

不同荷载条件下不同级配类型沥青混合料 路用性能研究

朱明轩¹, 李文凯^{2,3}, 邵景干^{2,3}, 王红阳¹, 郭海龙¹, 李长旭¹

(1. 河南省第三地质勘查院有限公司, 郑州 450046; 2. 绿色高性能材料应用技术交通运输行业

研发中心, 郑州 450046; 3. 河南交院工程技术集团有限公司, 郑州 450046)

摘要: 为分析沥青混合料高低温、常温抗拉、抗压性能及在动、静两种加载模式条件下的黏弹性力学性能, 选用工程上常用的AC-13C、SMA-13、SUP-13及PA-13四种不同级配类型的沥青混合料展开研究。在试验温度为50℃环境下进行单轴压缩蠕变试验评价四种沥青混合料的高温力学性能; 在试验温度为-10℃环境下进行间接拉伸试验评价四种沥青混合料的低温抗开裂性能; 在试验温度为20℃环境下进行单轴无侧限抗压及劈裂试验评价四种沥青混合料的常温抗拉、压能力; 在试验温度分别为10、20、30、40、50℃环境下进行静态单轴压缩蠕变试验评价四种沥青混合料的静态单轴压缩蠕变性能; 在试验温度分别为10、20、30℃, 加载频率分别为0.1、0.5、1、5、10、25 Hz下进行动态模量试验评价四种沥青混合料动态荷载下的力学性能。结果表明: 沥青混合料是一种典型黏弹性材料, 其力学性能与环境温度、外界荷载加载方式、加载时间及加载频率关系密切; 四种沥青混合料高温稳定性能的优劣顺序为PA<AC<SMA<SUP; SMA沥青混合料低温抗裂性能最优, PA沥青混合料低温抗裂性能最差; AC、SUP两种悬浮密实型结构整体抗压及抗拉能力较强; 在动、静荷载作用下, SMA、SUP两种沥青混合料较AC、PA两种沥青混合料均具有更强抗荷载变形能力。

关键词: 矿料级配; 油石比; 沥青混合料; 动静荷载; 路用性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0098-10

Road Performance of Different Graded Asphalt Mixtures Under Various Load Conditions

ZHU Mingxuan¹, LI Wenkai^{2,3}, SHAO Jinggan^{2,3}, WANG Hongyang¹, GUO Hailong¹, LI Changxu¹

(1. Henan Third Geological Survey Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450046, China;

2. R&D Center for Green High-performance Materials Application Technology of Transport Industry, Zhengzhou 450046, China;

3. Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co. Ltd., Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To analyze the tensile and compressive properties of asphalt mixtures at high, low, and ambient temperatures, as well as their viscoelastic mechanical properties under dynamic and static loading, four commonly used asphalt mixtures (AC-13C, SMA-13, SUP-13, and PA-13) were selected for this study. High-temperature mechanical properties were evaluated by uniaxial compression creep tests at 50℃. Low-temperature cracking

收稿日期: 2025-03-03

修回日期: 2025-09-05

接受日期: 2025-10-09

基金项目: 交通运输部重点科技项目(2021-TG-001); 河南省交通运输科技计划项目(2021T7, 2021J5); 河南省高等学校重点科研项目计划(25B560029)

作者简介: 朱明轩(1984-), 男, 高级工程师, 研究方向为项目建设和管理

通信作者: 李文凯(1990-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为新材料、新技术应用, Email: 1182255799@qq.com

引用格式: 朱明轩, 李文凯, 邵景干, 等. 不同荷载条件下不同级配类型沥青混合料路用性能研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 98-107.

Zhu M X, Li W K, Shao J G, et al. Road performance of different graded asphalt mixtures under various load conditions [J]. Henan Science, 2026, 44(1): 98-107.

resistance was evaluated by indirect tensile tests at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uniaxial unconfined compression and splitting tests were conducted at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to assess tensile and compressive capacity at room temperature. Static uniaxial compression creep tests were performed at 10, 20, 30, 40, and $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to evaluate the static creep behavior of the asphalt mixtures. Dynamic modulus tests were conducted at 10, 20, and $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at loading frequencies of 0.1, 0.5, 1, 5, 10, and 25 Hz to evaluate mechanical properties under dynamic loading. Results indicate that asphalt mixtures exhibit typical viscoelastic behavior, with mechanical properties strongly influenced by temperature, loading mode, loading duration, and frequency. The order of high-temperature stability is $\text{PA}<\text{AC}<\text{SMA}<\text{SUP}$. SMA exhibits the best low-temperature cracking resistance, whereas PA shows the poorest. AC and SUP, with suspension-dense structures, demonstrate strong overall compressive and tensile strength. Under both dynamic and static loads, SMA and SUP mixtures display superior resistance to load-induced deformation compared with AC and PA.

Key words: aggregate gradation; asphalt-aggregate ratio; asphalt mixtures; dynamic and static loads; road performance

0 引言

截至 2024 年底,我国公路通车总里程多达 600 万 km,其中高速公路 19 万 km,均稳居世界第一^[1]。沥青路面具有施工工艺成熟、易于养护、行车安全性及舒适性好等优点而被高等级公路广泛应用,其性能的好坏对耐久性及使用年限有重要影响。近年来,相关学者对沥青路面的力学性能进行了大量研究,沥青混合料是一种黏弹性材料,其力学性能与温度、加载方式、频率及时间关系密切。然而,关于沥青路面力学性能的研究,外界荷载主要包括动、静两种模式,由黏弹性力学理论得出,加载模式的不同,材料会产生不同的力学响应。

