

新疆钢渣在水稳基层中的试验应用研究

陈伟^{1,2}, 俞海明³, 李倩^{4*}, 黄勇¹, 斯毅^{1,2}

(1.新疆交通建设集团股份有限公司,新疆 乌鲁木齐 830016;2.新疆交建公路规划勘察设计有限公司,新疆 乌鲁木齐 830016;
3.新疆中合大正冶金科技有限公司,新疆 乌鲁木齐 830022;4.新疆农业职业技术学院,新疆 昌吉 830000)

摘要:通过对新疆钢渣在水稳基层中的试验研究,分析钢渣的理化特点,并对不同水泥剂量(4%、5%)和钢渣掺量(30%、40%、60%)的水稳钢渣砾石混合料无侧限抗压强度、劈裂强度和干缩性能进行分析。由试验结果知钢渣可作为良好的工程集料应用于水稳基层中,并且随着钢渣的掺入,钢渣砾石混合料的无侧限抗压强度和劈裂强度都有不同程度的提高,同时干缩变形也随着钢渣掺入比例的增加而减小,说明钢渣对水泥稳定基层干缩变形存在补偿效应。结合工程应用提出EDTA修正公式: $V = V_1 - V_2 - V_3 \times P$,可精准检测水泥拌和用量,分析得出在基层中掺入钢渣具有一定经济效益。

关键词:钢渣;水稳基层;强度;工程应用

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

根据调查,中国钢渣处理方式长期以堆存为主,在建筑业中钢渣循环利用率只有4%,而俄罗斯、美国钢渣再利用作为筑路材料占35%~38%,日本和德国占23%^[1],近年来钢渣增加对社会环境的影响进一步加剧,特别是绿色发展理念的实施,对建设发展提出了更高的要求,一些学者结合钢渣循环应用开展了大量科研工作。许多学者^[2-7]对钢渣作为道路基层材料和工程应用进行了研究;刘汝嘉^[8]对3种不同掺量比例的水稳钢渣碎石基层混合料进行配合比设计,通过试验可知:随着钢渣掺量比例的提高,无侧限抗压强度和抗压回弹模量呈降低趋势,钢渣掺量对劈裂强度影响不大;黄浩^[9]通过掺入SiO₂粉体研究了未陈化钢渣水泥稳定碎石基层的体积稳定性,试验得到在硅灰掺量0.5%条件下可减少91%的体积变形。

本文选用新疆具有代表性的宝钢集团新疆八一

钢铁有限公司(以下简称“八钢”)所产钢渣进行试验,近年来八钢钢渣逐年增加,年产量已突破100万t,在其内部已堆积如山。通过调研和基础试验,发现其力学指标、颗粒形状、物理性能均较好,为潜在的路面工程材料,若将其循环利用对新疆公路建设具有重要意义。

1 钢渣性能分析

1.1 钢渣物理性能分析

八钢生产钢渣采用热闷工艺,与其他工艺相比可使钢渣工程粒度普遍处于30 mm以下(表1),可满足现行规范对集料规格的要求。从表1可看出:钢渣颗粒粒径多分布于5~10 mm和10~15 mm,4.75~16.0 mm筛孔含量为48%,级配设计中可取代同粒径的砾石用于水稳基层,并与其他砾石和细集料掺配形成良好级配。表2为不同地区钢渣物理指标^[10-11],综合比较可看出,八钢钢渣在压碎值和吸水率指标上与其他地区钢渣差异不大或更优异,而表观密度

收稿日期:2022-05-17(修改稿)

基金项目:新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目(编号:2019-ZD1-003);新疆维吾尔自治区科技厅天山青年计划人才项目(编号:2020Q136)

作者简介:陈伟,男,硕士,工程师.E-mail:990147070@qq.com

*通信作者:李倩,女,硕士,讲师.E-mail:365424889@qq.com

表1 钢渣颗粒组成分析

材料	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
钢渣颗粒	96.2	91.1	86.5	79.7	68.3	38.5	19.4	12.8	8.2	5.3	3.7	1.8

表2 钢渣物理指标

钢渣来源	压碎值/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)	毛体积密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/ %
八钢	15.1	2.947	2.786	1.50
云南安宁	21.6	3.136	—	6.96
南京(南钢)	11.5	3.526	3.274	2.11
武汉(武钢)	13.2	3.390	3.250	2.80

