

钢渣对半刚性基层力学强度及稳定性影响分析

杨芙蓉¹, 武旭^{2*}, 杨小森², 张富奎², 魏定邦², 赵静卓², 王晖², 张军林², 任国斌²

(1. 甘肃省交通工程质量监督管理局, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司 甘肃省公路养护技术创新中心)

摘要:为促进工业固废钢渣在道路工程中的再生利用,对钢渣经过二次加工形成再生骨料应用于半刚性基层水泥稳定材料中,通过分析钢渣对水泥稳定材料的无侧限抗压强度、抗弯拉强度和干缩特性影响,定量评价钢渣的再生利用效果。结果表明:随着钢渣掺量增大,水泥稳定材料的强度逐渐增大,当掺量增大至70%,无侧限抗压强度提升1.4倍,抗弯拉强度提升1.8倍;水泥稳定钢渣碎石混合料的每日干缩应变随时间变化逐渐减小,累计干缩应变随时间变化先快速增大后趋向稳定,其中以前5d的干缩应变变化最为明显,120d后干缩应变基本稳定。对于4种不同性质的钢渣,钢渣掺量为50%达到稳定状态时,最大补偿收缩率为37.7%,最小为25.5%。钢渣陈化时间越长,膨胀性越小,则补偿收缩率越小。钢渣掺量越大,补偿收缩率增大,当钢渣掺量增大至70%,可补偿收缩40.1%。在水泥稳定材料中掺入钢渣,将对干燥收缩起到良好的补偿作用,对减小半刚性基层的开裂起到了积极作用。

关键词:钢渣;水泥稳定碎石混合料;抗压强度;抗弯拉强度;干缩应变;补偿收缩率

1 前言

水泥稳定类半刚性基层是中国高等级公路通用的基层形式,作为路面承重层,其力学性能和耐久性对路面的服役寿命至关重要。然而因水泥稳定材料的特点决定了该类基层易出现干缩开裂,严重影响了道路的服役质量。近年来,中国对环保重视程度日益提高,导致大批料场关停,造成公路建设中的石料匮乏及价格上涨。钢渣是一种钢铁企业生产过程中产生的固体废弃物,长期以来,未能有效利用而被随意堆放,不仅造成生态环境的加剧污染和破坏,而且占用大量的土地资源。大量研究表明钢渣是一种优良的筑路砂石可替代产品,同时具有一定膨胀性,如将其应用于半刚性基层中,不仅解决了钢渣引起的环境污染和公路建设石料匮乏问题,而且可通过膨胀特性补偿收缩达到减小基层易开裂几率。因此,钢渣作为骨料代替石料应用于水泥稳定类基层混合料中是当前研究的热点。

根据调查表明:在德、美等发达国家,超过50%的钢渣用于道路工程建设中,其中德国将钢渣应用于高

等级公路面层和基层中,美国对钢渣在公路中的应用具有一套完整的应用体系。研究表明:钢渣可改善混凝土结构孔隙分布、提高混凝土强度和耐久性等。中国较多学者开展了钢渣在半刚性基层中的应用研究,喻平研究得出60%钢渣掺量下水泥稳定碎石混合料不仅强度满足要求,膨胀性也最为稳妥;张宗保等采用水泥和粉煤灰两种无机结合料综合稳定钢渣碎石,从而形成新型复合混合料来当作路面基层或底基层材料;梁铎,毛志刚研究了钢渣在水泥稳定碎石基层中的工程应用,结果证实了钢渣可用于半刚性基层并一定程度抵消或补偿水泥稳定类半刚性基层材料的收缩特性;龚耀通过研究水泥稳定钢渣—碎石设计得出,混合料的干缩系数随着钢渣的增加而减小,钢渣的掺入有助于提高混合料的抗开裂性能;黄浩将未陈化钢渣掺入水泥稳定碎石基层中,研究认为新钢渣的参考掺量不超过50%为宜。

目前,国内外学者对于钢渣在基层中的应用研究成果众多,总结为钢渣可提升半刚性基层强度、减小半刚性基层的干缩应力及缓解沥青路面反射裂缝,钢渣掺量以≤50%为宜。然而对掺加不同比例钢渣对收缩

