

文章编号:1671-6833(2021)01-0082-07

冷再生用乳化沥青稳定性评价指标研究

汪德才<sup>1,2</sup>, 郝培文<sup>3</sup>, 孙 杨<sup>2</sup>, 李瑞霞<sup>2</sup>

(1.华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 2.郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 3.长安大学 特殊地区公路工程教育部重点试验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 针对冷再生用乳化沥青的稳定性,开展了乳化剂种类、用量及 SBR 改性乳化沥青粒径、Zeta 电位、界面张力的室内试验,提出了表征乳化沥青稳定性的指标要求。试验结果表明:不同乳化剂种类制备的乳化沥青的粒径大小与分布均不同,随着乳化剂用量的增加,平均粒径、 $D_{90}$ 与不均匀系数减小,稳定性增加;乳化剂的种类和用量对 Zeta 电位和界面张力有显著影响,随着乳化剂用量增加,Zeta 电位明显增加,界面张力明显减小,当用量达到一定时乳液稳定性趋于稳定;SBR 改性乳化沥青的粒径大小及分布基本与未改性前一致,Zeta 电位增大,储存稳定性略有减小。灰熵关联分析表明:界面张力、粒径不均匀系数与乳化沥青稳定性相关性最好,其次是  $D_{90}$ 与平均粒径,Zeta 电位最小。推荐当  $D_{90} \leq 7 \mu\text{m}$ ,平均粒径  $\leq 4 \mu\text{m}$ ,不均匀系数  $\leq 4$ ,Zeta 电位  $> 28 \text{ mV}$ ,界面张力  $< 3.3 \text{ mN/m}$  时,即可满足现行规范中稳定性的指标要求。

**关键词:** 冷再生;乳化沥青;稳定性;粒径;Zeta 电位;界面张力;灰熵关联分析

**中图分类号:** U414      **文献标志码:** A      **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.01.011

0 引言

乳化沥青冷再生技术,是乳化沥青与回收材料一起拌和、摊铺、压实的过程,很大程度上解决了路面废弃旧料问题,作为一项绿色环保技术被广泛应用<sup>[1]</sup>。乳化沥青是乳化沥青冷再生混合料关键组分,乳化性能好坏直接影响着冷再生混合料的路用性能<sup>[2-3]</sup>。而乳化沥青属于热力学不稳定体系,在储存和运输过程中容易产生组成成分分离析和沥青微粒凝结等稳定性不足的现象,离析严重的乳化沥青会导致路面沥青膜厚度不均匀、色泽不一致、易松散、不成型等病害<sup>[4]</sup>。因此有必要对冷再生用乳化沥青稳定性能进行探究,提出合理的评价方法和评价指标。

目前,国内外学者已对冷再生用乳化沥青稳定性进行了相关研究。Mercado 等<sup>[5]</sup>提出用振荡流变法测定沥青乳液的稳定性,发现随着聚结的发生,乳液的流变行为从剪切变稀发展到牛顿流体,乳液的弹性模量和黏性模量明显下降。Liu 等<sup>[6]</sup>研究了乳化剂种类和用量对其储存稳定性

的影响,发现乳化剂的表面活性越高,乳液的平均粒径越小,随着乳化剂用量的增加,乳液的平均粒径减小。Wang 等和赵品晖等<sup>[7-9]</sup>采用激光衍射技术研究沥青乳液的粒度变化,认为粒径与稳定性有良好的相关性。随着研究的不断深入,Noskov 等<sup>[10]</sup>发现流体界面的界面扩张黏弹性与乳液的稳定性相关。裴强等<sup>[11]</sup>研究了乳化沥青的界面黏弹性及 Zeta 电位,指出界面扩张模量、Zeta 电位和储存稳定性有着良好的对应关系,可以用来评价乳化剂的优劣。上述这些研究表明,乳化沥青的粒径、电位和界面张力与稳定性有一定的关联,但并没有定量地说明关联程度,且对于冷再生用乳化沥青稳定性的评价没有统一的方法及指标,尤其是从微观层面上多尺度地评价稳定性能。

鉴于以上问题,本文对不同类型和用量的冷再生乳化剂制备及 SBR 改性乳化沥青进行了粒径、Zeta 电位及界面张力试验,并采用灰熵关联分析方法计算各个指标与稳定性之间的关联程度,验证评价方法及指标的合理性,提出满足现行规范中稳定性的指标要求<sup>[12]</sup>。

