

煤矸石混凝土性能与资源化应用研究评述

邓友生, 冯爱林, 孟丽青, 李龙, 章梦雨, 郑云方

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 西安科技大学桩承结构研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 煤矸石是一种煤炭伴生矿物生产的副产品, 属于大宗固废弃物, 煤矸石混凝土是其资源化应用的重要实践。碳中和碳达峰要求各行业为绿色生态的可持续发展做出相应规划, 在建筑材料资源化利用方面, 将煤矸石用作集料研制高性能混凝土开始了建筑与土木工程行业的新兴材料革新, 同时将其作为不可或缺的低碳化资源处理的中坚力量能够为碳中和进程加速。国内外学者对煤矸石混凝土的力学性能与工程应用等方面进行了很多理论和实验研究, 在改善煤矸石混凝土性能、工程实际应用及生产技术革新等方面取得重大进展, 构建了较为完整的研究体系。基于不同地区煤矸石化学矿物特性和物理性质的差异性, 阐述了煤矸石作为不同集料制备的煤矸石混凝土的力学性能与耐久性能, 分析了煤矸石在土木工程领域应用的可行性和目前研究局限性, 展望了煤矸石作为集料制备新型混凝土在道路工程和建筑结构中的资源化应用前景, 为煤矸石大宗化再生利用和煤矸石混凝土进一步研究提供新的视角和参考。

关键词: 煤矸石混凝土; 大宗固废弃物; 碳中和; 力学性能; 耐久性; 资源化应用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.02.026

中图分类号: TD94:TU528 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)02-0169-08

碳中和碳达峰愿景的实现, 必须依靠各行各业的全面努力。作为新型环保形式, 碳中和推动使用再生能源是深入实施绿色低碳可持续发展战略的重要实践之一, 在土木工程发展进程中, 对采煤和洗煤过程中排放的大宗固体废弃物煤矸石的资源化应用是该领域为响应碳中和碳达峰作出的努力, 如将煤矸石制备成混凝土用于路面基层、承重结构和砌体材料等^[1-3]。煤矸石来源于煤炭开采, 数量庞大, 约为煤炭开采量的10%~25%。据不完全统计, 我国煤矸石山多达2000座, 占地20多万亩, 仍以8亿t/a的速度增长, 造成了极大的资源浪费, 同时, 也对堆放区域周边的安全及环境产生了隐患, 其资源化利用已迫在眉睫。将煤矸石用作建筑集料制备煤矸石混凝土, 为煤矸石资源化再生利用提供有效的途径^[4-7]。

本文分析了煤矸石混凝土的抗压强度、抗

拉强度及抗折强度等力学性能, 以及抗冻性、抗碳化和抗渗性等耐久性能, 研究了我国煤矸石混凝土在实际工程建设中的应用情况, 指出目前煤矸石在混凝土应用中仍存在的缺陷和不足, 探索了煤矸石作为建筑材料在土木行业中的其他应用, 为实现煤矸石的绿色低碳大宗化利用提供参考。

1 煤矸石化学成分及其物理特性

煤矸石是一种由砂岩和页岩等组成的复杂混合物, 在煤炭开采和加工过程中产生的, 大量堆置会形成煤矸石山, 一般分为非自燃煤矸石和自燃煤矸石两类^[8]。煤矸石所包含的化学元素多达数十种, 以Si和Al为主, 同时含有 Fe_2O_3 和CaO等氧化物以及微量的稀有金属元素。此外, 煤矸石的化学成分与其类型密切相关, 表1反映了我

收稿日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878554, 41672308); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2018JZ5012)

作者简介: 邓友生(1969-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事基础工程及防灾减灾教学与科研工作。

通信作者: 冯爱林(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事基础工程及防灾减灾科研工作。

国不同地理产区的煤矸石成分含量^[9]。由于主要成分是 SiO₂，硬度高，耐磨且耐分解。因此，煤矸石可用作集料来制备混凝土。煤矸石含碳量约为 20%~30%，低于普通煤炭，但硬度比煤炭高。砂岩含量高的煤矸石的密度和硬度较大，前者硬度在 2~3 之间，后者硬度 4~5 之间^[10]。煤矸石的

物理性能指标如下：可塑性为 2.8~3.0，干容重为 1.18 g/cm³，密度为 2.6 g/cm³，含水率为 24%，吸水率为 18%，堆积密度为 0.90~1.80 g/cm³，耐火度为 1300 °C，烧结温度为 1050 °C，脱碳温度为 1000 °C，压碎值为 3.5%^[11-12]。

