

文章编号:1671-1637(2014)03-0001-07

## 三角形坐标系下沥青组分与粘度、粘附性关系

傅 珍<sup>1</sup>, 延西利<sup>2</sup>, 蔡 婷<sup>2</sup>, 马 峰<sup>2</sup>, 汪林兵<sup>3</sup>

(1. 长安大学 材料学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;  
3. 弗吉尼亚理工大学 土木与环境工程系, 弗吉尼亚 黑堡 24061)

**摘 要:**为研究沥青的组分和组分构成关系对沥青技术性质的影响, 选用13种道路石油沥青和2种集料, 采用四组分、表观粘度与粘附性试验研究了沥青组分与粘度、粘附性之间的关系。提出了三角形坐标系下的沥青四组分试验结果表征方法, 采用沥青四组分数据绘制沥青特征三角形, 利用惯性矩反映沥青的组分构成特征, 分析了沥青四组分数据构成的三棱锥几何特性与粘度、粘附性的联系。试验结果表明: 除沥青的组成成分之外, 沥青组成成分的结构差异也会影响其粘度及集料粘附性; 对于不同品牌而相同标号的沥青, 在三角形坐标系下, 沥青组分特征三角形的惯性矩越大, 与集料粘附性越好。

**关键词:**路面材料; 沥青; 粘附性; 粘度; 三角形坐标系

**中图分类号:** U414.75

**文献标志码:** A

## Relationship among asphalt component, viscosity and adhesion in triangular coordinate system

FU Zhen<sup>1</sup>, YAN Xi-li<sup>2</sup>, CAI Ting<sup>2</sup>, MA Feng<sup>2</sup>, WANG Lin-bing<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 24061, Virginia, USA)

**Abstract:** In order to assess the influences of asphalt component and composition on asphalt technical properties, thirteen types of pavement petroleum asphalts and two kinds of typical aggregates were selected. The relationship among asphalt component, viscosity and adhesion was investigated by using tests of four-component, apparent viscosity and adhesion. The characterization method of asphalt four-component test result by using triangular coordinate system was put forward. The asphalt characteristic triangle was drawn with four-component data. The characteristic of asphalt composition was represented by inertia moment. The asphalt pyramid was drawn based on asphalt four-component data and the relationship among its geometry characteristics, viscosity and adhesion was analyzed. Analysis result indicates that except asphalt components, its composition differences also have influences on asphalt viscosity and aggregate adhesion. For the asphalts with same penetration grade and different brands, triangular coordinate analysis result shows the aggregate adhesion increases with the increase of the inertia moment of asphalt four-component characteristic triangle. 6 tabs, 6 figs, 18 refs.

**Key words:** pavement material; asphalt; adhesion; viscosity; triangular coordinate system

收稿日期: 2014-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108038, 51108039, 51310105031, 51310105032); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012ZD016); 陕西省科技计划项目(2013KJXX-94)

作者简介: 傅 珍(1976-), 女, 河南鹤壁人, 长安大学副教授, 工学博士, 从事道路结构与材料研究。

**Author resume:** FU Zhen(1976-), female, associate professor, PhD, +86-29-82334836, zhenfu@chd.edu.cn.

## 0 引 言

粘度是评价道路沥青粘结性的重要技术指标,沥青路面在施工过程中要求沥青在较短时间能均匀裹覆于矿料表面,在使用阶段则要求沥青路面具有较好的抵抗高温车辙变形和低温开裂的性能,沥青的这些关键技术性质都与其在环境温度下的粘度有紧密的联系。沥青属于烃类与非烃类的混合物,其组成及结构复杂,相对分子质量也较大。由于其复杂性,难以对其进行精确的分离,因此,按相似的物理和化学特性将其组分进行分离,简化分析沥青组分。

