

钢渣微表处应用技术规范

编制说明

2025 年 2 月

目 次

一、工作简况.....	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.....	1
三、主要起草过程.....	3
(一) 成立编制组、确定分工.....	3
(二) 收集资料.....	4
(三) 编制标准草案.....	6
(四) 调研及征求意见.....	6
四、编制原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系.....	7
(一) 编制原则.....	7
(二) 编制依据.....	7
(三) 与现行法律法规、标准的关系.....	8
五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述.....	8
(一) 主要条款说明.....	10
(二) 主要技术指标、参数、试验验证的论述.....	13
六、重大意见分歧的处理依据和结果.....	33
七、实施标准的措施及建议.....	33

八、知识产权说明.....	33
九、其他应说明的事项.....	33

《钢渣微表处应用技术规范》地方标准

编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

2024年5月16日，由宁夏交通建设股份有限公司申请地方标准的立项，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《钢渣微表处应用技术规范》地方标准的制订，结合实体工程需求的实际情况，编制《钢渣微表处应用技术规范》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：宁夏交通建设股份有限公司。

协作单位：宁夏交建交通科技研究院有限公司

宁夏公路管理中心

宁夏交投高速公路管理有限公司

宁夏大学

宁夏公路管理中心石嘴山分中心

（三）主要起草人及分工

1.3.1 起草人

惠迎新、门光誉、高宏广、徐新强、罗秉义、丁小平、倪静哲、董炜、张鑫、杨武、陈维斌、张晓星、韩方元、杨昊、聂静、杨宗林、胡晓亮、

张宏伟、李文涛、马铁飞、冀鹏举、李正武、岳通、吕慧杰。

1.3.2 分工

惠迎新负责标准的总体组织、策划、协调、编制等工作。

门光誉、高宏广、罗秉义、丁小平：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；

倪静哲、徐新强、董炜、张鑫、杨武、陈维斌：负责原材料及配合比设计等章节的编制工作；

徐新强、张晓星、韩方元、杨昊、聂静、杨宗林、胡晓亮、张宏伟：负责施工章节的编制工作；

李文涛、马铁飞、冀鹏举、李正武、岳通、吕慧杰：负责质量检验、验收与评定章节的编制工作；

徐新强、韩方元：负责对文稿进行修改整理工作。

二、制定(修订)标准的必要性和意义

钢渣作为宁夏地区主要工业固废之一，由于历史存量高、综合利用率低等原因，面临着无处可堆的困境。而且宁夏地区的钢渣在以约 60 万吨/年的速度持续增长，大量的钢渣堆积造成了严重的土地资源浪费和环境污染问题。同时，沥青路面在服役期内需要择机进行预防性养护以延长道路使用寿命，因此每年有大量的道路需要进行预防性养护，微表处技术作为一种较为常用的公路路面养护措施，具有提高路面抗滑性能、封闭路表水下渗、改善路面平整度、修复车辙等表面功能特点，还可以实现快速通车，是一种典型的绿色高效养护技术。

但是由于宁夏地区适用于微表处技术的优质集料缺乏，限制了微表处

技术在宁夏地区的应用和发展，使沥青路面预防性养护技术体系不完善。钢渣具有力学性能优异、表面纹理充分、与沥青黏附性好等特点，因此可应用于微表处技术，摆脱优质集料缺乏对微表处技术的限制，从而实现固废利用与道路绿色高效养护的双赢。

目前国内缺乏针对钢渣微表处技术的相关标准，现有路面养护的行业标准以及地方标准也只是对传统的微表处技术做了相关规定，无法对钢渣微表处技术的推广应用提供科学指导。因此，迫切需要从原材料性能控制、混合料设计、施工准备工作、工艺流程、施工安全与质量控制、验收与评定标准等全过程制定公路沥青路面钢渣微表处技术规范，从而推动钢渣微表处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，旨在总结提出一套涵盖原材料要求、混合料设计、施工准备工作、工艺流程、施工安全与质量控制、验收与评定等多方面内容的公路沥青路面钢渣微表处技术规范，拓展宁夏地区钢渣应用范围，提高钢渣综合利用率，减少优质筑路资源浪费，科学指导钢渣微表处技术在宁夏地区的推广应用。

本地方标准的制定，将使我区公路沥青路面钢渣微表处技术有规可循、有据可依，能够促进钢渣微表处技术在宁夏地区的标准化、绿色化发展，有力推动钢渣在宁夏地区公路行业的进一步高值化应用，为工业固废的资源化、高值化应用和公路沥青路面养护技术的发展提供新的路径，对服务宁夏地区交通基础设施建设高质量发展具有促进作用。

三、主要起草过程

（一）成立编制组、确定分工

地方标准项目任务下达后，宁夏交通建设股份有限公司联合***成立了标准编制组。

宁夏交通建设股份有限公司负责标准的总体组织、策划、协调、编制等工作，其他参编单位负责本标准的技术指标论证、工程验证等相关工作。

（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) 国家发展改革委、科技部、工业和信息化部、财政部、自然资源部、生态环境部、住房和城乡建设部、农业农村部、市场监管总局、国管局《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》

(10)《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）》

(11)《2021年全区一般工业固体废物资源综合利用工作方案》（宁节能资源办发〔2021〕1号）

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

2024 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。

2025 年 2 月，召开标准讨论会，《钢渣微表处应用技术规范（征求意见稿）》修改后形成标准征求意见稿，完成编制说明的编写。

(四) 调研及征求意见

2022 年 8 月，针对宁夏地区的钢渣分布及钢渣特性进行了调研，了解掌握宁夏地区的钢渣产量、分布以及特性。2023 年 5 月，针对宁夏地区微表处应用情况进行了调研，了解微表处技术在宁夏地区的适用性及推广应用过程中可能存在的特殊需求。2023 年下半年基于宁夏地区调研情况，对区外钢渣研究应用先进的地方和微表处技术应用经验丰富的地方进行了实地考察与交流。对钢渣微表处技术有了新的认识和充分了解。

目前已完成《钢渣微表处应用技术规范》（征求意见稿）和编制说明，可在自治区市场监督管理局网站上进行公开，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《钢渣微表处应用技

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

本技术规范采用以下行业及地方标准：

GB 3838	地表水环境质量标准
GB 6566	建筑材料放射性核素限量
GB 8978	污水综合排放标准
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
JTG F40	公路沥青路面施工技术规范
JTG H30	公路养护安全作业规程

JTG/T 5142-01 公路沥青路面预防养护技术规范

YB/T 4328 钢渣中游离氧化钙含量测定方法

（三）与现行法律法规、标准的关系

本标准在编制过程中对以下现行的标准规范进行了参考，下面就参考的各项标准规范进行说明。

目前，国内已发布微表处技术相关行业标准 3 项，但均无钢渣微表处技术相关内容。

2018 年 11 月 22 日交通运输部发布了 JTG 5421-2018《公路沥青路面养护设计规范》，对微表处技术的适用场景进行了明确说明。

2019 年 5 月 31 日交通运输部发布了 JTG 5142-2019《公路沥青路面养护技术规范》，对微表处技术的适用场景进行了进一步限定，从材料、组成、施工、质量控制及验收等方面对微表处技术作了详细说明。