目前关于沥青混合料黏弹性力学响应的研究主要从外加剂、环境因素等方面展开,加载模式与混合料黏弹特性的关系研究较少。相关学者针对沥青路面的力学性能也展开了大量研究。马涛等^[2]对不同旋转压实次数的硬质砂岩排水沥青混合料利用 Sig-moidal 模型得到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下试件的动态模量曲线,分析得出,硬质砂岩动态模量随压实次数的增加而增大。杨三强等^[3]对胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应进行了分析发现,动荷载作用下,沥青路面结构层呈拉应变受力状态,且存在残余变形。郭昱辰^[4]对静动荷载作用下不同路面结构的动态响应进行了分析,无论荷载大小,静态荷载水平传递能力有限,FWD 检测过程中对比动静荷载弯沉盆的变化发现,大荷载作用下结构层静荷载的力学变形远大于动荷载,且随荷载增大,差值越显著。张玉秀等^[5]对低围压下沥青混合料进行三轴剪切及单轴贯入试验研究

发现,两种试验得出的黏聚力结果差异较大,内摩擦角差异较小,三轴剪切试验中围压变化对黏聚力的影响大于对内摩擦角的影响。高丹盈和黄春水^[6]提出的五单元八参数模型能够很好地评价沥青混合料的蠕变变形特性,且拟合结果与实测值相吻合。余志平^[7]对试验温度与沥青混合料黏弹性能展开研究发现,较高温度时,混合料易产生永久性塑性变形,较低温度时,混合料弹性恢复能力较强。董满生等^[8]在 Burgers 模型及黏弹性理论基础上提出 TE-Burgers 模型,在研究混合料蠕变柔量时引入温度影响变量,分析不同试验温度下混合料的蠕变能力,拟合结果与实测值相吻合。Assogba 等^[9]通过三维有限元模型在不同原材料、载荷、行车速度及外界环境下对沥青路面黏弹性能展开研究,发现结构层内部的温缩应力与外界环境温度关系密切,但温度应力的变化会滞后于外界环境温度。洪诗迪^[10]对影响沥青路面永久性塑性变形的因素进行了研究,发现重轴载及低速行驶条件下,沥青路面更易发生永久变形。徐强等^[11]和 Assogba 等^[12]研究表明半刚性基层整体性较好,弯拉模量较大,轴载作用下,沥青路面内部产生的压应力较小,但车辆低速行驶时,会随轴载作用时间的增加而显著变大,严重影响沥青路面的使用年限。

现有文献利用模型、相关理论及单一荷载作用下对沥青路面性能研究的较多,但对动、静荷载作用下不同级配类型沥青混合料性能的研究不足。本研究选用工程上常用的 AC-13C、SMA-13、PA-13 及 SUP-13 四种级配类型的沥青混合料展开研究,对比分析动、静荷载作用下不同级配类型沥青混合料的

相关性能,能够探寻沥青路面病害产生的机理,为针对性地采取预防性措施延缓路面病害出现及延长沥青路面使用寿命提供理论基础。

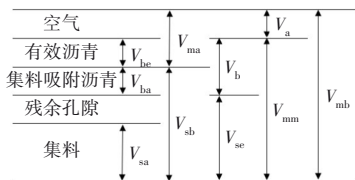
1 初始油石比确定方法

本研究选用密级配、间断级配及开级配三种工程上常用的沥青混合料开展研究。混合料配合比设计方法主要有 Marshall 法、Superpave 法等,混合料试件成型方法主要有击实法(Marshall)、旋转压实法(SGC)等。相关研究表明,击实法设计的沥青路面弯拉强度及耐久性能低于旋转压实法,且旋转压实法的设计理念更能模拟施工现场沥青路面的碾压过程^[13]。

本研究选用 AC、SMA、PA 及 SUP 四种不同级配类型的混合料展开研究,其中 AC、SUP 及 SMA 三种混合料的设计孔隙率一般较小,多为4%左右,选用有效沥青体积 V_{be} 和骨料吸附沥青体积 V_{ba} 双控指标确定预估油石比,PA 混合料设计孔隙率较大,多为20%左右,选用预估沥青膜厚度的方法确定油石比。

1.1 体积法

沥青路面是由骨料、胶结材料胶浆及孔隙组成的多相体系,其组成详见图1。混合料中的沥青一部分填充骨料孔隙而未能起到胶结作用,与自由沥青共同形成骨料吸附沥青,另一部分则形成有效沥青。通过计算骨料吸附沥青及有效沥青的用量可以确定初始预估油石比。



注: V_a 为空气体积; V_{mm} 为混合料体积; V_{mb} 为混合料成型后体积; V_{be} 为有效沥青体积; V_{ba} 为骨料吸附沥青体积; V_b 为沥青总体积; V_{sb} 为骨料毛体积; V_{ma} 为骨料间隙体积; V_{se} 为骨料有效体积; V_{sa} 为骨料实体体积。

图1 沥青混合料多相体系

Fig.1 Multiphase system of asphalt mixture

沥青混合料中总的沥青体积计算方法如式(1)。

$$V_b = V_{be} + V_{ba} \quad (1)$$

有效油石比 Q_{be} 为有效沥青质量与骨料质量之比,计算方法如式(2)。

$$Q_{be} = \frac{V_{be} \cdot \gamma_b}{\gamma_{mw}} \quad (2)$$

式中: γ_b 为沥青相对密度; γ_{mw} 为单元体内骨料质量。

有效沥青体积 V_{be} 参照 SHRP A-407 的规定计算、转化得到,计算方法如式(3)。

$$\begin{aligned} V_{be} &= 0.091 - 0.02931 \times \ln(S_n) \\ &= 0.091 - 0.02931 \times \ln\left(\frac{S_n \times 25.4}{25.4}\right) \\ &= 0.091 - 0.02931 \times \left[\frac{\lg(D)}{\lg(e)} - \ln(25.4)\right] \\ &= 0.1858 - 0.0675 \times \lg(D), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: S_n 为混合料公称最大粒径(英寸); D 为混合料公称最大粒径(mm,1英寸=25.4mm)。