近年来有研究人员开展了关于分离沥青组分的试验方法、沥青矿料间粘附性能的影响因素、沥青与集料粘附性能评价方法等方面的研究工作<sup>[1-6]</sup>。蔡婷等分析了沥青组分和粘度、粘附性能的联系<sup>[1-2]</sup>;谭忆秋等探讨了温度及荷载频率对沥青集料交互作用能力的影响<sup>[3]</sup>;马峰等分别研究了沥青组成等材料特性对粘附性等沥青路用性能的影响<sup>[4-6]</sup>;Kringos 等对沥青材料特性与沥青路用性能的相互作用与评价方法也开展了较深入的研究,从沥青胶浆与集料界面粘结强度角度分析水敏感性的热动力学性质<sup>[7-8]</sup>;Cheng 等从沥青集料界面能量方面评价不同沥青添加剂、温拌沥青等沥青与矿料粘附性<sup>[9-13]</sup>;Wei 等分析了对于沥青路面水损害的试验评价方法,探讨了矿料组成特征对沥青粘附性能的影响<sup>[14-16]</sup>,在沥青和矿料水敏感性关系方面取得了有益的成果;王翠红等利用离子交换色谱(IEC)方法分离了沥青酸碱性不同的组分,认为中性和酸性组分增多时沥青粘度增大<sup>[17]</sup>;高山松利用灰色理论分析了沥青蜡含量

和四组分组成特征与其粘度的关系,认为蜡含量对沥青粘度有较明显的影响,而单一组分与粘度的关联并无明确的规律性<sup>[18]</sup>。虽然仅采用沥青的组分分析来评价沥青路用性能还存在一些困难,但在沥青化学组成对宏观技术性质的影响方面已开展了较为深入的研究工作,日本田中晴也等通过多变量回归方法,认为沥青质和胶质等重质成分对沥青粘度有重要的影响。

目前的研究从一定程度上反映了沥青组成特性与沥青粘度、粘附性之间的关系,但并未采用三角形坐标系对三者之间的复杂关系开展进一步探讨。本文在开展沥青四组分分析的基础上,采用三角形坐标系和三棱锥体积方法表征沥青四组分数据,利用其几何性质指标研究沥青组成特征和沥青粘度、沥青矿料粘附性之间的联系,为沥青组分与性能研究提供了一种新的研究思路。

## 1 原材料技术性质

本文选用 13 种道路沥青和石灰石、玄武岩 2 种典型集料,通过试验分析了沥青四组分组成、沥青与集料的粘附性和沥青表观粘度等技术性质。为综合考虑生产厂家品牌与沥青标号对性能的影响,有针对性地进行了原材料选择。A、B 分别为不同生产厂家品牌的两类沥青,每类沥青中各选择 3 个不同的标号等级,分别编号为 A1、A2、A3 及 B1、B2、B3, E 类沥青常应用于中国寒冷地区,沥青标号等级较高,取 2 个不同标号等级,编号为 E1 和 E2。另外选择中国常用的 5 种石油沥青,标号为 110# 的有 2 种,编号为 C、D,标号为 90# 的有 3 种,编号为 F、G、H。各沥青的基本技术指标见表 1。

表 1 沥青基本技术指标

Tab. 1 Technical properties of asphalts

指标	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C	D	E1	E2	F	G	H
25 ℃针入度/0.1 mm	73	85	110	90	115	129	102	107	134	152	86	92	83
15 ℃延度/cm	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150
软化点/℃	48.5	48.5	44.0	48.5	43.0	43.5	45.0	44.5	47.5	48.5	47.5	48.5	48.0
针入度指数	0.60	1.04	0.67	-1.25	-0.67	-1.07	-0.61	-1.92	0.33	-0.67	-1.25	-1.25	-1.80

## 2 沥青组分与粘度、粘附性试验

沥青四组分分离的试验原理来自液固吸附色谱法,以固体吸附剂为固定相,以液体为流动相,按被

分离组分的分子(溶质分子)与流动相分子(溶剂分子)争夺吸附剂表面活性中心的数量差别,利用吸附剂对混合物各组分吸附能力的不同分离各组分。方法是将混合物溶于适当溶剂中,使溶液经由填装有

吸附剂的吸附柱中流过。沥青四组分试验方法基本操作步骤为:首先采用正庚烷沉淀沥青质;再将沉淀中的可溶分(即软沥青质)吸附于氧化铝色谱柱上,得到饱和分;然后使用甲苯冲洗,得到芳香分;最后采用甲苯-乙醇冲洗,得到胶质。依据以上试验原理对沥青试样进行四组分试验分析,结果见图 1。

