

磷渣粉替代粉煤灰对外掺 MgO 碾压混凝土性能的影响

陈荣妃,陈昌礼,杨华山,赵振华,刘小莹

(贵州师范大学材料与建筑工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:为寻求碾压混凝土中粉煤灰的替代掺合料,使用贵州磷渣粉部分或全部替代粉煤灰制备外掺 MgO 碾压混凝土,研究了采用不同掺合料的外掺 MgO 碾压混凝土的自生体积变形和力学性能,并采用 X 射线衍射、差热-热重分析、背散射电子成像、能谱分析、压汞分析等方法研究碾压混凝土的微观结构。结果表明:与单掺粉煤灰碾压混凝土比较,复掺磷渣粉和粉煤灰碾压混凝土的自生体积变形值变大,且随着磷渣粉掺量的增大而减小,而单掺磷渣粉碾压混凝土的自生体积变形值变小;在相同条件下,磷渣粉比粉煤灰对混凝土中 MgO 水化膨胀的抑制作用更强;用磷渣粉替代粉煤灰配制的碾压混凝土的孔隙结构得到优化,力学性能更高,且 MgO 水化产生的膨胀不会对其微观结构造成破坏;磷渣粉适宜替代粉煤灰配制外掺 MgO 碾压混凝土。

关键词:磷渣粉;粉煤灰;自生体积变形;外掺 MgO 碾压混凝土;微观结构

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0102-06

Effect of phosphorus slag powder replacing fly ash on performance of MgO-admixed RCC//CHEN Rongfei, CHEN Changli, YANG Huashan, ZHAO Zhenhua, LIU Xiaoying (School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to find an alternative admixture of fly ash in roller compacted concrete(RCC), Guizhou phosphate slag powder was used to partially or completely replace fly ash to prepare RCC mixed with MgO. The autogenous volume deformation and mechanical properties of MgO-admixed RCC, as well as the microstructure was investigated by means of X-ray diffraction, differential scanning calorimetry and thermogravimetry analysis, backscattered electron imaging, energy dispersive spectrum analysis, mercury injection porosimetry and so on. The results show that compared with singly-doped fly ash RCC, the autogenous volume change of RCC with phosphorus slag powder and fly ash becomes larger, and decreases with the amount of phosphorus slag powder, while the autogenous volume change of singly-doped phosphorus slag powder RCC is smaller. With the same conditions, the inhibitory effect of phosphorus slag powder on MgO hydration expansion of concrete is stronger than fly ash. The pore structure of RCC prepared with phosphorus slag powder replacing fly ash is optimized with better mechanical properties. The microstructure of MgO-admixed RCC cannot be damaged by expansion due to MgO hydration. Phosphorus slag powder is suitable to replace fly ash to prepare MgO-admixed RCC.

Key words: phosphorus slag powder; fly ash; autogenous volume deformation; MgO-admixed RCC; microstructure

粉煤灰已成为碾压混凝土必不可少的掺合料,掺量高达 50% 以上^[1]。近年来,随着我国基础设施建设的不断发展,粉煤灰需求量很大,在一些地区出现了供不应求、价格上涨的现象。因此,研究碾压混凝土中粉煤灰的替代物是非常有意义的。磷渣作为生产黄磷时排放的工业废弃物,全国 2016—2020 年平均产量约为 81 万 t/a^[2],利用率却很低。研究表明,磨细的磷渣粉是一种具有潜在活性的矿物掺合料^[3],其火山灰活性甚至高于粉煤灰^[4]。方坤河等^[5-6]认为

磷渣粉碾压混凝土性能可达到设计要求,磷渣粉作为碾压混凝土的掺合料前景很好;张建峰等^[7-8]研究了掺磷渣粉与粉煤灰的碾压混凝土的性能,认为两者复掺后的混凝土性能较高,且磷渣粉部分替代粉煤灰已成功应用在沙沱水电站碾压混凝土中^[9];王珩等^[10]研究了 PL(磷渣粉+石灰石粉)掺合料对碾压混凝土性能的影响,认为 PL 掺合料可以改善混凝土性能,节约工程成本。这些研究成果对于合理利用磷渣,以及对碾压混凝土筑坝技术的发展有着积极意义。

基金项目:国家自然科学基金(51869005);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5769-25)