表 1 不同产地煤矸石的化学成分/%^[9]
Table 1 Chemical composition and coal gangue from different producing areas^[9]

产地	化学成分							烧失量
	SO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
辽宁抚顺	43.11	17.40	10.39	0.96	0.89	0.65	0.18	23.02
黑龙江鸡西	54.09	21.62	2.28	0.23	0.44	1.75	0.13	18.42
新疆石河子	17.70	5.72	1.77	15.1	4.54	0.82	0.17	51.90
山西大同	48.33	19.87	9.85	1.85	0.73	1.65	0.10	16.52
江西萍乡	52.56	16.57	3.35	1.24	2.01	2.39	0.21	20.71
四川攀枝花	46.32	19.24	5.63	0.96	2.76	3.57	0.18	19.17
贵州六枝	38.55	13.48	11.41	8.79	2.94	1.51	1.22	17.60
河北邢台	26.94	17.77	2.96	0.36	0.19	0.44	0.08	48.20
山东肥城	46.20	16.82	7.38	4.24	1.88	1.60	0.87	16.75
安徽淮南	53.64	23.94	1.17	0.20	0.31	0.83	0.07	15.12
江苏徐州	54.30	14.90	10.80	3.80	0.90	0.77	/	14
山西阳泉	48.57	23.29	5.66	1.81	0.98	1.33	0.12	16.54

2 煤矸石混凝土

目前，煤矸石混凝土的性能主要从力学性能和耐久性两个方面研究。以不同粒径取代集料来制备的煤矸石混凝土，对其性能影响不一，可为煤矸石混凝土在土木工程不同方面大规模应用提供理论依据。

2.1 力学性能

2.1.1 抗压强度

煤矸石混凝土的力学性能是评价煤矸石能否

用作集料的关键，抗压强度是混凝土最基本的力学性能之一。

(1) 粗集料：马宏强等^[13]通过实验得出煤矸石作混凝土集料是可行的(图 1)，发现其最大掺量受混凝土设计强度和所处环境的限制，建议当设计强度较高(C50)时对煤矸石粗集料进行煅烧处理，当设计强度低于 C30 时不需要对煤矸石进行煅烧处理；ZHANG 等^[14]将煤矸石用作集料设计了保温混凝土，煤矸石集料替代率 30% 时，混凝土综合性能较优。

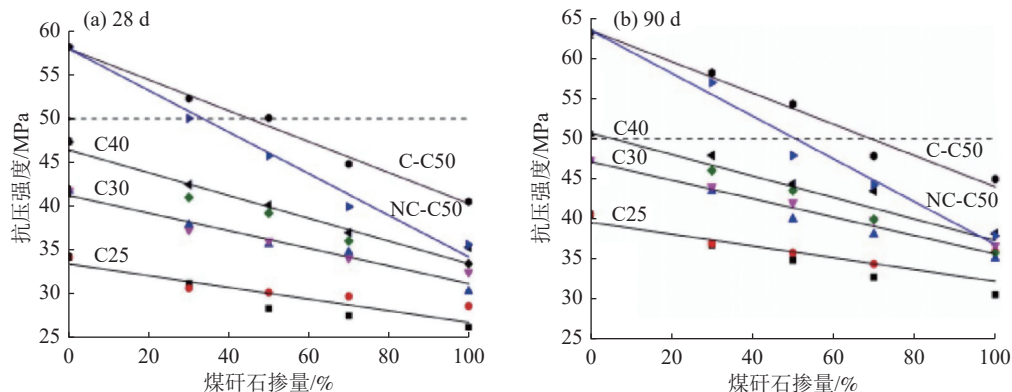


图 1 不同龄期煤矸石—碎石粗集料混凝土的抗压强度^[13](C—煅烧煤矸石; NC—未煅烧煤矸石)

Fig.1 Compressive strength of concrete specimens with coarse coal gangue-gravel aggregate in different ages^[13] (C – calcined coal gangue; NC – uncalcined coal gangue)

(2) 细集料和细磨粉：孙钢柱^[15]和HUANG^[16]等指出，煤矸石细集料取代率低于20%时，对混凝土抗压强度的影响微小；取代率为20%的煤矸石细集料混凝土抗压强度性能较高甚至高于天然细集料混凝土；取代率高于20%后，抗压强度开始呈下降趋势；取代率大于30%时，抗压强度逐渐小于天然细集料混凝土。白春等^[17]发现煅烧煤矸石粉分别与矿粉和粉煤灰的较佳复合掺量为30%和35%，复掺比例均为7:3，28 d抗压强度基本一致。

