

急冷镁渣水泥胶凝材料的性能

嵇 鹰^{1,2}, 李亚芳¹, 杨 康^{1,2}, 武艳文¹

(1. 西安建筑科技大学材料与矿资学院 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘要: 采用不同掺量的急冷镁渣与水泥制备出胶凝材料, 通过物理性能检测, 膨胀量测量, XRD, SEM, 压汞检测等试验手段对胶凝材料的物化性能对比分析后得出: 随着急冷镁渣掺量的减少, 胶凝材料的强度增加, 水化程度增高; 养护至 28 d 后, 不同镁渣掺量的胶凝材料均呈现出孔隙率减小, 密实度增加的现象, 养护至 200 d 后, 镁渣掺量为 30% 的胶凝材料收缩行为没有得到很好的改善, 掺量增加至 40% 的胶凝材料收缩行为被完全抵消了, 并且胶凝材料最终处于一种微膨胀状态, 继续将镁渣掺量增加到 50% 时, 胶凝材料表现出很大的膨胀行为, 并且掺 50% 急冷镁渣的胶凝材料压蒸安定性不合格。

关键词: 急冷镁渣; 密实度; 膨胀性能; 安定性

中图分类号: TU525

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0277-07

Properties of quenching magnesium slag cement cementitious materials

Ji Ying^{1,2}, Li Yafang¹, Yang Kang^{1,2}, Wu Yanwen¹

(1. College of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Cementitious material was prepared by mixing cement with different amount of quenching magnesium slag; Its physical and chemical properties were then identified with XRD, SEM, mercury injection and expansion measurement. It was found that in comparison, such cementitious materials strength increased with the reduction amount of quenching magnesium slag, so does its degree of hydration. After curing for 28 d, the cementitious materials (varying in the amount of added magnesium slag) all showed increases in density and decreases in porosity. After curing for 200 d, the shrinkage behavior of cementitious materials has not been improved when the magnesium slag content was 30%. However, such shrinkage behavior was completely offset when the content of magnesium slag was up to 40%, and then into a slightly expanded state; the cementitious material showed great expansion behavior when the content of magnesium slag was up to 50%, and failed in the pressure steam stability measurement.

Key words: quenching magnesium slag; compactness; expansion properties; stability

镁渣是金属镁厂在炼镁过程中排放的固体废弃物。目前镁渣的主要应用集中在以下几个方面: (1) 镁渣替代石灰石配料烧制硅酸盐水泥熟料^[1-2]; (2) 镁渣作水泥混合材^[3-4]; (3) 利用镁渣生产新型墙体材料^[5-6]。但是将镁渣作为胶凝材料的研究并不多。研究表明^[7-8]: 对出炉镁渣采取快速冷却, 可提高镁渣自身的活性, 同时降低镁渣中 MgO 的晶粒尺寸, 从而加速了镁渣中 MgO 的水化, 使得镁渣早期膨胀程度增加, 后期膨胀程度减弱。由此可知: 若采用冷却设备制备出急冷镁渣, 并和

水泥料以一个合适的比例混合使用, 是有可能做到利用镁渣的自身膨胀来抵消水泥基胶凝材料的自身收缩行为^[9], 这不仅使得镁渣能够得以利用, 同时还能改善胶凝材料的自收缩危害。因此, 采用将急冷镁渣与水泥以三种不同比例混合后置于球磨机中粉磨磨细(先混后磨工艺), 制备出不同比例的急冷镁渣水泥胶凝材料^[10], 并通过物理性能检测, 膨胀量测量, XRD, SEM, 压汞等方法对胶凝材料的物化性能进行对比研究, 旨在找出一个适合的比例, 在这个比例下急冷镁渣与水泥

收稿日期: 2016-12-29

修改稿日期: 2017-03-24

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划(2015JM5241)

作者简介: 嵇鹰(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事固体废弃物的资源化利用的研究。E-mail: jiyong01@ sina.com

混合后制备的胶凝材料在水化过程中能够达到一个膨胀与收缩能够相互抵消的状态,从而减弱了因水泥基胶凝材料自收缩带来的危害并解决了镁渣的利用问题。

1 实验

1.1 原材料

实验所用镁渣取自山西某镁厂,处理所用设备为自制小型冷却设备,经计算,此设备在 1 000 m³/h 的风量下,可使 2 kg 镁渣料在 2 min 内从 1 000 ℃降至 200 ℃,采用红外线测温仪跟进测定温度,本实验采取将出炉镁渣立刻置于冷却设备中,通风使其温度在 4 min 内降至 200 ℃下,将在此环境下制备的镁渣称为急冷镁渣,其化学成分分析见表 1。

表 1 镁渣化学成分

Tab. 1 Magnesium slag chemical composition /%

LOSS	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Σ
0.80	55.68	27.62	8.903	3.563	0.992	0.039	97.597