2021 年 8 月 17 日交通运输部发布了推荐性标准 JTG/T 5142-01-2021《公路沥青路面预防养护技术规范》，在《公路沥青路面养护技术规范》的基础上对级配进行了进一步细化，区分了 A 级和 B 级微表处，还增加了 MS-4 型级配，A 级微表处中对改性乳化沥青的软化点、黏韧性、5℃延度等指标提出了更高的要求。

目前，各省、地区现行已发布、实施微表处技术相关地方标准 10 余项。

2017 年 12 月 25 日福建省质量技术监督局发布了 DB35/T 1721-2017《公路路面微表处设计与施工技术标准》，对公路路面微表处材料要求、混合料配合比设计、施工工艺、施工质量管理与检查等内容进行了规定。

这也是第一部对公路沥青路面微表处技术做详细叙述的地方标准，虽然在此之前公路沥青路面养护相关规范中对微表处技术也有所涉及，但篇幅较短，对材料、组成设计、施工工艺、质量控制、评价验收等未做专项规定，仍在沿用 JTGF40《公路沥青路面施工技术规范》及《微表处和稀浆封层技术指南》中的相关要求。

2018年5月30日陕西省质量技术监督局发布了 DB 61/T 1154-2018《沥青路面微表处设计与施工技术规范》，对陕西省各等级公路沥青路面采用微表处技术进行预防性养护的设计与施工做了详细要求。

2020年6月14日天津市市场监督管理委员会发布了 DB12/T 938-2020《沥青路面预防性养护技术规程》，从路面损害类型对微表处技术的适用场景进行了进一步细化，并将其工艺原理、技术特点及适合的病害类型进行了叙述。

2020年7月22日吉林省市场监督厅发布了 DB22/T 3145-2020《公路沥青路面纤维微表处设计施工技术指南》，将纤维引入了微表处技术之中，提出了纤维与改性乳化沥青粘附性评价方法。

2021年4月8日云南省市场监督管理局发布了 DB53/T 1024-2021《再生微表处施工技术规范》，增加了对沥青混合料回收料及添加沥青混合料回收料的再生微表处混合料的性能要求。

2021年9月30日湖北省市场监督管理局发布了 DB42/T 1765-2021《高速公路沥青路面预防养护技术规程》，对适用于微表处技术的水性环氧乳化沥青的技术指标作了说明，并明确了微表处技术的施工流程。

2021年10月15日内蒙古自治区市场监督管理局发布了 DB15/T

2430-2021《公路岩沥青微表处技术规范》，在常规微表处技术的基础上加入了岩沥青，并提出了双层、三层铺筑方式。

2022年7月18日湖南省市场监督管理局发布了 DB43/T 2367-2022《公路路面预防养护技术规范》，基本沿用了 JTG/T 5142-01-2021《公路沥青路面预防养护技术规范》的指标及要求。

此外，中国工程建设标准化协会于 2020 年 12 月 10 日发布了 T/CECS G:M53-02-2020《微表处技术规程》的团体标准，也从材料、组成设计、施工工艺、质量控制与验收等多个方面对微表处技术做了叙述和要求。

结合上述行业标准、地方标准以及团体标准来看，各地方标准均在行业标准和团体标准的基础上针对本地区的气候、交通状况等提出或改进了适用于当地的技术指标，并针对性地在材料或工艺上做了创新，但均未涉及钢渣微表处技术相关内容。

本地方标准的先进之处在于：充分考虑宁夏地区钢渣集料的材料特性，及其与传统石质集料的差异，结合宁夏地区气候环境、交通特征等因素，在钢渣集料评价、改性乳化沥青选用以及钢渣微表处设计、施工、质量控制与验收等方面进行创新，提出集原材料性能要求、混合料组成设计、施工工艺及质量控制、评价与验收的一整套钢渣微表处技术指标体系，为宁夏地区钢渣微表处技术在公路沥青路面预防养护中标准化、规范化应用提供技术保障和实践支撑。

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

本文件主要包括 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，钢渣微表处混合料设计，钢渣微表处施工，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章规定了钢渣微表处、钢渣集料、钢渣微表处混合料、浸水膨胀率、内照射指数、外照射指数、钢渣微表处混合料体积配比、钢渣微表处混合料质量配比等术语及其定义，并规定了钢渣微表处和拌合型改性乳化沥青的代号。

第4章规定了钢渣微表处混合料用原材料的技术要求，包括钢渣、碎石集料、改性乳化沥青、填料、水、纤维、添加剂等。其中需要对条款4.2.1、4.2.2、4.3.1及4.3.5作特别说明。

(1) 4.2.1：新排钢渣中存在大量的游离氧化钙（f-CaO）和氧化镁（f-MgO），f-CaO和 f-MgO 的水化反应易造成体积膨胀，因此需对钢渣进行处理，促进或诱导 f-CaO 和 f-MgO 发生水化反应，并加快 f-CaO 和 f-MgO 水化反应速率，使 f-CaO 和 f-MgO 充分消解，提升钢渣稳定性，降低体积膨胀风险。钢渣中的 f-CaO 等膨胀性组分可通过自然陈化、浸水等方式进行处理，从而改善钢渣的体积安定性。对比不同的预处理方式，发现自然陈化与洒水陈化预处理方式操作上较为简单，成本较为低廉，在预处理时间较为宽松的条件下最为适宜，具备大面积推广应用的前景。但是相比之下，自然陈化的方式不需要水的参与，只需自然堆放即可，而洒水陈化不仅需要消耗一定的水资源，还需要专有的人员和设备持续性地进行洒水。因此以自然陈化作为常规的预处理工艺，洒水陈化方式用于需加快陈化速

度的场景。

(2) 4.2.2: 对陈化 1 年的热闷法冷却转炉钢渣进行筛分, 发现粒径主要分布在 0~15mm, 大于 15mm 的不足 3%。其中 0~3mm 粒径的钢渣占比分布为 31~35%, 3~5mm 粒径的钢渣占比分布为 17~22%, 5-10mm 粒径的钢渣占比分布为 29~34%, 10-15mm 粒径的钢渣占比分布为 18~22%。对钢渣进行破碎一方面是为了将大于 15mm 的颗粒进行细化, 同时通过机械力的方式对钢渣表面的陈化产物进行揉搓; 另一方面是为了将钢渣粒形进行修整, 使其粒形更接近于立方体。然后通过筛分的方式将钢渣进行分档, 进而便于工程应用。水洗主要考虑两方面原因: 一方面是清洗钢渣集料, 减少钢渣中 0.075mm 以下颗粒含量; 另一方面, 钢渣陈化产物附着在钢渣表面, 在拌和过程中易形成钢渣-陈化产物-沥青的界面过渡区, 水洗前后钢渣集料与沥青的粘附性差异较大, 为保证沥青混合料的性能, 宜进行水洗处理。

