

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.07.002

# 长大纵坡路段沥青路面车辙规律和影响因素

周健民<sup>1</sup>, 吴博<sup>2</sup>

(1. 唐山高速公路集团有限公司, 河北 唐山 063011; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为了探明长大纵坡路段车辙的分布特征及影响因素, 改善沥青路面的抗车辙性能, 以铜黄高速公路为依托, 调查了该公路的日平均交通量和长大纵坡路段的车辙病害。首先, 通过测量不同长大纵坡路段的车辙深度, 分析了车辙沿深度方向的分布特点; 其次, 通过开挖典型车辙断面, 分析了车辙在路面结构层内的分布规律; 再次, 钻取了典型车辙病害路段的圆柱形路面芯样 (芯样直径 150 mm), 并结合圆柱形试件车辙试验 (CSWTT) 结果, 揭示了长大纵坡路段沥青路面车辙的分布规律和产生机理; 最后, 分析了纵坡坡度与坡长、行车速度、温度、沥青混合料材料特性等因素对长大纵坡路段车辙的影响, 同时提出了改善沥青路面长大纵坡路段抗车辙性能的建议。结果表明: 长大纵坡路段沥青路面的车辙主要分布于中、下面层; 长大纵坡路段的车辙主要由压密变形和剪切流动变形组成, 前者来自于行车荷载的碾压, 后者则是由沥青混合料在多因素 (重载、高温、慢速等) 耦合作用下的抗剪切能力不足引起, 且后者对车辙产生的贡献率更大; 当其他条件相同时, 坡长对车辙的贡献率高于坡度, 当纵坡坡长较长 (超过或接近临界坡长), 坡度较大 (>3%) 时, 则车速降低最快, 相应地, 长大纵坡路段沥青路面车辙最为严重。

**关键词:** 道路工程; 车辙规律; 钻芯取样; 长大纵坡; 产生机理

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2021) 07-0009-08

## Rutting Rule and Influencing Factors of Asphalt Pavement in Large Longitudinal Slope Section

ZHOU Jian-min<sup>1</sup>, WU Bo<sup>2</sup>

(1. Tangshan Expressway Group Co., Ltd., Tangshan Hebei 063011, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** In order to clarify the rutting distribution characteristics and its influencing factors of large longitudinal slope section, and improve the anti-rutting performance of asphalt pavements, Based on Tongling-Huangshan expressway, the average daily traffic (ADT) and rutting in large longitudinal slope section are investigated. First, the rutting distribution along the depth is analyzed by measuring the rutting depth in different large longitudinal slope sections. Then, the rutting distribution rule in the pavement structure layers is analyzed by excavating typical rutting sections. Afterwards, the cylindrical core samples ( $\phi 150$  mm) of typical rutting disease sections are drilled, and the rutting distribution rule and generation mechanism on long longitudinal slope section is revealed combining with the result of the cylindrical sample wheel tracking test (CSWTT). Finally, the influences of longitudinal slope and slope length, vehicle speed, temperature, and characteristics of asphalt mixture on the rutting are analyzed, and the suggestions for improving the anti-rutting performance of large longitudinal slope sections of asphalt pavement are proposed. The result indicates that (1) The rutting in large longitudinal slope section is mainly distributed in middle and lower surface courses. (2) The rutting is mainly composed of compaction deformation and shear flow deformation, the former is caused by grinding from traffic load and the latter is ascribed to insufficient shear

收稿日期: 2021-03-31

作者简介: 周健民 (1963-), 男, 河北玉田人, 高级工程师. (tsshlxh@126.com)

ability of asphalt mixture under the couple effects of heavy load, high temperature and low speed, etc., and shear flow deformation contributes more to rutting than compact deformation. (3) Slope length also contributes more to rutting than longitudinal slope when other factors remain the same. When the slope length is longer (approaching or exceeding the limit slope length) and the longitudinal slope is larger ( $>3\%$ ), the vehicle speed drops the greatest. Correspondingly, the rutting of asphalt pavement in large longitudinal slope section is the most severe.

**Key words:** road engineering; rutting rule; core sampling; large longitudinal slope; generation mechanism

## 0 引言

近年来,随着我国高速公路的不断延伸和发展,建设的主战场已经逐渐向山区转移。但是,由于山区地形的限制以及大高差的不利影响,高速公路在设计和建造时不可避免地形成了较多长大纵坡路段。在高温、重载、慢速等耦合作用的影响下,长大纵坡路段容易产生推移、拥包等病害,尤其是长大爬坡路段的沥青路面上经常产生严重的车辙,极大地影响了通行车辆的安全性和道路的服役寿命<sup>[1-6]</sup>。

