



预处理方法对聚氨酯再生沥青混合料性能的影响

吴建涛¹ 伍洋¹ 刘泉¹ 陆国阳² 尹龙^{3,4}

(¹河海大学土木与交通学院,南京 210098)

(²香港理工大学建设及环境学院,九龙 999077)

(³江苏交通控股有限公司,南京 210019)

(⁴江苏高速公路工程养护技术有限公司,淮安 223005)

摘要: 为研究聚氨酯应用于再生沥青混合料(RAM)的可行性,研究了聚氨酯再生沥青混合料(PRA)的强度和路用性能.对RAM进行抽提沥青、普通热拌、热拌+再生剂预处理后,经聚氨酯常温再生得到试件PRA-1、PRA-2和PRA-3;以大孔隙聚氨酯混合料(PPM)和开级配抗滑磨耗层(OGFC)为对照,测试PRA的劈裂强度、孔隙率、抗冻性、马歇尔稳定性和抗剥落性.结果表明:PRA-1的劈裂强度约1.8 MPa,马歇尔稳定度较大,但抗冻和抗剥落性低于OGFC,性能接近PPM;PRA-2受沥青影响,劈裂强度(约1.0 MPa)和马歇尔稳定度略低,抗冻和抗剥落性优于PRA-1,性能接近OGFC;PRA-3受沥青和再生剂影响,强度和稳定度过低,不具有使用意义.因此聚氨酯应用于RAM的可行性与预处理方法密切相关,其中抽提沥青和普通热拌处理方法具有一定应用意义,但不推荐在PRA中掺入再生剂.

关键词: 聚氨酯; RAM; 预处理; PRA; 劈裂强度; 路用性能; 可行性

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2021)03-0489-07

Effect of pretreatment methods on performance of polyurethane recycling asphalt mixture

Wu Jiantao¹ Wu Yang¹ Liu Quan¹ Lu Guoyang² Yin Long^{3,4}

(¹ College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

(² Faculty of Construction and Environment, Hong Kong Polytechnic University, Kowloon 999077, China)

(³ Jiangsu Communications Holding Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

(⁴ Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Technology Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

Abstract: To explore the feasibility of polyurethane used in recycled asphalt mixtures (RAM), the strength and road performance of polyurethane recycled asphalt (PRA) were studied. RAMs were recycled with polyurethane using three treatment methods: RAM with extracted bitumen, RAM with hot mixing treatment, and RAM with hot mixing + rejuvenator, which were named PRA-1, PRA-2, and PRA-3. They were compared with porous polyurethane mixtures (PPM) and open-graded friction course (OGFC) mixtures. Split strength, porosity, anti-freeze capacity, Marshall stability, and adhesion were measured to characterize the performance of mixtures. The results indicate that the performance of PRA-1 is close to that of PPM, which shows good Marshall stability with the split strength of 1.8 MPa. However, the anti-freeze capacity and adhesion property of PRA-1 are lower than those of OGFC. The performance of PRA-2 is close to that of OGFC. The Marshall stability and split strength (1.0 MPa) of PRA-2 are insufficient due to the asphalt, but the anti-freeze capacity and adhesion property are better than those of PRA-1. The strength and stability of PRA-3 are the worst due to asphalt and rejuvenator, which is not recommended in engineering. Therefore, the feasibility of polyurethane used in RAM is closely related to pretreatment methods. The RAM with extracted bitumen and RAM with hot mixing treatment have some application significance. However, it is not recommended to add rejuvenator to PRA.

Key words: polyurethane; recycled asphalt mixtures (RAM); pretreatment; polyurethane recycled asphalt (PRA); splitting strength; road performance; feasibility

收稿日期: 2020-11-23. 作者简介: 吴建涛(1981—),男,博士,副教授, jiantao.wu@hhu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078190)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202043).

引用本文: 吴建涛,伍洋,刘泉,等.预处理方法对聚氨酯再生沥青混合料性能的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(3):489-495. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.03.018.

