

文章编号:1671-1513(2007)06-0011-05

# 硅灰对水泥净浆与砂浆性能及砂浆结构影响的研究

叶东忠

(福州大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 探讨不同掺量的硅灰对水泥净浆与砂浆性能及砂浆结构的影响。结果表明:掺入硅灰可以减缓水泥早期水化反应速度,使水化产物减少,结构疏松,使水泥砂浆早期强度有所下降。掺入适量的硅灰可以提高水泥后期水化反应速度,使水化产物增多,提高水泥砂浆的密实度,并能促使水化反应长期进行,从而提高水泥砂浆的后期与长期强度;硅灰的优化掺量为 8%。掺入硅灰会降低水泥净浆的流动性,增加水泥的凝结时间,但水泥的安定性均为合格。

**关键词:** 硅灰; 水泥净浆; 砂浆; 结构; 性能

**中图分类号:** TQ172

**文献标识码:** A

硅灰是用电弧炉冶炼硅金属或硅铁合金生产过程中产生的工业烟尘,其颗粒超细,比表面积大,具有很高的火山灰活性,20 世纪中后期,国内外学者逐步开展了对硅灰在混凝土中应用的研究<sup>[1-4]</sup>。我国对硅灰应用的研究起步较晚,于 20 世纪 80 年代中期开始了对硅灰应用于混凝土的研究与开发,并发现掺入适量的硅灰可以明显提高混凝土的早期与后期强度<sup>[5-7]</sup>,但是关于硅灰对水泥净浆与砂浆性能及水泥砂浆微观结构影响的文献较少<sup>[8]</sup>,本研究探讨了不同硅灰掺量对水泥净浆与砂浆性能及不同水化龄期水泥砂浆的微观结构的影响,为硅灰的合理应用提供参考依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

硅灰来自某工厂,其主要成分为  $\text{SiO}_2$ ,含量约为 96%;水泥为 42.5 等级普通硅酸盐水泥,取自某新型干法水泥厂;测定水泥砂浆强度用砂采用标准砂。

### 1.2 水泥性能测试

按国家标准测定各水泥试样的物理性能,其中水泥净浆的标准稠度用水量、凝结时间和安定性按 GB1346—89 进行,水泥砂浆强度按 GB177—85 进

行。

### 1.3 试样结构分析

采用日本理学 D/max-3C X 射线粉末衍射仪分析各水泥胶砂试样不同水化龄期的 XRD 谱图,确定各试样的晶相。将各试样经表面处理后进行扫描电镜分析,确定试样显微结构与形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅灰掺量对水泥净浆与砂浆性能的影响

#### 2.1.1 硅灰掺量对水泥砂浆强度的影响

表 1 为不同硅灰掺量(硅灰为外掺)时水泥胶砂试样各龄期的抗折强度与抗压强度实验结果。从表 1 中可以看出,随着硅灰掺量的增加,水泥胶砂试样的 3 d 抗压强度均有不同程度地下降,且均小于未掺硅灰的 0# 试样;水泥胶砂试样的 28 d 抗压强度随着硅灰掺量的增加而增加,当硅灰掺量为 8% 时,水泥试样的 28 d 抗压强度最大,其强度比 0# 试样提高 17.6%,随着硅灰掺量的增加,试样的 28 d 抗压强度逐渐下降,但仍大于未掺硅灰的 0# 对比试样。水泥胶砂试样的 180 d 抗压强度随着硅灰掺量的增加而增加,当硅灰掺量为 8% 时,水泥胶砂试样的 180 d 抗压强度最大,其强度比 0# 试样提高 18.5%,随着硅灰掺量的增加,试样的 180 d 抗压强

收稿日期:2007-09-13

作者简介:叶东忠(1967—),男,福建南安人,副教授,硕士,主要从事无机非金属材料及固体废物的综合利用研究。

度逐渐下降,但仍大于未掺硅灰的0<sup>#</sup>对比试样. 实验结果表明:掺入硅灰对水泥砂浆的早期强度不利,

但可以提高水泥砂浆的后期强度与长期强度,硅灰的优化掺量为8%.

