

常村矿永久避难硐室防护门研究

韩海荣¹, 高娜², 王岩³

(1. 中交路桥技术有限公司, 北京 100011; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;
3. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176)

摘要:通过分析常村矿井下情况, 确定常村矿永久避难硐室防护门应具备的基本防护功能; 通过抗爆功能研究, 确定了门板结构形式、门板材料, 综合分析避险人员身高、设备尺寸及硐室选址情况, 确定防护门尺寸; 并运用 ANSYS 进行数值模拟分析验证。针对密闭、高温功能研究, 确定了门板锁紧结构形式、密封结构及耐高温充填设计。最后通过密闭水压试验验证防护门抗水压能力。

关键词: 避难硐室; 防护门; 抗爆性; 有限元分析; 水压试验

中图分类号: TD77⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2016)02-0040-06

Research on protective door of permanent refuge haven in Changcun mine

HAN Hairong¹, GAO Na², WANG Yan³

(1. CCCC Road and Bridge Consultants Co. Ltd., Beijing 100011, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: The basic protection function of the refuge haven protective door in the Changcun mine is determined by the analysis of the situation under the Changcun mine. The antiknock function researches determine the door structure and the door material. The protective door sizes of Changcun coal mine are determined by the incident, reflected pressure calculation and the analysis of the hedge personnel, equipment sizes and refuge haven site. Numerical simulation analysis is carried out with ANSYS. According to the function of the sealed and high temperature, the sealing structure, sealing structure and high temperature resistant filling design of door panels are determined. Finally, the anti-hydraulic pressure capability of the protective door is verified by the hydraulic test.

Key words: refuge haven; protective door; anti-explosion performance; finite element analysis; hydraulic test

通过对大量矿难事故统计分析, 矿难事故中人员伤亡多是由于事故区域氧气耗尽、含有高浓度有毒有害气体、逃生路线被阻断而无法及时撤离到安全区域造成的。采用安全密闭空间用于被困人员应急避难, 赢得足够救援时间, 已成为煤矿安全防护的一种新趋势。避难硐室可在煤矿井下灾害突发时, 为被困矿工提供生存空间, 赢得救援时间, 提高避难矿工生还几率。欧美各采煤国将避难硐室作为应急救援工作的重要部分进行了大量的研究, 并积累了数次成功营救经验。国家安监总局也正在积极推进以永久避难硐室为核心的“安全避险六大系统”建设^[1-6]。

收稿日期: 2015-11-13

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK09B00)

通信作者: 韩海荣(1986-), 男, 江苏兴化人, 工程师, 研究方向: 矿井应急避险系统。E-mail: hhrsea@163.com

防护门是避难硐室抵抗火灾、爆炸、瓦斯突出等常见事故破坏的重要防护装置,是避难硐室的第一道也是最重要的一道屏障,因此有必要对其开展研究,保证实现避难硐室防火防爆密闭功能。

目前对防护门的研究多集中在煤矿防突风门、人防工程防护门、救生舱防护门上,重庆煤科院廖黎、苏文叔分析了煤与瓦斯突出的过程,对反向防突风门进行了试验研究,何翔、方秦等人对爆炸荷载作用下人防工程防护门进行了系统研究,常德功、罗星娜等人对矿用救生舱防护密闭门抗爆性能进行了设计研究^[7-11]。

本文以常村矿 N3 采区永久避难硐室为研究对象,对防护门的功能、结构、尺寸、防护性能及相关试验展开研究。

1 防护门功能确定

综合分析常村矿井下人员分布、采区分布、巷道布置及水文地质条件等情况,最终确定在 N3 采区轨道上山与皮带上山间构建永久避难硐室。通过分析资料,常村矿属煤与瓦斯突出矿井,井下可能发生的事故包括:煤与瓦斯突出事故、火灾与爆炸事故、顶板事故及透水事故。因此,该永久避难硐室的防护门应该具备如下功能^[12]:

1) 抗爆功能. 防护门应能抵抗煤尘或瓦斯爆炸事故的破坏,根据《煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定》要求,其抗爆能力不得低于 0.3 MPa。

