

煤矸石混凝土性能研究现状

王稷良^{1,2}, 马文辉^{1,2*}, 徐伟东³, 吕志刚⁴

(1.河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2.交通运输部公路科学研究院, 北京市 100088; 3.内蒙古雷石环保科技有限公司, 内蒙古 乌海 016040; 4.内蒙古综合交通科学研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:煤矸石是在原煤开采过程中产生的一种工业固体废弃物,其堆存量较大,利用率相对较低。若将煤矸石用作混凝土骨料,不仅能有效解决煤矸石堆存造成的环境污染,还能缓解天然砂石资源短缺的问题,为煤矸石的大规模利用开辟一条有效途径。该文针对煤矸石作为混凝土骨料的应用特性,系统分析了煤矸石化学成分、矿物组成以及物理特性,概述了国内外关于煤矸石作为骨料对混凝土的工作性能、力学性能、体积稳定性以及耐久性的影响规律,并展望了煤矸石在混凝土骨料应用中的发展趋势,以期煤矸石在混凝土中的大规模推广利用提供参考。

关键词:煤矸石;骨料;压碎值;吸水率;混凝土

中图分类号:U414

文献标志码:A

Research on Performance of Coal Gangue Concrete

WANG Jiliang^{1,2}, MA Wenhui^{1,2*}, XU Weidong³, LYU Zhigang⁴

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2.Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3.Inner Mongolia Leishi Environmental Technology Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia 016040, China; 4.Inner Mongolia Academy of Comprehensive Transportation Sciences Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: Coal gangue is an industrial solid waste produced in the process of raw coal mining. It has a large stock and a relatively low utilization rate. Using coal gangue as concrete aggregate can not only solve the environmental pollution caused by coal gangue storage but also make up for the shortage of natural sand and gravel resources, which opens up an effective way for the large-scale utilization of coal gangue. According to the application characteristics of coal gangue as concrete aggregate, the chemical component, mineral composition, and physical properties of coal gangue were systematically analyzed. The influence of coal gangue as aggregate on the working performance, mechanical properties, volume stability, and durability of concrete in China and abroad was summarized. The development trend of coal gangue used as concrete aggregate was prospected, so as to provide a reference for the large-scale popularization and utilization of coal gangue in concrete.

Keywords: coal gangue; aggregate; crush value; water absorption; concrete

0 引言

众所周知,中国煤炭资源丰富,是全世界最大的煤炭生产和消费大国,截至2020年,中国的原煤产量约390亿吨,煤矸石的产量占原煤产量的15%~

20%,其堆存数量已达70亿t左右,煤矸石已成为当前中国积存量最大、占地最广的工业固体废弃物之一。而煤矸石大面积堆积引发了很多生态问题,主要包括对土地的侵占,对空气、水体、土壤的污染,以及生态环境、公共安全的潜在危害^[1-3]。随着国家

收稿日期:2023-03-23(修改稿)

基金项目:内蒙古自治区交通运输科技项目(编号:NJ-2022-13, NJ-2020-28)

作者简介:王稷良,男,博士,研究员.E-mail:jiliangwang@163.com

*通信作者:马文辉,男,硕士研究生.E-mail:1533069165@qq.com

绿色矿山工程建设的推动,各级政府深入贯彻落实创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念,积极推动固废“减量化、资源化、无害化”。在处理煤矸石方面,政府正在制定并健全相关法律法规和引导性政策文件,如《煤矸石利用技术导则》《煤矸石综合利用管理办法》等,同时也在积极推动煤矸石等大宗固废处理技术的科技研发和大宗固废综合利用基地的落实。目前,煤矸石利用问题已经得到行业和社会的广泛关注^[4-6]。

英国、美国、日本、苏联等国家很早就开始了煤矸石的资源化利用,将煤矸石应用于水工建筑物、公路、铁路、路基、路堤充填材料、建筑材料等方面。中国从20世纪70年代开始对煤矸石进行大量的研究,目前在发电、建筑、化工、农业等领域的应用较为成熟^[7-10]。

对于煤矸石大规模利用而言,将其作为混凝土骨料是最有效的途径之一,同时也为混凝土骨料拓宽了原材料来源。目前,对煤矸石的研究和利用主要分为两种方式:①将煤矸石作为混凝土骨料,但经过简单破碎后,需要进行筛选或热处理;②通过烧结工艺将煤矸石制作成陶粒,用作混凝土轻骨料^[11]。国内外学者对煤矸石骨料及煤矸石骨料混凝土进行了大量研究,重点集中在煤矸石的理化特性及煤矸石置换率对煤矸石混凝土工作性能、力学性能、体积稳定性、耐久性等方面的影响。此外,学者们还探索了煤矸石混凝土性能的改善措施。研究表明:煤矸石可以替代天然骨料用于水泥混凝土,是一种性能较好的骨料^[12]。但受煤矸石成因、化学组成影响,其性能差异显著,如何在个性之中找到共性特点,建立相应的分级分类体系,并根据煤矸石特征、需求进行有效改性,是煤矸石大规模综合利用的关键。因此,本文从煤矸石的理化特性,煤矸石混凝土的工作性能、力学性能、体积稳定性以及耐久性等方面,对煤矸石及煤矸石混凝土的研究现状进行归纳总结,以期煤矸石的大规模综合利用提供有益的参考。

1 煤矸石的特性

煤矸石是在煤形成过程中与煤系地层共生,由多种矿物岩石组成的混合物,属于沉积岩,其表面多为灰色、灰褐色或褐黑色。煤矸石以产出方式分为过火矸、岩巷矸、煤巷矸、洗矸、手选矸及剥离矸等。

在自然存在状态下,分为未燃煤矸石和自燃煤矸石,如图1所示,这两种煤矸石内部结构差异很大,因此其胶凝活性也有很大区别。自燃煤矸石一般呈现黄色或红褐色。通常煤矸石碳含量波动较大,按照碳含量可以分为4个等级,碳含量小于4%为少碳,4%~6%为低碳,6%~20%为中碳,大于20%为高碳^[13],并且碳含量对于煤矸石强度、吸水率、压碎值等均具有显著影响。目前,采用煅烧除碳处理煤矸石是改善其性能最有效的手段之一,但也有研究表明煅烧除碳处理后的煤矸石吸水率有所提高。此外,如表1所示,煤矸石表观密度为2 140~2 640 kg/m³,相对于天然碎石较小,这表明煤矸石的材性较差,不够密实。煤矸石的堆积密度范围为1 121~1 340 kg/m³,而未燃煤矸石的堆积密度均高于自燃煤矸石,主要因为自燃过的煤矸石内部结构松散以及细小孔隙较多^[11]。