收稿日期:2021-07-02(修改稿)

基金项目:甘肃省交通运输厅科技研发项目(编号:2020-040);2020年中国交通运输部重点研发项目(编号:2020-MS4-110)

作者简介:杨芙蓉,女,大学本科,高级工程师. E-mail:516225732@qq.com

* 通信作者:武旭,男,硕士,助理工程师. E-mail:1805022398@qq.com

补偿起到多大作用未见定量评价,同时也未见将钢渣原材料膨胀性与无机结合料稳定钢渣碎石混合料干缩特性建立相关分析。该文采用两种不同来源和不同陈化时间钢渣进行不同掺量下对水泥稳定碎石混合料的强度及干缩特性影响,为钢渣在干旱与半干旱地区半刚性基层中的规模化应用提供理论支撑。

2 原材料分析

2.1 钢渣

对两种来源钢渣(记为样本 1 和样本 2)依据 JTGE42—2005《公路工程集料试验规程》测试集料性能,结果如表 1 所示。

表 1 钢渣各项性能测试结果

测试指标	单位	样本 1	样本 2	技术要求
坚固性	%	1.6	1.7	<12
吸水率	%	2.0	1.8	≤3
洛杉矶磨耗值	%	12.1	11.0	≤22
表观相对密度		3.5	3.3	>2.9
浸水膨胀性	%	3.0	1.5	<2

依据 HJ/T 300—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》标准测试两种钢渣样本的浸出毒性。结果见表 2,两种来源钢渣对环境均无危害。

2.2 集料

粗集料采用规格为 20~31.5 mm 碎石、3~5 mm 碎石和 0~3 mm 石屑,钢渣采用规格为 5~10 mm 和 10~20 mm,细集料规格为<0.075 mm。集料试验结

果见表 3。

表 2 钢渣安全性检测

项目	单位	样本 1	样本 2	限值	判定
甲基汞	ng/L	未检出	未检出	未检出	不得
乙基汞	ng/L	未检出	未检出	未检出	检出
汞	mg/L	0.2×10^{-5}	3.9×10^{-4}	0.1	符合
镉	mg/L	未检出	未检出	1	符合
铅	mg/L	0.15	0.22	5	符合
总铬	mg/L	未检出	未检出	15	符合
铜	mg/L	未检出	未检出	100	符合
锌	mg/L	未检出	未检出	100	符合
铍	mg/L	未检出	未检出	0.02	符合
钡	mg/L	未检出	1.29	100	符合
镍	mg/L	0.09	未检出	5	符合
砷	mg/L	0.15	0.10	5	符合
无机氟化物	mg/L	未检出	未检出	100	符合
氰化物	μg/L	未检出	未检出	5	符合
铬(六价)	mg/L	未检出	未检出	5	符合

表 3 集料指标试验结果

试验项目	单位	试验结果	技术要求
压碎值	%	15.4	≤26
针片状含量	5~10 mm 钢渣	%	8.0
	10~20 mm 钢渣	%	9.5
	20~31.5 mm 碎石	%	18.1
<0.075 mm 颗粒含量	%	17.1	≤15.0

2.3 水泥

半刚性基层水泥稳定钢渣碎石混合料配合比设计采用缓凝 32.5 级水泥,主要试验指标见表 4。

表 4 水泥试验结果

项目	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		安定性(雷氏夹法)/mm	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d		
试验结果	190	365	17.5	43.5	3.8	7.5	1	328
技术要求	>180	360~600	≥15.0	≥32.5	≥3.5	≥5.5	(C-A)≤5.0	≥300

2.4 级配设计

钢渣因具一定活性,陈化时间不同和采用不同方式处理后其体积稳定性会发生显著变化。为对比不同性质钢渣应用于半刚性基层对强度及收缩特性的影响,采用了两种来源 4 种不同性质的钢渣,分别为样本 2 陈化 5 年钢渣,样本 1 新渣,样本 1 陈化 3 年钢渣,样本 1 经过 90 ℃高温浸水 3 昼夜处理后的钢渣,并分

