

# 基于泡沫沥青法实现温拌的沥青混合料 室内试验对比

杨彦海,张旭,刘梦晴,杨野

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 为减缓沥青老化,降低污染、节约能源,实现沥青混合料低温施工,研制泡沫沥青温拌技术. 方法 通过沥青发泡试验,确定最佳发泡条件;基于马歇尔试验,分析研究在 AC-13、AC-16 和 AC-20 级配下泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料的温度-空隙率变化规律;通过高温车辙试验、低温弯曲试验和冻融劈裂试验分析比较泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料的路用性能. 结果 以温度为控制指标,泡沫沥青温拌混合料空隙率减小,具有较好的可压实性;以空隙率为控制指标,泡沫沥青温拌混合料较热拌沥青混合料压实温度降低 15~20℃;泡沫沥青温拌混合料高低温及水稳定性略低于热拌沥青混合料. 结论 泡沫沥青温拌混合料性能满足现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)要求,可实现低温施工.

**关键词** 道路工程;沥青路面;泡沫温拌;空隙率;路用性能

中图分类号 TU416;U41

文献标志码 A

## Comparative Study on Indoor Tests of Warm Asphalt Mixture Based on Foamed Asphalt

YANG Yanhai, ZHANG Xu, LIU Mengqing, YANG Ye

(School of Transportation Engineering, Shenyang JianZhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to slow down the aging of asphalt, reduce pollution, save energy and achieve the low-temperature construction of asphalt mixture, a warm mixing technology for foamed bitumen is developed. The optimum foaming condition is determined by asphalt foaming tests, rules of temperatures and air voids of warm-mixed and hot-mixed foam asphalt mixture which are AC-13, AC-16 and AC-20 are analyzed through Marshall tests, road performance of warm-mixed and hot-mixed foam asphalt mixture are analyzed through high-temperature rutting test, low-temperature bending test and freeze-thaw splitting test. Taking temperature as control index, foamed warm-mixed asphalt mixture has small void ratio and good compaction. Taking void ratio as control index, the compaction temperature of foamed warm-mixed asphalt mixture is less 15~20℃ than hot-mixed asphalt

收稿日期:2017-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51178278)

作者简介:杨彦海(1972—),男,教授,博士,主要从事道路结构与路面材料、道路施工与养护技术、废旧材料循环再利用等方面研究.

mixture. The stability of high temperature, low temperature and water for foamed warm-mixed asphalt mixture is worse than hot-mixed asphalt mixture. The performance of foamed warm-mixed asphalt mixture meets the requirements of the current technical specification“Technical Specification for Asphalt Pavement Regeneration”(JTG F40), so that low temperature construction can be achieved.

**Key words:** road engineering; asphalt pavements; foamed warm mix asphalt; air voids; road performance

温拌沥青混合料一般是采取降低沥青黏度,使其施工拌和温度介于热拌沥青混合料(150~180℃)和冷拌沥青混合料(常温,10~40℃),路用性能达到或接近热拌沥青混合料的新型沥青混合料<sup>[1-5]</sup>. 温拌沥青技术减少热拌沥青混合料在施工过程中大量有害气体的排放,弥补冷拌沥青混合料使用的局限性<sup>[6-13]</sup>,可以延长施工周期. 泡沫沥青温拌技术是一定的水与高温(140℃以上)沥青接触,水遇热汽化,沥青体积膨胀,黏度降低,从而实现温拌<sup>[14-16]</sup>. 笔者主要从发泡特性、泡沫沥青温拌混合料压实特性和路用性能进行泡沫温拌技术研究.

1 沥青最佳发泡条件

1.1 试验装置及方法

采用维特根发泡装置进行试验,型号WLB 10S,辅助设备钢桶直径为275 mm、容积为20 L,量尺和精度0.1 s的秒表. 胶结料采用辽河90号道路石油沥青,加热温度分别为160℃、170℃和180℃,发泡用水量分别为2%、3%和4%,水温为室温,每次发泡试验平行进行3次.