表1 不同掺量的硅灰对水泥砂浆强度的影响

编号	硅灰掺量/ %	水灰比	抗折强度/ MPa				抗压强度/ MPa			
			3 d	7 d	28 d	180 d	3 d	7 d	28 d	180 d
0 <sup>#</sup>	0	0.44	6.27	7.74	8.96	9.16	23.41	38.75	48.65	52.02
6 <sup>#</sup>	6	0.44	5.87	7.47	9.93	10.14	21.18	38.16	52.68	56.45
8 <sup>#</sup>	8	0.44	5.71	7.37	10.40	10.66	19.78	37.71	57.19	61.62
10 <sup>#</sup>	10	0.44	5.68	7.18	10.06	10.32	18.30	37.07	54.34	58.03
12 <sup>#</sup>	12	0.44	5.58	7.15	9.92	10.11	18.07	36.79	51.78	55.23
14 <sup>#</sup>	14	0.44	5.54	7.03	9.86	10.05	17.87	36.61	51.55	53.43

注:表1中0<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>水泥胶砂试样中硅灰均为外掺,胶砂比(水泥:标准砂)均为1:2.5.

### 2.1.2 硅灰掺量对水泥净浆标准稠度、凝结时间与安定性的影响

表2为不同掺量的硅灰对水泥净浆标准稠度、凝结时间与安定性的影响结果. 从表2中可以看出,随着硅灰掺量的增加,水泥净浆标准稠度均有不同程度地增加,且均大于未掺硅灰的0<sup>#</sup>试样;初凝时间与终凝时间均有不同程度地延长,且均比未掺硅灰的0<sup>#</sup>试样的凝结时间更长;掺入硅灰后水泥的安定性均为合格. 实验结果表明:掺入硅灰会降低水泥净浆的流动性,增加水泥的凝结时间,对水泥的安定性无负面影响.

表2 不同硅灰掺量时水泥净浆标准稠度、凝结时间与安定性的实验结果

编号	硅灰掺量/ %	标准稠度/ %	凝结时间/ min		安定性
			初凝	终凝	
0 <sup>#</sup>	0	29.4	122	264	合格
6 <sup>#</sup>	6	29.4	129	270	合格
8 <sup>#</sup>	8	29.5	132	276	合格
10 <sup>#</sup>	10	29.8	145	298	合格
12 <sup>#</sup>	12	30.2	162	321	合格
14 <sup>#</sup>	14	30.8	178	346	合格

## 2.2 硅灰掺量对水泥砂浆结构的影响

### 2.2.1 硅灰掺量对水泥3d砂浆结构的影响

实验用X射线粉末衍射仪分析测得0<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>试样水化3d的X射线衍射图谱,见图1~3. 从图1~3中可以看出,水化3d的水泥胶砂试样中,0<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>试样均存在3种物相: -SiO<sub>2</sub>(由于硅灰为非晶态球状SiO<sub>2</sub>微粒<sup>[9]</sup>,故该物相可能为标准砂带入,以下同)、Ca(OH)<sub>2</sub>、1.5CaO·SiO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O,其中,0<sup>#</sup>试样的1.5CaO·SiO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O特征峰(2θ=50°处)

最强,6<sup>#</sup>试样次之,8<sup>#</sup>试样的1.5CaO·SiO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O特征峰最弱,可见,随着硅灰掺量的增加,水化产物1.5CaO·SiO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O的含量逐渐减少. 图4~6为0<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>试样水化3d的扫描电镜分析结果. 从

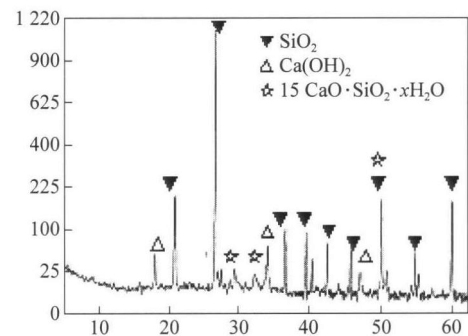


图1 0<sup>#</sup>试样水化3d的X射线衍射图谱

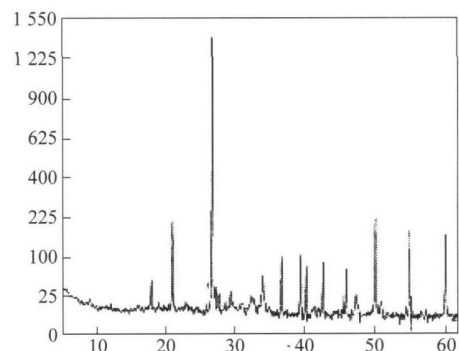


图2 6<sup>#</sup>试样水化3d的X射线衍射图谱

图4~6中也可以看出,0<sup>#</sup>试样中由等大颗粒聚集成的团状及珊瑚状的水化产物的含量最多,结构较密实,6<sup>#</sup>与8<sup>#</sup>试样中由等大颗粒聚集成的团状水化产物含量依次减少,结构比较疏松,因而使水泥3d抗折与抗压强度依次下降. 由此可以说:掺入硅

灰可以减缓水泥早期水化反应速度,使水泥早期强度有所下降.

