

USP 再生沥青混合料路用性能研究

张爽¹ 赵美玲² 陆亚¹

1.重庆工程学院 重庆 400056

2.交通运输部公路科学研究院 北京 100088

【摘要】：利用自主研发的 USP 低温再生沥青改性剂，按照沥青质量的 5.0% 外掺加入新沥青中，并与新集料、废旧沥青混合料混合形成再生沥青混合料。研究此种低温再生沥青改性剂对再生沥青混合料路用性能的影响。通过研究发现 USP 低温再生沥青改性剂使得沥青的针入度、延度增大，软化点及黏度降低。通过马歇尔设计方法确定 USP 再生沥青混合料（AC-16）的最佳油石比为 4.4%。研究表明，USP 再生沥青改性剂的掺入提升了再生沥青混合料的高温性能、低温性能和水稳定性，同时还可降低施工温度 30℃ 以上，当废旧沥青混合料的掺量为 70% 时，USP 再生沥青混合料亦能满足现行规范要求。

【关键词】：低温；再生；沥青混合料；路用性能

引言

截至 2021 年，中国公路已经过长达 30 年的高速发展时期，我国公路建设事业正在从新建阶段逐步向改扩建及翻新修补阶段过渡，这种阶段性的转变使得每年会产生数以千万吨的废旧沥青混合料的堆放、处置，造成了占地及环境问题，这种固废材料的再生资源利用问题凸显。因此在改扩建过程中如何合理地处置这些废料则是道路工作者研究的重要课题^[1-3]。废旧沥青混合料是大宗固废的其中一种，且有极大的再生利用的价值。沥青虽然老化但仍存在大量的沥青质与胶质，而集料的稳定特性决定了沥青混合料的集料仍具有利用价值。因此，目前常用的处置废旧沥青混合料的方式为再生利用，按照原理及工艺的区别，再生技术具体可以分为冷再生和热再生：（1）冷再生^[4-5]即将废旧沥青混合料进行适当处理后作为基层处理，可以通过掺入适量的水泥，使得用于路面基层的再生废旧沥青混合料仍拥有足够的强度；

（2）热再生^[6-7]则是将新旧集料按照适当比例搭配为新的级配，再和沥青混合成为热拌沥青混合料。由于再生处理的手段方法不同，对环境带来的影响也不同。热再生处理还属于热拌混合料范畴所以难免会对道路环境造成较大的污染，温度比热拌沥青更高，拌和施工时烟气排放问题显著，产出很多有毒气体，对环境污染严重，同时危害施工人员的健康，造成大气和粉尘污染，且燃料资源消耗巨大，释放更多的二氧化碳，与目前的双碳目标相违背；而冷再生技术虽然很少存在上述问题但是由于再生后沥青混合料的材料性能相对较差，因此很难直接应用于路面的铺筑^[8]。在前述研究中已经表明，自主研发的 USP 低温再生沥青改性剂能在有效降低沥青混合料拌和、摊铺、碾压等施工温度，同时对沥青混合料的路用性能有不同程度提升，从而大幅提升废旧沥青混合料的掺入比例。由于能够对沥青混合料施工阶段的各项温度进行降低，从而达到了减轻能源消耗及环境污染、减少二氧化碳排放的目的。这种 USP 低温再生沥青改性剂可应用于废

旧沥青混合料的再生应用从而达到路面循环可持续发展的理念要求。

基于处置废旧沥青混合料、减小热再生污染及能耗和提高 RAP 沥青混合料性能的目的，现将 USP 低温再生沥青改性剂应用于热再生沥青混合料应用研究中。为了研究 USP 低温再生沥青改性剂对再生沥青混合料路用性能的影响，本文首先分析了 USP 低温再生沥青改性剂对沥青性能的影响，确定了 USP 低温改性沥青的拌和及摊铺碾压温度，通过马歇尔设计方法对再生沥青混合料的级配进行了设计，确定了最佳沥青掺量油石比，最后通过对比说明了 USP 低温再生沥青改性剂对含不同比例废旧沥青混合料的再生沥青混合料路用性能的影响。