据统计,全球每年废弃的沥青混合料达到数十亿吨^[1]。随着沥青、石料等资源的枯竭和全球环保意识的增强,提高道路材料利用率、寻找新的替代材料成为道路领域亟需研究和解决的问题^[2]。

为摆脱对资源的依赖,各国对道路材料的创新开展了研究^[3]。聚氨酯因良好的强度和回弹性能以及耐腐蚀和耐老化的优点^[4-5],受到广泛关注。

在聚氨酯混合料铺装层研究方面,王火明等^[6]对大孔隙聚氨酯混合料(PPM)进行了系统的成型和试验,结果表明 PPM 受温度和养护时间影响较小,并且具有较好的强度、抗变形、抗滑和抗腐蚀性能,该研究为 PPM 的路面铺设提供了重要参考。Cong 等^[7]将 PPM 与开级配抗滑磨损层(OG-FC)进行对比,发现 PPM 的稳定性和疲劳寿命有较大的提高。Lu 等^[8]的研究表明,PPM 不仅拥有优异的透水性和声学性能,而且还能延长路面的机械和功能耐久性。Chen 等^[9-10]发现 PPM 不仅防冰、除冰性能优越,在降噪和防堵塞方面也表现优异。李添帅等^[11]通过对高性能聚氨酯混合料进行测试,发现其不仅具有较好的抗压强度,在抗低温、抗永久变形和排水、降噪方面也表现优异;李汝凯等^[12]研究了粒径 3~5、5~10 以及 10~15 mm 的聚氨酯混合料强度,发现混合料粒径越小,其强度越高,最大、最小值分别为 6.0 和 4.6 MPa,相差 1.4 MPa,考虑到最小值已处于较高强度水平,因此本研究将不会重点考虑因粒径差异造成的强度影响。

上述研究表明,聚氨酯应用于大孔隙混合料具有很好的实用性和应用前景,但目前还没有学者将聚氨酯混合料技术应用于沥青混合料再生领域。一方面是因为再生沥青混合料(RAM)的特性高度依赖于区域特征和铣刨工艺;另一方面,RAM 表面被老化沥青、细砂和矿粉形成的薄弱层包裹,具有很强的变异性和不稳定性^[13]。因此,若能验证聚氨酯应用于 RAM 的可行性,可摆脱对沥青、骨料等资源的过度依赖,对实现道路领域的可持续发展具有积极作用。

本研究结合聚氨酯混合料^[6]及再生沥青混合料的成型、试验方法,对预处理后的 RAM 进行聚氨酯再生并成型马歇尔试件;将传统 PPM 和 OG-FC 作为对照,以劈裂强度为主要指标,综合冻融劈裂试验、马歇尔稳定度试验和肯塔堡飞散试验,分析聚氨酯应用于 RAM 的可行性和路用性能。

<http://journal.seu.edu.cn>

1 试验材料与预处理方法

1.1 试验材料

1.1.1 聚氨酯

试验所用聚氨酯由胶水(A)和固化剂(B)组成。胶水常温为液态,呈琥珀色;固化剂常温为液态,呈深棕色。A、B 组分按质量比 100:85 调配^[6],拌和经验表明,室温下聚氨酯 A、B 组分拌和约 20~30 min 后产生黏附性,再经过约 15 min 后开始固化。

1.1.2 再生沥青混合料

原始 RAM 取自实际工程,呈灰黑色,表面被沥青、粉尘和细砂包裹,其物理指标见表 1。原始 RAM 粒径分布较复杂、含水率较高,沥青含量偏高且出现了明显的老化。相关指标测试参考《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)^[14]和《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[15]。

表 1 原始 RAM 及 RAM 中沥青基本物理指标

原始 RAM		RAM 中沥青	
物理指标	参数值	物理指标	参数值
骨料岩性	玄武岩	沥青质量分数/%	4.97
含水率/%	5.3	25 °C 针入度/0.1 mm	41.3
堆积密度/(g·cm ⁻³)	1.65	软化点/°C	67
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.63	25 °C 延度/cm	94
针片状质量分数/%	6.72	抗拉拔强度/MPa	0.36
矿粉质量分数/%	4.83		

图 1 和表 2 分别为 RAM 的粒径分布情况及其所占比例以及沥青和矿粉含量。原始 RAM 粒径主要分布于 2.36~9.50 mm 之间,该档骨料粒径适中,沥青和矿粉含量较低。由于小于 2.36 mm 的 RAM 细颗粒含量高且松散,与聚氨酯拌和易产生结团,导致聚氨酯分布不均影响混合料性能;PPM 的强度由骨料间的嵌挤、边缘点面的接触黏结提供,而大于 9.50 mm 的 RAM 骨料粒径过大,有效接触面积过低。因此二者皆不适用于聚氨酯再生。

