

小尺寸压蒸试件的 MgO 水泥基材料微观结构研究

李维维, 宋子宇, 赵振华, 卢 炜, 徐再贤

(贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为促进 MgO 混凝土的推广应用,采用汞孔隙率法和扫描电子显微镜法对小尺寸压蒸试件的 MgO 水泥基材料(水泥砂浆和一级配混凝土砂浆)的微观结构进行了研究。结果表明:随着试件尺寸的变化,MgO 水泥基材料的平均孔径由大到小的排序为微试件、小试件、标准试件;无害孔和少害孔占比由大到小的排序为标准试件、小试件、微试件;MgO 掺量相同时,随着粉煤灰掺量的增大,与小试件和微试件相比,标准试件的平均孔径最小,而无害孔和少害孔占比最大。

关键词:MgO 水泥基材料;微观结构;小尺寸压蒸试件;粉煤灰

中图分类号:TV431

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0060-05

Study on microstructure of MgO cement-based materials in small-size autoclave-treated specimen//LI Weiwei, SONG Ziyu, ZHAO Zhenhua, LU Wei, XU Zaixian(*School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China*)

Abstract: In order to promote the application of MgO concrete, the microstructure of MgO cement-based materials (cement mortar and one-grade concrete mortar) of small-size autoclave-treated specimens was investigated using mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscopy. The results show that with the change in specimen size, the average pore diameter of MgO cement-based materials of micro specimens is the largest, followed by small specimens and standard specimens. The proportion of harmless and less harmful pores of standard specimens is the largest, followed by small specimens and micro specimens. With the same amount of MgO, as the amount of fly ash increases, the standard specimens have the smallest average pore diameter and the highest proportion of harmless and less harmful pores compared to small and micro specimens.

Key words: MgO cement-based materials; microstructure; small-size autoclave-treated specimen; fly ash

氧化镁(MgO)混凝土筑坝技术既能防止大坝开裂,又能简化温控措施,有助于实现通仓连续浇筑和全天候快速施工,从根本上改变了混凝土坝的施工面貌^[1]。Mehta 等^[2]曾设想将 MgO 作为膨胀剂掺入到大体积混凝土中,利用其水化产生的膨胀来补偿大体积混凝土的温降收缩,但未曾应用于实际工程。在 MgO 混凝土筑坝技术的研究和应用历程中,外掺 MgO 混凝土的安定性一直是研究人员和工程界关注的焦点。因压蒸试验中的高温高压条件能够使 MgO 完全水化膨胀,因此,压蒸法是评价外掺 MgO 混凝土体积安定性的唯一鉴定方法,其核心是采用何种试件来检验外掺 MgO 混凝土的体积安定性,然后设法提高基体的强度^[3]。陈昌礼等^[4,6]采用石粉模拟法和砂子模拟法成型压蒸试件来确定 MgO 的安定掺量;李承木等^[7]采用一级配混凝土作为压蒸试件来确定混凝土中 MgO 的安定掺量。这

些研究成果对于探索采用何种外掺 MgO 水泥基材料作为压蒸试件更为科学合理意义重大。陈荣妃等^[8]研究了不同尺寸的外掺 MgO 水泥净浆试件的压蒸膨胀率;李维维等^[9]研究了外掺 MgO 水泥净浆和砂浆小尺寸试件的压蒸膨胀变形;李万军等^[3]研究了外掺 MgO 水泥净浆、砂浆和混凝土 3 类不同试件尺寸对压蒸膨胀率的影响及规律。这些研究成果对优选压蒸试件的合理尺寸具有重要意义。本文基于李维维等^[9]的研究成果,采用汞孔隙率法(mercury intrusion porosimetry, MIP)和扫描电子显微镜法(scanning electron microscopy, SEM)对小尺寸压蒸试件的 MgO 水泥基材料(水泥砂浆和一级配混凝土砂浆)的微观结构进行研究,以期揭示小尺寸压蒸试件对外掺 MgO 水泥基材料微观结构的影响规律,为外掺 MgO 混凝土压蒸安定性检测优选压蒸试件提供参考。

