

Yifan Liu

哈爾濱工業大學

畢業設計（論文）

題 目 基于石墨的自融雪導
電瀝青混凝土製備

專 業	土木工程
學 號	130840110
學 生	劉逸凡
指 導 教 師	馬新偉
答 辯 日 期	

Yifan Liu

摘 要

在我国北方地区，冬季常因为降雪导致交通拥堵，交通事故频发，清理道路积雪结冰也是一大难题。常用的人工、机械除雪和融雪剂除雪方式不仅效率相对较低，也容易对路面造成破坏。而导电沥青混凝土的作用就是在通电条件下，自身产热从而融化冰雪。导电沥青混凝土实际上就是在沥青混凝土制备过程中添加适当含量的导电材料，在不改变沥青混凝土的力学性能的前提下达到导电的目的。导电沥青混凝土不会像融雪剂一样对路面和车辆造成腐蚀，也减少了人工除雪作业量，能够大大降低冬季路面除雪的成本和资源消耗。

本文主要对导电沥青混凝土的制备过程和导电性能进行研究，对传统的马歇尔级配试验法和较新的 Superpave 级配设计法进行了研究和对比，采用 Superpave 级配设计法进行了配合比设计，采用石墨和钢纤维作为主要导电相材料，成功制备了导电沥青混凝土试块，并对石墨和钢纤维含量对导电性能的影响做了相应的实验测试，还对沥青试块进行了马歇尔稳定度试验，以保证其路用性能达到规范要求。

关键词：自融雪；导电沥青混凝土；石墨；Superpave；钢纤维；沥青路面

Abstract

In northern China, during the winter, snow often lead to traffic congestion, frequent traffic accidents, clean up the road snow ice is also a big problem. Commonly used artificial, mechanical snow removal and the use of snow melting agent, etc. not only the efficiency is relatively low, but also easy to cause damage to the road. The role of conductive asphalt concrete is in the power conditions, their own heat to melt snow and ice. Conductive asphalt concrete, in fact, is the asphalt concrete in the preparation process to add the appropriate content of conductive material, without changing the mechanical properties of asphalt concrete under the premise of the purpose of conduction.

Conductive asphalt concrete will not be like snow melting agent on the road and vehicle corrosion, but also reduces the amount of artificial snow removal, can greatly reduce the winter road snow removal costs and resource consumption.

In this paper, the preparation process and conductivity of conductive asphalt concrete are studied. The traditional Marshall gradation test method and the new Superpave gradation design method are studied and compared. Superpave method is used to design. The graphite and steel fiber were used as the main conductive phase materials, and the conductive asphalt concrete test pieces were successfully prepared. And the effects of graphite and steel fiber content on the electrical conductivity were tested, but also the Marshall stability test was carried out on the asphalt blocks to ensure that the road performance was met.

Keywords: Self-melting, Conductive asphalt concrete, Graphite, Superpave, Steel fiber, Asphalt pavement.

目录

摘 要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.1.1 课题背景	1
1.1.2 研究目的和意义	2
1.2 导电沥青混凝土及其他相关道路融雪融冰理论的发展概况	3
1.2.1 抗冻结路面的发展状况	3
1.2.2 发热电缆和导电沥青混凝土融雪路面的研究发展现状	4
1.3 本文的主要研究目标	5
1.3.1 各个阶段目标	5
1.4 本文的主要研究内容	6
1.4.1 沥青混合料原料的相关性质	6
1.4.2 导电材料的选择和相关性质	6
1.4.3 导电沥青混凝土的配合比设计	6
1.4.4 导电沥青混凝土的制备	6
1.4.5 混凝土制备步骤与最终导电性能的关系	6
1.5 本章小结	6
第 2 章 实验设备和材料	7
2.1 主要实验仪器和设备	7
2.1.1 SD-HJBIV型 数显混合料搅拌机	7
2.1.2 LD-5C 型 沥青混合料稳定度测试仪	7
2.1.3 LDMZ-IV型 数控马歇尔自动击实仪	9
2.1.5 其他实验设备和工具	10
2.2 主要实验材料	10
2.2.1 沥青	10
2.2.2 石墨粉	11
2.2.3 碳纤维	11
2.2.4 钢纤维	12
2.2.5 集料和矿粉	12

第 3 章 配合比设计和导电机理	13
3.1 马歇尔试验设计法	13
3.1.1 马歇尔级配方法简介	13
3.1.2 相关理论和规范要求	13
3.1.3 最佳沥青用量的确定	17
3.2 Superpave 级配方法	17
3.2.1 Superpave 级配方法简介	17
3.3 两种级配方法对比与方案选择	20
3.4 导电机理	21
3.5 本章小结	21
第 4 章 实验过程和相关记录	22
4.1 集料筛分	22
4.2 配合比设计计算	24
4.3 导电相材料掺入比例	28
4.4 实验操作	29
4.4.1 制作模具	29
4.4.2 制备混凝土	29
4.4.3 电阻测定	30
4.5 实验记录	31
4.5.1 未压实的沥青混凝土试块	31
4.5.2 压实的导电沥青混凝土块	33
4.5.3 改变石墨含量后压实的试块	34
4.5.4 力学性能测试	35
4.6 发热效率换算 ^[10-11]	35
4.7 本章小结	36
结 论	37
参考文献	39
致 谢	40

第1章 绪论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

1.1.1 课题背景

中国地区跨越了亚寒带、温带、亚热带、热带、高原气候区，大部分地区冬季有降雪结冰现象，尤其是在北方，部分地区如东北和西北地区，处于降雪积雪较多的地域，年降雪量甚至能达到年降水量的三分之一甚至更多。

然而，道路积雪、结冰会对公路和城市道路的交通行驶带来严重的影响，不但会导致道路的交通通行能力下降，车辆行驶缓慢，影响人们正常的日常出行和生活，同时，道路积雪结冰也会增加交通事故的发生几率，是交通安全的重大隐患之一，根据统计，在冬季发生的交通事故大约有 35%和道路结冰导致车辆失控或刹车不及时有关，造成大量的人员伤亡和经济损失。

雪天行车时，本来驾驶员的视线就会受到风雪的阻碍，实际有效视距比正常行车视距要小很多，再加上车辆行驶在雪地或者结冰路面上，车轮与路面的摩擦系数将变为正常路面的 $1/8-1/4$ ，刹车距离将变为正常刹车距离的数倍。冬季的交通事故对行人造成的伤害往往会更大。因此在我国北方城市，冬天行车时要给车辆准备好防滑链，一旦发现前方路面积雪过多，就需要停车安装防滑链，在路面没有积雪时则需要将防滑链取下以免防滑链磨损过多而损坏，这样一来，严重影响了道路的通行效率，容易造成道路拥堵，从而增加道路交通事故的发生率。



(1)



(2)

图 1-1 因道路积雪成冰导致的交通事故案例

现阶段世界各国包括我国在内的大多数地处温带、寒带的国家和地区采用的道路清雪方法为人工和机械作业除雪、融雪剂除雪，这两种方式属于被动式除雪，部分地区的道路会采用特种沥青，如在沥青中加入氯盐，在低温时氯盐会析出，

通过改变含盐量来降低水的凝固点，达到融雪化冰的目的。也有极少部分地区的路段会采用加热的方式进行除雪，如在路面面层下部埋设导热电缆，通过通电加热电缆使得路面温度升高来融化积雪。

对于上述几种路面除雪方式来说，人工和机械除雪的投入大，耗费的人力和物力多，清雪效率较低，如果不能持续作业，在连续降雪天气中，道路路面难以保持洁净，势必会有大量积雪成冰的路段。而含氯融雪剂或含盐沥青，由于会产生大量的氯盐溶液（强电解质），会对沥青混凝土路面造成极大的难以弥补的损害，这也是北方道路路面经常出现破损破裂等病害的主要原因之一，严重影响了道路的使用寿命，大大增加了路面维护维修的成本，同时会对路面上的车辆底盘、车体造成腐蚀，影响车辆寿命；而醇类融雪剂受环境温度影响大，具有反结冰现象，在温度较低的情况下会导致融化的冰雪再次结冰，使得路面更加湿滑。



图 1-2 机械和人工除雪

在路面面层下部铺设导热电缆，通过通电加热的方式来融雪，可以避免氯盐对路面和过往车辆的腐蚀，但是加铺电热层需要考虑和计算的内容更多，不仅需要保证路面的平整度，还需要考虑到沥青层和导热电缆层（即电热层）之间是否会产生错动导致路基路面受损，需要考虑和重新计算道路的整体抗压抗剪能力，电热层是否会因为长期受车辆碾压而变形导致断路或局部电阻过大（过小），还需要考虑电热的导热效率，沥青的散热率（保温能力），有多少热量是能够最终传递到路面用于加热融化积雪，有多少热量会传递到路基而不是向路面传递，最终的电热转化效率有多大，最终的融雪融冰的功率和效率等等，都是需要重新考虑的问题。如果电热转化效率太低，其融雪化冰效果可能虽好，但是成本过高，那便无法大规模使用，其意义也会大打折扣。

1.1.2 研究目的和意义

然而，现阶段有另外一种融雪化冰的方法和思路，就是将导电材料加入到沥

青混凝土中，从而改变沥青混凝土的电阻率，然后通过对沥青混凝土通电，使其自身产生热量从而融化路面积雪。现有的办法大多为将钢渣或石墨或碳纤维等材料加入到沥青混凝土中，或者将两种及以上的导电材料加入到沥青混凝土中，形成多相导电材料，但是材料种类越多，制备沥青混凝土的过程就越复杂，成本也就越高，对最后沥青混凝土的各项力学性能的影响就越大。

本实验的目的旨在尝试使用最少种类的导电材料，尽可能保证较低的制备成本，在保证路用性能的前提下，制成导电道路沥青混凝土。其意义在于既能保证沥青混凝土的各项力学性能，又能达到在冬季雪天融雪化冰的效果，既不会像氯盐融雪剂等融雪方式那样对路面造成腐蚀，也不会产生铺设导电缆层那样的高成本。

1.2 导电沥青混凝土及其他相关道路融雪融冰理论的发展概况

1.2.1 抗冻结路面的发展状况

2002 年，国际道路协会（PIARC）在日本举办国际冰雪道路技术大会，会议把抗冻结路面作为冰雪道路主要的研究方向。抗冻结沥青混凝土路面主要分为化学类，物理类，物理化学类 3 种^[1]。（如图 1 所示）

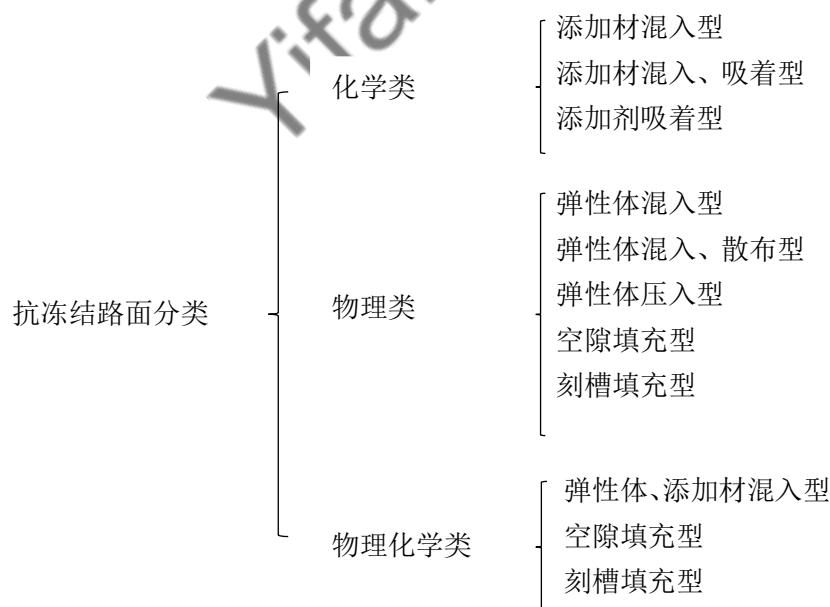


图 1-3 抗冻结沥青混凝土路面分类

其中，化学类抗冻结路面采用的主要方式是用盐化物代替少量细集料来达到抑制冰雪的目的，也就是将融雪成分直接填充在沥青中，在制备沥青时加入盐化物或其他融雪剂。添加材混入型沥青混凝土主要分为水泥固化型、表面裹油型和

