

# 老化 CR/SBS 复合改性沥青混合料弯曲 疲劳特性试验研究

杨侣珍<sup>1</sup>, 张允宝<sup>2,3</sup>

(1. 湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 410132; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院; 3. 湖南省交通建设造价管理站)

**摘要:** 为了研究橡胶粉(CR)/SBS 复合改性沥青混合料的耐久性, 该文对比分析了老化前后 CR/SBS 复合改性沥青混合料的路用性能及不同弯曲模式下的疲劳特性。首先, 基于响应曲面法进行试验设计, 根据 CR/SBS 复合改性沥青针入度、软化点、延度试验结果确定了 CR/SBS 的最佳掺量。然后, 通过短期老化、长期老化制备了不同老化程度的 AC-13CR/SBS 复合改性沥青混合料试件。最后, 进行了不同老化程度 CR/SBS 复合改性沥青混合料高温、低温、水稳定性能及两点弯曲、半圆弯曲、四点弯曲疲劳性能测试。结果表明: CR/SBS 复合改性沥青的最佳掺量为 15% 橡胶粉、3% SBS; CR/SBS 复合改性沥青混合料路用性能对老化的敏感程度较低, 抗老化性能显著; 弯曲疲劳寿命: 四点弯曲 > 半圆弯曲 > 两点弯曲, 应力敏感程度: 两点弯曲 > 四点弯曲 > 半圆弯曲, 不同老化程度下得出的结论一致; 疲劳方程参数对老化敏感程度: 半圆弯曲 > 四点弯曲 > 两点弯曲。

**关键词:** 老化程度; CR/SBS 复合改性; 路用性能; 弯曲疲劳

中国近 54% 的国土面积属于季冻区, 这些地区的气候特点为夏季持续高温多雨, 冬季严寒漫长, 像西北和东北地区, 代表性的“冰城”哈尔滨, 路面温度处于  $-40 \sim 70^{\circ}\text{C}$ , 跨度可达  $110^{\circ}\text{C}$ 。这对沥青路面的性能提出了很高要求, 既要有良好的高温抗车辙能力、低温抗裂缝延展能力, 还需要一定的抗疲劳性能和抗老化能力。改性沥青是解决这一问题的有效措施, 已在实际生产过程中有大量应用, 如 SBS、SBR、PE、橡胶粉等, 但单一改性剂的综合性能难以得到保证, 复合改性沥青技术应运而生。

橡胶粉(CR)/SBS 复合改性作为目前较为常见且已经有实际应用的复合改性技术受到越来越多的关注。CR/SBS 复合改性沥青的改性机理、微观结构、高低温特性和混合料路用性能均已有较为系统的研究。结果表明: 其具有良好的高温、低温、水稳定性能, 是一种潜在的能适用于季冻区的复合材料, 但对其混合料在抗老化性能和抗疲劳性能方面研究较少, 特别是对不同老化程度复合改性沥青混合料的疲劳性能缺乏全面的评价。

该文基于响应曲面法, 通过三大指标常规试验确定 CR/SBS 复合改性沥青的最佳掺量, 在此基础上对

其混合料进行短期老化和长期老化制备得到不同老化程度复合改性沥青混合料, 测试不同老化程度下复合改性沥青混合料路用性能和疲劳性能, 得到其随老化程度的变化规律, 以全面评价 CR/SBS 复合改性沥青混合料的耐久性。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

试验采用的基质沥青为环烷基原油生产的镇海 AH-70<sup>#</sup> 道路石油沥青, 其  $25^{\circ}\text{C}$  针入度为 75 (0.1 mm),  $10^{\circ}\text{C}$  延度为 31 cm, 环球法测得的软化点为  $58^{\circ}\text{C}$ 。SBS 采用线形热塑性丁苯橡胶 SBSYH-791H (1301-1), 橡胶粉采用 40 目废旧斜交轮胎橡胶粉。

### 1.2 试验方法

复合改性沥青制备: 将 70<sup>#</sup> 基质沥青在烘箱中加热至  $150^{\circ}\text{C}$ , 待基质沥青具有一定的流动性, 加入一定比例的 SBS、废旧橡胶粉、相容剂、稳定剂, 温度控制在  $180^{\circ}\text{C}$  左右, 将剪切仪转速增至 5 000 r/min, 剪切 60 min 后置于烘箱中发育 30 min, 制得复合改性沥青。

三大指标试验: 依据 JTG E20-2011《公路工程沥

青及沥青混合料试验规程》，采用 T0604—2011 测试 25℃条件下 CR/SBS 复合改性沥青针入度、T0605—2011 测试 5℃沥青延度、T0606—2011 测试沥青软化点(环球法)。

