

工业固废稳定煤矸石路基混合料力学与耐久性能研究

陈 杰

(中煤科工生态环境科技有限公司, 天津 300457)

摘 要: 为提升工业固废资源化利用水平, 以粉煤灰 (FA)、电石渣 (CS) 和矿渣粉协同稳定煤矸石制备路基混合料。通过设置 FA 与 CS 总掺量为 10%、15%、20%, 二者质量比为 0.5、1.0、1.5、2.0, 矿渣粉掺量为 5% 的配合比制备煤矸石路基混合料, 进行了 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度及抗压回弹模量试验, 测试分析掺量对抗冻性能、水稳定性及干缩变形的影响规律。结果表明: 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度、抗压回弹模量随 FA 和 CS 掺量增加呈先增大后减小趋势, 掺量为 15%、质量比为 1.5 时最佳; 抗压强度随冻融循环次数增加逐渐降低, 随干湿循环次数增加先增大后减小; 工业固废稳定煤矸石路基混合料中 FA、CS、矿渣粉、煤矸石最佳配比分别为 9%、6%、5%、80%。研究成果可为工业固废在路基工程中的规模化利用提供理论支撑。

关键词: 煤矸石; 工业固废材料; 路基混合料; 力学强度; 耐久性能

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0143-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.021

Study on the Mechanical and Durability Properties of Coal Gangue Roadbed Mixtures Stabilised with Industrial Solid Waste

CHEN Jie

(CCTEG Ecological Environment Technology Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: To enhance the resource utilisation of industrial solid waste, this study employs fly ash (FA), calcium carbide slag (CS) and slag powder to synergistically stabilise coal gangue for producing subgrade mixtures. Twelve coal gangue subgrade mixture designs were formulated by setting total FA and CS content at 10%, 15%, 20%, with mass ratios of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 between FA and CS, and a 5% slag powder content. Optimal mix designs were selected from the three dosage ranges based on 7-day unconfined compressive strength, flexural strength, and compressive rebound modulus test results. Further investigations examined the influence of dosage on freeze-thaw resistance, water stability, and dry shrinkage deformation. Results indicate: 7-day unconfined compressive strength, flexural strength, and compressive rebound modulus initially increase then decrease with rising FA and CS content, peaking at 15% content and a mass ratio of 1.5; compressive strength gradually declines with increasing freeze-thaw cycles, while compressive strength initially increases then decreases with wet-dry cycles. The optimal proportions for FA, CS, slag powder, and coal gangue in the industrial solid waste-stabilised coal gangue subgrade mixture were determined to be 9%, 6%, 5%, 80%, respectively. These findings provide theoretical support for the large-scale utilisation of industrial solid waste in subgrade engineering.

Key words: coal gangue; industrial solid waste materials; roadbed mixture; mechanical strength; durability performance

作者简介: 陈 杰 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 煤炭安全高效开采与洁净利用。

收稿日期: 2026-01-07

道桥技术

0 引言

煤矸石为煤炭开采和洗选过程中的主要副产物,其累计排放量在我国工业废渣中居于首位。大量堆存的煤矸石不仅占用土地资源,还对周边环境造成持续污染。将煤矸石规模化应用于路面基层材料,是处理煤矸石的一种有效途径,具有显著的环境与经济效益^[1-2]。当前,水泥稳定煤矸石是道路工程中的常用方法。由于煤矸石自身存在强度低、吸水率高等材料特性,往往需要较高的水泥掺量才能满足工程要求^[3-4],不仅增加了成本,有悖于固废资源绿色高值化应用理念。