粉末型，这三种混入型混凝土均是采用将盐化物以不同形式置换部分细集料，而添加剂吸着型沥青混凝土则是将高聚物盐类填充在开级配沥青混合料空隙中。

物理类抗冻路面则是利用在面层填入弹性体，利用车辆荷载使弹性体变形，车辆通过后弹性体反弹从而使冰面破碎。但物理类实际融雪破冰效果不佳，只能做到利用过往车辆破碎冰雪，并不能很好的融雪化冰，仍需配合其他除雪方式才能除净道路积雪。

物理化学类抗冻结路面则是将融雪剂和弹性体同时加入到道路沥青混凝土中，取二者之长来达到融雪目的。

山东大学曹卫东等人成功探索了将主骨料空隙填充法应用于橡胶颗粒沥青混合料配合比设计，并且成功铺设了试验路。^[2]北京工业大学的张金喜教授，采用汽车车门的废旧橡胶密封条制作橡胶颗粒，按照不同比例掺加到沥青混合料中，验证了混合料的除冰雪性能。^[3]长安大学的新型路面研究所韩森教授等人，进行了橡胶颗粒除冰雪沥青混凝土的路面的系统研究，并且自行研发了路面破冰模拟试验仪，从抑制结冰、破冰以及除雪三个方面验证了橡胶颗粒除冰雪沥青混凝土的除雪破冰性能^[4]。

1.2.2 发热电缆和导电沥青混凝土融雪路面的研究发展现状

美国内布拉斯加州的 77 号公路上的 Roca Spur 桥是世界第一座在部分桥面上铺设导电沥青混凝土的桥梁，通电时可以成功将冰雪融化。

美国 Nebraska Department of roads 导电混凝土桥面除雪化冰项目对各种除雪方式的成本进行了分析，其结果表明：在不同的加热融雪法中，导电混凝土的成本最低，其次为电热丝法。^[5]

北京工业大学也曾对利用发热电缆来融雪化冰这一项目进行过研究^[6]，实验所制试块放于室外地面，在低温（-4℃）时，通电加热 2.5h 后使试块温度上升至 2℃，完全融化 10mm 厚的碎冰需要 5h，完全融化 10mm 厚的新雪则只需大约 20min，完全能够做到无需人力或机械除雪。但是这种方式前期投资太大，道路施工成本较高，单位面积（1m²）内需要 250W-350W 的发热电缆铺装功率，而且预热时间较长。

2007 年一月，国内首座电热融雪桥——哈尔滨文昌高架桥投入使用，该桥上桥处匝道地面下铺设了电热电缆线，用于融化引桥匝道处的积雪，解决了道路结冰后除雪车辆难以进行除冰工作的难题。

2012 年 7 月，河北省唐山市曹妃甸综合保税区的一座桥面上，融雪抑冰导电沥青混凝土桥面铺装技术在国内首次应用，铺筑了全长 40 米的桥面，该地区最低

气温可达 -20.9°C ，年平均降雪量在 40 毫米以上，最大积雪深度可达到 180 毫米。工程竣工后，桥面多次开启导电沥青混凝土路面系统进行除雪，现桥面使用状态良好，平整度高，行车平稳舒适。负责该项目的项目组提出的包含隔热层、导电沥青混凝土铺装层、电极与电源的融雪抑冰桥面铺装结构形式，实现了国内首座导电沥青混凝土桥面铺装实体工程。^[7]

2013 年，乌鲁木齐市政工程建设处在“田”字路二期七一酱园、徽商酒店、西城街附近的 3 处关键匝道口采用了电融雪技术，将发热电缆铺设在道路下面，3 处发热电缆总长 200 多米。实际使用时地面温度为 4°C ，比周围路面高出大约 10°C ，发热电缆一根长 150 米，粗 4.5 毫米，电缆外护套采用的是钢合金，发热元件采用了铜镍合金，利用氧化镁作为绝缘材料，在承压和高温方面都没有问题，其中，一根发热线缆，全功率运行时半小时耗电可达 120 度。

2015 年 3 月，北京开始对北京市内多条立交桥安装自动融雪设备，紧急情况下（如突降大雪或道路已经结冰无法人工作业）可以远程操控喷洒无氯融雪剂。但由于无氯融雪剂成本较高，只能在紧急情况下（如突降大雪或道路已经结冰无法人工作业）启用。

同时，国内也有大量的科研人员在研究各式各样的自融雪路面，例如嵌入式导电沥青混凝土的热效应研究，利用发热电缆来进行路面融雪化冰，利用不同的导电材料如碳纤维、钢渣等来制备导电沥青混凝土，在沥青混凝土中加入废旧橡胶颗粒利用自应力来破碎路面积雪等。

1.3 本文的主要研究目标

1.3.1 各个阶段目标

第一阶段：

设计制作小比例导电沥青混凝土片，测试其电阻率，验证其是否满足导电要求。

第二阶段：

调整并改进实验方案，确定最佳方案并测试发热性能，并按照标准厚度的路面面层沥青混凝土来进行换算。

第三阶段：

制作压实的导电沥青混凝土试块，并测试其导电性能，验证其力学性能是否满足要求，尽量制成满足路用性能的低成本自融雪导电沥青混凝土试块。

1.4 本文的主要研究内容

1.4.1 沥青混合料原料的相关性质

主要包括粗细集料、沥青型号等主要原料的选择和相关力学和电学性能指标的确定。

1.4.2 导电材料的选择和相关性质

主要包括对导电材料的选择和导电材料的力学、电学性能

1.4.3 导电沥青混凝土的配合比设计

主要探讨马歇尔级配方式和 Superpave 级配方法，对比两种方法的优缺点，以及所选用级配方法的相关实验设计计算。

1.4.4 导电沥青混凝土的制备

选用 AC-16 沥青混合料，并在此混合料基础上研究制备导电沥青混凝土，研究并测试在不同比例的导电相材料加入后其电阻率的变化

1.4.5 混凝土制备步骤与最终导电性能的关系

主要研究不同的拌和顺序对最终的沥青混凝土的导电性能是否有影响，并研究讨论最佳的导电沥青混凝土的制备步骤。

1.5 本章小结

本章主要分析了现有的冬季沥青道路除雪的主要方案的利弊和最新的国内外相关研究的理论以及实际成果，分析了本文所做研究的目的和意义，简单介绍了本文的主要研究内容。

第 2 章 实验设备和材料

2.1 主要实验仪器和设备

2.1.1 SD-HJBIV型 数显混合料搅拌机



图 2-1 SD-HJBIV型 数显混合料搅拌机

该搅拌机由上海英松工矿设备有限公司生产，为数显自动混合料搅拌机。

最高加热温度约为 320℃，两档加热，搅拌单位可选为秒（s）、分钟（min）、小时（h），标准转速（不可调）。

2.1.2 LD-5C 型 沥青混合料稳定度测试仪

该沥青混合料稳定度测试仪由上海路达公司生产，于 2009 年购入。其主要特点：

- 1、设有过载保护，下降过位保护。
- 2、操作简便，测试数据准确，性能稳定可靠。
- 3、仪器自动试验，显示并打印稳定度及对应的流值，绘制试件受力变形的坐标曲线图。
- 4、可存储 15 组试件的试验结果。
- 5、大型液晶屏显示曲线和稳定度及流值。
- 6、流值检测有单路与双路两种。
- 7、试验由仪器或计算机自动控制，试件受压变形过程数据及曲线由计算机自动存盘并显示，可通过打印机打印输出。
- 8、先进的自动分析软件，按照《沥青混合料配合比设计方法》绘制出各种曲

线，自动给出最佳沥青用量，可通过打印机输出。

9、可以选配大压头做大马歇尔试验，也可选配双压头做大小两种试验。

10、机器配有 USB 接口。

11、可选配串口，上位机软件可以进行分析处理。

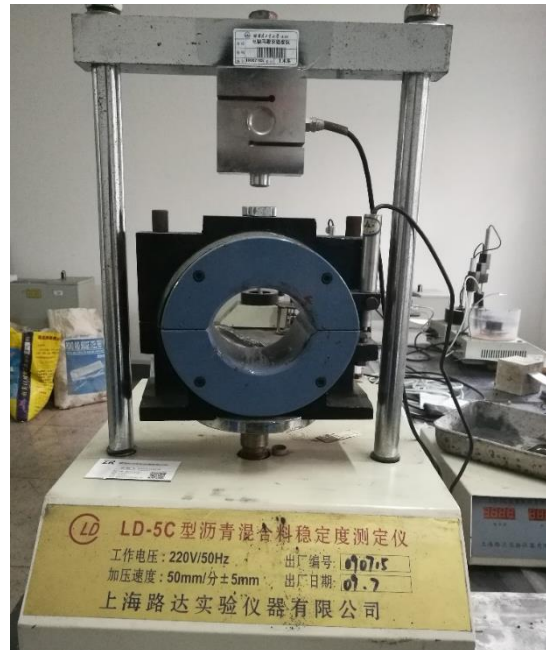


图 2-1 LD-5C 型 沥青混合料稳定度测试仪

表-2 沥青混合料稳定度测试仪主要技术指标

设备型号	LD-5C
上升速率（mm/min）	50±5
压头直径（mm）	101.6±0.2/152.4±0.2
最大压力	30KN 50KN 精度 1%
流值范围	0—15.00±0.1mm
环境温度（℃）	≤30
相对湿度（%）	≤85
整机功耗（W）	≤700
外型尺寸（mm）	700x500x900
仪器净重（kg）	100
电源电压（V）	220

2.1.3 LDMZ-IV型 数控马歇尔自动击实仪

LDMZ-IV 型马歇尔自动击实仪适用于标准的击实法供试验室进行沥青混合料物理力学性质试验，马歇尔试验，间接抗拉试验等，能通过置换击锤，分别制取交通部 JTJ052—2000 和交通部 JTJ52—83 试验规程中规定的两种沥青混合料马歇尔稳定度试件，是沥青混合料马歇尔稳定度试验制备试件理想的电驱动自动击实仪，一般适用于公路、市政、化工、科研等从事沥青性能指标测量研究的部门。



图 2-3 LDMZ-IV型 数控马歇尔自动击实仪

表 2-2 LDMZ-IV 型 数控马歇尔自动击实仪数据规格

型号规格	LDMZ-IV 型
大型击实锤重量 (kg)	10.21±0.01
标准击实锤重量 (kg)	4.53±0.01
击锤落高 (mm)	457
击实次数	60±5 次/分
大型试模直径 (mm)	Φ152.4
标准试模直径 (mm)	Φ101.6
大型试模高度 (mm)	115
标准试模高度 (mm)	87
大型电机功率 (W)	370
标准电机功率 (W)	380
电源电压	AC380V±10%，50Hz
外形尺寸 (mm)	500×570×1650
重量 (kg)	180

2.1.5 其他实验设备和工具

主要包括集料套筛，电子秤，铁锅，电热炉，隔热手套，木板，剪刀，36 伏稳压电源，铝片，电线，耐热红胶，羊角锤，电锯，手锯，铅笔，直尺等

2.2 主要实验材料

2.2.1 沥青

沥青是由不同分子量的碳氢化合物及其非金属衍生物组成的黑褐色复杂混合物，是高黏度有机液体的一种，呈液态，表面呈黑色，可溶于二硫化碳，电阻率在 $10^{13} \Omega \cdot m$ ，属绝缘体。沥青是一种防水防潮和防腐的有机胶凝材料，主要用于涂料、塑料、橡胶等工业以及铺筑路面等。

