

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.08.008

基于 PG 分级的高寒高海拔地区沥青 结合料性能与适应性

李东钊, 龚 演*, 严二虎, 田 波, 权 磊
(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为解决高寒高海拔地区沥青结合料性能不足的问题, 结合京藏高速公路格尔木至那曲段地形地貌与气候变化特点, 依托沿线多个气象观测站的 30 a 气象资料, 对所处地貌、气候特征、海拔、交通荷载量等相关数据进行统计学分析、计算, 探索高海拔大温差地区沥青胶结料 PG 分级方法的适应性。结果表明: 基于青藏地区现场监测结果对 LTPP 高温温度计算模型进行修正, 提出了更适合高寒高海拔地区沥青结合料高温温度计算公式, 提高了沥青高温性能指标计算公式的可靠性; 在京藏高速公路格拉段对沥青胶结料的 PG 分级建议值最高达到 PG76-22, 在高寒高海拔地区应充分考虑海拔增高对沥青低温抗裂性能的影响, 将低温等级提高 1~2 级; 在那曲地区建议使用 SBR II-A 改性沥青, 在格尔木地区建议使用 SBS 改性沥青; 在沱沱河、五道梁地区, 建议开发抗紫外温拌改性沥青, 采用更高标号的基质沥青对沥青进行 SBS/SBR 复合改性, 并进行适用性研究。本次研究成果为高寒高海拔地区沥青结合料的材料开发技术、施工工艺提升及工程化应用提供一定参考, 有利于提高沥青路面修建质量, 延长使用寿命。

关键词: 道路工程; 高低温性能; PG 分级; 沥青; 公路战略研究计划 (SHRP)

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 08-0078-08

Asphalt Binder Property and Adaptability Based on PG Grading in Severe Cold and High Altitude Regions

LI Dong-zhao, GONG Yan*, YAN Er-hu, TIAN Bo, QUAN Lei
(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient performance of asphalt in the severe cold and high altitude regions, based on the characteristics of topography, geomorphology and climate, and relying on the 30-year meteorological data observed by several meteorological observation stations along the Golmud-Nagqu section of Beijing-Tibet expressway, the statistical analysis and calculation were carried out on the geomorphology, climatic characteristics, altitude, and traffic load data. The adaptability of PG grading method for asphalt binder in high-altitude regions with large temperature differences was explored. The result indicates that the LTPP high temperature calculation model is modified based on the field monitoring results in Qinghai-Tibet region. The formula for calculating high temperature of asphalt binder in this region is proposed to improve the reliability of the formula. In Golmud-Nagqu section, the recommended PG classification value of asphalt binder reaches the highest PG 76-22. In the severe cold and high altitude region, the effect of elevation increase on low temperature cracking resistance of asphalt should be fully considered. The low temperature grade should be increased by 1 to 2 grades. It is recommended to use SBR II-A modified asphalt in Nagqu

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目 (2023-9034)

作者简介: 李东钊 (1995-), 男, 山东潍坊人, 硕士. (dz.li@rioh.cn)

* 通讯作者: 龚演 (1991-), 女, 湖北荆州人, 博士. (gy.1991@163.com)

area, and to use SBS modified asphalt in Golmud area. In Tuotuohe and Wudaoliang areas, it is recommended to develop UV-resistant modified asphalt, and use higher grade base asphalt to carry out SBS/SBR composite modification on asphalt for its applicability study. The study result provides basis for the material development technology, construction technology improvement and engineering application of asphalt binder in severe cold and high altitude regions. It is conducive to improving the construction quality of asphalt pavement, and extending the service life.

Key words: road engineering; high and low temperature properties; PG grading; asphalt; strategic highway research program (SHRP)

0 引言

青藏高寒高海拔地区平均海拔3 000 m以上,具有日照时间长、日照辐射强度高、昼夜温差大等气候特点。沥青胶结料是温度敏感性材料,其高低温性能对沥青路面性能起到关键作用:高温易软化,导致沥青路面出现车辙等永久变形;低温易发脆,导致沥青路面开裂。因此,青藏高寒高海拔地区的严苛环境对沥青路胶结料的性能提出更高的要求,为高速公路建设带来一定挑战。昼夜温差巨大,极易造成沥青混合料温度离析,加剧沥青路面层的温度应力并产生涨缩,沥青路面出现平整度偏差大、压实度不足等施工质量问题,同时,导致沥青路面出现裂缝、车辙等早期病害,如遇降温或降雨进而引发结构性损伤,影响使用寿命^[1];日、年的温度差与光照强度的影响会加速沥青胶结料的老化过程,沥青的低温抗裂性能随之下降,导致沥青路面开裂、松散等早期病害,影响沥青路面耐久性^[2];随着海拔增高,青藏地区年可施工天数急剧下降,短暂的工期为沥青路面施工带来不便。