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y251)

作者简介:李维维(1980—),女,副教授,硕士,主要从事混凝土材料及其结构研究。E-mail:ghtliweiwei@163.com

1 试验设计

1.1 原材料

a. 水泥:贵州水城拉法基 P · O 42.5 水泥,技术指标符合国家标准。其 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、SO₃、Na₂O、K₂O、f-CaO 的质量分数分别为 59.91%、20.25%、6.23%、3.74%、2.04%、2.69%、0.22%、0.39%、0.11%,烧失量为 3.90%,密度为 3.08 g/m³,比表面积为 319 m²/kg,标准稠度用水量为 26.2%,初凝时间和终凝时间分别为 200 min 和 324 min,安定性合格,3 d 和 28 d 抗折强度分别为 5.1 MPa 和 8.6 MPa,3 d 和 28 d 抗压强度分别为 23.0 MPa 和 49.6 MPa。

b. 粉煤灰:贵州野马寨发电厂所产,达到Ⅱ级粉煤灰国家标准。其 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、SO₃ 的质量分数分别为 49.48%、20.21%、15.32%、3.12%、2.30%、0.38%,密度为 2.44 g/m³,烧失量为 3.58%,细度为 15.7%,需水量比为 100.4%。

c. MgO:辽宁省海城市东方滑镁公司生产。其 MgO、SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃、SO₃ 的质量分数分别为 90.58%、1.58%、1.17%、0.30%、0.35%、0.23%,密度为 3.23 g/m³,烧失量为 3.56%,细度为 200 目,活性指数为 251s。

d. 骨料:贵州某水电站工地破碎的石灰岩人工砂,干燥状态视密度为 2.670 g/cm³,吸水率为 2.20%,石粉含量为 17.55%,细度模数为 2.78,颗粒级配属于Ⅱ区,级配良好,其品质满足水工混凝土用细骨料的质量要求。

e. 外加剂:奈系高效减水剂,其品质符合现行规范要求。

1.2 试验配合比和试验方法

1.2.1 试验配合比

拌制外掺 MgO 水泥基材料压蒸试件时,以贵州某水电站坝体三级配混凝土的实际配合比(即水胶比 0.58,单位水、胶凝材料、砂、小石、中石、大石用量分别为 134、230、702.4、409.1、409.1、545.4 kg/m³)为基准进行调整。成型水泥砂浆试件时,保持水胶比和胶砂比不变,去掉粗骨料(即水胶比 0.58,单位水、胶凝材料、砂用量分别为 134、230、702.4 kg/m³),粉煤灰掺量分别为 0、20%、40%(质量分数);成型一级配混凝土砂浆试件时,在保持水胶比和胶砂比不变的同时,去掉中石和大石,将小石用细粒段砂(粒径 0.15~1.18 mm)等量代替,未掺入粉煤灰(即水胶比 0.58,单位水、胶凝材料、砂、细粒砂用量分别为 134、230、702.4、409.1 kg/m³,粉煤灰掺量为 0)。其中 MgO 的外掺量按占胶凝材料

(水泥+粉煤灰)用量的百分比计。试验时通过调整外加剂的掺量使拌和物达到大致相同的流动度。

1.2.2 试验方法

试验标准试件采用 GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》规定的尺寸 25 mm×25 mm×280 mm,小试件尺寸为 25 mm×25 mm×146 mm,微试件尺寸为 25 mm×25 mm×76 mm,本文将小试件和微试件统称为小尺寸试件。压蒸试验参照 GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》的规定进行。压蒸试验后的试件,经终止水化处理和制样,采用 MIP 和 SEM 分别进行试样的孔隙结构检测和微观形貌观测。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

