

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.016

镍铁渣—黏土改性土承载特性试验研究*

王书勤^{1,2}, 尹平保^{1,2}, 贺炜^{1,2}, 邹敏^{1,2}, 陈彦虎³, 王泽华^{1,2}

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3.广东广青金属科技有限公司, 广东 阳江 529533)

摘要:为研究镍铁渣—黏土改性土的承载特性,开展不同镍铁渣掺入比和压实度下镍铁渣—黏土改性土加州承载比(CBR)试验,获得干密度—含水率、单位压力—贯入量关系曲线和浸水膨胀率,分析其承载特性及其影响机理。结果表明,镍铁渣掺配黏土可有效提高压实后填料干密度,镍铁渣—黏土改性土的最大干密度随镍铁渣掺入比的减小先增大后减小,镍铁渣掺入比为 65% 时最大干密度达到峰值,约为 2.18 g/cm³;相同压实度下,镍铁渣掺入比从 80% 降到 65% 时镍铁渣—黏土改性土的 CBR 值平均提高 90%,镍铁渣掺入比从 65% 降到 60% 时 CBR 值平均降低 12%;随压实度增加,镍铁渣—黏土改性土的 CBR 值近似呈线性增长,压实度对镍铁渣掺入比为 80% 改性土的影响较小,且压实度大于 90% 即可满足 CBR 大于 8% 和浸水膨胀率小于 2% 的要求。

关键词:公路;镍铁渣;黏土;承载力;压实度;加州承载比;浸水膨胀率

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)04-0063-05

中国是镍铁渣储量大国。目前对镍铁渣的处理以堆存或填埋为主,造成大量耕地被占用、地下水污染和资源浪费,需加强对镍铁渣的综合利用。刘龙武等利用静态图像法和筛分法分析了镍铁渣的级配特征。刘云等借助 XRD 和 SEM,从微观角度证实了富镍渣制备地质聚合物的可行性。付海峰等发现将镍铁渣用作水泥中部分集料,能有效提高水泥胶砂的强度。李琦等利用高 MgO 镍铁渣研制了性能良好的轻质耐火材料。此外,还有将镍铁渣用于陶粒、肥料等领域的报道,但利用率较低,镍铁渣的大量处置迫在眉睫。道路工程建设中需要大量填土或砂石材料,将垃圾炉渣、硅锰渣和钢渣等工业废渣作为路基土已取得了较多研究成果和工程经验。若能将镍铁渣用于路基修筑,将扩大镍铁渣应用范围,进一步解决镍铁渣综合利用和保护环境等问题。

关于固体废弃物的改良,一些学者开展了相关研究。如王士革等通过室内试验,分析了钢渣掺入比、粒径大小对石灰—钢渣混合料承载特性的影响;高朋等通过电石渣—粉煤灰稳定土的无侧限抗压强度试验,获得了电石渣—粉煤灰的最优配比;程涛等对比分析了粉煤灰、煤矸石、钢渣和炉渣等石灰渣稳

定土的力学特性。但关于镍铁渣承载特性和体积膨胀特性的研究很少。鉴于此,该文将镍铁渣和黏土混合制作不同配比和压实度的镍铁渣—黏土改性土试样进行加州承载比(CBR)试验,研究其干密度—含水率、单位压力—贯入量和浸水膨胀率的变化规律,进而分析配比和压实度对改性土承载特性和膨胀特性的影响机理。

1 试验方法

1.1 试验材料

镍铁渣取自广东广青金属科技有限公司经回转窑—矿热炉工艺产生的镍铁水淬渣,偏黑色(见图 1),



图 1 镍铁渣

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51878069;52078055;52178311);长沙理工大学特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金项目(kfj180502);湖南省自然科学基金项目(2019JJ50647);湖南省教育厅科学研究项目(20A001);长沙理工大学大学生创新训练项目(kfi180502)

其主要化学成分见表1。黏土取自广东阳江某工地,其基本物理性质见表2。2种材料的颗粒级配见图2。

表1 镍铁渣的主要化学成分

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO ₂	49.64	Al ₂ O ₃	2.99
MgO	30.93	Cr ₂ O ₃	2.14
TFe	8.17	CaO	1.23

