

精炼钢渣水泥稳定混合料性能室内试验研究

张洁¹, 杨义², 龙澄¹

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 广西鱼峰集团有限公司, 广西 柳州 545000)

摘要: 以广西北海诚德不锈钢厂的精炼钢渣为研究对象, 对含水率、化学成分、物理性质、稳定性、膨胀特性及有害物质重金属析出进行分析, 将钢渣作为道路材料探究其可行性; 将钢渣水泥稳定混合料在 5 种水泥掺量下分别进行击实试验和 7、28 d 无侧限抗压强度试验验证其抗压强度, 在 14% 水泥掺量下进行 28、90 d 弯拉试验、劈裂试验验证其力学性能, 进行干缩试验验证其稳定性。结果表明, 钢渣的主要成分是 CaO, 活性较高, 颗粒细腻, 含水率较高, f—CaO、f—MgO 的含量达到规范要求, 且无膨胀性, 重金属析出也远低于规范要求; 压制成型的钢渣水泥稳定混合料试块密实性好, 且抗压强度整体较高, 水泥掺量为 5% 以上的钢渣水泥稳定混合料满足二级及二级以下公路要求; 钢渣水泥稳定混合料满足弯拉强度要求, 且干缩性能稳定, 符合路面基层材料要求。

关键词: 公路; 精炼钢渣; 水泥稳定材料; 路面基层; 力学性能

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)01-0045-05

钢渣是钢铁冶炼过程中生成的固体残渣, 其中含有类似于石灰或水泥活性的 C_2S 、 C_3S 、 C_3A 和 C_4AF 等液压材料, 被认为是一种潜在的道路建筑类材料黏合剂。日本某公司采用处理后的钢渣作为路面材料, 室内试验、厂内道路试验结果显示路面平整、无膨胀。2002 年, 武汉钢铁集团冶金渣有限责任公司在厂区内道路进行试验段铺砌, 反馈结果显示路面表层基本保持平整, 结构深度好, 颗粒均匀, 无鼓拱、裂缝等缺陷, 具有良好的路用性能。然而钢渣作为道路材料在实际应用中也存在一些危害, 如钢渣的化学成分较复杂, 包含易膨胀的 f—CaO 和 f—MgO, 在潮湿环境中 f—CaO 和 f—MgO 的水化作用会引起道路膨胀和开裂, 导致体积不稳定; 同时钢渣的 pH 值很高, 可能含有有害的重金属物质, 可能造成周边环境污染。该文以广西北海诚德不锈钢厂的精炼钢渣代替砂、石等天然材料应用于路面基层水泥稳定类材料中, 通过室内试验分析其性能及用于道路工程的可行性。

1 试验原材料的物理化学性能

1.1 钢渣的来源

取广西北海诚德不锈钢厂两处废弃钢渣电放点的钢渣样本, 分别为 A 组、B 组; 取新产精炼钢渣样本, 为 C 组(见图 1)。新产钢渣为灰咖色, 自然风干后外观呈灰白色。它是高炉炉渣经水冷却后的产

物, 由工厂统一生产、统一冷却, 无其他杂质, 有害杂质较少。依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》采用容量瓶法分别测定 A、B、C 3 组钢渣的表观密度, 分别为 2.32、2.64、2.88 g/cm³。



(a) 钢渣电放处A



(b) 钢渣电放处B



(c) 新产钢渣C

图 1 钢渣北海取样点

1.2 钢渣的化学成分分析

1.2.1 化学成分

如表1所示,钢渣的主要化学成分为CaO、SiO₂、MgO、Al₂O₃、P₂O₅。相对而言,这次试验所用钢渣样本的Fe₂O₃含量较低,分别为0.33%、0.20%、0.095%,而Al₂O₃、SiO₂成分的比例均较高,SiO₂、Al₂O₃后期易形成硅酸三钙及活性矿物铝酸钙。3组钢渣样本中CaO含量分别高达52.52%、56.34%、57.54%,钢渣成分中CaO含量越高,碱度越大。A、B、C 3组试样钢渣的碱度分别为2.214、2.314、2.32,属于中碱度钢渣,其活性在一定碱性环境中可被激发,能显著加速钢渣水化硬化,增强钢渣在公路路基中的利用率。

