

# 乳化沥青温再生的再生沥青结合料常规性能研究

曹安贞<sup>1, 2</sup>, 徐海峰<sup>1, 2</sup>, 尹利洋<sup>1</sup>, 宋晓庆<sup>1</sup>, 尹茂群<sup>3</sup>

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250001; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102;  
3. 菏泽市建设工程质量检测中心, 山东 菏泽 274000)

**摘要:** 乳化沥青替代传统的热溶沥青的温拌再生技术可以将回收旧沥青路面材料的拌和温度降低到 120℃左右, 有效缓解了厂拌热再生高污染、高耗能以及低掺量的问题。针对利用乳化沥青再生的方式, 通过自制的老化沥青设计不同乳化沥青添加比例的再生沥青结合料并进行常规试验分析。研究结果表明: 随着乳化沥青掺加量的提高, 再生沥青结合料的针入度、延度等都逐步趋向恢复基质沥青的技术指标; 135℃表观黏度也逐渐下降, 沥青的感温性以及施工和易性都得到了改善。

**关键词:** 乳化沥青; 再生沥青结合料; 常规性能; 感温性

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0129-03

## 引言

我国目前回收沥青路面材料 (Recycled Asphalt Pavement, RAP) 数量已经增长到惊人的程度, RAP 不仅需要场地进行掩埋或者废弃处理, 在造成环境污染、浪费土地和大量有价值资源的同时, 还需要投入资金对环境污染进行治理, 这与我国现行的可持续发展的战略方针相悖<sup>[1]</sup>。因此, 再生沥青结合料及其混合料技术的研究, 以及相关设备的研发对降低成本、保护生态环境、助力“碳中和, 碳达峰”都具有极其重要的意义。

国内现在正在使用的再生方法也多种多样, 主流以热再生 (厂拌、就地) 与冷再生 (厂拌、就地) 为主。厂拌热再生虽然效果更好, 但 RAP 掺量较低, 在实体工程应用中一般为 20%~30%<sup>[2]</sup>; 就地热再生实现了就地 RAP100%再生利用, 但只能做路面表层修复, 大约在 2.5~6cm 左右, 设备成本较高污染较重; 冷再生技术有较高的废旧材料利用率, 厂拌冷再生一般在 85%~90%<sup>[3]</sup>, 就地冷再生接近 100%, 环保性能显著, 但对 RAP 中沥青资源回收利用低, 且结构强度较小适用层位较低, 不适用于沥青路面上面层, 且易出现结构层不密实及纵向裂缝两类问题<sup>[4]</sup>。

针对以上再生方式存在的问题, 选用乳化沥青的温拌再生技术可以将 RAP 的拌和温度降低到 120℃左右<sup>[5]</sup>, 有效缓解了厂拌热再生高污染、高耗能、低掺量以及高温引起的沥青二次老化的问题, 在提高 RAP 的回收利用率的同时, 保证一定的路面结构强度, 这点明显区别于冷再生 RAP 高回收利用率但再生的混合料结构强度较小的问题。传统的沥青再生技术, 如恢复旧沥青针入度、混合料体积指标 ( $V_v$ 、VMA、VFA) 等方法, 以及添加再生剂、温拌剂的方法。本设计主要考察乳化沥青添加量对再生沥青结合料性能影响的变化趋势, 不考虑添加温拌剂等, 研究再生沥青结合料的常规性能指标, 包括有三大指标与布氏黏度等。

## 一、试验设计

### 1. 试验方案

实际工程中, 路面铣刨难以对路面结构层实现精准的分层回收, 造成回收沥青路面材料成分复杂, 且常规抽提试验过程中又会对旧沥青造成老化以及三氯乙烯蒸馏不完全, 致使回收提取的旧沥青性质不稳定, 对试验结果与性能研究产生干扰, 因此本研究采用人工制备的老化沥青, 以避免材料不稳定造成的影响<sup>[6]</sup>。为模拟拌和、施工与路面混合料使用过程的老化, 参照 JTG E20-2011 试验规程<sup>[7]</sup>, 将普通 70# 基质沥青经过 RTFOT+PAV 试验制得老化沥青。新沥青选用普通的未改性的乳化沥青, 依据乳化沥青再生设计理念选择不再添加再生剂等外加剂。70#基质沥青、人工制备的老化沥青与乳化沥青蒸发残留物的性能试验结果见表 1。

