

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.06.004

陕西省公路沥青路面路用性能的气候分区

梁武星, 李小刚, 高超
(西安公路研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对目前我国沥青路面规范中气候分区以气温为依据, 没有和路面实际温度结合起来存在的弊端以及 SHARP 规范气候分区方法又不完全符合陕西省实际的现状, 采用陕西省 10 个市区 20 a 的气候资料, 采用回归的方法, 研究陕西省公路沥青路面路用性能气候分区。研究结果表明: 各市 20 a 平均极端地表最高温和 20 a 平均连续 7 d 日最高气温、地理纬度之间存在良好的关系; 各市 20 a 平均极端最低地表温和 20 a 平均最低气温存在良好线性关系; 运用高温回归模型和低温回归模型将陕西省公路沥青路面 PG 分为 PG64-10、PG64-16、PG64-22、PG64-22 这 4 个级别; 综合规范分区方法和 PG 分区, 将陕西省公路沥青路面路用性能气候分区划分为 3 个区。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 回归模型; 气候分区; 路用性能

中图分类号: U416.217.02

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)06-0016-06

Climate Zoning for Asphalt Pavement Performance of Highway in Shaanxi Province

LIANG Wuxing, LI Xiaogang, GAO Chao
(Xi'an Highway Research Institute, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: Aimed at the malpractice that the climate zoning in asphalt pavement specification is based on air temperature but not related to real pavement temperature, and the present situation that the SHARP performance grading system does not fully meet the actual status of Shaanxi Province, by using the climate data of 10 cities in Shaanxi Province in the past 20 years, the climate zoning of the asphalt pavement performance was researched by regression method. The results show that (1) good relationship exists among the average extreme highest temperature of pavement surface and the average highest air temperature in 7 consecutive days and geographical latitude; (2) good linear relationship exists between the average extreme lowest temperature of pavement surface and the average lowest air temperature; (3) by the regression models of high-temperature and low-temperature, the asphalt pavement performance was divided into 4 grades, i. e., PG64-10, PG64-16, PG64-22 and PG64-22; (4) comprehensively using the standard zoning method and asphalt pavement PG zoning, the climate zoning for asphalt pavement performance of Shaanxi Province was divided into 3 zones.

Key words: road engineering; asphalt pavement; regression model; climate zoning; pavement performance

0 引言

沥青路面的路用性能受气候环境因素影响比较大, 因此在进行路面设计时应根据各地的气候特点选择不同的沥青, 来保证路面具有较长的使用性能。

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 中沥青路面使用性能气候分区以气温为依据, 没有和路面实际温度结合起来, 不能保证其与路用性能有良好的相关关系; SHARP 规范^[2]中 PG 分区的方法是基于美国气候特点提出的, 针对陕西省气候特点

收稿日期: 2011-12-29

基金项目: 陕西省交通科技项目 (07-17K)

作者简介: 梁武星 (1966-), 男, 陕西合阳人, 高级工程师. (lwx2060@163.com)

是否适合还有待验证。因此基于上述方法探求一种适合陕西省实际的沥青路面气候分区,对指导陕西省公路沥青路面设计有着重要的意义。

1 陕西省主要气候特征

陕西省属大陆季风性气候,南北延伸达 800 km 以上,所跨纬度多,境内南北气候差异明显。长城沿线以北为温带干旱半干旱气候,关中平原为暖温带半干旱或半湿润气候,陕南盆地为北亚热带湿润气候,山地大部为暖温带湿润气候。

陕西省温度的分布,基本上是由南向北逐渐降低,各地的年平均气温在 7~16℃。其中陕南的浅山河谷为全省最暖地区,多在 14~15℃;关中 11~13℃;陕北 7~11℃。受季风影响,陕西境内冬冷夏热,四季分明。