2.1.2 劈裂抗拉强度

劈裂抗拉强度是评价混凝土强度的重要指标之一。在一定取代率的情况下，煤矸石混凝土的劈裂抗拉强度比普通混凝土有所提高。

(1) 粗集料：何文波^[18]对煤矸石粗集料在水灰比0.40和0.45条件下研究不同取代率的煤矸石对混凝土劈裂抗拉性能的影响规律，煤矸石粗集料混凝土早期的劈裂抗拉强度接近甚至超过普通混凝土，随着养护龄期和取代率的增加，煤矸石粗集料混凝土的强度反而会降低，且早期增长速率比后期增长速率快；董作超^[19]采用劈裂法测定煤矸石作为粗集料制备混凝土的抗拉强度，满足普通混凝土抗拉强度要求。

(2) 细集料：王亮等^[20]指出，煤矸石作细集料时，劈裂抗拉强度随配制强度的增加而增加，不同掺和率的煤矸石混凝土抗拉强度性能见图2，随水胶比的增大而减小，以劈裂强度作为评价指标时，较优取代率为20%。HUANG等^[16]研究发现，随着煤矸石取代率的增加，混凝土抗拉强度先增加后下降，抗拉强度达到最大值，比普通混

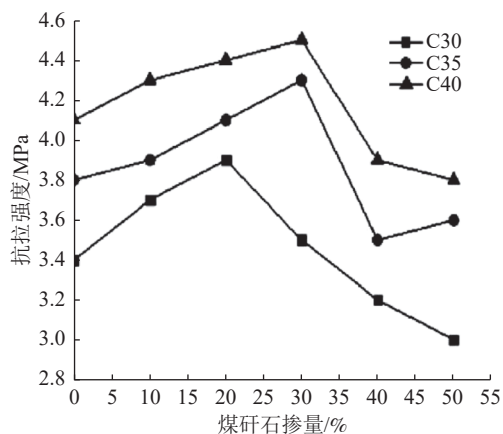


图2 不同掺量的煤矸石混凝土抗拉强度性能^[20]

Fig.2 Tensile strength performance of coal gangue concrete with different dosage^[20]

凝土高22.6%。

2.1.3 弹性模量

弹性模量是材料变形性能评价不可或缺的内容，煤矸石取代不同集料成分对弹性模量大小的影响各有差异。

(1) 粗集料：ZHANG等^[21]旨在研究自燃煤矸石集料(SCGA)取代率和粒径分布对混凝土力学性能的影响，当取代率为100%时，弹性模量降低了32.2%，而粒径分布对混凝土性能的影响有限。混凝土弹性模量随水灰比增加而减小，随取代率增加而减小，且水灰比对煤矸石粗集料混凝土的弹性模量值影响更加显著。WANG等^[22]用弹性模量模型准确地估计出煤矸石粗集料的弹性性能。

(2) 细集料：许荣盛^[23]通过动弹性模量试验发现，水胶比越大煤矸石细集料混凝土的动弹性模量呈减小趋势，煤矸石细集料的取代率为20%时，动弹性模值最高且随抗压强度的增大而增大；HUANG等^[16]做了进一步研究，在煤矸石细骨料混凝土中加入0.1%或0.3%的PET纤维，混凝土的静弹性模量增加，且脆性降低。

2.2 耐久性

2.2.1 抗渗性

混凝土是多孔、多相非均匀介质的复合材料，抗渗性是其耐久性能的重要指标之一。

(1) 粗集料：王晴等^[24]采用电通量法来评价煤矸石混凝土氯离子渗透性能，为煤矸石混凝土制备提供实质性建议；随着水胶比增大抗氯离子渗透性能逐渐减小，随着煤矸石掺量的增大抗氯离子渗透性先增大后减小，煤矸石掺量为45%的煤矸石粗集料混凝土抗氯离子渗透性最强^[25]。

(2) 细集料和细磨粉：孙钢柱等^[15]通过氯离子抗渗分析得到20%煤矸石细集料混凝土随着龄期的增加氯离子扩散系数先增大后减小。WANG等^[26]认为单掺煤矸石粉的混凝土，氯离子扩散系数降低到24%；双掺粉煤灰和煤矸石粉且取代率为20%，则降低到4.9%。

