

多因素耦合下沥青混合料拉压差异力学特性

潘勤学^{1,2,3}, 姜舜君^{1,2,3}, 吕松涛^{1,2,3}, 郑健龙^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 公路养护技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410114;
3. 极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对现行沥青路面设计时材料力学参数取值的可靠性不足, 基于道路材料的拉压差异特性, 开展了多因素耦合影响下沥青混合料拉压力学参数非线性特性及量化关系研究。结果表明, 沥青混合料拉压应力应变特性符合双模量理论的双线性特征; 拉压力学参数随加载速度增大先急剧增加后趋于平缓, 且呈幂函数关系; 与温度呈负指数函数关系, 且温度增幅越高力学参数减小幅度越大; 与沥青用量呈指数衰减模型函数关系, 高温时($>30^{\circ}\text{C}$)沥青用量的变化对力学参数影响相对较小, 最大力学参数所对应的沥青用量与马歇尔试验得到的最佳沥青用量基本一致; 就影响程度而言, 温度对力学参数的影响最大, 各因素对强度的影响最为显著, 抗拉力学参数较抗压力学参数更为敏感; 据此建立了多因素耦合作用下沥青混合料的拉压力学参数量化取值模型, 并推荐规范常用温度 15°C (20°C) 下的压拉强度比及压拉模量比分别为 6.5(7.5)、1.6(1.7), 压缩模强比及拉伸模强比分别为 400(17 00)、450(2 000)。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 多因素耦合; 非线性; 力学特性; 量化模型

中图分类号: U416

文献标志码: A

Mechanical Characterization of Tensile and Compressive Differences in Asphalt Mixtures in Multifactor Coupling

PAN Qinxue^{1,2,3}, JIANG Shunjun^{1,2,3}, LÜ Songtao^{1,2,3}, ZHENG Jianlong^{1,2,3}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. National Engineering Research Center for Highway Maintenance Technology, Changsha 410114, China; 3. National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, Changsha 410114, China)

Abstract: In response to the insufficient reliability of material mechanical parameter values in current asphalt pavement design, and based on the tensile and compressive difference characteristics of road materials, this paper conducted a study of nonlinear characteristics and quantitative relationship of tensile and compressive parameters of asphalt mixtures under the influence of multi-factor coupling. The results show that the tensile and compressive stress-strain characteristics of asphalt mixture in the elastic stage conform to the bilinear characteristics of the bi-modulus theory. The tensile and compressive mechanical parameters first increase sharply with the increase of loading speed and then tend to flatten out, and show a power function relationship. It has a negative exponential relationship with temperature, and the higher the temperature increase, the greater the decrease in mechanical parameters. The relationship between the asphalt dosage and the exponential decay model function is that the change in asphalt dosage at high temperatures ($>30^{\circ}\text{C}$) has a relatively small impact on the mechanical parameters. The asphalt dosage corresponding to the maximum mechanical parameter is basically consistent with the optimal asphalt dosage obtained from the Marshall test. In terms of the degree of influence, temperature has the greatest influence on the mechanical parameters, while factors have the most significant effect on strength. The tensile strength parameter is more sensitive than the compressive strength parameter, based on which the quantitative value model of the tensile and compressive parameter of asphalt mixtures under the influence of multifactorial coupling has been established. At the specification common temperature of 15°C (20°C), the ratio of compressive strength to tensile strength and the ratio of compressive modulus to tensile modulus can

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2603500, 2021YFB2600900); 国家自然科学基金(52225806, 52378441, 51908071); 湖南省自然科学基金(2024JJ5037); 浙江省交通运输厅重大研发项目(ZJXL-SJT-202316A); 山东省交通运输科技计划(2023B83); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划(202107)

第一作者: 潘勤学, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路面结构及材料力学特性。

E-mail: pqx123456789pqx@163.com



论文
拓展
介绍

be 6.5 (7.5) and 1.6 (1.7), respectively. The ratio of compressive modulus to compressive strength and the ratio of tensile modulus to tensile strength can be 400 (1 700) and 450 (2 000), respectively.

Keywords: road engineering; asphalt mixture; multi-factor coupling; nonlinearity; mechanical properties; quantitative model

从我国公路的投入与运营来看,不少公路还未达到使用年限,就已经出现了严重的功能性衰退与结构性破坏,造成巨大的经济损失^[1-4]。究其原因,现行路面结构设计理论及设计参数的取值与实际路面结构与材料的力学特性不匹配是其关键因素之一。目前沥青路面设计时参数的取值仅是粗略地对材料类型等进行区分,通过查询规范推荐表选取力学参数,且结构计算时各参数的取值基本是相互割裂的,一般凭经验及参考规范的推荐范围相互独立选取,并未充分考虑外界条件与材料自身内部特性等因素的影响,最终导致材料力学参数取值的不唯一性及结构计算结果的不确定性^[5-8]。

国内外学者针对上述问题开展了较多的试验研究。周雪艳等^[9]、田宇翔等^[10]、韦佑坡等^[11]通过数理统计方法研究了温度、沥青用量等对沥青混合料力学参数的影响,发现温度及沥青种类对力学参数影响最大;彭勇等^[12]通过试验得到油石比与级配类型对沥青混合料强度影响最为显著;黄拓等^[13]进行了不同加载速度及温度下沥青混合料刚度特性研究,揭示了动回弹模量的速度及温度相关性。然而,目前研究多集中于从影响因素对材料强度与模量的定性与简单定量分析,鲜有对材料参数随影响因素的变化进行系统的量化研究,也未构建多影响因素综合作用下材料参数取值模型。

此外,经研究发现道路材料自身具有显著的拉压不同力学特性,是典型的双模量(拉模量与压模量不等)材料^[14-17]。许多学者针对材料的双模量问题提出了不同的解析解与数值解求解方法^[18-19],并将其应用到工程材料的力学计算中^[20-21],揭示了经典线弹性理论在分析材料力学响应时所存在的弊端。然而现行路面结构设计理论仍采用单一的压模量作为计算参数,导致结构计算结果与实际偏差大,路面设计结果不可靠。针对该问题张起森等^[22]提出传统刚性路

面设计采用单一模量值计算不合理,并按照文克尔地基模型推导出具有拉压差异性的刚性路面设计公式;Yang等^[23]、潘勤学等^[24]对沥青路面关键点位进行力学响应计算分析,发现基于拉压差异性理论与传统线弹性理论的计算结果之间的偏差高达30%。因此,路面结构设计应充分考虑材料拉压差异力学特性带来的巨大影响。

本文的创新点在于针对现行沥青路面设计时材料力学参数取值未全面考虑内外因素及显著的拉压差异特性,导致其取值不科学、偏差大的问题,围绕多因素耦合作用下沥青混合料拉压力学参数非线性特性及其相互关系开展研究,最终建立多因素耦合的拉压力学参数取值模型,并构建强度和模量之间的函数关系,为基于双模量理论的沥青路面设计中力学参数的选取提供科学可靠的依据。

1 原材料及力学参数测试方法

1.1 原材料试验及配合比设计

本研究采用SBS(I-D)改性沥青,其性能指标测试结果均满足规范^[25]要求,如表1所示。

表1 SBS改性沥青试验结果
Tab. 1 Test results of SBS modified asphalt

| 测试内容 | 单位 | 测试值 | 技术要求 ^[25] |
|-----------------------------------|--------|------|----------------------|
| 针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s) | 0.1 mm | 52.6 | 30~60 |
| 延度 (5 cm·min ⁻¹ , 5 ℃) | cm | 28.6 | ≥20 |
| 软化点 | ℃ | 76.0 | ≥60 |
| 运动黏度 (135 ℃) | Pa·s | 1.8 | ≤3 |
| 弹性恢复 (25 ℃) | % | 79 | ≥75 |

