

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.01.019

## 脱硫石膏基复合胶凝材料的物理力学性能试验

耿飞<sup>1,2</sup> 桂敬能<sup>2</sup> 曹欣欣<sup>3</sup> 陈宏康<sup>2</sup> 高培伟<sup>2</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 南京, 210096; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016; 3. 南京鑫盛建筑工程质量检测有限公司, 南京, 211103)

**摘要:**以 $\beta$ 型脱硫石膏为基材,混掺水泥、粉煤灰和硅灰等胶凝材料,加入自制的专用改性外加剂,制备脱硫石膏基复合胶凝材料,测试分析原料组分、水胶比和养护方式对脱硫石膏基复合胶凝材料性能的影响,通过SEM和XRD测试手段探讨其强度形成及耐水机理。试验结果表明:水泥掺量为20%、粉煤灰掺量为25%和水胶比为0.7时的脱硫石膏基复合胶凝材料综合性能优良,其28 d抗压强度为12.1 MPa,吸水率为17.6%,软化系数为0.81;二水石膏晶体形成的第一支撑骨架和以钙矾石和C—S—H凝胶等形成的第二支撑骨架相互补充,提高了脱硫石膏基复合胶凝材料结构的致密性和耐水性。

**关键词:**建筑脱硫石膏;胶凝材料;物理性能;微观结构;耐水性

**中图分类号:**TU528.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)01-0124-07

## Study on Physical and Mechanical Properties of FGD Gypsum-Based Cementitious Materials

GENG Fei<sup>1,2</sup>, GUI Jingneng<sup>2</sup>, CAO Xinxin<sup>3</sup>, CHEN Hongkang<sup>2</sup>, GAO Peiwei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China; 2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 3. Nanjing Xinsheng Construction Quality Testing Co Ltd, Nanjing, 211103, China)

**Abstract:**The flue gas desulfurization (FGD) gypsum-based cementitious materials are prepared by using the  $\beta$  type desulfurization gypsum as the base material, including mixing cement, fly ash, silica fume and self-made modified additive. The effects of raw material composition, water to cementitious material ratio and curing methods on the properties of the FGD gypsum-based cementitious materials have been tested and analyzed, and the formation of strength and water resistance mechanism are explored by means of SEM, XRD analysis. The experimental results show that the performance of the FGD gypsum-based cementitious materials is excellent when 20% cement, 25% fly ash are mixed with a water to cementitious material ratio of 0.7. On these conditions, the compressive strength, water absorption and softening coefficient of specimens at the 28th day are 12.1 MPa, 17.6%, and 0.81, respectively. There are two types of skeletons in the specimens made with FGD gypsum-based cementitious materials, which synergistically supports the structure. The first skeleton is formed by dihydrate gypsum crystals, providing the early-age strength for the specimens. The second skeleton is formed by ettringite and C—S—H gel, providing strength in later ages. The skeletons improve the compactness and the water resistance of the specimens made with FGD gypsum-

**基金项目:**国家十二五科技支撑计划(2015BAL02B02)资助项目;2017年度南京市新型墙体材料专项补助资金(201712)资助项目。

**收稿日期:**2018-05-22;**修订日期:**2018-09-26

**通信作者:**耿飞,男,高级实验师,博士后,E-mail:gengfei@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**耿飞,桂敬能,曹欣欣,等. 脱硫石膏基复合胶凝材料的物理力学性能试验[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(1):124-130. GENG Fei, GUI Jingneng, CAO Xinxin, et al. Study on Physical and Mechanical Properties of FGD Gypsum-Based Cementitious Materials[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(1): 124-130.

based cementitious materials.