1.2 实验主要使用仪器

SYMΦ500×500 球磨机, Fluke 572 (−30 ~ 900 ℃) 红外线测温仪, YAW-300 全自动压力试验机, YH-40B 标准恒温恒湿养护箱, DBT-27 勃式透气比表面积仪, NJ-160A 水泥净浆搅拌机, BC 156-300 型比长仪, S4-PIONEER X 射线荧光仪, D/MAX 2200 X 射线衍射仪, Quanta 200 扫描电镜, Autopore IV 9500 压汞仪及自制冷却设备自制等。

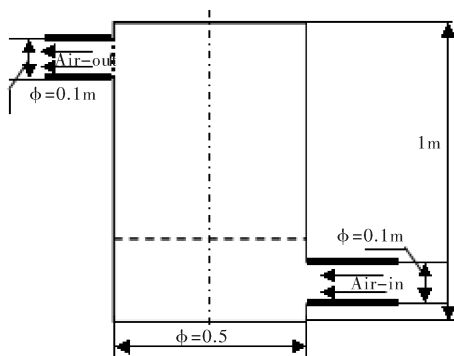


图 1 冷却设备规格尺寸

Fig. 1 Size of cooling equipment

1.3 实验方法

荧光分析原料的化学组成,采用抗压、抗折、膨胀性分析检测胶凝材料的物理性能,压蒸釜实验检测胶凝材料的安定性,SEM 分析胶凝材料的

微观结构,XRD 分析胶凝材料的矿物组成,压汞分析胶凝材料的孔隙特征。

2 实验方法、结果与讨论

(1)采用 30% 镁渣+70% 水泥混合(以下简称“掺 30% 镁渣料”);

(2)采用 40% 镁渣+60% 水泥混合(以下简称“掺 40% 镁渣料”);

(3)采用 50% 镁渣+50% 水泥混合(以下简称“掺 50% 镁渣料”);

2.1 镁渣水泥胶凝材料的物理性能研究

对不同镁渣掺量的胶凝材料分别根据 GB/T 1346-2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行试验后,采用标准稠度用水量制备出 40 mm×40 mm×160 mm 镁渣水泥砂浆标准试块,并置于温度 20 ℃,湿度 95% 的标准恒温恒湿养护箱中连续养护至规定龄期,胶凝材料砂浆试块的强度测定根据 GB/T17671-1999《水泥胶砂强度检验方法》进行,测定结果见图 2。

图 2 由两幅图组成,(a)为不同镁渣掺量的胶凝材料水化时间与抗折强度关系图,(b)为不同镁渣掺量的胶凝材料水化时间与抗压强度关系图,分析(a)图发现^[11-12],掺入镁渣的胶凝材料抗折强度较未掺镁渣的胶凝材料均有所减小,养护 3 d 后,胶凝材料的抗折强度随着镁渣掺量的增加呈下降趋势,掺 40% 镁渣料与掺 50% 镁渣料 3 d 抗折强度值基本一致,分别为 5.5 MPa 和 5.4 MPa,掺 30% 镁渣料 3 d 抗折强度最优,为 6.1 MPa,接近未掺镁渣的胶凝材料 3 d 抗折强度;养护 28 d 后,不同镁渣掺量的胶凝材料抗折强度均有大幅度增长,其中,掺 50% 镁渣料抗折强度增加到 7.0 MPa,增幅为 29.6%,掺 40% 镁渣料抗折强度为 7.1 MPa,增幅为 29.1%,掺 30% 镁渣料抗折强度为 7.3 MPa,增幅为 19.1%;分析(b)发现,未掺镁渣的胶凝材料抗压强度高于掺入镁渣的胶凝材料,养护 3 d 后,胶凝材料的抗压强度随着镁渣掺量的增加呈下降趋势,掺 30% 镁渣料 3 d 抗压强度最高,为 27 MPa,其次是掺 40% 镁渣料的 3 d 抗压强度,为 25 MPa,掺 50% 镁渣料 3 d 抗压强度最低,为 21 MPa;养护 28 d 后,掺 30% 镁渣料抗压强度为 53 MPa,较之 3 d,增加幅度为 96.3%,掺 40% 镁渣料抗压强度为 50 MPa,增幅为 100%,掺 50% 镁渣料 28 d 抗压强度为 42 MPa,增幅为 100%。

