

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221123003

文章编号: 1672-9331(2024)01-0050-09

引用格式: 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): 50-58, 109.

Citation: CHEN Bodan, SUN Jie, PAN Qinxue, et al. Strength and fatigue characteristics of asphalt mixture based on difference of tensile and compressive properties[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 50-58, 109.

## 基于拉压差异的沥青混合料强度与疲劳特性

陈柏丹<sup>1</sup>, 孙杰<sup>2</sup>, 潘勤学<sup>1</sup>, 吕晨<sup>3</sup>, 甄西东<sup>2</sup>, 宋小金<sup>4</sup>, 冯学茂<sup>5</sup>, 姜舜君<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410114; 2. 济南城建集团有限公司, 山东 济南 250031;  
3. 济南城建动能转换开发建设集团有限公司, 山东 济南 250000; 4. 湖南华城检测技术有限公司, 湖南 长沙 410036;  
5. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**【目的】探究沥青混合料的拉压差异力学特性。【方法】开展了典型沥青混合料直接拉伸和四点弯曲强度及疲劳试验, 基于材料拉压模量差异特性推导并得到了区别于传统四点弯曲梁的真实四点弯曲强度计算公式, 分析了传统四点弯曲、真实四点弯曲及直接拉伸应力状态下强度、疲劳寿命及模量衰变规律。【结果】真实四点弯曲强度约为传统四点弯曲强度的80%, 在相同加载速率下, 不同应力状态强度中直接拉伸强度最小, 且其对加载速率的敏感性亦最低; 在相同应力水平下, 直接拉伸疲劳寿命最小, 但在相同真实应力比下直接拉伸疲劳寿命最大, 真实四点弯曲疲劳寿命约为传统四点弯曲疲劳寿命的46%; 真实四点弯曲疲劳试验的模量衰变速率远小于直接拉伸模量衰变速率, 且破坏时前者的模量衰减幅度更小。【结论】材料的拉压差异特性对其力学参数的测试结果及变化规律影响显著, 研究成果可为考虑拉压差异的沥青路面结构设计参数取值提供参考。

**关键词:** 道路工程; 沥青混合料; 拉压差异; 强度; 疲劳特性

中图分类号: U416

文献标志码: A

## Strength and fatigue characteristics of asphalt mixture based on difference of tensile and compressive properties

CHEN Bodan<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>2</sup>, PAN Qinxue<sup>1</sup>, LYU Chen<sup>3</sup>, ZHEN Xidong<sup>2</sup>, SONG Xiaojin<sup>4</sup>,  
FENG Xuemao<sup>5</sup>, JIANG Shunjun<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Ji'nan Urban Construction Group Co., Ltd., Ji'nan 250031, China;  
3. Ji'nan Urban Construction Kinetic Energy Conversion Development and Construction Group Co., Ltd., Ji'nan 250000, China; 4. Hunan Huacheng Testing Technology Co., Ltd., Changsha 410036, China;  
5. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** [Purposes] This study aims to explore the difference in tension and compression properties for asphalt mixtures. [Methods] The strength and fatigue performances using direct tension and four-point bending tests on a typical asphalt mixture were characterized. Based on the

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2022-12-25; 接受日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378441, 51908071); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5579); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202107)

通信作者: 潘勤学(1986—)(ORCID: 0000-0002-6546-0441), 男, 副教授, 主要从事路面结构计算与测试方面的研究。

E-mail: pqx123456789pqx@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

different characteristics of tensile and compressive modulus of the materials, the calculation formula of the real four-point bending strength, which is different from the traditional four-point bending beam, was derived. The strength, fatigue life, and modulus decay law of traditional four-point bending, real four-point bending, and direct tensile stress state were analyzed. [Findings] The results showed that the real four-point bending strength was about 80% of the traditional four-point bending strength. Under the same loading rate, the direct tensile strength was the smallest in different stress states, and its sensitivity to loading rate was the lowest. Under the same stress level, the direct tensile fatigue life was the smallest, but under the same real stress ratio, the direct tensile fatigue life was the largest, and the real four-point bending fatigue life was about 46% of the traditional four-point bending fatigue life. The modulus decay rate of the real four-point bending fatigue test was much lower than that of the direct tensile test, and the former had a smaller modulus decay amplitude at failure. [Conclusions] The material's tension-compression difference characteristics significantly influence the test results of its mechanical parameters. The research results can provide a reference for the design parameters of asphalt pavement structures considering the tension-compression difference.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; tension-compression difference; strength; fatigue characteristic

**Foundation item:** Projects (52378441, 51908071) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2020JJ5579) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (202107) supported by Science and Technology Progress and Innovation Program of Hunan Provincial Department of Transportation

**Corresponding author:** PAN Qinxue (1986—) (ORCID: 0000-0002-6546-0441), male, associate professor, research interest: pavement structure calculation and testing. E-mail: pqx123456789pqx@163.com

## 0 引言

近年来,我国公路建设一直处于高速发展的状态,但大部分沥青路面在远未达到设计使用年限时就已出现了严重破坏。究其原因,除了与车辆超载及施工质量控制不严等原因有关外,现行路面设计参数取值不符合路面材料实际力学特性亦是其重要原因之一<sup>[1-4]</sup>。

