

GAOSU GONGLU LIQING LUMIAN
CAILIAO YU JIEGOU

高速公路 沥青路面材料与结构

■ 辛德刚 王哲人 周晓龙 编 著



176

人民交通出版社

高速公路沥青路面材料与结构

辛德刚 王哲人 周晓龙 编 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书内容主要有：沥青混合料试验，包括混合料搓揉、车辙、马歇尔、空隙率、抗冻性等指标试验；合理选择沥青混合料级配组成；沥青路面试验路段铺筑，包括所用材料指标、施工工艺控制，现场检测、数据处理及工程应用；振动碾压石灰、粉煤灰碎石基层，包括二灰碎石骨架结构形成，振动液化机理的应用，二灰碎石混合料设计方法及振动碾压施工工艺。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路沥青路面材料与结构 / 辛德刚, 王哲人, 周晓龙编著. - 北京: 人民交通出版社, 2001. 8

ISBN 7 - 114 04068 - 7

I. 高... II. ①辛...②王...③周... III. ①高速公路 - 沥青路面 - 建筑材料②高速公路 - 沥青路面 - 结构体系 IV. U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 063461 号

高速公路沥青路面材料与结构

辛德刚 王哲人 周晓龙 编 著

正文设计:孙立宁 责任校对:刘高彤 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:10.5 字数:254千

2002年1月 第1版

2002年1月 第1版 第1次印刷

印数:0001-3000册 定价:28.00元

ISBN 7-114-04068-7

U·02971

前 言

吉林省交通厅根据长春至四平高速公路建设需要,对《高速公路沥青路面材料与结构》进行了专题研究。专题研究中对沥青路面所用材料进行了选择,对路面结构组成及沥青混合料组成的各项技术性能指标作了室内试验比选,然后选择不同结构组合、不同级配混合料铺筑长1100m、宽9m的试验路段,对所铺沥青路面用落锤弯沉仪(FWD)做了弯沉检测及模量反算,对疲劳性能做了加速加载试验及其他各项指标检验,并将试验路结果用于长春至四平高速公路试拌试铺中,结合试铺做了沥青路面施工工艺研究,同时对石灰、粉煤灰碎石基层混合料设计及工艺进行了研究。通过一系列实验研究,取得很多宝贵的数据及方法。本书对此加以归纳总结,奉献给从事沥青路面研究、设计及施工人员参考。应该指出的是,本书对沥青路面研究的还不够深入,对试验结果的分析可能还不够透彻,因此不足或谬误之处,敬请广大读者批评指正。

本书的综述,由韦志成、张跃、张潮、辛德刚、王哲人和周晓龙编写;2.1 粗集料含量对沥青混合料性能的影响,由吴匡怀、郭祖辛、王世海、徐鹰、宋国平编写;2.2 路面上面层沥青混合料容许空隙率,由王哲人、曹晓岩、赵喜林、朴顺梅编写;2.3 路面沥青混合料级配曲线的走向,由王抒红、冯德成、孙丽华编写;2.4 路面上面层沥青混合料设计,由朱希令、王抒红、辛德刚、王树森、姜国会编写;3.1 长春试验路指标检测,由刘长顺、毕业明、李恩杰、侯相深、吴匡怀编写;3.2 长春试验路路面结构,由王哲人、陶志政、田波编写;3.3 长春试验路沥青路面现场加速加载试验,由辛德刚、何任飞、田波、曹晓岩、张守明、刘伟编写;3.4 沥青路面上面层试铺工艺,由辛德刚、陈耀忠、王哲人、孙丽华、杜二鹏、张冬青、潘宝峰编写;3.5 公路典型沥青路面使用性能调查,由冯德成、王彩霞、郭子燕编写;3.6 沥青路面结构设计和材料设计一体化,由何任飞、王哲人、周晓龙编写;4.1 二灰碎石基层振动液化压实机理,由周晓龙、柏玉海编写;4.2 二灰碎石混合料组成设计方法及4.3 二灰碎石基层振动碾压工艺,由周晓龙、李春武编写。

本书由辛德刚、周晓龙、王哲人、李春武统审。

著 者

2001年9月

目 录

1 综 述

- 1.1 高速公路对沥青路面的要求 (1)
- 1.2 沥青路面材料设计与结构设计的统一 (2)
- 1.3 沥青上面层 AC - 13V 型的研究 (5)
- 1.4 总结 (20)

2 沥青混合料试验

- 2.1 粗集料含量对沥青混合料性能的影响 (24)
 - 一、级配组成设计及试件的制备 (24)
 - 二、搓揉试验 (28)
 - 三、车辙试验 (28)
 - 四、马歇尔试验 (30)
 - 五、结论 (32)
- 2.2 路面上面层沥青混合料容许空隙率 (33)
 - 一、空隙率对路面技术性能的影响 (33)
 - 二、沥青混合料的冻融稳定性 (34)
 - 三、容许空隙率 (44)
 - 四、结论 (44)
- 2.3 路面沥青混合料级配曲线的走向 (44)
 - 一、研究方法 with 材料 (45)
 - 二、级配曲线走向的影响 (45)
 - 三、影响级配走向的原因 (46)
 - 四、级配建议范围的调整 (48)
 - 五、结论 (49)
- 2.4 路面上面层沥青混合料设计 (53)
 - 一、国内外上面层沥青混合料现状 (53)
 - 二、I 型密实式连续级配与 V 型密实紧密嵌挤骨架沥青混合料性能比较 (53)
 - 三、V 型密实紧密嵌挤骨架与 II 型半密实连续级配沥青混合料性能比较 (58)
 - 四、间断级配沥青混合料 (60)
 - 五、结论 (61)

