中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

不同取代方式下煤矸石对低强度混凝土强度的影响

白朝能[1],李霖皓[2],沈 远[1],龙广成[2],马昆林[2]
(1.中铁西安勘察设计研究院有限责任公司,陕西 西安 710054;2.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要:以 3 种煤矸石取代骨料的方式配置低强度混凝土,研究了煤矸石掺量、类型对低强度混凝土坍落度、力学强度等性能的影响规律,并采用岩石点荷载测试和光学显微镜、扫描电镜等方法分析了煤矸石作为骨料对低强度混凝土强度的影响机理。结果表明:煤矸石对低强混凝土的强度影响不仅与取代方式有关,同时也取决于煤矸石的种类;煤矸石取代间断级配粗骨料 30%以上时,混凝土抗压强度最大降低为 24.9%;煤矸石全取代粗细骨料,混凝土强度会降低 40%~60%;在煤矸石已取代连续粗骨料的前提下若继续取代细骨料,抗压强度会继续下降 27%,劈裂抗拉强度会下降 24.1%。煤矸石对低强度混凝土的强度降低效应主要是自身强度低以及界面过渡区(煤矸石-水泥)薄弱;为缓解因煤矸石取代所造成的强度"弱"化,可适当通过掺入粉煤灰的方法来改善。

关键词:煤矸石;低强度混凝土;粉煤灰;取代方式
中图分类号:TU528.01 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2020)S1-0270-08

Effect of coal gangue as aggregate on strength of cement-based materials

BAI Chaoneng[1], LI Linhao[2], SHENG Yuan[1], LONG Guangcheng[2], MA Kunlin[2]
(1.*Xi'an Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an* 710054, *China*;
2.*School of Civil Engineering, Central South University, Changsha* 410075, *China*)

Abstract: The authors replaced the aggregate with coal gangue in three different ways and studied the effect law of the amount and the type of coal gangue in slump and mechanical strength of low-strength concrete. Furthermore, the influence mechanism on the strength of low-strength concrete with coal gangue as aggregate was analyzed by rock point load testoptical microscope and scanning electron microscopy. The results show that the influence of coal gangue on the strength of low-strength concrete is not only related to the way of substitution, but also depends on the kind of coal gangue. When coal gangue replaces discontinuous grade with coarse aggregate more than 30%, the concrete compressive strength will be reduced by 24.9%. When coal gangue replaces coarse and fine aggregate completely, the strength of the concrete will be reduced by 40%~60%. Under the coal gangue replacing the continuous coarse aggregate if the coal gangue replace the continuous fine aggregate, the compressive strength will continue to decrease by 27% and the splitting tensile strength will decrease by 24.1%. The effect of coal gangue on the strength reduction of low-strength concrete is mainly due to its low strength and weak interface transition zone (gangue-cement). Adding fly ash can alleviate the "weakness" of the strength induced by the replacement of coal gangue.

Key words: coal gangue; low-strength concrete; fly ash; replacement method

0 引 言

近年来伴随着我国煤炭工业迅速的发展,煤矸石作为我国最大宗的固体废弃物受到了越来越多的关注。目前我国煤矸石排放量每年约有 8.5 亿 t[1],主要集中在太原、徐州、许昌、阜新等北方地区。为缓解资源短缺的问题,我国一直大力提倡对废弃资源进行高效利用。已有研究表明[2-4],煤矸石化学和矿物组成十分丰富,具有非常好的资源特性,再加上煤矸石本身也具有的一定的弹性模量和强度,所以将其作为骨料、粉末或活性外加剂配置成混凝土、路基、烧结砖和水泥制品等建筑材料能实现变废为宝[5-7],因此煤矸石逐渐成为亟待回收的工业副产品。目前煤矸石在土木工程领域的应用研究[8-10]已有很多,有关煤矸石取代传统混凝土集料的研究在近年来逐渐增多[11-13]。杨力辉等[14]提出了掺聚丙烯纤维配置煤矸石混凝土的可行性,但测试的试件仅是砂浆,而非混凝土,缺乏实际的工程指导价值;马宏强等[15]研究了 2 种煤矸石(煅烧及未煅烧)的取代量对不同等级混凝土的性能影响,提出了煤矸

收稿日期:2019-07-12;**责任编辑**:代艳玲
基金项目:中铁西安勘察设计研究院有限责任公司 2017 年科技计划资助项目(738010875)
作者简介:白朝能(1973—),男,云南昆明人,高级工程师。
通讯作者:李霖皓(1994—),男,湖南株洲人,硕士研究生。E-mail: llhmoshou@163.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

