增塑剂 DOP 对 LDPE 改性沥青混合料路用性能影响研究

李志刚，李文凯
（河南交院工程技术有限公司，河南 郑州 450000）

摘要：将废旧塑料作为改性剂制备改性沥青，能降低废旧塑料环境污染，也可解决道路建筑材料需求难题。LDPE 改性沥青混合料的高温性能较好，但低温性能不足，增塑剂 DOP 能改善 LDPE 改性沥青混合料的低温性能。文中通过对 LDPE＋DOP 复合改性沥青进行室内试验，得出 LDPE 的最佳掺量为 5％～6％，DOP 的最佳掺量为 1.5％～2.5％；在 LDPE 及 DOP 最佳掺量下分别对 AC－13C 沥青混合料进行高温抗车辙、低温抗开裂及抗水损害等路用性能试验，得出 AC－13C(6％LDPE)沥青混合料的高温抗车辙能力最优、AC－13C(1.5％DOP)沥青混合料的低温抗开裂能力最优、AC－13C(2.5％DOP＋6％LDPE)沥青混合料的抗水损害能力最优。

关键词：公路；DOP 增塑剂；LDPE 改性沥青混合料；路用性能

中图分类号：U416.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－2668(2021)01－0050－04

高分子聚合物的兴起不仅对人民生活带来了巨大方便，同时产生了大量聚合物生活垃圾，其中塑料产品占比最大。这类生活垃圾存在自身降解能力弱、分解周期漫长等特点，会造成环境污染，危害人类健康。如何对这些高分子聚合物进行回收利用，已成为现阶段大家关注的焦点。现有研究表明，将塑料及橡胶等高分子聚合物通过一定工艺添加到道路石油沥青中，能改善沥青在高温及低温环境下的性能及耐久性能。掺有聚合物 LDPE 改性剂的沥青混合料虽然高温抗车辙性能较好，但低温抗开裂能力不足。而 DOP 增塑剂能对塑料产品进行增塑，改善 LDPE 改性沥青混合料的低温抗开裂能力。该文将不同掺量组合的改性剂 LDPE 及增塑剂 DOP 掺入 90# 道路石油沥青中制成改性沥青，进行高温抗车辙、低温抗开裂及抗水损害等路用性能研究，为 LDPE 改性剂及 DOP 增塑剂在沥青路面中的应用提供理论基础。

1 原材料

1.1 沥青

选用 90# A 级道路石油沥青开展研究，其主要技术指标试验结果见表 1。

表 1 90# A 级基质沥青的主要技术指标试验结果

检测项目		技术要求	检测结果
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)		80～100	91
延度(5 cm/min，15 ℃)/cm		≥100	132
软化点/℃		≥45	48.5
动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)		≥160	175
蜡含量/％		≤2.2	0.7
溶解度/％		≥99.5	99.9
针入度指数		－1.5～1.0	0.6
闪点/℃		≥245	263
密度/(g·cm^{-3})		实测值	1.029
RTFOT 后残留物	质量变化/％	±0.8	－0.42
	针入度比(25 ℃)/％	≥57	64
	残留延度(15 ℃)/cm	≥20	28

1.2 LDPE 改性剂及 DOP 增塑剂

LDPE 的主要成分为低密度聚乙烯，是常用沥青改性剂，与沥青有很好的相容性，能改善沥青路面的高温抗车辙能力。LDPE 的主要技术指标试验结果见表 2。

表 2 LDPE 改性剂的主要技术指标试验结果

检测项目	检测结果
密度/(g·cm^{-3})	0.934
外观	白色、球形颗粒
断裂伸长率/％	574
断裂拉伸强度/MPa	9.67

DOP 增塑剂能对聚合物材料起到增塑效果，增塑后材料的韧性、力学性能及抗冲击能力得到增强，黏度降低。DOP 增塑剂的主要技术指标试验结果见表 3。

表 3　DOP 增塑剂主要技术指标试验结果

检测项目	技术指标	检测结果
外观	—	透明液体
含水率/%	≤0.15	0.07
闪点/℃	≥196	204
密度/(g·cm^{-3})	0.981～0.986	0.983
加热后(100 ℃、6 h)质量损失/%	≤0.15	0.11

