

# Performance Comparison of Different Molding Methods of Sasobit Warm Mix Recycled Asphalt Mixture

Shengchao LIANG<sup>1</sup>

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, CHINA

**Abstract:** The Super-pave design method was applied to optimize three synthetic gradations and the Marshall test was applied determined the optimum asphalt content which showed the selected synthetic grade II was the best synthesis of gradation, the optimum asphalt dosage is 4.5%. The Marshall hit and gyratory compaction were selected to analyze the performance of Sasobit warm mix recycled asphalt mixture based on the optimum gradation and the optimum asphalt content. It can be shown from the test that the dynamic stability of the rotating compacted specimens is 110% higher than that of the Marshall specimens, the failure strength modulus is 12.6%, the splitting tensile strength is 11.6%, and the TSR height is 5.1%. The VV of warm mix recycled mixture specimen formed by the rotating compaction method is smaller, the stress relaxation ability stronger, and the ability of resisting water erosion better, than that of the Marshall hit. The former can simulate the actual construction pavement compaction situation better with positive performance of high temperature, low temperature and stability of water, which could provide reference for future warm mix reclaimed asphalt pavement construction design and experiment method.

**Keywords:** Warm mix recycled asphalt mixture; forming method; Superpave; High temperature stability; Low temperature crack resistance; Water stability

## Sasobit 温拌再生沥青混合料不同成型方式路用性能对比

梁胜超

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 采用 superpave 设计方法对粗中细三种合成级配进行优选并通过马歇尔试验确定最佳沥青用量, 选定合成级配二为最佳合成级配, 其最佳沥青用量为 4.5%。选择车辙试验、劈裂试验、冻融劈裂试验, 通过马歇尔击实和旋转压实两种方式在最佳合成级配和最佳沥青用量下分别成型试件, 从而对两种成型方法下的 sasobit 温拌再生沥青混合料路用性能展开对比分析。结果表明, 旋转压实试件比马歇尔试件的动稳定度值高 110%, 破坏劲度模量低 12.6%, 劈裂抗拉强度低 11.6%, TSR 高 5.1%。旋转压实方法成型的温拌再生混合料试件 VV 更小, 应力松弛能力更强, 抗水侵蚀能力更好。前者能更好的模拟实际施工路面压实情况, 具有更优的高温、低温和水稳定性, 以期今后温拌再生沥青路面施工中设计与试验方法的改进提供参考。

**关键词:** 温拌再生沥青混合料; 成型方式; Superpave; 高温稳定性; 低温抗裂性; 水稳定性

### 1 引言

传统的沥青路面再生方法主要为热拌和冷拌再生。热拌再生过高的施工温度会影响再生路面的低温、抗疲劳性能和使用寿命。冷拌再生较低的施工温度使其性能相对较差, 不能满足高等级路面的要求[1]。温拌再生能很大程度降低结合料的拌合温度, 不仅能确保沥青混合料的路用特性, 而且可以大幅度节省燃料、降低生产过程中的老化和减少排放[2]。马歇尔设计法是目前世界上 HMA 设计最通用的方法, 但是马歇尔击实仪的每次击实都会对矿料造成一定的破

坏作用, 这种冲击压实不能模拟实际沥青路面的压实度和准确估计 HMA 的抗剪强度[3]。Superpave 旋转压实仪 (SGC) 在压实功的作用下, 对沥青混合料试件进行剪切、压缩和揉搓作用, 能比较好的模拟施工现场实际施工碾压情况, 使室内试验的压实度与施工现场保持一致。

目前国内针对再生沥青混合料的马歇尔成型和旋转压实成型等不同成型方法的对比研究主要集中在热再生和冷再生方面。高超[4]采取马歇尔击实、旋转剪切压实、旋转压实三种不同成型方法成型试件, 评价了相应混合料的性能。季节等[5]对马歇尔击实仪和剪