大量研究表明,道路材料具有显著的拉压差异力学特性,在不同应力状态下进行试验得到的力学参数存在较大差异<sup>[6-10]</sup>,导致在进行路面结构计算时力学参数取值不唯一,未考虑拉压差异特性的计算结果误差较大。潘勤学等<sup>[11-12]</sup>基于迭代思想建立了考虑材料拉压模量差异的沥青路面结构数值计算方法,发现与采用压模量的经典线弹性理论计算方法相比,两者计算结果之间差距很大。沥青面层作为直接承受车辆荷载的路面结构

层<sup>[13-16]</sup>,其材料的力学性能测试与评价至关重要,不少学者针对沥青混合料试件在试验中所表现出的拉压差异特性进行了研究。吕松涛等<sup>[17]</sup>对劈裂试验进行改进,推导出了劈裂试件拉、压模量的计算公式,试验结果显示,试件的抗拉和抗压模量差别较大,分析劈裂试件拉压差异可真实反映沥青路面的抗变形能力。郭彤等<sup>[18]</sup>基于四点弯曲试验推导得到了试件拉、压模量的计算公式,并测试了小梁试件拉、压和弯拉模量在疲劳试验中的衰变规律,发现小梁的破坏是由拉伸模量的衰减导致的。程怀磊等<sup>[19]</sup>分析了劈裂试件的应力分布情况,并基于此提出了试件拉、压泊松比的计算方法,发现沥青混合料的拉泊松比低于其压泊松比。

综上所述,考虑材料的拉压差异特性开展沥青混合料力学参数试验,能更好地反映复杂应力状态下沥青路面的真实力学特性,有利于提高沥青路面结构设计的科学性和准确性,但是现阶段关于此方向的研究较少,还不能为考虑拉压差异特性的路面

设计提供支撑。因此,本文基于文献[18],分析四点弯曲试验中考虑拉压差异特性时小梁所处的应力状态(四点弯曲真实应力状态),推导此应力状态下的强度计算公式;通过开展不同加载速率下的强度试验和不同应力水平下的疲劳试验,探究在传统四点弯曲、真实四点弯曲和直接拉伸应力状态下沥青混合料的强度、疲劳寿命以及模量衰变特性,为考虑拉压差异特性的沥青路面结构设计提供参考。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 原材料及配合比设计

试验采用 AC-13 沥青混合料,其中集料选用石灰岩,其力学性能见表 1;沥青选用东海牌 SBS 改性沥青,其性能见表 2;AC-13 矿料级配设计结果见表 3,依据马歇尔试验确定最佳沥青用量为 5.0%。

表 3 AC-13 矿料级配设计结果

Table 3 Design result of AC-13 aggregate gradation

混合料	级配类型	通过下列筛孔的质量百分率/%								
		13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
AC-13	上限	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0
	下限	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0
	设计级配	93.0	72.5	45.1	31.7	21.8	14.3	8.5	6.1	5.2

50.0 mm 的车辙板,并将其切割成 250.0 mm×50.0 mm×50.0 mm 的直接拉伸小梁试件;采用剪切压实仪成型得到 450.0 mm×150.0 mm×180.0 mm 的沥青混合料板,并将其切割成 380.0 mm×63.5 mm×50.0 mm 的四点弯曲小梁试件。

### 1.3 试验方法

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),利用万能试验机 MTS 分别进行直接拉伸及四点弯曲强度和疲劳试验。

本研究的试验温度均为 15 °C,强度试验加载速率分别取 0.02、0.05、0.10、0.50、1.00、2.00 MPa/s。

郭彤等<sup>[18]</sup>认为四点弯曲试验中小梁试件的中性层将发生上移,如图 1 所示,并推导得到小梁的拉压模量,如式(1)和式(2)所示。传统四点弯曲强度计算方法在计算时认为小梁试件中性层保持不动,拉压应力分区面积相同,而真实四点弯曲强度是指在小梁试件截面上拉应力区面积大于压应力区面积时的强度,可通过小梁破坏时下表面最

表 1 石灰岩集料力学性能

Table 1 Mechanical properties of limestone aggregate

项目	压碎值/%	磨光值(摆值)	磨耗值/%
测试结果	15.1	57.9	13.5
规范要求	≤28	≥45	≤30

表 2 SBS 改性沥青性能

Table 2 Performance of SBS modified asphalt

技术指标	试验结果	技术要求
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	58	40~60
延度(5 cm/min, 5 °C)/cm	31	≥20
软化点(环球法)/°C	63	≥60
运动黏度(135 °C)/(Pa·s)	1.31	≤3
弹性恢复(25 °C)/%	89	≥75
溶解度/%	99.8	≥99
闪点/°C	300	≥230

### 1.2 试件制备

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的要求进行试件制备。采用液压式车辙成型机成型得到 300.0 mm×300.0 mm×

大拉应变乘以破坏时的小梁拉伸模量得到,如式(3)所示。将式(1)代入式(3)进一步得到式(4)。小梁试件在破坏时其上表面压应变及下表面拉应变可通过粘贴应变片测得。传统四点弯曲强度和直接拉伸强度计算公式如式(5)~(6)所示。

