

稳定铁尾砂碎石混合料设计与性能研究

刘颖, 陈坤, 张士强, 白琦峰

(南京润程交通科学研究院有限公司, 江苏 南京 210049)

摘要: 基于密实填充理论, 设计了3种不同级配的骨架密实型铁尾砂碎石混合料, 通过室内试验揭示了填充度对铁尾砂碎石混合料抗压强度和劈裂强度的影响规律。为进一步了解不同矿铁尾砂碎石混合料稳定后的性能, 对马鞍山周边3处矿场铁尾砂碎石混合料进行重型击实试验和强度试验, 为铁尾砂碎石混合料的应用提供了主要技术参数。结果表明: 填充度小于100%时, 填充度与混合料抗压强度和劈裂强度呈正相关关系, 在填充度为98%时级配一表现出优异的路用性能; 铁尾砂碎石混合料抗压强度能满足不同公路等级的要求, 且具有优异的抗冻融性能。

关键词: 道路工程; 固废利用; 铁尾砂碎石; 级配设计; 性能试验

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0284-05

Design and Performance Study of Stabilized Iron Tailings Gravel Mixture

LIU Ying, CHEN Kun, ZHANG Shiqiang, BAI Qifeng

(Nanjing Runcheng Traffic Science Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210049, China)

Abstract: Based on the dense filling theory, three kinds of skeleton dense iron tailings gravel mixtures with different gradations are designed. The influence of filling degree on the compressive strength and splitting strength of iron tailings gravel mixture is revealed through laboratory tests. In order to further understand the performance of different iron tailings gravel mixtures after stabilized, the heavy compaction test and strength test of iron tailings gravel mixture in three mines around Ma'anshan are carried out, which provide the main technical parameters for the application of iron tailings gravel mixture. The results show that when the filling degree is less than 100%, the filling degree is positively correlated with the compressive strength and splitting strength of mixture. When the filling degree is 98%, the gradation 1 shows the excellent pavement performance. The compressive strength of iron tailings gravel mixture can meet the requirements of different highway grades, and has the excellent freeze-thaw resistance.

Keywords: road engineering; solid waste utilization; iron tailings gravel; gradation design; performance test

0 引言

铁尾砂是铁矿开采后剩余的残渣, 以存放在尾矿库中为主。据不完全统计, 我国国内约有146亿t尾矿堆存量, 尾矿库多达12 600座。将铁尾砂应用到公路工程建设中, 可以减少碎石开采, 为绿色高附加值应用。

白琦峰等^[1]分析了固化剂掺量对稳定铁尾砂性能的影响, 结果表明: 固化剂能提高铁尾砂的抗冻融性能; 随着固化剂掺量的增加, 其抗压强度和劈裂强度显著提高, 并通过试验路验证了铁尾砂基层具有良好的路用性能。宋宏伟等^[2]对铁尾砂混合料进行

了弹性模量试验和弯拉强度试验, 使其弹性模量和弯拉强度取值有了参考, 并对疲劳试验数据进行回归分析, 确定了疲劳参数。孙吉书等^[3]通过向铁尾砂碎石掺入10%石灰和20%粉煤灰来提高其强度, 同时使其具有良好的弹性模量、抗冻性和水稳定性。姜明等^[4]采用碎石、石灰、粉煤灰等多种结合料来固化铁尾砂, 对其作为道路基层材料的强度进行了研究。国外关于铁尾砂矿应用于基层材料已有大量实例, 从1960年开始, 美国明尼苏达州就已将铁尾砂应用到城市道路基层和高速公路建设中^[5-7]。Lucas等^[8]就铁尾砂矿作为道路材料的可行性作了研究, 结果表明: 5%水泥掺量的铁尾砂矿混合料符合用作任何交通道路基层的参数规定, 10%石灰掺量的铁尾砂矿混合料可以用于一般道路基层, 稳定的炼钢炉渣铁尾砂矿混合料仅限于用作底基层。Sun等^[9]对水泥稳定铁尾砂在公路上的应用进行了研究, 得

