

文章编号:1007-9629(2021)01-0131-07

TB 胶粉复合 SBS 改性沥青及混合料的低温性能

张家伟¹, 黄卫东¹, 吕 泉¹, 关维阳²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135)

摘要: 通过小梁弯曲蠕变试验(BBR)以及半圆弯拉试验(SCB),对不同 TB 胶粉掺量和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)掺量的 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青及其混合料的低温性能进行研究,并对其低温性能指标进行相关性分析.结果表明:与基质沥青相比,TB 胶粉改性沥青具有优异的低温性能,且随着 TB 胶粉掺量的增加,其低温 PG 分级温度下降,沥青低温应力变小,混合料低温抗裂性增强;TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青及其混合料的低温性能高于基质沥青,且随着 TB 胶粉掺量的增加,其低温性能改善效果较为显著,但低于相应掺量的 TB 胶粉改性沥青;随着 SBS 掺量的增加,10% TB 胶粉复合 SBS 改性沥青的低温性能变化不明显,混合料的低温抗裂性变差;TB 胶粉改性沥青的低温 PG 分级可以很好地反映沥青及其混合料的低温性能,而 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青不能通过单一的 PG 分级来评价其低温性能,需要结合其他指标共同评价.

关键词: TB 胶粉; SBS; 低温; 小梁弯曲蠕变试验; 半圆弯拉试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.018

Low Temperature Performance of TB Crumb Rubber Composite SBS Modified Asphalt and Mixture

ZHANG Jiawei¹, HUANG Weidong¹, LÜ Quan¹, GUAN Weiyang²

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Bending beam rheometer test(BBR) and semi-circular bend test(SCB) were conducted to study the low temperature performance of terminal blend(TB) crumb rubber composite styrene-butadiene-styrene(SBS) modified asphalt and its mixture with different contents of TB crumb rubber and SBS. The correlation of different low temperature performance indexes was analyzed. The results show that compared with the matrix asphalt, TB crumb rubber modified asphalt has excellent low-temperature performance, and with the increase of the TB crumb rubber content, the low temperature PG of TB crumb rubber modified asphalt decreases, the thermal stress of asphalt decreases, and the low temperature crack resistance of mixture is enhanced; the low temperature performance of TB crumb rubber composite 3% SBS modified asphalt and its mixture is better than that of matrix asphalt, and with the increase of the TB crumb rubber content, the improvement effect of low temperature performance of composite modified asphalt is more significant, but is not better than that with the corresponding content of TB crumb rubber modified asphalt; with the increase of SBS content, the low temperature performance of 10% TB crumb rubber composite

收稿日期:2019-09-02; 修订日期:2019-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778481,51978518,51908426)

第一作者:张家伟(1993—),男,河南信阳人,同济大学博士生. E-mail:jiaweizhang@tongji.edu.cn

通讯作者:吕 泉(1991—),男,浙江义乌人,同济大学在站博士后,博士. E-mail:1991lvquan@tongji.edu.cn

SBS asphalt does not change significantly, and the low temperature crack resistance of the mixture becomes poor; the low temperature PG grade of TB crumb rubber modified asphalt can well reflect the low temperature performance of asphalt and its mixture, while the low temperature performance of TB crumb rubber composite SBS modified asphalt can't be evaluated by a single low temperature PG index, which needs to be evaluated together with other indexes.

Key words: TB crumb rubber; SBS; low temperature; BBR; SCB

低温开裂是沥青路面的主要病害之一,在中国北方地区,冬季气温通常在 0°C 以下,随着温度的下降,沥青路面内部的低温应力迅速累加直至超过混合料的强度从而发生开裂.在沥青混合料中,集料的温缩系数远远小于沥青,故普遍认为沥青混合料低温性能的80%由沥青的低温性能决定^[1].因此,在实际工程应用中,一般通过改善沥青的低温性能来提高混合料的低温抗裂性.