吴中伟等^[10]按照孔径对混凝土强度的不同影响,将混凝土中的孔分为无害孔(孔径小于 20 nm)、少害孔(孔径为 20~100 nm)、有害孔(孔径为 100~200 nm)和多害孔(孔径大于 200 nm)。不同尺寸试件的 MgO 水泥砂浆和一级配混凝土砂浆的孔隙结构参数、MgO 极限掺量及压蒸抗压强度分别见表 1 和表 2。

2.2 结果分析

2.2.1 试件尺寸对 MgO 水泥砂浆和一级配混凝土微观结构的影响

图 1 和图 2 分别为试件尺寸对 MgO 水泥砂浆和一级配混凝土平均孔径及无害孔和少害孔的影响。从表 1、表 2、图 1、图 2 可以看出,无论是水泥砂浆试件,还是一级配混凝土砂浆试件,也不管是否掺入粉煤灰以及粉煤灰掺多掺少,试件尺寸对外掺 MgO 水泥基材料的微观结构都有重要影响。标准试件、小试件、微试件的孔隙率变化虽不明显,但是,除了水泥砂浆试件中粉煤灰掺量为 20%时平均孔径从大到小依次为小试件、标准试件、微试件以外(图 1(b)),未掺粉煤灰和粉煤灰掺量为 40%的水泥砂浆试件、一级配混凝土砂浆试件,其平均孔径从大到小的排序均为微试件、小试件、标准试件。同时,无论是水泥砂浆试件还是一级配混凝土砂浆试件,其无害孔和少害孔占比从小到大的排序均为微试件、小试件、标准试件。这说明,压蒸试件的尺寸越小、平均孔径越大,无害孔和少害孔占比越小。如 MgO 掺量为 8%、粉煤灰掺量为 40%的水泥砂浆试件,标准试件、小试件、微试件的平均孔径分别为 21.3、23.6、24.8 nm,无害孔和少害孔占比分别为 90.30%、88.79%、86.20%。这种试验现象的出现估计是因为试件尺寸越小,其压蒸膨胀率越大^[9],导

表 1 MgO 水泥砂浆试件的孔隙结构参数、MgO 极限掺量及压蒸抗压强度

粉煤灰 掺量/%	试件类型	MgO 掺量/%	孔隙率/%	平均孔径/nm	不同孔径的孔占比/%			MgO 极限 掺量/%	压蒸抗压 强度/MPa
					<20 nm	20~100 nm	>100 nm		
0	标准试件	0	22.87	32.8	18.93	40.02	41.05	5.5	26.2
		4	22.63	31.6	20.04	41.66	38.30	5.5	28.5
		6	24.54	34.3	16.15	38.68	45.17	5.5	18.4
	小试件	0	20.02	34.1	16.59	40.33	43.08	5.3	25.6
		4	20.37	32.4	21.79	37.74	40.47	5.3	27.5
		6	22.03	35.0	19.59	32.97	47.44	5.3	17.3
	微试件	0	19.31	36.8	15.87	38.44	45.69	5.2	25.0
		4	20.07	35.9	23.24	34.12	42.64	5.2	26.7
		6	21.24	38.2	16.20	34.06	49.74	5.2	16.1
20	标准试件	0	23.04	30.6	20.15	57.67	22.18	7.2	28.1
		6	22.66	27.5	20.82	64.80	14.38	7.2	32.8
		8	24.94	32.7	19.08	55.23	25.69	7.2	20.3
	小试件	0	23.84	31.9	21.51	55.36	23.13	6.9	27.0
		6	23.64	29.0	20.93	61.21	17.86	6.9	29.3
		8	24.39	33.8	24.89	48.76	26.35	6.9	18.7
	微试件	0	20.77	29.5	21.75	52.89	25.36	6.8	26.6
		6	20.65	25.9	25.12	54.76	20.12	6.8	28.1
		8	24.01	31.3	20.91	50.52	28.57	6.8	17.4
40	标准试件	0	21.86	25.1	32.65	55.98	11.37	9.3	31.3
		8	20.94	21.3	34.11	56.19	9.70	9.3	35.3
		10	22.20	28.7	28.72	55.34	15.94	9.3	23.1
	小试件	0	22.93	25.7	26.67	59.12	14.21	9.0	28.1
		8	23.24	23.6	28.63	60.16	11.21	9.0	31.5
		10	23.94	30.2	24.91	56.13	18.96	9.0	21.4
	微试件	0	23.10	26.3	27.43	52.79	19.78	8.8	26.8
		8	22.62	24.8	26.78	59.42	13.80	8.8	28.5
		10	25.24	31.4	20.94	54.72	24.34	8.8	17.9

