

文章编号:1674-2869(2017)05-0471-06

硅灰与氧化石墨烯对硬化水泥浆体的复合增强效应

陈亚兵¹,严泽稷²,鲁 娅³,林 康¹,李月星¹,张 芳^{1*}

1. 武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学工程学院,湖北 武汉 430074;

3. 武汉源锦商品混凝土有限公司,湖北 武汉 430064

摘 要:研究了硅灰与氧化石墨烯复掺时对硬化水泥浆体力学性能的影响.分别进行了普通水泥浆体、内掺质量分数10%的硅灰水泥、外掺质量分数0.8%的氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂(GOPCs)水泥浆体以及同时内掺硅灰与外掺GOPCs的水泥浆体的配制.对4种硬化水泥浆体的抗折强度、抗压强度以及90 d龄期孔隙率进行了测定,同时采用X射线衍射仪及扫描电子显微镜对水泥水化产物进行分析,并将4种样品的力学性能进行比较.结果表明,当掺10%硅灰时,硬化水泥浆体90 d抗压强度比空白样提高了3.6%,抗折强度提高了9.6%;当只使用氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂而不掺硅灰时,抗压强度提高了11.9%,抗折强度提高了15.3%;当硅灰与氧化石墨烯复掺时,抗压强度提高了22.7%,抗折强度提高了38.6%.孔隙率的变化以及XRD、SEM分析证实了这一结果.因此,硅灰与氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂对硬化水泥浆体具有复合增强作用.

关键词:氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂;硅灰;复合增强

中图分类号:TU599 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.05.012

Compound Enhancement Effect of Silica Fume and Graphene Oxide on Hardened Cement Paste

CHEN Yabing¹, YAN Zeji², LU Ya³, LIN Kang¹, LI Yuexing¹, ZHANG Fang^{1*}

1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Wuhan Yuanjin Reddy-mixed Concrete Co., LTD, Wuhan 430064, China

Abstract: The influences of silica fume and graphene oxide on the mechanical property of hardened cement paste were investigated. First, the ordinary cement pastes were prepared. Then the cement pastes were prepared using 10% mass fraction of silica fume, 0.8% mass fraction of graphene oxide/polycarboxylate superplasticizer (GOPCs) and silica fume/GOPCs respectively. The flexural strength, compressive strength, porosity of the samples have been tested on the 90th day. The hydration products of the samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the compressive strength and flexural strength of hardened cement paste with silica fume, GOPCs and fume/GOPCs composite respectively increase by 3.6% and 9.6%, 11.9% and 15.3%, and 22.7% and 38.6% compared with those of the ordinary hardened cement paste. The results were demonstrated by the data of porosity test, XRD and SEM images. Therefore, silica fume and GOPCs can enhance the mechanical property of hardened cement paste with a compound effect.

Keywords: graphene oxide/polycarboxylate superplasticizer; silica fume; compound enhancement

收稿日期:2017-01-06

基金项目:武汉工程大学科学研究基金(k201626);武汉市城建委科技计划项目(201610)

作者简介:陈亚兵,硕士研究生. E-mail:598221866@qq.com

*通讯作者:张 芳,博士,副教授. E-mail:582297197@qq.com

引文格式:陈亚兵,严泽稷,鲁娅,等. 硅灰与氧化石墨烯对硬化水泥浆体的复合增强效应[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(5):471-476.

CHEN Y B, YAN Z J, LU Y, et al. Compound enhancement effect of silica fume and graphene oxide on hardened cement paste[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(5):471-476.

由于房地产及基础建筑设施的飞速发展,混凝土材料因来源丰富、可塑性好、强度高,成为当今消耗量最多的建筑材料^[1].混凝土是由水泥、砂、石等组成的混合物,颗粒之间必然会有空隙,在拌制混凝土的过程中应尽量选择合适的级配以减小孔隙率进而提高混凝土的强度.因此减小混凝土中的孔隙率是提高混凝土性能的最主要方法^[2].水泥在结晶硬化的过程中会形成较杂乱的结晶水化硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$.这些结晶之间也存在空隙,对混凝土的力学性能有一定影响^[3].有研究表明,氧化石墨烯掺入水泥基材料中能减小水泥基材料的孔隙率.具有优异力学性能的石墨烯以及氧化石墨烯作为掺合料掺入水泥基材中时其本身提供力学性能外,还能调控水泥水化结晶,促进水泥的水化并形成更多C-S-H凝胶填充孔隙,氧化石墨烯片状结构使得水化产物分布更紧密,减小胶凝孔隙率^[4-6].在水泥基材料中,加入氧化石墨烯之后,由于氧化石墨烯独特的二维纳米片层结构及其优异的力学性能、大的比表面积及丰富的含氧基团,混凝土中水化矿物将在氧化石墨烯表面水化结晶从而调控水泥结晶可以显著改善混凝土的强度和韧性^[7].

