

文章编号:1007-9629(2023)09-0963-08

PFOTES 对水泥基材料防覆冰性能的影响及机理

陈楚欣^{1,2}, 刘斯凤^{1,2,3,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 3. 同济大学 工程结构服役性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:研究了十三氟辛基三乙氧基硅烷(PFOTES)对水泥基材料工作性能、防覆冰性能和微观性能的影响,并通过热重-差示扫描量热分析(TG-DSC)和X射线衍射(XRD)探究了水泥水化产物的化学组成及物相组成.结果表明:掺入PFOTES能延长水泥净浆的凝结时间;低PFOTES掺量对减小冰附着力与增大接触角的效果较为明显,随着PFOTES掺量的进一步提升,冰附着力与接触角都基本保持不变;掺入PFOTES后,改性砂浆的吸水率减小、抗压强度降低、孔隙率增大;微观测试证明,PFOTES可以延缓水泥水化,但并未生成新的水化产物.

关键词:硅酸盐水泥;十三氟辛基三乙氧基硅烷;防覆冰性能;冰附着力

中图分类号:TV42⁺1.5

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.003

Influence of PFOTES on Anti-icing Performance of Cementitious Materials and Its Mechanism

CHEN Chuxin^{1,2}, LIU Sifeng^{1,2,3,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Influences of perfluorooctyltriethoxysilane (PFOTES) on the workability, anti-icing performance and microscopic properties of cementitious materials were studied. The chemical composition and physical phases of the cement hydration products were also investigated by thermogravimetric-differential scanning calorimeter (TG-DSC) and X-ray diffractometer (XRD). The results show that the incorporation of PFOTES can prolong the setting time of cement paste. The impacts of low PFOTES content to the reduction of ice adhesion and increase of contact angle are more significant, and both ice adhesion and contact angle remain basically the same with further increase of PFOTES content. With PFOTES, the water absorption of the modified mortar reduces, the compressive strength decreases and the porosity increases. It is proved by microscopic tests that PFOTES delays the hydration of cement but does not produce new hydration products.

Key words: Portland cement; perfluorooctyltriethoxysilane (PFOTES); anti-icing performance; ice adhesion

南水北调工程的输水干渠面板常由混凝土制成,在北方干渠水位变动区域,混凝土面板出现了整体剥落瓦解现象,这是冰雍导致的破坏^[1].由于混

凝土表面粗糙多孔,水易通过开口孔隙向其内部渗入,结冰后与混凝土间存在锚固.冰面若抬高/降低,锚固作用对混凝土面板会产生上推/下拔的力^[2].循环

收稿日期:2022-12-08; 修订日期:2023-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52179122)

第一作者:陈楚欣(1997—),女,浙江嘉兴人,同济大学硕士生.E-mail:2030623@tongji.edu.cn

通讯作者:刘斯凤(1970—),女,湖北江陵人,同济大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:lsf@tongji.edu.cn

遭受冰雍的混凝土面板易拉裂.因此,降低冰与混凝土间的附着力是防止冰雍破坏的首要考虑因素之一.

目前,减小材料表面冰附着力、提升防覆冰性能的研究多见于电网架空线路、风电叶片设备等^[3-4].对于混凝土材料,常通过构造表面粗糙度、降低表面能等方法来提升其防覆冰性能.Shen等^[5]基于水泥水化形成的粗糙度,使用全氟癸基三乙氧基硅烷对混凝土表面进行低表面能修饰,其冰附着力远低于未改性混凝土,但该外加剂单价昂贵.也有研究者通过制备SiO₂微纳米与硅醇烷涂层等^[6-7]来达到表面防覆冰的目的.尽管关于混凝土防覆冰涂层的研究不断涌现,但涂层在实际使用中易老化、开裂^[8],导致其防覆冰性能下降.鉴于此,本文选用十三氟辛基三乙氧基

硅烷(PFOTES)来提升水泥基材料的防覆冰性能.PFOTES含有多个氟基团(-F),可降低基材表面能.通过制备PFOTES改性水泥砂浆,研究PFOTES改性水泥砂浆的防覆冰性能、改性砂浆表面冰附着力以及宏观性能、微观结构与微观物相的变化规律.

1 试验

1.1 原材料

水泥为P·I 42.5硅酸盐水泥,其化学组成¹⁾如表1所示;砂为细度模数2.65的石英砂;PFOTES改性剂的相对分子质量为468,分子式为C₁₁H₁₃F₁₃O₃Si,分子结构式如图1所示.