表2 黏土的基本物理指标

性能指标	试验值	性能指标	试验值
含水率/%	11	塑限/%	26.7
最大干密度/(g·cm ⁻³)	11	黏聚力/kPa	23
液限/%	45.8	内摩擦角/(°)	16

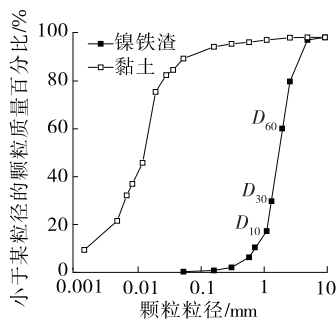


图2 试验材料的颗粒级配曲线

从图2可以看出:镍铁渣级配特征粒径 $D_{10}=1.25$ mm, $D_{30}=2.42$ mm, $D_{60}=3.69$ mm。其不均匀系数 $C_u=2.95$, 曲率系数 $C_c=1.27$ 。根据GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》,该镍铁渣为级配不良的砾土,若将其单独作为路基填料使用不易压实,无法满足路基设计要求。掺配黏土对其进行改良,可形成级配良好的镍铁渣—黏土改性土,使其容易压实。

1.2 试样制备

采用质量控制压实度法,按式(1)计算不同压实度下每个镍铁渣—黏土改性土试样所需镍铁渣和黏土的总质量 m 。

$$m = k\rho_{dmax}(1+w)V \quad (1)$$

式中: k 为目标压实度, $k = \rho_d / \rho_{dmax}$; ρ_d 为试样目标压实度所对应的干密度(g/cm³); ρ_{dmax} 为土样最大干密度; w 为含水率; V 为试样的体积。

试样制备依据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行,流程如下:先将足量的镍铁渣和黏土烘干,采用5 mm筛筛分;根据表3所示配比称取相应质量的试验材料充分拌合;依照配比中各自最

优含水率掺水拌合均匀,闷料1 h;最后把称量好的混合料分3层击实至试筒满为止,每层击实50次,制成直径为152 mm、高度为120 mm的试样。

表3 镍铁渣—黏土改性土的击实结果

改良方案编号	镍铁渣掺量 a_z /%	黏土掺量 a_s /%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%
方案一	60	40	2.15	9.0
方案二	65	35	2.18	8.5
方案三	70	30	2.13	9.5
方案四	75	25	2.10	10.5
方案五	80	20	2.04	11.0

通过重型击实试验得出不同配比下改性土试样的最大干密度和最优含水率(见表3)。

1.3 试验方案

为探究镍铁渣—黏土改性土中镍铁渣与黏土掺量、压实度对其承载特性和体积膨胀特性的影响,按表4所示方案进行CBR试验。试验前把试样放入水槽中浸水4 d,每组试验制作2个平行试样进行贯入度试验,测试其CBR值。路面强度试验仪转速为1 mm/min,量力环系数为98.4 N/(0.01 mm),贯入杆面积为0.001 963 5 m²,测力计与位移计均为百分表。记录测力计内百分表读数为 50×10^{-2} mm的整数倍数贯入量,当试样贯入量为 550×10^{-2} mm时终止试验。

表4 镍铁渣—黏土改性土CBR试验方案

试验方案编号	镍铁渣:黏土	含水率/%	压实度/%
1	60:40	9.0	90、93、96
2	65:35	8.5	90、93、96
3	70:30	9.5	90、93、96
4	75:25	10.5	90、93、96
5	80:20	11.0	90、93、96