和毛体积密度显著小于其他地区,主要原因为八钢在磁选工艺中较为充分,钢渣中铁元素回收率较高,使其密度与一般砾石接近或略大一些。

1.2 钢渣化学成分分析

对近年八钢新产钢渣,随机选取不同批次做元素检测。检测结果见表3。

表3 钢渣主要化学成分分析

年份/ 年	化学成分/%						
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	f-CaO
2015	13.23	20.05	7.43	40.88	7.96	2.01	2.03
2016	12.46	20.86	2.47	39.31	8.58	1.89	2.18
2017	13.22	21.18	6.11	45.33	8.71	2.20	1.80
2018	12.40	22.15	4.35	43.39	9.34	2.11	2.05
2019	16.14	21.62	4.89	42.23	5.06	1.82	1.58
2020	14.05	21.72	3.10	41.62	7.32	4.13	0.91

由表3可看出:八钢热闷工艺较为成熟,钢渣化学成分稳定,无明显波动性,使得钢渣物理性能较为稳定。在化学成分中,CaO成分较高,根据有关学者提出的碱度M计算公式及钢渣碱度划分(高度碱 $M>2.5$ 、中度碱 $M=1.8\sim 2.5$ 、低度碱 $M<1.8$),发现本文所研究的钢渣碱度 $M=2.84>2.5$,材料特性为高碱性集料,自身存在一定活性,有益于提升水稳基层的强度。

1.3 钢渣稳定性分析

在高温作用下,钢渣中存在部分对体积稳定性影响较大的f-CaO,其遇水反应后会使得固体体积变大,造成内部损坏隐患^[12-15]。从表3可看到八钢钢渣f-CaO成分为2%左右,并且随着生产工艺日渐完

善,新出钢渣f-CaO呈递减趋势,可达1%左右。图1为不同材料膨胀量试验结果。

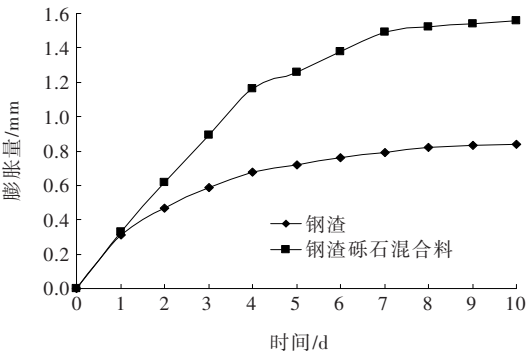


图1 不同材料膨胀量试验结果

从10 d膨胀量变化趋势(图1)可看出:钢渣与砾石复配混合料约为纯钢渣膨胀量的2倍,说明八钢钢渣稳定性良好,并且在骨架密实型级配中,钢渣颗粒内部的闭口孔隙和外部开口孔隙与砾石相比较多,上述孔隙可吸收部分膨胀的体积,就稳定性而言钢渣明显优于钢渣砾石混合料。

2 水稳钢渣砾石混合料试验方案

本次试验细集料选用天然砂,粗集料根据钢渣与砾石粒径分布,结合《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中C-B-3级配范围要求,设计3种钢渣与砾石不同比例的级配(表4),水泥剂量分别为4%和5%时通过重型击实试验得到最佳含水量和最大干密度(表5),在此基础上进行水稳钢渣砾石混合料性能分析。

表4 不同钢渣砾石掺量级配

钢渣:砾石	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
30:70	100	72.3	41.4	31.0	20.2	10.6	2.6
40:60	100	85.7	52.2	25.9	17.7	10.7	0.7
60:40	100	75.5	49.0	28.9	17.2	8.8	1.3
规范要求	100	68~86	38~58	22~32	16~28	8~15	0~3

表 5 不同钢渣掺量击实试验结果

钢渣掺量/%	4% 水泥剂量		5% 水泥剂量	
	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水 量/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水 量/%
30	2.470	4.6	2.490	5.0
40	2.503	4.7	2.532	5.3
60	2.535	4.9	2.581	5.7