采用不同工艺，或者不同原油但相同工艺或甚至是采用不同原油和工艺获得的沥青，它们即使具有相近的沥青组分含量，但是它们的技术性质指标却可以相差甚大。产生这些现象的原因，是不同油源和工艺获得的沥青，它们的各化学组分虽可以很接近，但它们各个组分的化学结构并不相同，各组分的溶度参数也不同。即各组分的相溶性不同，因而形成不同的胶体结构，所以它们的技术性质亦不相同。

本次试验采用的沥青为 SK-70#沥青，于 2017 年 3 月生产，原产地为韩国。其相关技术指标如下表所示。

表 2-1 SK-70#道路石油沥青技术指标

项目	单位	指标要求
针入度（25℃，5s，100g）	0.1mm	60—80
试用的气候分区	—	2—2
针入度指数 PI	—	-1.5—1.0
软化点（环球法）	℃	≥45
含蜡量	%	≤2.2
延度（10℃）	cm	≥25
溶解度	%	
密度（15℃）	g/cm ³	实测记录 0.95
质量变化	%	≤±0.8
残留针入度比（25℃）	%	≥61
残留延度（10℃）	cm	≥6

2.2.2 石墨粉

石墨粉是一种常见的导电相材料，石墨粉是化学反应很灵敏的物质，在不同的环境里面其电阻率都会改变，但有一点是不会变的，石墨粉是很好的非金属导电物质之一，只要在绝缘的物体里面保证石墨粉不间断，就可以保证可以导电，但是其电阻值难以确定，因为石墨粉的粗细不一样，用在不同的材料和环境石墨粉电阻值也会不一样。

本次试验选用鳞片石墨粉，形状类似于鱼鳞状，属于六方晶系，呈层状结构，具有良好的耐高温、导电导热、润滑、可塑和耐酸碱等性能。鳞片石墨根据固定碳含量分为高纯石墨、高碳石墨、中碳石墨、低碳石墨四种类型。

表 2-2 鳞片状石墨粉的主要性质

化学成分	密度 g/cm ³	莫氏硬度	粒径（mm）	碳含量（%）	电导率（S/m）
C	2.1-2.3	1-2	<0.075	98.9	3.2×10 ⁵

2.2.3 碳纤维

碳纤维（carbon fiber），是一种含碳量在 95%以上的高强度高模量纤维的新型纤维材料。它是由片状石墨微晶等有机纤维沿纤维轴向方向堆砌而成，经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料。碳纤维按原料来源可分为聚丙烯腈基碳纤维、沥青基碳纤维、粘胶基碳纤维、酚醛基碳纤维、气相生长碳纤维；按性能可分为通用型、高强型、中模高强型、高模型和超高模型碳纤维；按状态分为长丝、短纤维和短切纤维；按力学性能分为通用型和高性能型。碳纤维耐高温，耐摩擦，耐腐蚀，强度高，导电导热等性能使其可以用于航空航天领域、国防军事领域、

汽车构件、风力发电叶片、建筑加固材料、增强塑料、钻井平台等。此外还运用在压力容器、医疗器械、海洋开发、新能源等领域。

本文选用短切碳纤维，其优点在于其长度短，拌和时不易自身缩聚成团，能够有效的分布在沥青混合料中，以便增大沥青混合料导电相之间的接触面积，增大混合料的导电率。但是短切碳纤维的分散能力较差，在制备时应予以充分拌和以使其尽量均匀分布在沥青混合料中。

表 2-3 短切碳纤维单丝主要性能

指标名称	抗拉强度 (GPa)	拉伸模量 (GPa)	单丝直径 (μm)	碳含量 (%)	单丝长度 (mm)	电导率 (S/m)
指标	1.68	752	10~14	≥ 90	4~7	5×10^3

2.2.4 钢纤维

钢纤维，是以切断细钢丝法、冷轧带钢剪切、钢锭铣削或钢水快速冷凝法制成长径比（纤维长度与其直径的比值，当纤维截面为非圆形时，采用换算等效截面圆面积的直径）为 40~80 的纤维。具有良好的粘结性、硬度和耐腐蚀性，其电阻率也较小，可以作为导电相材料使用，同时其良好的粘结性可以使其和石墨粉、碳纤维等黏连，在沥青混合料中形成导电通路。本文试验选用的钢纤维是用切断细钢丝发所得的长径比在 50~70 的钢纤维，其长度约在 12~15mm，各项指标符合公路工程施工技术规范的要求。

2.2.5 集料和矿粉

集料，分为集料 A（细集料）、集料 B（粗集料），材料均为石灰石。

矿粉选用矿渣粉，密度约为 2.5g/cm^3 ，设计时按 2.5g/cm^3 计算。

集料和矿粉均符合技术规范要求。集料的筛分结果在第 4 章中。

第3章 配合比设计和导电机理

3.1 马歇尔试验设计法

3.1.1 马歇尔级配方法简介

马歇尔试验方法的基本概念最早是由密西西比公路局的 Bruce Marshall 在 1939 年左右提出的，后经美国陆军进一步完善。在二战期间，美国陆军工程兵团（USCOE）开始评价不同的热拌沥青混合料（HMA）设计方法，以用于军用机场道面设计。也是我国目前进行密级配沥青混合料配合比试验的主要试验方法。

马歇尔试验是确定沥青混合料最佳油石比的试验。其试验过程是对试件在规定的温度和湿度等条件下标准击实，其主要力学性能指标为马歇尔稳定度 MS 和流值 FL 等指标，经一系列计算后，分别绘制出油石比与稳定度、流值、密度、空隙率、饱和度的关系曲线，最后确定出沥青混合料的最佳油石比。

根据实验室现有仪器设备，可进行马歇尔试验，故先利用马歇尔试验方法进行初步设计计算。

3.1.2 相关理论和规范要求

沥青面层一般采用双层或者三层结构，各层所需沥青混合料类型应根据道路等级和所处位置的功能要求进行选择。

导电自融雪沥青混凝土如果作为磨耗层或者表面层，其损耗速度和损耗程度必定较大，一定时间后必定需要修补或翻新，一旦修补和翻新，必定导致新旧路面的电阻率有较大差异，而且接触面可能有较大裂缝，导致电路内部断路无法实现通电加热的目的，不能达到融雪化冰的效果。

如果将导电沥青混凝土制成下面层或基层，虽然可以避免破损裂缝等病害，但是产生的热量难以传递至路面，相同融雪效果需要消耗的电能和时间更多，造成不必要的浪费。

故本次实验选择将导电沥青混凝土作为中面层或表面层下部，以满足加热和防病害的目的。根据实验目标，先尝试制作可以导电的沥青混凝土试块，随后根据实验进度，再尝试制作完整的沥青混凝土路面面层试块，进行通电加热测试和相关力学性能测试。

马歇尔级配试验设计法流程如下：

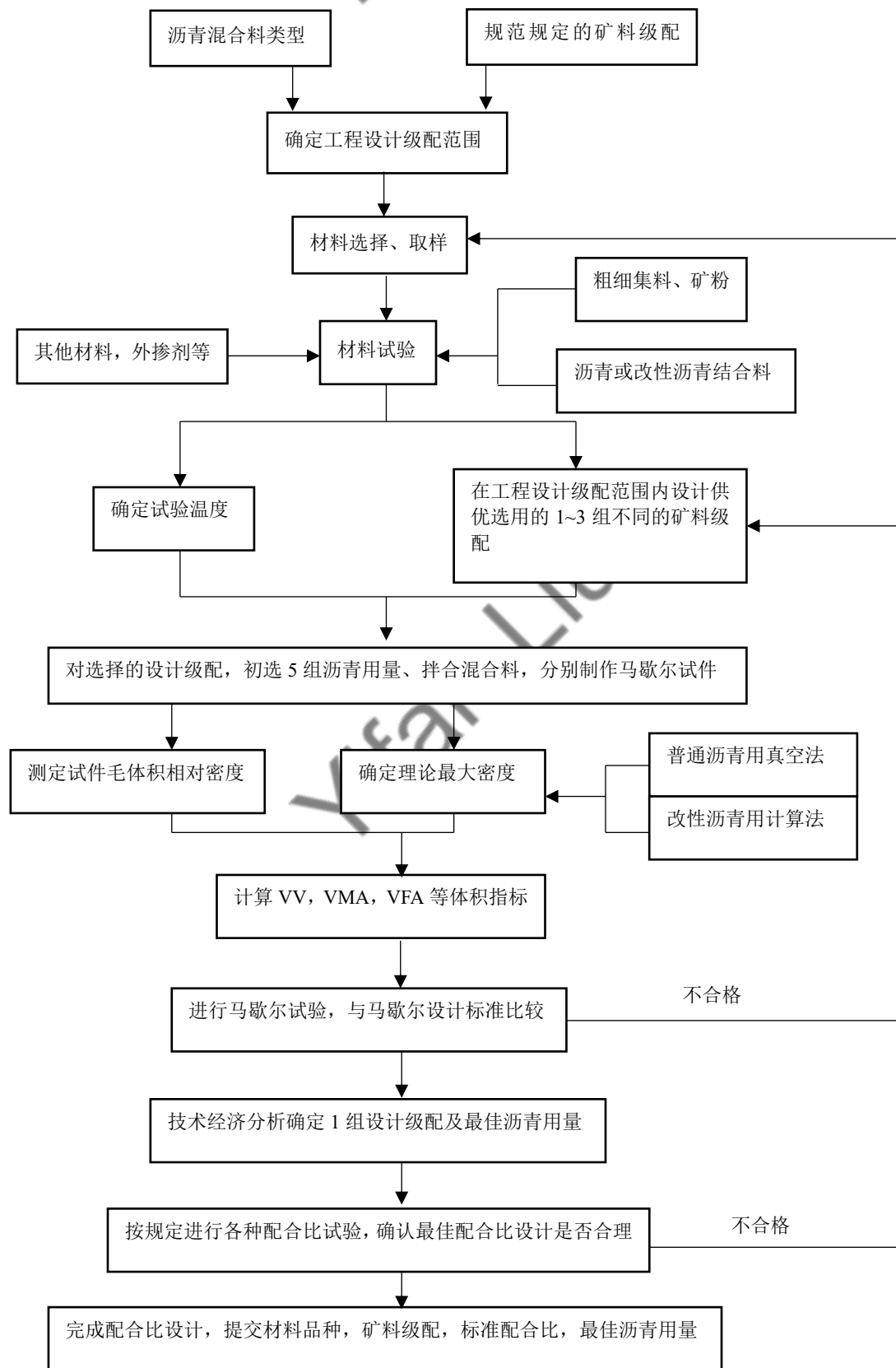


图 3-1 沥青混合料配合比设计流程图

沥青各层所需最小压实厚度如表 3-1 所示

表 3-1 沥青面层混合料的最小压实厚度（mm）

沥青路面 结构层类型	道路等级	沥青混合料类型	高速公路、一级公路 城市快速路、主干路			二级以下等级公路 一般城市道路			行人道路	
			AC	SMA	OGFC	AC	SMA	AC		
磨耗层 表面层	集料公称最大 尺寸（mm）	4.75	×	×	×	×	×	10		
		9.5	30	25	20	25	25	20		
		13.2	40	35	25	35	35	25		
		16	50	40	×	45	40	×		
中面层 下面层 基层	集料公称最大 尺寸（mm）	13.2	×	×		35	35	×	35	35
		16	50	×		45	40	×	40	40
		19	60	×		60	50	×	55	×
		26.5	80	80		×	60	80	×	×
		31.5	×	100		×	×	90	×	×
		37.5	×	120		×	×	100	×	×

由于沥青混合料矿料的级配组成对其使用性能影响很大，也是配合比设计的重要原因，我国现行规范《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40—2004）对密级配沥青混合料的矿料级配范围做出了相关规定。