作者简介:陈荣妃(1987—),女,实验师,硕士,主要从事混凝土材料研究。E-mail:554153304@qq.com

通信作者:陈昌礼(1966—),男,教授,硕士,主要从事混凝土材料研究。E-mail:clchen2026@163.com

外掺 MgO 混凝土能产生延迟性微膨胀,抵消大坝混凝土的温降收缩,还可简化大体积混凝土的温控措施^[11-12]。将外掺 MgO 混凝土筑坝技术与碾压混凝土筑坝技术相结合,可达到进一步快速施工、节省工程成本的目的。目前外掺 MgO 碾压混凝土已经在贵州省黄花寨水电站^[13]、广东韩江高坡水利枢纽^[14]等工程中应用,效果良好,但矿物掺合料全是粉煤灰,鲜见使用磷渣粉替代粉煤灰配制外掺 MgO 碾压混凝土的报道。为此,本文研究了单掺磷渣粉、单掺粉煤灰和复掺磷渣粉与粉煤灰对外掺 MgO 碾压混凝土自生体积变形、力学性能的影响,并采用 X 射线衍射 (XRD)、差热-热重分析 (DSC-TG)、背散射电子成像 (BSE)、能谱分析 (EDS)、压汞分析 (MIP) 等方法分析了外掺 MgO 碾压混凝土的微观结构,现阐述于后。

1 材料和方法

1.1 原材料

水泥采用 P · O42.5 普通硅酸盐水泥,密度为 $3\,130\text{ kg/m}^3$,细度(过 $45\mu\text{m}$ 方孔筛筛余,下同)为 15.20%,标准稠度用水量为 25.2%;粉煤灰和磷渣粉的物理性能指标见表 1; MgO 的密度为 $3\,340\text{ kg/m}^3$,细度为 26.80%。各材料主要化学成分的质量分数列于表 2。试验用粗骨料为灰岩骨料,采用三级配,即小石(5 ~ 20 mm)、中石(20 ~ 40 mm)、大石(40 ~ 80 mm);细骨料(人工砂)的细度模数为 2.96,属中砂,颗粒级配属于第 II 区,级配良好,石粉质量分数为 17.10%。骨料的品质满足 DL/T5112—2009《水工碾压混凝土施工规范》的技术要求。试验用外加剂为萘系高效减水剂和引气剂,其品质符合 DL/T5100—2014《水工混凝土外加剂技术规程》的技术要求。

表 1 粉煤灰和磷渣粉的物理性能指标				
原材料	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	细度/%	需水量比/%	28 d 强度 比/%
粉煤灰	2.57	20.60	95.90	78.90
磷渣粉	2.90	13.90	98.40	80.90

表 2 原材料主要化学成分的质量分数 单位:%											
原材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	其他	
水泥	64.68	21.73	4.81	3.01	2.12	1.95	0.24	0.71	0.15	0.60	
粉煤灰	6.29	46.54	19.97	15.72	1.87	1.35	0.54	1.52	0.18	6.02	
磷渣粉	26.66	30.19	9.36	12.49	3.30	2.72	0.56	0.82	1.40	12.10	
MgO	2.07	2.63	0.31	0.60	0.17	88.24	0.20	0.03	0.10	5.65	

图 1 和图 2 分别为粉煤灰和磷渣粉的 SEM 形貌图,可见粉煤灰由球状颗粒和其他一些不规则的颗粒组成。球状颗粒主要为硅-氧玻璃体和铝-氧玻璃体,其形貌效应和活性效应可以提高混凝土的工作性能

和力学性能。磷渣粉由几微米到几十微米的不规则颗粒组成,颗粒的棱角分明、表面较光滑、多面体形状明显。磷渣粉的形态效应虽不及粉煤灰,但从图 3 可以看到,磷渣粉在衍射角 2θ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 左右处有馒头状隆起,且根据表 1 可知,磷渣粉比粉煤灰更细,28 d 强度比高于粉煤灰,说明磷渣粉具有较高活性。