表1 水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition of cement

										w/%
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	IL	f-CaO	Na ₂ O	Cl ⁻	
63.32	20.58	5.03	3.38	2.06	2.01	1.76	0.68	0.55	0.02	

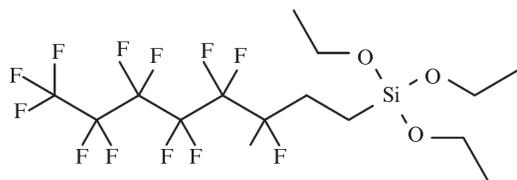


图1 PFOTES的分子结构式

Fig. 1 Molecular structure formula of PFOTES

1.2 试件制备

设计试件的水灰比为0.45,灰砂比为1:3,PFOTES掺量 w (PFOTES)为水泥质量的0%、0.1%、0.3%、0.6%及1.0%,对应试件分别记作S0(空白组)、S1、S3、S6、S10.成型尺寸为20 mm×20 mm×20 mm的净浆试块,脱模后在标准条件下养护3、28 d,然后进行表面接触角测试.成型尺寸为40 mm×40 mm×10 mm的板状砂浆试块,脱模养护后在标准条件下养护3、28 d,然后进行冰附着力测试.成型尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的砂浆试块,脱模后在标准条件下养护3、28 d,然后进行吸水率与力学性能测试.

1.3 测试方法

根据GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行凝结时间测试.

将注满水的离心管倒置于砂浆表面,常温下放置0.5 h,再在-25℃的条件下结冰4 h后,进行冰附着力测试,如图2所示.将推力计固定在手动螺旋式

推力计测试台上,表面粘有冰块的砂浆基底同样固定于测试台上.依靠推力计的平测头推冰块测得冰附着力的,推力计精确度为0.01 N,测试时设置峰值保持不变.

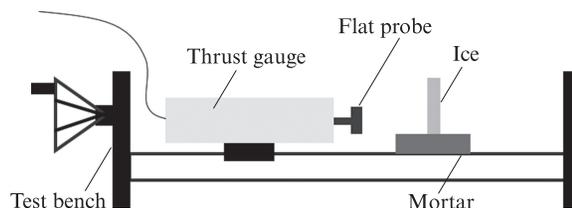


图2 冰附着力测试装置

Fig. 2 Ice adhesion test benches

根据GB/T 30693—2014《塑料薄膜与水接触角的测量》进行表面接触角测试,所用仪器为德国KRUSS标准型DSA25接触角测量仪,精度为0.1°.

根据JGJ/T70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行吸水率试验.

根据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行力学性能测试.

在Auto Pore IV 9600压汞仪上进行孔结构分析,水银温度为20℃,水银接触角为130°.

X射线衍射(XRD)分析使用德国Bruker D2 Phaser多功能X射线衍射仪,铜靶,扫描速度为5(°)/min,扫描角度为5°~80°.

通过Netzsch STA 409热分析仪进行热重-差示

1) 文中涉及的组成、掺量和灰水比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

扫描量热(TG-DSC)分析,在程序控制下,干燥的粉末样品在氮气环境下从20℃升至1000℃,升温速率为10℃/min.

2 结果与讨论

2.1 凝结时间

凝结时间是评判砂浆工作性能的重要因素,为了更加直观地探究PFOTES对水泥凝结时间的影响,选择水泥净浆进行试验.不同PFOTES掺量下水泥净浆的凝结时间如图3所示.由图3可见,随着PFOTES掺量的提高,水泥净浆的初凝时间和终凝时间均有所延长,当PFOTES掺量为1.0%时,初凝时间和终凝时间较空白组分别延长了22、23 min.这种现象可以解释为PFOTES中低表面能的一CF₂、一CF₃基团包裹于水泥颗粒表面^[5],阻碍了水泥水化,同时PFOTES中硅烷氧基官能团的水解消耗了原本水泥水化所需的部分水^[9],进而导致水泥水化延缓.