试件采用AC-16沥青混合料,级配曲线参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)^[25]要求,如表2所示,最佳沥青用量为4.5%(质量分数)。单轴压缩试件为高度(100±2)mm、直径(100±2)mm的圆柱体;直接拉伸试件为250 mm×50 mm×50 mm的梁式试件。

1.2 力学参数试验设计

为探究沥青混合料拉压力学参数在多因素耦合作用下的非线性特性,本研究选取的影响因素包括沥青用量、试验加载速度及温度,具体测试方案如表3所示,并依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)^[26]开展单轴压缩与直接拉伸力学参数测试试验。

2 多因素耦合下沥青混合料力学参数非线性变化规律

2.1 多因素耦合下沥青混合料强度非线性变化规律

2.1.1 不同加载速度下沥青混合料强度变化规律

单轴压缩强度及直接拉伸强度随加载速度变化规律如图 1、图 2 所示,趋势均呈现幂函数关系。如式(1)所示,各曲线拟合相关系数均在 0.9 以上,其他条件下均有类似的变化规律。

表 2 AC-16 级配设计
Tab. 2 AC-16 grading design

| 筛孔孔径/ mm | 通过率/% | | | |
|-------------|-------|--------------------|--------------------|-------|
| | 设计值 | 上限 ^[25] | 下限 ^[25] | 中值 |
| 19 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 16 | 95.4 | 100.0 | 90.0 | 95.0 |
| 13.2 | 86.5 | 92.0 | 76.0 | 84.0 |
| 9.5 | 70.5 | 80.0 | 60.0 | 70.0 |
| 4.75 | 45.0 | 62.0 | 34.0 | 48.0 |
| 2.36 | 30.2 | 48.0 | 20.0 | 34.0 |
| 1.18 | 23.0 | 36.0 | 13.0 | 24.5 |
| 0.6 | 15.4 | 26.0 | 9.0 | 17.5 |
| 0.3 | 10.7 | 18.0 | 7.0 | 12.5 |
| 0.15 | 7.1 | 14.0 | 5.0 | 9.5 |
| 0.075 | 5.3 | 8.0 | 4.0 | 6.0 |

表 3 测试方案设计表
Tab. 3 Test program design

| 影响因素 | 因素水平 | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| 沥青用量/% | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 |
| 试验温度/℃ | 5 | 15 | 20 | 30 | 40 |
| 加载速度/(MPa·s ⁻¹) | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.50 |

$$R_{(c/t)}=\bar{a}_{(c/t)}v^{\bar{b}_{(c/t)}}\tag{1}$$

式中: $R_{(c/t)}$ 为单轴压缩强度或直接拉伸强度,MPa;
 $\bar{a}_{(c/t)}$ 、 $\bar{b}_{(c/t)}$ 为拟合参数; v 为加载速度,MPa·s⁻¹。

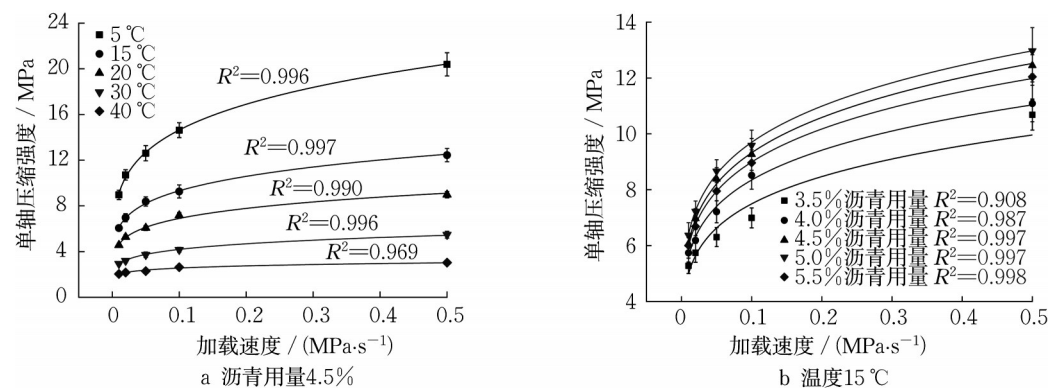


图 1 沥青混合料单轴压缩强度随加载速度变化规律

Fig. 1 Uniaxial compressive strength of asphalt mixture versus loading speed

2.1.2 不同温度下沥青混合料强度变化规律

根据试验数据,可建立起沥青混合料强度随温

由图 1、图 2 可知,沥青混合料强度对加载速度的敏感性随加载速度的增大而逐渐降低。在低加载速度(0.01~0.10 MPa·s⁻¹)时,强度增长率变化范围在 30%~60% 之间,而当在高加载速度(0.10~0.50 MPa·s⁻¹)时,其值在 20%~40% 之间,当加载速度达到 0.50 MPa·s⁻¹后强度值逐渐趋于稳定。结合图 1a 及图 2a 能够发现,当沥青混合料处于高温低加载速度时强度值较小,沥青胶结料主要呈现黏性性质且施加荷载作用时间较长,呈柔性破坏形式,集料与沥青胶结面共同分担荷载,胶结界面有充足时间发挥变形协调能力,试件常沿胶浆界面开裂(如图 3a 所示),该状态下混合料的强度很大程度受局部变形的影响;而当处于低温高加载速度时强度值较大,沥青胶结料主要呈现弹性性质且荷载作用时间较短,呈脆性破坏形式,胶结界面不能充分发挥变形协调能力,裂缝衍生速度较快且来不及沿胶结界面展开,骨料断裂为其破坏面主要形式(如图 3b 所示)。

沥青混合料的力学特性受试验温度及加载速度的影响显著,其中温度相对于沥青用量对强度的影响更大,且温度越高强度随加载速度变化越不敏感,并逐渐趋于一个定值。同等加载速度下,3.5% 沥青用量时的抗拉强度远小于其他沥青用量下的抗拉强度,其原因可能为沥青混合料抵抗直接拉伸破坏的能力主要来源于沥青胶浆黏结力及其与集料的黏附力,而沥青用料过少会导致胶结料与集料之间的有效胶结面减少,最终造成抗拉强度显著下降,而抗压强度未出现此现象,其原因为抗压强度主要依靠集料间的嵌挤力和集料与结合料间的黏结力抵抗试件压缩变形。

