

文章编号:1673-9469(2025)03-0060-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.008

路面基层矿渣粉稳定全固废混合料力学性能试验研究

崔邯龙¹,付志东^{1*},吴鸿飞²,孟文清¹,张亚鹏¹

(1.河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2.河北光太路桥工程集团有限公司,河北 邯郸 056000)

摘要: 为提高工业固体废弃物的利用率,以粒化高炉矿渣粉为结合料,研究矿渣粉稳定全固废(钢渣、煤矸石和回收粉)混合料路面基层的力学性能。采用均匀设计法,将钢渣、煤矸石和回收粉的掺量作为因素,7 d 无侧限抗压强度、120 d 抗压回弹模量以及 120 d 劈裂强度为目标响应值,设计 6 组试验配合比(质量比)展开试验,运用 JMP 软件对试验结果进行回归分析,建立不同材料掺量与三大力学性能指标间的数学模型,并借助 Image J 软件对混合料劈裂断面图像处理,从微观层面揭示混合料产生力学强度的主要原因。研究表明:混合料力学性能随钢渣掺量的增多而提高;回收粉掺量的增加会对混合料前期力学强度产生不利影响,然而,随着养护龄期的增长,后期力学强度随回收粉掺量增加呈现先提高后降低的变化趋势,故其掺量不宜超过 35%;通过方差分析得出回归方程拟合程度较高,可为实际工程提供指导。

关键词: 工业固废;路用力学性能;混合料均匀设计;数字图像处理;回归分析

中图分类号: U414

文献标识码: A

Experimental Study on Mechanical Properties of Pavement Base with All Solid Waste Mixture Stabilized by Mineral Powder

CUI Hanlong¹, FU Zhidong^{1*}, WU Hongfei², MENG Wenqing¹, ZHANG Yapeng¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Hebei Guangtai Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000, China)

Abstract: To enhance the utilization rate of industrial solid waste, a study was conducted on the mechanical properties of stabilized pavement base mixtures using granulated blast furnace slag powder as the binder, with the full solid waste (steel slag, coal gangue, and recycled powder) as the raw material. The uniform design method was employed, with the proportions of steel slag, coal gangue, and recycled powder as factors, and the 7-day unconfined compressive strength, 120-day compressive rebound modulus, and 120-day splitting strength as the target response values. Six sets of test mix ratios (mass ratios) were designed for the experiments, and the test results were analyzed using JMP software. A mathematical model was established between the different material proportions and the three mechanical performance indicators. The mixed material's splitting fracture surface images were processed using Image J software to reveal the main reasons for the mechanical strength at the micro level. The research results show that the mechanical properties of the mixture increase with the increase in steel slag proportion; the increase in recycled powder proportion has an adverse effect on the initial mechanical strength of the mixture, but the later mechanical strength shows a trend of increasing first and then decreasing with the increase in recycled powder proportion, so its proportion should not exceed 35%. The regression equation obtained through variance analysis has a high fitting degree and can provide guidance for

收稿日期:2022-08-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1903602-01);河北省自然科学基金资助项目(E2020402079,E2022402103);固废资源化利用与节能国家重点实验室开放基金资助项目(SWR-2019-008);河北省科技重大专项项目(21283804Z);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(214422053007)

第一作者: 崔邯龙(1977—),男,河北邢台人,硕士,副教授,主要从事土木工程施工技术与管理研究。

* **通信作者:** 付志东(1997—),男,河南信阳人,硕士,主要从事土木工程施工技术与管理研究。

practical engineering.

Key words: industrial solid waste; road mechanical properties; mixture uniform design; digital image processing; regression analysis