**Key words:** semi-water flue gas desulfurization (FGD) gypsum; cementitious material; physical property; microstructure; water resistance

目前,中国火力发电厂的脱硫石膏年产量已达近亿吨<sup>[1]</sup>,成为继粉煤灰之后的第二大固体废弃物,其利用率不高,大量堆积不仅占用了宝贵的土地资源,更严重威胁着周边的生态环境。如何有效处理和利用脱硫石膏已成为非常棘手的技术问题。

研究表明,脱硫石膏经煅烧工艺处理后所得的建筑脱硫石膏具有良好的胶凝性能,作为一种绿色可再生资源,具有可循环、可“呼吸”、轻质隔音和防火保温等特点<sup>[2-3]</sup>,符合国家建筑产业的节能环保要求。然而,建筑脱硫石膏耐水性差、强度低、易“泛碱”等问题限制了其在建筑材料领域的大规模推广应用,为此国内外学者针对这些问题进行了相应的研究。张志国等人<sup>[4]</sup>在脱硫石膏中复掺了矿渣、粉煤灰和激发剂等材料,复合材料吸水率为17.6%,抗压软化系数为0.80;李建权等人<sup>[5]</sup>在石膏中掺加石膏防水剂,2 h吸水率降至3.3%;Camarini等人<sup>[6]</sup>在脱硫石膏中掺入矿渣水泥,发现其强度可升至17.5 MPa,软化系数为0.52;Kovler及Butakova等人<sup>[7-8]</sup>在石膏中掺入水泥和硅粉后软化系数可由0.33提升至0.50。当前对建筑脱硫石膏的改性研究较为片面,大多是从强度或者耐水性单方面

进行宏观性能的改性研究,在其综合改性及微观机理分析方面还有待进一步研究。

本文以建筑脱硫石膏为主要组分,通过复掺水泥、粉煤灰、生石灰和硅灰等材料,着重研究水泥和粉煤灰掺量以及水胶比对复合胶凝材料基本性能的影响,并采用XRD和SEM观测其水化产物和微观形貌,分析复合胶凝材料的强度形成及耐水性机理,以为脱硫石膏在工程材料领域的高效资源化利用奠定理论基础。

## 1 试验原材料和方法

### 1.1 试验原材料

建筑脱硫石膏,产自山东华兴建材科技有限公司,其化学成分和性能指标分别见表1和表2;水泥为P·O42.5R级普通硅酸盐水泥,产自安徽芜湖,其化学成分和性能指标分别见表3和表4;粉煤灰为Ⅱ级,其化学成分和性能指标分别见表5和表6;生石灰粉、S95矿粉和硅灰皆为市售,其性能符合相应的国家行业标准。改性外加剂为自主研发,由甲基硅酸钠、硬脂酸、聚乙烯醇和硼酸铵等多种组分混合而成。

表1 建筑脱硫石膏的化学成分(质量百分数)

Tab. 1 Chemical composition of semi-water FGD gypsum (in mass)

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>
含量	4.30	3.10	0.33	31.97	0.18	51.84	0.18	4.30	0.04

表2 建筑脱硫石膏的性能指标

Tab. 2 Performance of semi-water FGD gypsum

No.	Properties	The first grade	Test result
1	Fineness(0.2 mm)/%	≤10	3
2	Normal consistency/%		65.0
3	Setting time/min	Initial setting time	≥3
		Final setting time	≤30
4	2 h strength/MPa	Compressive strength	≥6.0
		Flexural strength	≥3.0

表3 水泥的化学成分(质量百分数)

Tab. 3 Chemical compositions of cement(in mass) %

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
含量	23.16	4.22	62.34	3.12	2.28	2.42

### 1.2 试验配比

基于对前期大量试验的结果分析,本文按质量百分比固定生石灰、矿粉及硅灰的掺量分别为

3%,1%和0.5%,改性外加剂掺量为胶凝材料的5%,以水泥10%~30%、粉煤灰20%~30%及水胶比0.6~0.8为变化因素及范围,开展脱硫石膏复合胶凝材料的性能试验,具体配比见表7。

### 1.3 试验方法

复合胶凝材料的干容重、抗压强度、吸水率和软化系数等试验参照《混凝土砌块和砖试验方法》

表 4 水泥的性能指标

Tab. 4 Performance of cement

No.	Properties	Standard requirement	Test result
1	Specific surface area/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	>300	370
2	Normal consistency/%		28.0
3	Setting time/min	Initial setting time	≥45
		Final setting time	≤390
4	Soundness	合格	合格
5	Flexural strength/MPa	3 d	≥4.0
		28 d	≥7.0
6	Compressive strength/MPa	3 d	≥23.0
		28 d	≥42.5
7	SO <sub>3</sub> /%	≤3.5	2.42
8	MgO/%	≤5.0	2.28

表 5 粉煤灰的化学成分(质量百分数)