收稿日期: 2024-08-22

作者简介: 刘颖(1989—), 男, 本科, 工程师, 从事道路工程施工管理工作。

出了其强度和模量较高,具有良好抗冻性能和水稳定性的结论。

1 铁尾砂碎石混合料设计和试验

1.1 原材料

将碎石、铁尾砂、固化剂按照一定比例加水拌和

成的混合料称为稳定铁尾砂碎石混合料。本研究采用一种含有钙、硅、铝、镁、硫等氧化物活性成分的固化剂,并选用张庄矿的多金属铁尾砂进行样品元素分析。碎石采用工程粒径为5~10、10~20、20~30 mm的3种碎石,进行水洗筛分和技术指标试验。碎石、铁尾砂筛分结果见表1、表2;技术指标试验结果见表3。

表1 碎石筛分结果

矿料名称	规格/mm	筛孔通过率/%							
		31.5 mm	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.6 mm	0.075 mm
1#	20~30	100	90.5	22.9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
2#	10~20	100	100	90.9	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2
3#	5~10	100	100	100	90.8	11.2	1.6	0.3	0.3

表2 铁尾砂筛分结果

筛孔尺寸/mm	通过率/%
26.5	100.0
19	100.0
9.5	100.0
4.75	100.0
2.36	99.0
0.6	90.0
0.075	60.0

表3 技术指标试验结果

矿料名称	规格/mm	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	针片状含量/%	压碎值/%
1#	20~30	2.709	2.699	11.5	16.5
2#	10~20	2.706	2.697	10.3	16.2
3#	5~10	2.710	2.697	7.7	
铁尾砂			2.055		
技术要求				≤20	≤20

1.2 骨架密实型铁尾砂碎石混合料

1.2.1 设计级配

将密实填充原理应用于铁尾砂碎石级配设计中,参照公路工程常规级配范围,关键控制点采用4.75 mm筛孔通过率,设计了3组级配,分别对应规范中的C-C-2、C-B-1和C-B-3级配。

3组级配的矿料掺配比例见表4;级配图见图1。

表4 矿料掺配比例

单位:%

矿料规格/mm	级配一	级配二	级配三
20~30	20	20	20
10~20	17	20	30
5~10	17	20	20
铁尾砂	46	40	30

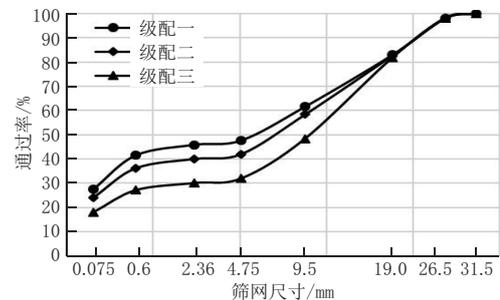


图1 级配图

测定3组级配粗集料捣实松方密度,并计算3组级配在捣实状态下的粗集料骨架间隙率VCA_{DRC},结果见表5。

表5 粗集料VCA_{DRC}计算结果

级配类型	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	捣实松方密度/(g·cm ⁻³)	VCA _{DRC} /%
级配一	2.698	1.531	43.25
级配二	2.698	1.553	42.43
级配三	2.698	1.576	41.58

1.2.2 计算矿料合成级配

固化剂用量固定为内掺5.7%,尾砂需求量根据填充度确定。级配一在不同填充度下的掺配计算结果见表6。表6中:V_i为不同填充度下铁尾砂与固化剂的相对体积,%;m₁~m₃分别为不同填充度下,20~30、10~20、5~10 mm碎石与固化剂的相对质量;m₄为铁尾砂与固化剂的相对质量。

计算级配一在不同填充度下各档矿料质量比,结果见表7。

按同样方法计算级配二、级配三在不同填充度下各档矿料质量比,结果见表8。

表6 级配一掺配比例计算过程

VCA _{DRC} /%	填充度 /%	V _i /%	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	Σm
43.25	154	66.60	53.98	45.85	45.85	136.87	282.55
	98	42.38	53.98	45.85	45.85	87.10	232.78
	94	40.65	53.98	45.85	45.85	83.54	229.22
	90	38.92	53.98	45.85	45.85	79.99	225.67

