

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.018

地聚物砂浆高温后抗拉和粘结性能及退化机理

张海燕^{1,2},曹 亮¹,吴 波^{1,2}

(1.华南理工大学 土木与交通学院,广州 510640;2.亚热带建筑科学国家重点实验室(华南理工大学),广州 510640)

摘 要:为考察地聚物砂浆在有耐高温要求的混凝土结构加固领域的应用可行性,开展了常温下和高温后地聚物砂浆的抗拉强度试验以及地聚物砂浆与普通水泥砂浆及普通混凝土基体的粘结性能试验,并与普通水泥砂浆的抗拉及粘结性能进行试验比较;通过热重分析-差示扫描量热分析(TG-DSC),探究了地聚物砂浆的高温强度退化机理.试验结果表明:地聚物砂浆与水泥砂浆及混凝土之间的常温粘结强度分别达 2.15 MPa 及 1.7 MPa,经 300 ℃ 高温后残余粘结强度仍有 1.5 MPa 左右,远高于普通水泥砂浆的粘结强度;超过 300 ℃ 以后地聚物砂浆的强度急剧退化,这主要是因地聚物砂浆高温脱水、微观结构遭受破坏引起.基于上述试验结果,可将地聚物砂浆用于 300 ℃ 以下高温环境的混凝土结构修补加固.

关键词:砂浆;地聚物;抗拉强度;粘结强度;高温;强度退化

中图分类号: TU502 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2016)12-0128-07

Tensile and bond properties and strength degradation mechanism of geopolymers mortar after exposure to elevated temperatures

ZHANG Haiyan^{1,2}, CAO Liang¹, WU Bo^{1,2}

(1.School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2.State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science (South China University of Technology), Guangzhou 510640, China)

Abstract: To investigate the feasibility of geopolymers mortar as a repair material for strengthening concrete structures in which fire resistance is one of the primary requirements, tensile strength and bond strength of geopolymers mortar on Portland cement mortar and concrete substrate were tested at ambient temperature and after exposure to elevated temperatures. Comparative tests were conducted on cement mortar specimens. Thermogravimetry and differential scanning calorimetry (TG-DSC) analysis were conducted on geopolymers paste to explore the strength degradation mechanism of geopolymers mortar at high temperatures. The results show that the bond strength of geopolymers mortar at ambient temperature on cement mortar and cement concrete substrate is 2.15 MPa and 1.7 MPa respectively, and the residual bond strength is about 1.5 MPa after exposure to 300 ℃, which is much higher than that of Portland cement mortar. When temperatures exceed 300 ℃, geopolymers mortar exhibits significant strength degradation, due to the microstructural damage induced by the dehydration of geopolymers at high temperatures. Based on the above test results, geopolymers mortar can be used as a repair material for concrete structures in high temperature environment below 300 ℃.

Keywords: mortar; geopolymers; tensile strength; bond strength; elevated temperatures; strength degradation

水泥砂浆或聚合物水泥砂浆是常用的结构修补加固材料^[1],常与钢筋网、钢绞线网片、纤维网格等材料结合^[2-3],用以加固混凝土结构或构件.水泥砂浆抗压强度高,耐久性好,但与混凝土的界面粘结强度较低,且水泥生产能耗较高,二氧化碳排放量较大,因此寻找节能环保的水泥替代品,研制非水泥基

砂浆近年来成为了人们关注的焦点之一^[4-5].

地聚物是通过碱激发矿渣、粉煤灰、偏高岭土等硅铝源材料而成的一种新型无机胶凝材料^[6-7],其力学性能优异,收缩徐变小,耐高温,抗酸碱腐蚀,且生产地聚物材料时的能耗和 CO₂ 排放量低,分别为生产水泥的 1/6~1/4 及 1/15~1/10^[8],因此地聚物被认为是一种绿色材料,可以在某些领域替代水泥或作为水泥材料的补充^[7].已有学者对地聚物砂浆在混凝土梁加固^[9]以及地下结构和污水管道等加固领域^[10]的应用进行了研究,关于地聚物砂浆材料本身的抗折和抗压强度^[4-5]及常温粘结性能方面的

收稿日期: 2015-08-22
基金项目: 国家自然科学基金(51478195);
国家重点基础研究发展计划(2011CB013800)
作者简介: 张海燕(1978—),女,博士,教授;
吴 波(1968—),男,研究员,博士生导师
通信作者: 张海燕, zhanghy@scut.edu.cn