(3) 4.3.1: 钢渣微表处混合料的层厚和普通微表处基本一致, 最粗的 SSMS-4 型微表处最大粒径也不超过 13.2mm, 因此所需的钢渣集料公称最大粒径为 10mm。而结合现行规范中的集料规格, 并考虑实际工程应用的便利性, 本规范将钢渣微表处用钢渣集料分为了 5~10mm、3~5mm、0~3mm 三档。

(4) 4.3.5: 对自治区内不同厂家的钢渣集料进行了试验分析, 经陈化处理后的钢渣压碎值的集中分布在 14%~20%之间, 洛杉矶磨耗集中分布在 16%~22%, 吸水率分布在 2.0%~2.7%, 与不同等级沥青的黏附性均集中在 5 级。因此在 JTG 5142 的基础上, 将压碎值与洛杉矶磨耗的

力学性能指标要求进行了一定程度提高，压碎值设定为了 $\leq 22\%$ ，洛杉矶磨耗损失设定为了 $\leq 26\%$ ，吸水率的指标放宽到 $\leq 3.0\%$ 。

第 5 章规定了钢渣微表处混合料的级配要求、混合料的技术要求及配合比设计方法。其中需要对条款 5.2.2 作特别说明，因为钢渣集料与碎石集料密度差异较大，钢渣集料毛体积相对密度约为 3.1~3.5，碎石集料毛体积相对密度约为 2.55~2.8。当采用钢渣与碎石进行合成级配时，若以各筛孔的质量通过率为依据，则会放大单档集料的粒径组成波动对整体级配的影响；而采用各筛孔的体积通过率为依据，可以使得同一配比下钢渣微表处混合料粒径组成基本一致。最后，为了在试验过程中以及实际应用过程中便于称重取料，完成级配设计后将体积配比再转化为质量配比进行应用。

第 6 章规定了钢渣微表处的施工工艺，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 6.1.4 作特别说明，即温度过低时以及雨天改性乳化沥青固化速度会延长，进而会影响微表处混合料的施工速度及最终成型后的工程质量；而大风天气会加快改性乳化沥青中水分的蒸发，使得改性乳化沥青快速破乳，提升了摊铺难度。

第 7 章规定了钢渣微表处的施工质量管理要求。

第 8 章规定了钢渣微表处的验收与评定。

(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，重点对钢渣微表处混合料原材料、钢渣微表处混合料配合比设计进行了试验验证。

1. 钢渣微表处混合料原材料

钢渣微表处混合料的原材料包括钢渣集料、碎石集料、改性乳化沥青、填料、水、纤维、添加剂等。将钢渣作为集料在微表处混合料中进行应用，需对钢渣的理化特性、力学指标、应用控制指标等进行规定。其他材料与 JTG 5142 中的规定相比未发生变化，因此此处仅对钢渣开展的相关试验验证数据进行说明。

(1) 钢渣预处理

①钢渣体积安定性不良的原因

钢渣是炼钢时产生的废弃渣，是转炉、电炉、精炼炉熔炼过程中排出的由金属原料中的杂质与助溶剂、炉衬形成的以硅酸盐、铁酸盐为主要成分的渣。受炼钢工艺、原材料种类及产地等多种因素的影响，不同钢厂的钢渣在成分上差别很大，即便是同一钢厂，不同批次或者同一批次不同部位的钢渣在成分上也存在差异。但对于绝大多数钢渣而言，主要组分可归结为钙、镁、硅、铁的氧化物。新排钢渣中存在大量的游离氧化钙（f-CaO）和氧化镁（f-MgO），而 f-CaO 及 MgO 的水解是造成钢渣膨胀粉化的潜在原因。钢渣的化学成分见表 1 所示。

表 1 钢渣化学成分表

灼烧 后灰 成分 分析	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃
	40.15	22.52	17.28	6.39	5.67	1.98	1.64	1.63	0.95
	V ₂ O ₅	CdO	Cl	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Co ₃ O ₄	SrO	Nb ₂ O ₅	其他
	0.65	0.40	0.33	0.17	0.11	0.06	0.04	0.02	0.03

从表 1 可知，钢渣主要化学成分包括 CaO、Fe₂O₃、SiO₂、MnO、MgO、Al₂O₃、P₂O₅、TiO₂ 等，其中 CaO 和 SiO₂ 占比分别为 40.2%和 17.3%，造

成钢渣具有较高的碱活性，大部分 CaO 以化合态的形式存在，极少部分游离态的 CaO 是造成钢渣不均匀膨胀的主要原因， f-CaO 遇水产生 Ca(OH)_2 体积膨胀 98% 左右。因此，需要对钢渣进行陈化处理。

②钢渣体积安定性技术指标

针对道路用钢渣，测试其 10d 浸水膨胀率是目前被广大研究人员较为认可的一种体积安定性评价方式，GB/T 25824《道路用钢渣》中也提出了浸水膨胀率不大于 2% 的要求。经研究发现，10d 浸水膨胀率对于道路用钢渣的安定性生产质量控制较为有效，10d 浸水膨胀率不超过 2% 的控制指标比较合理，基本上 10d 内浸水膨胀率不超过 2% 的钢渣，在 10d 后的膨胀也不显著，而 10d 的浸水膨胀率超过 2% 的钢渣，后期大多数样品膨胀不会收敛。

但是，使用浸水膨胀率指标评价钢渣体积安定性时时间周期较长，作为控制钢渣体积安定性的指标用于生产存在一定的局限性。而在 YB/T 4328《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》及 GB/T 24175《钢渣稳定性试验方法》中分别给出了 f-CaO 含量试验和压蒸粉化率试验两种快速评价方法，可用作钢渣体积安定性评价的快速方法。基于此，以陈化时间为变量，检测了不同陈化时间下钢渣的浸水膨胀率、游离氧化钙含量及压蒸粉化率三项指标。试验结果如图 1 所示。

