

玄武岩纤维沥青混合料的路用性能及抗裂性能

洪亮¹, 仲小玲², 陈芳³

(1.新疆维吾尔自治区交通运输综合行政执法局,新疆 乌鲁木齐 830011; 2.新疆农业大学,新疆 乌鲁木齐 830011;
3.新疆交通建设集团有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:为研究玄武岩纤维对沥青混合料路用性能和断裂性能的影响,基于马歇尔试验确定了不同玄武岩纤维掺量下的最佳油石比,并基于此分析纤维掺量对路用性能、老化性能、抗断裂性能的影响规律及其改善效果。结果表明:(1)玄武岩纤维掺量将影响最佳沥青用量,需同时考虑纤维掺量以确定最佳油石比;(2)纤维质量掺量为0.1%时,具有最佳的改善效果,最大可将高温稳定性能、低温抗裂性能、水稳定性能分别提升31.5%~38.4%、24.4%~37.3%、1.2%~5.5%。纤维对老化沥青混合料的高温稳定性的改善程度最佳,尤其是动稳定度,改善程度是其他性能的1.28~15.0倍;其次是低温抗裂性;水稳定性的改善效果最弱。纤维可通过增加沥青混合料的延性,以提高峰值荷载对应的裂纹张开位移,且玄武岩纤维在中温情况下对沥青混合料的抗断裂性能改善效果要高于低温条件,最大可提升21.64%的断裂韧性。

关键词:道路工程;沥青混合料;玄武岩纤维;路用性能;老化

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0058-06

0 引言

沥青路面在经受交通荷载的作用下将出现各种病害,尤其是昼夜温差较大的地区,沥青路面开裂、老化问题更加严重。因此,改善沥青路面的路用性能、提高路面的服役水平是路面工程研究的重点问题之一^[1]。

近年来,纤维对提升沥青路面的服役性能具有显著效果,且因其具备的施工便捷、经济合理等特点受到广泛青睐^[2]。在物理特性方面,彭建湘^[3]分析了玄武岩纤维长度对SMA-13性能的影响。一些研究^[4-5]指出,针对不同的应用场合(施工条件、服役环境等),应具有不同推荐长度、长径比、材质等物理参数。在混合料的性能研究方面,张慧军^[6]研究通过对比高温稳定性能、低温抗裂性能和水稳定性讨论了不同玄武岩纤维掺量对微表处路用性能的影响。张栋乐等^[7]分析了纤维对排水沥青混合料的高、低温性能影响的机理。孟硕等^[8]研究了影响玄武岩纤维与沥青混合料高温性能的关键影响因素。吴靖江等^[9]研究了不同级配的混合料下,玄武岩纤维对高温性能的影响。相关研究^[10-11]也分析了不同纤维掺量下的沥青混合料的疲劳性能、抗冻性。

综上,当前国内外学者就玄武岩纤维对沥青混合料性能的影响进行了大量研究,但纤维对沥青混合料的老化性能和抗裂性能的作用机制仍需进一步探索,以改善高海拔地区昼夜温差大、老化严重、重载交通地区的沥青路面服役性能。

1 原材料和试验方法

依托新疆某公路沥青路面项目开展,根据寒冷地区的低温、重载交通等服役环境,采用90#石油沥青。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)开展沥青性能测试,其主要的技术指标见表1。

表1 90#石油沥青基本特性

项目	值
针入度(25℃)/0.1 mm	96
延度(15℃)/cm	154
软化点/℃	46.5
质量损失/%	0.03
旋转薄膜烘箱试验(163℃)	针入度比/%
	73.0
	老化后延度(15℃)/cm
	78.6
	密度/(g·cm ⁻³)
	0.992