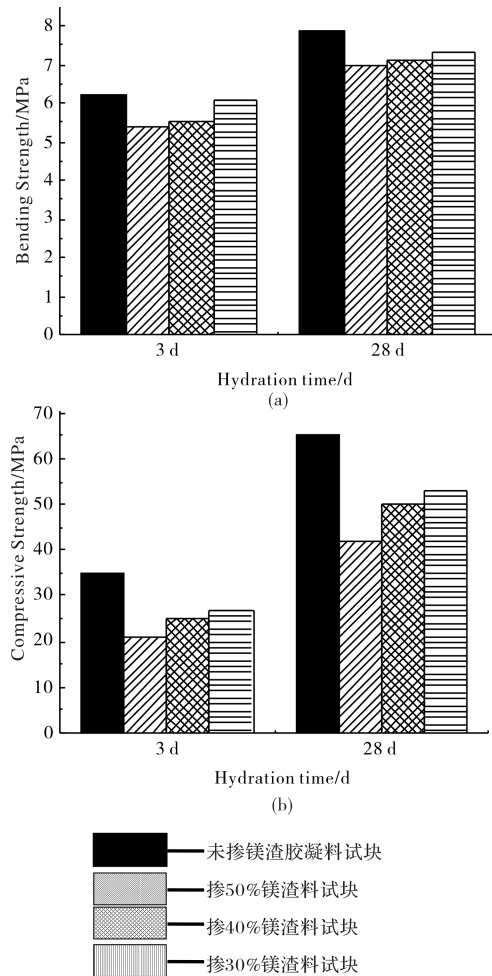


图2 三种镁渣掺量的胶凝材料抗压、抗折强度

Fig. 2 Compressive and flexural strength of cementitious materials with different magnesium slag content

2.2 镁渣水泥胶凝材料的膨胀性能及安定性研究

2.2.1 镁渣水泥胶凝材料的膨胀性能

将三种镁渣掺量的胶凝材料采用其标准稠度用水量制备 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ 三连模胶凝料膨胀试块, 并将试块置于温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度 95% 的养护箱中长期养护, 每隔 24 h 测量一次试块的长度, 养护共计 200 d , 用以研究三种比例的急冷镁渣水泥基胶凝材料的膨胀性能, 并将实验数据整理得到图 3。

图 3 中的 (a)、(b)、(c) 分别为掺 50% 、 40% 、 30% 镁渣的胶凝材料膨胀性能图, 观察三幅图不难看出: 镁渣掺量不同的胶凝材料的膨胀性能差别显著^[13]。图 3(c) 表明: 掺 30% 镁渣料在养护龄期内一直表现出负膨胀的情况, 养护 60 d 后, 其负膨胀率达到最大, 为 1.44% , 养护至 160 d 后, 负膨胀率减小至 1.08% , 继续养护至 200 d 后膨胀情况不再变化; 分析图 3(b) 发现, 掺 40% 镁渣料在养护龄期内先表现出负膨胀情况, 后表

现出正膨胀情况, 养护 15 d 后, 其负膨胀率达到最大, 为 0.71% , 养护至 140 d 后, 负膨胀率减小至 0% , 继续养护胶凝材料开始呈现正膨胀状态, 养护至 160 d 后, 胶凝材料的正膨胀率达到最大值 0.12% , 继续养护至 200 d 后膨胀情况不再改变; 当镁渣掺量增加到 50% 后, 胶凝材料先表现出负膨胀情况, 后变现出正膨胀情况, 且正负膨胀率之间的跨度很大, 在养护 20 d 后, 胶凝材料的负膨胀率达到最大值 0.69% , 养护至 140 d 后, 负膨胀率减小至 0% , 再继续养护胶凝材料开始呈现正膨胀状态, 养护至 160 d 膨胀率达到 0.35% , 再继续养护至 200 d 后胶凝材料依然存在膨胀的趋势。

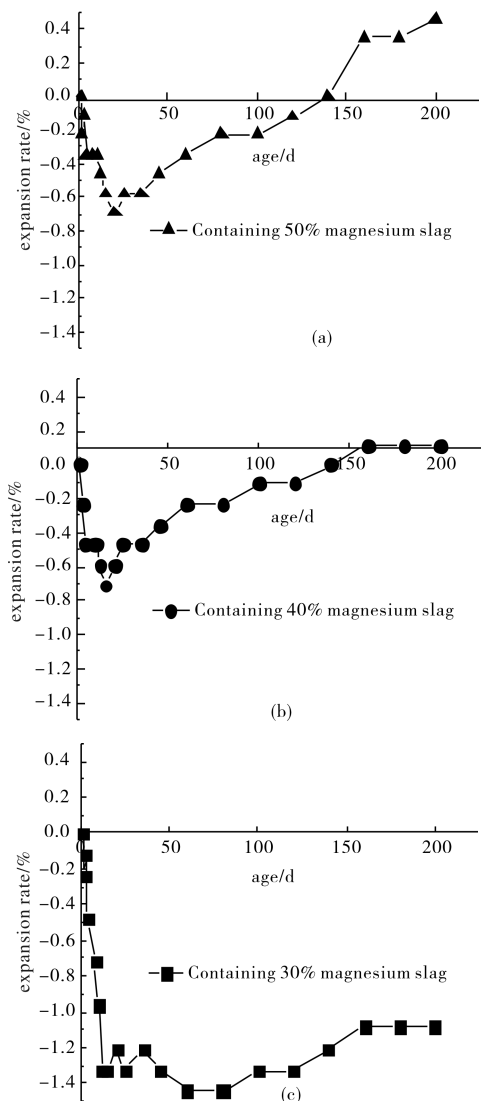


图3 三种镁渣掺量的胶凝材料膨胀性能

Fig. 3 Expansion properties of cementitious materials with three kinds of magnesium slag cement