1.4 试验过程

加州承载比CBR是评价路基土承载力的重要指标,它为试样贯入量 l 为2.5 mm时单位压力与标准碎石压入相同贯入量时标准荷载强度的比值,按式(2)计算。同时按式(3)计算 $l=5$ mm时的承载比,若 $CBR_{2.5} < CBR_{5.0}$,则重新进行试验。若试验结果仍然如此,则采用5 mm时的承载比。

$$CBR_{2.5} = p / 7\,000 \times 100 \quad (2)$$

$$CBR_{5.0} = p / 10\,500 \times 100 \quad (3)$$

式中: p 为单位压力(kPa)。

根据CBR浸水试验实测试样高度变化量,按下

式计算浸水膨胀率 γ :

$$\gamma = (d_1 - d_0) / h \times 100 \quad (4)$$

式中: d_1 为浸水 4 d 后试件上百分表的最终读数 (mm); d_0 为浸水前试件上百分表的初始读数 (mm); h 为原试件高度, $h = 120$ mm。

2 试验结果分析

2.1 击实试验结果分析

根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》, 分别对 5 种镍铁渣—黏土改性土进行击实, 得到图 3 所示击实曲线。图 4 为最大干密度 ρ_{dmax} 与镍铁渣掺入比 a_z 关系曲线。

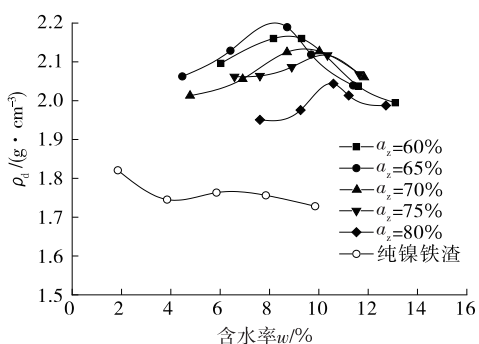


图 3 镍铁渣—黏土改性土击实曲线

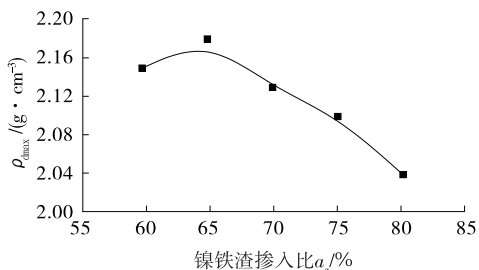


图 4 最大干密度与镍铁渣掺入比的关系曲线

由图 3 可知: 纯镍铁渣无明显最大干密度和最佳含水率, 其压实度较差, 相对来说, 含水率为 2% 时干密度最大, 为 1.82 g/cm^3 ; 对于镍铁渣—黏土改性土试样, 镍铁渣掺入比 a_z 为 80%、75%、70%、65%、60% 时, 对应最大干密度 ρ_{dmax} 分别为 2.04 g/cm^3 、 2.10 g/cm^3 、 2.13 g/cm^3 、 2.18 g/cm^3 、 2.15 g/cm^3 。总体来说, 掺配黏土可有效提高压实后土体干密度, 这是由于掺入黏土混合后能形成级配良好的镍铁渣—黏土改性土, 其更容易压实。

由图 4 可知: 对于镍铁渣掺入比 a_z 为 80%、75%、70%、65%、60% 的改性土试样, 后者与前者相比, 最大干密度变化幅度分别为 2.9%、1.4%、2.3%、-1.4%, 镍铁渣—黏土改性土的最大干密度

随着 a_z 的减小先增大后减小, a_z 为 65% 时最大干密度达到峰值, 约为 2.18 g/cm^3 。 $a_z > 65\%$ 时, a_z 每减小 5.0%, 最大干密度约增加 2.2%; $a_z < 65\%$ 时, a_z 每减小 5.0%, 最大干密度约减小 1.4%。这是由于黏土掺入体积低于颗粒间孔隙时, 增加黏土, 可有效填充镍铁渣颗粒之间的孔隙, 从而改善镍铁渣的颗粒级配, 干密度增大; 黏土掺入体积超出孔隙后, 由于黏土比重比镍铁渣小, 多出的黏土等质量替换镍铁渣, 试样体积变大, 干密度变小, 导致最大干密度随黏土增多而减小。