1.2 沥青发泡试验结果分析

以膨胀率和半衰期作为评价沥青发泡特性的指标. 膨胀率是指沥青发泡状态下测量的最大体积与未发泡状态下的体积之比,膨胀率越大,拌制的泡沫混合料质量越好,一般膨胀率不小于10倍. 半衰期是指泡沫沥青最大体积缩小到该体积一半所用的时间,半衰期越长,说明泡沫越不容易衰减,可以与集料有较长时间的接触和拌和,以提高泡沫沥青

混合料的质量,一般半衰期不小于8 s<sup>[17]</sup>. 不同温度 and 不同发泡用水量下沥青发泡按对数公式 $y = a \ln x + b$ ( $a$ 、 $b$ 为回归系数),以半衰期为 $X$ 轴,膨胀率为 $Y$ 轴,绘制不同温度下沥青发泡特征曲线,最上方曲线所对应的温度为最佳发泡温度,即为膨胀率和半衰期的最佳值<sup>[18-20]</sup>(见图1).

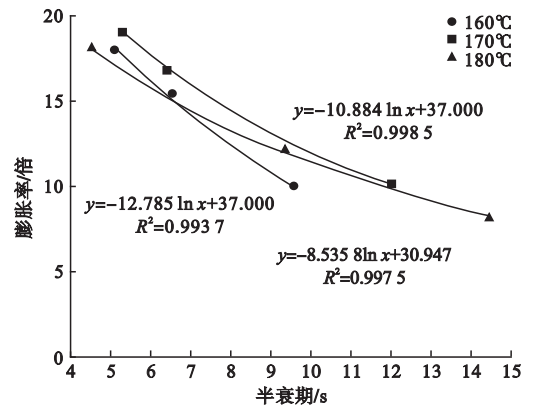


图1 不同温度下沥青发泡特征曲线  
Fig. 1 The characteristic curve of asphalt foaming at different temperatures

由图1可知,170℃时沥青发泡特征曲线位于最上方,说明170℃时膨胀率和半衰期最佳,发泡效果较好,因此笔者选择170℃作为最佳发泡温度进行沥青发泡. 170℃时发泡用水量与膨胀率、半衰期的关系曲线(见图2)进而确定最佳发泡用水量. 由图2分析可知,根据膨胀率和半衰期结果沥青发泡需要的用水量为2.0%~2.6%,取其平均值作为最佳发泡用水量,最佳发泡用水量为2.3%,此时膨胀率为12倍,半衰期为10 s,满足现行《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41)中膨胀率不小于10倍,半衰期不小于8 s的要求.

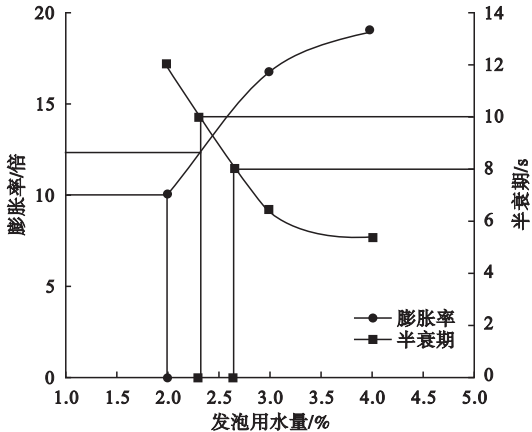


图2 170 ℃沥青发泡用水量曲线

Fig.2 Water consumption curve of asphalt foaming at 170 ℃

表1 三种级配筛孔通过率										
Table 1 Percentage rate of three gradation										
级配	筛孔尺寸/mm									
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
AC-13	99.6	98.3	94.6	79.2	56.6	36.9	22.2	15.1	9.8	7.2
AC-16	98.8	95.4	86.1	67.2	46.5	30.9	19.9	13.9	9.2	7.0
AC-20	92.9	82.6	71.8	58.4	39.4	27.8	17.9	12.3	8.0	5.9

2.3 最佳沥青用量确定

采用马歇尔击实法成型不同沥青用量的试件,通过测量体积指标、60 ℃马歇尔稳定性和流值确定最佳沥青用量.最终确定AC-13的最佳沥青用量为4.6%,AC-16的最佳沥青用量为4.4%,AC-20的最佳沥青用量为4.2%.最佳沥青用量情况下,沥青混合料各项路用性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中技术要求.