在“双碳”战略背景下,推动工业固废的资源化再利用显得尤为迫切。部分学者开展了其他工业固废作为稳定材料改善煤矸石路基性能的相关研究。王稷良等^[5]总结了煤矸石颗粒特性,分析了煤矸石特性对路基混合料路用性能的影响规律,提出了资源化利用的建议;李倩^[6]采用粉煤灰和煤矸石粉胶凝材料,及煤矸石骨料制备地聚合物,结果表明粉煤灰与煤矸石粉质量比为3:2时效果最佳;童彧斐等^[7]进行了水泥、粉煤灰稳定煤矸石混合料抗冻性能试验,建立了冻融循环下的强度衰减模型,掺入粉煤灰可提高混合料的抗冻性能;阴琪翔等^[8]制备9组全固废路基混合料,通过力学强度试验和耐久性能试验筛选出路基混合料的最佳配比,钢渣与煤矸石质量比为1:1时力学性能最佳,回收粉、矿渣粉最佳掺量分别为25%、5%;马璐璐等^[9]采用赤泥、粉煤灰稳定煤矸石,研究了不同养护龄期时抗压强度、劈裂抗拉强度发展规律,结果表明粉煤灰掺量为15%时力学强度最佳;崔邯龙等^[10]研究了矿渣粉、回收粉稳定钢渣、煤矸石混合料路面基层的力学性能,结果表明提高钢渣掺量力学性能增大,回收粉降低早期力学强度;薛晓燕等^[11]、张建俊等^[12]针对煤矸石混合料力学及耐久性低的缺点,研究了固化剂对煤矸石混合料性能的影响,结果表明固化剂可增强混合料的密实程度,显著提高力学强度及耐久性能;李艳丽等^[13]研究表明,电石灰协同粉煤灰可用于稳定煤矸石用作路基混合料,总掺量为25%时力学强度最佳;李永翔等^[14]采用工业固废经

过碱激发制备煤矸石基层混合料,结果表明自然煤矸石路用性能最佳;张轩硕等^[15]研究了炉渣、粉煤灰、煤矸石路基混合料的收缩变形特征,随炉渣、粉煤灰掺量增加温缩变形增大,干缩变形减小,总掺量为50%时收缩变形最小。

综上,将煤矸石用作路基混合料具备可行性,但采用电石渣、粉煤灰稳定煤矸石路基混合料的研究较少。为此,利用电石渣、粉煤灰、矿渣粉、煤矸石制备路基混合料,通过力学强度和耐久性能试验,获得煤矸石路基混合料路用性能的最佳配比,研究成果可为工业固废在路基工程中的高效利用提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

工业固废稳定材料由粉煤灰(FA)、电石渣(CS)、矿渣粉3种材料组成,FA等级为Ⅱ级、属于F类,表观密度为2 240 kg/m³,比表面积为420 m²/kg;将电石渣(CS)粉磨后呈灰白色粉末状,主要成分为氢氧化钙晶体,易吸水,表观密度为2 270 kg/m³,比表面积为380 m²/kg;矿渣粉外观呈白色粉末状,S95级,表观密度为2 750 kg/m³,比表面积为580 m²/kg;工业固废材料的主要化学成分见表1。煤矸石集料由原状煤矸石经机械破碎、筛分获得,表观密度为2 520 kg/m³,颗粒最大粒径为31.5 mm,颗粒级配曲线如图1所示,煤矸石骨料的不均匀系数Cu、曲率系数Cc分别为19.8、1.9,属于良好且连续级配;煤矸石技术指标见表2,均可满足高速公路和一级公路的要求。

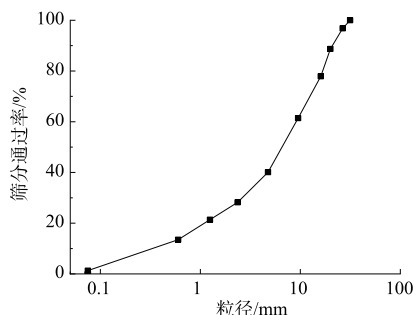


图1 煤矸石骨料级配曲线

Fig. 1 Coal gangue aggregate gradation curve

表 1 工业固废材料主要化学成分

Table 1 Main chemical components of industrial solid waste materials /%

化学成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
FA	63.7	2.5	24.3	5.8	1.2
CS	3.9	78.5	2.4	1.3	0.8
矿渣粉	36.7	33.6	16.7	1.5	7.6

表 2 煤矸石技术指标

Table 2 Technical indicators of recycled coal gangue /%

吸水率	压碎值	针片状含量	烧失量	自由膨胀率
4.2	18.6	9.5	8.1	15.7

1.2 试验配合比

制备 12 组不同配合比的煤矸石路基混合料，见表 3。固定矿渣粉掺量为 5%，F+C 表示 FA 和 CS 的掺量质量之和，掺量分别为 10%、15%、20%；F/C 表示 FA 与 CS 的质量之比，分别为 0.5、1.0、1.5、2.0。通过重型击实试验获得各组试件的最佳含水率，确定试件拌合水用量。