表 3-2 密级配沥青混合料（AC）矿料级配范围

级配类型		通过下列筛孔（mm）的质量百分率												
		31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.72	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
粗粒式	AC-25	100	90-100	75-90	65-83	57-76	45-65	24-52	16-42	12-33	8-24	5-17	4-13	3-7
中粒式	AC-20		100	90-100	78-92	62-80	50-72	26-56	16-44	12-33	8-24	5-17	4-13	3-7
	AC-16			100	90-100	76-92	60-80	34-62	20-48	13-36	9-26	7-18	5-14	4-8
细粒式	AC-13				100	90-100	68-85	38-68	24-50	15-38	10-28	7-20	5-15	4-8
	AC-10					100	90-100	45-75	30-58	20-44	13-32	9-23	6-16	4-8
砂粒式	AC-5						100	90-100	55-75	35-55	20-40	12-28	7-18	5-10

表 3-3 粗型和细型密级配沥青混合料的关键性筛孔通过率（JTG F40—2004）

混合料 类型	公称最大 粒径（mm）	用以分类的关键 性筛孔（mm）	粗 型 级 配		细 型 级 配	
			代号	关键性筛孔 通过率（%）	代号	关键性筛孔 通过率（%）
AC-25	26.5	4.75	AC-25C	<40	AC-25F	>40
AC-20	19	4.75	AC-20C	<45	AC-20F	>45
AC-16	16	2.36	AC-16C	<38	AC-16F	>38
AC-13	13.2	2.36	AC-13C	<40	AC-13F	>40
AC-10	9.5	2.36	AC-10C	<45	AC-10F	>45

本文所选沥青混合料为中粒式 AC-16，故公称最大粒径为 16mm，最大粒径为 19mm。关键性筛孔为 4.75mm。关键性筛孔通过率应大于 45%。

3.1.3 最佳沥青用量的确定

以油石比或沥青用量为横坐标，以沥青混合料试件的毛体积密度、沥青饱和度、马歇尔稳定度（MS）、空隙率、流值指标（FL）作为纵坐标，将实验结果点入图中后连成光滑曲线。

（1）确定最佳沥青用量的初始值 OAC_1

根据图 3-1-1，求取相应于马歇尔稳定度 MS 最大值、试件毛体积密度最大值、目标空隙率、设计沥青饱和度范围中值的沥青用量 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ，由式（3-1）计算四者的平均值作为最佳沥青用量的初始值 OAC_1

$$OAC_1 = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 \quad (3-1)$$

在试验的沥青用量范围中，如果密度或者稳定度没有出现峰值，可以直接采用目标空隙率对应的沥青用量作为 OAC_1 ，但是 OAC_1 必须介于 OAC_{min} 和 OAC_{max} 之间，否则应该重新设计配合比设计。

（2）确定沥青最佳用量的初始值 OAC_2

在图 3-1-1 上，求出各项指标（不含 VMA）符合技术标准规范的沥青用量范围 $OAC_{min} \sim OAC_{max}$ ，由式（3-2）来计算沥青最佳用量的初始值 OAC_2 。

$$OAC_2 = (OAC_{min} + OAC_{max}) / 2 \quad (3-2)$$

（3）综合确定最佳沥青用量 OAC

最佳沥青用量 OAC 的确定需要考虑沥青路面的工程实践经验、道路等级、交通特性、气候条件等因素。

通常情况下，取 OAC_1 和 OAC_2 的平均值作为计算的最佳沥青用量 OAC，检验与 OAC 对应的矿料间隙率 VMA 是否满足对 VMA 最小值的要求。

3.2 Superpave 级配方法

3.2.1 Superpave 级配方法简介

马歇尔试验设计法是上世纪 40 年代提出的，但是在 1973-1993 年期间，全美国长途货运量增加了 75%，法定荷载限制从 73280 磅增加至 80000 磅，表面上只是上限提高了 10%，但是实际上却使得路面的应力增加了 40%~50%。随着运输业的发展，传统的采用马歇尔试验级配方式的热拌沥青混合料的应用不断增加，但是其效果却并不尽如人意，这就迫使人们必须在沥青混合料上进行新的研究。

美国公路战略研究计划（SHRP）于 1987 年正式被批准建立，其目的就是研究开发一种新型体系，能够把热拌沥青混合料的材料特性和路面特性联系在一起。最终，SHRP 的研究者确定开发基于性能的沥青胶结料规范和研究改进混合料设计方法。

SHRP 沥青研究的最终成果就是 Superpave 沥青混合料设计和分析体系，Superpave 是 Superior Performing Asphalt Pavement 的缩写，Superpave 体系是一种改进后的体系，规定了沥青结合料和粗细集料性质，并进行了沥青混合料的设计和路面性能的分析。

Superpave 体系的特性在于，其试验是在更能够体现路面实际服务情况的温度以及老化条件下进行的。Superpave 所提及的路面损害（包括车辙、疲劳开裂与低温开裂）往往出现于路面寿命的相对典型的阶段和某种温度条件。根据这些情形，Superpave 性能等级胶结料规范，在项目预测的温度和老化条件下进行沥青的测试，以此来减少路面损坏。SHRP 的研究人员还开发了新的试验标准和相应的设备来进行试验。

Superpave 沥青混合料设计的四个主要步骤为：材料选择、设计集料结构选择、设计沥青胶结料含量选择以及混合料水敏感性评估，见图 3-3。

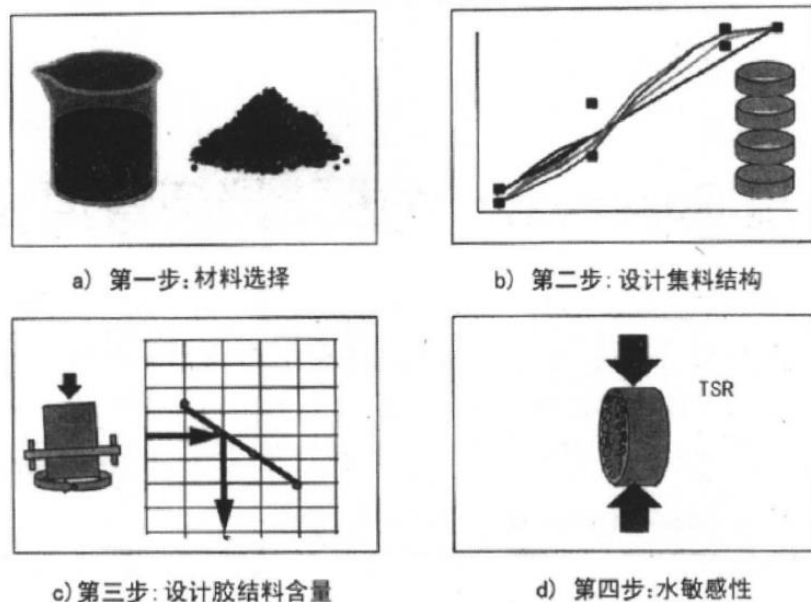


图 3-3 Superpave 混合料设计步骤

为了描述级配，Superpave 采用了 0.45 次方图确定允许级配，0.45 次方图的重要特点之一就是有一个最大密度级配，Superpave 采用了标准 ASTM 筛组，并根据集料尺寸定义如下：

(1) 最大尺寸：大于公称最大尺寸的上一个筛孔尺寸；

(2) 公称最大尺寸：第一次筛余大于 10% 的筛孔尺寸。

最大密级配代表颗粒最密集排列在一起的一种级配，但是很明显这种级配是应该避免的，因为此时的集料间的空隙太小，不能为混合料提供足够厚的沥青膜。

图 3-2-2 所示的 0.45 次方图为 19mm 最大集料尺寸和 12.5mm 公称最大尺寸的最大密级配。

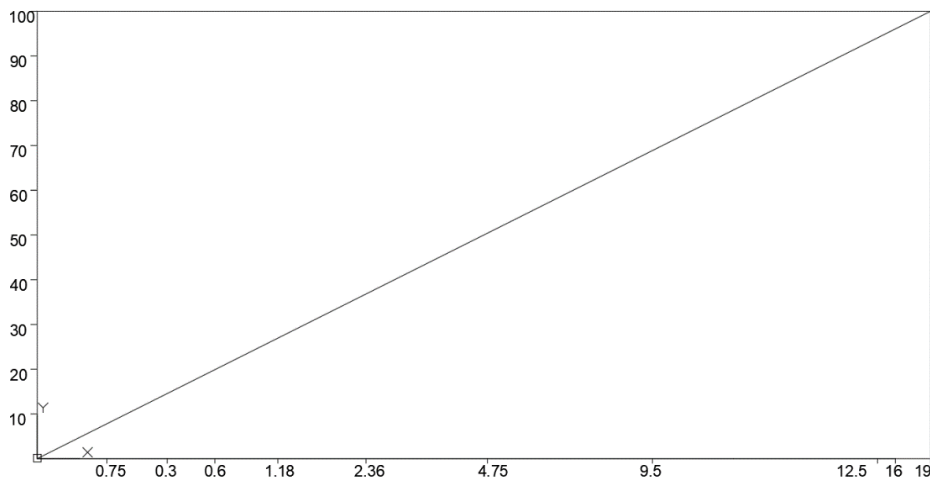


图 3-4 公称最大尺寸为 12.5mm 的最大密级配的 0.45 次方图

为了规范级配，还给 0.45 次方图增加了两个附加特征，即控制点和限制区。控制点的功能是控制级配所必须经过的范围，控制点位于公称最大尺寸、中等尺寸以及粉尘尺寸。

限制区是在中等尺寸和 0.3mm 尺寸间沿最大密度级配线而形成的一个区域，是不应通过的带状区域。通过限制区的级配通常被称为“驼峰级配”，这种级配实际往往会导致混合料的软云，因为其中含有较多的砂。在施工中，驼峰级配也会导致混合料难以压实、抵抗永久变形的能力变差等。因此在设计集料的时候必须在控制点之间，而且要避让限制区。

表 3-4 集料级配的禁区边界

禁区内筛孔尺寸 (mm)	公称最大尺寸 (mm) 时禁区边界最小/最大通过率 (%)				
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5
4.750	34.7/34.7	39.5/39.5	—	—	—
2.360	23.3/27.3	26.8/30.8	34.6/34.6	37.6/37.6	47.2/47.2
1.180	15.5/21.5	18.1/24.1	22.3/30.0	25.6/31.6	31.6/37.6
0.600	11.7/15.7	13.6/17.6	16.7/20.7	19.1/21.1	23.5/27.5
0.300	10.0/10.0	11.4/11.4	13.7/13.7	15.5/15.5	18.7/18.7

表 3-5 集料级配的控制点

筛孔尺寸 (mm)	公称最大尺寸 (mm) 时控制点通过率				
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5
50.000	100				
37.500	90~100	100			
25.000	-90	90~100	100		
19.000		-90	90~100		
16.000			-90	100	
12.500				90~100	100
9.500				-90	90~100
4.750					-90
2.360	15~41	19~45	23~49	28~58	32~67
0.075	0(1)~6	1~7	2~8	2~10	2~10