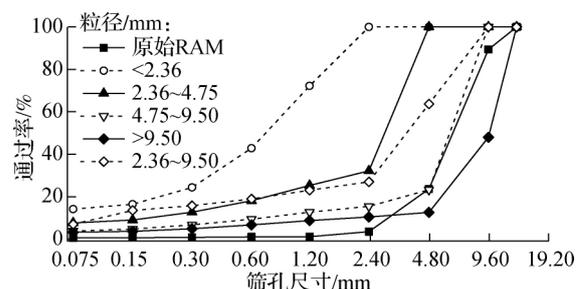


图 1 RAM 的粒径分布情况

表2 不同粒径RAM质量占比及沥青和矿粉含量

粒径范围/mm	质量占比/%	沥青质量分数/%	矿粉质量分数/%
<2.36	3.45	8.5	14.06
2.36~4.75	20.16	7.6	7.58
4.75~9.50	65.81	3.3	3.80
>9.50	10.58	2.4	3.19
2.36~9.50	85.97	5.3	6.96

参考PPM粒径设计方案^[6,12],为提高RAM的利用率并降低RAM表面薄弱层对混合料性能的影响,在考虑排水的条件下,将RAM的粒径方案确定为:将2.36~4.75 mm和4.75~9.50 mm的RAM按质量比1:3进行配比拌和。

1.1.3 再生剂

试验所用再生剂为轻质机油,常温为液态,呈黄绿色,主要化学组分包括:烷烃、芳烃、环烷烃等轻质油分;含氧、氮、硫的其他有机化合物;胶质和沥青质等非烃类化合物。

1.1.4 新集料

新集料为玄武岩,含水率(质量分数)为3.2%,骨料棱角性分明,接近立方体,用于成型PPM和OGFC;矿粉为石灰岩。PPM根据RAM粒径方案将2.36~4.75 mm和4.75~9.50 mm的新集料按质量比1:3配比拌和,混合后的骨料表观密度为2.75 g/cm³,毛体积密度为2.64 g/cm³,针片状质量分数为6.91%。OGFC的粒径设计见表3,其骨料的表观密度为2.79 g/cm³,毛体积密度为2.67 g/cm³,针片状质量分数为6.57%。

表3 OGFC粒径设计

筛孔尺寸/mm	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18
通过率/%	4.56	5.55	6.58	8.95	11.25
筛孔尺寸/mm	2.36	4.75	9.5	13.2	16
通过率/%	14.29	18.34	66.43	97.34	100

1.1.5 基质沥青

OGFC所用沥青为70#基质沥青。根据表3中OGFC级配方案,按规范^[15]中烧杯法和肯塔堡飞散试验,确定沥青掺量(质量分数,下同)为5.2%,具体参数见表4。

表4 基质沥青基本物理性质指标

项目	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	25℃延度/ cm	抗拉拔 强度/MPa
规范值	60~80	44~57	≥150	
试验值	74	53	>160	0.88

1.2 PRA的预处理与试样制作方法

1.2.1 PRA的预处理方法

为改善RAM表面状态,提出3种RAM预处理方法:抽提沥青、普通热拌和热拌+再生剂,得到

的3种聚氨酯再生沥青混合料试件分别记为PRA-1、PRA-2和PRA-3。

1) 通过抽提沥青去除RAM表面薄弱层,保证聚氨酯与骨料的黏附性能。具体流程为:将RAM按方案筛分后,用三氯乙烯浸泡,经清洗、烘干制得无沥青RAM(RA-1),再按粒径方案筛分RA-1,最后与聚氨酯拌和制得PRA-1。

2) 利用沥青在高温下软化将RAM表面粉尘、细砂吸附,改善其表面状态。具体流程为:将RAM按方案筛分,置于130℃烘箱中加热30 min(干燥、熔化沥青并防止过度加热),放入156℃拌锅拌和2 min,待冷却至室温后制得热拌RAM(RA-2),最后与聚氨酯拌和制得PRA-2。

3) 在PRA-2热拌的基础上,利用再生剂进一步改善沥青性能,加强与聚氨酯的黏结性。具体流程为:在对RAM热拌时掺入质量分数(再生剂/RAM中沥青)为5%、10%、15%、25%的轻质机油拌和2 min,使沥青充分吸收再生剂,将处理后的RAM室温闷料24 h,得到含再生剂的RAM(RA-3),最后与聚氨酯拌和制得PRA-3。

1.2.2 PRA的试样制作方法

PPM和3种PRA试样制作综合参考聚氨酯混合料试样成型、养护方法^[6]和规范^[15]中马歇尔试样制作方法。主要步骤为:将聚氨酯A、B组分按质量比100:85混合、搅拌20 min,然后倒入筛分好的集料和RAM,常温搅拌5 min;观察拌和时混合料黏性变化(防止成型时黏结力不足),待混合料出现拉丝现象后(拌和后约30 min),立即放入模具中(PRA-2和PRA-3用量约940 g,PPM和PRA-1用量约960 g),用铁棒迅速插捣50次,采用双面各击实50次的成型方法;将试件连同模具一起放置在28℃、干燥的环境中养护1 d后脱模。为避免聚氨酯混合料在拌和、成型过程中发生固化,拌料应适量。