2.2.2 抗冻性

抗冻性是评价严寒地区混凝土耐久性的重要内容之一。煤矸石较碎石孔隙率大，吸水率高，煤矸石内部的水分在冻融循环过程中冻结成冰体积增大，使得其内部的孔隙特征发生明显的变化，由此形成的膨胀压力对集料的内部结构造成破坏。

(1) 粗集料: 王晴等^[27]发现粉煤灰的掺入对其抗冻性下降有抑制效果, 粉煤灰掺量不同, 煤矸石混凝土质量损失率呈规律性发展, 粉煤灰掺量增大, 抗冻性能先增大后减小, 适宜的粉煤灰掺量可提高煤矸石粗集料混凝土的抗冻性, 粉煤灰掺量为 10% 左右, 煤矸石混凝土抗冻能力提高 20% 左右。

(2) 细集料: 王亮等^[20]发现掺入煤矸石细集料后, 混凝土抗冻性能有所下降, 混凝土相对动弹性模量呈现逐渐降低的趋势, 对控制和改善煤矸石细集料混凝土的抗冻性能具有实际意义。严冰等^[28]得出煤矸石陶砂掺量增加, 抗冻性能先增后减, 待掺量增加到 90% 时抗冻融破坏作用又逐渐提高。WANG 等^[26]通过试验发现煤矸石粒径越小, 抗冻性能越好, 建议选择 CG 粒径最小的 2000 μm 网眼来制备混凝土。

2.2.3 抗碳化性

混凝土碳化是混凝土所受到的一种化学腐蚀, 混凝土的抗碳化性能是混凝土耐久性的重要组成部分。混凝土是一个存在有不同大小孔隙的多孔体, CO_2 气体进入孔隙与碱性物质发生化学反应, 使得碱度大幅减少, 混凝土内部不再密实, 大大降低混凝土使用寿命。董作超^[19]通过碳化试验得到煤矸石集料混凝土碳化深度随着碳化时间的增长而增加, 且前期增长较快, 后期增长较缓; 随煤矸石粗集料掺入量的增加而增长; 水灰比越大, 煤矸石集料混凝土抗碳化能力越差, 碳化深度越大。张成中等^[29]对混凝土碳化深度发展规律进行早期碳化试验, 结果表明单掺和双掺均能提高混凝土早期抗碳化性能且双掺的效果更明显; 张向东等^[30]得出在冻融-碳化耦合环境下碳化深度与碳化时间呈线性正相关; 易成等^[31]发现在低水灰比 (0.35) 时, 煅烧煤矸石粗集料混凝土抗碳化性能较未煅烧煤矸石粗集料混凝土更明显, CO_2 在煤矸石粗集料混凝土的渗透通道减少, 内部结构更致密。

3 资源化应用

3.1 路面基层材料

煤矸石用作道路路基填料, 具有广阔的发展前景, 但煤矸石材料在路面基层的应用研究相对较少。周梅等^[32]分析了石灰、粉煤灰和稳定性好的煤矸石混合料用作季节性冰冻地区路面基层的

技术可行性, 拓宽了路面基层材料的选材范围。刘晓明等^[33]对赤泥—煤矸石基公路路面基层材料进行耐久性及能谱分析, 絮状水化产物将煤矸石与其他混合料紧密的粘结在一起, 形成了具有一定机械强度的交通荷载承重结构。闫广宇等^[34]优化煤矸石集料品质和配合比, 采用水泥粉煤灰煤矸石集料作为路面基层材料, 其抗击碎性能等力学性能满足二级公路的路面基层材料性能要求。李明^[35]将水洗煤矸石应用于水泥稳定碎石路面基层施工, 发挥实用价值, 创造可观的经济效益。所以, 煤矸石用作路面基层材料具备可行性和实用的价值, 能够节约石料资源。

3.2 承重结构材料

已有学者对煤矸石混凝土制成的梁、柱和板等承重结构进行初探研究。王庆贺等^[36]基于有限元模型进行参数分析 (图 3), 控制煤矸石的掺量, 可使钢筋煤矸石混凝土梁受弯性能指标降低幅度在 10% 以内。张霓等^[37]对煤矸石混凝土-钢管空心柱力学性能进行研究, 为其推广应用做了实验基础。GAO 等^[38]得出煤矸石作为粗集料的取代物要比钢筋混凝土短柱更适于钢管混凝土短柱核心混凝土。闫亚杰等^[39]用磨细后的自燃煤矸石代替细集料, 设计研发夹层楼板, 其混凝土力学性能实验结果显示, 各参数均符合设计要求。周梅等^[40]利用自燃煤矸石砂轻混凝土制备叠合板时, 发现构件具有良好的整体性和较高的刚度及承载力, 用作结构楼板是可行的。