收稿日期:2020-06-15;修订日期:2020-08-15  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708513,51878623)  
作者简介:汪德才(1983—),男,湖南益阳人,华北水利水电大学高级工程师,博士,主要从事路面结构与材料方面研究,E-mail:decaiww@126.com。  
通信作者:李瑞霞(1985—),女,河南开封人,郑州大学副教授,博士,主要从事路面新材料方面的研究,E-mail:li Ruizia@zzu.edu.cn。

1 试验材料与方法

基质沥青采用东明 70 号沥青,其测试指标见表 1;乳化剂选择乳化沥青冷再生中常用的 4 种阳离子慢裂快凝型乳化剂,分别记为 A、T、L、M。其中,乳化剂 A 的试验掺量(质量分数)分别为 0.7%、1.1%、1.7%、2.3%和 2.9%,乳化剂 T、L、M 的掺量(质量分数)分别为 2.0%、4.0%、3.0%,采用德国 RINKMD-1 胶体磨按照相关参数制备乳化沥青<sup>[13]</sup>,其测试指标见表 2。在制备改性乳化沥青(AG)时,通过聚合物 SBR 胶乳与乳化沥青成品混合的方式进行改性,现混现用以免出现分层离析影响改性效果,改性剂掺量(质量分数)为 3%。

乳化沥青的粒径、Zeta 电位和界面张力测试

分别采用美国麦克奇(Microtrac) S3500 系列激光粒度仪(图 1(a))、英国马尔文公司 Nano ZS90 纳米粒度及 Zeta 电位仪(图 1(b))和美国 Thermo Cahn 公司型号为 RADIAN Series 300 的表面/界面张力测试仪(图 1(c))。

2 稳定性评价指标

2.1 基于粒径的稳定性分析

2.1.1 粒径评价指标

乳化沥青颗粒粒径大小与分布是乳化沥青质量控制的关键参数,直接影响到乳化沥青的黏度、储存稳定性、破乳时间等性能指标,对乳化沥青的工程性能有非常重要的影响<sup>[14]</sup>。

(1)平均粒径。乳化沥青颗粒粒径通常服从正态分布,平均粒径与中位粒径基本接近,其比值

表 1 沥青测试指标  
Table 1 Asphalt test index

指标	针入度(25℃, 100 g, 5 s)/ (0.1 mm)	延度(15℃, 5 cm/min)/ cm	软化点 (环球法)/℃	蜡含量 (蒸馏法)/%	闪点 (COC)/ ℃	密度 (15℃)/ (g·cm <sup>-3</sup> )	溶解度 (三氯乙 烯)/%	TFOT 后残留物		
								质量变 化率/%	针入度比 (25℃)/ %	延度 (15℃)/ cm
规定值	60~80	≥100	≥46	≤2.2	不小于 260	实测记录	≥99.5	不大于 0.8	≥61	≥15
测试值	66	≥100	48.7	1.8	271	1.028	99.92	0.03	88	25

表 2 4 种乳化沥青测试指标  
Table 2 Indexes of four emulsified asphalt types

检测项目	乳化沥青类型			
	A	T	L	M
破乳速率	慢裂	慢裂	慢裂	慢裂
粒子电荷	阳离子	阳离子	阳离子	阳离子
筛上残留物(1.18 mm)/%	0.011	0.03	0.02	0.02
恩格拉黏度, E <sub>25</sub>	8.1	9.1	8.9	8.3
与粗集料的黏附性、裹覆性(裹覆面积)	≥2/3	≥2/3	≥2/3	≥2/3
与粗、细粒式集料拌和试验	均匀	均匀	均匀	均匀
残留分含量/%	64.2	63.5	63.8	63.7
蒸馏残留物 针入度(25℃)/(0.1 mm)	64.6	66.7	66.2	68.9
延度(15℃)/cm	87.3	69.8	76.3	52.6
5 d 储存稳定性/%	2.21	4.77	4.12	2.24