表1 钢渣的化学成分分析

化学成分	含量/%		
	A组	B组	C组
SiO ₂	23.720 0	24.350 0	24.790 0
CaO	52.520 0	56.340 0	57.540 0
MgO	4.500 0	4.110 0	5.160 0
Fe ₂ O ₃	0.330 0	0.200 0	0.095 0
Al ₂ O ₃	2.260 0	1.630 0	1.740 0
SO ₃	0.760 0	0.530 0	0.830 0
MnO	0.970 0	1.040 0	0.650 0
P ₂ O ₅	0.003 1	0.002 3	0.001 2

1.2.2 X射线衍射

在道路工程建设中,钢渣中的硫化亚铁、硫化锰

与水结合,会生成氢氧化亚铁和氢氧化锰,其能分解硫化物,引起颗粒粉碎导致体积膨胀,故钢渣中硫、锰、钛等化合物的含量不应超过规定值。钢渣的质量系数应超过1.2,即:

$$\frac{w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{Al}_2\text{O}_3)}{w(\text{SiO}_2) + w(\text{MnO}) + w(\text{TiO}_2)} \geq 1.2 \quad (1)$$

样品钢渣的X射线衍射测试结果见图2。经测试,样品钢渣的主要矿物成分是CaSi₂O₄、CaF₂,没有Mn、Ti、S、SO₃等元素。经式(1)计算,样品钢渣A、B、C组的质量系数分别为2.1、2.49、2.53,均大于1.2,满足要求。

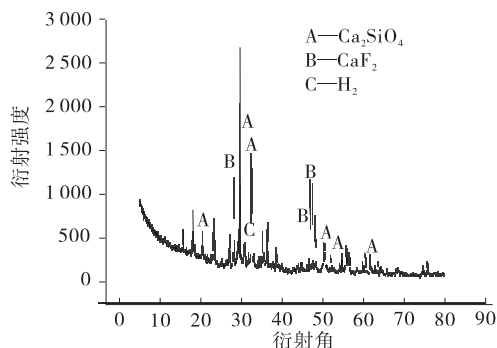


图2 钢渣X射线衍射测试结果

1.3 钢渣的物理性质

按照JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》,对3组钢渣样品进行筛分,结果见表2。

由表2可知:钢渣天然颗粒粒径及颗粒组成绝大部分在2.36~0.075mm,颗粒细腻,分布均匀。在

表2 钢渣的筛分结果

试验组	下列筛孔(mm)的通过率/%							
	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
A组	100	97	89	80	67	58	44	13
B组	100	100	100	98	93	79	62	27
C组	100	99	97	93	86	78	68	42

水化反应中,钢渣颗粒能与水的各方面接触从而加速反应,提高材料的胶凝活性,有利于水泥稳定钢渣混合料的压实和强度的形成。

按JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》测定A、B、C组钢渣的天然含水率,然后按JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行液限、塑限试验,试验结果见表3。

由表3可知:屯放的钢渣含水率较高,而新产的钢渣含水率较低,但整体含水率偏高;3组钢渣的液限、塑限指标基本无差异,塑性指数均小于12,符合规范要求。

表3 钢渣土的液、塑限试验结果

试验组	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
A组	54	36.5	25.1	11.0
B组	46	37.6	26.1	11.5
C组	27	34.5	24.0	10.5

1.4 钢渣稳定性试验

f—CaO含量是影响钢渣稳定性的重要因素。依据CJJ 35—90《钢渣石灰类道路基层施工及验收规范》,钢渣材料f—CaO的含量应小于3%。将f—CaO含量超过3%的钢渣应用于道路工程,可能导

致路面或路基顶包开裂,导致道路耐久性差。因此,在钢渣应用之前,依据 YB/T 4382—2012《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》测定其 $f-CaO$ 、 $f-MgO$ 含量。再依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行自由膨胀率试验,初步分析钢渣混合料用于道路工程的可行性。稳定性试验结果见表 4。

表 4 钢渣的稳定性试验结果

试验组	自由膨胀率/%	$f-CaO$ 含量/%	$f-MgO$ 含量/%
A 组	15	0.84	0.11
B 组	0	0.94	0.10
C 组	10	0.49	0.36