表 2 MgO 一级配混凝土砂浆试件的孔隙结构参数、MgO 极限掺量及压蒸抗压强度

试件类型	MgO 掺量/%	孔隙率/%	平均孔径/nm	不同孔径的孔占比/%			MgO 极限掺量/%	压蒸抗压强度/MPa
				<20 mm	20~100 mm	>100 mm		
标准试件	0	20.10	28.00	24.06	50.69	25.25	7.6	25.8
	7	19.99	26.10	25.65	54.79	19.56	7.6	27.4
	9	22.77	30.70	21.84	44.47	33.69	7.6	16.5
小试件	0	19.96	29.40	25.33	47.89	26.78	7.2	21.7
	7	19.49	27.30	28.84	50.19	20.97	7.2	26.9
	9	20.74	31.60	26.07	39.34	34.59	7.2	15.9
微试件	0	18.65	29.80	26.82	44.32	28.86	6.9	19.8
	7	18.18	27.60	30.01	46.51	23.48	6.9	25.2
	9	20.90	32.10	26.11	38.84	35.05	6.9	15.9

致试件内部结构越疏松,内聚力越小,微观结构劣化。李万军等^[3]认为,试件尺寸越大,材料的均匀分散程度越高,这估计也是导致标准试件的平均孔径比小试件和微试件小、无害孔和少害孔占比比小试件和微试件大的原因之一。

2.2.2 粉煤灰对小尺寸试件微观结构的影响

图 3 为粉煤灰掺量对 MgO 水泥砂浆孔结构的影响。从表 1 和图 3 可以看出,对于 MgO 水泥砂浆试件,无论是标准试件、小试件,还是微试件,与未掺粉煤灰的试件相比,掺入粉煤灰后的试件孔隙率或增加或减小,但是,试件的平均孔径明显减小,无害孔和少害孔占比明显增大,试件压蒸抗压强度显著

提高。且随着粉煤灰掺量的增大,这种变化趋势越明显。如 MgO 掺量为 0 的标准试件,与未掺粉煤灰相比,掺 20%和 40%粉煤灰时,试件的平均孔径分别减小了 6.7%和 23.5%,无害孔和少害孔占比分别增大了 18.87%和 29.68%。说明粉煤灰的掺入,可能使试件的孔隙率有所增大,但增大的部分多集中在无害孔和少害孔的部分。这充分反映出粉煤灰细化孔隙的作用,使得 MgO 水泥基试件的微观结构得以改善。同时,MgO 掺量相同时,除了粉煤灰掺量为 20%时平均孔径从大到小的排序依次是小试件、标准试件、微试件以外(图 3(a)),未掺粉煤灰和粉煤灰掺量为 40%的小尺寸试件平均孔径从

