

文章编号:1671-8879(2013)02-0027-06

# 甘肃地区 Superpave 路面材料标准

何兆益<sup>1</sup>, 汤 雄<sup>2</sup>, 陈宏斌<sup>3</sup>, 刘秀霞<sup>3</sup>, 徐 辰<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 交通运输部公路科学研究院,  
北京 100088; 3. 甘肃省交通运输厅工程处, 甘肃 兰州 730030)

**摘 要:**为了研究甘肃地区 Superpave 路面材料的应用标准,使 Superpave 路面更好地与甘肃地区的实际情况结合并进行应用,通过对该地区 1971~2000 年的气温资料整理统计,利用 LTPP 气候影响模型计算甘肃地区 Superpave 路面高温和低温设计温度,得到甘肃地区沥青 PG 等级;同时结合中国及甘肃地区实际情况,对该地区沥青 PG 等级进行调整,提出该地区沥青 PG 分级推荐标准;结合天水过境高速公路及西长风(西峰—长庆—凤翔)高速公路实体工程,对甘肃陇东地区集料进行调查,通过对集料料源特性及加工特性进行试验研究、指标分析,最终提出了甘肃陇东地区 Superpave 路面集料推荐标准。

**关键词:**道路工程;甘肃地区;气温;LTPP 模型;PG 分级;集料标准

中图分类号:U416.21

文献标志码:A

## Superpave pavement material standard in Gansu region

HE Zhao-yi<sup>1</sup>, TANG Xiong<sup>2</sup>, CHEN Hong-bin<sup>3</sup>, LIU Xiu-xia<sup>3</sup>, XU Chen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Department of Engineering Construction in Gansu Province, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** In order to study the application standards of the Superpave pavement materials in Gansu region, to adapt Superpave pavement to the actual situation in the Gansu region better, the high and low design temperatures of Superpave pavement in the Gansu region was investigated based on the data of temperature in Gansu province from 1971 to 2000, the asphalt PG grade in Gansu region was gotten by using the LTPP climate impact models, at the same time the asphalt PG rating in Gansu province was adjusted based on the actual situation of China and Gansu region, and the recommendation of the asphalt PG classification in Gansu region was put forward. The Tianshui transit expressway and Xichangfeng expressway actual project were taken as examples to investigate the aggregate in eastern Gansu, experimental study and index analysis on the properties and processing characteristics of the aggregate material were conducted, and finally the Superpave pavement aggregate recommendation in eastern Gansu was proposed. 6 tabs, 7 figs, 13 refs.

**Key words:** road engineering; Gansu district; temperature; LTPP model; PG grade; aggregate requirement

收稿日期:2012-02-07

基金项目:甘肃省交通建设科技项目(甘交工(科研)2011 第 002 号)

作者简介:何兆益(1965-),男,云南昭通人,教授,博士研究生导师,E-mail:hzyzb@cquc.edu.cn。

## 0 引言

Superpave 是一种较真实模拟实际路用情况的混合料设计方法,使混合料的受力更加符合路面实际使用过程。分析甘肃省近年来高等级公路路面设计、施工和运营的实际情况,甘肃省交通运输厅决定在天水过境段高速公路和西长凤高速公路首次推广采用 Superpave 沥青混合料<sup>[1-3]</sup>。在沥青路面的建设中,原材料质量直接影响沥青混合料的各项路用性能,对路面质量起着至关重要的作用。在沥青路面建设中,工程人员高度重视材料质量,无论是对沥青还是集料都建立了质量标准以及相应的测试方法和规程。但是,由于沥青路面施工和使用条件的复杂性,任何标准和方法都受到时代、地域以及认识水平的限制,也没有哪个标准适用于任何地区<sup>[4-5]</sup>。为此,本文根据甘肃地区实际情况,针对 Superpave 路面在甘肃地区应用的材料标准进行研究,确定推荐了甘肃地区沥青 PG 分级;通过对甘肃陇东地区集料各项指标分析,推荐了甘肃陇东地区 Superpave 路面集料使用的技术标准。