由表 4 可知: $f-CaO$ 和 $f-MgO$ 的含量远低于 3%;钢渣材料的自由膨胀率 $<40\%$,具有弱膨胀性。表明钢渣具有较好的稳定性,初步确定其应用于道路工程可行。

1.5 钢渣的有害物质分析

钢渣成分复杂,除一些氧化物外,还含有有害重金属物质。在道路工程中,经雨水冲刷和浸泡,钢渣材料中的重金属物质会析出,污染土壤及地下水资源,而且可能通过消化道和皮肤进入人体。因此,将其应用于公路工程时,根据 CJJ 35—90《钢渣石灰类道路基层施工及验收规范》测试其重金属含量,结果见表 5。

表 5 钢渣中重金属浸出试验结果 mg/L

重金属名称	生活饮用水卫生标准值	污水综合排放标准值	重金属检测结果
铬	0.05	1.50	0.102 00
锰	0.10	5.00	$<0.010\ 00$
汞	—	0.05	0.000 03
钒	—	2.00	$<0.020\ 00$
锌	1.00	5.00	0.060 00

由表 5 可知:在纯水浸出条件下,钢渣中仅检测到铬金属析出,低于污水综合排放标准值;其他重金属远低于综合排放标准值。

2 水稳钢渣配合比设计及力学性能研究

综上,3 组钢渣材料差异不大,可作为一类材料。为进一步检验钢渣应用于道路工程的适用性,将水泥掺量为 3%、5%、8%、10%、14% 的钢渣混合料制成试块,进行 7、28 d 无侧限抗压强度试验和直接弯拉强度、劈裂强度试验验证其弯拉强度,然后进行干缩试验测试其稳定性。

2.1 击实试验

依据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》,选取 0~4.75 mm 粒径钢渣,按一定比例掺合形成钢渣混合料,进行击实试验,结果见图 3。

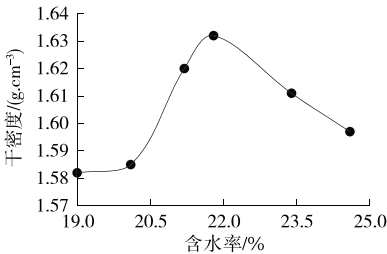
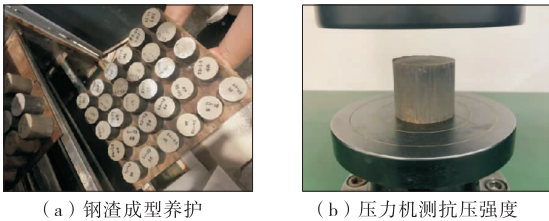


图 3 钢渣混合料的含水率—干密度曲线

由图 3 可知:钢渣混合料的干密度曲线呈抛物线形,最大干密度为 $1.632\ g/cm^3$,最佳含水率为 21.8%。

2.2 无侧限抗压强度试验

依据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》,对不同水泥掺量的钢渣混合料进行无侧限抗压强度试验(见图 4),测试其 7、28 d 无侧限抗压强度,试验结果见表 6、图 5。



(a) 钢渣成型养护 (b) 压力机测抗压强度

图 4 7、28 d 无侧限抗压强度测试

表 6 不同配比下钢渣混合料的抗压强度

级配编号	水泥掺量/%	钢渣掺量/%	压实度/%	不同龄期(d)的无侧限强度/MPa	
				7	28
1	3	97	98	3.120	3.980
2	5	95	98	3.420	4.450
3	8	92	98	4.225	5.167
4	10	90	98	5.670	6.540
5	14	86	98	7.200	8.090

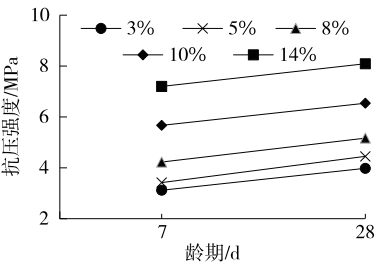


图 5 不同配比下钢渣混合料的抗压强度

钢渣中 CaO 和 MgO 的活性成分很高,而且钢渣的表面积小于水泥颗粒,可较好地填充水泥和钢渣颗粒中孔隙,起到微集料填充的作用,改变水泥砂浆机体的孔隙结构,使试件结构更紧密,强度也随着增强。随着水泥用量的增加,钢渣强度也递增。水泥掺量为 5% 以上的钢渣水泥稳定混合料基本满足二级及二级以下公路的要求。14% 水泥掺量下钢渣试件强度高达 7.20 MPa,达到极重、特重交通标准要求,且后期强度呈线性增加(见表 7)。