老化试验:采用 T0734—2000 对热拌沥青混合料进行短期老化,老化温度 135℃,时长 4 h,短期老化后成型试件进行长期老化,老化温度 85℃,时长 120 h。

路用性能试验:采用 T0719—2011 进行车辙试验,以动稳定度检验混合料高温稳定性,T0715—2011 进行弯曲试验测量低温破坏应变评价低温性能,T0709—2011、T0729—2011 进行马歇尔及浸水马歇尔稳定度试验、冻融劈裂试验评价沥青混合料水稳定性。

疲劳性能试验:两点弯曲试件采用轮碾压实仪成型,取沥青混合料长方体板正中部分切割成上底 25 mm×25 mm、下底 25 mm×56 mm、高 250 mm 的梯形悬臂梁;半圆弯曲试件采用旋转压实成型的大直径圆柱体试件(直径 150 mm、高度 180 mm)切割而成,首先将圆柱体试件两端上下对称各切除 15 mm,然后进行三等分十字切割成 6 个直径为 150 mm、厚度为 50 mm 的半圆试件;四点弯曲试件由轮碾成型的沥青混合料板块切割而成,其长度为 380 mm、厚度 50 mm、宽度 63.5 mm。

采用 T0739—2011 进行四点弯曲疲劳寿命试验,两点弯曲疲劳试验采用欧洲 EN 12697—24《Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt》标准,半圆弯曲试验参考美国标准。两点弯曲、半圆弯曲和四点弯曲疲劳试验条件保持一致,试验温度均为 15℃,采用正弦波加载模式,加载频率 10 Hz。疲劳试验采用应力控制,选用 0.2、0.4、0.5、0.6、0.8 共 5 个应力比,每个试件进行 5 次平行试验。

2 CR/SBS 复合改性沥青最佳沥青掺量及混合料路用性能

2.1 基于响应曲面法的最佳 CR/SBS 掺量确定

根据已有研究,SBS(2%、2.5%、3%、3.5%、4%),橡胶粉(10%、15%、20%、25%、30%)均采用 5 种掺量作为备选掺量(内掺),其中相容剂掺量为 1.5%、稳定剂掺量为 0.6%。根据响应曲面法进行试验设计,在此基础上对原材料进行高速剪切制备得到不同掺量 CR/SBS 复合改性沥青,然后对其进行三大指标常规性能试验,试验设计及结果见表 1。

表 1 试验设计及结果

编号	橡胶粉掺量/%	SBS 掺量/%	针入度 (25℃)/(0.1 mm)	软化点/℃	延度(5℃, 5 cm/min)/cm
1	10	2.0	62.5	74.9	29.1
2	30	2.0	75.0	66.8	16.4
3	10	4.0	82.4	55.1	52.9
4	30	4.0	89.8	46.1	44.5
5	20	2.0	68.9	68.2	20.9
6	10	3.0	68.8	67.4	42.1
7	30	3.0	82.0	60.9	30.0
8	20	4.0	86.7	49.6	47.7
9	15	2.5	68.4	67.5	31.4
10	25	2.5	74.5	63.1	22.0
11	15	3.5	77.6	58.3	44.7
12	25	3.5	85.1	53.7	40.5
13	20	2.5	71.1	65.9	27.8
14	15	3.0	71.0	65.7	39.9
15	25	3.0	79.1	62.4	33.8
16	20	3.5	81.7	55.8	42.7
17	20	3.0	74.6	63.6	36.3

依据此试验结果,利用 Expert—Design 程序进行统计学分析,以达到寻找研究范围内最佳掺量的目的。

(1) 软化点

软化点 Expert—Design 分析结果分别见图 1、2 及表 2。

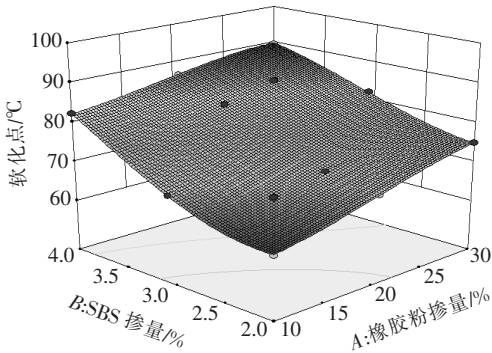


图 1 软化点对 SBS、橡胶粉掺量响应曲面图

软化点预测方程:

$$S = 75.55 + 7.81A + 10.59B - 1.12AB - 0.29A^2 + 2.28B^2 - 0.26A^2B - 1.68AB^2 - 1.17A^3 - 1.67B^3$$

$$R^2 = 0.995$$

式中:S 为软化点;A 为橡胶粉掺量;B 为 SBS 掺量。

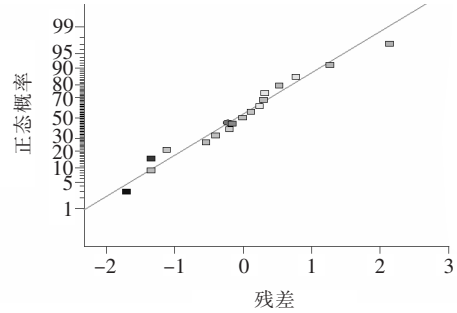


图2 软化点实测值与预测值分布

表2 软化点数值分析

项目	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	898.69	9	99.85	170.60	<0.000 1	
CR 掺量	50.62	1	50.62	86.48	<0.000 1	显著
SBS 掺量	93.25	1	93.25	159.31	<0.000 1	

(2) 针入度

针入度 Expert—Design 分析结果分别见图 3、4 及表 3。

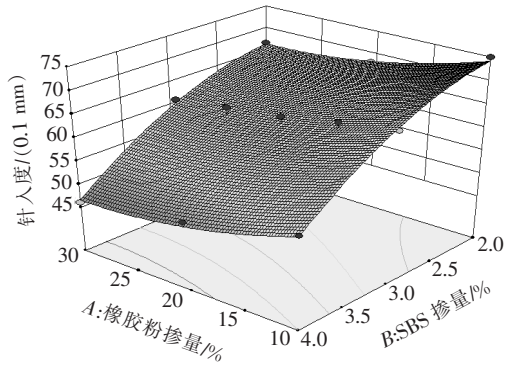


图3 针入度对 SBS、橡胶粉掺量响应曲面图

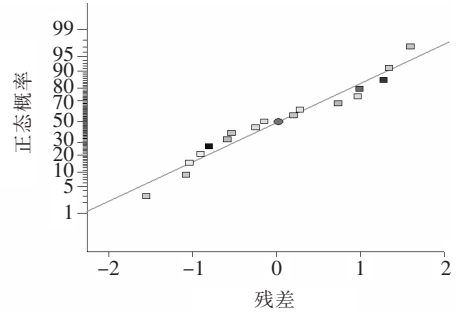


图4 针入度实测值与预测值分布

表3 针入度数值分析

项目	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	877.12	5	175.42	131.63	<0.000 1	
CR 掺量	118.01	1	118.01	88.55	<0.000 1	显著
SBS 掺量	719.32	1	719.32	539.73	<0.000 1	

针入度预测方程：

$$P=62.18-3.97A-9.79B-0.22AB+2.05A^2-3.65B^2$$
$$R^2=0.984$$

式中:  $P$  为针入度;  $A$  为橡胶粉掺量;  $B$  为 SBS 掺量。

(3) 延度

延度 Expert—Design 分析结果分别见图 5、6 及表 4。

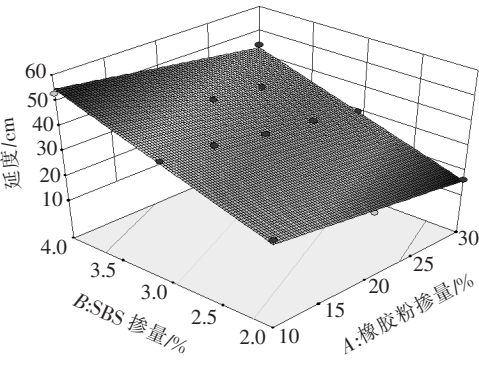


图5 延度对 SBS、橡胶粉掺量响应曲面图

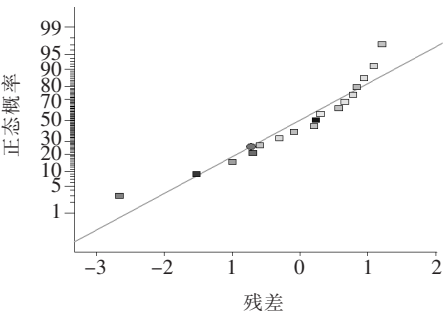


图6 延度实测值与预测值分布

表4 延度数值分析

项目	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	1 635.67	2	817.83	353.88	<0.000 1	
CR 掺量	247.11	1	247.11	106.92	<0.000 1	显著
SBS 掺量	1 388.56	1	1 388.56	600.83	<0.000 1	

延度预测方程：

$$D=35.45-5.74A+13.61B$$
$$R^2=0.981$$

式中:  $D$  为延度;  $A$  为橡胶粉掺量;  $B$  为 SBS 掺量。

依据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中表 4.6.2 聚合物改性沥青技术要求,按照适用于西北和东北地区的 I—C 级标准,结合响应曲面法确定 CR/SBS 最佳掺量,见表 5,取整得 CR 掺量为 15%, SBS 掺量为 3%。