2.2.2 镁渣水泥胶凝材料的安定性能

按照 GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》对三种镁渣掺量的胶凝材料采用其标准稠度用

水量制备 25 mm×25 mm×280 mm 三连模膨胀试块,并置于温度 20 ℃,湿度 95%的养护箱中养护 3~5 h 后,取出修正浆体面与模型边齐平,标上编号继续放入养护箱中养护 24 h 后脱模,沸煮按 GB/T1346-2001 要求进行,压蒸按 GB/T 750—1992 要求进行,检测结果见表 2。

表 2 三种镁渣掺量的胶凝材料安定性能

Tab. 2 Stability of cementitious material with three kinds of magnesium slag

镁渣 掺量/%	初始长度 L_0/mm	压蒸长度 L_1/mm	压蒸膨胀 率 $L_A/\%$	表面 裂缝	安 定性
50	8.67	10.24	0.63	有	不合格
40	8.45	8.88	0.17	无	合格
30	8.29	5.37	-1.17	有	合格

分析图 2 中数据得出:掺 30% 镁渣胶凝材料的压蒸膨胀率为 -1.17%,压蒸后试样表面无明显裂痕,安定性能合格;掺 40% 镁渣胶凝材料的压蒸膨胀率为 0.17%,试样表面无明显裂痕,安定性能合格;掺 50% 镁渣胶凝材料的压蒸安定性膨胀率为 0.63%,试样表面有明显裂痕,安定性能不合格。

2.3 镁渣水泥胶凝材料的矿物组成分析

对三种镁渣掺量的胶凝材料的养护 3 d、28 d 试样在同一参数条件下作 XRD 衍射图像,用于研究镁渣水泥基胶凝材料水化后的矿物组成,扫描范围为 5~80°,步长为 5°/min,结果见图 4(a)~(c)。

图 4 中的 (a)、(b)、(c) 分别为掺 50%、40%、30% 镁渣的胶凝材料水化 3 d、28 d 衍射图,分别对不同镁渣掺量的胶凝材料水化 3 d、28 d 的衍射图分析可得:水化 3 d 后,不同镁渣掺量的胶凝材料中均有水化物 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 出现,至水化 28 d 后,胶凝材料的衍射图中出现了衍射峰强度很高的 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [14],并且随着镁渣掺量的减少,水化产物 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰强度呈增大趋势,同时,由水化 3 d 到 28 d 后均可发现不同镁渣掺量的胶凝材料中的 C_2S 、 C_3S 含量减小迅速(衍射峰强度),并且在水化 3 d 的衍射图中我们可以观察到有 MgO 峰的出现,到了水化 28 d 后,图中几乎不存在 MgO 衍射强度。