3 泡沫沥青温拌混合料与热拌沥青混合料压实试验

3.1 马歇尔试件成型条件确定

选取AC-13、AC-16和AC-20三种级配混合料进行马歇尔试件成型,通过测定不同成型温度下沥青混合料空隙率大小进行泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料压实性能研究,试验条件如表2所示.

2 材料组成及配合比

2.1 沥青胶结料

胶结料采用辽河90号道路石油沥青,各项技术指标均符合现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中的要求.

2.2 集料组成

粗、细集料和矿粉,各项技术指标均符合现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中的要求,采用AC-13、AC-16、AC-20三种级配类型,矿料合成级配见表1.

表2 马歇尔试件成型条件

Table 2 Molding condition of Marshall specimen			
℃			
试验组	集料加热温度	混合料拌和温度	试件击实成型温度
1	80	90	110
2	90	100	120
3	100	110	130
4	110	120	140
5	120	130	150
6	130	140	160
7	140	150	170
8	150	160	180

3.2 试验结果分析

三种级配的泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料空隙率随成型温度变化曲线如图3所示.由图3可知,成型温度小于160 ℃时,三种级配泡沫沥青温拌混合料空隙率随温度的增加下降较快.当成型温度高于160 ℃时,

三种级配泡沫沥青温拌混合料空隙率随温度的增加降低幅度趋于平缓;相同温度下,泡沫沥青温拌混合料的空隙率明显小于热拌沥青混合料的空隙率;当达到相同空隙率时,泡沫沥青温拌混合料比热拌沥青混合料的成型温度低,降温幅度大概在 15 ~ 20 ℃. 这主要由于采用泡沫沥青温拌技术使得沥青黏度降低,流动性变大,可以更充分裹覆集料,使沥青混合料在击实功的作用下,实现彼此充分嵌挤,从而形成空隙率低、密实结构.

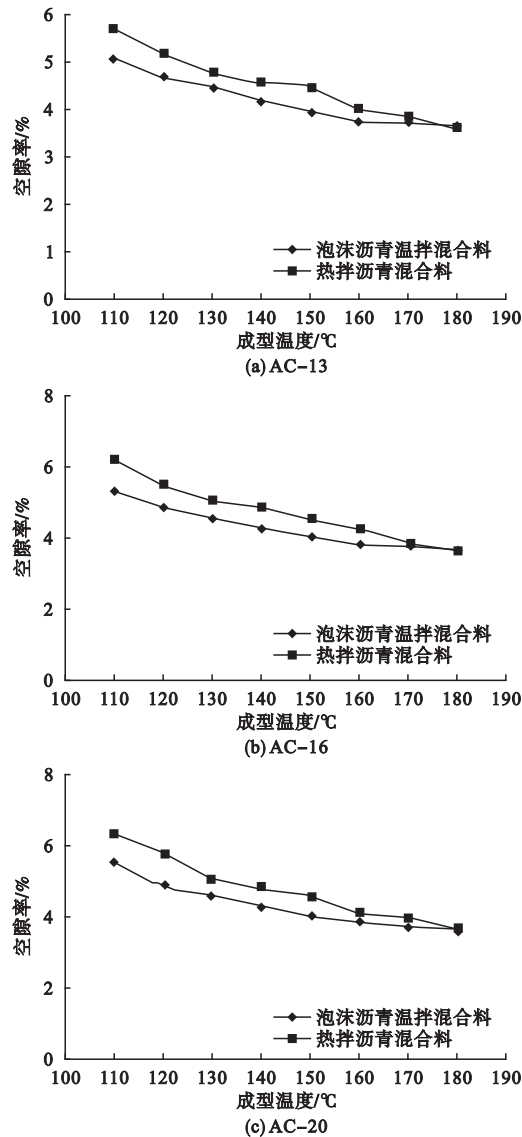


图3 不同级配沥青混合料空隙率随成型温度变化  
Fig. 3 Air voids of different gradation mixture change with molding temperatures