切压实仪两种不同成型方法下的热再生沥青混合料的路用性能展开了测试和性能影响规律评价；王宏[6]等对不同成型方式下的冷再生沥青混合料内部的空级配、空隙等效直径、空隙形状特征、以及集料的破损状况等进行了研究。高飞[7]对废旧二灰碎石水泥冷再生材料进行了配合比设计，分析了静压成型和振动成型这两种不同成型方法下的无侧限抗压强度。但是关于马歇尔成型和旋转压实成型对温再生混合料路用性能的对比研究比较少，而且在配合比设计中往往忽略了级配比较和优选。因此，本文首先采取 superpave 设计方法对粗中细三种不同 AC-16 合成级配进行比选，然后从高温、低温、水稳定性三方面对两种成型方式下的 sasobit 温拌再生沥青混合料试件性能进行对比和分析。

## 2 原材料的选择与性能检测

### 2.1 集料

试验用旧料来源于重庆某高速公路段上面层，原路面上面层为 AC-13 结构层。采取铣刨方法回收，回收后进行人工破碎。以 4.75 作为关键筛孔，将回收 RAP 分成小于 4.75 和大于 4.75 两档。利用抽提法分离出沥青和集料，旧集料为石灰岩，通过筛分各档级配如表 1。新集料采用石灰岩，经测定，新旧集料各项主要技术指标如表 2~3，经检验均满足规范[8]要求。

### 2.2 沥青

新沥青选择 70 号基质石油沥青，按规范测定新旧沥青的相关技术指标，其指标如表 4 所示。经测定，新旧沥青均符合规范[8-9]使用要求。

表 1. 抽提后旧料级配

粒径范围 (mm)	各粒径占总量百分比 (%)										
	<0.075	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
<4.75	12.3	7.4	8.7	15.7	12.8	17.6	25.2	0.3	—	—	—
≥4.75	5.4	2.4	3.6	8.3	8.7	11.2	15.1	28.9	13.8	2.6	—

表 2. 旧集料主要技术指标

表观相对密度		吸水率/%		压碎值/%	针片状/%
<4.75	≥4.75	<4.75	≥4.75		
2.574	2.656	1.84	1.41	19.0	11.8

表 3. 新集料主要技术指标

指标	吸水率/%	视密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	压碎值/%	洛杉矶磨耗/%	沥青粘附性/级
新集料	0.9	2.723	20.4	22	4.3
规范要求	≤3.0	≥2.5	≤28	≤30	≥4.0

表 4. 新旧沥青技术指标

检测项目	25℃针入度	15℃延度	软化点	60℃动力粘度	密度	溶解度	蜡含量
旧沥青	32	35	53.4	304	1078.5	99.98	1.76
70#沥青	75	>100	52	210	1043.2	99.99	1.88

### 2.3 温拌剂

Sasobit 温拌技术属于有机添加剂类降粘温拌技术[10]。通过向沥青中掺加 sasobit，起到减小沥青高温时的粘度和施工拌和温度的效果，达到增强路用性能的目的。本文选用重庆某技术公司提供的 sasobit 温拌剂，其外观为 2~4mm 大小的白色颗粒球状体，是一种合成直链脂肪族炭氢化合物。

## 3 配合比设计

### 3.1 级配优选

选择 AC-16 结构型，初步拟定粗中细三种合成级配。选用旋转压实仪成型试样并参照 superpave 设计方法确定每种试拌合成级配的体积特征，进行试拌合成级配的评估[11]。级配设计如表 5 所示。

确定旧料掺量为 20%，通过 superpave 试拌沥青含量选择方法计算三种级配试拌沥青用量。采取旋转压实仪对每种试拌级配压实成型两个试样，按照试拌合成级配评价方法预估混合料的体积特征，其结果如表 6 所示。

在建立了所有的预估混合料特征后，观察 VMA、VFA、D.P 和 N 初始这些指标是否符合规范要求，并决定是否有一种或多种级配可接受，或者决定是否需要做进一步的试拌。通过综合分析和对照，选择合成级配二为最佳合成级配。通过水敏感性试验测

定合成级配二的间接抗拉强度比为 83%，满足规范规定的间接抗拉强度比大于 80%的要求，可作为配合比设计的矿料级配使用。

### 3.2 最佳沥青用量确定

选择五种不同的沥青用量，用马歇尔击实仪成型试件，测定温拌再生混合料马歇尔试件的相关体积参数，其结果如表 7，均满足规范[8]要求。通过试验确定 AC-16 型沥青混合料的最佳沥青用量为 4.5%。