(a) 天然碎石



(b) 自燃煤矸石

图1 粗骨料的外观形貌图^[13]

Figure 1 Appearance morphology of coal gangue coarse aggregate^[13]

表1 不同地区煤矸石的基本物理性能^[11]

Table 1 Basic physical properties of coal gangue in different areas^[11]

产地	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	压碎 值/%	吸水率/ %	含泥量/ %
陕西铜川*	2 640	1 240	12.95	4.50	9.50
辽宁阜新	2 500	1 303	12.10	5.80	3.63
湖北武汉	2 500	1 258	12.20	5.80	3.64
辽宁沈阳	2 600	1 306	11.90	5.32	3.65
陕西柠条塔	2 321	1 160	21.80	5.40	6.90
北京门头沟	2 640	—	13.90	1.83	—

续表 1

产地	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎 值/%	吸水率/ %	含泥量/ %
辽宁朝阳	2 610	1 320	11.90	4.10	—
内蒙古鄂尔多斯	2 140	1 150	24.00	3.24	—
山西大同	2 470	1 340	19.40	2.63	—
河北清河	2 518	1 121	18.63	8.43	—
河南许昌	2 510	1 320	19.10	1.74	—

注:带*的压碎值是采用《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中 T0316 试验方法测试,后经关系式 $y=0.816x-5$ 换算为 T0315 试验结果,其余压碎值均采用《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)的测试方法。

受煤层地质年代、区域、成矿地质环境和开采条件等因素的影响,中国不同区域、不同年代层位和不同采出方式的煤矸石性质不同,但其矿物及化学成分的变化规律基本一致。煤矸石主要矿物成分如表 2 所示,占主导地位为黏土矿物,其主要包括伊利石、

高岭石、蒙脱石等^[8]。煤矸石的化学组成成分绝大部分是无机质和有机质。由表 3 可知:中国部分地区煤矸石主要无机质是 SiO_2 和 Al_2O_3 ,其总质量分数可达 60%~90%。在无机质中,铝主要以六配位的形式存在,并且与硅紧密结合,形成了稳定的内部结构,这限制了煤矸石胶凝活性的充分发挥。因此,通过机械活化、热活化、微波活化以及复合活化等方式,改善其胶凝活性^[14]。其他无机质还有 TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等成分,而有机质随着含碳量增加而增多,其中 C、H 是有机质的主要成分,此外,还有 S、O、N 等成分^[15]。

表 2 煤矸石的典型矿物组成范围^[8]
Table 2 Typical mineral composition range of coal gangue^[8]

矿物组成	含量/%	矿物组成	含量/%
黏土矿物	50~70	其他矿物和碳杂质	10~20
石英	20~30		

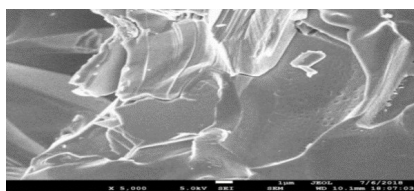
表 3 中国部分地区煤矸石化学成分^[15-16]
Table 3 Chemical components of coal gangue in some areas of China^[15-16] %

产地	W(SiO_2)	W(Al_2O_3)	W(TiO_2)	W(CaO)	W(MgO)	W(Fe_2O_3)	W(K_2O)	W(Na_2O)	烧失量
内蒙古准格尔	36.90	38.98	1.01	—	0.030	0.33	0.07	0.100	22.94
内蒙古大青山	38.37	33.00	0.61	0.14	0.025	0.80	0.11	0.092	24.93
贵州某地	40.28	9.05	0.37	18.39	4.660	3.35	3.34	0.380	19.68
贵州盘周	40.80	19.17	4.70	2.73	2.140	12.80	—	—	15.75
陕西铜川	44.75	37.43	1.43	0.07	0.150	0.99	0.56	0.880	14.54
陕西黄陵	50.33	21.69	1.25	0.57	0.570	5.90	—	0.910	—
山西阳泉	44.78	39.05	0.05	0.66	0.440	0.45	0.15	0.100	14.32

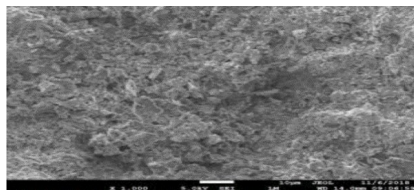
压碎值是用于衡量粗集料在逐渐增加荷载的情况下抵抗破碎的能力。煤矸石压碎值的大小与煤矸石的矿物组成成分有关,煤矸石中含一定的软质岩石(泥质的页岩、砂岩)、残留煤、有机质等物质。其中,有机质、残留煤等在燃烧过程中被氧化进而导致煤矸石的化学成分和结构发生变化(孔隙率增大,骨料变疏松),因此造成煤矸石很容易被压碎。不同产地的煤矸石压碎值如表 1 所示^[17],其压碎值普遍较大。柴亚南^[18]总结了 5 个省市 40 个矿区的自燃煤矸石和未燃煤矸石的压碎值,其范围为 21.3%~44.4%,整体压碎值偏大,可能是由于其选用的煤矸石主要为自燃煤矸石和洗矸类等强度较低的煤矸石。有研究表明:普通碎石集料是否存在针片状颗粒,对压碎值有较明显的影响。因此,当煤矸石针片状含量较

高时,测试得到的煤矸石压碎值也偏大^[19]。
骨料的吸水率会直接影响混凝土的工作性能、力学性能以及耐久性能。由于煤矸石产于不同区域和不同时代层位,因此煤矸石的吸水率也有很大差异,并且从表 1 也可以看出,中国大部分地区煤矸石的吸水率与天然碎石相比更大^[20]。时成林等^[21]对中国 25 个不同产地煤矸石的吸水率进行对比分析,发现煤矸石吸水率为 1.4%~21.9%;杨国栋等^[22]对安徽淮北水洗煤矸石进行吸水率测试,得出其吸水率基本低于 3%,几乎接近碎石,这可能是由于煤矸石种类不同,结构差异较大造成的;陈瑞雪^[23]研究表明,自燃煤矸石吸水率通常为天然碎石的 9 倍左右,而未燃煤矸石通常为天然碎石的 3 倍左右。自燃煤矸石骨料中毛细孔($100\text{ nm}<d<1\text{ 000 nm}$)出现的频