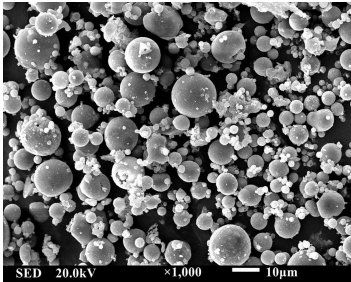


图 1 粉煤灰的 SEM 形貌

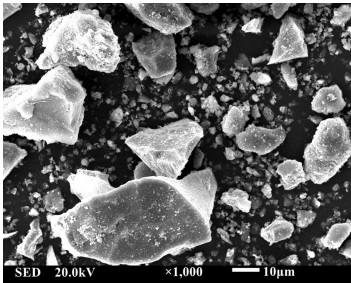


图 2 磷渣粉的 SEM 形貌

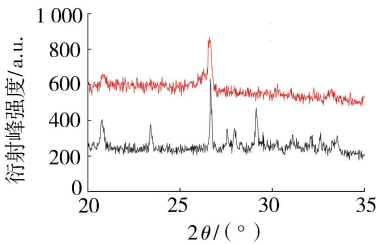


图 3 粉煤灰、磷渣粉的 XRD 形貌

1.2 配合比及试验方法

表 3 为参考某实际工程的外掺 MgO 碾压混凝土的试验配合比。以单掺粉煤灰(即粉煤灰替代水泥用量的 60%)混凝土为基准混凝土,改变磷渣粉替代基准混凝土中粉煤灰的比例,按照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》成型混凝土自生体积变形试件、抗压强度试件、劈拉强度试件、极限拉伸试件、抗渗试件及抗冻试件,并进行相应的试验与观测。成型各类混凝土试件时,通过调节外加剂用量,控制混凝土拌合物的稠度为 3 ~ 5 s,含气量为 2.5% ~ 3.5%,所选用水胶比为 0.50。

同时,为了综合分析外掺 MgO 碾压混凝土的微观性能,从龄期为 360 d 的混凝土自生体积变形试件中钻取芯样后,首先采用无水乙醇萃取,再在烘箱内于 60°C 温度下干燥 24 h,以备 BSE、XRD、DSC-TG、MIP 测试使用。其中,进行 BSE 测试前,将试样

表 3 试验用碾压混凝土配合比

试件 编号	粉煤 灰掺量/%	磷渣粉 掺量/%	MgO 掺量/%	减水剂 掺量/%	引气剂 掺量/%	原材料用量/(kg·m ⁻³)							
						水	水泥	粉煤灰	磷渣粉	砂	小石	中石	大石
PS-0	60	0	6.0	0.7	0.045	98	78.4	117.6	0	733.0	498.0	498.0	427.0
PS-20	40	20	6.0	0.7	0.045	98	78.4	78.4	39.2	733.0	498.0	498.0	427.0
PS-40	20	40	6.0	0.7	0.045	98	78.4	39.2	78.4	733.0	498.0	498.0	427.0
PS-60	0	60	6.0	0.7	0.045	98	78.4	0	117.6	733.0	498.0	498.0	427.0

注:试件编号“PS-20”表示磷渣粉占胶凝材料总量的 20%,其他依次类推。

磨成直径为 10 mm、厚度为 1 ~ 2 mm、表面光滑的待检样品,然后进行镀金处理;进行 XRD 和 DSC-TG 测试前,将试样用玛瑙碾钵压成粉末,并在碾压过程剔除砂石;进行 MIP 测试前,将试样按照国家标准《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度(第一部分 压汞法)》的规定制样,样品为块状的水泥砂浆。BSE 测试使用的仪器为日本生产的 JSM-6490LV 扫描电子显微镜;XRD 测试使用的仪器为德国布鲁克 AXS 公司生产的 D8 Advance X 射线衍射仪;DSC-TG 测试是在常温至 1 000 ℃(升温速率为 10 ℃/min)的氮气环境下进行,使用的仪器为德国耐驰生产的 STA449F3 综合热分析仪;MIP 测试使用的仪器为美国麦克公司生产的 AutoPore IV 9520 压汞测试仪。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

不同配合比的外掺 MgO 碾压混凝土的力学性能见表 4。如表 4 所示,磷渣粉替代粉煤灰配制的碾压混凝土 28 d 抗压强度比单掺粉煤灰混凝土小,90 d 抗压强度比单掺粉煤灰混凝土大。当在水泥混凝土中掺入磷渣粉或粉煤灰时,磷渣粉或粉煤灰颗粒因受水泥熟料水化反应生成的氢氧化钙碱性激发作用,将发生火山灰反应。但是,由于磷渣粉的缓凝作用使得掺磷渣粉的混凝土早期强度降低,相当于水泥早期水化被抑制,且本试验中磷渣粉的活性比粉煤灰高,这两个方面的原因使得磷渣粉混凝土龄期 90 d 抗压强度超过粉煤灰混凝土。