从已有的研究成果来看,国外对沥青路面的车辙问题进行了不少研究<sup>[7-10]</sup>,但是,国外大多数研究针对的都是平坡路段,较少有针对长大纵坡路段的研究。相比于国外,国内研究者针对山区长大纵坡路段的车辙问题,在材料设计、结构优化、病害防治等方面开展了大量研究<sup>[11-16]</sup>。李明国等<sup>[17]</sup>研究发现,重载车辆在长大纵坡往往慢速行驶,但是在重载与慢速的耦合下,其对沥青混合料动稳定度的影响超过单一的重载影响。吴浩等<sup>[18]</sup>发现长大纵坡路段的车辙沿纵向的分布规律与其他路段的基本一致,而在同一坡段观察(由坡底至坡顶),车辙深度逐渐增大,不足之处在于未进行现场取样和室内测试,以及只考虑了爬坡速度对车辙的影响。陈宝<sup>[19]</sup>通过数值模拟建立了长大纵坡处力学响应模型,研究了纵坡坡度、超载、低速、轴载等外因对车辙的影响,同样未进行现场调查,模型中也未考虑沥青混合料材料特性对车辙的影响。

目前,国内对山区长大纵坡路段沥青路面车辙的研究确实取得了一些成果,但是还存在以下不足:(1)研究成果大多基于室内试验和数值模拟所得出,缺少与实际工程之间的有效结合,研究结论的可靠性还需要进一步验证;(2)研究者较少采用钻芯取样的方法获得现场样本,同时,也较少结合室内测试试验,系统研究长大纵坡沥青路面车辙的特点和形成机理;(3)研究人员在分析车辙的影响因素时不够全面,且较少定量分析坡长、车速等因素对车辙的影响程度,

导致车辙预估模型的精度与实际测量值相差较大。

为了填补上述不足,本研究依托铜黄高速公路,通过对其长大纵坡路段典型车辙病害的详细调查和钻芯取样,采用自主开发的圆柱形试件车辙试验(CSWTT),探讨长大纵坡沥青路面车辙分布规律和产生机理。另外,通过分析外部和内部因素对长大纵坡路段车辙的影响,提出改善路面抗车辙性能的建议。

## 1 长大纵坡路段沥青路面调查

### 1.1 交通量调查

铜黄高速位于黄土丘陵地区,设计速度为 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,路线所经地段的高差为 $100\sim 200\text{ m}$ ,分水岭及河间地段大于 $300\text{ m}$ ,全线存在多个长大纵坡路段。根据调查的交通量数据,绘制了日平均交通量图(见图1)。

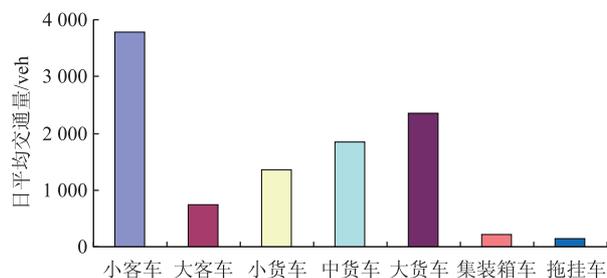


图1 铜黄高速日平均交通量

Fig. 1 Average daily traffic of Tongling - Huangshan expressway

由图1可知,将各种车型按车辆换算系数折算为小客车后,日平均交通量总和大于 $10\ 000$ 辆,因此具有重载交通的特点,而且各种货车总和占总日平均交通量的比例超过 $50\%$ 。初步推断,这些重载货车在长大爬坡路段的低速行驶可能是诱发车辙病害的重要原因之一。

### 1.2 长大纵坡路段车辙病害调查

采用抽样统计法随机抽取了铜黄高速不同长大纵坡路段的车辙深度(表1)。由表1可知,长大纵坡路段的车辙普遍比一般路段更深,尤其当坡度较大( $>3\%$ )和坡长较长时,车辙深度普遍都大于 $40\text{ mm}$ 。

表 1 TH 高速不同长大纵坡路段车辙深度

Tab. 1 Rutting depths of different sections of large longitudinal slope of Tongling – Huangshan expressway

序号	坡度/%	坡长/m	车辙深度/mm
1	2.08	1 480	26
2	2.47	2 307	42
3	2.57	980	34
4	3.00	1 058	39
5	3.17	915	43
6	3.18	1 251	47
7	3.50	861	49
8	3.62	607	47

