

废旧塑料改性沥青混合料动态模量研究

张倩¹, 谢来斌¹, 李彦伟², 何勇海³, 刘建³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 石家庄交通运输局, 河北 石家庄 050001;
3. 河北省交通规划设计院, 河北 石家庄 050001)

摘要: 针对目前大量废旧塑料处置问题, 尝试将其用于改性沥青混合料, 以探索其在道路工程中使用的可能性. 采用超市废旧高密度聚乙烯购物塑料袋, 将其切碎后按照 2%、5% 和 8% 的掺量制作沥青混合料试件, 采用三种试验温度在六种加载频率下进行动态模量试验, 与未掺加塑料混合料的相应指标进行对比. 试验结果显示在各个试验温度和加载频率下, 掺加塑料屑的混合料动态模量普遍提高. 掺加塑料与否对相位角指标的影响未呈现一定规律. 在各个试验温度和加载频率下, 2% 塑料掺量混合料均具有较高的动态模量和相位角.

关键词: 道路工程; 塑料改性; 动态模量试验; 沥青混合料; 相位角

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2011)05-0755-05

全球工业和人口的增长带来了大量的废旧材料, 这些废旧料大多不能在自然条件下降解, 其弃置及所带来的环境污染已经成为全球环保话题. 各国研究机构都在寻找有效再利用废旧材料的方法. 废旧塑料的处理就是各国研究的热点问题之一, 印度 Central Road Research Institute 曾尝试将废旧塑料应用于道路修筑^[1]. 在我国, 薄塑料袋作为包装袋和购物袋使用非常普遍, 大量被丢弃的废塑料袋早已引起关注, 尽管实行了限塑令, 塑料袋的实际使用量并未显著减少, 大量质量差价格低廉使用效率低的薄塑料袋作为购物袋仍然在农贸市场广泛使用, 然后作为垃圾弃置. 如果能再生利用这些废旧塑料, 不仅可以解决废旧塑料的弃置问题, 而且符合可持续发展的生态环保要求. 本研究采用废旧购物袋塑料屑对沥青混合料进行改性, 试验研究其动态模量指标, 以探索其在道路工程中使用的可行性.

1 废旧塑料沥青混合料试件的制备

采用的 Walmart 超市废旧购物塑料袋为高密度聚乙烯塑料 (High Density Polyethylene, 简称“HDPE”), 是一种结晶度高、非极性的热塑性树脂. 原态 HDPE 的外表呈乳白色, 在微薄截面呈一定程度的半透明状. 其特点是分子链上没有支链, 因此分子链排布规整, 具有较高的密度, 一般在 0.940 g/cm³ 以上. 使用切碎机将废旧塑料袋切碎成大小 2.36~4.75 mm 的碎屑, 在拌和时加入到已加热至规定温度的沥青中, 搅拌 20 s, 然后倒入拌和锅与集料拌和. 沥青 PG 分级为 58-34, 混合料拌和温度 160~167 ℃, 压实温度 147~153 ℃. 混合料级配和沥青用量见表 1, 采用旋转压实机 SGC 成型试件.

表 1 混合料级配和沥青用量
Tab. 1 Gradation and binder content of the mixture

| Sieve size/mm | 12.5 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 | Asphalt content/% |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------------|
| Passing percentage/% | 100 | 99.1 | 75.0 | 55.9 | 41.3 | 27.5 | 14.5 | 7.5 | 5.5 | 5.52 |

收稿日期: 2011-03-22 修改稿日期: 2011-09-05
基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (SJ08E208); 陕西省教育厅自然科学专项项目 (09JK560); 石家庄交通运输局科技项目
作者简介: 张倩 (1971-), 女, 陕西泾阳人, 博士, 副教授, 主要从事道路工程领域的教学和科研工作.

2 沥青混合料动态模量

作为一种黏弹性材料, 沥青混合料在连续正弦波荷载作用下的应力应变关系表现为黏弹性特征. 由于应力超前应变一个相位角, 即存在滞后现象, 使得应变分成了两个部分, 第一部分为弹性贡献, 与应变成线性关系, 第二部分为黏性贡献, 与应变速率成线性关系, 这种黏弹性特征下的应力应变关系采用复合模量(E^*)表征. 由于相位差的存在, 复合模量 E^* 是一个复数, 包括弹性模量和黏性模量两部分, 分别为 E' 、 E'' , 即 $E^* = E' + E''$, 动态模量 $|E^*|$ 就是复合模量 E^* 的绝对值, 用公式表示如下.

$$|E^*| = |\sigma(t)| / |\epsilon(t)| = \sigma / \epsilon$$

(1)

式中: $\sigma(t)$ 、 $\epsilon(t)$ 为应力和应变时间函数; σ 、 ϵ 分别为应力和应变的振幅^[2-3].