## 1 甘肃地区 Superpave 路面沥青胶结料标准

### 1.1 Superpave 规范沥青胶结料指标

Superpave 采用全新的体系进行试验及规范来选择沥青胶结料,新的 Superpave 胶结料试验通过工程学原理测量沥青物理特性,将沥青胶结料的质量要求与当地的气候及交通量状况建立起较好的联系,因此,Superpave 混合料设计时沥青的质量要求是根据工程所在地的气候和交通条件来选择胶结料,称为 PG 分级体系<sup>[6-8]</sup>。

Superpave 胶结料选择,允许设计者规定不同程度的可靠度来选择胶结料等级,最高路面温度由过去 30 年中连续 7 d 的最高平均气温来推算,而最低路面温度是由过去 30 年中最低的气温来推算<sup>[9]</sup>。可靠度是一年中实际温度不超过设计温度的百分率,高可靠度意味着低风险。路面高温、路面低温设计温度由气候影响模型计算,气候影响模型很多,本文采用最具有代表性的 LTPP 气候影响模型,计算公式如下所示<sup>[10-11]</sup>。

#### (1) 路面高温设计温度

$$T_{\text{pav}_H} = 54.32 + 0.78T_{\text{air}_H} - 0.0025L_{\text{at}}^2 - 15.14\lg(h+25) + Z(9 + 0.61\delta_{\text{air}_H}^2)^{0.5} \quad (1)$$

式中:  $T_{\text{pav}_H}$  为路面下  $h$  mm 处的最高温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{air}_H}$

为最高空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $L_{\text{at}}$  为项目工地纬度( $^{\circ}$ );  $\delta_{\text{air}_H}$  为温度最高的 7 d 平均温度的标准差( $^{\circ}\text{C}$ );  $h$  为计算采用的路面深度(mm);  $Z$  为根据标准正态分布表 ( $Z=2.005$ )98% 的可靠度。

#### (2) 路面低温设计温度

$$T_{\text{pav}_L} = 1.56 + 0.72T_{\text{air}_L} - 0.004L_{\text{at}}^2 + 6.26\lg(h+2) - Z(4.4 + 0.52\delta_{\text{air}_L}^2)^{0.5} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{pav}_L}$  为路面下  $h$  mm 处的最低温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{air}_L}$  为最低空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $\delta_{\text{air}_L}$  为平均低温的标准差( $^{\circ}\text{C}$ )。

美国 SHRP 规范给出了 PG 调整的标准,按交通荷载和速度来调整高温等级,叫做“grade-bump-ing”(跳级)。表 1 列出了 AASHTO M323 所推荐的调整等级。

表 1 交通量和交通荷载速率对(高温)PG 等级的调整(AASHTO)

Tab. 1 PG grade adjustment according to traffic volume and traffic loading rate(high temperature, AASHTO)

设计 ESALs/10 <sup>6</sup>	不同交通荷载速率下胶结料 PG 等级的调整		
	缓慢 ( $<20$ km/h)	低 ( $20\sim70$ km/h)	标准 ( $>70$ km/h)
$<0.3$			
$0.3\sim3$	2	1	
$3\sim10$	2	1	
$10\sim30$	2	1	
$\geq 30$	2	1	1

但是,美国的设计标准轴载为 80 kN,而中国的设计标准轴载为 100 kN;中国累计当量轴次的计算采用的一般为 15 年内远景交通量,而 Superpave 设计交通量采用 20 年内远景交通量。因此,直接按照美国的修正方法进行沥青胶结料选择(PG 等级跳级)显然不合适,有必要进行标准轴载的换算。

对表 1 中的 ESALs 进行换算调整,得出按中国标准轴载计算后的设计累计当量轴次与 PG 选择时的修正关系,如下页表 2 所示。需要说明的是,本研究的换算仅限于对轴载的简单换算,没有考虑两者在交通量组成、荷载组成上的不同,应用过程中还应结合具体情况根据已有成功经验论证取用。

### 1.2 甘肃地区沥青 PG 等级推荐

调查甘肃各地区大气气温资料(基于 1971~2000 年气象资料),调查统计结果如下页表 3 所示<sup>[12-13]</sup>。

根据统计学原理,基于甘肃地区气温资料,按照两倍标准差即相当于 98% 的保证率计算路面温度。再由式(1)和式(2)分别计算路面高温以及低温设计温度,路面高、低温设计温度与路面厚度成一次线性关系。根据最不利原则,PG 等级选择时,上面层用路