集料为玄武岩碎石和石灰岩矿粉,碎石的最大粒径为16.0 mm,密度为2.729 g/cm³,无结块现象。坚固性、压碎值等指标均满足规范要求。选择AC-13的

收稿日期: 2023-04-24

作者简介: 洪亮(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事公路工程施工材料检测工作。

级配中值,集料的合成级配如图 1 所示。玄武岩纤维作为一种由天然玄武岩碎石为原料成型的柔性纤维,对沥青混合料的性能具有很好的提升作用。选择河北石家庄玄武岩纤维,纤维长度为 9 mm,直径约 12 μm ,相对密度为 2.68 g/cm^3 ,断裂强度为 3 500 MPa,弹性模量为 9.5 GPa,质量损失为 1.3%,无卷曲性。

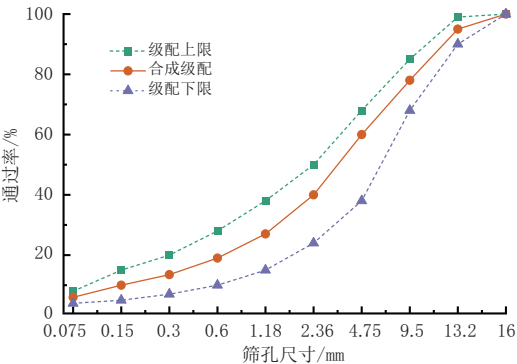


图 1 AC-13 级配曲线

2 试验方法

2.1 最佳沥青用量确定

考虑纤维的加入对最佳沥青用量的影响,参考已有研究,以 AC-13 密级配沥青混合料为基础,设定最佳基准油石比为 5.0%,并在此基础上设置梯度为 0.5,则共包括 5 组油石比,即 4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%。同时,设定玄武岩纤维的质量掺量百分比为 0.05%~0.15%(梯度为 0.05%),并选择普通沥青混合料(玄武岩纤维掺量为 0%)作为对照组。随后,通过马歇尔试验法,分析不同玄武岩纤维掺量下各马歇尔指标的变化特征,并分别确定不同纤维掺量下的最佳沥青用量。

2.2 路用性能试验

按照规范 JTG E20—2011 的要求成型试件,平行试件为 3 组,分别对不同纤维掺量下沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性进行试验。其中,采用车辙试验的动稳定性和车辙变形量评价高温稳定性,选择间接拉伸试验并计算破坏劲度模量评价低温抗裂性,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价其水稳定性,分别计算其残留稳定性和劈裂强度比。

2.3 加速老化试验

按照 T0734—2000 对沥青混合料进行短期和长期的加速老化试验,并测试其老化后的路用性能。短期老化的试验条件为:烘箱温度为 $(135 \pm 3)^\circ\text{C}$,强制通风条件下时间为 $4\text{ h} \pm 5\text{ min}$ 。长期老化的实验条件为:烘箱温度为 $(85 \pm 3)^\circ\text{C}$,强制通风条件下时间

分别为 3 d、5 d、10 d。

2.4 半圆弯拉试验

按照 AASHTO TP 105—13 (2019) 相关试验规定,基于 I 型断裂利用万能试验机开展沥青混合料的半圆弯拉试验,试验温度包括 -30°C 、 -10°C 、 10°C 、 25°C ,计算出不同试验条件下的断裂韧性,采用数字图像处理技术计算裂纹扩展位移。

3 试验结果及分析

3.1 马歇尔试验分析

不同纤维掺量下,各油石比对应的马歇尔指标如图 2 所示。随着油石比的增加,沥青的毛体积密度、稳定度均先增加后减少,矿料间隙率则先减少后增大;流值和稳定度持续增加,空隙率则持续下降。此外,纤维掺量的变化将显著影响马歇尔指标,且对最佳沥青用量也有一定影响。通过计算,得出 4 种纤维掺量下的最佳沥青用量分别为 5.0%、5.0%、5.05%、5.10%。此外,在各自的最佳沥青用量下,随着纤维掺量的增加,沥青混合料的密度和饱和度呈下降趋势,而稳定度、空隙率、流值和间隙率总体上呈上升趋势。