表 7 水泥稳定材料 7 d 无侧限抗压强度标准 MPa

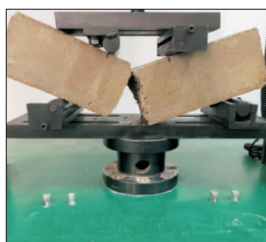
结构层	公路等级	极重、特重交通	重交通	中、轻交通
基层	高速公路和一级公路	5.0~7.0	4.0~6.0	3.0~5.0
	二级及二级以下公路	4.0~6.0	3.0~5.0	2.0~4.0
	高速公路和一级公路	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0
底基层	二级及二级以下公路	2.5~4.5	2.0~4.0	1.0~3.0

2.3 强度验证试验

参照 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》,对水泥掺量为 14% 的钢渣混合料在 28、90 d 龄期进行劈裂强度和弯拉强度试验(见图 6),进一步探究钢渣混合料的抗弯拉性能,结果见表 8。



(a) 劈裂强度试验



(b) 弯拉强度试验

图 6 28、90 d 直接弯拉、间接弯拉强度测试

表 8 4# 配比钢渣混合料的弯拉强度试验结果

龄期/d	劈裂强度/MPa	弯拉强度/MPa
28	0.43	0.67
90	0.75	1.14

由表 8 可知:随着龄期的增长,水泥稳定钢渣的弯拉强度变大,间接抗拉强度达到 0.75 MPa,直接弯拉强度达到 1.14 MPa,满足路面基层设计规范的要求。

2.4 干缩试验

参照 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》,制作 50 mm×50 mm×200 mm 钢渣水泥

稳定混合料试件,水泥掺量为 8%、14%。对试件进行干缩试验(见图 7),测试不同时间下试件的干缩量,结果见图 8。



(a) 试件成型



(b) 干缩养护

图 7 钢渣水泥稳定混合料干缩试验

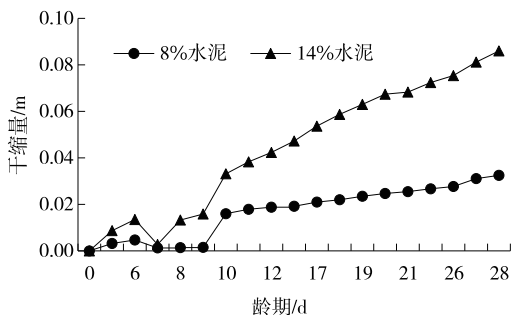


图 8 钢渣水泥稳定混合料的干缩变化趋势

由图 8 可知:以向上为收缩,水泥掺量越高收缩越大。因钢渣中含有微量遇水膨胀的矿物成分,这些矿物成分在水泥硬化后继续发生反应,使钢渣水泥稳定试块体积增大,能在一定程度上抑制水泥砂浆试件的干缩,故两组试件基本呈微收缩状况。

3 结论

(1) 钢渣材料的主要成分为 CaO ,活性较高,属于中碱度钢渣,与硅酸盐相似,具有一定的凝胶性。钢渣粒径主要为 0.075~2.36 mm,呈粉状。钢渣的初始含水率较高,而含水率对钢渣水稳材料强度的影响较大,路基铺筑时应严格控制钢渣的含水率。

(2) 钢渣中 $f-\text{CaO}$ 、 $f-\text{MgO}$ 含量远低于规范 3% 的要求,且钢渣自由膨胀率小于 40%,具弱膨胀性,说明其具有一定的稳定性。重金属析出物仅检测到微量铬金属,且其含量远低于污水排放标准,可用于道路工程。

(3) 不同水泥掺量钢渣水泥稳定混合料中钢渣颗粒细腻且分布均匀,钢渣水泥稳定混合料整体强度较高。随着水泥掺量的增加抗压强度呈线性增长,5% 以上水泥掺量钢渣水泥稳定混合料可达到二级及二级以下公路的强度标准要求。