3 水稳钢渣砾石基层性能分析

3.1 无侧限抗压强度分析

水泥稳定基层在相同级配结构下强度主要影响因素为水泥掺量。不同水泥掺量下水泥稳定钢渣砾石混合料无侧限抗压强度结果见图 2。

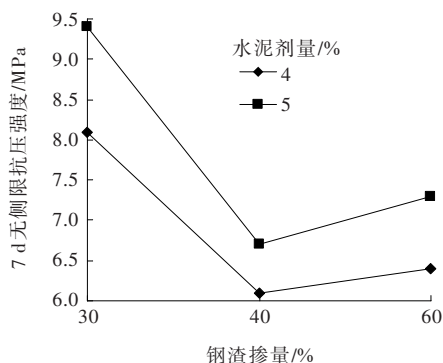
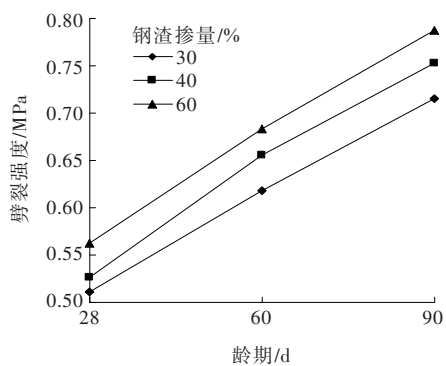


图 2 水泥稳定钢渣砾石混合料无侧限抗压结果

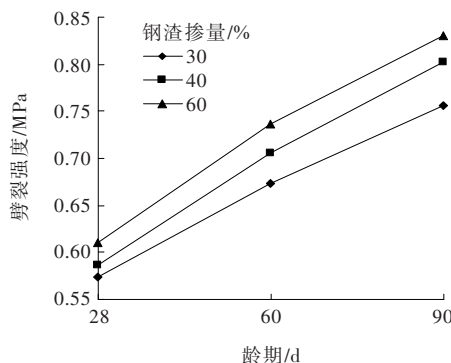
从图 2 可以看出:不同水泥剂量下,7 d 无侧限抗压强度均表现出钢渣掺量 30% 时强度最高,钢渣掺量 60% 次之,强度最低的为钢渣掺量 40%。在水泥剂量相同时,钢渣掺量为 40% 前,随着钢渣占比的提高强度基本呈递减规律,这与钢渣自身表面粗糙不闭合开孔有很大关系。由于钢渣掺量增加,会使水泥更多地附着于不闭合的开孔中,分散在颗粒表面的水泥则变少。钢渣掺量 60% 时强度略有提高,主要是八钢钢渣为碱性集料并存在活性,可与水反应形成 C—S—H 等胶凝物质,可使混合料强度得到部分提升。但水泥稳定基层强度形成主要是水泥起主导作用,如果水泥过多被吸附,混合料的强度反而会降低^[16-18]。

3.2 劈裂强度分析

水稳基层破坏关键原因是抗弯拉强度小于上部荷载所施加作用力,因此抗弯拉强度是基层设计中的重要控制指标,试验中以劈裂强度表示。不同龄期水稳钢渣砾石混合料劈裂强度试验结果见图 3。



(a) 水泥剂量 4%



(b) 水泥剂量 5%

图 3 水泥稳定钢渣砾石混合料劈裂强度

由图 3 可以看出:不同水泥剂量下,伴随钢渣掺入比例的提高劈裂强度呈增长趋势,并且随着龄期的增长不同钢渣掺量的混合料劈裂强度增长较大。劈裂强度增加的主要原因是八钢钢渣属于高度碱性材料,本身具有水化胶凝作用。从颗粒外观分析,钢渣具有与碎石一样的多面体,与新疆水稳基层中常用砾石相比更易形成挤嵌结构,随着钢渣掺量的增加,挤嵌作用越显著,从结构稳定性上表现出较好的劈裂强度。

3.3 干缩性能分析

新疆地处亚洲腹地,气候环境除山区以外主要表现为高温、干旱,因此新疆区域内公路常见病害为路面裂缝,主要原因为水稳基层受胶凝材料水化后干缩造成的裂缝并持续延伸到沥青层。在钢渣稳定性分析中,钢渣砾石混合料具有一定的膨胀性,在此基础上通过干缩试验实测了水稳钢渣砾石混合料 90 d 干缩变化,试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知:① 不同钢渣掺量和水泥剂量条件下,水泥稳定钢渣砾石混合料与常规水稳基层干缩变化趋势一致,均为初始阶段干缩变形很大,随着龄

期增加后期逐渐平缓^[19];② 除个别龄期外,不同水泥剂量下钢渣掺量为60%时干缩变形最小,说明钢渣比例越大对混合料的干缩变形影响越大,这与钢渣具有少量游离氧化钙有关,同时也说明钢渣中f-CaO