2.2 CBR 试验结果分析

图 5 为压实度为 90%、93%、96% 时不同配比下镍铁渣—黏土改性土试样的 $p-l$ 曲线。计算发现 l 为 2.5 mm 时的 CBR 值小于 l 为 5 mm 时的 CBR 值, 取 l 为 5.0 mm 时的 CBR 值作为试验结

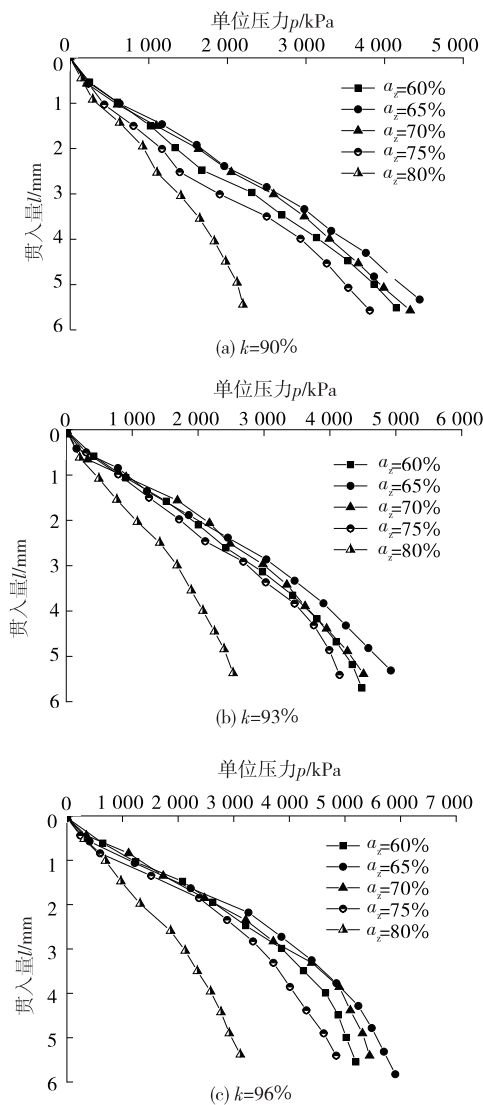


图 5 不同配比下镍铁渣改性土 $p-l$ 曲线

果。图6、图7为CBR值与配比和压实度的关系曲线。

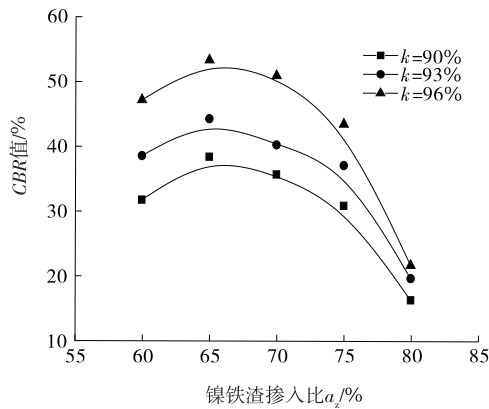


图6 CBR值与配比的关系

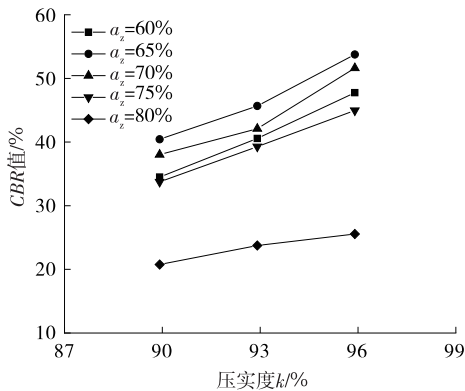


图7 CBR值与压实度关系

由图5可知:在不同配比和压实度下,镍铁渣一黏土改性土试样的单位压力与贯入量呈线性增长的发展规律。

由图6可知:压实度一定时,镍铁渣一黏土改性土的CBR值随镍铁渣掺入比 a_z 的减小先增大后减小, a_z 从80%减小至65%时,镍铁渣一黏土改性土的CBR值平均提高90%。 a_z 为70%、65%、60%时,后者与前者相比,CBR值平均变化幅度分别为6.4%、-12.1%, a_z 为60%改性土的CBR值小于 a_z 为70%改性土的CBR值。 a_z 从65%变化到60%时,黏土含量增加,在压实中镍铁渣颗粒之间的咬合力降低,试样受到外界影响变大,承载力减小。