表 1 各类型沥青的三大指标

Asphalt type	Penetration (25℃, 100g, 0.1mm)	Softening point (℃)	Ductility (10℃) (cm)
	70# asphalt	67.0	47.5
Aged asphalt	27.0	56.0	4.6
Emulsified asphalt evaporation residue	67.0	48.0	31.7

本设计再生的沥青, 按照乳化沥青与老化沥青的质量比为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 这 7 个比例配置, 其中老化沥青质量固定为 400 g, 对应的乳化沥青质量为 120、160、200、240、280、320、360 g。

### 2. 性能测试

制备试样样品, 参照 T0651-1993 试验法, 缓慢将乳化沥青添加到熔融状态的老化沥青中, 在电加热炉上火温搅拌熬制各设计比例的乳化沥青与老化沥青的蒸发残留物, 过程中注意加热温度, 避免温度过高导致沥青老化引起的试验误差。制备完成后浇入针入度、软化点、延度与布氏黏度模具中, 分别按照规定进行养生后检测。

收稿日期: 2022-03-06

作者简介: 曹安贞, 山东建筑大学 交通工程学院; 山东省交通科学研究院。

沥青三大指标是沥青的基本性质指标，是反应沥青性能最基本的评价方式，针入度评价沥青的粘滞性，同时也是我国沥青分级的指标；软化点评价沥青的高温性能，延度测定沥青的塑性，作为评价沥青的低温指标。

布氏黏度试验测定的是沥青的表观黏度，反映了沥青的流动性以及对集料的裹覆性，利用布氏黏度试验建立的黏温曲线可以确定沥青混合料的拌和与压实温度区间，设计选用老化沥青以及质量比为 0.3、0.6、0.9 的再生沥青结合料，参照 T 0651-2011，选用 27# 转子，转速为 20 r/min，测定 120 °C、135 °C 以及 155 °C 温度下的表观黏度，对试验结果进行对比分析。

二、结果与分析

再生沥青结合料三大指标试验结果如表 2 所示。

表 2 再生沥青结合料三大指标

Mass ratio	Penetration (25°C, 100g,	Softening point	Ductility (10 °C)
	0.1mm)	(°C)	(cm)
0.3	27.0	56.0	4.6
0.4	31.0	54.3	5.5
0.5	34.0	54.0	6.0
0.6	34.3	53.9	6.8
0.7	34.6	53.4	6.3
0.8	38.1	53.3	6.9
0.9	38.9	52.9	7.5

图 1 (a) 为再生沥青结合料 25°C 针入度随乳化沥青添加量的变化趋势。可以看到再生沥青结合料针入度随着乳化沥青的提高而呈线性增加的趋势，且拟合相关系数较高。图 1 (b)、(c) 分别为再生沥青结合料随乳化沥青添加量软化点、延度的变化趋势，软化点随着乳化沥青添加量的提高而呈线性降低，延度随着乳化沥青添加量的提高而呈线性增加，拟合相关系数都较高。从组成成分上来分析，乳化沥青具有比老化沥青更高比例的轻组分，沥青质含量较少，乳化沥青的加入降低了沥青质的相对含量，改变沥青中组分比例，从而致使沥青恢复一定的路用性能。部分数据不符合线性增加或低级的趋势，且问题数据主要发生在乳化沥青添加比例较高的设计方案中，这可能是制备再生沥青结合料过程中，乳化沥青越多水分越多蒸发残留物的加热时间越长，越易老化，导致沥青变硬变脆，具体表现为针入度偏小、软化点偏大以及延度偏小。