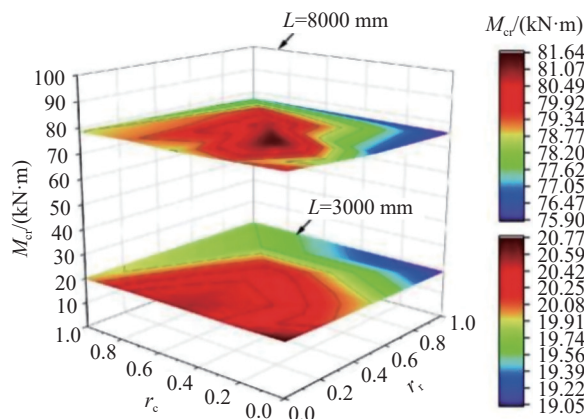


图 3 煤矸石集料取代率对开裂弯矩的影响^[36]

Fig.3 Effect of coal gangue aggregate replacement ratio on cracking moment^[36]

3.3 砌体材料

以煤矸石为主要原料制备的新型煤矸石混凝土是一种具有轻质减震、保温隔热和吸声降噪等

诸多优点的无机建筑材料,例如,煤矸石泡沫混凝土、煤矸石玻化微珠混凝土、煤矸石加气混凝土及煤矸石陶粒混凝土。张欣等^[41]用KD-1发泡剂制备的煤矸石泡沫混凝土强度较高,且潮湿环境下煤矸石泡沫混凝土的抗压强度不降反升。杨建利^[42]等指出,煤矸石较优掺量为66%,发泡剂较优掺量为40 mL,制品强度较高,质量较好。宫立等^[43]用煤矸石粗集料制成煤矸石玻化微珠保温混凝土,其热工性能良好,技术上符合绿色建筑材料的的要求。王长龙等^[44]以煤矸石和粉煤灰为主要原料制备加气混凝土,其制品性能符合《蒸压加气混凝土砌块》(GB 11968-2006)规定的要求。邱继生等^[45]对煤矸石陶粒混凝土的微观孔结构和冻融循环作用下性能进行分析,建立了具有较高精度的强度衰减理论模型,为煤矸石陶粒混凝土的耐久性研究提供了一定的微观基础。新型煤矸石混凝土不仅可用于对性能要求不同的砌体结构,还大量节省天然集料。

4 结 论

(1) 由于各地产区煤矸石的成分及物理特性有所差异,煤矸石混凝土的力学性能也存在较大的波动,所以对不同地区的煤矸石作为混凝土集料应合理选材、分类应用。

(2) 国内外对煤矸石的应用研究基本集中于用作粗集料和制备性能良好的低强度等级混凝土,而对其用作细集料和细磨粉和用于制备高强度等级混凝土的研究较少,并基本停留在混凝土试块的基本力学性能及耐久性方面。故煤矸石在混凝土的产品研制和梁、柱、板等承重结构方面理论及应用研究应进一步深入,建立产品及应用规范,以更好地在实际工程中大量应用煤矸石资源,节省天然材料。

(3) 我国煤矸石在道路工程中的应用效果较好,且资源化利用率提高,但主要集中于低等级公路路基填料,在路基面层的应用较少,今后可向路基面层及煤矸石混合料基层长期性能倾斜。

参 考 文 献:

[1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7):2197-2211.
XIE H P, REN S H, XIE Y C, et al. Development opportunities

of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7):2197-2211.

[2] 宋晓波,胡伯. 碳中和背景下煤炭行业低碳发展研究[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(7):17-24.

SONG X B, HU B. Research on low-carbon development of coal industry under the background of carbon neutrality[J]. *China Coal*, 2021, 47(7):17-24.

[3] JABONSKA B, KITYK A V, BUSCH M, et al. The structural and surface properties of natural and modified coal gangue[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190:80-90.

[4] HUANG G D, Ji Y S, Li J, et al. Improving strength of calcinated coal gangue geopolymer mortars via increasing calcium content[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166:760-768.

[5] SHEN L M. Composition of coal gangue and study on its reuse technology[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2020, 05:62-63.