青藏地区沥青路面的开裂、疲劳破坏和冻融破坏现象严重,其中,低温开裂和冻融破坏为青藏地区沥青路面主要破坏形式。青藏高速公路格尔木至拉萨段路面病害调查表明,沥青面层裂缝类和松散类损害分别占总损害的36%和17%^[3-4],而车辙类损害占比很小。由此可见,西藏地区的气候特征对沥青路面长期性能起关键性作用,路表面的松散与横向裂缝主要是由路面的平整度与压实度性能引起,而车辙类损害占比低说明车辆荷载对路面早期破坏的影响较弱。因此,高寒高海拔地区对沥青原材料的性能要求与其他地区有所不同,需严格把握沥青材料的质量^[5-6],否则,难以适应高寒高海拔地区特征,沥青路面将极易出现早期病害。

为了提高青藏地区沥青路面质量和使用寿命,重点在于考虑沥青材料的低温抗裂性能及高低温性能的

平衡。沥青的高低温性能与其流变性能密不可分^[7-8],可以采用美国交通运输部(TRB)沥青结合料路用性能规范(Superior Performing Asphalt Pavement, SuperPave)中提出的PG性能分级思路进行胶结料选型。根据全国气候因素,中国现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)提出了高温、低温、雨量分区,由于标准中范围太宽,气候区域差异不明显,只能对青藏地区进行粗略区划。目前,许多研究者通过搜集气候资料对不同地区沥青路面路用性能进行气候分区与分级研究^[9-11],除了PG分级方法的对比研究外,一部分研究人员还通过现场布设传感器获得路面实测温度,确定不同高温模型计算温度值的精确性。但是由于高寒高海拔地区气候条件特殊,气象站搜集的空气温度很难真实反映实际路面温度^[12],目前仍缺乏有针对性的青藏地区沥青路面温度预估模型及沥青胶结料PG分级方法。

京藏高速公路(G6)格尔木至那曲段项目位于格尔木市、玉树藏族自治州和那曲境内,全长达到1 100 km,全线的平均海拔在4 500 m以上,建设难度堪称世界之最。京藏高速公路格尔木至那曲段的建设将打通进出藏高速大通道,对完善区域路网结构,提升交通运输服务水平,方便民众平安快捷出行有重要意义。而由于严苛气候的影响,格那高速建设项目面临着巨大的挑战,本研究主要探索高海拔大温差地区沥青胶结料PG分级方法的适应性,研究沥青路面材料的性能指标、选型及改性,为高寒高海拔地区沥青结合料的材料开发技术、施工工艺提升及工程化应用提供一定参考。

1 沥青路面温度分级

沥青性能评价体系经历了针入度、黏度、PG性能分级3个发展阶段。1987年10月,为了提升沥青路面修建质量,美国交通运输部实施公路战略研究计划(Strategic Highway Research Program, SHRP)以提高路面性能为目的研究沥青的评价方法。其中

SuperPave 沥青规范中, 根据各地区的设计温度和交通情况, 提出 SHRP 温度模型对不同沥青进行 PG 分级。由于沥青胶结料的性能不仅受温度影响, 还与交通荷载 (包括荷载水平、加载次数和时间) 密切相关。因此, 高温设计温度由年连续 7 d 最高气温的平均气温推演, 为路表下 20 mm 深处的温度, 同时根据交通荷载及车速情况进行修正, 对于车载重、交通量大、车速缓慢的路面, 沥青路面温度等级应提高 1~2 个等级。同时, 低温设计温度由年最低气温来表示, 为路表温度。

随着路面长期性能研究计划的开展, 沥青路面温度分级被进一步研究, 带有概率的高、低温路面温度计算模型被提出, 即 LTTP 温度模型。根据标准

正态分布的可靠系数确定路面设计温度, 研究沥青路面温度分级。2005 年, 对 LTTP 提出的高温模型进行修正, 提出 LTTPBind3.1 高温模型, 其低温模型与 LTTP 低温模型一致^[13-14]。

2 气候分析和气候分区

为了计算沥青结合料 PG 分级, 本研究采用了格尔木、五道梁、沱沱河、那曲 4 个气象观测站所观测的近 30 a 的气象数据资料, 计算出 6 月份连续 7 d 最高气温的平均值、连续 7 d 最高气温的标准差、1 月份年最低气温、年最低气温标准差、日温度大于 10 ℃年积温 (4~9 月份) 的平均值、年平均降雨量等特征值, 汇总于表 1。