陕西省年降水量受山地地形影响显著,降雨分布南多北少,由南向北递减。年降水量陕南 700~900 mm,关中 500~700 mm,陕北 400~600 mm,其中陕南的米仓山、秦岭山地中和大巴山、西部高山地区,年降水量达 900~1 250 mm 之多。陕西省各地降水量的季节变化明显,夏季降水最多,占全年的 39%~64%,夏季降水量以陕北地区最为集中;秋季次于夏季,占全年的降水量的 20%~34%;春季少于秋季,春季降水量占全年的 13%~24%;冬季降水最少,只占全年的 1%~4%。陕西省内暴雨始于 4 月,结束于 11 月,主要集中在 7—8 月。关中、陕南春季第一场 320.0 mm 的降水过程一般出现在 4 月上旬末到中旬。初夏汛期出现在 6 月下旬后期到 7 月上旬前期,此期间,暴雨相对集中,关中、陕南出现洪涝较多。秋季,关中、陕南均出现相对多雨时段,称为秋淋,一般出现在 9 月上旬末至中旬初。

2 沥青路面使用性能气候分区

根据我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中沥青路面使用性能气候分区的方法,采用陕西省 10 个市区 20 a 气候资料进行陕西省沥青路面使用性能气候分区^[3]。

(1) 1 级分区

对陕西省 10 个市 1988—2007 年 20 a 的夏季各地区的最热月日最高气温进行统计,以 20 a 最热月的平均日最高气温的平均值作为反映高温和重载条件下出现车辙等流动变形的气候因子,并作为气候区划的一级指标如表 1 所示。

表 1 陕西省沥青路面使用性能气候分区 1 级区划

Tab. 1 Level 1 division of climate zoning for Shaanxi provincial asphalt pavement performance

市区	安康	汉中	商洛	咸阳	西安	宝鸡	渭南	铜川	延安	榆林
高温/℃	33.22	31.07	30.57	31.16	32.75	31.54	31.11	28.98	30.32	30.18
1 级分区	夏炎	夏炎	夏炎	夏炎	夏炎	夏炎	夏炎	夏热	夏炎	夏炎
	热区	热区	热区	热区	热区	热区	热区	区	热区	热区

陕西省各市区的夏季高温主要集中在 7 月和 8 月,高温季节持续近 2 个月,持续时间较长,对沥青混凝土路面的高温性能影响严重,因此在路面设计、原材料选择以及沥青混合料设计控制中,要预先考虑沥青路面的高温抗车辙能力,减少沥青路面病害产生的几率。

(2) 2 级分区

以 20 a 内的极端最低气温作为反映路面温缩裂缝的气候因子,并作为气候区划的 2 级指标,如表 2 所示。

表 2 陕西省沥青路面使用性能气候分区 2 级区划

Tab. 2 Level 2 division of climate zoning for Shaanxi provincial asphalt pavement performance

市区	安康	汉中	商洛	咸阳	西安
低温/℃	-9.7	-10	-13.9	-18.6	-14.7
2 级分区	冬冷区	冬冷区	冬冷区	冬冷区	冬冷区

市区	宝鸡	渭南	铜川	延安	榆林
低温/℃	-16.1	-18.5	-21.8	-23	-29.1
2 级分区	冬冷区	冬冷区	冬寒区	冬寒区	冬寒区

安康、汉中、商洛、咸阳、西安、宝鸡以及渭南都属于冬冷区,铜川、延安及榆林则属于冬寒区。因此,在铜川、延安及榆林等地区的沥青高速公路宜提高路面抗裂性能,防止由于降温及温度循环反复作用而产生的温缩裂缝及半刚性基层收缩开裂产生的反射裂缝。

(3) 3 级分区

以 20 a 内每年年降水量的平均值作为反映沥青路面受水影响的气候因子,并作为气候区划的 3 级指标,如表 3 所示。

表 3 陕西省沥青路面使用性能气候分区 3 级区划

Tab. 3 Level 3 division of climate zoning for Shaanxi provincial asphalt pavement performance

市区	安康	汉中	商洛	咸阳	西安	宝鸡	渭南	铜川	延安	榆林
降雨量/mm	815.2	826.8	672.7	568.3	553.6	640.0	766.9	579.9	515.7	378.5
3 级分区	湿润	湿润	湿润	湿润	湿润	湿润	湿润	湿润	湿润	半干旱
	区	区	区	区	区	区	区	区	区	旱区

