

不同陈化钢渣集料特性及其稳定性试验研究

张红日^{1,2},王桂尧²,冯坚¹,蓝天助¹,吴涛¹

(1.广西交科集团有限公司,广西 南宁 530007;2.长沙理工大学,湖南 长沙 410114)

摘要:钢渣集料具有良好的建筑材料性能,但目前钢渣在道路工程中的利用率较低。该文对广西防城港某钢厂露天陈化0、6个月、12个月钢渣集料的化学成分、基本物理力学指标、f-CaO、f-MgO、粉化率、CRB膨胀率等指标进行试验研究,结果表明:钢渣集料在物理力学特性方面基本满足道路基层材料和路基填料的要求,但陈化0、6个月的钢渣集料其f-CaO、粉化率、CRB膨胀率等指标不能满足道路基层和回填材料的要求,而陈化12个月的钢渣集料略小于规范限值。由此可见,用于道路基层和回填材料的钢渣集料至少要露天陈化12个月才能满足路用稳定性要求。

关键词:钢渣集料特性;f-CaO;粉化率;CRB膨胀率;稳定性

中图分类号:U414

文献标志码:A

钢渣是钢铁冶炼过程中产生的废渣,是中国目前数量最大的固体废弃物之一,占钢产量的15%~20%^[1]。近几年中国经济建设快速发展,对钢铁的需求越来越大,因此每年钢渣的排放量也在不断增多。若不对具有潜在利用价值的钢渣进行合理有效利用,势必导致大量的钢渣堆积,不仅给钢铁企业带来巨大压力,造成土地资源的浪费,同时,如果处置不当,还会给周边地区造成一定的污染,因此,对钢渣进行合理的再生利用是可持续发展战略中的重要内容之一。

在欧美国家,利用钢渣作为道路工程材料的研究起步较早,目前,有近70%的钢渣应用到道路工程领域^[2-4]。而中国作为钢铁工业大国,钢渣在道路方面的利用率还不到10%,钢渣的综合利用率也远远低于欧美国家,主要是因为钢渣物理化学成分及稳定性一直是道路工程应用中担忧的问题^[5-6]。目前国内外学者虽然对钢渣在道路工程中的应用开展了大量的研究工作,但现有研究基本上是对原始钢渣开展的基本性质方面的研究,而缺乏不同陈化钢渣在路用性能方面的系统研究^[7]。本文以广西防城港某钢铁厂不同陈化时间的钢渣集料为研究对象,分析钢渣的成分及在路用方面的物理力学性质,深入研

究钢渣集料的稳定性,为钢渣在道路工程中的再生利用提供良好的借鉴。

1 钢渣集料物理化学成分特性

钢渣从熔炉中排出后,在空气中冷却形成一种坚硬的材料,其颜色一般呈黑色和灰白色。试验所用材料为防城港某钢铁厂生产的钢渣,灰色,颗粒粒径大小不一。

(1) 钢渣集料化学成分

钢渣的化学成分受其陈化时间、生产工艺等因素影响较大,取不同露天陈化时间的钢渣集料进行X荧光光谱半定量分析试验,得到钢渣的化学成分如表1所示,该钢铁厂生产的钢渣集料的主要成分为CaO、Fe₂O₃、SiO₂、MgO、Al₂O₃、P₂O₅,其中CaO、Fe₂O₃、SiO₂约占总含量的82%。钢渣集料在露天陈化过程中,集料表层的氧化钙与空气和雨水中的水分子反应生成氢氧化钙,氢氧化钙进一步和空气中的二氧化碳反应,析出难溶的碳酸钙^[8]。所以,受陈化影响,露天不同陈化时间钢渣集料化学成分略有差异。

钢渣的碱度值R按式(1)计算^[9]。计算得到R值

收稿日期:2021-12-08

基金项目:广西科学研究与技术开发计划项目(编号:桂科攻1598009-4);崇左市科技计划项目(编号:崇科FA2019008);广西企茅公路建设有限公司科研项目

作者简介:张红日,男,博士(后),高级工程师.E-mail:253541461@qq.com

大于1,所以,该厂钢渣为碱性钢渣,活性较大,应用于道路工程容易板结,有利于提高强度。

$$R = w(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO})/w_1(\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (1)$$

表 1 陈化 0、6、12 个月钢渣集料主要化学成分

陈化时 间/月	各成分含量/%							
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Mn	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	其他
0	44.42	19.94	18.04	6.49	3.75	3.59	1.51	2.26
6	44.50	20.62	17.86	6.43	3.56	3.54	1.65	1.84
12	40.74	22.23	19.31	6.26	3.38	3.35	2.07	2.66