率相较天然碎石更多,且毛细孔会对骨料吸水率产生一定的影响;李少伟等^[24]认为,自燃煤矸石骨料粒径较小,其比表面积增大,致使水分的接触面积增大,在一定程度上提高了吸水率。从上述研究成果以及图2可以看出:煤矸石吸水率大的主要原因是内部结构相对疏松,孔隙率大,细小裂缝多,在很短时间内吸水率可达到最大值,而天然碎石内部结构紧密,导致吸水率较小。因此,在后续煤矸石混凝土配合比的试配中,很多学者采取引入附加用水量的方法,确保煤矸石混凝土满足工作性能和力学性能。



(a) 天然碎石



(b) 自燃煤矸石

图2 粗骨料的SEM图($\times 5\,000$)^[23]Figure 2 SEM image of coarse aggregate ($\times 5\,000$)^[23]

2 煤矸石混凝土的性能

2.1 煤矸石混凝土工作性能

混凝土工作性能主要表现在其拌和物的流动性、黏聚性、保水性以及坍落度经时损失率等方面。因煤矸石孔隙率较大,吸水率高,掺入煤矸石后,在一定程度上减少了新拌混凝土的自由水量,易造成新拌混凝土干稠,流动性变差,这种变化会严重影响混凝土的施工性能。

周梅等^[25]通过正交试验的方法研究了C20强度等级的自燃煤矸石砂轻集料新拌混凝土的工作性能变化规律,其影响因素大小顺序是:附加用水量>砂率>颗粒级配。当附加用水量为煤矸石饱和吸水率的78%时,结合最优砂率44%和颗粒级配比例7:47:46的条件下,此时煤矸石混凝土的工作性能最佳;牟爽^[26]研究也表明颗粒级配对自燃煤矸石混凝土工作性能具有显著影响,良好的颗粒级配可降低集料的

空隙率,各级配粗、细集料相互搭配嵌固,既能构成牢固致密的骨架,又能减少胶凝材料的使用量,提高混凝土的工作性能;肖建华等^[27]研究表明自燃煤矸石混凝土拌和物坍落度与骨料含水率呈正相关,与强度呈负相关;Yang等^[28]试验发现煤矸石的吸水率与煅烧时间成正比关系,且煅烧后的煤矸石可使新拌制的混凝土拌和物流动性变差。为保证煤矸石混凝土具有良好的工作性能,寻求改善煤矸石混凝土工作性能的方法至关重要;李永靖等^[29]将聚羧酸系减水剂和萘系减水剂进行对比分析,发现聚羧酸系减水剂使自燃煤矸石全轻集料新拌混凝土的坍落度经时损失率降低,聚羧酸系减水剂复配引气剂后,混凝土的工作性能也可以得到进一步改善;朱凯^[30]的研究表明将粉煤灰掺入自燃煤矸石新拌混凝土中时,在粉煤灰圆形颗粒滚珠轴承和润滑作用下,能减小浆体和集料之间界面摩擦力,提高混凝土拌和物工作性能。

与天然碎石相比,煤矸石的孔隙率相对较大。当吸水率偏高时,严重影响煤矸石混凝土的工作性能。通过掺入高性能减水剂、优质矿物掺合料、提前预湿骨料等方式,改善新拌混凝土的工作性能,以满足施工要求。

2.2 煤矸石混凝土力学性能

混凝土的强度是衡量材料承受压力的能力。煤矸石混凝土的强度大小决定着它能否达到相应规范的标准以及能否应用于实际工程中。

2.2.1 抗压强度

郝亮等^[31]研究表明:与普通混凝土相比,煤矸石混凝土的强度有明显下降,且煤矸石混凝土抗压强度与普通混凝土抗压强度的破坏形式基本相同,在加载过程中,出现了明显的环箍效应,破坏后呈现出一个完整的棱锥体;刘鸽等^[32]在做煤矸石保温混凝土时发现,煤矸石保温混凝土强度、弹性模量与煤矸石掺量呈负相关,强度、弹性模量与煤矸石的视密度、颗粒级配、压碎值、骨料及水泥砂浆界面结合程度相关;马宏强等^[33]发现煤矸石混凝土的抗压强度与煤矸石的取代率呈负相关,随着煤矸石取代率的提高,混凝土强度下降明显;邱继生等^[34]指出压碎值是一个重要影响参数,煤矸石的压碎值越大,抗压碎能力越弱,煤矸石混凝土抗压强度越低;沈海昌^[35]研究指出将原状煤矸石作为粗骨料取代天然骨料,不

利于混凝土的强度发展。但当煤矸石掺量不超过20%时,可保证C20和C30混凝土的设计强度等级,并且煤矸石掺量对C20和C30混凝土的早期强度影响较低。

2.2.2 抗折强度

郝亮等^[31]通过正交试验的方法分析了煤矸石混凝土抗折强度的影响规律,影响最大的因素为粉煤灰取代水泥,其次是煤矸石砂取代中砂,最后是煤矸石取代碎石。并指出试件的抗折破坏多发生于水泥砂浆和煤矸石骨料的交界处,煤矸石骨料很少出现折断现象。这说明混凝土抗折强度在很大程度上依赖于砂浆基体的强度,而粗骨料对抗折强度影响相对较小;苏煜翔^[20]、董作超^[36]研究也发现煤矸石混凝土抗折强度与煤矸石取代率均呈负相关,煤矸石取代率对煤矸石混凝土抗折强度的影响关系如图3所示。

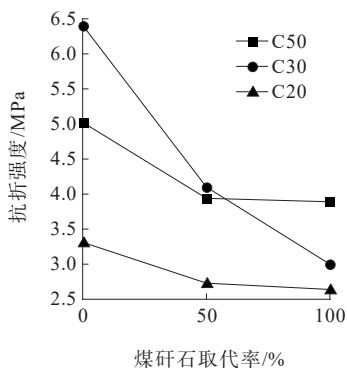


图3 煤矸石取代率对煤矸石混凝土抗折强度的影响^[20]

Figure 3 Influence of coal gangue substitution rate on flexural strength of coal gangue concrete^[20]