1 USP 低温再生沥青改性剂掺量对沥青性能的影响

1.1 USP 低温改性剂掺量对沥青的三大指标

本研究中使用的再生剂为实验室自主开发的 USP 低温再生沥青改性剂，主要由橡胶、树脂、有机助剂等配比而成，可以有效地降低沥青的各项施工温度，从而达到低温施工的目的。研究中选用的新基质沥青为克拉玛依为 90#A 级沥青。根据研究，将自主研发的 USP 低温再生沥青改性剂按照基质沥青质量分数的 4.5%、5.0%、5.5% 分别加入三个基质沥青中得到 USP 低温改性沥青（USPM），并与未添加再生剂的基质沥青进行对比。4 种不同再生剂掺量的沥青基本性能指标见表 1.1。

表 1.1 各组沥青基本性能指标试验结果

实验组 /%	25℃ 针入度 (0.1mm)	5℃ 延度 (cm)	软化点 (℃)	120℃ 布氏旋转粘度 (mPa·s)
0	83.0	15.2	44.4	567
4.5	93.5	30.4	42.4	0.456
5.0	>100	46.7	40.7	0.438

5.5	>100	50.3	38.1	0.404
-----	------	------	------	-------

(注：上接表 1.1)

可以看出，USP 低温再生沥青改性剂的掺入使得 90# 沥青的针入度和延度明显增大，软化点减小，沥青组分发生了明显改变，当掺入的 USP 低温再生沥青改性剂越多，沥青质地表现地越软，此时 USP 低温再生沥青改性剂在低温下呈软质状，流动性能相对较好，具备了低温施工的可行性。对比发现，当 USP 低温再生沥青改性剂掺量过高时，对 90# 沥青性能改变幅度减缓，因而基于再生效果及经济因素综合考虑可将 USP 低温再生沥青改性剂掺量设置为 5.0%。根据油石比与沥青混合料密度公式：每吨沥青混合料中内含约 2 公斤 USP 低温再生沥青改性剂。

1.2 USP 低温再生沥青改性剂掺量对沥青黏度的影响

表 1.2 USP 低温再生沥青改性剂掺量对沥青黏度影响

掺入比例/%	试验温度/℃			
	80	100	120	140
0	20.3	8.203	0.567	0.313
4.5	16.3	6.356	0.456	0.293
5.0	11.5	5.873	0.421	0.256
5.5	10.4	5.034	0.404	0.245

由表 1.2 横向数据看出，USP 低温再生改性沥青在不同试验温度下的黏度大小，随着温度升高，改性沥青黏度逐渐减小，同时纵向数据显示随着改性剂掺入比例的增加，黏度越来越小，说明改性剂的掺入越能起到有效的降黏作用，140℃ 下布氏旋转黏度值已明显趋近于 0，黏度极低，利于这个温度下沥青混合料的施工铺筑。

1.3 沥青混合料拌合、摊铺、碾压温度确定

因不同掺量的 USP 低温再生沥青改性剂降低黏度不同，选定内掺 2 公斤的 USP 低温再生改性沥青作为再生沥青混合料的胶结料。按照规范要求可确定混合料的拌合与压实成型温度，其中 90# 基质沥青的拌合及压实温度选为 165℃ 及 150℃。而对于 USP 低温再生改性沥青混合料，施工温度均可降低 30℃，因此，拌合及压实温度选为 135℃ 及 120℃。下文中对于有废旧沥青混合料掺入的 USP 再生沥青混合料同样在该温度下进行拌和，拌和时集料加热至 135℃ ± 5℃，在 120℃ ± 3℃ 下压实。

2 USP 低温再生沥青混合料级配设计

2.1 沥青

本研究再生沥青混合料中的先添加基质沥青使用的是克拉玛依 90 号沥青，不同比例废旧沥青混合料需要计算出相对应的 USP 低温再生改性沥青的用量，根据 1.1 得知每吨

