

文章编号:1673-9469(2022)03-0070-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.011

老化前后沥青与沥青混合料指标相关性分析

张颖森,高颖*,郭庆林,杨邯超

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:为分析老化前后沥青与沥青混合料指标相关性,开展了相应室内试验研究:在不同老化阶段进行沥青针入度、延度、软化点试验;在中、低温条件下,对不同老化时期 AC-13 沥青混合料进行半圆弯拉试验,分析混合料力学强度、弹性模量、断裂能演化规律;将老化前后沥青三大指标与沥青混合料力学指标进行相关性回归分析。试验结果表明,老化初期对混合料强度、弹性模量影响较大,且老化对弹性模量影响较为敏感;混合料对低温断裂能作用明显,中温断裂能显著高于低温断裂能;混合料老化前后的强度、弹性模量与沥青三大指标具有较高线性相关性,针入度可对中低温下混合料力学性能进行预测。

关键词: 沥青;沥青混合料;半圆弯拉试验;沥青老化;相关性

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Correlation Analysis of Asphalt and Asphalt Mixture Index Before and After Aging Stages

ZHANG Yingsen, GAO Ying*, GUO Qinglin, YANG Hanchao

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to analyze the correlation between asphalt and asphalt mixture indexes before and after aging, this paper carried out a series of indoor experimental tests including: asphalt penetration, ductility and softening point tests at different aging stages, and the semi-circular bending tensile test of AC-13 asphalt mixture in different aging periods under the condition of medium and low temperature to analyze the evolution laws of the mechanical strength, the elastic modulus and the fracture energy of the mixture; The correlation regression analysis is carried out between the three indexes of asphalt before and after aging and the mechanical indexes of asphalt mixture. The test results show that the initial stage of aging has a great influence on the strength and elastic modulus of the mixture, and the aging is more sensitive to the elastic modulus; The mixture has an obvious effect on the low-temperature fracture energy, and the medium temperature fracture energy is significantly higher than the low-temperature fracture energy. The strength and the elastic modulus of mixture before and after aging have high a linear correlation with the three indexes of asphalt. Penetration can predict the mechanical properties of mixture at medium and low temperature.

Key words: asphalt; asphalt mixture; semicircle bending tensile test; asphalt aging; relevance

由于沥青长期暴露在复杂的气候环境中,热 水、紫外光、温度的耦合作用下,老化进一步加剧,老化导致沥青硬化是不可避免的问题,此外,在 沥青路面服役寿命显著降低^[1-4]。目前,学者们对

收稿日期:2022-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508150);国家重点研发计划资助项目(2018YFF0300200);河北省自然科学基金资助项目(E2018402206);河北省教育厅青年拔尖人才计划资助项目(BJ2017034)

作者简介:张颖森(1997-),男,福建泉州人,硕士,研究方向为道路工程材料。

* 通讯作者:高颖(1977-),女,河北霸州人,硕士,副教授,研究方向:道路工程材料。

沥青老化已开展大量试验研究,主要集中在两个方面。一方面通过沥青微观分子结构变化来分析沥青老化机理及化学成分变化:金大勇^[5]等人采用红外光谱与凝胶渗透色谱分析了沥青的老化机理,发现沥青老化时吸收氧气发生聚合,分子间滑移减小,沥青逐渐呈硬脆性;耿九光^[6]通过红外光谱法研究了基质沥青老化前后官能团的变化,发现羰基和亚砷基含量有所增加。另一方面是通过室内宏观试验来分析老化对沥青及沥青混合料的影响:Zhang^[7]等人研究了老化对多种SBS改性沥青流变性能的影响,发现老化会使沥青相位角减少,复数模量升高;Behnood^[8]等人通过弯曲梁流变仪研究了不同种改性沥青的低温性能,研究发现热氧老化后,沥青劲度模量变大,蠕变速率减小,低温性能变差;郑向雷^[9]通过测试沥青混合料老化前后的动稳定度来研究老化对混合料高温性能的影响,发现老化促使混合料稳定度增加;陈海燕^[10]采用劈裂试验研究老化对低温性能的影响,结果发现随着老化深入,混合料低温性能变差;Lamothe^[11]等人对成型试件进行了单轴压缩试验,分析水对热拌沥青混合料疲劳性能的影响,结果表明,有水状态下的混合料疲劳性能低于干燥状态下的沥青混合料。