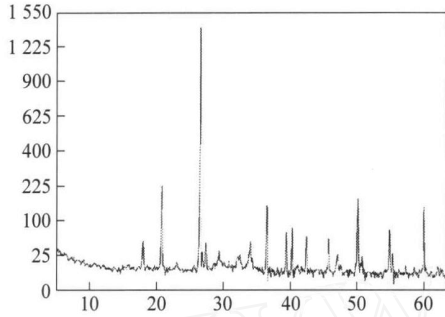


图 3 8# 试样水化 3 d 的 X 射线衍射图谱

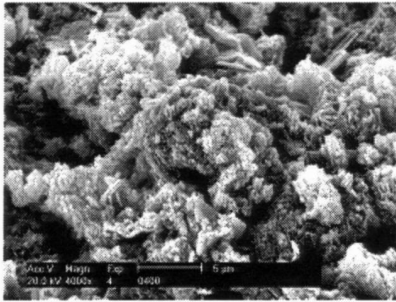


图 4 0# 试样水化 3 d 的 SEM 图

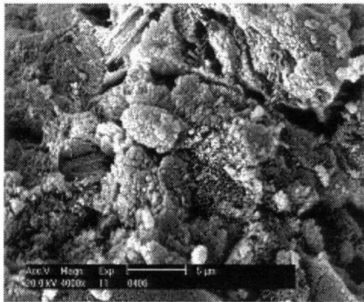


图 5 6# 试样水化 3 d 的 SEM 图

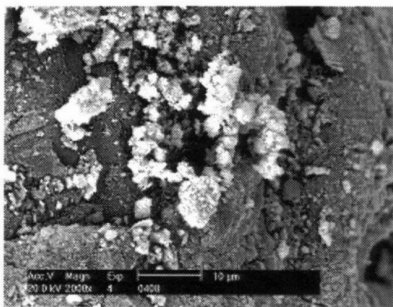


图 6 8# 试样水化 3 d 的 SEM 图

### 2.2.2 硅灰掺量对水泥砂浆 28 d 结构的影响

图 7~9 为 0#、8#、10# 水化 28 d 的 X 射线衍射图谱,从图 7~9 中可以看出,水化 28 d 的水泥胶

砂试样中,0#、8#、10# 试样均存在 3 种物相:  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $1.5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ,其中,8# 试样的  $1.5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  特征峰( $2\theta = 50^\circ$ )最强,其  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  特征峰( $2\theta = 18^\circ$ )最弱,10# 试样的  $1.5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  特征峰及  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  特征峰强度介于 8# 与 0# 试样之间,0# 试样的  $1.5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  特征峰最弱,其  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  特征峰最强. 图 10~12 为 0#、8#、10# 试样水化 28 d 的扫描电镜分析结果. 从图 10~12 中也可以看出,8# 试样存在着由等大颗粒聚集成的成片水化产物及少量花朵状水化产物,其水化产物的含量最多,结构较密实,10# 与 0# 试样中由等大颗粒聚集成的团状的水化产物的含量依次减少,结构相对较疏松,因此,8# 试样的 28 d 抗折与抗压强度最高,10# 试样次之,0# 试样的