表 5. AC-16 型沥青混合料三种合成级配设计

AC-16	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配 1	100.0	90.6	76.3	60.4	34.2	20.0	13.1	9.0	7.2	5.5	4.3
合成级配 2	100.0	94.2	85.7	68.6	40.0	28.2	20.1	17.1	11.6	8.4	6.4
合成级配 3	100.0	98.4	89.7	76.3	56.2	42.0	32.3	21.5	14.1	9.8	7.0
级配上限	100.0	100.0	92.0	80.0	62.0	48.0	36.0	26.0	18.0	14.0	8.0
级配下限	100.0	90.0	76.0	60.0	34.0	20.0	13.0	9.0	7.0	5.0	4.0

表 6. 三种合成级配试样体积特征

体积参数 级配类型	试拌沥青用量	预估沥青用量	空隙率 (%)	VMA	VFA	D.P
合成级配 1	4.4	5.5	4	15.8	74.6	0.86
合成级配 2	4.4	4.7	4	14.2	71.3	1.52
合成级配 3	4.4	5	4	14.5	72.3	1.55

表 7. 马歇尔试验技术指标

油石比/%	毛体积密度 (g/cm <sup>3</sup> )	MS/KN	FL/mm	VV/%	VMA/%	VFA/%
3.5	2.381	11.66	27.8	7.8	14.5	46.2
4.0	2.426	13.37	33.1	5.0	13.6	62.1
4.5	2.445	10.62	38.2	4.0	13.4	70.6
5.0	2.468	10.15	42.3	2.1	12.8	84.1
5.5	2.464	8.55	48.5	1.8	13.7	86.8

## 4 基于不同成型方式的 sasobit 温拌再生沥青混合料路用性能及对比

国内用于评价高温性能的试验方法较多，常见有单轴无侧限加载试验、三轴试验、单轴无侧限蠕变<sup>[12]</sup>。车辙试验运用较广，它用以评价混合料在规定的温度下，抵抗塑性流动变形的能力。本文选用车辙试验来评价不同成型方法的温拌再生沥青混合料的高温性能。其试验方法为在 60°C、轮压 0.7MPa 条件下，测试试验轮沿试件表面同一轮际反复行走产生单位车辙深度变形时车轮行走的次数，即动稳定度，其计算公

式为：

$$DS = \frac{(t_2 - t_1)N}{d_2 - d_1} C_1 C_2$$

式中：DS—沥青混合料动稳定度，次/mm；

$d_1, d_2$ —分别为对应于时间  $t_1, t_2$  的变形量，mm；

N—试验轮行走频率，42 次/min；

$C_1$ —试验机修正系数，曲柄连杆驱动试件的变速行走方式为 1.0，链驱动试验轮等速方式为 1.5；

$C_2$ —试件系数，试验室制备的宽 300mm 试件为 1.0，路面切割的宽 150mm 试件为 0.8。

低温劈裂试验是间接评价沥青混合料低温性能的

一种方法，本文选择其来评价结合料的低温性能[13]。其试验方法为在-10℃、1mm/min 加载速度前提下，通过圆弧形加载压条对拟定尺寸的圆柱形试件劈裂直至破坏，通过确定沥青混合料的劈裂抗拉强度、泊松比、破坏拉伸应变及破坏时的劲度模量来评价混合料的低温抗裂特性。其中试件直径为100mm±2.0mm、压条宽度为12.7mm。其参数计算公式为：