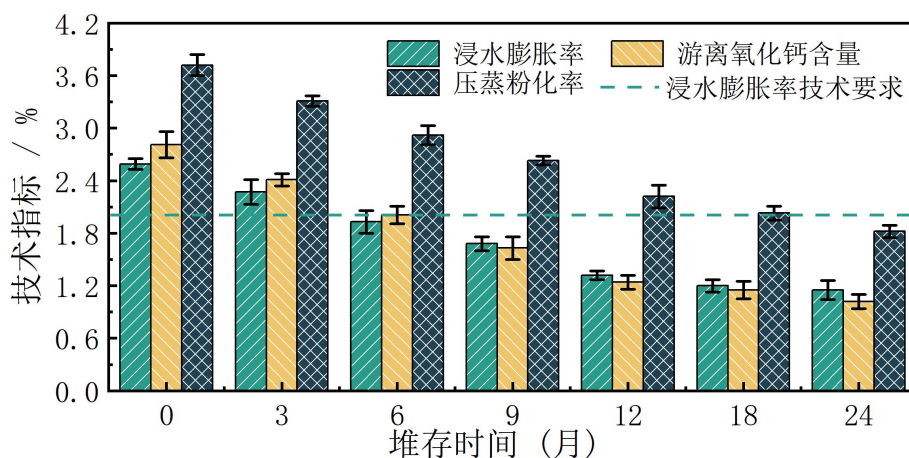


图 1 不同堆存时长的钢渣体积安定性试验结果

由图 1 可知：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。

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。结果如图 2 所示。

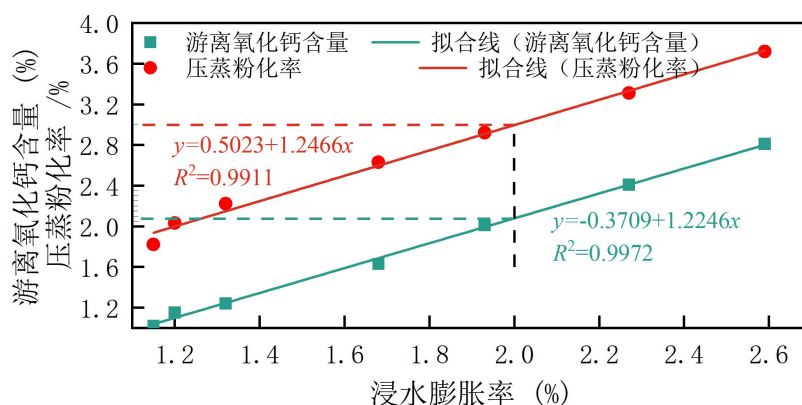


图 2 f-CaO 含量、压蒸粉化率与浸水膨胀率回归结果

由图 2 可知：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。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，确定 f-CaO 含量应不大于 2.0%，压蒸粉化率应不大于 3.0%。

③体积安定性预处理工艺

钢渣中的 f-CaO 等膨胀性组分可通过自然陈化、浸水等方式进行处理，从而改善钢渣的体积安定性。分别以自然陈化、常温浸水、60℃浸水的方式对新排钢渣进行预处理，并在不同的预处理时长下测定钢渣的体积安定性，试验结果如图 3~4。

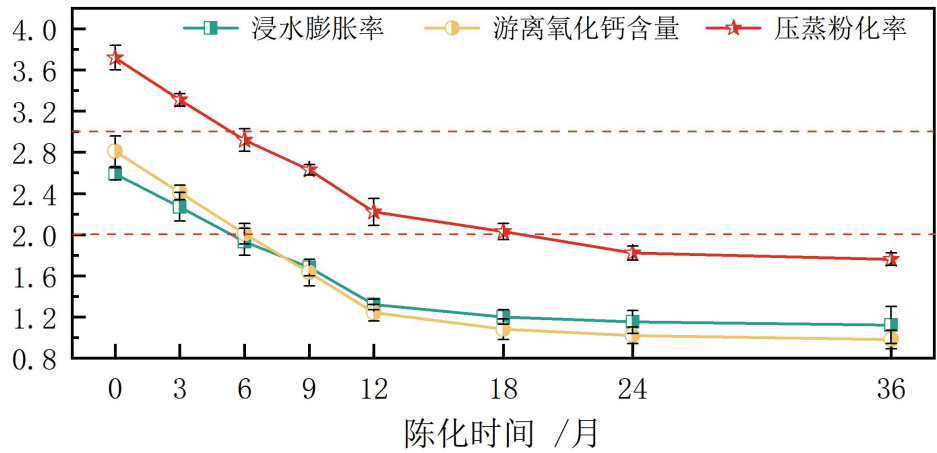


图 3 自然陈化方式下钢渣体积安定性指标变化

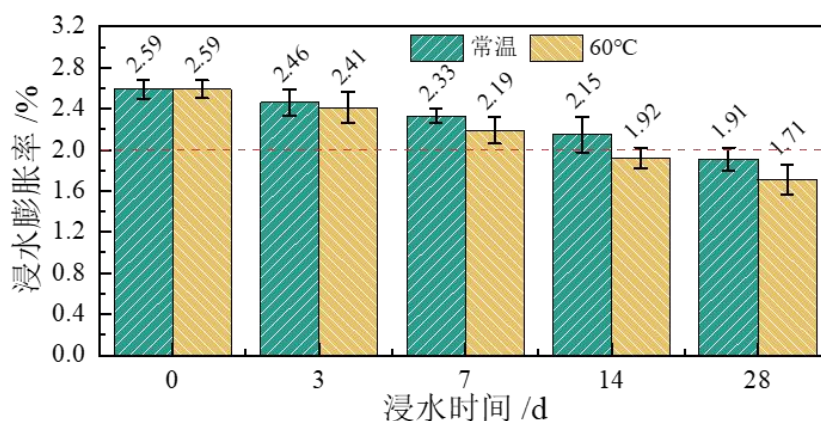


图 4 常温浸水和 60℃浸水方式下钢渣体积安定性指标变化

由图 3~4 可知：钢渣经自然陈化 6 个月以上、或常温浸水 28d 以上、或 60℃浸水 14d 以上才能满足路用要求。对比三种预处理方式，浸水预处理方式虽然处置时间较短，但需要水池等专用场地或很大容量的专用容器，不太适合大批量地对钢渣进行预处理，同时会造成大量的水资源浪费。60℃浸水的预处理方式由于需要加热，会产生较高的能耗，不符合我国实现“双碳”目标的重大战略决策。而自然陈化方式不需要专门的水池或容器，在场地选择上限制较小，同时也不用加热，能耗较低；但相对来说所需处置时间较长，需要长期占用大片土地进行堆存。因此，结合上述三种预处理方式的优点，提出了“自然陈化+洒水”的加速预处理方式。以不同的洒水量和洒水频率对新排钢渣进行洒水陈化预处理，并在不同的预处理时长下测定钢渣的体积安定性，试验结果如图 5。

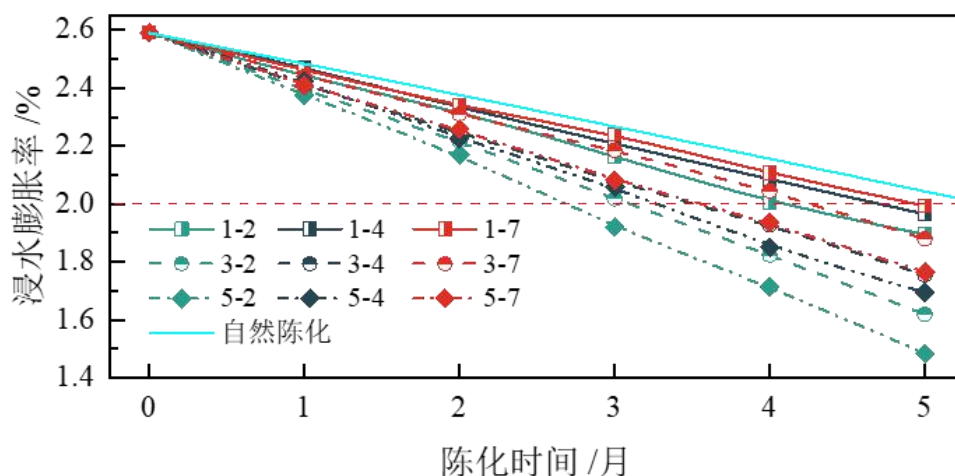


图 5 洒水陈化预处理方式下钢渣体积安定性指标变化
(注：图例表示不同工况，“-”前为洒水量，“-”后为洒水频率)