2.2 冰附着力

不同PFOTES掺量下砂浆表面的冰附着力如图4所示.由图4可见:随着砂浆中PFOTES掺量的增加,砂浆表面的冰附着力逐渐降低;养护龄期为3 d时,0.1%、0.3%、0.6%和1.0%PFOTES掺量下砂浆的冰附着力相对于空白组分别减小了

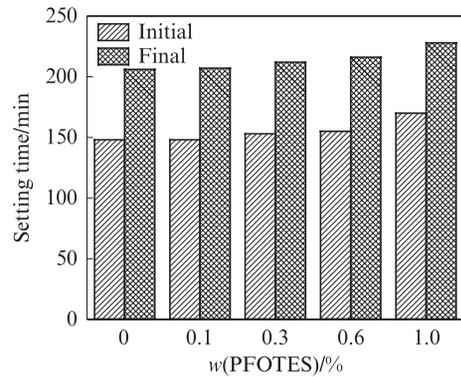
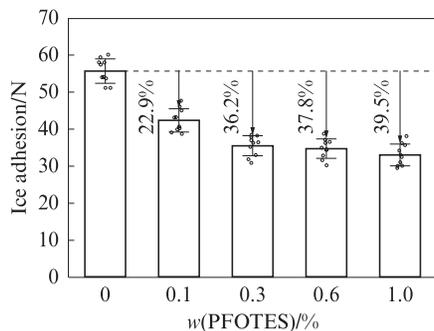


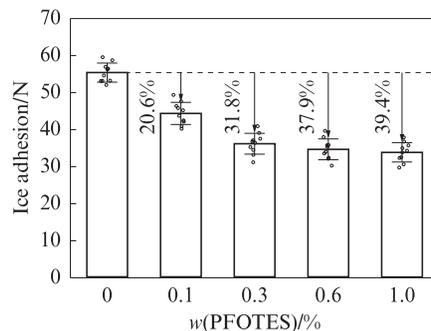
图3 不同PFOTES掺量下水泥净浆的凝结时间
Fig. 3 Setting time of cement pastes with different PFOTES contents

22.9%、36.2%、39.8%、39.5%;在低掺量情况下,冰附着力的降低幅度随着PFOTES掺量的增加而增大;当PFOTES掺量提高至0.6%时,增大PFOTES掺量对于冰附着力的改善效果并不明显,降低幅度在36.2%~39.5%之间;在养护龄期为28 d时,PFOTES掺量对砂浆表面冰附着力的影响趋势与3 d龄期时基本一致.

PFOTES的掺入对砂浆表面冰附着力的削弱可能与PFOTES的低表面能特性有关,因为PFOTES中含有多个低表面能的氟基团(—F),如图1所示.



(a) 3 d



(b) 28 d

图4 不同PFOTES掺量下砂浆表面的冰附着力

Fig. 4 Ice adhesion on mortar surfaces with different PFOTES contents

2.3 表面接触角

为了进一步验证掺入PFOTES对表面能的影响规律,选择净浆样品对其表面接触角(θ)进行了测试.图5给出了不同PFOTES掺量下水泥净浆的表面接触角.由图5可见:掺入PFOTES后,水泥净浆由亲水性转为疏水性,随着PFOTES掺量的增加,表面接触角也随之增大;PFOTES掺量为0.1%时,表面接触角增至86.6°,但仍表现为亲水性^[10-11];PFOTES掺量为0.3%时,表面接触角为102.6°.已知PFOTES的分子结构式如图1所示,其水解后与—OH进行脱

水反应,与水泥颗粒的反应示意图如图6所示.由图6可见:水泥颗粒被低表面能的一CF₂、一CF₃基团包裹^[5];氟原子结构的最外层有7个电子,和其他元素相结合时易夺取电子构成最外层8个电子的稳定结构,导致其较难与其他基团发生分子间作用,使其呈现出较低的表面能^[12].因此,掺入含有较多—CF₂、—CF₃基团的PFOTES会降低水泥基材料的表面能,在使材料表现出疏水特性的同时还增大了材料的表面接触角.