2) 耐高温功能. 防护门应能抵抗井下火灾事故所引起的高温危害,防止由于高温造成硐室结构及其防护系统的破坏。

3) 密闭功能. 防护门在关闭后,硐室应具备良好的密闭性,防止突出事故产生的 CO 等毒害气体渗入硐室。

4) 抗水压功能. 防护门关闭后,硐室应具备一定的抗水压及密闭功能。

2 防护门防爆性能

避难硐室防护门的防爆性能的提高可以通过 3 种方式进行:选择合适的门体材料,特殊的门体结构设计,增加防护门的厚度。通过对三者因素综合考虑确定防护门体的设计,并通过数值模拟加以验证。

2.1 门板结构形式确定

防护门板结构有平板型和弧形 2 种,受力情况如下分析。

2.1.1 平板结构受力

平板结构受力情况如图 1 所示,其所承受的爆炸冲击应力可由式(1)和式(2)计算。

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = 0.5PS \sqrt{2 - 2\cos 2\alpha}; \quad (1)$$

$$D = \frac{0.5PS \sqrt{2 - 2\cos 2\alpha}}{0.5S/\sin\alpha} = P\sin\alpha \sqrt{2 - 2\cos 2\alpha}. \quad (2)$$

式中, α :爆炸冲击波与门板夹角; β :冲击波的入射角与反射角; P :平板承受冲击波平均压强,Pa; S :防护门表面积, m^2 ; X :冲击波方向反向作用力,N; Y :与冲击波垂直方向反向作用力,N; R :总反向作用力,N; D :防护门所承受的当量应力,Pa。

计算可得,当 α 取最大值 $\pi/2$ 时,总反向作用力 R 为 PS ,当量应力 D 为 $2P$;反向作用力与当量应力随 α 角度的增大而减小。

2.1.2 弧形结构受力

弧型结构计算复杂,现以 1/4 圆弧门进行受力计算,受力情况如图 2 所示,其所承受的爆炸冲击应力可由式(3)和式(4)计算。

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = \frac{\sqrt{5}}{3}PS; \quad (3)$$

$$D = \frac{R}{\pi S} = \frac{\sqrt{5}}{3\pi}P. \quad (4)$$

式中, α :爆炸冲击波与门板切面夹角; β 为冲击波至门板切面的入射角与反射角; P 为弧形门板切面承受冲击波平均压强,Pa。

通过上述计算可知,防护门防护性能的提高可通过 2 方面解决:采用平面结构与正面冲击波成一定角度,或者采用弧形结构。

为减少冲击波对防护门的伤害,同时防止激励效应,常村矿永久避难硐室构建于 2 巷道间,因此门板

主要承受爆炸冲击波侧面压力,最大可能降低冲击波对防护门的冲击压力.同时门体采用弧形结构需设计专用冲压模具,成本急速增加,且本次防护门设计强度为0.3 MPa,因此常村矿永久避难硐室防护门最终选用平面门板结构.

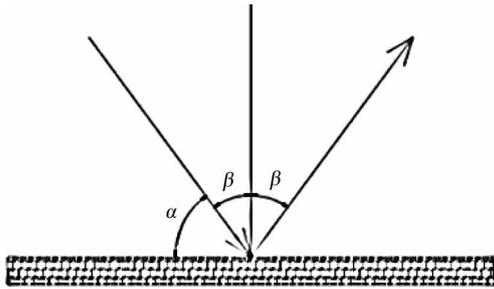


图1 平板防护门受力示意图

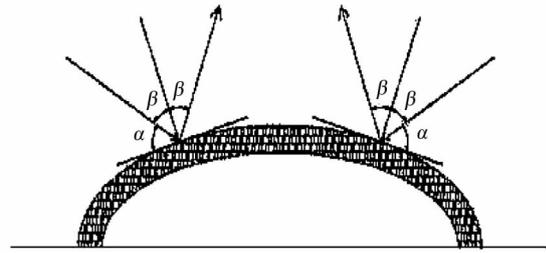


图2 弧形防护门受力示意图

2.2 门板材料确定

防护门材料的选择对防护功能的实现起着至关重要的作用,现有防护材料通常分为3种^[13,14]:

1)金属材料.常见的金属材料有Q235,45钢,70钢,16Mn等,其力学强度对比如表1所示.

