

# 钢渣特性及在道路工程中的应用研究

毛志刚<sup>1</sup>, 蓝天助<sup>1\*</sup>, 张红日<sup>1,2</sup>, 吴安耀<sup>3</sup>

(1.广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530000; 2.长沙理工大学;  
3.广西桂商实业投资有限公司)

**摘要:** 钢渣是钢铁企业冶炼钢材中的副产品,具有良好的建筑材料性能。通过对防城港某钢厂钢渣陈化0、6、12个月的钢渣级配情况、化学成分、基本物理力学指标、CBR承载比等指标进行研究,分析其用于道路工程的可行性。结果表明:该钢渣级配良好,其压碎值、坚固性、针片状颗粒含量、CRB值等满足路用材料的要求,只是吸水率指标较大,可以用于低等级道路的面层、道路的基层和垫层、道路回填工程及地基处理等,但在应用时尚应考虑其体积膨胀性、运输耗能、环境影响等问题。

**关键词:** 钢渣特性; 陈化时间; 路用性能; 道路工程

## 1 引言

钢渣是炼钢过程中所排放的固态废弃物,其颜色一般为黑色和灰白色,钢渣出炉后冷却形成一种硬度较大的材料,是一种具有潜在活性的路用材料。近几

年中国经济飞速发展,每年的钢铁产量在逐年增加,2018年广西拟重点推进的项目中,沿海地区涉及钢铁冶金15个,总投资额近千亿元,而每生产1 t的钢铁,就会产生150~200 kg的废渣。由此每年钢渣的排放量不断增多。大量钢铁废渣的堆积不利于钢铁的生产与发展,同时也占用了大量耕地,造成资源浪费,

级以下公路水泥稳定碎石底基层要求。

(2) 水泥稳定碎石再生集料水泥含量低,水泥砂浆含量少,吸水率并无明显提高。

(3) 粒径大于31.5 mm的铣刨粗集料,大部分由细集料和小粒径集料黏结而成,力学性质和物理性质均有较大程度衰减,受外力作用下易破碎,对再生水泥稳定碎石产生负面影响。

## 参考文献:

- [1] A.F.M.S. Amin, A. Hasnat, A. H. Khan, et al. Ashiquzzaman. Residual Cementing Property in Recycled Fines and Coarse Aggregates: Occurrence and Quantification[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(4):1-11.
- [2] Peerapong Jitsangiam, Kornkanok Boonserm, Tanapon Phenrat, et al. Recycled Concrete Aggregates in Roadways: Laboratory Examination of Self-Cementing Char-

acteristics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10):1-9.

- [3] Togay Ozbakkaloglu, Aliakbar Gholampour, Tianyu Xie. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(2):1-13.
- [4] 胡忠辉,贾致荣,张文刚,等.水泥稳定再生集料基层性能试验研究与工程应用[J].施工技术,2016(7).
- [5] 肖杰,吴超凡,湛哲宏,等.水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J].中国公路学报,2017(2).
- [6] 陈强.基于旧水泥混凝土再生集料的耐久性半刚性基层性能及设计参数的应用研究[D].华南理工大学博士学位论文,2013.
- [7] JDG E42-2007 公路工程集料试验规程[S].
- [8] 刘陵庆.水泥稳定再生集料的性能及设计研究[D].长安大学硕士学位论文,2014.
- [9] JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S].

收稿日期:2019-06-13

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)

作者简介:毛志刚,男,硕士,教授级高工.E-mail:jtmzg@126.com

\*通信作者:蓝天助,男,硕士,助理工程师.E-mail:1453622732@qq.com

表 1 陈化 0、6、12 个月钢渣主要化学成分

陈化时间/ 月	化学成分含量/%							
	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Mn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	其他
0	44.42	19.94	18.04	6.49	3.75	3.59	1.51	2.26
6	44.5	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

处理不当还会污染环境。因此,将钢渣运用到道路工程领域,不仅可以减少钢铁公司的经济负担,还可以为道路建设提供廉价材料,降低道路建设的工程造价。

## 2 钢渣化学成分

钢渣的具体化学成分含量受炼钢炉型、钢渣堆放时间、钢种的影响较大,但主要成分差异较小,包括钙、镁、硅、铁的氧化物,同时也含有少量铝、磷、锰等的氧化物。

取广西防城港某钢厂陈化 0、6、12 个月废弃钢渣作为试样进行 X 荧光光谱半定量分析,表 1 为所测定的钢渣的化学成分,主要成分为 CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,其中 CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 占了较大比例,约占总含量的 82%。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 成分的相对比例对钢渣的活性有较大影响,当 CaO 含量一定时,较高的 SiO<sub>2</sub> 含量决定了较高的硅酸三钙含量,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量越高,则活性矿物铝酸钙的含量就越高。