石作为混凝土粗集料的可行性和最优掺量,段晓牧等[16]研究了煤矸石种类、颗粒级配、粒径大小和预处理手段对混凝土的力学性能影响,但两者设计的混凝土种类都很单一,在对不同体系以及不同应用类型的混凝土缺乏拓展研究。煤矸石与石英质天然碎石相比存在许多缺陷,如孔隙率高、强度低、密度小、层状和片状类岩石较多等。这些缺陷不仅会影响新拌混凝土的工作性,还会对混凝土的耐久性和强度产生不利影响[17-18]。由于实际的施工条件较为粗放、不同产地的煤矸石存在性能差异,所以仅根据煤矸石的最佳掺量和预处理手段并不能让煤矸石混凝土满足诸多复杂的工程要求,而应结合实际环境条件和煤矸石特性,选择合理的取代方式将煤矸石投入到相应的工程建设中,做到因地制宜。基于现有的研究成果,考虑到实际工程中对不同等级的低强度混凝土需求,笔者选取了中国北方 4 个不同矿区的煤矸石(陕西的榆林、河南的许昌以及山西的太原、长治),设计了 3 种不同的取代方式配置多种低强度混凝土,研究煤矸石产地和取代方式对低强度混凝土的强度影响规律,并利用微观的测试手段分析了其影响机理,为推广煤矸石混凝土在实际工程应用提供依据。

1 试 验

1.1 原材料

水泥(C)采用 P·O42.5 的普通硅酸盐水泥,其 28 d 龄期实测抗压强度为 48.6 MPa;粉煤灰(FA)采用湖南湘潭电厂提供的 F 类粉煤灰,比表面积为 460 m^2/kg,密度为 2.36 g/cm^3,水泥和粉煤灰的化学组成见表 1。河砂来自湖南湘江湘阴河段砂,其细度模数为 2.7,表观密度为 2.62 g/cm^3;石灰石产自湖南娄底 5~31.5 mm 石灰石碎石,压碎指标 11.5%。

煤矸石选取陕西榆林、河南许昌、山西太原和长治 4 个不同地区的煤矸石,经破碎过筛后,颗粒粒径为 0.15~4.75 mm、4.75~31.5 mm 和 10~31.5 mm 三种粒径范围内的级配合格的煤矸石。

试验用水为普通自来水;减水剂采用羧酸系高性能减水,减水率为 21%。

表 1 水泥、粉煤灰的化学组成

Table 1 The chemical composition of cement and fly ash

原料	质量分数/%							烧失量/%
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O_{eq}	
C	24.6	7.3	4.0	59.7	3.8	2.98	0.6	2.2
FA	52.3	26.3	9.7	3.7	1.2	0.2	1.8	4.5

石灰石及煤矸石磨细后采用 X 射线衍射(X-rd)和荧光光谱分析(X-rf),测试了其矿物组成(图 1)和化学组成(表 2),其中煤矸石主要成分为石英(Quartz)、蒙脱石(Montmorillonite)和菱铁矿(Siderite),榆林煤矸石没有长石(Feldspar),许昌煤矸石没有方解石(Calcite),而石灰石碎石主要成分为白云岩石英和蒙脱石。试验所用煤矸石和石灰石的主要物理指标见表 3。

表 2 煤矸石和石灰石的化学组成

Table 2 The chemical composition of coal gangue and limestone

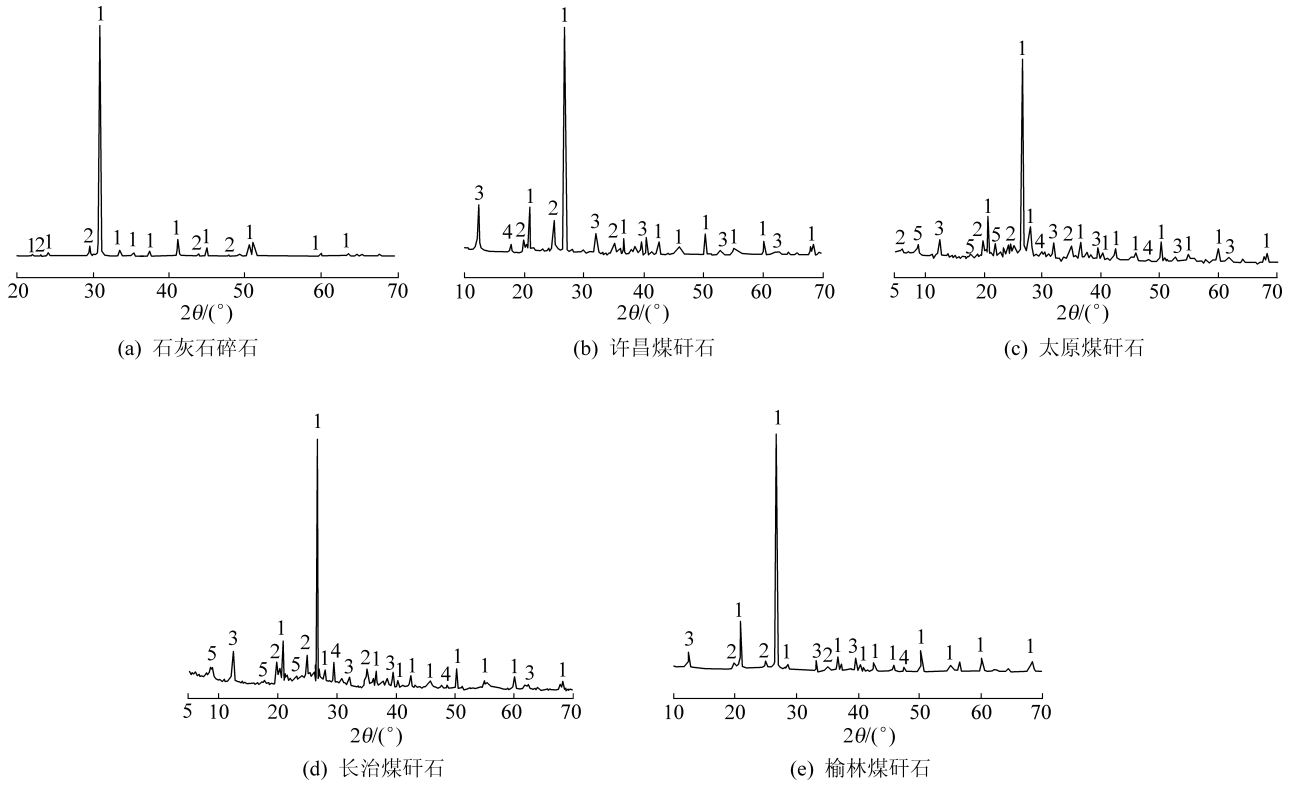
原料	质量分数/%							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O_{eq}	K_2O
石灰石	1.68	1.01	0.32	58.78	3.27	0.32	—	—
许昌煤矸石	60.19	29.28	3.25	1.15	0.71	0.44	0.21	3.00
太原煤矸石	61.05	25.92	3.06	3.07	0.83	0.20	0.61	3.67
长治煤矸石	57.71	28.64	4.66	2.24	0.61	0.80	0.58	2.99
榆林煤矸石	65.87	20.25	4.59	0.45	1.77	0.20	1.98	3.98