2　DOP 对 LDPE 改性沥青性能的影响

2.1　复合改性沥青制备

将 90# 道路石油沥青放入 165 ℃烘箱内，待沥青达到熔融状态时，将沥青放在电炉上，使沥青温度保持 165 ℃，加入所需掺量的 LDPE，用机械搅拌机以 600 r/min 的转速搅拌 25 min，然后以 5 000 r/min的转速高速剪切 15 min，得到 LDPE 改性沥青。将 LDPE 改性沥青温度降至 150 ℃，加入所需掺量的 DOP，用机械搅拌机以 600 r/min 的转速搅拌 10 min，得到 LDPE＋DOP 复合改性沥青。

2.2　老化前复合改性沥青试验

将不同 DOP、LDPE 掺量(占沥青质量)的复合改性沥青分别进行针入度、软化点、黏度、低温延度及弹性恢复试验，分析不同 DOP、LDPE 掺量对 90# 道路石油沥青技术指标的影响，试验结果见图 1～5。

由图 1 和图 4 可知：DOP 掺量相同时，随着 LDPE 掺量的增加，沥青的针入度及低温延度降低；

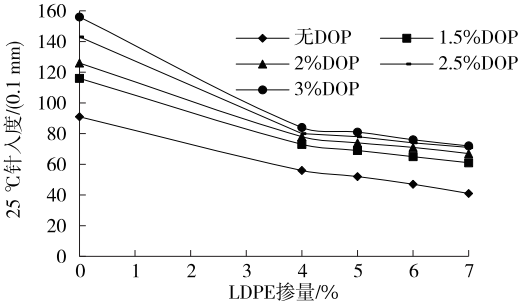

图 1　沥青针入度试验结果

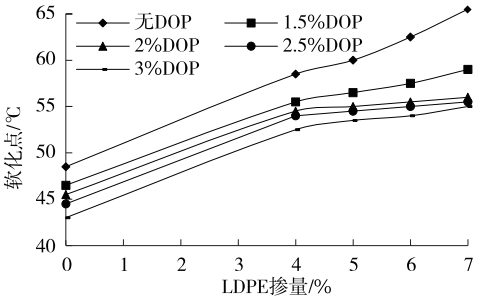

图 2　沥青软化点试验结果

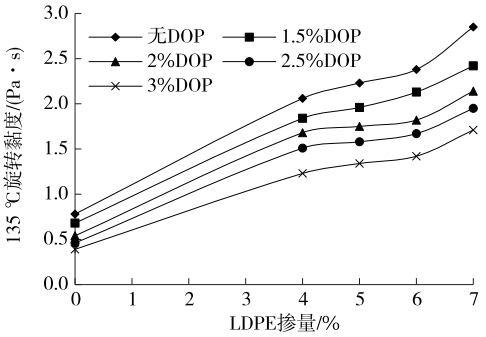

图 3　沥青旋转黏度试验结果

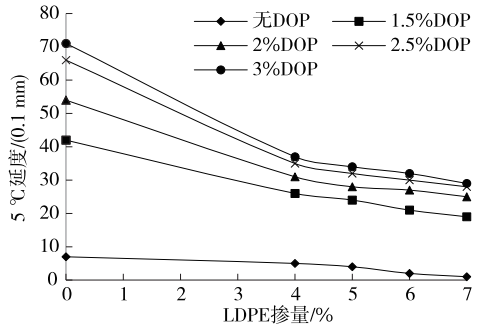

图 4　沥青低温延度试验结果

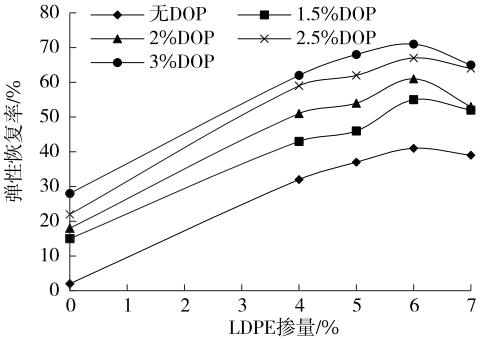

图 5　沥青弹性恢复试验结果

LDPE 掺量相同时，随着 DOP 掺量的增加，沥青的针入度及低温延度升高。

由图 2 和图 3 可知：DOP 掺量相同时，随着 LDPE 掺量的增加，沥青的软化点及黏度升高；LDPE 掺量相同时，随着 DOP 掺量的增加，沥青的软化点及黏度降低。