2.4 镁渣水泥胶凝材料的 SEM 图像分析

为了从微观角度分析研究三种镁渣掺量胶凝

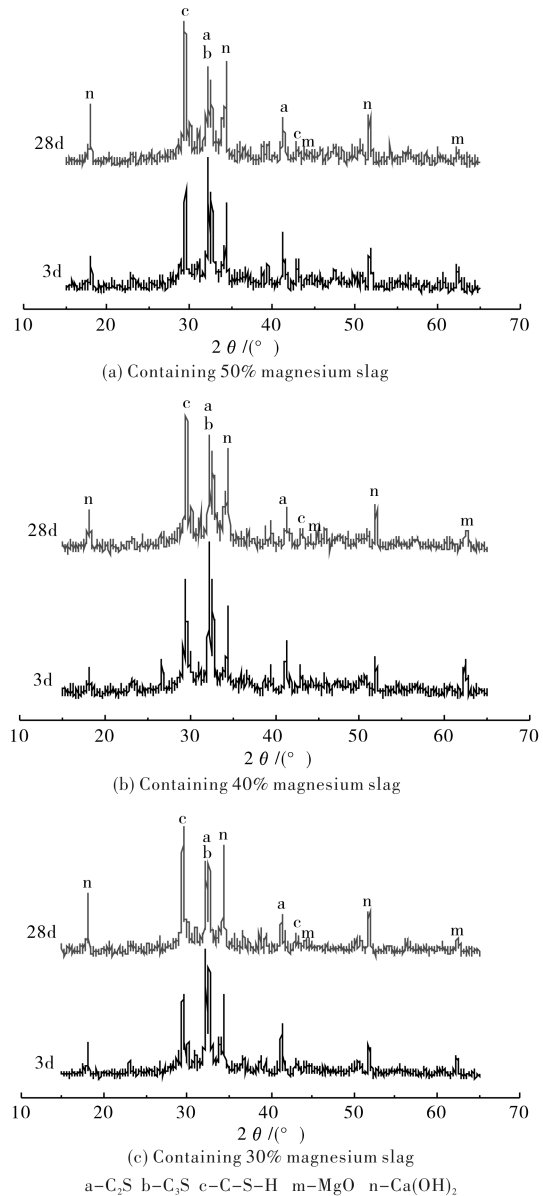


图 4 三种镁渣掺量的胶凝材料矿物组成分析

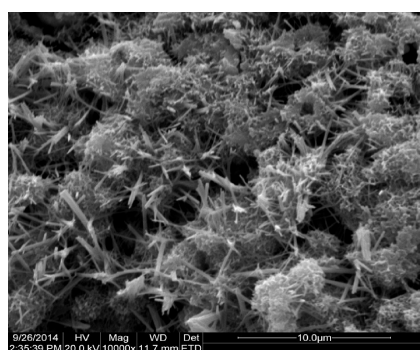
Fig. 4 Mineral composition analysis of cementitious materials with three kinds of magnesium slag content

材料的水化程度及微观结构,故将水化 3 d 样品喷金后置于扫描电镜下,在 10 000 倍下采用二次电子采集胶凝材料的微观形貌的信息,见图 5。

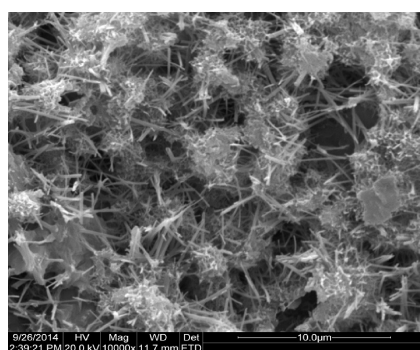
图 5 中的 (a)、(b)、(c) 图分别为掺 50%、40%、30% 镁渣的胶凝材料水化 3 d 后的电镜图,分析得出:不同镁渣掺量的胶凝材料水化 3 d 后均发现有大量纤维状的 C-S-H 凝胶生成,水化程度高,继续分析发现:不同镁渣掺量的胶凝材料水化 3 d 后内部密实度有差别,具体为掺 50% 镁渣料与掺 40% 镁渣料水化 3 d 后的内部密实度基本一致,但相比掺 30% 镁渣料密实度要偏低一些。

2.5 镁渣水泥胶凝材料的孔径尺寸分析

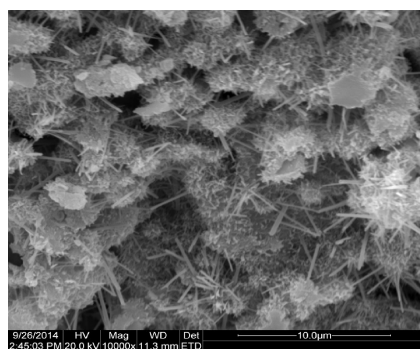
对三种镁渣掺量的胶凝材料采用标准稠度用水量制备砂浆标准试块,并置于温度 20℃,湿度 95% 的养护箱中进行养护至规定龄期后取出烘干,烘干后将试块制成 0.315~0.5 mm 样品,然后将样品置于压汞分析仪中检测,通过 origin 软件对分析结果中的孔径尺寸与进汞体积关系作图,并按照孔径尺寸的大小将胶凝材料的孔径尺寸分为 3 类,分别为小孔($\leq 10\ \mu\text{m}$),中孔($10\sim 50\ \mu\text{m}$)和大孔($\geq 50\ \mu\text{m}$)。结果见图 6。



(a) Containing 50% magnesium slag 3 d



(b) Containing 40% magnesium slag 3 d



(c) Containing 30% magnesium slag 3 d

图 5 三种镁渣掺量的胶凝材料微观结构分析

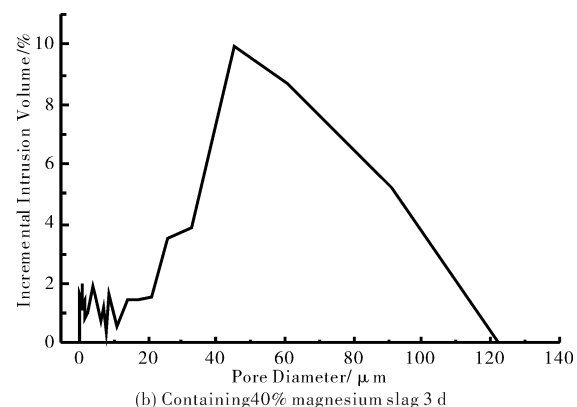
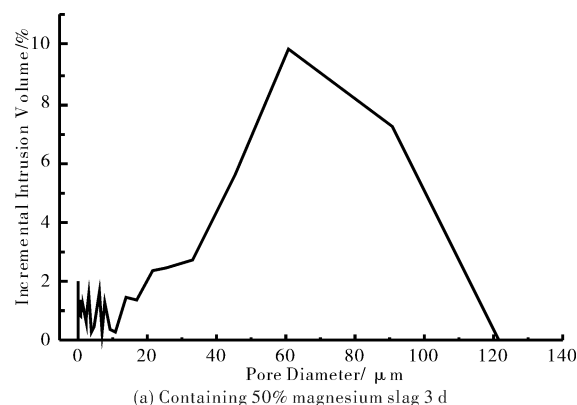
Fig. 5 Microstructural analysis of cementitious materials with three kinds of magnesium slag

