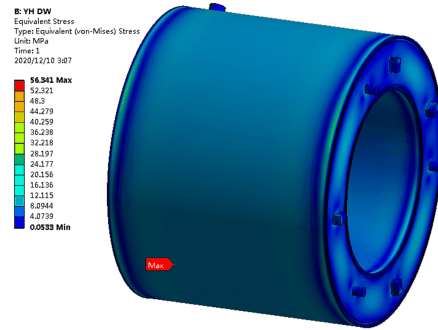


图 3 故障态应力云图

查表(2)可知:304L 不锈钢在常温条件下的弹性模量为 195 GPa,泊松比 $\sigma=0.3$,密度为 7900 kg/m³,导入 Ansys 有限元软件计算得到液氢杜瓦的最大等效应力为 56.34 MPa、分布在杜瓦吊点焊接处,最大变形为 0.048 mm,分布在杜瓦端板吊点附近;查阅 304L 不锈钢安全系数 1.5 时,许用拉应力为 114.6 MPa,液氢杜瓦的材料选型及尺寸设计符合强度要求;

4 真空杜瓦设计与校核

4.1 真空杜瓦设计计算

根据 μ 子源超导俘获线圈液氢杜瓦尺寸、测试需求及冷屏的要求,真空杜瓦设计成圆筒状结构并水平放置,内、外筒体通过端法兰进行连接和密封;真空杜瓦采用 304 不锈钢材料制造;正常工况下,真空杜瓦内部为真空状态,外部承受 0.1 MPa 大气压力,总重约 3.2 吨液氢杜瓦及线圈通过 G10 吊杆安装在真空外筒 D 吊装法兰上。查阅真空设计手册,其杜瓦设计壁厚 S_0 由以下公式得出:

$$S_0 = 1.25 D_B \left(\frac{p}{E_t} \times \frac{L}{D_B} \right)^{0.4} \text{ mm} \quad (3)$$

圆筒状真空杜瓦设计需要考虑材料的腐蚀时间等因素,圆筒的实际壁厚 S 计算如下:

$$S = S_0 + C \quad (4)$$

表 3 真空杜瓦计算结果

液氢 杜瓦	直径 (mm)	计算壁厚 (mm)	壁厚附加 量(mm)	理论值 (mm)	设计值 (mm)
内径	860	3.0	0.22	3.22	8
外径	1800	6.825	0.6	7.425	12

根据工程要求,取 1.5 倍安全系数,外筒体壁厚设定为 11.2 mm。在实际加工过程中筒壁内侧需要抛光减少表面放气率,考虑抛光去除材料对壁厚的影响,采用外筒 12 mm、内筒 8 mm 的 304 板卷制焊

接而成. 拼接焊缝采用 K 形坡口, 焊透并采用射线检测焊缝质量. 在外杜瓦承重方向上进行局部加强以提高结构刚性.

4.2 基于 Ansys 壁厚强度校核

采用 Ansys 有限元软件对真空杜瓦进行静力学仿真. 采用四面体单元类型对真空杜瓦进行网格划分, 其中内、外筒体网格密度为 3 mm, 端部法兰的网格密度为 6 mm, 网格划分的单元数及节点数分别为 1191355 和 4480035. 真空杜瓦地脚面设置为绑定约束, 真空杜瓦外侧加载 0.1 MPa 大气压力、吊杆连接法兰上添加 3.2 吨等效线圈重力, 系统整体添加重力加速度, 环境温度设置为 22 °C. 304 不锈钢的材料属性如下:

表 4 304 材料属性

材料特性	参数	材料特性	参数
强度极限(MPa)	520	弹性模量(GPa)	193
屈服极限(MPa)	206	泊松比 σ	0.31

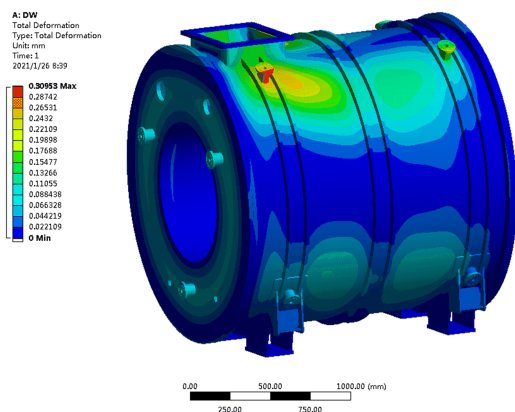


图 4 正常态形变云图

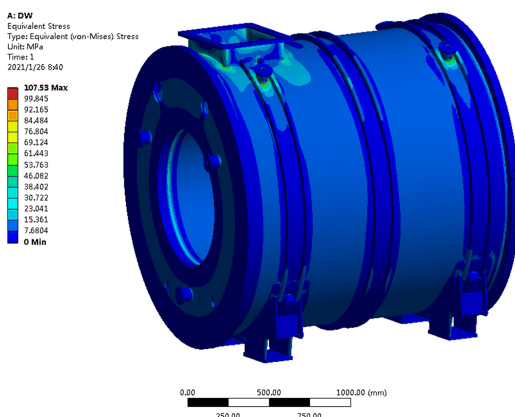


图 5 正常态应力云图

Ansys 有限元分析计算得到真空杜瓦的最大等效应力为 107.53 MPa, 分布在吊杆连接法兰的径管与真空室筒体连接处; 最大变形为 0.31 mm, 分布在吊杆连接法兰面上; 查阅 304 不锈钢安全系数为 1.5, 许用拉应力为 137 MPa, 真空杜瓦的材料选型及尺寸设计符合强度要求.

5 绝热冷屏的设计计算

μ 子源超导俘获线圈采用 NbTi 股线绞缆后覆铝导体进行绕制, 线圈 4.2 K 温区才能满足其正常运行的温度条件; 测试杜瓦系统的漏热过大会直接造成液氮损耗过大, 增加实验成本. 通常情况下, 需要在真空杜瓦和液氮杜瓦之间设置绝热冷屏, 绝热冷屏温度维持在 80 K 左右并稳定运行, 抵挡来自真空杜瓦 300 K 的辐射热, 从而会大幅度降低 300 K 杜瓦向 4.2 K 液氮杜瓦的辐射传热^[5].

5.1 绝热冷屏的结构设计

绝热冷屏分为杜瓦内筒、杜瓦外筒、杜瓦端板、G10 隔断板; 绝热冷屏采用 3 mm 紫铜板采用卷板铆接的方法制造, 杜瓦内 & 外筒表面布置紫铜冷却盘管, 盘管内采用蒸发的冷氦气或液氮来提高系统的冷却效果, 绝热冷屏的温度可达到 80 K 左右温区范围. 绝热冷屏外侧包裹 40 层由双面镀铝薄膜和纤维织网组成的多层绝热层 (MLI), 厚度约为 18 mm, 可进一步降低来自 300 K 真空杜瓦的辐射热影响.

μ 子源超导俘获线圈在正常运行过程时中心场强大约在 5 T 左右, 线圈储能为, 若线圈出现故障导致磁场突变, 对绝热冷屏内部会造成很大的感应涡流, 影响绝热冷屏的安全运行. 将绝热冷屏筒壁及盖板均设计成 2 半个 half 结构通过 G10 板进行隔断; 以减小故障态涡流的影响.

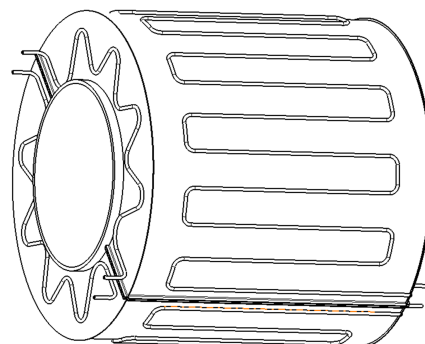


图 6 绝热冷屏设计示意图

μ 子源超导俘获线圈测试过程,绝热冷屏温度约为 80 K;真空杜瓦真空度约为 $3 \text{ E} \sim 5 \text{ Pa}$,温度为 300 K;线圈测试系统由内到外的热量传递比较复杂,绝热冷屏的热负载主要有:环境辐射漏热、支撑部件传导漏热、残余气体漏热等;

5.2 环境辐射漏热

热辐射是唯一一种可以再真空中传播的传热方式,其漏热与材料的温度、表现发射率以及表面积有关,在温度确定的情况下,通常采用降低材料表观发射率来降低辐射热漏热;如材料表面抛光^[4]. 根据斯蒂芬-波尔茨曼方程计算^[6],80 K 冷屏对液氮杜瓦的辐射热负荷 Q_1 为

$$Q_1 = \lambda_1 A_1 (T_2 - T_1) l^{-1} \quad (5)$$

式中:

λ_1 有效导热率;取 $2.51 \text{ E} \sim 4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

A_1 为绝热冷屏外表面积, 10.316 m^2 ;

l 为多层绝热厚度, 0.025 m ;

T_2 为真空杜瓦温度, 300 K ;

T_1 为绝热冷屏温度, 80 K ;

由上述公式计算可知,环境辐射漏热 Q_1 约为 22.79 W .