动态模量试验按照美国 AASHTO 规定的标准试验方法 AASHTO Designation: TP62-03 (Standard Method of Test For Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixture) 进行, 首先根据黏温曲线确定沥青混合料拌和与击实温度, 然后将拌和均匀的松散混合料置于 $135 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 的通风烘箱中 $4\text{ h} \pm 5\text{ min}$, 采用旋转压实仪 SGC 成型高度为 150 mm 、直径为 100 mm 的试件然后进行试验. 试验在澳大利亚 IPC 公司生产的 UTM 100 动态伺服液压材料试验机上进行, 该仪器配备温度控制范围为 $-10 \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境箱, 为确保材料处于黏弹性工作区, 试验中采用的可恢复轴向微应变范围设置于 $50 \sim 100$. 试件孔隙率 4% , 试验温度选取上考虑依托项目的中等工作温度, 采用 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $21.3\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $39.2\text{ }^\circ\text{C}$, 选取 5 个加载频率以反映行车荷载速度变化对混合料动态模量的影响, 分别为 25 Hz 、 10 Hz 、 5 Hz 、 1 Hz 、 0.5 Hz 和 0.1 Hz ^[4-6].

3 废旧塑料改性沥青混合料动态模量分析

为了对废旧塑料改性沥青混合料的动态模量试验结果进行分析, 采用相同材料和级配而未掺加改性剂的沥青混合料进行对比试验, 废旧塑料掺量采用 2% 、 5% 和 8% , 每种塑料掺量各制作三个试件进行平行试验, 同时制作不掺加塑料的原样混合料试件 3 个进行同步对比试验.

3.1 动态模量及相位角试验结果

不同废旧塑料掺量的沥青混合料动态模量和相位角测试结果分别见表 2 和表 3.

表 2 不同废旧塑料掺量的沥青混合料动态模量测试结果

Tab.2 Dynamic modulus of controlled and modified asphalt mixture

| Temperature / $^\circ\text{C}$ | Waste plastic content/ $\%$ | Dynamic modulus at different loading frequencies/ MPa | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | 25 Hz | 10 Hz | 5 Hz | 1 Hz | 0.5 Hz | 0.1 Hz |
| 4 | 0 | 15 098 | 14 049 | 13 310 | 8 032 | 7 429 | 6 889 |
| | 2 | 17 668 | 16 380 | 15 386 | 9 510 | 8 605 | 7 620 |
| | 5 | 16 423 | 15 246 | 14 401 | 8 803 | 6 996 | 5 236 |
| | 8 | 16 267 | 15 185 | 14 387 | 8 887 | 7 164 | 5 382 |
| 21.3 | 0 | 6 072 | 5 805 | 4 609 | 3 391 | 2 335 | 1 266 |
| | 2 | 8 406 | 7 781 | 6 373 | 4 822 | 3 966 | 2 494 |
| | 5 | 7 496 | 7 115 | 5 849 | 4 520 | 3 436 | 1 327 |
| | 8 | 7 873 | 7 425 | 6 118 | 4 733 | 3 623 | 2 475 |
| 39.2 | 0 | 2 316 | 1 962 | 1 836 | 1 190 | 613 | 299 |
| | 2 | 2 601 | 2 492 | 2 397 | 1 896 | 889 | 356 |
| | 5 | 2 455 | 2 290 | 2 261 | 1 811 | 942 | 452 |
| | 8 | 2 523 | 2 433 | 2 410 | 1 928 | 917 | 400 |