## 3 钢渣的物理力学性质

### 3.1 钢渣级配

公路工程集料的级配是影响其工程性质的重要指标,可以用颗粒的累计曲线来表示集料的粒度成分,过程中常用累计曲线的不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  两个重要指标来反映粒组的分布和连续情况。现将防城港某钢厂产生的未经筛分的钢渣进行筛分,得到陈化龄期为 0、6、12 个月的钢渣累计曲线见图 1。

不均匀系数:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

曲率系数:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (2)$$

式中: $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$  分别为累计百分含量为 10%、30%

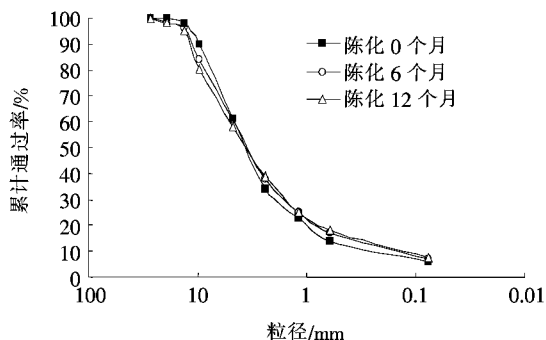


图 1 陈化龄期 0、6、12 个月的钢渣颗粒级配

和 60% 的粒径,  $d_{10}$  为有效粒径;  $d_{60}$  称为限制粒径。

$C_u$  越小,土粒越均匀,  $C_u < 5$  的土为均粒土,级配不良;  $C_u$  越大,表示粒组的分布范围越广,但  $C_u$  过大,可能缺失中间粒径,所以还需要曲线整体形状指标的曲率系数  $C_c$  来评价土粒的级配,通常  $C_u > 10$ ,  $C_c$  等于 1~3 的土为级配良好土。

通过筛分试验得出,陈化龄期为 0、6、12 个月的钢渣不均匀系数  $C_u$  为 13.43、20.07、26.83,大于 10,曲率系数  $C_c$  为 2.3、2.43、2.57,介于 1~3 之间,所以该钢渣为级配良好的粗粒类土,且对于  $C_u$  值,0 个月的钢渣 < 6 个月的钢渣 < 12 个月的钢渣;对于  $C_c$  值,0 个月的钢渣 < 6 个月的钢渣 < 12 个月的钢渣。另外,通过不同陈化龄期的同一批钢渣的累计筛分曲线发现,陈化时间越长,小于 2.36 mm、大于 9.5 mm 粒径的钢渣略有增大的趋势,钢渣的累计筛分曲线变得更加平缓。

### 3.2 钢渣的基本物理力学指标

钢渣物理力学特性的研究内容包括:密度试验、压碎值、针片状含量、坚固性、吸水率等,依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》,取陈化 0、6、12 个月,粒径为 0.075~19 mm 范围内的钢渣进行物理性能分析,各物理性能指标结果见表 2。

由表 2 可知:① 钢渣的物理力学性能受粒径范围及陈化时间的影响,根据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》,用于高速公路及一级公路表面

表 2 钢渣的物理指标

陈化时 间/月	压碎指 标/%	坚固性/ %	针片状颗 粒含量/%	吸水率/ %	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	松散堆积密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	空隙率/ %
0	17.6	6.4	4.6	3.97	3 566	2 455	31.2
6	18.4	5.0	3.9	3.48	3 496	2 353	31.6
12	19.2	2.0	1.2	1.92	3 387	2 280	32.6

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  $26 \text{ kg/m}^3$ ,由此可见,除钢渣吸水率不满足高等级公路表面层要求外,压碎值、坚固性、针片状颗粒含量满足修筑道路基层乃至路面的要求,其物理力学性能与石料比较接近;② 对同一批钢渣,陈化时间越长压碎指标、表观密度和空隙率增大,坚固性、针片状颗粒含量、吸水率、松散堆积密度等指标值减小。