研究也有不少^[9],但关于地聚物砂浆的高温抗拉和粘结性能的试验数据还比较缺乏,而这些试验结果对地聚物砂浆在有耐高温要求的混凝土结构加固领域的应用非常重要。

作者在前期的研究中,以粉煤灰和偏高岭土混合物为硅铝源材料,采用钾水玻璃激发,制备了一种具有较高抗折和抗压强度的地聚物砂浆^[11]。本文在此基础上,对地聚物砂浆常温下和高温后的抗拉及粘结性能进行研究,并通过热重分析-差示扫描量热分析(TG-DSC)探究地聚物砂浆的高温强度退化机理。

1 试件制备及试验方法

1.1 原材料及地聚物砂浆的制备

制备地聚物砂浆的原材料包括:平均粒径 0.032 mm 的低钙粉煤灰,煅烧温度 900 ℃、平均粒径 0.017 mm 的偏高岭土,模数 2.4、质量分数 40% 的工业硅酸钾溶液,纯度 95% 的固体氢氧化钾,过 2.0 mm 筛、细度模数 2.7 的中砂,自来水。偏高岭土和粉煤灰的主要化学成分见文献[11]。

地聚物砂浆的制备过程如下:首先在工业硅酸钾溶液中加入适量的固体氢氧化钾和水配制出模数 1.0、质量分数 40% 的硅酸钾溶液(钾水玻璃),然后静置冷却;将粉煤灰和偏高岭土固体粉末按质量比 1:1 混合,再倒入上述配制完成的钾水玻璃,搅拌均匀后,加入河砂,再搅拌 3~5 min 即可。

制备水泥砂浆和混凝土的原材料包括:石井牌 P.O.32.5 普通硅酸盐水泥,过 2.0 mm 筛、细度模数 2.7 的中砂,自来水,粒径 5~20 mm 的碎石,聚羧酸高效减水剂。

1.2 试件制备

1.2.1 地聚物砂浆抗拉强度试验试件的制备

为获得较优的地聚物砂浆配方,首先进行不同配方的地聚物砂浆在常温下的抗拉强度试验。

将地聚物砂浆注入周壁涂有脱模剂的“8”字型试模中,试件尺寸见 DL/T 5126—2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》^[12],然后置于砂浆振动台上振动,以除去气泡;接着覆盖薄膜,置于恒温恒湿养护箱中标准养护(温度 22 ℃,湿度 95%)6 d 后取出,自然晾干一天后进行地聚物砂浆的抗拉强度试验。

砂胶比和水胶比是影响地聚物砂浆强度的两个重要因素。此外,已有研究表明,在砂浆中加入短切纤维丝可以改善砂浆的抗裂和抗拉性能^[13]。本文配制了 8 种不同配方的地聚物砂浆(GM 1~8),每种配方浇筑 3 个试件,进行常温下的抗拉强度试验,以考察砂胶比、水胶比和短切纤维丝含量对地聚物砂

浆抗拉强度的影响。其中,短切纤维丝采用单丝直径 7.0~13 μm、抗拉强度 3 600~3 800 MPa、长度 5~6 mm 的短切碳纤维丝(CF)。根据常温下的抗拉强度测试结果,选择了纤维丝含量(CF 的质量与偏高岭土和粉煤灰质量和之比)不同的两种较优配方配制地聚物砂浆,进行高温后的抗拉强度试验,每种测试温度亦包括 3 个试件。地聚物砂浆抗拉强度试验的制备参数及高温处理温度见表 1。

表 1 试件制备参数及处理温度

Tab.1 Specimen critical parameters and test temperatures				
试件编号	砂胶比	水胶比	CF/固体粉末/%	测试温度/℃
GM1~3	2.5,3,3.5	0.40	0	25
GM4~7	3	0.45	0,0.5,1,2	25
GM8	3	0.50	0	25
GM9~12	3	0.45	0	100,300,500,700
GM13~16	3	0.45	1	100,300,500,700

注:砂胶比=砂的质量/(水玻璃溶质质量+粉煤灰和偏高岭土固体粉末质量);水胶比=水玻璃溶剂的质量/(水玻璃溶质质量+粉煤灰和偏高岭土固体粉末质量)。

1.2.2 地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试件的制备

制作地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试件(GM-CMO),以测试地聚物砂浆与水泥砂浆之间的粘结性能,GM-CMO 试件的尺寸与地聚物砂浆抗拉强度试验试件尺寸相同。提前制备半圆形的旧水泥砂浆试块,在养护 28 d 后放回“8”字型模具的一个半圆内,再在另一个半圆内浇注新鲜地聚物砂浆。为避免拉伸过程中旧水泥砂浆内部发生破坏,旧水泥砂浆采用高强水泥砂浆,按水:水泥:砂:减水剂=0.31:1:3:0.018 的质量比制备。根据常温下和高温后抗拉强度试验结果,粘结试验中的地聚物砂浆采用与表 1 中 GM4 试件相同的配方制备。图 1 给出了 GM-CMO 试件的照片,其中红色部分为地聚物砂浆,内掺适量色粉。经试验验证,色粉的掺入对地聚物砂浆的强度无显著影响。



图 1 地聚物砂浆-水泥砂浆试件

Fig.1 GM-CMO specimens

1.2.3 地聚物砂浆-混凝土粘结试件的制备

采用地聚物砂浆粘结两个旧混凝土块(GM-CCO),测试地聚物砂浆与混凝土之间的粘结强度。旧混凝土块的配合比为水:水泥:砂:石:减水剂

=0.31 : 1 : 1.5 : 2.3 : 0.018,地聚物砂浆的配方与 GM 4 试件相同.试件尺寸见 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》^[14],试件照片见图 2.