硅灰是硅铁合金冶炼过程中,从电炉烟道废弃物中收集的超细粉末.硅灰的比表面积高,并具有很高的火山灰活性,能与水泥水化过程中生成的氢氧化钙反应,生成C-S-H凝胶^[8-9].然而水泥水化过程中除了生成C-S-H凝胶,还生成氢氧化钙及水化硫铝酸钙^[10-11].并且水化产物受多因素的影响,种类以及数量会有所区别,如硅灰和粉煤灰^[12-13]以及聚羧酸减水剂^[14].在氧化石墨烯水泥基材料中,除了硅酸钙水化凝胶会聚集在氧化石墨烯片状结构上以外,生成的氢氧化钙也会在氧化石墨烯片状结构上结晶,从而影响混凝土强度.

为改善上述问题,使氧化石墨烯增强的水泥基材的强度进一步提升,本文用硅灰替代部分水泥,使硅灰与氢氧化钙反应生成C-S-H凝胶,减少氢氧化钙在氧化石墨烯表面的结晶体,从而减小孔隙率以及氢氧化钙与凝胶的界面^[15-16],提升水泥基材的力学性能.这也是本文的创新点所在.本文另一个创新点在于,为了使氧化石墨烯片状结构均匀分散,从而制备出分布均匀的硅灰与氧化石墨烯复掺的水泥浆体,文中制备了氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂,通过聚羧酸减水剂的均匀吸附作用^[17]使氧化石墨烯在水泥浆体中均匀分布.

1 实验部分

1.1 实验材料

粉状石墨,质量分数98%的浓硫酸,高锰酸钾,质量分数30%的过氧化氢,质量分数98%的丙烯酸,马来酸酐,甲基烯丙基聚氧乙烯醚,硅灰,42.5华新水泥,过硫酸铵(分析纯),亚硫酸氢钠(分析纯),实验中所用的水为自来水.

1.2 氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂的合成

使用Hummer法^[18]制备氧化石墨烯(graphene oxide, GO)溶液.称取4 g石墨粉在24 mL浓 H_2SO_4 和8 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 的条件下预氧化后烘干.烘干后取2 g预氧化石墨并在100 mL浓 H_2SO_4 和3 g的 NaNO_3 开始搅拌,在冰浴下缓慢加入15 g的 KMnO_4 .添加完后升温至35℃搅拌2 h,再升温至80℃搅拌15 min.抽滤、离心洗涤后得到GO水溶液备用.

将制备得到的GO水溶液与质量分数40%的甲基烯丙基聚氧乙烯醚溶液以及过硫酸铵混合,充分搅拌后升温至80℃.缓慢滴加30%丙烯酸溶液、30%马来酸酐溶液以及1%的亚硫酸氢钠溶液.滴加完毕后保温2 h,反应完成后补充适量水调节其固含量为30%.即得到氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂(graphene oxide/polycarboxylate superplasticizer, GOPCs).并用同样方法制备的普通聚羧酸减水剂(polycarboxylate superplasticizer, PCs)作为对照.

1.3 硅灰氧化石墨烯复掺水泥浆体的制备

实验中设计水泥浆体的水胶质量比为0.3,因为掺硅灰后水泥浆体的流动性下降,为了减小浆体流动性对硬化水泥浆体强度的影响,实验过程中调节减水剂的用量使4组水泥浆体的流动度相差不大,约为240 mm左右.对于水胶质量比0.3的混凝土来说硅灰的掺量在5%~10%时混凝土的力学性能呈现上升趋势,若继续增大则性能有所下降^[19].因此,上述实验中当掺硅灰时,硅灰的掺量均控制质量分数为10%.将水泥倒入搅拌锅中边低速搅拌边加入水以及减水剂,2 min后高速搅拌2 min,然后将浆料注入40 mm×40 mm×160 mm的模具中养护.依照此方法制备4组水泥浆体试块样,分别为:不掺硅灰并使用普通减水剂样,命名为PCs-CP;不掺硅灰并使用氧化石墨烯复合减水剂样,命名为GOPCs-CP;掺硅灰使用普通减水剂样,命名为SFPCs-CP;掺硅灰使用氧化石墨烯复合减水剂样,命名为SFGOPCs-CP.