表7 级配一在不同填充度下各档矿料质量比

填充度 / %	矿料用量 / %			固化剂用量 / %	铁尾砂用量 / %
	20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm		
154	19.10	16.23	16.23	5.70	42.74
98	23.19	19.70	19.70	5.70	31.75
94	23.55	20.00	20.00	5.70	30.75
90	23.92	20.32	20.32	5.70	29.75

表8 级配二、级配三在不同填充度下各档矿料质量比

级配类型	填充度 / %	矿料用量 / %			固化剂用量 / %	铁尾砂用量 / %
		20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm		
级配二	170	17.41	17.39	17.39	5.70	42.10
	98	21.83	21.81	21.81	5.70	28.85
	94	22.14	22.12	22.12	5.70	27.92
	90	22.46	22.44	22.44	5.70	26.95
级配三	185	15.56	23.32	15.55	5.70	39.87
	98	19.80	29.68	19.79	5.70	25.02
	94	20.06	30.06	20.04	5.70	24.14
	90	20.31	30.45	20.30	5.70	23.24

1.2.3 填充度对铁尾砂碎石混合料性能的影响

1.2.3.1 重型击实试验

进行重型击实试验,确定3组级配铁尾砂碎石混合料在不同填充度下的最大干密度和最佳含水率。

级配一铁尾砂碎石混合料的最大干密度与填充度呈正相关关系。154%填充度的混合料最大干密度最大,最佳含水率则随填充度的增大呈现减小的趋势。

级配二铁尾砂碎石混合料的最大干密度与填充度呈正相关关系;级配二的填充度变化对混合料最佳含水率和最大干密度影响不显著,整体显得较为平稳。

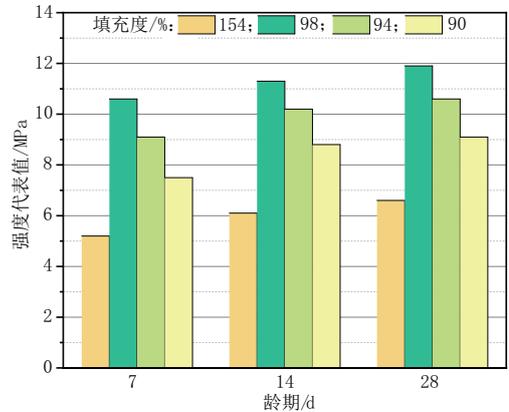
级配三铁尾砂碎石混合料的最大干密度与填充度呈正相关关系,其最佳含水率随着填充度的减小而减小。

1.2.3.2 抗压强度试验

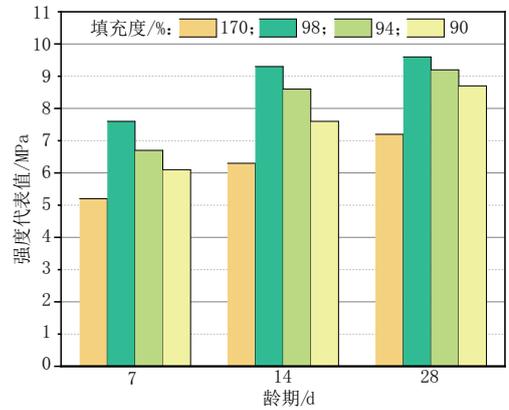
根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)要求,对3组级配成型试件进行不

