

沥青混凝土路面再生工艺的试验研究

李海军¹, 刘仰韶¹, 黄晓明²

(1. 广东交通集团检测中心 广州市 510420; 2. 东南大学交通学院 南京市 210096)

摘 要: 结合沥青混凝土路面材料构成特性, 利用 Fick 定律分析得出温度、时间和浓度梯度等因素对新旧沥青粘结剂混溶质量影响较大。依据分析结果, 针对沥青混凝土路面热再生方法的工艺特点, 设计试验利用旧矿粉的转移量表征不同工艺因素下再生沥青粘结剂的混溶程度。对试验结果进行多因子方差分析得出, 采用预热旧料、增加拌和时间和添加再生剂等工艺措施能够显著提高再生沥青混合料粘结剂的混溶再生质量。

关键词: 沥青混凝土路面; 热再生; 混溶质量; Fick 定律; 方差分析

沥青混凝土路面热再生通过工艺控制将新沥青、再生剂、矿粉等混溶于旧沥青粘结剂中, 进而通过粘结剂组分间的相容调配和大分子间的链接键合等改善旧沥青的性能, 使旧沥青粘结剂得以“再生”。可以看出, 在热再生过程中, 新沥青、旧沥青、再生剂以及矿粉等粘结剂材料相互之间能够充分混溶是保证再生质量的前提条件和关键, 而合理再生工艺的选择和设计直接影响到再生沥青粘结剂混溶程度。

本文从再生沥青混合料构成特性出发, 分析和利用 Fick 定律相关结论, 设计、试验探讨热再生过程中工艺措施对粘结剂混溶再生质量的影响程度和规律。

1 应用 Fick 定律分析粘结剂混溶规律

混合物中各组分存在浓度梯度时, 则发生分子扩散。设沿 z 方向组分浓度随距离的变化率为 dC/dz , 则在 z 方向上浓度会随时间的推移而逐渐均匀。对此, 菲克(Fick)提出, 在统一的压力和温度下, 使用一种简化的微分方程——守恒方程描述扩散过程, 见式(1)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: C 为浓度; t 为时间; D 为表征扩散速度的扩散系数; A 为扩散发生的截面积。

再生沥青混合料中旧沥青、新沥青和再生剂相互之间存在浓度梯度, 在一定温度和压力条件下, 会

发生分子团、组分等的扩散混溶, 沿沥青膜厚度方向随时间的推移而逐渐均匀。因此, 采用菲克定律对再生粘结剂形成过程进行分析和表征是可行的。

1.1 从扩散系数出发的混溶影响因素——温度

Einstein-Stokes 方程[见式(2)]示出了扩散系数的表达式 D , 它非常有助于分析影响扩散系数的各种因素。

$$D = kT/f = kT \cdot \frac{1}{6\pi\eta r} \quad (2)$$

式中: k 为 Boltzman 常数, $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为绝对温度; η 为溶剂的粘度; r 为溶质分子半径。

式中的 kT 代表内部热能参数, 可以理解为物质的内部热量与物质分子的布朗运动成正比, 而正是布朗运动驱动着分子扩散的进行。

根据式(2), 扩散系数 D 与给定状态下溶剂在溶质中运动的平均摩擦力 f 成反比, 而摩擦力主要与溶剂粘度 η 和扩散分子的平均分子半径 r 相关联。进一步分析得出, 在宏观性能指标方面, 扩散系数随着界面温度的升高、介质粘度及其粒子的减小而增大。由此, 在再生沥青混合料拌和工艺中, 提高温度, 降低新旧沥青两相组分粘度, 对旧沥青相互间的渗透、扩散非常有利。

1.2 从界面特征出发的混溶影响因素——再生剂

拌制工艺决定了新沥青(或再生剂)会同时喷洒、覆盖到旧沥青料和新骨料上。那么, 仅从混溶渗透方面讲, 添加剂同旧沥青接触类同自由界面扩散,

其浓度梯度曲线由菲克方程解得是一个高斯型分布曲线,见式(3)。

$$\frac{dC}{dz} = \frac{-C_0}{(4\pi Dt)^{1/2}} \exp(-z^2/4Dt) \quad (3)$$

分析式(3)得出,在界面附近浓度梯度随时间增加衰变很快,但离开界面相对较远处,浓度梯度受时间的影响减弱。反之,增大界面两侧浓度梯度,界面附近区域混溶到一定浓度所需要的时间也会明显减少。