表 3 不同废旧塑料掺量的沥青混合料相位角测试结果

Tab. 3 Phase angle of controlled and modified asphalt mixture

| Temperature /℃ | Waste plastic content/ % | Phase angle at different loading frequencies/° | | | | | |
|-------------------|-----------------------------|--|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | 25 Hz | 10 Hz | 5 Hz | 1 Hz | 0.5 Hz | 0.1 Hz |
| 4 | 0 | 27.77 | 27.34 | 28.09 | 28.8 | 32.27 | 28.86 |
| | 2 | 26.33 | 25.92 | 26.48 | 28.27 | 32.35 | 31.96 |
| | 5 | 25.46 | 24.96 | 25.82 | 27.39 | 31.1 | 29.31 |
| | 8 | 25.14 | 24.68 | 25.45 | 27.54 | 31.37 | 30.56 |
| 21.3 | 0 | 32.62 | 28.2 | 27.31 | 23.31 | 23.29 | 20.5 |
| | 2 | 33.86 | 31.49 | 31.22 | 27.8 | 27.65 | 24.45 |
| | 5 | 33.6 | 30.32 | 29.69 | 25.94 | 25.92 | 22.48 |
| | 8 | 28.85 | 26.46 | 25.26 | 19.15 | 18.36 | 16.07 |
| 39.2 | 0 | 27.74 | 21.62 | 18.69 | 14.71 | 14.99 | 15.21 |
| | 2 | 31.41 | 25.64 | 23.79 | 18.77 | 18.55 | 17.81 |
| | 5 | 31.46 | 28.43 | 25.75 | 20.68 | 17.52 | 16.16 |
| | 8 | 30.37 | 24.26 | 20.18 | 14.39 | 13.54 | 12.16 |

3.2 动态模量试验结果分析

3.2.1 废旧塑料掺量对动态模量的影响

对 4℃、21.3℃、39.2℃未掺加塑料以及不同塑料掺量的混合料动态模量实验结果绘图见图 1~图 3。

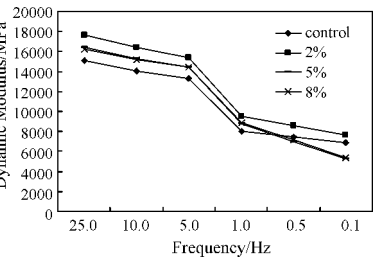


图 1 4℃动态模量试验结果对比

Fig. 1 Comparison of dynamic modulus at 4℃

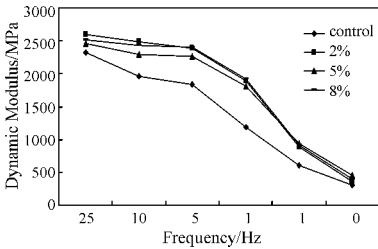


图 2 21.3℃动态模量试验结果对比

Fig. 2 Comparison of dynamic modulus at 21.3℃

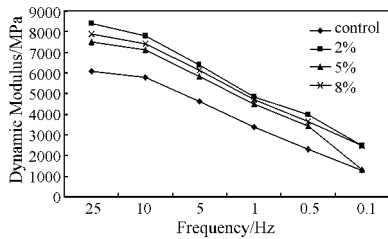


图 3 39.2℃动态模量试验结果对比

Fig. 3 Comparison of dynamic modulus at 39.2℃

3.2.2 动态模量与废旧塑料掺量的关系

图 1~图 3 具有一个共同趋势,即掺加废旧塑料屑的沥青混合料在三个试验温度下具有更高的动态模量(除 4℃时 5%、8%掺量的混合料在加载频率 0.5 Hz、0.1 Hz 外),表 4 对掺加和未掺加塑料沥青混合料动态模量增加的幅度进行了对比。从表 4 的数据可以看出,在三个试验温度下,掺加塑料屑的混合料均具有更高的动态模量,这一现象在 4℃尚不明显,随温度升高增幅越显著,增幅最为明显的是 21.3℃,塑料改性沥青混合料表现出更好的中、高温性能。分析其原因,当加载频率一定时,随着温度的升高,沥青的劲度模量下降,在承受应力作用时,混合料变形加大,骨料吸收部分能量,回弹能力降低,动态模量随之减小。掺加塑料后混合料在较高温度下能维持较高模量的原因可能在于掺加了塑料的沥青在高温下仍能维持较高的劲度,从而使混合料整体能保持较高的动态模量。