2.2.3 劈拉强度

沈海昌^[35]研究表明煤矸石混凝土的劈拉强度增长率随着煤矸石掺量增大而降低,并认为煤矸石骨料自身力学性能、节理发育及形态等的关键影响因素;吴秀峰等^[37]研究表明:掺加聚丙烯纤维的自燃煤矸石轻集料混凝土劈拉强度破坏与普通碎石混凝土有所不同,劈拉破坏面相对较平,断裂面与煤矸石发生横切,分析认为自燃煤矸石具有表面粗糙、吸水率大等特点,在混凝土凝结硬化前会吸收靠近界面处水泥浆中的自由水,使得靠近交界面处水胶比降低,导致水泥石和自燃煤矸石之间黏结强度增大,所以在一定程度上煤矸石混凝土的抗拉强度取决于自燃煤矸石自身的抗拉强度;牛晓燕等^[38]研究表明:非自

燃煤矸石置换率、附加水量以及骨料级配对劈拉强度和弹性模量都有一定的影响,非自燃煤矸石置换率从0增加到100%时,煤矸石混凝土的抗拉强度与弹性模量均减小了近50%。图4为沈海昌^[35]、牛晓燕等^[38]在试验中发现的煤矸石取代率对煤矸石混凝土劈拉强度影响的变化规律,从图4可以看出随着煤矸石掺量增加,劈拉强度逐渐降低。

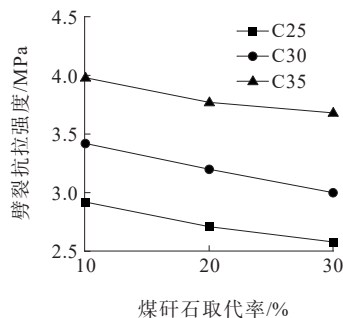


图4 煤矸石取代率对煤矸石混凝土劈拉强度的影响^[35,38]

Figure 4 Influence of coal gangue substitution rate on splitting tensile strength of coal gangue concrete^[35,38]

煤矸石物理性能差异较大,尤其是煤矸石的压碎值波动范围非常大,对煤矸石混凝土的物理力学性能产生显著影响。因此,在制备煤矸石混凝土时,宜根据煤矸石的特性对煤矸石掺量进行合理控制,以满足结构设计的物理力学性能要求。

3 煤矸石混凝土的体积稳定性

体积稳定性是现代混凝土最为重视的特性之一,混凝土体积变形易导致混凝土开裂,进而影响混凝土的结构安全,因此提高混凝土体积稳定性至关重要。在煤矸石混凝土中,煤矸石自身特性是影响体积稳定性的关键因素。

顾云等^[39]对比了普通混凝土与煤矸石混凝土在120 d内的收缩应变,当煤矸石掺量从0增加到60%时,煤矸石混凝土的收缩应变随着养护龄期的增加而增大,且普通混凝土的收缩应变大于煤矸石混凝土,这是因为煤矸石的堆积密度比碎石大,约束了煤矸石混凝土的收缩;崔正龙等^[40]取不同养护环境、不同自燃煤矸石替换率作为变量,测试了C30强度的自燃煤矸石混凝土干燥收缩裂缝抵抗性能,发现在相同干燥环境下,随着自燃煤矸石替换率提高,混凝土自由干燥收缩率增大,相应质量损失增加;与此同时随着干燥温度升高,干燥收缩开裂龄期提前,开裂后

混凝土拉应力均值趋近于 2.91 MPa;李永靖等^[41]研究表明:煤矸石混凝土干燥收缩率和质量损失率均是普通混凝土干燥收缩率的 2 倍,并指出煤矸石的干燥收缩率和质量损失率与煤矸石粗、细骨料的吸水率、孔隙率密切相关;王晴等^[42]用正交试验的方法验证了煤矸石混凝土收缩性能的影响规律,影响因素从大到小依次排序为:水胶比>粉煤灰>煤矸石,试验得出最佳配合比。当煤矸石替代碎石量为 55%,粉煤灰取代水泥量为 35%,水胶比 0.44 时,混凝土的收缩应变最小,仅为 245.845×10^{-6} 。图 5 为不同龄期下,混凝土收缩应变随煤矸石掺量变化规律。由图 5 可知:随着龄期的增加,不同掺量煤矸石混凝土的收缩应变规律类似。

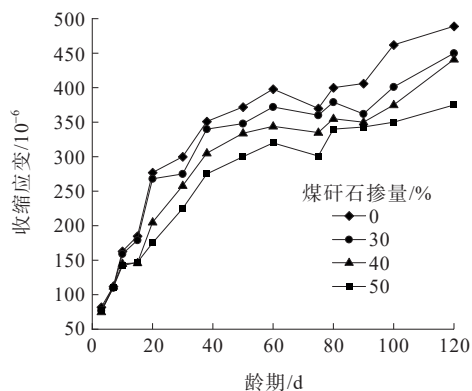


图5 煤矸石置换率对混凝土收缩应变的影响^[42]

Figure 5 Influence of coal gangue substitution rate on concrete shrinkage strain^[42]

混凝土体积稳定性与骨料的特性有很重要的关系,煤矸石与天然骨料存在显著差异,特别是煤矸石多孔隙、高吸水的特性,对煤矸石混凝土的体积稳定性影响显著。充分利用煤矸石的高吸水性,通过提前预湿,形成“内养护”效果,用来改善煤矸石混凝土的自收缩性能。