2)防爆材料.防爆材料主要通过极高的表面迅速地吸收了大量热能,及其特殊的“蜂窝”状结构阻滞了火焰和压力的传播实现防爆.

3)复合材料.常见的复合材料有陶瓷材料、泡沫材料、纤维材料.

对常村矿进行现场监测,硐室所在位置温度在16℃,相对湿度85%以上,粉尘浓度较高.本次避难硐室抗压强度确定为0.3 MPa,抗压强度相对较低.

防爆材料由于是蜂窝结构,气密性无法保证.陶瓷材料承受的拉伸能力较小,需为其配备韧性背板,且造价高.纤维和泡沫材料具有良好的减振和能量吸收能力,但需要较高厚度并加装背板且造价高,同时井下高浓度粉尘、高湿环境会对其性能产生影响.

综合考虑矿井环境、材料性能、成本、制造可行性,确定采用金属材料作为门体防护材料.

70钢的屈服强度最大,能够承受较大压力,但其成型工艺易发生龟裂,导致门板变形;Q235属于最常用门体材料,但是屈服强度偏小,且不耐腐蚀,在井下高湿环境十分容易发生锈蚀现象,从而防护性能降低.45钢与16Mn的力学性能比较接近,但是16Mn钢耐腐蚀性较强.

通过比较金属抗拉、抗压性能,以及制造可行性、成本,最终确定常村煤矿永久避难硐室防护门选用16Mn作为门板主材料.

2.3 防护门尺寸研究

2.3.1 防护门高、宽确定

1)防护门高度

防护门高度应满足避险人员身高及硐室内最大防护设备尺寸要求.通过测算,常村矿井下掘进、综采、安装回撤及其他作业人员的平均身高为1 730 mm;硐室内不可拆分最大防护设备为氧气控制装置,其尺寸为550 mm×280 mm×1 250 mm,据此确定防护门高度为1 800 mm.

2)防护门宽度

通过测算,井下作业人员的身体平均宽度为700 mm,硐室内最宽防护设备生氧净化器的宽度为600 mm,据此可确定防护门宽度为1 200 mm.

2.3.2 防护门板厚度确定

防护门的抗压性能可通过提高防护材料厚度来提高,但防护门自重会增加,机动性能会下降.

防护门板厚度由其所承受的入射压力、反射压力及静压载荷确定^[15,16].

1)防护门入射压力

$$\Delta P_{\lambda} = \frac{0.196r}{r+1}(M^2 - 1). \quad (5)$$

式中, r :空气比热比,取1.4; M :冲击波速度和介质中音速比.

表1 门板抗爆材料强度对比

材料	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
Q235	235	210
45钢	355	204
70钢	420	210
16Mn	350	206

以冲击波在 600 m/s, 计算得入射压力 ΔP_λ 为 0.24 MPa.

2) 防护门厚度

$$D = \frac{KB}{2\sigma_D} \left(2\Delta P_\lambda + \frac{6\Delta P_\lambda^2}{0.7 + \Delta P_\lambda} \right). \quad (6)$$

式中, K : 安全系数, 取 1.5 ~ 2; B : 防护门宽度, m; σ_D : 门体拉应力, MPa; ΔP_λ : 入射压力, MPa.

计算得防护门板厚度 D 为 8 mm, 考虑制作及安全系数确定防护门厚度为 10 mm.

2.4 防护门抗爆性能数值模拟分析

通过有限元数值模拟分析方法, 对防护门的抗爆性能进行研究. 建立常村矿防护门物理模型, 确定门体荷载, 利用 ANSYS 软件进行数值模拟分析, 从而判定常村矿避难硐室防护门的材料、厚度及结构是否满足抗爆性能的需求^[17-19].

2.4.1 物理模型建立

防护门模型厚度为 10 mm, 材料为 16Mn 钢, 弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.31, 屈服强度为 350 MPa, 设定门板载荷为 1 MPa, 对防护门进行网格划分, 建立防护门数值分析模型.