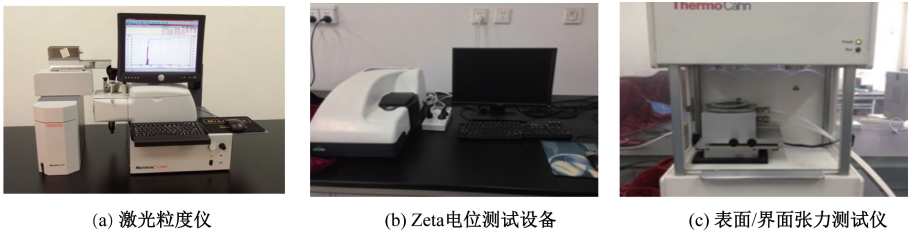


图 1 乳化沥青性能测试仪器  
Figure 1 Emulsified asphalt performance testing instrument

反映的是颗粒群的粒径分布与正态分布的偏离程度。为了简便,在表征粒径大小时,常采用中位粒径代替平均粒径。

(2)不均匀系数。粒径的分布通常采用中位粒径  $D_{50}$  来表征,但  $D_{50}$  主要反映的是颗粒粒径整体的粒径大小情况,并不能很好地反映颗粒粒组的均匀程度。因此,借助于土力学中颗粒的不均匀系数  $C_u$  ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ) 来评价乳化沥青颗粒粒径的分布和均匀性。

(3) $D_{90}$ 。 $D_{90}$ 是指粒度累计分布占 90%时所对应的粒径。它是一个综合指标,既反映粒径大小也表征了乳化沥青颗粒粒径分布的均匀度。

2.1.2 粒径稳定性分析

由图 2、图 3 可知,不同类型乳化沥青的平均粒径、 $D_{90}$ 与 5 d 稳定性大小排序相同,均为  $T>L>M>A$ ;而不均匀系数排序为  $T>M>L>A$ 。从排序结果来看,虽然 L 的平均粒径与  $D_{90}$ 均大于 M,但不能说明其均匀性就差,也表明在评价乳液粒径大小的同时需要兼顾粒径分布均匀性的必要性。在室内相同工艺及参数条件下,不同乳化剂配方制备的乳化沥青的粒径大小与分布不同,主要是由于不同乳化剂的内在结构不同,亲水亲油能力存在差异,其乳化效果明显不同。而乳化剂的分子结构对储存稳定性会有很大影响<sup>[15]</sup>,因此 4 种冷再生用乳化沥青的稳定性有很大差异。

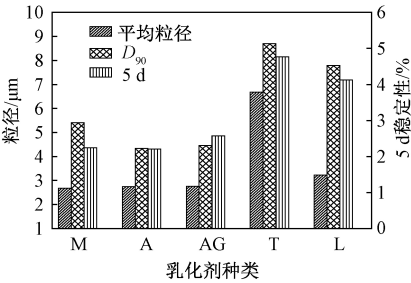


图 2 不同乳化剂制备的乳化沥青粒径与稳定性

Figure 2 Particle size and stability of emulsified asphalt prepared by different emulsifiers

加入 SBR 胶乳后的乳化沥青,平均粒径、 $D_{90}$ 以及不均匀系数基本一致,其储存稳定性略小于未加入胶乳的乳化沥青,可能是由于胶乳与原乳液系统存在两相良好的相容性,能够均匀稳定地分布在沥青中,再次形成了稳定的乳液系统<sup>[16]</sup>。从图 4、图 5 可以看出,当乳化剂含量(质量分数)小于 1.7%时,随着乳化剂用量的增加,平均粒径、 $D_{90}$ 与不均匀系数下降明显,而稳定性明显增强;乳化剂含量(质量分数)大于 1.7%时,各指标变化不大,逐渐趋于稳定。

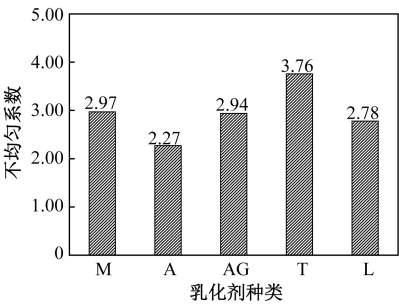


图 3 不同乳化剂制备乳化沥青的不均匀系数

Figure 3 The ununifomity coefficient of emulsified asphalt prepared by different emulsifiers