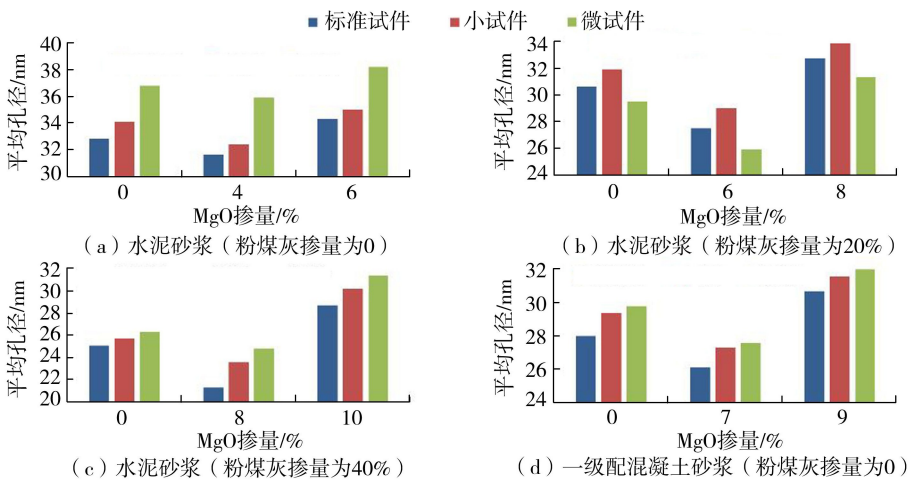


图1 试件尺寸对 MgO 水泥砂浆和一级配混凝土平均孔径的影响

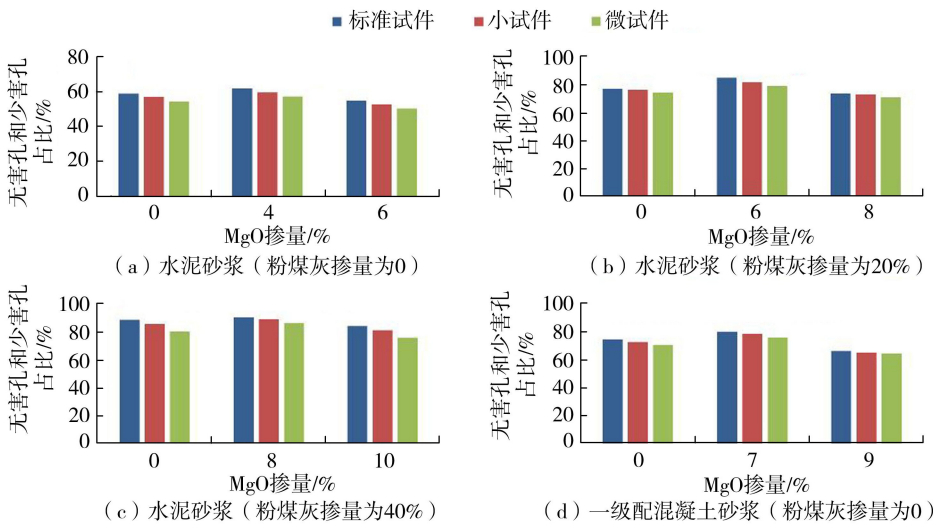


图2 试件尺寸对 MgO 水泥砂浆和一级配混凝土无害孔和少害孔占比的影响

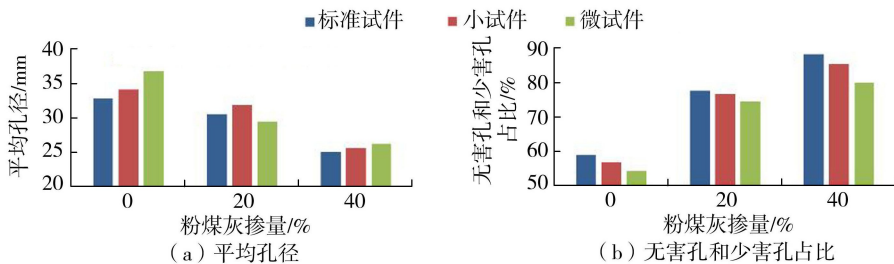


图3 粉煤灰掺量对 MgO 水泥砂浆孔结构的影响

大到小的排序均是微试件、小试件、标准试件；其无害孔和少害孔占比从小到大的排序都是微试件、小试件、标准试件。如 MgO 掺量为 0、粉煤灰掺量为 40% 的水泥砂浆试件，标准试件、小试件、微试件的平均孔径分别为 25.1、25.7、26.3 nm；无害孔和少害孔占比分别为 88.63%、85.79%、80.22%。当 MgO 和粉煤灰掺量相同时，试件的压蒸抗压强度从大到小依次为标准试件、小试件、微试件。表明试件尺寸越大，其内部结构越密实，微结构越优化，试件的平均孔径越小，无害孔和少害孔占比越大。同理，试件尺寸越大，粉煤灰的分散程度也更高，分布也更均

匀，更有利于细化孔隙、改善试件的微结构，从而使得试件的平均孔径更小，无害孔和少害孔增多。李万军等^[3]研究表明，压蒸试件的组成材料越均匀越好，这是选择试件的基本原则。由此可见，以标准试件作为压蒸试件优于小试件和微试件。

同时，无论是标准试件、小试件，还是微试件，与未掺 MgO 和粉煤灰时相比，双掺 MgO 和粉煤灰后，试件的孔隙率变化不明显，而平均孔径随着 MgO 和粉煤灰掺量的增大呈减小趋势，无害孔和少害孔占比呈增大趋势。以标准试件为例，未掺 MgO 和粉煤灰时，其孔隙率为 22.87%，平均孔径为 32.8 nm，无