(2) 钢渣集料级配特性

取该厂露天陈化 0、6 个月、12 个月的钢渣集料进行筛分,其粒径范围为 0.075~19 mm,钢渣级配曲线如图 1 所示。

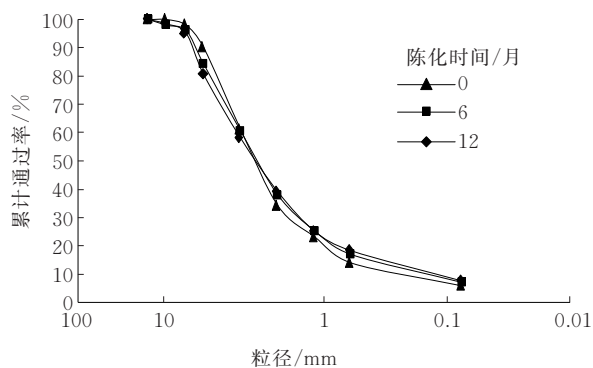


图 1 陈化龄期 0、6 个月、12 个月的钢渣集料级配曲线

表 2 钢渣集料的基本物理力学指标

陈化时 间/月	粒径/ mm	压碎值/ %	坚固性/ %	针片状颗粒 含量/%	吸水率/ %	表观密度/ (kg·m ⁻³)	松散堆积密 度/(kg·m ⁻³)	空隙率/ %	加州承载 比/%
0	0.075~19	17.6	8	6.6	5.04	3 605	2 427	30.6	79.2
6		18.4	5	3.9	3.48	3 496	2 353	31.6	85.5
12		19.2	2	1.2	1.92	3 387	2 280	32.6	88.0

2 钢渣集料稳定性研究

2.1 钢渣集料稳定性研究的必要性

道路工程中常用的路用普通石材的形成时间较为久远,并且经过了较长时间自然环境的检验,其物理化学性能已稳定下来,在道路工程中应用没有安定性方面的问题。与石料相比,钢渣集料形成时间很短,在自然环境下,其化学成分含量和力学性能还没有完全稳定下来,含有 f-CaO 和 f-MgO 等相对不稳定的化学成分。研究发现^[13]:材料中 f-CaO 和 f-MgO

根据级配曲线得陈化龄期为 0、6 个月、12 个月的钢渣不均匀系数 C_u 为 13.43、20.07、26.83,大于 10;陈化龄期为 0、6 个月、12 个月的钢渣曲率系数 C_c 为 2.3、2.43、2.57,其值为 1~3,所以所选试验用钢渣集料级配良好,在工程实践中这类钢渣材料具有较好的颗粒结构效应,能在较小的压实功下压实。

(3) 钢渣集料物理力学性质

为了研究钢渣集料作为道路基层材料和路基填料的物理力学特性,取露天陈化 0、6 个月、12 个月,粒径为 0.075~19 mm 的钢渣集料进行物理力学性能分析,根据《公路工程集料试验规程》(JTGE42—2005)^[10]测定该钢渣集料的物理力学指标,结果见表 2。根据《公路路面基层施工技术细则》(JTGF20—2015)^[11],用于高速公路及一级公路表面层的石料的压碎值应小于 26%,吸水率小于 2%,坚固性小于 12%,针片状颗粒含量小于 15%,表观密度大于 26 kg/m³;根据《公路路基施工技术规范》(JTGF10—2006)^[12]对上路床(路面底标高以下 0~0.3 m 深度)材料的要求,由表 2 可见:只有陈化龄期为 0、6 个月的钢渣集料的吸水率不满足高等级公路表面层要求,压碎值、坚固性、针片状颗粒含量都能满足路用材料的要求,其物理力学性能与石料比较接近,所以,钢渣集料可以替代碎石作为道路基层材料和路基填料。

会引起膨胀和粉化,从而引起路基或路面开裂、承载力下降等问题,正因为这一问题,钢渣集料在道路路基回填及基层材料中的应用才受到一定的限制,只有安定性合格的钢渣集料才能在道路基层和路基中使用,因此,钢渣集料的稳定性研究对于其在道路工程中的应用具有重要意义。

2.2 游离氧化钙含量

钢渣集料中的游离氧化钙以晶粒的形式被钢渣的其他成分包覆,且溶有部分杂质,其反应能力较低,完全水化要比钢渣的其他成分相对时间更长,水化后生成氢氧化钙晶体。研究发现:由于游离氧化