表 3 煤矸石路基混合料配比

Table 3 Coal gangue subgrade mixture ratio

试件编号	F/C	(F+C) /%	煤矸石 /%	矿渣粉 /%
1	0.5	10	85	5
2	1.0	10	85	5
3	1.5	10	85	5
4	2.0	10	85	5
5	0.5	15	80	5
6	1.0	15	80	5
7	1.5	15	80	5
8	2.0	15	80	5
9	0.5	20	75	5
10	1.0	20	75	5
11	1.5	20	75	5
12	2.0	20	75	5

1.3 试验方法

依据 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行 7 d 无侧限抗压强度、抗压回弹模量、弯拉强度试验，找出每种工业固废掺量下最优配合比。然后开展水稳定性、抗冻性能、干缩试验。每种试验中每组配合比试样 3 个，开展 3 组平行试验。

试件采用静压成型制备，压实系数不小于 0.98，脱模后放置于温度 20±1℃、湿度≥95%的养护室养

护。无侧限抗压强度试验养护龄期为 7 d，抗压回弹模量、弯拉强度试验养护龄期为 90 d，试验采用 DW-300 型万能试验机，加载速率为 1 mm/min。

抗冻性能采用冻融循环试验，将 28 d 龄期的试件浸水饱和 24 h，放置于 -18℃ 环境下冷冻 16 h，然后在 20℃ 恒温水箱融化 8 h，这样为 1 次冻融循环。循环次数为 5、10、15、20、25 次。水稳定性采用干湿循环试验，将 28 d 龄期的试件浸水养护 12 h，然后在 65℃ 烘箱中烘干 12 h，这样为 1 次干湿循环。循环次数分别为 10、20、30、40 次。试件标准养护 6 d 后取出，浸水养护 1 d，然后进行 0~90 d 干缩变形测试，采用千分表测定干缩变形。

2 结果与分析

2.1 7 d 无侧限抗压强度

由图 2 可知，F+C 掺量为 10% 条件下，F/C 质量比为 0.5、1.0、1.5、2.0 时，煤矸石混合料的 7 d 无侧限抗压强度分别为 3.75、4.13、3.76、3.27 MPa；F+C 为 15% 条件下，F/C 为 0.5、1.0、1.5、2.0 时，煤矸石混合料的 7 d 无侧限抗压强度分别为 4.16、4.87、5.16、4.54 MPa；F+C 为 20% 条件下，F/C 为 0.5、1.0、1.5、2.0 时，煤矸石混合料的 7 d 无侧限抗压强度分别为 4.28、4.56、4.72、3.81 MPa。由此可见，随 F/C 增加，煤矸石混合料的 7 d 无侧限抗压强度呈先增大后减小趋势，FA 和 CS 总掺量为 10%，质量比为 1.0 时 7 d 无侧限抗压强度最大；FA 和 CS 总掺量为 15%、20% 时，质量比为 1.5 时 7 d 无侧限抗压强度最大。CS 为高碱性材料，相比 FA 具有水化自硬性，故 FA/CS 为 0.5 时，随 FA 与 CS 总掺量增加，7 d 无侧限抗压强度增大；因 CS 水化产物以低强度的氢氧化钙和碳酸钙为主，导致以 CS 掺量为主的试件无侧限抗压强度较低；随 FA 与 CS 质量比增大，FA 掺量增加后可提供更多的氧化硅、氧化铝，在 CS 形成的碱性环境下激发了 FA 的火山灰活性，生成大量的水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶，牢固胶结了煤矸石集料，提升了煤矸石混合料的无侧限抗压强度；当 FA 与 CS 为 2.0 时，CS 掺量减少，碱浓度降低同样抑制了 FA 的火山灰活性，导致大量 FA 以填充材料赋存于混合料中，大大降低了煤矸石路基混合料的整体强度。