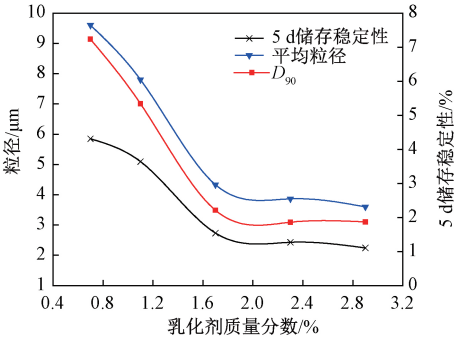


图 4 乳化剂含量与粒径和稳定性关系

Figure 4 Relationship between emulsifier dosage and particle size, emulsifier dosage and stability

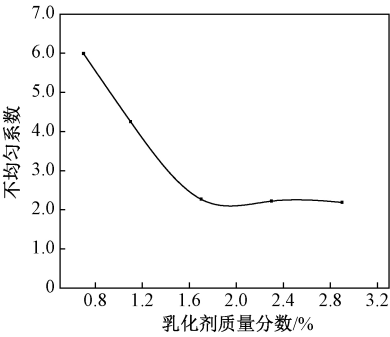


图 5 乳化剂含量与不均匀系数关系

Figure 5 Relationship between emulsifier dosage and ununifomity coefficient

对粒径指标与乳化沥青稳定性进行相关性分析,发现平均粒径、 $D_{90}$ 以及不均匀系数与稳定性具有良好的线性关系,即平均粒径、 $D_{90}$ 与不均匀系数越小,稳定性越好,相关系数分别为 0.761 2、0.898 8、0.895 6。因此冷再生用乳化沥青的平均粒径、 $D_{90}$ 与不均匀系数能较好地反映乳化沥青的稳定性。结合规范中稳定性的要求,根据拟合的线性关系可计算出:平均粒径  $\leq 5.2 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} \leq 7.99 \mu\text{m}$ ,不均匀系数  $\leq 4.25$ 。

在乳化沥青体系中,由于重力及两相密度不同,沥青颗粒会发生沉降现象,沉降速度采用

Stokes 沉降公式<sup>[17]</sup>：

$$V = \frac{2gr^2(\rho_1 - \rho_0)}{9\eta} \tag{1}$$

式中： $r$  为沥青颗粒平均粒径； $\rho_1$ 、 $\rho_0$  分别为沥青和水的密度； $\eta$  为水黏度； $g$  为重力加速度。

石油沥青密度一般为  $0.98 \sim 1.01 \text{ g/cm}^3$ ，取  $\rho_1 - \rho_0 = 0.01 \text{ g/cm}^3$ ； $\eta$  为  $10 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ ； $g = 9.8 \text{ cm/s}^2$ 。因此可计算得出当沉降速度取  $1 \text{ mm/d}$  时，乳化沥青颗粒粒径小于  $2.3 \text{ }\mu\text{m}$ ，此时重力沉降的影响可忽略不计，乳化沥青具有良好的稳定性。

沥青颗粒除了在重力作用下向下运动外，颗粒间还会发生布朗碰撞和重力碰撞。若粒径为  $r_i$  和  $r_j$  的两个沥青颗粒在一定浓度下，其布朗运动碰撞和重力碰撞分别与布朗碰撞因子  $B_{ij}$  和重力碰撞因子  $G_{ij}$  成正比，根据絮凝理论—分子运动论则有：

$$r_i = \left( \frac{9\sqrt{3}KT}{8\pi\Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{G_{ij}}{B_{ij}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2}$$

式中： $K$  为玻尔兹曼常数； $T$  为温度； $\Delta\rho$  为分散相与连续相密度差； $g$  为重力常数。设  $\Delta\rho = 0.01 \text{ g/cm}^3$ ， $T = 298 \text{ K}$ ，当两种碰撞并存时，可得出  $r_i$  值： $1 \text{ }\mu\text{m} \leq r_i \leq 3 \text{ }\mu\text{m}$ 。当  $r_i < 1 \text{ }\mu\text{m}$  时，乳液主要是布朗运动引起的碰撞，这主要与外界环境的温度和颗粒粒径大小有关：温度越高，布朗碰撞越明显；颗粒粒径越小，布朗碰撞越明显。当  $r_i > 3 \text{ }\mu\text{m}$  时，乳液主要是重力碰撞，粒径越大，越容易在重力作用下碰撞和沉降。以上从理论上证明了乳化沥青中沥青颗粒粒径的大小及分布与乳液稳定性密切相关。