玄武岩纤维侵占了沥青混合料的体积,而相比其他材料,玄武岩纤维具有更高的弹性模量,在相同的击实作用难以使其达到与沥青混合料相同的密实度,使混合料的毛体积密度随着纤维掺量逐渐下降,且随着掺量的进一步增加,纤维将存在团聚现象。

此外,低掺量的纤维易于分散,其形成的网状结构能够赋予一定的加筋效果,利于稳定度的提高;而高掺量的纤维易出现团聚现象,使稳定度略微下降。研究表明,随着玄武岩纤维掺量的增加,混合料受到的最大拉应力将呈现递减趋势,但随着掺量增加造成额外的施工难度反而可能在混凝土内部形成薄弱面,从而不利于发挥纤维加筋效果^[12]。因此,需根据对不同纤维掺量下的路用性能进行研究,以确定最佳纤维掺量。

3.2 路用性能

3.2.1 高温稳定性

不同纤维掺量下的沥青混合料高温稳定性能发展趋势如图 3 所示。当纤维掺量为 0~0.10%时,分散性良好的纤维可有效提高动稳定性;尤其是当掺量为 0.05%~0.10%时,动稳定度提升了 21.1%。从纤维掺量与动稳定性和车辙变形量的关系可知,纤维掺量为 0.1%时,在车辙变形量与动稳定度变化趋势中