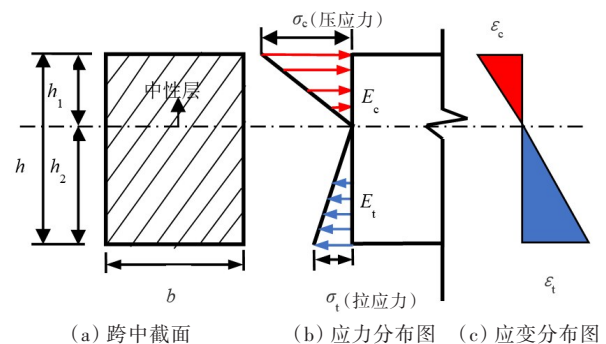


图 1 试件跨中截面及其应力和应变分布图

Fig. 1 The mid-span section of the specimen and its stress and strain distribution diagram

$$E_t = \frac{PL(\epsilon_t + \epsilon_c)}{2bh^2\epsilon_t^2} \quad (1)$$

$$E_c = \frac{PL(\varepsilon_t + \varepsilon_c)}{2bh^2\varepsilon_c^2} \quad (2)$$

$$R_{c,t} = \varepsilon_{t,\max} E_{t,\max} \quad (3)$$

$$R_{c,t} = \frac{PL(\varepsilon_{t,\max} + \varepsilon_{c,\max})}{2bh^2\varepsilon_{t,\max}} \quad (4)$$

$$R_b = \frac{LP}{bh^2} \quad (5)$$

$$R_t = \frac{P}{bh} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: $E_t$ 为试件拉伸模量,MPa; $E_c$ 为试件压模量,MPa; $\varepsilon_c$ 为跨中上表面压应变; $\varepsilon_t$ 为跨中下表面拉应变; $P$ 为荷载,N; $L$ 为跨距,mm; $h$ 为试件高度,mm; $h_1$ 为上表面到中性层的距离,mm; $h_2$ 为下表面到中性层的距离,mm; $b$ 为试件宽度,mm; $\varepsilon_{t,\max}$ 为试件破坏时跨中下表面拉应变; $\varepsilon_{c,\max}$ 为试件破坏时跨中上表面压应变; $E_{t,\max}$ 为试件破坏时的拉伸模量,MPa; $R_{c,t}$ 为真实四点弯曲强度,MPa; $R_b$ 为传统四点弯曲强度,MPa; $R_t$ 为直接拉伸强度,MPa。

进行疲劳试验前先开展加载速率为 50 mm/min

的四点弯曲强度试验以及加载速率为 5 mm/min 的直接拉伸强度试验。然后,采用应力控制模式在频率为 10 Hz 的情况下,根据强度试验结果进行应力比为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 的疲劳试验。在疲劳试验过程中,直接拉伸应变以及四点弯曲试件底部中心拉应变可分别通过引伸计和应变片测得,以此计算直接拉伸模量和真实四点弯曲模量。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 强度试验结果

利用 MTS 测得传统四点弯曲强度与直接拉伸强度,通过测量四点弯曲试件破坏时的上下表面应变计算得到真实四点弯曲强度,以试件的破坏时间及真实四点弯曲强度计算对应的加载速率,试验结果见表 4。

通过表 4 绘制四点弯曲试件破坏时传统与真实四点弯曲强度相关关系图,并采用线性函数进行拟合,结果如图 2( $R^2$ 为相关系数)、式(7)所示。

表 4 不同加载速率下的强度试验结果

Table 4 The results of strength test under different loading rates

传统四点弯曲强度试验		真实四点弯曲强度试验		直接拉伸强度试验	
加载速率/ (MPa·s <sup>-1</sup> )	传统四点弯曲强度/ MPa	加载速率/ (MPa·s <sup>-1</sup> )	真实四点弯曲强度/ MPa	加载速率/ (MPa·s <sup>-1</sup> )	直接拉伸强度/ MPa
0.02	3.194	0.015	2.417	0.02	1.570
0.05	5.166	0.036	3.700	0.05	1.817
0.10	5.992	0.077	4.624	0.10	1.999
0.50	7.644	0.372	5.689	0.50	2.509
1.00	8.138	0.799	6.502	1.00	2.935
2.00	9.082	1.697	7.708	2.00	3.267

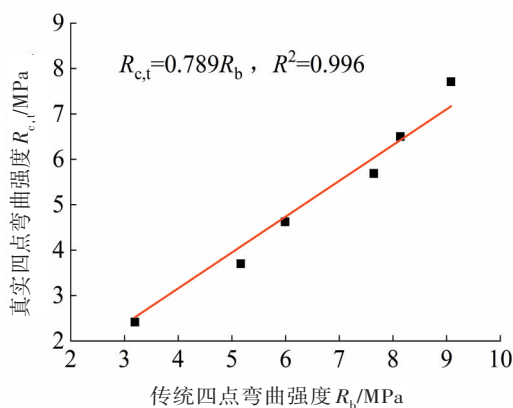


图 2 传统与真实四点弯曲强度的相关关系

Fig. 2 Correlation between traditional and real four-point bending strength results

$$R_{c,t} = 0.789R_b \quad (7)$$

由图 2 可知,两种强度之间的线性相关性良好。根据式(7)可知,真实四点弯曲强度基本约为传统四点弯曲强度的 80%。其原因为计算传统四点弯曲强度时假设小梁截面的受拉区与受压区面积相同,但是在试验过程中梁的中性层会发生上移,使受拉区面积大于受压区面积,且沥青混合料的抗拉模量小于其抗压模量,故考虑拉压差异性测算得到的四点弯曲强度结果偏小。