陕西省大部分区域都处于湿润区,而且水对沥

青路面的影响是无孔不入，因此在陕西省高速特别是安康、汉中、商洛高速公路沥青路面设计中，必须从材料、结构等入手防治水损坏。

(4) 3 级分区汇总

按照上述 3 级区划结果进行汇总，如表 4 所示。

表 4 陕西省沥青路面使用性能气候分区区划

Tab. 4 Climate zoning for Shaanxi provincial asphalt pavement performance

纬度/ (°)	32.72	33.07	33.87	34.25	34.3	34.35	34.48	35.08	36.6	38.27
市区	安康	汉中	商洛	咸阳	西安	宝鸡	渭南	铜川	延安	榆林
气候	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	2-2	1-2	1-2
分区	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3

由分区表 4 可见，现行分区方法大致仅能将陕西省划分为南北两部分，各市之间的区分不明显。另外，目前我国路面设计规范中的沥青指标没有和实际沥青路面温度结合起来，使用时只根据该地区的气温、降雨量等气候条件来选择沥青。而在这些气候条件相同的地区，由于地理位置、海拔高度等不同，沥青路面实际温度可能相差很大，若在这些地区使用同种沥青表现出的路用性能相差会很大。因此，现行气候分区局限性较明显。

3 陕西省沥青路面 PG 气候分区

参照美国的 SHRP 规范^[3]，结合陕西省实际，对 SHRP 规范的 PG 分级方法进行改进，对陕西省不同区域进行基于路面温度的气候分区。

(1) 路面高温设计温度确定

对陕西省各地区的高温资料进行分析汇总，探求陕西省区域大气温度和地温的关系，找寻适合陕西省的路面高温设计温度确定方法，如表 5 所示。

表 5 陕西省各市 20 a 高温资料统计表

Tab. 5 Statistical data of high temperature of cities of Shaanxi Province in the past 20 years

市区	纬度/(°)	20 a 平均连续 7 d 最高气温/℃	标准差/℃	20 a 平均极端 最高地温/℃
安康	32.72	36.56	1.21	61.50
汉中	33.07	34.07	1.43	59.1
商洛	33.87	34.16	1.24	60.09
咸阳	34.25	35.88	1.19	63
西安	34.3	36.63	1.27	62.2
宝鸡	34.25	35.79	1.67	62.9
渭南	34.48	36.15	1.48	63.1
铜川	35.08	32.57	1.08	59.5
延安	36.60	33.99	1.54	61.7
榆林	38.27	33.55	1.79	64.2

将各地区连续 7 d 平均日最高气温 T_{ari} 、地理纬

度 Lat 与极端地表最高温度 $T(\text{pav})$ 进行二元一次线性回归，发现它们之间存在一定的线性关系 ($R = 0.94$) 表现为：

$$T(\text{pav}) = 11.269 + 1.1T_{\text{ari}} + 0.996Lat,$$
$$R = 0.94.$$

将由回归模型计算得到的路表温度与 SHRP^[3] 模型公式计算的路表温度和 LTPP 模型计算的路表温度进行对比，如表 6 所示^[3-4]。

表 6 不同方法确定的地表高温温度对比 (单位:℃)

Tab. 6 Contrast of surface high temperatures determined by different methods (unit:℃)

市区	指标				
	7 d 平均 最高气温	极端地表 最高温	本文回归模 型地表温度	SHAP 模型 地表温度	LTPP 模型 地表温度
安康	36.56	61.5	61.5	61.9	65.4
汉中	34.07	59.1	59.2	59.3	63.4
商洛	34.16	60.0	60.0	59.2	63.2
咸阳	35.88	63	61.4	60.9	64.5
西安	36.63	62.2	63.1	60.9	65.2
宝鸡	35.79	62.9	61.9	60.8	64.7
渭南	36.15	63.1	63.6	61.1	64.9
铜川	32.57	59.5	59.6	57.4	61.6
延安	33.99	61.7	62.4	58.5	62.8
榆林	33.55	64.2	63.9	57.3	62.2