5.3 支撑部件传导漏热

绝热冷屏支撑部件采用低导热率的 G10 材料,包括液氮杜瓦与绝热冷屏之间的内支撑、绝热冷屏与真空杜瓦间的磁体吊杆,对于支撑部件漏热^{[7][8]}:

$$Q_2 = \lambda_1 \frac{A_2}{l_2} (T_2 - T_1) + \lambda_2 \frac{A_3}{l_3} (T_3 - T_2) \quad (7)$$

式(8)中:

λ_1 为 G10 在 $80 \sim 300 \text{ K}$ 间平均导热系数;取 $0.64 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

λ_2 为 G10 在 $4.2 \sim 80 \text{ K}$ 间平均导热系数;取 $0.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

A_2 为 G10 吊杆的总横截面积; 0.009891 m^2 ;

A_3 内支撑总横截面积; 0.017584 m^2

L_2 为内支撑总长度;取 0.1 m ;

L_3 为磁体吊杆总长度;取 0.15 m ;

T_1 为支撑部件液氮杜瓦端温度,取 4.2 K ;

T_2 为支撑部件真空杜瓦端温度,取 80 K ;

T_3 为支撑部件真空杜瓦端温度,取 300 K ;

通过计算可知,冷屏支撑结构的总导热 Q_2 为 9.85 W ;

5.4 残余气体漏热

真空杜瓦的真空度控制在 $3 \text{ E} \sim 5 \text{ Pa}$ 条件下,依然存在着残余气体,残余气体导热会产生热负荷,计算公式为:

$$Q_3 = K a_0 p (T_2 - T_1) A_4 \quad (8)$$

对于真空状态, K 取 $1.114 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{Pa})$ ^[4],取气体分子在 T_2 、 T_1 表面总的适用系数 a_0 为 0.85 ,真空杜瓦残余气体压强 p 为 $3 \text{ E} \sim 5 \text{ Pa}$, T_1 和 T_2 为冷热表面温度,绝热冷屏外表面积 A_4 为 20.632 m^2 ;计算可知,残余气体导热 Q_3 约为 0.176 W .

由上述计算可知,绝热冷屏的热负载 Q 计算公式为:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (9)$$

式(10)中, Q_1 为环境辐射漏热、 Q_2 为支撑部件传导漏热、 Q_3 为残余气体漏热. 由上述计算可知,冷屏的总体热负载 Q 为 32.816 W ,冷屏设计满足 50 W 的总漏热需求.

6 结 论

根据 μ 子源超导俘获线圈测试需求,设计了测试系统所需的液氮杜瓦、真空杜瓦及绝热冷屏;根据线圈的结构及测试需求,设计了绝热冷屏并详细计算了整体漏热远低于设计需求,由于国内材料特性的差异及加工工艺水平的限制,整体漏热值与计算值可能有偏差,但是可以满足 μ 子源超导俘获线圈测试过程的漏热需求. 根据测试过程液氮杜瓦和真空杜瓦的实际使用环境,分别建立了 Ansys 有限元模型,进行整体的力学仿真,分析结果表明,液氮杜瓦及真空杜瓦的设计较为合理,为后续测试杜瓦的工程设计提供了计算依据.

参 考 文 献

[1] 唐靖宇,周路平,洪杨,缪子源及多学科研究和应用[J]. 物理, 2020, 49(10): 645-656.

[2] 达道安等. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[3] 李雪芹. 40T 混合磁体外真空杜瓦平台设计及优化[D]. 合肥

工业大学, 2015.

- [4] 张帅, 欧阳峥嵘, 李俊杰, 孟秋敏. 40 T 混合磁体冷屏热分析及测试[J]. 低温工程, 2018, (03): 14-17+23.
- [5] 张海峰, 叶海峰, 丁怀况, 章学华, 武义锋, 胡南南. 中小型低温超导磁体中的低温技术[J]. 低温与超导, 2017, **45**(07): 24-28.
- [6] 陈国邦. 最新低温制冷技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 王开松, 白玉成, 葛剑. CFETR 杜瓦冷屏初步设计与热分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2019, **39**(04): 343-347.
- [8] 黄礼凯, 王秋良, 赵保志, 王晖, 李兰凯, 李毅. 1.5TMRI 超导磁体低温容器的拉杆设计与校核[J]. 低温与超导, 2011, **39**(05): 22-27.