OGFC采用规范^[15]中马歇尔试样的成型和养护方法。新集料在拌和前进行烘干处理,采用双面各击实50次的方法成型后,将试件连同模具一起置于28℃干燥环境中养护1 d。试样成型养护以及各混合料马歇尔试件如图2所示。

2 聚氨酯和再生剂的掺量确定

2.1 聚氨酯的掺量确定

根据规范^[15],利用HG-MF501微机控制电子万能试验机对马歇尔试件进行劈裂试验,确定聚氨酯掺量。由于新集料和RA-2分别与RA-1和RA-3

<http://journal.seu.edu.cn>

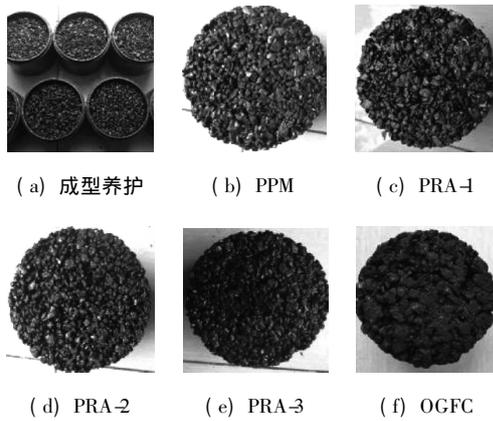


图 2 试样成型养护与各混合料马歇尔试件

具有相似的表面状态,为简化试验,对前 2 种集料成型聚氨酯掺量(质量分数,下同)分别为 4%、5%、6% 的马歇尔试样,各掺量成型 3 个平行试件。

图 3 是不同聚氨酯掺量下混合料的劈裂强度。随着聚氨酯掺量的增加,PPM 和 PRA-2 的劈裂强度均有不同程度的提高。聚氨酯掺量低于 5% 时,混合料的劈裂强度增长幅度较大,当掺量高于 5% 后增长幅度明显减小,增长作用不再明显。在 3 种聚氨酯掺量下,PRA-2 的劈裂强度都远低于 PPM,强度值也只有 PPM 的 40%~50%,可以看出,有沥青裹附的聚氨酯混合料强度性能受到了严重影响。

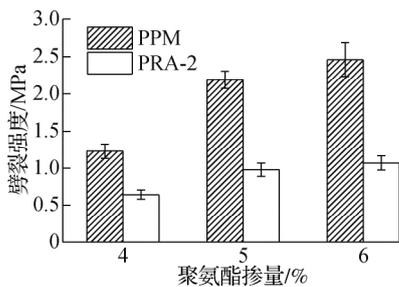


图 3 聚氨酯掺量对劈裂强度的影响

不同聚氨酯掺量下 PPM 和 PRA-2 马歇尔试件的密度及孔隙率见图 4。不同聚氨酯掺量对 PPM 和 PRA-2 试件的表观密度和毛体积密度几乎没有

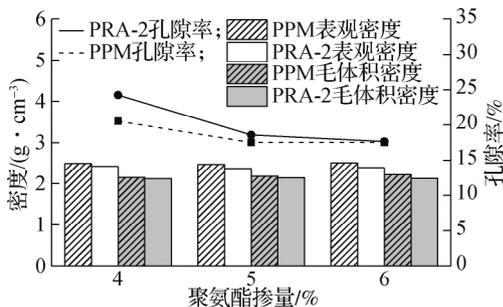


图 4 聚氨酯掺量对试件密度和孔隙率的影响

影响。2 种混合料的孔隙率均高于 17%,排水性较好,增加聚氨酯掺量会降低 2 种混合料的孔隙率,当掺量达到 5% 后,试样的孔隙率减小速率降低。

综上所述,为了既保证聚氨酯混合料的强度和排水性能,又能减少聚氨酯的使用,降低生产成本,后续试验中混合料的聚氨酯掺量确定为 5%。

2.2 再生剂的掺量确定

试验分别对回收的 RAM 沥青和 PRA-3 添加掺量为 5%、10%、15%、25% 的再生剂。根据规范^[15]中针入度试验方法测试 RAM 中沥青的软硬变化情况,再利用抗拉拔强度试验研究 RAM 中沥青再生后的黏附性变化规律。对不同再生剂掺量的 PRA-3 成型马歇尔试件,各掺量制作 3 个平行试样,并对其劈裂强度和孔隙率进行测试。