由图 5 可知：洒水陈化的预处理方式可加快钢渣中膨胀性组分的消解，进而改善钢渣的体积安定性。以 5% 的洒水量和 2d/次的洒水频率进行洒水陈化预处理时，所需陈化时间最短，为 2.7 个月，以 1% 的洒水量和 7d/次的洒水频率进行预处理所需陈化时间最长，为 4.9 个月。与自然陈化预处理方式下 6 个月的必需陈化时间相比，洒水陈化预处理方式在缩短处理时间方面具有一定的优势。

综合来看，自然陈化与洒水陈化预处理方式操作上较为简单，成本较为低廉，在预处理时间较为宽松的条件下最为适宜，具备大面积推广应用的前景。但是相比之下，自然陈化的方式不需要水的参与，只需自然堆放即可，而洒水陈化不仅需要消耗一定的水资源，还需要专有的人员和设备持续性地进行洒水。因此以自然陈化作为常规的预处理工艺，洒水陈化方式用于需加快陈化速度的场景。

④钢渣破碎、筛分、水洗预处理工艺

对自治区内不同来源、陈化时间 6 个月以上的钢渣进行筛分，对其粒径分布进行检测，检测结果如图 6~7 所示。

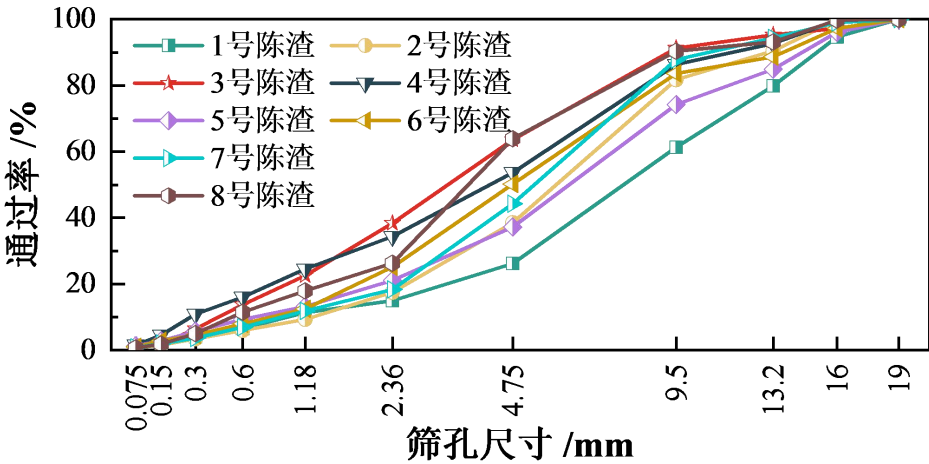


图 6 钢渣筛分曲线

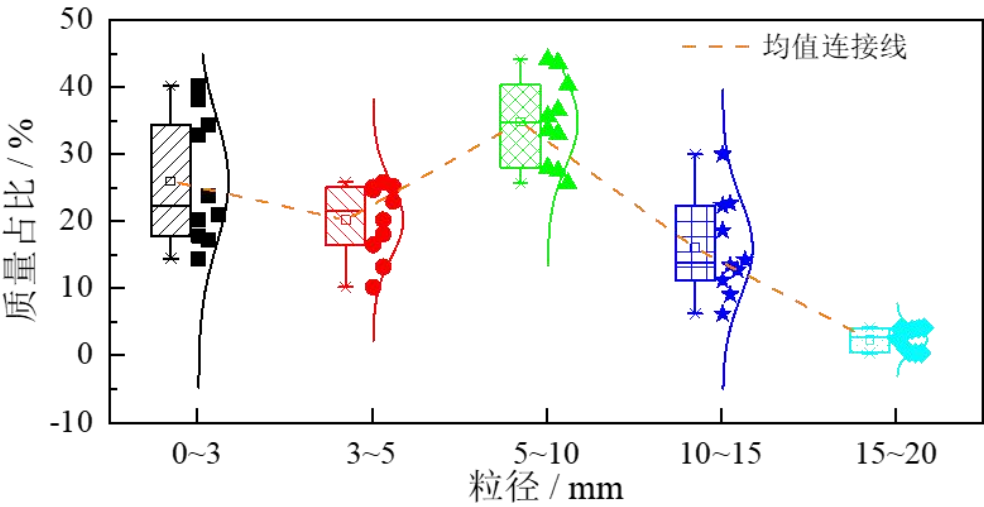


图 7 钢渣粒径分布

由图 6~7 可知：不同来源的陈化钢渣相同粒径下其分布差别比较大，其中 0mm~3mm 粒径的钢渣占比分布为 15%~40%，3mm~5mm 粒径的钢渣占比分布为 10%~25%，5mm~10mm 粒径的钢渣占比分布为 25%~45%，10-15mm 粒径的钢渣占比分布为 6%~30%。此外，钢渣粒径分布变异性较大，均匀性较差，以 15mm~20mm 的最为显著，5mm~10mm 变异性最

小。

因此，为便于应用，首先将超粒径颗粒的量进行筛除，然后结合工程经验将 0mm~15mm 范围内的钢渣按照 10mm~15mm、5mm~10mm、3mm~5mm、0mm~3mm 及 0mm~5mm 的方式进行分级应用。

水洗主要考虑两方面原因：一方面是清洗钢渣集料，减少 0.075mm 以下颗粒含量；另一方面，钢渣陈化产物附着在钢渣表面，在拌合过程中易形成钢渣—陈化产物—沥青界面过渡区，水洗骨料、未水洗骨料与沥青的粘附性差异较大，为保证沥青混合料的性能，宜进行水洗处理。水洗前后钢渣表面微观形貌变化如图 8 所示。