3 沥青路面试验

- 3.1 长春试验路指标检测 (62)

一、试验路段混合料类型设计	(62)
二、主要材料指标	(62)
三、现场摊铺与检测	(68)
四、结论	(82)
3.2 长春试验路路面结构	(82)
一、路面技术性能检测方法	(82)
二、数据分析	(84)
三、结论	(94)
3.3 长春试验路沥青路面结构现场加速加载试验	(94)
一、概况	(94)
二、现场加速加载液压试验	(95)
三、试验数据分析	(97)
四、结论	(109)
3.4 沥青路面上面层试铺工艺	(109)
一、概述	(109)
二、试铺段的技术性能	(112)
三、关键因素	(113)
四、技术措施	(114)
五、压实标准	(116)
六、结论	(118)
3.5 公路典型沥青路面使用性能调查	(118)
一、典型沥青路面状况调查	(118)
二、调查路段及内容	(118)
三、调查结果分析	(119)
四、结论	(123)
3.6 沥青路面结构设计和材料设计一体化	(124)
一、概述	(124)
二、沥青路面技术性能计算模型	(124)
三、根据柔性路面的结构功能要求选择沥青混合料组成	(128)
四、沥青路面结构设计和材料设计的统一	(132)
五、结论	(141)

4 振动碾压二灰碎石基层

4.1 二灰碎石基层振动液化压实机理	(142)
一、关于嵌入式骨架的讨论	(142)
二、液化概念及影响液化因素	(142)
三、振动碾压液化现象及实验	(146)
四、液化对二灰碎石压密的促进作用	(150)
五、结论	(151)

- 4.2 二灰碎石混合料组成设计方法 (151)
 - 一、关于材料的讨论 (151)
 - 二、混合料组成设计 (152)
 - 三、结论 (154)
- 4.3 二灰碎石基层振动碾压工艺 (154)
 - 一、振动碾压早强试验 (154)
 - 二、振动碾压施工要诀 (157)
- 参考文献**..... (158)

1 综 述

1.1 高速公路对沥青路面的要求

吉林省交通厅立项研究寒冷地区高速公路沥青路面材料与结构，重点是抗滑与抗裂的工程技术措施。这既出于吉林省公路的实际状况^[1]，也是借鉴我国第一批高速公路建成后的使用经验^{[2]、[3]、[4]}和追随国外高速公路技术发展的趋势。

1. 高速公路路面面临的几个基本矛盾

第七届国际沥青路面结构会议^[5]之后，人们将沥青路面的使用性能分为两类：

①结构性使用性能，按 SHRP^[8]研究用五个方面表述，即疲劳、车辙、低温缩裂、水损害和老化；

②功能性使用性能，主要有平整度、构造深度、车辙、摩擦系数和滚动噪声五个方面^{[6]、[7]}。

这两个性能实际上反映了行驶车辆对沥青路面使用品质和使用寿命的基本要求。一个完善的路面结构既应满足功能性使用性能的要求，也应满足结构性使用性能的要求。总结我国高速公路修建以来的早期损坏情况，当前急需要解决如下几对矛盾：

- ①构造深度与密实耐久的矛盾；
- ②低温抗裂与高温抗辙的矛盾；
- ③疲劳裂缝与收缩裂缝的矛盾。

2. 在密实耐久的前提下提高沥青路面的抗滑性能

高速公路沥青路面需要解决好抗滑问题。沥青上面层选用 II 型抗滑性能好，但会由于渗水造成路面水损害及冻害；选用 I 型虽然可以避免水损害，但抗滑不能满足要求。沥青上面层选用抗滑 B 型和 A 型时，问题雷同。

在对吉林省现有的 I 型沥青路面调查中得到确认后，课题组面临的任务是开发一种防渗、防冻有足够耐久性的适合当前工艺水平的抗滑上面层结构。

3. 路面抗裂与抗车辙的统一

东北地区冬季长期寒冷，夏季持续高温^[9]。入冬初春期间的除雪盐冻及大面积低温收缩裂缝，对沥青路面的使用性能和使用寿命都产生很大的影响；高速公路在高温、重载、初期大交通量的渠化交通作用下不可避免地出现车辙问题。一般的抗冻裂技术措施往往会加剧车辙的发生，因此改善路面抗冻裂要以不损害路面高温稳定性为前提。

4. 重点要解决工程措施

近年来很多研究成果都得出了令人鼓舞的结论。高兴之余人们发现从确认成果到实际应用中间还有很长的距离。有些成果由于不具备条件而长期不能得到应用。吉林省长平高速公路推荐的抗滑、防渗、抗裂的沥青面层结构，必须考虑工程大面积应用的各种可行性，研究中要突出解决好新要求、新措施带来的一系列工艺问题。

1.2 沥青路面材料设计与结构设计的统一

1. 技术途径

1) 基层

(1) 国内外现状

公路沥青路面设计规范中,为解决沥青路面半刚性基层缩裂而采取的措施有:“在沥青层与半刚性基层之间设置碎石层或沥青贯入层”和“在基层顶面铺土工合成材料”。

这种采用柔性基层以消除反射裂缝的做法在国外已有很多,但需要设计较厚的沥青层以避免疲劳裂缝,由于国内材料、经济及技术条件的限制,目前还难以实现大规模的推广应用;半柔性虽取得一定的研究成果^[10]但达到工程应用还有相当的距离;基层顶面铺筑土工合成材料有成功的实例,也有不成功的案例。