TB胶粉改性沥青(MA-TB)是特殊的橡胶粉改性沥青^[2],TB胶粉在高温条件下发生脱硫反应,快速分解并与沥青融合,形成的改性沥青外观与普通改性沥青无异,可以均匀存储和工厂化生产.研究表明^[3-5],TB胶粉改性沥青具有良好的低温性能和耐疲劳特性,但高温性能较差,因此通常与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)进行复合改性来提升沥青混合料的路用性能.TB胶粉复合SBS改性沥青混合料的疲劳性能要优于SBS改性沥青以及橡胶沥青混合料^[6],TB胶粉复合SBS改性沥青的低温PG分级温度也显著低于其他种类的改性沥青^[7].魏相荣^[8]研究发现TB胶粉和SBS复合改性沥青后,其混合料的高温稳定性、低温抗裂性以及疲劳性能均优于TB胶粉改性沥青和SBS改性沥青混合料.董瑞琨等^[9]的研究结果也显示出TB胶粉复合SBS改性沥青比SBS改性沥青具有更好的疲劳自愈合性能.但目前关于TB胶粉复合SBS改性沥青的研究大多侧重于与其他种类改性沥青进行性能对比,复合改性过程中TB胶粉和SBS掺量对沥青及其混合料性能影响的相关研究较少.

目前对沥青低温性能的评价,国内外较为主流的评价指标是低温延度试验、测力延度试验以及SHARP推荐的低温PG分级^[10].这些指标给出的是沥青在某一特定条件下的试验结果,虽然能区分不同沥青低温性能的优劣,但沥青路面的低温开裂是由于温度下降,混合料内部应力缓慢集中而发生开裂的过程,其无法模拟降温过程中沥青内部实际的受力情况.对沥青混合料低温性能的评价,最常见

的方法是通过低温小梁弯曲蠕变试验(BBR)得到其弯曲蠕变劲度,该方法较为简单,但评价指标也较为单一,无法评价路面开裂后的裂缝发展情况.

本文制备了不同TB胶粉掺量和SBS掺量的TB胶粉复合SBS改性沥青,通过BBR研究了其低温流变特性,探究了在温度下降过程中,沥青内部低温应力的变化情况;通过半圆弯拉试验(SCB)研究了TB胶粉复合SBS改性沥青混合料的低温抗裂性能;系统地评价了TB胶粉掺量和SBS掺量变化对TB胶粉复合SBS改性沥青及混合料低温性能的影响,并对其低温性能指标进行相关性分析.

1 试验

1.1 原材料

1.1.1 改性沥青

沥青为埃索70#基质沥青(E70);TB胶粉为江阴产橡胶粉,粒径为 0.6 mm ;SBS为岳阳石化公司生产的线型SBS.改性沥青的制备工艺为:将TB胶粉加入到基质沥青中,在 220°C 下高速剪切 16 h 以上,制备TB胶粉掺量¹⁾为20%的TB胶粉改性沥青(20TB),其他掺量TB胶粉改性沥青则通过在20TB中添加基质沥青稀释后得到;TB胶粉复合SBS改性沥青则通过向 175°C TB胶粉改性沥青中加入一定量的SBS,搅拌 1 h 后制得.改性沥青的配合比及基本性能指标如表1所示.文中:MA-TB+3SBS表示SBS掺量为3%的TB胶粉复合SBS改性沥青;MA-10TB+SBS表示TB胶粉掺量为10%的TB胶粉复合SBS改性沥青.

1.1.2 改性沥青混合料

粗集料为玄武岩,细集料为石灰岩,矿粉为石灰岩矿粉,混合料选用AC-13级配,设计孔隙率为4%(体积分数),选用马歇尔设计方法,确定最佳油石比为0.049,混合料的级配如表2所示.