度的非线性关系。以温度为横坐标,分别以 4.5% 沥青用量与 0.1 MPa·s⁻¹ 加载速度为例,单轴压缩强

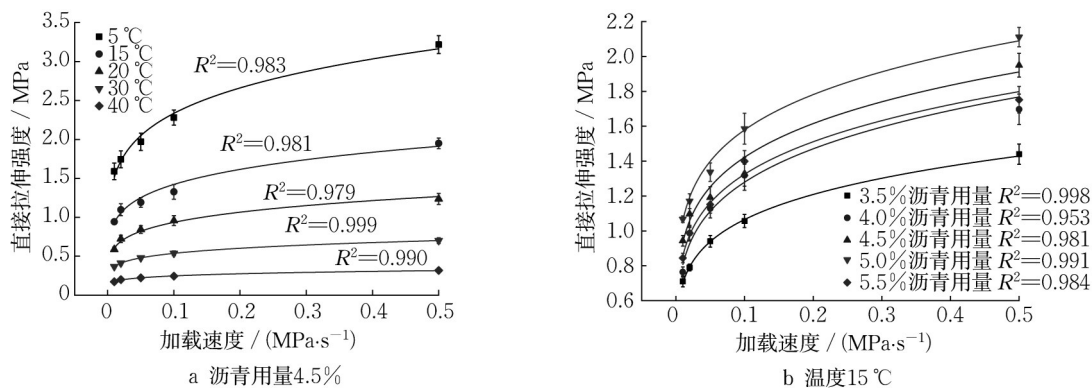


图2 沥青混合料直接拉伸强度随加载速度变化规律

Fig. 2 Direct tensile strength of asphalt mixture versus loading speed

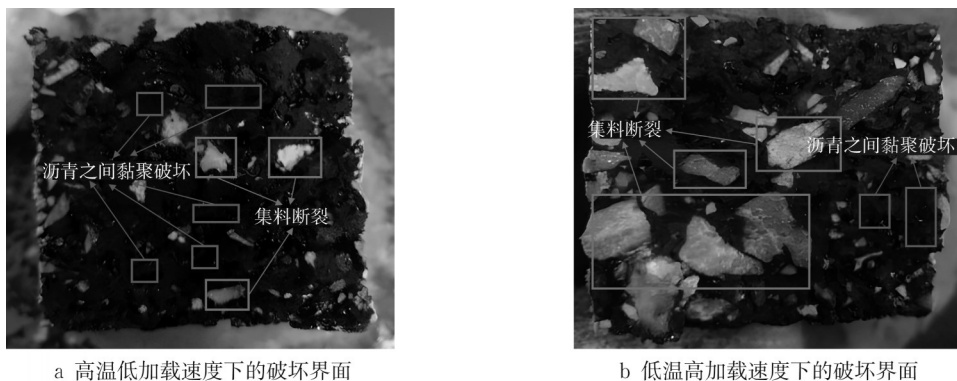


图3 试件破坏界面图

Fig. 3 Damage interface of specimen

度及直接拉伸强度随温度变化规律基本一致,如图4所示,趋势均呈现指数函数关系,如式(2)所示,各曲

线拟合相关系数均在0.9以上。其他条件下均有类似的变化规律。

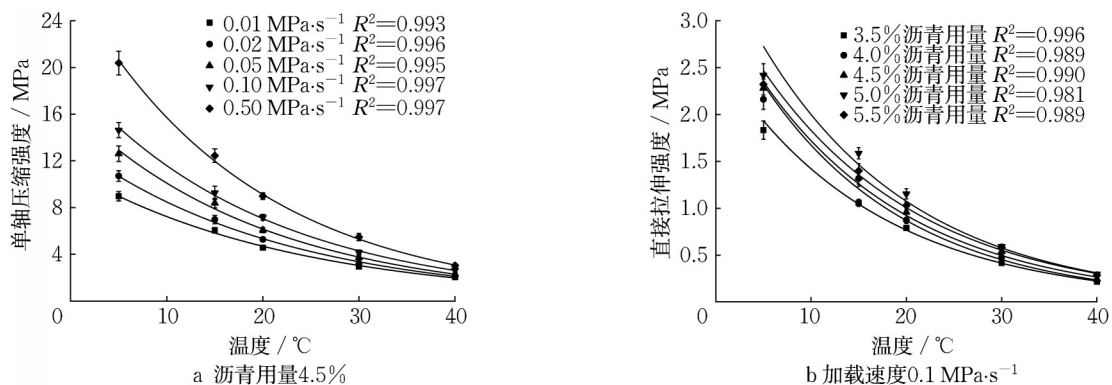


图4 沥青混合料强度随温度变化规律

Fig. 4 Asphalt strength versus temperature

$$R_{(c/t)} = \bar{d}_{(c/t)} e^{\bar{f}_{(c/t)} T} \quad (2)$$

式中: $R_{(c/t)}$ 为单轴压缩强度或直接拉伸强度,MPa; $\bar{d}_{(c/t)}$ 、 $\bar{f}_{(c/t)}$ 为拟合参数; T 为温度,°C。

由图4可知,沥青混合料强度对温度的敏感性随温度的增大而逐渐降低。从5℃升至15℃时的变化幅度最大;而在15℃逐步升至40℃呈现均匀变化,幅度较小,当温度达到40℃后趋于稳定。不同

加载速度下强度随温度的变化程度相比于不同沥青用量的要大,加载速度越大,压缩强度随温度变化敏感性越大,而沥青用量对压缩强度随温度变化的敏感性几乎无影响。当加载速度与沥青用量固定时,低温(5℃)下的单轴压缩强度约为高温(40℃)下的4~7倍,而低温(5℃)下的直接拉伸强度约为高温(40℃)下的8~10倍,由此说明温度对沥青混合料

的直接拉伸强度影响要大于单轴抗压强度。

2.1.3 不同沥青用量下沥青混合料强度变化规律

根据试验数据,可建立起沥青混合料强度随沥青用量的非线性关系,以沥青用量为横坐标,分别以

20℃温度与0.1 MPa·s⁻¹加载速度为例,单轴压缩强度及直接拉伸强度随沥青用量变化规律如图5、图6所示,趋势均呈现指数函数关系,如式(3)所示。其他条件下均有类似的变化规律。

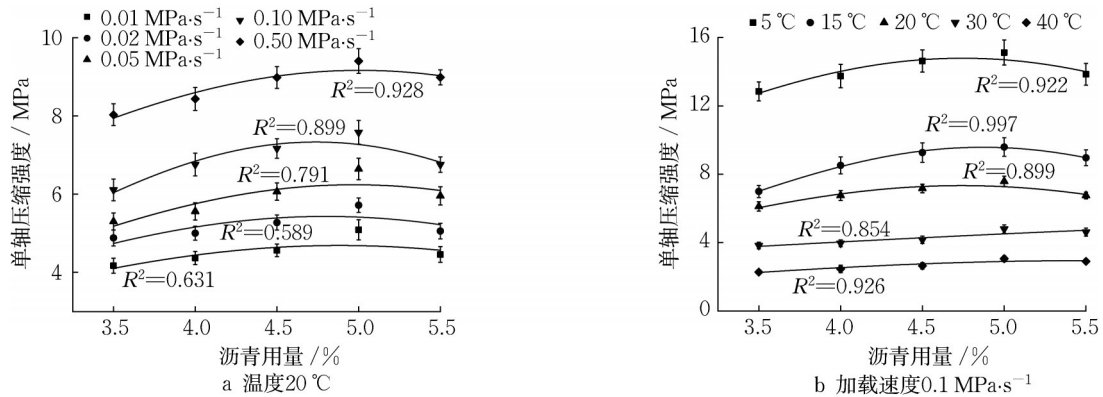


图5 沥青混合料单轴压缩强度随沥青用量变化规律

Fig. 5 Uniaxial compressive strength of asphalt mixture versus asphalt dosage

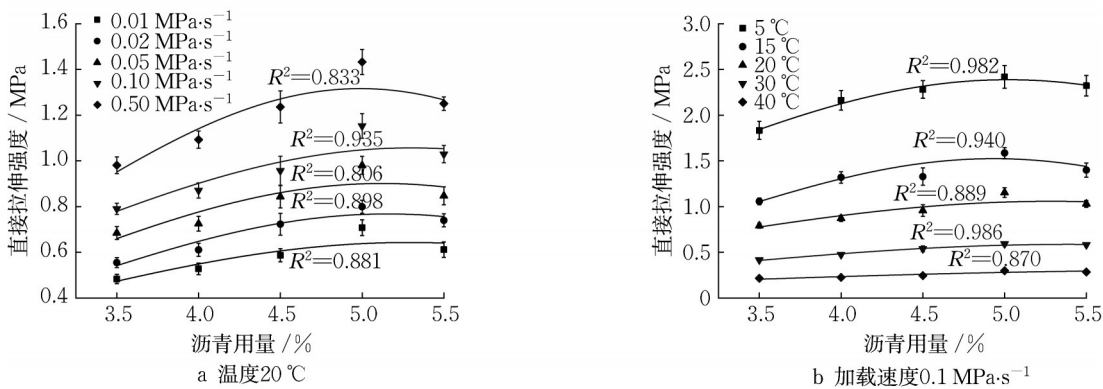


图6 沥青混合料直接拉伸强度随沥青用量变化规律

Fig. 6 Direct tensile strength of asphalt mixtures versus asphalt dosage

$$R_{(c/t)} = e^{\bar{g}_{(c/t)} + \bar{h}_{(c/t)}C + \bar{i}_{(c/t)}C^2} \quad (3)$$

