

文章编号:1007-9629(2022)04-0401-07

粉煤灰用量和早期养护温度对 EGC 拉伸性能的影响

万小梅^{1,2,*}, 刘 杰¹, 朱亚光¹, 于 琦^{1,3}, 曾云辉¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛理工大学 蓝色经济区工程建设与安全
山东省协同创新中心, 山东 青岛 266033; 3. 青岛青建新型材料集团有限公司, 山东 青岛 266108)

摘要:研究了粉煤灰用量、早期养护温度对工程地质聚合物复合材料(EGC)拉伸性能及微观结构的影响,并从细观力学角度对其纤维-基体界面的力学性能进行了分析.结果表明:降低粉煤灰用量不利于EGC拉伸延性的提高,适当提高早期养护温度有利于EGC拉伸性能的提高;粉煤灰用量为80%、早期养护温度为60℃或80℃时,EGC的拉伸应变可达到3.5%以上;纤维拉拔过程中较长的滑移硬化阶段有助于EGC拉伸性能的提升.

关键词:地质聚合物;韧性;拉伸性能;单纤维拔出试验;界面性能

中图分类号:TU528.58

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.011

Influence of Fly Ash Content and Early Curing Temperature on Tensile Performance of EGC

WAN Xiaomei^{1,2,*}, LIU Jie¹, ZHU Yaguang¹, YU Qi^{1,3}, ZENG Yunhui¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Cooperative
Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao
University of Technology, Qingdao 266033, China; 3. Qingdao Qingjian New Material Group
Co., Ltd., Qingdao 266108, China)

Abstract: The effects of fly ash content and early curing temperature on the tensile properties and microstructure of engineering geopolymer composites (EGC) were studied. The mechanical properties of fiber-matrix interface of EGC were analyzed from the perspective micromechanics. The test results show that the decrease of fly ash content is not conducive to the improvement of the tensile ductility of EGC, and the moderate increase of early curing temperature is conducive to the improvement of tensile properties of EGC. When the fly ash content is 80%, and the early curing temperature is 60℃ or 80℃, the tensile strain of EGC can reach more than 3.5%. The longer slip hardening stage during fiber pullout process is helpful to improve the tensile performance of EGC.

Key words: geopolymer; toughness; tensile performance; single fiber pull-out test; interface property

地质聚合物一般由铝硅酸盐胶凝材料与碱反应制备而成^[1],具有三维立体网状结构^[2],其生产能耗低^[3]、CO₂排放量低^[4]、耐久性优异、凝结硬化快^[5-9],且内部结构致密、力学性能优良^[10-12],是一种极具发展前景的新型绿色胶凝材料.然而,地质聚合物往往表现出较高的

脆性^[13-14],因此掺加纤维制成工程地质聚合物复合材料(EGC)可以有效提高基体韧性,使其表现出多缝开裂行为和准应变硬化特性^[15-17].Ohno等^[18]利用聚乙烯醇(PVA)纤维增强粉煤灰地质聚合物,获得拉伸延性在4%以上的应变硬化性能.Nemtollahi等^[19-20]研究发现

收稿日期:2020-12-23; 修订日期:2021-02-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878365)

第一作者(通讯作者):万小梅(1974—),女,山东青岛人,青岛理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:wanyxiaomei1211@hotmail.com

PVA-EGC 的纤维-基体界面性能优于聚乙烯(PE)-EGC,且PVA纤维表面覆油可以适当降低纤维与基体间的化学黏结,优化EGC的拉伸性能。

为研究不同粉煤灰用量及早期养护温度对EGC拉伸性能及其纤维-基体界面性能的影响,分析对比EGC相对于地质聚合物基体性能的提升,本文开展了宏观、细观及微观试验分析。通过宏观试验表征并分析了EGC的单轴拉伸性能;通过单纤维拔出试验对纤维-基体界面性能进行了分析,并对EGC宏观拉伸性能进行了细观力学的补充解释;通过X射线衍射(XRD)对EGC水化产物进行了分析;通过扫描电镜(SEM)分析了EGC在纤维拔出后的微观形貌。本文基于多尺度的研究结果可为优化EGC的制备和

界面改性提供参考和借鉴。

1 试验

1.1 EGC的制备

胶凝材料包括华能山东发电有限公司白杨河发电厂提供的一级粉煤灰(FA)和青岛青建新型材料集团有限公司提供的S95级粒化高炉矿渣粉(GBFS),其化学组成¹⁾见表1;PVA纤维为日本可乐丽公司生产的高强高模REC15纤维,其性能指标见表2。石英砂最大粒径为600 μm ;NaOH为世纪星化学试剂有限公司生产,形态为白色均匀颗粒状固体,分析纯。水玻璃由海湾索尔维有限公司提供,模数为3.5,波美度为38.4~39.8, Na_2O 、 SiO_2 的含量分别为9.57%、33.34%。