图 6 中(a)、(b)、(c)分别为掺 50%、40%、30% 镁渣胶凝材料养护 3 d 后的孔径尺寸与进汞体积图,图中数据表明:三种镁渣掺量的胶凝材料

养护 3 d 后内部孔径尺寸变化范围在 0~120 μm 内,内部孔径尺寸以中孔、大孔居多,小孔所占体积小,并且随着镁渣掺量的减少,胶凝材料的最可几孔径尺寸呈下降趋势。

图(d)、(e)、(f)分别为掺 50%、40%、30% 镁渣胶凝材料养护 28 d 的孔径尺寸与进汞体积图,分别与同镁渣掺量的胶凝材料养护 3 d 样对比分析后得出:养护 28 d 后,不同镁渣掺量的胶凝材料内部孔径尺寸变化范围仍在 0~120 μm 内,但胶凝材料的内部孔径尺寸均大幅度减小,小孔所占体积显著增多,中孔,大孔体积大幅下降,其中,掺 40% 镁渣料养护至 28 d 后试样内部已几乎无中孔、大孔,小孔所占体积较养护 3 d 的增加量最大,其次是掺 30% 镁渣料,掺 50% 镁渣料养护至 28 d 后内部孔径尺寸也以小孔居多,但相比掺 30%、掺 40% 镁渣料来说,掺 50% 镁渣料养护至 28 d 后中孔,大孔所占体积更多一些。

通过对三种镁渣掺量的胶凝材料养护 3 d, 28 d 样的孔径尺寸与进汞体积关系图分析可以初步看出三种胶凝材料内部的密实情况,为了更加方便具体的研究镁渣掺量的改变对胶凝材料水化样内部孔结构的影响,故将压汞检测所得数据进行分类整理后得到表 3。



