

煤矸石路基填料的力学性能及工程实践

尹作寅¹, 王 紫²

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300000;

2. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:为探究煤矸石在道路工程中综合利用的可行性,本文选取宁夏地区的煤矸石开展液塑限试验、击实试验和三轴试验,对比分析了煤矸石粗集料与细集料的特性,并依托上沟湾物流园项目进行了工程实践。结果表明:煤矸石的液限为31.26%,塑限为21.17%;击实试验测得最大干密度为 2.19 g/cm^3 ,最优含水率为4.5%。煤矸石细集料的应力-应变曲线呈现应变硬化型特征,粗集料的应力-应变曲线呈现应变软化型特征。基于试验结果,将煤矸石替代部分碎石应用于路基工程。现场监测数据表明:各断面最大沉降量小于9.0 mm,相邻断面差异沉降量均小于3.0 mm,满足路面结构层对不均匀沉降的严格要求。沉降指标符合行业标准,可为后续路面施工提供可靠的质量保障。

关键词:煤矸石路用;力学性能试验;断面沉降量

中图分类号:U416;X752

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0013-07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.04.037

Mechanical properties and engineering practice of coal gangue as roadbed filler

YIN Zuoyin¹, WANG Zi²

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China;

2. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To investigate the feasibility of comprehensive utilization of coal gangue in road engineering, this study selected coal gangue from the Ningxia region to conduct liquid-plastic limit tests, compaction tests, and triaxial tests. The characteristics of coarse and fine coal gangue aggregates were compared and analyzed. Furthermore, engineering practice was carried out based on the Shanggouwan Logistics Park project. The results show that the liquid limit of the coal gangue is 31.26% and the plastic limit is 21.17%. The maximum dry density obtained from the compaction test is 2.19 g/cm^3 , with an optimal moisture content of 4.5%. The stress-strain curve of the fine coal gangue aggregate exhibits strain-hardening behavior, whereas that of the coarse aggregate exhibits strain-softening behavior. Based on the experimental findings, coal gangue was utilized as a partial replacement for crushed stone in the subgrade construction. Field monitoring data indicate that the maximum settlement of each cross-section is less than 9.0 mm, and the differential settlement between adjacent sections is less than 3.0 mm. These values meet the stringent requirements for uneven settlement of pavement structural layers and comply with industry standards, thereby providing a reliable quality assurance for subsequent pavement construction.

Key words: coal gangue for road engineering; mechanical property test; cross-section settlement

收稿日期: 2025-08-19

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划引才专项(2024BEH04055)

作者简介: 尹作寅(1986—),男,高级工程师,从事固废资源化管理方向的研究。

通信作者: 王 紫(1998—),女,硕士研究生,从事岩土工程方向的研究。

煤矸石是煤矿建设、煤炭开采及洗选加工时排出的工业废弃物^[1]。在煤炭生产过程中,煤矸石的产出比例通常占原煤产量的 10%~25%^[2],这导致我国煤矸石产量巨大。煤矸石的大量堆积不仅会占用宝贵的土地资源,其所含的硫化物和重金属元素会随雨水冲刷渗透到土地,污染附近土地及地下水源。煤矸石堆积产生的粉尘及其自然释放的二氧化硫、氮氧化物等污染物会加重空气污染。此外,不稳定的煤矸石堆积体还可能诱发滑坡等地质灾害。煤矸石的露天堆放会给生态环境带来多方面危害。由此可见,煤矸石堆积引发的环境问题亟待解决。

研究发现,将煤矸石用于路基填筑,不仅能有效解决煤矸石堆积带来的一系列问题,还能降低碎石的使用量,从而显著降低工程成本。多位学者对煤矸石的路用性能进行了系统研究。王飞^[3]研究发现,煤矸石的 CBR 值与粗颗粒质量分数密切相关,当粗颗粒质量分数为 40% 时,其干密度达到峰值 2.36 g/cm³,此时的煤矸石级配良好且承载能力最大。李娜等^[4]认为,细集料质量分数对 CBR 值存在显著影响,呈现先升高后降低的变化规律。全佳^[5]通过室内试验系统评价了煤矸石的力学性能,并从经济、技术和生态效益角度论证了其道路应用的可行性。李永翔等^[6-7]提出,经地聚物稳定后的洗选煤矸石可作为低等级道路基层材料,替代传统碎石。刘辰昊等^[8]将煤矸石与石灰石粉复合应用于橡胶沥青混凝土改性,发现随着煤矸石掺量的增加,混合料的路用性能显著提升,且稳定度明显改善。张体龙^[9]的研究表明,水泥稳定煤矸石混合料在胶凝物质的作用下,其力学性能可满足规范要求,验证了煤矸石替代粗骨料的可行性。景宏君等^[10]通过逐级填充法和 K 法分别确定粗集料和细集料的配比,并确定骨架密实型水泥稳定煤矸石集料的合理级配范围。查文华等^[11]利用碱激发粉煤灰和矿渣,煤矸石替代粗骨料制备透水混凝土,采用 5~10 mm 的单级配骨料,煤矸石取代率为 35%,水胶比为 0.32,碱激发剂模数为 1,目标孔隙率为 15%,该配合比能够在满足透水混凝土路用规范要求的前提下最大程度利用煤矸石。在微观结构研究方