近年来,随着我国工业化进程的不断推进,大量工业固体废弃物的排放给人类的生存环境带来了严重威胁,且在“双碳”目标的战略推动之下,如何实现固体废弃物的资源化利用更是成为了社会各界广泛关注的焦点问题^[1-2]。钢渣、煤矸石和回收粉均属于工业固废材料,通过国内外学者对固废材料的研究,目前煤矸石主要以混合料的形式用于筑路修道^[3],许多学者以石灰或水泥作为结合料激发煤矸石、粉煤灰中火山灰物质的活性,发现混合料的路用性能良好^[4-6];然而,当前市售石灰存在质量良莠不齐、生产过程污染严重等问题,这些因素导致近年来其在工程领域的应用规模呈现缩减趋势。回收粉是沥青拌合站拌合沥青混合料过程中产生的废料,其本身活性较低,是一种与天然集料成分相似的惰性材料^[7],但回收粉的粒径较小($<0.075\text{ mm}$),所以将其掺配至混合料中可作为填料,从而提高混合料的强度和抗裂能力^[8]。由此可见,钢渣、煤矸石和回收粉可以作为天然砂石料的替代品,而国内鲜见使用这三种材料协同制备路面基层混合料的研究。粒化高炉矿渣粉(下文简称矿渣粉)是良好的无机胶凝材料,其活性指数较高,目前不论是作为混凝土的矿物掺合料直接使用,还是掺入水泥中作为复合水泥的混合材,都取得了良好的应用效果^[9-10];且与石灰和水泥等结合料相比,在路面基层中应用时还

具有缓凝、受延迟时间影响小、性质稳定及价格低廉等优势^[11]。

本文以矿渣粉为结合料,将其与工业固废钢渣、煤矸石和回收粉按照质量比配制成路面基层混合料,采用均匀设计法设计了6组配合比并测试其无侧限抗压强度(7 d)、抗压回弹模量(120 d)和劈裂强度(120 d),通过应用数字图像处理技术及回归分析等方法对试验结果进行处理分析,以探究矿渣粉稳定全固废混合料作为半刚性路面基层的力学性能。研究成果能够为工业固废的实际公路工程应用提供理论依据,对助力“双碳”目标的早日实现具有现实意义。

1 试验材料与矿料级配

1.1 试验原材料

(1)矿渣粉:选用清漳牌 S95 级矿渣粉见图 1(a),其各项性能均可满足《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2017)^[12]要求,部分性能指标见表 1。

(2)钢渣:采用河北邯钢热闷转炉渣,为灰黑色块粉混合料(图 1(b))。依据《钢渣集料混合料路面基层施工技术规程》(YB/T 4184—2009)^[13]计算钢渣筛分质量通过百分率如表 2 所示。钢渣的化学成分组成如图 2 所示。按照《道路

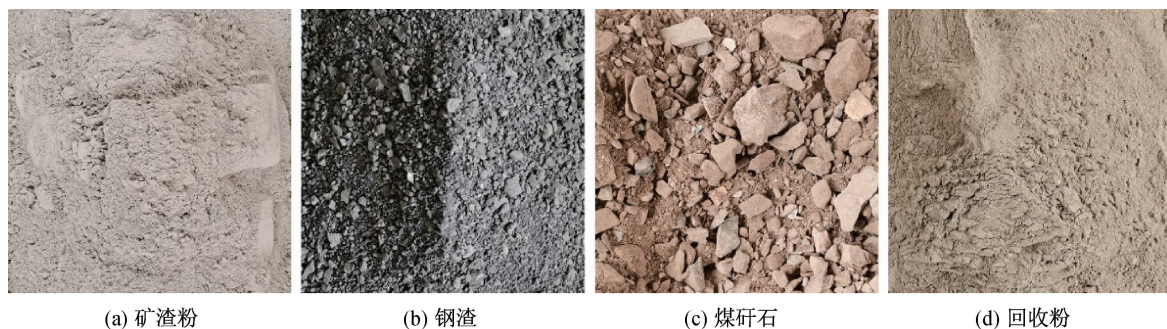


图 1 混合料原材料

Fig. 1 Mixture raw materials

表 1 矿渣粉性能指标

Tab. 1 Performance index of mineral powder

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	初凝时间比/%	烧失量/%	活性指数/%	
				7 d	28 d
2.88	556	119	0.80	80	103

表 2 钢渣干筛法试验结果

性能指标	颗粒筛分质量通过百分率/%		
	$d < 9.5$ mm	$d < 4.75$ mm	$d < 0.075$ mm
规范要求	100	90~100	0~20
实测数据	100	92.20	2.10

注: d 表示钢渣的颗粒粒径。

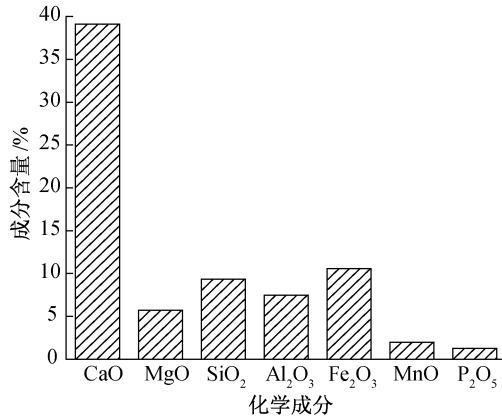


图 2 钢渣主要化学成分

Fig. 2 Main chemical composition of steel slag

用钢渣》(GB/T25824—2010)^[14]和《水泥混凝土路面用钢渣砂应用技术规程》(YB/T 4329—2012)^[15]