通过表 4 绘制不同应力状态下强度随加载速率  $v$  的变化关系图,并使用幂函数进行拟合,如图 3 所示。

由图 3 可知,3 种强度与加载速率之间成良好



的幂函数相关关系,且皆随着加载速率的增大而增大,而强度的增长速率随加载速率的增加逐渐减小。在相同加载速率下,传统四点弯曲强度 $R_b$ >真实四点弯曲强度 $R_{c,t}$ >直接拉伸强度 $R_t$ 。取加载速率最大和最小时所对应的强度进行比较,直接

拉伸强度约增加了1.1倍,传统及真实四点弯曲强度分别约增加了1.8倍和2.2倍,说明相较于直接拉伸强度,四点弯曲强度对加载速率更敏感。

基于图3的拟合结果,建立相同加载速率下不同强度之间的相关关系式:

$$R_{c,t} = 0.633R_b^{1.135} \quad (8)$$

$$R_{c,t} = 1.808R_t^{1.263} \quad (9)$$

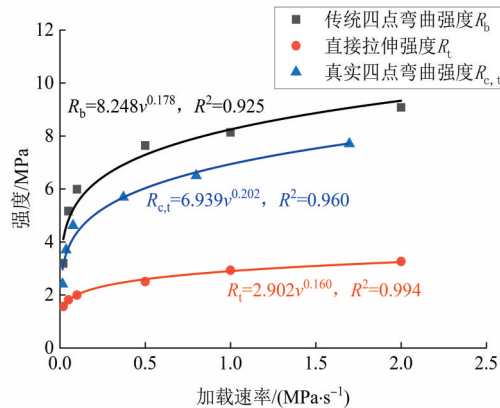


图3 强度与加载速率的变化关系

Fig. 3 Relationship between strength and loading rate

表5 疲劳试验结果

Table 5 The results of fatigue test

应力比	传统四点弯曲疲劳试验		直接拉伸疲劳试验		真实四点弯曲疲劳试验	
	传统四点弯曲应力水平/ MPa	疲劳寿命/次	直接拉伸应力水平/ MPa	疲劳寿命/次	真实四点弯曲应力水平/ MPa	疲劳寿命/次
0.3	1.404	23 450	0.428	43 518	1.108	23 450
0.4	1.872	11 348	0.571	17 171	1.477	11 348
0.5	2.340	2 972	0.714	8 800	1.846	2 972
0.6	2.808	2 096	0.856	3 468	2.216	2 096
0.7	3.276	1 411	0.999	2 041	2.585	1 411

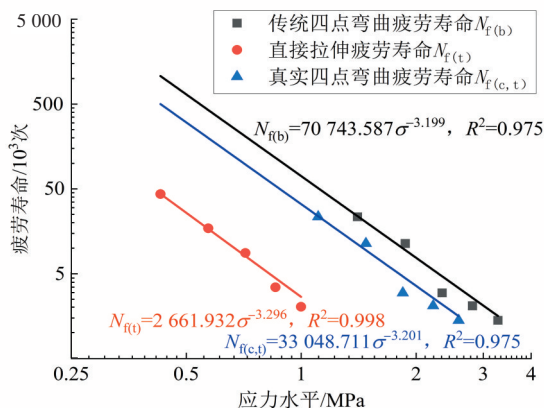


图4 疲劳寿命与应力水平的关系

Fig. 4 Relationship between fatigue life and stress level

$$N_f = k \left( \frac{1}{\sigma} \right)^n \quad (10)$$

式中: $N_f$ 为疲劳寿命,次; $k$ 、 $n$ 为拟合参数; $\sigma$ 为应力水平,MPa。

在S-N方程中, $k$ 为截距,截距越大说明沥青

混合料的抗疲劳性能越好。由图4可知,不同应力状态下疲劳寿命随着应力水平的增大而减小。为了对比相同应力水平下3种疲劳寿命的大小,将不同S-N方程的横坐标延伸到相同应力水平之下,可以发现,传统四点弯曲疲劳寿命 $N_{f(b)}$ >真实四点弯曲疲劳寿命 $N_{f(c,t)}$ >直接拉伸疲劳寿命 $N_{f(t)}$ 。

依据不同疲劳试验的S-N方程,建立3种疲劳寿命之间的相关关系:

$$N_{f(c,t)} = 0.464 \left( N_{f(b)} \right)^{1.001} \quad (11)$$

$$N_{f(c,t)} = 2.196 \left( N_{f(t)} \right)^{1.030} \quad (12)$$

由式(11)可知,在相同应力下,真实和传统四点弯曲疲劳寿命之间基本成线性关系,前者约为后者的46%;真实四点弯曲疲劳寿命显著大于直接拉伸疲劳寿命,其约为直接拉伸疲劳寿命的2.2倍。