表 2 交通量和交通荷载速率对甘肃省(高温)PG 等级的调整

Tab. 2 PG grade adjustment according to traffic volume and traffic loading rate (high temperature in Gansu)

设计 ESALs/10 <sup>6</sup>	不同交通荷载速率下胶结料 PG 等级的调整		
	缓慢 (<20 km/h)	低 (20~70 km/h)	标准 (>70 km/h)
<0.1			
0.1~1.2	2	1	
1.2~4.1	2	1	
4.1~12.3	2	1	1'
≥12.3	2	1	1

注:表中 1'为本文增加的一个调整等级。

表 3 甘肃省各地区气温资料(1971~2000 年)

Tab. 3 Meteorological data in Gansu area(1971~2000)

地 区	经度/(°)	纬度/(°)	气温/℃					
			平均最低气温	标准差	极端最低温度	平均最高气温	标准差	极端最高温度
庆阳市	107.63	35.73	−13.8	2	−23.0	31.4	1	36.7
平凉市	106.67	35.55	−13.6	2	−24.3	31.5	1	36.0
天水市	105.72	34.58	−10.1	2	−17.4	33.1	1	38.2
陇南市	104.92	33.40	−4.6	1	−8.6	34.6	1	38.6
定西市	104.62	35.58	−11.1	2	−26.9	24.0	1	33.7
甘南藏族自治州	102.92	34.98	−21.9	2	−27.9	24.0	1	30.4
临夏回族自治州	103.22	35.60	−17.2	2	−27.8	29.4	1	32.5
白银市	104.18	36.55	−16.5	2	−24.3	33.5	1	39.5
兰州市	103.82	36.07	−14.4	1	−19.7	33.5	1	39.8
武威市	102.63	37.93	−18.0	2	−32.0	33.1	1	40.8
金昌市	102.18	38.50	−18.8	1	−28.3	32.7	1	38.1
张掖市	100.45	38.93	−20.4	2	−28.2	33.5	1	38.2
酒泉市	98.52	39.75	−19.1	1	−29.8	32.9	1	36.6
嘉峪关市	98.27	39.80	−21.0	1	−28.6	32.6	1	38.0

表 4 甘肃省各地区 PG 等级计算结果(LTPP 模型算法)

Tab. 4 PG grades calculating results in Gansu(LTPP model)

地 区	各层沥青 PG 等级计算结果								
	沥青下面层			沥青中面层			沥青上面层		
	低温/℃	高温/℃	PG 等级	低温/℃	高温/℃	PG 等级	低温/℃	高温/℃	PG 等级
庆阳市	−11.5	51.6	PG52−16	−13.2	55.9	PG58−16	−15.8	62.2	PG64−16
平凉市	−11.3	51.8	PG52−16	−13.0	56.1	PG58−16	−15.6	62.3	PG64−16
天水市	−8.5	53.2	PG58−10	−10.3	57.5	PG58−16	−12.8	63.8	PG64−16
陇南市	−2.1	54.5	PG58−4	−3.9	58.8	PG64−4	−6.5	65.1	PG70−10
定西市	−9.5	45.9	PG46−10	−11.3	50.2	PG52−16	−13.8	56.5	PG58−16
甘南藏族自治州	−17.1	46.0	PG46−22	−18.9	50.3	PG52−22	−21.5	56.6	PG58−22
临夏回族自治州	−13.9	50.1	PG52−16	−15.6	54.4	PG58−16	−18.2	60.7	PG64−22
白银市	−13.6	53.1	PG58−16	−15.4	57.4	PG58−16	−18.0	63.7	PG64−22
兰州市	−9.9	53.2	PG58−10	−11.7	57.5	PG58−16	−14.3	63.8	PG64−16
武威市	−15.1	52.6	PG58−16	−16.9	56.9	PG58−22	−19.5	63.2	PG64−22
金昌市	−13.8	52.1	PG58−16	−15.6	56.4	PG58−16	−18.2	62.7	PG64−22
张掖市	−17.2	52.7	PG58−22	−18.9	57.0	PG58−22	−21.5	63.3	PG64−22
酒泉市	−14.4	52.1	PG58−16	−16.2	56.4	PG58−22	−18.8	62.6	PG64−22
嘉峪关市	−15.8	51.8	PG52−16	−17.6	56.1	PG58−22	−20.2	62.4	PG64−28