通过表 6 可以得出：

(1) 极端最高地温和路表温度回归计算值差值很小范围为 0~1.6℃，因此可以用回归公式计算路表高温。

(2) 地表温度和 SHRP 公式计算地表温度差范围为 0.2~6.9℃，且在很多地区 SHAP 模型计算得出的路面高温指标值具有一定的风险性，如在榆林地区 SHAP 模型得出的高温值比实际地表温度偏低近 7℃，偏差较大，这也说明 SHRP 高温计算公式在我省并不是完全适用的。

(3) 在有实际温度场的情况下，可以根据 7 d 平均最高气温利用回归公式计算路面内部不同深度的温度。

(4) 用 LTPP 公式计算的路表温度比实际地表温度要高，比较保守风险性较小，无形中提高了高路面设计温度的可靠度。因此在缺乏温度场数据的情况下，用 LTPP 的计算方法计算路面的高温设计温度是可行的。表 7 为按照 LTPP 高温模型计算的陕西各地区高温设计温度。

表 7 陕西省各市高温设计温度

Tab. 7 Designed high temperatures for cities of Shaanxi Province

市区	安康	汉中	商洛	咸阳	西安	宝鸡	渭南	铜川	延安	榆林
高温设计 温度/℃	61.6	59.71	59.54	60.8	61.42	60.98	61.12	58.03	59.09	58.6

(2) 路面低温设计温度确定

对陕西省各地区的低温资料进行分析汇总, 建立大气温度、最低地表温度的关系, 找寻适合陕西省的路面低温设计温度确定方法。

表 8 陕西省各市低温资料统计表

Tab. 8 Statistical data of low temperature of cities of Shaanxi Province in the past 20 years

市区	纬度/(°)	20 a 平均最低 气温/℃	标准差/℃	20 a 平均极端 最低地温/℃
安康	32.72	-4.65	1.55	-6.53
汉中	33.07	-5.18	1.44	-7.23
商洛	33.87	-10.29	1.47	-12.79
咸阳	34.25	-12.38	2.70	-15.5
西安	34.3	-9.47	2.36	-11.81
宝鸡	34.25	-8.53	2.33	-10.9
渭南	34.48	-11.34	2.87	-12.12
铜川	35.08	-14.70	2.46	-16.4
延安	36.6	-18.44	2.49	-19.67
榆林	38.27	-24.08	3.08	-27.52

通过对陕西省各地区的最低气温平均值 T_{air} 和极端最低地温 T 的线性回归分析, 发现两者之间的关联性很大 (相关系数达到 0.99)。

$$T = -1.7288 + 1.03506T_{\text{air}},$$
$$R = 0.99.$$

将由 SHRP 公式、LTPP 公式以及回归公式计算得到的路面温度与实际路面温度进行了对比, 具体如表 9 所示。

表 9 不同方法确定的地表低温对比 (单位: ℃)

Tab. 9 Contrast of surface low temperatures determined by different methods (unit: ℃)

市区	指标						
	极端	平均	实际	本文回归	美国 SHRP	加拿大	LTPP
	最低气温	最低气温	最低地温	模型计算 地温	模型 低温值	SHAP 模型 低温值	模型 低温值
安康	-9.7	-4.65	-6.53	-6.54	-9.7	-2.09	-5.36
汉中	-10	-5.18	-7.23	-7.09	-10	-2.62	-5.76
商洛	-13.9	-10.29	-12.79	-12.38	-13.9	-7.73	-9.71
咸阳	-18.6	-12.38	-15.5	-14.54	-18.6	-9.82	-12.39
西安	-14.7	-9.47	-11.81	-11.53	-14.7	-6.91	-9.95
宝鸡	-16.1	-8.53	-10.9	-10.56	-16.1	-5.97	-9.25
渭南	-18.5	-11.34	-12.12	-13.47	-18.5	-8.78	-11.87
铜川	-21.8	-14.7	-16.4	-16.94	-21.8	-12.14	-14.06
延安	-23	-18.44	-19.67	-20.82	-23	-15.88	-17.24
榆林	-29.1	-24.03	-27.52	-26.60	-29.1	-21.47	-22.41