上述研究仍处于沥青、沥青混合料二者的单一化研究,指标之间的影响机制尚不清楚。若能将沥青与沥青混合料的老化指标影响进行联系,找到沥青老化对混合料指标影响的某种规律,则对于沥青及混合料老化相关研究和工程实际应用起到积极作用。基于上述问题,本文首先通过室内试验研究沥青老化前后三大指标演化规律,其次对沥青混合料老化前后力学性能进行测试,并基于测试结果对试验数据进行拟合分析,探讨老化前后沥青、沥青混合料指标间相关性,研究成果可通过对沥青的指标测试达到对混合料老化前后性能的预测评价,具备一定的工程实际价值,同时可为揭示沥青老化对路面耐久性的影响提供有利的理论支撑。

1 试验研究

1.1 试验材料

试验选用AH-70#石油沥青及玄武岩骨料制备AC-13沥青混合料,由马歇尔试验确定最佳油石比为4.6%。原材料相关技术指标如表1、表2所示,混合料级配如图1所示。

表1 沥青基本技术指标

技术指标	实测值	规范要求
针入度/0.1mm(25℃)	80	60~80
延度/cm(15℃)	118	>100
软化点/℃	50	>45
动力粘度/(Pa·s)	211	>180
含蜡量/%	1.9	<2.2
闪点/%	287	>260
密度/(g·cm ⁻¹)(25℃)	1.0066	

表2 骨料基本技术指标(经过冲洗处理)

骨料粒径/mm	吸水率/%	表观相对密度	表干相对密度
13.2	0.567	2.723	2.697
9.5	0.632	2.681	2.650
4.75	0.523	2.679	2.656
2.36	—	2.675	—
1.18	—	2.708	—
0.6	—	2.713	—
0.3	—	2.713	—
0.15	—	2.713	—
0.075	—	2.712	—

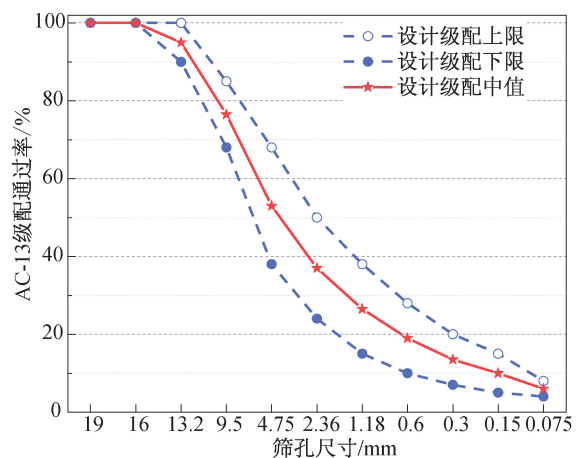


图1 AC-13沥青混合料级配曲线

Fig. 1 Grading curve of AC-13 asphalt mixture

1.2 实验方法

1.2.1 沥青宏观指标测试

对基质沥青进行针入度、软化点、延度测试,分析老化前后沥青指标变化规律,并与沥青混合料力学性能进行相关性分析。测试阶段分为未老化阶段、短期老化阶段、长期老化阶段,采用旋转薄膜烘箱老化试验对基质沥青进行短期老化试验,长期老化采用压力老化试验仪进行试验。