表 4 碾压混凝土试件的力学性能

试件 编号	抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa		90 d 极限 拉伸值/ ×10 ⁻⁶	90 d 抗渗 等级	90 d 抗冻 等级
	28 d	90 d	28 d	90 d			
PS-0	14.40	17.96	1.33	1.64	56.34	>W6	>F100
PS-20	12.03	19.36	1.10	1.75	56.78	>W6	>F100
PS-40	11.78	20.69	1.08	1.79	57.32	>W6	>F100
PS-60	12.70	21.05	1.10	1.82	58.71	>W6	>F100

另外,SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》规定,水头低于 70 m(目前 MgO 混凝土筑坝技术主要用于中低坝)的大体积混凝土结构挡水面,其抗渗等级的最小允许值为 W6;在温暖地区的抗

冻等级为 F50 ~ F100。由表 4 可见,使用磷渣粉替代粉煤灰制备的碾压混凝土的抗渗、抗冻能力,同样能够满足坝高 70 m 以下的混凝土的抗渗要求和温暖地区对坝体混凝土的抗冻要求。因此,磷渣粉可以替代粉煤灰来制备外掺 MgO 碾压混凝土。

2.2 自生体积变形

不同配合比的外掺 MgO 碾压混凝土的自生体积变形试验结果见图 4。由图 4 可知,无论是单掺粉煤灰还是用磷渣粉替代粉煤灰配制的混凝土的自生体积变形均呈现膨胀状态,这明显区别于普通混凝土的收缩状态。90 d 前,单掺粉煤灰混凝土 PS-0 的自生体积膨胀变形偏小;90 d 后,单掺磷渣粉混凝土 PS-60 的自生体积膨胀变形最小。对比复掺粉煤灰与磷渣粉的混凝土,以及单掺 60% 磷渣粉的混凝土后发现,在相同 MgO 掺量条件下,随着磷渣粉掺量的减少,使用磷渣粉替代粉煤灰配制的混凝土的自生体积变形逐渐增大。其中,使用磷渣粉全部替代粉煤灰的碾压混凝土 PS-60 在龄期 360 d 的自生体积变形值比基准混凝土低约 3×10⁻⁶,而用磷渣粉部分替代粉煤灰配制的混凝土在龄期 360 d 的自生体积变形值却比基准混凝土高约 8×10⁻⁶ ~ 15×10⁻⁶,这与混凝土抗压强度的变化密切相关。一般情况下,抗压强度越大,混凝土中 MgO 水化引起膨胀的约束作用就越强,导致膨胀变小^[15-16]。单掺粉煤灰的混凝土 PS-0 的抗压强度最低,但自生体积变形却不是最大,而是介于 PS-60 与 PS-40 之间,与 PS-60 的膨胀接近。由此看来,抗压强度虽是影响混凝土自生体积变形的重要因素,但不是唯一因素。当存在多种掺合料或矿物掺合料掺量很高时,水泥水化

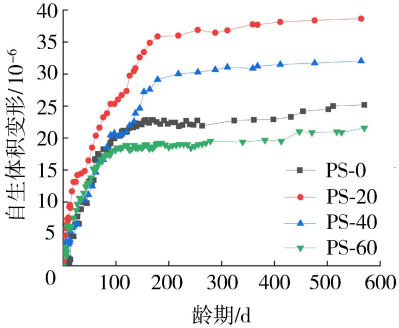


图 4 外掺 MgO 碾压混凝土的自生体积变形

反应的过程非常复杂。

2.3 X 射线衍射

龄期为 360 d 的外掺 MgO 碾压混凝土芯样的 XRD 试验结果见图 5。从图 5 观察到,用磷渣粉替代粉煤灰配制的碾压混凝土与单掺粉煤灰混凝土均含有氢氧化钙(Ca(OH)₂)、二氧化硅(SiO₂)、碳酸钙(CaCO₃)及未水化方镁石。水泥的主要水化产物水化硅酸钙(C-S-H),由于结晶度很低,未出现衍射峰。CaCO₃ 和 SiO₂ 衍射峰的出现,是因为取样时样品中不可避免地混入砂石骨料。Ca(OH)₂ 的衍射峰主要由水泥水化形成,但在 XRD 图谱中的强度较低。一方面,水泥用量少,水泥水化生成的Ca(OH)₂ 少,且粉煤灰或磷渣粉可以同 Ca(OH)₂ 发生火山灰反应,消耗了部分 Ca(OH)₂; 另一方面,随着龄期的延长,Ca(OH)₂ 越来越少,即使有一些,在制样的过程也有可能已碳化。还有,方镁石的衍射峰也不明显,是因为外掺 MgO 含量本来就少,1 年后大部分已水化,且过量矿物掺合料(主要成分 SiO₂、Al₂O₃)也可能与 MgO 发生水化反应^[17]。