表 3 试验所用石灰石和煤矸石主要物理指标

Table 3 Main physical indicators of coal gangue and limestone

原料	表观密度/($g\cdot cm^{-3}$)	堆积密度/($g\cdot cm^{-3}$)	吸水率/%	200 kN 压碎指标/%	坚固性指标/%	单轴抗压强度/MPa
石灰石	2.73	1.44	1.65	11.1	0.1	32.3
许昌煤矸石	2.51	1.32	1.74	19.1	0.2	14.2
太原煤矸石	2.39	1.26	1.97	20.1	0.3	13.7
长治煤矸石	2.42	1.34	2.55	20.4	0.3	13.2
榆林煤矸石	2.12	1.13	5.37	21.9	0.5	11.0

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net



(a) 石灰石碎石　(b) 许昌煤矸石　(c) 太原煤矸石

(d) 长治煤矸石　(e) 榆林煤矸石

1—石英;2—蒙脱石;3—菱铁矿;4—方解石;5—钡长石

图 1　煤矸石及石灰石 X 射线衍射分析

Fig. 1　The XRD analysis of coal gangues and limestones

1.2　配合比设计

试验设计了 3 种煤矸石取代方法,分别为系列一、系列二、系列三,其配合比见表 4。

系列一研究的是煤矸石取代间断粗骨料对低强度混凝土的影响,主要变量为煤矸石对粗骨料的取代分数(0、15%、30%、45%、60%、75%、100%),参考表 3 中 4 种煤矸石的相关物理指标(单轴抗压强度、吸水率和表观密度)选取骨科性能较好的煤矸石,统一选取了许昌煤矸石作为本系列的研究对象。系列二研究的是煤矸石全取代粗细骨料对低强度混凝土的影响,主要以煤矸石的种类为变量。系列三研究的是煤矸石分别取代连续粗/细骨料对低强度混凝土的影响,变量有连续粗骨料煤矸石的种类及细骨料的种类(河砂/许昌煤矸石)。

1.3　成型方法

1)系列一中低强度混凝土所用到的材料有水泥、粉煤灰、河砂、石灰石、许昌煤矸石、水和减水剂。采用强制式混凝土搅拌机进行混凝土拌和,拌和时间为 120 s,拌和后首先进行工作性(坍落度)测试和密度测试,以保证新拌混凝土具有较好的工作性,然后成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,成型过程如图 2 所示。3 d 后拆模并置于标准养护室,养护至 28 d 时测试其抗压强度。



图 2　煤矸石混凝土工作性状态及成型

Fig. 2　Working state and forming of coal gangue concrete

2)系列二中低强度混凝土所用到的材料有水泥、粉煤灰、水、石灰石和 4 个不同地区的煤矸石。石灰石和煤矸石都采用 0.15~4.75 mm 的细集料和 4.75~31.5 mm 的粗集料 2 种级配。采用普通混凝土搅拌机进行拌和,拌和时间为 150 s,成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件。7 d 后拆模并置于标准养护室,养护至 28 d 时测试其抗压强度。

3)系列三中低强度混凝土所用到的材料主要有水泥、水、河砂和煤矸石,骨料为 0.15~4.75 mm 的细骨料和 4.75~31.5 mm 的粗骨料 2 种级配,其中细骨料分为河砂和煤矸石 2 种,粗骨料统一为煤矸石。制备时采用普通混凝土搅拌机进行拌和,拌和时间为 150 s,然后成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,试验利用铁片和锤子进行人工锤击充模成型来代替现场路基施工时机器碾压成

