DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.046

基于配方设计的明色沥青低温力学特性

刘夕曦[1]，徐鹏[1,2*]
（1.长安大学，陕西 西安 710061；2.西安公路研究院）

摘要：明色沥青的低温抗裂性能是决定其耐久性能的关键指标。基于测力延度试验、常规性能试验及显微分析，并结合明色沥青的配方组成，分析了沥青在低温下的应力、应变特性。试验结果表明：树脂用量的增加，提高了沥青的最大拉应力、屈服应变能及基质沥青当量劲度等指标，增加了沥青的脆性；而改性剂的加入增加了沥青的延度，降低了弹性比，改善了沥青的柔性和韧性；测力延度指标相比常规指标，更能反映明色沥青的低温性能变化。通过测力延度的相关指标控制明色沥青配方，对改善明色沥青的低温性能具有一定意义。

关键词：明色沥青；测力延度；常规指标；配方；树脂；改性剂

明色沥青是彩色沥青的关键组成材料，近年来越来越多地被用于城市自行车道、景观道路。明色沥青多由树脂、溶剂油及改性剂制成。由于树脂掺量较大，低温较脆，易开裂，对明色沥青的低温性能影响明显。而现有规范采用延度指标作为明色沥青的低温性能控制指标，未能有效体现明色沥青低温条件下的应力、应变特性。通常明色沥青测得的延度较大，但在实际应用中路面冬季低温条件下易开裂，如何通过调整原材料配比来控制明色沥青的低温性能成为目前关注的重点。测试沥青低温力学性能的方法如BBR、直接拉伸试验等，受设备价格等方面限制，难以在生产和施工企业中大量应用。目前厂家及施工企业基本上都具备测力延度设备，其能反映沥青低温下的应力、应变特性，但未见用于明色沥青的相关研究成果。因此，该文通过测力延度试验，结合明色沥青的配方组成，评价沥青在低温下的应力应变特性，希望能为明色沥青的制备和应用提供借鉴和参考。

1 制备工艺及评价方法

1.1 制备工艺

称取一定质量的溶剂油，加热到指定温度；按比例加入石油树脂继续搅拌加热至熔融状态；待两者混合均匀后，加入增韧改性剂熔胀，逐渐升高温度至剪切温度；高速剪切分散均匀后，搅拌发育；制备得到明色沥青。

1.2 评价方法

（1）沥青常规性能指标试验

沥青常规性能指标试验，主要包括针入度、针入度指数、软化点、10 ℃延度、135 ℃运动黏度等，试验试件制备及测试按有关规范要求进行。

（2）测力延度

测力延度试验试模采用8字模，温度为10 ℃，拉伸速率为50 mm/min，试验试件制备及测试按有关规范要求进行。

（3）显微镜测试

由于明色沥青具有较好的透光性能，在显微镜普通的灯光下放大倍数为400倍，即可观察改性剂在沥青中的分布。

2 结果与讨论

2.1 树脂用量对明色沥青力学特性影响分析

采用内掺法，变换树脂在溶剂油中的用量，并外掺6%的改性剂，制备明色沥青。基于测力延度试验，结合沥青常规指标，分析树脂用量变化对明色沥青的力学特性指标影响，试验结果见表1、2及图1。

收稿日期：2018－10－18
基金项目：陕西省工业科技攻关资助项目（编号：2015GY153）；道路结构与材料交通行业重点实验室基金资助项目（编号：310821171114）
作者简介：刘夕曦，女，本科在读.E－mail:1185447212@qq.com
*通信作者：徐鹏，男，博士研究生，高级工程师.E－mail:xupeng003@qq.com

表 1 不同树脂用量下 10 ℃测力延度试验结果

树脂用量/%	最大拉力 F_{max}/N	最大拉力对应延度 D_{max}/cm	延度 L_{max}/cm	拉伸柔量 f/(cm·N^{-1})	屈服应变能 E/(cm·N)	当量劲度 S_a/(N·m^{-1})	黏韧性面积 W/(N·m)	韧性比 $R_{T/V}$/%
40	4.00	0.25	100.00	25.00	1.00	13.00	88.28	29.90
50	31.00	0.50	100.00	3.23	15.50	60.00	600.50	15.10
60	217.00	0.35	0.35	0.00	75.95	689.00	35.93	—
70	119.00	0.15	0.15	0.00	17.85	960.00	7.08	—