4 煤矸石混凝土的耐久性能

由于煤矸石骨料孔隙率高、吸水率和压碎值偏大,煤矸石种类较多且品质和成分差异较大等原因,导致其耐久性能备受关注。

4.1 抗渗透性能

混凝土的抵抗渗透能力是耐久性最主要的指标之一。陈彦文等^[43]研究指出随着煤矸石替换率的增大,煤矸石混凝土抗渗透能力逐渐下降,这与煤矸石

中裂纹、缝隙较多有很大关系,氯离子受电流影响,沿煤矸石缝隙迅速运移,导致混凝土抗渗透能力减弱;马宏强等^[33]通过快速氯离子渗透试验表明:掺加煅烧过的煤矸石粗集料,有利于提高混凝土抗氯离子渗透性能,这是因为煤矸石具有固化氯离子的能力,并且还认为煅烧可致使煤矸石中晶相成分发生分解,产生火山灰活性物质 SiO_2 和 Al_2O_3 ,活性物质参与二次水化反应,形成 C-S-H 、 C-A-S-H 凝胶,使得内部结构紧密,从而提高氯离子固化能力;邱继生等^[44]研究表明:随着煤矸石替换率增大,煤矸石混凝土抗氯离子侵蚀性能呈先增后减的变化规律,氯离子表观扩散系数呈先降后升的变化规律,多害孔则呈先减后升的变化趋势,且认为煤矸石替换率达到 40% 时,不利孔数量最少,孔隙结构最好,孔隙体积分形维数最大,抗氯离子侵蚀性能最佳;王晴等^[45]采用正交分析法研究了煤矸石特性对混凝土渗透性能的影响,认为煤矸石混凝土抵抗氯离子渗透的影响因素中水胶比的影响最为显著,砂率和集灰比影响较大,级配影响最小。当水胶比为 0.39,砂率为 43%,集灰比为 4.2,集料级配为 1.2 时,配制的煤矸石混凝土抗氯离子渗透能力达到最优;张金喜等^[46]研究认为,砂浆饱水高度随着煤矸石掺量增加而增大,说明煤矸石掺量过多时加速了水对砂浆渗透作用,使水泥砂浆耐久性下降,这与其砂浆内部具有一定连通孔隙通道有关;李永靖等^[47]的研究表明:煤矸石混凝土的氯离子迁移系数随着水胶比的增加而升高,掺粉煤灰能改善煤矸石混凝土的抗氯离子渗透性能,氯离子渗透深度随着粉煤灰掺量的增加而降低。

4.2 抗冻性能

冻融循环破坏机制表明:自由水的存在是混凝土发生冻害的前提条件,而煤矸石吸水率较高,可能会加剧混凝土的盐冻或冰冻破坏程度,进而影响煤矸石混凝土结构物的使用寿命。

白朝能等^[48]指出煤矸石混凝土在冻融循环过程中的损伤随着煤矸石掺量增加而加剧,与普通混凝土相比,经过 75 次冻融循环后,煤矸石混凝土的抗压强度降低了 51.0%~79.7%。随着冻融循环次数的增加,煤矸石混凝土内部会因孔隙水体积膨胀而产生冻胀应力,使煤矸石混凝土产生新的裂缝和空隙,继而弹性模量下降,最终导致煤矸石混凝土破坏。

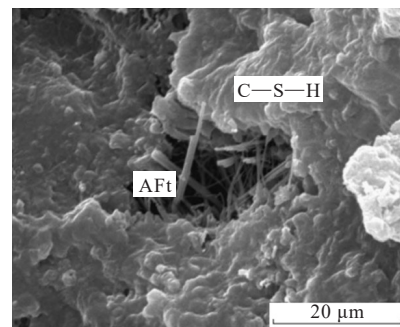
陈彦文等^[43]研究表明:当煤矸石替换率大于60%时,煤矸石混凝土在经过300次冻融循环后,C30煤矸石混凝土动弹性模量降低幅度大于40%,质量损失率接近5%。煤矸石替换率最大时(100%),C30煤矸石混凝土动弹性模量损失量较普通混凝土减少了28.38%;刘世等^[49]指出自燃煤矸石混凝土经过冻融循环作用后对吸水性有显著影响,煤矸石混凝土的累积吸水高度、初始吸水率显著提高;李永靖等^[50]研究指出,经300次冻融循环之后,煤矸石混凝土各项抗冻性能指标均能达到要求,但是在制备煤矸石混凝土过程中加入高性能减水剂,可降低水的用量,增强抗冻融循环能力;邱继生等^[51]研究表明:随着冻融循环次数增多,导致煤矸石混凝土内部大孔隙显著增多,混凝土内部会出现明显的冻融损伤。但当掺入 0.6 kg/m^3 聚丙烯纤维时,可显著改善和细化掺加40%煤矸石骨料混凝土的内部孔隙;张向东等^[52]对比研究了无机盐防冻剂(氯化钙、硝酸钙、亚硝酸钙)和有机防冻剂(无水乙二醇)对新拌掺减水剂煤矸石混凝土抗冻性能的影响,发现无水乙二醇掺量在1%以内,可以避免煤矸石混凝土出现早期的冻伤损坏,并提高10%~30%的抗冻融破坏能力;邱继生等^[53]试验研究表明:在冻融环境中,掺加适量钢纤维,能提高煤矸石混凝土抗冻性能,降低煤矸石混凝土质量损失率及动弹性模量。

4.3 抗碳化性能

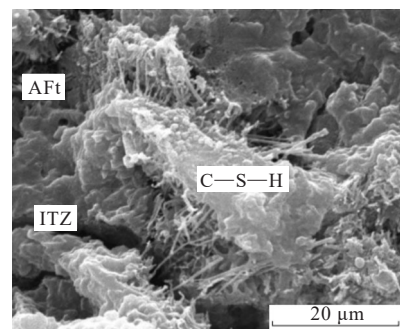
混凝土碳化是导致钢筋锈蚀损坏的主要因素。当混凝土碳化深度超过保护层厚度后,裂缝扩展使钢筋裸露出来,裸露的钢筋表面钝化膜被破坏,最终导致钢筋锈蚀,结构构件破坏。因此,混凝土的碳化性能,也是混凝土耐久性的评价指标之一。

由世岐等^[54]经研究后认为,自燃煤矸石轻集料混凝土和普通混凝土碳化深度规律相同,碳化深度随着时间增加而增加,即使煤矸石混凝土碳化深度已达到钢筋保护层厚度,内部的钢筋仍无锈蚀现象。因此,只需要按不同的环境类别分别约束结构混凝土的最大水灰比、最小水泥掺量、最低混凝土强度等级、粉煤灰替代量、抗碳化等耐久性指标,自燃煤矸石轻集料混凝土完全能够达到耐久性要求。李庆文等^[55]研究表明:煤矸石轻骨料混凝土的碳化深度与其水灰比、养护龄期呈正相关,而与其强度、水泥用量、相对湿度呈负相关;王洋等^[56]通过正交优化设