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

型,成型过程如图 3 所示。7 d 后拆模并置于标准养护室,养护至 28 d 时测试其抗压强度及劈裂抗拉强度。

表 4 煤矸石集料混凝土的配合比设计

Table 4 Mixing proportion of coal gangue concrete

类型	编号	水泥	粉煤灰	河砂	粗骨料					水	减水剂
					石灰石		煤矸石				
					5~10 mm	10~31.5 mm	10~31.5 mm	4.75~31.5 mm	0.15~4.75 mm		
系列一	C_0	333	59	773	333	779	0	—	—	165	3.9
	C_{15}	332	59	770	332	660	116	—	—	164	3.9
	C_{30}	330	58	767	331	541	233	—	—	164	3.9
	C_{45}	330	58	765	330	424	347	—	—	163	3.9
	C_{60}	329	58	762	329	307	461	—	—	163	3.9
	C_{75}	328	58	760	328	192	574	—	—	162	3.9
	C_{100}	326	58	755	326	0	761	—	—	161	3.8
系列二	2-石灰石	150	150	537	1 347(4.75~31.5mm)		—	—	—	180	—
	2-许昌	146	146	—	—	—	—	1 257(许昌)	539(许昌)	175	—
	2-太原	140	140	—	—	—	—	1 213(太原)	520(太原)	169	—
	2-长治	142	142	—	—	—	—	1 224(长治)	525(长治)	170	—
	2-榆林	129	129	—	—	—	—	1 110(榆林)	476(榆林)	154	—
系列三	S-许昌	230	—	690	—	—	—	1 324(许昌)	—	138	—
	S-太原	224	—	672	—	—	—	1 290(太原)	—	134	—
	S-长治	226	—	677	—	—	—	1 299(长治)	—	135	—
	S-榆林	210	—	629	—	—	—	1 207(榆林)	—	126	—
	C-许昌	227	—	0	—	—	—	1 305(许昌)	680(许昌)	136	—



图 3 锤击充模的过程

Fig. 3 Filling process by hammer

1.4 测试方法

混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度根据 GB/T 50081《普通混凝土力学性能实验方法标准》进行测定;新拌低强度混凝土的坍落度和表观密度测试根据 GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》。骨料煤矸石和石灰石的单轴饱和抗压强度由 GB/T 50218《工程岩体分级标准》中规定的点荷载试验方法测试并得到,结果见表 3。

1.5 微观测试

试验采用光学显微镜和扫描电镜 2 种设备来观察煤矸石和石灰石的浆体—骨料的界面粘结情况。扫描电子显微分析(SEM)采用日本 JSM-5610LV 型分析仪。高低真空分辨率分别为 3.0、4.0 nm,放大倍数 18~300 000 倍。光学电子显微分析采用凤凰光学集团有限公司生产的光学显微镜,放大倍数可达 160 倍。

2 结果与分析

2.1 煤矸石取代间断粗骨料的影响(系列一)

系列一中的新拌低强度混凝土的坍落度和密度见表 5,可见随着煤矸石的掺量增加,混凝土的密度会降低,但坍落度不会生显著改变。

表 5 系列一种低强度混凝土的坍落度和密度

Table 5 Slump and density of low-strength concrete from series 1

编号	坍落度/mm	密度/(g·cm^{-3})
C_0	145	2.23
C_{15}	150	2.22
C_{30}	145	2.20
C_{45}	150	2.20
C_{60}	155	2.20
C_{75}	145	2.18
C_{100}	155	2.15

低强度混凝土 28 d 的抗压强度与煤矸石粗骨料的取代分数关系如图 4 所示。随着取代分数的增

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

加,混凝土的抗压强度逐渐降低,拟合结果显示:抗压强度与取代分数呈线性关系,$y=36.14-0.09x$。从数据中还可以发现,当取代分数在 0~30%时,煤矸石的掺入对混凝土的抗压强度影响不大,下降幅度低于 3.5%;当煤矸石取代分数大于 30%后,抗压强度下降显著,每增加 15%的煤矸石掺量,降低幅度约 5%。与石灰石混凝土 C_0进行比较,当煤矸石取代分数为 100%(C_{100})时抗压强度下降约 25%。根据以下试验数据,用煤矸石取代间断粗骨料来配制低强度混凝土,强度等级能达到 C20,如果取代分数小于 30%,强度等级则可以达到 C30。

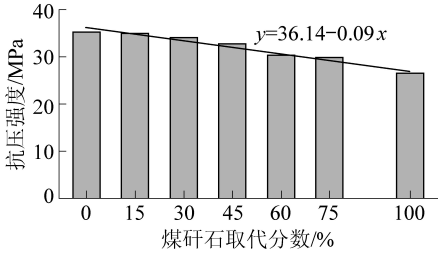


图 4　低强度混凝土 28 d 的抗压强度(系列一)

Fig. 4　Compressive strength of low-strength concrete in 28 d(series 1)

2.2　煤矸石全取代粗细骨料的影响(系列二)