旧沥青、新沥青和再生剂 3 种再生沥青粘结剂组成材料中,再生剂与旧沥青浓度差别最大。故而,为增加浓度梯度,提高扩散效率,应将再生剂喷洒至旧沥青中,搅拌后再喷洒新沥青。此外,形成的旧沥青—再生剂和再生剂—新沥青两个界面的浓度梯度最大,渗透、扩散效率也最高。因此,在再生工艺中,应适时喷洒再生剂,同时进行强制拌和,以增大浓度梯度及其接触发生面。

1.3 从扩散混溶过程出发的扩散影响因素——时间

Robert Karlsson^[4]取用图 1 简化模型模拟旧沥青再生过程中再生剂扩散进入老化沥青的过程。假设沥青膜厚度为 αL ,再生剂膜厚度为 $(1-\alpha)L$,在沥青层上,再生剂的初始浓度是 0,在再生剂层上,初始浓度为 C_0 。

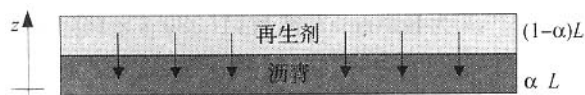


图 1 简化的沥青与再生剂混溶模型

同时考虑初始条件和边界条件,可以得到任意位置 z 和时间 t 的浓度表达式,见式(4)。

$$C(z, t) = (1-\alpha) \cdot C_0 - \frac{2C_0}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha n \pi)}{n} \cdot \cos\left(\frac{n \pi z}{L}\right) \cdot e^{-[n(\pi/L)]^2 Dt} \quad (4)$$

分析式(4)中的指数表达式可以得出:扩散过程所需时间与结合料薄膜厚度的平方成正比。虽然该式是理论上的结论,由于沥青复杂的化学结构,准确分析沥青结合料中的混溶扩散是很困难的,但该结论对实践仍有较好的指导意义。如果旧料中沥青含量较多,沥青膜较厚,则相应的再生拌和时间应做二次方式延长,并且未加新粘结剂前旧料与新骨料的拌和不仅充分利用了新骨料较高的热量,其对旧沥青膜的少许减薄也会较多地降低新粘结剂的渗透时间。由此,时间的保证是混溶渗透充分的必要条件。

2 再生添加剂扩散渗透的试验设计

根据前面分析,影响再生沥青粘结剂组分间混溶渗透的 3 个主要因素是温度、浓度梯度和时间。据此设计模拟试验,以该 3 个因素为变量,实际测试它们对粘结剂形成的影响程度,以揭示沥青粘结剂热再生机理,指导沥青混凝土路面再生工艺设计。

2.1 试验设计方法

在热再生沥青混合料形成后,要将旧料表面沥青粘结剂薄膜分为内外两层,测试其性状差异、验证其混溶均匀程度相对比较困难。考虑到如果设计试验测得旧集料表面内层与外层沥青膜内矿粉与沥青的比例的差异,也可以从一方面反映再生沥青粘结剂的混溶差异程度。具体来讲,将掺拌了新沥青(再生剂)、但未掺加矿粉的旧沥青料(含旧矿粉)与较高温度的石料自然、充分拌和,此时新添石料表面获得的沥青粘结剂显然主要由旧沥青料外层的沥青膜组成,测试其中矿粉与沥青比例,将该比例与理论上完全混溶下应有的比例比较,即可在很大程度上反映原拌和工序和条件下旧沥青料表面粘结剂的混溶状况。

在试验室内模拟工程条件制备旧沥青混合料,并尽可能按照热再生施工过程中的温度状况和再生条件进行新旧料拌和,以推测实际工程中可能出现的状况。

本试验采用的材料如下:矿料为石灰岩集料(9.5 mm 和 2.36 mm 两种粒径),表观密度为 2.71 g/cm^3 ;矿粉为石灰石粉,表观密度为 2.64 g/cm^3 ;兰炼 130 号基质沥青,短期和长期老化的壳牌 70 号沥青,相关物理指标测试结果见表 1。

表 1 老化沥青性能指标

沥青	25℃针入度 0.1 mm	15℃延度/cm	软化点/℃
壳牌 70 号 (PAV 老化)	26.3	4.5	56.2
兰炼 130 号	130	132	43.9