由于上述背景,课题组从调查研究总结经验出发,分析了吉林省公路横向裂缝间距波动在3m到500m的原因,发掘潜在因素寻求改善措施。通过宏观比较后,认为采用振动碾压二灰碎石基层的沥青路面结构横向收缩裂缝有明显改善。

(2) 技术途径

为了寻找高强、少裂的实用技术,把注意力转向半刚性基层材料组成结构的最优组合。充分发挥粗集料的嵌挤作用,在形成一种理想的骨架以抵抗收缩裂缝的同时,填充骨架空隙的结合料所形成的适当粘聚力与骨架的嵌挤力共同形成高强而韧性好的力学性质,并采用合理的振动压实工艺,使紧密嵌挤骨架——密实的组成结构能够实现^[11]。

2) 沥青上面层

(1) 国内外现状

国内在沥青上面层材料方面的发展正逐渐与国际发展趋势接近^[12]。多孔、排水沥青混凝土与碎石玛蹄脂被认为是最有发展前景的两种类型^[13]。在美国、荷兰、日本等国发展的排水沥青混凝土空隙率已做到20%~25%,优点是抗滑、降噪声,特别是雨天高速行驶时无水漂现象,水雾可减少90%,但在耐久性与空隙堵塞两方面存在缺点,目前正在发展改性沥青与清洗技术以克服缺点。

德国采用的碎石沥青玛蹄脂(SMA)其特点首先在级配:一方面为实现密实原则强调有足够的细料填充(空隙率<6%)以保证耐久性;另一方面强调粗集料含量(4.75mm以上的大于等于70%)构成骨架结构以保证表面形成足够的构造深度。为此外掺纤维类添加剂加大矿粉用量(8%~12%)及增加沥青用量(6.5%~7.5%),从而来提高抗疲劳等耐久性。必要时还采用改性沥青。

碎石沥青玛蹄脂兼顾了耐久性与构造深度、抗滑这一基本矛盾,但它局限于德国、奥地利等国,近几年引到美国、日本等国。1991年~1994年期间美国19个州共修筑86个SMA实验路段^[14]。这种混合料设计是否真正适用各种地域条件,有待于大量应用验证。

(2) 技术途径

第一,寒冷地区的沥青上面层,在提高沥青混合料冻融稳定性方面还缺乏研究,改性沥青技术还处于试验研究阶段的情况下,很难考虑在工程上实施多孔排水沥青混凝土。合乎逻辑的结论是首先发展既密实耐久又抗滑的技术途径,与后来美国的调查结论^[15]也不约而同。

第二,当时吉林省有关木质纤维素与SMA的研究起步不久,缺乏技术经济依据,因此

确定根据工程实际条件通过材料组成设计与工艺研究实现密实耐久与抗滑统一的技术途径。

第三，解决密实耐久与构造深度这一对主要矛盾的同时，要解决好低温抗裂与高温抗车辙的矛盾。国内做了大量的研究工作，如林绣贤高工提出的“变K法”^[16]和1986年在惠州试验路的实践以及沙庆林院士提出的“多碎石”^[17]和七五、八五期间在济青、沪宁高速公路等的实践。但是吉林省有它独特的具体条件，除材料因素外，气候条件差异显著。因此作为我国寒冷地区第一条高速公路有必要针对具体环境及技术条件，就骨架-密实原则沥青混合料进行较为系统的试验研究。

3) 结构

(1) 国内外现状

结构设计如何考虑抗滑与抗裂？路面设计规范给出的条文有限，且很少与结构有关，规范中关于抗裂的3.0.10节要求采用符合重交通标准的沥青；关于抗滑的4.1.5节要求设计表面层时应“综合考虑沥青面层的抗滑、密水、耐久、抗开裂、抗车辙等技术要求，选择适当的级配类型和表面层厚度”。按第七届国际沥青路面结构会议对路面使用性能的新定义，横向收缩裂缝是应力和结构性演变的结果，属结构性使用性能的范畴；SHRP课题提出了沥青与沥青混合料低温抗裂的措施与标准。可以说规范对抗裂要求不够具体化，在抗滑与路面结构的关系方面还是空白。

在高速公路网已基本形成的西欧，表面功能的研究成果往往用于路面管理系统分析决策，如实施道路大、中修是否加铺抗滑层、吸音层^[18]。对于正在实现高速公路网的中国，设计满足多功能要求的沥青上面层，必须注意沥青上面层与加铺抗滑层的区别，加铺抗滑层的前提是原有路面结构在实际使用中已经证明稳定并具有足够的强度；而新建路面结构的耐久性需要与抗滑功能一起解决。因此在解决面层抗滑时必须考虑沥青上面层对结构的影响和要求。需要重视的是，近期我国采用AK-16B的沥青上面层，出现的早期损坏比国外加铺开级配磨耗层严重。有关高速公路沥青路面上面层设计，如表1-2-1。

(2) 技术途径

高速公路对路面具有多功能要求，由于不同的功能对混合料的要求往往相互矛盾，难以全部由材料设计来解决，有必要通过下列两个方面发挥结构的作用：结构层的分工、协作与按道路等级、自然区划、交通与环境对路面提出不同的功能要求，据此为努力实现路面结构性使用性能与功能性使用性能的统一。适宜的结构设计程序为：

- ①在结构层分工论的指导下进行材料设计；
- ②对通过选型、试验、开发、设计所得到的统一多功能要求的各层材料进行结构组合设计与方案分析、验算；
- ③落实工艺；
- ④必要的反馈与调整。