害孔和少害孔占比为 58.95%;MgO 掺量为 6%、粉煤灰掺量为 20%时,其孔隙率为 22.66%,平均孔径为 27.5 nm,无害孔和少害孔占比为 85.62%;MgO 掺量为 8%、粉煤灰掺量为 40%时,其孔隙率为 20.94%,平均孔径为 21.3 nm,无害孔和少害孔占比为 90.30%。这说明,同时掺入 MgO 和粉煤灰,试件的孔结构明显改善,内部结构更加紧密(图 4)。尤其是 MgO 掺量为 6%、粉煤灰掺量为 20%时,与未掺 MgO 和粉煤灰时相比,试件的平均孔径减小幅度较小,但无害孔和少害孔占比显著增大。李维维等^[11]研究表明,混凝土中掺入适量 MgO,能有效改善试体的微结构,细化孔隙。而粉煤灰因其独特的形态效应、活性效应和微集料效应^[12],使得试件孔结构得到显著改善。因此,双掺 MgO 和粉煤灰后,因为 MgO 和粉煤灰的双重作用,试件的微观结构明显得到优化,这对 MgO 膨胀材料在掺入粉煤灰的水工混凝土工程中的应用极为有利。

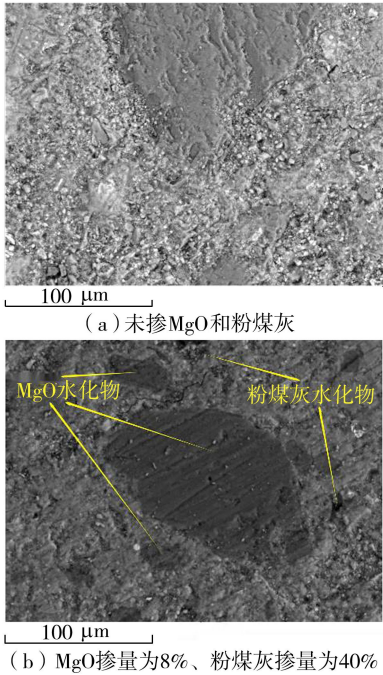


图 4 未参与双掺 MgO 和粉煤灰标准试件的 SEM 图像

当 MgO 水泥砂浆试件中粉煤灰掺量为 20%时,试件平均孔径的变化规律与粉煤灰掺量为 0 和 40%以及一级配混凝土砂浆试件有所不同(图 1(b)和图 3(a))。出现这种试验现象的原因有待进一步研究。

