

附件 2

《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》

编制说明

2026 年 5 月

目 次

一、工作概况	1
(一) 任务来源	1
(二) 起草单位	1
(三) 主要起草人及分工	1
二、制定(修订)标准的必要性和意义.....	2
三、主要起草过程	4
(一) 成立起草组、确定分工	4
(二) 收集资料	4
(三) 编制标准草案.....	6
(四) 调研及征求意见.....	7
四、编制原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系	8
(一) 编制原则	8
(二) 编制依据	8
(三) 与现行法律法规、标准的关系	9
五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述.....	10
(一) 主要条款说明.....	10
(二) 主要技术指标、参数、试验验证的论述.....	14
六、重大意见分歧的处理依据和结果	49

七、实施标准的措施及建议	50
八、知识产权说明	50
九、其他应说明的事项.....	50

《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》

地方标准编制说明

一、工作概况

（一）任务来源

2025年6月17日，按照《自治区市场监管厅关于下达生态环境领域地方标准制（修）订计划的通知》，批准由宁夏交通投资集团有限公司申请地方标准《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》地方标准的制订，结合实体工程需求的实际情况，编制《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》地方标准，标准由宁夏回族自治区交通运输厅提出并归口。

（二）起草单位

该地方标准主要承担单位：宁夏交通投资集团有限公司

协作单位：宁夏交投高速公路管理有限公司

宁夏交通建设股份有限公司

宁夏交建交通科技研究院有限公司

（三）主要起草人及分工

1.3.1 起草人

张鑫、韩方元、杨昊、陈维斌、何涛、段学锋、杨宗林、马波、顾鹏、徐腾飞、边泽英、杨菊芳、王杰、崔俱、崔宇、杜琨、马铁飞、马军、刘琰君、袁成志、周亮、李静远、李强、王昱鑫、孙晓骋

1.3.2 分工

张鑫负责标准的总体组织、策划、协调、编制等工作。

韩方元、杨昊、何涛、段学锋、杨宗林：前言、范围、规范性引用文件和术语及定义部分的编写以及对本文件的整体文本把控；

马波、陈维斌、马军、徐腾飞、杨菊芳、马铁飞、孙晓骋：负责原材料及配合比设计等章节的编制工作；

陈维斌、顾鹏、边泽英、王杰、崔俱、崔宇、杜琨：负责施工章节的编制工作；

马军、刘琰君、袁成志、周亮、李静远、李强、王昱鑫：负责质量检验、验收与评定章节的编制工作；

陈维斌、徐腾飞：负责对文稿进行修改整理工作。

以上人员均参与标准内容的编写，负责协调、组织、研讨、撰写、征求意见、修订、送审等工作。

二、制定(修订)标准的必要性和意义

近年来，随着宁夏地区社会经济和工业化的高速发展，交通运输行业和基础设施的发展也得到了空前的发展，现有公路总里程超过3.8万公里，路网密度已超过全国平均水平。目前，我国公路逐步由建设期转入养护期，公路的预防性养护需求逐年上升；因此，如何实现公路预防养护工作绿色低碳转型成为行业亟待解决的问题。

各级政府先后颁布了《交通强国建设纲要》、《绿色交通“十四五”发展规划》、《“十四五”公路养护管理发展纲要》《新时代的中国绿色发展》、《宁夏碳达峰碳中和科技支撑行动方案》、《新征程全面加强生

态环境保护推进美丽宁夏建设科技支撑方案》、等政策文件，全面推进经济社会发展绿色低碳转型，推动传统建筑材料向绿色化高值化转变，注重科技创新与公路交通发展深度融合，全面提高公路养护管理效能。这些政策的导向，为道路预防性养护技术的创新升级注入了强劲动力；其中，冷拌冷铺超薄磨耗层技术以路面功能性提升为目标，具有节能减排、无燃烧无烟尘、施工温度低等显著优势，有效降低工程造价成本，提高路面使用性能，延长路面使用寿命，有助于推动我区公路养护工程的高质量发展，对推动环境保护和可持续发展战略的实施具有深远意义。

然而，传统的道路预防性养护普遍采用热拌沥青混合料（超薄罩面、薄层罩面等）和普通冷拌型（微表处、稀浆封层等），热拌沥青混合料是在生产过程中需要消耗大量能源、排放大量温室气体与PM2.5，对生态环境造成不可逆的伤害；而现有普通冷拌技术存在强度低、耐久性差、抗滑性能衰减过快等问题；且国内缺乏冷拌冷铺超薄磨耗层技术的相关标准、无法对冷拌冷铺超薄磨耗层技术的推广应用提供科学指导；因此，亟需开展低能耗、少污染、成本低、资源节约的冷拌冷铺超薄磨耗层技术，从而推动冷拌冷铺超薄磨耗层技术在宁夏地区的标准化、规模化应用。

本标准在充分考虑国内外已有工程经验前提下，旨在深入总结一套适应于宁夏地区道路工程的冷拌冷铺超薄磨耗层技术规范，全面涵盖原材料要求、混合料设计、施工准备、工艺流程、施工安全与

质量控制、验收与评定等多方面的关键技术体系，为预防性养护工程的推广应用提供坚实支撑，助力宁夏地区公路预防性养护向绿色低碳环保方向转型，促进交通基础设施可持续发展。

本地方标准的制定，积极响应国家和地方政策引导，契合时代发展需求，有助于推动冷铺冷拌超薄磨耗层技术在宁夏的标准化和绿色化发展，促进全区公路预防性养护工程的高质量建设，助力道路养护体系的创新升级，进一步推动宁夏交通基础设施向“绿色低碳、节能环保”的方向迈进。

三、主要起草过程

（一）成立起草组、确定分工

地方标准项目任务下达后，宁夏交通投资集团有限公司联合宁夏交投高速公路管理有限公司、宁夏交通建设股份有限公司、宁夏交建交通科技研究院有限公司成立标准编制组。

宁夏交通投资集团有限公司和宁夏交投高速公路管理有限公司负责标准的总体组织、策划、协调、编制等工作。

宁夏交通建设股份有限公司和宁夏交建交通科技研究院有限公司负责本标准技术指标、参数实体工程验证管理工作，确保各项数据的准确性和实用性。

（二）收集资料

本标准编制过程中，不断收集相关法律法规、政策文件、标准等相关资料。

1. 法律法规

- (1) 《中华人民共和国标准化法》
- (2) 《中华人民共和国标准化法实施条例》
- (3) 《标准出版发行管理办法》
- (4) 《地方标准管理办法》
- (5) 《宁夏回族自治区地方标准管理办法》

2. 政策文件

- (1) 中共中央、国务院《国家标准化发展纲要》
- (2) 中共中央、国务院《国家创新驱动发展战略纲要》
- (3) 中共中央、国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》
- (5) 中共中央、国务院《2030 前碳达峰行动方案》
- (6) 中共中央、国务院《“十四五”循环经济发展规划》
- (7) 中共中央、国务院《交通强国建设纲要》
- (8) 中共中央办公厅、国务院办公厅《“十四五”文化发展规划》
- (9) 《宁夏回族自治区推动高质量发展案标准体系建设方案（2021 年—2025 年）》

3. 标准规范

- | | |
|------------------|--------------------------------|
| (1) GB/T1.1-2020 | 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》 |
| (2) GB/T 3100 | 《国际单位制及其应用》 |
| (3) GB/T 20000 | 《标准化工作指南》 |

- | | |
|--------------------|------------------|
| (4) GB/T 20001 | 《标准编写规则》 |
| (5) GB/T 20002 | 《标准中特定内容的起草》 |
| (6) GB/T 20003 | 《标准制定的特殊程序》 |
| (7) GB/T 25824 | 《道路用钢渣》 |
| (8) JTG F40 | 《公路沥青路面施工技术规范》 |
| (9) JTG 5421 | 《公路沥青路面养护设计规范》 |
| (10) GB 3838 | 《地表水环境质量标准》 |
| (11) GB 6566 | 《建筑材料放射性核素限量》 |
| (12) GB 8978 | 《污水综合排放标准》 |
| (13) GB/T 14848 | 《地下水质量标准》 |
| (14) GB/T 24175 | 《钢渣稳定性试验方法》 |
| (15) JTG 3432 | 《公路工程集料试验规程》 |
| (16) JTG 5142 | 《公路沥青路面养护技术规范》 |
| (17) JTG 5220 | 《公路养护工程质量检验评定标准》 |
| (18) JTG H30 | 《公路养护安全作业规程》 |
| (19) JTG/T 5142-01 | 《公路沥青路面预防养护技术规范》 |
| (20) YB/T 4328 | 《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》 |

(三) 编制标准草案

2025年11月，标准编制组对所收集的资料进行梳理、分析，形成工作组讨论稿。

2026年2月，召开标准讨论会，《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》修改后形成标准草案，同步完成编制说明初稿的编写。

(四) 调研及征求意见

2022 年围绕宁夏地区公路预防性养护需求，系统开展了路面病害类型及服役状况调研，通过现场踏勘与历史养护资料分析，重点梳理了重载交通和典型气候条件下路面表面功能衰减快、耐久性不足等突出问题，明确了常规微表处等技术在宁夏地区适应性和使用寿命方面存在的局限性，为冷拌冷铺超薄磨耗层技术研究明确了工程需求背景。

2023 年，系统梳理了冷拌冷铺超薄磨耗层在不同道路等级和病害类型下的适用性及应用场景，明确提出了对材料高黏附性、高弹性和耐久性的关键技术需求，形成了适用于冷拌冷铺超薄磨耗层的高性能乳化沥青材料技术方案。

2024 年，开展了冷拌冷铺沥青混合料设计方法研究，通过高粘高弹乳化沥青与集料黏附特性试验，分析了混合料配合比设计与路用性能、表面功能需求之间的关系，明确了层间粘结与耐久性控制的关键技术指标。

2025 年，依托实际工程项目，开展了冷拌冷铺超薄磨耗层的工程应用示范与跟踪观测，系统总结形成了施工工艺、质量控制与评价方法，并通过与传统预防性养护技术对比分析，验证了该技术在耐久性和适用性方面的工程应用价值，逐步构建了冷拌冷铺超薄磨耗层的道路化应用技术体系。

目前已完成《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》(征求意见稿)和编制说明，可在自治区市场监督管理厅网站上进行公开，并广泛征

求意见，后续将根据收集到的修改意见对标准文本进一步修改，并形成《冷拌冷铺超薄磨耗层应用技术规范》（送审稿）和编制说明，并报行业主管部门审核，保证该标准的科学性和适用性。

四、编制原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

（一）编制原则

本标准依据现行相关规范、规程、技术标准、指南等文件参考编制。遵循中华人民共和国国家标准 GB/T 1.1-2020 标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则的原则，重点突出了该标准适用范围、原材料技术指标、混合料设计、施工工艺、施工安全与质量控制、验收与评定标准。

（二）编制依据

本标准依据 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求进行编制。并参考依据了如下标准规范：

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 24175 钢渣稳定性试验方法

JTG 3432 公路工程集料试验规程

JTG 5142 公路沥青路面养护技术规范

JTG 5220 公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程

JTG 5421 公路沥青路面养护设计规范

JTG D50 公路沥青路面设计规范

JTG E20 公路工程沥青及沥青混合料试验规程

JTG F40 公路沥青路面施工技术规范

JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程

（三）与现行法律法规、标准的关系

本标准的制定严格按照《标准出版发行管理办法》《中华人民共和国标准化法》等相关法律法规要求实施；并系统参考了《公路沥青路面养护技术规范》、《公路沥青路面设计规范》、《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》、《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》、《公路沥青路面施工技术规范》等多项国家及行业标准。