表 1 京藏高速公路格那段沿线站点气象数据特征值

Tab. 1 Meteorological data characteristic values of stations along Golmud-Nagqu section of Beijing-Tibet Expressway									
站点	海拔/m	7 d 平均最高气温 $T_{Ha}/^{\circ}\text{C}$	7 d 平均最高气温标准差 $S_{Ha}/^{\circ}\text{C}$	年最低气温 $T_{La}/^{\circ}\text{C}$	年最低气温标准差 $S_{La}/^{\circ}\text{C}$	10℃以上年积温 $T_{10}/^{\circ}\text{C}$	年平均降雨量/mm	日照时数/h	纬度 $L_{at}/(^{\circ})$
格尔木	2 807	28. 78	1. 99	- 19. 85	1. 51	4 460	250~500	3 000~3 200	36. 40
五道梁	4 612	16. 74	2. 01	- 29. 70	2. 03	1 080	500~1 000	2 200~3 000	35. 22
沱沱河	4 533	18. 56	1. 58	- 30. 95	3. 13	1 680	293. 9	2 200~3 000	34. 22
那曲	4 527	19. 25	1. 23	- 26. 81	2. 24	2 210	449. 6	2 200~3 000	31. 46

根据中国道路沥青路面的气候分区, 格那高速公路沿线区域可划分为 2-3-3 夏热冬冷半干区 (格尔木) 和 3-2-3 夏凉冬寒半干区 (五道梁、沱沱河、那曲)。3 个数字越小说明气候因素对沥青材料影响越严重。

3 青藏地区沥青 PG 分级

通过收集格尔木、五道梁、沱沱河、那曲 4 个气象观测站所观测的气象数据资料, 根据 SHRP, LTTP, LTTPBind3.1 模型计算各层位的路面设计温度等级。一般来说, 高温设计温度指各层位中间温度值; 低温设计温度指各层位顶部温度值。按照中国典型路面结构, 计算层位的深度如表 2 所示。

3.1 高温温度

采用 SHRP, LTTP, LTTP Bind3.1 模型, 根据

表 2 高低温等级温度设计层位 (单位: mm)

Tab. 2 Temperature design layers for high and low temperature grades (unit: mm)		
层位	高温	低温
表面层	20	0
中面层	70	40
下面层	140	100

表 1 中沿线站点气象数据特征值计算不同层位的高温设计温度, 计算结果如表 3 所示。其中 $T_{HP,20}$ 表示距路表 20 mm 处实测沥青路面最高温度; $T_{HP,70}$ 表示距路表 70 mm 处实测沥青路面最高温度; $T_{HP,140}$ 表示沥青路面距路表 140 mm 处实测沥青路面最高温度。

根据已有研究成果^[15-18]将温度传感器安装至沥青路面, 实测路面不同深度的温度, 通过对比实测

表 3 京藏高速公路格那段沿线路面不同层位最高温度预测结果 (单位: ℃)

Tab. 3 Forecast results of maximum temperatures at different layers of road surface along Golmud-Nagqu section of Beijing-Tibet expressway (unit: ℃)									
站点	SHRP 模型			LTTP 模型			LTTP Bind3.1 模型		
	$T_{HP,20}$	$T_{HP,70}$	$T_{HP,140}$	$T_{HP,20}$	$T_{HP,70}$	$T_{HP,140}$	$T_{HP,20}$	$T_{HP,70}$	$T_{HP,140}$
格尔木	54. 2	48. 3	43. 1	55. 4	50. 5	46. 8	64. 1	59. 2	55. 6
五道梁	43. 0	38. 0	33. 7	46. 2	41. 3	37. 7	33. 4	28. 5	24. 9
沱沱河	44. 0	38. 9	34. 4	47. 5	42. 6	39. 0	40. 2	35. 3	31. 7
那曲	44. 4	39. 2	34. 7	48. 3	43. 4	39. 8	45. 4	40. 5	36. 9

温度值与模型计算最高温度值, 可验证不同模型计算值的精确度及适用性, 同时对温度计算公式进行修正。本研究以那曲等几个青藏典型区域为例, 将温度传感器安装至沥青路面距路表 20 mm 处实测沥青路面最高温度, 对比研究 3 种模型计算的最高温度与实测路表最高温度的差异性, 结果如表 4 所示。

表 4 模型计算及距路表 20 mm 处实测路面最高温度
(单位: °C)

Tab. 4 Model calculation and measured maximum pavement temperature at 20 mm depth from pavement surface (unit: °C)