再生剂掺量对 RAM 中沥青和 PRA-3 的性能影响分别见图 5 和图 6。由图可知,随着再生剂掺量的增加,沥青逐渐软化,其抗拉拔强度先增大后减小,当掺量为 10% 时达到最大值。而 PRA-3 的劈裂强度和孔隙率随再生剂掺量的增加都在逐渐降低,当再生剂掺量仅为 5% 时,PRA-3 的劈裂强度损失率就达到了 32.65%,当掺量增加到 25% 后,其劈裂强度值仅为 0.33 MPa。造成该现象的原因:混合料制作过程中,只有部分再生剂被 RAM 表面沥青吸收,剩余再生剂被骨料吸收或残留在 RAM 沥青表面,使聚氨酯与 RAM 黏结界面被一层油膜隔开,导致混合料整体黏结性能受到严重影响。

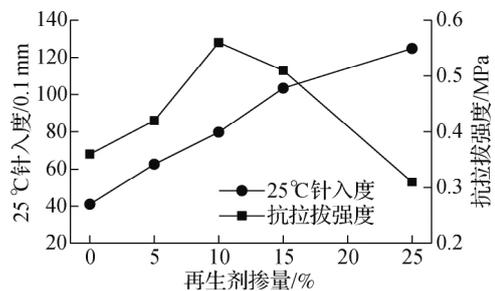


图 5 再生剂对 RAM 沥青 25 °C 针入度和抗拉拔强度的影响

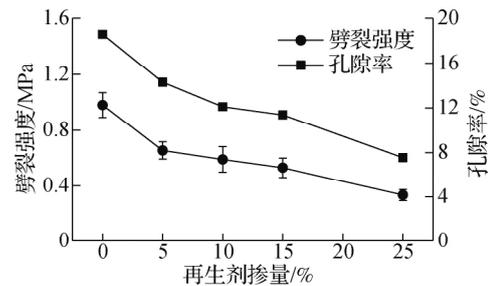


图 6 再生剂对 PRA-3 劈裂强度和孔隙率的影响

综上所述,再生剂不仅没有改善 PAR-3 的相关性能,反而降低了其劈裂强度和孔隙率。但为了

深入研究再生剂对 PRA 性能的影响机理, 后续试验中仍保留 PRA-3 试验组, 再生剂掺量设置为 5%。

3 试验方案

3.1 劈裂试验

聚氨酯、再生剂和沥青掺量经前期试验确定, 按上文所述的试样成型、养护方法, 对 PRA、PPM 和 OGFC 成型 3 个平行马歇尔试样, 养护后进行劈裂试验。取试样平均值作为劈裂强度最终值, 对比分析聚氨酯应用于 RAM 的可行性和强度指标。

3.2 路用性能试验

3.2.1 冻融循环劈裂试验

本文冻融循环劈裂试验是基于规范^[15]中的冻融劈裂试验和王火明等^[6]冻融循环的方法, 并进行了适当修改, 具体操作为: 以 $(-18 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 冰冻 12 h, $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 解冻 12 h 作为一次冻融, 由于一次冻融时间较长, 试验对 PRA-2 进行冻融 0、3、5、7 次 (每次成型 3 个试件) 的劈裂强度和强度损失试验, 根据结果确定后续试验的冻融次数。

对于 PPM、PRA-1、PRA-3 和 OGFC 试样, 设置冻融和非冻融 2 个试验组, 每个试验组成型 3 个平行试件, 在目标冻融循环次数下进行劈裂强度试验, 取 3 个平行试件的平均值为最终强度指标。

3.2.2 马歇尔稳定度试验

PPM、PRA 和 OGFC 各成型 3 个马歇尔试件, 在 $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温水槽中保温 30 ~ 40 min, 按规范^[15]进行稳定度试验, 取稳定度和流值平均值为分析指标。

3.2.3 抗剥落性试验

对 PPM、PRA 和 OGFC 设置冻融和非冻融试验组, 各组混合料成型 2 个试件, 按规范^[15]进行肯塔堡飞散试验, 取平行试样的飞散损失平均值作为分析指标。

4 结果与分析

4.1 预处理方法对 PRA 劈裂强度的影响

各混合料的劈裂强度及孔隙率见图 7。在大孔隙设计下, 不同预处理方法对 PRA 的劈裂强度影

响较大, 但对孔隙率影响有限。对比 PRA-1 和 PPM 可知, PRA-1 劈裂强度约为 1.8 MPa, 略低于 PPM, 去除沥青的骨料表面黏附性虽受一定影响, 但仍远高于其他 PRA 和 OGFC; 普通热拌预处理后, PRA-2 的劈裂强度约为 1.0 MPa, 达到了 OGFC 的水平; 添加再生剂后, PRA-3 的劈裂强度大幅降低。