道桥技术

FA 和 CS 总掺量为 15% 试件相比总掺量为 10%、20% 试件, 最大 7 d 无侧限抗压强度分别提高了 24.9%、9.3%, 这表明 FA 和 CS 掺量过低或过高均会削弱煤矸石混合料的强度; 掺量过低时, 水化反应生成的硅酸钙和铝酸钙凝胶数量不足, 难以有效包裹煤矸石骨料颗粒, 降低了胶结性能, 从而导致强度降低; 掺量过高时, 细颗粒材料含量增加导致煤矸石含量减小, 胶凝材料过度包裹骨料, 使混合料形成“悬浮-密实”骨架结构, 该种结构主要依靠胶凝材料提供强度, 从而削弱了煤矸石混合料的无侧限抗压强度。

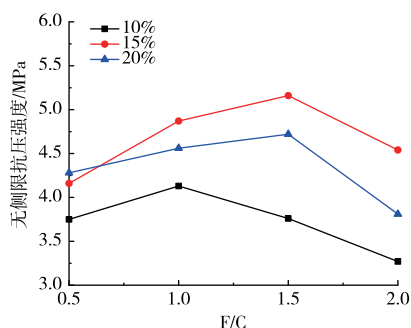


图2 煤矸石混合料的 7 d 无侧限抗压强度

Fig. 2 7-day unconfined compressive strength of coal gangue mixture

2.2 弯拉强度

由图 3 可知, F+C 为 10% 条件下, F/C 为 0.5、1.0、1.5、2.0 时, 煤矸石混合料的弯拉强度分别为 0.88、1.06、0.89、0.72 MPa; F+C 为 15% 条件下, F/C 为 0.5、1.0、1.5、2.0 时, 煤矸石混合料的弯拉强度分别为 0.92、1.17、1.41、1.25 MPa; F+C 为 20% 条件下, F/C 为 0.5、1.0、1.5、2.0 时, 煤矸石混合料的弯拉强度分别为 0.98、1.24、1.31、0.95 MPa。由此可见, 不同 F+C 掺量时, 煤矸石混合料的弯拉强度呈先增大后减小趋势; F+C 掺量为 10% 时, F/C 为 1.0 时弯拉强度最大, 而掺量为 15%、20% 时, F/C 为 1.5 时弯拉强度最大; 另外掺量为 15%、20% 时, 各质量比试件的弯拉强度均高于掺量为 10% 试件。综上分析, FA 和 CS 低掺量时不利于煤矸石混合料的弯拉强度增长, 这是由于胶凝材料不足而无法有效胶结煤矸石骨料, 导致弯拉强度降低; F+C 为 20% 时, F/C 为 0.5、1.0 时的弯拉强度均高于掺量为 15% 的试件; 当 F/C 为 1.5, 掺量为 15% 的试件弯拉强度最大。这表明, 适当提高稳

定材料掺量有利于提高煤矸石混合料的弯拉强度, 但需控制 FA 的比例。若 FA 比例过高时, CS 难以充分激发 FA 的活性, 因而无法参与水化反应生成水化凝胶。因此, 工业固废稳定煤矸石混合料中 F+C 最佳掺量为 15%, 二者质量比为 1.5。