站点	SHRP 模型 $T_{HP,20}$ 计算值	LTPP 模型 $T_{HP,20}$ 计算值	LTPP Bind3.1 模型 $T_{HP,20}$ 计算值	路表 实测值
那曲	44.4	48.3	45.4	51.1
日喀则	50.8	53.4	62.4	55.4
拉萨	52.2	54.3	32.7	59.3
昌都	53.4	55.7	39.7	57.9
林芝	50.9	53.8	45.1	55.7

由表 4 可见, 3 种模型预测的路表最高温度均偏低, 其中 LTPP 模型计算值最接近实测值。采用线性回归分析的统计方法, 将实测路表高温温度与模型计算高温温度进行相关性分析, 结果如图 1 所示。

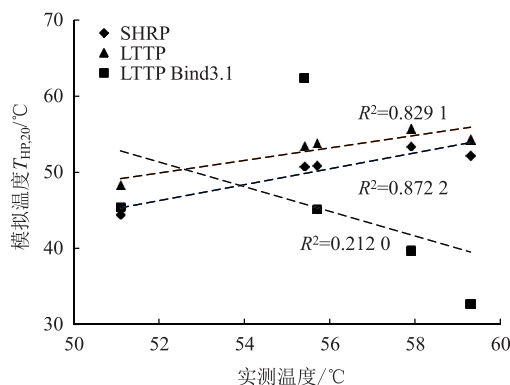


图 1 不同模型计算的高温温度与实测路表高温温度的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of high temperatures calculated by different models with actual measured high surface temperatures

线性拟合后 R 值越大, 代表计算值与实测值相关性越强, 模型计算的高温温度值精度越高。3 种模型计算的高温温度精度由大到小排序为 SHRP 模型, LTPP 模型, LTPP Bind3.1 模型。其中 LTPP Bind3.1 模型模拟的温度与青藏地区实测温度差异性较大, 不适用于该地区。基于 SHRP 模型和 LTPP 模型的计算温度值与实测温度值相关性 (R 值) 基本一致, 综合 2 种模型计算值与实测值的差异性与相关性, 采用 LTPP 模型计算青藏高寒高海拔区域的高温温度

更具有借鉴意义。另外, 考虑到国外的气候条件与青藏地区的气候条件存在差异, 可采用 Python 软件中的 curve fit 函数对 LTPP 高温模型进行修正, 进一步提高计算精度。

LTPP 高温模型中有 3 个变量: 年平均 7 d 最高气温 T_{Ha} , 纬度 L_{at} 和年 7 d 最高气温的标准方差 S_{Ha} 。因此修正与之相关的 3 个系数, 并引入常数 E , 其他系数采用 LTPP 模型中的值, 修正后的公式为:

$$T_{HP} = 54.32 + A \times T_{Ha} - B \times L_{at}^2 - 15.14 \lg(d + 25) + E \times (9 + C \times S_{Ha}^2)^{0.5}, \quad (1)$$

式中, A , B , C , E 为修正系数; T_{Ha} 为年平均 7 d 最高气温; L_{at} 为纬度; S_{Ha} 为 7 d 最高气温的标准方差; d 为实测点位距离路表的深度。

采用 Python 求得结果为: $A=0.7732$; $B=0.0064$; $C=18.9949$ 。因此, 采用 Python 修正后的高温计算公式为:

$$T_{HP} = 54.32 + 0.7732 T_{Ha} - 0.0064 L_{at}^2 - 15.14 \lg(d + 25) + E \times (9 + 18.9949 S_{Ha}^2)^{0.5}. \quad (2)$$

为了验证修正后的高温模型计算精度, 根据修正后的式 (2) 进行计算, 比较计算结果, 如表 5 所示。

表 5 修正前后模拟计算结果对比 (单位: °C)

Tab. 5 Simulation calculation results comparison before and after correction (unit: °C)

站点	LTPP 模型的 $T_{HP,20}$ 计算值	修正后的 $T_{HP,20}$ 计算值	路表实测值
那曲	48.3	50.5	51.1
日喀则	53.4	57.4	55.4
拉萨	54.3	59.5	59.3
昌都	55.7	57.8	57.9
林芝	53.8	56.0	55.7

由表 5 可见, 修正后的高温模型计算结果比 LTPP 模型的计算结果数值更高。与现场路表实测值相比, 修正后的高温模型计算值与路表实测值非常接近, 修正后的高温计算公式更加符合青藏高寒高海拔地区的实际情况。

对于沥青混合料, 增加温度会导致车辙量增加, 增加荷载大小或增加荷载作用次数也会导致车辙量的增加; 虽然二者增加的幅度不同, 但是就最终沥青路面效果来说, 是等效的。因此可以基于变形量的大小, 进行温度-荷载条件等效换算。基于交通量、车速和高温下沥青胶结料性能等效性, 可以将不同荷载条件换算成等效的温度条件, 将原沥青路面的温度条件再叠加上交通荷载的等效温度和车速的等效温度, 从而选择合适的沥青胶结料等级。