当冰黏附于材料表面时,环境温度趋于0℃,此

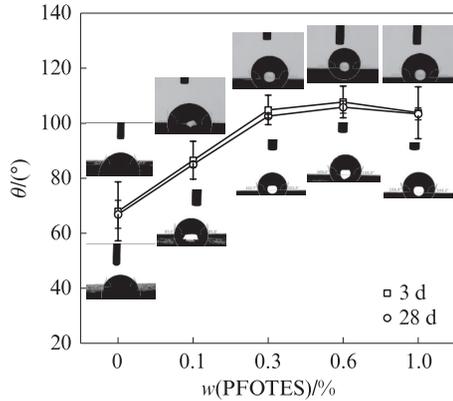


图5 不同PFOTES掺量下水泥净浆的表面接触角
Fig. 5 Contact angles of cement pastes with different PFOTES contents

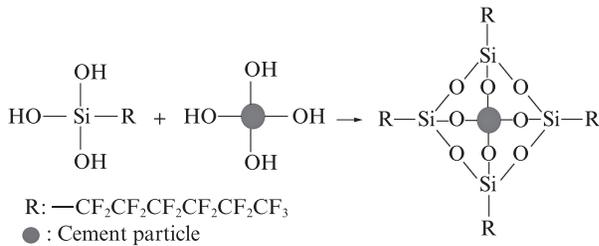


图6 PFOTES与水泥颗粒的反应
Fig. 6 Reaction of PFOTES with cement particles

时材料接触界面上同时存在液态水与固态冰.在大气压下冰水混合物的张力与液态水的表面张力基本相同,因而可以用表面接触角的大小来评价材料表面黏附能(W)的大小.黏附能被定义为液相与固相的相互作用力,在冰黏附过程中,接触界面上存在水和冰膜层,因此黏附能在一定程度上又能用来评价冰附着力^[13-14].如式(1)所示,采用Young-Dupree方程来计算黏附能.

$$W = \gamma(1 + \cos \theta) \quad (1)$$

式中:γ为液体表面张力,0℃时水的表面张力为75.64 mN/m^[15].

表2给出了不同PFOTES掺量下水泥净浆的黏附能.由表2可知:养护28 d后,0.1%、0.3%、0.6%和1.0%PFOTES掺量下水泥净浆的黏附能相对于空白组分别降低了21.9%、43.8%、47.8%、44.8%;水泥净浆表面的黏附能随PFOTES掺量增加而下降,且PFOTES掺量越大,黏附能的下降幅度越大;对比3、28 d龄期下PFOTES改性水泥净浆表面的黏附能,可以发现养护龄期对黏附能几乎没有影响.试件表面的黏附能越低,其表面冰附着力就越小.因此,PFOTES的掺入可以增大水泥净浆表面的接触角、减小表面的黏附能,同时降低净浆表面的冰附着力.

表2 不同PFOTES掺量下水泥净浆的黏附能
Table 2 Adhesion energy of cement pastes with different PFOTES contents

Specimen	θ/(°)		W/(mN·m ⁻¹)	
	3 d	28 d	3 d	28 d
S0	68.0	66.9	103.99	105.33
S1	86.6	85.0	80.15	82.25
S3	104.8	102.6	56.34	59.16
S6	107.7	105.9	52.67	54.94
S10	103.8	103.4	57.62	58.13

2.4 吸水率

图7给出了不同PFOTES掺量下砂浆的吸水率.由图7(a)可知,随着PFOTES掺量的增大,砂浆的3 d吸水率逐渐降低.这可能是由于随着PFOTES掺量的增大,含氟基团的数量也在增加,使得砂浆所表现出来的表面能降低.前24 h砂浆吸水率的增速较快,24 h后趋于平稳.对比图7(b)发现,砂浆的28 d

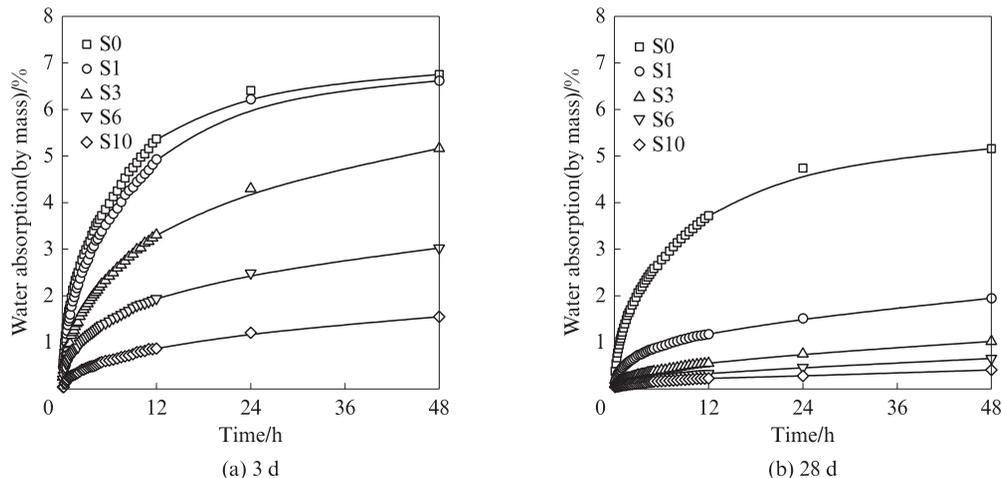


图7 不同PFOTES掺量下砂浆的吸水率
Fig. 7 Water absorption of mortars with different PFOTES contents