1.4 表征与测试

对合成的 GOPCs 以及 PCs 减水剂进行傅立叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) 表征,对制备的 4 组硬化水泥浆体进行力学性能测试 (抗折强度以及抗压强度),利用浸水法对 4 组硬化水泥浆体进行孔隙率测定,对 4 组硬化水泥浆体进行 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 分析,采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对 4 组硬化水泥浆体进行断面扫描。

2 结果与讨论

2.1 氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂的结构

GOPCs 与 PCs 减水剂的 FT-IR 如图 1 所示。曲线 a 为 GOPCs 的红外吸收峰,曲线 b 为 PCs 的红外吸收峰。图 1 中 $3\,441\text{ cm}^{-1}$ 处为游离羟基的吸收峰。并且氧化石墨烯复合减水剂在该处峰强度大于普通减水剂,是由于氧化石墨烯上含有丰富的羟基,而且由于缔合氢键作用曲线 a 在 $3\,240\text{ cm}^{-1}$ 处出现一个吸收峰,说明氧化石墨烯与聚羧酸减水剂分子之间形成了缔合氢键。 $2\,876\text{ cm}^{-1}$ 处为饱和 C—H 的伸缩振动峰, $1\,731\text{ cm}^{-1}$ 处为 C=O 的伸缩振动峰,是由于分子间羧基缔合而形成。 $1\,643\text{ cm}^{-1}$ 处为 C=C 键的吸收峰,说明样品中存在未聚合的单体。 $1\,454\text{ cm}^{-1}$ 处为 C—H 的反对称伸缩振动峰。 $1\,351\text{ cm}^{-1}$ 为羟基 O—H 面内弯曲振动。 $1\,250\text{ cm}^{-1}$ 处为 C—C 骨架振动峰。 $1\,105\text{ cm}^{-1}$ 处为 C—O—C 的不对称伸缩振动峰。而且曲线 a 在此处的吸收强度较曲线 b 更强,是因为氧化石墨烯表面也存在大量的醚键。由红外光谱可知氧化石墨烯与聚羧酸减水剂分子之间通过缔合氢键使聚羧酸减水剂分子附着在氧化石墨烯表面。