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),实际沥青路面中沥青混合料受很多因素的影响,沥青胶结料只是其中的一个重要因素,进行温度、荷载和车速 3 个因素的等效叠加的量化是非常复杂的。目前,根据 SHRP, LTTP, LTTP Bind3.1 模型,有 3 个不同量化标准。采用美国 LTTP 模型确定沥青高温等级的车速、交通量等效数值计算,标准荷载为 80 kN (见表 6)。由于美国标准荷载为 80 kN,将表 6 中交通量按照 4 次方法则换算为中国标准荷载 100 kN,这需要乘以一个系数 $(80/100)^4$,即 0.4;考虑荷载分级、换算方法等差异,将折减系数取为 0.5,如表 6 所示。

表 6 美国 LTTP 模型确定沥青高温等级的车速、交通量等效数值

Tab.6 Equivalent values of vehicle speed and traffic volume for determining asphalt high-temperature grade with U. S. LTTP model

美国交通荷载 等级/($\times 10^5$ 次)	中国交通荷载 等级/($\times 10^5$ 次)	一般路段 (>70 km/h)	长大纵坡路段 ($20\sim 70$ km/h)
<3	<1.5	2	6
<10	<5	4	8
<30	<15	6	10
<100	<50	8	12
<300	<150	10	14
>300	>150	12	16

根据中国相关标准,交通荷载分为 3 级,即轻交通 (0~500 万次)、中交通 (500~1 500 万次) 和重交通 ($>1\ 500$ 万次)。综合交通量和车速,实际上分为 6 种情况,即:轻、中、重交通的一般路段;轻、中、重交通的长大纵坡路段。根据 2021 年 G109 线青藏高速公路月交通量统计 (见表 7),预估格那高速公路的交通荷载为中交通。

根据修正后的高温模型和温度-交通量-车速的等效量化标准,按照式 (3) 对沥青胶结料高温性能等级进行修正,预测高温模型中路面不同层最高温度,如表 8 所示。

$$T_{PG} = T_{HP-ad} + T_{PGS}, \tag{3}$$

式中, T_{HP-ad} 为修正后沥青路面结构某一设计层位的最高路面温度; T_{PGS} 为高温条件下的等效温度,青藏地区 $T_{PGS}=8$ 。

3.2 低温设计温度

采用 SHRP 模型和 LTTP 模型,根据表 1 中京藏高速公路格那段沿线站点气象数据特征值,计算出不

表 7 G109 线青藏高速公路 2021 年月交通量统计

Tab.7 Statistical data on monthly traffic volume of Qinghai-Tibet expressway G109 in 2021

月份	自然数合计/辆	当量数合计
1	1 644	3 910
2	1 448	3 036
3	2 242	5 656
4	3 040	7 775
5	3 853	9 768
6	3 789	9 521
7	3 916	9 182
8	3 836	9 549
9	3 512	8 933
10	3 170	7 968
11	2 679	6 714
12	2 508	6 143
平均值	2 970	7 346

表 8 基于修正后的高温模型路面不同层最高温度预测结果 (单位:℃)

Tab.8 Predicted results for maximum temperatures in different layers of pavement with revised high-temperature model (unit: ℃)

站点	一般路段			长大纵坡路段		
	$T_{HP,20}$	$T_{HP,70}$	$T_{HP,140}$	$T_{HP,20}$	$T_{HP,70}$	$T_{HP,140}$
格尔木	69.9	65.0	61.4	73.9	69.0	65.4
五道梁	61.3	56.4	52.8	65.3	60.4	56.8
沱沱河	59.6	54.6	51.0	63.6	58.6	55.0
那曲	58.5	53.5	49.9	62.5	57.5	53.9

同设计层位的 PG 分级低温设计温度。同时,在路面放置温度传感器实测路表最低温度,计算结果和实测最低温度如表 9 所示。

表 9 路面不同层最低温度预测结果及实测路表温度 (单位:℃)

Tab.9 Predicted results for the lowest temperatures and actual measured surface temperatures in different layers of pavement (unit: ℃)

站点	SHRP 模型			LTTP 模型		
	$T_{LP,0}$	$T_{LP,40}$	$T_{LP,100}$	$T_{LP,0}$	$T_{LP,40}$	$T_{LP,100}$
格尔木	-18.4	-16.5	-14.0	-13.5	-10.9	-9.1
五道梁	-28.0	-26.1	-23.5	-23.0	-20.4	-18.6
沱沱河	-31.3	-29.4	-26.8	-25.2	-22.6	-20.9
那曲	-25.9	-24.0	-21.5	-20.4	-17.8	-16.0