表 2 树脂用量变化对沥青性能影响结果

树脂用量/%	针入度/(0.1 mm)			软化点/℃	运动黏度(135 ℃)/(mPa·s)	当量软化点 T_{800}/℃	当量脆点 $T_{1.2}$/℃	针入度指数 PI	塑性温度范围 ΔT/℃
	15 ℃	25 ℃	30 ℃						
40	70	190	265	44.8	823	41.78	−30.44	0.152	72.22
50	29	90	146	51.5	1 333	45.63	−14.90	−0.998	60.53
60	10	31	51	55.5	1 584	55.74	−5.25	−0.950	60.99
70	4	11	13	57.0	1 771	81.23	−1.35	1.070	82.57

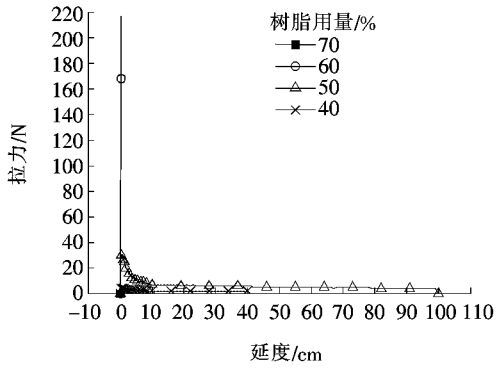

图 1 不同树脂用量下 10 ℃测力延度曲线

由表 1、图 1 可知：随着树脂用量增加，最大拉应力 F_{max}逐渐增大，当用量为 60%时，相比 40%用量时增大5 325%，当用量为 60%及以上时，拉应力未达到最大值时即发生断裂；沥青延度 L_{max}、拉伸柔量 f 随树脂用量增加先增加后降低，用量为 70%时，f 为 0；屈服应变能 E 随树脂用量增加先增加后降低，用量为 70%时相比 40%增加 7 495%，沥青拉伸需要更多的能量；基质沥青劲度模量 S_a 随树脂用量增加而逐渐增大，当树脂用量超过 60%时，基质沥青劲度模量 S_a 迅速增加，相比 40%增加7 284.62%；黏韧性面积 W 随树脂用量增加而先增大后减小，在 50%树脂用量时达到最大值，相比 40%时增加 580.22%；在 50%树脂用量时韧性比 $R_{T/V}$最小；继续增加树脂用量，已无韧性。

由表 2 可知：随着树脂用量的增加，明色沥青的针入度明显降低，最大降低到初始值的 5%左右；运动黏度增大，相比 40%时，最大提高 115%；当量脆点温度升高，低温脆性增加；当量软化点 T_{800}、软化点及黏度等高温性能指标均逐渐提高，温度敏感性增大，最大达到初始值的 703.95%。

由此可得：明色沥青的性能受树脂添加量的影响明显。溶剂油为芳烃低聚物，常温下为液态，流动性较好；而树脂常温下为固态，是芳烃和烯烃混合的低聚物，玻璃化转变温度高。两者具有较好的相容性。随着树脂掺量的增加，共混体系中刚性链增多，黏度增大，玻璃化转变温度提高，软化点增加，反映到沥青 10 ℃测力延度指标上，表现出劲度增大、柔性降低的趋势。当树脂用量增加到 50%左右时，具有最佳的黏韧性；继续增加树脂用量，体系中以树脂的刚性分子链为主，内聚力迅速提高，当树脂刚性分子链的内聚力超过改性剂中大分子链作用力时，在拉力作用下，共混体系直接断裂，表现出明显的脆性。

2.2 改性剂用量变化对明色沥青力学特性指标影响分析

选择在最佳树脂用量条件下，基于测力延度试验，结合常规性能指标，分析改性剂用量变化对明色沥青的力学性能影响，结果见表 3、4 及图 2。

由表 3、图 2 可知：随改性剂的加入，改善了树脂及溶剂油共混物的低温延展性能及柔性，最大拉应力 F_{max}略有降低，延度值 L_{max}及拉伸柔量 f 明显提高，相比未加改性剂，分别最大提高 614.29%及 687.23%；基质沥青劲度模量 S_a 明显降低，降幅接近 40%；黏韧性明显改善，黏韧性面积最大为未加改性剂的 1 430.60%；而随着改性剂用量的增加，延度值L_{max}保