2.4.2 数值模拟结果分析

利用 ANSYS 软件, 对施加载荷后的防护门模型进行模拟, 分析器受力和位移情况如图 3 和图 4 所示.

1) 门体受力分析

从图 3 可发现, 门板局部出现凹陷, 但未进入屈服阶段, 未发生塑性变形, 门板能够抵抗 1 MPa 冲击波载荷的作用, 其强度满足要求. 同时发现在密封面约束区域出现应力集中现象, 因此密封面需要增大.

2) 门体结构位移分析

从图 4 可以明显发现防护门的中间是变形最大区域, 并以门体中心为椭圆中心, 成逐渐变形递减趋势, 门体的密封面处变形量最小. 因此考虑在位移较大处设置筋板进行加强.

有限元分析结果证明, 常村矿 16Mn 钢、10 mm 厚平板型防护门能够抵抗 1 MPa 爆炸力冲击而不发生较大形变, 满足井下防火防爆系统抗爆能力不低于 0.3 MPa 的要求, 但是为了加强门体整体抗爆和密封性能, 可对门板中心进行加强筋设计.

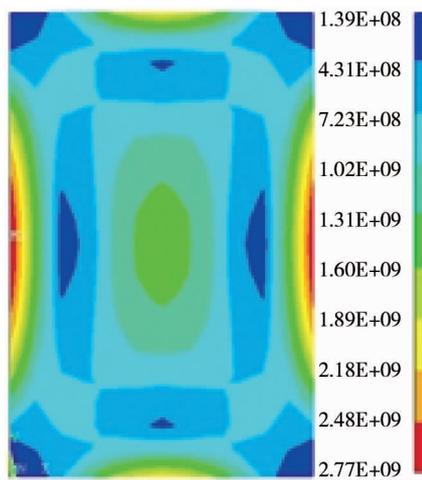


图3 防护门压力分布云图

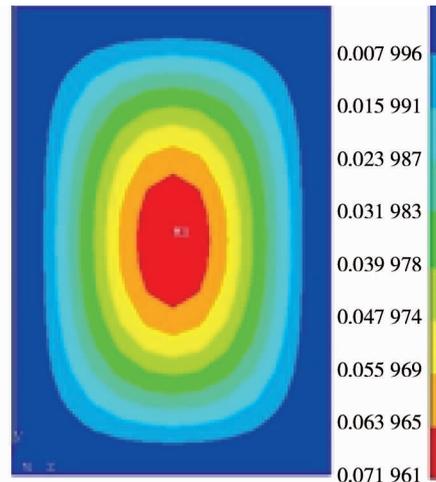


图4 防护门位移变化云图

2.5 支护结构确定

为加强防护门的抗爆能力, 必须加强门、墙的整体抗爆性. 为此, 常村矿永久避难硐室的防护门采用焊接钢筋支护结构, 通过采用防护门支护钢筋结构及门、墙整体浇筑方式, 保证防护门、墙的整体抗爆性及密闭性. 当防护门受到爆炸冲击时, 冲击力将通过门体支护结构传递给墙体, 从而分散、释放冲击力.

3 防护门密闭、耐高温设计

3.1 密闭锁紧结构确定

防护门的密闭锁紧结构直接影响门体密封性能, 常用锁紧方式包括气压锁紧、液压锁紧、电动锁紧和机械锁紧等.

由于常村煤矿井下环境条件恶劣, 湿度达到 85% 以上、粉尘浓度较高等, 为确保防护门安全可靠, 应

尽量不采用电动及感应电子器件,因此确定防护门选用机械手动锁紧结构,如图5所示。

通过设置在门板中部的齿轮传动机构牵引2套连杆机构实现防护门密闭锁紧,人员通过转动门板上的手轮启闭防护门。锁紧块采用6个,左右两侧各3个,连杆动作时,左侧与右侧运动方向相反,在门框上设置6个对应的锁紧点。为开启方便,在防护门设置一套一点锁紧装置,快速开启或锁紧防护门。