3.3 级配钢渣的 CBR 承载比

CBR 承载比可以作为路基填料选择的依据;评价填料强度的辅助指标。在进行 CBR 试验时,先进行击实试验,找出材料的最佳含水量和最大干密度,按最佳含水率进行制样,并对试验材料进行浸泡一定的时间,测量其膨胀量和贯入量,当材料的膨胀量超出了规定的限制时,该材料则不能作为路基填料。该试验可以模拟路基土在饱和状态下的强度值。

该文选用粒径为  $0.075 \sim 19 \text{ mm}$ ,陈化时间为 0、6、12 个月 3 组钢渣按 T0131—1993 加州承载比试验方法测定其 CBR 值,测得陈化 0、6、12 个月钢渣的 CBR 值分别为 79.2%、84.9%、88%。级配钢渣 CRB 值最小为 79.2%,均远大于 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》对上路床(路面底标高以下  $0 \sim 0.3 \text{ m}$  深度)材料 CBR 值大于或等于 8%的要求。

从陈化龄期来看,相同级配的材料,陈化 12 个月的级配钢渣 CRB 值高于陈化 6 个月和 0 个月的级配钢渣。故从钢渣的加州承载比 CRB 值考虑,应优先选用陈化龄期长的钢渣。

4 钢渣在道路工程中的应用方向及主要问题

4.1 钢渣在道路上可能的应用方向

(1) 用于低等级道路面层

低等级道路包括工程施工中的便道、乡村公路及支路。钢渣含有  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等活性成分,在使用过程中虽然会有略微膨胀,但其膨胀量在使用初期

较大,随着时间的推移,膨胀量将逐渐趋于稳定,且由于低等级道路车流量较小,设计车速较低,钢渣产生的膨胀并不影响低等级道路的正常使。钢渣活性成分反应后,将生成一定的晶体和水硬性胶凝产物,从而提高松散钢渣颗粒整体性,此外,钢渣本身具有一定的板结性,一段时间后,钢渣面层可板结为一个稳定性较好并且具有一定强度的结构层。

(2) 钢渣代替石料用于道路的基层及垫层

从上述试验看,钢渣属于粗粒土,级配良好,易于压实,其强度满足要求,但未经陈化或陈化时间短的钢渣个别指标并不满足 CJJ 35—1990《钢渣石灰类道路基层施工及验收规范》的要求,陈化 12 个月的钢渣各项指标基本上满足道路施工的要求,可代替石料用于道路的基层及垫层。研究发现,钢渣可以和水泥土拌和,用作道路的基层。钢渣对水泥土的性能具有一定的改善作用,在水泥土中掺入一定的钢渣,可以提高水泥土的密实度和抗裂性。

(3) 大体积工程回填

钢渣碎石硬度大,表面粗糙,强度高,级配良好,良好的回填材料。在道路工程中,钢渣可以用在沟槽和路堤回填工程。钢渣加水拌和后,其铁、铝、钙等氧化物反生水化反应,形成具有较高强度的水化物,使回填材料整体板结,从而使松散颗粒材料之间产生一定的“内聚力”,土体的整体强度得到了提高。

(4) 软弱地基的处理

通过上述分析可知,废钢渣吸水率较大,且具有一定的膨胀性。软土地层的含水率较高,废钢渣应用于软土地层,不但可以起到置换、加筋的作用,还可以起到固结、挤密等作用,从而改善地基土的性质。废钢渣处理软土地基的应用形式一般有以下几种:利用钢渣将软土整体或局部换填;钢渣与现场土体搅拌,形成强度较高的土体;利用钢渣做成素桩置换部分软弱土体,形成复合地基,从而提高地基承载力。