调研发现,国内已发布冷铺薄磨耗层技术相关团体标准仅 1 项。

中关村中科公路养护产业技术创新联盟于 2023 年 8 月 8 日发布了 T/GLYH 005—2023《冷拌冷铺超薄磨耗层技术规程》，该规程规定了冷拌冷铺超薄磨耗层的具体类型，对制备冷拌冷铺超薄磨耗层的原材料及其质量要求进行要求，并对材料的组成设计、制备工艺及性能、施工工艺、质量验收等多方面进行了说明。

结合上述标准来看，目前发布的标准数量较少，主要以发布的团体标准为主，各团体标准对冷拌冷铺超薄磨耗层的指标体系不一致，施工工艺的标准化、质量控制的精细化以及评价体系不完善；因此，冷拌冷铺超薄磨耗层在施工标准化、质量控制及评价等方面仍需不断改进与创新。

本地方标准的先进之处在于：充分考虑宁夏地区气候环境、交通特征等因素，结合宁夏道路预防性养护的需求，在高性能改性乳化沥青的研发、原材料质量评价体系、冷拌冷铺超薄磨耗层级配设计、施

工工艺及质量控制与验收等多方面进行创新，提出一套完整的覆盖原材料指标要求、混合料配合比设计、施工准备、施工工艺流程、质量控制与验收等内容的冷拌冷铺超薄磨耗层技术体系，为冷铺冷拌技术在预防性养护工程中的推广应用提供技术支撑。

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

（一）主要条款说明

本标准主要包括 8 个章节的内容，分别为范围、规范性引用文件、术语和定义、符号及代号、材料、冷拌冷铺超薄磨耗层混合料设计、冷拌冷铺超薄磨耗层施工、施工质量控制、验收与评定。

第 1 章规定了本文件的主要构成要素及适用范围。

第 2 章明确了本文件引用的相关规范。

第 3 章规定了冷拌冷铺超薄磨耗层、冷拌冷铺超薄磨耗层混合料、高粘高弹改性乳化沥青、钢渣集料、碎石集料、冷拌冷铺超薄磨耗层级配等术语及其定义，并规定了冷拌冷铺超薄磨耗层的代号。

其中，第 4 章规定了冷拌冷铺超薄磨耗层用原材料的技术要求，包括高黏高弹改性乳化沥青、粗集料、细集料、填料、水、纤维、添加剂等。其中需要对条款 4.2 及 4.3.2 作特别说明。

（1）4.2：高黏高弹改性乳化沥青是冷拌冷铺超薄磨耗层的核心结合料，其性能直接决定混合料的高温稳定性、低温抗裂性能以及层间粘结能力。因此，规定了其蒸发残留物软化点、动力黏度及弹性恢复率等关键性能指标，较高的软化点和动力黏度能够显著提高沥青

材料在高温条件下的抗剪切变形能力，使混合料在高温及重载交通作用下仍能保持良好的结构稳定性，从而有效抵抗车辙、推移及剪切破坏等路面病害；弹性恢复率反映材料在荷载作用后的弹性恢复能力，高弹性恢复性能能够减少重复荷载作用下的永久变形，提高路面的抗疲劳性能；同时，高黏高弹改性乳化沥青蒸发残留物在低温条件下具有良好的延展性，5℃延度可达到 30cm 以上，具有较好的低温柔韧性，能够有效缓解温度收缩应力，减少低温裂缝的产生，从而提高路面的耐久性能。

(2) 4.3.2 规定冷拌冷铺超薄磨耗层粗集料可采用钢渣集料，并对压碎值、洛杉矶磨耗损失、坚固性及针片状颗粒含量等指标进行了控制。钢渣集料具有强度高、棱角性好、表面粗糙及耐磨性能优良等特点，有利于形成稳定的粗集料骨架结构并提高混合料的抗滑性能。试验研究表明，钢渣集料压碎值约为 15.7%，洛杉矶磨耗损失约为 18.3%，坚固性约为 2.6%，整体性能优于普通碎石集料，表明其具有较好的抗压碎能力和耐磨性能。将钢渣集料应用于冷拌冷铺超薄磨耗层中，可有效增强混合料骨架结构稳定性，提高路面的抗剪切能力和耐磨性能，从而提升超薄磨耗层的整体耐久性。同时，考虑到钢渣材料可能存在一定的体积膨胀风险，对钢渣稳定性提出了相应要求，规定钢渣中游离氧化钙含量应满足相关标准规定，并应进行稳定性试验检测，以确保其在工程应用中的体积稳定性。

第 5 章规定了冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的级配要求、混合料

的技术要求及配合比设计方法。其中需要对条款 5.2.1、5.2.2 和 5.3 作特别说明。

(1) 5.2.1 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料采用高沥青膜厚度与主骨料空隙互补的级配设计方法，在界面处形成显著的机械嵌锁和化学黏附效应，显著增强了整体结构的协调性与力学耦合性能，有效提升了冷拌冷铺超薄磨耗层的粘结强度、结构稳定性和长期耐久性；根据超薄磨耗层厚度及施工工艺特点，对 CMCP- I 和 CMCP- II 两种类型混合料的级配范围进行了规定，以保证混合料在满足施工性能的同时具有良好的抗滑性能、抗车辙性能及结构稳定性。

(2) 5.2.2 在级配设计过程中，由于钢渣集料的毛体积相对密度约为 3.1 ~ 3.5，而碎石集料毛体积相对密度约为 2.55 ~ 2.8，两种集料密度差异较大。如果直接采用质量通过率控制级配，则会放大单档集料波动对整体级配结构的影响。因此，提出了在级配设计阶段采用体积通过率进行控制，以保证不同集料组合情况下混合料颗粒结构的一致性。在完成级配设计后，再根据各集料毛体积密度将体积配比转换为质量配比，以便于试验和施工生产中的称量与控制，有效降低材料密度差异对级配稳定性的影响，提高级配设计的合理性和工程可操作性。

(3) 5.3: 为保证冷拌冷铺超薄磨耗层的使用性能，对混合料的力学性能及耐久性能提出了明确要求，包括湿轮磨耗试验、负荷车轮黏附砂量试验及冻融劈裂试验等指标。湿轮磨耗试验主要用于评价

混合料在水作用条件下的抗飞散能力；负荷车轮黏附砂量试验用于评价混合料表面稳定性；冻融劈裂试验则用于评价混合料的抗水损害能力及耐久性能。通过对上述指标进行控制，可确保冷拌冷铺超薄磨耗层在交通荷载及环境因素共同作用下仍具有良好的结构稳定性和耐久性能。

第 6 章规定了冷拌冷铺超薄磨耗层的施工工艺，包括对原路面的要求、施工准备、试验段铺筑及施工工艺。其中需要对条款 6.2.2 和 6.5.8 作特别说明。

6.2.2 施工前应对原路面进行全面检查，确保原路面结构稳定，不存在严重松散、坑槽、沉陷或结构性裂缝等病害。对于存在明显结构损坏的路段，应先进行必要的病害处治后方可进行超薄磨耗层施工。同时，原路面表面应保持清洁、干燥，必要时应进行机械清扫或高压空气吹扫处理，以保证新旧路面之间形成良好的粘结界面，从而提高层间结合强度。

6.5.8 冷拌冷铺超薄磨耗层施工完成后，应在乳化沥青充分破乳、水分基本蒸发并形成稳定结构后方可开放交通，开放交通时间应根据环境温度、空气湿度及材料破乳情况综合确定。一般情况下，在气温较高且通风条件良好的环境下，混合料能够较快形成初始强度，可在较短时间内开放交通；在气温较低或湿度较大的条件下，应适当延长养护时间，以避免在结构尚未稳定时开放交通，从而造成表面松散或集料脱落等问题。通过合理控制开放交通条件，可确保超薄磨耗层

在早期阶段形成稳定结构，保证路面的使用性能及耐久性。

第 7 章规定了冷拌冷铺超薄磨耗层的施工质量管理要求。

第 8 章规定了冷拌冷铺超薄磨耗层的验收与评定。

(二) 主要技术指标、参数、试验验证的论述

本技术规范编制过程中，重点对冷拌冷铺超薄磨耗层混合料原材料、冷拌冷铺超薄磨耗层混合料配合比设计进行了试验验证。

1、高黏高弹改性乳化沥青

(1) 制备工艺

对高粘高弹改性沥青的配方进行研究，高黏高弹改性乳化沥青是以 SBS 改性剂、90#基质沥青、硫磺为原材料，制备 SBS 高掺量的改性沥青，然后采用慢裂快凝型阳离子乳化剂将改性沥青进行乳化制备高黏高弹改性乳化沥青，试验过程如图 1 所示：



(a) 高粘高弹改性乳化沥青制备



(b) 高粘高弹改性乳化沥青



(c) 红外光谱检测



(d) 动力黏度测试

图 1 高粘高弹乳化沥青试验检测过程

(2) 油水比的确定

冷拌冷铺超薄磨耗层用改性乳化沥青要求蒸发残留物含量不能低于 60%。蒸发残留物含量是指乳化沥青加热蒸发完水分后残留沥青占原乳化沥青的质量百分数，反映乳化沥青中有效沥青的含量，蒸发残留物含量过低导致乳化沥青粘度过低，影响冷拌冷铺超薄磨耗层混合料成型以及性能。蒸发残留物含量的大小，直接与油水比相关。因此，本研究乳化剂掺量取 1.8%，油水比分别取 55:45、60:40、65:35，乳化时间取 20min 制备不同的乳化沥青。分别测试三种油水比下未改性乳化沥青的蒸发残留物含量，在其他条件不变的情况下考察不同油水比对蒸发残留物含量的影响。

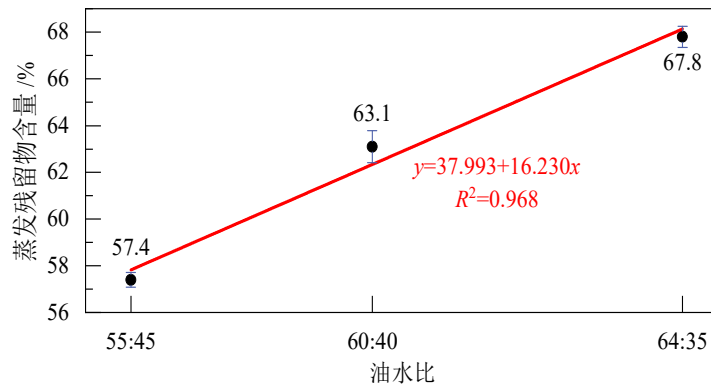


图 2 不同油水比对蒸发残留物含量的影响

随着油水比的增大，基质乳化沥青的蒸发残留物含量几乎呈线性增长，当油水比为 60:40 时，蒸发残留物含量满足微表处用乳化沥青要求，当油水比为 65:35 时，蒸发残留物含量达到 67.8%，但此时存在乳化不充分的现象，乳化沥青中存在不少游离沥青，对乳化沥青的质量造成了一定影响。最终把油水比定在 60:40。

(3) 60℃动力黏度

动力黏度是评价沥青材料高温流动性能的重要指标，用于反映沥青在高温条件下抵抗流动变形的能力。本研究通过对蒸发残留物60℃动力黏度不小于60000Pa.s，在高温环境和车辆荷载共同作用下，沥青材料容易发生剪切变形。如果沥青黏度较低，则材料容易产生流动，从而导致混合料发生车辙或推移破坏。通过提高动力黏度，可以显著增强沥青材料抵抗剪切变形的能力。对于超薄磨耗层而言，由于结构厚度较薄，材料整体抗变形能力较弱，因此需要依赖高黏度沥青提供较强的结构粘结能力。通过控制动力黏度指标，可以保证沥青材料在高温条件下仍具有较高的抗剪切能力，从而提高路面抗车辙性能。此外，高黏高弹改性沥青中通常加入高比例SBS改性剂及增粘树脂，这些材料能够显著提高沥青黏度并形成稳定结构，从而使材料具有较高的高温稳定性。