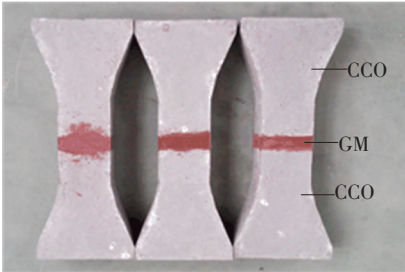


图 2 地聚物砂浆-混凝土试件

Fig.2 GM-CCO specimens

为对比地聚物砂浆与普通水泥砂浆的抗拉及粘结性能,按照上述地聚物砂浆试件的制备方法,分别制作了水泥砂浆抗拉强度试验试件(CM)、新旧水泥砂浆粘结试件(CM-CMO)以及水泥砂浆-混凝土粘结试件(CM-CCO),其中新水泥砂浆的配比为水:水泥:砂=0.45:1:3.

1.3 试验方法

采用量程为 20 kN 的 UTM5205 电子万能试验机对上述试样进行拉伸试验,以获得地聚物砂浆和普通水泥砂浆的抗拉强度和粘结强度,加载速度统一采用 2 mm/min.对需要进行高温处理的试件,首先将试件放入智能箱式电阻炉内进行加热,以 5 ℃/min 的升温速度加热到目标温度后恒温 60 min,然后自然冷却至室温,接着按上述常温下的试验方法进行高温后的拉伸试验.试验装置如图 3 所示.



(a) 砂浆抗拉强度试验以及新旧砂浆粘结试验装置



(b) 砂浆与混凝土粘结试验装置

图 3 试验装置

Fig.3 Test set-up

2 抗拉及粘结强度测试结果

2.1 地聚物砂浆常温抗拉强度试验结果

为考察砂胶比对地聚物砂浆抗拉强度的影响,对 GM 1~3 这 3 组试件进行拉伸试验,结果见图 4.图 4 中数据采用 3 个试件的平均试验结果,数据点上下的 I 字型线表示数据的离散范围.由图 4 可看

出,3 种配方的地聚物砂浆均具有较高的抗拉强度(>3.5 MPa),且地聚物砂浆的抗拉强度随砂胶比的增加先增后减,其中砂胶比为 3 的试件(GM 2)平均抗拉强度最高(4.07 MPa),强度离散性最小.

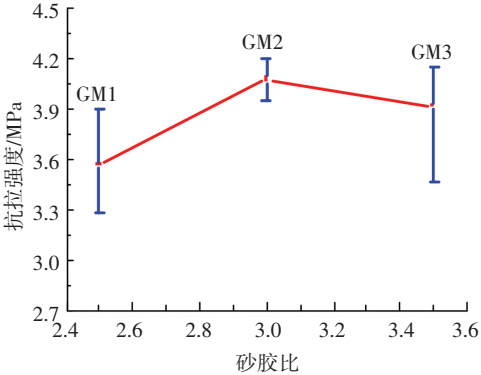


图 4 砂胶比对地聚物砂浆抗拉强度的影响

Fig.4 Effect of sand-binder ratio on tensile strength of GM

地聚物砂浆试件 GM 2、GM 4 和 GM 8 用于探究水胶比对地聚物砂浆抗拉强度的影响,图 5 给出了这 3 组试件的抗拉强度测试结果.由图 5 可知,水胶比在 0.4~0.5 范围内时,地聚物砂浆的抗拉强度随水胶比的增大而降低.水胶比对地聚物砂浆的流动性也有较大影响.采用跳桌试验测试不同水胶比下地聚物砂浆的流动度.测试结果表明,当水胶比分别为 0.4、0.45 和 0.5 时,地聚物砂浆的流动度对应为 114.8、137.4 和 159.6 mm.相对于常规的砂浆流动度(140~180 mm),水胶比为 0.4 时的流动度偏小较多.综合地聚物砂浆抗拉强度和流动度测试结果,水胶比取 0.45 比较合适.