注:表中计算结果仅为按气候条件进行的计算结果,未按交通速度、交通量水平进行修正。

面表面设计温度,中面层用路面表面以下 40 mm 深度设计温度,下面层用路面表面以下 100 mm 深度设计温度,由此得到甘肃地区所需要的沥青 PG 等级,如表 4 所示。

结合甘肃实际情况及表 2 计算结果,同时考虑交通量水平情况下,PG 等级调整按照各层的高温等级应至少提高 1 个等级;在低温等级方面,考虑甘肃地区温差较大,气温相对较低,为了减小沥青路面低温开裂,可在原计算基础上适当提高低温等级要求,建议至少提高 1 个低温等级。调整后推荐 PG 等级如下页表 5 所示。

表 5 甘肃省各地区推荐 PG 等级  
Tab. 5 Recommended PG grades in Gansu region

地 区	各层沥青 PG 等级计算结果								
	沥青下面层			沥青中面层			沥青上面层		
	低温/℃	高温/℃	PG 等级	低温/℃	高温/℃	PG 等级	低温/℃	高温/℃	PG 等级
庆阳市	−11.5	51.6	PG58−22	−13.2	55.9	PG64−22	−15.8	62.2	PG70−22
平凉市	−11.3	51.8	PG58−22	−13.0	56.1	PG64−22	−15.6	62.3	PG70−22
天水市	−8.5	53.2	PG64−16	−10.3	57.5	PG64−22	−12.8	63.8	PG70−22
陇南市	−2.1	54.5	PG64−10	−3.9	58.8	PG70−10	−6.5	65.1	PG76−16
定西市	−9.5	45.9	PG52−16	−11.3	50.2	PG58−22	−13.8	56.5	PG64−22
甘南藏族自治州	−17.1	46.0	PG52−28	−18.9	50.3	PG58−28	−21.5	56.6	PG64−28
临夏回族自治州	−13.9	50.1	PG58−22	−15.6	54.4	PG64−22	−18.2	60.7	PG70−28
白银市	−13.6	53.1	PG64−22	−15.4	57.4	PG64−22	−18.0	63.7	PG70−28
兰州市	−9.9	53.2	PG64−16	−11.7	57.5	PG64−22	−14.3	63.8	PG70−22
武威市	−15.1	52.6	PG64−22	−16.9	56.9	PG64−28	−19.5	63.2	PG70−28
金昌市	−13.8	52.1	PG64−22	−15.6	56.4	PG64−22	−18.2	62.7	PG70−28
张掖市	−17.2	52.7	PG64−28	−18.9	57.0	PG64−28	−21.5	63.3	PG70−28
酒泉市	−14.4	52.1	PG64−22	−16.2	56.4	PG64−28	−18.8	62.6	PG70−28
嘉峪关市	−15.8	51.8	PG58−22	−17.6	56.1	PG64−28	−20.2	62.4	PG70−34

2 陇东地区 Superpave 路面集料标准

2.1 集料指标试验分析

2.1.1 粗集料表观相对密度、吸水率试验分析

进行粗集料表观相对密度和吸水率试验研究，结果分别如图 1、图 2 所示。

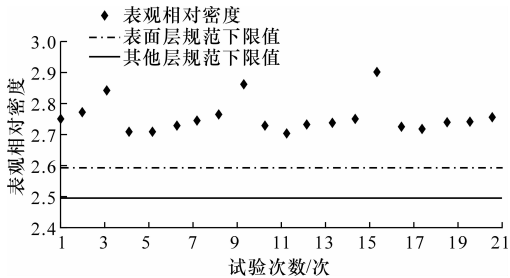


图 1 粗集料表观相对密度

Fig. 1 Apparent relative densities of coarse aggregate

由图 1 可知，粗集料表观相对密度在 2.7~2.8 之间，均能满足国家《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) (以下简称规范)对沥青(上、中、下)面层集料表观相对密度的要求(分别不小于 2.6、2.5)，表观相对密度最小值为 2.708，最大值为 2.908(辉绿岩)。集料密度对沥青路面性能影响不大，但可以间接反映集料在纯度、致密性、强度等方面的性能状况，提高密度对优选集料有利，结合已有试验结果及其他省份应用经验，建议可适当提高集料表观相对密度要求，将其他层表观相对密度由不