根据表 3-4 和表 3-5，可以绘制出 12.5mm Superpave 混合料的控制点和限制区如图 3-5 所示。

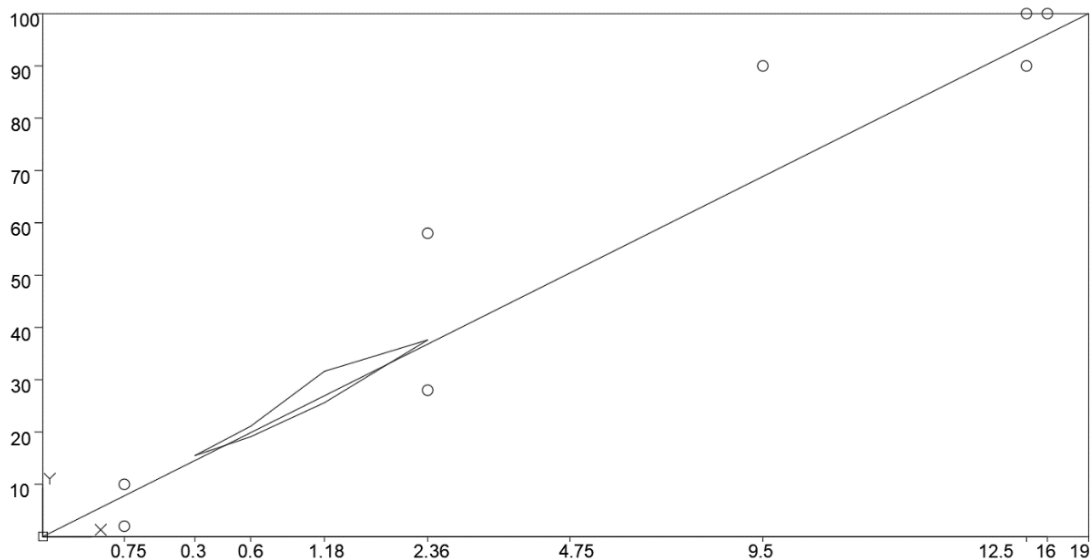


图 3-5 12.5mm Superpave 混合料的控制点和限制区

3.3 两种级配方法对比与方案选择

马歇尔方法的优点之一在于注重沥青混合料的空隙率和密度的特性分心，这种分析可以有效的保证混合料材料有合适的体积比例，从而获得较为耐久的 HMA。另一个优点就是所需要的设备相对价格要低，携带方便，利于远距离的质量控制。

但是，马歇尔方法采用的冲击压实不能模拟发生在实际沥青混凝土路面的压实度，此外，马歇尔级配试验设计法不能通过马歇尔稳定度来正确估算出 HMA 的抗剪强度。这两种方法使得马歇尔方法难以保证沥青混合料的抗车辙能力。

根据实验室已有设备和两种理论的综合对比，本文选择采用 superpave 级配方式来进行级配设计，由于实验室只有马歇尔级配试验的相关设备，故利用马歇尔试验设备进行性能测试。

3.4 导电机理

目前，解释导电高分子复合材料的导电机制的有粒子接触导电效应、隧道效应等。但没有一个较为完善的、普遍适用的导电机制来解释体系导电网络的形成及其导电行为。

其中，接触导电效应学说认为，当导电粒子相互搭接形成链状网络，可形成闭合的导电通路，在单位体积内导电粒子越多，粒子间接触比例越大，那么复合材料的导电率就越高；而隧道效应学说则认为，复合材料的导电现象不仅仅依靠粒子直接接触组成的导电通路，复合材料中还存在着由热振动引起的电子，其在导电粒子间空隙中迁移所产生的导电现象。

导电沥青混凝土包括粉墨导电相和纤维导电相。而导电主要通过粉墨导电相中的石墨和纤维导电相中的钢纤维来导电。导电沥青混凝土的导电机制可以用粒子接触效应来解释。设钢纤维的临界掺入含量为 P_c ，在低钢纤维掺量 ($P < P_c$) 时，导电粒子接触几率极小且导电粒子间隙大，体系主要靠石墨导电，难以形成有效的导电通路，近似呈绝缘性；在钢纤维掺量 P 接近 P_c 时，导电粒子接触几率增大，局部导电粒子之间的偶然接触起到电子迁移的作用，表现出绝缘-导电急剧转变；在高掺量 ($P > P_c$) 时，导电粒子接触几率大，钢纤维与石墨连成导电通路，导电性能得到增强。

3.5 本章小结

本章主要介绍了马歇尔试验设计法和 Superpave 设计法，并对两种方法的优缺点进行了简单比较，最终选择了利用 Superpave 设计法进行级配设计。同时，对导电沥青混凝土的导电机理进行了简单分析。

第 4 章 实验过程和相关记录

4.1 集料筛分

首先选择集料，发现实验室只能提供小石块，先进行收集和初步筛选，随后将集料洗净，除去杂质和浮尘，充分晾干后收集备用。

由于实验室只能提供 19mm 及以下口径的套筛，所以初步筛选时利用 19mm 的筛孔筛选了约两袋石料，先将一袋作为粗集料备用，另一袋送去材料科学与工程学院实验室进行破碎，制成细集料。

随后对粗细集料进行筛分试验，每种集料各进行三次筛分并计算平均值。集料 A 每次称量 1kg 进行筛分，集料 B 每次称量 2kg 进行筛分。首次筛分结果如表 4-1 和表 4-2 所示。

表 4-1 集料 A 首次筛分结果（1kg）

集料 A	第一组		第二组		第三组		三组平均		筛余率	通过率
筛孔直径 (mm)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	(%)	(%)
4.750	0.255	0.745	0.230	0.770	0.250	0.750	0.245	0.755	24.50%	75.50%
2.360	0.300	0.445	0.280	0.490	0.275	0.475	0.285	0.470	28.50%	47.00%
1.180	0.095	0.350	0.110	0.380	0.115	0.360	0.107	0.363	10.67%	36.33%
0.600	0.110	0.240	0.110	0.270	0.095	0.265	0.105	0.258	10.50%	25.83%
0.300	0.080	0.160	0.095	0.175	0.090	0.175	0.088	0.170	8.83%	17.00%
0.150	0.055	0.105	0.065	0.110	0.065	0.110	0.062	0.108	6.17%	10.83%

表 4-2 集料 B 首次筛分结果（2kg）

集料 B	第一组		第二组		第三组		三组平均		筛余率 (%)	通过率 (%)
筛孔直径 (mm)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)		
19	0.135	1.865	0.120	1.880	0.065	1.935	0.107	1.893	5.33%	94.67%
16	0.685	1.180	0.860	1.020	0.905	1.030	0.817	1.077	40.83%	53.83%
9	1.080	0.100	0.950	0.060	0.920	0.110	0.983	0.090	49.17%	4.50%
4.75	0.095	0.005	0.060	0.000	0.110	0.000	0.088	0.002	4.42%	0.08%

集料 A 的筛分结果显示集料 A 的组成没有较大问题，但是集料 B 的筛分结果显示 19mm 筛孔的通过率没能达到 100%，这和所要求的 19mm 最大尺寸要求不符，故立即重新对所有粗集料全部进行重新过筛，保证 19mm 通过率为 100%后，重新对集料 B 进行筛分试验。

重选后的集料 B 的筛分结果如表 4-3 所示。

表 4-3 重选后的集料 B 的筛分结果

集料 B	第一组		第二组		第三组		三组平均		筛余率 (%)	通过率 (%)
筛孔直径 (mm)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)	筛余 (kg)	通过 (kg)		
19	0.000	2.000	0.000	2.000	0.000	2.000	0.000	2.000	0.00%	100.0%
16	0.670	1.330	0.515	1.485	0.570	1.430	0.585	1.415	29.25%	70.75%
9	1.120	0.215	1.250	0.235	1.200	0.230	1.190	0.227	59.50%	11.33%
4.75	0.210	0.005	0.230	0.005	0.225	0.005	0.222	0.005	11.08%	0.25%

重选后的集料 B 在 19mm 的筛孔下的通过率为 100%，达到了实验要求制备 AC-12 沥青混合料的要求。

4.2 配合比设计计算

根据表 4-1 和表 4-3，以及第 3 章 Superpave 级配表 3-4 和表 3-5，绘制最大尺寸为 19mm 公称最大尺寸为 12.5mm 的沥青混合料级配拟合曲线如图 4-1（1）和图 4-1（2）所示。

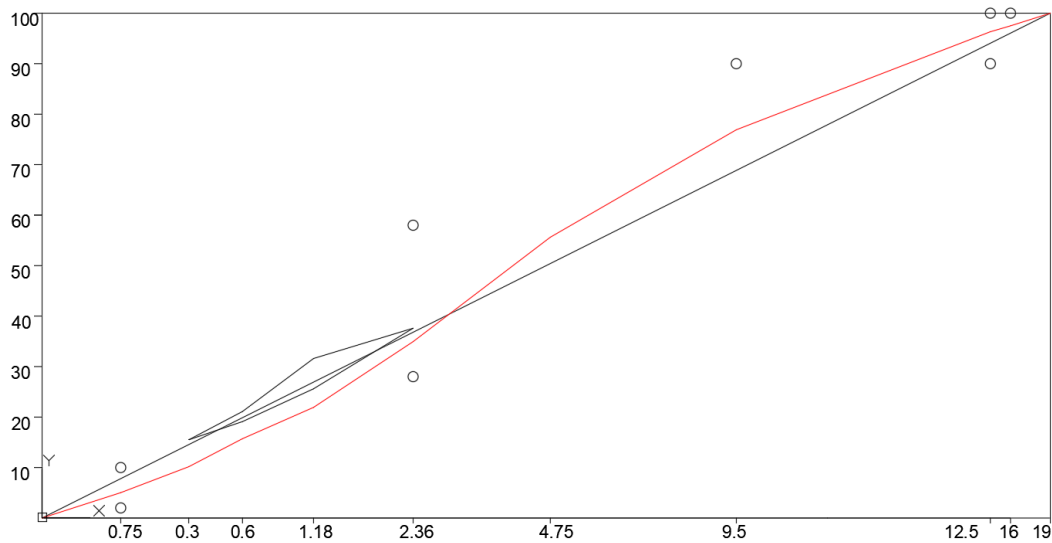


图 4-1（1） 沥青混合料级配拟合曲线方案 1

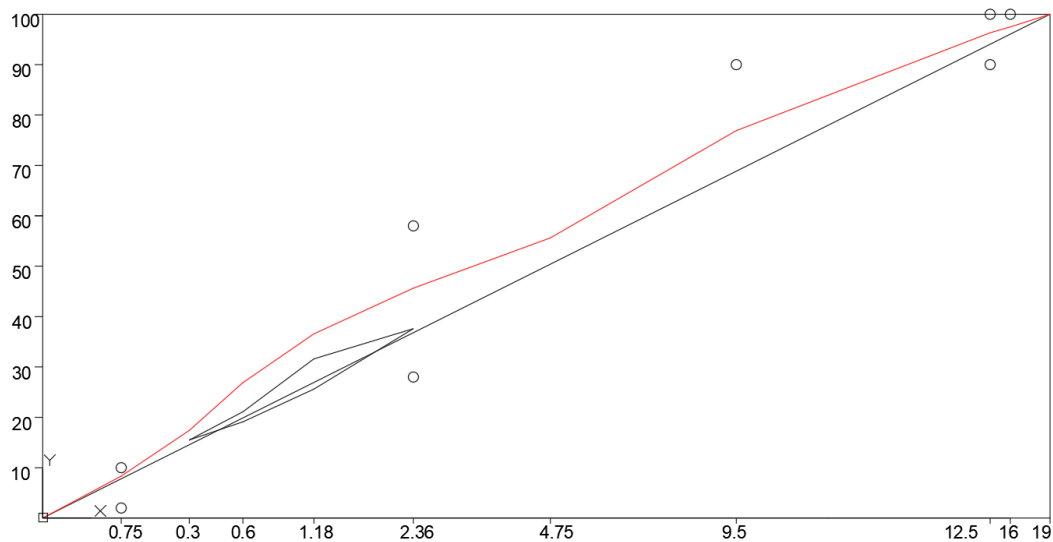


图 4-1（2） 沥青混合料级配拟合曲线方案 2

如图 4-2 所示，两种级配曲线方案区别在于如何绕过限制区，一种方案为保证 0.300mm~2.36mm 筛孔的通过率在限制区下方，另一种方案则选择在限制区的上方

通过。

根据表 4-1 和表 4-3，对集料 A、集料 B 进行配合比设计计算，以期分别达到图 4-1（1）和图 4-1（2）所示的拟合曲线程度。

由于手动计算配合比过于繁琐，反复修改配合比会浪费大量精力，故尝试编制软件或寻求现有软件进行辅助计算。经过搜寻，发现了软件“沥青级配自动计算软件（朱纯余 制）”，该软件能够快速有效进行沥青混合料配合比计算，故使用该软件作为配合比计算软件。