面,李钰等^[12]采用 XRD 和 SEM 技术对煤矸石的矿物组成和形貌特征进行了表征,并评估了其路用性能。

煤矸石长期堆存不仅占用土地,还可能引发自燃、扬尘及重金属污染等环境问题,亟需合理消纳利用。同时,传统碎石路基材料成本较高,而煤矸石因其良好的物理力学性能,有望替代碎石用于路基填筑,降低工程经济成本。基于环境效益与经济效益的双重考量,本研究拟通过煤矸石的基本力学性能试验(击实试验、液塑限试验和三轴试验)及实际工程应用验证,系统评估煤矸石的路用可行性,旨在为煤矸石在道路工程中的资源化利用提供理论依据与实践参考。

1 试样材料及试验方案

1.1 煤矸石的物理化学性质

1.1.1 煤矸石的颗粒级配

颗粒级配是对材料进行粒径分析的最有效手段,依据《公路工程集料试验规程》(JTG 3430—2020)中的筛分试验,利用振动筛对煤矸石的级配进行测定。振动筛实物如图 1 所示。



图 1 筛分机

利用破碎机将煤矸石进行破碎处理,采用四分法对破碎后的煤矸石进行筛分试验。采用的筛孔直径分别为 150.00、60.00、40.00、20.00、10.00、5.00、2.00、0.50 mm 和 0.25 mm,对每级筛内煤矸石剩余量进行称量、记录数据,级配曲线如图 2 所示。

1.1.2 煤矸石的化学成分

煤矸石的主要成分如表 1 所示,这些成分的占比受煤层地质条件和洗选工艺影响,直接影响其工程适用性与环境风险。

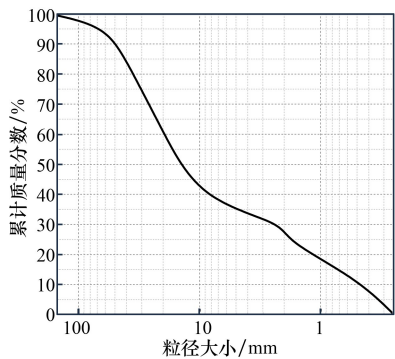


图 2 煤矸石的粒径级配

表 1 煤矸石主要化学成分(质量分数) %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃
46.92	38.83	0.55	0.97	1.26

1.2 试验设计与试验方案

1.2.1 液塑限试验

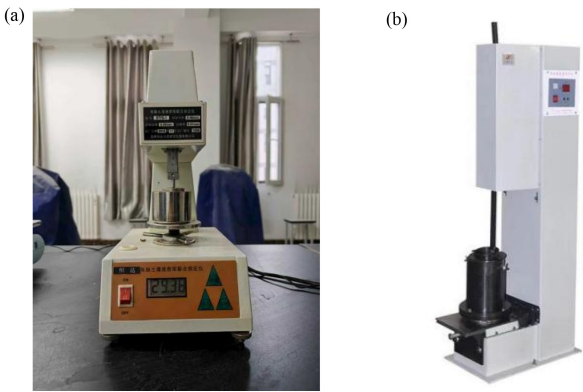
为了解煤矸石物理性质，取煤矸石细粒 0.5 mm 筛分煤矸石，测定煤矸石细粒的液塑限，为工程指标计算提供数据支持。试验设备包括圆锥仪(锥的质量为 76 g, 锥角为 30°)、盛土杯(直径为 50 mm、高度为 40 mm)、天平、调土刀和吸管等。试验步骤：取 6 份 200 g 煤矸石细粒(粒径 < 0.5 mm)，分别调节含水率至液限、略高于塑限及中间状态，每组两个平行样。将试样装入盛土杯，排气整平后置于测定仪升降台，调整锥尖与试样齐平并涂抹凡士林，测定锥入深度并记录数据。试验仪器如图 3(a)所示。