$$R_T = 0.006287P_T / h$$

$$\mu = (0.1350A - 1.7940) / (-0.5A - 0.0314)$$

$$\varepsilon_T = X_T \times (0.0307 + 0.0936\mu) / (1.35 + 5\mu)$$

$$S_T = P_T \times (0.27 + 1.0\mu) / (h \times X_T)$$

式中： $R_T$ —劈裂抗拉强度 (MPa)；

$\varepsilon_T$ —破坏拉伸应变；

$S_T$ —破坏劲度模量 (MPa)；

$\mu$ —泊松比；

$P_T$ —试验荷载的最大值 (N)；

$h$ —试件高度 (mm)；

$A$ —试件垂直变形与水平变形的比值；

$$A = Y_T / X_T$$

$Y_T$ —试件对应于最大荷载时的垂直方向总变形 (mm)；

$X_T$ —量取的对应于最大破坏荷载时水平方向的总变形 (mm)；当试验仅测定垂直方向变形 $Y_T$ 或由实测的 $Y_T$ 、 $X_T$ 计算的 $\mu$ 值大于0.5或小于0.2时，水平变形 ( $X_T$ ) 可按  $X_T = Y_T \times (0.135 + 0.5\mu) / (1.794 - 0.0314\mu)$  计算。

冻融劈裂试验具有比一般浸水试验条件更严格的要求，本文选用其来评价沥青结合料的水稳定性[14]。其试验方式为将沥青混合料随机分成两组，一组在25℃条件下测定劈裂强度 ( $R_{T1}$ )；另一组试件先真空 (真空度 98.3~98.7KPa) 饱水，然后置于-18℃冷冻 16h，再在 60℃水中浸泡 24h，最后在 25℃条件下测定劈裂强度 ( $R_{T2}$ )。劈裂抗拉强度计算公式为：

$$R_{T1} = 0.006287P_{T1} / h_1$$

$$R_{T2} = 0.006287P_{T2} / h_2$$

式中： $R_{T1}$ —未进行冻融循环的第一组单个试件

的劈裂抗拉强度 (MPa)

$R_{T2}$ —经过冻融循环的第二组单个试件的劈裂抗拉强度 (MPa)

$P_{T1}$ —第一组单个试件的试验荷载值 (N)

$P_{T2}$ —第二组单个试件的试验荷载值 (N)

$h_1$ —第一组每个试件的高度 (mm)

$h_2$ —第二组每个试件的高度 (mm)

冻融劈裂抗拉强度比 TSR 的计算公式为：

$$TSR = \frac{\bar{R}_{T2}}{\bar{R}_{T1}} \times 100$$

式中： $TSR$ —冻融劈裂试验强度比 (%)

$\bar{R}_{T2}$ —冻融循环后第二组有效试件劈裂抗拉强度平均值 (MPa)

$\bar{R}_{T1}$ —未冻融循环的第一组有效试件劈裂抗拉强度平均值 (MPa)

#### 4.1 马歇尔击实法成型 sasobit 温拌再生沥青混合料路用性能

采用前文确定的最佳矿料级配和最佳沥青用量，通过马歇尔击实仪在 120℃下成型试件。对其进行车辙试验、低温劈裂试验和冻融劈裂试验，来评价马歇尔击实仪成型方式下 sasobit 温拌再生沥青结合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性。试验结果如表 8 所示。

#### 4.2 旋转压实法成型 sasobit 温拌再生沥青混合料路用性能

采用前文确定的最佳矿料级配和最佳沥青用量，通过 SGC 在 120℃下成型旋转压实试件。对成型后的试件钻芯取样和切割取样[15]。切割制造出长 300 毫米、宽 150m 毫米、厚 50 毫米的沥青混合料板块状车辙试件，直径为 101.6 毫米±0.25 毫米、高为 63.5 毫米±1.3m 毫米的低温劈裂试件和冻融劈裂试件。对钻芯和切割所取得的试件进行车辙试验、低温劈裂试验和冻融劈裂试验，来评价 SGC 成型方式下 sasobit 温拌再生沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性。试验结果如表 9 所示。

表 8. 马歇尔击实法成型 sasobit 温拌再生沥青混合料路用性能试验结果

试验项目	高温稳定性	低温抗裂性	水稳定性
	车辙试验	低温劈裂试验	冻融劈裂试验

	$DS$ (次/mm)	$S_T$ /MPa	$R_T$ /MPa	$\bar{R}_{T1}$ /MPa	$\bar{R}_{T2}$ /MPa	TSR/%
AC-16	3011	1244	2.28	0.705	0.586	83.1
规范值	$\geq 800$			TSR $\geq 75\%$		