综合考虑乳化沥青颗粒运动情况和规范要求，推荐冷再生乳化沥青粒径大小及分布为： $D_{90} \leq 7 \text{ }\mu\text{m}$ ，平均粒径  $\leq 4 \text{ }\mu\text{m}$ ，不均匀系数  $\leq 4$ 。

2.2 基于电位的稳定性分析

由图 6 可知，不同乳化剂类型制备的乳化沥青 Zeta 电位和稳定性均不相同。Zeta 电位大小从大到小排序为 A、M、L、T，5 d 储存稳定性指标从大到小排序为 T、L、M、A，即 Zeta 电位越大，其稳定性能越好。主要原因是 Zeta 电位大小决定了乳液中微粒之间的排斥力大小以及微粒在体系中的热运动情况，Zeta 电位越大，乳化沥青体系的稳定越强，反之则越弱。

SBR 改性乳化沥青 Zeta 电位大于未改性前，原因可能是由于 SBR 改性沥青胶乳中的 SBR 为阳离子乳液，本身带有电荷，这样就会与原来的乳液相容而形成稳定的改性乳液。

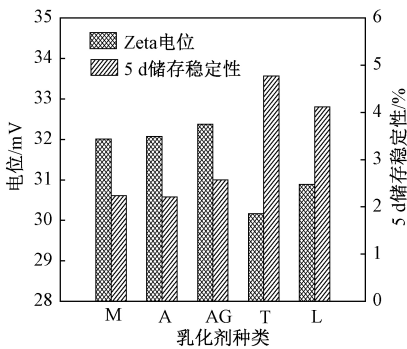


图 6 乳化剂种类与 Zeta 电位和稳定性关系  
Figure 6 Relationship between emulsifier type and Zeta potential, emulsifier type and stability

分析图 7 可知，不同质量分数乳化剂制备的乳化沥青 Zeta 电位和稳定性有明显差异。当乳化剂 A 含量（质量分数）在  $0.7\% \sim 1.7\%$  时，随着乳化剂用量增加，乳化沥青 Zeta 电位明显增加，稳定性显著提高；当乳化剂 A 含量（质量分数）在  $1.7\% \sim 2.3\%$ ，随着乳化剂用量增加，乳化沥青 Zeta 电位缓慢增加，同时稳定性能也有所提高，但变化趋势较小；当乳化剂 A 含量（质量分数）超过  $2.3\%$  时，乳液稳定性稍有下降，这可能是由于乳化剂含量对乳液粒度大小和 Zeta 电位的影响造成的，当粒径过小的沥青微粒较多时，其比表面积较大，导致比表面能激增，微粒间发生团聚的吸引力大于颗粒间的排斥力，使过小粒径沥青微粒相互结合形成稍大粒径的沥青颗粒，从而乳液的稳定性基本不变。

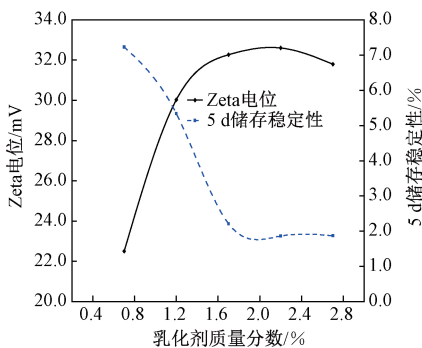


图 7 乳化剂含量与 Zeta 电位和稳定性关系  
Figure 7 Relationship between emulsifier dosage and stability, Zeta potential and stability

结合不同乳化剂种类及含量，对乳化沥青 Zeta 电位与 5 d 储存稳定性指标进行线性相关性分析，相关系数为  $-0.7908$ ，即 Zeta 电位越大，稳定性越好。根据线性关系得出满足规范稳定性要求的乳化沥青 Zeta 电位应大于  $28 \text{ mV}$ 。

2.3 基于界面张力的稳定性分析

乳化沥青之所以形成高稳定的分散体系，是

由于乳化剂降低了体系界面能以及界面电荷斥力,形成界面膜,因此乳化剂对储存稳定性的影响主要还是通过界面张力来实现,这主要与乳化剂自身的性能密切相关。从表 3 可以看出,不同乳化剂种类配制的乳化沥青界面张力不一致,通过线性相关性分析可知,乳化沥青界面张力与储存稳定性指标具有相同的变化趋势,即界面张力越大,稳定性越差。两者的相关系数为 0.961 2,因此可以通过界面张力来评价乳化沥青的稳定性。