1.2 试验方法

1.2.1 BBR试验

按照ASTM D6648—2016《Standard test method

1)文中涉及的掺量、油石比等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

表 1 改性沥青的配合比及基本性能指标

Table 1 Mix proportions and basic performance parameters of modified asphalts

Asphalt	$w(\text{TB})/\%$	$w(\text{SBS})/\%$	Penetration (25 °C)/ (0.1 mm)	Softening point/°C	Ductility (5 °C)/cm
E70	0	0	64	50.9	
3SBS	0	3	45	73.9	48.0
5TB	5	0	71	51.3	
5TB+3SBS	5	3	58	52.4	48.0
10TB	10	0	103	50.9	12.3
10TB+2SBS	10	2	70	51.7	53.0
10TB+3SBS	10	3	68	56.2	53.0
10TB+4SBS	10	4	65	59.7	54.0
15TB	15	0	115	50.7	27.0
15TB+3SBS	15	3	73	55.3	52.0
20TB	20	0	120	50.5	30.0
20TB+3SBS	20	3	70	61.5	58.0

表 2 改性沥青混合料的级配

Table 2 Gradation of modified asphalt mixture

Sieve size/ mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio (by mass)%	100.0	96.4	75.5	47.1	34.7	24.8	17.6	12.4	8.9	6.2

for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer(BBR)》,采用 Cannon 弯曲梁流变仪进行 BBR 试验.采用压力老化试验(PAV)后的沥青样品进行试验,设置平行试验 2 组,结果取平均值.分别加载 8、15、30、60、120、240 s,沥青小梁试件的弯曲蠕变劲度 S_t 为:

$$S_t = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (1)$$

式中: P 为跨中加载力; L 为跨径; b 为小梁试件宽度; h 为小梁试件厚度; $\delta(t)$ 为 t 时刻的跨中挠度.

取 60 s 时的 S_{60} 和蠕变曲线斜率 m_{60} 作为评价指标,并以 $S_{60} \leq 300$ MPa 和 $m_{60} \geq 0.3$ 作为控制指标进行低温 PG 分级的划分.

根据 ASTM D6816-11《Standard practice for determining low-temperature performance grade (PG) of asphalt binders》,首先通过 Christensen-Anderson-Marasteanu(CAM)模型构建弯曲蠕变劲度主曲线,然后采用 Hopkins and Hamming 方法将弯曲蠕变劲度主曲线换算成松弛模量主曲线,最后完成低温应力计算.假设从 0 °C 开始降温,降温速率为 1 °C/h,降温终点为 -45 °C,线膨胀系数 α 为 0.000 17,即可得到温度不断下降的情况下沥青内部产生的低温应力.

1.2.2 SCB 试验

采用预先开缝的圆盘形试件进行 SCB 试验.试件尺寸为 $\phi 150 \times 110$ mm,通过旋转压实成型.采用数控机床将成型好的圆柱形试件切割成厚度为 25 mm 的圆盘,将圆盘对中切开,并在跨中进行开缝,缝深(a)为 12.7、25.4、38.1 mm.试验温度为 -18 °C,设置 3 组平行试验,结果取平均值.加载前将试件置于 -18 °C 的冰箱进行保温,试验开始时取出并放置于 UTM-100 仪器上进行加载.为保证开裂速度均匀,根据预试验及文献调研,加载速率定为 0.5 mm/min,跨径为 120 mm. SCB 试验荷载-位移曲线见图 1.

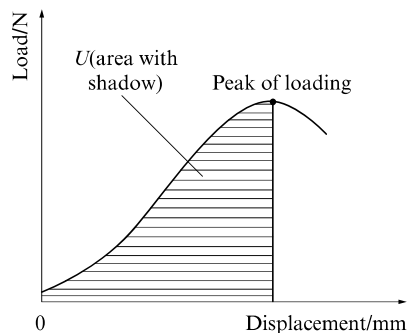


图 1 SCB 试验荷载-位移曲线

Fig. 1 Load-displacement curve of SCB test

采用应变能释放速率 J_c 值来评价混合料的低温抗裂性能, J_c 值与现场路面的开裂率有很好的相关性^[11-12],通常沥青混合料的 J_c 值越大,表明其抗裂性能越好. J_c 值由不同缝深下 SCB 试验的应变能密度 U (见图 1)来计算:

$$J_c = -\frac{1}{t} \frac{dU}{da} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 BBR 试验