从低温设计温度计算结果来看,采用 SHRP 模型计算沥青路面低温温度偏安全。考虑到青藏高寒

高海拔地区的地理环境及气温状况, 建议采用 SHRP 模型确定低温设计温度^[13]。由于低温反映沥青路面的开裂, 主要与气温有关, 与交通荷载和车速无关, 因此无需修正。因此通过计算 T_{LP} 并按 PG-10, PG-16, PG-22, PG-28, PG-34 对沥青混合料的低温性能等级进行取值。

3.3 PG 分级与分析

已有研究表明^[11], 沥青路面路表以下 4~9 cm 处 (中面层) 剪应力分布最大, 容易产生较为严重的车辙病害。因此, 考虑到中面层的结构功能需求, 将沥青结合料的高温等级提高 1 个等级。根据高、低温计算模型、等效温度及功能需求, 计算出不同站点对应的沥青结合料的 PG 分级建议值, 结果如表 10 所示。相比于一般路段, 长大纵坡路段的高温等级可以适当提高 1 个等级。

表 10 京藏高速公路沥青胶结料 PG 分级建议值

Tab. 10 Recommended PG grade values for asphalt binder of Beijing-Tibet expressway

站点	一般路段			长大纵坡路段			海拔/ m
	上面层	中面层	下面层	上面层	中面层	下面层	
格尔木	70-22	76-22	64-16	76-16	76-16	70-10	2 807
五道梁	64-34	64-28	58-28	70-28	70-22	58-22	4 612
沱沱河	64-34	64-34	52-28	64-28	70-28	58-22	4 533
那曲	64-28	64-28	52-22	64-22	64-22	58-22	4 527

由于目前气象观测站只能观测到 4 个站点的气候数据, 对沿线不同区域进行半定量分析。考虑格那高速沿线地形地貌情况, 可发现海拔与气温具有较强关联性, 海拔升高将导致沥青的高温分级降低 1~2 个等级, 低温分级升高 1~2 个等级。从格尔木 (桩号 K2760) 至五道梁 (桩号 K3000) 段, K2760~K2900 存在较明显的海拔提高, K2900~K3000 海拔趋于稳定, 格尔木与五道梁两地的高、低温均下降 9℃左右, 因此应根据海拔高度选择合适类型的沥青。

4 青藏地区沥青类型及适用性

从 PG 分级的建议值上可看出, 青藏地区日夜温差大, 低温温度低、持续时间长, 沥青胶结料应选择兼顾高低温性能、低温抗裂性能强的高等级沥青。根据《多年冻土地地区公路设计与施工技术规范》(JTG/T 3331-04—2023) 建议, 沥青路面宜选择高标号的道路石油沥青, 包括 110#, 130#, 150# 沥青, 表面层和中面层沥青混合料宜采用 SBR 或 SBS 改性沥

青。该施工技术规范中未明确规定沥青种类和型号, 对格那高速公路沥青类型选择的指导意义并不强。

经过广泛调研, 青藏地区不同高速公路项目采用的沥青型号如表 11 所示。青藏地区较常用的改性沥青为 SBS 和 SBR 两种改性沥青, 其中, SBS 改性沥青高温稳定性能优秀, SBR 具有良好的低温抗裂性能, 在高寒高海拔地区, 因低温持续时间长, 沥青应侧重选择低温抗裂性能好的沥青胶结料。很多室内研究和工程表明, SBR II-A 改性沥青 (基质沥青 130#) 更适用于青藏地区^[19-21]。

表 11 不同高速公路采用的沥青型号

Tab. 11 Different asphalt types for various expressways

藏区高速公路项目	沥青型号
林拉高速公路	低海拔地区: SBS
	高海拔地区: SBR II-A
青藏高速公路格拉段改建项目	SBR II-A
国道 G219 线桑桑至拉孜段改建整治工程	SBR II-A
纳木错至班戈公路改建工程	SBR II-A
国道 G219 线新藏公路巴嘎至马依木新桥段改建工程	SBR II-A
巴尔兵站-札达 (古格王朝遗址) 公路改建工程	SBR II-B
国道 G219 线新藏公路达吉岭至国杰段改建工程	SBR II-A

对目前中国常用的 110# 沥青及 SBS I-C, SBS I-D, SBR II-A 改性沥青开展高低温性能试验, 根据试验结果对 110# 沥青及 SBS I-C, SBS I-D, SBR II-A 改性沥青进行 PG 分级研究, 结果如表 12 所示。