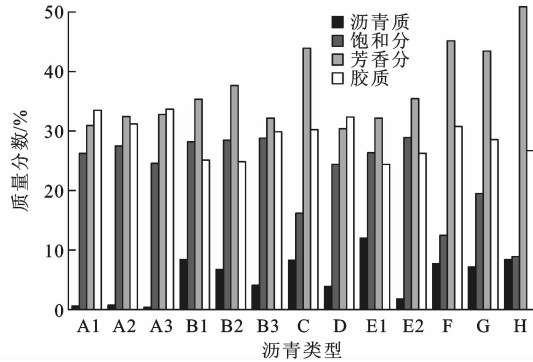


图 1 沥青四组分试验结果

Fig. 1 Four component test results of asphalts

一般认为沥青的技术性质决定于 2 个主要因素,即原油品质特性和沥青生产工艺特性。图 1 中数据表明,不同品牌的沥青由于原油品质特性的不同,其四组分的组成比例特征存在较大的差异。A 类沥青特有的成分特点是具有较低的沥青质含量,但是其胶质含量并不低。从实际的使用情况来看,A 类沥青具有优良的技术性质,在中国高等级公路建设中具有广泛的成功经验。

采用 Brookfield 旋转粘度仪测定了 13 种沥青 100 ℃~135 ℃温度域的表观粘度,试验结果见图 2。随着温度升高,不同类型沥青的粘度都呈现明显的下降趋势。A1 和 A2 沥青相比其余沥青在 4 个温度条件下具有显著的高粘度值,A3 沥青则与其余类别沥青的粘度值接近。A 类 3 种沥青的四组分分析结果差异并不明显,而粘度测试结果有显著差异,分析表明沥青四组分组成并不是决定其粘度的唯一主要因素。沥青组成成分的结构差异也会影响其粘度以及其他宏观路用性能。

普通石灰岩为典型的碱性集料,玄武岩为弱碱性集料。碱性石灰岩与弱酸性沥青成分发生反应而形成扩散的溶剂化膜,由此产生良好的粘附性能。本文中采用的 2 种集料表面特征差异明显:玄武岩表面较为光滑,颜色呈玄黑,具有较明显的纹理结构;石灰石表面致密且较光滑,颜色均匀,属微晶结构。进行沥青与集料的粘附性试验前,首先用水冲洗集料表面,然后放入恒温烘箱进行干燥,挑选出破碎面较新且无污染的集料,以尽可能降低对试验结果的影响。

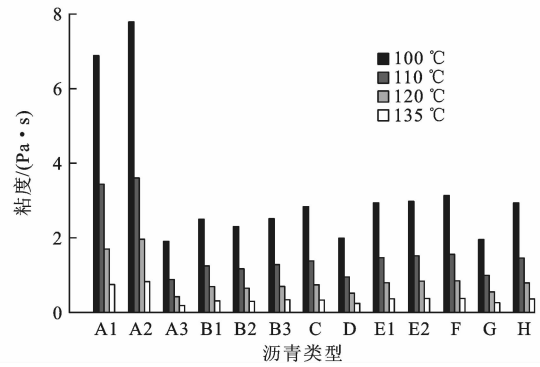


图 2 沥青表观粘度试验结果

Fig. 2 Apparent viscosity test results of asphalts

水煮法试验是常用的沥青与集料间的粘附性评价方法。本文在进行水煮法试验时,称取水煮前后集料吸附沥青的质量,利用剥落前后的沥青质量之差与沥青质量的比值作为粘附率,定量表征粘附性能的大小。采用洁净细铁丝牢集料中部,置于万分之一精度电子天平上称取其质量。拴铁丝集料裹覆沥青后首先在干燥器中干燥约 20 min,使试样冷却至室温,时间略长于水煮法试验静置时间,然后利用天平吊架称取拴铁丝集料裹覆沥青后的质量。试验中较长的静置时间使沥青与集料有更充分的相互作用时间,提高了沥青与集料界面附着力。为了更好地区分不同沥青与集料间粘附性能的差异,本文中将试验过程中的水煮时间延长到 5 min。为了消除水煮后的试样残留水分的影响,将试样分别置于提前称重的洁净玻璃杯中,然后放置于烘箱中保持 120 ℃加热除水 3 h,在干燥器中冷却至环境温度,然后称取质量,计算沥青质量之差与沥青质量比值,从而得到沥青与集料的粘附率。考虑试验数据精度,本文试验中将集料的试验样品个数增加为 10 个,排除离散较大的数据后取平均值。粘附性等级与粘附率试验结果分别见图 3、4。