系列二中的低强度混凝土 28 d 抗压强度如图 5 所示,可见在相同的胶骨比参数下,煤矸石全取代混凝土的粗细骨料会使抗压强度下降至 7~10 MPa,与为被取代的混凝土相比,强度下降了 40%~60%,其中系列二的煤矸石低强度混凝土按强度由高到低排序为:2-许昌、2-太原、2-长治和 2-榆林,这与骨料的强度排序对应一致,这是因为本系列中混凝土的胶骨比低,骨料占比较高(约 79%),所以其相关性能大多由骨料的性质所决定。

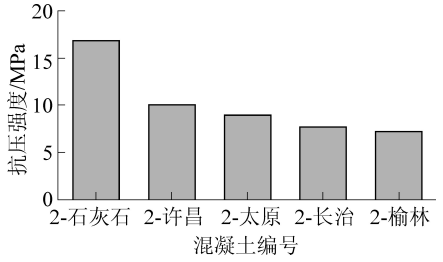


图 5　低强度混凝土 28 d 的抗压强度(系列二)

Fig. 5　Compressive strength of low-strength concrete in 28 d(series 2)

2.3　煤矸石取代连续粗/细骨料的影响(系列三)

图 6a 表示系列三中连续粗骨料替换成不同种类的煤矸石后的低强度混凝土 28 d 抗压和劈裂抗拉强度,可见在这种取代方式下配置的低强度混凝土,强度基本在 10~13 MPa,劈裂抗压强度在 1.5~2.0 MPa。

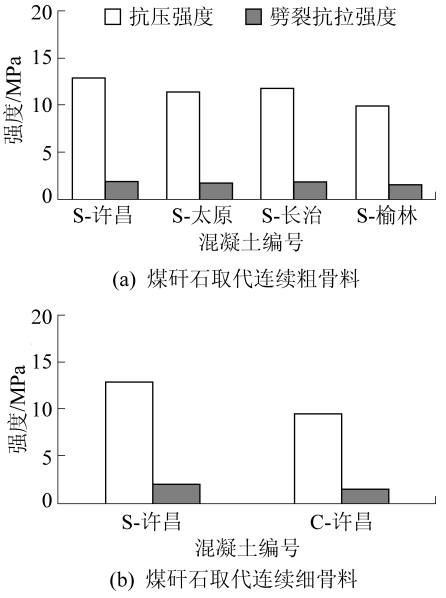


图 6　低强度混凝土 28 d 的抗压及劈裂抗拉强度(系列三)

Fig. 6　Compressive strength and splitting tensile strength of low-strength concrete in 28 d(series 3)

长治煤矸石的骨料强度虽不及太原煤矸石,但本系列所配置混凝土的强度要高于太原,这是因为其表面含有较多的水分(表 3 骨料含水率),拌和时工作性能好,试件成型后内部较密实。以 S-许昌作为对照,用煤矸石继续取代连续细骨料后混凝土的 28 d 抗压及劈裂抗拉强度如图 6b 所示,可见在系列三条件下,用煤矸石取代河砂会使抗压强度下降 27%,劈裂抗拉强度下降 24.1%。

本系列中比较 S-许昌与 C-许昌,取代骨料与总骨料的质量比为 0.342;比较系列一中 C_0与 C_{100},取代的骨料与总骨料质量比为 0.413。系列 2 中用煤矸石完全取代混凝土体系的细骨料后,抗压强度会下降 27%,而在系列一中用煤矸石完全取代低强度混凝土的粗骨料后,抗压强度会只下降 24.9%。可见系列一中的骨料取代比例虽多,但强度下降偏小,这是因为系列一中掺入的粉煤灰起到了强度增强的效果:因为粉煤灰具有一种细小的玻璃微珠结构,在混凝土体系中能发挥微集料填充密实效应,减少混凝土内部的孔隙率,增加密实度,从而受强度降低影响较小[12]。所以当煤矸石取代混凝土的集料后,可以通过掺入粉煤灰的方式来减少煤矸石对混凝土的强度降低效应[16-19]。

3　强度降低效应分析

3.1　煤矸石种类对强度的影响

结合表 3 中的单轴饱和抗压强度和压碎指标可

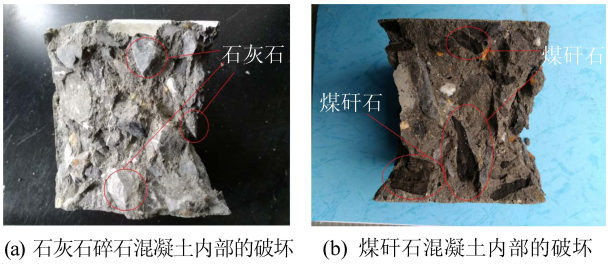
中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

以发现 4 种煤矸石按强度由大到小的排序:许昌、太原、长治和榆林。根据图 2 中 X-rd 的测试结果,四个地方的煤矸石共有的矿物组成为石英、蒙脱石和菱铁矿,其中榆林煤矸石没有长石,许昌煤矸石没有方解石,根据 1949 年 Talor 等人对自然界常见矿物莫氏硬度的测量方法和结果可以知道长石的模式硬度大在 6.0~6.5,而方解石的莫氏硬度大概在 3 左右。不仅如此,比较表 2 中不同煤矸石的化学组成,可以发现许昌、长治和太原的煤矸石中 CaO 和 Al_2O_3 的总含量 29%~31%,而榆林的只有 20.7%,而榆林煤矸石中 K_2O,NaO 和 MgO 的含量均显著高于其他 3 个地区的煤矸石,这主要是因为榆林煤矸石受物理和化学风化较严重,导致一部分金属氧化物流失和另一部分金属氧化物沉积附着,从而化学组成出现相对偏差。所以综上所述,煤矸石的矿物组成和环境因素会对煤矸石骨料的强度起着决定性作用,煤矸石中的长石含量高,且方解石含量少则强度相对高一些。