利用“沥青级配自动计算软件（朱纯余 制）试用版”软件，把集料 A 和集料 B 分别作为细集料和粗集料，将其数据输入到软件，将各筛孔尺寸所要求的边界条件输入软件内。由于软件并不能直接设置配合比设计的限制区（即禁区），故分成两次配合比设计计算，首先将限制区条件的下边界作为控制点输入到软件内，先使用自动计算功能得到初步配合比设计，随后尝试多次手动修改集料和矿粉比例，以便达到图 4-1（1）所示的沥青混合料配合比设计曲线，经过反复试验和测算，结果如图 4-2（1）所示。

随后将限制区的上边界的边界条件作为控制点输入到软件内，其他条件和集料数据不做改变，再次计算沥青混合料配合比。仍然采用先自动计算后多次手动小幅度修改的方法，获得较为平稳的沥青混合料配合比设计曲线，结果如图 4-2（2）所示。

操作: 490/490

沥青混合料级配自动计算(最优规划)

型号: AH-70生产

编号: 20170424

泰勒坐标	筛孔(%)	1# <input checked="" type="checkbox"/> 停	2# <input type="checkbox"/> 停	3# <input type="checkbox"/> 停	4# <input type="checkbox"/> 停	5# <input checked="" type="checkbox"/> 停	6# <input checked="" type="checkbox"/> 停	<input type="checkbox"/> 停	合成级配	设计级配范围	目标级配	合成比例
		30*30	19*19	16*16	11*11	6*6	3*3	7#矿粉		下限	上限	
5.969	53	100	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0
5.109	37.5	100	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0
4.723	31.5	100	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0
4.370	26.5	63	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0
3.762	19	4.2	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0
3.482	16	1	70.75	100	100	100	100	100	90.9	90	100	95.0
3.193	13.2	0	68	100	100	100	100	100	90.1	90	100	95.0
2.754	9.5	0	11.33	100	100	99.5	100	100	72.5	50	90	75.0
2.016	4.75	0	0.3	75.5	100	58	99.8	100	52.2	30	70	50.0
1.472	2.36	0	0	47	100	6.4	93.4	100	32.4	20	37.6	33.0
1.077	1.18	0	0	36.33	100	4.1	64	100	25.1	15	25.6	20.0
0.795	0.6	0	0	25.83	100	3.5	47.8	100	17.8	10	19.1	15.0
0.582	0.3	0	0	17	100	2.9	29.5	100	11.7	2	15.5	12.0
0.426	0.15	0	0	10.83	96	0	15.4	98.1	7.5	2	15.5	8.1
0.312	0.075	0	0	4	91	0	10.3	91.4	2.8	2	10	6.0
产地									油石比	5.5	沥青价格	
化验单号									矿料损耗%		沥青损耗%	
价格									备注			
矿料配合比(%)		停用	31	69	0	停用	停用	0	100			

选择自动计算项:



全选/全不选 超限系数: 1000

计算配方

振动筛孔范围	1# <input type="checkbox"/> 停	2# <input type="checkbox"/> 停	3# <input type="checkbox"/> 停	4# <input type="checkbox"/> 停	5# <input type="checkbox"/> 停	6# <input type="checkbox"/> 停	<input type="checkbox"/> 停	合计	合成级配方差值: 0.32
	19-30	16-19	11-19	6-11	3-6	0-3	7#矿粉		
筛孔所占比例(%)	0	8	19	20	18	32	3	100	查看矿料占筛孔比例详情

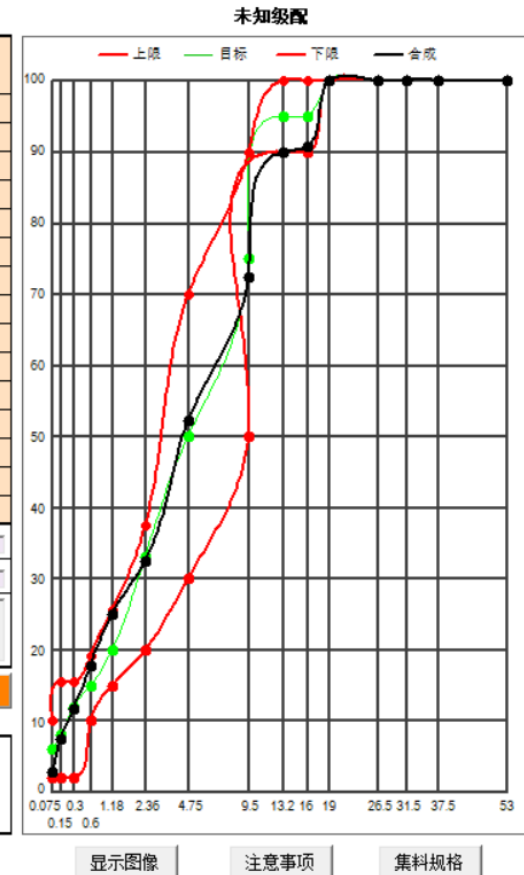
审核:

记录: 2/2

制表: 刘逸凡

2017年 04月 24日

图 4-2 (1) 配合比设计方案 1



操作: 384/384

沥青混合料级配自动计算(最优规划)

型号: AH-70生产

编号: 20170424

泰勒坐标	筛孔 (%)	1# <input checked="" type="checkbox"/> 停	2# <input type="checkbox"/> 停	3# <input type="checkbox"/> 停	4# <input checked="" type="checkbox"/> 停	5# <input checked="" type="checkbox"/> 停	6# <input checked="" type="checkbox"/> 停	<input type="checkbox"/> 停 7# 矿粉	合成级配	设计级配范围		目标 级配	合成偏 离比例
		30*30	19*19	16*16	11*11	6*6	3*3			下限	上限		
5.969	53	100	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0	
5.109	37.5	100	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0	
4.723	31.5	100	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0	
4.370	26.5	63	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0	
3.762	19	4.2	100	100	100	100	100	100	100.0	100	100	100.0	
3.482	16	1	70.75	100	100	100	100	100	94.7	90	100	95.0	-0.06
3.193	13.2	0	68	100	100	100	100	100	94.2	90	100	95.0	-0.16
2.754	9.5	0	11.33	100	100	99.5	100	100	84.0	50	90	75.0	0.60
2.016	4.75	0	0.3	75.5	100	58	75.5	100	63.2	30	70	50.0	0.66
1.472	2.36	0	0	47	100	6.4	47	100	41.2	37.6	58	45.0	-0.51
1.077	1.18	0	0	36.33	100	4.1	36.33	100	33.0	31.6	37.6	35.0	-0.59
0.795	0.6	0	0	25.83	100	3.5	25.83	100	24.9	21.1	31.6	25.0	-0.03
0.582	0.3	0	0	17	100	2.9	17	100	18.1	15.5	21.1	18.0	0.03
0.426	0.15	0	0	10.83	96	0	10.83	98.1	13.2	2	15	8.1	0.74
0.312	0.075	0	0	4	91	0	4	91.4	7.6	2	10	6.0	0.40
产 地									油 石 比	5.0	沥青价格		
化验单号									矿料损耗%		沥青损耗%		
价 格									100	备 注			
矿料配合比(%)		停用	18	77	停用	停用	停用	5					

选择自动计算项:



全选/全不选

超限系数: 0

计算配方

振动筛孔范围	1# <input checked="" type="checkbox"/> 停	2# <input type="checkbox"/> 停	3# <input type="checkbox"/> 停	4# <input type="checkbox"/> 停	5# <input type="checkbox"/> 停	6# <input type="checkbox"/> 停	<input type="checkbox"/> 停 7# 矿粉	合计	合成级配方差值: 0.23	
	19-30	16-19	11-19	6-11	3-6	0-3			查看矿料占筛孔比例详情	
筛孔所占比例(%)	停用	5	11	19	21	37	7	100		

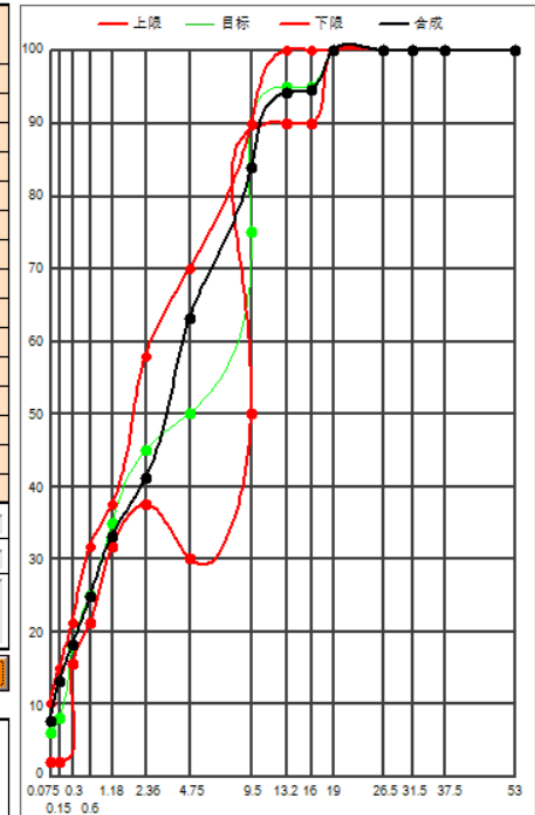
审 核:

记录: 2/ 2

制 表: 刘逸凡

2017年 04月 24日

未知级配



显示图像

注意事项

集料规格

图 4-2 (2) 配合比设计方案 2

由于是试用版软件，无法准确计算加入矿粉后的配合比，只能计算集料之间的配合比，所以只能在此配合比基础上加入矿粉并进行手动小幅度修改。

查阅文献后发现，应当尽可能保证级配曲线在限制区的下方通过，以便保持混合料的路用性能和力学性能，故选用图 4-1（1）和图 4-2（1）所示方案进行计算，手动计算的最终结果为

集料B: 集料A: 矿粉=32:63:5

形成的最终级配曲线图如图 4-3 所示

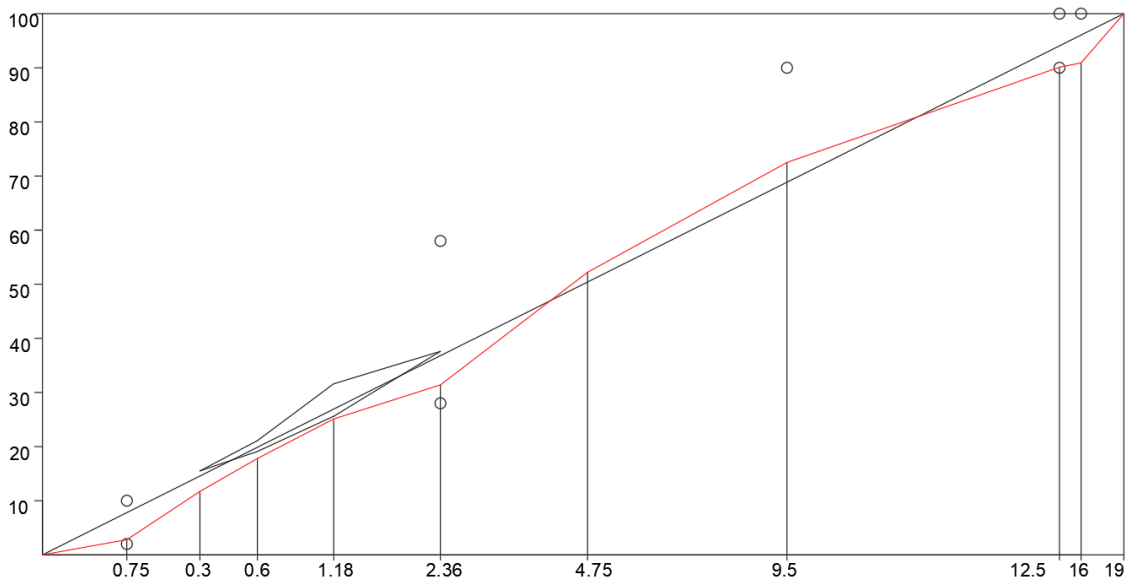


图 4-3 沥青混合料级配设计曲线

4.3 导电相材料掺入比例

由于本文研究的主要是基于石墨的自融雪导电沥青混凝土，故石墨占有所有导电相材料比重较大,查阅其他相关文献^[8-9]得知，钢纤维作为一种良好的导电材料其含量应在 2%左右，以便在沥青混凝土中形成导电通路。初步确定导电材料的掺入比例见表 4-4 所示。