由图7可知: a_z 相同时,镍铁渣一黏土改性土的CBR值随压实度增加近似呈线性关系增大,压实度从90%增至96%时, a_z 为60%、65%、70%、75%、80%改性土的CBR值分别增加13.8%、13.4%、13.6%、11.3%、4.8%, a_z 为60%改性土的增幅最大,约为40%。相对来说,压实度对 a_z 为80%改性土的影响较小。另外,镍铁渣一黏土改性

土的压实度大于90%时,其CBR值均大于8%,经黏土改性后镍铁渣的承载力良好,满足规范要求。

2.3 浸水试验结果分析

通过CBR浸水试验研究不同镍铁渣掺入比和压实度时镍铁渣一黏土改性土的浸水膨胀率,试验结果见图8。

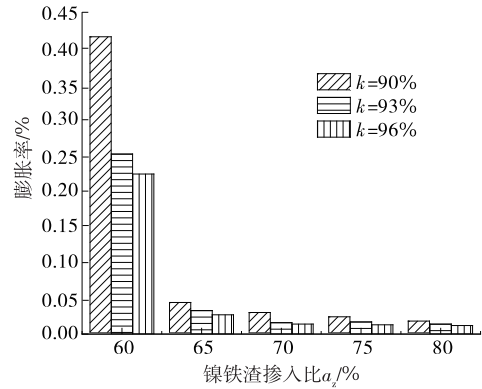


图8 不同试验条件下镍铁渣一黏土改性土的膨胀率

由图8可知:镍铁渣一黏土改性土的浸水膨胀率为0.01~0.42,均小于路基规范限值2%,说明不论镍铁渣掺入比和压实度如何,镍铁渣一黏土改性土的稳定性都较好,可用作路基填料。

3 镍铁渣环境可行性分析

镍铁渣中含有Ni、Cr、Cd等重金属元素,工程应用时需考虑重金属元素对周围土壤、地下水及生物生命安全的影响。根据HJ/T 299—2007《固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》进行镍铁渣浸出毒性分析,结果见表5。

表5 镍铁渣浸出液试验结果

检测项目	检测结果/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准要求/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	结果
镍(Ni)	1.395	≤ 5.00	合格
锌(Zn)	0.069	≤ 100.00	合格
镉(Cd)	0.002	≤ 1.00	合格
铜(Cu)	0.002	≤ 100.00	合格
铅(Pb)	0.005	≤ 5.00	合格
铬(Cr)	1.012	≤ 15.00	合格
钡(Ba)	0.002	≤ 100.00	合格
铍(Be)	0.001	≤ 0.02	合格

由表5可知:镍铁渣浸出液中有害物质最大检测值低于毒性鉴别标准值,表明镍铁渣为一般工业固体废物,不属于危险废弃物,可直接作为路基掺合

料加以应用。

另外,镍铁渣浸出液呈弱碱性状态(pH 值=9),其浸出液不会对周围土壤造成腐蚀危害。

4 结论

(1) 镍铁渣—黏土改性土的最大干密度随镍铁渣掺入比减小先增大后减小,镍铁渣掺入比为65%时,最大干密度达到峰值,约为 2.18 g/cm^3 。

(2) 相同压实度下,镍铁渣—黏土改性土的 CBR 值随镍铁渣掺入比减小先增大后减小;随压实度增加,镍铁渣—黏土改性土的 CBR 值近似呈线性增长,增长幅度为40%。不论镍铁渣掺入比和压实度如何,镍铁渣—黏土改性土的承载力和浸水膨胀率均满足路基规范要求。

(3) 镍铁渣材料为一般工业固体废渣,且不会对周围土壤造成腐蚀危害,可直接作为路基掺合料加以应用。

参考文献:

[1] 吴春丽,谢红波,陈哲,等.镍铁渣资源化综合利用现状研究[J].广东建材,2019,35(6):77-79.