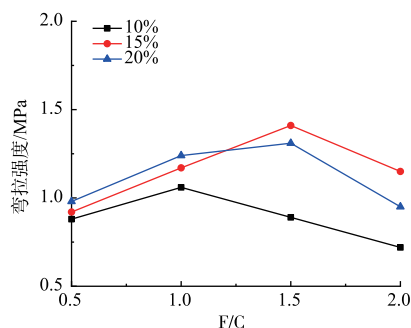


图3 煤矸石混合料的弯拉强度

Fig. 3 Flexural tensile strength of coal gangue mixture

2.3 抗压回弹模量

由图 4 可知, F+C 为 10%、15%、20% 时, 煤矸石混合料的抗压回弹模量随 F/C 增加呈先增大后减小趋势。F+C 为 10% 时, F/C 为 1.0 时抗压回弹模量最大, 为 13.8 GPa, 质量比为 2.0 的试件抗压回弹模量低于质量比为 1.0 的试件。F+C 为 15%、20% 时, 质量比为 1.5 时抗压回弹模量最大, 分别为 18.3、17.1 GPa; 当质量比为 2.0 时, 抗压回弹模量迅速减小, 掺量为 20% 试件降幅最大, 抗压回弹模量小于质量比为 0.5 的试件。这说明 FA 质量占比较高时会显著限制其水化反应, 这源于 CS 含量的减小使 FA 难以参与水化反应, 导致硬性胶凝凝胶数量减小, 煤矸石颗粒之间的连接和整体性能较弱, 从而使抗压回弹模量大大降低。F/C 为 0.5、1.0 时, 掺量为 20% 试件的抗压回弹模量均高于掺量为 15% 试件; 当质量比增加至 1.5 时, 掺量为 20% 试件的抗压回弹模量增幅显著低于掺量为 15% 的试件, 掺量为 15% 的试件抗压回弹模量最大, 这说明 F+C 为 20% 时稳定材料掺量过高, 增加 FA 质量占比使 FA 掺量过大, 导致混合料的需水量增加, 未参与水化反应的 FA 在后期失水收缩, 会引起结构产生微裂缝, 导致抗压回弹模量降低。综上, F+C 协同稳定煤矸石混合料时, 其主要为 CS 中的氢氧化钙提供活性氧化硅、氧化铝材料, 形成更高强度的水化硅酸钙和水化硅铝酸钙凝胶; 过大 FA 掺量时, 多数 FA

无法参与水化反应,其填充作用会削弱煤矸石混合料骨架结构强度,故需控制 FA 的质量占比不宜超过 1.5。

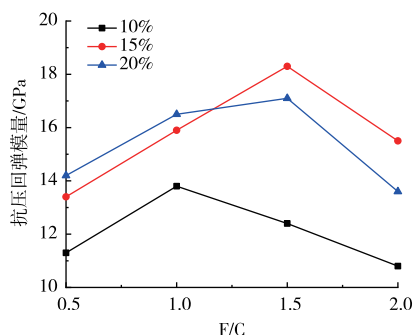
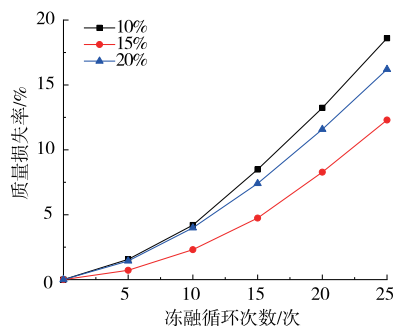


图 4 煤矸石混合料的抗压回弹模量

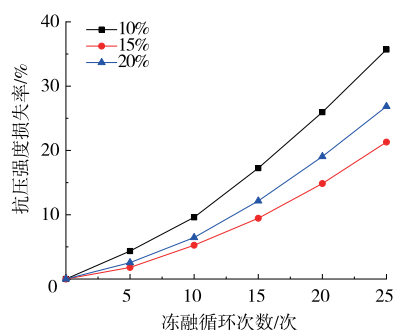
Fig. 4 Compressive resilience modulus of coal gangue mixture

2.4 抗冻性能

由图 5 可知,在 F/C 为 1.5 时,随冻融循环次数增加,3 种掺量下的煤矸石路基混合料的质量损失率和抗压强度损失率呈增大趋势。受循环冻胀应力作用,煤矸石路基混合料表层逐渐脱落,质量损失不断增加,抗压强度逐渐减小;10 次冻融循环内 F+C 为 10%、20% 的试件质量损失无明显差距,10 次冻融循环后,掺量为 10% 的试件质量损失增幅超过掺量为 20% 的试件;这是由于 F+C 为 10% 时对煤矸石路基混合料的胶结程度较差,煤矸石吸水率高,外部水分易侵入材料内部,增大了冻融循环时的冻胀应力,从而导致质量损失较大;而 F+C 为 20% 的试件未水化的 FA 颗粒含量较多,在循环冻胀力作用下,该部分 FA 颗粒同样易于吸水、软化、脱落,故其质量损失率和抗压强度损失率高于掺量为 15% 的试件。从 F+C 为 20% 的试件质量损失率和抗压强度损失率增长幅度来看,质量损失率增幅显著高于抗压强度损失率,这说明高 FA 掺量时,未胶结的 FA 颗粒易于脱落导致质量损失增加,但因形成胶结体数量较多,煤矸石骨架仍保持较高整体强度,故抗压强度损失率增幅低于质量损失率。经 25 次冻融循环作用, F+C 分别为 10%、15%、20% 的试件质量损失率分别为 18.6%、12.3%、16.2%,抗压强度损失率分别为 35.7%、21.3%、26.9%;可见, F+C 为 15%、20% 残余抗压强度仍高于 70%,抗冻性能较好;为提升煤矸石路基混合料的抗冻性能, F+C 宜为 15%。