1.2.2 击实试验

煤矸石作为道路基层材料时，其压实性能主要受混合料的最大干密度和最佳含水率影响。本次试验参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)规定的标准击实试验方法，针对自然级配的煤矸石基层材料开展相关测试，重点研究其在自然级配状态下的最佳含水率和最大干密度。根据规范要求，试验材料的最大粒径需控制在 40 mm 以内，因此试验选用 31.5 mm 作为煤矸石的最大粒径限值。试验采用重型击实设备，按照干土法的标准程序进行操作。试验所用击实仪器详见图 3(b)。

1.2.3 三轴试验

为探究煤矸石的抗剪强度指标，分别取煤矸石筛后进行不固结不排水三轴剪切试验。依据击实试验得出的最大干密度和最优含水率制作试样。



(a) 液塑限试验仪器；(b) 击实试验仪器

图 3 试验仪器

控制压实度为 95%，探究不同集料煤矸石的抗剪强度指标，每种含水率的试样共进行 4 个围压的三轴试验，围压分别设置为 100、200、300 kPa 和 400 kPa。三轴试验仪器如图 4 所示。

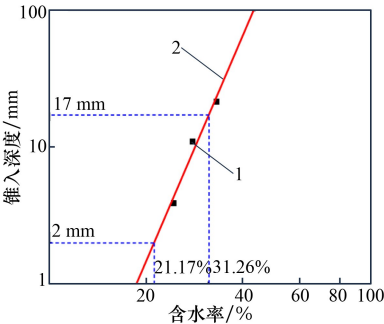


图 4 三轴试验仪器

2 试验结果

2.1 液塑限试验

通过试验得出含水率与锥入深度的关系如图 5 所示，取纵坐标入土深度 $h = 17$ mm 所对应的横坐标的含水率为该煤矸石细粒试样的液限 31.26%，取纵坐标入土深 $h = 2$ mm 所对应的含水率为该试样塑限为 21.17%。



1—锥入深度；2—拟合直线。

图 5 液塑限试验结果

2.2 击实试验

击实试验结果如图 6 所示, 煤矸石的最大干密度随含水率变化呈现先上升后下降的趋势。通过数据拟合分析, 确定该材料的最佳含水率为 4.50%, 此时对应的最大干密度达到 2.19 g/cm^3 。现象的形成机制可归纳如下: 当煤矸石含水率较低时, 颗粒表面水膜厚度不足, 压实过程中需要克服较强的结合水黏滞阻力和毛细管作用力。随着含水率的增加, 煤矸石的水膜厚度增大, 有效降低了颗粒间的摩擦系数, 使得颗粒重新排列并提高密实度。然而, 当含水率超过临界值后, 过量的自由水填充颗粒孔隙空间, 反而阻碍了材料的进一步压实。

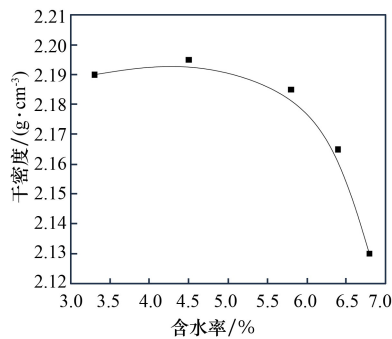


图 6 天然煤矸石的击实曲线

2.3 三轴试验结果

2.3.1 应力 - 应变曲线

煤矸石细集料的应力 - 应变曲线如图 7(a) 所示, 其中: ε_1 为应变, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏应力。由图 7(a) 可知, 随着围压的增加, 煤矸石的偏应力呈现上升的趋势。应力 - 应变曲线呈现应变硬化型, 试样的破坏为塑性破坏。

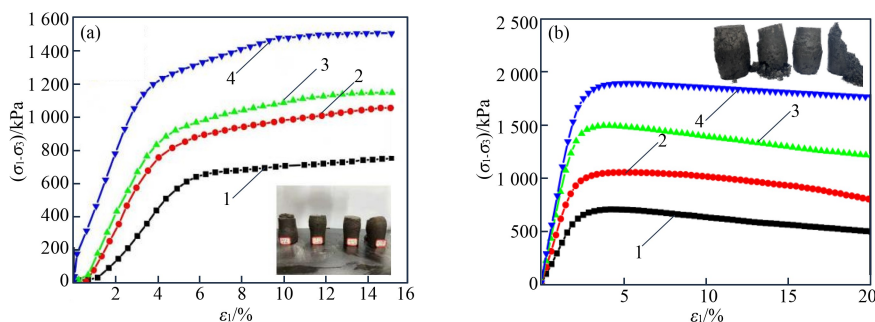
煤矸石细集料的应力 - 应变曲线呈现 3 个阶段: 1) 压密阶段, 初始加载时, 由于煤矸石颗粒