(4) 软化点

软化点是评价沥青材料高温稳定性的重要指标，用于反映沥青在温度升高过程中由固态逐渐转变为流动状态的温度。软化点越高，说明沥青在高温条件下抵抗流动变形的能力越强。高黏高弹改性乳化沥青蒸发残留物软化点不低于80℃。这一指标设置主要考虑到超薄磨耗层在高温条件下的抗车辙性能要求。由于超薄磨耗层厚度较薄，其结构稳定性主要依赖于沥青结合料的粘结性能和抗剪切能力，因此必须保证沥青材料具有较高的高温稳定性。在高温环境及车辆

荷载作用下，若沥青软化点较低，则沥青容易发生软化流动，从而导致混合料产生车辙、推移或剪切破坏等病害。而通过提高沥青软化点，可以显著增强材料的高温抗变形能力，使混合料在高温条件下仍能保持稳定结构。

（5）延度

延度是评价沥青材料在拉伸条件下变形能力的重要指标，用于反映沥青材料在低温条件下的柔韧性和延展能力。本研究规定高黏高弹改性乳化沥青蒸发残留物在 5℃ 条件下延度不小于 30 cm。在寒冷地区或冬季低温环境中，路面结构会因温度变化产生收缩应力，如果沥青材料缺乏足够的延展能力，则容易在温度应力作用下产生裂缝，从而降低路面耐久性能。因此，通过控制低温延度指标，可以保证沥青材料在低温条件下具有良好的变形能力，从而提高路面抗裂性能。对于超薄磨耗层而言，其厚度较薄，对温度应力变化较为敏感，因此要求沥青材料具有较好的低温柔韧性。通过提高低温延度，可以使沥青材料在温度变化过程中通过自身变形释放应力，从而减少裂缝产生。此外，高黏高弹改性沥青中的 SBS 聚合物具有良好的弹性和延展性能，在沥青中形成网状结构，使材料在低温条件下仍能保持一定的延展能力。因此，规定 5℃ 延度不小于 30cm，以保证材料具有良好的低温抗裂性能。

2、钢渣集料技术指标

（1）钢渣的集料特性

由于钢渣的密度与普通集料的密度差别比较大，为给后续研究提供基础数据和理论依据，对不同粒径的钢渣的不同密度进行了分析测试，其结果见下表。

表 1 不同粒径钢渣的密度分布

粒径大小 (mm)	表观相对密度	表干相对密度	毛体积相对密度
5~10	3.462	3.201	3.316
3~5	3.351	3.018	3.117

由上表可知，钢渣的表观相对密度、表干相对密度、毛体积相对密度基本都在 3.0 以上，远大于同粒径石质集料的密度，并且随着粒径的增大，其相对密度也随之增大。

钢渣在存放过程中其技术性能会随着存放时间发生一定的变化，本研究从不同排放时间的钢渣料堆上取样，对存放时间 0 个月、6 个月、1 年、2 年的钢渣技术性能进行了评价，不同存放时间钢渣的技术指标见下表。

表 2 不同存放时间钢渣的技术指标

检测项目	0 月	6 月	1 年	2 年	技术要求	试验方法
压碎值 (%)	14.2	15.1	15.9	16.2	≤22	T0316
洛杉矶磨耗损失 (%)	16.1	17.6	18.4	18.8	≤26	T0317
小于 0.075mm 含量 (%)	0.37	0.52	0.79	0.94	≤5	T0310
表观相对密度	3.384	3.365	3.328	3.291	≥2.9	T0304
吸水率 (%)	2.496	2.348	2.239	2.122	≤3.0	T0304
含水率 (%)	0.23	0.47	0.61	0.83	-	T0306

由上表可知：随着存放时间的延长，钢渣压碎值、洛杉矶磨耗损失、小于 0.075mm 含量和含水率不断增大，表观相对密度及吸水率不断变小。表明钢渣随着存放时间的延长，力学性能有所劣化，且粒径存在持续细化的风险。

(2) 钢渣体积安定性评价

将每一组钢渣试样筛分成 6 档，按照规定的比例配料，进行重型击实试验，测定其最佳含水量和最大干密度。然后以上述比例配 7kg 的料并用测得的最佳含水量和最大干密度拌和，用重型击实仪成型试件，将成型好的试件连同试模一起放入恒温水浴箱中，上面放置半圆形荷载板和百分表，装置如下图所示。将两个试件同时放置在恒温水浴箱当中，水面完全淹没试件。每天对水浴箱进行加热，每次加热前记录百分表读数，加热温度达到 $(90 \pm 3)^\circ\text{C}$ 后保持 6h，6h 后停止加热，自然冷却，以后每天按照这个步骤进行，并在每天升温前记录百分表的读数，如此持续进行 10d，10d 以后读取百分表的最终读数 d_{10} 。



图 2 陈化钢渣浸水膨胀率试验

钢渣的浸水膨胀率按下式计算：

$$\gamma = \frac{d_{10} - d_0}{120} \times 100$$

式中： γ —浸水膨胀率，%；

120—试件原始高度，单位为毫米（mm）；

d_{10} —百分表的终读数，单位为毫米（mm）；

d_0 —百分表的初读数，单位为毫米（mm）。

基于此，本研究从自然堆放时间为 0 个月、3 个月、6 个月、9 个月、12 个月、18 个月、24 个月的钢渣料堆上进行取样，每种钢渣从不同位置各取 4 组试样，分别进行浸水膨胀率、f-CaO 含量及压蒸粉化率的测定，全面评价建龙钢渣体积安定性，评估 f-CaO 含量试验和压蒸粉化率试验在评价道路用钢渣体积安定性方面的适用性，进而确定 f-CaO 含量及压蒸粉化率的技术要求。试验结果如下图所示。

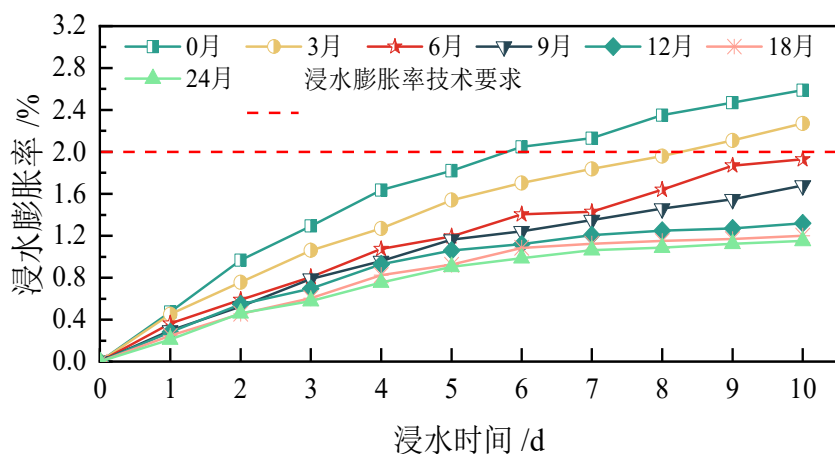


图 3 不同堆存时长的钢渣浸水膨胀率随浸水时间的变化情况

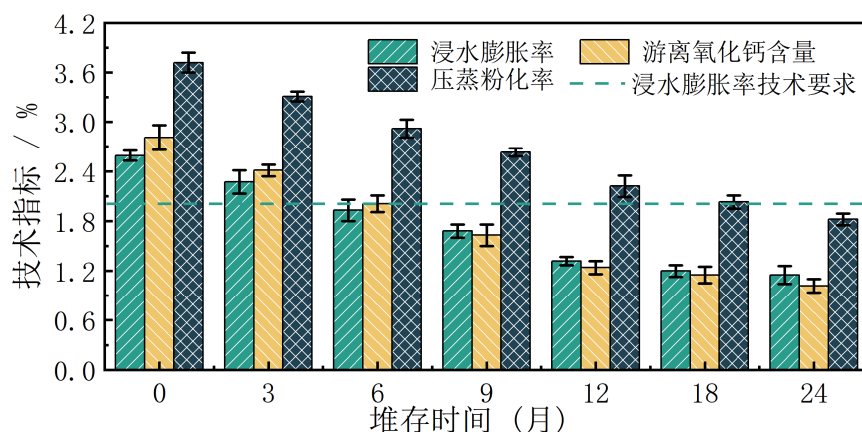


图 4 不同堆存时长的钢渣体积安定性试验结果

由上图可知：随着浸水时间的增长，钢渣的体积在不断膨胀，体

积膨胀率增长速度整体呈现先快后慢的趋势。新排钢渣（堆存时长 0 个月）10d 浸水膨胀率为 2.59%，表明其体积安定性不满足路用要求，需通过一定手段进行预处理后进行应用。直至堆存时间达到 6 个月时，钢渣的浸水膨胀率小于 2.0%，才满足路用技术要求；堆存时长与 10d 时的浸水膨胀率成反比，即堆存时间越长，其浸水 10d 时的膨胀率越小，体积安定性越佳；浸水膨胀率、f-CaO 含量及压蒸粉化率随堆存时间的变化趋势基本一致，随着堆存时间的延长，浸水膨胀率、f-CaO 含量及压蒸粉化率均在不断降低。说明三个指标之间存在一致性，其具体规律还需进一步探究。

为探究钢渣浸水膨胀率与 f-CaO 含量及压蒸粉化率之间的关联性，使用 SPSS 软件进行了相关性分析。结果如下表所示。

表 3 相关性分析结果

		浸水膨胀率	游离氧化钙含量	压蒸粉化率
浸水膨胀率 (%)	Pearson 相关系数	1	0.997	0.996
	显著因子 (双侧)	/	0.000	0.000
	N	7	7	7
游离氧化钙含量 (%)	Pearson 相关系数	0.997	1	0.999
	显著因子 (双侧)	0.000	/	0.000
	N	7	7	7
压蒸粉化率 (%)	Pearson 相关系数	0.996	0.999	1
	显著因子 (双侧)	0.000	0.000	/
	N	7	7	7

从上表可以看出，钢渣的浸水膨胀率、f-CaO 含量及压蒸粉化率三个指标相互间的相关性系数均大于 0.99，显著因子均为 0，表明三个指标间有着较强的相关性，f-CaO 含量与压蒸粉化率也可作为评价道路用钢渣体积安定性的指标应用于生产实践。

为进一步确定 f-CaO 含量与压蒸粉化率的技术要求，以浸水膨胀率为自变量，以 f-CaO 含量与压蒸粉化率分别作为因变量进行了回归分析。结果如下图所示。

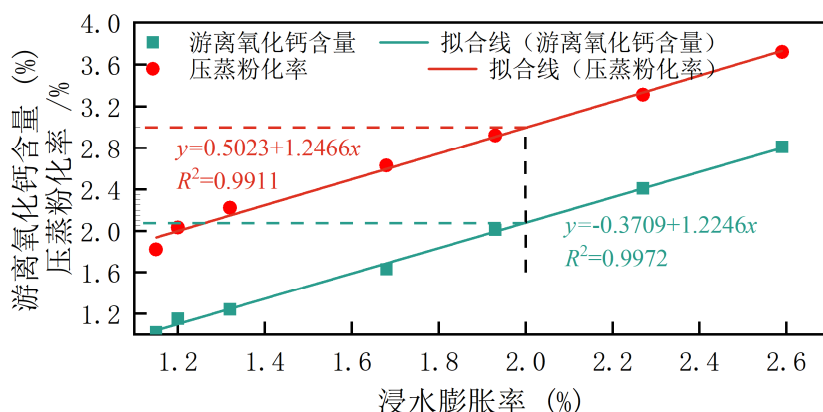


图 5 f-CaO 含量与压蒸粉化率回归结果

从图 5 可知：钢渣的 f-CaO 含量和压蒸粉化率与 10d 浸水膨胀率的线性相关性较高，相关系数 R^2 均大于 0.99，说明可以通过浸水膨胀率的技术要求反推出钢渣 f-CaO 和压蒸粉化率的技术要求。在前文中已提到国家标准《道路用钢渣》(GB/T 25824-2010)中也提出了浸水膨胀率不大于 2%的要求。当浸水膨胀率为 2%时，f-CaO 含量为 2.08%，压蒸粉化率为 3.0%。因此，考虑到操作便捷性，并考虑到一定的可靠性，将结果进行取整，初步确定 f-CaO 含量和压蒸粉化率的技术要求如下表所示。