的膨胀作用在一定范围内可改善水稳钢渣砾石基层的干缩性能,借助钢渣遇水产生的微膨胀作用可对干缩应变进行补偿,减缓路面裂缝的产生。

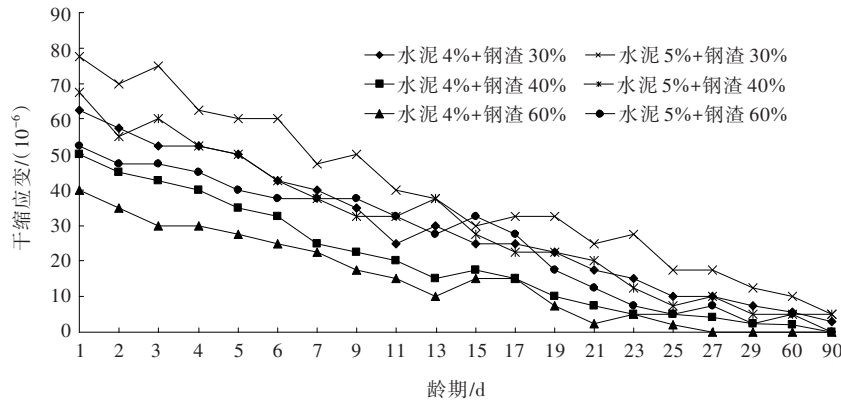


图4 水泥稳定钢渣砾石混合料干缩变化趋势

4 工程应用分析

钢渣应用依托连(连云港)霍(霍尔果斯)高速公路G30新疆境内乌鲁木齐至奎屯改扩建项目,施工控制指标按照《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)执行。本文根据钢渣特性,在应用中进行EDTA溶液滴定结果修正。

4.1 EDTA修正

钢渣中除含有表3中化学成分外,部分学者通过XRD分析发现钢渣中存在与水泥熟料成分一样的硅酸二钙、硅酸三钙等物质^[20],这些物质在进行水泥剂量EDTA溶液滴定时会使实测数据偏大,造成水泥用量增加的假象。工程应用中发现,随着钢渣掺量的增加,这种被钢渣消耗的EDTA溶液随之增大,最大可达1.5%~2.0%,导致质量控制人员造成误判,从而降低配合比中水泥的拌和用量。因此,本文首次对水泥稳定钢渣砾石混合料提出EDTA修正,即按照标准EDTA滴定方法,测得所用钢渣对EDTA溶液的消耗量;其次,按照上述方法测得水泥稳定钢渣砾石混合料对EDTA溶液的消耗量,根据消耗量绘制标准曲线;最后在所绘制的标准曲线中减去钢渣对EDTA溶液的消耗量,所得结果即为实际拌和的水泥掺量,修正公式为:

$$V=V_1-V_2-V_3\times P$$

式中:V为EDTA标准溶液实际消耗量(mL);V₁、V₂

分别为水泥稳定钢渣砾石混合料未滴定前与滴定终止时滴定管中EDTA标准溶液的体积(mL);V₃为钢渣对EDTA标准溶液的消耗量(mL);P为水泥稳定钢渣砾石混合料中钢渣的掺量(%)。

4.2 经济效益分析

结合依托项目情况,测得水稳砾石混合料压实密度为2.35 g/cm³,水泥稳定钢渣砾石混合料压实密度为2.41 g/cm³,钢渣掺量为30%,砾石和细集料为自采,各种集料根据配合比单价见表6。钢渣的应用较水稳砾石基层而言,以压实方计算,每方可节约10.49元,每公里可节约造价为37.5 m×0.52 m×1 000 m×10.49元/m³=20.46万元,若项目购买成品集料市场价格会更高,节约成本效益会更加显著。

表6 水稳钢渣砾石基层级配和原材料综合成本

规格/ mm	单价/ (元·t ⁻¹)	水稳砾石		水稳钢渣	
		配合比	成本/ (元·t ⁻¹)	配合比	成本/ (元·t ⁻¹)
0.00~4.75	32.19	0.35	11.27	0.25	8.04
4.75~9.50	32.19	0.08	2.57	0.05	1.61
9.50~13.20	32.19	0.16	5.15	0.11	3.54
13.20~19.00	32.19	0.19	6.12	0.14	4.51
19.00~31.50	32.19	0.22	7.08	0.15	4.83
钢渣	15.03	—	—	0.30	4.51
合计		—	32.19	—	27.04
压实方成本/(元·m ⁻³)			75.65		65.16
节约成本/(元·m ⁻³)					10.49