表 4 不同废旧塑料掺量的沥青混合料动态模量增幅

Tab.4 Increase rate of dynamic modulus of asphalt mixture with different plastic content

| Temperature /℃ | Plastic content/% | Dynamic modulus increase of waste modified mix compared to unmodified mix/% | | | | | | Average /% |
|-------------------|----------------------|---|-------|------|------|--------|--------|---------------|
| | | 25 Hz | 10 Hz | 5 Hz | 1 Hz | 0.5 Hz | 0.1 Hz | |
| 4 | 2 | 17.0 | 16.6 | 15.6 | 18.4 | 15.8 | 10.6 | 15.7 |
| | 5 | 8.8 | 8.5 | 8.2 | 9.6 | — 5.8 | — 24.0 | 0.9 |
| | 8 | 7.7 | 8.1 | 8.1 | 10.6 | — 3.6 | — 21.9 | 1.5 |
| 21.3 | 2 | 38.4 | 34.0 | 38.3 | 42.2 | 69.9 | 97.0 | 53.3 |
| | 5 | 23.5 | 22.6 | 26.9 | 33.3 | 47.2 | 4.8 | 26.4 |
| | 8 | 29.7 | 27.9 | 32.7 | 39.6 | 55.2 | 95.5 | 46.8 |
| 39.2 | 2 | 12.3 | 27.0 | 30.6 | 59.3 | 45.0 | 19.1 | 32.2 |
| | 5 | 6.0 | 16.7 | 23.1 | 52.2 | 53.7 | 51.2 | 33.8 |
| | 8 | 8.9 | 24.0 | 31.3 | 62.0 | 49.6 | 33.8 | 34.9 |

3.3 相位角试验结果分析

3.3.1 废旧塑料掺量对相位角的影响

相位角描述材料黏性部分和弹性部分的相对大小,由下式确定:

$$\varphi=2\pi f\Delta t$$
(2)

式中: f 为施加荷载的频率; Δt 为试验中应变滞后于应力的时间,对于完全弹性材料 $\varphi=0^\circ$,对于完全黏性材料 $\varphi=90^\circ$.材料黏性增强时相位角增加^[7-10].三种试验温度下不同塑料掺量混合料相位角对比见图 4~图 6.从图可以看出,是否掺加塑料对混合料相位角影响不明显.但对四种混合料来讲,在低温高频加载条件下,相位角较小,即混合料弹性更显著,而在中温高频时,相位角最大,温度继续升高时相位角逐渐减小.这可能是因为高频荷载作用下,低温时沥青劲度较高,混合料弹性更显著,但随温度升高,沥青胶结料逐渐变软,而矿料骨架的影响尚未体现出来,所以此时混合料黏性显著;但温度继续升高时,矿料骨架的影响逐渐加大并超过了沥青黏性的影响,因为矿料是弹性材料,所以沥青混合料的相位角减小.相应的低频阶段,相位角的变化从 4℃时的较大到 39.2℃时的减小也可以如此解释.

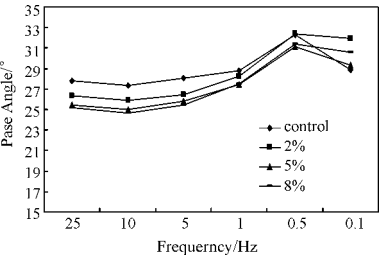


图 4 4℃相位角试验结果对比

Fig. 4 Comparison of phase angle at 4℃

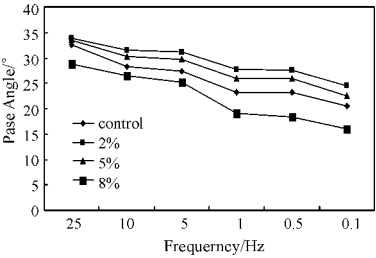


图 5 21.3℃相位角试验结果对比

Fig. 5 Comparison of phase angle at 21.3℃

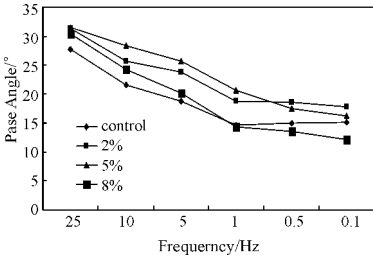


图 6 39.2℃相位角试验结果对比

Fig. 6 Comparison of phase angle at 39.2℃

4 结 论

- (1)与未掺加废旧塑料的混合料比,掺加废旧塑料的沥青混合料在高温下可以保持更高的动态模量.
- (2)塑料掺量 2%的混合料在各个试验温度和加载频率下动态模量均最大.
- (3)掺加塑料与否对沥青混合料相位角参数的影响不显著.
- (4)高频加载条件下,相位角经历由低到高再到低的变化过程,表明混合料经历弹性显著到黏性显著再到弹性显著的黏弹性材性变化过程.低频加载条件下,加载频率小于 1 Hz 时,相位角随温度从低到高经历由大到小的变化.
- (5)在各个试验温度下,2%塑料掺量混合料的相位角最大,表明其黏性较强.