Tab. 5 Chemical composition of fly ash (in mass) %

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
含量	56.94	18.67	10.46	6.00	2.01	1.22	1.33

表 6 粉煤灰的性能指标

Tab. 6 Performance of fly ash

No.	Properties	The secondary FA	Test result
1	Fineness(45 μm) /%	≤25.0	13.2
2	Water demand ratio /%	≤105.0	93.0
3	Water content /%	≤1.0	0.3
4	f-CaO /%	≤1.0	0.1
5	Soundness /mm	≤5.0	2.3
6	Activity index	7 d	83
		28 d	106

表 7 脱硫石膏基复合胶凝材料试验配合比

Tab. 7 Proportion of semi-water FGD composite cementitious system

No.	Ce- me- nt/ %	Hemihy- drate gyp- sum/%	Fly ash/ %	Quick lime/ %	Ground slag/%	Silica fum- e/%	Water to cementi- tious ma- terial ra- tio
A1	10	60.5	25	3	1	0.5	0.7
A2	20	50.5	25	3	1	0.5	0.7
A3	30	40.5	25	3	1	0.5	0.7
B1	20	55.5	20	3	1	0.5	0.7
B2	20	45.5	30	3	1	0.5	0.7
C1	20	50.5	25	3	1	0.5	0.6
C2	20	50.5	25	3	1	0.5	0.8

注:A2同时为B组和C组的对比配比。

(GB/T 4111—2013)进行。试件成型后,其养护方式分自然养护和蒸汽养护两种,自然养护是将脱模后的试件置于室内(温度 20℃±3℃)不做其他任何处理;蒸汽养护是将脱模后的试件在室内静置一天,然后放入预先升温至 80℃的蒸汽养护箱中恒温 3 h,而后取出自然晾干。

## 2 试验结果与机理分析

### 2.1 试验结果与分析

#### (1) 水泥掺量的影响

试验测试了不同水泥掺量的脱硫石膏基复合胶凝材料的抗压强度、吸水率和软化系数,具体结果见图 1。从中可以看出,随着水泥掺量的不断增大,脱硫石膏基复合胶凝材料的抗压强度有较大幅度的增加。具体为:水泥掺量为 10% 时,其 28 d 抗压强度为 10.4 MPa;水泥掺量为 30% 时,其 28 d 抗压强度增为 13.3 MPa,增幅达 28.8%。蒸汽养护较之于自然养护的 28 d 抗压强度提升明显,提升

幅度最大可达 12%。水泥掺量为 10% 时,吸水率、软化系数分别为 22.3% 和 0.70;水泥掺量为 30% 时,吸水率、软化系数分别为 15.9% 和 0.87。可见,适当增加水泥的掺量可显著提升石膏基复合胶凝材料的耐水性能。

#### (2) 粉煤灰掺量的影响

试验测试了粉煤灰掺量对脱硫石膏基复合胶凝材料抗压强度、吸水率和软化系数的影响,具体结果见图 2。从中可以看出,随着粉煤灰掺量的增加,石膏基复合胶凝材料的抗压强度呈下降趋势。粉煤灰掺量为 20% 时,28 d 抗压强度值达到 13.9 MPa;粉煤灰掺量为 30% 时,28 d 抗压强度为 11.7 MPa,降幅达 15.8%。蒸汽养护较之于自然养护的 28 d 抗压强度略有提升,最大增幅为 3%。粉煤灰掺量为 20% 时,吸水率、软化系数分别为 18.1% 和 0.80;粉煤灰掺量为 30% 时,吸水率、软化系数分为 20.5% 和 0.82。可见,适量的粉煤灰可以改善复合胶凝材料体系的结构致密性,降低吸水