分别测试钢渣的浸水膨胀率及压蒸粉化率以评价其膨胀性,试验结果见表 3。

(3)煤矸石:取自邯郸峰峰矿区煤矸石山,外观呈红褐色,质地较硬见图 1(c),自燃时间约 40 年,其性能指标如表 4 所示。

(4)回收粉:取自邯郸市某沥青拌合站见图 1(d),密度为 2.68 g/cm^3 。经取样检测,有效 CaO+MgO 含量仅为 1.08%,性能指标见表 5。

1.2 矿料级配

本研究中将煤矸石中的粗颗粒(粒径 >4.75 mm)作为粗骨料,钢渣与煤矸石细颗粒当作细集料,回收粉作为填料使用。为充分利用固废资源并考虑施工简便,直接采用煤矸石和钢渣的自然级配。处于自然堆放状态下的煤矸石,粒度分布范围较大,故试验时须将煤矸石过 31.5 mm 砂石方孔筛以剔除其中的巨粒石块,从而减小或避免对试验结果产生的不利影响。由煤矸石的筛分试验结果(表 6)及自然级配曲线(图 3)可知本矿区矸石的颗粒整体偏粗,但仍能够满足 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》^[16]中 G-A-1 的级配范围要求,可以作为基层集料使用。

表 3 钢渣物理性能

Tab. 3 Physical properties of steel slag

性能指标	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸水率/%	浸水膨胀率/%	压蒸粉化率/%	
				$2.36 \text{ mm} \leq d < 4.75 \text{ mm}$	$4.75 \text{ mm} \leq d < 9.5 \text{ mm}$
规范要求	实测	实测	≤ 2.00	≤ 5.90	
实测数据	3.32	0.82	1.60	2.80	3.60

注: d 表示钢渣的颗粒粒径。

表 4 煤矸石性能指标

Tab. 4 Performance index of coal gangue

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	堆积密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	压碎值/%	吸水率/%	烧失量/%
2.40	1.425	28.96	3.30	10.28

表 5 回收粉性能指标

Tab. 5 Performance index of recycled powder

比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	塑性指数/%	水洗法筛分结果/%		
		$l < 0.6 \text{ mm}$	$l < 0.15 \text{ mm}$	$l < 0.075 \text{ mm}$
374	3.68	99.30	97.00	92.60

注: l 表示回收粉的颗粒粒径。

表 6 煤矸石干筛法试验结果

Tab. 6 Results of the dry screening tests for coal gangue

集料级配	通过方孔筛的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围	100~90	93~80	81~64	75~57	69~50	60~40	45~25	31~16	22~11	15~7	—	—	5~2
级配中值	95	86.5	72.5	66	59.5	50	35	23.5	16.5	11	—	—	3.5
筛分结果	100	91.2	76.1	69.4	64.3	56.6	40.8	27	18.6	12.8	9.7	6.5	3.6

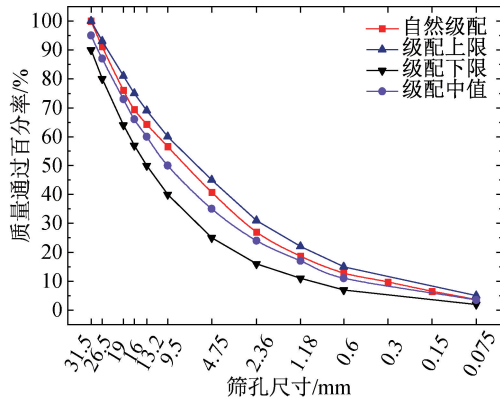


图 3 煤矸石自然级配曲线

Fig. 3 Natural gradation curve of coal gangue

2 混合料试验方案

2.1 均匀试验与配比设计

混合料的力学性能会受到结合料掺量、矿料级配、含水率与压实度等多种因素的综合影响。本文采用均匀设计试验法,将钢渣(A)、煤矸石(B)和回收粉(C)的掺量(相对于混合料总质量的百分比,下同)作为影响因素,并按照内掺法将矿渣粉(D)定量地掺入混合料中。经查阅资料及预试验,确定D掺量为4%,A、B、C的取值范围分别为[0.2,0.35]、[0,0.6]、[0.2,0.4],并在研究范围内对各因素选定6个水平,按照均匀设计表 $U_6^*(6^4)$ 进行等水平设计,调整后的具体试验配比见表7。