有效沥青体积 V_{be} 也可根据矿料间隙率 VMA 及空隙率 VV 进行确定,计算方法如式(4)~(5)。

$$V_{be} = VMA - VV, \quad (4)$$

$$VMA = \frac{\gamma_{sb} - \gamma_{mw}}{\gamma_{sb}} \times 100\% \quad (5)$$

由式(2)~(5)推出,

$$\begin{aligned} Q_{be} &= \frac{V_{be}}{1 - 0.01VMA} \times \frac{\gamma_b}{\gamma_{sb}} \\ &= \frac{18.58 - 6.75 \times \lg(D)}{0.8142 + 6.75 \times 10^{-2} \lg(D) - 0.01 \times VV} \times \frac{\gamma_b}{\gamma_{sb}}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中: γ_b 为沥青相对密度; γ_{mw} 为骨料质量; γ_{sb} 为骨料合成毛体积相对密度。

被骨料孔隙吸附的沥青油石比 Q_{ba} 计算方法同有效沥青量油石比 Q_{be} 相似,计算方法如式(7)。

$$Q_{ba} = \frac{V_{ba} - V_b}{\gamma_{mw}} \quad (7)$$

骨料吸附沥青体积 V_{ba} 由骨料合成毛体积相对密度 γ_{sb} 、合成骨料有效相对密度 γ_{se} 及骨料的质量 γ_{mw} 计算得到,计算方法如式(8)。

$$V_{ba} = \gamma_{mw} \left(\frac{1}{\gamma_{mw}} - \frac{1}{\gamma_{se}} \right), \quad (8)$$

式中: γ_{se} 由骨料吸附沥青体积系数的经验公式得到,计算方法如式(9)。

$$\gamma_{se} = \gamma_{sb} + C(\gamma_{sa} - \gamma_{sb}), \quad (9)$$

式中: C 为合成骨料吸附沥青的体积系数, γ_{sa} 为合成骨料表观相对密度。AC-13C、SUP-13 型混合料,参照同济大学研究成果^[14],拟合方程如式(10)所示;SMA-13 型混合料,参照 JTG E20—2011 拟合方程进行,如式(11)所示。

lg C = AW + B , (10)

C = 0.033 W^2 - 0.293 6W + 0.933 9 , (11)

式中:A=-0.147 4,B=-0.024 4,W为合成骨料面干吸水率,按式(12)计算。

W = (1/γsb - 1/γsa) × 100%。 (12)

由式(7)~(12)可得,

Qba = (1/γsb - 1/γse) × γb = (1/γsb - 1/(γsb + C(γsa - γsb))) × γb。 (13)

沥青体积计算法得到的初始油石比Qb按式(14)计算。

Qb = Qbe + Qba = (18.58 - 6.75 × lg(D) / (0.814 2 + 6.75 × 10^-2 lg(D) - 0.01 × VV)) × (1/γsb - 1/(C(γsa - γsb))) × γb。 (14)

1.2 膜厚度法

沥青路面由孔隙、沥青、骨料及沥青-骨料界面构成,示意图见图2。沥青在骨料表层黏附构成沥青膜,沥青膜的厚度对混合料性能起着决定性作用。

把骨料作为球形颗粒,沥青均匀包裹球体表面,沥青膜的厚度决定沥青路面的性能。沥青膜厚度较薄时,骨料之间的黏结性能较差,沥青胶浆易从孔隙中剥落,沥青路面水稳定性及耐久性能不足;沥青膜厚度较厚时,沥青用量增加,沥青路面高温稳定性不足。因此,合理的沥青膜厚度范围是沥青路面良好路用性能的保证。沥青膜厚度由骨料比表面积计算得到,而骨料比表面积可参照美国沥青技术研究

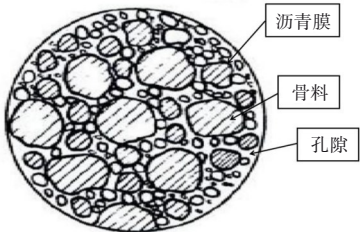


图2 沥青混合料结构图

Fig.2 Structural diagram of asphalt mixture

中心(National Center for Asphalt Technology, NCAT)提出的经验表面积因子与该粒径骨料通过百分率相乘后累加计算得到,不同粒径骨料对应的经验表面积因子见表1。

骨料比表面积SA(m²/kg)的计算方法如式(15)所示。

SA = Σ(Pi × FAi), (15)

式中:Pi为各粒径骨料通过百分率,%;FAi为相应骨料经验表面积因子,m²/kg。

基于沥青膜厚度的初始油石比Qb计算公式如式(16)所示。

Qb = Qbe + Qba , (16)

式中:Qbe以美国沥青协会(AI)经验表面积因子法为基础进行计算,Qba按式(17)进行计算,沥青膜厚度DA按规范建议取14 μm。

Qba = (DA × SA × γb) / 10。 (17)