别编号为 B、C-1、C-2、C-3,其中未掺钢渣的全碎石混合料记为 A。对 4 种性质钢渣,分别进行水泥稳定碎石混合料级配设计,钢渣掺量参考龚耀、黄浩等研究成果设计为 50%。同时针对榆钢新渣 C-1,进行不同掺量设计,设计掺量分别为 10%、30%、50%和 70%,并分析不同钢渣掺量水泥稳定碎石混合料的强度、收缩等性能变化规律。

3 试验方法

3.1 钢渣压蒸粉化率

依据 GB 24175—2009—T《钢渣稳定性检测方法》中压蒸粉化率试验测试钢渣原材料的体积稳定性。试验采用 4.75~9.5 mm 钢渣 800 g,测试前进行清洗处理,随后将湿润状态钢渣放入压蒸釜中,在 2.0 MPa 的饱和蒸气压下蒸 3 h,试验结束后将试样烘干,过筛称取 1.18 mm 以下钢渣,计算压蒸粉化率。

3.2 无侧限抗压强度和抗弯拉强度试验

试件成型和强度测试依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行。

3.3 干缩试验

试验过程依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0854 进行,测试龄期为 180 d。

4 结果分析

4.1 钢渣对水泥稳定碎石混合料力学性能的影响

选择钢渣 C-1 测试水泥稳定钢渣碎石混合料的无侧限抗压强度(4 组试验)和抗弯拉强度(3 组试验),钢渣掺量为 10%、30%、50%和 70%,结果如图 1、2 所示。

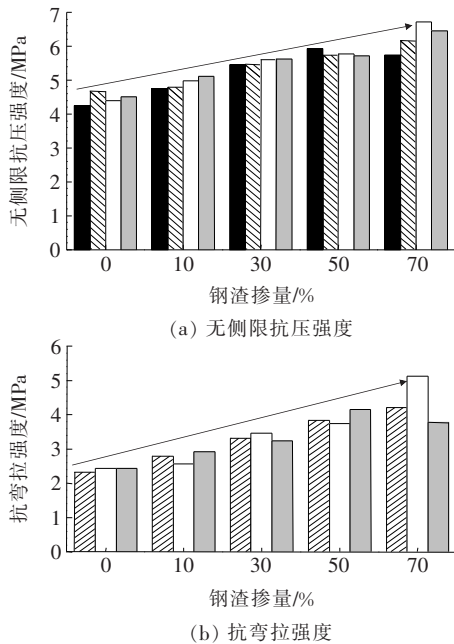


图 1 钢渣掺量对水泥稳定碎石混合料的强度影响分析

由图 1 得出:水泥稳定钢渣碎石混合料的无侧限抗压强度和抗弯拉强度均随着钢渣掺量的增大而增

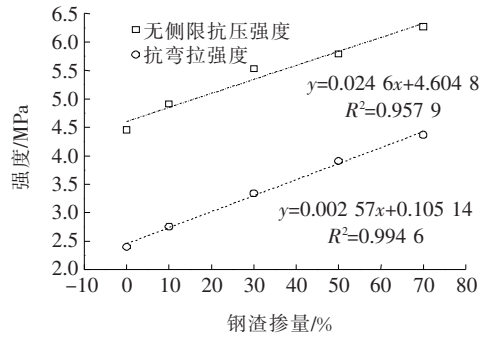


图 2 钢渣掺量与水稳混合料力学强度的影响规律分析

大。当钢渣掺量增加至 70% 时,抗压强度提升 40.6%,抗弯拉强度提升 82.1%。可见利用部分钢渣代替碎石,对水泥稳定碎石混合料的抗压强度和抗弯拉强度均具有显著的提升效果。其中,抗弯拉强度提升更为明显。

由图 2 得出:钢渣掺量与水稳碎石混合料的抗压强度和抗弯拉强度呈显著的线性关系,相关系数为 0.957 9 和 0.994 6。进一步证明,钢渣对水稳碎石材料的强度影响效果明显。其原因是钢渣强度较普通碎石高,同时具有胶凝性矿物成分,如 C_3S 和 C_2S ,在水泥稳定碎石混合料中发挥了一定的水化特性和胶凝作用,从而较普通水泥稳定碎石混合料具有更高的抗压强度和抗弯拉强度。