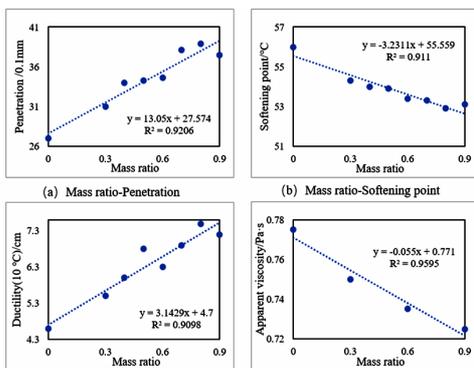


图 1 不同质量比的再生沥青结合料的常规性能

四种再生沥青结合料的布氏黏度试验结果见表 3，对结果根据公式进行线性拟合，拟合公式如下表示。

$$\lg \lg (\eta \times 1000) = n - m \times \lg (t + 273.13)$$

式中：η 布氏黏度，Pa·s；t 试验温度，°C；m 为斜率；n 为截距。

图 1 (d) 为不同质量比下的 135°C 表观黏度，由图可以看出，随乳化沥青添加量的增加黏度逐渐降低，说明乳化沥青具有一定的降黏作用，可以降低一定的拌和与施工温度。依据线性回归方程与规范规定的拌和温度、压实温度的黏度区间求出拌和温度与压实温度上下限。线性拟合方程、拌和与压实温度上下限计算结果见表 4，并以此绘制黏温曲线，见图 4。由表 4、图 4 可知，四种沥青的表观黏度均与温度呈现出良好的线性关系，相关系数 (R<sup>2</sup>) 均大于 0.99，再生沥青结合料随乳化沥青添加量的增加拟合方程系数 k 的绝对值有减小的趋势，表征随着乳化沥青含量的增加，再生沥青结合料的感温性逐渐降低，受温度变化的影响变小；且计算出随着乳化沥青的添加，再生沥青结合料的拌和温度与压实温度的上下限逐渐降低，施工和异性得到改善。

表 3 表观黏度

Asphalt type	Apparent viscosity/ (Pa·s)		
	120°C	135°C	155°C
Aged Asphalt	1.7500	0.7750	0.3000
Recycled asphalt with a mass ratio of 0.3	1.6370	0.7125	0.3125
Recycled asphalt with a mass ratio of 0.6	1.6000	0.7150	0.3250
Recycled asphalt with a mass ratio of 0.9	1.5120	0.7250	0.3215

表 4 线性拟合、拌和与压实温度计算结果

Asphalt type	linear relationship	R <sup>2</sup>	Mixing temperature/(°C)		Compaction temperature/(°C)	
			upper limit	lower limit	upper limit	lower limit
			Aged asphalt	$y = -3.0416x + 8.4024$	1	175.1
Recycled asphalt with a mass ratio of 0.3	$y = -3.0401x + 8.3969$	0.9997	174.5	167.8	160.5	155.0
Recycled asphalt with a mass ratio of 0.6	$y = -3.0190x + 8.3389$	1	173.8	167.1	159.7	154.2
Recycled asphalt with a mass ratio of 0.9	$y = -3.0218x + 8.3438$	0.9990	173.0	166.2	158.9	153.4

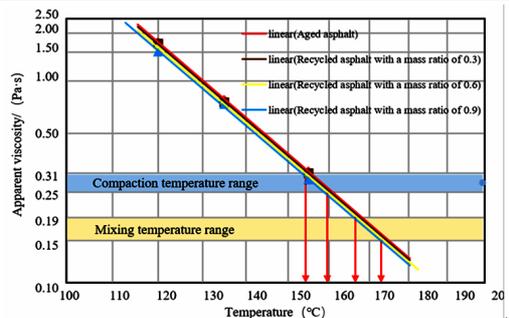


图 2 黏温曲线

(下转第 147 页)

通过静力分析结果可知, 锥面网壳结构可看作由环向折线构成的单向传力结构, 环向肋的内力数值明显大于拱向肋, 且地震内力系数均较大, 但动静内力之和整体偏小, 不会控制设计, 在汇总时只考虑每根环向肋的控制截面。MLX 动内力系数分布规律见图 6 所示: 在不同方向地震作用下, 随着环向肋不断靠近屋顶, 轴力内力系数不断增大, 而靠近边梁和屋顶处的值较大, 密肋板跨中的环向肋值相对较小; 水平地震作用时, 虽内力系数较大, 但内力数值较小, 在设计时可忽略不计。