由图 5 可知：DOP 掺量相同时，随着 LDPE 掺量的增加，沥青的弹性恢复率先升高后降低，且均在 LDPE 掺量为 6%时达到峰值；LDPE 掺量相同时，DOP 掺量越大，沥青的弹性恢复率越高。

2.3　老化后复合改性沥青试验

沥青在长期光照、雨水、轮胎揉搓及冻融循环综合作用下会发生老化，老化后沥青路面的使用性能及车辆行驶安全性能发生退化。选用旋转薄膜加热

试验对不同 LDPE、DOP 掺量的改性沥青分别进行针入度及延度试验，试验结果见图 6、图 7。

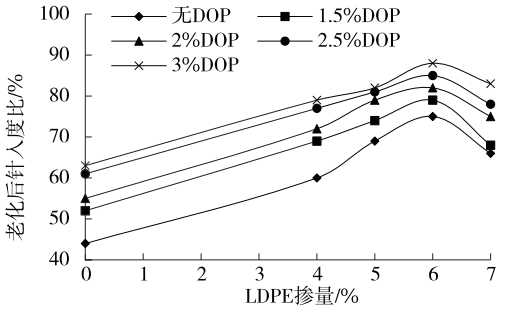

图 6 沥青老化后针入度比试验结果

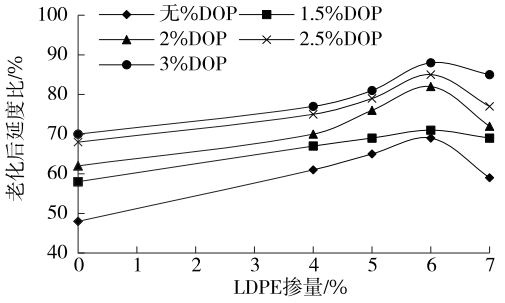

图 7 沥青老化后延度比试验结果

从图6和图7可以看出：DOP掺量相同时，随着 LDPE 掺量的增加，沥青的针入度比及延度比均呈现先升高后降低的趋势。LDPE 掺量为 5%～6%时，沥青的针入度比及延度比增幅较大；掺量超过 6%时，沥青的针入度比及延度比降低。这主要是因为 LDPE 掺量过大会导致 LDPE 分散不均匀，老化后出现结皮现象，影响试验结果。LDPE 掺量相同时，当 DOP 掺量为 1.5%～2.5%时，针入度比及延度比增幅较大；DOP 掺量超过 2.5%时，针入度比及延度比增幅降低。这主要是因为 DOP 作为油状液体能增加沥青中轻质成分含量，改善沥青的抗老化能力，但掺量过高时，改善效果趋近饱和甚至降低。综上，LDPE 的最佳掺量为 5%～6%，DOP 的最佳掺量为 1.5%～2.5%。

3 路用性能分析

3.1 矿料级配及马歇尔试验结果

选用混合料级配类型 AC－13C，粗集料为 3～5、5～10、10～15 mm 石灰岩碎石，细集料为 0～3 mm 石灰岩机制砂，填料为石灰岩磨细的矿粉。矿料级配设计见表 4，不同 LDPE、DOP 掺量时混合料最佳油石比及马歇尔试验结果见表 5。