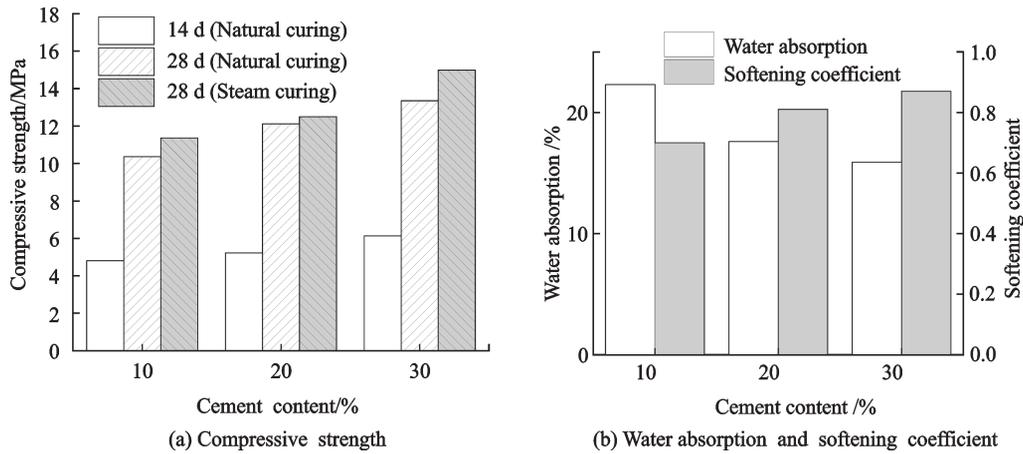


图1 不同水泥掺量的脱硫石膏基复合胶凝材料试验结果

Fig. 1 Test results of semi-water FGD composite cementitious materials with different cement content

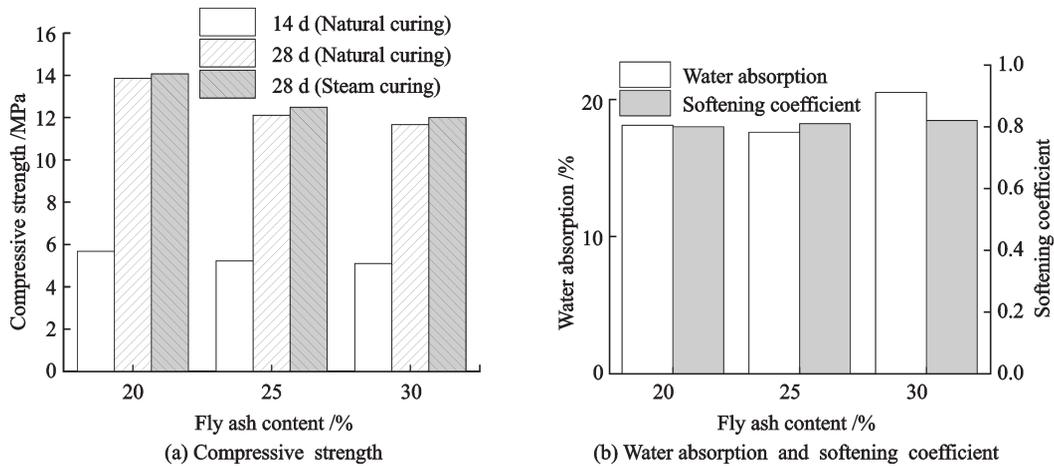


图2 不同粉煤灰掺量的脱硫石膏基复合胶凝材料试验结果

Fig. 2 Test results of semi-water FGD composite cementitious materials with different fly ash content

率,而过量粉煤灰使得建筑脱硫石膏掺量过少,在相同水胶比下,用水量远远多于水化所需的实际用水量,多余的水分蒸发后留下大量孔隙,增加吸水率。

### (3) 水胶比的影响

试验测试了3种水胶比( $W/C$ )对脱硫石膏基复合胶凝材料抗压强度、吸水率、软化系数和干容重等性能的影响,具体结果见图3。从中可以看出,随着水胶比的增加,石膏基复合胶凝材料的抗压强度明显降低。水胶比为0.6时,其28 d抗压强度值达到最高18.9 MPa;水胶比为0.8时,其28 d抗压强度值仅为9.8 MPa,降幅达50%。蒸汽养护较之于自然养护的28 d抗压强度小幅提升,其提升幅度最大可达6%。吸水率不断增加,软化系数先增加后降低,水胶比为0.8时,吸水率为26.9%;水胶比为0.6时,内部结构更加密实,孔隙少,吸水率较低,仅为9.2%。水胶比为0.7时软化系数达到最高值0.81;水胶比为0.8时,内部孔隙增加,水分对石膏晶体的侵蚀加剧,软化系数降为0.77;水胶