研究表明,基于真实应力比建立的疲劳方程可揭示强度破坏和疲劳破坏之间的联系<sup>[20]</sup>,如式

(13)和式(14)所示。真实应力比计算结果见表6,使用S-N方程对其进行拟合,并绘制于图5中。

$$v = \frac{\sigma}{T/2} = 2f\sigma \quad (13)$$

$$t_s = \frac{\sigma}{S_{dz}} \quad (14)$$

式(13)~(14)中: $T$ 为疲劳试验加载周期,s; $f$ 为加载频率,Hz; $t_s$ 为真实应力比; $S_{dz}$ 为与加载频率和应力水平相对应的加载速率下的疲劳动载强度,MPa。

表6 不同试验方式和应力比下的真实应力比和疲劳寿命

Table 6 Real stress ratio and fatigue life under different test methods and stress ratios

试验	应力比	应力水平/MPa	加载速率/(MPa·s <sup>-1</sup> )	动载强度/MPa	真实应力比	疲劳寿命/次
传统四点弯曲试验	0.3	1.404	28.08	15.389	0.09	23 450
	0.4	1.872	37.44	16.239	0.12	11 348
	0.5	2.340	46.80	16.931	0.14	2 972
	0.6	2.808	56.16	17.518	0.16	2 096
	0.7	3.276	65.52	18.031	0.18	1 411
直接拉伸试验	0.3	0.428	8.56	4.092	0.10	43 518
	0.4	0.571	11.42	4.285	0.13	17 171
	0.5	0.714	14.28	4.441	0.16	8 800
	0.6	0.856	17.12	4.571	0.19	3 468
	0.7	0.999	19.98	4.686	0.21	2 041
真实四点弯曲试验	0.3	1.108	22.16	12.975	0.09	23 450
	0.4	1.477	29.54	13.751	0.11	11 348
	0.5	1.846	36.92	14.384	0.13	2 972
	0.6	2.216	44.32	14.925	0.15	2 096
	0.7	2.585	51.70	15.396	0.17	1 411

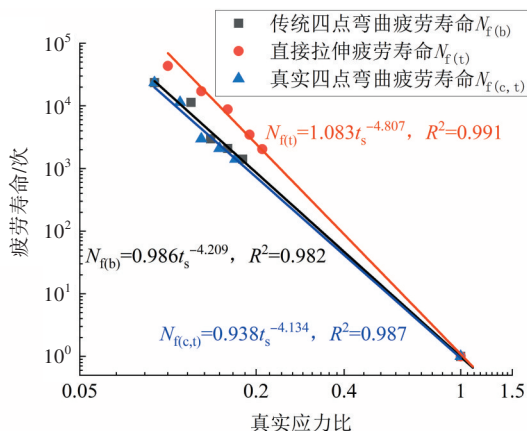


图5 疲劳寿命与真实应力比的关系

Fig. 5 Relationship between fatigue life and real stress ratio

## 2.2.2 疲劳特性

目前,国内外研究对于沥青混合料疲劳损伤过程分析主要是基于沥青混合料的模量衰变规律展开的,如式(15)所示,损伤模型如式(16)所示。

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (15)$$

理论上基于真实应力比的拟合曲线应经过点(1,1)。由图5可知,3条疲劳曲线皆接近点(1,1),且传统与真实四点弯曲疲劳方程的拟合曲线较为接近。在相同真实应力比下,直接拉伸疲劳寿命  $N_{f(t)} >$  传统四点弯曲疲劳寿命  $N_{f(b)} >$  真实四点弯曲疲劳寿命  $N_{f(c,t)}$ 。

综上可知,使用考虑拉压差异特性的力学参数测试方法进行疲劳试验对测试结果影响较大。

$$\frac{dD}{dN} = [1 - (1 - D)^{1+\gamma}]^\alpha \left[ \frac{\sigma}{M(1 - D)} \right] \quad (16)$$

式(15)~(16)中: $N$ 为循环荷载的作用次数; $E$ 为模量,MPa; $E_0$ 为初始模量,MPa; $D$ 为疲劳损伤; $M$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 为与应力水平和温度等相关的拟合参数。

当  $N = N_f$  时,  $D(N) = 1$ , 这时损伤模型可简化为:

$$D(N) = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (17)$$

进而得到:

$$\frac{E}{E_0} = \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (18)$$

已有研究将传统与真实四点弯曲模量在疲劳试验中的衰变特性进行了对比,发现后者衰变速率更快<sup>[18]</sup>。本文主要对真实四点弯曲模量和直接拉伸模量的衰变特性进行对比分析,利用式(18)对模量与荷载作用次数之间的关系进行拟合。

令  $1/(1 - \alpha) = a$ ,  $1/(1 + \gamma) = b$ ,  $a$  和  $b$  的大小

可以反映试件模量在疲劳试验过程中的衰变速率。将不同应力水平下  $a$  和  $b$  的拟合结果绘制于图 6~7 中。

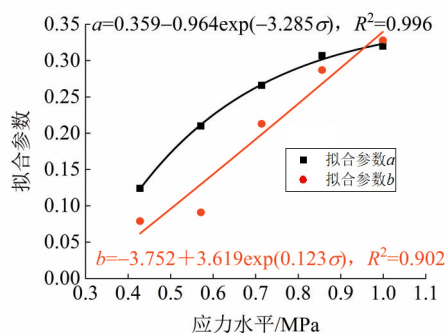


图 6 直接拉伸模量损伤模型拟合参数与应力水平的关系

Fig. 6 The relationship between stress levels and fitting parameters of direct tensile modulus damage model