2 原材料及配合比设计

2.1 沥青

作为沥青路面的胶结材料,沥青质量对沥青路面使用年限及路用性能至关重要,本研究选用工程上常用的SBS I-D聚合物改性沥青进行研究,其主要技术指标试验结果见表2。

2.2 矿料级配及最佳油石比

为比较不同级配类型混合料性能的差异,选用公称最大粒径相同的AC-13C、SMA-13、PA-13及SUP-13四种混合料展开研究。AC-13C为密级配沥青混合料,工程实践中应用最广;SMA-13为间断级配沥青混合料;PA-13为开级配透水式沥青混合料;SUP-13为Superpave设计体系中典型路面结构,上述四种混合料类型具有较广的应用及研究价值。四种混合料矿料级配设计结果见表3,AC、SUP、SMA三种混合料用体积法确定油石比,PA混合料用膜厚度法确定油石比,四种混合料最佳油石比设计结果见表4。

表1 不同粒径骨料对应的经验表面积因子

Tab.1 Empirical surface area factors corresponding to aggregates with different particle sizes

筛孔尺寸/mm	0.075	0.150	0.300	0.600	1.180	2.360	≥4.750
表面积因子/(m²·kg ⁻¹)	0.327 7	0.122 9	0.061 4	0.028 7	0.016 4	0.008 2	0.004 12

表2 沥青主要技术指标试验结果

Tab.2 Test results of main technical properties of asphalt			
检测项目	技术要求	试验结果	试验方法
针入度(25℃)/(0.1 mm)	40~60	51	JTG E20—2011(T 0604—2011)
延度(5 cm/min, 15℃)/cm	≥20	27	JTG E20—2011(T 0605—2011)
软化点/℃	≥60	64.5	JTG E20—2011(T 0606—2011)
运动黏度(135℃)/(Pa·s)	≤3	2.43	JTG E20—2011(T 0619—2011)
25℃弹性恢复/%	≥75	84	JTG E20—2011(T 0662—2011)
RTFOT后残留物	质量变化/%	±1.0	-0.22
	针入度比(25℃)/%	≥65	69
	残留延度(5℃)/cm	≥15	23

表3 矿料级配设计结果

Tab.3 Design results for mineral aggregate gradation										
混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13C	100.0	94.2	74.8	56.0	35.8	28.1	17.2	14.1	11.7	7.4
SMA-13	100.0	96.7	63.8	28.9	17.6	17.3	15.3	12.7	13.1	9.6
PA-13	100.0	95.3	71.3	20.1	15.8	11.3	8.7	6.2	4.8	3.6
SUP-13	100.0	96.3	73.9	45.2	31.1	19.0	11.9	8.0	6.6	5.5

表4 最佳油石比设计结果

Tab.4 Design results for optimum asphalt-aggregate ratio				
混合料类型	AC-13C	SMA-13	PA-13	SUP-13
最佳油石比/%	4.9	6.1	5.4	4.7

3 沥青混合料性能

3.1 高温稳定性能

沥青混合料为黏弹性材料,其性能对温度较为敏感,高温环境下具有较强的黏性^[15-16]。参照现行规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的规定,选用多功能全自动沥青压力试验仪进行四种混合料的单轴压缩高温力学性能试验。试验温度为50℃,试验前将试件在50℃环境下养生4 h,首先在15 kPa下加载30 s,然后在200 kPa下加载3600 s。试件蠕变过程由三个阶段组成:①加载初期变形速率逐渐降低的第一阶段;②变形速率趋于稳定的第二阶段;③试件发生破坏后变形速率快速增长的第三阶段。第二阶段能够反映混合料的高温稳定性能,用拟合曲线的斜率*k*表示,相关系数用*R*²表示。取四个试件的平均值作为试验结果,四种混合料高温蠕变变形试验过程见图3,试验结果见图4,蠕变变形第二阶段拟合曲线的斜率及相关系数见表5。

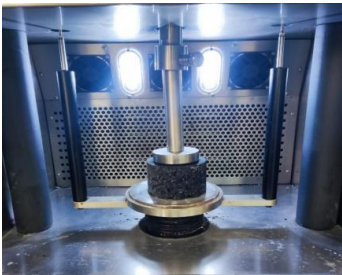


图3 沥青混合料蠕变变形试验过程

Fig.3 Creep deformation test process of asphalt mixture

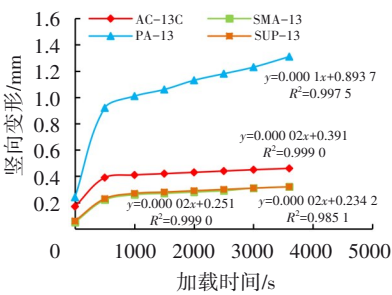


图4 沥青混合料蠕变变形试验结果

Fig.4 Creep deformation test results of asphalt mixture

表5 蠕变稳定阶段的蠕变速率

Tab.5 Creep rate during creep-stable stage				
混合料类型	AC-13C	SMA-13	PA-13	SUP-13
第二阶段蠕变速率 <i>k</i>	2.00×10 ⁻⁵	2.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁻⁵
相关系数 <i>R</i> ²	0.999 0	0.985 1	0.997 5	0.999 0

由图4、表5可以得出:随着加载时间的增加,四种混合料蠕变变形均快速增加,然后增加趋势变缓;PA混合料蠕变变形最大,远大于另外三种混合料,这主要因为PA孔隙率较大,一般为18%~22%之间,沥青胶浆填充骨料间孔隙的能力有限,骨料之间嵌挤效果较弱,外界竖向荷载作用下抗变形能力较差;SMA、SUP两种混合料蠕变变形较小,且变形曲线趋于重合。第二阶段蠕变变形拟合曲线斜率 k 表征混合料的高温稳定性能,相当程度上与蠕变变形变化趋势吻合,即PA高温稳定性最差,其次AC,而SMA、SUP两种混合料高温稳定性较好;从以上两个方面可知,SUP混合料高温稳定性能最优,其次为SMA和AC,最差为PA。