4.2 钢渣对水泥稳定碎石混合料干缩特性影响分析

4.2.1 水泥稳定钢渣碎石混合料的干缩应变分析

通过 180 d 每日干缩应变和累积干缩应变分析 4 种不同性质钢渣及不同掺量钢渣对水泥稳定碎石混合料的收缩性能影响。前 10 d 采集每日的干缩应变,第 10~30 d 采集每 2 d 的干缩应变,从 30 d 后每隔 30 d 采集一次干缩应变,120 d 后每隔 60 d 采集一次干缩应变,具体结果见图 3、4。

分析 0~30 d 每日干缩应变得出,前 5 d 的每日干缩应变呈现大幅下降趋势,其中以未掺加钢渣的全碎石混合料 A 变化幅度最大,其次为钢渣 B 和钢渣 C。第 5~10 d 每日干缩应变基本稳定,日干缩应变变化幅度基本接近。从第 30 d 后,每隔 30 d 的干缩应变下降明显,仍以无钢渣的空白组变化幅度最大,掺入钢渣后的变化幅度基本接近。干缩应变达到 120 d 时,包括无钢渣和掺入钢渣的水稳混合料的干缩应变均接近于 0,证明 120 d 后水泥稳定材料的干缩趋于稳定。

由图 4(a)得出:随着时间的增长,累积干缩应变呈先增大后趋于稳定的变化规律,前期增长幅度明显,第 90 d 后增长变缓,第 120 d 基本趋于稳定。对比

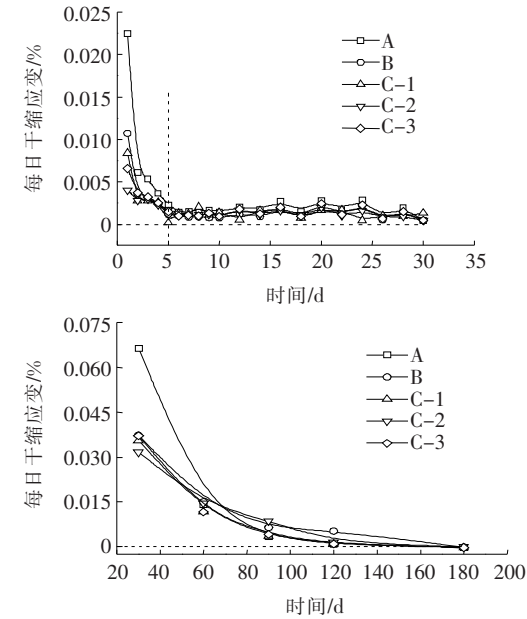


图3 每日干缩应变变化规律

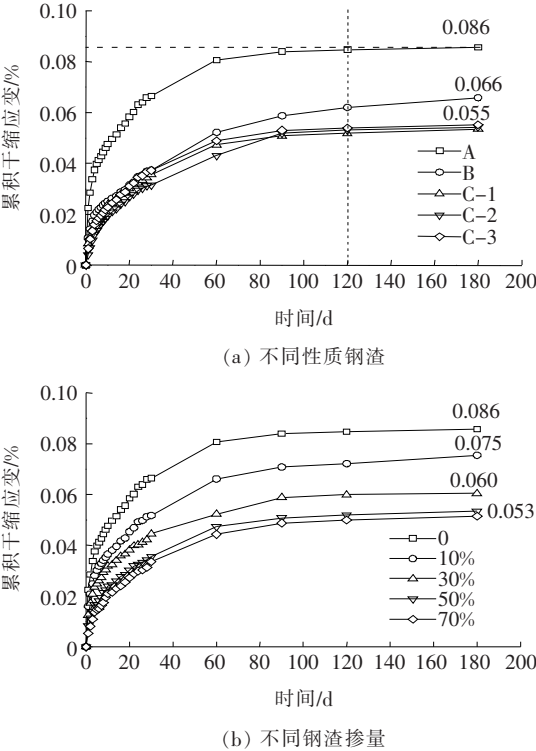


图4 累积干缩应变随时间的变化规律

180 d 的累积干缩应变得出,不同性质钢渣的水稳碎石混合料大小是 A>B>C-3>C-2>C-1,其中 C-3、C-2、C-1 钢渣水稳碎石混合料累积干缩应变接近。180 d 全碎石混合料累积总干缩应变为 0.086%,钢渣组最小累积干缩应变为 0.053%,为钢渣样本 C-1,较全碎石混合料累积干缩应变减小 0.036%。