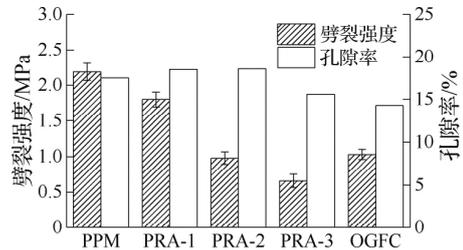


图 7 混合料劈裂强度及孔隙率

图 8 为混合料劈裂试验力与位移变化曲线, 图中 $F_1 \sim F_5$ 分别为 5 种混合料对应的最大劈裂试验力。不同预处理 PRA 的材料特性具有较大差异: PPM 和 PRA-1 的曲线呈先急速增大、后迅速降低的规律, 其最大试验力 F_1 、 F_2 大且位移小, 呈刚性; PRA-3 的曲线则非常平缓, 其最大试验力 F_4 小且位移大, 呈柔性; PRA-2 和 OGFC 的曲线介于上述四者之间, 其上升和下降阶段都较为平缓, 即 PRA-2 和 OGFC 也呈一定的柔性特征。

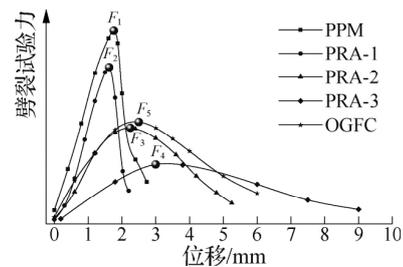


图 8 混合料劈裂试验力与位移变化曲线

PRA、PPM 和 OGFC 劈裂试验后的破裂面见图 9。不同预处理 PRA 的破坏方式如下: PPM 和 PRA-1 的破坏均表现为聚氨酯与骨料黏结面的破坏和骨料自身的折断; PRA-2 的破坏出现在聚氨酯与沥青、沥青与集料以及聚氨酯与骨料的黏结面; PRA-3 的破坏出现在聚氨酯与沥青/骨料的黏结面; OGFC 的破坏出现在沥青与骨料的黏结面。

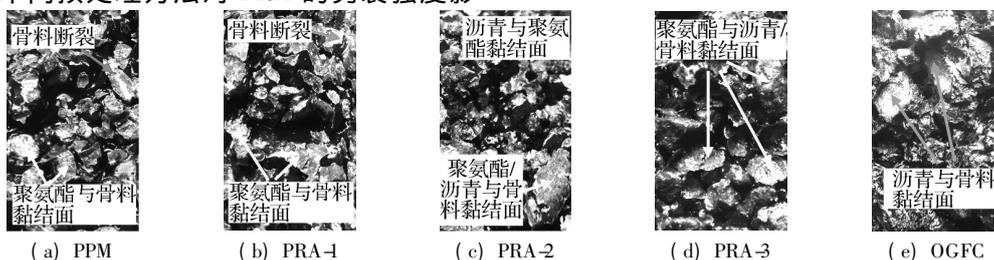


图 9 混合料劈裂试验破裂面

4.2 预处理方法对 PRA 冻融劈裂强度的影响

表 5 为不同冻融次数下 PRA-2 的劈裂强度和强度损失. 随着冻融次数的增加, PRA-2 的强度损失不断增大. 其中冻融 3 次的强度损失虽远低于冻融 5 次、7 次的结果, 但仍达到 9.36%, 考虑到每次冻融时间较长, 故后续试验冻融次数确定为 3 次.

表 5 不同冻融次数下 PRA-2 劈裂强度和强度损失

冻融次数	劈裂强度 /MPa			强度损失 /%
	试验值	平均值	标准差	
0	1.08	0.91	0.95	0
3	0.87	0.95	0.82	9.36
5	0.86	0.68	0.77	21.31
7	0.78	0.56	0.79	28.19

图 10 为冻融 3 次前后混合料的劈裂强度和强度损失. 冻融前后, 各混合料的劈裂强度大小关系并未发生改变, 但强度损失却存在较大差异. 其中 PRA-1 的冻融强度损失率虽最高, 但其冻融后的劈裂强度仍较大; PRA-2 的强度损失最低, 沥青的存在一定程度上弥补了刚性混合料抗冻性能的不足; PPM、PRA-3 和 OGFC 的强度损失则介于前两者之间, 在冻融过程中, 再生剂会削弱沥青对混合料的黏结和缓冲作用.