从表 9 可以看出:

(1) 加拿大 SHAP 低温确定方法得出的路面低温比实际地表温度高 5~7℃ 左右, 显而易见用该方法确定低温路面设计温度在我省是不适用的。

(2) SHRP 将极端最低气温作为路面低温设计温度, 陕西省各地区的极端最低气温和极端最低路面温度相差较大, 若采用美国 SHAP 路面低温确定方法, 各地区 PG 分级的低温等级将很有可能相差一个等级, 且据气象资料发现, 最低地表温度介于平均最低气温与极端最低气温之间, 可能是由于空气与地面的太阳辐射的吸收率不同等原因。以极端最低气温做为低路面设计温度较为保守, 因此美国 SHRP 确定低温路面温度的方法在我国也是不适用的。

(3) 将 LTPP 方法计算得到的温度与实际地表温度进行对比, 不难发现实际低温要比计算得到的低温更低, 这说明 LTPP 确定低温路面设计温度方法在我省沥青路面气候分区的安全性欠缺。

(4) 陕西省各地区的平均最低气温和极端最低地温两者之间的关联性很大, 在陕西省各地区用回归公式计算的路面温度和实际的路面温度差值较小。因此采用本文回归模型确定陕西省各地区低温设计温度是可行的。

表 10 陕西省各市低温设计温度 (单位: ℃)

Tab. 10 Designed low temperatures for cities of Shaanxi Province (unit: ℃)

市区	安康	汉中	商洛	咸阳	西安	宝鸡	渭南	铜川	延安	榆林
低温设计 温度	-6.54	-7.09	-12.38	-14.54	-11.53	-10.56	-13.47	-16.94	-20.82	-26.6

(3) 陕西省沥青路面 PG 分区结果

结合上述的路面设计高温确定方法和路面设计低温确定方法, 陕西省各市区具体的 PG 分级结果如表 11。

表 11 陕西各地区 PG 分级表

Tab. 11 PG table of cities of Shaanxi Province

市区	路面温度			PG 标准	市区	路面温度			PG 标准
	最高路面 温度/℃	最低路面 温度/℃	PG 标准			最高路面 温度/℃	最低路面 温度/℃	PG 标准	
安康	61.60	-6.53	64-10		宝鸡	60.98	-10.9	64-16	
汉中	59.71	-7.23	64-10		渭南	61.12	-12.12	64-16	
商洛	59.94	-12.79	64-16		铜川	58.03	-16.4	64-22	
咸阳	60.8	-15.5	64-16		延安	59.09	-19.67	64-22	
西安	61.42	-11.81	64-16		榆林	58.60	-27.52	64-28	

如表 11 所示, 陕西各地区的 PG 分级共有以下 4 个分级标准: PG64-10, 安康、汉中; PG64-16,

商洛、咸阳、西安、宝鸡、渭南; PG64 - 22, 铜川、延安; PG64 - 28, 榆林。

4 陕西省公路沥青路面路用性能气候分区

综合文献 [5 - 12] 的研究成果, 在陕西省沥青路面使用性能气候分区和陕西省沥青路面 PG 气候分区的基础上, 结合陕西省地域特点, 提出陕西省公路沥青路面路用性能气候分区, 如表 12 所示。

表 12 陕西省公路沥青路面路用性能气候分区表
Tab. 12 Climate zoning table of highway asphalt pavement performance of Shaanxi Province