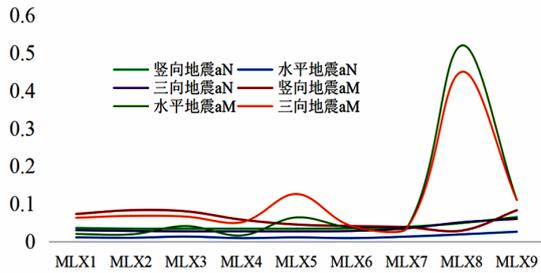


图 6 MLX 动内力系数分布规律图

由上综合分析可推断出, 该网壳结构水平方向跨度大, 竖向刚度小, 易受竖向地震破坏的影响, 且三向地震的影响较大, 在进行抗震设计分析时, 应重点考虑其对结构的影响。

#### 四、结论

通过对混凝土折板式密肋锥面网壳结构的地震响应分析得出以下结论:

- (1) 频谱分布均较为密集且随振型阶数的增大有明显的跳跃性, 因结构具有多条对称轴的缘故, 对称性且成对出现的振型较多。
- (2) 结构主要以竖向振动为主, 振型主要表现在边梁附近密肋折板的竖向振动, 并且振动区域不断向边梁处移动。
- (3) 本结构受竖向地震和三向地震作用影响较大, 在做

抗震设计时, 应重点考虑其对结构的影响。

#### 文献参考

- [1] 薛素铎, 张毅刚, 曹资等. 中国空间结构十年抗震研究的发展和展望[J]. 工业建筑, 2013, 43(6): 105.
- [2] 冯远, 夏循, 曹资等. 常州体育馆索承单层网壳屋盖结构抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(9): 41-44.
- [3] 薛素铎, 曹资, 王健宁. 双层柱面网壳弹塑性震性能[J]. 工业建筑, 2003, (2): 59-61+82.
- [4] 潘文臣. 钢管混凝土网壳的地震反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [5] 张华刚, 张钰, 吴琴等. 新型混凝土壳体结构的研究概况及工程实践[J]. 空间结构, 2019, 25(3): 3-12+21.
- [6] 张华刚, 杨期柱, 马克俭等. 人字形密肋式折板拱壳的静力性能分析及其工程应用[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 29-35.
- [7] 宋勇, 张华刚, 姜岚等. 人字形密肋式折板壳结构地震响应分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(6): 98-104.
- [8] 杨水艳. 混凝土密肋锥面网壳的力学性能分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [9] 杨水艳, 张华刚, 龚琨. 正交网格混凝土密肋式锥面网壳的静力性能分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版): 1-7.
- [10] 杨水艳, 张华刚, 马克俭. 混凝土密肋式锥面网壳的动力特性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 97-103.
- [11] 杨水艳, 张华刚, 王坤平等. 混凝土锥面密肋网壳与下部结构共同工作动力特性分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(1): 140-142.
- [12] 曹资, 张毅刚. 单层球面网壳地震反应特征分析[J]. 建筑结构, 1998, (8): 3-5.

(上接第 130 页)

#### 三、结论

乳化沥青温再生方式具有一定的可行性, 乳化沥青的加入可逐步恢复再生沥青结合料的针入度、延度等, 随掺量的提高性能呈线性趋势接近原沥青的性能指标。但要恢复老化沥青的性能, 使再生沥青结合料混合料达到路用效果标准, 单纯的乳化沥青不能保证, 可采用一些改性乳化沥青或其他外掺剂等。

乳化沥青的加入改善了再生沥青结合料的感温性, 随着添加量的提高再生沥青结合料的感温性能改善效果逐渐增加, 135℃表观黏度逐渐降低, 且由计算可知随着掺量的增加拌和与压实温度上下限逐渐降低, 利用乳化沥青再生的混合料施工和易性比老化沥青得到明显的改善。其它如流变性、路用性能等方面需要继续研究验证。

#### 参考文献

- [1] 李泉, 韩庆奎, 张继森等. 高废旧料掺量厂拌热再生技术性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(06): 301-304.
- [2] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 72-88.
- [3] 张攀, 栾雨澄. 老旧沥青路面再生技术的应用[J]. 中国公路, 2021, (13): 99-100.
- [4] 万超, 俞鹏飞. 高速公路乳化沥青厂拌冷再生技术实施效果评价及应用经验总结[C]//. 中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集. [出版者不详], 2021: 274-278.
- [5] 周银宝. 乳化沥青温拌全再生研究与经济性分析[J]. 工程与建设, 2018, 32(2): 255-257+262.
- [6] 王维营. 大比例温拌再生沥青及混合料性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [7] JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].