表 9. SGC 成型 sasobit 温拌再生沥青混合料路用性能试验结果

试验项目	高温稳定性 车辙试验	低温抗裂性 低温劈裂试验		水稳定性 冻融劈裂试验		
	$DS$ (次/mm)	$S_T$ /MPa	$R_T$ /MPa	$\bar{R}_{T1}$ /MPa	$\bar{R}_{T2}$ /MPa	TSR/%
AC-16	6324	1087	2.02	0.712	0.628	88.2
规范值	$\geq 800$			TSR $\geq 75\%$		

### 4.3 不同成型方式下的温拌再生沥青混合料性能对比与分析

两种不同成型方式下的 sasobit 温拌再生沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性对比如图 1~3。

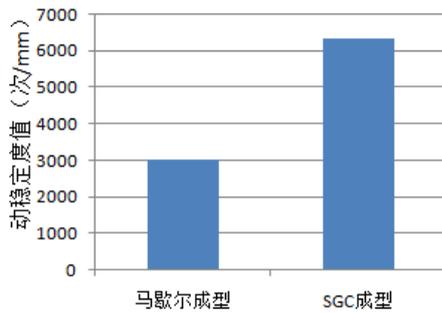


图 1. 不同成型方式下温拌再生沥青混合料车辙试验对比

由上表分析，SGC 试件比马歇尔试件的动稳定度值高 110%，使得 SGC 成型方法在高温稳定性方面明显优于马歇尔方法。其主要原因在于在相同的最佳沥青用量情况下，SGC 成型方法本身所具有的特点使其成型后的试件具有更高的密度。相比于马歇尔试件，其空隙率更小，集料之间发生相对移动后更加紧凑和密实。同时 SGC 试件的空隙等效直径、空隙数量和空隙率整体波动幅度比较小，试件内部结构更稳定、均匀和统一，抵抗变形的能力增强，从而具有更高的高温稳定性。

由表可得，相比于马歇尔试件，SGC 试件的破坏劲度模量要低 12.6%，同时劈裂抗拉强度要低 11.6%，SGC 试件具有更好的低温抗裂性能。表明 SGC 成型的试件集料间具有作用更加明显的骨架结构。其矿料颗粒之间有足够的空间，使其应力松弛能

力增强。反观马歇尔击实仪，重锤从一定高度下落，每次击实都会对矿料造成一定的破坏作用，使其矿料级配发生变异性，集料排列不密实，试件内部的薄弱面较多，从而导致其强度降低。

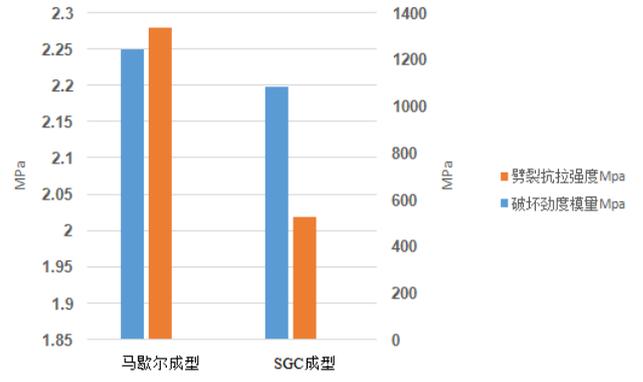


图 2. 不同成型方式下温拌再生沥青混合料劈裂试验对比

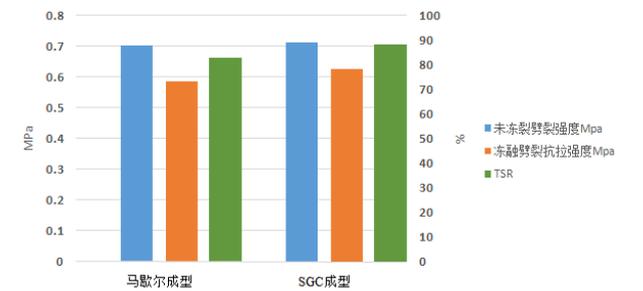


图 3. 不同成型方式下温拌再生沥青混合料冻融劈裂试验对比

由表可知，SGC 成型的温拌再生试件的 TSR 高 5.1%。在旋转压实仪压实功的作用下，沥青混合料试件承受着剪切、压缩和揉搓的作用，导致混合料颗粒位置发生变化并重新排列，其矿料间嵌挤力增强，混合料呈现出更密实的密实—骨架型结构。但是马歇尔击实仪只承受竖直方向的作用力，不包括剪切应力作用，试件的强度更低。另一方面，本实验中旋转压实