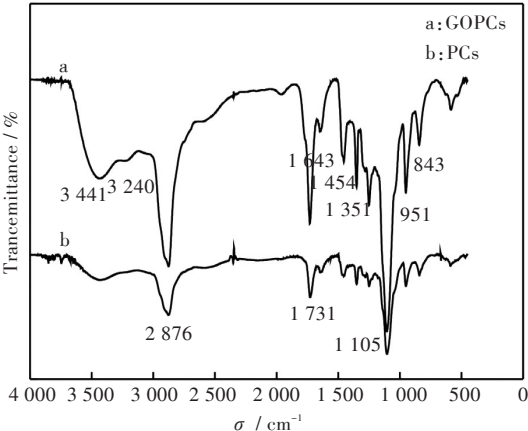


图1 氧化石墨烯复合减水剂(GOPCs)与普通减水剂(PCs)的FT-IR

Fig. 1 FT-IR spectra of GOPCs and PCs

2.2 水泥浆体的工作性能与力学性能

实验中以硅灰为矿物掺和料,以实验合成的氧化石墨烯复合减水剂以及普通减水剂为化学外加剂制备水泥浆体。浆体的水胶质量比均为 0.3。实验过程中,由于掺硅灰后水泥浆体的流动性下降比较严重,因此通过调节减水剂的用量使 4 组水泥浆体的流动度大体保持一致。另外,为了使 GO 的用量保持一致,都使用 0.8% 掺量的 GOPCs,当掺硅灰时,调节流动度所使用的额外减水剂用普通 PCs 代替。制备的上述 4 组水泥浆体的流动度如表 1 所示。分别测量 3 d、7 d、28 d、90 d 龄期强度,结果如图 2 所示。从图中曲线可知,相较于只使用普通减水剂制备的水泥浆体,PCs-CP 试块,当同时掺硅灰并使用含氧化石墨烯的复合减水剂时,制备的水泥浆体试块 SFGOPCs-CP 强度最高。当只掺 10% 的硅灰时,FSPCs-CP 试块相较于普通 PCs-CP 试块,其 90 d 抗压强度提升为 3.6%,抗折强度提升为 9.6%。28 d 抗压强度相对于 PCs-CP 试块有所下降,这可能是由于水泥浆体流动度相对较小造成的;当只使用氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂而不掺硅灰时,GOPCs-CP 试块相较于普通 PCs-CP 试块,抗压强度提升为 11.9%,抗折强度提升为 15.3%;当同时掺 10% 硅灰并使用氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂时,SFGOPCs-CP 试块相较于普通 PCs-CP 试块,抗压强度与抗折强度均提升最大,分别为 22.7%、38.6%。由上述结果可知,硅灰与氧化石墨烯共同作用于水泥浆体时具有复合增强效果。

表1 水泥浆体流动度
Tab. 1 Fluidity of cement paste

样品 sample	水胶质量比 water cement ratio	减水剂质量掺量 dosage of superplasticizer	流动度 fluidity / mm
PCs-CP	0.3	0.8% PCs	249
GOPCs-CP	0.3	0.8% GOPCs	252
SFPCs-CP	0.3	2.0% PCs	231
SFGOPCs-CP	0.3	0.8% GOPCs+ 1.2% PCs	235

2.3 硬化水泥浆体微观孔隙率

实验中测量上述 4 组实验样品 90 d 龄期孔隙率。测量方法根据阿基米德原理使用浸水法测量。先将样品于烘箱中烘干至恒重,测得样品的干重为 m_0 ,然后将样品置于水中浸泡 12 h,再煮沸 4 h 后冷却至室温继续浸泡 12 h,让水充分渗透进水泥浆体孔隙中。浸泡充分后取出称其湿重 m_1 ,然

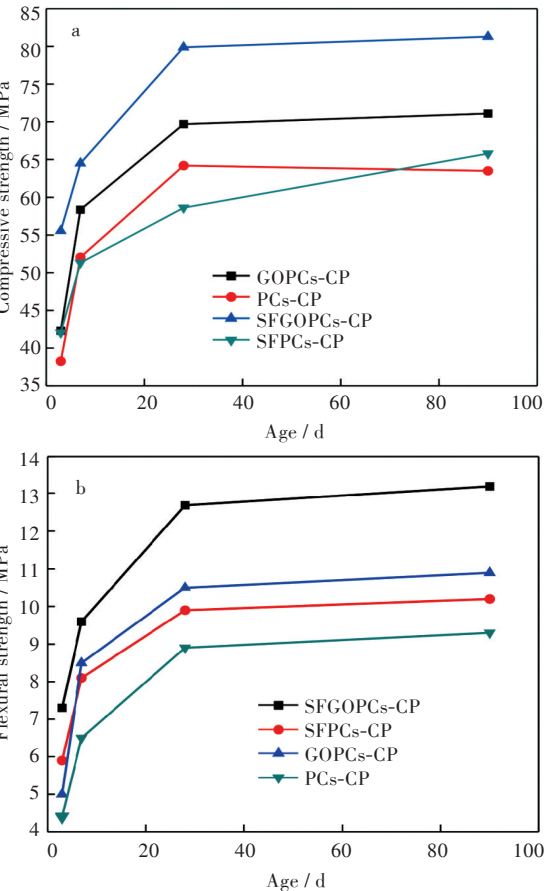


图2 硬化水泥浆体力学性能:(a)抗压强度;(b)抗折强度
Fig. 2 Mechanical properties of hardened cement paste:
(a)Compressive strength;(b)Flexural strength

后用浸水天平测得其在水中重量 m_2 ,根据公式

$$P = \frac{m_1 - m_0}{m_1 - m_2} \times 100\%$$

计算孔隙率. 其结果如表 2 所示. 由表 2 可知,当不掺硅灰并使用普通减水剂时,测得样品的孔隙率为 30.7%. 当单独掺硅灰或者单独使用氧化石墨烯复合减水剂时,都能减小水泥浆体的孔隙率,但是单独使用氧化石墨烯时水泥浆体孔隙率更低. 当同时掺硅灰并使用氧化石墨烯复合减水剂时,水泥浆体孔隙率最低,为 17.2%. 说明硅灰与氧化石墨烯的协同减小水泥浆体的孔隙率,从而增强水泥浆体的强度.