内部孔隙和微裂隙的存在, 曲线呈上凹形, 应变增长快于应力, 表现为煤矸石试样逐渐密实的过程, 这一阶段过程较快; 2) 弹性阶段, 孔隙闭合后, 集料骨架开始承担荷载, 应力 - 应变近似线性关系, 模量相对稳定, 此时变形以弹性为主; 3) 塑性强化阶段, 超过弹性极限后, 颗粒间滑移、破碎及内部微裂纹扩展导致非线性变形增强, 曲线斜率逐渐减小, 但应力仍随应变增加而上升, 表现出应变硬化特性。

煤矸石粗集料的应力 - 应变曲线如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可见, 随着围压的增加, 煤矸石的偏应力先升至峰顶后逐渐趋于下降。应力 - 应变曲线呈现应变软化型, 试样的破坏为塑性破坏。煤矸石粗集料含有较多的孔隙和裂纹, 随着轴向应力和围压的施加, 煤矸石的裂缝产生应力集中现象导致裂缝扩展。且煤矸石的颗粒较粗, 颗粒间的胶结作用较弱。当应力较大时, 颗粒之间的胶结作用破坏导致峰值后强度迅速下降。尽管围压会使得煤矸石的裂缝发生蔓延进而导致结构破坏, 但由于煤矸石本身强度较大, 其应力 - 应变曲线仍能表现出明显的软化现象。

2.3.2 破坏形态

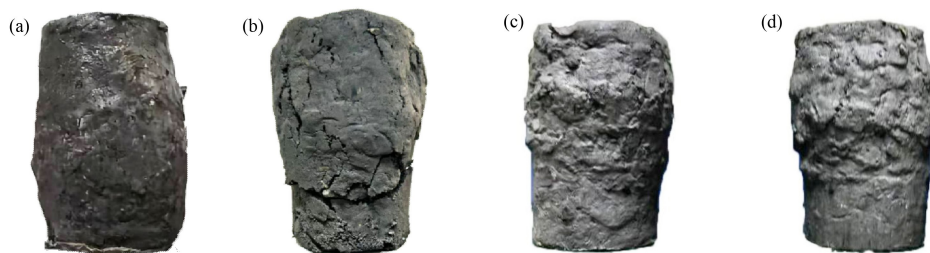
煤矸石主要破坏形态如图 8 所示。图 8(a) 中, 煤矸石的破坏形态为鼓胀破坏, 此时煤矸石试样在鼓胀破坏过程中, 试样表面会出现明显的横向膨胀变形, 平直的侧面向外凸起, 形成中部直径大于两端的“鼓腰”状形貌; 随着应力的增加, 表面逐渐出现多条不规则分布的纵向裂纹, 这些裂纹起初细密且呈随机走向, 随后逐渐扩展并相互连接; 试样中部发生明显凸起, 呈现鼓胀破坏。



(a) 细集料; (b) 粗集料

围压/kPa: 1—150; 2—250; 3—350; 4—450。

图 7 不同围压下煤矸石骨料的应力应变曲线



破坏形态: (a) 一; (b) 二; (c) 三; (d) 四

图 8 破坏形态

图 8(b) 显示, 试样中部产生较大的贯穿斜裂缝, 表面形成以 45° 左右倾角交叉的网状裂纹系统, 局部区域出现片状剥落或颗粒崩解现象, 部分破碎颗粒从主体分离并散落。整个破坏过程中, 试样表面粗糙度显著增加, 原先相对平整的表面变得凹凸不平, 且表面裂纹的分布密度和开口宽度均随应变增大而持续发展。

图 8(c) 显示, 煤矸石试样虽发生开裂但仍保留较强的整体性, 破坏形态也由鼓胀破坏转变为整体塑性压缩破坏。剪切面平整度随围压增大而提高, 表面附着细颗粒粉末, 反映出摩擦滑动导致的颗粒粉碎。围压同时会抑制表面剥落和颗粒崩解现象, 因此破坏后试样仍保持较好的整体性。