比为0.6时,软化系数仅为0.60,内部孔隙虽然减少,但单位体积的石膏晶体增加,饱水后强度损失比例增大。水胶比为0.6时,干容重约为 $1\ 150\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,水胶比每增加0.1,干容重约降低 $100\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 2.2 复合胶凝材料强度形成及耐水机理分析

为进一步探究脱硫石膏基复合胶凝材料强度形成和耐水机理,本文利用X射线衍射仪(XRD)及扫描电镜(SEM)对空白石膏、A2自然养护7 d和28 d试样进行测试分析。

### (1) XRD分析

在建筑脱硫石膏中,复掺水泥、粉煤灰、生石灰、矿粉和硅灰等胶凝材料后,会发生一系列复杂的水化反应,现简化为3步:建筑脱硫石膏水化反应阶段;矿物掺合料前期水化反应阶段;矿物掺合料后期水化反应阶段。

#### ① 建筑脱硫石膏水化反应阶段

建筑脱硫石膏水化反应速度较快,其先发生水化反应,反应式为



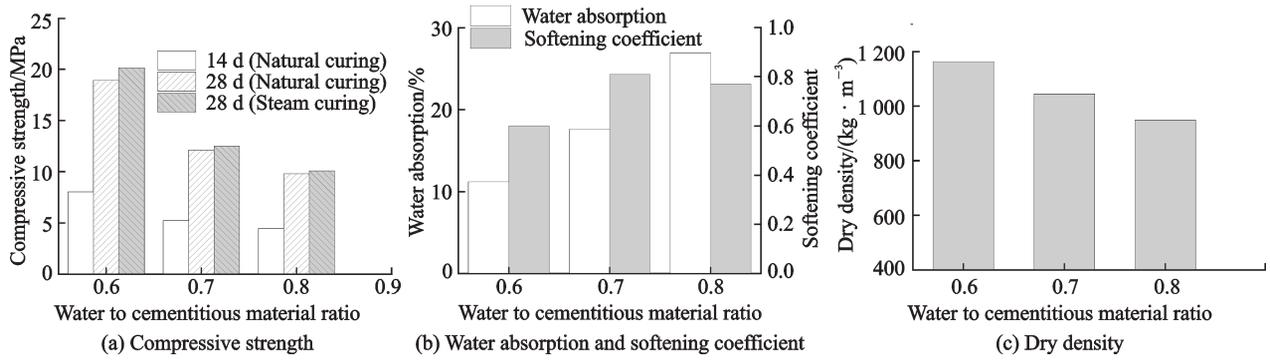
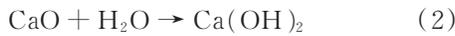


图 3 不同水胶比的脱硫石膏基复合胶凝材料试验结果

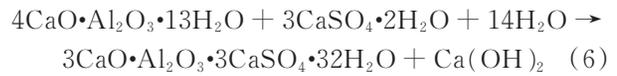
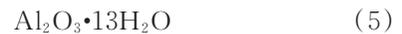
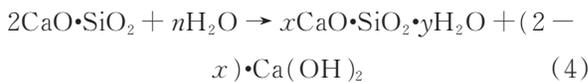
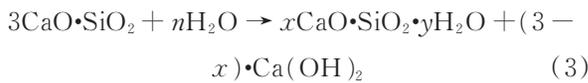
Fig. 3 Test results of semi-water FGD composite cementitious materials with different water to cementitious material ratio

② 矿物掺合料前期水化反应阶段

前期生石灰水化后生成氢氧化钙并放出大量的热促进其他胶凝材料的水化反应,反应式为

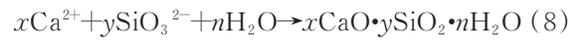
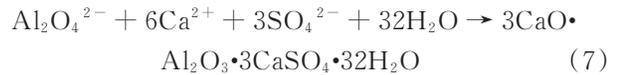


水泥中硅酸三钙和硅酸二钙水化生成 C—S—H 凝胶和大量的氢氧化钙,铝酸三钙水化后生成 C—A—H, 进一步与二水石膏反应生成钙矾石<sup>[9-12]</sup>,反应式为