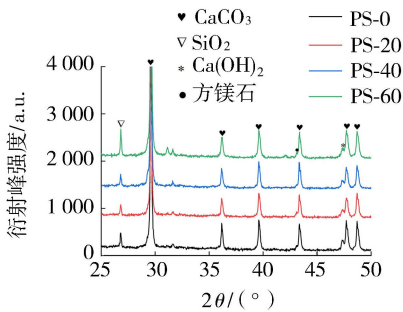


图 5 360 d 混凝土芯样的 XRD 试验结果

2.4 差热-热重分析

龄期为 360 d 的外掺 MgO 碾压混凝土芯样的 DSC-TG 曲线见图 6。图中只有 2 个明显的吸热峰,约 100℃ 处的峰产生原因主要是 C-S-H 脱水;约 770℃ 处的峰很尖锐,表明失重很大,主要原因是 CaCO₃ 分解生成 CO₂, 其次是可能存在于水化硅酸镁。根据热重曲线及相关研究报道^[18-19], 300 ~ 400℃ 为 Mg(OH)₂ 脱水区间, 400 ~ 500℃ 为 Ca(OH)₂ 脱水区间,但从图中曲线看这两个区间的峰都不明显,这与 XRD 能谱图中Ca(OH)₂、Mg(OH)₂ 峰不强相对应。

使用磷渣粉替代粉煤灰制备的外掺 MgO 混凝土的膨胀变形与 MgO 的水化程度、水化环境相关。根据热分析原理,在一定温度范围内 Mg(OH)₂ 会脱水,这个脱水的量即为 MgO 水化反应消耗的水量,据此可以粗略地判断 MgO 的水化度。本文以 300 ~ 400℃ 为 Mg(OH)₂ 脱水区间, 400 ~ 500℃ 为 Ca(OH)₂ 脱水区间,得到 MgO 水化度和 Ca(OH)₂ 质量分数的计算公式如下:

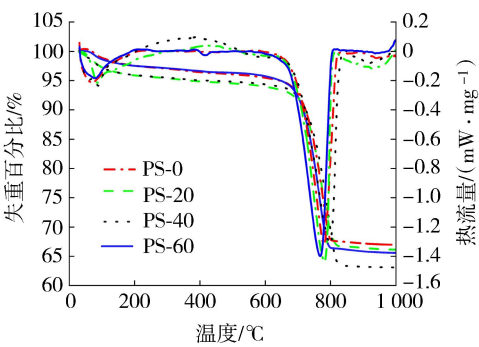


图 6 360 d 混凝土芯样 DSC-TG 曲线

$$w(\text{MgO}) = \frac{(w_{400^\circ\text{C}} - w_{300^\circ\text{C}}) \times 40}{18} \tag{1}$$

$$w(\text{Ca(OH) }_2) = \frac{(w_{500^\circ\text{C}} - w_{400^\circ\text{C}}) \times 74}{18} \tag{2}$$

式中: $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{Ca(OH) }_2)$ 分别为 MgO 水化度和 Ca(OH)₂ 的质量分数; $w_{300^\circ\text{C}}$ 、 $w_{400^\circ\text{C}}$ 和 $w_{500^\circ\text{C}}$ 分别为 300℃、400℃ 和 500℃ 的样品剩余质量分数。