3.2 煤矸石混凝土的“三通道”破坏

根据骨料的单轴抗压强度(表 3)可以发现煤矸石自身强度要比石灰石低,两者在与水泥砂浆拌和后,石灰石骨料与砂浆结合可以说是“弱”(砂浆)包“强”(骨料),而煤矸石骨料与砂浆结合则是“强”(砂浆)包“弱”(骨料)[18],所以当低强度混凝土体系中煤矸石的占比增加时,这个体系的强度便会逐渐“弱”化。

体系一中和 C_0 的实际破坏状态如图 7 所示。普遍认为骨料与浆体的界面过渡区是混凝土内部最薄弱的部位,所以混凝土受挤压发生破坏时,主要的破坏部位是在骨料和浆体的界面过渡区上,如图 7a 所示。而掺入煤矸石后,由于其强度低于石灰石和砂浆,煤矸石混凝土的破坏不仅仅发生在界面过渡区,其自身也会受压断裂,如图 7b 所示。

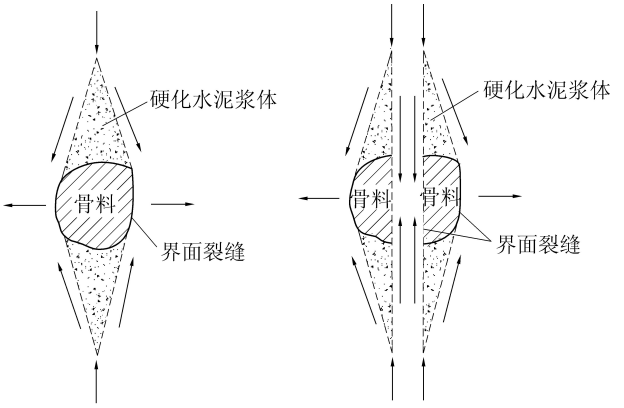


(a) 石灰石碎石混凝土内部的破坏 (b) 煤矸石混凝土内部的破坏

图 7 煤矸石混凝土和普通混凝土的实际破坏状态

Fig. 7 Actual destruction state of coal gangue concrete and ordinary concrete

图 8 为模拟图 7 得到的低强度混凝土受压破坏时不同骨料的破坏模式。由图 8 可知,混凝土的破坏路径从原来的“两通道”变成了“三通道”,大大降低了混凝土抵抗破坏的能力,所以因骨料自身强度降低所出现的“三通道”破坏路径是强度降低的主要原因之一[20]。



(a) 介面过渡区破坏 (b) 界面过渡区和骨料破坏

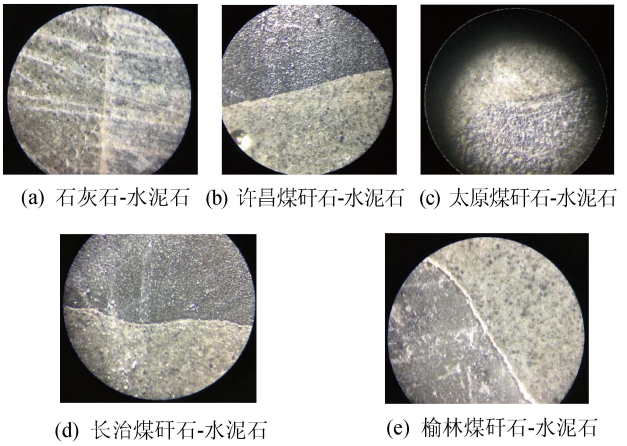
图 8 混凝土受压破坏时不同骨料的破坏模式

Fig. 8 Failure mode of different aggregates after concrete damaged by compression

3.3 骨料界面过渡区薄弱

3.3.1 80 倍光学显微镜观察结果

用 80 倍的显微镜分别观察煤矸石、石灰石与水泥石的粘结界面,观察结果如图 9 所示。可见两种骨料在与水泥石接触的部位都会出现一条清晰可见的“槽”,其中石灰石与水泥石间“槽”的较细,如图 9a 所示,而四种煤矸石与水泥石间的“槽”有明显凹陷,其中榆林煤矸石最为明显(图 9b—图 9e),这就说明石灰石与水泥石粘结较煤矸石而言更加紧密,界面过渡区结构相对完善。