式中: $R_{(c/t)}$ 为单轴压缩或直接拉伸强度,MPa; $\bar{g}_{(c/t)}$ 、 $\bar{h}_{(c/t)}$ 、 $\bar{i}_{(c/t)}$ 为拟合参数; C 为沥青用量,%。

由图5、图6可知,单轴抗压强度及直接拉伸强度均随沥青用量的增大呈先增大后减小趋势,且无论何种温度还是加载速度,抗压强度及拉伸强度的最大值对应的沥青用量均比最佳沥青用量(4.5%)要大0.2%~0.3%。因此,从提高混合料强度的角度出发,实际工程中可以适当增大沥青用量。此外,综合图5a和图6a可以发现,在相同加载速度下,沥青混合料直接拉伸强度随沥青用量的变化幅度(最大约为46%)明显大于单轴压缩强度(最大约为17%);综合图5b和图6b可以发现,从20℃开始,随着温度的增加,单轴压缩强度及直接拉伸强度随沥青用量的增大基本呈现稳定趋势,表明当温度增加

到30℃左右时,即使增大沥青用量也不会对沥青混合料的压缩强度及拉伸强度产生较大影响。

2.1.4 多因素耦合下沥青混合料强度取值模型的建立

基于压、拉强度试验结果及多元非线性拟合分析方法,可建立沥青混合料强度在加载速度、温度及沥青用量耦合作用下取值模型,如式(4)和式(5)所示。

单轴压缩强度为

$$R_c = e^{-0.1047C^2 + 0.963C + 1.214 - 0.053T} v^{-0.002C + 0.2} \quad (4)$$

直接拉伸强度为

$$R_t = e^{-0.0774C^2 + 0.775C - 0.313 - 0.061T} v^{-0.001C + 0.2} \quad (5)$$

为验证强度取值模型的使用性与拟合效果,以标准误差(RMSE)为判别指标,计算公式如式(6)所示,对预测模型的精度进行判别与评估,将预测值与实测值进行比较,绘制图7的45°等值线图。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{\text{实}} - V_{\text{预}})^2} \quad (6)$$

式中: n 为样本点个数; $V_{\text{实}}$ 为实测值; $V_{\text{预}}$ 为预测值。

从图7可以看出,采用强度取值模型计算得到的125组对比数据点基本分布在坐标系的45°等值线

两侧附近,且通过计算得到的单轴压缩与直接拉伸的标准误差分别约为0.512 MPa与0.081 14 MPa。因此,可采用此模型对AC-16沥青混合料拉压强度进行预估,其结果稳定可靠,且精度高于90%,该模型能为沥青混合料拉压强度参数取值提供参考。

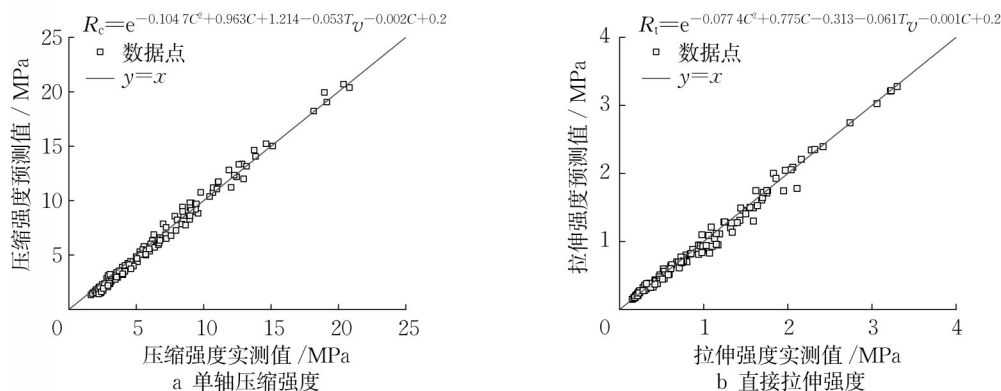


图7 沥青混合料压拉强度模型45°图

Fig. 7 Asphalt mixture compressive and tensile strength model 45° plot

2.2 多因素耦合下沥青混合料模量非线性变化规律

2.2.1 沥青混合料应力应变曲线非线性特性

单轴压缩及直接拉伸模量测试试验中,以15℃、4.5%最佳沥青用量与0.1 MPa·s⁻¹加载速度的试验条件为例,其他试验条件下均呈现相同的变化规律,各级荷载和纵向应变的实时数据如图8所示。由图8可知,沥青混合料单轴压缩应变随荷载

具有滞后效应,其竖向应变峰值出现时间略微晚于荷载峰值出现时间;而直接拉伸测试中,沥青混合料的竖向应变峰值几乎与荷载峰值同步出现。将沥青混合料各级拉压荷载下应力应变关系绘制于图9中。由图9可知,沥青混合料拉压应力应变特性符合双模量理论的双线性特征,其他因素组合下也有类似规律。

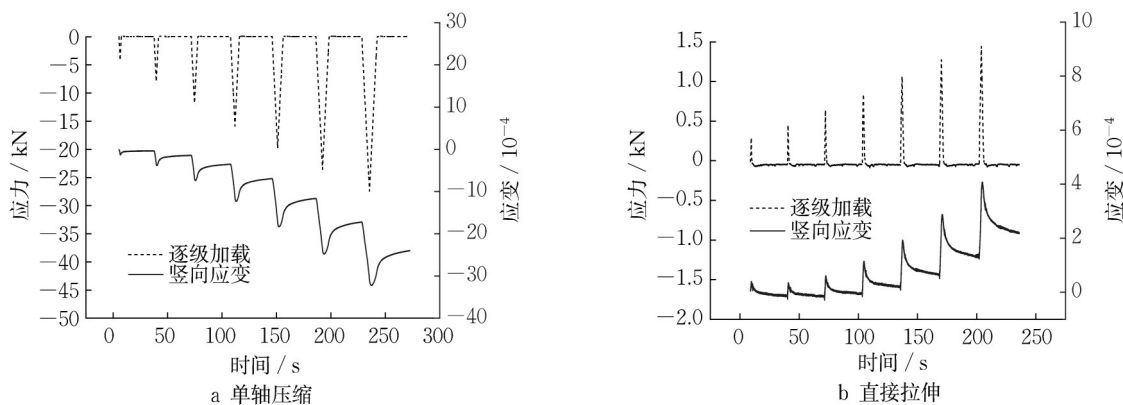


图8 沥青混合料试验各级荷载和应变数据

Fig. 8 Load and strain data for all levels of asphalt mixture testing

2.2.2 不同加载速度下沥青混合料模量变化规律

参照强度分析方法,以加载速度为横坐标,选取最佳沥青用量及15℃温度下的模量为研究对象,沥青混合料单轴压缩模量及直接拉伸模量随加载速度变化规律如图10所示,趋势均呈现幂函数关系,如式(7)所示,各曲线拟合相关系数均在0.9以上。其他条件下均有类似的变化规律。

$$E_c = \bar{a}_c' v^{\bar{b}_c'} \quad (7)$$

式中: E_c 为单轴压缩模量, MPa; \bar{a}_c' 、 \bar{b}_c' 为拟合参数; v 为加载速度, MPa·s⁻¹。

由图10可知,沥青混合料单轴抗压模量及直接拉伸模量对加载速度的敏感性随加载速度的增大而逐渐降低,当加载速度从0.01 MPa·s⁻¹增加至0.1 MPa·s⁻¹时,不同条件下模量增长率变化范围在