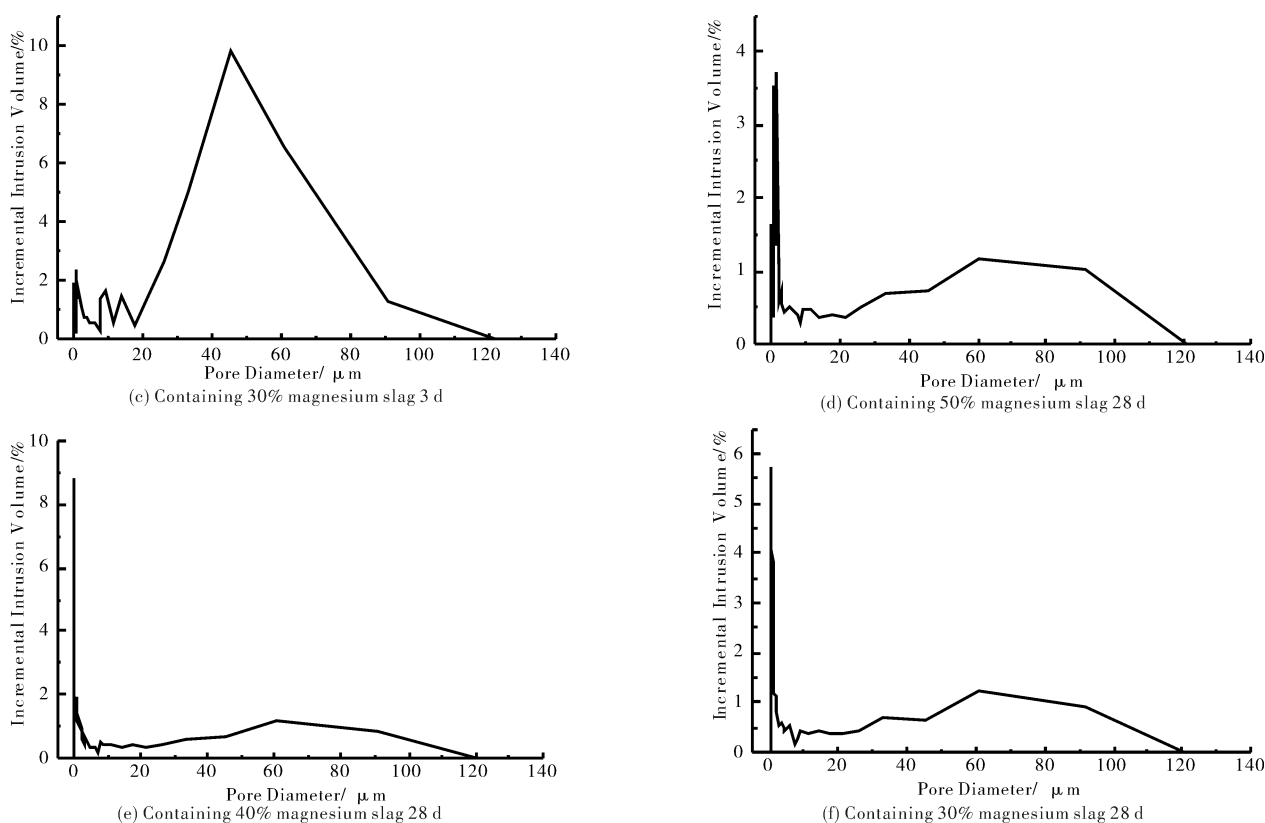


图 6 三种镁渣掺量的胶凝材料内部孔结构情况

Fig. 6 Internal pore structure of cementitious materials with three kinds of magnesium slag content

表 3 三种镁渣掺量的胶凝材料内部孔径尺寸分布

Tab. 3 Internal pore size distribution of cementitious materials with three kinds of magnesium slag content

镁渣 掺量/%	养护 时间/d	孔隙率/%	孔径百分比/%			最可几孔径 尺寸/ μm
			$\leq 10 \mu\text{m}$	$10 \sim 50 \mu\text{m}$	$\geq 50 \mu\text{m}$	
50	3	32.39	66.51	16.39	17.1	60.67
50	28	26.76	94.82	3.02	2.16	1.30
40	3	28.48	63.67	22.41	13.92	45.43
40	28	16.08	94.34	3.63	2.03	0.18
30	3	26.98	70.58	21.5	7.92	45.45
30	28	16.64	93.85	3.99	2.16	0.18

将表 3 与图 6 结合起来分析可以看出: 掺 50% 镁渣料养护 3 d 后孔隙率为 32.39%, 最可几孔径尺寸为 60.67 μm , 小孔所占体积为 66.51%, 养护至 28 d 后, 胶凝材料孔隙率下降至 26.76%, 最可几孔径尺寸由 3 d 时的大孔变为 28 d 的小孔 1.30 μm , 小孔所占体积增加至 94.82%; 掺 40% 镁渣料养护 3 d 后孔隙率较掺 50% 镁渣养护 3 d 孔隙率低, 为 28.48%, 最可几孔径尺寸为 45.37 μm , 小孔所占体积为 63.67%, 养护至 28 d 后, 孔隙率减小至 16.08%, 最可几孔径尺寸减小至 0.18 μm , 小孔所占体积比增加至 94.34%; 掺 30% 镁渣料养护 3 d 后孔隙率在三种比例胶凝材料中最小, 为 26.98%, 最可几孔径尺寸为 45.45

μm , 小孔所占体积在养护 3 d 的三种镁渣掺量的胶凝材料中是对多的, 为 70.58%, 养护至 28 d 后, 掺 30% 镁渣料的孔隙率下降至 16.64%, 最可几孔径减小至 0.18 μm , 小孔所占体积增加到 93.85%.

实验中使用急冷镁渣因 MgO 的存在可使其水化过程中产生膨胀性能, 在镁渣不同配比下存在膨胀行为、内部孔结构等的差异. 养护 3 d 后, 胶凝材料的孔隙率及最可几孔径尺寸随着镁渣掺量的增加而增大, 小孔所占体积比随着镁渣掺量的增加而减小; 养护至 28 d 后, 三种镁渣掺量的胶凝材料的孔隙率均有所下降, 最可几孔径尺寸由 3 d 的中孔、大孔逐渐变为 28 d 的小孔, 并且胶凝

材料的内部已基本无大孔、中孔出现,这是因为随着水化时间的增加,胶凝材料水化逐渐完成,生成大量的 C-S-H 凝胶,使得胶凝材料的内部结构不断致密,这种致密性水化就体现在了胶凝材料的内部孔隙率降低。

3 结论

(1)随着镁渣掺量的减少,胶凝材料的抗压、抗折性能增大,水化生成的水化产物 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量增多,并且水化 3 d 后,三种镁渣掺量的胶凝材料衍射图中均可以观察到有 MgO 峰的出现,但水化至 28 d 后,除了掺量为 50% 镁渣料的衍射图中可以观察到微弱的 MgO 峰,掺 30% 和 40% 镁渣的胶凝材料衍射图中已几乎不存在 MgO 衍射峰强度。