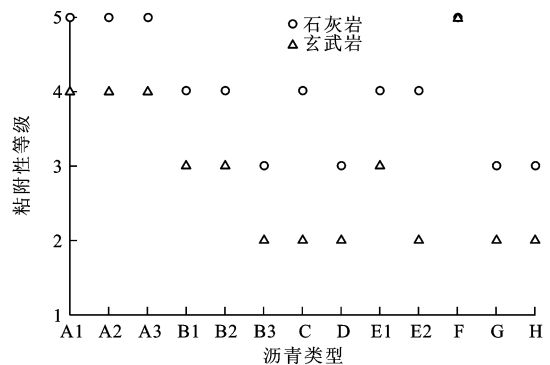


图 3 水煮法测定沥青粘附性等级

Fig. 3 Adhesion grades of asphalts based on boiling

对比图 3、4 的试验结果,可以看出由水煮法评

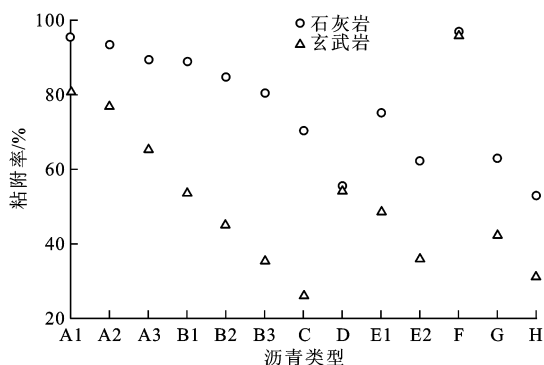


图4 水煮法测定沥青粘附率

Fig. 4 Adhesion ratios of asphalts based on boiling

定的粘附等级比粘附率表征的等级高,由于集料表面形成的沥青膜厚薄程度不均,因此,利用从集料表面剥落的沥青质量差值表示剥落面积存在部分偏差。虽然石灰岩集料对不同沥青的粘附性均优于玄武岩,但不同沥青之间仍存在差异。B3、D、G与H四种沥青与石灰岩集料的粘附性等级仅为3,而B2与B3沥青具有相近的四组分和粘度数值,B2沥青与石灰岩集料的粘附性等级优于B3。A类3种沥青具有突出的与酸性集料和碱性集料的粘附性能,A3沥青较低的粘度数值并没有直接体现在粘附性能上,但是从粘附率试验结果表现出A3的粘附性能略低于A1和A2。F沥青的粘附性等级和粘附率试验结果均显著优于本研究中的其余各类沥青,但其四组分试验数据相比其余沥青并无显著差异,粘度仅略高于其余沥青。除沥青的组成成分之外,沥青组成成分的结构差异也会影响其粘度以及其他宏观路用性能。

在利用水煮法测试时,水煮过程中集料表面的自由沥青容易从表面剥落下来,在试验前后会引起自由沥青膜质量减少,但粘附效应强的结构沥青膜则不易破坏,因此,该方法只能定性地评定沥青与集料相对粘附性的好坏。本研究采用的沥青的初始吸附量以及水煮试验后沥青的残留质量之差,即粘附率指标,比仅通过观察集料表面的沥青剥落面积能够更为量化、准确地表征沥青与矿料的粘附性能。

### 3 三角形坐标系下的沥青组分与粘度、粘附性关系分析

将沥青组分绘制于三角形坐标系的方法常被用于沥青组成特性与分布情况的研究。本文将饱和分和芳香分之和统称油分,以此作为沥青组分特征三角形的3条边之一,另外2条边分别为沥青质和胶质含量。本文提出将沥青的组分数据绘于三角形坐