分区	I	II	III
气候类型	北亚热带湿润气候、暖温带湿润	暖温带半干旱、半湿润气候	温带干旱半干旱气候
地质特点	山岭重丘区	平原	黄土高原、沙漠
代表市区	汉中、安康	商洛、咸阳、西安、宝鸡、渭南	铜川、延安、榆林
最热月平均最高气温/℃	32. 1	31. 4	29. 8
极端最低气温/℃	-9. 9	-16. 4	-24. 6
年平均降雨量/mm	820	640	490
沥青 PG 分级	PG64 - 10	PG64 - 16	PG64 - 22/PG64 - 28
重点	高温性能、水稳定性	高温、低温、水稳定性	低温性能

5 结论

(1) 采用规范推荐方法, 利用陕西省 10 市区近 20 a 的气候资料, 进行陕西省沥青路面使用性能气候 3 级分区, 发现各市之间的区分不明显。

(2) 陕西省各地区连续 7 d 平均日最高气温 T_{ari} 、地理纬度 Lat 与极端地表最高温度 $T(pav)$ 之间存在良好的线性关系 ($R=0.94$), 即:

$$T(pav) = 11.269 + 1.1T_{ari} + 0.996Lat。$$

(3) 陕西省各地区的最低气温平均值 T_{air} 和极端最低地温之间的存在良好的线性关系 (相关系数达到 0.99), 表现为:

$$T = -1.7288 + 1.03506T_{air}。$$

(4) 通过回归模型、SHRP 模型、LTPP 模型之间的对比可以看出, SHRP 模型预测的路面高温温度较低, 具有一定的风险性; 7 d 平均最高气温和路面表面温度有良好的相关性, 因此在有温度场数据情况下, 可以根据 7 d 平均最高气温通过回归模型计算路面内部不同深度的温度; LTPP 模型计算的路表温度比实际地表温度要高, 比较保守, 风险性较小,

无形中提高了高路面设计温度的可靠度。

SHRP 模型将极端最低气温作为低路面温度, 陕西省各地区的极端最低气温和极端最低路面温度相差较大, 因此 SHRP 模型确定低温路面温度的方法在我国也是不适用的; LTPP 模型方法计算低温温度比实际低温要高, 这说明 LTPP 模型确定低温路面设计温度方法在我省沥青路面气候分区的安全性欠缺; 陕西省各地区的平均最低气温和极端最低地温两者之间的关联性很大, 在陕西省各地区可以用本文回归模型计算的路面温度。

(5) 综合上述规范气候分区法和上述 PG 分区法, 将陕西省公路沥青路面路用性能气候分区划分为 3 个, 即北亚热带湿润气候和暖温带湿润气候, 暖温带半干旱、半湿润气候, 温带半干旱半干旱气候, 代表市区分别为汉中、安康, 商洛、咸阳、西安一带和宝鸡、渭南一带, 铜川、延安、榆林。

参考文献:

References:

[1] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S]. JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavement [S].

[2] 美国沥青协会. 高性能沥青路面 (Superpave) 基础参考手册 [M]. 贾渝, 曹荣吉, 李本京, 译. 北京: 人民交通出版社, 2005.

US Asphalt Institute. Superpave Fundamental Reference Manual [M]. JIA Yu, CAO Rongji, LI Benjing, translated. Beijing: China Communications Press, 2005.

[3] 王崇涛. 西安公路设计参数及弯沉控制标准研究 [D]. 西安: 长安大学, 2003.

WANG Chongtao. Study on Design Parameters and Deflection Controlling Criterion of Xi'an Highway [D]. Xian: Chang'an University, 2003.

[4] 张永满. 西部湿陷性黄土地区路用沥青气候适用性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2003.

ZHANG Yongman. Study on Climatic Adaptation of Asphalt for Highway in Western Collapsible Loess District [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.

[5] 晋琰. 六盘山地区高等级公路沥青气候适应性及沥青混合料水稳定性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.

JIN Yan. Study on Climatic Adaptation of Asphalt and Moisture Stability of Asphalt Mixture for High-grade Highway in Liupanshan Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.