表 12 不同沥青的 PG 分级结果

Tab. 12 PG grading results of different asphalts

沥青种类	110#	SBS I-C	SBS I-D	SBR II-A
PG 分级	58-22	70-22	76-22	64-28

结合表 10 和表 12 结果, 对于表面层和中面层, SBR II-A 改性沥青可以用于格那高速沿途的那曲地区; 格尔木地区由于海拔稍低, 可以考虑使用 SBS 改性沥青; 在沱沱河和五道梁地区 (PG64-34), 目前较常使用的改性沥青均不能很好地满足低温性能要求。针对格那高速公路的情况, 沥青路面设计亟待解决的是低温问题, 同时需要兼顾该地区紫外线强度高, 日照时间长, 可施工时效短的实际情况。考虑到 SBR 改性沥青施工温度低, 更适合高寒高海拔地区, 因此, 建议采用更高标号的基质沥青对沥青进行 SBS/SBR 复合改性, 以满足改性沥青的高低温性能要求。

5 结论

本研究对所处地貌、气候特征、海拔、交通荷载量等相关数据进行统计学分析、计算,探索高海拔大温差地区沥青胶结料 PG 分级方法的适应性。

(1) 针对青藏地区,PG 分级可作为沥青胶结料选型的参考,宜采用 SHRP 模型计算沥青的低温温度。同时,对于高温温度的计算,本研究基于青藏地区现场监测结果对 LTPP 高温温度计算模型进行修正,提出更适合高寒高海拔地区沥青结合料高温温度计算公式,提高了沥青高温性能指标计算公式的可靠性。

(2) 对格拉高速公路地区沥青胶结料的 PG 分级建议值最高达到 PG76-22,低温较低区域达 PG64-34,高寒高海拔地区应充分考虑海拔增高对沥青低温抗裂性能的影响,将低温等级提高 1~2 级。

(3) 针对格那高速项目,那曲地区建议使用 SBR II-A 改性沥青;格尔木地区建议使用 SBS 改性沥青;在沱沱河和五道梁地区,建议开发抗紫外温拌改性沥青,采用更高标号的基质沥青,对沥青进行 SBS/SBR 复合改性,并进行适用性研究。

参考文献:

References:

- [1] 邵华. 西藏大温差地区沥青路面结构适应性与耐久性探讨 [J]. 中国公路, 2023 (16): 185-187.
SHAO Hua. Discussion on Structural Adaptability and Durability of Asphalt Pavement in Tibet Area with Large Temperature Difference [J]. China Highway, 2023 (16): 185-187.
- [2] 崔宇阳. 藏区沥青紫外老化行为与抗老化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
CUI Yu-yang. Study on Ultraviolet Aging Behavior and Antiaging of Asphalt in Tibetan Area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [3] 窦明健, 胡长顺, 多吉罗布, 等. 青藏公路路面病害成因分析 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (4): 439-444.
DOU Ming-jian, HU Chang-shun, DUOJI Luo-bu, et al. Analysis on Surface Troubles of the Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25 (4): 439-444.
- [4] 朱自成. 高寒高海拔地区沥青路面病害机理与防治技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
ZHU Zi-cheng. Study on Disease Mechanism and Control Technology of Asphalt Pavement in High Alpine and High Altitude Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [5] 司伟, 张博文, 杨若聪, 等. 青藏高寒区基于真实环境冻融作用的沥青混合料冻融疲劳破坏表征 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2023, 43 (3): 11-21.
SI Wei, ZHANG Bo-wen, YANG Ruo-cong, et al. Characterization Analysis of Freezing-thawing Fatigue of Asphalt Mixtures Freeze-thaw Action in Real Environment in Qinghai-Tibet Plateau Cold Regions [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43 (3): 11-21.
- [6] 尹国宏, 张平, 李博, 等. 重冻地区组合式基层沥青路面温度应力响应研究 [J]. 市政技术, 2023, 41 (10): 94-100.
YIN Guo-hong, ZHANG Ping, LI Bo, et al. Study on Temperature Stress Response of Composite Asphalt Pavement in Heavy Frozen Areas [J]. Municipal Engineering Technology, 2023, 41 (10): 94-100.
- [7] 周水文, 时敬涛, 张蓉, 等. 高寒高海拔地区改性沥青高温性能研究 [J]. 公路工程, 2017, 42 (6): 199-205, 212.
ZHOU Shui-wen, SHI Jing-tao, ZHANG Rong, et al. Research on High-and-low Temperature Properties of Modified Asphalt in Alpine and High Altitude Region [J]. Highway Engineering, 2017, 42 (6): 199-205, 212.
- [8] 杨凯. 高寒高海拔地区 SBS/SBR 复合改性沥青制备及性能评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
YANG Kai. Study on Preparation and Performance Evaluation of SBS/SBR Composite Modified Asphalt for Extremely Cold and High Altitude Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [9] 肖琪, 吴萍. 分析江西省高速公路沥青路面温度特征与沥青 PG 分级 [J]. 江西建材, 2018 (4): 150-151.
XIAO Qi, WU Ping. Analyzation of Temperature Characteristics and PG Classification of Expressway Asphalt Pavement in Jiangxi Province [J]. Jiangxi Building Materials, 2018 (4): 150-151.
- [10] 李萍. 吉林省沥青混合料高温设计指标统一性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
LI Ping. Research on Unity of Asphalt Mixture Design Index Under High and Low Temperature in Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [11] 唐佑绵, 刘书君. 新疆地区沥青路面性能温度分区与沥青结合料 PG 等级研究 [J]. 石油沥青, 2017, 31 (1): 31-35.
TANG You-mian, LIU Shu-jun. Research on the Temperature Field Division of Asphalt Pavement Performance and the Performance Grade of Asphalt Binder in Xinjiang Area [J]. Petroleum Asphalt, 2017, 31 (1): 31-35.