(a) 质量变化率



(b) 抗压强度损失率

图 5 煤矸石混合料的抗冻性能影响

Fig. 5 The impact of frost resistance on coal gangue mixture

2.5 水稳定性

由图 6 可知,在 F/C 为 1.5 时,随干湿循环次数增加,3 种掺量的煤矸石路基混合料的抗压强度比(干湿循环后抗压强度与未进行干湿循环的试件的抗压强度之比)均呈先增大后减小规律。干湿循环为 10 次时,抗压强度呈现增大趋势;干湿循环超过 10 次抗压强度开始减小。这是由于受浸水和高温烘干的循环作用促进了 FA、CS、矿渣粉中活性成分的水化反应,生成大量额外的硬性凝胶材料。这些胶结物质包裹了煤矸石颗粒,填充了混合料中的孔隙,提高了路基混合料的密实度,从而增强了煤矸石路基混合料的抗压强度。而随干湿循环次数继续增加,煤矸石路基混合料在干湿循环作用下产生收缩、膨胀效应,引起混合料产生微裂缝并逐渐积累加大,导致混合料内部颗粒流失,使承载体系破坏,抗压强度降低。10 次干湿循环时, F+C 为 20% 的试件抗压强度增幅最大,掺量为 15% 的试件次之,掺量为 10% 的试件抗压强度增幅最小。这表明,高稳定材料掺量下受干湿循环作用可生成更多硬性凝胶提高抗压强度。随干湿循环次数继续增加, F+C 为 20% 的

道桥技术

试件抗压强度降幅高于掺量为 15% 的试件, 在 30 次干湿循环时抗压强度比低于掺量为 15% 的试件。经 40 次干湿循环后, F+C 分别为 10%、15%、20% 的试件抗压强度比分别为 99.1%、97.2%、88.6%, 掺量为 15%、20% 的试件抗压强度损失率均小于 5%, 说明其水稳定性好。为使煤矸石路基混合料具有更好的水稳定性能, F+C 不应小于 10%。

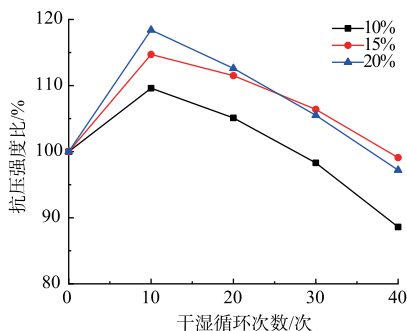


图 6 煤矸石混合料的水稳定性能
Fig. 6 Water stability of coal gangue mixture

2.6 干缩性能

由图 7 可知, 在 F+C 为 1.5 时, 随干缩龄期增加, 3 种掺量的煤矸石路基混合料干缩变形逐渐增大。干缩变形在 0~14 d 龄期内增速最快, 14~28 d 龄期增速逐渐减缓, 35 d 龄期时干缩变形基本趋于稳定。F+C 分别为 10%、15%、20% 的试件, 90 d 最大干缩变形分别为 176.3×10^{-6} 、 144.1×10^{-6} 、 208.3×10^{-6} 。可见, 掺量为 20% 的试件干缩应变最大, 高出掺量为 15% 的试件 44.6%, 这表明高 F+C 会增大干缩应变。这源于稳定材料用量增加, 导致混合料的用水量增大, 在养护期间易于产生收缩裂缝, 且在浸水养护时煤矸石混合料会从外部吸收大量水分。过多的自由水不参与水化反应, 水分蒸发过程会导致产生较大干缩应变。F+C 为 15% 时干缩变形最小, 这是由于该掺量下 FA 与 CS 水化反应最为充分, 可生成大量的水化硅酸钙和水化硅铝酸钙凝胶, 充分包裹煤矸石骨料, 提高混合料的密实程度, 减少外部水分进入结构内部的通道, 混合料含水量降低, 从而抑制干缩应变发展。F+C 为 10% 时, 水化生成的硬性胶凝材料较少, 难以充分包裹煤矸石颗粒, 一方面导致了煤矸石混合料骨架的整体强度较低, 另一方煤矸石易于从外部吸水。饱水后的煤矸石在