为简化旧沥青混合料的制备和便于新旧料的分离,本试验仅采用单一粒径的集料掺加合适用量的矿粉模拟路面旧集料,然后直接拌和长期老化沥青来模拟路面的旧沥青混合料。

取用 0.5 kg 2.36 mm 集料、5.5 g 老化沥青与 5.5 g 矿粉(沥青和矿粉用量按沥青膜厚约 $9 \mu\text{m}$ 计算),按普通沥青混合料拌制工艺拌和而成,以模拟旧沥青混合料相关情况。新沥青采用兰炼 130 号沥

青,用量同样为 5.5 g,这样从总体上,再生沥青粘结剂中矿粉与沥青质量比为 0.5。新添石料取用 0.4 kg,加热至 200℃,采用的单一粒径的 9.5 mm 集料,以利于与旧料分开。

2.2 试验工艺条件

根据对菲克定律的分析,考虑到热再生过程中常见的工序条件,将旧料的再生条件分为以下 4 种情况进行分析:

- (1)旧料常温温度,不加再生剂;
 - (2)旧料预热 110℃,不加再生剂;
 - (3)旧料常温温度,掺加 R_{1100} 再生剂;
 - (4)旧料预热 110℃,掺加 R_{1100} 再生剂。
- 同时,上面每一种情况按拌和时间再分为 1 min

和 3 min 两种情形。

掺加再生剂时,为了保证结合料总量不变,即再生剂与沥青量的总和仍是 11 g,同时考虑到该再生剂对旧沥青性能的作用情况取用掺加率为 10%(占旧沥青结合料比例),所以旧沥青量调整为 5 g,再生剂用量为 0.5 g,新沥青量仍为 5.5 g。在掺加新沥青前,依据实际拌制工艺,先掺拌再生剂,时间均为 0.5 min,总拌和时间不变。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

根据试验设计方案,在室内进行测试,得到 8 个试验条件下的试验数据,见表 2。

表 2 再生沥青粘结剂混溶渗透模拟试验测试结果

编号	再生粘结剂形成条件			转移总量/g	矿粉质量/g	沥青质量/g	矿粉:沥青
	添加剂情况	旧料状态	拌和时间				
I	新沥青	常温	1 min	1.02	0.163	0.857	0.19
II			3 min	1.61	0.363	1.247	0.29
III		预热 110℃	1 min	2.15	0.517	1.633	0.32
IV			3 min	2.52	0.790	1.73	0.46
V	新沥青与 R_{1100}	常温	1 min	1.67	0.385	1.285	0.30
VI			3 min	2.01	0.59	1.42	0.42
VII		预热 110℃	1 min	2.71	0.852	1.858	0.48
VIII			3 min	3.08	1.005	2.075	0.50

矿粉与沥青比为 0 时,再生沥青粘结剂混溶程度为 0;达到 0.5 时,可以认为再生沥青粘结剂混溶程度达到 100%。照此分析,可将试验结果表示为图 2 所示。

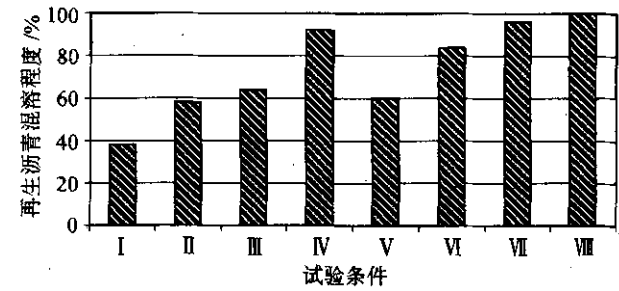


图 2 不同试验条件下的再生沥青粘结剂混溶程度

3.2 多因子方差分析

下面对试验结果进行有交互影响的多因子方差分析。

试验影响因素及水平见表 3。

表 3 再生沥青粘结剂混溶试验影响因素及水平

因子		I	II
A	温度	常温	预热 110℃
B	再生剂	无	有
C	拌和时间	1 min	3 min

按正交设计方法列出表示试验值变量的观测值,见表 4,相应的方差分析见表 5。

F 检验的临界值为: $F_{0.90}(1,1)=39.9$; $F_{0.95}(1,1)=161$ 。可以看出拌和时间、温度和再生剂 3 个因子的交互作用对粘结剂混溶程度影响很小,将它们从表 5 方差分析表中排除出去,重新得到修正的方差分析表,见表 6。

此时的 F 检验临界值为: $F_{0.90}(1,4)=4.54$; $F_{0.95}(1,4)=7.71$; $F_{0.99}(1,4)=21.2$ 。可以看出,旧料预热因素和再生剂因素高度显著地影响粘结剂混溶程度,拌和时间的不同对粘结剂混溶程度也有显