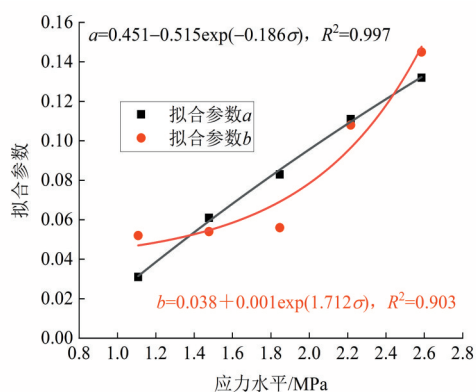


图 7 真实四点弯曲损伤模型拟合参数与应力水平的关系

Fig. 7 The relationship between stress levels and fitting parameters of real four-point bending damage model

由图 6~7 可知,  $a$ 、 $b$  随应力水平的变化规律符合幂函数关系, 且均随着应力水平的增加而增大, 符合式 (16) 中拟合参数受应力水平影响的规律。为了直观地比较直接拉伸模量以及真实四点弯曲模量的衰变过程, 取稳定阶段疲劳循环次数比  $N/N_f=0.5$  时的切线与  $N/N_f=1.0$  时的切线相交所构成的夹角, 该角的角平分线与模量衰变曲线的交点即为临界破坏点<sup>[18]</sup>, 如图 8 所示。

将直接拉伸模量衰变曲线及真实四点弯曲模量衰变曲线  $N/N_f=0.5$  时的切线斜率与应力比的关系绘制于图 9 中, 将实际疲劳过程中临界破坏点处的破坏模量与初始模量的比值 (简称为临界模量比) 与应力比的关系绘制于图 10 中。

由图 9~10 可以看出, 真实四点弯曲模量衰变曲线与直接拉伸模量衰变曲线的切线斜率和临界模量比基本随应力比的增大而减小, 但在相同应

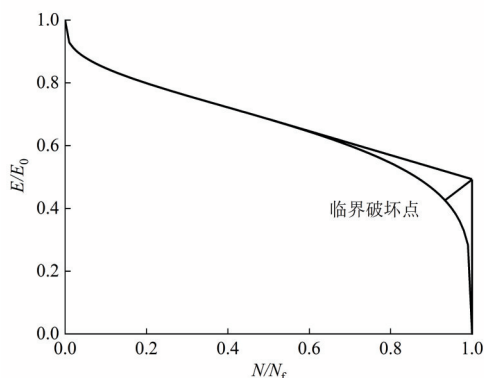


图 8 临界破坏点示意图

Fig. 8 Schematic diagram of critical failure point

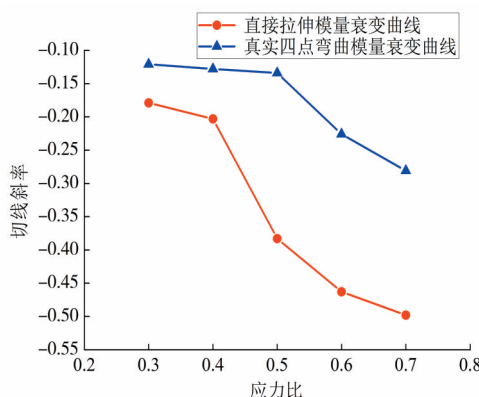


图 9 不同模量衰变曲线切线斜率与应力比的关系

Fig. 9 The relationship between the tangential slope of the decay curves of different modulus and the stress ratio

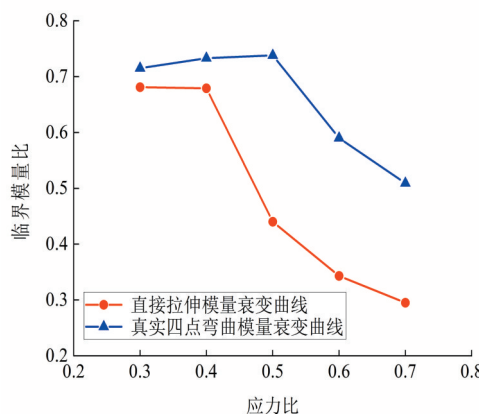


图 10 不同模量衰变曲线临界模量比与应力比的关系

Fig. 10 The relationship between the critical modulus ratio of the decay curves of different modulus and the stress ratio

力比和应力水平下前者的指标均比后者的大。

取 0.5 应力比下的两种模量衰变曲线进行分析, 结果如图 11 所示。由图 11 可知, 两种应力状态下沥青混合料的疲劳损伤特性皆呈非线性特性, 模量衰变过程可分为 3 个阶段: 第一个阶段是