3.2 低温抗裂性能

在车辆轴载作用下,当温缩应力大于结构层内部允许抗拉应力时,沥青路面就会开裂,如不加以处治就会恶化成块状裂缝甚至龟裂等严重病害^[17-18]。参照现行规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的规定,选用多功能全自动沥青压力试验机进行-10℃间接拉伸试验来评价四种混合料劈裂低温抗开裂能力,试验前试件提前在-10℃环境下养生4 h,加载速率为1 mm/min,取四个试件的平均值作为试验结果,四种混合料劈裂强度、劈裂应变、劈裂劲度模量及劈裂破坏应变能试验过程见图5。

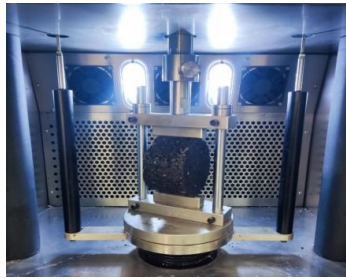


图5 低温劈裂试验过程

Fig.5 Low-temperature splitting test process

由图6可以得出:AC、SUP两种混合料劈裂强度及劲度模量试验结果均大于SMA、PA混合料,而AC、SUP两种混合料劈裂应变试验结果均小于SMA、PA混合料,但JTG F40—2004规范中推荐间接拉伸应变评价混合料的低温性能,因此仅从劈裂强度、劈裂应变、劈裂劲度模量三项指标来评价混合料低温抗开裂性能优劣存在不足。劈裂破坏应变能可用破坏单位体混合料所消耗的能量表征,结果表明,SUP、SMA两种混合料劈裂破坏应变能均高于AC、PA两种混合料,且PA混合料试验结果最小,表明SUP、SMA两种混合料具有较好的低温抗开裂能力。这主要因为,AC、SUP均为悬浮密实型结构,但SUP级配设计更加严苛,级配曲线不允许通过规定的禁区,其结构更加合理,储能能力更强;SMA为骨架密实型结构,矿粉及沥青用量较大,相较于其他三种混合料柔韧性更强,破坏时消耗能量更多,低温性能较

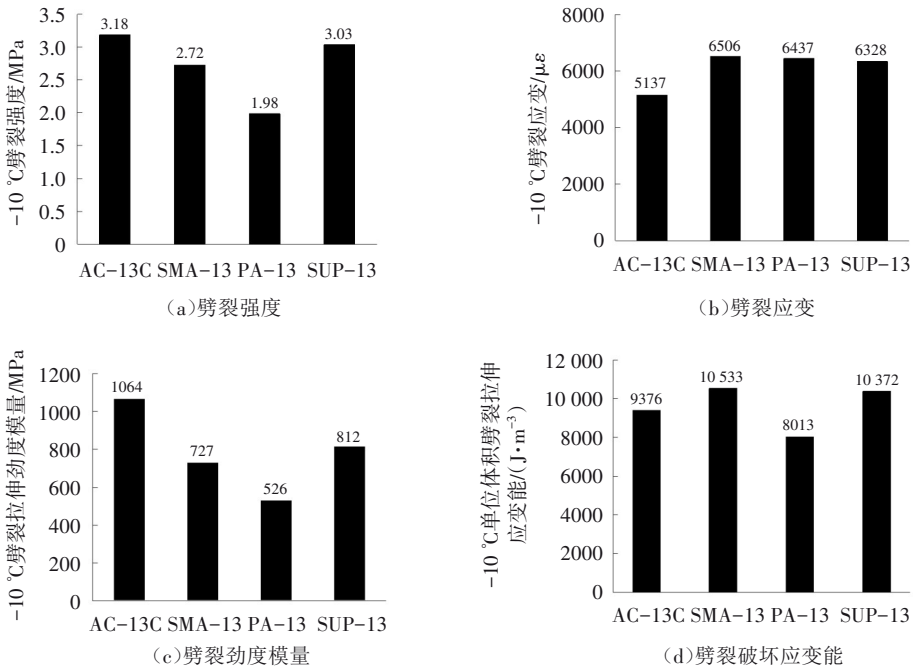


图6 低温劈裂试验结果

Fig.6 Low-temperature splitting test results

强;PA为开级配结构类型,虽沥青用量较多,但内部孔隙较大,属骨架孔隙结构,骨料间的黏结能力不足,整体承载能力较差,因此低温抗开裂能力最小。

3.3 抗拉、抗压性能

在外界荷载作用下,沥青路面服役阶段会受到抗压及抗拉作用^[19]。为评价四种混合料在常温环境下的路用性能,参照现行规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的规定,选用多功能全自动沥青压力试验机进行单轴无侧限抗压及劈裂试验,试验温度为20℃,加载速率为2 mm/min,试验前试件在20℃环境下养生4 h。取四个试件的平均值作为试验结果,四种混合料抗拉强度、抗压强度、破坏应变、劲度模量及破坏应变能试验结果见表6。

表6 沥青混合料常温抗拉、抗压破坏试验结果

Tab.6 Test results of tensile and compressive failure of asphalt mixture at room temperature

检测项目	AC-13C	SMA-13	PA-13	SUP-13
劈裂强度/MPa	0.86	0.67	0.37	0.74
抗压强度/MPa	4.53	2.74	1.52	3.47
劈裂破坏应变/ $\mu\varepsilon$	6573	8862	14175	7618
压缩破坏应变/ $\mu\varepsilon$	21 463	23 572	42 875	28 726
劈裂拉伸劲度模量/MPa	263.47	163.18	58.72	175.63
压缩劲度模量/MPa	218.93	123.17	40.26	117.43
单位体积劈裂拉伸应变能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)	3476	3742	2987	3318
单位体积压缩破坏应变能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)	574 28	384 72	336 71	596 45