参考文献 References

- [1] VASUDEVAN R, NIGAM S K, VELKENEDY R, et al. Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers[R] . Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 5-7 September 2007, Chennai, India, 105-111.
- [2] 胡霞光, 李德超, 田 莉. 沥青混合料动态模量研究进展[J] . 中外公路, 2007, 27(2): 132-136.
HU Xia-guang, LI De-chao, TIAN Li. Research Development in Asphalt Mixture Dynamic Modulus[J] . Journal of China & Foreign Highway, 2009, 26(10): 11-17.
- [3] 马 林, 张肖宁. 间接拉伸与单轴压缩模式沥青混合料动态模量比较分析[J] . 公路交通科技, 2009, 26(10): 11-17.
MA Lin, ZHANG Xiao-ning. Comparison of HMA Dynamic Moduli between Indirect Tension and Uniaxial Compression Test Modes[J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 11-17.
- [4] 李德超. 沥青混合料动态模量试验研究[J] . 公路, 2008(1): 134-140.
LI De-chao. Test and Study on Dynamic Modulus of Asphalt Mixture[J] . Highway, 2008(1): 134-140.
- [5] Shuwei Goh, Zhanping You. Properties of Asphalt Mixtures with RAP in the Mechanistic-Empirical Pavement Design of Flexible Pavements: A Preliminary Investigation[C] //Airfield and Highway Pavements, 2008: 171-177.
- [6] Shuwei Goh, Zhanping You. The Dynamic Modulus of Asphalt Mixture with Bottom Ash Aggregates[R] . GEO-CONGRESS 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation, 2008: 1008-1015.
- [7] SUDIP Bhattacharjee¹, RAJIB B Mallick, Jo Sias Daniel. Effect of Loading and Temperature on Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt Tested under MMLS[C] //Airfield and Highway Pavements, 2008: 267-278.
- [8] 马士杰, 付建村, 韦金城, 等. 大粒径透水性沥青混合料动态模量预估模型研究[J] . 公路交通科技, 2010, 27(5): 36-40.
MA Shi-jie, FU Jian-cun, WEI Jin-cheng, et al. Study on Dynamic Modulus Prediction Model of Large Stone Porous Asphalt Mixture[J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 36-40.
- [9] 闫振林, 胡霞光, 肖昭然. 沥青混合料动态模量预估模型研究[J] . 公路, 2008(1): 175-179.
YAN Zhen-lin, HU Xia-guang, XIAO Zhao-ran. Research on Dynamic Modulus Predictive Models of Bituminous Mixture[J] . Highway, 2008(1): 175-179.
- [10] DABA S Gedafa, MUSTAQUE Hossain, STEFAN Romanosch, et al. Field Verification of Superpave Dynamic Modulus[J] . Journal of Materials in Civil Engineering, 2010(5): 485-494.

Research on dynamic modulus of waste plastic modified asphalt mixture

ZHANG Qian¹, XIE Lai-bin¹, LI Yan-wei², HE Yong-hai³, LIU Jian³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shijiazhuang Transportation Bureau, Shijiazhuang 050001, China;

3. Hebei Traffic Planning & Design Institute, Shijiazhuang 050001, China)

Abstract: Waste plastic is reused in pavement engineering in this research. The purpose of the study is to probe the possibility of using waste plastic in asphalt mixture as a kind of modifier so as to find a way to solve the problem of the waste plastic disposal. High Density Polyethylene plastic bags obtained from supermarket were shredded into pieces and were added into asphalt mixture at three percentages of 2%, 5% and 8%. The corresponding control samples were also made and tested. Three different temperatures were used (4°C, 21.3°C and 39.2°C) and the frequencies ranged from 0.1 Hz to 25 Hz in this dynamic modulus test. When compared with the test results of the control samples, almost all the dynamic modulus of the plastic modified samples (except 4 results) are greater than those of the control samples. No regular pattern is shown in the test results of the phase angle. Modified asphalt mixture with 2% plastic is of the greatest dynamic modulus and phase angle.

Key words: road engineering; waste plastic modification; dynamic modulus test; asphalt mixture; phase angle