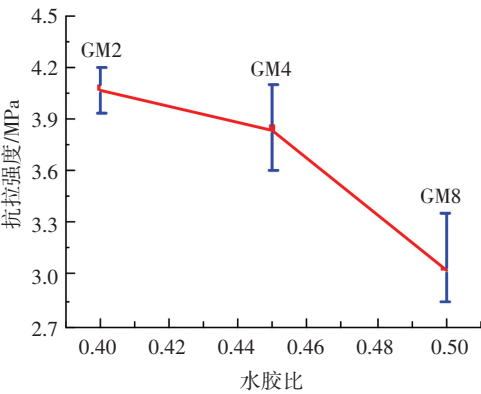


图 5 水胶比对地聚物砂浆抗拉强度的影响

Fig.5 Effect of water-binder ratio on tensile strength of GM

地聚物砂浆试件 GM 4~7 含有不同比例的短切碳纤维丝(CF),CF 掺量分别是粉煤灰和偏高岭土固体粉末质量和的 0%、0.5%、1%和 2%.这 4 组试件在常温下的抗拉强度试验结果见图 6.可以看出,添加 CF 对地聚物砂浆的抗拉强度有一定提高,但效果并不显著,如当 CF 掺量为 2%时,地聚物砂浆的抗拉强度较无 CF 的砂浆仅提高了 9%.这可能是因

为碳纤维丝表面光滑,当纤维丝承担的拉力达到一定值后纤维丝产生滑移,使得其强度得不到充分利用.

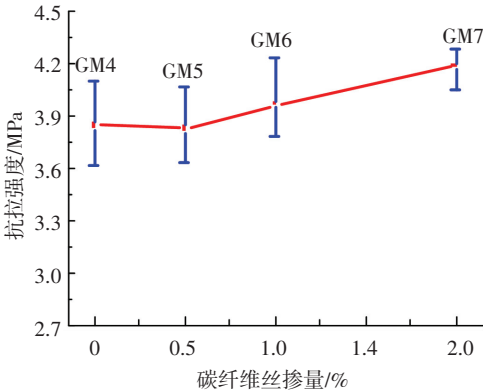


图 6 CF 掺量对地聚物砂浆抗拉强度的影响

Fig.6 Effect of CF content on tensile strength of GM

2.2 地聚物砂浆高温后抗拉强度试验结果

对不同短切碳纤维丝含量的地聚物砂浆试件 GM 9–12(0% CF, 配方与 GM 4 相同) 和 GM 13–16 (1% CF) 进行高温处理 (100、300、500 和 700 ℃), 冷却后进行抗拉强度试验, 以考察短切碳纤维丝对地聚物砂浆高温后抗拉强度的影响. 图 7 给出了这些试件的试验结果. 可以看出, 两种配方的地聚物砂浆的抗拉强度在 100 ℃ 时均有所提高, 超过 300 ℃ 以后, 强度急剧下降, 500 ℃ 时其抗拉强度仅为常温强度的 25% 左右. 尽管 1% CF 掺量的地聚物砂浆抗拉强度在整个温度范围内均高于未掺入 CF 的地聚物砂浆的抗拉强度, 但两者的强度差随温度的升高先增后减, 当温度超过 500 ℃ 后两种配方的地聚物砂浆的抗拉强度差几乎为零. 这主要是因为地聚物砂浆与 CF 的粘结强度退化以及 CF 自身强度退化引起. 文献[15]指出, 有氧条件下, CF 在 500 ℃ 时残余抗拉强度仅为常温强度的 29%. 因此, 500 ℃ 高温后 CF 对地聚物砂浆抗拉强度的贡献已很小.

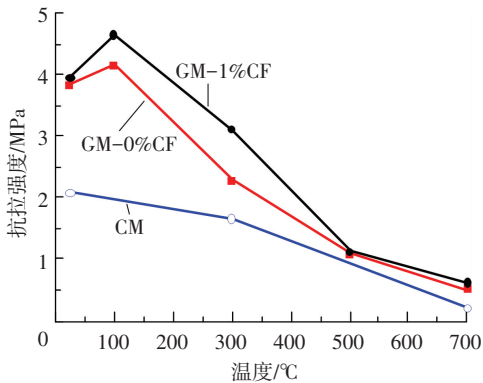


图 7 地聚物砂浆和普通水泥砂浆高温后的抗拉强度比较
Fig.7 Tensile strength comparison between GM and CM after exposure to elevated temperatures

由于短切碳纤维丝的掺入对地聚物砂浆常温下和高温后的抗拉强度提高作用均有限, 因此在后续

的粘结强度实验中, 地聚物砂浆采用与抗拉强度试验试件 GM 4 相同的配方 (0% CF) 进行配制.