迁移阶段,在此阶段模量由于试件本身存在缺陷而衰减较快,但持续时间较短;第二个阶段是稳定阶段,试件缺陷附近的能量由于塑性变形和裂纹扩展而发生转移,内部系统能量达到平衡,试件以比较平稳且缓慢的速率发生模量衰减,对于切线斜率,真实四点弯曲应力下为-0.134,直接拉伸应力下为-0.383,后者模量的衰减速率约为前者的2.9倍;第三个阶段是破坏阶段,损伤迅速增大直至试件破坏,其中,真实四点弯曲及直接拉伸应力下的临界模量比分别为0.738和0.440,即前者的临界模量比更高。综上可知,相较于直接拉伸疲劳试验,在四点弯曲疲劳试验中试件未破坏前,四点弯曲模量衰减更慢,且破坏时模量衰减幅度较小。因此,用不同应力状态下的疲劳试验来评价沥青混合料的疲劳性能,所得到的结果存在较大差异。

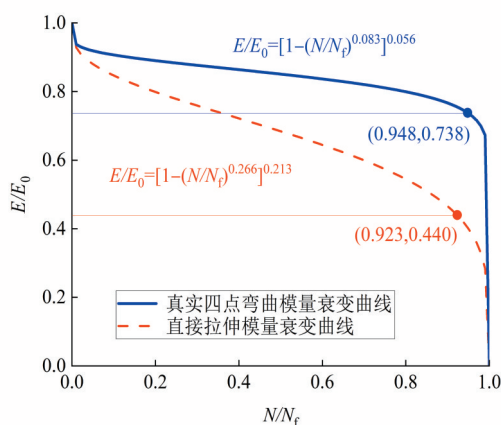


图11 应力比为0.5时模量衰变曲线的对比

Fig. 11 Comparison of modulus decay curves with a stress ratio of 0.5

### 3 结论

本文基于沥青混合料的拉压差异特性开展了直接拉伸及四点弯曲试验研究,得到以下结论:

1) 真实四点弯曲强度约为传统四点弯曲强度的80%,不同应力状态下强度与加载速率成幂函数相关关系,其中,相同加载速率下直接拉伸强度最小,且其对加载速率的敏感性最低。

2) 在相同应力水平下,直接拉伸试件的疲劳寿命最小,但在相同真实应力比下直接拉伸试件的疲劳寿命最大,真实四点弯曲试件的疲劳寿命约为传统四点弯曲试件的疲劳寿命的46%。

3) 建立了同一加载速率下不同应力状态强度之间以及相同应力水平下不同应力状态疲劳寿命之间的相关关系,可为考虑拉压差异的路面设计参数的统一表征提供参考。

4) 真实四点弯曲和直接拉伸疲劳损伤模型参数均随着应力水平的增大而增大,且符合幂函数相关关系;在相同应力比和应力水平下进行疲劳试验,真实四点弯曲模量衰变速率远小于直接拉伸模量衰变速率,且试件破坏时其模量衰减幅度较小。

总之,真实四点弯曲应力状态下的强度和疲劳特性与传统四点弯曲及直接拉伸应力状态下的强度和疲劳特性存在较大差别,考虑拉压差异特性的测试方法获得的力学参数能反映路面的真实力学特性。因此,为保证路面结构设计的合理性与科学性,应采用考虑拉压差异特性的路面材料力学参数进行路面分析与设计。

### [参考文献]

- [1] 郑健龙. 基于状态设计法的沥青路面弯沉设计标准[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 1-9. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.04.001.  
ZHENG Jianlong. Deflection design standards of asphalt pavement based on state design method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 1-9. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.04.001.
- [2] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.01.001.  
ZHENG Jianlong. New structure design of durable asphalt pavement based on life increment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 1-7. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.01.001.
- [3] 潘勤学, 钱国平, 刘宏富, 等. 沥青混合料水稳定性指标控制值适用性分析[J]. 中外公路, 2014, 34(3): 253-256. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2014.03.075.  
PAN Qinxue, QIAN Guoping, LIU Hongfu, et al. Applicability analysis of control value of water stability index of asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(3): 253-256. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2014.03.075.
- [4] 李友云, 张宇辉, 何敏, 等. 多尺度算法预测沥青混合料剪切疲劳剩余强度[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.010.  
LI Youyun, ZHANG Yuhui, HE Min, et al. Prediction of residual shear fatigue strength of asphalt mixture by multiscale algorithm [J]. Journal of Transport Science