表 3　不同改性剂用量下 10℃ 测力延度试验结果

改性剂用量/%	最大拉力 F_{max}/N	最大拉力对应延度 D_{max}/cm	延度 L_{max}/cm	拉伸柔量 f/(cm·N^{-1})	屈服应变能 E/(cm·N)	当量劲度 S_a/(N·m^{-1})	黏韧性面积 W/(N·m)	韧性比 $R_{T/V}$/%
0	30	0.45	14	0.47	13.5	64.02	104.9	250.84
3	29	0.50	100	3.45	14.5	45.55	184.9	68.24
6	27	0.55	100	3.70	14.85	42.23	801.8	17.60
9	27	0.55	100	3.70	14.85	42.58	1 605.6	11.14

表 4　改性剂用量变化对沥青性能影响结果

改性剂用量/%	针入度/(0.1 mm)			软化点/℃	运动黏度(135 ℃)/%	当量软化点 T_{800}/℃	当量脆点 $T_{1.2}$/℃	针入度指数 PI	塑性温度范围 ΔT/℃
	15 ℃	25 ℃	30 ℃						
0	35	118	179	37.0	170	43.16	−16.05	−1.136	59.21
3	34	115	175	37.5	537	43.29	−15.68	−1.161	58.98
6	32	93	148	51.5	1 336	46.35	−17.30	−0.679	63.64
9	18	51	90	52.5	2 500	50.17	−9.71	−1.066	59.88

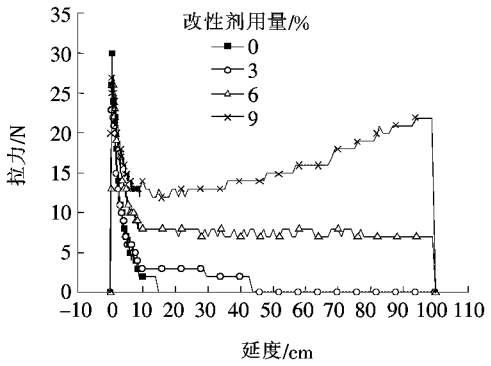

图 2　不同改性剂用量下 10 ℃ 测力延度曲线

持不变，但超过 6%改性剂后，继续增加改性剂用量，测力延度各项指标提高幅度不大。

由表 4 可知：随着改性剂用量增加，明色沥青硬度有所提高，针入度降低，最大降到未加改性剂的 50%左右，软化点迅速升高，相比未加改性剂时，增加 41.89%；黏度增大 1 370.58%，高温性能变优；当改性剂用量为 6%时，沥青的针入度指数 PI 接近零，塑性范围增大，感温性改善，当量脆点温度最低，综合高低温性能最优。

由此可得：改性剂大分子链低温下具有较好的韧性及延展性能，加入共混体系后，在共混物中起到了主导作用，改善了共混体系的柔性，使共混体系的延度明显提高，黏韧性能增强，黏弹性比明显降低。改性剂为 6%用量条件下达到最佳，继续增加改性剂用量，受改性剂自身的力学特性影响，对明色沥青共混体系的性能改善不明显。

为进一步分析改性剂对明色沥青的改善机理，结合上述试验结果，采用显微镜分析改性剂、树脂及溶剂油多相体系混合状态，结果如图 3 所示。

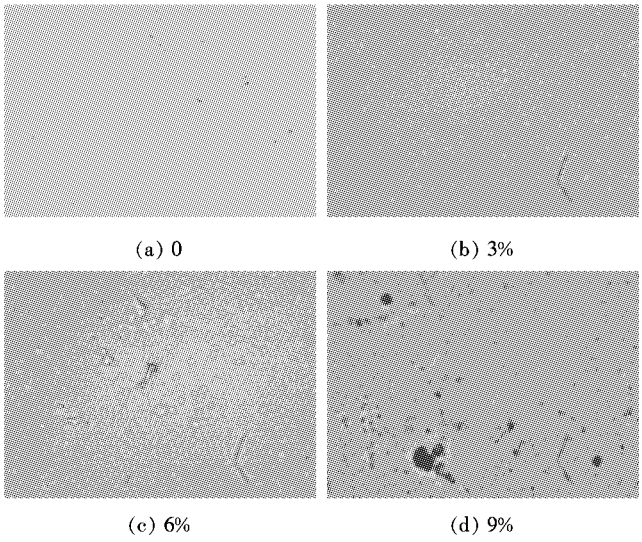

图 3　不同改性剂用量下共混物的显微镜照片

由图 3 可知：在 400 倍显微镜下未添加改性剂的树脂及溶剂油共混物分布均匀。改性剂为高聚物，加入 3%改性剂后，在溶胀、剪切作用下，在树脂及溶剂油的共混体系中成纤维状均匀分散、交联的网状结构，起到了加筋的作用。而且随着改性剂用量的提高，网状分布更加明显和清晰。