门体采用门轴式开启方式,向外开启。门转轴承受门扇自重引起的径向荷载和门扇传来的反向压力。径向荷载的大小与门扇的自重、门扇重心到轴心铅垂线的距离成正比,与2铰页链的中心距离成反比。门轴与门扇之间采用螺栓连接,为使门扇受冲击波正压力作用时门轴不约束门扇,将轴的螺栓孔做成椭圆形,其孔径稍大于螺栓直径。

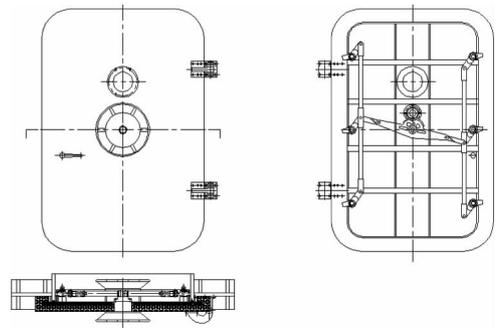


图5 防护门锁紧结构

3.2 耐高温、密封结构确定

为承受瞬时高温,需从2方面对防护门体进行处理:表面喷涂与内部充填。

1) 表面喷涂

防护门体表面涂有多层防火、防锈、防腐专用涂层,耐火涂料厚度为1 mm。

2) 内部充填

防护门体采用双层钢结构,内部充填厚度为50 mm的隔热层,阻断内外热桥。隔热材料选用含锆型硅酸铝棉,为防止隔热材料老化,延长隔热层使用寿命,内部附着一层不锈钢护板,门体材质示意如图6所示。

避难硐室防护门基本的性能就是密闭性,通过密闭保证隔绝有毒有害气体对避难人员的伤害。

防护门密闭主要是门扇与门框间的密闭。加大门体与门框的密封面,宽度为40 mm。门框密封面采用燕尾槽结构,采用特制密封胶条提高密闭门的密封性能。

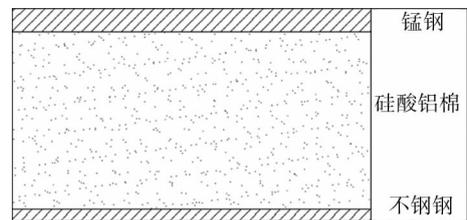


图6 门体材质示意图

4 防护门抗水压性能

4.1 水压试验方法

将2扇防护门焊接在密封注水容器两端,保证容器的整体密封性(如图7和图8所示);在容器底部安装注水阀门、排水阀门、压力表、管路及加压泵,容器顶部安装压力表及排气阀,用于测量容器内的压力变化,即门体承压情况;向密封容器内注满清水后,对容器进行加压,记录门体的形变及顶部压力表的数据,直至门体发生塑性形变,记录并分析门体所能承受的最大水压及形变情况。

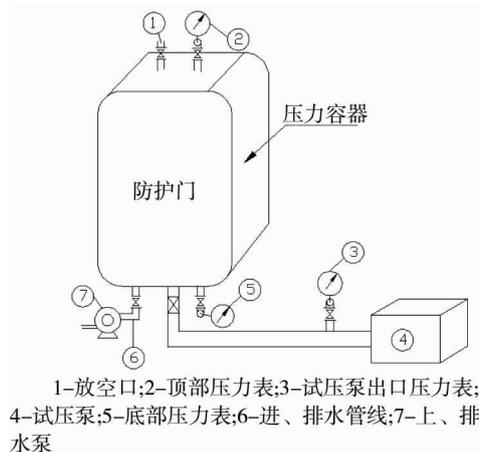


图7 水压试验原理图



图8 防护门密闭防水试验容器

4.2 试验结果

密闭充水容器内水压变化范围为 0.0 ~ 1.6 MPa,随着水压增加,门体经历“明显形变 - 基本不变 - 缓慢增加 - 最大形变”的过程,在压力值为 1.6 MPa 时,门板无泄漏和异常声响,此时门板中心形变量为 14 mm,继续增加水压,门体中心形变量增加,同时出现渗水现象,其承压与形变量关系如图 9 所示. 该试验证明常村矿防护门能承受 1.6 MPa 水压作用,并保持良好的密闭性能.