表 5 最佳掺量

橡胶 粉掺 量/%	SBS 掺量/ %	针入度 (25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度(5℃, 5 cm/min)/ cm
14.57	3.13	72.8	63.6	40.3
技术要求		60~80	>55	>30

2.2 CR/SBS 复合改性沥青路用性能验证

为了验证 CR/SBS 复合改性沥青最佳掺量的合

理性并揭示其路用性能随老化程度的变化规律,选用 AC—13 细粒式 CR/SBS 复合改性沥青混合料,成型马歇尔试件(180℃)确定最佳油石比(6.9%)和设计空隙率(4.0%),对 CR/SBS 复合改性沥青混合料进行短期老化和长期老化试验得到不同老化程度复合改性沥青混合料,并测试其路用性能。

对不同老化程度复合改性沥青混合料进行车辙试验、低温弯曲试验、标准马歇尔、浸水马歇尔稳定度试验和冻融循环前后的劈裂强度试验,试验结果见表 6~9。

表 6 车辙动稳定度试验结果

老化程度	车辙动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )				变异系 数/%	规范要求/ (次·mm <sup>-1</sup> )
	1	2	3	平均值		
未老化	7 677	8 243	8 431	8 117	4.83	2 800
短期老化	8 235	9 333	9 182	8 916	6.67	—
长期老化	9 326	11 234	11 049	10 536	9.98	—

表 7 低温弯曲试验结果(—10℃)

老化程度	破坏强度/ MPa	破坏劲度 模量/MPa	破坏应变/ με
未老化	4.11	1 106	3 715
短期老化	5.12	1 493	3 428
长期老化	5.55	1 743	3 183

表 8 浸水马歇尔残留稳定度试验结果

老化程度	标准马歇尔		浸水马歇尔(48 h)		残留稳 定度 S <sub>0</sub> /%
	稳定 度/kN (0.1 mm)	流值/ (0.1 mm)	稳定 度/kN (0.1 mm)	流值/ (0.1 mm)	
未老化	11.32	29.50	10.25	32.10	90.5
短期老化	12.98	25.44	11.07	27.14	85.2
长期老化	15.01	21.86	12.56	23.78	83.6

表 9 冻融劈裂残留强度比试验结果(—10℃)

老化程度	劈裂抗拉强度/MPa		冻融劈裂抗拉 强度比 TSR/%
	未冻融循环	冻融循环后	
未老化	0.89	0.79	86.51
短期老化	1.05	0.85	80.95
长期老化	1.14	0.87	76.32

综合不同老化程度 CR/SBS 复合改性沥青混合料路用性能试验结果,可以得出:在最佳 CR/SBS 掺量条件下,CR/SBS 复合改性沥青混合料高温、低温性能满足夏炎热—冬严寒地区的技术要求,水稳定性满

足湿润区使用要求,且经过短期老化和长期老化后,其路用性能仍能符合检验技术要求,CR/SBS 复合改性沥青混合料表现出良好的抗老化能力。为了充分评价 CR/SBS 复合改性沥青混合料的耐久性,开展不同弯曲模式疲劳试验,进一步研究其疲劳特性。

3 老化 CR/SBS 复合改性沥青混合料疲劳特性

目前常用的沥青混合料疲劳测试方法有单轴压缩、间接拉伸、直接拉伸、两点弯曲、三点弯曲、四点弯曲、半圆弯曲等,不同的测试方法得到的试验结果相差甚远,很难得出唯一的结论。研究表明:沥青路面的疲劳破坏多以弯拉破坏为主,故选取两点弯曲、半圆弯曲、四点弯曲疲劳试验以综合评价 CR/SBS 复合改性沥青混合料疲劳性能,不同老化程度弯曲疲劳试验结果见表 10。

由表 10 可知:① 3 种疲劳模式下的疲劳寿命有一定的差距,其中四点弯曲的疲劳寿命最大,半圆弯曲次之,两点弯曲最小;② 从变异系数来看,半圆弯曲疲劳寿命离散性最小,变异系数全部控制在 15%以内,两点弯曲变异系数高达 29.68%,四点弯曲高达 25.74%。

究其原因,这与试件的制作方式和应力状态相关,两点弯曲试件采用等腰梯形梁,最大应力点出现在距试件底部 1/3 处,试件尺寸很难达到精度要求,从而造



表 10 不同老化程度弯曲疲劳试验结果(15 ℃)