表 2 硬化水泥浆体的孔隙率

Tab. 2 Porosities of hardened cement paste				
样品 sample	干重 dry weight / g	湿重 wet weight / g	浸水重量 weight in water / g	孔隙率 porosity / %
GOPCs-CP	52.6	58.7	29.9	21.1
PCs-CP	66.2	78.8	37.9	30.7
SFGOPCs-CP	58.8	64.4	31.8	17.2
SFPCs-CP	49.4	57.3	27.6	26.4

2.4 硬化水泥浆体水化产物分析

为了分析硅灰对氧化石墨烯增强的水泥基材料水化产物的影响,将上述制备的 4 组样品进行 XRD 衍射分析,测得其 60 d 的 XRD 图如图 3 所示. 由图 3 可知,无论是否掺硅灰以及是否使用含有氧化石墨烯的 GOPCs 减水剂,硬化水泥浆体都含有 3 种矿物,分别为水泥水化后生成的氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、钙矾石 (ettringite, AFt)、以及未水化的硅酸三钙 (C_3S). 图中 GOPCs-CP 组 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰最强,说明氧化石墨烯掺入后促进了水泥颗粒的水化. 当掺硅灰后,图中 SFPCs-CP 以及 SFGOPCs-CP,在 26.32° 处出现 SiO_2 的衍射峰,这是因为硅灰没有与氢氧化钙完全反应,并且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰强度明显减弱,说明掺入硅灰后,硅灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应使硬化水泥浆体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少. 由此可以得出,硅灰并不会影响水泥水化产物的种类,但是对水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量有影响. 并且当硅灰与含有氧化石墨烯的 GOPCs 减水剂共同作用时,图中 SFGOPCs-CP 曲线, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰最弱. 说明硅灰与氧化石墨烯共同作用时,硅灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应更充分,从而生成更多 C-S-H 凝胶,减小硬化水泥浆体中的孔隙率.

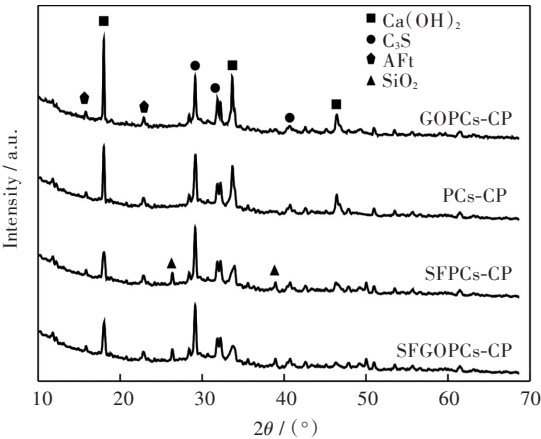


图3 硬化水泥浆体的 XRD 图
Fig. 3 XRD patterns of hardened cement paste

图 4 为上述硬化水泥浆体的断面 SEM 照片. 对比图 4(a)PCs-CP 硬化水泥浆体,当只掺氧化石墨烯时 (GOPCs-CP, 图中 4(b)), 可以看到水化生成的 C-S-H 凝胶更密实,并且呈现一定的大体积波纹状,这是因为水化产物在氧化石墨烯片上结晶形成的结果,同时也能看到有很多小的片状,其为片状的氢氧化钙,说明水化生成的氢氧化钙也聚集在氧化石墨烯片层结构上. 当只掺入硅灰时 (SFPCs-CP, 图 4(c)), 由于硅灰与水化生成的氢氧

化钙反应生成C-S-H凝胶,图中小尺寸的片状结构明显减少,但能看到基体中存在很多毛细孔.当同时掺硅灰与氧化石墨烯时(SFGOPCs-CP,图4(d)),能看到基体中生成了呈波纹形的C-S-H凝

胶,并且小尺寸片状结构也较少,毛细孔明显减少,更密实,证实了图3中的说法.上述结果说明,当硅灰与氧化石墨烯共同掺入水泥基体中时,得到了更密实,孔隙率更小的硬化水泥浆体.