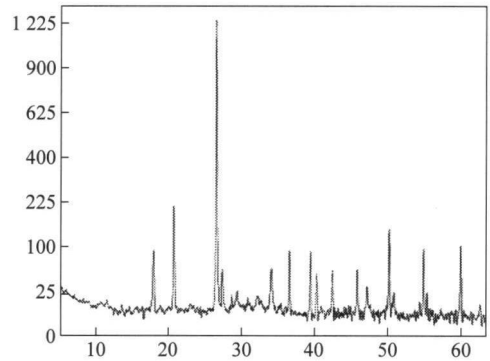


图 7 0# 试样水化 28 d 的 X 射线衍射图谱

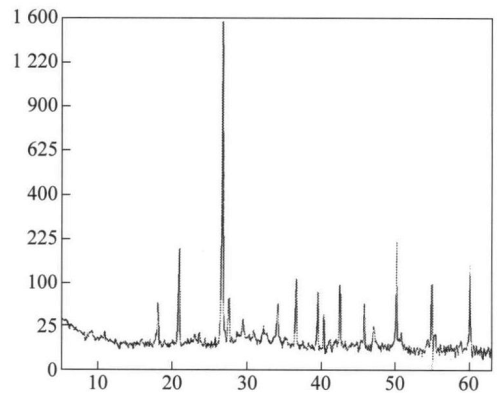


图 8 10# 试样水化 28 d 的 X 射线衍射图谱

28 d 抗折与抗压强度最低. 这可能是由于随着水泥水化龄期的增长,硅灰的火山灰效应逐渐开始起作用,它可以与界面区内富集的、粗大的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体反应,使水泥砂浆中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体含量明显降低,并生成了强度更高的低碱水化硅酸钙  $1.5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ,使水泥砂浆强度得到提高;另一方面,

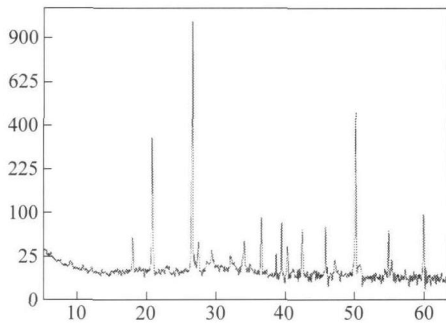


图9 8# 试样水化 28 d 的 X 射线衍射图谱

由于硅灰颗粒极细,能填充到水泥砂浆中的空隙中,使砂浆的结构也更加密实均匀,有效地改善了水泥砂浆受力时的应力分布状况,有利于强度提高.故当硅灰掺量小于 8% 时,随着硅灰掺量的增加,水泥砂浆中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体含量逐渐减少, $1.5\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$  含量逐渐增加,结构愈加均匀密实,强度逐渐增加.但当硅灰掺量大于 8% 时,随着硅灰掺量的增加,水泥砂浆的流动性逐渐降低,填充到水泥砂浆内部的硅灰量减少,砂浆内部的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体含量逐渐增加, $1.5\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$  含量逐渐减少,水泥砂浆内部结构相对较疏松,从而降低了强度.分析结果表明:掺入适量的硅灰可以提高水泥后期水化反应速度,使水化产物增多,提高水泥砂浆的密实度,强化水泥砂浆的微观结构,从而提高水泥砂浆的后期强度.硅灰的优化掺量为 8%.

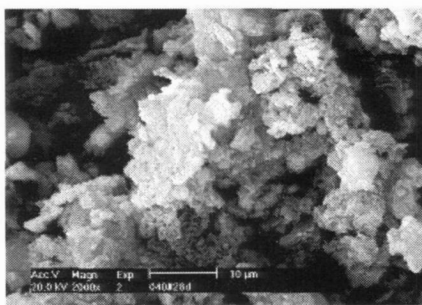


图 10 0# 试样水化 28 d 的 SEM 图

### 2.2.3 硅灰掺量对水泥砂浆 180 d 结构的影响

图 13、图 14 为 0#、8# 试样水化 180 d 的扫描电镜分析结果.从图 13、图 14 中可以看出,8# 试样中由等大颗粒聚集成的成片的水化产物相互叠加,形成层状坚固的水泥石,其水化产物的含量多于 0# 试样,致密度大于 0# 试样,因此,8# 水泥胶砂试样的 180 d 抗折与抗压强度高于 0# 试样.这可能是由于随着水化龄期的增长,水化反应不断进行,直至水泥