表 3 不同乳化剂的乳化沥青体系界面张力和  
储存稳定性测试结果

乳化种类	界面张力/ (mN·m <sup>-1</sup> )	5 d 储存 稳定性/%
M	2.28	2.24
A	2.27	2.21
AG	2.49	2.57
T	2.91	4.77
L	2.74	4.12

从表 4 测试结果来看,随着乳化剂含量的增加,界面张力明显减小,5 d 储存稳定性显著增加;当含量(质量分数)达到 2.3%后,界面张力和稳定性能趋于稳定,两者呈现出很好的线性相关性,其相关系数为 0.921 7。分析原因,可能是乳化沥青中乳化剂分子数量较少时,大部分乳化剂亲水基团与亲油基团分布在水中与沥青相中,水与沥青界面上吸附的量很小,因此降低油水界面张力的能力较弱;当乳化剂分子质量浓度增加时,水与沥青界面上吸附乳化剂分子量也在增加,因此界面张力降低,当乳化剂分子达到一定质量浓度时,乳化剂分子在界面上吸附量平衡,多余乳化剂分子将不能吸附于界面上,最终乳化沥青中水与沥青的界面张力也不再发生变化。

表 4 不同乳化剂含量的乳化沥青界面张力和储存  
稳定性测试结果

Table 4 Test results of interfacial tension and storage stability of emulsified asphalt with different emulsifier dosages		
乳化剂质量 分数/%	界面张力/ (mN·m <sup>-1</sup> )	5 d 储存 稳定性/%
0.7	4.550	7.23
1.1	2.920	5.34
1.7	2.270	2.21
2.3	1.891	1.86
2.9	1.877	1.87

最后结合不同乳化剂种类及用量,对乳化沥青界面张力与 5 d 储存稳定性指标进行相关性分析,发现两者具有良好的线性相关性,相关系数为 0.889 4,根据线性关系得出满足规范稳定性要求的乳化沥青界面张力应小于 3.3 mN/m。

3 灰熵关联分析

基于灰关联熵分析法<sup>[18]</sup>,研究乳化沥青粒径、电位及界面张力与稳定性的关联性。设  $X$  为灰关联因子集,将参考序列记为  $x_0, x_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ , 比较序列记为  $x_i, x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

(1) 各系列的均值像(或初值像):

$$x'_i = \frac{x_i}{x_i} = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n))。$$
 (3)

式中:  $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum x_i(k); i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n。$

(2)  $x_0$  与  $x_i$  的均值像(或初值像)对应分量之差的绝对值序列:

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|。$$
 (4)

式中:  $\Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)), i = 1, 2, \dots, m。$

(3)  $\Delta_i(k)$  的两极最大差与两极最小差分别记为:

$$M = \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k);$$
 (5)

$$m = \min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k)。$$
 (6)

(4) 比较列和参考列间的灰熵关联系数为

$$\xi_i[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\left| \frac{\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)} \right|}{\left| \frac{m + \rho M}{\Delta_i(k) + \rho M} \right|}。$$
 (7)

式中:分辨系数  $\rho \in (0, 1)$ , 灰熵计算中取 0.5;  $i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n。$

(5) 灰熵。设灰内涵数列  $x_i = (x_i, x_2, \dots, x_m), \forall i, x_i \geq 0$ , 且  $\sum x_i = 1$ , 称函数  $H(x) = - \sum x_i \ln(x_i)$  为序列  $X$  的灰熵,  $x_i$  为属性信息。

(6) 灰关联熵与灰熵关联度。设  $X$  为灰关联因子集,  $x_0 \in x$  为参考列,  $x_i \in x (i = 1, 2, \dots, m)。$

$$R_i = \{ \xi[x_0(k), x_i(k)] \};$$
 (8)

$$P_h \triangleq \frac{\xi[x_0(k), x_i(k)]}{\sum_{k=1}^n \xi[x_0(k), x_i(k)]}。$$
 (9)