1.2.2 混合料力学性能测试

对 AC-13 沥青混合料在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种工况下进行半圆弯拉试验(图 2),将试验支座两支点之间距离设置为 120 mm ,试件中心的预切缝深度为 10 mm ,中、低温荷载加载速率分别设为 1 、 50 mm/min 。试验阶段包括未老化、短期老化、长期老化,同时为了提高试验测试的数据参考度和可推测性,测试中将引入超长期老化 10 d 和 15 d ,超长期老化根据美国国家公路与运输协会标准(AASHTO PP1)要求进行。试验分析混合料层底抗拉强度、模量变化规律^[12-14],为减少试验数据离散型,每种条件均采用 3 个平行试件进行测试^[15-17]。混合料老化试验方法如表 3 所示,其相关力学指标按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{4.8P}{tD} \quad (1)$$

$$E = \frac{KF}{BV_z} \quad (2)$$

$$G_f = \frac{A}{b \times h} \times 10^6 \quad (3)$$

式中: σ_t 为层底抗拉强度(MPa); P 为试件峰值荷载(N); t 为试件厚度(mm); D 为试件直径(mm); E 为弹性模量(MPa); K 为位移系数; F 为竖直方向荷载(N); B 为试件厚度(mm); V_z 为竖向位移(mm); G_f 为试件的断裂能(J/m^2); A 为荷载-跨中挠度曲线下的面积(J); b 为试件的厚度(mm); h 为试件的高度(mm)。

表 3 老化试验方法

Tab. 3 Aging test method

老化时间	老化方法
短期老化	将拌合完成后的混合料进行均匀摊铺,然后将其置于 $135\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中,在鼓风条件下加热 $4\text{ h} \pm 5\text{ min}$,加热期间每间隔 1 h 翻拌混合料 1 次
长期老化	短期老化后将未成型的混合料击实成型,脱膜后将其放置于 $85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中,在鼓风条件下连续加热 $120\text{ h} \pm 0.5\text{ h}$,加热完成后,室温下冷却不低于 16 h
超长期老化	将短期老化后的试件放于 $85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中,在鼓风作用下加热 $120\text{ h} \pm 0.5\text{ h}$,加热完成后在室温冷却不低于 16 h 。重复上述过程 2 次为超长期老化 10 d ,重复 3 次为超长期老化 15 d

同时,本文将引入一个阶段差异指数,通过差异指数大小来表征各项指标对老化的敏感性,阶

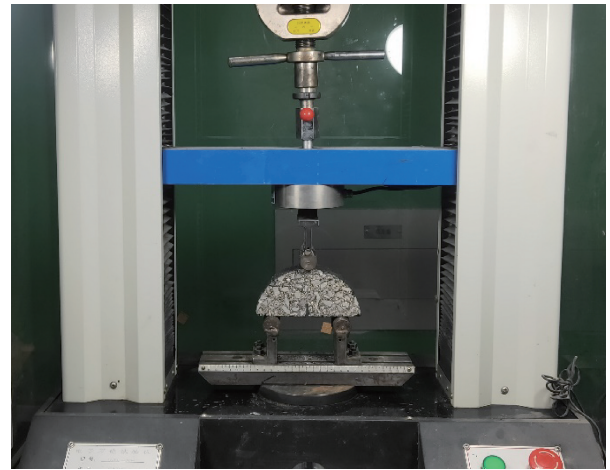


图 2 半圆弯拉试验

Fig. 2 Semicircle bending tensile test

段差异指数如下式:

$$\text{阶段差异指数} = \frac{\text{后老化阶段指标} - \text{前老化阶段指标}}{\text{前老化阶段指标}} \quad (4)$$

2 实验结果分析

2.1 老化前后沥青三大指标变化规律

不同老化时期沥青三大指标变化规律如表 4 所示。

表 4 老化前后沥青三大指标变化

Tab. 4 Changes of three major indexes of asphalt before and after aging

老化阶段	针入度/0.1 mm	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	延度/cm
未老化	80	50	39
短期老化	49	54	7
长期老化	24	57	5