③ 矿物掺合料后期水化反应阶段

随着水化反应持续进行,后期粉煤灰、矿粉和硅灰在氢氧化钙溶液中不断溶出  $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ , 这些离子与  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  作用形成钙矾石和水化硅酸钙产物<sup>[13-14]</sup>,反应式为



为进一步验证石膏基复合胶凝材料的水化产物组成,A2 试样的 XRD 结果见图 4。

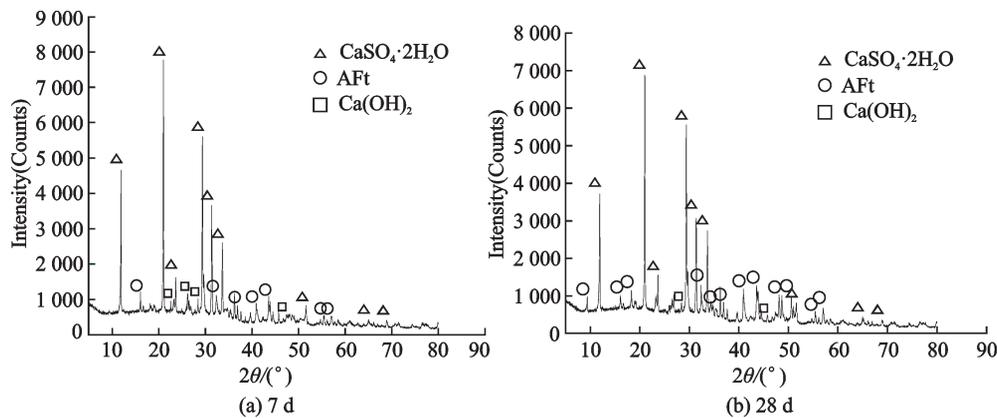


图 4 A2 试样的 XRD 图

Fig. 4 X-ray diffraction of A2 sample

对比分析图 4 可知,石膏基复合胶凝材料体系的水化产物主要有二水硫酸钙、钙矾石和氢氧化钙等,其中二水硫酸钙在 7 d 龄期试样的图中衍射峰峰强较高,而在 28 d 龄期试样的图中衍射峰峰强有所弱化,这说明二水硫酸钙的数量随着试样龄期的延长而不断减小,原因由式(6)和(7)可知,水泥、粉煤灰及矿粉的持续水化在不断的消耗二水硫酸钙;钙矾石在 7 d 龄期试样的图中衍射峰数量不多,而在 28 d 龄期试样图中出现了较多衍射峰且峰强

都有所提高,这说明钙矾石的数量随着试样龄期的延长而不断增加,原因同上,在水泥、粉煤灰和矿粉不断水化时就产生了越来越多的钙矾石;氢氧化钙在 7 d 龄期试样的图中存在一定数量的衍射峰,而在 28 d 龄期试样的图中衍射峰数量降低且峰强有所弱化,这是因为粉煤灰、矿粉等在后期水化过程中不断消耗氢氧化钙所致;由式(3),(4)及(8)可知,石膏基复合胶凝材料水化产物中还应水化硅酸钙凝胶产生,但由于其为非晶体,并不能显现出

衍射峰。根据有关资料可知<sup>[15]</sup>,基线提高代表无定型凝胶物质的生成,故可推测石膏基复合胶凝材料水化产物中存在水化硅酸钙凝胶。

### (2) SEM分析

试验测试了空白石膏及A2试样的微观形貌。如图5所示,空白石膏试样的晶体结构为长柱状无规则搭接在一起,二水石膏晶体之间的空隙较大,整体结构较为疏松,宏观强度较低。试样浸水后,水分会通过渗水通道填满这些空隙,加剧对二水石膏晶体结晶接触点的侵蚀,晶格易发生歪曲和变

形,造成试样强度不可逆的下降,且试样受压时石膏晶体之间的水相当于“楔子”,会对石膏晶体产生破坏作用,饱水强度大幅下降,这也是纯石膏制品耐水性差的原因。在掺入矿物掺合料及改性外加剂后,二水石膏晶体间产生诸多水化产物,如钙矾石针状晶体和C—S—H凝胶等。试样在7d龄期时,大多数粉煤灰刚开始与体系中的氢氧化钙发生水化反应,而随着时间延长,试样28d龄期时,粉煤灰表面大部分被腐蚀水化生成钙矾石等,结构不断密实<sup>[16]</sup>。