表 4 f-CaO 含量和压蒸粉化率技术要求

指标	游离氧化钙含量 (%)	压蒸粉化率 (%)
技术要求	≤ 2.0	≤ 3.0

为验证浸水膨胀率与 f-CaO 含量及压蒸粉化率之间的规律，并为初定的 f-CaO 含量和压蒸粉化率的技术要求提供支撑，从不同堆

存时间的钢渣料堆上随机取了 16 组试样，分别进行 10d 浸水膨胀率试验、f-CaO 含量试验及压蒸粉化率试验，试验结果如下图所示。

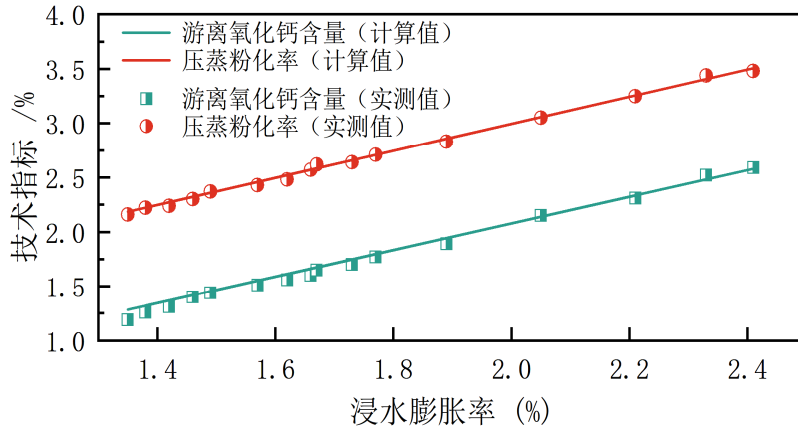


图 6 计算值与实测值对比

由上图可知：实测值与计算值相差较小，f-CaO 含量实测值与计算值相对误差最大值为 4.03%，压蒸粉化率实测值与计算值相对误差最大值为 3.67%，表明前文得出的规律可信，确定的 f-CaO 含量和压蒸粉化率的技术要求可以作为参考指标进行应用。

(3) 冷拌冷铺超薄磨耗层钢渣性能要求

冷拌冷铺超薄磨耗层混合料一般作为路面的磨耗层，直接与车轮荷载相接触，为提高车辆行驶过程中的抗滑性，保证路面的耐磨性，延长使用寿命，冷拌冷铺超薄磨耗层集料应具有多棱角、表面粗糙、强度高、硬度大、耐磨性好的特点。本研究所用的钢渣集料技术性能进行检测，为确保冷拌冷铺超薄磨耗层应用效果，钢渣集料采用 3~5mm 和 5~10mm 的，其技术指标测试测试结果如下表所示。

表 5 钢渣粗集料技术性能

检测项目	检测结果		技术要求
	3~5mm	5~10mm	

压碎值 (%)	15.7		≤22
洛杉矶磨耗损失 (%)	18.3		≤26
磨光值 (BPN)	46		≥42
坚固性 (%)	2.6		≤12
吸水率 (%)	2.36	2.12	≤3
表观相对密度	3.305	3.441	≥2.9
毛体积相对密度	3.037	3.268	—
水洗法<0.075mm 颗粒含量 (%)	—	0.2	≤5
游离氧化钙 (%)	1.31		≤2

检测结果表明，钢渣集料的各项物理力学指标均满足要求。其中钢渣集料的压碎值为 15.7%，洛杉矶磨耗值为 18.3%，坚固性为 2.6%，三项指标均优于碎石集料，说明钢渣的耐磨性、坚固性优于碎石，这是由于钢渣在形成过程中生成的矿物结晶致密、晶粒较大且钢渣中含有较多的金属铁，增强了其耐冲击性和耐磨性。因此，将钢渣用于冷拌冷铺超薄磨耗层技术有利于增强混合料在服役过程中的抗压碎性能和耐磨耗性能。此外，钢渣表面粗糙、多孔的特性进一步增强了其与沥青间的吸附作用。且钢渣颗粒的棱角性好，易于形成良好的嵌挤结构，可提高混合料整体的粘结性、水稳定性等路用性能。

3、冷拌冷铺超薄磨耗层混合料配合比设计

(1) 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料级配设计

冷拌冷铺超薄磨耗层混合料级配设计，应根据原路面病害状况、功能要求、公路等级、路面类型、交通量及气候条件等因素综合确定，针对性的进行冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的配合比进行设计，开展了适应于 CMCP-I和 CMCP-II冷拌冷铺型超薄磨耗层的配合比设计，通过室内试验与性能验证，确定了冷拌冷铺超薄磨耗层的 CMCP- I

和 CMCP- II 两种级配最佳级配类型与关键参数, CMCP- I 和 CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层矿料的级配范围应符合表 6 的规定。

表 6 冷拌冷铺超薄磨耗层矿料级配范围

级配类型	通过下列筛孔的百分率 (%)								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
CMCP-I	100	100	100~80	60~42	46~24	28~16	18~8	12~6	8~4
CMCP-II	100	100~95	90~70	70~45	50~28	34~19	25~12	18~7	12~6

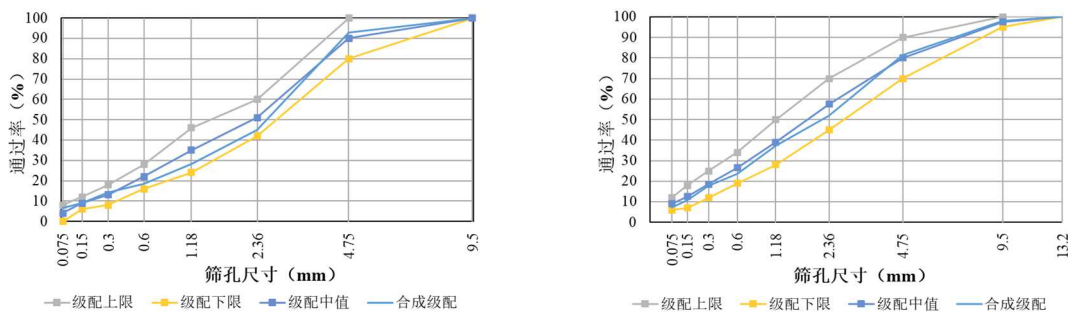


图 7 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料级配曲线

拌和试验能很好反应混合料的成浆状态。可拌和时间过短会影响混合料的现场施工,可拌和时间过长会影响混合料强度形成。因此,为了利于混合料的可施工性和强度形成,需要通过拌和试验确定外加水量,确定外加水量按照可拌和时间不小于 120s 为标准。

对合成级配在油石比 6% ~ 8% 范围内以油石比梯度 0.5% 进行拌和试验,确定在不同油石比下各种配比的最佳用水量。其中,水泥掺量为 1.5%。不同油石比下稀浆混合料的最佳用水量如表 4.5 所示。其中, CMCP-I 冷拌冷铺超薄磨耗层所用级配为合成级配 1, CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层所用级配为合成级配 2。

表 7 不同油石比下的最佳用水量

类型	油石比/%				
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
CMCP- I	3.1	2.4	1.8	1.6	1.4

CMCP-II	3.3	2.6	1.9	1.8	1.6
---------	-----	-----	-----	-----	-----

根据拌和试验的结果，分别对不同油石比下各种配比进行黏聚力试验，定量评价稀浆混合料的黏聚力水平。黏聚力值分为 30min 和 60min 的黏聚力，30min 黏聚力值是稀浆混合料基本成型的强度，60min 黏聚力值是稀浆混合料成型后开放交通时的强度。不同油石比下各种配比的黏聚力值如表 4.6 所示，表格中斜线前数据为 30min 黏聚力，斜线后数据为 60min 黏聚力。

表 8 不同油石比下的黏聚力值

类型	油石比/%				
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
CMCP-I	1.1/1.8	1.2/2.0	1.3/2.0	1.4/2.1	1.4/2.2
CMCP-II	1.1/1.8	1.1/2.0	1.2/2.0	1.3/2.1	1.4/2.1

当油石比为 6% 时，冷拌冷铺超薄磨耗层的 30min 和 60min 黏聚力都不符合要求，其它油石比下，冷拌冷铺超薄磨耗层的黏聚力符合要求，通过试验发现，用扭矩扳手不易得到准确的黏聚力值，需要参照规范观察试件表面的破坏状态来确定，此种确定方法有偶然性。因此，黏聚力结果只能作为混合料成型强度的参考，不能作为评判强度的依据。

湿轮磨耗试验 1h 磨耗值用于确定冷拌冷铺超薄磨耗层沥青用量的下限。不同油石比下各种配比的 1h 磨耗值如表 8 所示。

表 8 不同油石比下的磨耗值

类型	油石比/%				
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
CMCP-I	476.50	316.76	235.8	185.12	123.53
CMCP-II	492.30	334.52	243.2	203.23	182.35

负荷轮粘砂试验用于确定冷拌冷铺超薄磨耗层用量的上限。通

过测试试件的变形量确定混合料抵抗车辙的能力。不同油石比下各种配比的黏附砂量如表 9 所示。

表 9 不同油石比下的黏附砂量

类型	油石比/%				
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
CMCP- I	182.63	289.52	332.80	411.49	482.31
CMCP- II	168.23	244.35	302.10	398.52	432.52

根据不同油石比稀浆混合料的湿轮磨耗结果和负荷轮粘砂结果，绘制成如图 8 和图 9 所示的关系曲线。

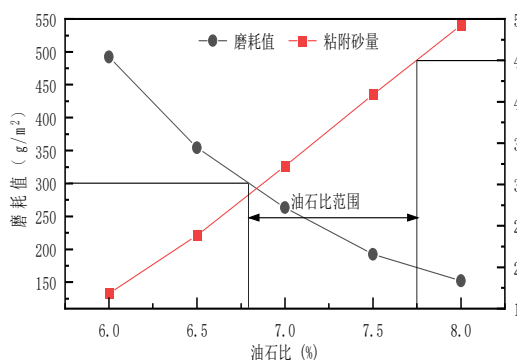


图 8 CMCP- I 混合料

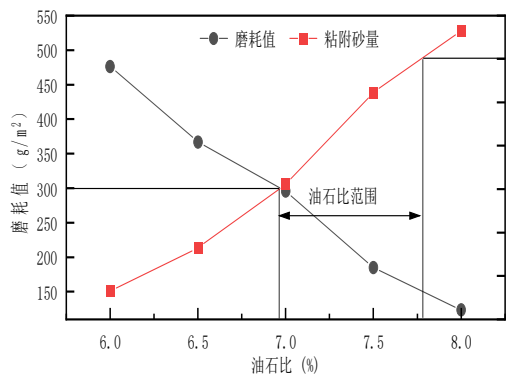


图 9 CMCP- II 混合料

根据图 8 和图 9, CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层的最佳油石比范围为 6.7% ~ 7.8%, CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层的最佳油石比范围为 6.9% ~ 7.7%, 结合交通特点和经济等因素, CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层和 CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层的最佳油石比均取磨耗值曲线和黏附砂量曲线交点附近, 即油石比为 7.3% 和 7.1%。冷拌冷铺超薄磨耗层的最佳配合比表 10 所示。