从表 4 可知,基质沥青针入度基本呈直线下降,延度在短期老化过程中,下降速率较快,之后长期老化阶段下降趋势减缓,说明短期老化对沥青延度老化影响起主导作用。主要原因在于,沥青老化后生成羰基、亚砷基等含氧官能团,小分子发生聚合反应,分子间滑移减少,流动度降低,导致针入度和延度下降^[18-19]。此外,通过对沥青软化点的测试发现即便长、短期老化时间有所增长,但老化沥青软化点上升水平并没有如针入度和延度测试结果般出现大幅变化,说明老化作用对沥青软化点影响较小。

2.2 力学性能试验结果分析

根据试验结果,绘制中、低温下 AC-13 沥青混

合料不同老化阶段力学性能、阶段差异指数变化规律图,如图 3 至图 9 所示。

2.2.1 强度对老化敏感性分析

由图 3 可见,在-10℃条件下,未老化至短期老化过程中,层底抗拉强度提升 3.1%,而继短期老化后持续的长期、超长期老化导致的层底抗拉强度变化较小。总体而言,低温条件下老化对沥青混合料的强度影响很小,其中短期老化在低温条件下对沥青混合料的强度影响要稍大于长期、超长期老化。

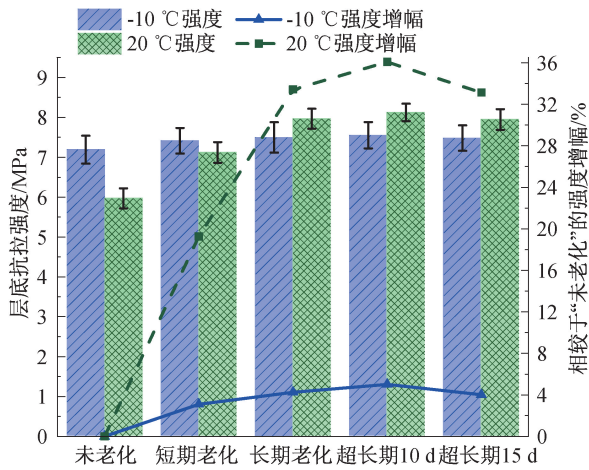


图 3 层底抗拉强度演化规律

Fig. 3 Evolution law of Strength

20℃条件下,在未老化至长期老化阶段,层底抗拉强度增长速率较快,相比于未老化时期,依次提升了 19.26%、33.42%、36.08%。长期老化后,层底抗拉强度变化幅度显著降低。由不同温度下混合料测试结果可知,20℃条件下,沥青混合料的强度受长期老化过程影响程度较大,而之后超长期的老化对沥青强度的影响程度将显著降低。

2.2.2 模量对老化敏感性分析

由图 4 可见,-10℃低温条件下,沥青混合料的抗变形能力增强,导致各时期混合料弹性模量均显著高于中温时期。-10℃低温的老化过程中,从未老化阶段到超长期 10 d 阶段,不同老化阶段沥青混合料与未老化相比,弹性模量依次提升了 19.64%、30%、35.86%。而在 20℃环境下,弹性模量在长期老化过程中仅出现小幅度增长,之后的超长期老化阶段对弹性模量影响较小。可以得出,老化过程中,温度高低在较大程度上可以影响沥青混合料模量,其中低温对混合料模量具有显著的提升作用。