4 泡沫沥青温拌混合料与热拌沥青混合料路用性能试验

4.1 高温车辙试验

笔者对泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料进行室内高温车辙试验,通过三种级配下混合料 60 ℃ 动稳定度比较二者高温抗变形性能,三种级配下泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料 60 ℃ 动稳定度试验结果如图 4 所示.

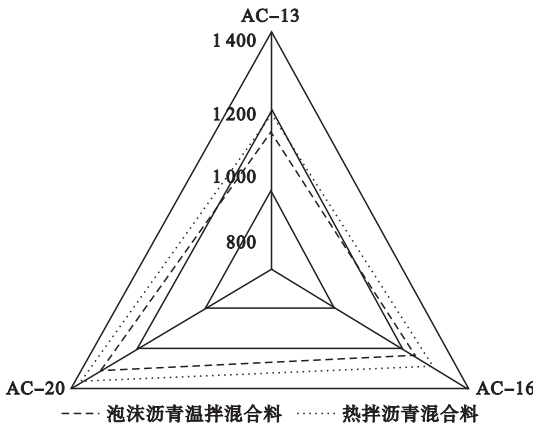


图4 泡沫温拌与热拌沥青混合料动稳定度  
Fig. 4 Dynamic stability of foam asphalt warm-mixed and hot-mixed asphalt mixture

由图 4 车辙动稳定度试验结果可知,泡沫沥青温拌混合料车辙动稳定度稍低于热拌沥青混合料,这主要由于泡沫沥青中含有一定量的水影响混合料的高温性能,但泡沫沥青温拌混合料三种级配下车辙动稳定度均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中大于 800 次/mm 的要求.

4.2 低温小梁弯曲试验

笔者对泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料进行室内 - 10 ℃ 小梁弯曲试验,评价其低温抗裂性能. 三种级配下泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料最大弯拉应变试验结果如图 5 所示.

由图 5 小梁低温弯曲试验结果可知,泡沫沥青温拌混合料最大弯拉应变小于热拌沥青混合料,这主要由于泡沫沥青温拌混合料

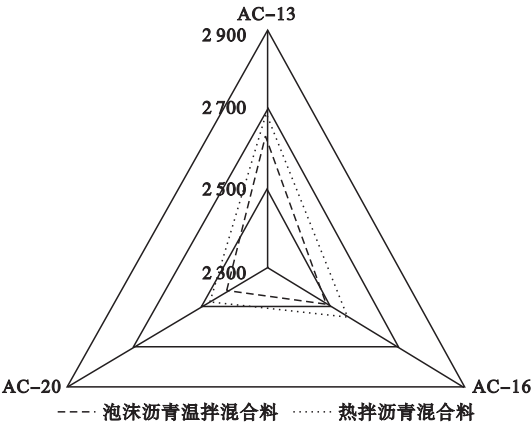


图5 泡沫温拌与热拌沥青混合料最大弯拉应变

Fig. 5 Max flexural – tensile strain of foam asphalt warm-mixed and hot-mixed asphalt mixture

石料加热温度相对较低,集料内残留的水将降低与沥青的黏附效果,同时泡沫沥青里的水也将降低黏附效果,所以其低温性能略差于热拌沥青混合料,但泡沫沥青温拌混合料三种级配下最大弯拉破坏应变均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中大于 $2\,300\times10^{-6}$ 的要求。

4.3 冻融劈裂试验

笔者对泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料进行室内冻融劈裂试验,评价三种级配类型下泡沫沥青温拌混合料和热拌沥青混合料的抗水损害性能。试验结果如图6所示。