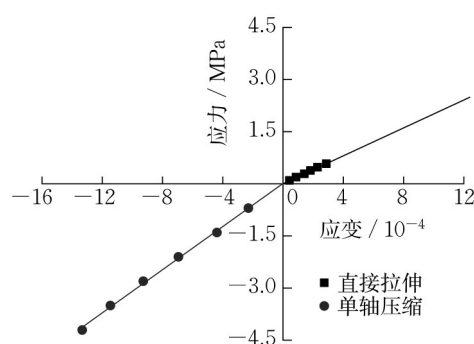


图9 沥青混合料拉压应力应变双线性模型

Fig. 9 Bi-linear model of tensile and compressive stress-strain of asphalt mixture

50%~80%之间,而当加载速度从 $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至 $0.5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,模量增长率变化范围在25%~40%之间,且在当加载速度达到 $0.5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 后逐渐趋于稳定;此外,沥青混合料模量值对温度的敏感性明显高于对沥青用量的敏感性。

2.2.3 不同温度下沥青混合料模量变化规律

由试验数据可建立沥青混合料模量随温度的非线性关系。以温度为横坐标,分别以4.5%沥青用量与 $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速度为例,单轴压缩模量及直

接拉伸模量随温度变化规律如图11所示,趋势均呈现指数函数关系,如式(8)所示,各曲线拟合相关系数均在0.9以上。其他条件下均有类似的变化规律。

$$E_c = \bar{d}'_c e^{\bar{f}'_c T} \quad (8)$$

式中: E_c 为单轴压缩模量,MPa; \bar{d}'_c, \bar{f}'_c 为拟合参数; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由图11可知,沥青混合料单轴抗压模量及直接拉伸模量随温度的变化趋势同强度一致,均在当温度达到 40°C 后趋于稳定,且模量对加载速度变化的敏感性同样要显著高于对沥青用量变化的敏感性。此外,当加载速度与沥青用量固定时,低温(5°C)下的单轴压缩模量约为高温(40°C)下的4~6倍,而低温(5°C)下的直接拉伸模量约为高温(40°C)下的6~8倍。同强度分析结果类似,温度对沥青混合料直接拉伸模量的影响要大于单轴压缩模量。

2.2.4 不同沥青用量下沥青混合料模量变化规律

根据试验数据,可建立起沥青混合料模量随沥青用量的非线性关系。以沥青用量为横坐标,分别以 20°C 温度与 $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速度为例,单轴压

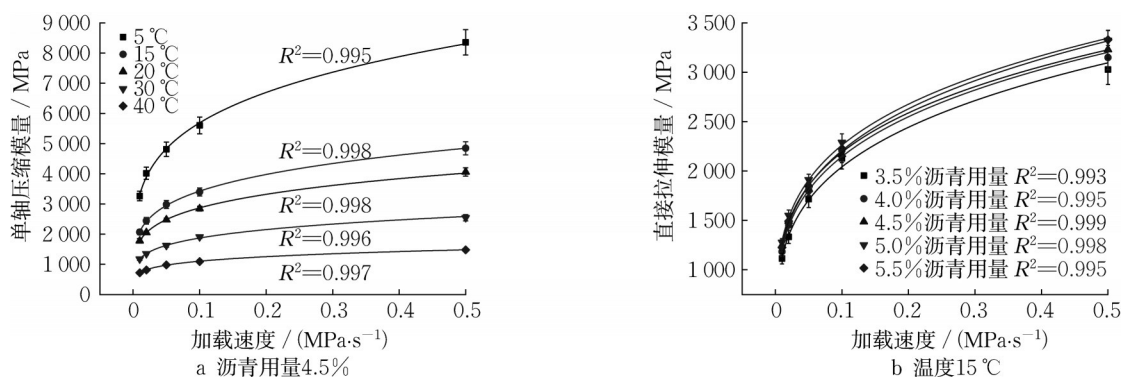


图10 沥青混合料模量随加载速度变化规律

Fig. 10 Asphalt mixture modulus versus loading speed

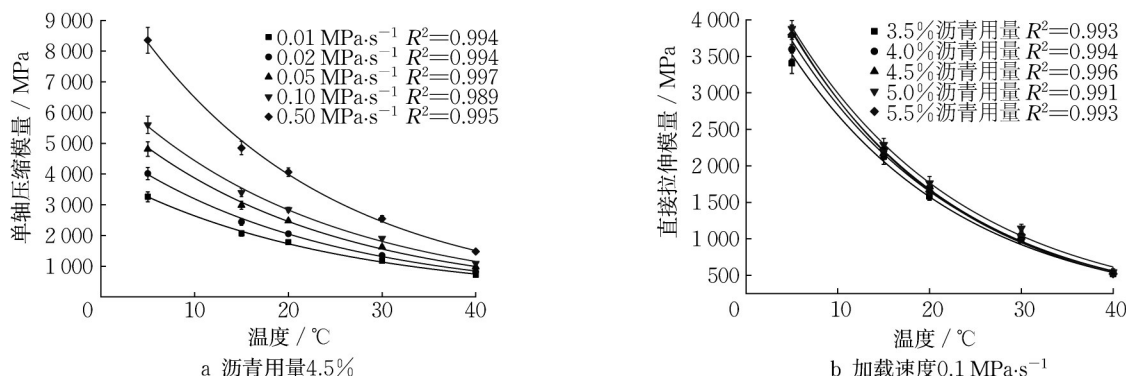


图11 沥青混合料模量随温度变化规律

Fig. 11 Asphalt mixture modulus versus temperature

缩模量及直接拉伸模量随沥青用量变化规律如图12所示,趋势均呈现指数函数关系,如式(9)所示。其他条件下均有类似的变化规律。

$$E_c = e^{\bar{g}_c' + \bar{h}_c' C + \bar{i}_c' C^2} \quad (9)$$

式中: E_c 为单轴压缩模量, MPa; \bar{g}_c' 、 \bar{h}_c' 、 \bar{i}_c' 为拟合参数; C 为沥青用量, %。

由图12可知,同强度分析结果类似,单轴压缩模量及直接拉伸模量随沥青用量的增大呈先增大后减小趋势,且均在温度达到30℃以上时,沥青用量对模量的影响几乎可以忽略;此外,抗压模量与拉伸模量在沥青用量为4.75%附近达到峰值,较最佳沥青用量(4.5%)处的模量值高出约0.25%。

结合拉压模量测试结果,可知拉压模量随沥青用量变化相较于随加载速度、温度的变化要小的多。根据数值大小可判定温度对模量值的影响程度最大,其次为加载速度,最后则为沥青用量。当温度从5℃变化到40℃时,压模量最低减少了4倍,拉模量最低减少了6倍;当加载速度从0.01 MPa·s⁻¹变化到0.50 MPa·s⁻¹时,压模量增加了105%~160%,拉模量则增加了130%~185%;而当沥青用量变化时,压缩模量的增加幅度在8%~30%之间,拉伸模量的增加幅度则处于4%~22%之间。此外,在最佳沥青用量的基础上适当增加约0.2%~0.3%的沥青用量,将对提高沥青混合料抗变形能力具有重要的意义。