2.2.3 强度与模量敏感性对比

从图 5、图 6 中发现,两种温度下,沥青混合料

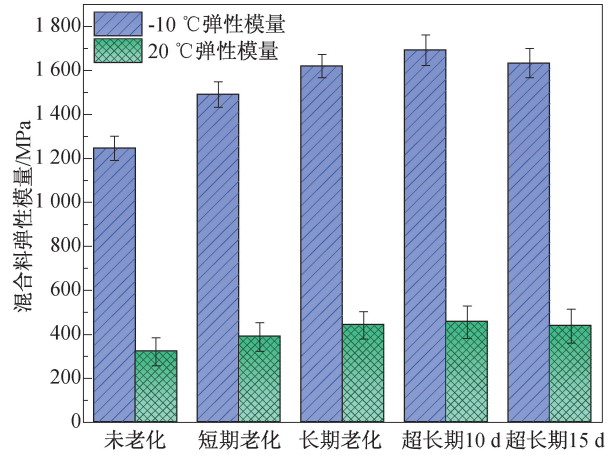


图 4 弹性模量演化规律

Fig. 4 Evolution law of elastic modulus

随着老化程度加深,层底抗拉强度与弹性模量的阶段差异指数均先升高后下降。-10℃条件下,模量阶段差异性指数变化幅度远高于强度阶段差异指数的变化幅度,说明低温条件下,模量对老化阶段的敏感性更高。在 20℃时,总体对比两者受老化影响程度均为较高水平,其中模量阶段差异指数在整个老化过程中基本是略高于强度阶段差异指数。会出现模量幅度变化大的原因在于,随着老化时间增长,沥青受热氧作用逐渐呈现硬脆性,外荷载作用下,内部应力变大,导致模量增大。此外,短期老化后沥青混合料强度受老化影响程度逐渐降低,进一步老化很难使沥青混合料硬脆性持续提高,超长期 10 d 时,混合料达到最高临界强度。