由表6可以得出:四种混合料抗压破坏的强度、应变及破坏应变能试验结果均大于抗拉破坏的强度、应变及破坏应变能试验结果,且抗压破坏应变能显著高于拉伸破坏应变能,表明混合料抗压能力显著高于抗拉能力。这主要因为,受压状态下,混合料中骨料间的嵌挤力、黏结力共同承受外界荷载,且骨料本身具有较大抗压强度,因此混合料抗压能力较强;受拉状态下,骨料间的嵌挤力无法抵抗拉力,而沥青起到的黏结力有限,混合料抗拉能力较弱。AC、SUP两种混合料抗拉强度、抗压强度、拉伸劲度模量、压缩劲度模量及压缩破坏应变能试验结果均大于SMA、PA两种混合料,表明悬浮密实型结构较其他结构具有较好的力学性能。SMA混合料较AC、SUP两种混合料具有较高的拉伸应变能,且PA混合料拉伸应变能最低,但SMA混合料压缩破坏应变能较低,这主要由SMA混合料沥青用量较大导致的。

因此AC、SUP两种悬浮密实型结构整体抗压及抗拉能力较强。

3.4 静态压缩蠕变性能

黏弹特性是沥青路面的重要属性,其性能受温度、加载时间及加载方式影响较大,静载作用下,沥青路面变形量随加载时间的延长而不断增加^[20-21]。本研究利用旋转压实仪成型试件,选用静态单轴压缩蠕变试验来评价四种混合料的黏弹特性,试件尺寸为 $\Phi 150\text{ mm}\times 180\text{ mm}$,然后利用钻芯机制备尺寸为 $\Phi 100\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ 的试件,最后进行切割得到 $\Phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的单轴压缩蠕变试验试件。选用UTM-30试验机对四种混合料分别在10、20、30、40、50℃试验环境下开展试验,试验包括预加载、加载、卸载等三个阶段,荷载依次为20、200、0 kPa,加载时间依次为30、3600、300 s,取四个试件的平均值作为试验结果,四种混合料静态单轴压缩蠕变变形量试验过程见图7。



图7 四种混合料蠕变变形量试验过程

Fig.7 Test process for creep deformation of four asphalt mixtures

由图8可以得出:随着试验温度的增加,四种混合料蠕变变形量试验结果均逐渐升高;相同试验温度下,随着加载时间的延长,四种混合料蠕变变形量试验结果均呈现先快速增长后趋于平缓的趋势,卸载后,蠕变弹性变形快速恢复,黏弹性变形随着卸载时间的延长进一步恢复,但仍存在残余部分塑性变形;SMA、SUP两种混合料较AC、PA两种混合料具有更强的抗静态单轴压缩蠕变变形能力,其中PA混合料抗静态单轴压缩蠕变变形能力最差。

3.5 动态黏弹性能

车辆轴载较小及车辆行驶速度较低时,单轴压缩静态蠕变试验能够很好地反映沥青路面的黏弹特性。但沥青路面在运营阶段,车辆行驶速度较快,且重载、超载的现象经常发生,高速、重载行驶的车辆产生的惯性荷载及冲击荷载会加快沥青路面破坏,因此静态荷载试验难以模拟现场路面实际受力情况^[22-24]。为更好模拟沥青路面在高速、重载条件下

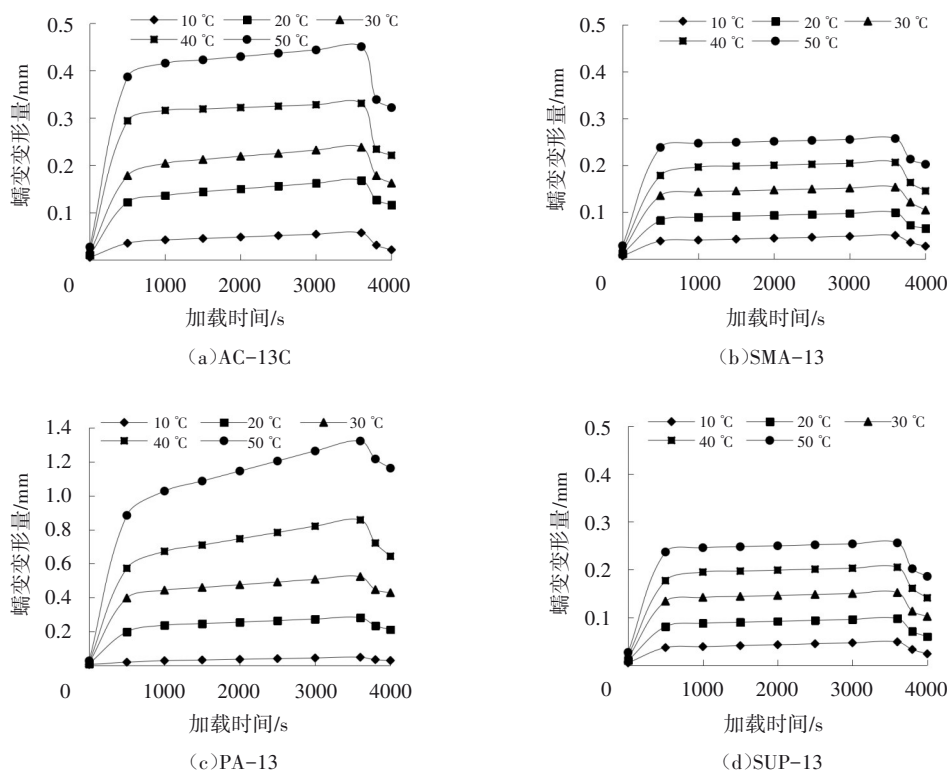


图8 四种混合料蠕变变形量试验结果

Fig.8 Test results of creep deformation of four asphalt mixtures

的黏弹特性,本研究参照美国 AASHTO 设计理念,用动态模量试验来评价四种混合料的动态黏弹特性。选用 UTM-30 试验机进行动态模量试验,试件制作过程同静态单轴压缩蠕变试验,尺寸为 $\Phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。试验最大荷载 200 kPa 与静态单轴压缩蠕变试验保持一致,采用偏移正弦波轴向压应力的方式进行加载。试验过程中的温度依次为 10、20、30 °C,不同试验温度下测定四种混合料在 0.1、0.5、1、5、10、25 Hz 加载频率下的动态模量及相位角,取四个试件的平均值作为试验结果,试验过程见图 9。