3 结 论

a. 无论是水泥砂浆试件,还是一级配混凝土试件,也不管是否掺入粉煤灰以及粉煤灰掺多掺少,随着试件尺寸的变化,MgO 水泥基材料的平均孔径从大到小的排序均为微试件、小试件、标准试件;其无

害孔和少害孔占比从小到大的排序均为微试件、小试件、标准试件。由此可见,压蒸试件的尺寸越大,其平均孔径越小,无害孔和少害孔占比越大。

b. 对于 MgO 水泥砂浆试件,无论是标准试件、小试件,还是微试件,与未掺粉煤灰的试件相比,掺入粉煤灰后的试件孔隙率或增加或减小。但是,试件的平均孔径明显减小,无害孔和少害孔占比明显增大,试件压蒸抗压强度显著提高。同时,MgO 掺量相同时,随着粉煤灰掺量的增大,与小试件和微试件相比,标准试件的平均孔径最小,其无害孔和少害孔占比最大。

c. 基于本试验的原材料和试验结果并结合李维维等^[9]的研究成果可以得出,选择 GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》中规定的标准试件尺寸 25 mm×25 mm×280 mm 作为压蒸试件是比较科学合理的。

参考文献:

[1] 曹泽生,徐锦华. 氧化镁混凝土筑坝技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003.

[2] MEHTA P K, PIRTZ D. Magnesium oxide additive for producing selfstress in mass concrete [C]//The 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris: Septima,1980:6-9.

[3] 李万军,李晓勇,陈学茂,等. 外掺 MgO 混凝土压蒸安定性试验方法的探讨[J]. 水电站设计,2010,26(1): 67-71. (LI Wanjun, LI Xiaoyong, CHEN Xuemao, et al. Probing into admixed MgO concrete autoclave soundness test method [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2010,26(1):67-71. (in Chinese))

[4] 陈昌礼,方坤河. 外掺氧化镁混凝土安定性模拟试验方法的研究[J]. 水力发电学报,2012,31(5):241-244. (CHEN Changli, FANG Kunhe. Study on simulation test method for invariability of concrete with light-burned magnesium oxide [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(5):241-244. (in Chinese))

[5] 陈昌礼,赵其兴,李维维,等. 高掺氧化镁混凝土在某水电站拱坝工程中的应用[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6): 64-68. (CHEN Changli, ZHAO Qixing, LI Weiwei, et al. Application of concrete with high content of MgO in arch dam of hydropower station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (6):64-68. (in Chinese))

[6] CHEN Changli, LI Weiwei, YANG Dongsheng, et al. Study on autoclave expansion deformation of MgO-admixed cement-based materials [J]. Emerging Materials Research,2017,6(2):422-428.

(下转第 79 页)

参考文献:

[1] 林敦志. 闸门振动现象及振动特性分析[J]. 科技资讯, 2010,8(16):116. (LIN Dunzhi. Analysis of gate vibration phenomenon and vibration characteristics[J]. Science & Technology Information,2010,8(16):116. (in Chinese))

[2] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. (PENG Sixian,ZHAO Lanhao,MAO Jia,et al. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):90-96. (in Chinese))

[3] 刘计良,奚宏林,司政,等. 基于流固耦合的弧形闸门-闸墩体系的流激振动研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023,34(5):149-154. (LIU Jiliang, XI Honglin, SI Zheng,et al. Flow induced vibration of radial gate-pier system based on fluid-structure coupling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023,34(5):149-154. (in Chinese))

[4] 阮颖颖. 翻板闸门流激振动模型试验及优化设计[J]. 黑龙江水利科技, 2023,51(4):96-99. (RUAN Yingying. Model test and optimization design of flow-induced vibration of flap gate[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2023,51(4):96-99. (in Chinese))

[5] 居荣初,曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论 [M]. 北京:地震出版社,1983.