老化程度	应力比	两点弯曲试验			半圆弯曲试验			四点弯曲试验		
		疲劳寿命/次	标准差/次	变异系数/%	疲劳寿命/次	标准差/次	变异系数/%	疲劳寿命/次	标准差/次	变异系数/%
未老化	0.2	16 642	3 540	21.27	27 752	2 675	9.63	53 264	6 636	12.45
	0.4	3 345	540	16.14	8 131	544	6.69	14 394	1 933	13.42
	0.5	1 479	439	29.68	5 476	657	11.99	8 564	1 544	18.02
	0.6	1 234	140	11.35	3 564	451	12.65	5 546	934	16.84
	0.8	256	37	14.45	1 364	185	13.56	1 534	395	25.74
短期老化	0.2	14 892	1 418	9.52	22 123	2 424	10.95	40 127	7 832	19.51
	0.4	3 189	396	12.42	6 543	563	8.60	10 398	1 421	13.66
	0.5	1 283	75	5.85	3 211	140	4.36	6 210	612	9.85
	0.6	728	78	10.71	2 156	303	14.05	3 456	244	7.06
	0.8	201	45	22.39	1 012	139	13.73	1 223	258	21.09
长期老化	0.2	11 328	2 335	20.61	19 282	2 480	12.86	23 908	3 723	15.57
	0.4	1 387	90	6.49	3 791	279	7.35	5 349	1 307	24.43
	0.5	843	43	5.10	1 531	147	9.60	3 127	799	25.55
	0.6	362	45	12.43	1 023	148	14.46	1 225	48	3.91
	0.8	123	21	17.07	294	23	7.82	316	42	13.29

成理论开裂位置和实际开裂位置出现偏差;四点弯曲采用长方体梁,试件尺寸较易精确控制,且两个加载点之间的梁受力状态保持一致,但对于非均质的沥青混合料来说,理论开裂位置为一区域,这无疑增大了缺陷出现的概率,从而造成离散性偏大;半圆弯曲为圆柱体试件切割一分为二得到,一方面保证了两个半圆试件的一致性;另一面试件受力模式唯一,最大应力点始终为底部跨中位置,更能真实反映材料的疲劳抗力。

3.1 两点弯曲疲劳

在双对数坐标中对两点弯曲疲劳试验结果进行线性拟合,采用经典 S-N 疲劳方程  $N_f = k \left(\frac{1}{t}\right)^n$ ,其他弯曲模式保持一致,拟合结果如图 7 及表 11 所示。

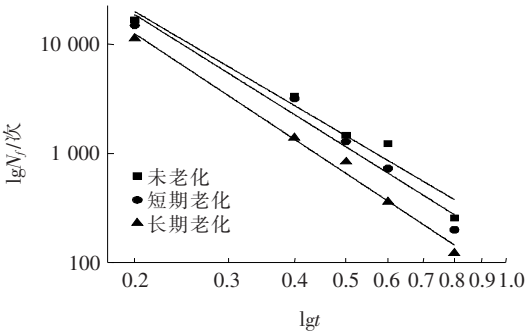


图 7 不同老化程度两点弯曲疲劳方程(双对数坐标图)

表 11 不同老化程度两点弯曲疲劳方程拟合参数

老化程度	拟合参数		
	k	n	R <sup>2</sup>
未老化	199	2.86	0.95
短期老化	138	3.04	0.96
长期老化	71	3.21	0.99

从图 7、表 11 可以看出:疲劳寿命和应力比有较好的线性相关关系。随着老化程度的加剧,两点弯曲疲劳寿命逐渐减小,短期老化后的疲劳寿命与未老化相差较小,这说明 CR/SBS 复合改性沥青混合料在施工拌和摊铺过程中的疲劳损伤较少;不同应力比条件下,长期老化后的两点弯曲疲劳寿命为未老化的 29%~68%,同时其疲劳寿命对应力大小也越发敏感,说明老化作用对复合改性沥青混合料产生了不利影响,这是因为沥青在老化过程中变硬变脆,黏性成分减少,故在路面设计中应考虑老化带来的疲劳损伤。但在应力比为 0.2 的条件下,其两点弯曲疲劳寿命仍有未老化的 68%,也就是说在没有超载严重的情况下,服役多年后的 CR/SBS 复合改性沥青混合料仍具有较好的抗疲劳性能。

3.2 半圆弯曲疲劳

在双对数坐标中对半圆弯曲疲劳试验结果进行线

性拟合,拟合结果如图 8 及表 12 所示。

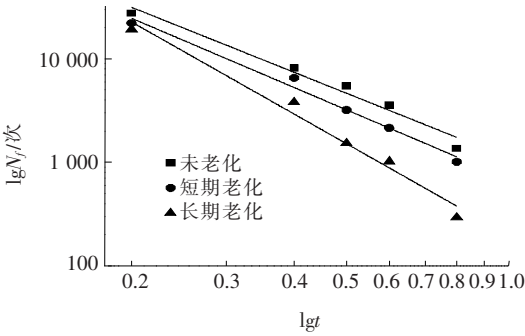


图 8 不同老化程度半圆弯曲疲劳方程(双对数坐标图)