[6] Verian K P, Ashraf W, CAO Y Z. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133:30-49.

[7] YI C, Ma H Q, Chen H Y, et al. Preparation and characterization of coal gangue geopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187:318-326.

[8] 段晓牧. 煤矸石集料混凝土的微观结构与物理力学性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.

DUAN X M. Study on the micro-structure and physical-mechanical performance of concrete with coal gangue as aggregate[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[9] ZHOU M, DOU Y W, ZHANG Y Z, et al. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2019, 220:386-395.

[10] 顾炳伟,王培铭. 不同产地煤矸石特征及其火山灰活性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(12):113-116+74.

GU B W, WANG P M. Study on different coal rejects features and volcanic ash activity from different areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(12):113-116+74.

[11] 贾鲁涛,吴倩云. 煤矸石特性及其资源化综合利用现状[J]. *煤炭技术*, 2019, 38(11):37-40.

JIA L T, WU Q Y. Properties and comprehensive utilization status of coal gangue resource[J]. *Coal Technology*, 2019, 38(11):37-40.

- [12] 刘江. 煤矸石的理化性能研究[J]. 煤炭技术, 2008(5):139-140.
- LIU J. Study on physicochemical performance of coal gangue[J]. Coal Technology, 2008(5):139-140.
- [13] 马宏强, 易成, 朱红光, 等. 煤矸石集料混凝土抗压强度及耐久性能[J]. 材料导报, 2018, 32(14):2390-2395.
- MA H Q, YI C, ZHU H G, et al. Compressive strength and durability of coal gangue aggregate concrete[J]. Materials Reports, 2018, 32(14):2390-2395.
- [14] ZHANG M A, LIU Li. Mix design for thermal insulation concrete using waste coal gangue as aggregate[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19
- [15] 孙钢柱, 关罡, 许荣盛. 煤矸石作细集料的混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(8):87-89+98.
- SUN G Z, GUAN G, XU R S. Experimental study on the performance of the concrete with coal gangue as fine aggregate[J]. Concrete, 2016(8):87-89+98.
- [16] HUANG Yanlin, ZHOU An. Study on Mechanical properties of PET fiber-reinforced coal gangue fine aggregate concrete[J]. Geofluids, 2021, 6627447.
- [17] 白春, 麻凤海, 刘书贤, 等. 煅烧煤矸石粉掺合料制备及对混凝土性能影响[J]. 非金属矿, 2017, 40(2):38-41.
- BAI C, MA F H, LIU S X, et al. Effect of the preparation process of calcined coal gangue powder admixture on concrete performance[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(2):38-41.
- [18] 何文波. 煤矸石粗集料混凝土性能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- HE W B. Study on Properties of coal gangue coarse aggregate concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.
- [19] 董作超. 煤矸石集料混凝土的力学性能与抗碳化试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- DONG Z C. Experimental study on mechanical properties and carbonation resistance of coal gangue aggregate concrete[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.
- [20] 王亮, 王志伟. 煤矸石细集料混凝土强度及耐久性能研究[J]. 混凝土, 2018(3):153-155.
- WANG L, WANG Z W. Study on the strength and durability of coal gangue fine aggregate concrete[J]. Concrete, 2018(3):153-155.
- [21] ZHANG Y Z, WANG Q H, ZHOU M, et al. Mechanical properties of concrete with coarse spontaneous combustion gangue aggregate (SCGA): experimental investigation and prediction methodology, Construction and Building Materials. 2020, 255: 119337.
- [22] WANG Qinghe, LI Zhe, ZHANG Yuzhuo, et al. Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32(5):101748.
- [23] 许荣盛. 煤矸石作为细集料的混凝土性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- XU R S. Experimental research on the performance of coal gangue as fine aggregate concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [24] 王晴, 李明泽, 吴陶俊, 等. 煤矸石混凝土抗氯离子渗透性研究[J]. 混凝土, 2014(7):1-4.
- WANG Q, LI M Z, WU T J, et al. Research on the permeability to resistance chloride ion of coal gangue concrete[J]. Concrete, 2014(7):1-4.
- [25] 顾云, 张彬. 煤矸石集料混凝土工作与力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(7):71-73.
- GU Y, ZHANG B. Research of working and mechanical properties of coal gangue aggregate concrete[J]. Concrete, 2019(7):71-73.
- [26] WANG Yuanzhan, TAN Yi, WANG Yuchi, et al. Mechanical properties and chloride permeability of green concrete mixed with fly ash and coal gangue[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233:117166.
- [27] 王晴, 黄成洋, 刘锁, 等. 煤矸石取代粗集料的混凝土抗冻性的研究[J]. 混凝土, 2015(9):77-79.
- WANG Q, HUANG C Y, LIU S, et al. Research on frost resistance of the coal gangue instead of coarse aggregate concrete[J]. Concrete, 2015(9):77-79.
- [28] 严冰, 宋战平, 王艳, 等. 煤矸石混凝土抗冻性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(3):109-111+128.
- YAN B, SONG Z P, WANG Y, et al. Study on the frost resistance capacity of coal gangue concrete[J]. Concrete, 2017(3):109-111+128.
- [29] 张成中, 孙广帅, 胡晓鹏, 等. 掺合料对混凝土早期碳化深度影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1):282-287.
- ZHANG C Z, SUN G S, HU X P, et al. Experimental research on influence of concrete early carbonation depth by admixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1):282-287.
- [30] 张向东, 李庆文, 李桂秀, 等. 冻融-碳化耦合环境下自燃煤矸石混凝土耐久性实验研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5):2595-2600.
- ZHANG X D, LI Q W, LI G X, et al. Experimental study on durability of self-ignite coal gangue concrete under freeze-thaw and carbonization coupling environment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5):2595-2600.