在车辙较为严重的路段, 开挖了车辙典型断面, 同时, 测量了典型断面处的车辙深度。由图 2 可知, 中面层的变形最大, 且车辙主要发生在上、中面层。

另外, 选取车辙病害严重的路段制取直径为 150 mm 的圆柱形沥青路面芯样, 以便于室内研究。

## 2 长大纵坡路段沥青路面车辙分布规律

### 2.1 基于现场取芯的车辙分布规律

据调查, 铜黄高速大多数路段路面结构层的设

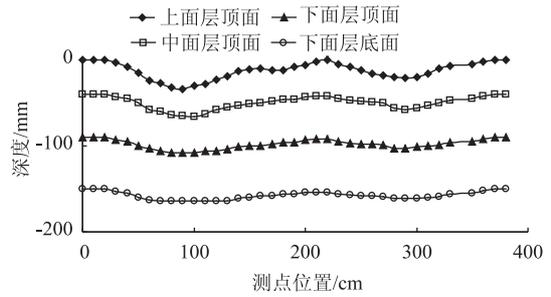


图 2 典型断面处的车辙深度

Fig. 2 Rutting depth at typical section

计厚度为“上面层 40 mm + 中面层 50 mm + 下面层 60 mm”, 少数路段路面结构层的设计厚度为: “上面层 40 mm + 中面层 60 mm + 下面层 100 mm”, 现场钻取芯样的总厚度和结构层厚度, 见表 2。由表 2 可知, 中面层的变形最大, 其次是下面层, 上面层最小。但是在少数路段中 (如芯样 2 所在路段), 变形最大处发生在下面层。因而多数路段的车辙发生于中面层, 只有在下面层比较软弱的路段, 车辙才主要发生于下面层。

表 2 芯样的总厚度及结构层厚度

Tab. 2 Overall thicknesses and structural layer thicknesses of core samples

芯样 编号	总厚度/mm			上面层厚度/mm			中面层厚度/mm			下面层厚度/mm		
	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道
1#	139	149	—	36	38	—	44	56	—	58	59	—
2#	102	127	—	38	40	—	38	40	—	34	44	—
3#	127	163	147	34	40	38	38	60	49	60	62	58
4#	133	155	148	36	39	37	43	57	50	59	60	58
5#	162	196	—	34	37	—	40	66	—	91	93	—
6#	168	201	—	33	38	—	42	68	—	92	92	—

注: 带#号为铜黄高速公路结构层设计厚度较厚处的路面芯样, 下同。

由表 3 可知: (1) 中面层的平均变形率最高, 达到了 60%, 主要原因是其受到的横向剪应力最大, 而此层位沥青的抗车辙能力又未能满足抗车辙的要求; (2) 上面层的平均变形率最小, 只有 17%, 说明上面层并不是车辙的主要发生层; (3) 下面层的变形率分布差异较大, 如 2# 芯样下面层的变形率接近 60%, 可能是该芯样所在路段存在软弱下面层, 所以当行车荷载作用时, 下面层变形较大。

另外, 通过观察芯样的外观 (图 3), 很容易看出, 中面层附近的变形最大, 其中沥青与集料的错动最为明显。

表 3 芯样结构层变形率

Tab. 3 Deformation rates of structural layers of core samples

芯样 编号	隆起处与车辙处厚度差值/mm	变形率/%					
		上面层	中面层	下面层	上面层	中面层	下面层
1#	18	3	12	3	17	67	17
2#	22	3	6	13	14	27	59
3#	33	7	21	5	21	64	15
4#	20	4	13	3	20	65	15
5#	32	4	22	6	13	69	19
6#	38	6	25	7	16	66	18
平均值	27	5	17	6	17	60	24

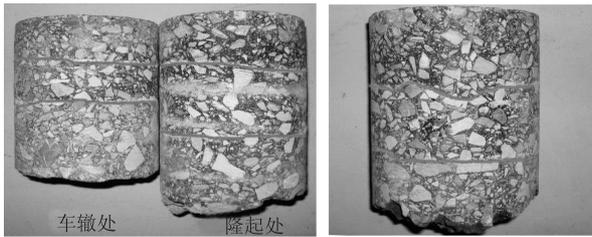


图3 中面层严重的流动变形

Fig. 3 Severe flow deformation in middle surface course

## 2.2 基于圆柱形试件车辙试验 (CSWTT) 的车辙分布规律

### 2.2.1 可行性分析

为了测试沥青混合料的高温抗车辙能力,常选用  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  的板式试件进行车辙试验,但是在现场若切割同规格的板式试件,既会对路面造成较大的损害,也难以在现场开展大量试验。鉴于此,开发了一种可承载圆柱形芯样的车辙模具<sup>[20]</sup>(见图4),利用圆柱形试件车辙试验(CSWTT)评价沥青混合料的抗车辙性能,其力学原理、试验参数、试验条件都同国产车辙仪,显著优点是适合现场取样、快速评价,同时对路面破坏较小,测试结果更为准确。

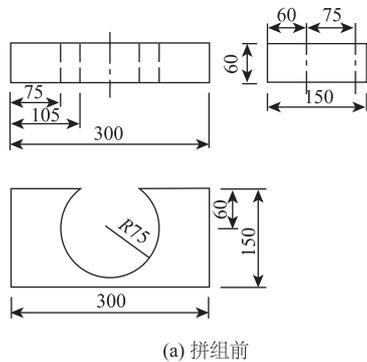


图4 圆柱形试件车辙试验模具(单位: mm)

Fig. 4 Test moulds of CSWTT (unit: mm)