2. 研究方法

为长平高速公路选择路面结构、材料组成，以改善路面抗滑、抗裂能力，拟采用下列五个方面相结合的研究方法：

- 1) 理论分析；
- 2) 室内试验验证；
- 3) 修建试验路并测试验证；
- 4) 工程调查；

表 1-2-1

高速公路沥青路面上面层设计表

序号	级配类型	通过率 (%)	粒径 (mm)	19.0 (25)	16.0 (20)	13.2 (15.0)	9.5 (10)	4.75 (5.0)	2.36 (2.5)	1.18 (1.2)	0.6 (0.6)	0.3 (0.3)	0.15 (0.15)	0.074 (0.074)	沥青用量 (%)
1	沈大高速前期(LH-20 I)		100	95~100	75~90	56~76	40~60	30~50	22~38	16~29	11~21	7~15	4~8	4.0~6.0	
2	沈大高速后期(LH-20II)		100	90~100	65~85	50~70	30~50	18~35	12~26	7~19	4~14	39	2~5	4.0~5.5	
3	京津塘高速前期		100			75	60	45	35	25	18	11	6		
4	京津塘高速		95~100			55~70	35~47	22~33	13~25	10~20	8~16	5~13	4~9	4.5~6.0	
5	沪嘉高速(上海抗滑层 I 型)			95~100		70~85	35~55	25~40	18~30	12~20	8~16	5~10	4~8		
6	沪嘉高速(上海抗滑层 II 型)			95~100		60~80	25~45	17~30	8~20	5~15	4~12	28	2~6		
7	沈本高速		100	95.8		65	34.6	25.6	15.3	12.4	7.8	6.8	4.2	4.8~5.1	
8	规范(AK-13A)		100	90~100		60~80	30~53	20~40	15~30	10~23	7~18	5~12	4~8	3.5~5.5	
9	规范(AK-13B)		100	85~100		50~70	18~40	10~30	8~22	5~15	3~12	3~9	2~6	3.5~5.5	
10	规范(AC-13 I)		100	95~100		70~88	48~68	36~53	24~41	18~30	12~22	8~16	4~8	5.0~7.0	
11	规范(AC-13II)		100	90		60~80	34~52	22~38	14~28	8~20	5~14	3~10	2~6	4.5~6.5	
12	长平高速(AC-13V)(原设计值)			100		55~65	30~40	28~38	26~36	18~28	10~20	8~14	6~8	4.5~5.5	
13	长平高速(放宽后)		100	95~100		55~65	30~40	28~38	22~30	16~24	12~18	6~12	4~7		
14	黑龙江抗裂级配		100	94		49	36	34	32	23	16	11	8	5.1	
15	沪宁高速实验路		100	97		65	49.5	37.5	28	20.5	14	9.5	6		
16	沪宁高速多碎石(SAC-16)			90~100		50~70	30~50	22~37	16~28	12~23	8~18	6~13	4~8		
17	SMA-16			95~100		54~72	25~40	17~31	14~26	10~22	8~17	7~15	7~12		
18	SMA-13			90~100		55~75	26~42	19~34	16~28	12~24	10~18	8~15	8~12		
19	变 K 法抗滑层			95~100		52~65	37~50	23~34	(2.0)	(1.0)	(0.5)			上限 0.55~0.7 下限 0.65~0.7	
20	升级配防滑层(美国)					90~100	30~55		21~30	14~20	10~14			0~5	
21	升级配防滑层(日本)					90~100	30~40		(2.0)		(0.42)			0~5	
22	升级配防滑层(日本)					90~100	30~40		0~22		0~12			3~5	
23	密式断级配(日本)			95~100			23~45	15~30	8~20	4~15	4~10	4~10	2~7	3.5~5.5	
24	AC-20V(净月潭试验路)		100	65~70		35~45	30~40	30~40	25~35	15~25	10~20	8~14	6~8	4.5~6.5	

5) 工程应用试拌试铺。

1.3 沥青上面层 AC-13V 型的研究

1.AC-13V 型沥青混合料组成

针对冰冻潮湿的特点，沥青上面层应以抗滑、密水、抗裂、抗车辙等功能为主；立足于现有材料、结构与工艺措施的合理组合，开发了一种紧密嵌挤骨架密实型的沥青混合料，命名为 AC-13V 型。

(1) 容许空隙率的研究

为了确定寒冷地区沥青上面层容许空隙率，做出 15 组组成结构不同的沥青混合料进行 25 次冻融循环试验。模拟路面水分未能排除条件下的冰冻破坏作用，冻融循环是分别将试件放在盛满水的各个盒中进行的。15 组试件随冻融循环而呈不同程度的体积膨胀与融化后强度的衰减，影响最显著的因素则是初始空隙率（表 1-3-1）^[19]。

汇总表 1-3-1，以冻前马歇尔稳定度大于 7kN、冻融循环强度损失不大于 30% 控制，则初始空隙率应小于 5.0%（图 1-3-1）。水工部门对水坝采用沥青混合料防渗，根据渗透试验以空隙率不大于 4% 为标准^[20]；交通部现场透水试验标准水压力较小，可以空隙率不大于 7% 为密水标准^[21]。针对寒冷地区，根据冻融循环试验结果暂定空隙率不大于 5.0% 为容许空隙率上限。这样结合国际上根据抗车辙要求沥青混合料空隙率不小于 3% 的惯例^[22]，寒冷地区高速公路沥青上面层的容许空隙率可以暂定为 3.0% ~ 5.0%。由于抗冻融循环能力还取决于原材料与级配组成，因此当实际情况变动较大时，应通过试验对容许空隙率范围予以调整。