- [31] 易成, 马宏强, 朱红光, 等. 煤矸石粗集料混凝土抗碳化性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5):787-793.
- YI C, MA H Q, ZHU H G, et al. Investigation on anti-carbonation performance of coal gangue coarse aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(5):787-793.
- [32] 周梅, 李志国, 吴英强, 等. 石灰-粉煤灰-水泥稳定煤矸石混合料的研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(2):213-217.
- ZHOU M, LI Z G, WU Y Q, et al. Experimental research on lime-fly ash-cement stabilized coal gangue mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(2):213-217.
- [33] 刘晓明, 唐彬文, 尹海峰, 等. 赤泥—煤矸石基公路路面基层材料的耐久与环境性能[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(4):438-445.
- LIU X M, TANG B W, YIN H F, et al. Durability and environmental performance of Bayer red mud- coal gangue-based roadbase material[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(4):438-445.
- [34] 闫广宇, 周明凯, 陈潇, 等. 煤矸石集料路面基层材料应用研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(3):568-573.
- YAN G Y, ZHOU M K, CHEN X, et al. Study on application of coal gangue aggregate pavement base material[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2021, 45(3):568-573.
- [35] 李明. 淮北水洗煤矸石在路面基层中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- LI M. Research on the application of huabei water-washed coal gangue in pavement base[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [36] 王庆贺, 李喆, 周梅, 等. 自燃煤矸石集料取代率对煤矸石混凝土梁受弯性能的影响[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12):64-74.
- WANG Q H, LI Z, ZHOU M, et al. Effects of spontaneous-combustion coal gangue aggregate(SCGA) replacement ratio on flexural behavior of SCGA concrete beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12):64-74.
- [37] 张霓, 郑晨阳, 赵中伟, 等. GFRP管-煤矸石混凝土-钢管空心柱轴压试验[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3):571-577.
- ZAHNG N, ZHENG C Y, ZHAO Z W, et al. Experimental investigations on axial compression behavior of GFRP tube coal gangue concrete steel tube hollow columns[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3):571-577.
- [38] GAO Shan, ZHAO Guohao, GUO Lanhui, et al. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268.
- [39] 闫亚杰, 赵强. 装配式自燃煤矸石细石混凝土夹层楼板设计与试验研究[J]. *混凝土*, 2019(6):130-133+160.
- YAN Y J, ZHAO Q. Design and experimental study on assembled spontaneous combustion coal gangue fine stone concrete sandwich floor[J]. *Concrete*, 2019(6):130-133+160.
- [40] 周梅, 张院强, 杨尚谕, 等. 自燃煤矸石砂轻混凝土叠合板受弯性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210416.1337.002.html>
- ZHOU M, ZHANG Y, Q, YANG S Y, et al. Study on flexural behavior of spontaneous combustion gangue sand light concrete composite slab[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210416.1337.002.html>
- [41] 张欣, 周海兵, 陈飞宇, 等. 煤矿采空区充填用煤矸石泡沫混凝土发泡剂的研究[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(5):295-299.
- ZHANG X, ZHOU H B, CHEN F Y, et al. Research on foaming agent of coal gangue foam concrete for filling, 2015, 15(5): 295-299.
- [42] 杨建利, 杜美利, 杨小刚, 等. 渭北煤矸石制备高性能泡沫混凝土的研究[J]. *应用化工*, 2018, 47(9):1838-1840.
- YANG J L, DU M L, YANG X G, et al. Study of using coal gangue Weibei to prepare high performance foam concrete[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(9):1838-1840.
- [43] 宫立, 张泽平, 黄骁, 等. 煤矸石玻化微珠保温混凝土初探[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(8):8-11+44.
- GONG L, ZHANG Z P, HUANG X, et al. Preliminary study on thermal insulation glazed hollow beads concrete mixed with coal gangue[J]. *New Building Material*, 2016, 43(8):8-11+44.
- [44] 王长龙, 张凯帆, 左伟, 等. 煤矸石粉煤灰加气混凝土的制备及性能[J]. *材料导报*, 2020, 34(24):24034-24039.
- WANG C L, ZHANG K F, ZUO W, et al. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and fly ash[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(24):24034-24039.
- [45] 邱继生, 杨占鲁, 关虢, 等. 煤矸石陶粒混凝土微观孔结构特征及抗压强度[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(1):110-117.
- QIU J S, YANG Z L, GUAN X, et al. Microscopic pore structure and compressive strength of coal gangue ceramsite concrete[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(1):110-117.