表 12 不同老化程度半圆弯曲疲劳方程拟合参数

老化程度	拟合参数		
	$k$	$n$	$R^2$
未老化	1 096	2.08	0.97
短期老化	676	2.22	0.98
长期老化	195	2.95	0.97

从图 8、表 12 可以看出:半圆弯曲疲劳寿命和应力比有很好的线性相关关系,相关系数均达到 0.97。老化将导致 CR/SBS 复合改性沥青混合料半圆弯曲疲劳寿命对应力越发敏感。随着老化程度的加剧,半圆弯曲疲劳寿命逐渐减小,短期老化后的疲劳寿命与未老化相差较小,长期老化后疲劳寿命显著减小;不同应力比条件下,短期老化后的半圆弯曲疲劳寿命为未老化的 59%~80%,长期老化后的半圆弯曲疲劳寿命为未老化的 21%~69%,但在应力比为 0.2 时,短期和长期老化之后半圆弯曲疲劳寿命仍有未老化时的 79%和 69%,同样说明低应力比条件下 CR/SBS 复合改性沥青混合料具有一定的抗老化和疲劳性能。

3.3 四点弯曲疲劳

在双对数坐标中对四点弯曲疲劳试验结果进行线性拟合,拟合结果如图 9 及表 13 所示。

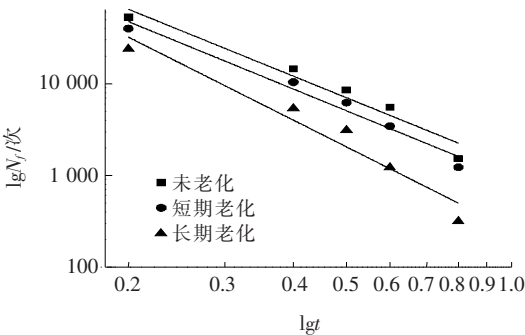


图 9 不同老化程度四点弯曲疲劳方程(双对数坐标图)

表 13 不同老化程度四点弯曲疲劳方程拟合参数

老化程度	拟合参数		
	$k$	$n$	$R^2$
未老化	1 288	2.43	0.94
短期老化	912	2.44	0.96
长期老化	251	3.00	0.92

从图 9、表 13 可以看出:四点弯曲疲劳寿命和应力比有较好的线性相关关系。随着老化程度的加剧,四点弯曲疲劳寿命逐渐减小,其疲劳寿命对应力大小也越发敏感,短期老化后的疲劳寿命与未老化相差较小,这与两点弯曲和半圆弯曲得出的结论一致;但在不同应力比条件下,短期老化后的四点弯曲疲劳寿命均为未老化的 72%左右;相对未老化,长期老化后的疲劳寿命随应力比的增大而折减得更为明显,最低可折减到原来的 20%。由此可见,如有超载,对老化后的 CR/SBS 复合改性沥青混合料产生的疲劳损伤是极其不利的。

3.4 弯曲疲劳特性比较

对不同弯曲模式和不同老化程度的 CR/SBS 复合改性沥青混合料疲劳方程进行汇总分析(图 10、11),并分析其疲劳方程拟合参数的变化规律,以期深入评价 CR/SBS 复合改性沥青混合料的抗老化和抗弯曲疲劳特性。

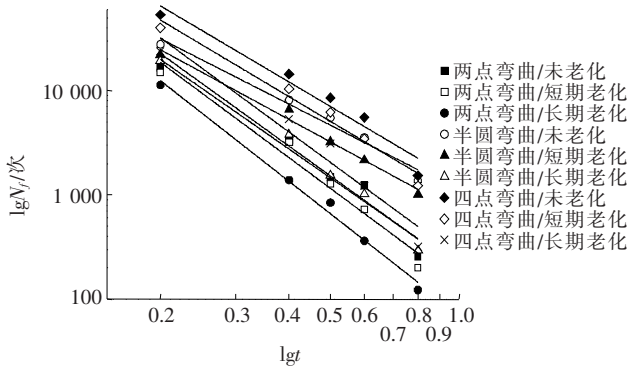


图 10 不同老化程度弯曲疲劳方程对比(双对数坐标图)

图 10、11 表明:对于 CR/SBS 复合改性沥青混合料,同种老化程度,不同弯曲模式的疲劳方程差异明显,同种弯曲模式,不同老化程度的疲劳方程不尽相同。

整体来看,无论何种老化程度,四点弯曲的疲劳曲线线位最高,半圆弯曲次之,两点弯曲最低,线位越高,说明耐久性更好,但显然,对于同一种材料,其耐久性应是唯一的,这就涉及到耐久性评价方式的选取,从