计,确定了影响煤矸石混凝土抗碳化性能的4个因素,影响最大的是水胶比,硅灰掺量、煤矸石掺量影响次之,减水剂掺量影响最小;易成等^[57]研究表明:随着煤矸石掺量(原状煤矸石和煅烧煤矸石)和水灰比的增大,煤矸石混凝土的碳化深度不断增大,并通过试验分析得出,当低水灰比(0.35)时,煅烧煤矸石可改善混凝土抗碳化性能,这是由于煅烧后煤矸石骨料产生了大量孔隙,未经预湿的骨料会吸收混凝土内的水,造成了煤矸石混凝土实际水胶比下降,从而使得煤矸石混凝土内出现空隙的可能性减小,且煅烧后的煤矸石骨料,表面活性物质 SiO_2 、 Al_2O_3 与水泥水化反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化,如图6所示,新产物C—S—H凝胶AFt及含铝相的水化产物将使界面过渡期ITZ的内部孔隙致密,继而抑制 CO_2 向内部渗透。



(a) 煅烧煤矸石骨料混凝土



(b) 非煅烧煤矸石骨料混凝土

图6 煤矸石骨料混凝土的SEM形貌^[57]

Figure 6 SEM morphology of coal gangue aggregate concrete^[57]

混凝土的抗渗性、抗冻性、抗碳化性能都是混凝土重要的耐久性指标,煤矸石的疏松多孔结构以及内部连通孔隙通道直接关系到混凝土耐久性能。根据煤矸石混凝土使用环境及设计要求,在配制混凝土时应充分考虑煤矸石骨料的特点,进行优选和限

制。也可根据耐久性需求,通过掺配优质天然骨料或矿物掺合料的方式来改善煤矸石混凝土的耐久性。

5 结论

(1) 煤矸石作为一种产量大、堆存量多的固体废弃物,其利用率相对较低。将煤矸石作为骨料,不仅可以大量消耗煤矸石,避免大量开采自然资源,还为建筑材料的生产提供了新来源,积极响应了国家低碳绿色发展的产业政策,若能实现煤矸石的大规模利用,将具有深远的战略意义。

(2) 煤矸石种类多且性能差异大,在工程应用中不利于质量控制,严重制约了煤矸石的规模化利用。因此,需建立科学合理的分级分类体系,以指导煤矸石在实际工程中的大规模综合利用。

(3) 煤矸石的吸水率偏高、压碎值偏大,多用于制备低强度等级的混凝土,制约了煤矸石向高强混凝土的方向发展,可以通过掺配天然骨料或优质矿物掺合料的方式对煤矸石混凝土进行改性,以提升其力学性能、改善体积稳定性和耐久性。

(4) 自燃型煤矸石的结构疏松多孔、比表面积大,吸水率高,在混凝土设计中可充分利用其密度小、吸水率高的优点,制备出具有内养护功能的低收缩轻质混凝土,从而实现特种煤矸石的高值化利用。

(5) 活性低是制约煤矸石利用率提升的关键因素之一,尤其是未燃型煤矸石因活性低而难以大规模应用。为解决该问题,可通过机械活化、热活化、微波活化以及复合活化等方式提高其反应活性,进而扩大其应用范围。

(6) 尽管煤矸石作为混凝土骨料的研究目前较为成熟,但缺乏实体工程长期应用的数据积累,应加强监测煤矸石混凝土在实体工程应用的长期性能,并形成相应煤矸石混凝土的产品标准,规范指导煤矸石混凝土的大规模应用。

参考文献:

References:

- [1] 李振,雪佳,朱张磊,等.煤矸石综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(6):165-178.
LI Zhen, XUE Jia, ZHU Zhanglei, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6):165-178.
- [2] WU B, YU Y, CHEN Z P, et al. Shape effect on compressive mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:50-64.
- [3] PENG B H, GUO D N, QIAO H, et al. Bibliometric and visualized analysis of China's coal research 2000—2015 [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197:1177-1189.
- [4] 孙春宝,董红娟,张金山,等.煤矸石资源化利用途径及进展[J].矿产综合利用,2016(6):1-7,12.
SUN Chunbao, DONG Hongjuan, ZHANG Jinshan, et al. Resource utilization ways of coal gangue and its development[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016(6):1-7,12.
- [5] 郭彦霞,张圆圆,程芳琴.煤矸石综合利用的产业化及其展望[J].化工学报,2014,65(7):2443-2453.
GUO Yanxia, ZHANG Yuanyuan, CHENG Fangqin. Industrial development and prospect about comprehensive utilization of coal gangue[J]. CIESC Journal, 2014, 65(7): 2443-2453.
- [6] HUANG G D, JI Y S, LI J, et al. Improving strength of calcinated coal gangue geopolymers mortars via increasing calcium content[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166:760-768.
- [7] 陈炜林.煤矸石作为水泥混凝土骨料可行性的基础研究[D].北京:北京工业大学,2010.
CHEN Weilin. Feasibility study of coal gangue as aggregate of cement concrete[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [8] 黄晓研.加快煤矸石建筑材料发展的产业化研究[J].墙材革新与建筑节能,2019(9):55-60.
HUANG Xiaoyan. Study on industrialization of accelerating the development of coal gangue building materials[J]. Construction Wall Innovation & Building Energy-Saving, 2019(9):55-60.
- [9] 李鹏,夏元鹏,张立魁,等.煤矸石综合利用产业政策和方向[J].陕西地质,2021,39(2):96-101.
LI Peng, XIA Yuanpeng, ZHANG Likui, et al. Industrial policy and development direction of the comprehensive utilization of coal gangue[J]. Geology of Shaanxi, 2021, 39 (2):96-101.
- [10] 何文波.煤矸石粗骨料混凝土性能研究[D].泰安:山东农业大学,2017.
HE Wenbo. Study on properties of coal gangue coarse aggregate concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural

- University,2017.
- [11] 王爱国,朱愿愿,徐海燕,等.混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2076-2086.
- WANG Aiguo,ZHU Yuanyuan,XU Haiyan,et al.Research progress on coal gangue aggregate for concrete[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2019,38(7):2076-2086.
- [12] 刘梦醒.煤矸石在建筑中的利用现状及发展方向探究[J].金田,2013,44(9):367-369.
- LIU Mengxing. Research on the utilization status and development direction of coal gangue in buildings[J]. Jin Tian,2013,44(9):367-369.
- [13] 李化建.煤矸石的综合利用[M].北京:化学工业出版社,2010.
- LI Huajian.Comprehensive utilization of coal gangue[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2010.
- [14] 郭伟.煤矸石的活性激发及活性评价方法的探讨[D].南京:南京工业大学,2005.
- GUO Wei. Research on coal gangue activation and its activity evaluation method[D].Nanjing:Nanjing University of Technology,2005.
- [15] 周海亮.煤矸石的特性分析及综合利用研究[J].山西化工,2021,41(6):221-223.
- ZHOU Hailiang. Characteristic analysis and comprehensive utilization of coal gangue[J]. Shanxi Chemical Industry,2021,41(6):221-223.
- [16] 贾敏.煤矸石综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2019,39(4):46-52.
- JIA Min.The current situation research on comprehensive utilization of coal gangue[J].Conservation and Utilization of Mineral Resources,2019,39(4):46-52.
- [17] 赵鹏.邢汾高速煤矸石填筑路基关键技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- ZHAO Peng. Research on key technology of Xingfen highway gangue subgrade[D].Xi'an:Chang'an University,2012.
- [18] 柴亚南.煤矸石路基填料分级标准及沉降特性研究[D].西安:长安大学,2013.
- CHAI Yanan. Study on classification standard and settlement characteristics of coal gangue subgrade filler [D].Xi'an:Chang'an University,2013.
- [19] 彭秋乐.粗集料压碎值影响因素研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- PENG Qiule. Research the influence factors of coarse aggregate crushing value[D]. Chongqing: Chongqing University,2013.
- [20] 苏煜翔.煤矸石混凝土基本力学性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- SU Yuxiang. Experimental study on basic mechanical properties of coal gangue concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2021.
- [21] 时成林,祝侃,沙爱民,等.煤矸石路用分级技术指标研究[J].中外公路,2009,29(4):401-405.
- SHI Chenglin, ZHU Kan, SHA Aimin, et al. Study on technical indexes of road classification of coal gangue[J]. Journal of China & Foreign Highway,2009,29(4):401-405.
- [22] 杨国栋,王峰.水洗煤矸石水泥稳定基层材料配合比试验研究[J].山东交通学院学报,2018,26(3):64-70.
- YANG Guodong, WANG Feng. Experimental study on mixture ratio of cement stabilized base material with washed coal gangue[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2018,26(3):64-70.
- [23] 陈瑞雪.自燃煤矸石骨料混凝土配合比优化设计及性能研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
- CHEN Ruixue. Study on mix proportion optimization design and performance of spontaneous combustion gangue aggregate concrete[D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2021.
- [24] 李少伟,周梅,张莉敏.自燃煤矸石粗骨料特性及其对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2020,23(2):334-340,380.
- LI Shaowei, ZHOU Mei, ZHANG Limin. Properties of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete[J]. Journal of Building Materials,2020,23(2):334-340,380.
- [25] 周梅,王强,牟爽.自燃煤矸石粗集料特性对混凝土拌合物工作性影响研究[J].非金属矿,2013,36(1):8-11.
- ZHOU Mei, WANG Qiang, MOU Shuang. The effects on workability of concrete mixture of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate characteristics [J].Non-Metallic Mines,2013,36(1):8-11.
- [26] 牟爽.大流动性自燃煤矸石全轻混凝土试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.
- MOU Shuang. Study on high fluidity spontaneous combustion coal gangue full-lightweight concrete[D]. Fuxin:Liaoning Technical University,2013.
- [27] 肖建华,周梅,赵华民.自燃煤矸石骨料含水状态对混凝土性能的影响[J].非金属矿,2015,38(2):24-27.
- XIAO Jianhua, ZHOU Mei, ZHAO Huamin. Effect of moisture state for spontaneous combustion gangue aggregate on concrete performance[J]. Non-Metallic

- Mines,2015,38(2):24-27.
- [28] YANG Q B, LU M X, LUO Y B. Effects of surface-activated coal gangue aggregates on properties of cement-based materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2013, 28(6): 1118-1121.
- [29] 李永靖, 闫宣澎, 郭瑞琪, 等. 自燃煤矸石全轻混凝土拌合物坍落度经时损失试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(4): 727-731.
- LI Yongjing, YAN Xuanpeng, GUO Ruiqi, et al. Study on the gradual loss in slump of the spontaneous combustion coal gangue full-lightweight concrete mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(4): 727-731.
- [30] 朱凯. 掺粉煤灰煤矸石轻骨料混凝土性能研究[J]. 铁道建筑, 2014, 54(3): 118-120, 121.
- ZHU Kai. Study on properties of lightweight aggregate concrete mixed with fly ash and coal gangue[J]. Railway Engineering, 2014, 54(3): 118-120, 121.
- [31] 郝亮, 谭小蓉. 煤矸石混凝土力学性能试验研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(11): 116-121.
- HAO Liang, TAN Xiaorong. Study on mechanical property test of gangue concrete[J]. China Coal, 2016, 42(11): 116-121.
- [32] 刘鸽, 任鹏飞, 李珠, 等. 煤矸石保温混凝土抗压强度与弹性模量试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 282-286.
- LIU Ge, REN Pengfei, LI Zhu, et al. Experimental study on compressive strength and elastic modulus of coal gangue thermal insulation concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 282-286.
- [33] 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 Hongqiang, YI Cheng, ZHU Hongguang, et al. Compressive strength and durability of coal gangue aggregate concrete[J]. Materials Reports, 2018, 32(14): 2390-2395.
- [34] 邱继生, 侯博雯, 关斌, 等. 煤矸石理化性质对混凝土抗压强度的影响[J]. 非金属矿, 2019, 42(2): 29-32.
- QIU Jisheng, HOU Bowen, GUAN Xiao, et al. Effect of physical and chemical properties of coal gangue under different stratas on compressive strength of concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(2): 29-32.
- [35] 沈海昌. 煤矸石混凝土力学性能试验研究[J]. 中国建材科技, 2016, 25(2): 55-58.
- SHEN Haichang. Experimental study on mechanical properties of coal gangue concrete[J]. China Building Materials Science & Technology, 2016, 25(2): 55-58.
- [36] 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]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- DONG Zuochao. Experimental study on mechanical properties and carbonation resistance of coal gangue aggregate concrete[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [37] 吴秀峰, 周梅, 崔正龙. 自燃煤矸石粗集料对混凝土强度影响的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 81-85.
- WU Xiufeng, ZHOU Mei, CUI Zhenglong. The experiment research on concrete strength influence of self combustion coal gangue coarse aggregate[J]. Industrial Construction, 2009, 39(3): 81-85.
- [38] 牛晓燕, 高琦翔, 李深圳, 等. 非自燃煤矸石粗骨料对混凝土力学性能的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 131-138.
- NIU Xiaoyan, GAO Qixiang, LI Shenzhen, et al. Effect of coarse aggregate of non-spontaneous combustion coal gangue on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2022, 42(2): 131-138.
- [39] 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 Yun, ZHANG Bin. Research of working and mechanical properties of coal gangue aggregate concrete [J]. Concrete, 2019(7): 71-73.
- [40] 崔正龙, 郝敬力, 陈龙, 等. 自燃煤矸石混凝土强度及干燥收缩裂缝试验研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(6): 76-78.
- CUI Zhenglong, HAO Jingli, CHEN Long, et al. Experimental study on strength and drying shrinkage crack of spontaneous combustion gangue concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2015, 38(6): 76-78.
- [41] 李永靖, 曹爽, 邢洋, 等. 煤矸石骨料混凝土的干燥收缩性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(11): 95-97.
- LI Yongjing, CAO Shuang, XING Yang, et al. Experimental study on the drying shrinkage performance of the concrete with coal gangue aggregate[J]. Concrete, 2016(11): 95-97.
- [42] 王晴, 赵振清, 刘颖琦, 等. 煤矸石混凝土收缩性能的研究[J]. 混凝土, 2015(10): 68-70.
- WANG Qing, ZHAO Zhenqing, LIU Yingqi, et al. Research on shrinkage performance of coal gangue concrete[J]. Concrete, 2015(10): 68-70.
- [43] 陈彦文, 丁兆阳, 祝金崧, 等. 煤矸石掺量对混凝土耐久性影响研究[J]. 混凝土, 2015(5): 87-89.