2.1.1 低温 PG 分级

图 2 为改性沥青的低温 PG 分级结果.由图 2 可见:(1)对于 TB 胶粉改性沥青,TB 胶粉的掺量越高,沥青的低温 PG 分级温度越低,表明 TB 胶粉的加入能显著改善沥青低温性能.(2)对于 SBS 掺量为 3% 的 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青:随着 TB 胶粉掺量的增加,TB 胶粉复合 SBS 改性沥青的低温 PG 分级温度降低;当 TB 胶粉掺量由 5% 增加到 10% 时,改性沥青的低温 PG 分级温度明显降低;当 TB 胶粉掺量大于 10% 时,改性沥青的低温 PG 分级温度比较接近.说明在 TB 胶粉掺量较高时,SBS 的加

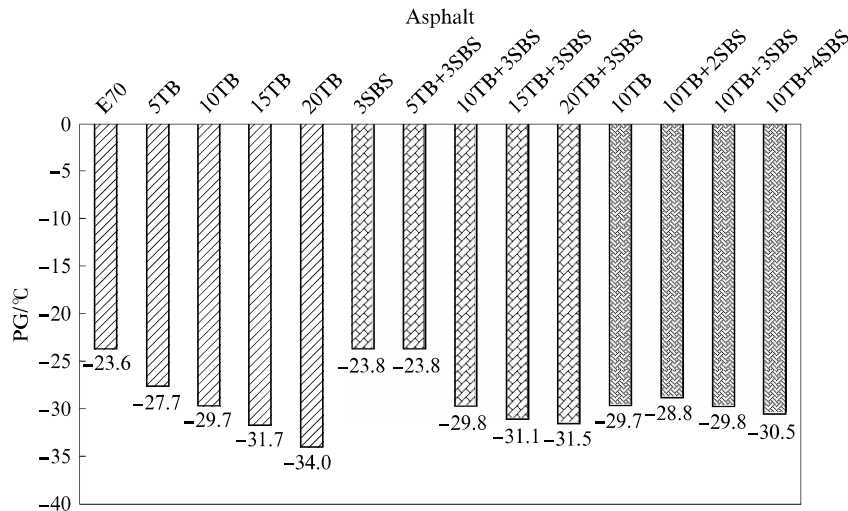


图2 改性沥青的低温 PG 分级结果

Fig. 2 Low temperature PG classification results of modified asphalts

人对沥青低温 PG 分级的改善效果并不显著。(3)对 TB 胶粉掺量为 10% 的 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青,随着 SBS 掺量的增加,改性沥青的低温 PG 分级温度比较接近,呈先上升后缓慢降低的趋势,由此可见 SBS 对 TB 胶粉改性沥青的低温性能改善并不明显,甚至还会损害 TB 胶粉改性沥青的低温性能。

2.1.2 低温应力

图 3 为改性沥青的低温应力曲线。由图 3 可见:随着温度的降低,沥青内部产生的低温应力逐渐增大;随着 TB 胶粉掺量的增加,相同温度下改性沥青的低温应力逐渐降低,且降低幅度较大;在 -30°C

时,基质沥青的低温应力明显高于 TB 胶粉改性沥青,不同 TB 胶粉掺量的 TB 胶粉改性沥青低温应力比较接近,说明 TB 胶粉的加入对沥青低温性能的改善非常显著;对于 TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青,加入 TB 胶粉后,沥青的低温应力也降低,10% TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青的低温应力最低,TB 胶粉掺量大于 10% 时,沥青的低温应力增大,这说明加入 3% SBS 后,TB 胶粉掺量不宜太高;对于 10% TB 胶粉复合 SBS 改性沥青,可以发现几种沥青的低温应力曲线比较接近,也证明了复合改性后, SBS 对沥青的低温性能改善并不显著。