2.3　低温测力延度指标与常规低温性能指标关系分析

为进一步分析明色沥青材料组成特性以及其对明色沥青低温性能的影响，对树脂用量及改性剂用量改变

表 5 材料用量改变明色沥青常规指标变化率 %

原材料类型	用量/%	25 ℃针入度	延度 L_{max}	当量脆点 $T_{1.2}$	最大拉力 F_{max}	劲度模量 S_a	黏韧性面积 W	韧性比 $R_{T/V}$
树脂	40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	50	47.37	100.00	48.95	775.00	461.54	680.22	194.02
	60	16.32	0.35	17.25	5 425.00	5 300.00	40.70	0.00
	70	5.79	0.15	4.43	2 975.00	7 384.62	8.02	0.00
改性剂	0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	3	97.46	714.29	97.69	96.67	71.15	176.26	27.20
	6	78.81	714.29	107.79	90.00	65.96	764.35	7.02
	9	43.22	714.29	60.50	90.00	66.51	1 530.60	4.44

后，沥青测力延度指标和沥青常规指标的变化率见表 5。

由表 5 可知：在给定用量范围内，树脂掺量较大，对明色沥青的性能影响程度相比改性剂大。树脂用量增加直接提高了明色沥青的硬度，降低了针入度，增大了明色沥青拉应力以及劲度，导致明色沥青延度降低，低温性能变差；改性剂的加入改善了树脂及溶剂油共混物的低温延展性能及柔性，虽然明色沥青的针入度有所降低，但改善了黏韧性，使延度值及拉伸柔量等指标改善明显，基质沥青劲度模量 S_a 明显降低。测力延度指标相比常规性能指标，更能直观地体现明色沥青在低温变形过程中的应力、应变特性。传统的延度指标反映了明色沥青变形能力，但在同样的延度下，沥青的内部应力、应变变化差异较大。因此，测力延度相比传统的以延度评价沥青低温性能的方法更具优势。如能通过测力延度的相关指标有效控制明色沥青配方的原材料用量，对改善明色沥青的低温性能具有一定指导意义。

树脂用量范围为 40%～50%，聚烯烃改性剂用量范围为 3%～6%，路用性能良好，符合 CA50～CA90 彩色沥青结合料相关技术要求。

3 结论

(1) 树脂的加入增加了明色沥青的黏度和劲度。树脂用量由 40%增加到 60%时，最大拉应力 F_{max} 增大 5 325%，基质沥青劲度模量增大 7 284.62%，在 50%树脂用量时弹性比 $R_{T/V}$ 最小，继续增加树脂用量，韧性值为零。

(2) 改性剂的加入改善了树脂及溶剂油共混物的低温延展性能及柔性。相比未加改性剂，最大拉应力 F_{max} 略有降低，延度值 L_{max} 及拉伸柔量 f 明显提高，分别最大提高 614.29%及 687.23%；基质沥青劲度模量 S_a 明显降低，降幅接近 40%；黏韧性明显改善，黏韧性面积最大为未加改性剂的 1 430.60%；而随着改性剂用量的增加，延度值 L_{max} 保持不变，但超过 6%后，继续增加改性剂用量，测力延度各项指标提高幅度不大。

(3) 树脂用量范围为 40%～50%，聚烯烃改性剂用量范围为 3%～6%，明色沥青路用性能良好，符合 CA50～CA90 彩色沥青结合料相关技术要求。

(4) 测力延度的相关指标更能直观地体现明色沥青在低温变形过程中的应力、应变特性，相比传统的以延度评价沥青低温性能的方法更具优势。

参考文献：

[1] 徐斌.重载改性彩色 SMA 沥青路面在 BRT 公交专用道上的应用[J].上海公路，2017(2).

[2] 王际洪.彩色沥青在唐山世界园艺博览会建设中的应用[J].交通世界，2017(10).

[3] 李立寒，吕伟民.彩色路面用胶结料的研究[J].建筑材料学报，1999(3).

[4] CJJ/T 218－2014 城市道路彩色沥青混凝土路面技术规程[S].

[5] 聂忆华，胡静轩.加拿大沥青改进测力延度试验(DENT)介绍[J].中外公路，2018(3).