表 7 混合料试验配比与击实特性

Tab. 7 Tests mix proportion and compaction characteristics of mixture

试验组号	混合料组分质量占比/%				击实试验结果	
	钢渣(A)	煤矸石(B)	回收粉(C)	矿渣粉(D)	最佳含水率/%	最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)
H1	32	19	45	4	11.6	2.102
H2	22	35	39	4	11.4	2.031
H3	23	52	21	4	10.8	2.062
H4	43	0	53	4	9.3	2.201
H5	41	30	25	4	10.0	2.210
H6	29	40	27	4	10.1	2.143

2.2 试验内容与试验方法

2.2.1 重型击实试验

对6组试验配比分别进行重型击实试验,各组取两次平行试验的均值作为试验结果(表7),以获得最佳含水率与最大干密度。

2.2.2 试件制作养护

根据试验配比计算并称取材料,经加水拌合后,参照JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[17]通过压力机静压完成尺寸为 $\Phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的圆柱体试件制作。将制备完成的试件放于密封塑料袋中,放置于标准养护室中养护至规定龄期。

2.2.3 力学性能试验

路面基层主要承受面层传递的行车荷载,并将荷载扩散传递至垫层和路基,所以基层需要有足够的强度、合适的刚度以及一定的抗弯拉能力。以矿渣粉作为结合料,考虑现行规范中未规定此类混合料的养护龄期,故参照水泥稳定类基层材料,同时为保证力学强度充分发展,对混合料分别开展7d无侧限抗压强度试验、120d抗压回弹模量试验和120d劈裂强度试验(图4)以探究混合料的力学性能。