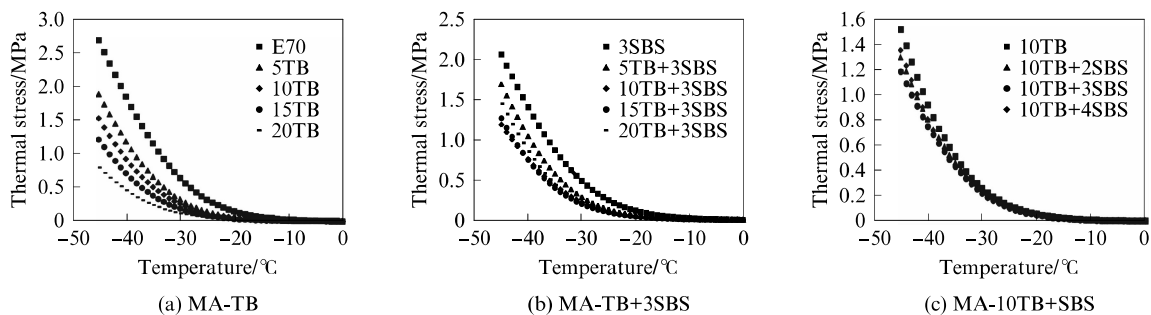


图3 改性沥青的低温应力曲线

Fig. 3 Thermal stress curves of modified asphalts

由图 3 还可见:加入 TB 胶粉后沥青的低温应力降低显著;20% TB 胶粉改性沥青的低温应力仅为基质沥青的 30%,降低幅度非常明显;加入 3% SBS 后,随着 TB 胶粉掺量的增加,改性沥青的低温应力出现了先降低后增加的趋势;对于 10% TB 胶粉改性沥青,随着 SBS 掺量的增加,沥青的低温应力也出现先降低后增加的趋势,但变化幅度并不大。

从低温应力结果来看,10% TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青是较优的复合改性方案。

2.2 SCB 试验

对 3 种缝深试件的应变能密度 U 进行线性拟合,得到 J_c 值,改性沥青混合料的低温 SCB 试验结果见表 3。由表 3 可见:随着 TB 胶粉掺量的增加, TB 胶粉改性沥青混合料的 J_c 值也随之增

加,表明其低温抗裂性变好;TB 胶粉掺量为 20% 时,改性沥青混合料的 J_e 值很大,表明其低温抗裂性改善效果极其显著;对 TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青来说,TB 胶粉掺量的增大使改性沥青混合料的 J_e 值提高、低温抗裂性能提升;在 10% TB 胶粉改性沥青中掺加不同掺量的 SBS,少量的 SBS(2%)可使改性沥青混合料的 J_e 值增大,其

低温抗裂性有一定的提高,而随着 SBS 掺量的增加,混合料的 J_e 值降低,表明其低温抗裂性变差。加入 SBS 后,随着 SBS 掺量的增加,混合料的低温抗裂性能逐渐下降,这与低温 PG 分级变化趋势截然相反,说明对于 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青,沥青的低温性能优劣并不能代表混合料的低温抗裂性好坏。

表 3 改性沥青混合料的低温 SCB 试验结果
Table 3 Low temperature SCB test results of modified asphalt mixtures

Asphalt	U/kJ			Regression equation	J_e
	$a=12.7\text{ mm}$	$a=25.4\text{ mm}$	$a=38.1\text{ mm}$		
E70	0.77	0.47	0.15	$y/25=-0.976x+0.0433, R^2=0.9999$	0.98
3SBS	1.08	0.52	0.16	$y/25=-1.442x+0.0602, R^2=0.9837$	1.44
5TB	1.23	0.88	0.21	$y/25=-1.617x+0.0720, R^2=0.9705$	1.62
5TB+3SBS	1.17	0.63	0.30	$y/25=-1.382x+0.0632, R^2=0.9827$	1.38
10TB	1.59	1.02	0.17	$y/25=-2.231x+0.0938, R^2=0.9867$	2.23
10TB+2SBS	2.28	1.61	0.22	$y/25=-3.246x+0.1374, R^2=0.9615$	3.25
10TB+3SBS	1.66	0.62	0.33	$y/25=-2.087x+0.0879, R^2=0.9045$	2.09
10TB+4SBS	1.19	0.91	0.00	$y/25=-1.872x+0.0755, R^2=0.9137$	1.87
15TB	2.38	0.65	0.47	$y/25=-3.014x+0.1232, R^2=0.8220$	3.01
15TB+3SBS	1.89	0.33	0.44	$y/25=-2.273x+0.0933, R^2=0.6936$	2.27
20TB	4.89	1.51	0.83	$y/25=-6.387x+0.2587, R^2=0.8717$	6.39
20TB+3SBS	3.51	1.11	0.35	$y/25=-4.976x+0.1927, R^2=0.9178$	4.98