由图 10~图 11 可以得出:加载频率相同时,随着试验温度的升高,四种混合料动态模量均逐渐降低,相位角均逐渐升高;试验温度相同时,随着加载频率



图9 动态黏弹性能试验过程

Fig.9 Dynamic viscoelastic performance test process

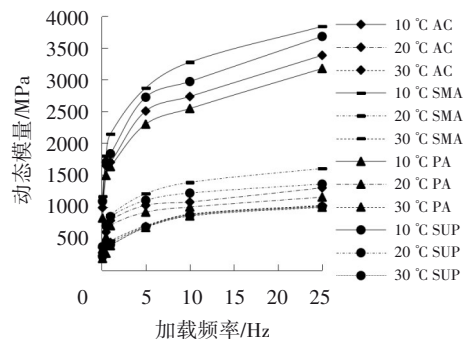


图10 动态模量试验结果

Fig.10 Dynamic modulus test results

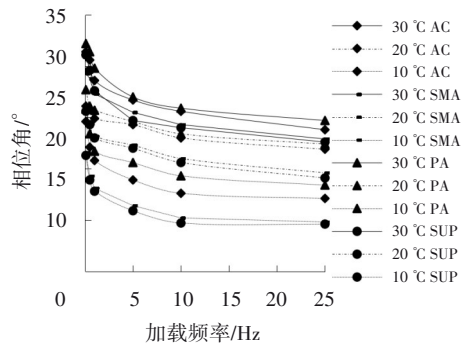


图11 相位角试验结果

Fig.11 Phase angle test results

的增加,四种混合料动态模量均逐渐增大,增大幅度逐渐变缓,相位角均逐渐降低,降低幅度逐渐变缓;试验温度较高及加载频率较低时,混合料偏软,动态模量较低,相位角较大,此时混合料表现出更强的黏性;试验温度较低及加载频率较大时,混合料偏硬,动态模量较大,相位角较小,此时混合料表现出更强的脆性。从级配类型角度分析,相同试验温度及加载频率下,SMA、SUP两种混合料动态模量试验结果大于AC、PA两种混合料,表明SMA、SUP两种混合料较AC、PA两种混合料具有更强的抗变形能力;相同试验温度及加载频率下,SMA、SUP两种混合料相位角试验结果小于AC、PA两种混合料,表明SMA、SUP两种混合料较AC、PA两种混合料具有更强的储能能力。

4 结论

为分析沥青混合料的路用性能,对AC-13C、SMA-13、SUP-13及PA-13四种不同级配类型的沥青混合料进行相关性能研究,得出以下结论:

1)矿料级配对沥青混合料的高温蠕变变形能力有较大影响,第二阶段蠕变变形拟合曲线斜率 k 表征混合料的高温稳定性能,相当程度上与蠕变变形变化趋势吻合,四种沥青混合料高温稳定性能的优劣顺序为 $PA < AC < SMA < SUP$;引入劈裂破坏应变能评价四种沥青混合料的低温抗开裂性能,SMA骨架密实型结构低温抗开裂性能最优,PA骨架孔隙结构低温抗开裂性能最差;AC、SUP两种悬浮密实型结构整体抗压及抗拉能力较强。

2)SMA、SUP两种沥青混合料较AC、PA两种沥青混合料具有更强的抗静态单轴压缩蠕变变形能力,其中PA沥青混合料抗静态单轴压缩蠕变变形能力最差;动态荷载作用下,SMA、SUP两种沥青混合料较AC、PA两种沥青混合料具有更强的储能能力,具有更强的抗动态荷载变形能力。

参考文献:

[1] 侯俊杰,邵景干,王俊超,等.水-温-紫外线耦合作用下玄武岩纤维沥青混合料路用性能研究[J].合成材料老化与应用,2024,53(4):58-61.
Hou J J, Shao J G, Wang J C, et al. Study on road performance of basalt fiber asphalt mixture under the water-temperature-ultraviolet light coupling effect[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2024, 53(4): 58-61.

[2] 马涛,范剑伟,朱雅婧.硬质砂岩排水沥青混合料力学

性能与空隙率衰变[J].交通科技与经济,2023,25(3):1-7.

Ma T, Fan J W, Zhu Y J. Mechanical properties and void rate attenuation of hard sandstone drainage asphalt mixture[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2023, 25(3): 1-7.

[3] 杨三强,孙爽,李倩,等.胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J].中外公路,2023,43(2):227-233.

Yang S Q, Sun S, Li Q, et al. Dynamic load response analysis of rubber powder modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 227-233.

[4] 郭昱辰.静动荷载作用下路面动态响应与参数分析[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2019.

Guo Y C. Dynamic response and parameter analysis of pavement under static and dynamic loads[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2019.

[5] 张玉秀,李萍,范鑫源.低围压沥青混合料抗剪性能试验及影响因素分析[J].广西科技大学学报,2023,34(3):45-52.