表 4 再生沥青粘结剂混溶试验值变量的观测值

试验号	A	B	A×B	C	C×A	B×C	空列	试验值 变换 y_i
	1	2	3	4	5	6	7	
1	I	I	I	I	I	I	I	−11
2	I	I	I	II	II	II	II	−1
3	I	II	II	I	I	II	II	0
4	I	II	II	II	II	I	I	12
5	II	I	II	I	II	I	II	2
6	II	I	II	II	I	II	I	16
7	II	II	I	I	II	II	I	18
8	II	II	I	II	I	I	II	20
K_{j1}	0	6	26	9	25	23	35	$K=56$ $P=392$ $Q=1\ 250$
K_{j1}	56	50	30	47	31	33	21	
S_j	392	242	2	180.5	4.5	12.5	24.5	
$S_T=858$								

表 5 方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
因子 A	392	1	392	16	
因子 B	242	1	242	9.9	
因子 C	180.5	1	180.5	7.4	
A×B	2	1	2	0.08	
B×C	12.5	1	12.5	0.51	
C×A	4.5	1	4.5	0.18	
误差	24.5	1	24.5		
总和	858	7			

表 6 修正后的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
因子 A	392	1	392	36.0	高度显著
因子 B	242	1	242	22.2	高度显著
因子 C	180.5	1	180.5	16.6	显著
误差	43.5	4	10.88		
总和	858	7			

著的影响,但 3 因素间交互作用不明显,也即采取措施越多,混溶效果越明显。
分析试验结果可以得如下结论。

(1)掺加适量再生剂、对旧料进行预热,且拌和时间较长的情况下,基本可以达到再生沥青粘结剂混溶均匀;而在最不利的条件,即不掺加适量再生剂、旧料常温温度且拌和时间较短的情况下,转移到新集料沥青膜内矿粉的含量明显偏低,矿粉与沥青比例仅为 0.19,也可以理解为在新添石料的再生沥青粘结剂中,新沥青约占 80%,故而混溶程度不佳。

(2)旧料温度、再生剂的掺用以及拌和时间这 3 个再生条件对试验结果影响都很大。添加再生剂后,粘结剂混溶程度平均提高 22%;旧料预热后粘结剂

混溶程度平均提高 28%;拌和时间延长后粘结剂混溶程度平均提高 20%。仅采用一个有利于再生沥青混溶的条件时,粘结剂混溶程度都在 60%左右(试验条件 II、III 和 V);而同时采用两个有利于再生沥青混溶的条件时,则粘结剂混溶程度都在 90%左右(试验条件 IV、VI 和 VII),此时可以认为达到比较理想的混溶效果。

根据上述试验结果,针对具体工程情况,在沥青混凝土路面再生利用过程中,建议应至少采用掺加再生剂、预热旧料以及延长拌和时间 3 个条件中的两项来促使新旧沥青粘结剂的充分混溶再生,以保证再生沥青粘结剂质量。

4 结论

(1)热再生过程中,再生沥青粘结剂的混溶程度直接影响到新沥青和再生剂对旧沥青的“再生”质量,应设计工艺保证再生沥青粘结剂的充分混溶一致。同时,设计测试表明,利用旧矿粉在新旧沥青粘结剂间的转移量,可以较好地表征再生沥青粘结剂的混溶程度。

(2)分析菲克理论表明,温度、时间和浓度差对溶液间的扩散混溶过程影响较大。据此设计工艺条件并测试表明,在沥青混凝土路面再生利用过程中,应至少采用预热旧料温度、掺加再生剂,以及延长拌和时间 3 个条件中的两项来促使新旧粘结剂的充分混溶再生,保证再生沥青粘结剂质量。

参考文献:

[1] C L Monismith, S F Brown. Developments in the Structural Design and Rehabilitation of Asphalt Pavements over Three Quarters of a Century [S]. AAPT, 1997.

[2] 陈晋南. 传递过程原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[3] 潘承毅, 何迎晖. 数理统计的原理与方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.

[4] R Karlsson, U Isacson. Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion [J]. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, MARCH/APRIL, 2003.

[5] 黄晓明, 赵永利, 江臣. 沥青路面再生利用试验分析 [J]. 岩土工程学报, 2001, (4).

[6] 吕伟民. 沥青混合料设计原理与方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.