张争奇等<sup>[20]</sup>通过模拟软件建立了圆柱形和板式试件的三维有限元模型,并且计算了断面的应力分布,发现两种试件的横向应力及剪应力分布具有相似的变化规律,从理论上论证了CSWTT的可行性。

试验方面,本研究分别对成型的板状试件和圆柱形试件进行了车辙试验,结果如表4所示,相关性分析见图5。

表4 不同形状试样车辙试验结果(60 °C, 5 cm)

Tab. 4 Rutting test result of different shaped samples (60 °C, 5 cm)

混合料类型	油石比	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	
		板式试件	圆柱形试件
AC-13	5.1	5 000	13 145
		3 010	11 200
		4 236	9 087
		4 720	8 277
AC-20	4.3	4 308	13 152
		3 967	8 750
		5 263	10 008
AC-25	3.7	4 725	14 660
		5 285	14 799
		5 082	13 222
		4 565	9 700
		6 269	10 087

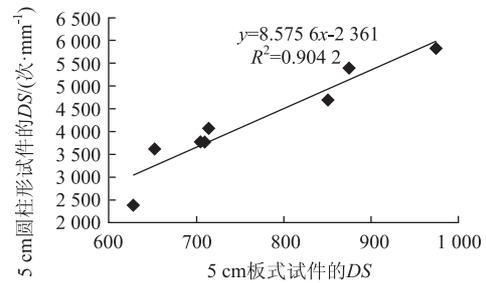


图5 不同形状试样的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of different shaped samples

由图5可知,在60 °C的试验条件下,圆柱形试件与板式试件的动稳定度(DS)相关系数达到了0.9042,表明圆柱形试件车辙试验表征沥青混合料的高温抗车辙性能是可靠的,因此基于CSWTT分析了车辙规律和车辙机理,试验方法及步骤描述详见文献[20]。

### 2.2.2 CSWTT 分析

对某断面(下称断面A)的超车道和行车道处钻取芯样,并且实施了CSWTT,结果见图6。

由图6可知:(1)抗车辙性能最好的是上面层,其次是下面层,而中面层在所有面层结构中的抗车辙能力最差;(2)行车道处与超车道处中面层的车辙发展速度均很快,当行走次数 < 2 000 次时,试样已发生破坏,表明中面层的抗车辙性能存在严重不足。

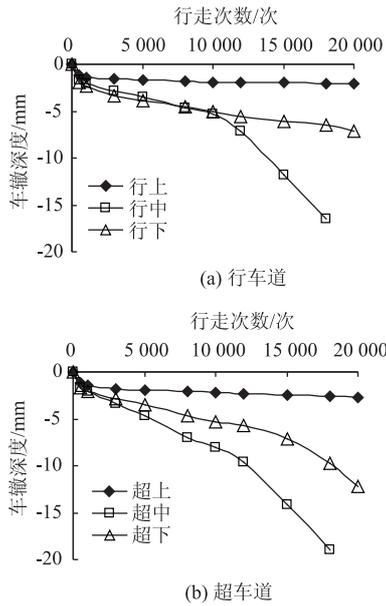


图 6 断面 A 处芯样的 CSWT 结果

Fig. 6 CSWT result of core samples at section A

### 3 长大纵坡路段沥青路面车辙产生机理

#### 3.1 基于芯样测试的车辙产生机理

测试了芯样结构层的毛体积密度, 见表 5。由表 5 可知, 各结构层车辙处的密度一般都大于隆起处和停车道处。因为开放交通后, 由于行车碾压引起的压密作用会使得沥青混合料的体积发生变化, 同时颗粒之间的排列更为紧密, 进而产生压密变形。

基于流变学原理, 测试了芯样结构层的沥青含量 (表 6)。从表 6 可以发现, 整体上隆起处的油量高于车辙处, 路段油量差平均在 0.1% 以上, 最大为 0.22% (见 3 号芯样路段下面层处), 说明沥青混合料在高温和荷载下发生了明显的横向流动。

#### 3.2 基于 CSWTT 试验的车辙机理

对同一断面 (断面 A) 不同位置的路面芯样实施了 CSWTT 试验, 见图 7。

表 5 芯样结构层的毛体积密度

Tab. 5 Bulk densities of structural layers of core samples

芯样编号	上面层密度/(g · cm <sup>-3</sup> )			中面层密度/(g · cm <sup>-3</sup> )			下面层密度/(g · cm <sup>-3</sup> )		
	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道
1#	2.520 0	2.518 8	—	2.458 7	2.452 1	—	2.508 8	2.505 0	—
2#	2.500 3	2.451 0	—	2.499 7	2.744 0	—	2.488 0	2.463 9	—
3#	2.547 9	2.507 3	2.507 9	2.502 9	2.490 1	2.499 6	2.483 6	2.475 0	2.492 2
4#	2.513 4	2.505 7	2.506 0	2.506 9	2.481 9	2.472 3	2.493 9	2.773 0	2.467 9
5#	2.532 1	2.501 3	—	2.503 8	2.493 7	—	2.485 2	2.473 5	—
6#	2.520 7	2.496 4	—	2.502 3	2.492 1	—	2.481 3	2.471 2	—