表 4 AC－13C 矿料级配设计

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	85	68	50	38	28	20	15	8
下限	90	68	38	24	15	10	7	5	4
目标级配	94.8	74.6	54.8	39.3	25.1	17.2	11.5	9.1	5.6

表 5 AC－13C 沥青混合料的最佳油石比及马歇尔试验结果

混合料编号	混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
A	AC－13C(道路石油沥青)	4.6	2.452	4.9	15.4	68.6	9.43	2.8
B	AC－13C(1.5%DOP)	4.7	2.447	4.8	15.2	69.2	10.74	2.9
C	AC－13C(6%LDPE)	4.8	2.443	4.6	15.1	69.6	13.28	3.4
D	AC－13C(1.5%DOP＋5%LDPE)	4.8	2.445	4.7	15.1	69.9	12.17	3.1
E	AC－13C(1.5%DOP＋6%LDPE)	4.9	2.441	4.6	14.8	70.4	12.67	3.2
F	AC－13C(2.5%DOP＋6%LDPE)	4.9	2.442	4.5	14.7	70.2	12.89	3.2

3.2 高温稳定性

夏季炎热环境下，沥青路面在车辆轴载作用下极易出现车辙病害。选用车辙试验评价混合料的高温抗车辙能力，不同 LDPE、DOP 掺量时 AC－13C 混合料的动稳定度试验结果见图 8。

由图 8 可知：LDPE 能显著改善混合料的高温抗车辙能力，而 DOP 的掺入会降低混合料的高温抗车辙能力。这主要是因为 LDPE 能改善沥青的黏韧性，增强沥青与矿料之间的黏聚力，DOP 对沥青的作用效果则相反。综合考虑，AC－13C(6% LDPE)混合料的高温抗车辙能力最优。

3.3 低温抗裂性

低温环境下，沥青脆性增强，韧性降低，这是北方季节性冰冻区沥青路面裂缝产生的主要原因。当

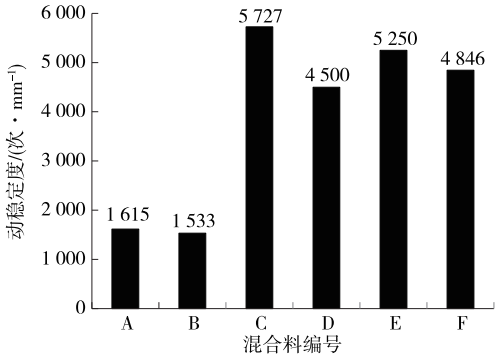

图 8　AC－13C 沥青混合料动稳定度试验结果

混合料内部产生的温缩应力大于极限容许拉应力时，沥青路面会出现裂缝，这些裂缝如果不能及时处治就会形成龟裂、坑槽等严重病害。通过小梁弯曲试验评价混合料的低温抗开裂能力，不同 LDPE、DOP 掺量时 AC－13C 混合料弯曲破坏应变试验结果见图 9。

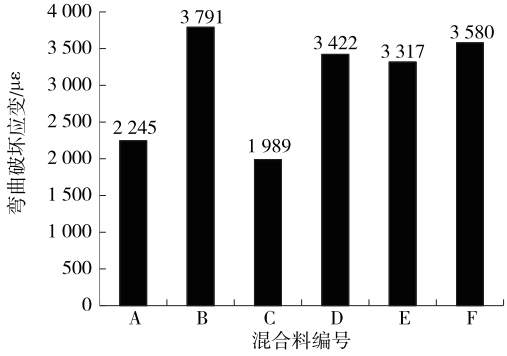

图 9　AC－13C 沥青混合料弯曲破坏应变试验结果

由图 9 可知：DOP 能显著改善混合料的低温抗开裂能力，而 LDPE 的掺入会降低混合料的低温抗开裂能力。这主要是因为 LDPE 分散到沥青中后会吸附沥青中的轻质组分，导致低温抗开裂性能削弱；而 DOP 能降低沥青组分之间的相互吸附能力，增强混合料的流变能力，改善混合料的低温抗开裂能力。综合考虑，AC－13C(1.5%DOP)混合料的低温抗开裂能力最优。