吸水率也随着PFOTES掺量的增加而减小,且相同PFOTES掺量下,砂浆的养护龄期越长,其吸水率越低.这是因为随着龄期的增长,水化仍在进行,生成的水化产物填补了部分孔隙^[16].

2.5 力学性能

图8给出了不同PFOTES掺量下水泥砂浆的力学性能.由图8(a)可见:当养护时间为3 d时,PFOTES掺量为0.1%、0.3%、0.6%与1.0%的砂浆抗压强度分别比空白组降低了13.4%、17.9%、

11.5%、8.6%;当砂浆试块养护至28 d时,PFOTES掺量为0.1%、0.3%、0.6%与1.0%的砂浆抗压强度分别比空白组下降了18.4%、18.4%、18.8%、21.9%.可见,随着养护龄期的增加,掺入PFOTES后砂浆的抗压强度下降明显,与空白组的差距进一步扩大.这可能是因为PFOTES没有参与水泥的水化,从而在硬化水泥浆体中形成了缺陷,导致砂浆力学性能下降^[17].由图8(b)可见,PFOTES的掺入还会导致砂浆的抗折强度下降.

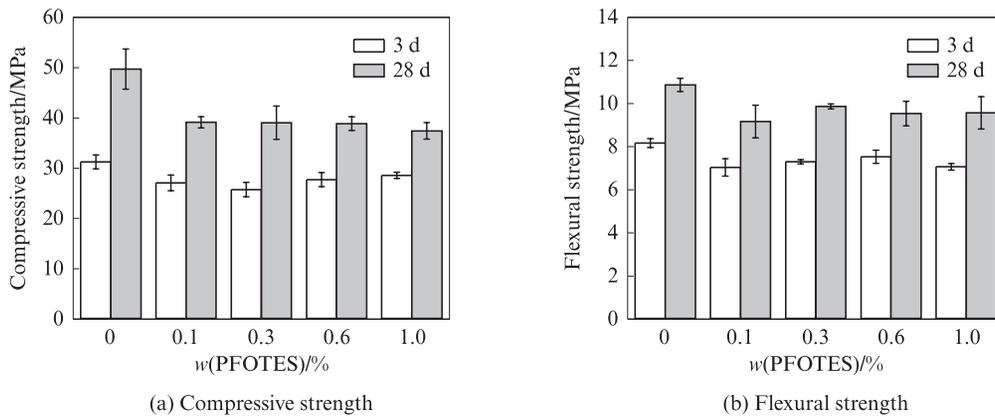


图8 不同PFOTES掺量下水泥砂浆的力学性能
Fig. 8 Mechanical properties of mortars with different PFOTES contents

2.6 孔结构

图9为养护28 d后PFOTES改性水泥砂浆的孔结构分析.根据文献[18],可将孔隙分为如下4类:孔径 $d \leq 20$ nm的无害孔、 $20 \text{ nm} < d \leq 50$ nm的少害孔、 $50 \text{ nm} < d \leq 200$ nm的有害孔、 $d > 200$ nm的多害孔.由压汞法测得,PFOTES掺量为0%、0.1%与0.6%时砂浆的总孔隙率(体积分数)分别为32.20%、35.12%、36.08%,说明掺入PFOTES使得砂浆的总孔隙率略有增加.一般来说,总孔隙率的增加需要与4种不同类型的孔隙占比相结合考虑.因此,计算了

无害孔、少害孔、有害孔与多害孔的体积分数,如图9(b)所示.由图9(b)可知,PFOTES的掺入促进了水泥砂浆中 $20 \text{ nm} < d \leq 50$ nm的少害孔转化为 $50 \text{ nm} < d \leq 200$ nm的有害孔,同时也使得总孔隙率有所提升.而抗压强度的大小与较大孔径的孔隙联系更为紧密,因此掺入PFOTES使得水泥砂浆中有害孔的体积分数增大,这也是PFOTES改性砂浆强度下降的原因之一.