沥青混合料须内含约 2 公斤 USP 低温再生沥青改性剂来满足温拌状态下的和易性。

USP 低温再生沥青改性剂在制备时的比例=2 公斤/（RAP 综合油石比-废旧沥青混合料回收油石比）×1000。

废旧沥青混合料中沥青含量由抽提试验确定。由级配设计计算求得掺入的 USP 改性沥青质量。

2.2 集料

新集料均采用石灰岩粗细集料，其性能经测试均满足技术要求。旧集料为经过筛分的铣刨后的废旧沥青混合料，按照再生沥青混合料的级配要求加入经过筛分后不同粒径的集料。

2.3 最佳油石比确定

采用 AC-16 型沥青混凝土，配合比设计和最佳沥青用量按照传统的热拌沥青混合料马歇尔试验方法确定。级配设计结果见表 2.1

表 2.1 USP 低温再生沥青混合料目标设计级配

筛孔尺寸 (mm)	级配
19	100
16	97.0
13.2	89.8
9.5	76.1
4.75	46.6
2.36	29.3
1.18	23.2
0.6	17.6
0.3	12.6
0.15	8.7
0.075	5.1

最佳油石比下的马歇尔试验结果如表 2.2 所示，通过马歇尔试验确定了 USP 再生沥青混合料最佳沥青用量，最终得到最佳油石比为 4.4%，90 号热拌沥青混合料最佳油石比确定方法同上。

表 2.2 马歇尔试验结果

油石比	4.4
试件毛体积相对密度	2.386
最大理论相对密度	2.573
孔隙率/%	5.6
矿料间隙率/%	11.4
饱和度/%	58.7
流值/mm	2.14
稳定度/KN	8.16

3 USP 再生沥青混合料路用性能

将未添加旧料的沥青混合料与添加了 40%、50%、60%、

70%废旧沥青混合料的再生沥青混合料进行路用性能对比，以评价 USP 低温再生沥青混合料的高温性能、低温性能、水稳定性能。

3.1 高温性能

利用车辙试验对成型的热拌沥青混合料和掺入废旧沥青混合料的 USP 再生沥青混合料试件的高温性能进行测试，表征再生沥青混合料的高温稳定性。动稳定度 DS 测试结果见表 3.1。

表 3.1 沥青车辙试验结果

混合料类型	废旧沥青混合料掺量/%	DS/ (次/mm)
90#	0	1215
USP	40	1813
	50	2974
	60	3210
	70	3482

由表 3.1 可得，USP 低温再生沥青混合料的动稳定度数值相比于 90 号热拌沥青混合料要高出 50%，说明 USP 低温再生沥青改性剂提升了基质沥青的高温抗变形能力。沥青混合料性能改善的主要原因在于拌和过程的短期老化促进了小分子挥发，加强了有机助剂和沥青的交联作用。而废旧沥青混合料的掺入进一步提升了混合料的高温抗变形能力，随着掺入废旧沥青混合料比例的上升，再生沥青混合料的动稳定度继续增大；当废旧沥青混合料掺入量达到 40%，动稳定度增长幅度达到 40%，废旧沥青混合料掺入使得新旧集料的摩阻力增大，因而再生沥青混合料表现出更好的高温稳定性。

3.2 低温抗裂性能

利用小梁低温弯曲试验对成型的普通热拌沥青混合料与 40%、50%、60%、70%废旧沥青混合料的再生沥青混合料的低温性能进行研究，弯曲试验结果见表 3.2。

表 3.2 沥青低温弯曲试验结果

混合料类型	废旧沥青混合料掺比%	抗弯拉强度 (Mpa)	最大弯拉应变 ($\mu\epsilon$)	弯曲劲度模量 (Mpa)
90#	0	8.53	2178	3916
USP	40	8.64	2283	3784
	50	8.85	2092	4207
	60	9.16	2125	4310
	70	9.30	1934	4562

由表 3.2，对比 90 号基质沥青，发现 USP 改性沥青混合

料具有更好的抗弯拉强度与最大弯拉应变，USP 低温改性剂提升 90 号沥青的低温性能，可见沥青分子与高分子补偿剂中物质发生接链反应，从而改善了胶结料的低温韧性。但是废旧沥青混合料的掺入却不利于混合料低温性能，随着废旧沥青混合料掺入比例增加，混合料的弯拉应变不断减小，劲度模量不断增大，特别当废旧沥青混合料掺入比例为 90%时，混合料弯曲模量变大了 60%，USP 再生沥青混合料的低温稳定性降低明显。