同龄期抗压强度试验。

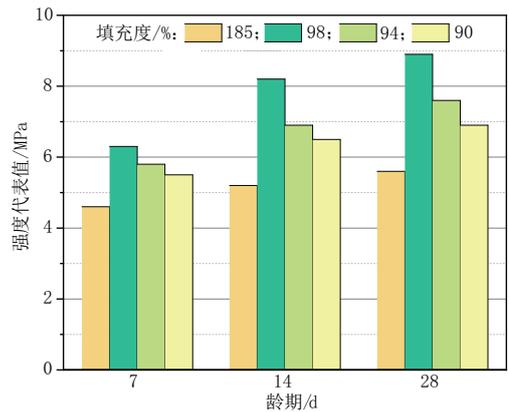
在不同填充度下,级配一至级配三试件的各龄期抗压强度见图2。



(a) 级配一



(b) 级配二



(c) 级配三

图2 不同填充度下,3组级配成型试件各龄期抗压强度

由图2可知,各级配试件在小于100%填充度时,填充度与抗压强度呈正相关关系。在98%的填充度下,级配一试件的14 d抗压强度较7 d时提高了6.6%,28 d抗压强度较14 d时提高了5.3%;级配二试件的14 d抗压强度较7 d时提高了22.4%,28 d抗压强度较14 d时提高了3.2%;级配三试件的14 d抗压强度较7 d时提高了30.2%,28 d抗压强度较14 d时

提高了8.5%。

1.2.3.3 劈裂强度试验

成型 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 试件,置于标准养护箱内养护至180 d,然后泡水进行劈裂强度试验,以此来研究不同填充度下试件劈裂强度的变化情况。3组级配试件的劈裂强度试验结果见表9。

由表9可知,3组级配试件的劈裂强度随填充度的变化规律与抗压强度相同。在98%的填充度下,级配一试件的劈裂强度是级配二试件的1.10倍,级配三试件的1.17倍。由此可见,级配一的抗疲劳开裂能力较强,原因主要是级配一铁尾砂掺量较大,级配偏细。

2 不同矿山铁尾砂碎石混合料性能研究

对马鞍山周边3处矿场铁尾砂碎石稳定后的性

表10 不同铁尾砂筛分结果

类型	累计通过百分率/%						
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
东山坑细铁尾砂	100	100	99.3	95.9	89.2	78.1	55.9
当涂矿铁尾砂	100	99.6	98.5	93.3	77.3	46.0	15.7
和尚桥矿铁尾砂	100	99.6	94.7	89.9	82.3	65.1	36.0

2.1 南山矿东山坑铁尾砂碎石混合料试验

采用2种比例将南山矿东山坑细铁尾砂与石屑、碎石混合,固化剂掺量分别为4%、6%、8%。进行重型击实试验,并成型试件进行7 d无侧限抗压强度试验。

配比A——南山矿东山坑细铁尾砂质量:0~5 mm石屑质量:5~10 mm碎石质量=60%:20%:20%。

配比B——南山矿东山坑细铁尾砂质量:0~5 mm石屑质量:5~10 mm碎石质量=70%:15%:15%。

7 d无侧限抗压强度试验结果见表11。

表11 东山坑铁尾砂碎石混合料7 d无侧限抗压强度

固化剂掺量/%	最佳含水率/%		最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		7 d强度/MPa	
	配比A	配比B	配比A	配比B	配比A	配比B
4	7.0	7.0	2.541	2.470	3.98	3.85
6	6.6	7.0	2.514	2.480	4.87	4.49
8	7.0	6.9	2.534	2.508	5.35	5.08

由表11可知,南山矿东山坑铁尾砂碎石混合料强度满足各等级公路对基层的强度要求,且随着固化剂掺量和碎石比例的增加,强度随之增大。

2.2 当涂矿铁尾砂碎石混合料试验

将当涂矿铁尾砂与石屑(0~5 mm)和碎石(5~10 mm)按70%:15%:15%的质量比配料,固化剂掺

表9 劈裂强度试验结果

级配类型	填充度/%	180 d劈裂强度/MPa
级配一	154	0.94
	98	1.84
	94	1.65
	90	1.47
级配二	170	0.81
	98	1.67
	94	1.52
	90	1.35
级配三	185	0.74
	98	1.57
	94	1.42
	90	1.23

能进行评价,进一步测试了不同碎石级配、掺量和固化剂用量的稳定铁尾砂碎石混合料7 d无侧限抗压强度。不同铁尾砂筛分结果见表10。

量分别为4%、6%。进行重型击实试验,并成型试件进行7 d无侧限抗压强度试验,结果见表12。

表12 当涂矿铁尾砂碎石混合料7 d无侧限抗压强度

固化剂掺量/%	最佳含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7 d强度/MPa
4	8.0	2.310	2.87
6	7.8	2.314	3.96