25 次冻融循环空隙率与稳定度变化表 表 1-3-1

不同级配 试件编号	空隙率 (%)		稳定度 (kN)		
	冻前	冻后	冻前	冻后	损失 (%)
A13	3.0	4.2	9.4	8.5	10
A10	4.3	7.5	8.1	6.4	21
A11	4.4	5.5	11.0	8.0	28
A14	5.6	9.0	8.6	5.0	42
A5	5.8	8.2	8.2	5.4	34
A4	5.8	7.4	8.6	3.6	58
A12	5.8	7.6	8.3	5.5	34
A8	6.0	9.6	6.5	3.6	45
A7	6.5	8.3	6.2	5.5	12
A6	7.7	9.2	6.5	3.8	42
A3	8.6	/	4.9	/	100
A2	10.5	/	4.5	/	100
A1	13.7	/	3.7	/	100

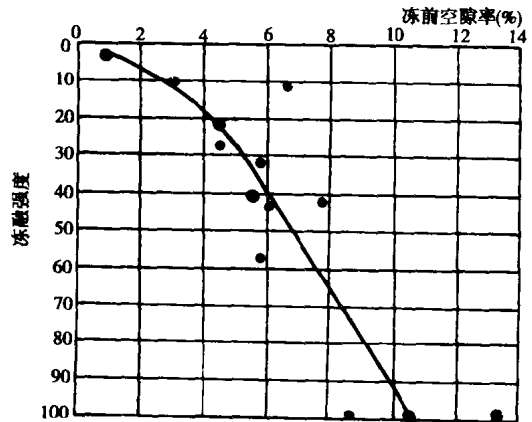


图 1-3-1 初始空隙率对冻融强度损失的影响

沥青面层的空隙率由碾压工艺实现，但材料级配是基础，必须以容许空隙率控制沥青混合料组成设计，并做为检测生产热混合料的依据。否则为达到空隙率 $\leq 5\%$ ，就可能将石料过多压碎。宜采用体积法来实现空隙率 $\leq 5\%$ 的沥青混合料组成设计，即：

- 第一，小于 2.36mm 的细集料用量应恰恰填满混合料骨架形成的空隙（约 30% ~ 40%）；
- 第二，小于 2.36mm 的细集料应满足逐级填充原则，按递减系数法 $K = 0.7 \sim 0.75$ 。

(2) 增加粗集料方法的研究

1994 年部颁 JTJ032 - 94 规范已将沥青混合料矿料级配范围向偏粗的方向做了调整，大量关于高速公路对路面功能的要求的研究报告指出粗集料还需要增多。不仅上海的抗滑层试

验路证明粗细集料比 3:1 的较 2:1 的抗滑效果好^[13]；南京的环道试验证明为了抗车辙，大于 4.75mm 的粗集料用量应大于 50%^[23]；处在寒冷地区北端的黑龙江齐齐哈尔至林甸的二级公路工程实践也突破了矿料级配对抗温缩贡献率充其量只有 15% 的常规，大于 4.75mm 含量达 64% 的抗裂级配取得了减少低温缩裂的效果^[24]。一些研究报告^[13]同时指出：粗集料增多路面初始空隙率增大，非渠化交通下行车碾压一年以上，密水性得以提高。

在避免因增加粗集料使空隙率增大而损害耐久性方面，国内自“七五”期间就做了不少工作，如按“变 K 法”修建的广东惠州试验路，以及按“多碎石”原理修建的河北正定试验路。变 K 法建议粗集料 K 取值 0.55~0.65，细集料取 K=0.7。如果说“变 K 法”遵循连续级配原则增加粗集料的话^[16]，那么“抗裂级配”与“SMA”是以遵循断级配的原则的方式增加粗集料^{[24][13]}。

为了解这两种增加粗集料方式的特点，进行了如下的试验研究^[25]：由粗集料级配混合料与细集料级配混合料分别按 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1 称重混合而成，为使九组混合料均有连续级配和断级配两种类型，备有两种细集料级配混合料，在粒级上差一个档次。分别对最佳油量下的两类九组试件进行马歇尔试验、车辙试验与用以测定构造深度与摩擦系数衰减规律的搓揉试验。

图 1-3-2 说明：第一，粗集料用量相同时断级配的稳定性高于连续级配；第二，无论是连续级配或断级配稳定性总体趋势随粗集料的增多而下降。如按 60% 将粗集料用量分为两段，则连续级配随粗集料用量增加稳定性直线下降的趋势起自 30%，而断级配起自 60%，在 30%~60% 范围内变化较平缓。联系图 1-3-3，不难发现粗集料含量小于 60% 时，断级配稳定性下降平缓，与空隙率的较少波动密切相关，而连续级配空隙率随粗集料用量增加呈直线上升。级配间断使相同粗集料含量下，形成了与连续级配不同的空隙结构，导致混合料物理力学性质的差异。