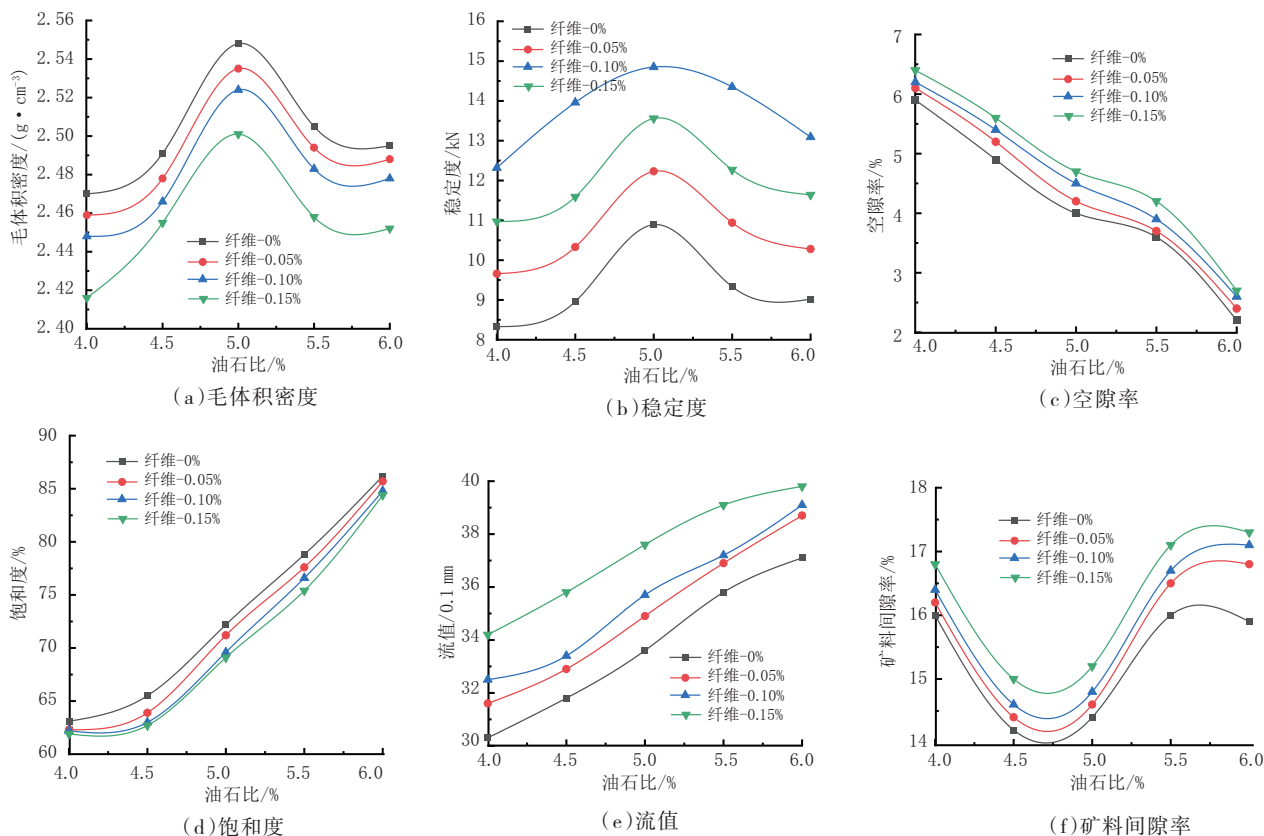


图2 最佳沥青用量确定

出现极值,表明此对混合料的高温稳定性具有最佳的改善效果,即最佳掺量为0.1%。此时可使荷载的传递能够及时扩散至矿料和沥青胶浆。同时还能增加沥青的稠度,有效减少高温条件下集料的滑移和沥青的流动。与对照组相比,动稳定度增加了38.4%。当掺量超过0.1%时,车辙变形量略有增加,动稳定度稍有降低,表明此时纤维用量过大,分散性差,从而产生了负面的影响,团聚的纤维无法起到加筋效果,而且占据了集料的空间。

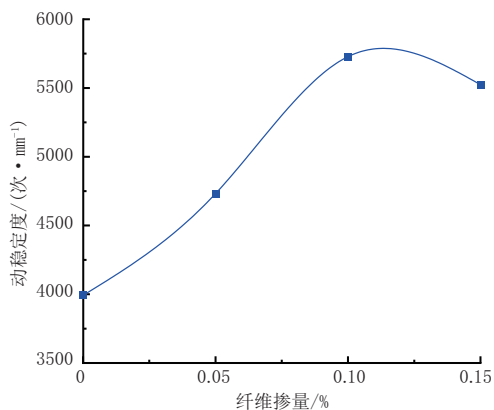


图3 不同纤维掺量下沥青混合料的高温稳定性

3.2.2 低温抗裂性

不同纤维掺量下的沥青混合料低温稳定性能指标发展趋势如图4所示。随着玄武岩纤维掺量的增加,沥青混合料的劲度模量先减少后略微增大,而破

坏拉伸应变则先增大后略微减少。极值点均出现在纤维掺量为0.1%时。在此掺量下,劲度模量和破坏拉伸应变分别减少了24.4%,增加了37.3%。在0.1%掺量之前,分散性较好的纤维增加了结构沥青的占比,使其黏稠性增加,在低温下有效地增加了沥青与矿料之间的界面黏结强度。由于加筋作用,0.1%玄武岩纤维掺量比未参加纤维的沥青混合料表现出更大的破坏拉伸应变。当纤维的掺量增加至0.15%时,纤维将出现团聚,从而降低混合料的性能,使低温状态下的变形抵抗能力降低。

3.2.3 水稳定性

不同纤维掺量下的低温稳定性能发展趋势如图5所示。随着纤维掺量的增加,劈裂强度比先增加后缓慢下降,且0.1%掺量对应的劈裂强度比最大,且与不参加玄武岩纤维相比,劈裂强度比增加了5.5%。就劈裂试验而言,间接的拉伸作用将使沥青混合料内部承受受拉的应力,当拉应力大于混合料的黏结强度时,试件将出现破坏。对于普通沥青混合料而言,黏结强度来源于集料与沥青的黏结作用,当分散性较好的纤维加入时,由于其能够增加结构沥青的占比,沥青胶浆的黏性更强,进而显著提高集料与沥青的界面黏附性。因此,集料表面的有效沥青膜厚度将增加,从而增加了水对界面的破坏,进而提高集