小于 2.5 提高到不小于 2.6，表面层由不小于 2.6 提高到不小于 2.65。

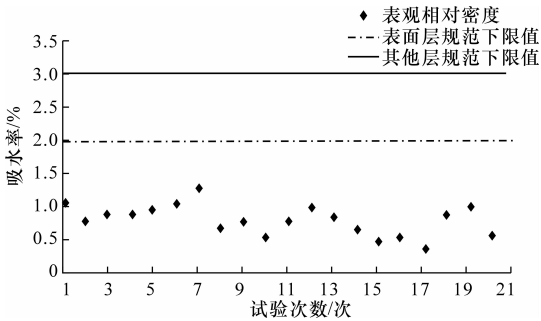


图 2 粗集料吸水率试验结果

Fig. 2 Water absorption test results of coarse aggregate

由图 2 吸水率试验结果可知，所检测样本的吸水率均满足规范要求，且吸水率主要分布于 0.5%~1.0% 之间，鉴于吸水率的大小主要影响工程造价，对沥青路面的使用情况并没有多少影响，所以本文建议不提高吸水率技术标准。

2.1.2 粗集料压碎值试验结果分析

进行粗集料压碎值试验研究，结果如下页图 3 所示。

由图 3 试验结果可知，集料压碎值最大值为 17.9%，最小值为 15.2%，均能满足国家规范要求的沥青路面上(中、下)面层集料压碎值不大于 26% (28%)的要求，数值主要分布在 15%~20% 之间，整体质量较好。

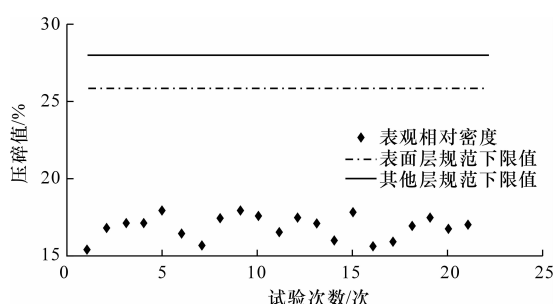


图 3 粗集料压碎值试验结果

Fig. 3 Crushing value test results of coarse aggregate

压碎值指标用于评价集料的强度和质量,是集料质量控制的关键指标之一,该指标体现沥青路面面层的集料在受到车轮荷载作用下,并在受剪和受折状态下抵抗破坏的能力。压碎值小意味着其强度较高,抗破坏能力强,通过提高压碎值标准可间接地达到提高集料母材要求的目的,结合已有试验结果及其他省份应用经验,建议可将上(中、下)面层集料压碎值技术标准由不大于 26%(28%)提高到不大于 22%(25%)。

### 2.1.3 集料洛杉矶磨耗值试验分析

进行粗集料磨耗值试验研究,结果如图 4 所示。

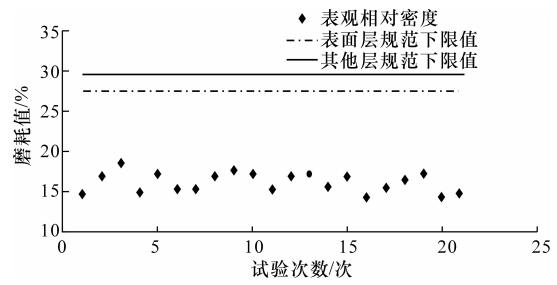


图 4 粗集料磨耗值试验结果

Fig. 4 Abrasion value test results of coarse aggregate

由图 4 试验结果可知,集料磨耗值最大值为 18.9%,最小值为 14.8%,均能满足国家规范要求的沥青路面上(中、下)面层集料磨耗值不大于 28%(30%)的要求,数值大部分分布在 15%~20%之间,整体质量较好。