Zhang Y X, Li P, Fan X Y. Test on shear performance of asphalt mixture with low confining pressure and analysis of its effect factors[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2023, 34(3): 45-52.

[6] 高丹盈,黄春水.纤维沥青混凝土五单元八参数粘弹性力学模型[J].中国公路学报,2014,27(2):1-8.

Gao D Y, Huang C S. Viscoelastic mechanical model with five units and eight parameters for fiber reinforced asphalt concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 1-8.

[7] 余志平.考虑温度效应的沥青混合料粘弹性力学模型及其应用[D].合肥:合肥工业大学,2013.

Yu Z P. Viscoelastic mechanical model and its application of asphalt mixture considering temperature effect[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

[8] 董满生,余志平,鹿婧,等.考虑温度效应的沥青混合料粘弹性力学模型[J].固体力学学报,2014,35(增刊1):165-172.

Dong M S, Yu Z P, Lu J, et al. Viscoelastic constitutive model of asphalt mixture considering temperature effect[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(S1): 165-172.

[9] Assogba O C, Tan Y Q, Zhou X Y, et al. Numerical investigation of the mechanical response of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load and nonlinear temperature gradient effect[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117406.

[10] 洪诗迪.沥青混合料粘弹塑性本构方程及其应用研

- 究[D]. 西安:长安大学,2018.
- Hong S D. Viscoelastic-plastic constitutive equation of asphalt mixture and its application research[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.
- [11] 徐强,任瑞波,王建光,等. 城市道路沥青路面结构力学响应分析[J]. 城市道桥与防洪,2011(5):175-180.
- Xu Q, Ren R B, Wang J G, et al. Analysis of mechanical response to asphalt pavement structure of urban road[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2011(5): 175-180.
- [12] Assogba O C, Tan Y Q, Sun Z Q, et al. Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(3): 572-602.
- [13] 杨瑞华,彭妙娟. 沥青混合料设计成型方法对SAC沥青混合料路用性能的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(3): 96-99.
- Yang R H, Peng M J. Study on influence of molding method of asphalt mixture design on road performance of SAC asphalt mixture[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(3): 96-99.
- [14] 林绣贤. HMA和SMA最佳油石比快速确定法[J]. 华东公路, 2003(2): 88-92.
- Lin X X. Rapid determination method of optimum oil-stone ratio of HMA and SMA[J]. East China Highway, 2003(2): 88-92.
- [15] 李元昊,邵景干,黄运军,等. 矿渣砂-水镁石纤维沥青混合料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 40-46.
- Li Y H, Shao J G, Huang Y J, et al. Study on properties of slag sand and brucite fiber asphalt mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(4): 40-46.
- [16] 周合轻,陈浩,张珈毓,等. 基于RAP全掺量下再生温拌沥青混合料路用性能研究[J]. 河南科学, 2023, 41(5): 721-729.
- Zhou H Q, Chen H, Zhang J Y, et al. Research on pavement performance of recycled warm mix asphalt mixture based on RAP full content[J]. Henan Science, 2023, 41(5): 721-729.
- [17] 王丽,邵景干,王兆仑,等. RCA高模量玄武岩纤维AC-20C沥青混合料路用性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(5): 32-35.
- Wang L, Shao J G, Wang Z L, et al. Research on the road performance of RCA high modulus basalt fiber AC-20C asphalt mixture[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2024, 53(5): 32-35.
- [18] 孙黎,李元昊,邵景干,等. 外掺剂配比优化改性的排水式沥青混合料性能研究[J]. 粘接, 2024, 51(10): 65-68.
- Sun L, Li Y H, Shao J G, et al. Study on the performance of drainage asphalt mixture modified by optimization of external admixture ratio[J]. Adhesion, 2024, 51(10): 65-68.
- [19] 顾兴宇,章天杰,王晓威,等. 一种评价沥青混合料矿料骨架强度的试验方法[J]. 公路, 2018, 63(6): 232-238.
- Gu X Y, Zhang T J, Wang X W, et al. A test method to evaluate the aggregate skeleton strength of asphalt mixture[J]. Highway, 2018, 63(6): 232-238.
- [20] 罗文波,梁晟,张永军. 沥青混合料动态黏弹性的分数阶微分本构模型[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 34-43.
- Luo W B, Liang S, Zhang Y J. Fractional differential constitutive model for dynamic viscoelasticity of asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 34-43.
- [21] 肖庆一,余天航,陈向阳,等. 铁尾矿沥青混合料动态模量试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 85-90.
- Xiao Q Y, Yu T H, Chen X Y, et al. Experimental study on dynamic modulus of iron tailings asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(5): 85-90.
- [22] 刘朝晖,杨鑫,黄优,等. 基于沥青混合料动态模量主曲线参数的沥青路面结构分析[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 35-45.
- Liu Z H, Yang X, Huang Y, et al. Analysis of asphalt pavement structure based on master curve parameters of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3): 35-45.
- [23] 黄宣,白桃,张德育,等. 沥青混合料动静态黏弹性主曲线转化与比较[J]. 公路交通科技, 2024, 41(6): 1-8.
- Huang X, Bai T, Zhang D Y, et al. Viscoelastic master curve transformation and comparison of asphalt mixture under dynamic and static loads[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(6): 1-8.
- [24] 李浩,王选仓,曾国东,等. 沥青混合料动态拉压特性对比[J]. 公路, 2024, 69(8): 114-119.
- Li H, Wang X C, Zeng G D, et al. Comparisons on dynamic tension and compression characteristics of asphalt mixture[J]. Highway, 2024, 69(8): 114-119.

(编辑 康 艳)