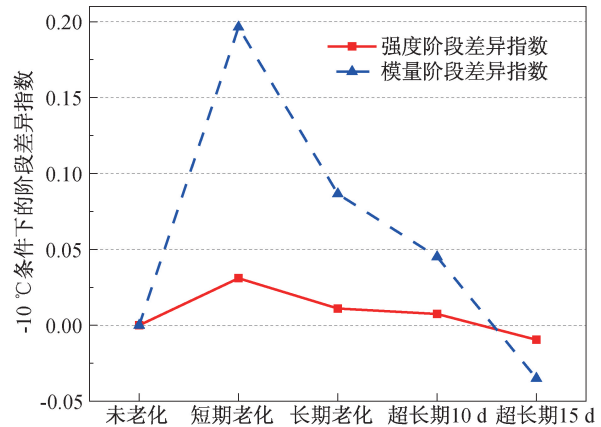


图 5 -10℃条件下强度、模量各老化阶段差异指数变化情况

Fig. 5 Variation rule of strength and modulus difference at -10℃

2.2.4 断裂能演化规律分析

由图 7 可知,在-10℃条件下,随着老化时间

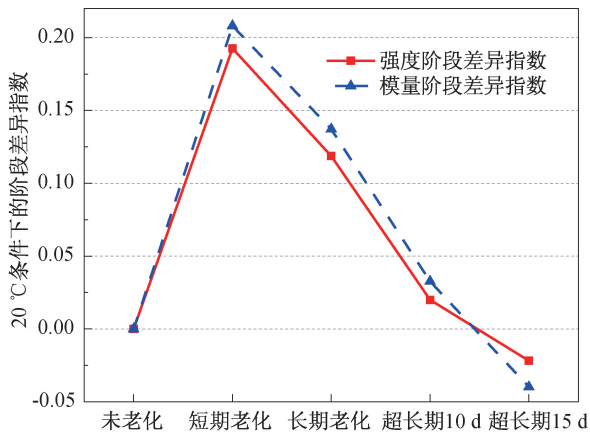


图6 20 °C条件下强度、模量各老化阶段差异指数变化情况

Fig. 6 Variation rule of strength and modulus difference at 20 °C

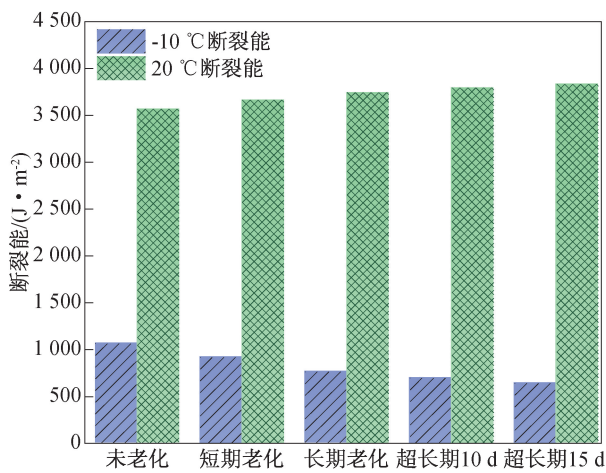


图7 断裂能演化规律

Fig. 7 Evolution law of fracture energy

增长,沥青混合料的断裂能逐渐下降。与未老化沥青混合料相比,沥青混合料断裂能呈单调趋势分别下降 13.76%、28.3%、34.51%、39.72%,原因在于沥青混合料的强度主要取决于界面拉伸强度,而沥青老化导致沥青混合料脆性增加,削弱沥青胶结料与矿料间的粘聚力,随着老化的深入,粘

聚力弱化最终导致其破坏所需的断裂能下降。

在 20 °C 试验温度下,随着老化深入,沥青混合料的断裂能呈上升趋势。与未老化沥青混合料相比,断裂能依次提高了 2.73%、4.96%、6.42%、7.48%,相较于-10 °C 低温条件,20 °C 老化作用对断裂能影响显著降低。除此之外,数据表明中温条件下断裂能的数据变化趋势与低温条件下断裂能相反,原因在于,低温下沥青分子间流动度降低,沥青呈硬脆性,外力作用下,混合料呈现较小的破坏位移;而中温时,沥青呈粘弹性,混合料破坏所需位移较大,导致其抗裂性有所提高^[20]。

3 沥青混合料力学指标与沥青指标相关性分析

沥青性能与沥青混合料性能息息相关,为分析二者之间的内在联系,对二者相关指标建立拟合曲线,进行相关性回归分析。通过先前试验数据综合可以发现沥青的指标变化主要集中在长期老化阶段及之前,超长期老化并不是指标变化的主要阶段,因此相关性分析中取沥青未老化、短期老化、长期老化三个阶段的数据进行拟合分析,拟合结果如图 8—图 11 所示。

从图 8 到图 11 可知,低温条件下,强度与沥青三大指标的拟合度均高于 0.95,中温下强度与沥青针入度、软化点拟合度接近 1。此外,以拟合优度 R^2 作为参考标准,中、低温下软化点与强度的相关性最高,针入度与强度的相关性略低于软化点与强度相关性。

同时,低温条件下,模量与沥青三大指标的拟合度均在 0.9 以上。20 °C 时,模量与针入度、软化点拟合度达到 0.99,与延度相关性较低。与强度相比较,模量与沥青宏观指标的相关性更高,可以表明,模量对老化更为敏感。