粗集料磨耗试验是检测标准条件下粗集料抵抗摩擦、撞击的能力,以磨耗损失表示,与集料压碎值试验相比,可更好地模拟集料在生产运输及施工过程中发生磨损的情况,也可从侧面反映集料的强度。磨耗值越小,意味着其抵抗磨损能力越强,通过提高集料磨耗值要求可减少其在运输、生产过程中的变形,达到稳定混合料级配的目的,结合已有试验结果及其他省份应用经验,建议可将上(中、下)面层集料洛杉矶磨耗值技术标准由不大于 28%(30%)提高

到不大于 24%(26%)。

### 2.1.4 坚固性试验结果分析

进行粗集料坚固性试验研究,结果如图 5 所示。

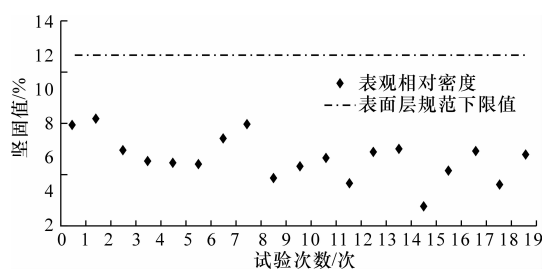


图 5 粗集料坚固性试验结果

Fig. 5 Firmness test results of coarse aggregate

集料坚固性是确定集料经饱和硫酸钠溶液多次浸泡与烘干循环,承受硫酸钠结晶压而不发生显著破坏或强度降低的性能。坚固性试验是模拟集料在自然状态下受到雨水的浸泡和日照所受到的损害。从图 5 试验结果可知,坚固性分布在 4%~8%之间,均能满足国家规范要求。本文建议不提高坚固性标准。

### 2.1.5 针片状含量试验结果分析

进行粗集料针片状试验研究,结果如图 6 所示。

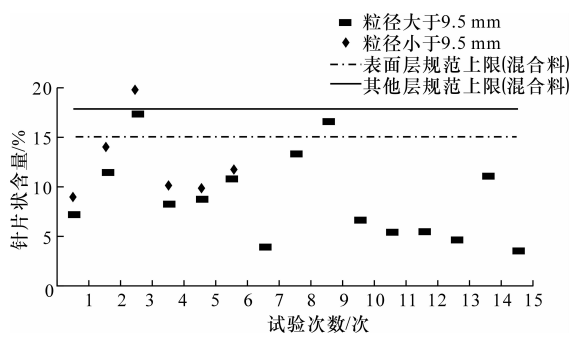


图 6 粗集料针片状试验结果

Fig. 6 Flakiness test results of coarse aggregate

由图 6 试验结果可知,针片状含量(质量分数)最大值为 19.9%(粒径小于 9.5 mm),满足国家规范对沥青路面中下面层对集料针片状含量不大于 20%(单档)的要求,大部分集料的针片状含量在 15%以下。集料中的针片状颗粒在施工过程中及路面使用过程中容易发生折断,会造成沥青混合料级配波动、路面水损害、稳定性差等质量隐患,应严格控制,可适当提高标准。从现有试验结果及其他省份的应用经验来看,对于甘肃地区,建议可将集料针片状含量技术指标上(中、下)面层由规范的不大于 15%(18%)提高到不大于 12%(15%)(混合料)。