为比较地聚物砂浆与普通水泥砂浆高温后抗拉强度的差异, 图 7 还列出了普通水泥砂浆在常温下、300 和 700 ℃ 高温后的抗拉强度. 从图可以看出, 常温下地聚物砂浆的抗拉强度几乎是水泥砂浆强度的 2 倍, 高温后地聚物砂浆和水泥砂浆抗拉强度的差异有所减小, 但 700 ℃ 高温后地聚物砂浆仍具有更高的抗拉强度.

2.3 地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试验结果

2.3.1 破坏特征

理论上, 地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试件的破坏形式应包括地聚物砂浆内部破坏、旧水泥砂浆内部破坏以及地聚物砂浆-水泥砂浆界面破坏. 由于地聚物砂浆-水泥砂浆结合界面处于截面面积最小的部位, 且地聚物砂浆和水泥砂浆 (高强水泥砂浆) 自身的抗拉强度较高, 因此地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试件在常温下和高温后粘结试验中的破坏模式基本都是界面破坏, 15 个试件中仅有 2 个试件同时出现了界面破坏和水泥砂浆内部破坏的复合破坏模式 (发生在常温和 500 ℃ 高温后), 见图 8. 新旧水泥砂浆粘结试件的破坏模式均为新旧水泥砂浆的粘结界面破坏.

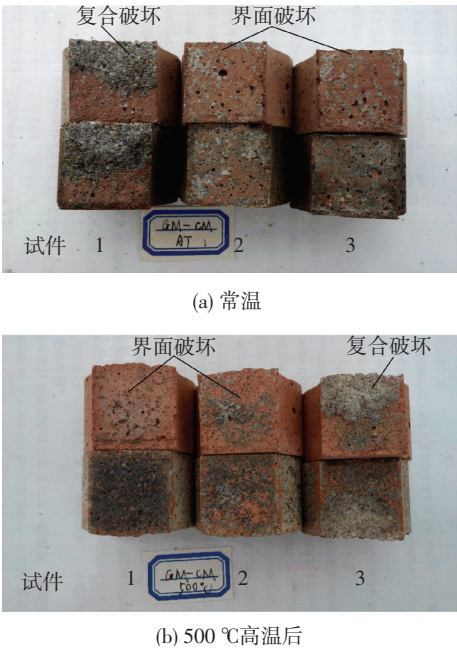


图 8 地聚物砂浆-水泥砂浆试件的粘结破坏模式

Fig.8 Failure modes of GM-CMO specimens

2.3.2 地聚物砂浆-水泥砂浆粘结强度

图 9 给出了地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试件 (GM-CMO)、新旧水泥砂浆粘结试件 (CM-CMO) 在常温下和高温后的粘结强度测试结果. 可以看出, GM-CMO 的粘结强度随温度的升高先增后减, 在

100 ℃ 时达到最高 (2.83 MPa), 为常温强度的 132%, 但 300 ℃ 和 500 ℃ 时强度大幅下降, 分别为常温强度的 68% 和 32%, 700 ℃ 高温后残余强度几乎为零。而 CM-CMO 的粘结强度则随温度一直下降, 且在整个温度范围内其强度远低于 GM-CMO 的强度, 如常温时 CM-CMO 的粘结强度仅为 GM-CMO 的 1/2 左右。

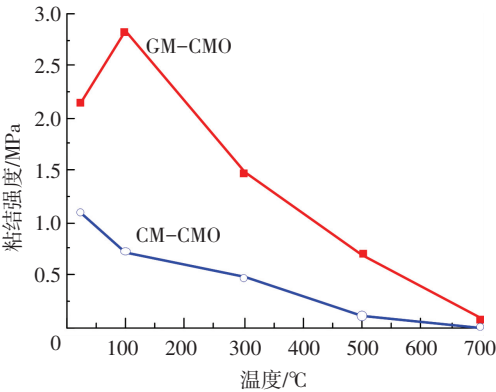


图 9 地聚物砂浆和水泥砂浆与旧水泥砂浆基体的粘结强度比较

Fig.9 Bond strength comparison between GM and CM bonding old cement mortar substrate

2.4 地聚物砂浆-普通混凝土粘结试验结果

2.4.1 破坏特征

常温下和高温后地聚物砂浆-普通混凝土粘结试件 (GM-CCO) 的破坏模式与地聚物砂浆-水泥砂浆粘结试件类似, 基本都是地聚物砂浆与普通混凝土的界面破坏, 仅有 100 ℃ 高温后的地聚物砂浆-普通混凝土粘结试件出现了旧混凝土内部和地聚物砂浆-混凝土界面同时破坏的复合破坏形态。图 10 给出了地聚物砂浆-普通混凝土粘结试件在常温下和 100 ℃ 高温后的粘结破坏面。水泥砂浆-混凝土粘结试件 (CM-CCO) 的破坏模式均为界面破坏。