由表12可知,当涂矿铁尾砂碎石混合料7 d无侧限抗压强度随着固化剂掺量的增加而增大。固化剂掺量为6%的7 d强度是固化剂掺量为4%的1.38倍。

2.3 和尚桥矿铁尾砂碎石混合料试验

将和尚桥矿铁尾砂与石屑(0~5 mm)和碎石(5~10 mm)按60%:20%:20%的质量比配料,固化剂掺量为6%。进行重型击实试验,并成型试件进行7 d无侧限抗压强度试验,结果见表13。

表13 和尚桥矿铁尾砂碎石混合料7 d无侧限抗压强度

参数	固化剂掺量/%	最佳含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7 d强度/MPa
值	6	8.5	2.321	3.49

由表13可知,和尚桥矿铁尾砂碎石混合料在6%固化剂掺量下,其7 d无侧限抗压强度满足公路对底基层的强度要求。

3 结 语

(1) 骨架密实型铁尾砂碎石混合料在填充度小于100%时,填充度越高则混合料的密度越大、无侧限抗压强度和劈裂强度越高。

(2) 骨架密实型铁尾砂碎石混合料在填充度为98%时,级配一试件的7 d抗压强度是级配二试件的1.39倍,级配三试件的1.68倍;级配一试件的劈裂强度是级配二试件的1.10倍,级配三试件的1.17倍。

(3) 确定了马鞍山周边3家主要矿业单位的稳定铁尾砂碎石混合料技术指标(最佳含水率、最大干密度、不同固化剂掺量的7 d无侧限抗压强度),可直接作为后续工程应用的参考。

参考文献:

- [1] 白琦峰,张华,鲍伟超,等. 固化铁尾砂的路用性能研究[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(3): 40-43, 47.
[2] 宋宏伟,冯浩,郑攀,等. 固化剂稳定铁尾砂基层结构设计参数取

值分析[J]. 上海公路, 2020(3): 69-72, 101.

- [3] 孙吉书,陈朝霞,肖田,等. 石灰粉煤灰稳定铁尾砂矿碎石的路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(3): 59-62.
[4] 姜明,丁向群,龚威,等. 固化剂对道路铁尾砂矿基层强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(2): 231-235.
[5] 胡光伟,张衡,庄园,等. 无机结合料稳定尾矿砂的路用性能研究[J]. 交通世界-建养机械 2015, 370(28): 124-128.
[6] ZANKO L M, FOSNACHT D R, HOPSTOCK D M. Construction aggregate potential of minnesota taconite industry byproducts[C]// Conference on Cold Regions Engineering. Duluth, Minnesota United States: [s.n.], 2009: 252-274.
[7] MOHAMMAD H, GORAKHKI, CHRISTOPHER A, et al. Unconfined compressive strength of synthetic and natural mine tailings smended with fly ash and cement[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(7): 1-4.
[8] BASTOS L A D C, SILVA G C, MENDES J C, et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(10): 04016102(1-9).
[9] SUN J S, DOU Y M, CHEN Z X, et al. Experimental study on the performances of cement stabilized iron ore tailing gravel in highway application[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 97/98: 425-428.

(上接第283页)

要是由于HMM-13混合料的空隙率在2%以内,施工空隙率与设计空隙率一致,有较好的密水性;但砂当量降低会导致混合料的低温性能衰减,衰减幅度为5.98%。

参考文献:

- [1] JTG F40—2018,公路沥青路面施工技术规范[S].
[2] 王斌. 集料粉尘对沥青混合料性能的影响及其控制技术[D]. 南

京:东南大学,2016.

- [3] 关旭,李伟. 浅析拌和站除尘问题对沥青混合料性能的影响[J]. 吉林交通科技, 2014(3): 1-4.
[4] 杜骋. 沥青混合料回收粉的利用研究[D]. 南京:东南大学,2002.
[5] 谢兆星,李鼎乐,韩森,等. 针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(6): 736-739.
[6] 崔君毅. 粗集料含泥量对沥青混合料水稳定性的影响[J]. 北方交通, 2016(10): 44-47.