式中:  $P_h \in P_i (h = 1, 2, \cdots, n)$ ;  $P_h$  称为分布的密度值。

$X_i$  的灰关联熵表示为:

$$H(R_i) \triangleq - \sum_{k=1}^n P_h \ln P_h \circ \tag{10}$$

序列  $x_i$  的灰熵关联度为:

$$E(x_i) \triangleq \frac{H(R_i)}{H_{\max}} \circ \tag{11}$$

式中:  $H_{\max} = \ln n$ , 为  $n$  个元素构成的差异信息列的最大熵。

以稳定性为参考列, 平均粒径、 $D_{90}$ 、不均匀系数、Zeta 电位及界面张力为被比较序列, 按上述理论公式计算序列之间的灰熵关联度。根据灰熵关联度准则: 比较列的灰熵关联度越大, 则比较列与参考列的关联性越强; 同时灰熵关联度大小可以用来确定主要因素, 灰熵关联度越大, 影响越显著<sup>[19]</sup>。由图 8 可知, 界面张力、平均粒径大小、 $D_{90}$ 、不均匀系数及电位与稳定性的灰熵关联度都大于 0.99, 其中界面张力、粒径不均匀系数关联程度最大, 其次是  $D_{90}$  与平均粒径, Zeta 电位与乳化沥青稳定性关联度相对最小。因此, 在考察乳液体系的稳定时, 如果不方便测试乳化沥青界面张力, 可以测试乳化沥青的粒径大小分布, 包括平均粒径、 $D_{90}$  以及不均匀系数, 尤其不均匀系数、 $D_{90}$  与稳定性的关联性要大于平均粒径 ( $D_{50}$ )。这也间接证明了采用不均匀系数与  $D_{90}$  指标评价粒径大小与分布的合理性。

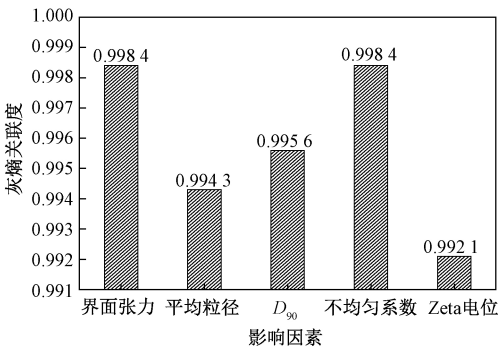


图 8 各影响因素的灰关联度

Figure 8 Grey correlation degree of each influencing factor

4 结论

(1) 不同乳化剂配方制备的乳化沥青粒径大小及分布不同; 随着乳化剂用量增加, 平均粒径、 $D_{90}$  以及不均匀系数均减小, 稳定性增强。与普通乳化沥青相比, SBR 改性乳化沥青平均粒径、 $D_{90}$

以及不均匀系数基本不变, 其稳定性略小于未加入胶乳的乳化沥青。在粒径评价指标中  $D_{90}$  与平均粒径评价结果一致, 但  $D_{90}$  能更明显区分粒径大小, 不均匀系数可以很好地反映粒径分布均匀情况。

(2) 不同乳化剂种类配制的乳化沥青 Zeta 电位和界面张力不同, 乳化沥青 Zeta 电位越大, 其稳定性能越好, 界面张力越小; 随着乳化剂用量增加, Zeta 电位显著增加, 界面张力显著减小, 当用量达到一定时, 乳液稳定性能趋于稳定。

(3) 灰熵关联分析表明, 各评价指标均与乳液稳定性关联性较好, 灰熵关联度从大到小排序为: 界面张力、粒径不均匀系数、 $D_{90}$ 、平均粒径、Zeta 电位, 均大于 0.99。因此在考察乳化沥青稳定性时, 如不便测试乳化沥青界面张力, 可先测试乳液的平均粒径、 $D_{90}$  以及不均匀系数。基于现行规范中稳定性的指标要求, 推荐平均粒径  $\leq 4 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} \leq 7 \mu\text{m}$ , 不均匀系数  $\leq 4$ , Zeta 电位  $> 28 \text{ mV}$ , 界面张力  $< 3.3 \text{ mN/m}$ 。

参考文献:

[1] 黄煜镔,吕伟民,汪宏涛. 沥青路面冷再生技术的现状及其发展[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(4): 177-179.

[2] WANG Z J, SHU X, RUTHERFORD T, et al. Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar[J]. Construction and building materials, 2015, 75: 25-30.

[3] 肖晶晶,郑南翔,宋哲玉. 乳化剂对改性乳化沥青性能影响及机理研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(3): 5-9.