[6] 严根华,董家,孙云茜. 上翻式拱形闸门的流激振动控制及原型观测验证[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):55-61. (YAN Genhua,DONG Jia,SUN Yunxi. Flow-induced vibration control and prototype measurement verification of large upwelling arch gate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(5):55-61. (in Chinese))

[7] 赵兰浩,李同春,汪凌. 水工闸门流激振动响应的一种

(上接第 64 页)

[7] 李承木,陈学茂,李晓勇. 关于外掺 MgO 混凝土压蒸安定性试验的几个问题[J]. 广东水利水电,2009(6):1-4. (LI Chengmu, CHEN Xuemao, LI Xiaoyong. Some problems related to autoclave stability test of concrete mixed magnesia [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2009(6):1-4. (in Chinese))

[8] 陈荣妃,陈昌礼. 试件尺寸对外掺 MgO 水泥净浆压蒸膨胀变形的影响[J]. 混凝土,2014(3):7-10. (CHEN Rongfei,CHEN Changli. Dimensional effect on deformation of autoclave expansion in cement paste maxed with magnesium oxide[J]. Concrete,2014(3):7-10. (in Chinese))

[9] 李维维,陈昌礼,李良川,等. 外掺 MgO 水泥净浆和砂浆小尺寸试件的压蒸膨胀变形[J]. 材料科学与工程学

计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):404-408. (ZHAO Lanhao,LI Tongchun,WANG Ling. A computation method for flow-induced vibration response of gates [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(4):404-408. (in Chinese))

[8] 王雨苗,路观平,张法宝. 水流脉动压力的谱特性及相干尺度[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),1998,21(5):71-76. (WANG Yumiao, LU Guanping, ZHANG Fabao. The spectrum character and coherence scale of fluctuation pressure in water flow [J]. Journal of Hefei University of Technology, 1998,21(5):71-76. (in Chinese))

[9] 庄表中,王衍新. 随机振动概论[M]. 北京:地震出版社,1982.

[10] 纽兰. 随机振动与谱分析概论[M]. 方同,译. 北京:机械工业出版社,1980.

[11] 苏圣致,杨春霞,饶天华,等. 不同开度下某闸门流激振动数值模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(9):148-155. (SU Shengzhi, YANG Chunxia, RAO Tianhua, et al. Numerical simulation of flow-induced vibration of a gate with different opening degrees [J]. Water Resources and Hydropower Technology (Chinese and English),2023,54(9):148-155. (in Chinese))

[12] 郭博文,高玉琴,范冰,等. 基于 LES 的水工钢闸门流激振动数值模拟研究[J]. 人民黄河,2024,46(3):126-131. (GUO Bowen, GAO Yuqin, FAN Bing, et al. Numerical simulation of flow-induced vibration of hydraulic steel gate based on LES [J]. Yellow River, 2019,46(3):126-131. (in Chinese))

[13] 王文强,王雪岩,李超. 某项目泄洪闸工作闸门流激振动试验研究[J]. 内蒙古水利,2024(4):15-17. (WANG Wenqiang, WANG Xueyan, LI Chao. Experimental study on flow-induced vibration of working sluice gate of a project [J]. Inner Mongolia Ancient Water Conservancy, 2024(4):15-17. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-18 编辑:俞云利)

报,2016,34(1):160-165. (LI Weiwei,CHEN Changli, LI Liangchuan, et al. Autoclave-treated expansibility of small dimension specimens of cement paste and mortar with magnesium oxide[J]. Journal of Materials Science & Engineering,2016,34(1):160-165. (in Chinese))

[10] 吴中伟,廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.

[11] 李维维,陈昌礼,雷平,等. 外掺 MgO 水泥基材料的微观结构研究[J]. 功能材料,2017,47(2):2166-2171. (LI Weiwei, CHEN Changli, LEI Ping, et al. Study on microstructure of MgO cement-based materials[J]. Journal of Functional Materials,2017,47(2):2166-2171.

[12] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1989.

(收稿日期:2023-09-29 编辑:俞云利)