3 试验结果与数据分析

3.1 试验结果分析

混合料力学性能试验结果如图5和图6所示,

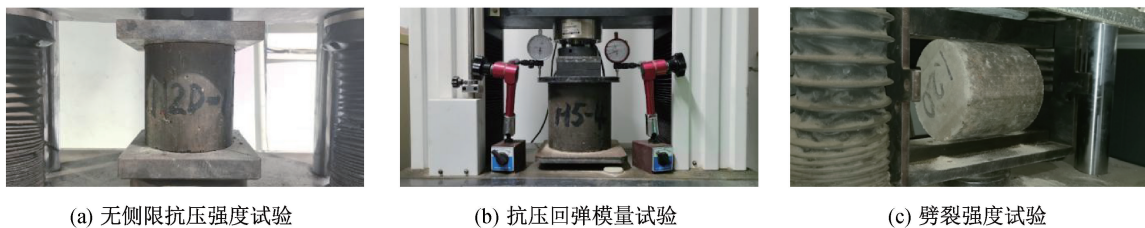


图 4 混合料力学性能试验

Fig. 4 Mechanical properties tests of mixture

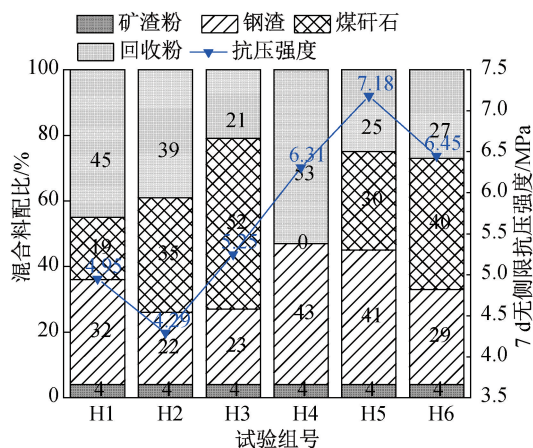


图5 混合料配比与7 d无侧限抗压强度

Fig. 5 Mixture ratio and unconfined compressive strength at curing age of 7 d

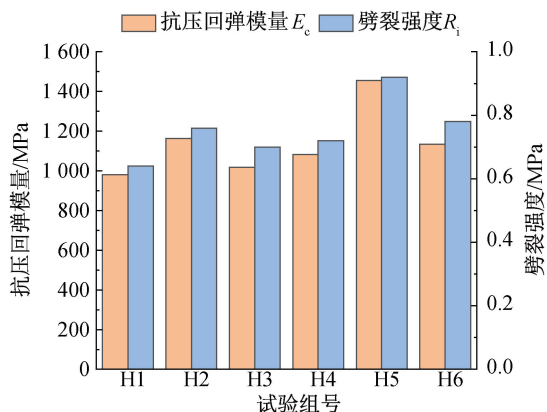


图6 120 d养护龄期下混合料抗压回弹模量和劈裂强度

Fig. 6 Compressive resilience modulus and split strength of mixture at curing age of 120 d

其中 R_c , E_c , R_t 均为各试验组数据的平均值,其变异系数 C_v 及标准差 S 均在规范允许范围内。

图5反映了混合料的6组配合比(以各组分的累积百分比表示)及其7 d无侧限抗压强度 R_c 。从图5可以得出,混合料 R_c 最大为7.18 MPa,最小为4.29 MPa,满足《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[18]中对于各级公路中、轻交通基层及底基层的强度要求。由图6可知,当养护龄期为120 d时,不同配比的抗压回弹模量 E_c 与劈裂强度 R_t (图6)表现出一致的力学性能变化规律, E_c 介于982~1455 MPa, R_t 介于0.60~0.92 MPa之间,说明基层混合料具备较好的刚度与抗弯拉强度。

当矿渣粉掺量一定时,增大钢渣掺量能够提高混合料的力学性能。当回收粉掺量基本一致时(H5组25%和H6组27%),钢渣掺量越大,混合料力学性能越好。这主要是在矿渣粉水化以及钢渣 f-CaO 遇水析出的条件下,混合料中呈现的碱

性环境使钢渣中的 C_2S 、 C_3S 等活性成分被激发,反应生成的水硬性胶凝物质随着钢渣掺量的提高而增多,在宏观上表现为混合料的力学性能提高。

从图5中可以看出,当钢渣掺量基本一致时(如H2与H3、H4与H5)煤矸石用量增多能够提高混合料7 d无侧限抗压强度,其中H5、H3的7 d无侧限抗压强度较H4、H2分别提高了13.8%和22.4%,而抗压回弹模量和劈裂强度却有升有降。这是因为煤矸石主要作为粗骨料使用将影响混合料的整体级配与密实度,进而会对混合料力学强度产生影响,同时自燃煤矸石在碱性环境中会发生火山灰反应,生成的水化产物将改变混合料的分子结构,且随着养护龄期的增长材料内部逐渐变得坚实牢固,混合料的强度、刚度及抗弯拉强度不断增大。

3.2 数据回归分析

3.2.1 模型的建立与显著性分析

运用JMP软件以Scheffe三次正则多项式模型对均匀试验结果进行逐步回归拟合,在剔除回归系数不显著的因子项后,得到混合料的抗压强度(Y_1)、抗压回弹模量(Y_2)和劈裂强度(Y_3)与钢渣(A)、煤矸石(B)和回收粉(C)掺量之间的多元回归方程分别为

$$Y_1 = -7.39A - 24.07B + 17.80C + 102.48AB + 105.44BC(B - C) \quad (1)$$

$$Y_2 = -1424.09A + 1637.35B + 5688.13C - 6322.02AB + 56387.70AC(A - C) \quad (2)$$

$$Y_3 = -1.40A - 0.17B + 4.13C - 6.13AB(A - B) + 37.00AC(A - C) \quad (3)$$

其中,A、B、C的实际范围分别为[0.22,0.43]、[0,0.52]、[0.21,0.53]。由模型的拟合效应汇总情况(表8)可知,各模型拟合显著水平较高,决定系数 $R^2 > 0.99$,表明预测值与实际值之间具有较好的相关性,模型拟合具有较高的可信度。因此,各模型能够良好地分析评价混合料力学强度与其组分掺量之间的数学关系。

表8 回归方程模型评价

Tab. 8 Evaluation of regression equation model

回归模型	拟合效应汇总				
	R^2	R_{adj}^2	F	P	显著性
Y_1	0.999 9	0.999 6	3 219.82	0.013 2	**
Y_2	0.999 8	0.999 1	1 534.97	0.019 1	**
Y_3	0.999 0	0.995 3	269.11	0.045 7	**