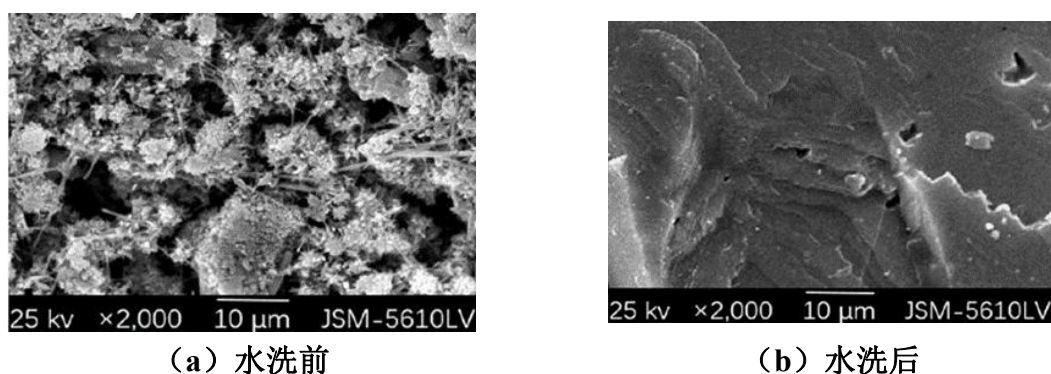


图 8 水洗前后钢渣表面微观形貌变化

由图 8 可知：水洗前钢渣表面有明显的粉尘和水化产物附着，会对钢渣与沥青之间的黏附性产生不利影响；水洗后钢渣表面完整性良好，钢渣可以与沥青形成良好的粘结。

综上，在将钢渣应用于沥青混合料之前，需要先通过陈化或洒水陈化的方式将钢渣中的膨胀性组分进行处理，使其体积安定性满足要求。然后对钢渣中超粒径的大颗粒进行破碎，并将所有按照工程粒径规格进行筛分，

得到满足粒径要求的不同规格钢渣集料；最后将钢渣进行水洗，去除钢渣集料表面粉尘、水化物等杂质，增强钢渣与沥青的黏附性。此外，由于钢渣吸水率较大，采用水洗处理后，使用前应对其进行翻拌、晾晒等措施，确保其含水率在适宜的范围。

（2）钢渣技术性能

钢渣作为工业固废的一种，将其作为道路建设材料应用于沥青混合料需要满足环保相关的规范要求，钢渣的环保风险主要来源于放射性危害和重金属浸出对土壤和地下水等的影响。因此需要结合 GB 6566《建筑材料放射性核素限量》、GB/T 14848《地下水质量标准》等规范的要求进行环保特性的检测，合格后方可应用于道路建设中。

对自治区内不同厂家的钢渣集料进行了试验分析，经陈化处理后的钢渣压碎值的集中分布在 14%~20%之间，洛杉矶磨耗集中分布在 16%~22%，表观相对密度分布在 2.98~3.60，吸水率分布在 2.0%~2.7%，与不同等级沥青的黏附性均集中分布在 5 级。因此在 JTG 5142 的基础上，将压碎值与洛杉矶磨耗的力学性能指标要求进行了一定程度提高，压碎值设定为了 $\leq 22\%$ ，洛杉矶磨耗损失设定为了 $\leq 26\%$ ，吸水率的指标放宽到 $\leq 3.0\%$ 。

2. 钢渣微表处混合料配合比设计

由于钢渣密度远大于碎石集料，作为集料在沥青混合料中进行应用时，需对其配合比设计方法进行调整。需要调整的内容为级配设计，其余操作步骤和注意事项与 JTG 5142《公路沥青路面养护技术规范》基本一致。

在进行配合比设计时，首先需确定出沥青混合料各档集料的级配曲线，然后以此为基础进行不同粒径集料的掺配。一般来说，在实际应用过程中都会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，但钢渣集料的密度是碎石集料的1.24~1.31倍，如果此时依旧忽略密度差异，继续采用质量法进行配料，则最后制备出来的混合料实际颗粒级配已经发生了改变，也就是说制备的混合料与设计的混合料级配不一致。当使用不同类型的集料替代其他集料时，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，在制备钢渣微表处混合料时，首先应按表2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2 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				
2				
3				
...	...	...	...	...
合计	100			100

基于上述体积-质量换算法，结合前期全部矿料以碎石集料制备微表处混合料时确定的配合比作为基准配合比，对不同替代方式下的钢渣微表处混合料的掺配比例进行设计并换算，换算过程及换算后的不同钢渣微表处混合料质量掺配比例如下表所示。

表 3 钢渣微表处混合料的掺配比例换算过程及质量比

集料类型		碎石 5~10mm	钢渣 5~10mm	碎石 3~5mm	钢渣 3~5mm	机制 砂	钢渣 0~3mm	矿 粉	钢渣 粉
体积 比	5~10mm	0	22	20	0	53	0	5	0
	3~5mm	22	0	0	20	53	0	5	0
	0~3mm	22	0	20	0	0	53	5	0
	钢渣粉	22	0	20	0	53	0	0	5
毛体积相对密度		2.673	3.268	2.583	3.307	2.662	2.987	2.655	3.312
质量 比	5~10mm	0.0	25.9	18.6	0.0	50.8	0.0	4.8	0.0
	3~5mm	21.1	0.0	0.0	23.7	50.5	0.0	4.8	0.0
	0~3mm	20.8	0.0	18.3	0.0	0.0	56.1	4.7	0.0
	钢渣粉	21.9	0.0	19.3	0.0	52.6	0.0	0.0	6.2

基于确定的各档集料掺配质量比及基准微表处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 6.5%，外加水量定为 4%，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钢渣微表处混合料，分别进行 1h 湿轮磨耗及负荷轮粘砂试验，试验结果如下表图所示。

表 4 不同钢渣微表处混合料的磨耗值及粘附砂量

油石比 (%)		5.5	6	6.5	7	7.5
磨耗值 (g/m ²)	5~10mm	524.81	407.66	357.13	309.61	260.56
	3~5mm	531.12	414.61	368.94	319.46	272.78
	0~3mm	497.83	376.33	327.07	278.38	225.64
	钢渣粉	549.33	429.67	383.89	333.16	282.76
粘附砂量 (g/m ²)	5~10mm	368.52	401.29	420.05	444.76	481.91
	3~5mm	364.83	401.8	421.68	442.08	483.65
	0~3mm	379.93	416.15	433.9	452.79	493.98
	钢渣粉	359.64	389.15	407.25	432.22	474.24

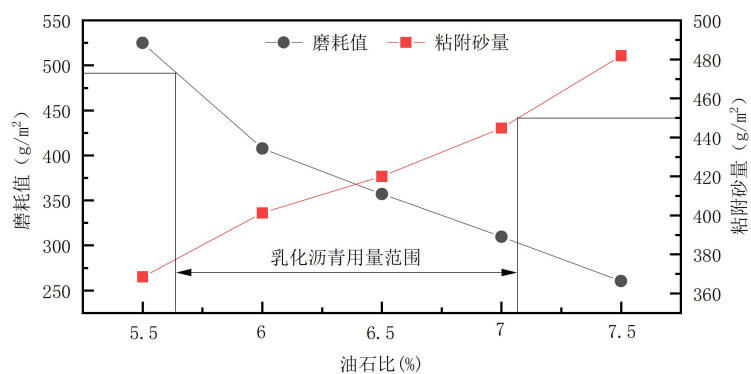


图 9 钢渣微表处最佳油石比确定曲线图 (5~10mm 钢渣替代碎石集料)