5 结 论

通过对钢渣物理性能、水泥稳定钢渣砾石混合料性能和工程技术应用控制指标进行分析,可为新疆范围内钢渣在公路建设中的循环利用提供参考。主要结论如下:

(1) 新疆八钢钢渣因其热闷处理工艺,颗粒多分布于 5~10 mm 和 10~15 mm,力学指标良好,并且密度在同领域偏小,稍大于砾石密度;化学指标中 f-CaO 含量较小,属于碱性集料,膨胀试验显示钢渣安定性良好,可作为优良的水稳基层材料。

(2) 钢渣掺量为 30% 时,无侧限抗压强度最优,可为工程应用提供参考。在不同水泥剂量下随着钢渣掺入比例的提高劈裂强度呈增长趋势,这主要因为钢渣为碱性集料,且外观与碎石一致,可形成较好的挤嵌结构,对劈裂强度有一定影响。干缩指标中,随着钢渣掺量的增加,混合料的干缩变形降低,借助游离氧化钙遇水膨胀作用,说明钢渣可对干缩形变进行补偿,减缓路面裂缝的产生。

(3) 工程应用中首次提出 EDTA 修正指标和修正公式,可避免水泥用量增加的假象,从而降低配合比掺量,钢渣在水稳基层的应用可参考该方法进行水泥剂量精准检测。

(4) 钢渣作为潜在工程集料,工程性能表现良好,同时具有良好的经济价值,在新疆范围内可作为筑路资源进行推广应用,加大固废循环利用率。

参考文献:

- [1] 周启伟.公路钢渣基层与钢渣沥青混合料路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [2] 刘玉民,王兰,王玉.钢渣混合料用作道路基层材料工程应用研究[J].中外公路,2018,38(5):209-213.
- [3] 毛志刚,蓝天助,张红日,等.钢渣特性及在道路工程中的应用研究[J].中外公路,2019,39(5):233-236.
- [4] 申爱琴,陈祥,郭寅川,等.基于灰靶决策理论的钢渣沥青混合料路用性能评价[J].硅酸盐通报,2019,38(4):1245-1252.
- [5] 沈凡,庞若楠,韦国苏,等.掺钢渣再生沥青混凝土的制备及路用性能研究[J].中外公路,2020,40(3):231-237.
- [6] 金年生.钢渣骨料沥青混合料路用性能研究[J].公路交通技术,2019,35(1):18-23.
- [7] 谢勇,张逸圣,辛顺超.基于钢渣骨料的沥青混合料路用性能研究[J].公路,2014,59(12):186-190.
- [8] 刘汝嘉.沥青路面水泥稳定钢渣碎石基层路用性能研究[J].黑龙江交通科技,2019,42(1):16-17,19.
- [9] 黄浩.未陈化钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D].西安:长安大学,2018.
- [10] 牛哲.钢渣沥青混合料的制备与性能研究[D].南京:东南大学,2016.
- [11] 李轩.钢渣在沥青稳定碎石中的应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [12] 秦林清.陈化对钢渣及其沥青混凝土的体积和水稳定性影响研究[J].中外公路,2019,39(6):264-270.
- [13] 郭鸥,张红日,蓝天助等.基于正交设计的钢渣黏土承载比试验研究[J].中外公路,2022,42(3):231-235.
- [14] 吴少鹏,崔培德,谢君,等.钢渣集料膨胀抑制方法及混合料体积稳定性研究现状[J].中国公路学报,2021,34(10):166-179.
- [15] 张彩利,王超,李松,等.钢渣沥青混合料水稳定性研究[J].硅酸盐通报,2021,40(1):207-214.
- [16] 吴军.水泥稳定钢渣碎石混合料力学性能发展规律研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(7):152-154.
- [17] 黄优,刘朝晖,柳力,等.钢渣-水泥稳定碎石性能及环境影响试验[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):43-53.
- [18] 梁铎,温永钢,杨超,等.钢渣在水泥稳定碎石基层中的工程应用研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(2):250-254.
- [19] 徐晓云.钢渣稳定土的干缩性能研究[J].中外公路,2018,38(4):319-322.
- [20] 郑武西.钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D].西安:长安大学,2018.