Review of Research on the Properties and Resource Utilization of Coal Gangue Concrete

Deng Yousheng, Feng Ailin, Meng Liqing, Li Long, Zhang Mengyu, Zheng Yunfang
(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Plie-supported Structures Research and Test Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi, China)

Abstract: Coal gangue is a by-product of the production of coal-associated minerals, and belongs to bulk solid waste material. coal gangue concrete is an important practice for its resource utilization. Carbon neutrality and carbon peaks require all industries to make corresponding plans for the sustainable development of green ecology. In terms of resource utilization of building materials, coal gangue was used as aggregates to develop high-performance concrete, which started a new material innovation in the construction and civil engineering industries. At the same time, it can accelerate the process of carbon neutralization as the backbone of the indispensable treatment of low-carbon resources. Scholars at home and abroad have done a lot of theoretical and experimental research on the mechanical properties and engineering application of coal gangue concrete, and have made significant progress in improving the performance of coal gangue concrete, engineering practical application and production technology innovation, and established a relatively complete research system. Based on the differences in chemical and physical properties of coal gangue in different regions, this paper elaborates on the mechanical and durability properties of coal gangue concrete prepared with different aggregates, analyzes the feasibility and current research limitations of coal gangue application in civil engineering, and looks forward to the resource utilization prospects of coal gangue as aggregate to prepare new concrete in road engineering and building structures, provide a new perspective and reference for the large-scale recycling and utilization of coal gangue and further research on coal gangue concrete.

Keywords: Coal gangue concrete; Bulk solid waste material; Carbon neutrality; Mechanical properties; Durability; Resource-based application

////////////////////////////////////
(上接第 149 页)

Present Situation of Comprehensive Utilization of High Iron Manganese Oxide Ore and Development in Reduction Roasting

Zhang Hanquan, Zhang Pengfei, Xu Xin

(School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei, China)

Abstract: Manganese is widely used in steel, chemical, non-ferrous metallurgy, batteries and other fields. Most of the manganese oxide ore in China are lean ore with high iron and low manganese, and most of them need beneficiation pretreatment before smelting. Commonly used processes include blast furnace smelting method, reduction roasting-leaching method, and direct reduction-leaching method. Among them, the reduction roasting-leaching process can realize the selective separation of iron and manganese minerals, and the comprehensive resource utilization rate is high, but the energy consumption of the roasting process is large. The thermodynamic conditions and kinetics of the simultaneous reduction of iron and manganese minerals must be studied, and the interaction between the magnetization reduction of iron oxide minerals and the pre-reduction of manganese oxide and the law of simultaneous reduction, the phase transformation and crystal form transformation of manganese oxide and iron oxide ore must be clarified, the mineral composition and bonding method of the bond during the reduction process. Provide a theoretical basis for realizing the low-temperature reduction of iron minerals and manganese minerals and saving energy consumption.

Keywords: Manganese oxide ore; Iron minerals; Simultaneous reduction; Manganese monoxide; Magnetite