由拟合结果可得出,在沥青混合料老化过程

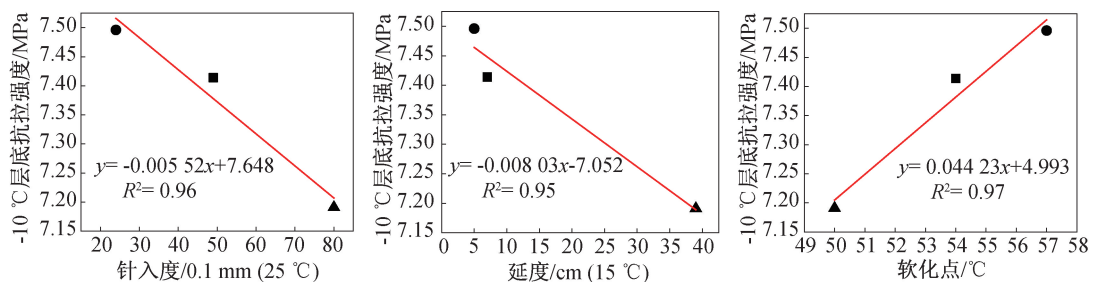


图8 -10 °C条件下强度与沥青三大指标相关性

Fig. 8 Correlation between strength and three indexes of asphalt at -10 °C

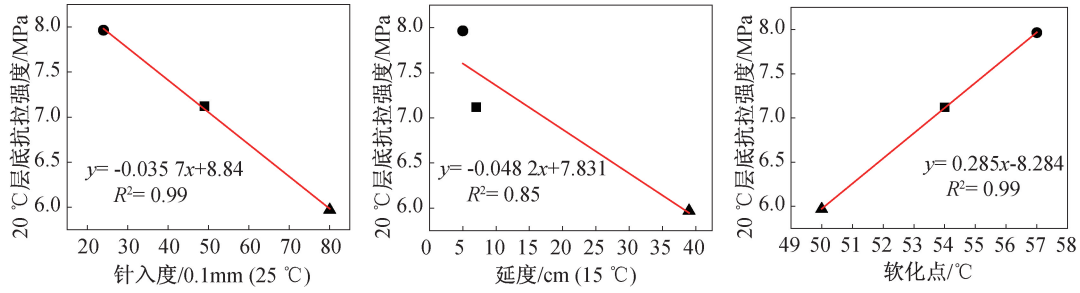


图9 20 °C条件下强度与沥青三大指标相关性

Fig. 9 Correlation between strength and three indexes of asphalt at 20°C

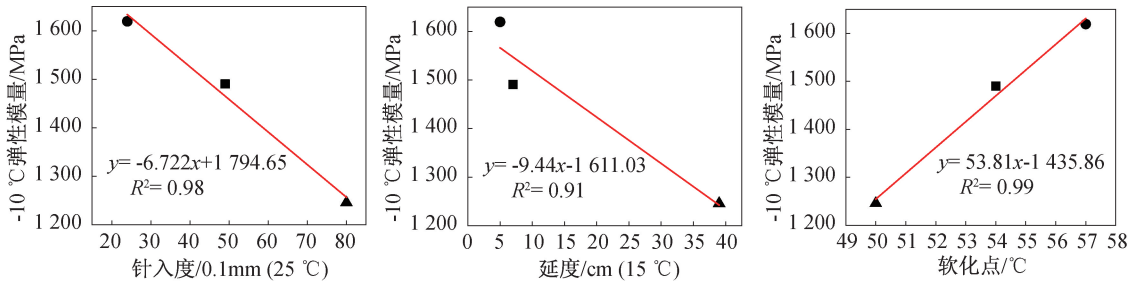


图10 -10 °C条件下模量与沥青三大指标相关性

Fig. 10 Correlation between modulus and three indexes of asphalt at -10°C

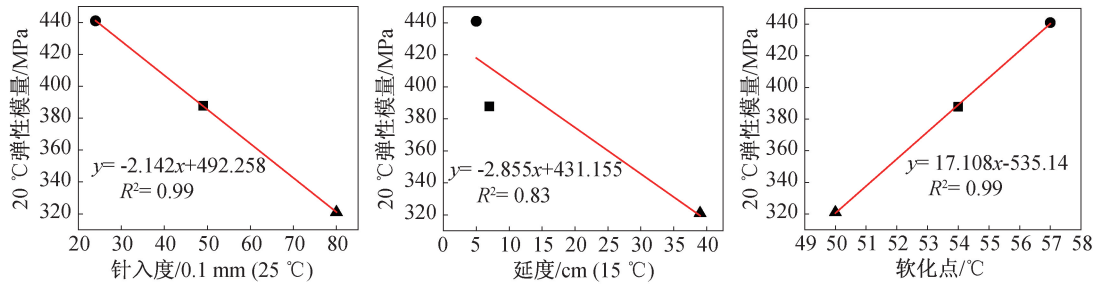


图11 20 °C条件下模量与沥青三大指标相关性

Fig. 11 Correlation between modulus and three indexes of asphalt at 20°C

中,沥青基本指标变化规律能够间接反应混合料强度的变化趋势,结合老化时期沥青三大指标变化规律的试验数据结果,老化作用对沥青软化点影响较小,因此推荐采用针入度对沥青混合料性能进行预测。