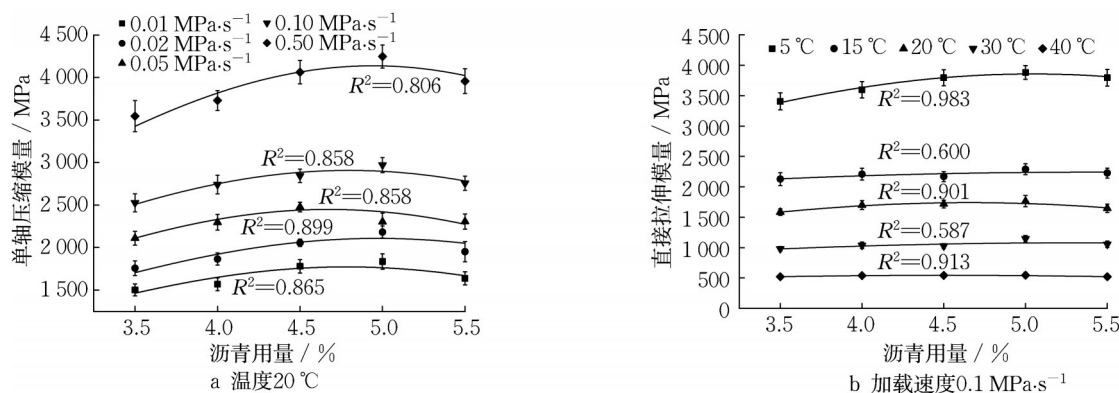


图12 沥青混合料模量随沥青用量变化规律

Fig. 12 Asphalt mixture modulus versus asphalt dosage

2.2.5 多因素耦合下沥青混合料模量取值模型的建立

依据试验结果及分析,可建立沥青混合料拉压模量随加载速度、温度及沥青用量变化的量化取值模型。如式(10)和式(11)所示。

单轴压缩模量为

$$E_c = e^{-0.0805C^2 + 0.809C + 7.410 - 0.048T_v^{0.244} - 0.0014T} \quad (10)$$

直接拉伸模量为

$$E_t = e^{-0.0538C^2 + 0.550C + 7.738 - 0.057T_v^{0.267} - 0.0015T} \quad (11)$$

同样地,为验证模量取值模型的使用性与拟合效果,对依据模型得到的预测值与实测值进行比较,绘制图13的45°等值线图,并分析两者的差异性。

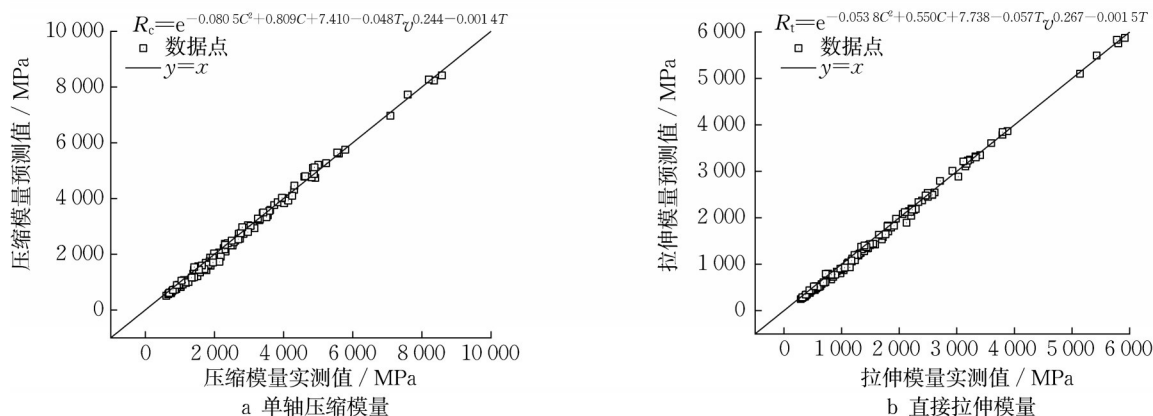


图13 沥青混合料拉压模量模型45°图

Fig. 13 Asphalt mixture tensile and compressive model 45° plot

由图13可得,对比数据点分布在等值线图的两侧,计算得到单轴压缩模量与直接拉伸模量的标准误差分别为144.67 MPa和39.94 MPa,表明该模型用来预测模量值准确可靠,精度大于90%,可为实际路面设计中多因素耦合作用下的AC-16沥青混合料拉压模量取值提供参考。

3 沥青混合料拉压力学参数间差异性及相关关系

3.1 沥青混合料不同力学指标间相关性

沥青混合料作为常用的面层材料,现行路面设计中其强度与模量参数的取值往往是相互独立的,并未根据两者的内在联系进行取值。而强度试验过程涵盖了试件的线弹性与塑性阶段,模量试验过程则只发生在试件的弹性阶段,两者之间必定存在某种内在联系。因此,本文结合多因素耦合下AC-16沥青混合料压、拉强度与对应的模量测试结果,建立压拉模强比($E_c/R_c/R_{ct}$)随影响因素的变化关系。图14分别以4.5%沥青用量、0.1 MPa·s⁻¹加载速度、20℃温度作为典型固定值开展分析。

由图14a可知,沥青混合料压拉模强比随加载速度的增大而增大,在高加载速度下最终趋向于一个固定值。其中,拉模强比明显大于压模强比。现行规范中常采用15℃或20℃作为沥青混合料力学参数测试的温度。由图14a可知,15℃下对应的压模强比约为400,拉模强比约为1700;20℃下对应的压模强比约为450,拉模强比约为2000。

由图14b可知,沥青混合料压、拉模强比随温度的增大而增大,基本符合线性增长规律。当沥青用量变大时,模强比的增长速度变小,沥青用量为5.5%时,模强比基本保持稳定,不随温度的变化而变化。当沥青用量为最佳沥青用量4.5%时,压模强比在不同温度下的变化范围约为350~450,拉模强比在不同温度下的变化范围约为1650~1950。

由图14c可知,随着沥青用量的增加,沥青混合料压拉模强比表现出相反的变化趋势,压模强比随沥青用量的增大呈现增大的趋势,但总体上变化幅度不大,基本保持在15%以内,而拉模强比随沥青用量的增大呈现减小的趋势,减大幅度相对较大,随沥青用量的变化范围约为1530~2350。

由于强度与模量是两个完全相互独立的试验,试验过程不同,且模量试验相对复杂,因此通过模强比的变化范围,通过测试强度便能预测相应条件下

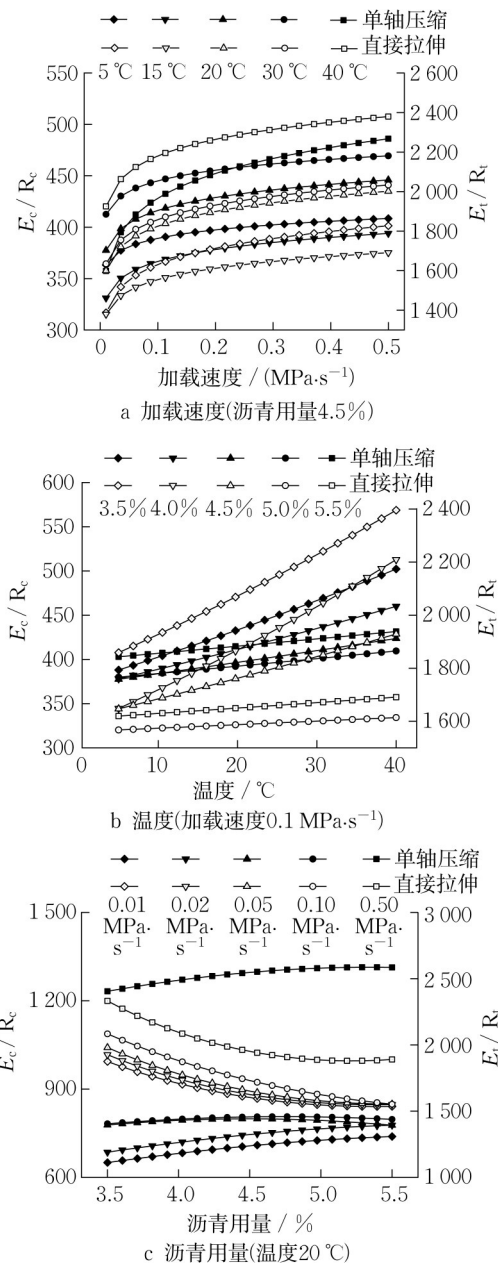


图14 沥青混合料压拉模强比随影响因素的关系

Fig. 14 E_{ct}/R_{ct} of asphalt mixtures versus influencing factors

的模量范围,简化试验过程,可为路面面层设计时不同材料参数间的匹配性提供了参考依据。

3.2 沥青混合料拉压力学参数对比

基于双模量理论的路面结构设计中,路面材料的拉压力学参数取值及其比值对路面力学响应计算结果影响很大^[24]。本文对不同影响因素下的沥青混合料压拉力学参数(压拉强度比 R_c/R_t 、压拉模量比 E_c/E_t)数据进行差异性及其比值大小分析,计算所得的压拉强度比和压拉模量比如表4所示(限于篇幅文中仅列出4.5%沥青用量下的数据)。