表 6 芯样结构层的沥青含量

Tab. 6 Asphalt contents of structural layers of core samples

芯样编号	上面层沥青含量/%			中面层沥青含量/%			下面层沥青含量/%		
	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道	车辙处	隆起处	停车道
1#	4.98	4.92	—	4.72	4.86	—	4.38	4.27	—
2#	4.86	4.97	—	4.60	4.81	—	4.30	4.32	—
3#	4.96	5.14	4.81	4.12	4.63	4.70	4.18	4.40	4.55
4#	4.84	4.86	4.81	4.68	4.62	4.68	4.24	4.40	4.45
5#	4.81	4.95	—	4.59	4.76	—	3.51	3.62	—
6#	4.83	4.96	—	4.62	4.78	—	3.54	3.66	—

由图 7 可知, 停车道的车辙要大于超车道和行车道, 得出开放交通后沥青路面每个结构层都会产生一定的压密变形, 另外, 车辙变形都会包含一定程度的压密变形。经过进一步分析, 对于沥青路面表面层的所有测点的车辙变形分为两个阶段, 即压密阶段和稳定阶段; 而对于沥青路面中面层和下面层来说, 其车辙变形较快, 相对之下其压密过程不

显著。因此沥青路面车辙变形分为两个部分, 即起初的压密变形和剪切流动变形。此外, 沥青路面表面层胶结料采用了抗车辙改性沥青, 高温性能比较好, 表明该路面的车辙变形绝大部分是由中面层和下面层的剪切流动变形所导致。

综上, 长大纵坡路段沥青路面车辙产生的机理应是沥青混合料在重载、高温、慢速下产生的剪应

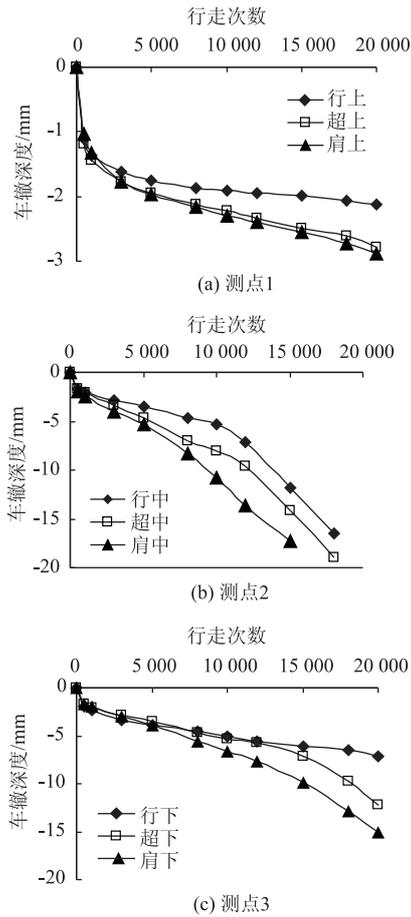


图7 断面A不同位置处芯样的CSWTT结果  
Fig.7 CSTT result of core samples at different positions of section A

力超过了材料本身的抗剪强度,进而使混合料发生流动变形,逐渐形成了车辙。因此,需要通过分析长大纵坡路段车辙的影响因素,并且提出针对性的措施,以控制剪应力的大小,减少车辙的发生。

#### 4 长大纵坡路段路面车辙的影响因素

##### 4.1 纵坡坡度和坡长

从表1中可以发现,当坡度一定时,坡长越长,车辙越易出现,同理亦然。进一步分析,若纵坡坡度保持不变,当纵坡坡长增加1%时,车辙深度随之增加0.11 cm;反之,若纵坡坡长保持不变,当纵坡坡度增加1%时,车辙深度随之增加0.30 cm,表明纵坡坡长对车辙的贡献率远高于纵坡坡度。这可能是由于纵坡坡度的增加对剪应力的增长幅度较为有限,而纵坡坡长的增加会直接引起行驶车辆的车速下降,同时也导致轮胎与路面作用时间的延长。因此,在设计阶段,就要合理选用坡度与坡长的组合,尽量避免长陡坡的发生。

##### 4.2 行车速度

采用雷达测速仪分别测试了4处长大纵坡坡脚和坡顶处重载车辆的车速,同时测量了最大车辙深度(表7),发现坡长越长,坡度越大,平均车速越低,相应地,车辙最大深度也最深,可能是行车速度的降低延长了荷载作用于路面的时间,依据时温等效原理,相当于间接提高了沥青路面所要承受的温度,从而导致沥青路面相同交通量下引起的车辙增大。因此,在设计时就要综合考虑坡度和坡长的合理组合,满足重载车辆的最低爬坡速度。