表 10 冷拌冷铺超薄磨耗层的最佳配合比

类型	5-10mm (%)	3~5mm (%)	0-3mm (%)	矿粉	油石比/%	水/%	水泥/%
CMCP- I	-	70	25	5	7.3	1.8	1.5
CMCP- II	15	45	35	5	7.1	2.0	1.5

(2) 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层配合比设计

① 级配设计

基于上述冷拌冷铺超薄磨耗层配合比结果的基础上，分别使用 3~5mm、5~10mm 的钢渣全部替代碎石集料，制备不同的钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层混合料进行配合比设计，研究钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层的级配设计及混合料性能。

上述对 CMCP-I 和 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的矿料掺配比例进行了研究，CMCP-I：3~5mm：0-3mm：矿粉=70：25：5；CMCP-II：5-10mm：3~5mm：0-3mm：矿粉=15：45：35：5；按照体积法换算，得出 3~5mm、5~10mm 不同粒径钢渣集料全部代替同粒径碎石后冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的合成级配如下表，级配曲线如下图。

表 11 CMCP-I 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层混合料合成级配表

筛孔尺寸 (mm)		9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
通过率 (%)	上限	100	100	60	46	28	18	12	8	
	下限	100	80	42	24	16	8	6	0	
	中值	100	90	51	35	22	13	9	4	
	筛分结果	钢渣 3~5mm	100	89.8	26.4	13.5	0.3	0.3	0.3	0.3
		机制砂	100	99.8	86.7	55.4	52.7	35.9	16.1	7
		矿粉	100	100	100	100	100	100	97.6	94.2
合成级配		100.0	77.5	49.2	36.5	25.1	15.4	9.2	6.7	

表 12 CMCP-II 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层混合料合成级配表

筛孔尺寸 (mm)		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率 (%)	上限	100	100	90	70	50	34	25	18	12
	下限	100	95	70	45	28	19	12	7	6
	中值	100	97.5	80	57.5	39	26.5	18.5	12.5	9

筛分结果	钢渣 5~10mm	100	87.2	7.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	钢渣 3~5mm	100	100	89.8	36.4	28.5	0.3	0.3	0.3	0.3
	机制砂	100	100	99.8	86.7	55.4	52.7	35.9	16.1	7
	矿粉	100	100	100	100	100	100	100	97.6	94.2
	合成级配	100	98	81.4	51.7	37.2	23.6	17.7	10.6	7.3

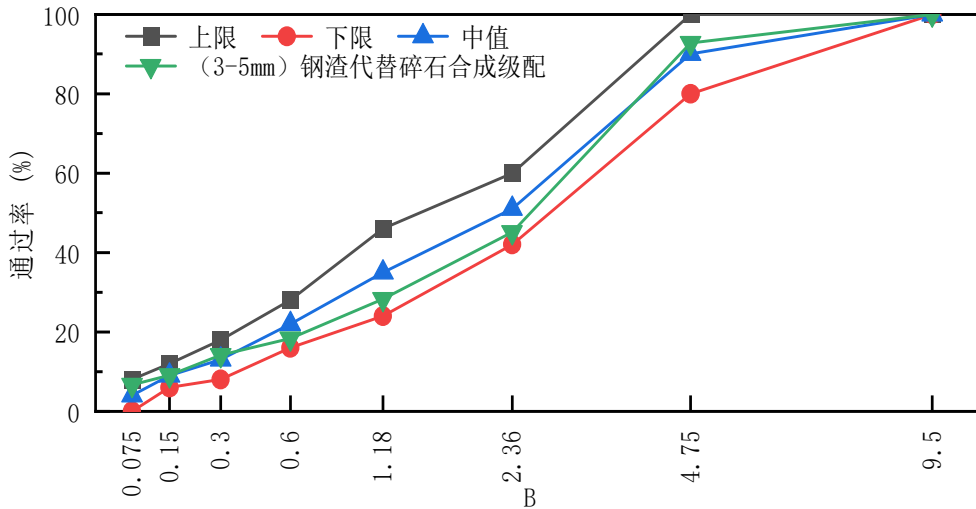


图 10 CMCP-I 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层级配曲线

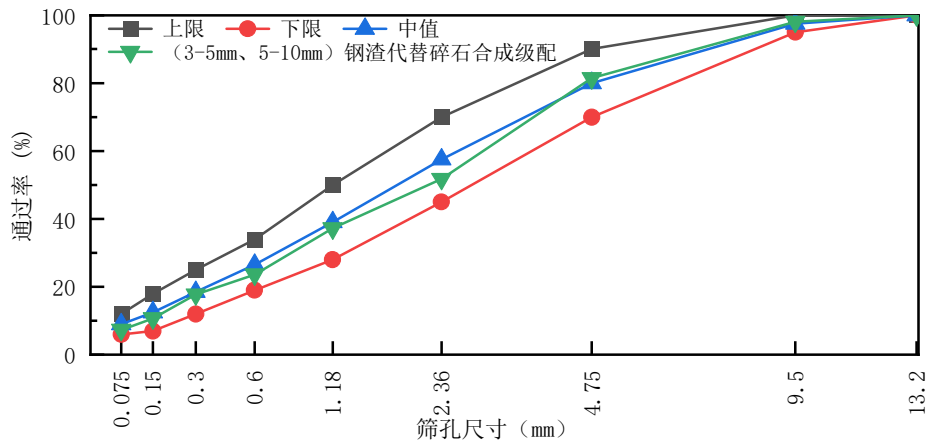


图 11 CMCP-II 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层级配曲线

我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)将级配曲线上的通过率看作是质量通过率,这种方法在混合料集料密度相差不大时不会带来严重影响,但钢渣的密度是砂岩的 1.24~1.31 倍,为

了控制变量和得到正确的体积参数，需要保证不同集料的体积掺量相同，所以本研究在进行配合比设计时，也应该按照体积掺量为标准进行设计。因此，在制备冷拌冷铺超薄磨耗层混合料时，首先按下表进行体积-质量换算，从而得到不同粒径钢渣集料的质量比。

表 13 钢渣集料体积-质量换算表

集料种类	设计配合比 (%)	毛体积相对密度	质量分数 (%)	换算后质量配合比 (%)
1	A_1	γ_1	$A_1 \times \gamma_1$	$A_1 \times \gamma_1 / \Sigma \times 100$
2	A_2	γ_2	$A_2 \times \gamma_2$	$A_2 \times \gamma_2 / \Sigma \times 100$
3	A_3	γ_3	$A_3 \times \gamma_3$	$A_3 \times \gamma_3 / \Sigma \times 100$
...
n	A_n	γ_n	$A_n \times \gamma_n$	$A_n \times \gamma_n / \Sigma \times 100$
合计	100		Σ	100

基于上述体积-质量换算法，对不同替代方式下的冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的掺配比例进行换算，换算过程及换算后的不同冷拌冷铺超薄磨耗层混合料质量掺配比例如表 14 和 15 所示。

表 14 CMCP-I 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层掺配比例换算过程及质量比

集料类型	钢渣 3~5mm	机制砂	矿粉
体积比	70	25	5
毛体积相对密度	3.307	2.662	2.655
质量比	74.4	21.4	4.2

表 15 CMCP-II 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层掺配比例换算过程及质量比

集料类型	钢渣 5~10mm	钢渣 3~5mm	机制砂	矿粉
体积比	15	45	35	5
毛体积相对密度	3.268	3.307	2.662	2.655
质量比	16.1	48.9	30.6	4.4

② 配合比设计

基于确定的各档集料掺配质量比及基准冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的最佳配合比，按上述质量比配制集料初始油石比取为 7%，用

水量定为 2%，水泥用量定为 1.5%。以 0.5%调整油石比，制备不同替代方式下的冷拌冷铺超薄磨耗层混合料，分别进行 1h 湿轮磨耗及负荷轮粘砂试验，试验结果如下表及图所示。

表 16 CMCP-I 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的磨耗值及粘附砂量

油石比 (%)		6	6.5	7	7.5	8
CMCP-I	磨耗值 (g/m ²)	449.33	369.67	283.89	203.16	122.76
	粘附砂量 (g/m ²)	238.64	329.15	385.25	432.22	474.24

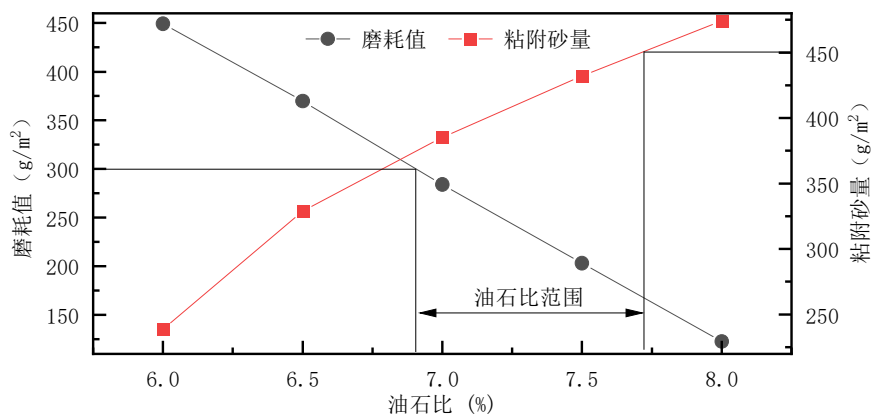


图 12 冷铺超薄磨耗层最佳油石比确定曲线图 (3~5mm 钢渣代替碎石集料)

表 17 CMCP-II 钢渣冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的磨耗值及粘附砂量

油石比 (%)		6	6.5	7	7.5	8
CMCP-II	磨耗值 (g/m ²)	467.83	316.33	257.07	168.38	106.64
	粘附砂量 (g/m ²)	239.93	326.15	398.9	439.79	483.98

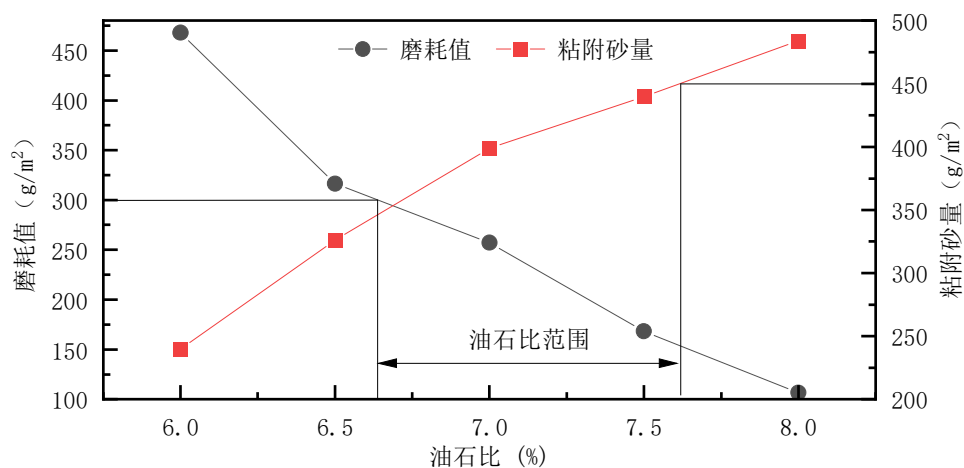


图 13 冷拌冷铺超薄磨耗层最佳油石比确定曲线图 (3~5mm、5~10mm 钢渣替代碎石集料)

结合基准冷拌冷铺超薄磨耗层的最佳油石比确定曲线图，由上图可知：CMCP-I和CMCP-II使用不同粒径的钢渣集料全部替代碎石集料后，冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的湿轮磨耗值和粘附砂量随油石比的变化趋势与基准冷拌冷铺超薄磨耗层一致，即随着油石比的增加，冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的湿轮磨耗值在不断变小，粘附砂量在不断增加。同时，在6.0%~6.5%的油石比范围内湿轮磨耗值变化最大，在7.5%~8.0%油石比范围内粘附砂量变化最大。