3.4　水稳定性

水损害是沥青路面破坏的主要形式之一，主要表现为松散、坑槽等病害。沥青路面在车辆轴载及雨水的共同作用下沥青与矿料之间的黏附性会降低，造成沥青胶浆从混合料孔隙中脱落。通过浸水马歇尔试验及冻融劈裂强度试验评价混合料的抗水损害能力，不同 LDPE、DOP 掺量时 AC－13C 混合料的浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂残留强度比试验结果见图 10、图 11。

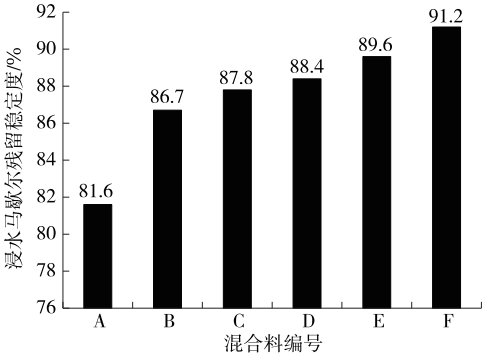

图 10　AC－13C 沥青混合料浸水马歇尔残留稳定度试验结果

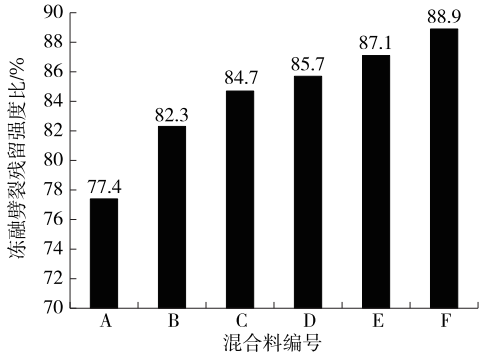

图 11　AC－13C 沥青混合料冻融劈裂残留强度比试验结果

由图 10、图 11 可知：LDPE、DOP 的掺入均能显著改善混合料的抗水损害能力，掺量越大改善效果越明显，且浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂残留强度比均满足改性沥青混合料不小于 85%、80%的要求。综合考虑，AC－13C(2.5% DOP＋6% LDPE)混合料的抗水损害能力最优。

4　结论

(1) 根据老化前、后 LDPE＋DOP 复合改性沥青的室内试验结果，LDPE 的最佳掺量为 5%～6%，DOP 的最佳掺量为 1.5%～2.5%。

(2) LDPE 能显著改善沥青混合料的高温抗车辙能力，而 DOP 的掺入会降低沥青混合料的高温抗车辙能力，AC－13C(6%LDPE)沥青混合料的高温抗车辙能力最优；DOP 能显著改善沥青混合料的低温抗开裂能力，而 LDPE 的掺入会降低沥青混合料的低温抗开裂能力，AC－13C(1.5%DOP)沥青混合料的低温抗开裂能力最优；LDPE、DOP 的掺入均能显著改善混合料的抗水损害能力，掺量越大改善效果越明显，AC－13C(2.5%DOP＋6%LDPE)沥

(下转第 58 页)

[23] LEPECH M D,LI V C.Water permeability of engineered cementitious composites[J].Cement & Concrete Composites,2009,31(10):744－753.

[24] LI V C.高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及其应用[C]//中国混凝土与水泥制品协会.中国混凝土与水泥制品协会纤维混凝土工程材料高峰论坛.北京:中国混凝土与水泥制品协会,2012:1－6.