2.7 XRD分析

通过XRD对不同PFOTES掺量下水泥净浆的

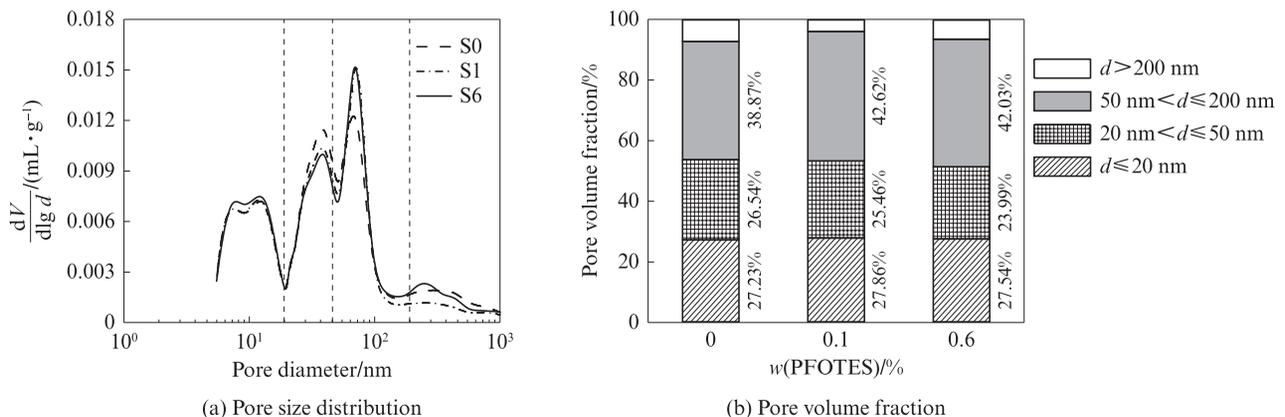


图9 养护28 d后PFOTES改性水泥砂浆的孔结构分析
Fig. 9 Pore structure analysis of PFOTES modified cement mortars at 28 d

相组成进行研究,得到其养护3、28 d时的XRD图谱,如图10所示.从图10可以观察到,各试件均存在未水化的水泥熟料硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)和水化产物氢氧化钙(CH)、钙矾石(AFt)的衍射峰^[19],不存在新的晶相.这说明随着PFOTES掺量的增加,不同组别硬化砂浆在不同龄期下并无新的水化产物生成.水泥水化的主要产物CH的衍射峰主要出现在18°、34°和50°处;C₃S和C₂S作为未水化的水泥熟料,其衍射峰分别出现在29°、31°和

32°处^[20].由3 d时的XRD图谱可见,水泥净浆在掺入不同掺量的PFOTES后,各晶体的衍射峰强度较为接近,在34°处CH的衍射峰强度随着PFOTES掺量的增加略有下降,说明PFOTES的掺量越高,水化产物的衍射峰强度越低.这表明PFOTES的掺入对CH的衍射峰强度产生了影响.在组成相同的情况下,随着养护龄期从3 d增至28 d时,改性水泥净浆中C₃S和C₂S的衍射峰强度略有下降,说明随着龄期的增长水化反应仍在继续.

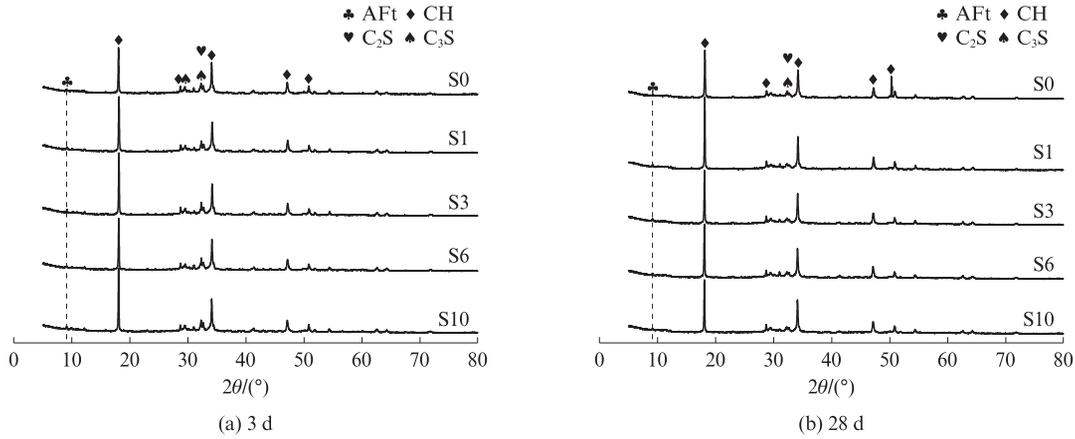


图10 不同PFOTES掺量下水泥净浆的XRD图谱
Fig. 10 XRD patterns of cement pastes with different PFOTES contents