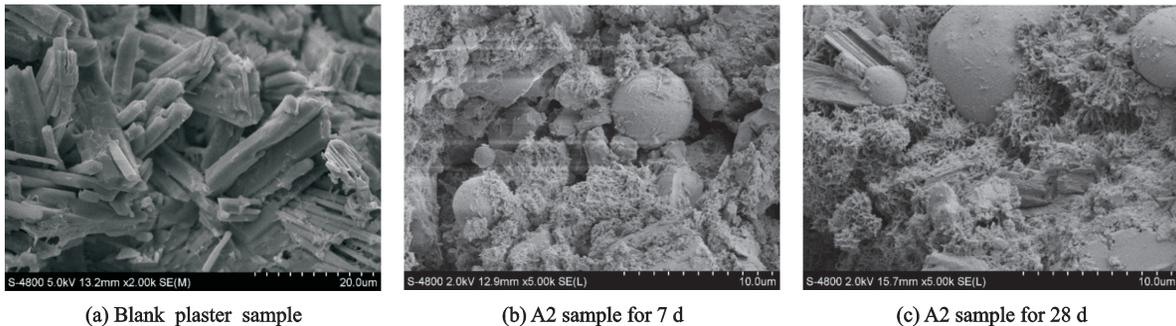


图5 空白石膏及A2试样的SEM图

Fig. 5 SEM photographs of the blank plaster sample and A2 samples

### (3) 强度形成机理

基于脱硫石膏基复合胶凝材料的XRD和SEM分析可知,在养护前期,大部分建筑脱硫石膏完成水化,二水石膏晶体相互搭接形成网状结构为第一支撑骨架,其提供了胶凝材料的前期强度。而在养护后期,越来越多的钙矾石和C—S—H凝胶等水硬性水化产物生成,它们依附在二水石膏晶体表面并不断发展,最终在空间上纵横交错形成网状结构为第二支撑骨架,其提供了胶凝材料的后期强度。第一支撑骨架和第二支撑骨架两者相互补充,整体结构更为密实,宏观上表现为较高的强度。

### (4) 耐水机理

采用防水剂和矿物掺合料对建筑脱硫石膏进行复合改性后,脱硫石膏基复合胶凝材料具有较好的耐水性。一方面防水剂可在晶体结构表面形成一层疏水膜,起到一定的抗水作用,另一方面矿物掺合料水化后生成的钙矾石和C—S—H凝胶等产物填充在二水石膏晶体之间的空隙中,结构更为密实,也能更好地发挥防水剂的成膜抗水效果,大幅降低试样的吸水率,且水硬性的水化产物依附在二水石膏晶体表面,覆盖二水石膏晶体的结晶接触点,可避免其被水分侵蚀,有效提升石膏基复合胶凝材料的耐水性。

## 3 结 论

(1)水泥掺量的增加可以改善脱硫石膏基复合

胶凝材料的力学及耐水性能,综合考虑其经济成本等因素,水泥掺量以20%为宜;粉煤灰掺量的增加会降低脱硫石膏基复合胶凝材料的抗压强度,软化系数略有增加,吸水率先降低后增加,综合考虑后粉煤灰掺量以25%为宜;水胶比每增加0.1,脱硫石膏基复合胶凝材料干容重约降低 $100\text{ kg/m}^3$ ,抗压强度大幅下降,吸水率不断增大,软化系数先增加后降低,综合考虑后水胶比以0.7为宜。

(2)蒸汽养护可以提高脱硫石膏基复合胶凝材料的抗压强度,在相同的抗压强度要求下,采用蒸汽养护可比自然养护减少胶凝材料用量,降低经济成本。

(3)当水胶比为0.7,水泥、脱硫石膏、粉煤灰、生石灰、矿粉和硅灰掺量分为20%,50.5%,25%,3%,1%和0.5%,外加剂掺量为胶凝材料质量的5%时,脱硫石膏基复合胶凝材料28d抗压强度为12.1 MPa,吸水率为17.6%,软化系数为0.81,综合性能优异。

(4)以二水石膏晶体为组成的第一支撑骨架为胶凝材料提供前期强度,以钙矾石和C—S—H凝胶等为组成的第二支撑骨架则提供后期强度;防水剂可在晶体结构表面形成疏水膜,而矿物掺合料可密实晶体结构,提升胶凝材料的耐水性。

### 参考文献:

[1] 国家发展改革委. 中国资源综合利用年度报告[J].