注:** ($P < 0.05$)表示模型拟合差异“显著”。

3.2.2 响应曲面图分析

根据 3.2.1 拟合的回归方程模型,以不同材料的掺量为自变量,三大力学性能为指标,画出相应的三元响应曲面图(图 7),分析各混合料因素掺量变化对力学强度的影响。

由图 7 可知,在 4% 矿渣粉激发下,钢渣、煤矸石与回收粉间存在交互作用。从整体来看,矿渣粉掺量为 4% 时,无论是前期还是后期,钢渣掺量越大,混合料的力学强度就越高。回收粉的掺量对混合料力学强度的影响在不同龄期表现出显著差异。早期,7 d 抗压强度与回收粉掺量呈负相关;后期,120 d 抗压回弹模量和 120 d 劈裂强度随回收粉掺量增加呈先升后降的变化趋势,其转折点出现在回收粉掺量约 35% 处,在低掺量区间(21%~35%)力学强度提升,在高掺量区间(35%~53%)力学强度衰减。煤矸石的掺量变化对力学强度的贡献大小会受到其他混合料因素的影响。综合

考虑混合料的力学性能以及响应曲面图的变化趋势,给出本试验研究范围内混合料的最优配比为矿渣粉:钢渣:煤矸石:回收粉=4%:43%:23%:30%,此时 $R_c=6.25\text{ MPa}$ 、 $E_c=1\ 791\text{ MPa}$ 、 $R_i=1.09\text{ MPa}$ 。

3.3 劈裂断面细观分析

数字图像处理技术是一种利用计算机对数字图像转化处理的技术,目前在工程领域已得到广泛应用^[19-21]。本文基于 Image J 软件对由高清数码相机拍摄的劈裂试验试件破坏后的断面图像进行处理、增强和分析,通过观察其结构内部各组分的形貌、级配、数量以及空间分布填充情况,从细观层面上分析混合料力学强度的形成原因。本文选取的 3 个典型配比 H3(煤矸石掺量为最大值)、H4(煤矸石掺量为 0,钢渣掺量、回收粉掺量为最大值)和 H5(宏观力学强度最高)的断面情况如图 8 所示,其中拍摄原图后缀为 a,二值化处理图像后缀为 b。