2.8 TG-DSC分析

利用TG-DSC探究PFOTES对于水泥水化产物化学组成的影响规律.图11为不同龄期时,不同PFOTES掺量下水泥净浆的TG-DSC曲线.从图11中水泥净浆的TG曲线可以看出,主要存在3个阶段的失重^[21]:第1阶段在100℃左右,对应C-S-H凝胶脱水和AFt的分解损失;第2阶段对应水泥水化产物之一的CH在450℃左右时的分解;第3阶段在700℃左右,对应CH碳化后生成的CaCO₃分解.相应地,在图11的DSC曲线中也可以看到对应的吸热

峰.当温度升高至450℃左右时,CH会分解为水和氧化钙,因此在加热过程中水的损失量可用于计算CH的含量 w_{CH} .计算式如下:

$$w_{CH} = w_w \frac{M_{CH}}{M_w} \tag{2}$$

式中: w_w 为升温过程中水的质量损失率; M_{CH} 为CH的相对分子质量; M_w 为水的相对分子质量.

CH含量的计算结果如图12所示.由图12可见:当PFOTES掺量从0%增至0.6%时,CH的含量减少了3%;PFOTES的掺量越大,CH的含量越低.结

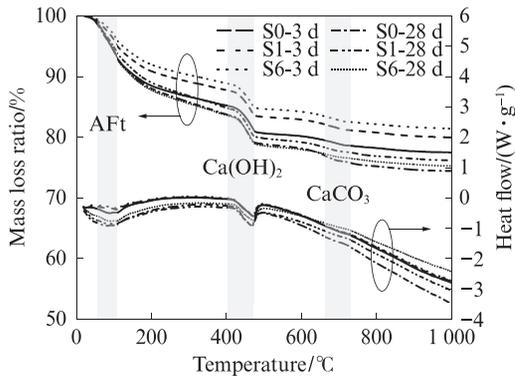


图11 不同PFOTES掺量下水泥净浆的TG-DSC曲线
Fig. 11 TG-DSC curves of cement pastes with different PFOTES contents

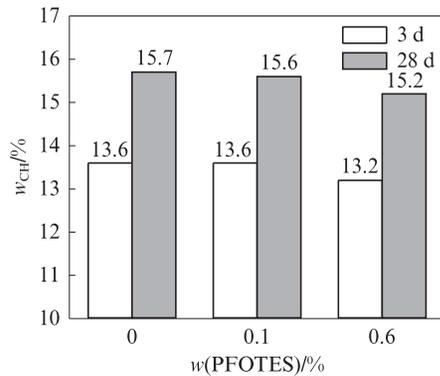


图12 不同PFOTES掺量下水泥净浆的CH含量
Fig. 12 CH content of cement pastes with different PFOTES contents

果表明,PFOTES的掺入在有效降低砂浆表面冰附着力的情况下,轻微地延缓了水泥水化.其原因主要为,PFOTES中的 $-CF_2$ 、 $-CF_3$ 基团包裹在水泥颗粒表面^[5],阻碍了水泥水化.

3 结论

(1)水泥颗粒表面被PFOTES中表面能较低的一 CF_2 、 $-CF_3$ 基团包裹,因此PFOTES的掺入延长了水泥的初凝与终凝时间.低表面能基团使水泥浆体表面由亲水性转为疏水性,吸水率减小,接触角增大、黏附能减小.砂浆表面的冰附着力在掺入PFOTES后明显降低,冰附着力在掺量较低时随着PFOTES掺量的增加而减小,而在掺量较高时,提升PFOTES掺量对冰附着力的改善效果并不明显.

(2)PFOTES在硬化水泥砂浆中使部分少害孔转化为有害孔,导致砂浆力学性能下降.