由图 4(b)得出,随着钢渣掺量的增大,干缩应变减小,原因是钢渣掺量增加导致钢渣膨胀应变增加,可抵消的收缩应变增大,从而水泥稳定钢渣碎石混合料的整体干缩应变减小。当钢渣掺量为 70%时,累积干缩应变为 0.051%,较全碎石混合料减小 0.035%。

4.2.2 钢渣对水泥稳定碎石混合料干缩补偿性分析

在水泥稳定类半刚性基层材料中掺入钢渣,因钢渣具有一定膨胀性,可对水泥稳定性材料起到补偿收缩的作用。定义补偿收缩率来定量评价钢渣对水泥稳定混合料的补偿收缩特性,计算公式如下:

$$R_{cs} = \frac{\epsilon_A}{\epsilon_B} \times 100 \tag{1}$$

式中: R_{cs} 为补偿收缩率; ϵ_A 为全碎石混合料累积干缩应变; ϵ_B 为掺钢渣混合料累积干缩应变。

对 4 种不同性质钢渣的水泥稳定材料随时间变化的补偿收缩率进行对比,并测试 4 种钢渣的压蒸粉化率指标,将补偿收缩率与钢渣体积稳定性建立关联性,结果如图 5、6 所示。

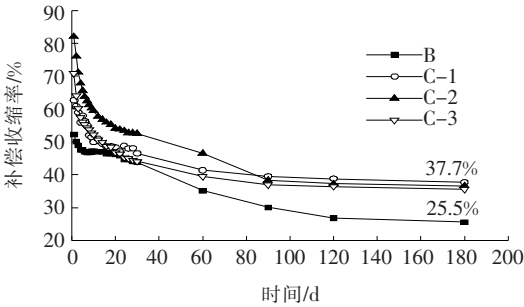


图5 4种不同性质钢渣干缩应变补偿收缩率分析

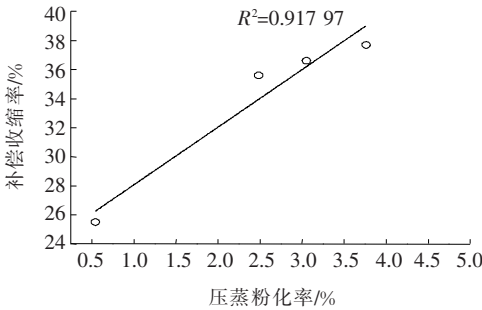


图6 补偿收缩率与体积稳定性的关系分析

由图 5、6 可知:4 种钢渣和不同掺量下均呈现逐渐减小后趋向稳定的变化规律,前期补偿收缩率下降明显,直至 90 d 后补偿收缩率变化变小,120 d 后基本达到稳定状态。4 种钢渣的补偿收缩率大小为:90 d 前为 C-2>C-1>C-3>B,180 d 时收缩率大小为 C-1>C-2>C-3>B,最大为 C-1 钢渣补偿收缩率为 37.7%,最小为 B 钢渣补偿收缩率为 25.5%。

钢渣压蒸粉化率与在水泥稳定材料中的补偿收缩率具有较好的线性关系,相关系数达 0.91。证明了钢渣在水泥稳定材料中的补偿收缩大小与钢渣自身的体积膨胀性有关,钢渣陈化时间越长,膨胀性越小,则补偿收缩率越小。然而对于陈化 5 年以上的 B 样本钢渣,50%的掺量下可以达到 25.5%的补偿收缩率,可见钢渣具有较长的活性保持期,对水泥稳定类半刚性基层混合料的干燥收缩起到了显著的抵消作用。

对比不同钢渣掺量下的补偿收缩率(图 7)得出:随着钢渣掺量的增大,补偿收缩率增大。达到最终稳定状态时,对于 10%钢渣,可补偿收缩 14.3%,对于 50%钢渣掺量可补偿收缩 29.3%,对于 70%钢渣掺量,可补偿收缩 40.1%。钢渣掺量越大,对水泥稳定碎石混合料补偿收缩越大。