### 2.1.6 粗集料粉尘含量试验结果分析

粗集料粉尘含量指各档料粉尘含量的平均值,

具体结果如图 7 所示。

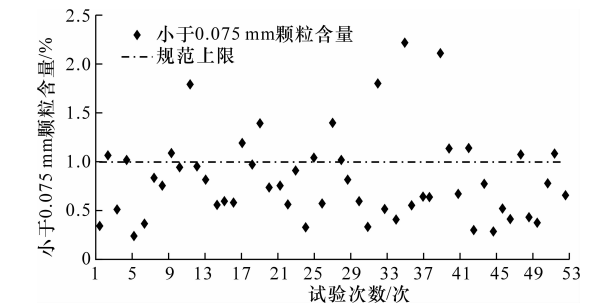


图 7 粗集料粉尘含量试验结果

Fig. 7 Dust content test results of coarse aggregate

从图 7 的试验结果可知,粉尘含量出现超标现象的较多,约有 30.2% 的料场集料粉尘含量不能满足规范要求。由于集料粉尘含量对混合料性能是有影响的,而其中的泥土成分或非碱性成分对沥青混合料的影响则可能是致命的。而从调研情况来看,现有集料加工厂家均不能完全保证进行生产的母材是洁净不含泥土等杂质,也就不能保证集料中的粉尘不含泥土成分。鉴于此,本文建议甘肃地区粗集料粉尘含量均严格按不大于 1% 控制。

2.1.7 其他指标分析

通过试验研究,除以上分析的指标外,集料的粘附性能够满足国家规范要求,同时由于试验条件的限制,对于部分指标未进行研究,如软石含量、集料磨光值及亚甲蓝值,这些指标标准仍然按照国家规范要求。

2.2 甘肃陇东地区集料技术标准的提出

根据上述分析结果,同时结合中国其他省份的应用经验,本文建议甘肃陇东地区 Superpave 路面上、中、下面层集料技术指标要求如表 6 所示。

表 6 甘肃陇东地区 Superpave 路面粗集料质量技术要求(推荐值)  
Tab. 6 Coarse aggregate quality technical requirements of Superpave pavement in Longdong region of Gansu(suggested value)

指 标		表面层	其他层
石料压碎值/%	不大于	22	25
洛杉矶磨耗损失/%	不大于	24	26
表观相对密度	不小于	2.65	2.60
吸水率/%	不大于	2	3
磨耗值/%	不小于	42	
坚固性/%	不大于	12	12
针片状颗粒含量(混合料)/%	不大于	12	15
其中粒径大于 9.5 mm/%	不大于	15	18
其中粒径小于 9.5 mm/%	不大于	18	20
水洗法小于 0.075 mm 颗粒含量/%	不大于	3	5
集料与沥青的粘附性/级	不小于	5	4
粗集料	1 个破碎面/%	不小于	100
棱角性	2 个及以上破碎面/%	不小于	100

3 结 语

(1)通过对甘肃地区气温整理统计,利用 LTPP 模型计算、调整得到甘肃地区 Superpave 路面沥青 PG 分级推荐标准。

(2)通过对甘肃省陇东地区集料指标研究分析,提出了甘肃陇东地区 Superpave 路面集料推荐标准,而对于甘肃省内其他地区 Superpave 路面集料标准,还有待于进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 陈俊志. 甘肃省重载交通沥青路面结构研究[D]. 西安:长安大学,2007.  
CHEN Jun-zhi. Study on structure of heavy-load asphalt pavement of Gansu province[D]. Xi'an:Chang'an University,2007. (in Chinese)

[2] 袁得豪. 甘肃省沥青路面早期破坏调查研究及防治措施[D]. 西安:长安大学,2007.  
YUAN De-hao. Investigation and research on the early failure of asphalt pavement and preventive measures In Gansu province[D]. Xi'an:Chang'an University,2007. (in Chinese)

[3] 付清华. 甘肃省高寒阴湿地区公路典型病害防治[D]. 西安:长安大学,2007.  
FU Qing-hua. Study on highway typical hazards preventing and curing technology in Gansu high cold wet zone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)

[4] 余同山. Superpave 技术在城市道路改造中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2010.  
YU Tong-shan. The application research on Superpave technology in urban road reconstruction[D]. Xi'an:Chang'an University,2007. (in Chinese)

[5] 汤 雄. Superpave 在甘肃高速公路沥青路面中的研究与应用[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.  
TANG Xiong. The research and application on Superpave using in Gansu expressway asphalt pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

[6] Mahboub K, Little D N. An improved asphalt concrete mix design procedure[J]. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, 1990(26):12-14.

[7] Asphalt Institute. Superpave performance graded asphalt binder specification and testing, Superpave series No. 1 (SP-1)[R]. Lexington: Asphalt Institute, 1995.