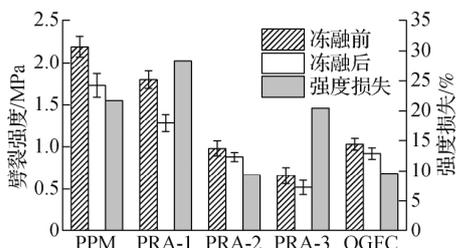


图 10 混合料 3 次冻融前后劈裂强度及强度损失

4.3 预处理方法对 PRA 马歇尔稳定度的影响

马歇尔稳定度试验能一定程度上反映沥青混合料的高温性能, 各混合料的马歇尔稳定度和流值见图 11. PPM 和 PRA-1 在高温下的稳定性和抗变形能力较好, PRA-1 的流值虽略大于 PPM, 但马歇尔稳定度较高; 再生剂破坏了聚氨酯与沥青的黏结, 导致 PRA-3 稳定性大幅降低, 抗变形也最差; PRA-2 的马歇尔稳定度介于 PRA-1 和 PRA-3 之间, 高温稳定性和抗变形能力和 OGFC 接近.

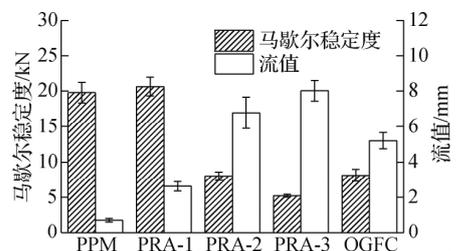


图 11 混合料马歇尔稳定度和流值

4.4 预处理方法对 PRA 肯塔堡飞散的影响

图 12 是 PRA、PPM 和 OGFC 经 3 次冻融前后的肯塔堡飞散损失. 冻融前后, PPM、PRA-2 和 OGFC 的抗剥落性能均处于同一水平, 飞散损失从 18% 左右增加到了 22% 左右; PRA-3 的飞散损失最低, 冻融前仅为 12.45%, 冻融后也只有 15.66%, 再生剂的加入提高了 PRA-3 的抗剥落性能; PRA-1 的抗剥落性能最差, 其冻融后的飞散损失更是达到了 31.5%.

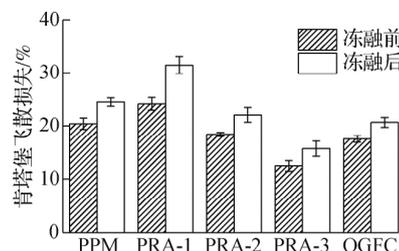


图 12 混合料肯塔堡飞散损失

4.5 PRA 的可行性分析和预处理方法选择

4.5.1 可行性分析

以 OGFC 的劈裂强度、孔隙率、(冻融) 强度损失、马歇尔稳定度和肯塔堡飞散损失作为基准值, 将 PRA、PPM 和 OGFC 对应指标与 OGFC 相除得到各性能比值并作雷达图. 为研究方便, 将强度损失替换为强度保留率, 其中强度保留率等于标准值 1 减去强度损失.

图 13 为 PRA、PPM 和 OGFC 的综合性能图, 作为基准的 OGFC 各性能比值均为 1, 性能曲线为标准五边形. PRA-1 的综合性能接近 PPM, 仅劈裂强度和强度保留率略低于后者, 两者的综合性能都优于 OGFC. 特别是在强度和稳定性方面有明显优势; 由于 PRA-1 原始强度值较高, 可忽略强度损失造成的影响. PRA-2 的综合性能接近 OGFC, 其强度保留率指标最高, 其他指标几乎和 OGFC 相同. PRA-3 的孔隙率、强度保留率和肯塔堡飞散损失接近于 OGFC, 甚至具有一定优势, 但其劈裂强度和马歇尔稳定度指标过低, 使整体性能远弱于 OGFC.

综上所述, 采用抽提沥青和普通热拌 2 种预处理

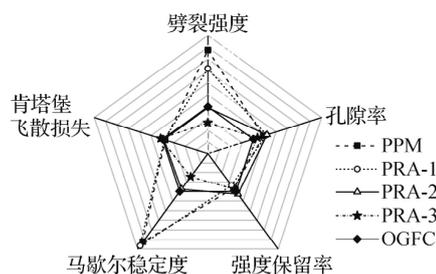


图 13 混合料综合性能图

理方法的 PRA 具有实际应用可行性,而 PRA-3 综合性能表现较差,不具有实际使用意义。

4.5.2 PRA 的用途讨论及预处理方法选择

PRA-1 性能和状态都非常接近 PPM,综合性能优秀,可以直接考虑将其应用于 PPM 的应用领域(公园、人行道等非重要排水路面)。特别是对强度、排水和稳定度有一定要求,并且能实施大规模沥青回收的路面工程。