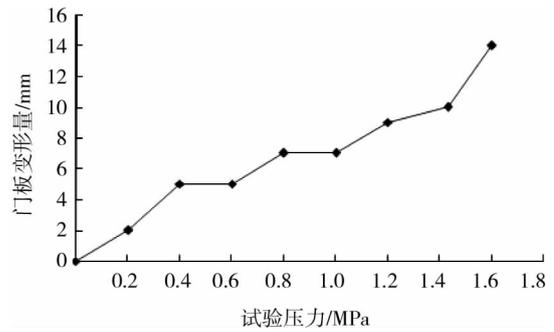


图9 防护门压力 - 形变曲线

5 结论

- 1) 常村矿永久避难硐室防护门主要功能为抗爆、耐高温、密闭和抗一定的水压。
- 2) 对平面和弧形 2 种面板结构进行受力分析,确定防护门采用平面结构与正面冲击波成 90° 布置。
- 3) 经过井下环境、材料性能、成本、制造可行性分析,确定 16Mn 钢为防护门体及门框材料。
- 4) 研究确定防护门尺高 1 800 mm,宽 1 200 mm,门板厚度为 10 mm. 门框与墙体采用钢筋支护、整体浇筑方式保证门体的抗爆性及密闭性。
- 5) 防护门板能够承受 1 MPa 爆炸力冲击而不发生较大形变,提出在门板中心增加配筋结构以加强抗压性。
- 6) 防护门采用机械手动楔形锁紧方式,采用双层钢结构,内部充填硅酸铝棉进行热桥隔绝. 门框密封面采用燕尾槽结构,内部填塞密封胶条。
- 7) 该防护门最大抗水压力为 1.6 MPa,对应门板中心形变量为 14 mm,密闭性良好,减压后无永久性变形。

参考文献:

- [1] 赵利安,王铁力. 国外井工矿避灾硐室的应用及启示[J]. 煤矿安全,2007(8):88-91.
- [2] 杨大明. 煤矿井下紧急避险系统的建设与发展[J]. 煤炭科学技术,2010(11):6-9.
- [3] 马培贤,韩海荣. 新型应急避难硐室研究与设计[J]. 工业安全与环保,2014,7(7):47-50.
- [4] Michael A. Parametric design of a coal mine refuge chamber[D]. West Virginia University,2007.
- [5] MSHA. Refuge Alternatives for Underground Coal Mines Final Rule[S]. 2008.
- [6] 栗婧,金龙哲,汪声. 基于应急避难空间的矿山安全防护体系研究[J]. 中国安全科学学报,2010,20(4):155-156.
- [7] 廖黎,苏文叔. FM 反向防突风门的试验研究[J]. 煤炭工程师,1998,12(S1):26-28.
- [8] 何翔,庞伟宾,曲建波,等. 防护门在空气冲击波和破片作用下的破坏[J]. 爆炸与冲击,2004,9(5):475-479.
- [9] 方秦,谷波,张亚栋. 钢结构防护门结构优化的数值分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2006,12(6):557-562.
- [10] 常德功,高新君,费振忠. 新型矿用救生舱防护密闭门的抗冲击性分析[J]. 机电工程,2013,10(10):1178-1182.
- [11] 罗星娜,黄平,钱新明. 矿用救生舱防爆门抗爆结构安全性数值分析[J]. 高压物理学报,2013,12(6):879-887.
- [12] 何学秋. 中国煤矿灾害防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [13] 孙刚,刘预,冯芳,等. 聚氨酯泡沫材料的研究进展[J]. 材料导报,2006,3(3):29-34.
- [14] 邵磊,余新泉,于良. 防弹纤维复合材料在装甲防护上的应用[J]. 高科技纤维与应用,2007,4(2):31-35.
- [15] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [16] 钱七虎,王明洋. 高等防护结构计算理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2009.
- [17] 尚晓江. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [18] 廖黎莹,丁国清. 冲击载荷作用下金属防护外壳的防爆仿真分析[J]. 计算机仿真,2009,8(1):20-26.
- [19] 陆新征,江见鲸. 抗爆门结构考虑接触影响的动力有限元分析[J]. 力学与实践,2003(2):24-26.