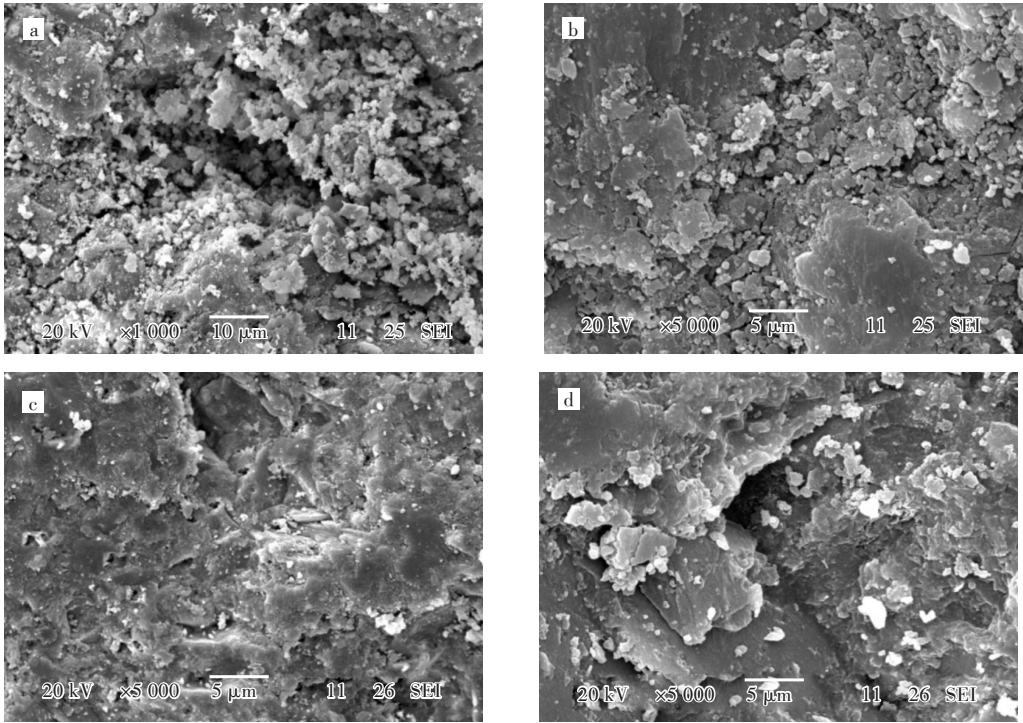


图4 (a) PCs-CP、(b) GOPCs-CP、(c) SFPCs-CP、(d) SFGOPCs-CP的断面SEM图
Fig. 4 SEM images of (a) PCs-CP, (b) GOPCs-CP, (c) SFPCs-CP and (d) SFGOPCs-CP

2.5 作用机理

水泥基材料是一种非均质多物相组成的混合结构材料,由各种水化产物、残留熟料、孔隙以及存在于孔隙中的水组成.其中孔隙率的大小直接影响水泥基体的力学性能.氧化石墨烯掺入水泥基体中时,作为二维片状结构,使水化产物在氧化石墨烯表面聚集从而形成更致密的C-S-H胶凝,并促进水泥水化,减小胶凝孔隙率使水泥基体强度提升,但此过程中也会生成大量的氢氧化钙晶体,在氧化石墨烯片层上聚集,增加了凝胶与氢氧化钙的界面,如图4(b).然而硅灰作为具有火山灰活性的矿物掺合料能与水化反应生成的氢氧化钙反应生成C-S-H凝胶,从而减少氢氧化钙在氧化石墨烯片上的聚集生成更多C-S-H凝胶,进一步减小胶凝孔隙率,并减小了C-S-H与氢氧化钙晶体的界面,从而使硬化水泥浆体的力学性能得到进一步提升.

3 结 语

本文以硅灰为矿物掺合料,以氧化石墨烯复合聚羧酸减水剂为外加剂制备硅灰与氧化石墨烯

复合水泥浆体,研究硅灰与氧化石墨烯对于水泥浆体的力学性能的影响.制备得到的硅灰与氧化石墨烯复掺硬化水泥浆体的力学性能提升很大.氧化石墨烯的掺入调节了水化产物的排布,使C-S-H凝胶更致密,孔隙率更小,强度得到提升,但生成的氢氧化钙较多.硅灰掺入与水泥水化生成氢氧化钙反应生成C-S-H凝胶,同样能减小水泥浆体的孔隙率从而使水泥浆体的强度得到提升.硅灰单独掺入水泥浆体以及氧化石墨烯单独掺入水泥浆体作用时,硬化水泥浆体相较于普通硬化水泥浆体的孔隙率都有所减小,强度提升分别为3.6%、11.9%.但当硅灰与氧化石墨烯共同掺入水泥浆体作用时,二者共同调节水泥矿物水化结晶,更有效的减小了水泥浆体的孔隙率,对硬化水泥浆体强度的提升也最大,为22.7%.因此硅灰与氧化石墨烯对于水泥浆体具有复合增强作用.