(a) 石灰石-水泥石 (b) 许昌煤矸石-水泥石 (c) 太原煤矸石-水泥石

(d) 长治煤矸石-水泥石 (e) 榆林煤矸石-水泥石

图 9 光学显微镜下骨料的粘结界面

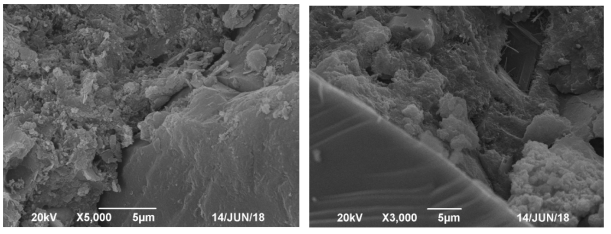
Fig. 9 Bonding interface of aggregate under the optical microscope

3.3.2 SEM 测试结果

图 10 为石灰石与水泥石的骨料界面过渡区 SEM 图,图 11 为煤矸石与水泥石的骨料界面过渡

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

区 SEM 图。由图 10a 可以发现石灰石与水泥石的界面过渡区空隙已被许多水化产物所填充,而图 11a 中煤矸石与水泥石界面过渡区还存在许多较大的毛细孔洞,且这种空洞内含有大量针状的结晶钙矾石。再比较图 10b 与图 11b 和图 11c 煤矸石界面过渡区所生成的 $Ca(OH)_2$晶体明显大于石灰石界面过渡区中的 $Ca(OH)_2$晶体,这是因为是在混凝土搅拌时骨料表面都会吸附一层水膜,而在成型过程中煤矸石表面所附着的水膜较厚,这层水膜会因为没有被水泥水化所消耗而形成毛细孔,孔内提供了足够多的液相环境,使得较多的钙矾石和 $Ca(OH)_2$晶体被析出。

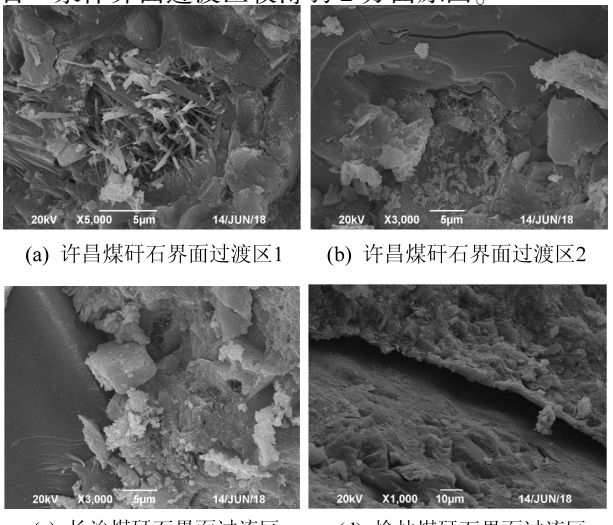


(a) 石灰石界面过渡区1　　(b) 石灰石界面过渡区2

图 10　石灰石-水泥石界面过渡区 SEM

Fig. 10　SEM of limestone and cement interface transition zone

$Ca(OH)_2$晶体比表面积较小,表面能低,对强度的贡献较小,不利于界面过渡区的强度发展,阻碍了骨料与凝胶的接触,导致煤矸石与水泥石的粘合程度不够致密,弱化了界面过渡区的强度发展。其中榆林煤矸石和浆体间粘结最不紧密,其界面过渡区间存在明显较宽的缝隙,如图 11d 所示。因此,在水泥基材料中用煤矸石取代石灰石后引起的强度降低效应主要是由于煤矸石自身强度不高以及煤矸石—浆体界面过渡区较薄弱 2 方面原因。



(a) 许昌煤矸石界面过渡区1　　(b) 许昌煤矸石界面过渡区2

(c) 长治煤矸石界面过流区　　(d) 榆林煤矸石界面过流区

图 11　煤矸石-水泥石界面过渡区 SEM

Fig. 11　SEM of limestone and cement interface transition zone

4 结　论

1)随着煤矸石间断取代低强度混凝土粗骨料后,混凝土抗压强度降低,当取代分数超过 30%,其下降幅度开始增大;煤矸石全取代了低强度混凝土粗细骨料后,其抗压强度会降低 40%~60%(具体视煤矸石种类而定);当抗压强度作为设计低强度混凝土的主要考虑因素时,不宜用煤矸石全取代其粗细骨料。在煤矸石已取代低强度混凝土连续粗骨料的前提下再取代其连续细骨料,其抗压强度会继续下降 27%,劈裂抗拉强度会继续下降 24.1%。

2)在利用煤矸石取代石灰石骨料配置低强度混凝土时,为缓解煤矸石取代对混凝土造成的“弱”化效应,验证了除减少煤矸石的取代分数外,还可以通过掺入粉煤灰改善煤矸石—浆体界面过渡区的方法,进而完善混凝土的内部结构。

3)煤矸石对低强度混凝土强度的影响不仅与取代方式相关,还取决于所用煤矸石的种类,针对本文研究范围的内不同地区煤矸石,按强度从高到低排序为:许昌、太原、长治和榆林。煤矸石的强度不仅与自身所含有的矿物成分相关,还受所在地区的自然环境等外部因素所影响。

4)煤矸石对低强度混凝土的强度降低效应主要来源于 2 个方面,一是煤矸石自身强度低所引起的“三通道”破坏;二是煤矸石—水泥石界面过渡区存在许多的空隙和微裂缝。

参考文献(References):

[1] WANG B, LIU X, ZHANG J, *et al*. Pyrolysis behavior of corncob and coal gangue with modified medical stone and HZSM-5 based additives[J]. Fuel, 2018, 211: 816-826.