标轴上,然后将3个数据点用直线相连,每种沥青的四组分在按照沥青质、胶质和油分3部分绘制特征三角形,利用三角形的面积、惯性矩和三角形形心位置等几何特征来评价沥青的化学组成特性。A3和B1在三角形坐标系下的形心位置以及组分构成见图5,其余11种沥青也可分别绘制成图(图略)。

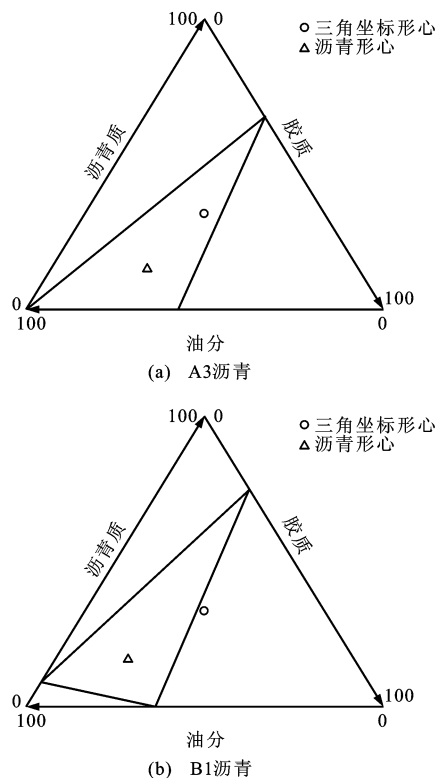


图5 沥青A3和B1的四组分特征三角形

Fig. 5 Four-component characteristic triangles of asphalts A3 and B1

每种沥青的组分面积、惯性矩、形心与坐标系形心的相对位置以及几何特征在一定程度上反映沥青的组成特性。三角形坐标系下的沥青特征三角形面积反映了其组分的分布情况,沥青特征三角形的形心与坐标系形心的距离可以表征不同的沥青三角形形状的差异,沥青三角形几何特征计算与分析结果见表2。

同一品牌沥青的三角形形心位置与其四组分特征三角形面积基本接近,说明相同的原油油源及相近的沥青炼制工艺决定了其宏观技术性质的一致性。同类不同标号沥青不仅25℃针入度(也称条件粘度)存在差异,结合组分及粘度分析,3种A类沥青粘度存在明显不同,B类沥青粘度和组分差别较小,E类沥青的组分有明显差异但粘度数值较接近。粘附性试验说明A类和B类的不同针入度标号沥青之间粘附性能接近,差异较小。综合13种沥青

表 2 沥青特征三角形几何特性

Tab. 2 Geometry characteristics of asphalt characteristic triangle

沥青种类	特征三角形形心与三角形坐标系形心的相对位置		特征三角形面积/mm <sup>2</sup>	惯性矩/mm <sup>3</sup>
	角度/(°)	距离/mm		
A1	44.49	22.45	1 228	27 575
A2	47.71	24.31	1 191	28 960
A3	44.44	22.61	1 224	27 685
B1	55.46	25.61	1 139	29 178
B2	55.51	27.82	1 080	30 063
B3	50.31	24.46	1 168	28 593
C	51.38	22.83	1 173	26 801
D	44.46	20.23	1 304	26 384
E1	55.92	21.22	1 270	26 956
E2	54.26	30.99	990	30 682
F	49.41	21.24	1 232	26 186
G	53.16	25.26	1 120	28 293
H	53.18	22.86	1 226	28 046

表 3 沥青组分、粘度和粘附性

Tab. 3 Components, viscosities and adhesions of asphalts

针入度等级	沥青种类	惯性矩/mm <sup>3</sup>	135 ℃粘度/(Pa·s)	与石灰岩的粘附等级	与石灰岩的粘附率/%	与玄武岩的粘附等级	与玄武岩的粘附率/%
90	F	26 186	0.387	5	96.87	5	95.64
	A2	28 960	0.825	5	93.33	4	76.72
	B1	29 178	0.319	4	88.89	3	53.39
	G	28 293	0.260	3	62.96	2	42.16
	H	28 046	0.360	3	52.85	2	31.15
110	A3	27 685	0.177	5	89.34	4	65.34
	B2	30 063	0.301	4	84.65	2	44.99
	C	26 801	0.336	4	70.27	2	25.94
	D	26 384	0.238	3	55.56	2	54.06
130	B3	28 593	0.336	3	80.33	2	35.44
	E1	26 956	0.378	4	75.34	3	48.61