仪使用与马歇尔击实仪相同的沥青含量，沥青能够在混合集料中充分渗透与拌合，使其成型出试件的细集料和沥青胶浆对骨料的包裹作用更进一步增强，不易受水侵蚀，因此具有更高的抵抗水损害的能力。

## 5 结论

(1) 应用 superpave 级配优选方法，对拟定的三种合成级配进行了比较优选，确定级配二为最佳级配组合，通过马歇尔击实仪确定其最佳沥青用量为 4.5%。

(2) 通过室内试验，比较了两种成型方式在相同矿料级配和沥青用量下成型试件的路用性能。相比于马歇尔成型方式，由于旋转压实特有的剪切、压缩和揉搓的成型特点，其成型的温拌再生混合料试件空隙率更小，应力松弛能力更强，抗水侵蚀能力更强。表现为其动稳定度值高 110%，破坏劲度模量低 12.6%，劈裂抗拉强度低 11.6%，TSR 高 5.1%。对于温拌再生沥青路面的现场施工，旋转压实的试验方式较马歇尔击实方式能更好的模拟施工现场的实际压实情况，本文以期为今后温拌再生沥青路面施工中设计与试验方法的改进提供参考。

## References (参考文献)

[1] 俞志龙. 厂拌热再生沥青混合料路用性能及施工工艺研究[D].

- 重庆: 重庆交通大学,2013.
- [2] 徐世法,徐立庭,郑伟,等. 热再生沥青混合料新技术及其发展展望[J]. 筑路机械与施工机械化,2013,6(6):39-43.
- [3] 美国沥青协会. 高性能沥青路面 (superpave) 基础参考手册[M].北京: 人民交通出版社, 2005:18-19.
- [4] 高超. 基于不同成型方式的再生沥青混合料性能研究[D].北京: 北京建筑大学,2014.
- [5] 季节,高超. 基于不同成型方式的热再生沥青混合料性能试验研究[J]. 公路,2014,3(3):174-177.
- [6] 王宏,刘锋. 不同成型方式泡沫沥青冷再生混合料微观结构性能研究[J]. 公路交通科技,2016,33(2):19-27.
- [7] 高飞. 基于不同成型方式的水泥冷再生混合料路用性能研究[J]. 交通世界(建养.机械),2012,9(9):124-126.
- [8] 交通部公路科学研究所.JTG F50-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [9] 交通部公路科学研究所.JTG F41-2008 公路沥青路面再生技术规范[S].北京: 人民交通出版社,2008.
- [10] 吕玉超,张美玉,张玉贞. 温拌沥青混合料发展现状[J]. 石油沥青,2013,27(5):1-6.
- [11] 陈泽宏. 沥青混合料不同配合比设计方法对比研究[D].湖南: 湖南大学,2013.
- [12] 王瑞燕. 建筑材料[M].重庆: 重庆大学出版社, 2010: 173-174.
- [13] 李文珍,李亮,曾伟. 沥青混合料低温抗裂弯曲试验研究[C]//中国土木工程学会市政工程分会城市道路与交通学术委员会. 科技创新 绿色交通——第十一次全国城市道路交通学术会议论文集.中国土木工程学会市政工程分会城市道路与交通学术委员会, 2011: 3.
- [14] 王理吉,吴欢,徐燕. Sasobit 温拌再生沥青混合料水稳定性改善措施研究[J]. 公路交通技术,2015,2(2):53-56.
- [15] 纪小平,郑南翔,甘新立. 再生沥青混合料压实特性的研究[J]. 中外公路,2013,32(5):265-268.