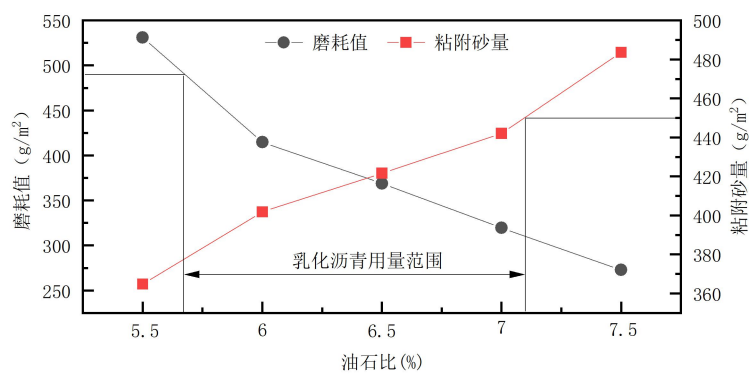


图 10 钢渣微表处最佳油石比确定曲线图 (3~5mm 钢渣替代碎石集料)

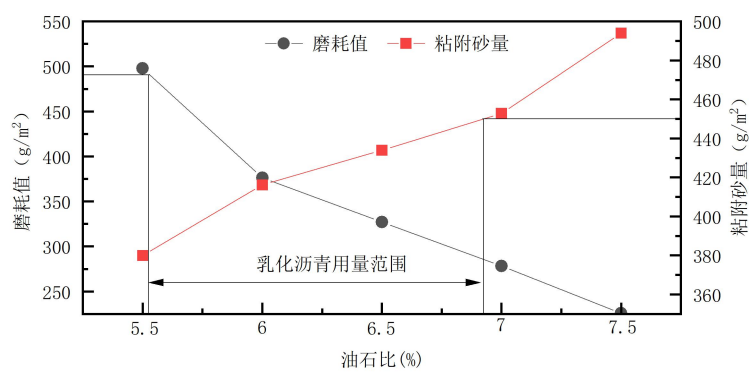


图 11 钢渣微表处最佳油石比确定曲线图 (0~3mm 钢渣替代碎石集料)

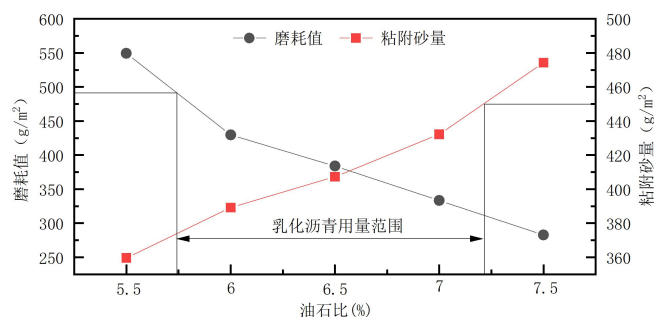


图 12 钢渣微表处最佳油石比确定曲线图（钢渣粉替代碎石集料）

结合基准微表处的最佳油石比确定曲线图，由上图可知：使用不同粒径的钢渣集料替代碎石集料后，钢渣微表处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微表处一致，即随着油石比的增加，钢渣微表处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 5.5%~6% 的油石比范围内湿轮磨耗值变化最大，在 7%~7.5% 油石比范围内粘附砂量变化最大。

根据上述不同钢渣微表处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。以此范围的中值作为最佳油石比，确定不同钢渣微表处混合料的油石比范围及最佳油石比如下表所示。

表 5 改性乳化沥青用量范围及最佳用量

混合料类型	油石比范围 (%)	最佳油石比 (%)
5~10mm	5.62~7.08	6.35
3~5mm	5.71~7.11	6.41
0~3mm	5.53~6.91	6.22
钢渣粉	5.75~7.22	6.49

根据确定的不同钢渣微表处混合料最佳改性乳化沥青用量，制备钢渣微表处混合料评价其耐磨耗性、水稳定性、早期强度、抗车辙性能和抗滑性能等路用性能。

表 6 不同钢渣微表处混合料最佳配合比下的耐磨耗性能

混合料类型	基准微表处	5~10mm	3~5mm	0~3mm	钢渣粉
改性乳化沥青用量 (%)	6.5	6.4	6.4	6.2	6.5
1h 湿轮磨耗值 (g/m ²)	389.54	364.82	372.11	369.21	383.89

表 7 不同钢渣微表处混合料最佳配合比下的水稳定性

混合料类型	基准微表处	5~10mm	3~5mm	0~3mm	钢渣粉
改性乳化沥青用量 (%)	6.5	6.4	6.4	6.2	6.5
6d 湿轮磨耗值 (g/m ²)	584.17	564.96	577.06	592.68	571.08

表 8 车辙变形试验结果

混合料类型	基准微表处	5~10mm	3~5mm	0~3mm	钢渣粉	技术要求
PLD (%)	4.07	3.34	3.88	3.12	3.95	≤5
PVD (%)	5.27	4.41	4.76	4.21	4.94	—

表 9 黏聚力试验结果

混合料类型	基准微表处	5~10mm	3~5mm	0~3mm	钢渣粉	技术要求
30min 黏聚力 (N·m)	1.5	1.7	1.7	1.8	1.6	≥1.2
60min 黏聚力 (N·m)	2.4	2.8	2.7	2.9	2.6	≥2.0

表 10 基准微表处及钢渣微表处抗滑性能

混合料类型	基准微表处	5~10mm	3~5mm	0~3mm	钢渣粉	技术要求
构造深度 (mm)	0.73	0.87	0.87	0.76	0.74	≥0.6
摆值 (BPN)	63	74	71	69	66	≥45

相比于基准微表处混合料,由不同粒径的钢渣集料替代同粒径碎石集料后,钢渣微表处混合料的耐磨耗性能、水稳定性、抗车辙性能及抗滑性能均有所提升。而从 6d 湿轮磨耗试验结果来看,在使用常规的改性乳化沥青条件下,从技术层面上不建议将 0~3mm 钢渣集料应用于钢渣微表处之中。

3. 钢渣微表处施工工艺及长期服役性能

(1) 试验段概况及配合比设计

依托 S312 线张平线开展了钢渣微表处试验段建设，试验段位于陆家堡子附近，起止桩号为 K5+000~K5+500，摊铺厚度 1cm。

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：5-10mm=5:50:22:23，合成级配曲线如下图。