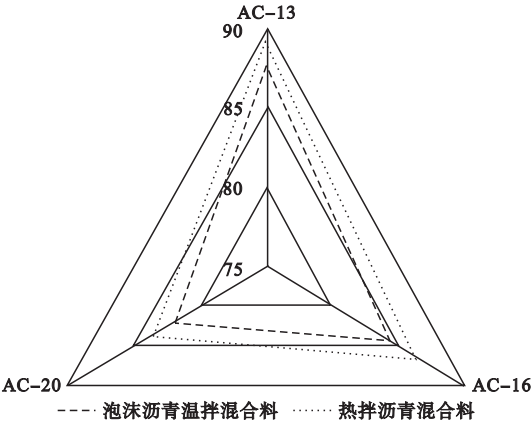


图6 泡沫温拌与热拌沥青混合料冻融劈裂强度比

Fig. 6 Freeze-thaw splitting strength ratio of hot mix and hot mix asphalt mixture

由图6冻融试验结果可知,泡沫沥青温拌混合料冻融劈裂强度比略小于热拌沥青混

合料,这主要由于泡沫沥青温拌混合料黏度相对热拌沥青混合料较小,所以其抗水损害能力略差于热拌沥青混合料,但泡沫沥青温拌混合料三种级配下冻融劈裂强度比均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中大于75%的要求。

5 结 论

(1)当发泡温度为170℃时发泡沥青的膨胀率和半衰期最佳,因此选择170℃作为发泡温度,170℃发泡用水量为2.3%时,泡沫沥青的膨胀率为12倍,半衰期为10 s。

(2)成型温度小于160℃时,泡沫沥青温拌混合料空隙率随温度的增加下降较快,当成型温度高于160℃时,泡沫沥青温拌混合料空隙率随温度的增加降低幅度趋于平缓。

(3)相同温度下,泡沫沥青温拌混合料的空隙率明显小于热拌沥青混合料的空隙率;当达到相同空隙率时,泡沫沥青温拌混合料比热拌沥青混合料的成型温度低,降温幅度大概在15~20℃,可实现低温施工。

(4)泡沫沥青温拌混合料高低温及水稳定性略低于热拌沥青混合料,但各项性能指标均满足现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)要求。

参考文献

[1] HURLEY G C, PROWEELL B D. Evaluation of Sasobit for use in warm-mix asphalt [J]. Ncat report, 2005.

[2] ÓLÖF KRISTJÁNSDÓTTIR, MUENCH S T, MICHAEL L, et al. Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption [J]. Transportation research record journal of the transportation research board, 2008, 2040: 91 – 99.

[3] 杨彦海, 高小晰, 沈阳, 等. 温拌沥青技术在低温施工中的应用 [J]. 中外公路, 2014, 34 (3): 264 – 267.

(YANG Yanhai, GAO Xiaoxi, SHEN Yang, et al. Application of warm mix asphalt technology in low temperature construction [J]. Journal of China & foreign highway, 2014, 34 (3): 264 – 267.)