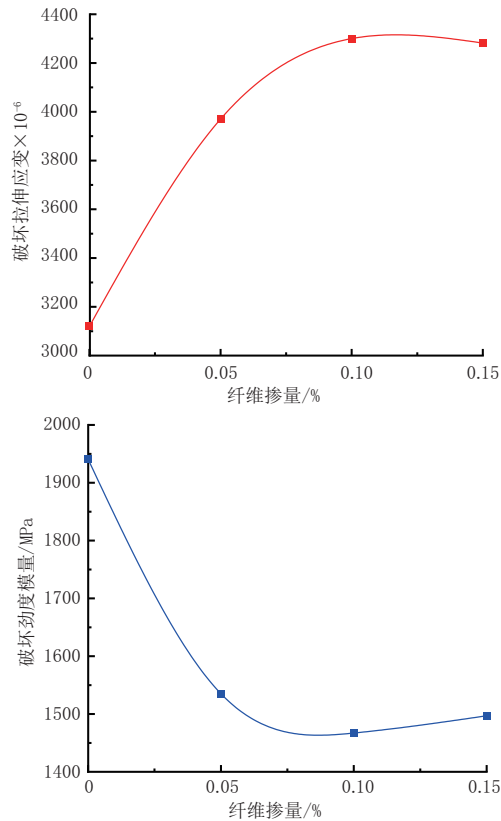


图4 不同纤维掺量下沥青混合料的低温抗裂性

料的劈裂能力。然而,当纤维进一步增加时,纤维分散性下降,将使混合料内部产生应力集中,进而影响整个试件的抗拉强度。由此可见,当掺量高于0.10%时,劈裂强度产生轻微下降的趋势。

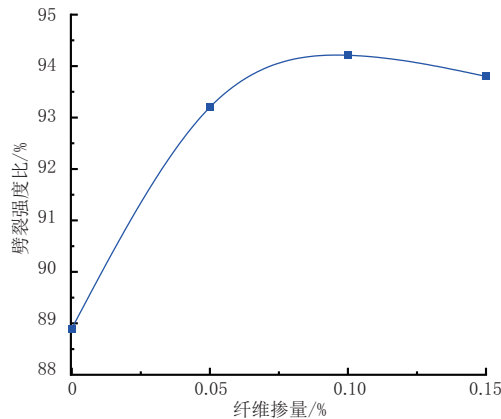


图5 不同纤维掺量下沥青混合料的水稳定性

3.3 老化性能

选择0.10%为最佳纤维掺量用于成型试件以研究不同老化程度后的路用性能,结果如图6所示。如图6中的阴影部分,阴影部分面积越大,表明改善程度越高;反之,则越低。随着老化时间增加,相关结论如下:

(1)与未掺纤维相比,随着老化时间增加,纤维对车辙变形量的改善效果逐渐减少,改善程度为36.2%~25.9%;而对动稳定度的改善效果却持续增

加,并于第5 d后达到峰值,此时改善程度为64.3%。

(2)在老化条件下,沥青胶结料的脆性将增加,延度降低,使得抗变形能力下降。纤维对老化后的沥青混合料的破坏劲度模量的改善效果持续上升后趋于稳定(24.4%~27.10%),而对破坏拉伸应变的改善持续上升(46.5%~55.1%)。

(3)随着老化程度的加深,沥青混合料的残留稳定性和劈裂强度比均逐渐下降。纤维增强沥青混合料在老化末期的残留稳定度几乎恒定,且劈裂强度的下降速率逐渐平缓,而未掺加的试验组仍以较大的速率下降。这表明随着老化程度的加深,混合料的抗冻融和抗水损害能力逐渐下降。就增强效果而言,纤维对残留稳定度的改善程度持续增加(3.38%~5.46%),而对劈裂强度比的改善程度则维持在较稳定的水平(即10.6%~12.1%)。相比之下,由于浸水试验中试件的浸水时间较短,故老化对残留稳定度的降低百分比低于劈裂强度比,前者为4.9%~6.7%,后者为12.3%~12.9%,表明当前用浸水马歇尔试验评价老化后的水稳定性可能不如冻融劈裂试验。