参考文献:

[1] 孙艳秋,曾志兴. 混凝土改性的研究[J]. 基建优化, 2006,27(1):112-114.
SUN Y Q,ZENG Z X. Study on modification of concrete

- [J]. Optimization of Capital Construction, 2006, 27 (1) : 112-114.
- [2] 水中和,魏小胜,王栋民. 现代混凝土科学技术[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [3] STAROKON E V, DUBKOV K A, BABUSKIN D E, et al. Liquid phase oxidation of alkenes with nitrous oxide to carbonyl compounds [J]. Advanced Synthesis & Catalysis, 2004, 346 (2/3) : 268-274.
- [4] LEE C, WEI X, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. Science, 2008, 321 (5887) : 385-388.
- [5] LIN C Q, WEI W, HUA Y H. Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2016, 89: 128-133.
- [6] ZHU P, LI H, LING Q, et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite [J]. Cement & Concrete Composites, 2015, 58: 140-147.
- [7] TONG T, FAN Z, LIU Q, et al. Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro-and macro-properties of cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 102-114.
- [8] MOHAMMAD I K, RAFAT S. Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 57: 30-35.
- [9] 李建权,许红升,谢红波,等. 硅灰改性水泥/石灰砂浆微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(4) : 66-70.
- LI J Q, XU H S, XIE H B, et al. Microstructural investigation of silica fume modified cement /lime mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(4) : 66-70.
- [10] 何小芳,张亚爽,李小庆,等. 水泥水化产物的热分析研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2012, 5 (31) : 1170-1174.
- HE X F, ZHANG Y S, LI X Q, et al. Research progress of thermal analysis in cement hydration [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 5 (31) : 1170-1174.
- [11] 李林香,谢永江,冯仲伟,等. 水泥水化机理及其研究方法[J]. 混凝土, 2011(6): 76-80.
- LI L X, XIE Y J, FENG Z W, et al. Cement hydration mechanism and research methods [J]. Concrete, 2011 (6) : 76-80.
- [12] SONG H W, JANG J W, SARASWATHY V, et al. An estimation of the diffusivity of silicafume concrete [J]. Building and Environment, 2007, 42(3) : 1358-1367.
- [13] MOHAMMAD S, ALIREZA R, HAMED L. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10) : 769-775.
- [14] 陈怀成,钱春香,赵飞,等. 聚羧酸系减水剂对水泥水化产物的影响[J]. 东南大学学报, 2015, 45(4) : 745-749.
- CHEN H C, QIAN C X, ZHAO F, et al. Effect of polycarboxylate-type superplasticizer on hydration products of cement [J]. Journal of Southeast University, 2015, 45(4) : 745-749.
- [15] SIMEONOV P, AHAMAD S. Effect of transition zone on the elastic behavior of cement-based composites [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (1) : 165-176.
- [16] ZHAO X H, CHEN W F. Effective elastic moduli of concrete with interface layer [J]. Computers and Structures, 1998, 66(2/3) : 275-288.
- [17] 张国政,唐林生. 醚型聚羧酸减水剂的作用机理研究[J]. 天津化工, 2011, 25 (1) : 25-27.
- ZHANG G Z, TANG L S. Study on the action mechanism of ether-type polycarboxylate water reducer [J]. Tianjin Chemical Industry, 2011, 25 (1) : 25-27.
- [18] HUMMERS W S, OFFEMAN R E. Preparation of graphitic oxide [J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(6) : 1339.
- [19] 何小芳,卢军太,李小楠,等. 硅灰对混凝土性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32 (3) : 423-428.
- HE X F, LU J T, LI X N, et al. Progress in research of silica fume on the performance of cement concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32 (3) : 423-428.

本文编辑:苗 变