4 结论

- 1)随着老化时间增长,沥青针入度和延度下降,延度在短期老化阶段下降幅度最大。
- 2)20 °C时,长期老化显著提高了混合料强度,长期老化后,老化作用不明显;-10 °C时,老化作用对混合料强度影响较弱。低温环境显著提高了混合料弹性模量,且在老化初期,老化对模量的提升

作用最为明显。

3)根据阶段差异指数演化规律得出老化对混合料弹性模量影响比强度更明显。

4)相比于中温条件,老化对混合料低温断裂能作用更加明显,而中温断裂能显著高于低温断裂能。

5)老化前后沥青针入度、软化点与沥青混合料模量、强度具有较高线性相关性,拟合优度 R^2 基本高于 0.95,综合推荐针入度法对中低温下沥青混合料力学性能进行预测。

参考文献:

[1]栗培龙,张争奇,芦军,等. 沥青路面自然老化衰变行为及力学分析[J]. 公路交通科技:应用技术版,2008,4

- (S1):87-90.
- [2] 吴建涛,马鑫源,陈俊,等. 水分-老化耦合作用对沥青性能的影响[J]. 公路,2021,66(11):275-284.
- [3] 哇南,郎进. 纳米复合材料对 SBS 改性沥青热与紫外老化性能影响[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2022,46(2):319-322+329.
- [4] 王佳妮,薛忠军,谭忆秋. 紫外老化对沥青力学行为及聚集态的影响[J]. 中国公路学报,2011,24(1):14-19.
- [5] 金大勇,颜川奇,易宏宇,等. 老化对改性沥青宽温度域粘弹特性的影响研究[J/OL]. 建筑材料学报:1-15 [2022-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20211012.1554.010.html>.
- [6] 耿九光. 沥青老化机理及再生技术研究[D]. 西安:长安大学,2009.
- [7] ZHANG D, ZHANG H, SHI C. Investigation of Aging Performance of SBS Modified Asphalt with Various Aging Methods[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145:445-451.
- [8] BEHNOOD A, OLEK J. Rheological Properties of Asphalt Binders Modified with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), Ground Tire Rubber (GTR), or Polyphosphoric Acid (PPA)[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151:464-478.
- [9] 郑向雷. 沥青混合料高温特性研究[D]. 西安:长安大学,2006.
- [10] 陈海燕. 老化对聚酯纤维沥青混合料低温水稳性影响[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.
- [11] LAMOTHE S, PERRATON D, DI BENEDETTO H. Fatigue Behaviour of Dry or Partially Saturated Hot Mix Asphalt (HMA)[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(6):1100-1114.
- [12] 张锐,黄晓明,赵永利,等. 加入新型添加剂的沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技,2006(11):27-30.
- [13] 弥海晨,张娟,郭平,等. 老化后橡胶沥青混合料高温性能研究[J]. 中外公路,2019,39(4):251-254.
- [14] FAISAL H M, MANNAN U A, RAHMAN A, et al. Effects of RAP Sources for Performance Testing of Asphalt Concrete[C]// International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology 2017. 2017.
- [15] SAEIDI H, AGHAYAN I. Investigating the Effects of Aging and Loading Rate on Low-temperature Cracking Resistance of Core-based Asphalt Samples Using Semi-circular Bending Test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126:682-690.
- [16] 杨震. 沥青老化前后多尺度行为特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [17] 杨大田,朱洪洲. 沥青混合料的半圆弯拉与小梁三点弯拉对比试验[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2010,34(6):1224-1226+1231.
- [18] 应荣华,郑健龙,陈骁. 沥青老化效应的试验研究[J]. 公路交通科技,2007(6):20-23+28.
- [19] 高榕,赵乐,房士伟. 基于灰色理论的 SBS 改性沥青老化性能的评价方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(9):57-61.
- [20] 高壮元,安丰伟,刘文科. 不同老化方式对沥青混合料低温稳定性的影响[J]. 交通世界,2020(32):6-8.

(责任编辑 王利君)