表 4-4 各导电相材料掺入比例

材料	鳞片状石墨粉	钢纤维	碳纤维
体积比 (%)	10~25	2~4	0~2

4.4 实验操作

4.4.1 制作模具

为了能够制成沥青混凝土试块，需要制作模具来装载制备完成的沥青混合料。

首先考虑利用水泥板制作模具，尝试利用手锯和电锯来切割水泥板，发现手锯切割效果太差，电锯由于宽度限制无法对整片水泥板进行切割，遂放弃使用水泥板制作模具。

随后尝试采用木板进行制作，利用手锯对木板进行切割，成功切割出多片长约 250mm，高约 60mm 的木条，使用耐热红胶将木条粘结，成功制成两组 200mm×200mm×50mm 的木框，并切割两块较大的木板作为模具底座。底座和框架为分离式结构，方便倒入的沥青混合料成型后的取出和模具的清理

4.4.2 制备混凝土

（1）首次制备混凝土（典型失败案例）

根据配合比设计结果，称取粗集料 800g，细集料 1575g，鳞片状石墨粉 57.8g、矿渣粉 67g（石墨和矿粉占沥青体积的比例为 18%），沥青 150g，钢纤维 75g（3%），碳纤维 5g。

启动 SD-HJBIV 型数显混合料搅拌机（以下简称混合料搅拌机或搅拌机），倒入沥青，加热至 170℃ 后，发现沥青已经呈现粘稠状，于是加入粗细集料，保持 170℃，搅拌 90s，然后加入碳纤维、钢纤维矿粉和石墨粉并搅拌 90s。

拌和结束后将混合料倒出至铁锅内，发现部分沥青混合料粘结聚成一团，难以剥离，以至于无法倒入模具内进行成型过程，首次实验以失败告终。

随后对试验失败结果进行原因分析，认为主要原因在于沥青未能充分加热导致沥青并没有完全转化为液态所导致部分沥青处于半融状态，和混合料完全粘结在一起，未能成功制备沥青混凝土。170℃ 仅仅是拌和温度，沥青在此温度下难以完全转化为液态。

（2）制备混凝土具体方案

反复计算试验后，成功找到混凝土制备具体步骤。如无特殊说明，此方案为本文所有制成的导电沥青混凝土试块的制备方案。

仍采用首次实验所称量的数据进行称取集料、沥青和矿粉（其他材料根据不同试验组别其称取量各有不同），但制备过程进行了改进。

启动搅拌机，将搅拌机预热至 170℃ 并全程保持温度恒定。同时将沥青倒入平底锅，置于石棉网上，用电热炉加热；

将粗细集料加入搅拌机中，搅拌 90s；

然后将钢纤维和碳纤维加入搅拌机中，搅拌 90s；

再将完全加热为液态的沥青倒入搅拌机，再将矿粉倒入，搅拌 90s；与此同时，在模具底座和框架内部涂抹一层薄润滑脂。

最后，将石墨倒入搅拌机，搅拌 90s 后，升起搅拌器，将拌和完毕的沥青混合料倒出至铁锅，利用铁锅转移到模具中，此时混合料各组分之间粘结力很弱，整体较为松散，有很强的塑性，用工具将混合料表面抹平，并轻微施加压力以压实，等待试块冷却至室温以固结成形。

4.4.3 电阻测定

设计方案一：

在沥青混合料倒入模具之前，将导线预先放入模具两侧，在沥青混合料倒入的时候将导线埋入混合料两端的中心位置。

优点：接线较为方便，沥青混凝土成型后可以直接接上电源进行测试。

缺点：导线和沥青混凝土可能不能充分接触，导致产生较大的接触电阻；导线也可能会接到沥青表面，无法和导电相材料接触，导致无法形成闭合电路。

设计方案二：

在沥青混凝土成型前，将打磨后的铝片放置于试块两端，使其和试块紧密接触，试块成型后和试块一同取出。再将导线和铜片相接进行通电测试。

优点：接触面积增大，大大降低了导线无法和导电材料接触的几率。

缺点：埋入铝片时和试块取出时难度较大，有脱落的可能。同时，接触电阻的大小无法保证，可能会由于接触电阻过大而导致测得的电流过小。

设计方案三：

在沥青混凝土成型后，在两端均匀轻轻的刷上一层薄石墨粉，再将铝片紧密贴合在石墨层上，将导线接在铝片上，进行通电测试。

优点：解决了接触电阻的问题，避免接触不良导致的断路。

缺点：刷石墨粉的难度较大，应注意保证石墨分布均匀，石墨层不能过厚或太薄，铝片应设法与试块紧密贴合，不能有松动迹象。

经过综合比对，选择方案三作为测试方案，虽然操作繁琐，但可以尽最大可能避免接触电阻和接触不良等问题，尽可能排除干扰项。

实际操作过程如下：

沥青混合料倒入模具后，平整混合料，等待约 4~5 小时，待其冷却至室温后，将模具框架取下，在试块两端分别用软木刷均匀仔细涂抹一层鳞片状石墨粉，同

时，同时，用 1500 目砂纸对铝片表面进行打磨抛光，除去表面的氧化铝薄膜以便减小电极电阻值。将铝片紧密压合在涂抹石墨粉的试块端面，用导线吧铝片和 36V 稳压电源相接。在试块正中央用改锥小心钻孔，大约钻入 20mm，将电子温度计插入试块中央，读取温度计示数。启动稳压电源，将电压调至最大，读取电压和电流示数，读取温度计示数，并每隔 5 分钟读取一次电压、电流和温度，记录在表格内。

4.5 实验记录

4.5.1 未压实的沥青混凝土试块

首先先进行的是不压实的混凝土试块的导电性能测试，主要测试的是钢纤维含量变化对试块导电性能的影响，其中，最佳沥青用量选为（5.5%），实际称量时考虑到在转移和加热过程中会有损耗，故称取量比实际所需量多约 10%。各组试验所取用的材料用量见下表。

表 4-5 各组实验配料称取量（单位：g）

配比	石墨	矿粉	细集料	粗集料	沥青用量 (5.5%)	钢纤维	碳纤维
3%钢纤维	57.87	67.13	1575	800	180.6	75	0
3%钢纤维	57.87	67.13	1575	800	179.8	100	5
2%钢纤维	57.87	67.13	1575	800	182.1	50	0
2.5%钢纤维	57.87	67.13	1575	800	178.9	62.5	0
1%钢纤维	57.87	67.13	1575	800	180.1	25	0

表 4-6 3%钢纤维（未压实）实验数据

室温 21.2℃ 电压 31.2V

时间	温度（℃）	实测电流（A）	时间	温度（℃）	实测电流（A）
9:21	22.6	0.17	10:26	25.9	0.2
9:26	22.9	0.17	10:31	26.1	0.2
9:31	23.1	0.18	10:36	26.2	0.2
9:36	23.6	0.18	10:41	26.3	0.2
9:41	23.8	0.18	10:46	26.6	0.2
9:46	23.9	0.18	10:51	26.8	0.2
9:51	24.2	0.19	10:56	27.0	0.2
9:56	24.5	0.2	11:01	27.1	0.2
10:01	24.7	0.2	11:06	27.0	0.2
10:06	25.1	0.2	11:11	27.0	0.2
10:11	25.3	0.2	11:16	27.2	0.2
10:16	25.5	0.2	11:21	27.2	0.19
10:21	25.7	0.2	11:26	27.3	0.19

可以看出，添加了 3% 的钢纤维、10% 的石墨粉后，沥青试块的电阻率显著降低，在室温下可以达到 $36 \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻率降低了 10~11 个数量级。通电两小时后，试块温度上升了 4.7°C ，通电加热效果十分明显。

表 4-7 3% 钢纤维 2% 碳纤维（未压实）实验数据

室温 21.2°C 实测电压 31.2V					
时间	温度 ($^\circ\text{C}$)	实测电流 (A)	时间	温度 ($^\circ\text{C}$)	实测电流 (A)
8:36	22.8	0.20	9:26	25.8	0.18
8:41	23.1	0.22	9:31	26	0.18
8:46	23.5	0.22	9:36	26.1	0.18
8:51	23.7	0.22	9:41	26.3	0.18
8:56	24	0.22	9:46	26.5	0.18
9:01	24.4	0.19	9:51	26.6	0.19
9:06	24.7	0.19	9:56	26.7	0.19
9:11	25	0.18	10:01	26.9	0.19
9:16	25.3	0.18	10:06	27.2	0.19
9:21	25.6	0.18	10:11	27.3	0.19

在改变碳纤维含量后，发现其电阻率和发热效率变化并不明显，而且碳纤维本身成本较高，故选择不再加入碳纤维，而是改变钢纤维和石墨含量来研究电阻率变化。

表 4-8 2% 钢纤维（未压实）实验数据

室温 21.0°C 实测电压 31.2V					
时间	温度 ($^\circ\text{C}$)	实测电流 (A)	时间	温度 ($^\circ\text{C}$)	实测电流 (A)
9:07	22.1	0.04	9:32	22.3	0.04
9:12	22	0.04	9:37	22.2	0.04
9:17	22	0.06	9:42	22.1	0.04
9:22	22	0.06	9:47	22.1	0.04
9:27	22.2	0.04	9:52	22	0.04

表 4-9 1% 钢纤维（未压实）实验数据

室温 21.0°C 实测电压 31.2V		
时间	温度 ($^\circ\text{C}$)	实测电流 (A)
10:01	22.5	0.03
10:06	22.5	0.03
10:11	22.5	0.03
10:16	22.5	0.03
10:21	22.5	0.03

明显可以看出，在石墨含量不变而钢纤维含量下降至 2% 时，沥青混凝土试块（未压实）的电阻值明显上升，达到约 1040Ω ，电阻率上升至 $208 \Omega \cdot \text{m}$ ，导电能力明显下降，发热效率近乎为 0。3% 含量的钢纤维和 2% 含量的钢纤维在通电发热

效率上相差较大，而 2% 和 1% 含量的钢纤维试块电阻率和发热效率相差不大。

4.5.2 压实的导电沥青混凝土块

在此基础上，将钢纤维含量调整为 2%~3%，分别进行未压实和压实后的通电测试。压实过程采用轮碾法压实，将拌和好的试块放入轮碾设备中压实后，冷却至室温取出，再进行通电测试，其中，钢纤维含量为 2.5% 时，为能够保证电阻率较小的最低钢纤维含量，其通电测试结果如表 4-5-6 所示

表 4-10 2.5% 钢纤维实验数据

室温 20.8℃ 电压 31.2V

压实试块			未压实试块		
时间	温度 (°C)	实测电流 (A)	时间	温度 (°C)	实测电流 (A)
17:03	23.0	0.34	19:30	22.0	0.17
17:08	23.3	0.34	19:35	22.2	0.17
17:13	23.7	0.35	19:40	22.3	0.17
17:18	24.1	0.35	19:45	22.4	0.17
17:23	24.6	0.35	19:50	22.6	0.17
17:28	25.2	0.36	19:55	22.8	0.17
17:33	25.6	0.35	20:00	22.9	0.17
17:38	26.0	0.35	20:05	23.1	0.17
17:43	26.3	0.34	20:10	23.1	0.17
17:48	26.5	0.34	20:15	23.3	0.17
17:53	27.0	0.34	20:20	23.5	0.17
17:58	27.4	0.34	20:25	23.6	0.17
18:03	27.7	0.34	20:30	23.8	0.18
18:08	27.9	0.35	20:35	23.9	0.18
18:13	28.2	0.35	20:40	24.1	0.19
18:18	28.5	0.35	20:45	24.3	0.19
18:23	28.7	0.35	20:50	24.4	0.19
18:28	28.8	0.35	20:55	24.6	0.20
18:33	29.1	0.35	21:00	24.9	0.20
18:38	29.3	0.35	21:05	25.2	0.20
18:43	29.4	0.35	21:10	25.3	0.20
18:48	29.4	0.35	21:15	25.5	0.20
18:53	29.6	0.35	21:20	25.6	0.19
18:58	29.9	0.35	21:25	25.7	0.19
19:03	30.0	0.35	21:30	25.9	0.19
19:08	30.1	0.35	21:35	26.0	0.19
19:13	30.4	0.35	21:40	26.2	0.19
19:18	30.5	0.35	21:45	26.4	0.19