表 4 沥青惯性矩、粘度、粘附率排序

Tab. 4 Sequences of inertia moment, viscosity and adhesion of asphalts

25 ℃针入度/0.1 mm	沥青种类	惯性矩排序	135 ℃粘度排序	粘附率排序
90	B1	1	2	1
	G	2	3	2
	H	3	1	3
110	B2	1	2	1
	C	2	1	2
	D	3	3	3
130	B3	1	2	1
	E1	2	1	2

附性越好。而惯性矩指标与 135 ℃粘度的联系较为

的组分、粘度和粘附性数据,四组分试验结果与沥青技术性质之间不存在线性关系,油源的不同决定了不同沥青中同种组分性质差异,反映了沥青技术性质中影响因素的复杂性,也要求技术人员探寻新的技术指标来反映沥青组成与技术性质之间的联系。三角形坐标系中惯性矩指标能够反映四组分之间的构成比例关系,体现沥青组成的结构特点。为了分析相同针入度等级沥青惯性矩指标与相应的宏观技术性质之间的联系,将 135 ℃布氏粘度及粘附性数据列于表 3 中。

按沥青技术性能的特征将试验数据从优到劣排序,并将序号列于表 4 中。由于在表 3 中 A 类 3 种沥青和 F 类沥青与集料表现出良好粘附性,其组成成分的特殊性使得在表 4 排序中未将 A 和 F 两类沥青数据列入。

表 4 数据表明同一针入度等级的沥青惯性矩排序与其粘附率的排序具有较好的一致性,即在三角形坐标系下沥青的惯性矩较大,表明其与集料的粘

复杂,表中数据表明,针入度 130 等级沥青惯性矩的排序结果和 135 ℃粘度的排序结果相反,即在三角形坐标系下沥青的惯性矩数值越小则沥青 135 ℃粘度越大。针入度 90 与 110 两个等级沥青基本也表现出同样的趋势,但规律性并不显著。由于试验数据有限,沥青惯性矩作为新的指标,利用三角形坐标系下的形心、惯性矩等几何特征表征沥青组分数据关系和组分构成特征仍需进一步深入研究。

4 基于三棱锥图形的沥青组分与粘度、粘附性关系分析

本文提出采用沥青四组分数据绘制三棱锥图

形,并利用其几何特征研究沥青组分、粘度和粘附性之间的联系。根据三角形两边之和大于第三边,两边之差小于第三边的定理,利用沥青四组分试验结果中的 3 个数据构成三角形,第 4 个组分数据作为三棱锥的高。受到几何定理的约束,并不是所有沥青的四组分试验结果均能够构成三棱锥体,H 沥青的四组分数据经过验算不能构成三棱锥体,故在分析中未列入 H 沥青数据。

12 种沥青试样的四组分试验结果经量纲为 1 处理后均可绘制出三棱锥图。绘图过程中各种沥青试样底面三角形数据由饱和分含量(质量分数)、芳香分含量和胶质含量形成,三棱体的高是沥青质含量。以 A1、A2、B1 和 C 四种沥青试样的四组分试验结果为例,汇制的三棱锥体见图 6。对比各沥青试样的三棱锥体积特点可以得出,A 类 3 种沥青具有较大的底面积,但由于沥青质含量相对较少,因而绘制得到的三棱锥体高度低,锥体体积明显小于其他沥青试样。具有较高沥青质的沥青试样,如 B1 和 E1 等沥青,能够构成特征明显的空间锥体,具有较大的体积。