(3)向水泥净浆中掺入PFOTES后没有生成新物相,主要物相为 C_3S 、 C_2S 、CH和Aft.通过计算CH的含量发现,PFOTES的掺入延缓了CH的生成.

参考文献:

- [1] 周爱山,刘斌.黄壁庄水库冰雍危害及防治措施[J].大坝与安全,2019,5(5):5-8.
ZHOU Aishan, LIU Bin. Hazards of ice jam and countermeasures for Huangbizhuang reservoir[J]. Dam & Safety, 2019, 5(5):5-8. (in Chinese)
- [2] 韩红卫,张帅,汪恩良,等.憎水涂层混凝土冰附着强度试验研究及应用性能分析[J].建筑材料学报,2020,23(6):1350-1356.
HAN Hongwei, ZHANG Shuai, WANG Enliang, et al. Experimental study on ice adhesion strength on hydrophobic coated concrete and analysis of application performance [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1350-1356. (in Chinese)
- [3] 李超仪,宋世杰,蔡猛,等.配电网线路防结冰涂层构筑及其性能评价[J].中国表面工程,2021,34(3):66-74.
LI Chaoyi, SONG Shijie, CAI Meng, et al. Construction and analysis of anti-icing coating for distribution lines [J]. China Surface Engineering, 2021, 34(3):66-74. (in Chinese)
- [4] HU Q, YANG H, JIANG X L, et al. Investigation on one-step preparation and anti-icing experiments of robust super-hydrophobic surface on wind turbine blades[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 195:103484.
- [5] SHEN C, ZHU Y Q, SHI W N, et al. Mechanically stable superhydrophobic surface on cement-based materials [J]. Chemical Physics, 2020, 538:244-250.
- [6] 高英力,李学坤,代凯明,等.超疏水仿生水泥混凝土路面防覆冰技术及效能评价[J].材料导报,2017,31(14):132-137.
GAO Yingli, LI Xuekun, DAI Kaiming, et al. Anti-icing technology and effectiveness evaluation of super-hydrophobic bionic cement concrete pavement[J]. Materials Reports, 2017, 31(14):132-137. (in Chinese)
- [7] 王宗鹏.超疏水涂层对混凝土抗冻性及防冰性影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
WANG Zongpeng. Effect of superhydrophobic coatings on the frost resistance of and anti-icing properties of concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] YIN B, WU C, HOU D S, et al. Research and application progress of nano-modified coating in improving the durability of cement-based materials[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 161:106529.
- [9] LI F P, LIU J S. An experimental investigation of hydration mechanism of cement with silicane[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166:684-693.
- [10] 王海良,李懿祯,荣辉,等.有机硅防护剂对铝酸盐水泥砂浆防护性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(4):516-522.
WANG Hailiang, LI Yizhen, RONG Hui, et al. Effect on protective performance of organosilicone protective agent for aluminate cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4):516-522. (in Chinese)
- [11] 高英力,何倍,蒋正武,等.超疏水改性自发光水泥基材料的性能与微结构[J].建筑材料学报,2020,23(1):192-199,209.
GAO Yingli, HE Bei, JIANG Zhengwu, et al. Properties and micro-structure of super-hydrophobic modified self-luminous cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):192-199,209. (in Chinese)
- [12] LI Y Z, LI L, WAN D, et al. Preparation and evaluation of a fluorinated nano-silica superhydrophobic coating for cement pavement [J]. Construction and Building Materials, 2022, 360:129478.
- [13] 唐珊.表面特性对冰粘附强度影响的研究[D].广州:广州大学,2014.
TANG Shan. Research on the effects of surface properties on ice adhesion strength[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [14] 孙瑜,李立寒,孙艳娜.沥青表面能试验方法与试验条件[J].建筑材料学报,2017,20(3):489-494.
SUN Yu, LI Lihan, SUN Yanna. Test method and test condition of asphalt surface energy[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3):489-494. (in Chinese)
- [15] 徐开俊,王险峰.物理化学[M].北京:中国医药科技出版社,2009:255.
XU Kaijun, WANG Xianfeng. Physical chemistry[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2009:255.
- [16] XIA Y, LIU M H, ZHAO Y D, et al. Hydration mechanism and phase assemblage of blended cement with iron-rich sewage sludge ash[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63:105579.
- [17] WANG F J, LEI S, OU J F, et al. Effect of PDMS on the waterproofing performance and corrosion resistance of cement mortar[J]. Applied Surface Science, 2020, 507:145016.