表7 TH高速长大纵坡路段的车速和车辙结果

Tab.7 Vehicle Speed and Rutting Result in large longitudinal section of Tongling - Huangshan expressway

测点	坡长/m	坡度/%	平均车速/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最大车辙 深度/cm
1 坡脚	600	4.0	55.5	1.8
1 坡顶	600	4.0	40.67	2.0
2 坡顶	500	4.6	37.56	2.5
3 坡顶	1000	5.0	28.11	3.0
4 坡顶	2400	3.1	41.05	2.0

##### 4.3 温度

沥青混合料的不足之处是对温度比较敏感,高温时易产生流动变形,低温时又易产生开裂。一方面,路面的高温和环境温差直接导致了混合料的抗剪强度、回弹模量、泊松比等存在显著下降;另一方面,在重载和渠化交通等的不利组合下,更易使路面车辙发生。因而建议在路面表面设置热反射涂层以降低路面结构内部温度。

##### 4.4 沥青混合料材料特性

###### 4.4.1 混合料及集料级配

利用上文中提到的圆柱板试件,采用马歇尔方法设计了TH高速各面层沥青混合料的级配类型及设计级配,如表8所示。此外,对典型车辙断面的芯样进行了筛分试验,如表9所示。

由表8和表9可知,铜黄高速各面层主要级配类型属于细级配,而各断面4.75 mm筛孔的通过率都相对较大,大都超过了45%,说明集料之间未形成骨架结构,相应地,沥青混合料的抗车辙能力也存在明显不足。因此在混合料设计时需要注意优化集料级配,以形成较为密实的骨架结构。

另外,集料的几何特性(形状、粒径等)及表面特性(表面粗糙度、棱角性等)特性也会影响混合料的骨架密度程度,继而影响抗车辙能力。因此

表 8 TH 高速不同面层沥青混合料设计级配

Tab. 8 Design gradation of asphalt mixture for different surface layers in Tongling-Huangshan expressway

面层层位	混合料类型	不同筛孔尺寸/(mm) 通过率/%												
		31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上面层	AC-13	100	100	100	100	95.6	80.4	42.3	25.2	18.8	14.1	10.3	8.6	6
中面层	AC-20	100	100	98.2	88	76	62.8	39.5	27.8	18.5	13.1	10.1	8.3	5.7
下面层	AC-25	100	97.1	78.7	68.7	60	50.4	32	19.8	14.2	9.7	7.8	6.7	4

表 9 典型断面芯样的级配

Tab. 9 Gradations of core samples in typical sections

断面位置	车辙深度/mm	4.75 mm 关键筛孔通过率/%		
		上面层	中面层	下面层
1	18	50.7	50.1	44.1
2	22	57.2	53.8	38.4
3	33	53.0	52.0	46.0
4	20	45.1	35.2	50.2
5 <sup>#</sup>	32	52.7	49.3	38.6
6 <sup>#</sup>	38	54.3	51.2	49.3

在沥青混合料设计时, 应优选质地坚硬, 表面粗糙且多棱角的集料, 并适当提高集料粒径。

#### 4.4.2 沥青种类

沥青种类会影响相应沥青混合料的高温稳定性, 不同面层使用的沥青种类如表 10 所示。

表 10 TH 高速不同面层使用的沥青种类

Tab. 10 Asphalt types used for different surface layers in Tongling - Huangshan expressway

面层层位	沥青种类
上面层	SBS-70 <sup>#</sup> 改性沥青
中面层	盘锦 AH-70 <sup>#</sup> 基质沥青
下面层	盘锦 AH-70 <sup>#</sup> 基质沥青

由表 10 可知, 上面层选用了 SBS 改性沥青, 其抗车辙能力更强, 中、下面层选用了基质沥青, 抗剪切变形能力并不如 SBS 改性沥青。由于中面层是路面结构最主要的抗车辙层, 基质沥青的抗剪切能力很不理想, 因而导致车辙易在本层发生, 这点也在前述的 CSWTT 结果中得到了验证。因此宜在中面层使用抗车辙能力更强的 SBS 改性沥青。

#### 4.4.3 沥青用量

油石比会对沥青混合料的压实性能产生重要影响, 具体表现为当油量较小时, 混合料难以达到规定的压实度; 而当油量过高后, 结构沥青并不会相应地增加, 反而自由沥青对混合料的润滑作用愈强, 使沥青混合料的抗车辙能力急剧下降。从表 6 可知, 中面层的沥青含量基本上大于 4.6%, 且车辙处的沥青含量都小于隆起处和停车道处, 说明沥青和沥青

胶浆发生了横向流动, 造成这种现象的原因是中面层沥青含量较高。因此, 宜控制油石比, 以保证混合料的压实性能和抗车辙能力。

### 5 结论

基于车辙现场调查、钻芯取样和 CSWTT 测试, 获得的主要结论如下:

(1) 根据典型断面车辙深度以及车辙处路面芯样的测试结果, 发现当纵坡坡度较大、纵坡长度较长时, 沥青路面车辙最为严重, 且长大纵坡路段沥青路面车辙集中分布在中、下面层。因此, 为了保证中面层材料的抗车辙性能, 宜优化混合料级配设计, 选用高模量沥青混凝土, 在基质沥青中掺加抗车辙剂等措施。

(2) 利用自主开发的圆柱形车辙试验 (CSWTT), 测试了长大纵坡路段路面芯样的毛体积密度和沥青含量, 结果表明: 车辙处的密度值和油量都大于隆起处和停车处。这可能是由于沥青在高温与荷载的作用下抗剪切能力不足, 从而发生了流动变形。此外, 分析长大纵坡路段沥青路面车辙的组成可知, 其主要由压密变形和剪切流动变形组成。其中, 剪切流动变形持续时间更长, 对沥青路面车辙的影响更为严重。

(3) 通过分析纵坡坡度与坡长、行车速度、温度等外部因素和沥青混合料材料特性 (混合料及集料级配、沥青种类、沥青用量) 等内部因素对长大纵坡车辙的影响, 分别提出了选用合理坡度与坡长组合、考虑重载车辆的最低爬坡速度、设置热反射涂层、优化集料级配、选用抗车辙性能较好的抗性沥青以及控制沥青用量等切实建议。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 许甜, 邱磊, 刘建蓓, 等. 基于安全评价的山区高速公路越岭线纵坡设计方法研究 [J]. 公路, 2019, 64 (3): 10-15.  
XU Tian, QIU Lei, LIU Jian-bei, et al. Longitudinal

- Slope Design of Mountainous Expressways Based on Safety Evaluation [J]. Highway, 2019, 64 (3): 10 - 15.
- [2] 徐婷, 赵磊, 张敏, 等. 基于重载车辆性能的高速公路长大纵坡临界坡长确定 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2019, 39 (3): 108 - 116.  
XU Ting, ZHAO Lei, ZHANG Min, et al. Critical Length Determination for Long and Longitudinal Slope of Expressway Based on Performance of Heavy Duty Vehicles [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2019, 39 (3): 108 - 116.
- [3] MODARRES A, SHABANI H. Investigating the Effect of Aircraft Impact Loading on the Longitudinal Top-down Crack Propagation Parameters in Asphalt Runway Pavement Using Fracture Mechanics [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 150: 28 - 46.
- [4] JAHANIAN H R, SHAFABAKHS G, DIVADARI H. Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Containing Bitumen Modified with Gilsonite [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 156 - 164.
- [5] 杨海荣, 关宏信. 高温、重载、慢速条件下上坡沥青路面车辙 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2008, 5 (4): 13 - 17.  
YANG Hai-rong, GUAN Hong-xin. Asphalt Pavements Rutting on Upgrade Section under High Temperature, Heavy Load and Slow Speed [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 5 (4): 13 - 17.
- [6] 路文兴, 杨芸波. 山区长大纵坡路段高速公路扩容及交通安全改善方案研究 [J]. 公路, 2019 (2): 91 - 94.  
LU Wen-xing, YANG Yun-bo. Research on Expansion and Traffic Safety Improvement Plan of Expressway in Long Longitudinal Slope Section in Mountain Area [J]. Highway, 2019 (2): 91 - 94.
- [7] MAZUREK G, IWANŃSKI M. Estimation of Zero Shear Viscosity Versus Rutting Resistance Parameters of Asphalt Concrete [J]. Procedia Engineering, 2016, 161: 30 - 35.
- [8] ALKAISSI Z A. Effect of High Temperature and Traffic Loading on Rutting Performance of Flexible Pavement [J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2020, 32 (1): 1 - 4.
- [9] BROVELLI C, CRISPINO M, PAIS J, et al. Using Polymers to Improve the Rutting Resistance of Asphalt Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 117 - 123.
- [10] LI L L, HUANG X M, HAN D, et al. Investigation of Rutting Behavior of Asphalt Pavement in Long and Steep Section of Mountainous Highway with Overloading [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 635 - 643.
- [10] 夏勇. 长大纵坡沥青路面结构研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
XIA Yong. Investigation of Asphalt Pavement Structure on Large Longitudinal Slope [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [12] 胡萌, 张久鹏, 黄晓明. 半刚性基层沥青路面车辙特性分析 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (6): 14 - 18, 46.  
HU Meng, ZHANG Jiu-peng, HUANG Xiao-ming. Analysis of Rutting Characteristics of Semi-rigid Base Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (6): 14 - 18, 46.
- [13] 周岚, 倪富健, 赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路面车辙发展的影响性分析 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (3): 42 - 47, 54.  
ZHOU Lan, NI Fu-jian, ZHAO Yan-jing. Impact of Environment Temperature and Vehicle Loading on Rutting Development in Asphalt Concrete Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (3): 42 - 47, 54.
- [14] 张宜洛. 长大纵坡路段沥青路面行为和混合料设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.  
ZHANG Yi-luo. Research on Asphalt Pavement Behavior and Its Mixture Design for Long and Steep Slope Section [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [15] 孔慧. 基于抗车辙性能的长大纵坡路段沥青路面结构优化设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.  
KONG Hui. Research on Optimal Design of Asphalt Pavement Structure for Long Longitudinal Slope Section Based on Anti-rutting Performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [16] 董泽蛟, 肖桂清, 龚湘兵. 级配及抗车辙剂对沥青混合料抗车辙性能的影响分析 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (2): 27 - 31, 46.  
DONG Ze-jiao, XIAO Gui-qing, GONG Xiang-bing. Analysis on Impact of Gradation and Anti-rutting Additive on Rutting Resistance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 27 - 31, 46.
- [17] 李明国, 牛晓霞, 申爱琴. 山区高速公路沥青路面的抗车辙能力 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006 (6): 19 - 22.