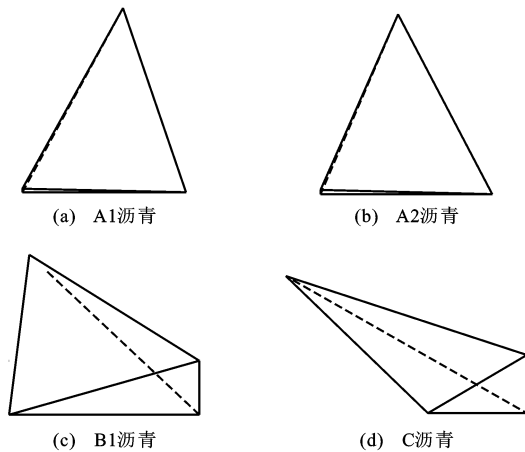


图 6 沥青试样 A1、A2、B1 和 C 四组分数据三棱锥

Fig. 6 Four-component triangular pyramids of asphalts A1, A2, B1 and C

利用绘制的 12 种沥青试样的三棱锥体图形计算得到其三棱锥体积,综合沥青试样的 135 ℃粘度和沥青矿料粘附性能数据列于表 5。

表 6 中数据表明,A 类 3 种沥青和 B 类 3 种沥青构成的三棱锥体的形状和体积均较相近,反映了沥青油源及炼制工艺与宏观技术性质的紧密联系,表现了同类沥青相同油源和近似的炼制工艺对三棱锥体积特征的影响。为了更好地分析四组分数据三棱锥体积与沥青技术性质的联系,将上述 90 和 110 两种针入度等级沥青的数据从优至劣分别排序(表 6)。分

析排序结果表明,在 4 种针入度等级为 90 的沥青中,除去 B1 沥青外,其余 3 种沥青的 135 ℃粘度和其集料的粘附性都随着三棱锥体积的减小而增大。在针入度等级为 110 的沥青中,也存在基本相似的趋势。

表 5 三棱锥体积与沥青粘度、粘附性关系

Fig. 5 Relationship among triangular pyramid volume, viscosity and adhesion

沥青	三棱锥 体积/mm <sup>3</sup>	135 ℃粘度/ (Pa·s)	与石灰岩的 粘附等级	与石灰岩 的粘附率/%	与玄武岩的 粘附等级	与玄武岩的 粘附率/%
A1	71.83	0.82	5	95.47	4	80.67
A2	89.35	0.17	5	93.33	4	76.72
A3	37.99	0.31	5	89.43	4	65.34
B1	986.02	0.30	4	88.89	3	53.39
B2	780.01	0.33	4	84.65	3	44.99
B3	542.87	0.33	3	80.33	2	35.44
C	425.85	0.23	4	70.27	2	25.94
D	437.65	0.37	3	55.56	2	54.06
E1	1 251.95	0.39	4	75.34	3	48.61
E2	245.66	0.38	4	62.34	2	35.87
F	342.63	0.26	5	96.87	5	95.64
G	523.02	0.26	3	62.96	2	42.16

表 6 三棱锥体积、粘度、粘附率排序

Tab. 6 Sequences of triangular pyramid volume, viscosity and adhesion

针入度等级	沥青种类	三棱锥体积排序	135 ℃粘度排序	粘附率排序
90	A2	4	1	2
	B1	1	3	3
	F	3	2	1
	G	2	4	4
110	A3	4	4	1
	B2	1	2	2
	C	3	1	4
	D	2	3	3

## 5 结 语

(1)选用 13 种道路石油沥青和 2 种常用集料,通过组分与粘度、粘附性试验研究了沥青组分与粘度、集料粘附性之间的关系,研究结果表明沥青组分不是其粘度数值的唯一决定因素,沥青组分的结构差异也会影响其粘度及粘附性。

(2)采用水煮试验前后集料表面裹覆沥青的质量差计算沥青的粘附率来评价沥青与矿料粘附效应,并延长煮沸时间以增加试验评价方法的准确性。

试验结果表明,相对于使用剥落面积的经验方法,该方法更能反映沥青与集料之间的粘附程度,从而表征粘附性效果。

(3)提出了三角形坐标系下的沥青四组分试验结果表征方法,以沥青惯性矩作为新指标,在沥青三角形坐标系下建立沥青组分数据的三角形,利用其形心、惯性矩等几何特征表征沥青组成特性。不同品牌而相同标号的沥青在三角形坐标系下沥青组分特征三角形的惯性矩越大,与集料粘附性越好。