[4] 王志祥, 霍洋洋, 党合欢. 温拌橡胶沥青混合



- 料拌和和压实温度研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015(3): 647 - 651.  
(WANG Zhixiang, HUO Yangyang, DANG Hehuan. Research on compaction temperature and performance of warm mix rubber asphalt mixtures[J]. Journal of Wuhan university of technology(Transportation science & engineering), 2015(3): 647 - 651.)
- [5] 陈静云, 李捷, 王维营. 不同老化沥青掺量下的温拌再生沥青性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017(5): 863 - 869.  
(CHEN Jingyun, LI Jian, WANG Weiying. Performance of warm recycled asphalt binders with different aged asphalt percentage [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017(5): 863 - 869.)
- [6] RUBIO M C, MARTÍNEZ G, BAENA L, et al. Warm mix asphalt: an overview[J]. Journal of cleaner production, 2012, 24(3): 76 - 84.
- [7] XIAO F, JORDAN J, AMIRKHANIAN S N. Laboratory investigation of moisture damage in warm-mix asphalt containing moist aggregate [J]. Transportation research record: Journal of the transportation research board, 2009(2126): 115 - 124.
- [8] SILVA H M R D, OLIVEIRA J R M, PERALTA J, et al. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents [J]. Construction & building materials, 2010, 24(9): 1621 - 1631.
- [9] 师龙飞. 成型温度对泡沫沥青混合料性能的影响[J]. 公路工程, 2015, 40(2): 249 - 251.  
(SHI Longfei. Effects of molding temperature on properties of foamed warm-mixed asphalt mixture [J]. Highway engineering, 2015, 40(2): 249 - 251.)
- [10] ALI A, ABBAS A, NAZZAL M, et al. Workability evaluation of foamed warm-mix asphalt [J]. International journal of pavement research & technology, 2012, 5(2): 93 - 101.
- [11] 石鹏程, 沈菊男, 祝鸿, 等. 水发泡温拌再生沥青混合料体积性能研究[J]. 公路, 2014(12): 161 - 165.  
(SHI Pengcheng, SHEN Junan, ZHU Hong, et al. Study on volume performance of warm mixed asphalt mixture with water foaming[J]. Highway, 2014(12): 161 - 165.)
- [12] 邹晓勇, 李英涛, 柏宁. 泡沫温拌沥青混合料不同施工阶段发泡水含量变化规律研究[J]. 中外公路, 2016(2): 218 - 221.  
(ZOU Xiaoyong, LI Yingtao, BAI Ning. Study on the changes of water content of foamed warm-mixed asphalt mixture at different construction stages[J]. Journal of China & foreign highway, 2016(2): 218 - 221.)
- [13] 马永锋, 郝培文. 温拌(半温拌)泡沫沥青混合料发展现状[J]. 中外公路, 2012, 32(3): 294 - 298.  
(MA Yongfeng, HAO Peiwen. Development status of warm mix (semi-warm mixed) foam asphalt mixture[J]. Journal of China & foreign highway, 2012, 32(3): 294 - 298.)
- [14] 黄康旭, 梁星敏, 徐波. RAP掺量对泡沫温拌再生沥青混合料路用性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(5): 794 - 797.  
(HUANG Kangxu, LIANG Xingmin, XU Bo. Influences of RAP dosage on road performances of foamed warm mix reclaimed asphalt [J]. Journal of materials science and engineering, 2016, 34(5): 794 - 797.)
- [15] CHOMICZ-KOWALSKA A, GARDZIEJCZYK W, IWĄŃSKI M M. Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen [J]. Construction & building materials, 2016, 126: 108 - 118.
- [16] NEWCOMB D E, ARAMBULA E, YIN F, et al. Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications [J]. Nchrp report, 2015.
- [17] 吴革森, 杨卿, 吴凡, 等. 泡沫沥青就地冷再生混合料配合比设计及工程应用[J]. 公路, 2015(5): 197 - 201.  
(WU Gesen, YANG Qing, WU Fan, et al. Mix proportion design and engineering application of cold regenerated mixture of foamed asphalt [J]. Highway, 2015(5): 197 - 201.)
- [18] 拾方治, 赫振华, 吕伟民, 等. 沥青发泡原理及发泡特性的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 183 - 187.  
(SHI Fangzhi, HE Zhenhua, LÜ Weimin, et al. Principle and study of bitumen foaming [J]. Journal of building materials, 2004, 7(2): 183 - 187.)
- [19] 徐金枝, 郝培文. 沥青发泡性能评价指标及优化设计研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(6): 776 - 780.  
(XU Jinzhi, HAO Peiwen. Research on the evaluation index and optimization design of asphalt foaming characteristics [J]. Journal of building materials, 2011, 14(6): 776 - 802.)
- [20] SANCHEZ-ALONSO E, VEGA-ZAMANILLO A, CASTRO-FRESNO D, et al. Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives [J]. Construction and building materials, 2011, 25(5): 2304 - 2311.