根据上述不同冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的最佳油石比确定曲线图可以得出磨耗值对应的最小油石比和粘附砂量对应的最大油石比，即油石比范围。与基准冷拌冷铺超薄磨耗层相同，以此范围的中值作为最佳油石比，确定不用冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的油石比范围及最佳油石比如下表所示。

表 18 油石比范围及最佳用量

混合料类型	油石比范围 (%)	最佳油石比 (%)
CMCP-I	6.92~7.72	7.32
CMCP-II	6.65~7.61	7.13

4、冷拌冷铺超薄磨耗层混合料性能指标研究

(1) 耐磨耗性能

冷拌冷铺超薄磨耗层是新型预防性养护技术，用于路面表面层，改善路面技术状况，因施工后直接受到行车荷载作用，汽车在加速、制动等过程中易产生较大的摩擦力，部分颗粒因与沥青的黏结力不足被带掉，在行车荷载持续的作用下，周围越来越多的颗粒可能会被带掉，将导致路面出现坑洞等病害。因此，为了保证冷拌冷铺超薄磨

耗层有较长的使用年限，需对其耐磨耗性能进行研究。

①CMCP-I

对 CMCP- I 采用不同类型的集料按照各自的最佳油石比制备冷拌冷铺超薄磨耗层混合料试件，如表 19 所示，并进行浸水 1h 湿轮磨耗试验，相关试验结果如图 14 所示。

表 19 不同类型集料冷拌冷铺超薄磨耗层混合料最佳配合比下的耐磨耗性能

混合料类型	石灰岩	青砂岩	玄武岩	钢渣
油石比 (%)	7.1	7.1	7.1	7.3
1h 湿轮磨耗值 (g/m^2)	428.54	280.52	218.36	175.32



(a) 石灰岩



(b) 青砂岩



(c) 玄武岩



(d) 钢渣

图 14 CMCP-I 不同集料类型冷拌冷铺超薄磨耗层湿轮磨耗试验对比

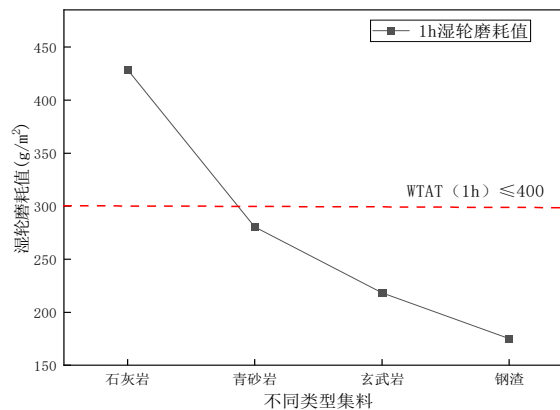


图 15 CMCP- I 不同集料类型冷拌冷铺超薄磨耗层湿轮磨耗试验对比

从图 15 可以看出，从石灰岩、青砂岩、玄武岩、钢渣不同集料 1h 湿轮磨耗值来看，磨耗值大小均呈减小趋势，表明不同集料的耐磨耗性能从大到小依次为钢渣 > 玄武岩 > 青砂岩 > 石灰岩，这是由于钢渣对沥青的吸附力比碎石更强，增加了钢渣与沥青之间的黏附力，从而使得钢渣与沥青之间的粘结更加牢固；同时钢渣集料相比于碎石集料压碎值、洛杉矶磨耗、磨光值等技术指标更优，从集料层面就具备优异的耐磨性；此外，由于钢渣集料密度更大，在最佳油石比相近的情况下单位体积的钢渣沥青混合料内所用的改性乳化沥青更多，意味着包裹钢渣集料的沥青膜更厚，进一步提升了集料与沥青之间的粘结。

(2) CMCP-II

对 CMCP-II 采用不同类型的集料按照各自的最佳油石比制备冷拌冷铺超薄磨耗层混合料试件，并进行浸水 1h 湿轮磨耗试验，相关试验结果见下图所示。



(a) 石灰岩



(b) 青砂岩



(c) 玄武岩



(d) 钢渣

图 16 CMCP-II不同集料类型冷拌冷铺超薄磨耗层湿轮磨耗试验对比

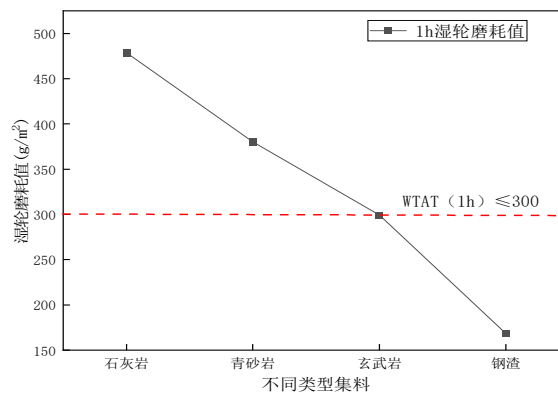


图 17 CMCP-II不同集料类型冷拌冷铺超薄磨耗层湿轮磨耗试验对比

从图 17 可以看出，不同类型集料 1h 湿轮磨耗值变化规律与 CMCP-I相似，钢渣的耐磨耗性能更好。

(2) 抗水损害性能研究

(1) CMCP-I

分析试验结果发现，不同冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的 6d 湿轮磨耗值与 1h 湿轮磨耗值规律性存在差异，将两项指标绘制成图进行对比。

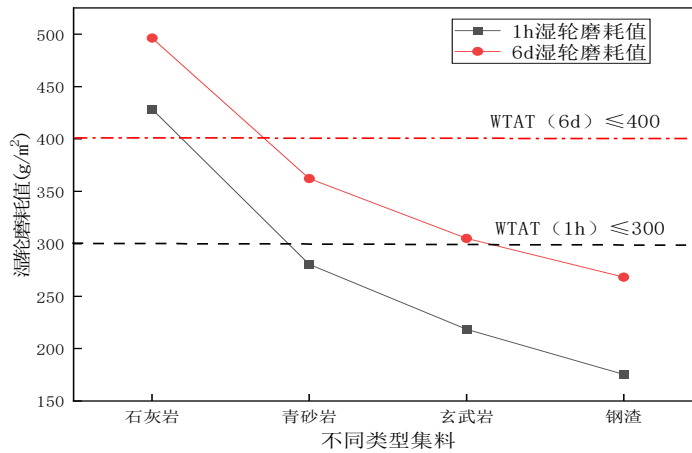


图 18 不同冷拌冷铺超薄磨耗层混合料 6d 湿轮磨耗值与 1h 湿轮磨耗值

从图 18 可以看出，石灰岩、青砂岩、玄武岩、钢渣这 4 种不同类型集料的 6d 湿轮磨耗值均高于其 1h 湿轮磨耗值，说明水对冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的性能存在不利影响，石灰岩的 1h 湿轮磨耗值约为 430g/m^2 ，6d 值约为 500g/m^2 ，均超出了 $\text{WTAT}(1\text{h}) \leq 300\text{g/m}^2$ 和 $\text{WTAT}(6\text{d}) \leq 400\text{g/m}^2$ 的限值，水稳性能较差。而青砂岩、玄武岩、钢渣的 1h 值均满足 $\leq 300\text{g/m}^2$ 的要求，6d 值也均满足 $\leq 400\text{g/m}^2$ 的要求，其中玄武岩和钢渣的 6d 值明显低于限值，水稳性能相对更优。

(2) CMCP-II

对 CMCP-II 采用不同类型的集料按照各自的最佳油石比制备冷拌冷铺超薄磨耗层混合料试件，并进行浸水 6d 的湿轮磨耗试验，相关试验结果见下图所示。

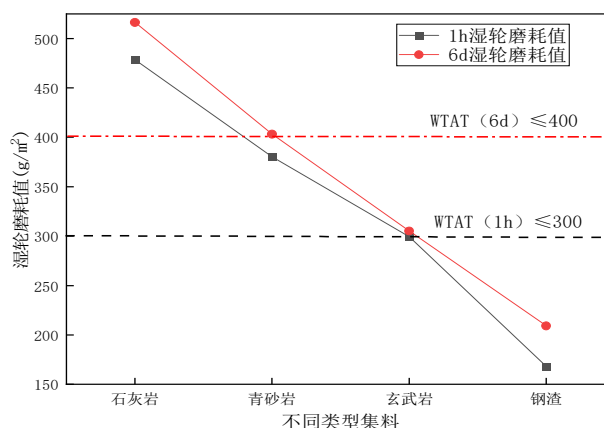


图 19 不同冷拌冷铺超薄磨耗层混合料 6d 湿轮磨耗值与 1h 湿轮磨耗值

从图 19 可以看出，不同类型集料 1h 湿轮磨耗值变化规律与 CMCP- I 相似，钢渣的抗水损害性能更好。

(3) 抗轮辙变形试验研究

采用不同类型的集料按照各自的最佳油石比制备冷拌冷铺超薄磨耗层混合料试件，并进行负荷轮粘砂试验，试验结果如表 5.3 所示。

表 20 不同类型集料车辙变形试验结果

混合料类型	技术指标	石灰岩	青砂岩	玄武岩	钢渣	技术要求
CMCP- I	PLD (%)	3.8	3.6	3.0	2.7	≤5
	PVD (%)	3.6	3.8	2.8	1.9	—
CMCP- II	PLD (%)	3.2	2.8	2.5	1.8	≤5
	PVD (%)	3.3	2.6	2.6	1.5	—

由表 20 车辙变形试验结果可知，冷拌冷铺超薄磨耗层混合料 (CMCP- I、CMCP- II) 在采用不同类型集料时，其永久变形深度 (PLD) 和永久变形量 (PVD) 均呈现出显著差异，且均满足技术要求中 $PLD \leq 5\%$ 的限值；此外，CMCP- II 混合料的 PLD 和 PVD 整体低于 CMCP- I，说明在一定范围内，合理调整油石比等配合比参

数，也有助于进一步优化冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的抗车辙性能，降低车辙病害的发生风险。

(4) 层间抗剪性能

冷拌冷铺超薄磨耗层的厚度较薄，在车辆正常行驶、制动过程中，会受到水平推力作用产生水平剪切力，当水平剪切力大于材料本身的抗剪强度时，层间发生剪切破坏，路面会出现推移、拥包等病害。层间粘结强度的大小不仅与粘层油的粘结能力有关，而且与冷拌冷铺超薄磨耗层本身的结构有关。因此，冷拌冷铺超薄磨耗层与原路面的粘结能力是衡量冷拌冷铺超薄磨耗层技术成败的关键因素之一，本研究采用剪切试验评价冷拌冷铺薄层的层间抗剪强度。

层间抗剪试验过程如图 20 所示，芯样层间剪切破坏后如图 21 所示，不同类型试件的层间抗剪试验结果如表 21 所示。



图 20 试验过程



图 21 芯样破坏

表 21 不同类型集料抗剪强度试验结果

混合料类型	石灰岩	青砂岩	玄武岩	钢渣
CMCP-I	1.8	2.1	2.3	2.5
CMCP-II	1.6	1.9	2.4	2.6

根据表 21 不同集料类型剪切强度试验结果可知，CMCP- I 与 CMCP- II 两种结构在不同岩性集料条件下的层间抗剪强度存在一定差异，且整体呈现出随集料硬质化程度提高而增强的趋势。说明在结构厚度或配比调整后，高强集料的结构优势更加明显，而低强度、表面较光滑的石灰岩类集料在界面受力时更易产生滑移，表明集料的力学强度、表面粗糙度以及棱角特性是影响层间抗剪性能的关键因素。

(5) 早期强度性能

冷拌冷铺超薄磨耗层技术与传统技术相比最大的优势是能够快速开放交通，这也对冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的早期强度提出了一定要求，目前通常用黏聚力试验来评价冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的早期强度。本研究使用黏聚力试验仪对不同冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的 30min 和 60min 黏聚力值进行了测试，试验结果如下表所示。