[4] 谢利宝,杨建新,凌晨. 浅谈乳化沥青的储存稳定性[J]. 公路交通科技, 2006, 2(9): 86-88.

[5] MERCADO R, FUENTES L. Measure of asphalt emulsions stability by oscillatory rheology[J]. Construction and building materials, 2017, 155: 838-845.

[6] LIU Z G, ZONG L, ZHAO L L, et al. Preparation and storage stability of asphalt emulsions made from modified lignin cationic asphalt emulsifiers[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 357-360: 781-785.

[7] WANG F Z, LIU Y P, HU S G. Effect of early cement hydration on the chemical stability of asphalt emulsion[J]. Construction and building materials, 2013, 42: 146-151.

[8] 赵品晖,范维玉,张凌波,等. 乳化沥青粒度与稳定性的影响因素及其相关性考察[J]. 石油炼制与化

工,2013,44(7):12-16.

[9] 赵品晖,范维玉,董爽,等.阴离子乳化沥青稳定性与油水界面张力的关系[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(3):175-179.

[10] NOSKOV B A, LOGLIO G, MILLER R. Dilational surface visco-elasticity of polyelectrolyte/surfactant solutions: formation of heterogeneous adsorption layers [J]. Advances in colloid and interface science, 2011, 168(1/2):179-197.

[11] 裴强,杜素军,庞瑾瑜.乳化沥青的界面黏弹性及 Zeta 电位研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(1):42-45,76.

[12] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面再生技术规范:JTG F41—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.

[13] 王伟明,吴旷怀,王凤华,等.新型 SBR 复合改性乳化沥青研制与性能研究[J].中外公路,2014,34(5):235-240.

[14] 李忠玉,刘栓,陈小雪,等.乳化沥青颗粒粒度分析试验研究[J].石油沥青,2015,29(3):14-17.

[15] 王红,王翠红,王子军.乳化剂体系对乳化沥青储存稳定性影响研究[J].石油沥青,2008,22(4):10-13.

[16] 陈宪宏,孙立夫.SBR 改性乳化沥青的研究[J].湖南科技学院学报,2007,28(4):110-112.

[17] 王长安,吴育良,许凯,等.影响乳化沥青稳定性的主要因素[J].新型建筑材料,2005,32(1):52-54.

[18] 张岐山,郭喜江,邓聚龙.灰关联熵分析方法[J].系统工程理论与实践,1996,16(8):8-11.

[19] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.

Stability Evaluation Indexes of Emulsified Asphalt for Cold Regeneration

WANG Decai<sup>1,2</sup>, HAO Peiwen<sup>3</sup>, SUN Yang<sup>2</sup>, LI Ruixia<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2.School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3.Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at the stability of emulsified asphalt for cold regeneration, laboratory tests were carried out on the types and dosage of emulsifier, particle size, Zeta potential and interfacial tension of SBR modified emulsified asphalt, and the index requirements for characterizing the stability of emulsified asphalt were put forward. The results showed that the particle size and distribution of the emulsified asphalt prepared by different emulsifier types were different. With the increase of the amount of emulsifier, the average particle size,  $D_{90}$  and ununiformity coefficient regeneration and the stability increased. The type and amount of emulsifier had a significant effect on the Zeta potential and interfacial tension. As the amount of emulsifier increased, the Zeta potential increased significantly and the interfacial tension decreased. When the amount reached a certain level, the emulsion stability tended to be stable. The particle size and distribution of SBR modified emulsified asphalt were basically the same as those before unmodified, but the Zeta potential increased, and the storage stability slightly reduced. The grey entropy correlation analysis showed that the interfacial tension and particle size ununiformity coefficient had the best correlation with the stability of emulsified asphalt, followed by  $D_{90}$  and average particle size, and the Zeta potential had the smallest. It was recommended that when  $D_{90} \leq 7 \mu\text{m}$ , average particle size  $\leq 4 \mu\text{m}$ , ununiformity coefficient  $\leq 4$ , Zeta potential  $> 28 \text{ mV}$ , interfacial tension  $< 3.3 \text{ mN/m}$ , it could meet the stability requirements of the current specification.

**Key words:** cold regeneration; emulsified asphalt; stability; particle size; Zeta potential; interfacial tension; grey entropy correlation analysis