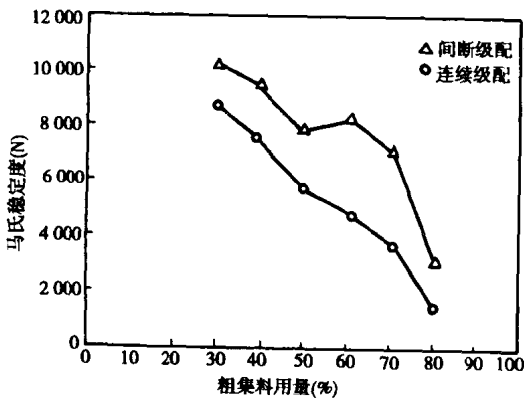


图 1-3-2 马歇尔稳定性随粗集料用量变化图

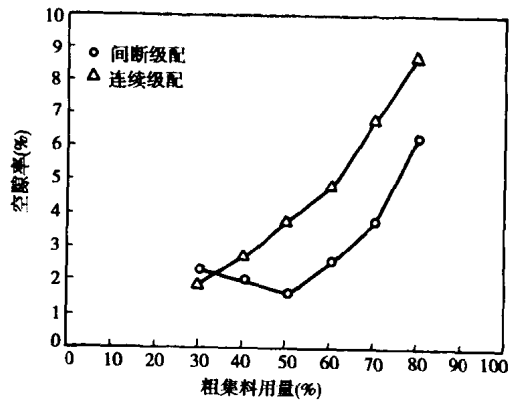


图 1-3-3 空隙率随粗集料用量变化图

增加粗集料用量这是路面抗车辙、抗滑、抗裂发展的必然，然而如何保持抗渗、抗冻、抗疲劳等耐久性要求呢？试验证明遵循断级配原则就可兼顾功能与耐久两类不同要求，它能容纳更多数量的粗集料。

(3) 两级主骨料比例的研究

增加粗集料总量的趋势国内外的意见已经相同；但在量的控制上，在对粒级分布的要求上各有己见、差异不小。对于 AC-13 型而言，粗集料的粒级分布可简化为两级主骨料的比例

问题。

虽然第一、二级主骨料比例对稳定度的影响小于集料原材料的强度（图 1-3-4 除曲线 6，第六标段的原材料符合规范标准的下限或略低，其它各点集料原材料强度好）以及集料的不均匀性（图 1-3-4 曲线 8，八标段的粗集料级配大于 13.2 的占 15%，还混有大于等于 16 的粒级），更小于压实度由 0.96 到 1.0 的影响，但从两级主骨料比例的影响中仍可以辨认从稳定度来看第一、二两级粗集料的比例以 9.5 ~ 13.2 的占 30% ~ 35%，4.75 ~ 9.5 的占 25% ~ 30% 最佳（曲线 *d* 在 e_2 、 e_3 的上侧）。

图 1-3-5 说明构造深度随压实而降低，更说明当 $K=1$ 时存在一个取决于材料组成的相对稳定的构造深度，其中一、二级粗集料的比例有较大的影响（ E_2 、 E_3 在 *B*、*D* 之上）。为取得良好的表面构造一级主骨料的比例要大于二级主骨料，主骨料的粒级要求均匀并强调立方体的形状。为避免行驶车辆制动时跑偏，表面构造的均匀性更为重要，因此粒径略小（ $\leq 13.2\text{mm}$ ）而均匀的表面构造深度反而较粒径大（ $\geq 16\text{mm}$ ）而不均匀的要好。

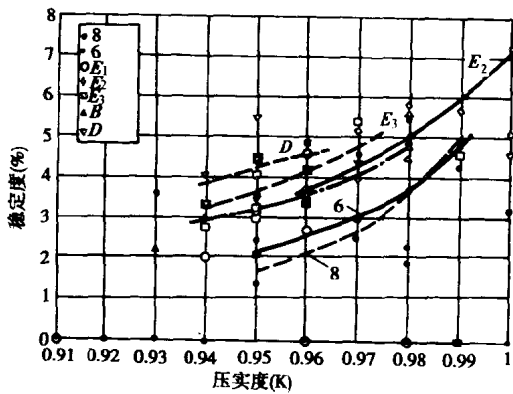


图 1-3-4 稳定度-压实度的关系

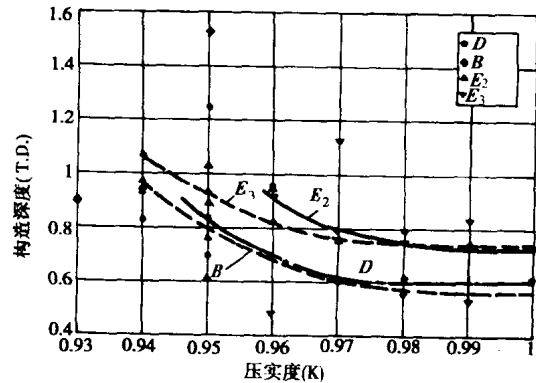


图 1-3-5 构造深度-压实度的关系

试铺取得的测定数据^[21]表明，构造深度与稳定度之间存在一定的矛盾，需要掌握好分寸。据此，AC-13V 设计时要求粒径 9.5 ~ 13.2mm 含量为 30% ~ 40%，4.75 ~ 9.5mm 相应为 20% ~ 30%，以平衡矛盾的各个方面。而在工程落实过程中更强调了强度与稳定性是功能的基础，根据各标段材料与工艺的实际水平，大部分要求 9.5 ~ 13.2mm 含量为 30% ~ 35%，4.75 ~ 9.5mm 相应为 25% ~ 30%。

(4) 按体积法实现密实原则

密实不仅是密水、抗老化、抗冻融循环作用等耐久性的要求，也是沥青混合料强度构成的一个方面，对于强度处于下限的集料更为明显。

四平银矿料场供应的玄武岩符合质量标准下限，并时有个别指标不足的现象，生产配合比设计结果（表 1-3-2，4s）低于规范要求。对此采取了增加矿粉含量、外掺抗剥离剂以及通过分别增加粗集料、石屑、细砂等调试级配等技术措施（表 1-3-2），结果表明，只有这样马歇尔试验各项指标才能达标。这显示出紧密嵌挤骨架密实型结构的优势。四平银矿玄武岩生产配比说明：第一，沥青混合料中集料的密度波动范围较大（ $2.3 \sim 2.9\text{t/m}^3$ ），采用体积法组成设计优点显著。第二，细集料的总量恰能填满粗集料骨架形成的空隙（对银矿玄武岩 $< 4.75\text{mm}$ 含量约 35% ~ 40% 为宜）；同时细集料本身宜符合逐级填充原理，使 $< 4.75\text{mm}$ 的细集料本身空隙最小^[19]。