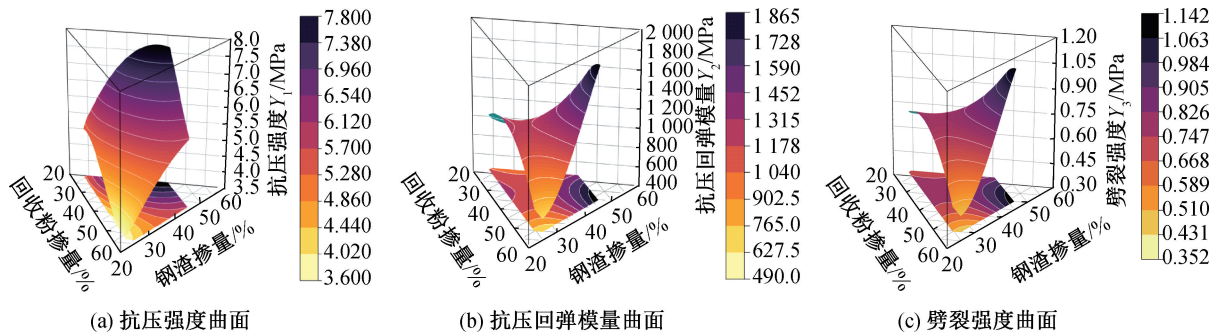


图 7 混合料力学性能响应曲面

Fig. 7 Mechanical properties response surface of mixture

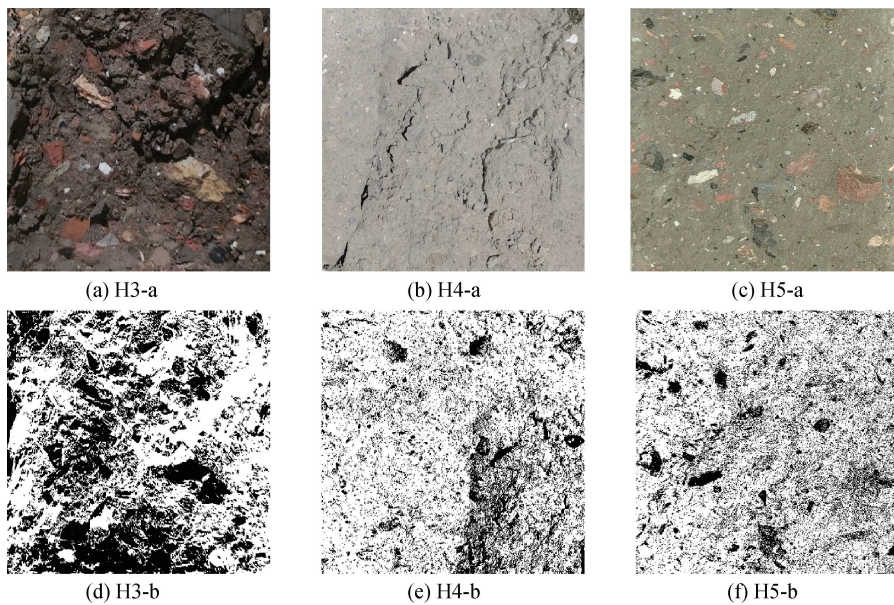


图 8 不同配比的混合料试件劈裂断面

Fig. 8 Splitting section of mixture specimens with different mixture proportions

混合料在细观层次上可以看作是由骨料(煤矸石、钢渣),粉状浆体(矿渣粉、回收粉)及二者之间的界面组成的三相非均质复合材料(图9)。结合图8与图9作如下分析:与H4、H5断面形貌相比,H3表面裸露粗糙,煤矸石粗骨料占主导且结构松散,细骨料钢渣含量显著偏低,破坏模式主要为“浆体-骨料”界面脱粘,并伴随部分煤矸石粗骨料自身碎裂,该现象揭示了混合料内部存在浆体与骨料间粘结力薄弱以及粗骨料嵌挤结构不良的核心问题,在该配比组成的结构缺陷下,混合料的宏观结构强度主要依赖于骨料颗粒间的内摩擦力。H4断面特征表明,粉状浆体对钢渣细骨料非均匀包裹,细颗粒呈“离散悬浮态”或“团聚嵌锁态”分布;断面整体粗糙度显著,揭示其压实度对含水率敏感性较高,该敏感性会导致混合料的水化反应进程受阻,浆体结构发育不完善,进而削弱界面过渡区强度;上述因素共同作用,致使试件呈现显著的结构失稳倾向。从H5断面形貌可以看出,破坏面平整连续,粗细骨料呈均匀弥散分布,矿料间形成高密实嵌挤骨架,界面过渡区被粉状浆体完全填充。该致密结构证实其级配设计合理且胶结料水化反应充分,赋予材料显著的板状整体性,其力学强度源于黏结力(浆体贡献)与内摩擦力(骨架贡献)的协同作用,这与宏观试验中H5试件峰值力学强度的测试结果高度吻合。

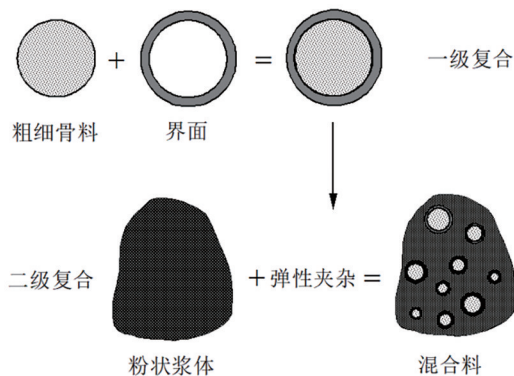


图9 混合料的三相复合结构

Fig.9 Three-phase composite structure of mixture

4 结论

1) 矿渣粉稳定全固废混合料的力学性能良好。试验研究范围内该类混合料7d无侧限抗压强度(4.29~7.18 MPa)能够满足各级公路中、轻交通的基层及底基层设计强度要求;120d抗压回弹模量(982~1455 MPa)和劈裂强度(0.60~

0.92 MPa)数据表明其刚度和抗弯拉性能良好。

2) 回归模型拟合精度较高。通过JMP软件回归分析,得到混合料的三大力学性能指标与混合料因素掺量间的回归方程模型,不同因素之间影响显著,各模型拟合程度较好,可以为不同等级公路的路面基层及底基层的选择设计提供相应合理配比,对于指导实际工程应用具有现实意义。