3.3 水稳性能

借助浸水马歇尔和冻融劈裂试验评价 USP 再生沥青混合料的水稳性能，试验结果如表 3.3 所示。

表 3.3 再生沥青混合料水稳试验结果

沥青类型	废旧沥青混合料掺比	残留稳定度 (%)	劈裂强度 (Mpa)		冻融劈裂强度比 (%)
			冻融前	冻融后	
90#	0	90.6	1.23	1.06	86.7
USP 改性沥青	40	91.5	1.18	1.00	85.3
	50	88.5	1.30	1.11	86.1
	60	86.3	1.15	0.98	84.6
	70	84.2	1.01	0.83	82.9

水稳性试验结果表明，USP 再生沥青混合料残留稳定度及冻融劈裂强度比均低于 90 号热拌沥青混合料，USP 再生沥青混合料水稳性能变化不大。但是随着掺入废旧沥青混合料掺量增加，USP 再生沥青混合料的残留稳定度和冻融劈裂强度比不断下降，表明废旧沥青混合料的引入不利于混合料的水稳性能，当掺入 90%的废旧沥青混合料时，USP 再生沥青混合料残留稳定度已不满足规范要求。

4 结论与展望

通过考察 USP 低温再生沥青改性剂对沥青及再生沥青混合料的性能影响，得到以下几点结论：

(1) USP 低温再生沥青改性剂能够明显改变沥青的基本性能，掺量越多改变越明显，AC-16 全新沥青混合料综合得出 USP 低温再生沥青改性剂最佳掺量为沥青质量的 5.0%；对应的每吨再生沥青混合料中 USP 低温再生沥青改性剂用量约为 2 公斤。

(2) 使用 USP 低温再生改性沥青，利用马歇尔设计方法对再生沥青混合料进行级配设计，得到再生沥青混合料最佳油石比为 4.4%，成型后试件的各项指标都满足规范。

(3) USP 低温再生沥青改性剂使得沥青混合料具有更好的高温性能，再生沥青混合料的动稳定度 DS 随着废旧沥

青混合料掺量增加而提升。USP 低温再生沥青改性剂使得沥青混合料具有更好的低温性能,但是废旧沥青混合料的掺入不利于再生沥青混合料的低温稳定性,当废旧沥青混合料掺入量达到 90%时,再生沥青混合料的劲度模量迅速增加,低温性能减弱。同时 USP 低温沥青混合料水稳性能满足规范,但对于再生沥青混合料,废旧沥青混合料掺入对混合料的水稳性能产生消极影响,废旧沥青混合料掺量为 90%时混合料

的水稳性能不满足规范要求。因而综上所述,USP 再生沥青混合料在废旧沥青混合料掺量 70%时仍能满足规范的要求,最大掺量为 70%可应用于中、下面层,掺量 50%时,可用于上面层。

(4) 未考虑废旧沥青混合料老化时间不同、原材料种类不同等影响因素,后期可根据不同情况讲废旧沥青混凝土进行分级,选择合理的再生技术进行合理再利用。

参考文献:

- [1] 黄颂昌,彭明文,徐剑.国内外沥青路面再生技术应用[J].公路交通科技,2006(11):5-8.
- [2] 拾方治,孙大权,吕伟民.沥青路面再生技术简介[J].石油沥青,2004(05):56-59.
- [3] 杨建明,杨仕教,熊韶峰,何建.旧沥青路面再生研究的现状与工艺[J].南华大学学报(理工版),2003(01):11-15.
- [4] 李强,马松林,王鹏飞.沥青路面冷再生沥青混合料疲劳性能[J].交通运输工程学报,2004(01):7-10.
- [5] 李艳春,陈朝霞,阎峰,刘绣红.旧路面材料的冷再生利用及力学性能分析[J].公路交通科技,2001(05):15-16.
- [6] 侯睿,李海军,黄晓明.高等级路面旧沥青混合料热再生分析[J].中外公路,2005(04):155-159.
- [7] 刘先森,朱战良,王欣,何文锋.厂拌热再生沥青技术在广佛高速公路路面大修工程的应用[J].公路,2004(11):131-136.
- [8] 黄煜镔,吕伟民,周小平.沥青路面再生技术的原理与应用[J].重庆建筑大学学报,2004(06):129-133.