3.4 断裂性能

3.4.1 裂缝扩展特征

不同纤维掺量沥青混合料在两种温度下(-10℃、25℃)的裂缝张开位移与作用荷载关系如图7所示。从图7(a)可知,在低温条件下,随着纤维掺量的增加,裂缝张开位移的最大值逐渐增加。表明纤维可延缓沥青混合料抵达峰值荷载的过程,从而抑制裂纹的进一步扩展。从图7(b)可知,中温条件下,纤维沥青混合料的峰值荷载对应的裂纹张开位移高于基质沥青混合料,且裂纹张开位移随着纤维掺量提高而显著增加。另外,抵达峰值荷载后,裂纹仍在进一步扩展,表明纤维可提高沥青混合料中温条件下的延性和荷载峰值后的承载能力。因此,玄武岩纤维在低温、中温条件下均能提高沥青混合料的抗变形能力,且中温条件下所起到的抗断裂效果高于低温情况。

3.4.2 断裂韧性

为进一步研究纤维在不同温度下对沥青混合料断裂性能的影响,测定了4种温度下的断裂韧性,结果如图8所示。总体结果表明,无论在何种温度下,随着纤维含量的提高,沥青混合料的断裂韧性均逐渐增大,且掺量为0.10%纤维混合料的断裂韧性最高。另外,当温度从-30℃变化至25℃时,沥青混合料的断裂韧性均缓慢下降,但相对于基质沥青,纤维