表 22 不同类型集料黏聚力试验结果

混合料类型	石灰岩	青砂岩	玄武岩	钢渣	技术要求
CMCP-I	1.5	1.7	1.8	2.2	≥ 1.2
CMCP-II	2.4	2.8	2.9	2.8	≥ 2.0

由表 22 可知，不同类型集料对冷拌冷铺超薄磨耗层混合料黏聚力影响显著。在 CMCP- I 级配条件下，各集料黏聚力均满足技术要求 (≥ 1.2)，其大小规律为钢渣 (2.2) > 玄武岩 (1.8) > 青砂岩 (1.7) > 石灰岩 (1.5)。在 CMCP- II 级配条件下，各类型集料黏聚力均满足技术要求 (≥ 2.0)，且整体水平明显高于 CMCP- I，强度范围为 2.4 ~

2.9。不同集料之间差值较 CMCP- I 有所缩小，说明随着骨架结构增强，级配对结构稳定性的主导作用更加突出，集料差异对黏聚性能的影响相对减弱。

5、冷拌冷铺超薄磨耗层工程应用及服役性能研究

(1) 试验段概况及配合比设计

在固原 S203（固将路）线养护项目和 G22 青兰高速沿川子至白家高庄段路面养护项目开展了冷拌冷铺超薄磨耗层试验段铺筑，对室内研究成果进行了验证。

①CMCP- I 试验段配合比设计

基于室内试验确定的各档集料掺配比例，并根据实际各档集料的筛分结果进行级配设计，得到的各档矿料比例为矿粉：0-3mm：3-5mm=5:70:25，CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层合成级配计算过程如下表，级配曲线如下图。

表 23 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料合成级配表

筛孔尺寸 (mm)		9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
通过率 (%)	上限	100	100	60	46	28	18	12	8	
	下限	100	80	42	24	16	8	6	0	
	中值	100	90	51	35	22	13	9	4	
	筛分结果	3~5mm 集料	100	89.8	26.4	13.5	0.3	0.3	0.3	0.3
		机制砂	100	99.8	86.7	55.4	52.7	35.9	16.1	7
		矿粉	100	100	100	100	100	100	97.6	94.2
	合成级配		100.0	77.5	49.2	36.5	25.1	15.4	9.2	6.7

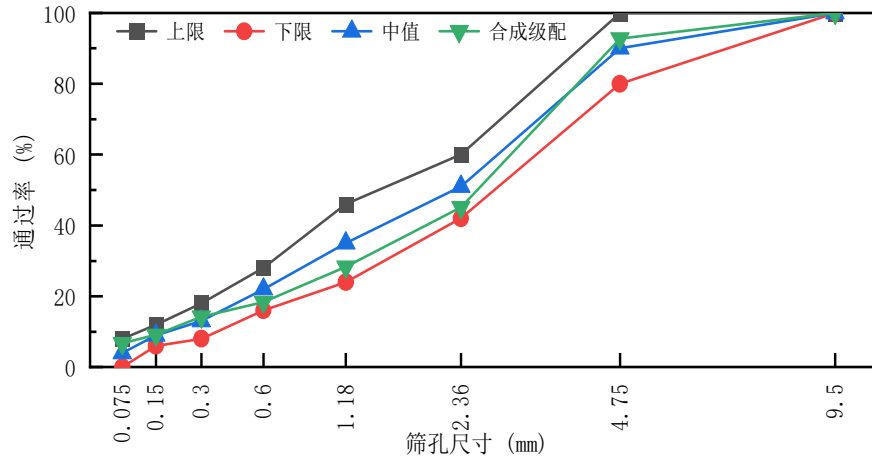


图 22 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层级配曲线

基于上述级配设计结果及室内试验结果，初拟油石比为 7.0%，用水量为 1.8%，水泥用量定为 1.5%。以 0.5%调整油石比，制备不同油石比下的冷拌冷铺超薄磨耗层混合料，分别进行 1h 湿轮磨耗及负荷轮粘砂试验，试验结果如下表及图所示。

表 24 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的 1h 磨耗值及粘砂量

油石比 (%)	6	6.5	7	7.5	8
磨耗值 (g/m^2)	431.12	314.61	268.94	141.46	102.78
粘附砂量 (g/m^2)	264.83	309.8	392.68	422.08	483.65

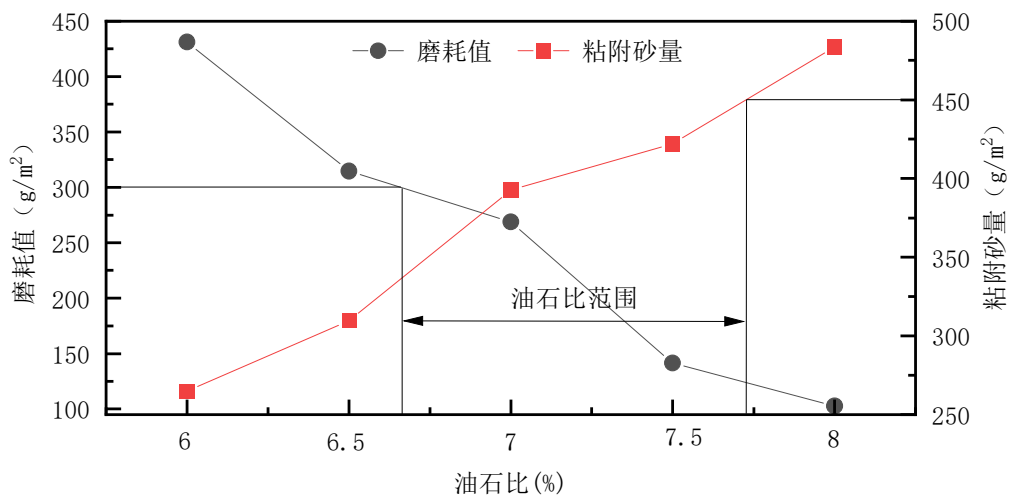


图 23 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层最佳油石比确定曲线图

基于上述试验结果，确定冷拌冷铺超薄磨耗层满足规范要求的油石比范围为 6.54%~7.52%。取 7.3%的油石比开展冷拌冷铺超薄磨耗层混合料各项性能指标验证，试验结果如下表所示。

表 25 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料技术性能

混合料类型	检测结果	技术要求	试验方法
1h 湿轮磨耗值 (g/m ²)	187.4	≤300	T 0752
6d 湿轮磨耗值 (g/m ²)	236.2	≤400	T 0752
PLD (%)	3.28	≤5	T 0756
PVD (%)	4.10	—	T 0756
粘附砂量 (g/m ²)	390.1	≤450	T 0755
30min 黏聚力 (N·m)	1.8	≥1.2	T 0754
60min 黏聚力 (N·m)	2.5	≥2.0	T 0754
构造深度 (mm)	0.96	≥0.6	T 0961
摆值 (BPN)	86	≥45	T 0964

基于上述试验结果确定用于施工的 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层配合比为：矿粉：0-3mm：3-5mm=5:70:25，油石比为 7.1%，水泥产量为 1.5%，用水量初定为 2%，实际用水量根据现场施工环境在此基础上进行微调，以满足施工时间的需求。

②CMCP- II 试验段配合比设计

基于室内试验确定的各档集料掺配比例，并根据实际各档集料的筛分结果进行级配设计，得到的各档矿料比例为矿粉：5-10mm：3~5mm：0-3mm：矿粉=15：45：35：5，CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层合成级配计算过程如下表，级配曲线如下图。

表 26 CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料合成级配表

筛孔尺寸 (mm)		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率 (%)	上限	100	100	90	70	50	34	25	18	12
	下限	100	95	70	45	28	19	12	7	6
	中值	100	97.5	80	57.5	39	26.5	18.5	12.5	9

筛分结果	钢渣 5~10mm	100	87.2	7.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	钢渣 3~5mm	100	100	89.8	36.4	28.5	0.3	0.3	0.3	0.3
	机制砂	100	100	99.8	86.7	55.4	52.7	35.9	16.1	7
	矿粉	100	100	100	100	100	100	100	97.6	94.2
	合成级配	100	98	81.4	51.7	37.2	23.6	17.7	10.6	7.3

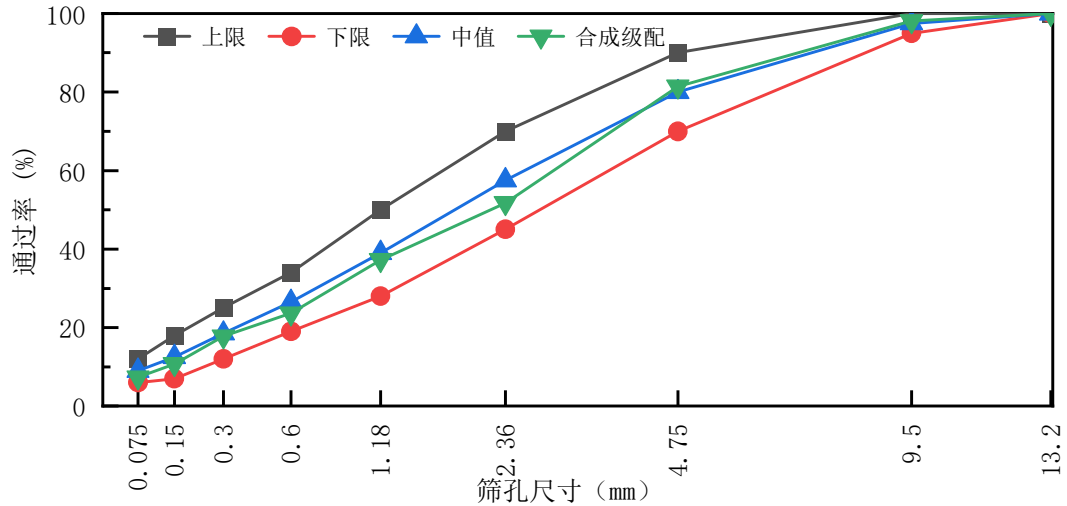


图 25 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层级配曲线

基于上述配比进行体积-质量换算，换算过程及结果如下表所示。

表 27 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层的掺配比例换算过程及质量比

矿料类型	5~10mm 钢渣	3~5mm 钢渣	机制砂	矿粉
体积比/%	15	45	35	5
毛体积相对密度	3.205	3.107	2.662	2.716
质量比/%	16	47	32	5

基于上述级配设计结果及室内试验结果，初拟油石比为 7.0%，用水量为 2%，水泥用量定为 1.5%。以 0.5%调整油石比，制备不同油石比下的冷拌冷铺超薄磨耗层混合料，分别进行 1h 湿轮磨耗及负荷轮粘砂试验，试验结果如下表及图所示。

表 28 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的 1h 磨耗值及粘砂量

油石比 (%)	6	6.5	7	7.5	8
磨耗值 (g/m ²)	424.81	307.66	257.13	159.61	108.56
粘附砂量 (g/m ²)	268.52	301.29	390.05	444.76	481.91