[6] 时宁, 周勇, 雷茂锦. 江西省沥青路面使用性能气候

- 分区 [J]. 交通标准化, 2011 (18): 105 - 107.
- SHI Ning, ZHOU Yong, LEI Maojin. Climatic Zoning of Asphalt Pavement Performance in Jiangxi Province [J]. Transportation Standardization, 2011, (18): 105 - 107.
- [7] 郑南翔, 张霞, 李安. 对 SHRP 沥青分级存在问题的探讨 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (9): 44 - 46.
- ZHENG Nanxiang, ZHANG Xia, LI An. Discuss of Problems in SHRP Performance Grading System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (9): 44 - 46.
- [8] 袁万杰, 彭波, 陈忠达. 不同类型 SBS 改性剂适用气候分区研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 21 (1): 18 - 21.
- YUAN Wanjie, PENG Bo, CHEN Zhongda. Study on Climate Zone for Different Kinds of SBS Modifiers [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (1): 18 - 21.
- [9] 贾渝. Superpave 的真正含义 [J]. 石油沥青, 2003, 17 (4): 24.
- JA Yu. True Meanings of Superpave [J]. Petroleum Asphalt, 2003, 17 (4): 24.
- [10] 陈志忠, 于斌, 王恒斌. Superpave 技术现状及对我国沥青路面技术的启示 [J]. 合肥工业大学学报, 2002, 25 (1): 71 - 75.
- CHEN Zhizhong, YU Bin, WANG Hengbin. Superpave Technology and Its Elicitation to the Bituminous Pavements Engineering in China [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2002, 25 (1): 71 - 75.
- [11] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- SHEN Jin'an, The Pavement Performance of Asphalt and Asphalt Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [12] 蔡琦. Superpave 技术在赣定高速公路中的应用与研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- CAI Qi, Application and Research on Superpave Technology in Gan-Ding Expressway [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.

(上接第10页)

- [8] AMIR K, FEREIDOUN M N, AMIR M. Laboratory Fatigue Models for Recycled Mixes with Pozzolanic Cement and Bitumen Emulsion [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 17 (1): 98 - 107.
- [9] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
- JTG F40—2004, Technical Specification for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [10] ORUC S, CELIK F, AKPINAR M. Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 16 (5): 578 - 583.
- [11] KIM Y J, IM S Y, LEE H D. Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of Cold In-place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23 (5): 542 - 553.
- [12] 徐剑, 黄颂昌, 秦永春, 等. 乳化沥青和泡沫沥青冷再生混合料性能研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 27 (6): 20 - 24.
- XU Jian, HUANG Songchang, QIN Yongchun, et al. Performance of Cold Recycled Mixtures with Emulsified Asphalt or Foam Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 27 (6): 20 - 24.

(上接第15页)

- [5] 龚成志, 张祖棠, 罗刚. 空隙特征对沥青混合料低温抗裂性能的影响 [J]. 公路交通技术, 2011, 28 (4): 39 - 42.
- GONG Chengzhi, ZHANG Zutang, LUO Gang. Influences of Void Features on Crack Resistance of Asphalt Mixtures at Low Temperature [J]. Technology of Highway and Transport, 2011, 28 (4): 39 - 42.
- [6] DUGDALE D S. Yielding of Steel Sheets Containing Slits [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8 (2): 100 - 104.
- [7] BARENBLATT G I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture [J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55 - 129.
- [8] LI Weizhou, SIEGMUND T. An Analysis of Crack Growth in Thin-sheet Metal via a Cohesive Zone Model [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69 (18): 2073 - 2093.
- [9] JENQ Y S, PERNG J D. Analysis of Crack Propagation in Asphalt Concrete Using Cohesive Crack Model [J]. Transportation Research Record, 1991, 1317: 90 - 99.
- [10] LI H, CHANDRA N. Analysis of Crack Growth and Crack-tip Plasticity in Ductile Materials Using Cohesive Zone Models [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19 (6): 849 - 882.
- [11] SONG S H. Fracture of Asphalt Concrete: A Cohesive Zone Modeling Approach Considering Viscoelastic Effects [D]. Urbana: University of Illinois, 2006.