- LIU Hao, ZHANG Jia-ming, FU Jin-dan, et al. Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Discarded Soil Field Landslide [J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19 (6): 54-58.
- [11] 王光辉. 降雨入渗条件下弃渣场边坡稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2017 (6): 147-151.
- WANG Guang-hui. Slope Stability Analysis for Slag Dump under Rainfall Infiltration Condition [J]. Railway Engineering, 2017 (6): 147-151.
- [12] 张朔, 但路昭, 尹小涛, 等. 山区交通工程弃渣场常见病害及安全控制研究[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2020, 40 (5): 13-19.
- ZHANG Shuo, DAN Lu-zhao, YIN Xiao-tao, et al. Study on Common Diseases and Safety Control of Waste Disposal Site of Traffic Engineering in Mountainous Area [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2020, 40 (5): 13-19.
- [13] 沈明祥, 罗红明, 刘志鹏, 等. 贵州省六盘水至威宁高速公路弃土场稳定性评估[J]. 中国岩溶, 2019, 38 (4): 559-564.
- SHEN Ming-xiang, LUO Hong-ming, LIU Zhi-peng, et al. Stability Assessment of the Spoil Ground on the Liupanshui-Weining Expressway in Guizhou Province [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38 (4): 559-564.
- [14] GB51018—2014, 水土保持工程设计规范[S].
- GB51018—2014, Code for Design of Soil and Water Conservation Engineering [S].
- [15] GB50433—2008, 开发建设项目水土保持技术规范[S].
- GB50433—2008, Technical Code on Soil and Water Conservation of Development and Construction Projects [S].
- [16] 王明慧, 蒋树平, 张桥, 等. 山区高速铁路弃渣场选址分析[J]. 铁道工程学报, 2013, 30 (4): 18-20, 67.
- WANG Ming-hui, JIANG Shu-ping, ZHANG Qiao, et al. Analysis of Site Selection of Abandoned Dregs Field for Mountain High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30 (4): 18-20, 67.
- [17] JTG D30—2015, 公路路基设计规范[S].
- JTG D30—2015, Specifications for Design of Highway Subgrades [S].
- [18] GB18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].
- GB18306—2015, Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China [S].

(上接第16页)

- LI Ming-guo, NIU Xiao-xia, SHEN Ai-qin. Anti-rut Ability of Asphalt Pavement on Mountain Freeway [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006 (6): 19-22.
- [18] 吴浩, 裴建中, 张久鹏. 长大纵坡路段沥青路面车辙规律及影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (6): 28-31.
- WU Hao, PEI Jian-zhong, ZHANG Jiu-peng. Rutting Law and Its Influence Factors for Asphalt Pavement in Long and Steep Longitudinal Slope Section [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29 (6): 28-31.
- [19] 陈宝. 长大纵坡路面合理结构与提高整体寿命技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- CHEN Bao. Study on Reasonable Structure of Longitudinal Slope Pavement and Technique of Improving Its Overall Lifetime [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [20] 张争奇, 尚同羊, 孔慧. 基于现场钻芯取样的沥青结构层抗车辙性能评价方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25 (5): 31-37.
- ZHANG Zheng-qi, SHANG Tong-yang, KONG Hui. Anti-rutting Performance Evaluation of Asphalt Structure Layers with Samples Cored at Site [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (5): 31-37.
- [21] 张苛, 张争奇, 罗要飞. 基于圆柱形芯样的沥青路面现场抗车辙性能评价标准[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (6): 1951-1959.
- ZHANG Ke, ZHANG Zheng-qi, LUO Yao-fei. Evaluation Standard for Anti-rutting Performance of Asphalt Pavement Based on Cylindrical Core Sample [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37 (6): 1951-1959.