3) 不同矿料掺量对混合料力学强度影响显著。取4%矿渣粉掺量时,混合料力学强度与钢渣掺量呈正相关;回收粉存在35%掺量阈值;煤矸石对力学强度的贡献率受配伍耦合作用显著;基于细观三相非均质复合理论,混合料的力学强度源于胶凝体系黏结力和矿料骨架内摩擦力的双重耦合作用。

参考文献:

- [1] 顾晓薇,张延年,张伟峰,等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2022(1): 2-13.
- [2] 王海成,金娇,刘帅,等. 环境友好型绿色道路研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2137-2169.
- [3] LIU M, ZHU Z, ZHANG Z, et al. Development of highly porous mullite whisker ceramic membranes for oil-in-water separation and resource utilization of coal gangue[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 237: 116483.
- [4] 孟文清,黄祖德,崔邯龙,等. 煤矸石混合料抗压强度的试验研究[J]. 煤炭工程, 2012(7): 106-108.
- [5] 李彩惠,张亚鹏,王海燕,等. 煤矸石混合料路面基层施工工艺研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 54-56.
- [6] 张建锋,许家文. 石灰-粉煤灰-煤矸石混合料强度和水泥改性后抗冻性能试验[J]. 混凝土, 2017(12): 92-94+98.
- [7] 庄园. 沥青拌和站回收粉在石灰稳定土中的应用研究[J]. 交通世界, 2016(Z2): 192-193+213.
- [8] 刘畅. 沥青拌合站回收粉尘掺配水泥稳定碎石路用性能研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- [9] 周岳,周健,唐孟雄,等. 粉煤灰和矿渣粉对混凝土抗氯离子渗透和抗碳化性能的影响[J]. 混凝土, 2021(7): 60-64.
- [10] 李超,杨强斌,张海裕. 基于双掺技术混凝土配合比的预测模型及优化设计[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(1): 25-29.
- [11] 孙治军,姚爱玲. 矿渣微粉在路面材料中的研究与应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(5): 87-90+97.

(下转第74页)

- (S1): 5-10.
- [6] HUANG B, GUO C, TANG Y, et al. Experimental study on the permeability characteristic of fused quartz sand and mixed oil as a transparent soil [J]. *Water*, 2019, 11(12): 2514.
- [7] WU J S, XING M, YIN S X, et al. Analysis of micro-structure and low permeability with 3D digital rock modeling [J]. *Geofluids*, 2022, 2022.
- [8] 崔翔, 姚劲松, 杨吉红, 等. 三维孔隙微观性质对珊瑚砂介质渗透性影响研究 [J]. *土工基础*, 2023, 37(5): 782-786+796.
- [9] 崔翔, 朱长歧, 胡明鉴, 等. 珊瑚砂渗透性的微观机理研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(12): 2336-2341.
- [10] 任玉宾, 王胤, 杨庆, 等. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 491-497.
- [11] 任玉宾, 王胤, 杨庆, 等. 典型深海软黏土全流动循环软化特性与微观结构探究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1562-1568.
- [12] 任玉宾, 杨庆, 王胤, 等. 典型深海软黏土触变特性与微观结构探究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1295-1302.
- [13] 彭家奕, 张家发, 沈振中, 等. 颗粒形状对粗粒土孔隙特征和渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 592-600.
- [14] 李军红. 细观结构变异引起的垃圾土渗透性及强度劣化研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [15] 雷炳霄, 李俊, 吴佳伟, 等. 济南富水裂隙黏性土的渗透特性试验研究 [J]. *路基工程*, 2023(3): 68-72.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第 66 页)

- [12] 全国水泥标准化技术委员会. 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉: GB/T 18046—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 钢渣混合料路面基层施工技术规程: YB/T 4184—2009 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [14] 全国钢标准化技术委员会. 道路用钢渣: GB/T 25824—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. 水泥混凝土路面用钢渣砂应用技术规程: YB/T 4329—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [19] 张大翰, 李萌, 王新悦, 等. D-最优混料设计优化肉苁蓉速溶咖啡加工工艺 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(23): 9233-9241.
- [20] 黄志福, 赵毅, 梁乃兴, 等. 基于数字图像处理技术的沥青混合料摊铺均匀性实时监测评价方法 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34(4): 8-15+79.
- [21] 李万庆, 续玉倩, 孟文清, 等. 数字近景摄影测量在钢桁架节点试验中的应用 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(1): 42-47.
- (责任编辑 周雪梅)