虽然 PRA-2 综合性能接近 OGFC,但含多种胶结料的混合料在路面材料中还没有相关应用,因此建议将该预处理方法试验性地应用于公园、人行道等非重要性场景验证其可靠性,通过深入研究再拓展到排水路面领域。

对再生剂种类、再生方法的选择应该慎重,本研究不建议使用再生剂。

5 结论

1) 采用抽提沥青预处理后,回收骨料的表面状态对混合料性能存在影响,大孔隙设计下,PRA-1 呈脆性,劈裂强度约为 1.8 MPa,其抗冻性和抗剥落性一般,但高温稳定性较好,综合性能接近 PPM。

2) 采用普通热拌预处理后,PRA-2 孔隙率较大,劈裂强度约为 1.0 MPa,呈一定柔性;受沥青影响,其马歇尔稳定度一般,但沥青提高了混合料的抗冻性和抗剥落性,PRA-2 综合性能接近 OGFC。

3) 采用热拌+再生剂预处理后,再生剂使得 PRA-3 呈柔性,其劈裂强度、孔隙率、抗冻性和马歇尔稳定度都有不同程度的降低;虽然再生剂增强了 PRA 的抗剥落性,但综合性能上仍弱于 OGFC。

4) 聚氨酯应用于 RAM 的可行性与预处理方法有关,实际中建议根据工程需求和条件选择抽提沥青或普通热拌 2 种预处理,不建议使用以轻质油为主的再生剂对 RAM 进行处理。

参考文献 (References)

[1] Hong F, Prozzi J A. Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2018, **19**(8): 1816-1831. DOI: 10.1080/14680629.2017.1348306.

[2] Wu H J, Zhang X Y. The analysis of recovery asphalt performance in recycled asphalt mixture [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **361**: 1598-1603. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.361-363.1598.

[3] Varma S, Jamrah A, Kutay M E, et al. A framework based on engineering performance and sustainability to assess the use of new and recycled materials in pavements [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, **20**(8): 1844-1863. DOI: 10.1080/14680629.2018.1474789.

[4] 洪斌,陆国阳,高峻凌,等. 路用聚氨酯胶结料的抗紫外老化性能[J]. *中国公路学报*, 2020, **33**(10): 240-253. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.018.

Hong B, Lu G Y, Gao J L, et al. Anti-ultraviolet aging performance of polyurethane binders used in roads [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, **33**(10): 240-253. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.018. (in Chinese)

[5] Hong B, Xian G J, Li H. Effects of water or alkali solution immersion on the water uptake and physico-mechanical properties of polyurethane [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2018, **58**(12): 2276-2287. DOI: 10.1002/pen.24848.

[6] 王火明,李汝凯,王秀,等. 多孔聚氨酯碎石混合料强度及路用性能[J]. *中国公路学报*, 2014, **27**(10): 24-31. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.10.004.

Wang H M, Li R K, Wang X, et al. Strength and road performance for porous polyurethane mixture [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, **27**(10): 24-31. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.10.004. (in Chinese)

[7] Cong L, Wang T J, Tan L, et al. Laboratory evaluation on performance of porous polyurethane mixtures and OGFC [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **169**: 436-442. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.145.

[8] Lu G Y, Renken L, Li T S, et al. Experimental study on the polyurethane-bound pervious mixtures in the application of permeable pavements [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, **202**: 838-850. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.051.

[9] Chen J, Ma X, Wang H, et al. Experimental study on anti-icing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **161**: 598-605. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.170.

[10] Chen J, Yin X J, Wang H, et al. Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **188**: 12-19. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.297.

[11] 李添帅,陆国阳,王大为,等. 高性能聚氨酯透水混合料关键性能研究[J]. *中国公路学报*, 2019, **32**(4): 158-169. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.013.

Li T S, Lu G Y, Wang D W, et al. Key properties of high-performance polyurethane bounded pervious mixture [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32**(4): 158-169. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.013. (in Chinese)

[12] 李汝凯,王火明,周刚. 多孔聚氨酯碎石混合料强度及影响因素试验研究[J]. *中外公路*, 2015, **35**(1): 244-247. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.01.054.

[13] Obaid A, Nazzal M D, Abu Qtaish L, et al. Effect of RAP source on cracking resistance of asphalt mixtures with high RAP contents [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, **31**(10): 04019213. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002817.

[14] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程: JTG E 42—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[15] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E 20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.