[2] TANG Q, LI L, ZHANG S, *et al*. Characterization of heavy metals in coal gangue-reclaimed soils from a coal mining area[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018186: 1-11.

[3] 杨　凯,文雪琴. 自燃后煤矸石的 XRD 定性分析[J]. 煤炭技术,2017,36(1):313-314.
YANG Kai, WEN Xueqin. XRD qualitative analysis of spontaneous combustion of coal gangue[J]. Coal Technology, 2017, 36(1): 313-314.

[4] ZHAO J, WANG D, LIAO S. Effect of mechanical grinding on physical and chemical characteristics of circulating fluidized bed fly ash from coal gangue power plant[J]. Construction & Building Materials, 2015, 101: 851-860.

[5] WANG C, NI W, ZHANG S, *et al*. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings [J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 109-115.

[6] 张金喜,陈炜林,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(1):116-125.

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

ZHANG Jinxi,CHEN Weilin,JIN Shanshan,*et al*.Investigation on durability of coal gangue aggregate concrete[J].Journal of Beijing University of Technology,2011(1):116-125.

[7] 刘莉君,于 伟,王怡丹,等.煤矸石制备烧结砖的方法和性能研究[J].煤炭技术,2017,36(10):279-281.
LIU Lijun,YU Wei,WANG Yidan,*et al*.Study on preparation and properties of sintered brick by coal gangue[J].Coal Technology,2017,36(10):279-281.

[8] WANG J,QIN Q,HU S,*et al*.A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas[J].Journal of Cleaner Production,2016,112:631-638.

[9] LI D,SONG X,GONG C,*et al*.Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue[J].Cement & Concrete Research,2006,36(9):1752-1759.

[10] ZHOU S X.Study on the reaction degree of calcined coal gangue powder in blended cement by selective solution method[J].Procedia Earth & Planetary Science,2009,1(1):634-639.

[11] DONG Z,XIA J,FAN C,*et al*.Activity of calcined coal gangue fine aggregate and its effect on the mechanical behavior of cement mortar[J].Construction & Building Materials,2015,100(17):63-69.

[12] 汪振双,谭晓倩,周 梅,等.煤矸石粗集料粒径对混凝土性能的影响[J].沈阳大学学报:自然科学版,2016,28(1):69-73.
WANG Zhenshuang,TAN Xiaoqian,ZHOU Mei,*et al*.Influence of particle size of coal gangue coarse aggregates on concrete properties[J].Journal of Shenyang University:Natural Science,2016,28(1):69-73.

[13] 陈久权,刘 磊,杜秉旋,等.煤矸石粗集料混凝土配合比设计及性能研究[J].煤炭技术,2017,36(10):300-302.
CHEN Jiuquan,LIU Lei,DU Bingxuan,*et al*.Study on mix proportion design and mechanical properties of coal gangue coarse aggregate concrete[J[.Coal Technology,2017,36(10):300-302.

[14] 杨力辉,于少春.自然煤矸石轻骨料混凝土配合比设计[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2010,29(S1):45-46.
YANG Lihui, YU Shaochun. Mixing proportion design of lightweight aggregate concrete with coal gangue[J].Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2010,29(S1):45-46.

[15] 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(7),2390-2395.
MA Hongqiang, YI Cheng, ZHU Hongguang, *et al*. Compressive Strength and Durability of Coal Gangue Aggregate Concrete[J].Material Review,2018,32(14):2390-2395.

[16] 段晓牧,夏军武,杨风州,等.煤矸石集料性质对混凝土力学性能影响的试验研究[J].工业建筑,2014,44(3):114-118.
DUAN Xiaomu,XIA Junwu,YANG Fengzhou,*et al*.Experimental research on the influence of coal gangue aggregate behavior on the mechanical properties of concrete[J].Industrial Construction,2014,44(3):114-118.

[17] CHEN Y,ZHOU S,ZHANG W.Effect of coal gangue with different kaolin contents on compressive strength and pore size of blended cement paste[J].Journal of Wuhan University of Technology:Mater Sci Ed,2008,23(1):12-15.

[18] 陈本沛.煤矸石混凝土的强度[J].工业建筑.1994(7):29-32.
CHEN Benpei.Strength of gangue concrete[J].Construction Industrial,1994(7):29-32.

[19] 肖 佳,陈 雷,邢 昊.粉煤灰和矿粉对水泥胶砂自收缩的影响[J].建筑材料学报,2011,14(5):604-609.
XIAO Jia,CHEN Lei,XING Hao.Influence of fly ash and slag powder on autogenous shrinkage of cement mortars[J].Journal of Building Materials,2011,14(5):604-609.

[20] 白朝能,李霖皓,沈 远,等.煤矸石作为粗骨料对混凝土力学性能的影响[J].四川建材,2018(8):1-3.
BAI Chaoneng LI Linhao,SHEN Yuan,*et al*.The effects of coal gangue as coarse aggregate on mechanical property of concrete[J].Sichuan Building Materials,2018(8):1-3.