2.4.2 地聚物砂浆-混凝土粘结强度

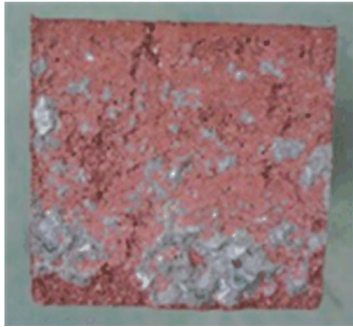
图 11 给出了地聚物砂浆-混凝土粘结试件 (GM-CCO)、水泥砂浆-混凝土粘结试件 (CM-CCO) 的粘结强度随温度的变化曲线。由图可知, GM-CCO 的常温粘结强度 (1.7 MPa) 远高于 CM-CCO 的粘结强度 (0.4 MPa), 而与聚合物改性水泥砂浆的粘结强度 (约 1.6 MPa^[16]) 接近, 且在 25~300 ℃ 范围内强度变化不大, 300 ℃ 时的粘结强度仍有 1.57 MPa, 但超过 300 ℃ 之后粘结强度迅速下降。

地聚物砂浆与水泥砂浆或混凝土的粘结强度远高于新旧水泥砂浆或水泥砂浆-混凝土之间的粘结强度, 究其原因主要是当地聚物砂浆遇到水泥砂浆后, 地聚物砂浆中的硅酸钾与界面处水泥水化产生

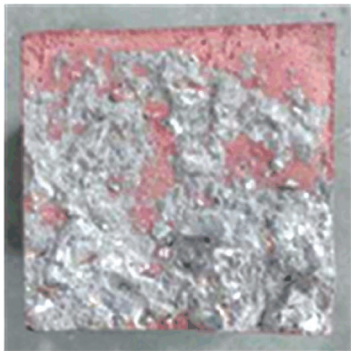
的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成了水化硅酸钙, 具体化学反应过程^[17]:

- 1) 水泥中硅酸三钙水化产生氢氧化钙
- $$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2,$$
- 2) 硅酸钾与氢氧化钙反应, 生成水化硅酸钙
- $$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O} + 2\text{KOH}.$$

水化硅酸钙具有较强凝胶性, 是水泥水化的主要产物以及水泥硬化后强度形成的主要原因。在地聚物砂浆与水泥砂浆或混凝土界面生成的水化硅酸钙, 增强了地聚物砂浆与水泥砂浆或混凝土之间的粘结强度。



(a) 常温



(b) 100 ℃ 高温后

图 10 地聚物砂浆-混凝土试件的粘结破坏面
Fig.10 Bond failure interface of GM-CCO specimens

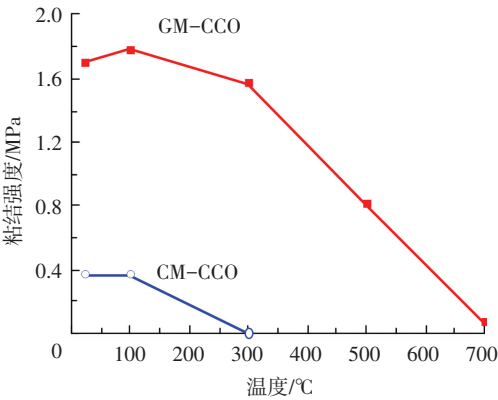


图 11 地聚物砂浆和水泥砂浆与混凝土基体的粘结强度比较
Fig.11 Bond strength comparison between GM and CM bonding concrete substrate

3 地聚物砂浆高温强度退化机理分析

比较图 7、9 和 11, 可看到地聚物砂浆的抗拉强度、地聚物砂浆与水泥砂浆基体以及混凝土基体的粘结强度随温度的变化趋势基本一致, 均在 100 ℃ 时强度增加, 300 ℃ 之后强度迅速下降, 但地聚物砂浆-混凝土之间的粘结强度在 300 ℃ 以后的强度退化速度要低于地聚物砂浆的抗拉强度以及地聚物砂浆-水泥砂浆之间粘结强度的退化速度, 这主要是因为地聚物砂浆-混凝土粘结试件的尺寸较大, 试件内部的温度升高速度较缓, 因此强度降低较慢。

地聚物砂浆在 100 ℃ 时的强度提高可归因于地聚物的进一步地聚合反应。已有研究表明, 蒸汽或高温养护条件能促进地聚物胶凝材料的地聚合反应, 且养护温度为 60~90 ℃ 时地聚合反应程度最高^[18]。地聚物砂浆从常温升至 100 ℃ 并恒温 60 min 的过程类似于蒸汽养护, 因此地聚物砂浆经过 100 ℃ 的高温处理强度会有所提高。