失水过程中存在干缩变形, 因煤矸石收缩主要源于稳定材料失水收缩, 故掺量为 10% 的试件干缩变形小于掺量为 20% 的试件。

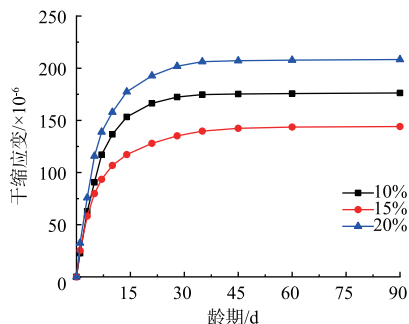


图 7 煤矸石混合料的干缩应变曲线
Fig. 7 Dry shrinkage strain curve of coal gangue mixture

3 结论

研究了 F+C、质量比对煤矸石混合料 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度及抗压回弹模量的影响, 并分析了两者质量比为 1.5 时掺量变化对抗冻性能、水稳定性及干缩变形的影响, 得出以下结论:

(1) 煤矸石路基混合料的 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度、抗压回弹模量随 F+C 的增加先增大后减小, 掺量为 15% 时最佳。同一掺量下, 随 F/C 增加, 力学强度呈先增大后减小趋势。掺量为 10%, 质量比为 1.0 时最佳, 掺量为 15%、20% 时, 质量比为 1.5 时最佳。

(2) 随着冻融循环次数增加, 煤矸石路基混合料的质量损失率、抗压强度损失率均呈增大趋势, F+C 为 15% 试件抗冻性能最佳, 掺量为 20% 的试件次之, 掺量为 10% 的试件最差。

(3) 随着干湿循环次数增加, 煤矸石路基混合料的抗压强度比呈先增大后减小趋势。干湿循环为 10 次时抗压强度增大, 之后随次数增加而减小。F+C 为 10% 试件抗压强度降幅最大, 掺量为 15%、20% 试件降幅较小, 两者水稳定性能相当。

(4) 随着干缩龄期增加, 煤矸石路基混合料的干缩变形呈增大趋势, 35 d 龄期时干缩变形基本趋于稳定。F+C 为 20% 的试件干缩变形最大, 掺量为 15% 的试件最小。

(5) 采用 FA、CS、矿渣粉稳定的煤矸石路基混合料具有较好的力学及耐久性能, 能够满足道路基

层材料的使用要求。建议 FA、CS、矿渣粉、煤矸石最佳掺量分别为 9%、6%、5%、80%。

参 考 文 献

- [1] 刘泽, 段开瑞, 周梅, 等. 煤矸石在土木工程材料中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (10): 88-99.
- [2] 张承实, 姚贤华, 尉晓雪, 等. 煤矸石在公路路基工程中的应用研究进展 [J]. 河南科学, 2024, 42 (9): 1334-1345.
- [3] 史艳忠. 煤矸石粗骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能影响分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 29-34.
- [4] 李明, 李昶, 郭雨鑫, 等. 水泥稳定碎石-煤矸石混合料性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (9): 2895-2901, 2909.
- [5] 王稷良, 郭文彬, 任中杰. 煤矸石特性及其对路面基层性能影响的研究现状 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (8): 109-116.
- [6] 李倩. 粉煤灰-煤矸石基地聚合物混凝土力学及耐久性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (3): 50-55.
- [7] 童彧斐, 严鹏飞, 张虎彪, 等. 水泥粉煤灰稳定炉渣煤矸石混合料抗冻试验 [J]. 中国科技论文, 2022, 17 (10): 1078-1083.
- [8] 阴琪翔, 院龙, 王海, 等. 全固废基层混合料路用性能研究

[J]. 精细化工中间体, 2025, 55 (5): 50-54.