(2)胶凝材料的膨胀性能随着镁渣掺量的增加而增大,当镁渣掺量为 30% 时,胶凝材料的收缩行为没有得到很好的改善,当镁渣掺量为 40% 时,胶凝材料的收缩行为被完全抵消了,并且最终胶凝材料处于一种微膨胀状态,若将镁渣掺量继续增加到 50% 时,胶凝材料的压蒸安定性不合格。

(3)养护 3 d 后,胶凝材料的孔隙率及最可几孔径尺寸随着镁渣掺量的增加而增大,小孔所占体积比随着镁渣掺量的增加而减小;养护至 28 d 后,三种镁渣掺量的胶凝材料孔隙率均有所下降,胶凝材料的内部已基本无大孔、中孔出现,并且镁渣掺量为 40% 和 30% 的胶凝材料无论是孔隙率,还是最可几孔径或是内部孔径尺寸分布情况,均已趋于一致并明显优于镁渣掺量为 50% 的胶凝材料。

参考文献 References

- [1] 黄从运,柯劲松,张明飞,等. 镁渣代替石灰石配料煅烧硅酸盐水泥[J]. 新世纪水泥导报, 2005(5): 27-28.
HUANG Congyun, KE Jinsong, ZHANG Mingfei, et al. Magnesium slag instead of limestone ingredients calcined Portland cement[J]. Cement Guide For New Epoch, 2005(5): 27-28.
- [2] 霍冀川,卢中远,石荣铭,等. 镁渣配料煅烧硅酸盐水泥熟料的研究[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(1): 55-56.
HUO Jichuan, LU Zhongyuan, SHI Rongming, et al. Study on calcination of Portland cement clinker with magnesium slag [J]. Chongqing Environmental Science, 2000, 22(1): 55-56.
- [3] 杨伟. 镁渣作水泥混合材的研究[J]. 建材技术与应用, 2011(9): 11-13.
YANG Wei. Study on magnesium residue as cement

- mixture[J]. Research & Application of Building Materials, 2011(9): 11-13.
- [4] 丁庆军,李悦,胡曙光,等. 镁渣作水泥混合材的研究[J]. 水泥工程, 1998(3): 24-25.
DING Qingjun, LI Yue, HU Shuguang, et al. Study on magnesium residue as cement mixture[J]. Cement Engineering, 1998(3): 24-25.
- [5] 赵爱琴. 利用镁渣研制新型墙体材料[J]. 山西建筑, 2003, 29(17): 48-49.
ZHAO Aiqin. Development of new wall materials by using magnesium slag[J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(17): 48-49.
- [6] 肖立光,雒锋,王思宇,等. 镁渣节能墙体材料的研究[J]. 新型建筑材料, 2011(7): 21-23.
XIAO Liguang, LUO Feng, WANG Siyu, et al. Study on energy saving wall material of magnesium slag [J]. New Building Materials, 2011(7): 21-23.
- [7] 崔自治,杨建森. 镁渣水化惰性机理研究[J]. 新型建筑材料, 2007, 54(2): 54-55.
CUI Zizhi, YANG Jiansen. Study on hydration inertity mechanism of magnesium slag[J]. New Building Materials, 54(2): 54-55.
- [8] 崔自治,杨建森. 镁渣活化措施试验研究[J]. 宁夏大学学报, 2008, 29(3): 230-231.
CUI Zizhi, YANG Jiansen. Experimental study on magnesium slag activation measures[J]. Journal of Ningxia University, 2008, 29(3): 230-231.
- [9] FEI JIN, ABIR AL-TABBAA. Strength and drying shrinkage of slag paste activated by sodium carbonate and reactive MgO [J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 58-65.
- [10] 肖力光,雒锋,王淑娟,等. 镁渣胶凝材料强度影响因素的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 680-686.
XIAO Liguang, LUO Feng, WANG Shujuan, et al. Study on influencing factors of strength of magnesium slag cementitious material[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 680-686.
- [11] 彭小芹,王开宇,龚明非,等. 镁渣硅酸盐水泥的性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(6): 141-143.
PENG Xiaoqin, WANG Kaiyu, GONG Mingfei, et al. Properties of magnesium slag Portland cement [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2011, 33(6): 141-143.
- [12] UNLUER, C, AL-TABBAA. A, The role of brucite, ground granulated blastfurnace slag, and magnesium silicates in the carbonation and performance of MgO cements[J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 629-643.
- [13] 崔自治,倪晓,孟秀丽. 镁渣膨胀性机理试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2006(6): 10.
CUI Zizhi, NI Xiao, MENG Xiuli. Experimental study on swelling mechanism of magnesium slag[J]. Fly Ash Comprehensive, 2006(6): 10.
- [14] JIN FEI, GU KAI, AL-TABBAA. ABIR Strength and hydration properties of reactive MgO -activated ground granulated blastfurnace slag paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 57: 8-16.

(编辑 沈波)