(4) 14% 水泥掺量钢渣水泥稳定混合料的弯拉

强度满足规范要求;随着龄期的延长,8%、14%水泥掺量钢渣水泥稳定混合料的干缩量呈上升趋势,但整体偏小。

(5) 钢渣代替砂石应用于路面基层水泥稳定材料可行。

参考文献:

- [1] 许远辉,陆文雄,王秀娟,等.钢渣活性激发的研究现状与发展[J].上海大学学报(自然科学版),2004,10(1):91—95.
- [2] 施惠生,黄昆生,吴凯,等.钢渣活性激发及其机理的研究进展[J].粉煤灰综合利用,2011(1):48—53.
- [3] 潘凯.钢渣碳化固定二氧化碳及制备建材产品应用研究[D].南宁:广西大学,2014.
- [4] 乔军志,胡春林,陈中学.钢渣作为路用材料的研究及应用[J].国外建材科技,2005,26(4):22—30.
- [5] 马睿,王景琪,张宏.钢渣材料在国内道路工程中的应用现状[J].焦作大学学报,2016,30(1):78—80.
- [6] WANG Shige, LI Xinming, REN Kebin, et al. Experimental research on steel slag stabilized soil and its application in subgrade engineering[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020(12):1—13.
- [7] 交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 赵海晋,余其俊,韦江雄,等.钢渣矿物组成、形貌及胶凝活性的影响因素[J].武汉理工大学学报,2010,32(15):22—26.
- [9] DING Qingjun, LI Chun, PENG Bo, et al. Study of the practicability of asphalt concrete conected by steel slag [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(6): 11—15.
- [10] 交通部公路科学研究院.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [11] GU Xingyu, YU Bin, DONG Qiao, et al. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181(20):102—108.
- [12] 全国钢铁标准化技术委员会.钢渣中游离氧化钙含量测定方法:YB/T 4382—2012[S].北京:中国钢铁工业协会,2012.
- [13] 武汉市市政工程设计研究院.钢渣石灰类道路基层施工及验收规范:CJJ 35—90[S].武汉:武汉市市政工程设计研究院,1990.
- 收稿日期:2020—05—29
- *****
- (上接第44页)
- [4] 崔亚楠,于庆年,韩吉伟,等.沥青砂浆多次损伤自愈合性能[J].复合材料学报,2018,35(8):2158—2156.
- [5] FU Q, XIE Y, NIU D, et al. Integrated experimental measurement and computational analysis of relaxation behavior of cement and asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120:137—146.
- [6] RIARA M, TANG P, MO L, et al. Evaluation of moisture and temperature effect on crack healing of asphalt mortar and mixtures using healing agents[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177:388—394.
- [7] 黄晓明,许涛,曾磊.基于灰靶理论的隧道路面结构类型选择[J].公路交通科技,2008,25(8):1—5.
- [8] 张华,杜小虎,汪德才,等.基于加权灰靶理论的纤维沥青混合料综合性能评价[J].江苏大学学报(自然科学版),2016,37(5):616—620.
- [9] 于新,李英涛,刘云.基于力学分析的桥面铺装防水黏结层材料灰靶优选[J].西南交通大学学报,2012,47(6):1086—1091.
- [10] 宋亮,安传峰,黄美.玄武岩纤维沥青碎石封层黏结性能及评价[J].建筑材料学报,2019,22(3):440—445.
- [11] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [12] 应荣华,王育刚,吴婷.细集料级配对沥青砂浆影响的单轴压缩蠕变试验研究[J].公路与汽运,2011(4):115—119.
- [13] 王进,应荣华.沥青砂浆的抗拉压试验研究[J].公路与汽运,2010(2):62—65.
- [14] 吕泽华,程永春,马桂荣,等.硅藻土—玄武岩纤维复合改性沥青的低温流变性能试验研究[J].公路工程,2019,44(1):44—50.
- [15] 赵伟,韩飞飞.沥青砂浆剪切力学性能影响因素研究[J].中外公路,2017,37(5):276—281.
- [16] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [17] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990:86—103.
- 收稿日期:2020—06—02