为查明地聚物砂浆经 300 ℃ 高温处理后抗拉及粘结强度急剧退化的原因, 对水胶比为 0.45 的地聚物净浆粉末进行 25~800 ℃ 范围内的热重分析-差示扫描量热分析 (TG-DSC), TG-DSC 试验采用 NETZSCH STA449F3 同步热分析仪进行。图 12 给出了地聚物的热重分析曲线 (TG) 以及热重微分曲线 (DTG)。由图 12 可知, 地聚物在整个升温过程中有两个明显的失重段, 分别是 25~250 ℃ 和 450~650 ℃, 其中 25~250 ℃ 的失重量占到了总失重量的 71.8%。地聚物砂浆在高温下的重量 (质量) 损失主要是因地聚物砂浆脱水引起。在 25~250 ℃ 范围内, 大量的自由水和吸附水汽化, 并从结构内部向表面迁移和蒸发, 地聚物砂浆内部结构急剧恶化, 导致抗拉及粘结强度在温度高于 300 ℃ 时急剧下降; 当升温至 450 ℃ 时, 地聚物中的结晶水也开始脱出, 微观结构受到进一步破坏。这一点也可以从图 13 中的 DSC 曲线看出。地聚物净浆的 DSC 曲线在 25~250 ℃ 以及 450~800 ℃ 区间各出现了一个吸热峰, 前者是由于自由水和吸附水蒸发引起, 后者是由于地聚物凝胶 (化学式为 $M_n \{-(SiO_2)_z AlO_2\}_n \cdot wH_2O$, 式中 M 为 K 或 Na 元素, 这里为 K; n, z, w 为分子数) 脱水, 生成钾霞石 ($KAlSiO_4$) 或白榴石 ($KAlSi_2O_6$) 所致^[19]。由于结晶水的失去比自由水和吸附水蒸发需要吸收更多的热量, 因此, 450~800 ℃ 区间的吸热峰远高于 25~250 ℃ 区间的吸热峰。结晶水的失去使得地聚物的微观结构进一步遭受严重破坏, 因此 500 ℃ 高温以后, 地聚物砂浆强度

所剩无几。此外, 高温下地聚物胶凝材料的收缩变形和砂浆中细骨料的热膨胀变形不协调是导致高温后地聚物砂浆强度退化的另一个原因^[11]。

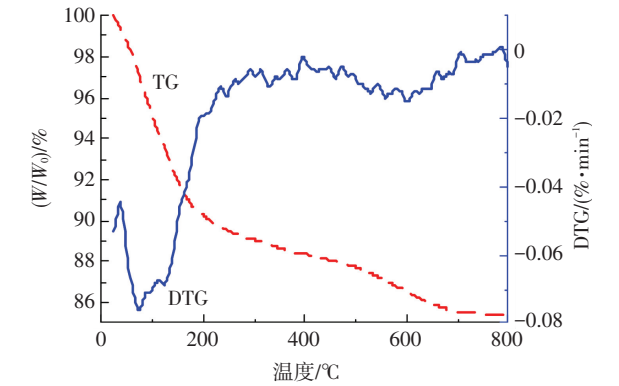


图 12 地聚物净浆的 TG 和 DTG 曲线
Fig.12 TG and DTG curves of geopolymer paste

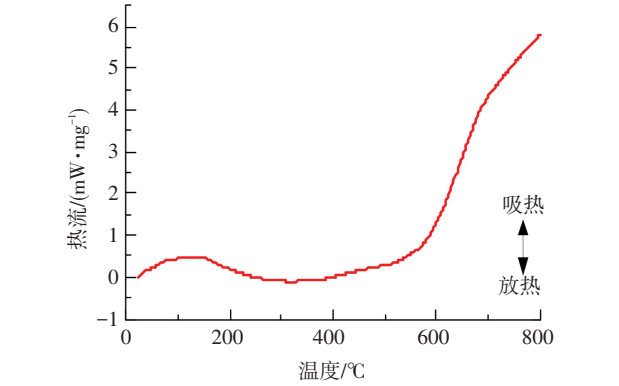


图 13 地聚物净浆的 DSC 曲线
Fig.13 DSC curve of geopolymer paste

4 结 论

本文进行了常温下和高温后不同配方的地聚物砂浆的抗拉强度试验、地聚物砂浆-水泥砂浆和地聚物砂浆-普通混凝土的粘结性能试验, 以及地聚物的热重分析-差示扫描量热分析 (TG-DSC), 得到以下结论:

- 1) 当地聚物砂浆的砂胶比为 3, 水胶比为 0.45 时, 地聚物砂浆的抗拉强度可达到 3.84 MPa, 且流动性较好。
- 2) 短切碳纤维丝掺量在 0~2% 范围内时, 添加短切碳纤维丝对地聚物砂浆的常温和高温后抗拉强度有一定提高, 但效果不显著。
- 3) 地聚物砂浆的抗拉强度和粘结强度均随温度升高先增后减, 在 100 ℃ 时达到最高, 超过 300 ℃ 以后强度急剧下降。
- 4) 地聚物的 TG-DSC 曲线在 25~250 ℃ 以及 450~800 ℃ 区间存在两个明显失重段和吸热峰, 分别对应地聚物中自由水、吸附水脱出和结晶水脱出, 这是导致 300 ℃ 以上高温地聚物砂浆强度急剧退化的主要原因。

5)地聚物砂浆与普通水泥砂浆及普通混凝土之间的常温粘结强度分别达到 2.15 MPa 及 1.7 MPa,高于试验用普通水泥砂浆的相应粘结强度;同时,经 300 ℃ 处理后残余粘结强度仍有 1.5 MPa,因此地聚物砂浆可作为修复砂浆用于 300 ℃ 以下高温环境的混凝土结构的修补和加固。

参考文献

- [1] PELLEGRINO C, PORTO F D, MODENA C. Rehabilitation of reinforced concrete axially loaded elements with polymer-modified cementitious mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10): 3129–3313.
- [2] TETTA Z C, KOUTAS L N, BOURNAS D A. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77: 338–348.
- [3] SEVIL T, BARAN M, BILIR T, et al. Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening [J]. *Composite Materials and Adhesive Bonding Technology*, 2011, 25(2): 892 – 899.
- [4] RANJBAR N, MEHRALI M, ALENGARAM U J, et al. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 65: 114–121.
- [5] ISLAM A, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z, et al. The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 833–841.
- [6] 郑文忠,陈伟宏,徐威,等.用碱激发矿渣耐高温无机胶在混凝土表面粘贴碳纤维布试验研究[J].*建筑结构学报*,2009,30(4): 138–144.
ZHENG Wenzhong, CHEN Weihong, XU Wei, et al. Experimental research on alkali-activated slag high temperature resistant inorganic adhesive pasting CFRP sheets on surface of concrete[J].*Journal of Building Structures*, 2009, 30(4): 138–144.
- [7] UENG T, LYU S, CHU H, et al. Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression; An experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 204–210.
- [8] 张书政,龚克成.地聚合物[J].*材料科学与工程学报*,2003, 21(3): 430–436.DOI: 10.3969/j.issn.1673–2812.2003.03.030
ZHANG Shuzheng, GONG Kecheng. Geopolymer[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*,2003, 21(3): 430–436.DOI: 10.3969/j.issn.1673–2812.2003.03.030.
- [9] VASCONCELOS E, FERNANDES S, BARROSO DE AGUIAR J L, et al. Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(8): 3213–3221.
- [10] MONTES C, ALLOUCHE E N. Evaluation of the potential of geopolymer mortar in the rehabilitation of buried infrastructure[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(1): 89–98.
- [11] ZHANG Haiyan, KODUR V, QI Shuliang, et al. Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 55: 38–45.
- [12] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 聚合物改性水泥砂浆试验规程:DL/T 5126—2001[S]. 北京:中国电力出版社, 2001.
State Economic and Trade Commission of the PRC. Test code on polymer-modified cement mortar; DL/T 5126—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [13] IUCOLANO F, LIGUORI B, COLELLA C. Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient Masonry restoration [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 785–789.
- [14] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2001[S]. 北京:中国电力出版社, 2002.
State Economic and Trade Commission of the PRC. Test code for Hydraulic concrete; DL/T 5150—2001 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [15] 高晓楠,张海燕.玄武岩纤维片材和碳纤维片材高温后拉伸性能比较[J].*防灾减灾工程学报*, 2012, 32(1): 60–65.
GAO Xiaonan, ZHANG Haiyan. Tensile properties comparison between basalt fiber sheet and carbon fiber sheet after exposure to elevated temperatures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(1): 60–65.
- [16] 黄华,刘伯权,刘卫锋.聚合物砂浆与混凝土抗拉粘结性能研究[J].*工业建筑*, 2009, 39(4): 98–102.
HUANG Hua, LIU Boquan, LIU Weiduo. Study on tensile bond performance between polymer mortar and concrete [J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(4): 98–102.
- [17] SKRIPKIŪNAS G, JANAVIČIUS E. Effect of Na₂O · nSiO₂ nanodispersion on the strength and durability of Portland cement matrix[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 16(1): 86–93.
- [18] WINNEFELD F, LEEMANN A, LUCUK M, et al. Assessment of phase formation in alkali activated low and high Calcium fly ashes in building materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(6): 1086–1093.
- [19] DUXSON P, LUKEY G C, VAN DEVENTER J J. The thermal evolution of metakaolin geopolymers; Part 2-Phase stability and structural development [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, 353(22/23): 2186–2220.

(编辑 赵丽莹)