- [12] 吕骄阳, 权磊. 西藏地区公路沥青路面路用性能气候分区及 PG 分级 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (9): 1-7.
LÜ Jiao-yang, QUAN Lei. Climate Zoning and PG Grading for Highway Asphalt Pavement Performance in Tibet Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (9): 1-7.
- [13] MAHBOUB K, LITTLE D N. An Improved Asphalt Concrete Mix Design Procedure [J]. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, 1990 (26): 12-14.
- [14] KENNEDY T W, HUBER G A, HARRUGAN E T, et al. Superior Performing Asphalt Pavements: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410 [R]. Washington, D. C.: National Research Council, 1994.
- [15] 阳恩慧, 李雨泉, 罗蕾, 等. 季节性冻土地区隧间路段沥青路面温度场研究 [J]. 市政技术, 2023, 41 (6): 1-9.
YANG En-hui, LI Yu-xiao, LUO Lei, et al. Study on Temperature Field of Asphalt Pavement Between Tunnels in Seasonal Frozen Region [J]. Municipal Engineering Technology, 2023, 41 (6): 1-9.
- [16] 商淑杰, 张晓萌, 徐全鹏, 等. 全厚式沥青路面结构温度场全年变化规律研究 [J]. 山东交通科技, 2023 (3): 5-9, 18.
SHANG Shu-jie, ZHANG Xiao-meng, XU Quan-peng, et al. Study on the Year-round Variation of Temperature Field of Full Depth Asphalt Pavement [J]. Shandong Jiaotong Keji, 2023 (3): 5-9, 18.
- [17] 黄乔森. 广东地区高 PG 等级改性沥青研制及混合料性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
HUANG Qiao-sen. Development of High PG Grade Modified Asphalt and Study on Properties of Mixture in Guangdong Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [18] 徐霏, 王祺, 张宏, 等. SBS/SBR 改性沥青 PG 分级及其在西藏地区的适用性研究 [J]. 公路交通技术, 2018, 34 (6): 45-49.
XU Pei, WANG Qi, ZHANG Hong, et al. The PG Grade of SBS/SBR Modified Asphalt and Its Adaptability in Tibet Area [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34 (6): 45-49.
- [19] 李郑. 多聚磷酸与橡胶粉复合改性沥青及其混合料在西藏地区的应用研究 [J]. 公路工程, 2016, 41 (1): 230-235.
LI Zheng. Study on Application of Polyphosphate and Rubber Composite Modified Asphalt and Its Mixture in The Tibet Region [J]. Highway Engineering, 2016, 41 (1): 230-235.
- [20] 苏江, 田荣燕, 唐靖武, 等. 西藏地区废胎橡胶粉改性沥青的应用前景研究 [J]. 河南科技, 2019 (1): 98-101.
SU Jiang, TIAN Rong-yan, TANG Jing-wu, et al. Application Prospect of Waste Rubber Powder Modified Asphalt in Tibet [J]. Henan Science and Technology, 2019 (1): 98-101.
- [21] 杨光, 申爱琴, 陈志国, 等. 季冻区橡胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料性能及改性机理 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2015, 35 (6): 6-15.
YANG Guang, SHEN Ai-qin, CHEN Zhi-guo, et al. Pavement Performance and Modified Mechanism of Rubber Powder and SBS Compound Modified Asphalt Mixture in Seasonal Freezing Region [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35 (6): 6-15.