[2] 刘龙武,龚德峰,李俊,等.基于静态图像法的镍铁渣粒度分析及剪切试验[J].交通科学与工程,2020,36(2):1-6.

[3] 刘云,张康,冯恩娟,等.镍铁渣地质聚合物的制备及其性能研究[J].水泥工程,2017,4(2):13-17.

[4] 付海峰,李天翻,秦文茜,等.电炉镍铁渣粉对水泥胶砂强度的影响试验研究[J].化工矿物与加工,2020,49(3):51-55.

[5] 李琦,钱烽烽,付启新,等.镍渣/稻壳研制轻质镁橄榄石—尖晶石耐火材料[J].非金属矿,2019,42(4):41-43.

[6] 王海,王佳东,张杰,等.掺杂湿法镍冶炼废渣制备新型建材陶粒研究[J].有色矿冶,2021,37(2):29-32.

[7] YUNJ J, KANG B H, KANG W S, et al. Effect of fertilizers using ferro-nickel slag on chinese cabbage growth and soil chemical properties[J]. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 2018, 51(3): 204-210.

[8] 卢佩霞,殷成胜,王会芳.垃圾炉渣用于路基填筑的土工特性试验分析[J].筑路机械与施工机械化,2015,32(9):51-54.

[9] PATIL A V, PANDE A M. Behaviour of silico manganese slag manufactured aggregate as material for road and rail track construction[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 3258.

[10] 李超,陈宗武,谢君,等.钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J].材料导报,2017,31(3):86-95+122.

[11] 王士革,张宗领,高洪波.基于路用性能的石灰—钢渣稳定土试验分析[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2017,30(2):321-325.

[12] 高朋,党增琦,栗培龙,等.电石渣—粉煤灰稳定土强度影响因素分析[J].路基工程,2020(5):6-10.

[13] 程涛,晏克勤.不同工业废渣石灰稳定土力学性质对比分析[J].建筑材料学报,2011,14(2):212-216.

[14] 中华人民共和国水利部.土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S].北京:中国计划出版社,2008.

[15] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG/T D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[16] 尹平保,杨文斌,贺炜,等.镍铁渣加筋路堤填筑方法及足尺试验[J].中国公路学报,2020,33(5):55-65.

[17] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[18] 苏青,谢红波,陈哲,等.电炉镍铁渣重金属浸出研究[J].硅酸盐通报,2021,40(4):1312-1317.

[19] 鞠丽萍,陈彦虎,祝怡斌,等.镍铁渣在混凝土综合利用中的环境风险研究[J].有色金属(冶炼部分),2020(9):106-109.

[20] 陈海雄,刘龙武,张健,等.固化技术在软土地基中的应用研究[J].公路与汽运,2022(2):71-73+76.

[21] 刘洋.碱激发镍渣—粉煤灰制备地质聚合物及性能研究[D].包头:内蒙古科技大学,2021.

[22] 徐德儒.工业废弃硅粉—粉煤灰模袋混凝土力学性能及抗冻性试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.

[23] 侯贵斌,俞一平,郭剑,等.镍渣资源高附加值产品开发与应用[C]//亚洲与太平洋地区红土镍矿合作组织(APOL).2021年APOL镍与不锈钢产业链年会论文集.济南:亚洲与太平洋地区红土镍矿合作组织(APOL),2021.

[24] 李杰,程寅,韩锋,等.矿渣—炉渣—电石渣稳定粉黏土用于路基填筑的试验研究[J].交通运输研究,2022,8(1):130-140.

[25] 康永发.非洲地区软土路基填筑及沉降预测研究[J].工程机械与维修,2021(5):226-229.

[26] 龚德峰.改性土砂化机理研究及砂化度评价方法应用[D].长沙:长沙理工大学,2021.

[27] 刘洋,吴锦绣,封春甫,等.富镁镍渣—粉煤灰地质聚合物的制备与性能表征[J].硅酸盐通报,2021,40(3):921-928.