钙生成的氢氧化钙晶体产物常常在局部聚集,并且晶体在游离氧化钙的逐渐水化下不断增长,导致产物稀松不均,并且f-CaO水化时体积增大98%^[14],局部产生膨胀应力,所以,钢渣中的游离氧化钙含量高将引发体积安定性问题,钢渣集料在应用于道路工程之前应进行游离氧化钙含量检测。f-MgO的水化作用比f-CaO需要更长的时间,反应更为缓慢,生成Mg(OH)₂后体积增大148%^[15],所以,如果钢渣集料中f-MgO含量过多,同样会发生膨胀变形现象,出现安定性不良的问题。

按照《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》(YB/T 4382—2012)^[16],用硝酸铵-乙醇提取游离氧化镁方法测定游离氧化钙和游离氧化镁的含量。试验测得露天陈化0、6个月、12个月钢渣集料的f-CaO含量分别为3.42%、2.43%、1.44%。根据《钢渣石灰类道路基层施工及验收规范》(CJJ 35—1990)^[17],用于道路工程的钢渣游离氧化钙含量应低于3%,所以未经陈化的钢渣集料游离氧化钙含量不符合道路工程的应用要求,钢渣集料在应用于道路工程之前应进行一定的陈化,且随着陈化时间的增长,钢渣集料的游离氧化钙含量降低幅度较大,可见,增加钢渣集料的陈化时间有利于工程应用。试验测得露天陈化0、6个月、12个月钢渣集料的f-MgO含量分别为0.035%、0.028%、0.037%,可见,该钢渣集料f-MgO的含量较低,对钢渣的安定性影响较小。

从钢渣集料中所检测出的f-CaO与f-MgO成分含量来看,钢渣集料的f-CaO成分含量是f-MgO成分含量的50倍以上,可认为导致钢渣集料稳定性不良的主要原因是该钢渣中的f-CaO成分。

2.3 粉化率

按照《钢渣稳定性试验方法》(GB/T 24175—2009)^[18],采用压蒸试验测其粉化率的方法对同一粒径范围、不同陈化周期的钢渣集料进行粉化率的测定,粒径为0.075~19 mm,陈化0、6个月、12个月的钢渣集料各一组,一组3个渣样,各组测定的粉化率平均值分别为5.76%、5.12%和4.48%,根据《工程回填用钢渣》(YB/T 801—2008)^[19],其粉化率须小于5%,可见陈化0、6个月的钢渣集料不满足《工程回填用钢渣》(YB/T 801—2008)^[19]对粉化率的技术要求,而陈化12个月的钢渣集料满足这一要求。另外,粉化率数据显示,钢渣集料的陈化时间越长,粉化率越

低,增加陈化时间有利于提高钢渣集料的稳定性能。

2.4 CBR膨胀率

钢渣集料中存在游离氧化镁和游离氧化钙,与水接触后,游离氧化镁和游离氧化钙会与水分子发生反应,生成氢氧化镁和氢氧化钙,造成体积膨胀。若将游离氧化钙和游离氧化镁含量高的钢渣集料直接用于道路工程,则会产生超限的沉降变形,造成道路路基沉降或路面破坏,因此钢渣集料在使用前必须测量其膨胀量,浸水膨胀率按下式计算^[19]:

$$\text{膨胀率} = \frac{\text{泡水后试件高度变化}}{\text{原试件高(120 mm)}} \times 100\% \quad (2)$$

根据《钢渣稳定性试验方法》(GB/T 24175—2009)^[18]中浸水膨胀率测定方法,对露天陈化0、6个月、12个月,粒径为0.075~19 mm的钢渣集料进行膨胀率试验,试验结果如图2所示。

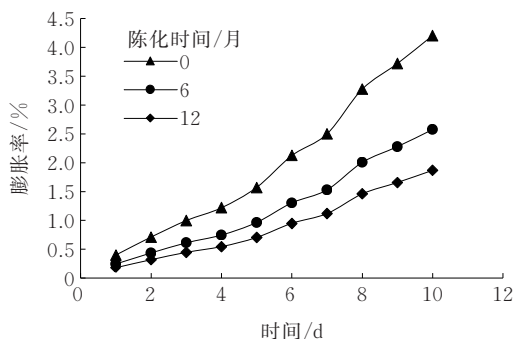


图2 陈化0、6个月、12个月钢渣集料膨胀率变化图

图2显示:刚出厂的0个月钢渣集料膨胀率为4.2%>2.0%(规范要求值)^[19],不宜用于道路基层、底基层的铺筑;而经过6个月陈化后的钢渣集料膨胀率为2.57%,钢渣的膨胀率明显下降,但仍然大于2.0%;经过12个月陈化后的钢渣集料膨胀率为1.87%,基本能满足工程建设指标要求。所以,在道路工程应用中,应选择经过12个月露天陈化后的钢渣集料作为基层材料和路基填料。