图 8(d) 显示, 煤矸石并未发生明显的剪切变形, 中部“鼓腰”状凸起变得不明显, 试样整体保持较为规则的圆柱形态, 仅局部出现轻微隆起。由于偏应力较大, 煤矸石试样抵抗轴向压缩的能力相对较强, 破坏后试样的整体性明显较强。

3 工程应用

3.1 项目背景

以上沟湾物流园项目为依托, 利用煤矸石作为路基填料。项目位于宁东镇, 地处银川市东 44 km 处, 该标段起讫既有里程 $K6+000 \sim K7+994.39$, 全长为 1 994.39 m, 其中路基 1 750 m/1 段, 占标段长度 87.7%; 接长涵洞 38.64 m/两座, 占标段长度 1.9%。

3.2 填筑方案

根据工程方案中路基填筑方法和填筑材料, 路基采用改良土包心法填筑工艺。具体做法: 路基顶面 1.2 m 以下填料采用煤矸石或煤矸石改良土包心填筑, 煤矸石或煤矸石改良土顶面至硬化

面结构层底面或者至路基顶面 0.9 m 范围, 采用细粒土夹不透水土工布封层。改良土包心法路基横断面填筑如图 9 所示。

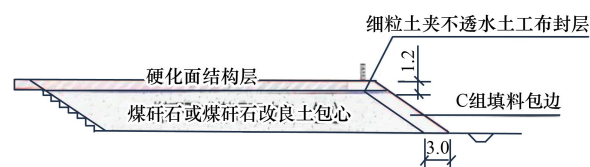


图 9 改良土包心法路基横断面填筑

m

3.3 监测范围及内容

监测内容上沟湾物流园路基使用煤矸石填料, 预埋变形监测元件, 对沉降变形及水平位移进行监测, 完成路基变形监测设备布设及数据采集, 对物流园路基进行全时段自动监测, 保障线路安全运营及顺利施工。

3.4 监测范围

监测范围为宁夏西创运通供应链有限公司上沟湾物流园现场。在 $K7+100 \sim K7+675$ 段, 布设 $K7+100$ 、 $K7+325$ 、 $K7+375$ 、 $K7+425$ 、 $K7+475$ 、 $K7+600$ 等 6 个监测断面; 其中 $K7+100$ 、 $K7+325$ 、 $K7+375$ 、 $K7+425$ 、 $K7+475$ 为 I 型监测断面, $K7+600$ 为 II 型监测断面。

3.5 断面沉降量

监测断面沉降量数据如表 2 所示。通过对 6 个监测断面沉降点 31 d 龄期的持续观测, 所有测点的累计沉降量均控制在设计允许范围内, 完全满足《城镇道路工程施工与质量验收规范》(CJJ 1—2008) 中对路基沉降稳定性的技术要求。各断面最大沉降量小于 9.0 mm, 表明路基压实效果良好, 地基处理措施得当, 符合道路工程工后沉降控制标准。监测数据同时显示, 相邻断面间的差异沉降量均小于 3 mm, 满足路面结构层对不均匀沉降的严格要求, 为后续路面施工提供了可靠的质量保障。

表 2 断面沉降量 mm

龄期/d	监测断面					
	K7 + 100	K7 + 325	K7 + 375	K7 + 425	K7 + 475	K7 + 600
1	-2.81	-2.75	-4.94	-2.59	-4.27	-0.93
2	-3.02	-2.81	-5.13	-3.84	-4.29	-0.60
3	-3.03	-2.84	-5.16	-4.63	-4.33	-0.82
4	-3.43	-2.91	-5.39	-3.83	-4.38	-0.83
5	-3.56	-2.92	-5.52	-2.82	-4.35	-0.81
6	-3.69	-2.94	-5.50	-3.43	-4.33	-0.84
7	-3.77	-2.98	-5.67	-2.58	-4.33	-0.81
8	-3.81	-2.99	-5.61	-3.14	-4.29	-0.79
9	-3.93	-2.99	-5.58	-2.76	-4.33	-0.75
10	-3.95	-2.99	-5.44	-2.96	-4.31	-0.72
11	-4.06	-3.01	-5.35	-2.92	-4.38	-0.73
12	-4.10	-3.03	-5.58	-3.97	-4.36	-0.75
13	-4.22	-3.04	-5.47	-2.88	-4.35	-0.80
14	-4.46	-3.04	-5.40	-2.79	-4.36	-0.81
15	-4.63	-3.07	-5.43	-4.31	-4.38	-0.78
16	-4.64	-3.09	-5.59	-3.76	-4.46	-0.81
17	-4.96	-3.12	-5.97	-2.90	-4.33	-0.77
18	-5.02	-3.13	-5.74	-4.17	-4.30	-0.80
19	-5.08	-3.14	-5.41	-5.06	-4.29	-0.77
20	-5.13	-3.17	-4.83	-4.86	-4.39	-0.76
21	-5.24	-3.20	-4.71	-5.57	-4.41	-0.76
22	-5.25	-3.20	-4.40	-7.75	-4.44	-0.73
23	-5.36	-3.24	-4.28	-7.98	-4.56	-0.71
24	-5.51	-3.26	-4.03	-7.88	-4.61	-0.74
25	-5.61	-3.27	-3.77	-7.38	-4.65	-0.73
26	-5.75	-3.28	-3.66	-8.14	-4.67	-0.76
27	-5.91	-3.28	-3.58	-6.17	-4.75	-0.75
28	-6.08	-3.34	-3.53	-2.06	-4.85	-0.77
29	-6.22	-3.46	-3.50	-1.81	-4.90	-0.79
31	-6.31	-3.48	-4.94	-0.17	-4.91	-0.85