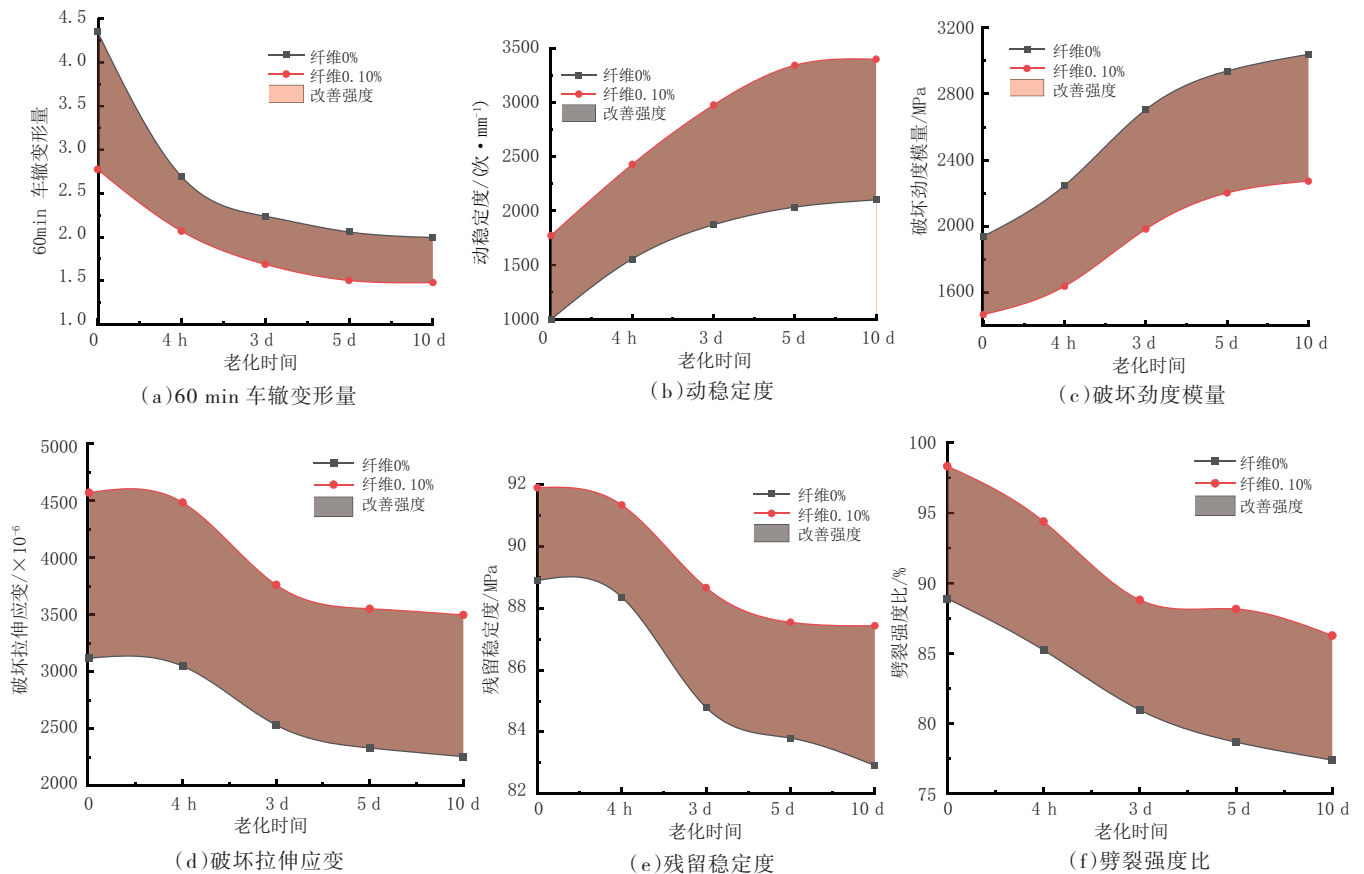


图6 不同老化时间下的纤维沥青混合料路用性能

对沥青混合料的断裂韧性的最大改善程度分别为14.14%、5.57%、10.12%、21.64%。由此可见,相对于基质沥青混合料,玄武岩纤维对中温情况下(25℃)的沥青混合料的断裂韧性改善效果高于低温条件。