[25] DAI X B,ZHANG P,GAO J X.Review of mechanical properties and durability of pva fiber reinforced cement based composite materials[J].Advanced Materials Research,2013,804:8－11.

[26] LEPECH M D,LI V C.Water permeability of engineered cementitious composites[J].Cement & Concrete Composites,2009,31(10):744－753.

[27] 李庆华.超高韧性水泥基复合材料的水渗透性能试验研究[J].水利学报,2012,43(1):76－84.

[28] 高栋.超高韧性水泥基复合材料渗透性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2010.

[29] LI V C,HORII H,KABELE P,et al.Repair and retrofit with engineered cementitious composites[J].Engineering Fracture Mechanics,2000,65(2):317－334.

[30] LIM Y M,WU H C,LI V C.Development of flexural composite properties and dry shrinkage behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composites at early ages[J].ACI Material Journal,1999,96(1):20～26.

[31] 赵铁军,毛新奇,张鹏.应变硬化水泥基复合材料的干燥收缩与开裂[J].东南大学学报(自然科学版),2006,36(增刊 2):269－273.

[32] 田砾,荆斌,赵铁军,等.应变硬化水泥基复合材料收缩性能的试验研究[J].建筑科学,2007,23(6):76－79.

[33] 刘志凤.超高韧性水泥基复合材料干燥收缩及约束收缩下抗裂性能研究[D].大连:大连理工大学,2009.

[34] BOSHOFF W P,VAN Zijl G P A G.Creep and creep fracture of engineered cement-based composites[J].Restoration of Buildings and Monuments,2006,12(2):133－142

[35] 徐世烺.超高韧性水泥基复合材料取代保护层混凝土梁抗锈蚀性能研究[J].土木工程学报,2011,44(5):79－85.

[36] 蔡新华.超高韧性水泥基复合材料与锈蚀钢筋粘结性能试验研究[J].中国腐蚀与防护学报,2012,32(3):228－234.

[37] 刘问.等幅疲劳荷载作用下超高韧性水泥基复合材料弯曲疲劳寿命试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(1):119－127.

[38] SUTHIWARAPIRAK P,MATSUMOTO T,KANDA T.Multiple cracking and fiber bridging characteristics of engineered cementitious composites under fatigue flexure[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2004,16(5):433－443.

[39] ZHANG J,LI V C.Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system[J].Cement & Concrete Research,2002,32(3):415－423.

收稿日期:2020－04－16

(上接第 53 页)

青混合料的抗水损害能力最优。

参考文献:

[1] 黄彬,马丽萍,许文娟.改性沥青的研究进展[J].材料导报,2010,24(1):137－141.

[2] 王波.PCL 基环保型增塑剂的研究[D].太原:太原理工大学,2013.

[3] 孔志峰.增塑剂对路用沥青性能影响研究[D].西安:长安大学,2015.

[4] 黄春蕾,杨旗.低密度聚乙烯(LDPE)对沥青黏弹性能影响[J].公路工程,2014,39(6):326－329.

[5] 许洪彬.废胶粉及再生低密度聚乙烯复合改性沥青性能研究[D].长沙:湖南大学,2015.

[6] 李小燕,李豪,关永胜,等.中国、美国和欧洲沥青评价指标及试验方法比较研究[J].中外公路,2015,35(1):248－253.

[7] 孙培,韩森,高榕,等.适用于 SBS 改性沥青针入度的测试方法研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10):2130－2137.

[8] 高晓伟,颜薇,宋珲,等.温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析[J].中外公路,2019,39(1):28－33.

[9] 申万青.增塑剂 DOA 改性沥青及混合料高低温性能研究[D].西安:长安大学,2017.

[10] 薛爱新,王洁光,王海军,等.高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J].中外公路,2019,39(3):59－63.

[11] 徐明非,郭平,李俊.蒙脱土/SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究[J].公路交通科技,2019,36(1):4－7.

收稿日期:2020－05－08