表 4 多因素耦合作用下沥青混合料压拉强度比(R_c/R_t)与压拉模量比(E_c/E_t)结果汇总Tab. 4 Summary of results of R_c/R_t and E_c/E_t of asphalt mixtures under multi-factors coupling effect

| $v/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$ | R_c/R_t | | | | | E_c/E_t | | | | |
|------------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 °C | 15 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 5 °C | 15 °C | 20 °C | 30 °C | 40 °C |
| 0.01 | 5.64 | 6.43 | 7.78 | 8.01 | 11.79 | 1.58 | 1.66 | 1.80 | 2.01 | 2.18 |
| 0.02 | 6.14 | 6.35 | 7.30 | 7.77 | 10.87 | 1.56 | 1.64 | 1.74 | 1.94 | 2.12 |
| 0.05 | 6.40 | 7.03 | 7.19 | 7.78 | 10.33 | 1.52 | 1.60 | 1.70 | 1.90 | 2.05 |
| 0.10 | 6.42 | 6.98 | 7.49 | 7.74 | 10.80 | 1.48 | 1.57 | 1.66 | 1.86 | 2.01 |
| 0.50 | 6.34 | 6.38 | 7.27 | 7.82 | 9.55 | 1.44 | 1.50 | 1.63 | 1.80 | 1.97 |

从表4可以看出, R_c/R_t 数值的大小受加载速度与沥青用量变化的影响较小,而受温度的影响较大,不同温度下 R_c/R_t 的平均值如图15所示。

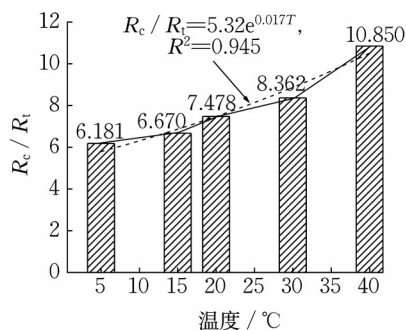
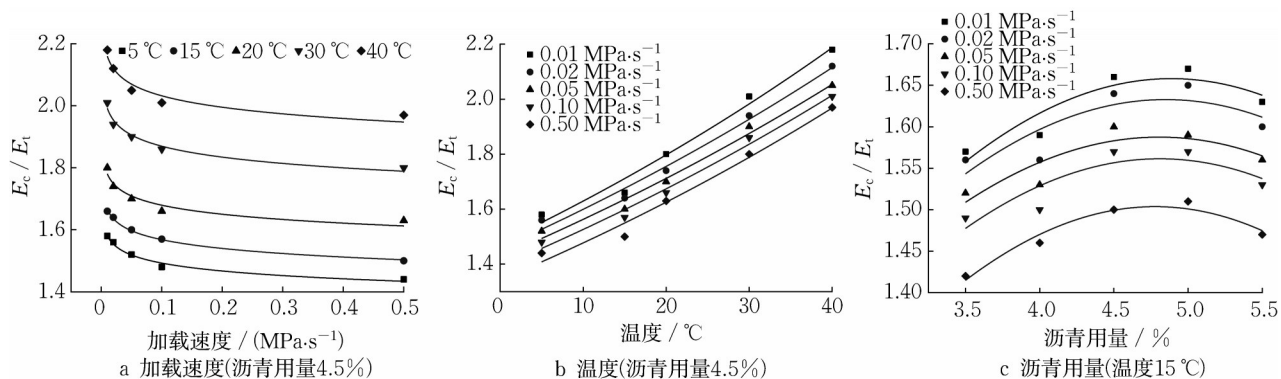
图 15 不同温度下沥青混合料 R_c/R_t 的平均值对比Fig. 15 Comparison of mean values of R_c/R_t of asphalt mixtures at different temperatures

图15反映了 R_c/R_t 在不同温度下的数值大小。压拉强度比随温度的增加可分为3个阶段,在5 °C到15 °C,随温度的增加较缓慢,增率为7.9%;在15 °C到30 °C,增率为25.4%;而在30 °C到40 °C,增率达到29.7%。图15充分表明温度的升高加大了沥青

混合料拉压强度间的差异程度。原因在于温度升高,沥青流动性增加,沥青与集料间的黏结力降低,导致拉压强度均降低,而构成单轴压缩强度的还有集料间的嵌挤力,该性质力的大小不受温度影响,因此导致单轴压缩强度随温度升高而降低的程度相比直接拉伸强度较小。此外,压拉强度比 R_c/R_t 随温度的变化可采用指数函数进行拟合(拟合公式见图15),拟合系数达到0.945,此公式可为不同温度下面层材料的拉压强度选取提供参考。

根据表4数据,以4.5%沥青用量与15 °C下的 E_c/E_t 为例,绘制图16并开展分析。

由图16可知,压拉模量比随加载速度的增大而减小,随温度的增大而增大,随沥青用量的增大呈现先增大后减小的趋势。其中比值大小受温度的影响最大,依次为加载速度、沥青用量。相比5 °C,40 °C下的 E_c/E_t 增长率范围为35%~40%;相比0.01 $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$,0.5 $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的 E_c/E_t 增长率范围为8%~12%;而不同沥青用量下, E_c/E_t 的最大值与最小值之差最大仅为6.5%。因此,内部因素对沥青混合料拉压差异性的影响程度较外部因素的影响更弱。

图 16 不同影响因素下沥青混合料 E_c/E_t 对比Fig. 16 Comparison of E_c/E_t of asphalt mixtures at different influencing factors

综上所述,温度的变化对沥青混合料的拉压差异性程度影响最大,当温度从5 °C增长至40 °C时,压拉参数比大致提高了40%以上,而加载速度与沥青

用量的变化对沥青混合料的压拉参数比影响不大,随着影响因素的变化,基本均维持在10%以内。因此,在采用双模量理论进行面层结构设计时,设计参

数的选取要着重考虑温度对拉压差异的影响。此外,对于现行规范常采用的15℃或20℃试验温度,AC-16沥青混合料对应的压拉强度比、压拉模量比的大小约为6.7(7.5)、1.6(1.7)。

4 结论

本文基于沥青混合料的拉压差异特性,开展了沥青用量、加载速度、温度等多因素耦合作用下的AC-16沥青混合料拉压强度和拉压模量的非线性特性及其相互关系研究,揭示了不同影响因素下沥青混合料的拉压差异性变化规律,主要结论如下:

(1) 沥青混合料拉压应力应变特性符合双模量理论的双线性特征,其拉压强度、拉压模量与加载速度、温度及沥青用量具有良好的相关性,据此建立了各力学参数随加载速度、温度及沥青用量变化的量化取值模型,可为基于双模量理论的路面结构计算与分析的设计参数取值提供依据。