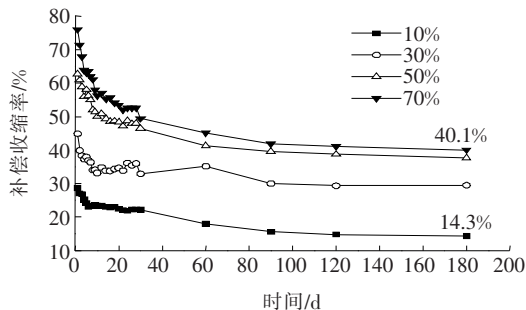


图 7 4 种不同钢渣掺量补偿收缩率分析

5 结论

(1) 水泥稳定钢渣碎石混合料的无侧限抗压强度和抗弯拉强度随钢渣掺量的增大而增大。当钢渣掺量增大至 70%，抗压强度提升 40.6%，抗弯拉强度提升 82.1%，且钢渣掺量与半刚性基层的强度呈显著的线性关系。

(2) 水泥稳定材料的干缩应变以前 5 d 降低幅度最大,随着时间延长,日干缩应变逐渐减小,累计干缩应变先快速增大后趋向稳定,120 d 后基本达到稳定状态。加入钢渣后,水泥稳定钢渣碎石混合材料的每日干缩应变率和累积干缩应变均呈减小变化趋势。且随着钢渣掺量增大,累积干缩应变减小,当钢渣掺量为 70%时,累积干缩应变为 0.051%，较全碎石混合料减小 0.035%。

(3) 4 种不同性质钢渣掺量均固定为 50%时,180 d 时的补偿收缩率大小为 C-1>C-2>C-3>B,最大补偿收缩率为 37.7%，最小为 25.5%。随着钢渣掺量的增大,补偿收缩率增大,当钢渣掺量增大至 70%，

可补偿收缩 40.1%。钢渣膨胀性与水泥稳定材料中的补偿收缩率具有较好的线性关系,钢渣陈化时间越长,膨胀性越小,则补偿收缩率越小。

(4) 在水泥稳定类半刚性基层中掺入一定量钢渣,不仅提高了无侧限抗压强度和抗弯拉强度,而且对干燥收缩起到了良好的补偿减小作用,保证了半刚性基层的体积稳定性,降低了开裂概率。

参考文献:

- [1] 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(2).
- [2] 许亚华. 日本钢铁渣资源化利用技术[J]. 废钢铁,1999(6).
- [3] Guangren Q, Darren D S, Joo H T, et al. Autoclave Properties of Kirschsteinite-Based Steel Slag[J]. Cement and Concrete Research,2002(32):1 377-1 382.
- [4] Montgomery D G, Wang G. Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete Fracture Related Properties[J]. Cement and Concrete Research,1992(22):755-760.
- [5] Oluwasola E A, Hainin M R, Aziz M M A. Comparative Evaluation of Dense-Graded and Gap-Graded Asphalt Mix Incorporating Electric Arc Furnace Steel Slag and Copper Mine Tailings[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,122:315-325.
- [6] Maslehuddin M, Sharif A M, Shameem M, et al. Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes[J]. Construction & Building Materials, 2003,17(2):105-112.
- [7] Wang G, Wang Y, Gao Z. Use of Steel Slag as a Granular Material: Volume Expansion Prediction and Usability Criteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,184(1-3):555-560.
- [8] Anastasiou E, Filikas K G, Stefanidou M. Utilization of Fine Recycled Aggregates in Concrete Withfly Ash and Steel Slag [J]. Construction and Building Materials, 2014,50:154-161.
- [9] 喻平. 水泥稳定钢渣碎石基层抗疲劳性能研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2017.
- [10] 张宗保,张和远,刘志强,等. 水泥粉煤灰综合稳定钢渣碎石基层性能研究[J]. 公路,2008(10).
- [11] 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(5).
- [12] 龚耀. 水泥稳定钢渣-碎石设计与路用性能试验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文,2018.
- [13] 黄浩. 未陈化钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2018.