表 3 煤矸石路基的技术效果

最大粒径/mm	吸水率/%	耐崩解系数/%	塑性指数	自由膨胀率	烧失量	压碎值	单轴抗压强度/MPa	有机质体积分数/%
150	70%	≥70%	≤10	≤45	≤20	≥35	≥15	≤10

3.6 煤矸石路基的技术效果

根据施工效果，路基填料的压碎值不得小于 30%，煤矸石的压碎值测得指标均大于 35%，符合规范要求。将煤矸石放入水中静置 96 h 测得煤

矸石的耐崩解系数≥70%，说明煤矸石在浸水后仍能保持一定的完整性。压实后的煤矸石中含有的活性成分，与路基混合料中的水泥能发生火山灰反应，形成水化硅酸钙等胶凝物质，提升强度。

4 结 论

本研究选取宁夏地区的废弃煤矸石作为研究对象,采用室内力学试验同时依托宁夏西创运通供应链有限公司上沟湾物流园实际的工程项目进行试验结果的实践,现得出结论如下。

(1) 煤矸石的液限为 31.26%,塑限为 21.17%;煤矸石击实试验的最大干密度为 2.19 g/cm^3 ,最优含水率为 4.5%。

(2) 煤矸石的应力-应变曲线可大致分为 3 个阶段:压密、弹性和塑性阶段。煤矸石细集料的破坏为塑性破坏,即应变随应力的增加而增加,应力-应变曲线呈现应变硬化型。粗集料的破坏方式为脆性破坏,即应力到达峰值后会下降。煤矸石主要破坏形态有 4 种。

(3) 将煤矸石应用于实际工程建设中并监测其断面沉降量,结果表明各断面沉降量及相邻断面沉降量之差均符合规范要求。

参考文献:

- [1] 周翠红,常欣. 煤矸石综合利用技术综述[J]. 选煤技术,2007(2):61-64;73.
- [2] 赵成毅. 煤矸石路基填料力学性能及结构特征研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2024.
- [3] 王飞. 煤矸石作路基填料的试验及应用研究[J]. 交通科技与管理,2023,4(16):189-191.
- [4] 李娜,苏静,张名成,等. 高速公路煤矸石路基填料路用性能试验研究[J]. 青海交通科技,2024,36(6):35-40.
- [5] 全佳. 煤矸石的路用性能及路基填筑施工技术[J]. 石材,2024(7):126-128.
- [6] 李永翔,季奎良,高妹敏. 洗选煤矸石在公路工程中的应用及特性研究[J]. 金属矿山,2024(10):273-280.
- [7] 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.
- [8] 刘辰昊,张策,刘伟超,等. 煤矸石粉填料橡胶沥青混合料路用性能研究[J]. 粉煤灰综合利用,2025,39(1):34-38.
- [9] 张体龙. 水泥稳定煤矸石混合料路用性能分析[J]. 西部交通科技,2023(11):27-29;48.
- [10] 景宏君,张超伟,高萌,等. 骨架密实型水泥稳定煤矸石级配设计与性能研究[J]. 材料导报,2025,39(2):111-117.
- [11] 查文华,李杰莲,吕文芳,等. 碱激发粉煤灰-矿渣基煤矸石透水混凝土制备及性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(4):1622-1634.
- [12] 李钰,王行行. 煤矸石利用现状及路用性能研究[J]. 交通科技与管理,2023,4(16):135-137.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。