- [9] 马璐璐, 张翥, 刘芳, 等. 赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特性及机理 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (7): 762-770.
- [10] 崔邯龙, 付志东, 吴鸿飞, 等. 路面基层矿渣粉稳定全固废混合料力学性能试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2025, 42 (3): 60-66, 74.
- [11] 薛晓燕, 赵梦珍, 张佳, 等. 复合固化剂对粉煤灰-煤矸石混合料路用性能影响研究 [J]. 河北工业科技, 2025, 42 (1): 62-69.
- [12] 张建俊, 姚柏聪, 孙源骏, 等. 离子固化剂对水泥稳定煤矸石结合料耐久性能的影响 [J]. 煤炭学报, 2022, 47 (9): 3472-3482.
- [13] 李艳丽, 夏清, 王功浩, 等. 电石灰-粉煤灰稳定煤矸石混合料力学性能研究 [J]. 河南城建学院学报, 2025, 34 (4): 35-42.
- [14] 李永翔, 季奎良, 党彦. 地聚物稳定煤矸石混合料路用性能及机理探究 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2024, 45 (5): 28-36.
- [15] 张轩硕, 严鹏飞, 丁永发, 等. 水泥粉煤灰稳定炉渣-煤矸石混合料的收缩试验 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8): 3325-3331.

(上接第 142 页)

参 考 文 献

- [1] 彭卫兵, 潘若丹, 马俊, 等. 独柱墩桥梁倾覆破坏模式与计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2016, 46 (2): 25-30.
- [2] 孙士尧, 周勇军, 王业路, 等. 基于目标可靠指标的独柱墩单点支撑桥梁整体倾覆稳定性 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (7): 121-132.
- [3] 庄冬利. 偏载作用下箱梁桥抗倾覆稳定问题的探讨 [J]. 桥梁建设, 2014, 44 (2): 27-31.
- [4] 宫亚峰, 何钰龙, 谭国金, 等. 三跨独柱连续曲线梁桥抗倾覆稳定性分析 [J]. 吉林大学学报, 2018, 48 (1): 113-120.
- [5] 李盼到, 马利君. 独柱支撑匝道桥抗倾覆验算汽车荷载研究 [J]. 桥梁建设, 2012, 42 (3): 14-18.
- [6] 叶鹏飞, 宋之舟, 周英浩, 等. 独柱墩弯桥抗倾覆与曲率半径的关系 [J]. 有色冶金设计与研究, 2025, 46 (6): 68-72.
- [7] 黄书考, 阳敏敏, 刘荣. 独柱墩梁桥抗倾覆稳定性分析及加固改造研究 [J]. 桥隧工程, 2023 (1): 90-92.
- [8] 李勇, 张劲泉, 余波. 钢筋混凝土 T 梁旧桥极限承载能力研究

[J]. 公路交通科技, 2017, 34 (4): 67-71.

- [9] 栗勇, 刘一平. 独柱支承梁式桥横向抗倾覆构造措施研究 [J]. 世界桥梁, 2014, 42 (1): 50-53.
- [10] 甘世泽. 支承间距及方式对独柱墩箱梁桥抗倾覆稳定性影响分析 [J]. 公路与汽运, 2017 (11): 165-168.
- [11] 刘国权. 独柱墩弯梁桥抗倾覆加固措施分析 [J]. 交通世界, 2024 (33): 19-21.
- [12] 龙胜. 基于专项试验的独柱墩加固桥梁抗倾覆性能评估体系 [J]. 福建交通科技, 2025 (10): 142-148.
- [13] 彭松. 关于独柱墩箱梁桥加固后的抗倾覆性能分析 [J]. 交通工程, 2025, 25 (9): 74-79.
- [14] 张志成. 公路独柱墩桥梁加固方法及抗倾覆性能分析 [J]. 工程管理, 2025, 10 (18): 133-135.
- [15] 陶戴邦. 新型独柱墩桥梁加固技术研究 [J]. 桥梁工程, 2025, (7): 120-124.
- [16] 刘鸿博, 张己存. 公路独柱墩桥梁拼宽改造方法及抗震性能优化研究 [J]. 甘肃科技, 2025, 41 (8): 6-11.