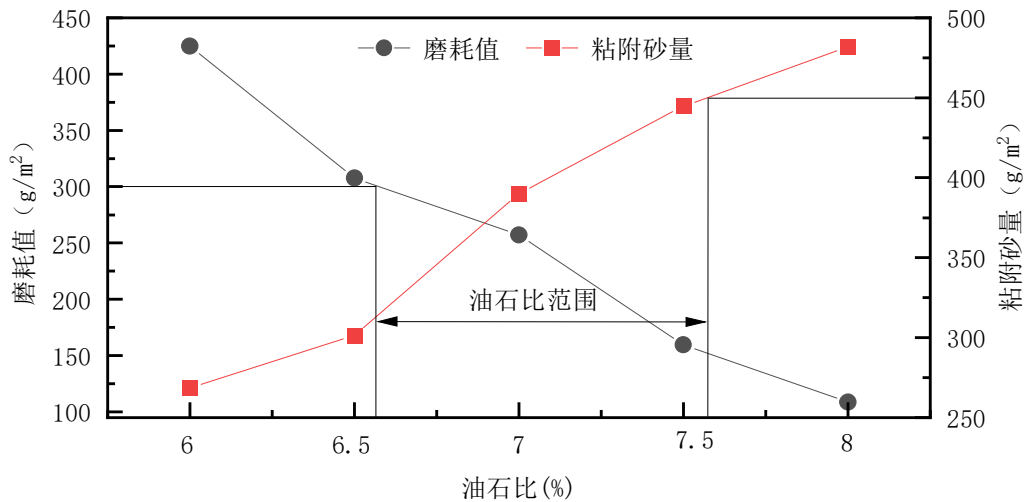


图 26 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层最佳油石比确定曲线图

基于上述试验结果，确定冷拌冷铺超薄磨耗层满足规范要求的油石比范围为 6.54%~7.52%。取该范围中值 7.0%的油石比开展冷拌冷铺超薄磨耗层混合料各项性能指标验证，试验结果如下表所示。

表 29 冷拌冷铺超薄磨耗层混合料技术性能

混合料类型	检测结果	技术要求	试验方法
1h 湿轮磨耗值 (g/m ²)	203.5	≤300	T 0752
6d 湿轮磨耗值 (g/m ²)	305.4	≤400	T 0752
PLD (%)	3.56	≤5	T 0756
PVD (%)	4.21	—	T 0756
粘附砂量 (g/m ²)	365.2	≤450	T 0755
30min 黏聚力 (N·m)	1.9	≥1.2	T 0754
60min 黏聚力 (N·m)	2.4	≥2.0	T 0754
构造深度 (mm)	0.85	≥0.6	T 0961
摆值 (BPN)	82	≥45	T 0964

基于上述试验结果确定用于施工的 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层配合比为：5-10mm：3~5mm：0-3mm：矿粉=15：45：35：5，油石比为 7.1%，水泥产量为 1.5%，用水量为 2%，实际用水量根据现场施工环境在此基础上进行微调，以满足施工时间的需求。

(2) 冷拌冷铺超薄磨耗层施工

①原路面处理：原路面存在裂缝、坑槽、沉陷、拥包、车辙、龟网裂等局部病害时，应先采取灌缝、挖补、填充等措施进行处治，使路表无明显薄弱部位。

②交通管制：冷拌冷铺超薄磨耗层施工会占用路幅，影响交通秩序，给来往行驶的车辆造成不便，如果不加以规范，会造成不良后果。因此，冷拌冷铺超薄磨耗层施工前，业主单位与当地交警等管理部门协商，拟定了交通疏导方案、施工场地封闭形式和封闭时间，并办理了相关手续。

③拌和：按照配合比设计要求进行均匀预混拌再运输至施工现场进行混合料的拌和，确保冷拌冷铺混合料级配可控、铺面均匀。将符合要求的材料装入摊铺车内各料箱中，检查调试拌和机，待其运转正常时，将各种材料阀门同时打开，让各种材料同时输入摊铺车拌缸进行搅拌，此时注意观察混合料的成浆状态。

④摊铺：启动摊铺设备的辅助发动机，打开各料门控制开关，各种原材料按标定的数量依次传送到搅拌缸快速拌和成稀浆混合料，并由分料器分布到摊铺箱内，再由摊铺箱的搅笼将稀浆混合料均匀分布到摊铺箱的全宽范围内。当流入摊铺槽的混合料体积近槽内体积的 2/3，当稀浆状态符合规定要求后，摊铺机可按 15-25m/min 的缓慢速度，进行均匀摊铺。

⑤两侧遇障碍物需要提前将边板拆除或者在两侧加装倒料刮板，

确保铺面到边。混合料摊铺后，对摊铺不到位的两侧或局部需要由人工修整找平；过厚或不平处，使用耢耙找平，漏铺和稀浆不足之处，及时使用混合料进行修补，纵向和横向搭接处应进行修整，保持搭接平顺。

⑥养生及压实：根据天气温度和现场实际情况等待破乳和干燥。待下层沥青完全破乳后开始进行碾压，从摊铺完成到开始碾压时间不得超过 2h。对于 CMCP- I 型的冷拌冷铺超薄磨耗层，采用胶轮压路机进行碾压，碾压次数为 3-5 遍。对于 CMCP- II 的冷拌冷铺超薄磨耗层，破乳后宜采用 2t-6t 双钢轮压路机进行初压 1 遍~2 遍，以表面平整为宜，终压宜采用 8t-15t 轮胎压路机，遍数不宜少于 2 遍。碾压过程中应严格控制洒水量，洒水装置应能保证全面覆盖压路机轮胎。

⑦开放交通：碾压完成后，尽快开放交通。

（3）施工质量控制

根据本试验段确定的配合比，在施工过程中对冷拌冷铺超薄磨耗层混合料和现场质量进行抽查，检测项目、检测频率、质量要求、检测方法及检测结果如下表所示。其中冷拌冷铺超薄磨耗层混合料的稠度用以下方式进行检测：一是用直径约 10mm 的木棍在冷拌冷铺超薄磨耗层表面划出一道痕迹，若划痕两侧混合料立即将划痕掩盖，则表面改性乳化沥青混合料的稠度过稀，应适当降低混合料的含水量；若划痕两侧混合料不流动掩盖划痕并呈松散状态，则表面改性

乳化沥青混合料稠度过大，则应适当增加混合料的含水量；若划痕两侧的改性乳化沥青混合料经过一定的时间后再覆盖划痕并具有一定的流动性，则证明该改性乳化沥青混合料的稠度较为合适。

表 30 冷拌冷铺超薄磨耗层试验段施工过程技术指标

检测项目	检测频率	质量要求	检测结果	检测方法
稠度	1 次/100m	适中	适中	经验法
沥青用量	1 次/工作日	施工配合比的沥青用量 ±0.2%	7.25 %	T 0722
矿料级配	1 次/工作日	满足施工配合比的矿料 级配要求	满足	T 0725
1h 湿轮磨耗	1 次/7 个工作日	≤300g/m ²	285.3g/m ²	T 0752
外观	全线连续	表面平整、均匀，无离 析，无划痕	满足	目测
横向接缝	每条	对接，平顺	满足	目测
变现	全线连续	任一 30m 长度范围内的 水平波动不得超过± 50mm	满足	尺量法

(4) 长期服役性能检测

CMCP- I 和 CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层试验段分别于 2024 年 8 月和 2025 年 6 月完成铺筑，铺筑完成后对路面技术指标进行了检测，各项技术指标均满足《公路沥青路面养护技术规范》(JTG 5142—2019) 要求。在 CMCP- I 试验段通车后开展了 3 次试验段跟踪检测，分别于 2024 年 11 月份、2025 年 6 月份、2025 年 12 月份，检测结果如表 31 所示：

表 31 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层试验段路面技术状况检测结果

技术指标	检测结果			质量 要求	检测方 法
	24 年 11 月份	25 年 6 月份	25 年 12 月份		
厚度 (mm)	8.2、8.4、 8.8、8.2、 8.1、8.3、	8.6、8.5、 8.5、8.4、 8.3、8.2、	8.7、8.6、 8.5、8.5、 8.4、8.3、	≥8	T 0902

	8.5、8.2、 8.3、8.4、 8.5、8.6、 8.3、8.3、8.2	8.2、8.1、 8.0、7.9、 7.8、7.8、 7.7、7.7、7.6	8.2、8.1、 8.0、7.9、 7.9、7.8、 7.7、7.7、7.6		
渗水系数 (mL/min)	3.2、0.0、 6.8、0.3、 3.7、2.8、 3.9、6.0、 3.7、6.9、 8.0、2.5、 2.2、7.7、4.1	2.3、3.1、 1.8、2.6、 2.5、1.3、 1.4、2.5、 5.3、1.2、 2.2、3.2、 2.8、1.6、2.1	0.0、4.1、 0.0、1.6、 0.9、2.5、2、 5.5、6.5、 0.8、1.2、 4.8、3.3、 1.5、1.9	≤10	T 0971
构造深度 (mm)	0.92、0.96、 0.89、0.95、 0.92、0.95、 0.96、0.92、 0.89、0.95、 0.96、0.93、 0.89、0.94、 0.91	0.93、0.92、 0.85、0.81、 0.81、0.86、 0.91、0.85、 0.93、0.95、 0.88、0.91、 0.85、0.89、 0.92	0.89、0.91、 0.92、0.92、 0.9、0.93、 0.93、0.93、 0.92、0.87、 0.93、0.9、 0.91、0.86、 0.87	≥0.6	T 0961
摆值 (BPN)	77、81、72、 82、83、82、 81、77、81、 82、83、77、 82、82、79	78、91、76、 82、77、75、 76、76、77、 81、72、77、 79、76、79	75、73、74、 76、75、74、 76、76、77、 78、77、75、 73、73、75	≥45	T 0964

根据上表可知，通车前后 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层的各项技术指标均满足要求。从抗滑指标来看，经过 24 年 11 月份、25 年 6 月份、25 年 12 月份的检测，CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层的构造深度和摆值整体上虽然存在一定的衰减，但衰减幅度较小，构造深度仅下降了 2.51%，摆值下降了 6.16%，反映了 CMCP- I 冷拌冷铺超薄磨耗层优良的耐磨耗性能。后续将继续开展跟踪观测，更为全面的评价冷拌冷铺超薄磨耗层技术的可行性和适用性。

CMCP- II 冷拌冷铺超薄磨耗层试验段于 2025 年 6 月完成铺筑，

铺筑完成后对路面技术指标进行了检测，各项技术指标均满足《公路沥青路面养护技术规范》（JTG 5142—2019）要求。CMCP-II 试验段通车后于 2025 年 12 月份对路面技术指标进行了跟踪观测，检测结果如表 32 所示：

表 32 CMCP-II 冷拌冷铺超薄磨耗层试验段路面技术状况检测结果

技术指标	检测结果		质量要求	检测方法
	6 月份	12 月份		
厚度 (mm)	10.2、10.4、 10.8、10.2、 10.1、10.3、 10.5、10.2、 10.3、10.4、 10.5、10.6、 10.3、10.3、10.2	10.3、10.2、 10.1、10.5、 10.1、10.4、 10.2、10.4、 10.5、10.2、 10.2、10.2、 10.4、10.5、10.3	≥ 10	T 0902
渗水系数 (mL/min)	3.2、0.0、6.8、 0.3、3.7、2.8、 3.9、6.0、3.7、 6.9、8.0、2.5、 2.2、7.7、4.1	0.0、4.1、0.0、 1.6、0.9、2.5、 2、5.5、6.5、 0.8、1.2、4.8、 3.3、1.5、1.9	≤ 10	T 0971
构造深度 (mm)	0.92、0.96、 0.89、0.95、 0.92、0.95、 0.96、0.92、 0.89、0.95、 0.96、0.93、 0.89、0.94、0.91	0.89、0.91、 0.92、0.92、 0.9、0.93、 0.93、0.93、 0.92、0.87、 0.93、0.9、 0.91、0.86、0.87	≥ 0.6	T 0961
摆值 (BPN)	77、81、72、 82、83、82、 81、77、81、 82、83、77、 82、82、79	75、73、74、 76、75、74、 76、76、77、 78、77、75、 73、73、75	≥ 45	T 0964

六、重大意见分歧的处理依据和结果

无。

七、实施标准的措施及建议

建议为推荐性标准。待本标准批准发布后，建议由标委会及交通行业主管部门组织相关生产、检验、施工、设计等有关单位进行宣贯。

八、知识产权说明

本标准无涉及的专利等相关知识产权。

九、其他应说明的事项

无。