四平玄武岩用于 AC-13V 型混合料试配表

表 1-3-2

级配编号	通过率(%)										油屑率(%)	孔隙率(%)	饱和度(%)	稳定度(kN)	技术途径
	16 (mm)	132 (mm)	9.5 (mm)	4.75 (mm)	2.36 (mm)	1.18 (mm)	0.6 (mm)	0.3 (mm)	0.15 (mm)	0.075 (mm)					
4S	100	92.4	75.2	44.3	28.5	18.7	13.9	10.2	7.97	6.0	4.5	7.7	55.5	6.57	用四平银矿集料调试的级配
4S-1	100	88.1	64.8	40.1	28.1	19.6	14.8	11.1	8.78	6.64	4.5	5.5	64.1	64.8	外加 9.5~13.2 粒级
4S-2	100	92.4	75.2	44.8	28.5	18.7	13.9	10.2	7.97	6.0	4.5	7.8	55.3	5.1	外加 5% 抗剥离剂
4S-3		100	59	35	33	25	19	14	9	5.5	4.5	4.8	67.2	7.4	按长平-13 中值级配
4S-4	100	92.4	75.4	45.8	30.2	20.6	15.8	12.1	9.91	7.51	4.5	7.04	58.0	6.3	增加矿物粉 2%
4S-6	100	98.3	65.7	40.4	28.5	18.5	14.3	10.2	8.03	6.02	5.0	4.8	70.4	6.87	采用 1~1.5 粒级配(细石屑)
4S-8	100	88.1	65.1	41.9	31	23.7	21.0	14.3	8.69	6.03	5.0	3.5	76.1	8.27	采用细砂配置达到长平-13 中值
4S-9	100	95.7	63	39.9	26.8	18.1	13.5	9.94	7.91	5.96	5.0	4.8	69.7	6.27	外加 9.5~13.2 粒级
长平-13		100	53~85	30~40	28~38	20~30	14~24	10~18	8~12	4~7	4.5~5.0				设计的级配范围

(5) AC-13V 型与 AC、AK 各型性能比较

为正确地选择混合料类型,进行一组比较试验^[25],除了车辙、低温缩裂与疲劳试验外,还做了冻融循环试验以及模拟交通荷载搓揉作用下摩擦系数和构造深度的试验,详细内容已列入分报告“沥青上面层材料设计”。今综合评价如下:

AC-I 型有好的抗疲劳和抗冻融耐久性,但表面功能最差;AK-B 型反之,表面构造、抗滑、排水、低噪声等表面功能特性都好,但耐久性甚差;AK-A 与 AC-II 居中,前者接近 I 型,后者接近 AK-B 型;V 型兼具良好的耐久性与表面功能特性(表 1-3-3)。

不同类型沥青混合料使用性能评分(5 分制)

表 1-3-3

级配类型	构造深度	抗滑	低噪声	抗辙	抗裂	抗疲劳	冻融稳定性	表面排水
AC-13I	1	2	1	3	2	5	5	1
AC-13II	3	4	3	4	3	2	3	3
AK-13A	2	3	2	3	2	3	4	2
AK-13B	5	5	3	4	3	2	2	4
AC-13V	4	4	3	5	4	4	5	3

长平高速公路沥青上面层选择 AC-13V 型。第一,抗冻融循环要求空隙率 $\leq 5\%$,通过调整级配形成紧密嵌挤结构。第二,在解决表面构造与耐久性矛盾的同时,解决高温车辙与低温缩裂这一对基本矛盾。至于 V 型抗疲劳性能不如 I 型,可通过结构层分工来弥补。

(6) AC-13V 型级配组成及级配曲线

经过试验路与实体工程的实践,AC-13V 级配建议值范围调整如表 1-3-4。为避免粗集料偏细,故 13.2mm 通过率改为 95%~100%;能否兼顾构造深度和密实不渗水,与工艺水平密切相关,故 4.75mm 通过率改为 30%~42%; $< 2.36\text{mm}$ 的通过率恢复到原设计值;并建议:对于一般的材料工艺水平宜采用高通过率以确保上面层密实耐久;对于条件好的,则

可在保证密实耐久的基础上提高抗滑指标。图 1-3-6 给出了与规范抗滑层推荐级配的比较。

AC-13V 型沥青混合料级配建议范围

表 1-3-4

级配 (mm)	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.074	沥青用量
AC-13V (%)	100	95~100	55~65	30~42	28~38	24~34	18~28	14~20	8~14	6~8	4.5~5.5