2.3 低温指标相关分析

沥青低温 PG 分级是现行评价沥青低温性能最常用的指标,将其与沥青的低温应力、混合料的 J_e 值进行相关性分析,结果如图 4、5 所示。由图 4、5 可见:TB 胶粉改性沥青的低温 PG 分级温度与其低温应力存在很强的线性相关关系,与混合料 J_e 值也存在一定线性相关关系,即 TB 胶粉改性沥青的 PG 分级温度可以表征沥青及混合料的低温性能,沥青低温 PG 分级温度越低,低温应力越小,其混合料的 J_e 值越大,低温抗裂性越小;TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青的低温 PG 分级温度与其低温应力以及混

合料 J_e 值的相关系数均比较低,但随着沥青低温 PG 分级温度的变化,其低温应力与混合料 J_e 值的变化趋势与 TB 胶粉改性沥青相同,即复合改性沥青的低温 PG 分级温度在一定程度上也能反应沥青及其混合料低温性能的优劣;10%TB 胶粉复合 SBS 改性沥青的低温 PG 分级温度与低温应力之间的相关性很低,而与其混合料 J_e 值的相关性很高。有趣的是,线性相关分析结果显示,随着 10%TB 胶粉复合 SBS 改性沥青低温 PG 分级温度的变化,其低温应力与混合料 J_e 值的变化趋势与 TB 胶粉改性沥青以及 TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青的变化趋势