- CHEN Yanwen, DING Zhaoyang, ZHU Jinsong, et al. Experimental study on the spontaneous combustion coal gangue concrete[J]. Concrete, 2015(5):87-89.
- [44] 邱继生,张如意,侯博雯,等.干湿循环下煤矸石混凝土孔结构特性及抗氯离子侵蚀机理[J].硅酸盐通报,2021,40(12):3993-4001.
- QIU Jisheng, ZHANG Ruyi, HOU Bowen, et al. Pore structure characteristics and chloride ion corrosion resistance mechanism of coal gangue concrete under drying-wetting cycles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021,40(12):3993-4001.
- [45] 王晴,刘锁,王继博,等.煤矸石粗集料混凝土抗氯离子渗透性能的研究[J].混凝土,2016(8):36-38.
- WANG Qing, LIU Suo, WANG Jibo, et al. Research on resistance to chloride ion of the coal gangue coarse aggregate concrete[J]. Concrete, 2016(8):36-38.
- [46] 张金喜,陈伟林,金珊珊,等.煤矸石集料混凝土耐久性研究[J].北京工业大学学报,2011,37(1):116-125.
- ZHANG Jinxi, CHEN Weilin, JIN Shanshan, et al. Investigation on durability of coal gangue aggregate concrete[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011,37(1):116-125.
- [47] 李永靖,邢洋.煤矸石混凝土抗氯离子渗透实验研究[J].非金属矿,2016,39(2):11-13.
- LI Yongjing, XING Yang. Experiment study on chloride ion penetration of coal gangue concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2016,39(2):11-13.
- [48] 白朝能,李霖皓,沈远,等.煤矸石对C30混凝土抗冻性能影响的试验研究[J].工程技术研究,2018(10):15-17.
- BAI Chaoneng, LI Linhao, SHEN Yuan, et al. Experimental study on the influence of coal gangue on the frost resistance of C30 concrete[J]. Engineering and Technological Research, 2018(10):15-17.
- [49] 刘世,刘海卿.冻融循环作用对煤矸石混凝土吸水性的影响[J].非金属矿,2018,41(4):34-36.
- LIU Shi, LIU Haiqing. Effect of freeze-thaw action on water absorption capacity of the coal gangue concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2018,41(4):34-36.
- [50] 李永靖,韩俊俊,邢洋,等.煤矸石骨料混凝土的冻融循环试验研究[J].混凝土,2013(12):100-102.
- LI Yongjing, HAN Junjun, XING Yang, et al. Research on the freezing and thawing cycle test of coal gangue aggregate concrete[J]. Concrete, 2013(12):100-102.
- [51] 邱继生,邢敏,杨占鲁,等.冻融作用下聚丙烯纤维煤矸石混凝土孔结构研究[J].混凝土与水泥制品,2020(6):41-44,48.
- QIU Jisheng, XING Min, YANG Zhanlu, et al. Pore structure characteristics of polypropylene fibre coal gangue concrete under freeze-thaw[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(6):41-44,48.
- [52] 张向东,李庆文,宋洋.防冻剂对掺减水剂煤矸石混凝土抗冻性能研究[J].非金属矿,2016,39(1):48-51.
- ZHANG Xiangdong, LI Qingwen, SONG Yang. Study of anti-freezing agent on frost resistance of coal gangue concrete mixing with water reducers[J]. Non-Metallic Mines, 2016,39(1):48-51.
- [53] 邱继生,潘杜,谷拴成,等.钢纤维煤矸石混凝土抗冻性能及损伤模型研究[J].冰川冻土,2018,40(3):563-569.
- QIU Jisheng, PAN Du, GU Shuancheng, et al. Study on frost resistance and damage model of steel fiber reinforced coal gangue concrete[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018,40(3):563-569.
- [54] 由世岐,刘斌.自燃煤矸石轻骨料混凝土碳化性能综述[J].混凝土,2004(6):22-24.
- YOU Shiqi, LIU Bin. A summary of carbonation properties on concrete[J]. Concrete, 2004(6):22-24.
- [55] 李庆文,张向东,李桂秀,等.自燃煤矸石轻骨料混凝土碳化深度研究[J].环境工程学报,2016,10(5):2616-2620.
- LI Qingwen, ZHANG Xiangdong, LI Guixiu, et al. Study on carbonation depth of spontaneous combustion coal gangue lightweight aggregate concrete[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016,10(5):2616-2620.
- [56] 王洋,胡凯伟.煤矸石混凝土碳化性能初步研究[J].粉煤灰综合利用,2015,28(5):3-6,18.
- WANG Yang, HU Kaiwei. Preliminary study on the carbonization performance of coal gangue concrete[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2015,28(5):3-6,18.
- [57] 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 Cheng, MA Hongqiang, ZHU Hongguang, et al. Investigation on anti-carbonation performance of coal gangue coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017,20(5):787-793.