(4)提出采用沥青四组分数据得到三棱锥图形,并利用其几何特征研究沥青组分、粘度和粘附性能之间的联系,本研究试验数据表明除个别沥青试样以外,同一针入度等级沥青试样具有如下趋势:沥青组分构成的三棱锥体积值越小,其 135 ℃ 粘度越大,且沥青与集料的粘附性能越好。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 蔡 婷. 沥青材料的组分与粘度试验分析[D]. 西安: 长安大学, 2005.  
CAI Ting. Test analysis on asphalt components and viscosity[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [2] ZHOU Hai-ping, HOLIKATTI S, VACURA P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [3] 谭忆秋, 李晓琳, 吴建涛, 等. 温度及荷载频率对沥青-集料交互作用能力的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 65-72.  
TAN Yi-qiu, LI Xiao-lin, WU Jian-tao, et al. Influence of temperature and loading frequency on the interaction ability of asphalt and aggregate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 65-72. (in Chinese)
- [4] 马 峰, 沙爱民. 塔河沥青路用性能影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 6-9, 25.  
MA Feng, SHA Ai-min. Influencing factors of Tahe asphalt road performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 6-9, 25. (in Chinese)
- [5] 马 峰, 沙爱民. 基于热质联用技术的塔河道路沥青性能分析[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 29-33.  
MA Feng, SHA Ai-min. Property analysis of Tahe road asphalt using simultaneous thermogravimetry-differential scanning calorimetry-mass spectrometry[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 29-33. (in Chinese)
- [6] 韩 森, 刘亚敏, 徐鸥明, 等. 材料特性对沥青-集料界面粘附性的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 6-9, 70.  
HAN Sen, LIU Ya-min, XU Ou-ming, et al. Influence of material characteristics on adhesion at interface between asphalt and aggregate[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 6-9, 70. (in Chinese)
- [7] KRINGOS N, SCARPAS A, DE BONDT A. Determination of moisture susceptibility of mastic-stone bond strength and comparison to thermodynamical properties[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2008, 77: 435-478.
- [8] BHASIN A, LITTLE D N. Application of microcalorimeter to characterize adhesion between asphalt binders and aggregates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(6): 235-243.
- [9] CHENG D. Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy[D]. College Station: Texas A&M University, 2002.
- [10] AKILI W. On the use of sulphur in sand-asphalt applications[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1983, 52: 561-584.
- [11] FINI E H, AL-QADI I L, MASSON J F, et al. Interfacial fracture energy: an indicator of bituminous material adhesion[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2008, 77: 827-849.
- [12] MOGAWER W S, AUSTERMAN A J, KASSEM E, et al. Moisture damage characteristics of warm mix asphalt mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2011, 80: 491-524.
- [13] REINKE G, GLIDDEN S, HERLITZKA D, et al. PPA modified binders and mixtures: aggregate and binder interactions, rutting and moisture sensitivity of mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2010, 79: 719-742.
- [14] WEI Jian-ming, ZHANG Yu-zhen. Influence of aging on surface free energy of asphalt binder[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2010, 3(6): 343-351.
- [15] AIREY G D, COLLOP A C, ZOOROB S E, et al. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9): 2015-2024.
- [16] MAGGIORE C, AIREY G, MARSAC P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 49-54.
- [17] 王翠红, 宋艳茹, 张荣德, 等. 沥青组分对其粘度的影响[J]. 石油沥青, 2003, 17(3): 19-21.  
WANG Cui-hong, SONG Yan-ru, ZHANG Rong-de, et al. The influence of asphalt composition on its viscosity[J]. Petroleum Asphalt, 2003, 17(3): 19-21. (in Chinese)
- [18] 高山松. 沥青组成对其粘度影响的灰色关联分析[J]. 石油沥青, 2008, 22(2): 66-68.  
GAO Shan-song. Asphalt composition influencing its viscosity and its grey correlation analysis[J]. Petroleum Asphalt, 2008, 22(2): 66-68. (in Chinese)