疲劳试验的离散性和拟合方程的相关性来说,半圆弯曲是一个好的选择。从 CR/SBS 复合改性沥青混合料对应力的敏感性,也即参数  $n$  值来看,两点弯曲最大,四点弯曲次之,半圆弯曲的  $n$  值总体为最小, $n$  值越小说明对应力越发不敏感,这也反映出半圆弯曲的一定优势,因为其可以消除部分人为因素引起的试验加载条件误差。因此,半圆弯曲试验用来评价老化 CR/SBS 复合改性沥青混合料的弯曲疲劳特性更具合理性和适用性。

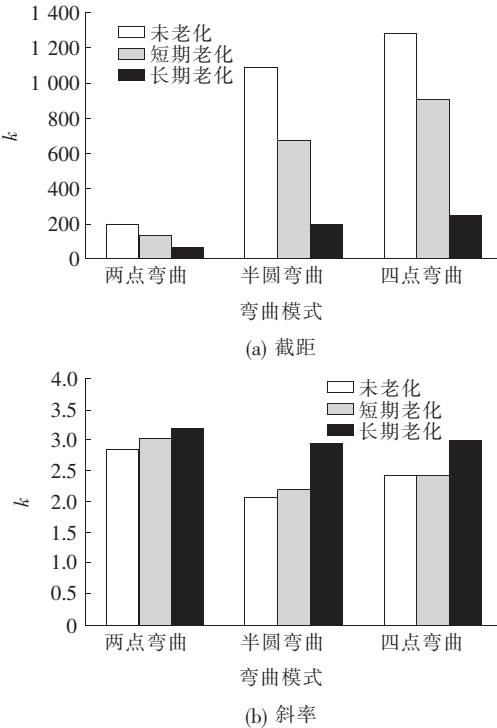


图 11 不同老化程度弯曲疲劳方程拟合参数对比

图 12 为不同弯曲模式疲劳方程拟合参数对老化的敏感性分析,即以未老化时的疲劳参数作为分母(基准为 1),短期老化和长期老化的疲劳方程参数作为分子,两者相比描述  $k$ 、 $n$  参数随老化程度加剧的相对变化。各点之间用水平阶梯中心线连接,从而更为直观地描述参数对老化的敏感性。

从图 12 可以看出: $k$  的相对变化在水平线 1 以上, $n$  的相对变化在水平线 1 以下。对于  $k$ ,水平线位越高,说明对老化越敏感;对于  $n$ ,水平线位越低,说明对老化更敏感。可以直观地得出,半圆弯曲疲劳方程参数对老化最为敏感,四点弯曲次之,对老化最不敏感的为两点弯曲。因此,不同弯曲模式中,评价 CR/SBS 复合改性沥青混合料的抗老化性能,半圆弯曲同样是一个较好的选择。

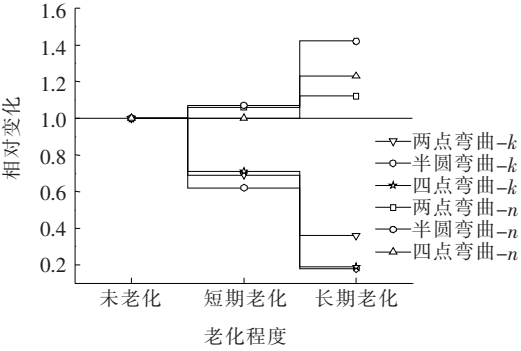


图 12 弯曲疲劳方程参数老化敏感性分析

4 结论

- (1) 针入度、软化点、延度试验结果表明:在掺量研究范围内,当 CR/SBS 复合改性沥青中橡胶粉掺量为 15%、SBS 掺量为 3% 时,制备得到的改性沥青效果最优,能完全满足季冻区技术要求。
- (2) 最佳 CR/SBS 掺量条件下,CR/SBS 复合改性沥青混合料的路用性能符合夏炎热一冬严寒地区技术要求,且经过短期老化甚至长期老化后,其高温、低温、水稳定性仍满足使用需求,表现出良好的抗老化性能。
- (3) 两点弯曲、半圆弯曲、四点弯曲 3 种模式下,CR/SBS 复合改性沥青混合料疲劳寿命大小关系为:四点弯曲>半圆弯曲>两点弯曲,其中以半圆弯曲的离散性最小,拟合度最高。
- (4) 3 种弯曲模式均表明:相比未老化,经过短期和长期老化后的 CR/SBS 复合改性沥青混合料疲劳寿命递减,设计中应考虑老化带来的寿命折减,低应力比条件下,老化对其影响较小,应力比为 0.2 时,疲劳寿命可保持未老化时的 69%。
- (5) CR/SBS 复合改性沥青混合料 3 种弯曲疲劳方程参数对老化敏感程度大小依次为:半圆弯曲>四点弯曲>两点弯曲,综合结论(3),建议以半圆弯曲试验评价 CR/SBS 复合改性沥青混合料疲劳特性。

参考文献:

[1] 王明,余红伟,魏微. 橡胶粉/SBS 复合改性沥青研究进展[J]. 弹性体,2016(2).