2.5 钢渣集料膨胀率、f-CaO含量及粉化率之间的关系分析

通过上述研究可知,钢渣集料的f-CaO含量、粉化率、CBR膨胀率跟钢渣的陈化时间有很大关系,不同陈化时间所对应的钢渣集料的f-CaO含量、粉化率、CBR膨胀率如表3所示。

从表3可以看出:钢渣集料的CBR膨胀率、粉化率均与其f-CaO含量成正比。所以,钢渣中的f-CaO含量是造成钢渣集料粉化和膨胀的主要原因。

表 3 不同陈化时间的钢渣集料 CBR 膨胀率、
f-CaO 含量及粉化率

陈化时间/月	f-CaO 含量/%	粉化率/%	CBR 膨胀率/%
0	3.42	5.76	2.57
6	2.43	5.12	2.00
12	1.44	4.48	1.87

3 结 论

为了在道路工程中合理有效利用钢渣,通过对钢渣的材料特性以及不同陈化时间的钢渣集料的稳定性进行试验研究,得出以下结论:

(1) 物理化学分析发现,钢渣成分中 CaO、Fe₂O₃、SiO₂占了大部分比例。钢渣集料级配良好,应用在工程中能在较小的压实功下使其压实,其物理力学指标除了吸水率较大外,其余指标都能较好地满足道路基层和路基填料的使用要求,是一种良好的筑路材料。

(2) 研究发现钢渣集料 f-CaO 相对含量较高, f-MgO 含量较低,因此,导致实例工程钢渣集料稳定性问题的主要原因是 f-CaO,且陈化 0 个月的钢渣集料 f-CaO 含量指标超标,而陈化 6 个月、12 个月的钢渣集料可以满足道路基层和回填材料的要求。

(3) 陈化 0 个月和 6 个月的钢渣集料粉化率和膨胀率并不满足道路基层和回填材料的要求,而陈化 12 个月的钢渣集料这两项指标基本满足道路基层和回填材料的最低要求。另外,通过各指标的对比可以发现,钢渣集料的 CBR 膨胀率、粉化率均与 f-CaO 含量成正比关系,钢渣中的 f-CaO 含量是造成钢渣集料粉化和膨胀的主要原因。

参考文献:

- [1] 羊依金,李志章,邹长武.钢渣在工程中的应用[J].路基工程,2005(5):15-17.
- [2] 方荣利.一种新型道路建材[J].矿产利用,1997(3):25-31.
- [3] 薛明,李光新.上海市钢渣的路用室内研究及其应用前景[J].粉煤灰,1999(3):31-32,35.
- [4] 游润卫.包钢钢渣作为筑路材料的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 陈宗武.钢渣理化特性及其沥青混凝土性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [9] 俞海明,王强.钢渣处理与综合利用[M].北京:冶金工业出版社,2015.
- [10] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTGE42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [11] 交通运输部公路科学研究院.公路路面基层施工技术细则:JTGT F20—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [12] 中交第三公路工程局有限公司.公路路基施工技术规范:JTGT 3610—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [13] 李新明.钢渣稳定土的路用性能研究及应用[D].郑州:郑州大学,2010.
- [14] 张光明,连芳,张作顺,等.钢渣中的 f-CaO 及稳定化处理的研究进展[J].矿物学报,2012,32(S1):203-204.
- [15] 贾红玉,刘敬东,郭玉安.安钢钢渣在道路工程中的应用[J].中国资源综合利用,2015,33(2):34-36.
- [16] 中冶集团建筑研究总院有限公司,清华大学,北京工业大学,等.钢渣中游离氧化钙含量测定方法:YB/T 4328—2012[S].北京:冶金工业出版社,2012.
- [17] 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].北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [18] 中冶集团建筑研究总院.钢渣稳定性试验方法:GB/T 24175—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [19] 中冶集团建筑研究总院.工程回填用钢渣:YB/T 801—1993[S].北京:中国标准出版社,1993.