4.2 道路工程中应用钢渣应注意的问题

钢渣作为道路工程材料具有良好的应用前景。虽然钢渣的主要物理力学性能能满足道路工程用料的要

求,但并不能认为钢渣可以在道路工程中随意应用,钢渣的化学成分中含有一定的游离氧化钙和氧化镁,这一指标会影响钢渣的稳定性。钢渣应用于道路工程中主要有以下问题。

#### (1) 钢渣的稳定性不良

钢渣中的氧化物会与水发生反应导致体积产生膨胀,从而影响钢渣混合料的体积稳定性,如钢渣中的  $\text{MgO}$  遇水后生成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,其膨胀量为  $5\% \sim 80\%$ ,体积膨胀将产生较大的内力,当应力达到一定程度后将会使钢渣碎裂。研究表明当钢渣中的氧化镁含量超过  $70\%$  时,钢渣稳定性不良。另外游离氧化钙的含量对钢渣的稳定性影响较大,其含量跟炼钢方法、陈化时间关系较大,不同的钢渣品种和陈化时间,钢渣的游离氧化钙含量差异较大,游离氧化钙与水发生反应后生成氢氧化钙,体积增大约 2 倍,产生很大的膨胀应力,当游离氧化钙含量超过  $3\%$  时,钢渣稳定性不良。所以,钢渣中的游离氧化钙反应是导致膨胀的最大问题,且钢渣中的游离氧化物的水化反应较为缓慢,钢渣在应用于道路工程后,在后期往往会有膨胀问题。所以,钢渣在应用前,还应进行膨胀率等试验,以确定钢渣及其混合料的体积稳定性,对于膨胀性过大的钢渣,应进行一定的处理,降低游离氧化钙含量,当膨胀率达到标准后再用于道路工程。

#### (2) 钢渣密度过大

钢渣的密度较大,是普通石料的  $1.2 \sim 1.4$  倍,钢渣在道路工程中的运输、拌和、摊铺等工作的耗能要比普通石料大,所以,为了节省运输成本,钢渣在道路工程中的使用应采用就近原则,另外,由于钢渣密度过大,在地基承载力较低的地方应慎重使用。

#### (3) 对环境的影响

钢渣成分较为复杂,某些钢渣含有少量的铬、锰、汞、钒、锌等重金属元素等,对于这些钢渣在运用于道路工程时,应进行重金属析出方面的评估试验,当钢渣的重金属析出量超过环境标准值时禁止直接用作道路工程材料。

## 5 结 论

(1) 钢渣是钢铁企业冶炼钢材时产生的废渣,将钢渣替代碎石用于道路工程,不但可以减少钢渣的占用场地,节约土地资源,同时还可以为道路工程提供廉价材料,变废为宝,有利于钢铁企业的可持续发展。

(2) 化学分析发现,钢渣成分中  $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  占了大部分比例,钢渣中活性矿物成分的比例跟对应的氧化物成分比例关系较大,且陈化时间不同的钢渣化学成分也有一定差异。

(3) 通过对未筛分的钢渣进行试验发现,钢渣为级配良好的粗粒类土,且对同一批钢渣,陈化时间越长, $C_u$  和  $C_c$  指标的值越大,钢渣的累计筛分曲线变得更加平缓。

(4) 钢渣的压碎值、坚固性、针片状颗粒含量满足修筑道路基层和路面的要求,其物理力学性能与石料比较接近,但钢渣孔隙较多,吸水率较大;钢渣的强度较高,所测得的  $\text{CBR}$  值较大,能够满足路用材料的要求。对同一批钢渣,陈化时间越长, $\text{CBR}$  值、压碎值、表观密度和空隙率等指标增大,坚固性、针片状颗粒含量、吸水率等指标值减小。

(5) 钢渣在道路工程中应用范围较广,目前可考虑的主要应用方向有:用于低等级道路面层;钢渣代替石料用于道路的基层及垫层;可以用在沟槽和路堤回填工程;用于软弱地基的处理等方面。

(6) 不同钢厂生产的钢渣,其化学成分、物理力学特性都会有所差异,钢渣在用作道路工程材料时,应考虑其膨胀性问题、运输耗能问题及对环境的影响问题,对膨胀性过大或重金属析出超标的钢渣,禁止用于道路工程或经过处理后使用,对于运输距离过大的道路工程不建议使用钢渣。

#### 参考文献:

- [1] 王丽艳,高鹏,陈香香.掺合废弃钢渣的新型混合轻质砂土的强度特性试验研究[J].公路,2013(11).
- [2] JTGE40—2007 公路土工试验规程[S].
- [3] JTGE42—2005 公路工程集料试验规程[S].
- [4] JTG/T F20—2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [5] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].
- [6] 游润卫.包钢钢渣作为筑路材料的研究[D].西安建筑科技大学硕士学位论文,2006.
- [7] 徐文娟.水泥钢渣土用于公路底基层的试验研究[D].南京林业大学硕士学位论文,2007.
- [8] 肖琪仲.钢渣的膨胀破坏与抑制[J].硅酸盐学报,1996(6).
- [9] 燕更祥.钢渣应用于道路工程的研究[J].辽宁交通科技,2005(8).
- [10] 冯群英.钢渣在公路路基路面工程中的应用研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.
- [11] 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(5).