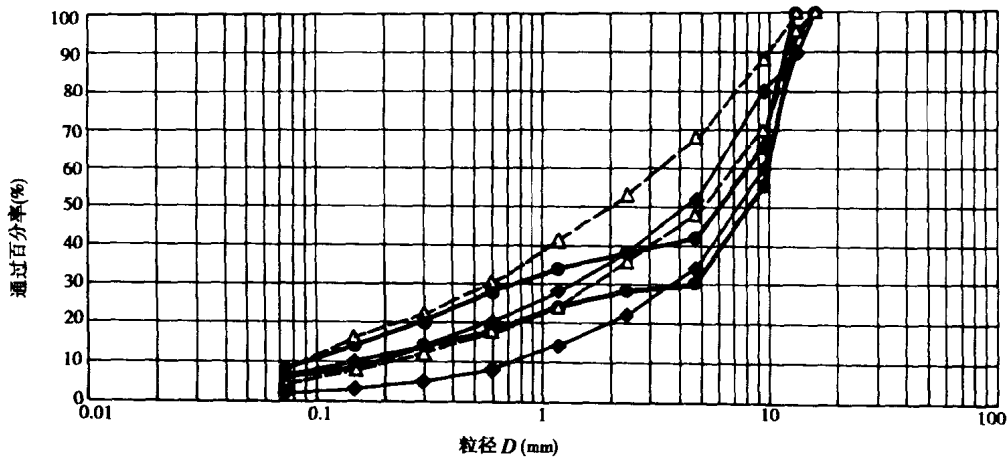


图 1-3-6 V 型级配与抗滑级配曲线的比较

2. AC-13V 型铺筑

(1) 试铺中发现问题

结合标段六、八、九、十、十一组织的试拌、试铺，进行 12 次现场测定，取得丰富的数据，现汇总如表 1-3-6。上述标段的拌和、摊铺和碾压施工设备有所不同，集料情况也不同，级配差异表现为八标段偏粗、六标段偏细，而九、十一标段不甚规则，十标段较好。为证实材料的影响还在十标段进行了 5 次测定，重点对集料粒径分布的影响进行了研究（表 1-3-5）。

各试铺段级配组成概况 (%)

表 1-3-5

级配 (mm)	十 标 段				六 标 段	八 标 段
	E1, E2	E3	D	B		
13.2~16.0	> 5.0					> 15.0
9.5~13.2	40~45	35~40	30~35	30~32	≤30	< 25.0
< 2.36	26~30	28~30	28~34	28~34	28~34	24~32

测定钻孔取样的马歇尔稳定度、摩擦系数、构造深度、透水性、压实度。通过性能测定数据分析可以看到工艺上的问题，主要反映在强度与透水性方面而不在构造深度与摩擦系数，因为从表 1-3-6 的量测统计数据、绘出的图 1-3-5 可以看到，即使构造深度衰减后，相当于压实度为 1.0 时的构造深度也普遍满足或大于规范的要求，现对问题分述如下：

① 透水性

按规范方法进行路面透水性试验时。水分流失极快，表面构造深度大的试铺段，透水表现在表面厚约 1mm 内的横向排出。据此认定不能只根据现有的现场透水性试验判断上面层的透水性。

将切割的钻孔试样，倒转使底面朝上，用野外透水试验仪器，按现场标准方法试验，首

表 1-3-6

沥青上面层试铺汇总表

次 序	指标 分段 编号	稳定度 (kN)				摩擦系数				构造深度 (mm)				透水性				压变度 > 0.96		按级 配粗 细排 序				
		样本 数 n	波动 范围	均值 MS	均方 差 σ	变异 系数 C_v	样本 数 n	波动 范围	均值 F	均方 差 σ	变异 系数 C_v	样本 数 n	波动 范围	TD	均方 差 σ	变异 系数 C_v	钻孔 样本 数 n	有孔洞 n_1 %	无孔洞 n_2 %		空隙率 < 7% n_3 %	n	%	
1	8 标	15	1.4~9.7	3.85	1.99	0.52	39	60~80	71.18	6.01	0.08	15	0.62~1.85	1.04	0.365	0.350	18	10	55.6	8	44.4	61	10	35.6
2	6 标	7	2.1~8.6	4.71	2.36	0.50	60~75				15	0.49~0.88	0.65	0.119	0.183	7	2	28.6	5	71.4	6	86	7	100
3	E ₁	6	2.0~4.6	2.65	1.03	0.39	60~75				15	0.78~1.4	1.06	0.206	0.195	8	4	50.0	4	50.0	6	75.5	3	37.5
4	E ₂	10	3.6~7.2	5.01	1.00	0.22	60~75				10	0.48~1.125	0.75	0.187	0.1499	10	4	40.0	6	60.0	9	90.0	9	90.0
5	E ₃	12	2.8~5.4	3.75	0.80	0.21	44~53	48.83	2.98	0.06	12	0.61~1.065	0.87	0.132	0.1522	12	8	66.6	4	33.4	7	58	2	16.7
6	D 匝道	8	3.4~5.5	4.28	0.66	0.08	41~52	45.89	3.08	0.07	9	0.60~1.25	0.81	0.201	0.2481	8	5	62.5	3	37.5	6	75	2	25
7	B 匝道	7	2.2~5.6	4.09	1.20	0.29	47~58	52.06	3.35	0.06	10	0.53~0.97	0.71	0.153	0.2151	7	4	57.0	3	43.0	5	71	4	57
8	11 标	12	1.3~5.8	3.15	1.292	0.410	48.67~63	55.53	3.77	0.068	12	0.57~1.7	0.94	0.375	0.399	5	4	54.1	6	67.6	5	50	3	60
9	6 标第二次	5	2.1~6.0	3.74	1.436	0.384	52.33~66.67	58.78	4.75	0.081	5	0.68~0.89	0.74	0.165	0.223	2	4	40	3	60	3	60	4	60
10	9 标	10	60~71.33	64.47	3.30	0.051	60~71.33	64.47	3.30	0.051	5	0.62~1.04	0.76	0.399	0.526	1	1	11.1	5	55.55	1	1	1	1
11	8 标第二次	7	2.2~5.2	3.46	0.983	0.284	40~55.33	45.45	3.93	0.086	9	0.59~1.38	0.99	0.305	0.305	1	1	11.1	5	55.55	1	1	1	1