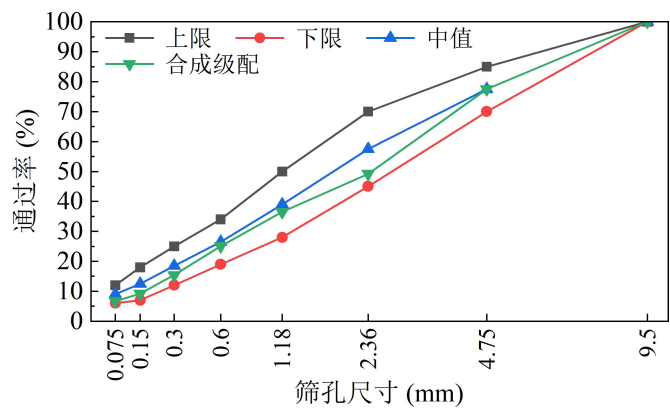


图 13 钢渣微表处级配曲线（5~10mm 钢渣替代碎石集料）

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 11 钢渣微表处混合料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/%	23	22	50	5
毛体积相对密度	3.205	3.107	2.662	2.716
质量比/%	25.5	23.7	46.1	4.7

基于上述级配设计结果及室内试验结果，初拟改性乳化沥青用量为 6.5%，外加水量为 4%，水泥用量定为 1.5%。以 0.5%调整油石比，制备不同钢渣掺量下的钢渣微表处混合料，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 12 不同钢渣掺量下的钢渣微表处混合料的 1h 磨耗值及粘砂量

改性乳化沥青用量 (%)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
磨耗值 (g/m ²)	539.3	425.1	342.3	296.5	251.1
粘附砂量 (g/m ²)	347.2	413.3	432.8	461.1	502.3

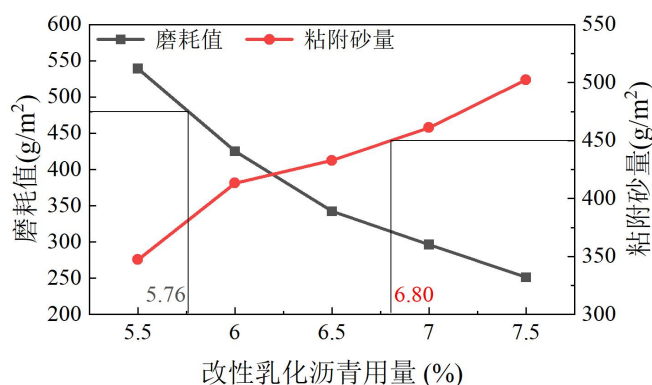


图 14 钢渣微表处最佳油石比确定曲线图（20%钢渣替代）

基于上述试验结果，确定钢渣微表处满足规范要求的改性乳化沥青用量范围为 5.76%~6.80%。取该范围中值 6.28%作为改性乳化沥青掺量开展钢渣微表处混合料各项性能指标验证，试验结果如下表所示。

表 13 钢渣微表处混合料技术性能

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)	357.4	≤480	T 0752
6d 湿轮磨耗值 (g/m ²)	536.2	≤680	T 0752
PLD (%)	3.28	≤5	T 0756
PVD (%)	4.10	—	T 0756
粘附砂量 (g/m ²)	428.1	≤450	T 0755
30min 黏聚力 (N·m)	1.7	≥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)	79	≥45	T 0964

基于上述试验结果确定用于施工的钢渣微表处配合比为：5~10mm 钢渣：3~5mm 钢渣：0~3mm 机制砂：矿粉=23:22:50:5，油石比为 6.28%，水泥产量为 1.5%，外加水量初定为 4%，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) 钢渣微表处施工

①试拌：按确定的配合比进行试拌，检查混合料的流动性和和易性，对用水量进行调整。

②交通管制：微表处施工会占用路幅，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，钢渣微表处施工前，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原路面处理：为了保证钢渣微表处层与原路面的良好黏结，将原路面上的松散材料、泥、杂草、垃圾等一切杂物进行了清除。然后对于路面的裂缝、车辙、推移、拥包等病害进行了修补。

④摊铺作业

a.检查摊铺机设备，确保处于良好工作状态。

b.按设计配合比进行计算，将运输到位的各种材料按配合比要求倒入摊铺车内，进行改性乳化沥青混合料的拌合，根据实际情况中的气候条件和施工工艺，可以适当调整外掺水量。

c.调整摊铺机出料速率和出料量，拌合速度应与出料速度进行协调，保证在摊铺过程中摊铺作业不中断；快速开放交通时摊铺槽应保持 $1/2$ 容积料量，慢速开放交通时摊铺槽应保持 $1/2 \sim 2/3$ 容积的料量。

d.开动摊铺机匀速前进，并对摊铺后的路面进行洒水保湿。

e.对于摊铺在原始路面上的微表处改性乳化沥青混合料，其中局部不达标，如漏铺或铺筑厚度不足等区域用橡胶刮板、拖布、铲子等工具进行

人工修补，使之达到铺筑标准；并且修补侧边线纵横向接缝等处。

f.完成摊铺后，摊铺机应停止前进，提起摊铺槽，移至路侧进行清理。施工废弃物应收集装入废料车，不得随意抛掷。

g.钢渣微表处摊铺后，可使用 6t~10t 轮胎压路机进行碾压。碾压时机应选择在微表处混合料已破乳并初步成型之后。

h.摊铺完成后，立即进行初期养护，以保持水分，避免混合料干燥过快。初期养护后，使用洒水车均匀洒水养护，保持混合料湿润。在开放交通前应严禁车辆和行人通行，根据环境温度和湿度情况，适当延长养护时间。在达到开放交通的标准时应尽快开放交通。

(3) 施工质量控制

根据本试验段确定的配合比，在施工过程中对钢渣微表处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 & 检测结果如下表所示。其中钢渣微表处混合料的稠度用以下方式进行检测：一是用直径约 10mm 的木棍在微表处表面划出一道痕迹，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 14 钢渣微表处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 $\pm 0.2\%$	5.43%	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	$\leq 480\text{g/m}^2$	362.1g/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 $\pm$ 50mm	满足	尺量法

(4) 长期服役性能检测

钢渣微表处试验段于 2024 年 8 月中旬完成铺筑，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。在通车 3 个月后于 2024 年 11 月下旬对路面技术指标进行了跟踪观测，两次检测结果如下表所示。

表 15 钢渣微表处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
	8 月份	11 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、	75、73、74、76、	≥ 45	T 0964

	83、82、81、77、 81、82、83、77、 82、82、79	75、74、76、76、 77、78、77、75、 73、73、75		
--	--	--	--	--

根据上表可知，通车前后钢渣微表处的各项技术指标均满足要求。从抗滑指标来看，经过 3 个月的车辆运行之后，钢渣微表处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%，反映了钢渣微表处优良的耐磨耗性能。后续将继续开展跟踪观测，更为全面的评价钢渣微表处技术的可行性和适用性。

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

建议审批发布为推荐性标准。

八、知识产权说明

本标准依托宁夏回族自治区科学技术厅重点研发项目《宁夏地区钢渣全粒度资源化道路应用关键技术研究》（2022BEG02009）开展了关键条款的验证。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