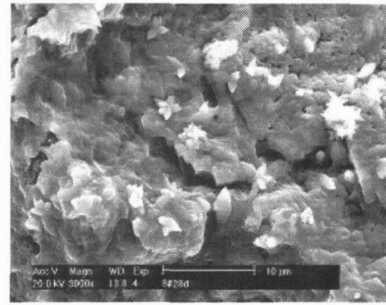


图 11 8# 试样水化 28 d 的 SEM 图

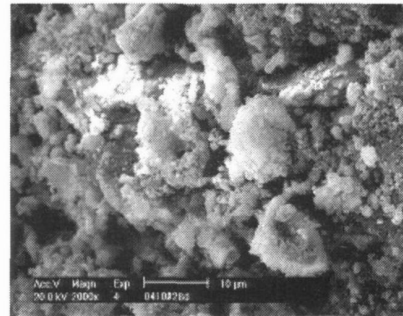


图 12 10# 试样水化 28 d 的 SEM 图

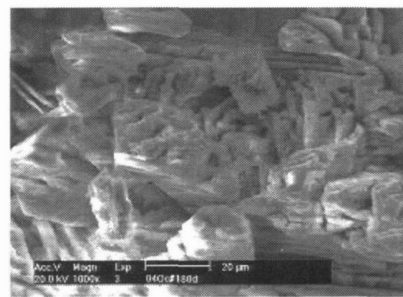


图 13 0# 试样水化 180 d 的 SEM 图

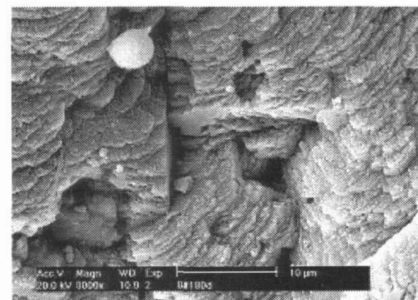


图 14 8# 试样水化 180 d 的 SEM 图

水化半年时,硅灰仍具有一定的火山灰效应,促进水泥的水化反应,使水化产物增多,提高水泥砂浆的密实度,强化水泥砂浆的微观结构,从而提高水泥砂浆的长期强度.由此可见:掺入适量的硅灰可以提高水泥砂浆的长期强度.

### 3 结 论

1) 掺入硅灰对水泥砂浆的早期强度不利,但可以提高水泥砂浆的后期强度与长期强度,硅灰的优化掺量为 8 %;

2) 掺入硅灰会降低水泥净浆的流动性,增加水泥的凝结时间,但水泥的安定性均为合格;

3) 掺入硅灰可以减缓水泥早期水化反应速度,使水化产物减少,结构疏松,使水泥砂浆早期强度有所下降;

4) 掺入适量的硅灰可以提高水泥后期水化反应速度,使水化产物增多,降低孔隙率,提高水泥砂浆的密实度,强化硬化水泥浆体的微观结构,并能促使水化反应长期进行,从而提高水泥砂浆的后期与长期强度.

#### 参考文献:

[1] 田文玉. 硅粉的研究及应用现状[J]. 重庆交通学院学

报,1998(2):100-107.

[2] 惠荣炎. 硅粉混凝土及其应用[M]. 北京:铁道出版社,1995:19-47.

[3] 杨坪,彭振斌. 硅灰在混凝土中的应用探讨[J]. 混凝土,2002(1):31-35.

[4] Marusin S L, Shotwell L B. Alkali-silica reaction in concrete caused by densified silica fume[J]. Cement and Concrete Aggregates, 2000,22(2):90-94.

[5] 李家和,盖广清,刘铁军. 双掺硅灰超细矿渣高强混凝土的研究[J]. 吉林建筑工程学院学报,2000(1):11-16.

[6] 刘旭晨,赵景海. 矿物掺合料对高强混凝土配制的影响[J]. 混凝土,2002(10):46-49.

[7] 陈瑶,张美霞. 绿色高强混凝土——硅灰混凝土[J]. 安全与环境工程,2002,9(3):33-36.

[8] 刘孔凡,焦利利. 硅粉及其在混凝土中的应用[J]. 河南大学学报,1994(12):91-94.

[9] 曹文达,曹栋. 新型混凝土及其应用[M]. 北京:金盾出版社,2001:54.

## STUDY ON EFFECT OF SILICA FUME ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF CEMENT MORTAR AND PROPERTIES OF CEMENT PASTE

YE Dong-zhong

(College of Materials Sciences and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The effect of the content of silica fume on the structure and property of the cement mortar and property of the cement paste were investigated. The results shows that the early stage rate of hydrated reaction is reduced to decrease the content of hydrated product and make the structure sparse, so that the early strength of cement mortar is reduced by adding silica fume to cement. The late stage rate of hydrated reaction is improved to increase the content of hydrated product and increase compactness of cement mortar, so that the late age strength of cement mortar is increased by adding proper content of silica fume to cement. The hydrated reaction can continue for long time, so that the long age strength of cement mortar is increased by adding proper content of silica fume to cement. The optimized content of silica fume is 8%. The flowability of cement paste is reduced and the setting time of cement is increased but the soundness is acceptable by adding silica fume to cement.

**Key words:** silica fume; cement paste; cement mortar; structure; property

(责任编辑:叶红波)