[6] Tang P，Mo L，Pan C，et al.Investigation of Rheological Properties of Light Colored Synthetic Asphalt Binders Containing Different Polymer Modifiers[J].Construction & Building Materials，2018，161:175－185.

[7] 岳学军.沥青测力延度仪的应用分析[J].公路交通科技：应用技术版，2007(8).

[8] JTG E20－2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[9] 周燕，张凯，陈拴发，等.改性沥青测力延度试验[J].长安大学学报：自然科学版，2012(3).

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.047

基于分形与VCA_{DRF}法的沥青混合料空隙研究

张飞[1]，于江[2]
（1.新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院，新疆 乌鲁木齐 830006；2.新疆大学 建筑工程学院）

摘要：结合二度域分形级配定向化设计与VCA_{DRF}矿料级配检验方法，研究了矿料级配组成与沥青混合料空隙率之间的关联性。研究结果表明：二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式是矿料级配分形特性与沥青混合料空隙率之间的纽带；二度域分形级配沥青混合料设计方法有利于在沥青混合料配合比设计过程中定量分析矿料级配分形特性对沥青混合料空隙率的影响。

关键词：沥青混合料；分形特性；VCA_{DRF}；空隙率

分形是沥青混合料矿料级配的本质；分形参数可定量描述矿料级配的分布状况，与沥青混合料路用性能指标具有较好的相关性，是矿料级配定向化设计的理论依据；就二度域分形级配而言，可根据沥青混合料路用性能对矿料级配的要求确定分形参数的取值，初拟矿料级配，并通过路用性能比较确定沥青混合料最佳配合比。空隙率是沥青混合料配合比试验中的关键性控制参数之一，因此空隙率研究对沥青混合料配合比合理设计至关重要，目前空隙率研究主要集中在定性描述沥青、矿料级配、成型方法等因素与空隙率之间的变化规律方面，不能定量分析油石比、矿料级配与空隙率之间的关系，致使沥青混合料配合比试验过程中根据试验结果机械性地简单调整矿料级配或增减沥青用量来达到目标空隙率，而在此过程中沥青混合料路用性能指标如何变化却无法预知。这就产生沥青混合料配合比试验中沥青混合料空隙率达到目标空隙率要求，但其路用性能却不一定满足规范要求的问题。因此，沥青混合料矿料级配定向化设计的核心问题就是在沥青混合料配合比设计过程中建立描述矿料级配与沥青混合料空隙率关联性的计算公式，实现宏观把控矿料级配、沥青对沥青混合料路用性能的影响，定量分析与控制矿料级配、沥青对沥青混合料空隙率影响的目标。VCA_{DRF}矿料级配骨架检验法在保证沥青混合料矿料级配骨架密实结构的前提下，通过调整粗集料、细集料、填料和沥青的用量控制设计空隙率。

基于此，有必要探究VCA_{DRF}矿料级配检验方法与分形矿料级配之间的关联性，进而定量描述二度域分形级配与沥青混合料空隙率之间的关系，为沥青混合料矿料级配定向化设计提供依据。

1 二度域分形级配定向设计方法与VCA_{DRF}法的简述

1.1 二度域分形级配定向设计方法

二度域分形级配定向设计是指根据工程对沥青混合料路用性能要求，在矿料级配分形参数与沥青混合

[10] 康爱红，张吴红，孙立军.改性沥青荧光显微观测样本制备方法[J].四川大学学报：工程科学版，2012(2).
[11] 李志栋，黄晓明，侯曙光，等.应用测力延度试验评价改性沥青的低温性能[J].公路交通科技，2005(5).
[12] 岳学军，黄晓明，李文龙，等.测力延度试验以及韧性比评价指标的研究[J].公路交通科技，2007(2).
[13] JTG F40－2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
[14] 丛玉凤，徐磊，黄玮，等.SBS－C9石油树脂改性沥青的研究[J].建筑材料学报，2016(3).
[15] Fuqiang Dong，Wenzhe Zhao，Yuzhen Zhang，et al. Influence of SBS and Asphalt on SBS Dispersion and the Performance of Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials，2014，62：1－7.
[16] Min Bai，Investigation of Low－Temperature Properties of Recycling of Aged SBS Modified Asphalt Binder[J]. Construction and Building Materials，2017，150：766－773.

收稿日期：2018－09－15
基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51168044）
作者简介：张飞，男，硕士.E－mail：zfxj1007@126.com