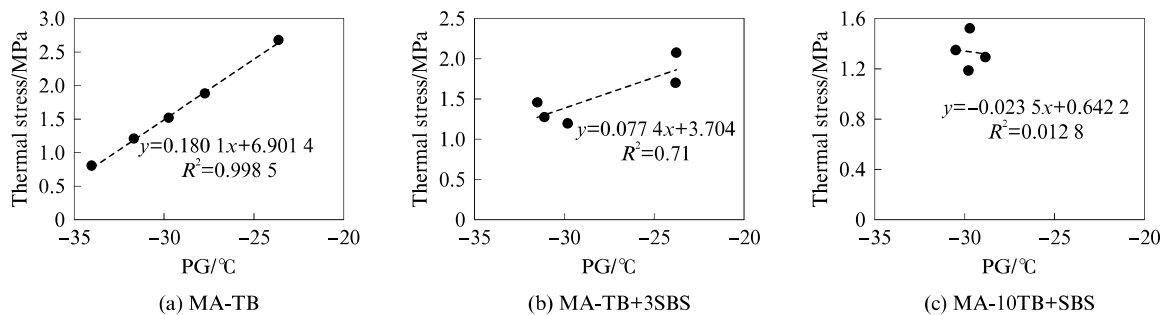


图 4 低温 PG 分级与低温应力的相关性分析

Fig. 4 Relationship between low temperature PG and thermal stress

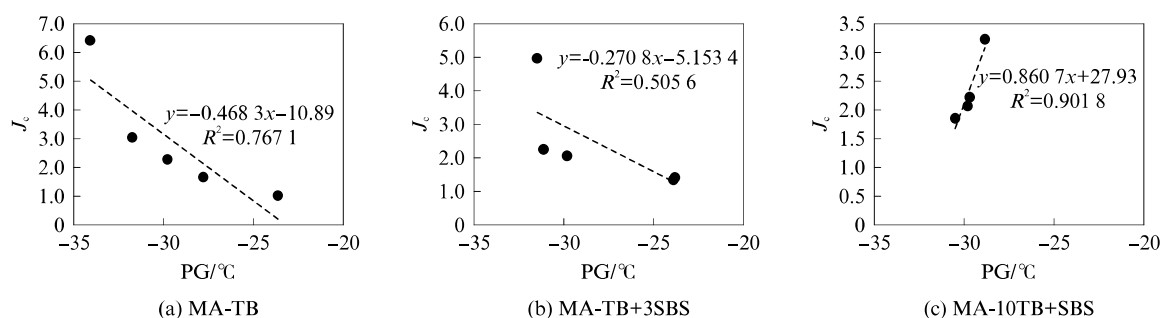


图5 低温 PG 与应变能释放速率的相关性分析

Fig. 5 Relationship between low temperature PG and J_e value

相反,即较低的低温 PG 分级温度反而会使得沥青低温应力更高,混合料的 J_e 值更小,低温抗裂性变差.因此对 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青来说,SBS 的掺入使沥青体系变得更加复杂,低温 PG 分级不能反映实际复合改性沥青及其混合料的低温抗裂性能,需要用其他指标对其低温性能进行综合评价.

3 结论

(1)与基质沥青相比,TB 胶粉改性沥青具有优异的低温性能,且随着 TB 胶粉掺量的增加,TB 胶粉改性沥青的低温 PG 分级温度下降,沥青低温应力变小,混合料应变能释放速率 J_e 值增大,低温抗裂性增强.

(2)TB 胶粉复合 3% SBS 改性沥青及其混合料的低温性能高于基质沥青,且随着 TB 胶粉掺量的增加,复合改性沥青的低温性能改善效果较为显著,但低于相应掺量的 TB 胶粉改性沥青.

(3)随着 SBS 掺量的增加,10% TB 胶粉复合 SBS 改性沥青的低温性能变化并不明显,而其混合料的 J_e 值变小,低温抗裂性能变差.

(4)TB 胶粉改性沥青的低温 PG 分级可以很好地反映沥青及其混合料的低温性能,而 TB 胶粉复合 SBS 改性沥青不能通过单一的 PG 分级来评价其低温性能,需要结合其他指标共同评价.

参考文献:

- [1] BOULDIN M G, DONGRE R, ROW G M, et al. Predicting thermal cracking of pavements from binder properties: Theoretical basis and field validation [C]// Association of Asphalt Paving Technologists. St Paul: The National Academies Press, 2000: 69.
- [2] 吕泉, 黄卫东, 柴冲冲. Terminal Blending 橡胶沥青的特性与应用前景 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 51-55.
- LÜ Quan, HUANG Weidong, CHAI Chongchong. Properties

and application of terminal blending rubber asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2014, 33(4): 51-55. (in Chinese)

- [3] WANG T, XIAO F P, AMIRKHANIAN S, et al. A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials [J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 483-505.
- [4] LI B L, HUANG W D, TANG N P, et al. Evolution of components distribution and its effect on low temperature properties of terminal blend rubberized asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 598-608.
- [5] 黄卫东, 郑茂, 黄明. 溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳性能 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1543-1549.
- HUANG Weidong, ZHENG Mao, HUANG Ming. Fatigue performance of terminal blend rubberized asphalt mixture [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(10): 1543-1549. (in Chinese)
- [6] 黄卫东, 郑茂, 黄明. 多种沥青混合料疲劳性能的比较 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 1089-1094.
- HUANG Weidong, ZHENG Mao, HUANG Ming. Fatigue performance comparison of various kinds of asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 1089-1094. (in Chinese)
- [7] 黄卫东, 傅星恺, 李彦伟, 等. SBS 类改性沥青低温性能评价及指标相关性分析 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 460-467.
- HUANG Weidong, FU Xing kai, LI Yanwei, et al. Evaluation of low temperature performance and correlation analysis on low temperature indexes of SBS modified asphalts [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 460-467. (in Chinese)
- [8] 魏相荣. TB 与 SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究 [J]. 公路工程, 2016(41): 249-255.
- WEI Xiangrong. Asphalt and mixture performance TB and SBS compound modified [J]. Highway Engineering, 2016(41): 249-255. (in Chinese)
- [9] 董瑞琨, 郑茂, 黄卫东, 等. 考虑自愈补偿的多种沥青混合料疲劳性能比较 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 87-92.
- DONG Ruikun, ZHENG Mao, HUANG Weidong, et al. Fatigue performance comparison of various kinds of asphalt mixtures with self-healing compensation considered [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 87-92. (in Chinese)

(下转第 152 页)