[2] 杨光,申爱琴,陈志国,等. 季冻区橡胶粉/SBS 复合改性沥青工厂化参数分析与性能评价[J]. 公路交通科技,2015(12).

[3] 刘梦梅,韩森,任万艳,等. 橡胶和 SBS 对排水沥青混合料性能影响的试验研究[J]. 中外公路,2018(3).

# 预留远期改扩建条件下高速公路超前设计探讨

张金, 张焱发, 潘丹

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 该文结合工程设计经验, 对考虑到预留远期扩建八车道条件下, 现阶段实按四车道高速公路建设, 超前设计时需重点关注的问题进行论述总结, 从路线平面线形指标预留、超高横坡预留、平面线元组合超前设计、纵断面指标预留、路基横断面加宽方式的选择、互通式立体交叉变速车道几何指标及主线出入口匝道线形设计等方面进行探讨。

**关键词:** 高速公路改扩建; 预留; 超前设计

随着经济的不断发展, 国省高速公路网承担的交通量成倍增趋势, 现阶段运营或启动开工建设的高速公路项目中, 湖北省内目前已运营高速公路多为四车道高速公路, 设计速度为 100 km/h, 日趋增加的交通量与公路实际通行能力不相匹配的矛盾渐显, 高速公路原走廊改扩建方案通过道路扩容, 能有效缓解矛盾, 高速公路改扩建工程项目的设计及施工实施中, 往往存在原高速公路主线平面、纵面、横断面技术指标设计不匹配, 互通式立体交叉设置紧凑而无法适应改扩建方案所需互通的布设, 原路基横断面未考虑扩建方案所需放坡空间, 上跨主线桥涵构造物跨径无法满足改扩建条件, 隧道或特大桥梁等特殊节点往往因为扩建空间受限, 以上种种不利因素均对今后改扩建方案有很大制约, 导致改扩建工程规模偏大, 不能充分利用既有高速公路横断面进行扩建, 部分桥梁构造物废弃, 整

个互通拆除重建, 隧道或特大桥梁因为无法有效扩建而成为瓶颈路段, 因此, 现阶段高速公路设计中, 如何有效地为远期多车道改扩建方案预留空间, 又不过于增大现阶段投资规模, 是一个值得探讨的问题。该文从路线、路基路面、互通式立体交叉、分离式立交等设计方面出发, 对高速公路勘察设计时, 考虑预留改扩建条件的高速公路超前设计进行探讨。

## 1 路线设计

原有四车道高速公路, 相比于扩建六车道方案, 扩建八车道方案从对快速增长的交通量适应性、远期经济效益、避免多次重复建设、大型结构物加宽合理性、施工及质量控制难度等方面, 远期八车道扩建方案无疑比六车道更为合理, 现状 100 km/h 设计速度, 不能

- \*\*\*\*\*
- [4] 勾俊芳, 韩森, 杨晓飞, 等. 废胶粉对热拌沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2017(2).
- [5] 魏斌. 基于橡胶粉与 SBS 复合改性技术钢桥面铺筑沥青混合料耐久性试验研究[J]. 公路工程, 2015(5).
- [6] 韦大川, 王云鹏, 李世武, 等. 橡胶粉与 SBS 复合改性沥青路用性能与微观结构[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008(3).
- [7] 向丽. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青的机理和性能研究[D]. 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2011.
- [8] 王志刚, 杜英, 向丽, 等. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青制备研究[J]. 石油炼制与化工, 2010(4).
- [9] 王岚, 陈刚, 邢永明, 等. 老化对胶粉和 SBS 改性沥青流变性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2015(3).
- [10] 陈志国, 姚冬冬, 于丽梅, 等. 应对极端气候的橡胶粉 SBS 复合改性沥青成套技术研究与应用[J]. 吉林交通科技, 2016(1).
- [11] 黄卫东, 钟皓白, 李本亮, 等. 不同疲劳试验中改性沥青混合料疲劳性能对比[J]. 建筑材料学报, 2019(1).
- [12] 吴凡. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料疲劳愈合性能研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2018.
- [13] 冯新军, 杨强, 赵弘正, 等. 沥青混合料疲劳寿命的新现象学模型研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [14] 谢军, 罗文浩. 沥青混合料 3 种疲劳试验方法对比分析[J]. 中外公路, 2018(2).