(2) 沥青混合料拉压力学参数随加载速度增大先急剧增加后趋于平缓;随温度的增加而减小,低温下力学参数约为高温下的4~10倍;随沥青用量的增加先增加后减小,当温度提高到30℃以上时,沥青用量的变化对力学参数的影响相对较小,且最大力学参数值所对应的沥青用量与马歇尔设计法得出的最佳沥青用量基本一致(略大0.2%~0.3%)。

(3) 就影响因素的作用大小而言,温度对沥青混合料拉压力学参数的影响程度最大,其次为加载速度,最后则为沥青用量;就具体力学参数而言,温度对强度的影响最显著;就力学参数拉压特性而言,抗拉力学参数对影响因素的变化更敏感。

(4) 沥青混合料拉压差异性受温度影响最大,压拉参数比随温度变化最大可提高40%以上,而加载速度与沥青用量的变化对其变化影响较小,基本维持在10%以内。

(5) 对于规范设计试验温度15℃(20℃)下的AC-16沥青混合料,其压拉强度比、压拉模量比可取为6.5(7.5)、1.6(1.7);压缩模强比、拉伸模强比可取为400(1 700)和450(2 000)。

作者贡献声明:

潘勤学:研究命题的提出与方案制定,论文撰写与修改。

姜舜君:试验及数据分析,论文撰写。

吕松涛:研究方案制定与论文修改。

郑健龙:研究方案指导及论文修改。

参考文献:

- [1] QIAN G P, SHI C Y, YU H N, *et al.* Evaluation of different modulus input on the mechanical responses of asphalt pavement based on field measurements [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 312: 125299.
- [2] CHEN S Q, WANG D S, FENG D C, *et al.* Fast and accurate method for calculating the surface mechanical responses of asphalt pavements [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(9): 4020090.
- [3] 吕松涛,刘建峰,岳爱军,等.基于弯沉与层底拉应力指标的沥青路面结构层疲劳寿命匹配性[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,11(4):8.
LÜ Songtao, LIU Jianfeng, YUE Aijun, *et al.* Matching of fatigue life for asphalt pavement based on deflection and layer bottom tensile stress indexes [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2014, 11(4):8.
- [4] 关宏信,李铭哲,曾勇,等.基于贝雷法参数与CEI的沥青混合料级配优化[J].交通科学与工程,2022,38(2):1.
GUAN Hongxin, LI Mingzhe, ZENG Yong, *et al.* Gradation optimization of asphalt mixtures based on the Bailey method parameter and the construction energy index [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38(2):1.
- [5] NOROUZI Y, GHASEMI S H, NOWAK A S, *et al.* Performance-based design of asphalt pavements concerning the reliability analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 332: 127393.
- [6] DONG Z J, WANG T X, MA X Y, *et al.* Structural performance evaluation of airport asphalt pavement based on field data measurement and finite element simulation [J]. *Measurement*, 2023, 210: 112553.
- [7] ZHANG J, BAO L L. Determination of asphalt mixture's viscoelastic constitutive parameters for pavement response analysis using dynamic modulus transformation [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 315: 125729.
- [8] 石中州,栾华锋,董宏运.沥青混合料动态力学性能的围压应力依赖性研究[J].中外公路,2023,43(5):248.
SHI Zhongzhou, LUAN Huafeng, DONG Hongyun. Study on dependence of dynamic mechanical properties of asphalt mixture on surrounding compressive [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(5):248.
- [9] 周雪艳,马磊,田宇翔,等.面层沥青混合料抗压回弹模量的取值[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(5):615.
ZHOU Xueyan, MA Biao, TIAN Yuxiang, *et al.* Value of compressive resilient modulus of asphalt mixture in surface layer [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science)*, 2017, 38(5):615.
- [10] 田宇翔,马磊,周雪艳,等.面层沥青混合料弯曲刚度模量取值研究[J].硅酸盐通报,2016,35(10):3280.
TIAN Yuxiang, MA Biao, ZHOU Xueyan, *et al.* Value of the bending stiffness modulus of asphalt mixture in surface layer

- [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(10): 3280.
- [11] 韦佑坡, 马磊, 司伟. 寒区沥青混合料抗压强度影响因素[J]. 公路交通科技, 2012, 29(4): 19.
WEI Youpo, MA Biao, SI Wei. Influencing factors of compression strength of asphalt mixture in cold region [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(4): 19.
- [12] 彭勇, 孙立军, 石永久, 等. 沥青混合料劈裂强度的影响因素[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1304.
PENG Yong, SUN Lijun, SHI Yongjiu, *et al.* Factors affecting splitting strength of asphalt mixture[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2007, 37(6): 1304.
- [13] 黄拓, 漆帅, 蒋浩浩, 等. 单向拉伸应力状态下沥青混合料强度和刚度特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 460.
HUANG Tuo, QI Shuai, JIANG Haohao, *et al.* Stress and stiffness characteristics of asphalt mixture under uniaxial tensile stress state [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 460.
- [14] 潘勤学, 郑健龙, 文丕华. 不同模量理论广义弹性定律的深入研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 93.
PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, WEN Pihua. Theoretical study on generalized elastic of elastic theory with different modulus [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(1): 93.
- [15] 陈柏丹, 孙杰, 潘勤学, 等. 基于拉压差异的沥青混合料强度与疲劳特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 50.
CHEN Bodan, SUN Jie, PAN Qinxue, *et al.* Strength and fatigue characteristics of asphalt mixture based on difference of tensile and compressive properties [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2024, 21(1): 50.
- [16] TIMOSHENKO S. Strength of materials. Part 2: Advanced theory and problems [M]. 9th ed. Hoboken: Van Nostrand, 1947.
- [17] AMBARTSUMYAN S A. The axisymmetric problem of circular cylindrical shell made of materials with different stiffness in tension and compression [J]. Akademii Nauk Sssr, Mekhanika, 1965(4): 77.
- [18] ZHANG L, DONG K, ZHANG H, *et al.* A 3D PVP co-rotational formulation for large-displacement and small-strain analysis of bi-modulus materials [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2016, 110: 20.
- [19] HUANG T, PAN Q X, JIN J, *et al.* Continuous constitutive model for bimodulus materials with meshless approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 66: 41.
- [20] 马超, 陈晶, 王志国, 等. 拉压不同模量硬夹心矩形夹层板的弯曲[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 333.
MA Chao, CHEN Jing, WANG Zhiguo, *et al.* Bending of hard sandwich rectangular sandwich plates with different moduli in tension and compression [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 333.
- [21] INSAUSTI N, ADARRAGA I, CARBAJAL N, *et al.* Numerical assessment of the analytical models used to determine flexural and shear moduli in i-beams when the tensile and compressive moduli are different [J]. Polymer Testing, 2020, 81: 106154.
- [22] 张起森, 郑健龙. 刚性路面考虑拉压模量差异时的计算方法[J]. 长沙交通学院学报, 1992(3): 40.
ZHANG Qisen, ZHENG Jianlong. Calculation method for rigid pavement considering differences in tensile and compressive moduli [J]. Journal of Changsha Communications Institute, 1992(3): 40.
- [23] YANG Y, ZHENG J L, LÜ S T. Research on differences and correlation between tensile, compression and flexural moduli of cement stabilized macadam [J]. Frattura Ed Integrità Strutturale, 2017, 11(41): 339.
- [24] 潘勤学, 郑健龙. 考虑拉压模量不同的沥青路面力学计算方法与分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 110.
PAN Qinxue, ZHENG Jianlong. Mechanical calculation method and analysis of asphalt pavement considering different modulus in tension and compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 110.
- [25] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F 40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F 40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG F 40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.