明显可以看出，在经过压实以后，电阻率有明显的下降趋势，电流增大了近 90%，电阻率可以达到约 $17 \Omega \cdot m$ ，两小时内温度上升了大约 7 摄氏度，同等时间

内温度上升幅度更大。

4.5.3 改变石墨含量后压实的试块

如果保持钢纤维（2.5%）和碳纤维含量（0%）不变，石墨含量由 10%增加至 20%，其导电效率能更进一步。试验结果如下表所示，试验操作中最大电流见图 4-4 所示

表 4-11 2.5%钢纤维 20%石墨（压实）实验数据

室温 22.0℃，电压 31.2V

时间	温度（℃）	实测电流（A）	时间	温度（℃）	实测电流（A）
15:23	23.0	0.39	16:28	28.1	0.41
15:28	23.4	0.39	16:33	28.6	0.40
15:33	23.7	0.39	16:38	29.0	0.41
15:38	24.1	0.39	16:43	29.5	0.40
15:43	24.6	0.39	16:48	29.8	0.40
15:48	25.1	0.39	16:53	30.1	0.39
15:53	25.5	0.39	16:58	30.6	0.39
15:58	25.8	0.40	17:03	31.1	0.40
16:03	26.2	0.39	17:08	31.5	0.40
16:08	26.6	0.40	17:13	31.7	0.39
16:13	27.0	0.40	17:18	31.9	0.39
16:18	27.3	0.40	17:23	32.3	0.39
16:23	27.7	0.41	17:28	32.5	0.39



图 4-4 本组试验实际所测最大电流

4.5.4 力学性能测试

沥青混凝土的马歇尔稳定度一般为 12~20KN。将 2.5%钢纤维、10%石墨和 2%碳纤维掺量的沥青混凝土混合料用马歇尔击实仪击实后，在马歇尔稳定度测试仪中进行测试，得该混凝土试块强度为 13.6KN，通过计算可知该混凝土强度约为 34MPa，证明其稳定度/流变值符合规范要求。并利用轮碾法进行了实验，同样可以满足规范要求。

4.6 发热效率换算^[10-11]

导电沥青混凝土的发热功率：

$$P = U^2 / R$$

其中：P——发热功率（单位为 W）；

U——电压（31.2V）；

R——电阻（ $R = 31.2 / 0.4 = 78\Omega$ ）。

实验试件的电阻率：

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{78 \times 0.2 \times 0.05}{0.2} = 3.9$$

其中：ρ——电阻率（单位为 $\Omega \cdot m$ ）；

S——横截面积；

L——长度。

代入数值计算得： $P = 31.2^2 / 78 = 12.48W$ 。

单位面积发热功率为： $12.48 / (0.2 \times 0.2) = 312W / m^2$ 。

雪的平均密度为 $200kg/m^3$ ，假设新降积雪厚度为 1cm，预估导电沥青混凝土与雪之间的传热效率为 1/4，则

$$Q = cm$$

其中：Q——雪融化时吸收的热量（单位为 J）；

c——雪的融化热（取 $c = 3.36 \times 10^5 J / kg$ ）；

m——积雪的质量（ $m = 200 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.01 = 0.08kg$ ）。

经计算得： $Q = 0.08 \times 3.36 \times 10^5 = 26880J$ 。

计算需要发热时间：

$$t = \frac{Q}{PK}$$

其中：P——导电沥青混凝土发热功率（ $P = 12.48W$ ）；

K ——传热效率 ($K = \frac{1}{4}$);

t ——发热时间 (单位为 h)。

经计算得:

$$t = \frac{26880}{12.48 \times 3600 / 4} = 2.39\text{h}$$

由计算可知, 120~140min 左右即可将雪完全融化 (未考虑积雪从 0℃ 以下升温至 0℃), 实验中 (在露天环境下, 室温 20℃) 测得导电沥青混凝土一小时升温 4~5℃, 考虑实际情况, 融雪效果可能会打折扣, 比如实际通电时沥青处于 0℃ 以下、雪花或积雪温度低于 0℃ 等。若在下大雪之前进行通电预热, 能够起到良好的融雪效果, 保持积雪厚度不大, 甚至可做到即下即化, 从而不影响交通并减少交通事故。

工程应用中采用可调压电源, 根据降雪的情况选择合适的电压, 融雪过程中还可间隙供电, 避免路面温度过高, 这样不仅可以保证融雪效果还可以节约能源。

4.7 本章小结

本章主要阐述和记录了实验的主要步骤和多组实验数据结果, 完成了导电沥青混凝土的制备, 并对其导电性能和力学性能进行了测试, 换算了理论上的发热效率。

然而, 在试验过程中也多次出现相同级配和制备步骤下, 导电率较低或直接断路的情况, 经过对试块的分析, 发现有以下几种原因。

一是在压实和成型过程中, 沥青内部出现裂缝, 导致导电材料在裂缝处无法相互接触, 致使电路在沥青内部断路; 二是在未压实或压实不够充分的情况下, 由于粗细集料间存有一定的空隙, 未能紧密压实, 在空隙处容易产生小裂缝或断路; 三是在试验操作过程中, 取出试块、插入温度计、搬运试块等过程可能对沥青混凝土试块产生振动或碰撞, 使其产生裂缝。

究其原因, 最主要的还是沥青混合料内部出现了病害导致导电相材料在试块内部某个部位无法相互接触, 从而导致电阻急剧增大甚至断路。

结 论

（1）基本结论

本文通过在沥青混凝土拌和料中加入钢纤维、石墨，制成了导电的沥青混合料，用于铺筑可以导电的自融雪路面，通过对混合料配合比、导电性能、力学性能的试验研究，得出基本结论如下：

（1）配合比方面，需要根据不同集料的筛分结果，利用 Superpave 设计法的 0.45 次方图、控制点和限制区，来进行配合比的设计，才能保证沥青混合料的级配能够同时做到导电和保证其力学性能。

（2）随着钢纤维含量的增加，试块的电阻率也逐渐下降，反之，当钢纤维的含量低至一定时，石墨作为一种良好的导电材料，仍然能保证沥青混凝土内能够形成足够的闭合电路，但是其电阻率会上升大约一个数量级。在钢纤维和碳纤维保持一定含量时，石墨的体积比例的增加，会大幅度提高沥青混凝土的导电性能，甚至可以将电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）降低至个位数。

（3）力学性能方面，制备的导电沥青混凝土试块的马歇尔击实试验和马歇尔稳定度试验结果符合规范要求，车辙试验结果同样符合规范设计要求，甚至在钢纤维的掺和后比普通沥青混凝土的力学性能略有提升，能够保证其在实际使用时的路用性能。

（4）导电性能方面，根据实验所测数据，不难发现，钢纤维和石墨，是制备导电沥青混凝土所必要的导电相材料。随着钢纤维含量的增加，试块的电阻率也逐渐下降，反之，当钢纤维的含量低至一定时，石墨作为一种良好的导电材料，仍然能保证沥青混凝土内能够形成足够的闭合电路，但是其电阻率会上升大约一个数量级。在钢纤维和碳纤维保持一定含量时，石墨的体积比例的增加，会大幅度提高沥青混凝土的导电性能，甚至可以将电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）降低至个位数。钢虽然是一种导体，但是其电阻率仍然偏高，由此可见，钢纤维的主要作用便是在混合料内部形成一条条“道路”，以便让石墨粉粘结、附着在“道路上”，让石墨粉能形成一条条“导线”穿梭在沥青混凝土内部，从而使得沥青混凝土能够达到导电的效果。

（2）未来展望

未来的研究方向应当注重制备步骤的改良，因为制备步骤也有可能对沥青混合料最后的导电性能造成影响，此外，还包括尝试采用其他高分子导电材料作为导电相材料，各导电相材料的最佳掺入量（同时低制备成本和高导电效率），以

及尽可能避免沥青产生裂缝而导致无法通电加热等诸多问题。

如果能将导电沥青混凝土的成本控制在较低水平，那么在我国北方大部分地区的桥梁、匝道、高速公路、国道省道以及车流量密集的重点路段均可铺设导电沥青混凝土路面，在降雪时启动，可以做到即下即化、即落即化的效果，从而减少人工和机械除雪的工作量，也能大大提高道路的通行效率，减少事故的发生率。

此外在实际工程操作中，可以采用太阳能或风能供电的形式，白天或大风天气可以为电源充电，在低温降雪降水过程中可以利用储备的电能进行融雪化冰。但是应注意道路的排水系统，避免融化的积雪形成积水成冰，造成更大的危害。

参考文献

- [1] 张洪伟.抗冻结沥青混凝土路面国内外研究现状与进展
- [2] 曹卫东,等.废旧轮胎橡胶混合法改性沥青混合料的研究[J].建筑材料学报, 2007,10 (1): 110-114.
- [3] 张金喜.废橡胶作为弹性沥青混凝土路面材料的实验研究[J].建筑材料学报, 2004, 7 (4): 396-401.
- [4] 张洪伟.橡胶颗粒除冰雪沥青混凝土路面的研究[D].长安大学.2009
- [5] 高寒地区隧道路面发热电缆融雪化冰试验研究_赵四龙
- [6] 孙明清,李红,张谢东,等. 铺设碳纤维-玻璃纤维格栅的沥青混凝土路面融雪试验研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014 年 2 月(第 38 卷 第 1 期): 130-133
- [7] 融化冰雪的“神器”. 交通运输部公路科学研究院, 融冰化雪导电沥青混凝土桥面铺装技术研究, 三等奖.
- [8] 磨炼同.导电沥青混凝土的制备与研究.武汉理工大学, 2004 年 5 月
- [9] 陈忠良.导电沥青混凝土的导电机理及路用性能研究.南昌大学, 2013 年 6 月.
- [10] 涂瓛,陈辉, 吴少鹏,王虹, 磨炼同.导电沥青混凝土融雪化冰热输出功率计算方法.武汉理工大学学报, 2009 年第 31 卷第 13 期, P37~P40
- [11] Wu S P, Mo L T, Shui Z H. An Improvement of Electrical Properties of Asphalt Concrete[J]. J of Wuhan Univ of Tech:Mater Sci Ed,2002,17(4):69-72.

致 谢

衷心感谢导师马新伟老师对本人的精心指导，在我的实验和论文撰写过程中不断为我答疑解惑、进行指导。由于是第一次使用大量沥青混凝土实验设备，很多实验仪器我和老师并不会使用，马新伟老师便主动帮忙查阅相关说明，帮助我学习和操作使用试验设备。在试验的相关理论研究阶段，老师提出的观点和经验总结，对于我的实验研究有很大的启发和帮助。在论文撰写过程中，因为我是第一次撰写此类论文，在很多地方不知道该如何阐述或总结，反复向老师请教，马老师也耐心的帮我审阅论文，指出了多处撰写不够妥当之处，在老师的指导和帮助下，我才能成功完成本次毕业论文的实验操作和论文撰写。

同时，还要感谢同样和我在实验室进行试验的惠一特等同学，在试验的理论研究和实际操作中，他们都给予了我最大程度的帮助和支持，尤其是惠一特同学，多次和我讨论相关的理论研究，并在试验操作中多次和我协同作战，帮助我完成了各项试验。

感谢马新伟老师，感谢实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！