- & Engineering, 2022, 38(4): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.010.
- [5] 张锐, 滕煜晟, 刘闯. 路基回弹弯沉控制方法及试验验证[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 8-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.003. ZHANG Rui, TENG Yusheng, LIU Chuang. Control method and experimental verification of roadbed rebound deflection[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(2): 8-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.003.
- [6] 钱国平, 刘宏富, 郑健龙, 等. 不同受力模式下沥青混合料强度的速度特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 681-687. QIAN Guoping, LIU Hongfu, ZHENG Jianlong, et al. Strength experiment of speed characteristic of asphalt mixtures in different force modes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(2): 681-687.
- [7] 黄拓, 昌振东, 杨毅. 三轴拉压应力状态下沥青混合料的破坏准则[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(7): 1908-1914. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.07.030. HUANG Tuo, CHANG Zhendong, YANG Yi. Failure criterion of asphalt mixture in triaxial tension and compression state [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(7): 1908-1914. DOI: 10.11817/j. issn. 1672-7207.2017.07.030.
- [8] 李强, 李国芬, 王宏畅. 受力模式对沥青混合料动态模量的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 816-822. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2014.05.011. LI Qiang, LI Guofen, WANG Hongchang. Effects of loading modes on dynamic moduli of asphalt mixtures [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 816-822. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2014.05.011.
- [9] 石志勇, 李倩倩, 王旭东. 不同荷载模式下沥青混合料的动态模量依赖模型[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 9-15, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.02.002. SHI Zhiyong, LI Qianqian, WANG Xudong. Dynamic modulus dependence model of asphalt mixture under different load modes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(2): 9-15, 47. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2021.02.002.
- [10] 张晨晨, 王旭东, 钱振东, 等. 半刚性基层材料不同模量试验与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 53-60. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.06.008. ZHANG Chenchen, WANG Xudong, QIAN Zhendong, et al. Test and analysis on different moduli of semi-rigid base material [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6): 53-60. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2017.06.008.
- [11] 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): 110-117. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2020.01.011. 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): 110-117. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2020.01.011.
- [12] 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): 93-100. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.01.010. PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, WEN Pihua. Theoretical study on generalized elastic laws of elastic theory with different modulus [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(1): 93-100. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.01.010.
- [13] 关宏信, 杨宇轩, 曾勇, 等. 基于压实性和抗剪性能的AC-16沥青混合料级配优化研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 12-19. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.002. GUAN Hongxin, YANG Yuxuan, ZENG Yong, et al. Research on grading optimization of AC-16 asphalt mixture based on compactness and shear strength [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 12-19. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.002.
- [14] 李闯民, 彭博, 甘新众, 等. 干法和湿法制备TPCB改性沥青混合料的路用性能室内试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 49-60. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.005. LI Chuangmin, PENG Bo, GAN Xinzhong, et al. Indoor test research on road performance of TPCB modified asphalt mixture prepared by dry and wet method [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 49-60. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.005.
- [15] 张辉, 潘友强, 张志祥, 等. 玄武岩-页岩混杂增强的沥青混合料路用性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(4): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzbkb.2021.04.003. ZHANG Hui, PAN Youqiang, ZHANG Zhixiang, et al. Experimental study on pavement performance of basalt-shale hybrid reinforced asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(4): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzbkb.2021.04.003.
- [16] 查旭东, 樊小林, 刘安辉, 等. RIOHTrack中面层沥

(下转第109页)

- SUN:YTLX.0.2018-S2-005.
- SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical simulation technology and application with particle flow code (PFC5.0) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(sup 2): 1. DOI: CNKI: SUN: YTLX. 0.2018-S2-005.
- [20] 石崇, 王盛年, 刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2798-2805. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z1.029.
- SHI Chong, WANG Shengnian, LIU Lin. Research of avalanche disaster numerical simulation based on granular discrete element method of high-steep slope under seismic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(sup 1): 2798-2805. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z1.029.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [22] 付宏渊, 陈镜丞, 曾铃, 等. 降雨对炭质泥岩-土分层路堤渗流与变形影响的模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2852-2860. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.027.
- FU Hongyuan, CHEN Jingcheng, ZENG Ling, et al. Model test on effect of rainfall on seepage and deformation of carbonaceous mudstone - soil stratified embankment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2852-2860. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.027.
- [23] 付宏渊, 邱祥, 李光裕, 等. 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 33-42. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.01.005.
- FU Hongyuan, QIU xiang, LI guangyu, et al. Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(1): 33-42. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.01.005.
- (责任编辑: 周鹏展; 校对: 刘平; 英文编辑: 吴高桥)

(上接第58页)

- 青混合料高温性能 SPT 试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.01.003.
- ZHA Xudong, FAN Xiaolin, LIU Anhui, et al. SPT test of high temperature performance of asphalt mixture in middle surface layer of RIOHTrack [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.01.003.
- [17] 吕松涛, 李亦鹏, 刘超超, 等. 基于劈裂试验的沥青混合料拉压模量同步测试方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 1-7, 16. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.001.
- LYU Songtao, LI Yipeng, LIU Chaochao, et al. Synchronous testing method for tensile and compressive moduli of asphalt mixture based on splitting test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 1-7, 16. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.001.
- [18] 郭彤, 杨毅, 夏诚东, 等. 基于拉压模量同步测试的岩沥青改性沥青混合料疲劳损伤特性[J]. 公路交通科技, 2018, 35(6): 14-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.06.003.
- GUO Tong, YANG Yi, XIA Chengdong, et al. Fatigue damage characteristics of rock asphalt modified asphalt mixtures based on tension and compression moduli synchronous test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(6): 14-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.06.003.
- [19] 程怀磊, 孙立军, 郑健龙, 等. 沥青混合料动态压-拉双模量及其在路面响应分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 105-116, 128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.03.005.
- CHENG Huailei, SUN Lijun, ZHENG Jianlong, et al. Dynamic compressive-tensile moduli of asphalt mixture and its applications to pavement response prediction [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(3): 105-116, 128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.03.005.
- [20] 吕松涛. 考虑加载速率影响的沥青混合料疲劳方程[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 276-281. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0273.
- LYU Songtao. Fatigue equation of asphalt mixture considering the influence of loading rate [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 276-281. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0273.
- (责任编辑: 石月珍; 校对: 刘平; 英文编辑: 李岳林)