根据上述公式计算得到试件 PS-0、PS-20、PS-40、PS-60 的 MgO 水化度分别为 1.20%、1.31%、1.26%、1.06%, 试件 PS-0、PS-20、PS-40、PS-60 的 Ca(OH)₂ 质量分数分别为 1.36%、1.56%、1.30%、1.23%。由此可知:单掺 60% 磷渣粉混凝土芯样的 Ca(OH)₂ 质量分数小于单掺 60% 粉煤灰混凝土芯样的 Ca(OH)₂ 质量分数。由于混凝土中的 Ca(OH)₂ 主要由水泥水化产生,故在相同水泥用量条件下,Ca(OH)₂ 剩余越少,说明矿物掺合料发生火山灰反应所消耗的 Ca(OH)₂ 越多,掺合料活性就越高。由此可见,本试验所用磷渣粉的活性比粉煤灰高,这与表 1 中磷渣粉和粉煤灰的物理性能指标一致。从计算结果还可发现,随着磷渣粉掺量的增加,使用磷渣粉替代粉煤灰所配制的混凝土的Ca(OH)₂ 质量分数逐渐下降,即磷渣粉的火山灰效应能够降低浆体孔隙液的碱度。邓敏等^[20]认为在高碱环境下 MO 水化生成的 Mg(OH)₂ 晶体细小,被限制扩散而聚集在 MgO 颗粒表面附近较窄的区域内生长,能产生较大的膨胀;在低碱环境中,生成的 Mg(OH)₂ 晶体则较粗大,并分散在 MgO 颗粒表面周围较大的区域内,膨胀较小。这从微观层面揭示了使用磷渣粉替代粉煤灰制备的碾压混凝土的自生体积变形随磷渣粉掺量增加而逐渐减小的机理。此外,与单掺粉煤灰的基准混凝土比较,MgO 在单掺磷渣粉混凝土中的水化度最低,与图 4 显示的单掺磷渣粉碾压混凝土的自生体积变形最小相吻合。这说明,在相同条件下,单掺磷渣粉比单掺粉煤灰对混凝土中 MgO 水化膨胀的抑制作用更强。

2.5 压汞分析

龄期为 360 d 的外掺 MgO 碾压混凝土芯样的累

计孔径分布直方图及孔径分布微分曲线分别见图7、图8(图8中 D 为孔径, V 为孔体积)。由图7可知,与单掺60%粉煤灰的基准混凝土PS-0相比,用磷渣粉替代粉煤灰配制的混凝土的总孔体积明显减少,多害孔($>200\text{ nm}$)和有害孔($50\sim 200\text{ nm}$)减少。由图8可知,PS-0、PS-20、PS-40、PS-60的最可几孔径(出现几率最大的孔径)分别为 $0.040\ 3\ \mu\text{m}$ 、 $0.026\ 3\ \mu\text{m}$ 、 $0.026\ 3\ \mu\text{m}$ 、 $0.021\ 1\ \mu\text{m}$,即随着磷渣粉替代粉煤灰的比例增加,最可几孔径有减小趋势。最可几孔径越小,平均孔径也就越小。原因是磷渣粉的缓凝及火山灰特性使得磷渣粉水化生成更多凝胶,提高了混凝土的密实度,细化了混凝土的孔径,减小了孔体积。

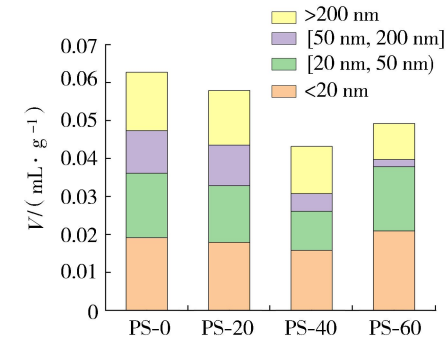


图7 360 d 混凝土芯样累计孔径分布直方图

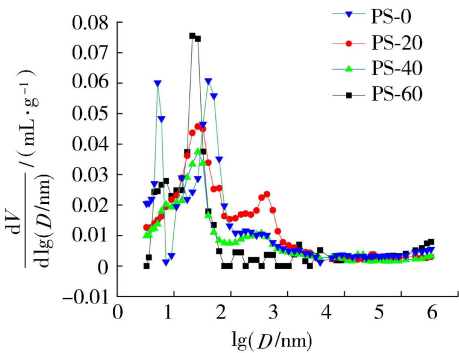


图8 360 d 混凝土芯样孔径分布微分曲线

2.6 背散射电子成像及能谱分析

龄期为360 d的外掺MgO碾压混凝土芯样的背散射电子图像和能谱分析结果分别见图9及表5。从表5可以看到,混凝土芯样中Mg和O原子数之比接近1:2,高于氧化镁中Mg和O原子数之比1:1,与Mg(OH)₂中Mg和O原子数之比1:2接近,说明经过1年后,混凝土中的MgO大多水化生成了水镁石。同时,从自生体积变形值最大的混凝土PS-20和使用磷渣粉全部替代粉煤灰制备的混凝土PS-60的背散射电子图像(图9)可见,在MgO颗粒及其水化产物周围均未见裂纹。这说明,在MgO掺量适当的条件下,MgO水化产生的膨胀不会对采用磷渣粉部分或全部替代粉煤灰制备的碾压混凝土的微观结构造成破坏。