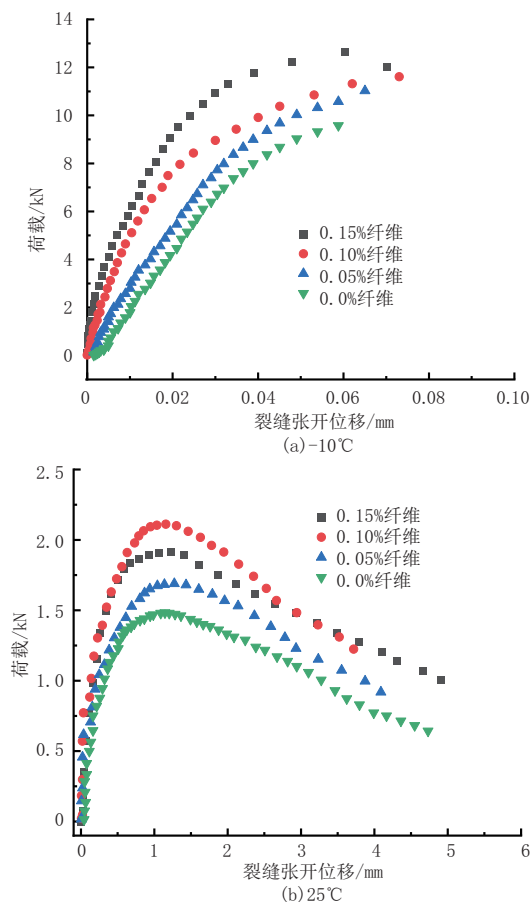


图7 不同纤维掺量下沥青混合料的裂纹张开位移

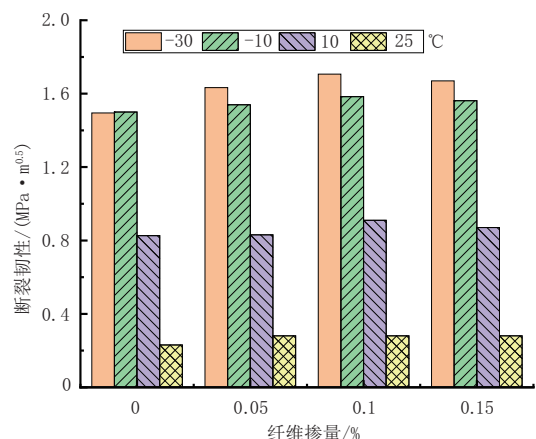


图8 不同纤维掺量下沥青混合料的断裂韧性

4 结 语

本文通过室内试验,研究了不同纤维掺量下沥青混合料的路用性能、抗断裂性能规律和内在作用机制,得出以下结论。

(1)玄武岩纤维将影响沥青混合料的最佳油石比,故需同时考虑纤维掺量确定最佳油石比以开展纤维沥青混合料性能研究。随着纤维掺量增加,沥青混合

料的饱和度呈下降趋势,而稳定度、空隙率、流值和间隙率总体上呈上升趋势,且过量的纤维掺量将导致稳定度下降。

(2)玄武岩纤维主要是减少高温条件下集料的滑移和沥青的流动以提高高温稳定性,提高沥青与矿料的黏结强度以改善低温抗裂性,并以增加结构沥青的比例以提高抗水损害性;且纤维掺量为 0.10% 时具有最佳的改善效果,最大可将高温稳定性能、低温抗裂性能、水稳定性能分别提升 31.5%~38.4%、24.4%~37.3%、1.2%~5.5%。

(3)玄武岩纤维可显著增强沥青混合料老化的路用性能,且对高温稳定性的改善程度最佳,尤其是动稳定度,改善程度是其他性能的 1.28~15.0 倍;其次是低温抗裂性;水稳定性的改善效果最弱。

(4)纤维掺量增加可提高沥青混合料的延性和荷载峰值后的承载力。随着温度的升高,沥青混合料的断裂韧性逐渐降低,但中温条件下混合料的断裂韧性改善效果高于低温条件。

参考文献:

[1] 郑健龙.基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J].中

国公路学报,2014,27(1):1-7.
[2] 李建合,吴冬兰.SBS 改性沥青混合料中玄武岩纤维最佳掺量的研究[J].西部交通科技,2022(9):23-25.
[3] 彭建湘.玄武岩纤维长度对 SMA-13 各项性能的影响研究[J].湖南交通科技,2022,48(3):33-37.
[4] 张婧丽.玄武岩短切纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(9):3032-3039.
[5] 何东坡,左惠宇.玄武岩纤维长度对排水沥青路面性能影响研究[J].公路,2021,66(1):13-18.
[6] 张慧军.玄武岩沥青混合料微表处路用性能[J].山东交通科技,2022(5):43-45,57.
[7] 张栋乐,李明亮,李俊.纤维对排水沥青混合料高低温性能的影响机理分析[J].市政技术,2022,40(9):17-22.
[8] 孟硕,宋关春,吴建国,等.玄武岩纤维-沥青界面粘结性能与高温性能关联度分析[J].科学技术创新,2022(21):112-115.
[9] 吴靖江,张聪,吴正光,等.玄武岩纤维沥青混合料高温性能研究[J].公路,2022,67(7):9-13.
[10] 王国方,李波,肖鹏,等.玄武岩纤维再生沥青混合料抗裂性能分析[J].扬州大学学报(自然科学版),2021,24(3):69-73.
[11] 唐智勇,刘富强.老化玄武岩纤维沥青混合料冻融劈裂试验研究[J].科学技术与工程,2022,22(20):8862-8868.
[12] 杨程程,刘朝晖,柳力,等.基于空间分布模型的玄武岩纤维参数对沥青混合料的影响[J].玻璃钢/复合材料,2019,308(9):14-19.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com