- 再生资源与循环经济, 2014, 7(10):3-8.
- National Development and Reform Commission. Annual report on China's comprehensive utilization of resources [J]. *Renewable Resources and Recycling Economy*, 2014, 7(10):3-8.
- [2] MEHAFFEY J R, CUERRIER P, CARISSE G. A model for predicting heat transfer through gypsum-board / wood-stud walls exposed to fire[J]. *British Medical Journal*, 1994, 18(18):297-305.
- [3] MANZELLO S L, GANN R G, KUKUCK S R, et al. Performance of a non-load-bearing steel stud gypsum board wall assembly: Experiments and modelling [J]. *Fire & Materials*, 2007, 31(5):297-310.
- [4] 张志国, 高玲艳, 杨伶凤, 等. 脱硫石膏制耐水石膏砌块的研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2009(2):27-30.
- ZHANG Zhiguo, GAO Lingyan, YANG Lingfeng, et al. Study on water resistant gypsum blocks from desulfurization gypsum [J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2009(2):27-30.
- [5] 李建权, 李国忠, 张国辉. 石膏复合防水剂对石膏晶体形成的影响[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(2):137-141.
- LI Jianquan, LI Guozhong, ZHANG Guohui. Effect of the gypsum waterproof agent on gypsum crystal formation[J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(2):137-141.
- [6] CAMARINI G, MILITO J A D. Gypsum hemihydrate-cement blends to improve renderings durability[J]. *Construction & Building Materials*, 2011, 25(11):4121-4125.
- [7] KOVLER K. Enhancing water resistance of cement and gypsum-cement materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001, 13(5):349-355.
- [8] BUTAKOVA M D, GORBUNOV S P. Study of the influence of complex additives on properties of the gypsum-cement-puzzolan binder and concretes on its basis [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 150:1461-1467.
- [9] 施惠生, 郭晓璐, 阚黎黎. 水泥基材料科学[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2011.
- SHI Huisheng, GUO Xiaolu, KAN LiLi. *Cement based materials science* [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2011.
- [10] PREECE S J, BILLINGHAM J, KING A C. On the initial stages of cement hydration[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2001, 40(1):43-58.
- [11] GAWLICKI M, NOCUŃ-WCZELIK W, LUKASZ B. Calorimetry in the studies of cement hydration[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2010, 100(2):571-576.
- [12] 马振珠, 岳汉威, 宋晓岚. 水泥水化过程的机理、测试及影响因素[J]. *长沙大学学报*, 2009, 23(2):43-46.
- MA Zhenzhu, YUE Hanwei, SONG Xiaolan. Mechanism, testing and influencing factors of cement hydration process[J]. *Journal of Changsha University*, 2009, 23(2):43-46.
- [13] 陶文宏, 刘宗明, 张明星, 等. 脱硫石膏-石灰-粉煤灰体系胶凝性及水化机理[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(3):233-237.
- TAO Wenhong, LIU Zongming, ZHANG Mingxing, et al. Cementitious property and hydration mechanism of desulphogypsum-lime-fly ash system[J]. *Journal of University of Jinan (Sci & Tech)*, 2010, 24(3):233-237.
- [14] SINGH N B, KALRA M, KUMAR M, et al. Hydration of ternary cementitious system: Portland cement, fly ash and silica fume[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, 119(1):381-389.
- [15] 诸培南, 翁臻培, 王天顺. 无机非金属材料显微结构图谱手册[M]. 武汉:武汉工业大学出版社, 1994:56-78.
- ZHU Peinan, WENG Zhenpei, WANG Tianshun. *Manual of atlas of microstructure of inorganic nonmetallic materials*[M]. Wuhan: Wuhan Tech University Press, 1994:56-78.
- [16] 桂敬能. 石膏基复合材料轻质隔墙板制备及拼接缝受力仿真分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- GUI Jingneng. *Preparation and stress analysis on stitching seam of lightweight partition board made of gypsum-based composite materials* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

(编辑:胥橙庭)