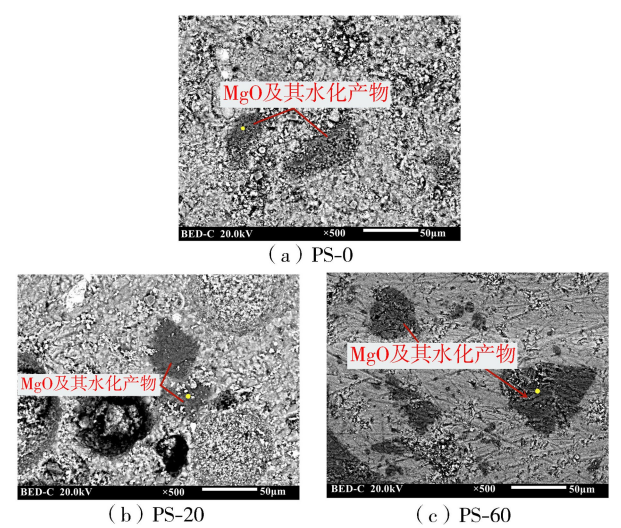


图9 360 d 混凝土芯样的背散射电子图像

表5 能谱分析结果

试件编号	原子数/%				
	O	Mg	Ca	Si	Al
PS-0	62.16	33.18	1.12	0.53	3.01
PS-20	63.92	34.13	0.74	0.32	0.89
PS-60	64.81	31.34	0.82	0.41	2.62

3 结 论

- 在相同MgO掺量下,与单掺粉煤灰的碾压混凝土比较,当使用磷渣粉全部替代粉煤灰制备碾压混凝土时,混凝土的自生体积变形变小;当使用磷渣粉部分替代粉煤灰制备碾压混凝土时,混凝土的自生体积变形变大,且随着磷渣粉掺量的增加,混凝土自生体积变形逐渐减小。
- 在相同MgO掺量下,与单掺粉煤灰的碾压混凝土比较,使用磷渣粉替代粉煤灰制备的碾压混凝土在龄期90 d时的抗压强度、劈拉强度、极限拉伸值均增大,且随磷渣粉掺量的增加而增大。使用磷渣粉替代粉煤灰配制的碾压混凝土的抗渗、抗冻能力,同样能够满足坝高70 m以下的混凝土的抗渗要求和温暖地区对坝体混凝土的抗冻要求。
- 在相同条件下,磷渣粉比粉煤灰对混凝土中MgO水化膨胀的抑制作用更强。
- 在相同MgO掺量下,与单掺粉煤灰的碾压混凝土比较,使用磷渣粉替代粉煤灰制备的碾压混凝土的累计孔体积、多害孔和有害孔减少,最可几孔径减小,孔隙结构得到优化。
- 在MgO掺量适当的条件下,MgO水化产生的膨胀不会对采用磷渣粉替代粉煤灰制备的碾压混凝土的微观结构造成破坏。

参考文献:

[1] 刘先江. 超高掺粉煤灰碾压混凝土在工程中的应用

- [C] //中国大坝协会 2015 学术年会暨第七届碾压混凝土坝国际研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2015: 561-568.
- [2] 华经产业研究院. 2020 年我国黄磷供需现状及竞争格局分析, 西南地区为主要产地[EB/OL]. [2021-03-11]. <http://caifuhao.eastmoney.com/news/20210311142001122515760>.
- [3] 彭艳周, 柯锦, 张俊, 等. 磷渣粉的粒径分布与其活性的灰色关联分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(2): 115-120. (PENG Yanzhou, KE Jin, ZHANG Jun, et al. Grey relation analysis between particle size distribution and cementitious reactivity of phosphorous slag powder[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(2): 115-120. (in Chinese))
- [4] WANG Lei, GUO Fanxing, LIN Yuqiang, et al. Comparison between the effects of phosphorous slag and fly ash on the C-S-H structure, long-term hydration heat and volume deformation of cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 1-20.
- [5] 方坤河. 磷矿渣粉用作碾压混凝土掺合料的研究[C]//第五届碾压混凝土坝国际研讨会论文集. 北京: 中国大坝委员会, 2007: 353-359.
- [6] 金双全, 朱育岷, 陈丽琴. 磷渣粉用作碾压混凝土掺合料的研究和应用[J]. 红水河, 2012, 31(3): 43-45. (JIN Shuangquan, ZHU Yumin, CHEN Liqin. Study on phosphorus slag powder as RCC admixture and its applications[J]. Hongshui River, 2012, 31(3): 43-45. (in Chinese))
- [7] 张建峰, 杨华全, 王迎春, 等. 掺磷渣粉与粉煤灰碾压混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2010(6): 74-76. (ZHANG Jianfeng, YANG Huaquan, WANG Yingchun, et al. Study on properties of RCC with phosphorous slag and fly ash[J]. Concrete, 2010(6): 74-76. (in Chinese))
- [8] 杨华美, 林育强, 杨华全, 等. 掺磷渣粉与粉煤灰的碾压混凝土性能比较研究[J]. 混凝土, 2009(11): 54-57. (YANG Huamei, LIN Yuqiang, YANG Huaquan, et al. Comparative study on the performance of roller compacted concrete with phosphorus slag powder or fly ash[J]. Concrete, 2009(11): 54-57. (in Chinese))
- [9] 林育强, 陈群山. 四级配碾压混凝土在沙沱水电站大坝中的应用[C]//第六届“全国先进混凝土技术及工程应用”研讨会论文集. 北京: 工业建筑杂志社, 2018: 99-106.
- [10] 王珩, 陆采荣, 梅国兴, 等. 磷渣粉石灰石粉复合掺合料及其混凝土的性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 85-89. (WANG Heng, LU Cairong, MEI Guoxing, et al. Performance test of phosphorus slag powder and limestone powder compound mineral additive and the compounded concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 85-89. (in Chinese))
- [11] 李承木. 外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 82-88. (LI Chengmu. Review of quick damming technology of MgO concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 82-88. (in Chinese))
- [12] 陈昌礼, 申献平, 陈学茂. 全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术在贵州省拱坝工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 84-88. (CHEN Changli, SHEN Xianping, CHEN Xuemao. Application of damming technology with MgO admixed concrete used in the whole dam in Guizhou's arch dam projects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 84-88. (in Chinese))
- [13] 郑国旗, 赵其兴. 外掺氧化镁碾压混凝土技术在黄坛水电站的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(3): 208-213. (ZHENG Guoqi, ZHAO Qixing. The application of magnesia RCC technique in the Huanghuazhai Hydropower Station[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(3): 208-213. (in Chinese))
- [14] 王子龙, 纪宪坤, 徐可, 等. 外掺 MgO 混凝土技术在韩江高陂水利枢纽工程中的应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 130-133. (WANG Zilong, JI Xiankun, XU Ke, et al. Application of concrete with MgO in Hanjiang Gaobei water control project[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 130-133. (in Chinese))
- [15] GHOSH S N. 水泥技术进展[M]. 杨南如, 闵盘荣, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 10-18.
- [16] 沈达, 邓敏, 莫立武. 约束程度对外掺 MgO 混凝土变形及劈拉强度的影响[J]. 混凝土, 2010(10): 14-17. (SHEN Da, DENG Min, MO Liwu. Effect of restraint degree on the expansion and tensile splitting strength of concrete containing MgO-based expansive agent[J]. Concrete, 2010(10): 14-17. (in Chinese))
- [17] 方坤河. 过烧氧化镁的水化及其对混凝土自生体积变形的影响[J]. 水力发电学报, 2004, 23(4): 45-49. (FANG Kunhe. Hydration of excessively combusted magnesium oxide and its influence on autogenous volume change of concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(4): 45-49. (in Chinese))
- [18] 周龙龙. MgO 膨胀剂-粉煤灰-水泥复合胶凝体系水化特性及水化动力学研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [19] WANG Hui, WANG Yali, CUI Suping, et al. Reactivity and hydration property of synthetic air quenched slag with different chemical compositions[J]. Materials, 2019, 12(6): 932-955.
- [20] 邓敏, 崔雪花, 刘元湛, 等. 水泥中氧化镁的膨胀机理[J]. 南京化工学院学报, 1990, 12(4): 1-11. (DENG Min, CUI Xuehua, LIU Yuangzhan, et al. Expansive mechanism of magnesia as an additive of cement[J]. Journal of Nanjing Institute of Chemical Technology, 1990, 12(4): 1-11. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-08-17 编辑: 骆超)