表1 粉煤灰和粒化高炉矿渣粉的化学组成
Table 1 Chemical composites of FA and GBFS

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
FA	8.59	39.99	25.43	0.62	1.26	16.93	2.12	2.17	0.54
GBFS	57.11	22.53	10.98	3.36	1.77	0.91	0.36	1.87	0.21

表2 PVA纤维的性能指标
Table 2 Property indexes of PVA fiber

Tensile strength/ MPa	Diameter/ μm	Length/mm	Modulus of elasticity/ GPa	Ultimate elongation/%	Oil content (by mass)/%
1 620	39	12	42.8	6.0	0.8

用NaOH将原模数为3.5的水玻璃调至模数为1.8,以9%的 Na_2O 碱性溶液作为激发剂。EGC中PVA纤维的体积分数 φ_{PVA} 为2%,配合比 m (胶凝材料): m (石英砂): m (激发剂)=1.00:0.30:0.35。胶凝材料中,设定粉煤灰与矿渣粉质量比 $m_{\text{FA}}:m_{\text{GBFS}}=0.8:0.2$ 、 $0.6:0.4$ 、 $0:1.0$,即粉煤灰用量 $w_{\text{FA}}=80\%$ 、 60% 、 0% ,制备的EGC分别记为M1、M2、M3,其中M3为全矿渣粉试件。设置早期养护温度 $t=20$ 、 60 、 80 $^{\circ}\text{C}$,并将M1在早期养护温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 下的试件记为M1-20,其他类推。

试件的制备过程为:先将胶凝材料混合搅拌,然后加入石英砂继续搅拌,接着缓慢加入激发剂搅拌3 min,再加入PVA纤维继续搅拌,搅拌完成后将砂浆倒入模具分3层振捣,密封,将试件及模具分别放置于温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为95%以上的恒温恒湿室以及 60 、 80 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中,24 h后将其取出并拆模。热养护具体流程参照Nematollahi等^[21]提出的方法进行,拆模后立即将试件放置在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温恒湿室中进行养护,养护至试验所需龄期后取出并进行相应的试

验。制作哑铃形试件用于单轴拉伸试验,10 mm $\times$ 5 mm $\times$ 30 mm试件用于单纤维拔出试验。

1.2 试验方法

根据JC/T 2461—2018《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》,用岛津AG-IS 250 kN的万能试验机进行单轴拉伸试验,加载速率为0.1 mm/min,位移传感器LVDT固定在哑铃形试件距中间90 mm的两侧,并连接到计算机采集位移数据,测量精度为0.001 mm。单纤维拔出试验在SANS微控万能试验机上进行,加载过程中最大荷载为2 N,精度为0.000 01 N,纤维嵌入长度为1~2 mm,试件的固定方法参照文献[22]。用帕纳科锐影X射线衍射仪EmpyreanX对水化产物进行测试,采用压片法制样,扫描速率为4 ($^{\circ}$)/s。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

单轴拉伸作用下试件的应力-应变曲线见图1。由图1可见:除M3组试件以外,M1组和M2组试件

1)文中涉及的组成、配合比等除特殊说明外均为质量分数或质量比。

均表现出明显的拉伸应变硬化行为,且M1组试件较M2组试件的应变硬化行为更加显著;M1组试件在60、80℃时的拉伸应变可达到3.5%以上;当早期养护温度为60℃时,随着粉煤灰用量的增大,EGC的应变逐渐增大,全矿渣粉试件M3的应变甚至低于1.0%,而EGC的极限拉应力随着粉煤灰用量的减小逐渐增大,这是因为当粉煤灰用量减小,矿渣粉用量增加,从而使基体强度升高,导致纤维在拔出过程中磨损严重而减弱了纤维的桥联作用;当早期养护温度为80℃时,与M1、M2组试件相比,M3组试件的应变下降得更明显,且几乎没有拉伸应变硬化过程,其原因可能是试件M3-80未掺粉煤灰且早期养护温度较高,其基体强度相比其他组试件更高,因此在拉伸

过程中试件M3-80初裂强度最高,达到初裂强度后基体将所承受的拉伸应力传递给纤维,而纤维本身强度不足以承受此时的拉伸应力,且因纤维与基体黏结较强,使纤维无法发生滑移而直接被拉断,导致试件破坏;当早期养护温度为20℃时,M3组试件的拉伸应力最高,这是因为M3组试件的基体相较于M1组和M2组强度较高且适中,微结构较为密实,纤维与基体间黏结更好,使纤维作用发挥得更好。

M2组和M3组试件的应变能力随着早期养护温度的升高而降低:20℃下基体水化较慢,纤维与基体的黏结强度较低,纤维在这个过程中会被拔出,表现为较低的拉伸应力和较高的拉伸应变;当早期养护温度达到60、80℃时,早期水化加快,结构更加密实,

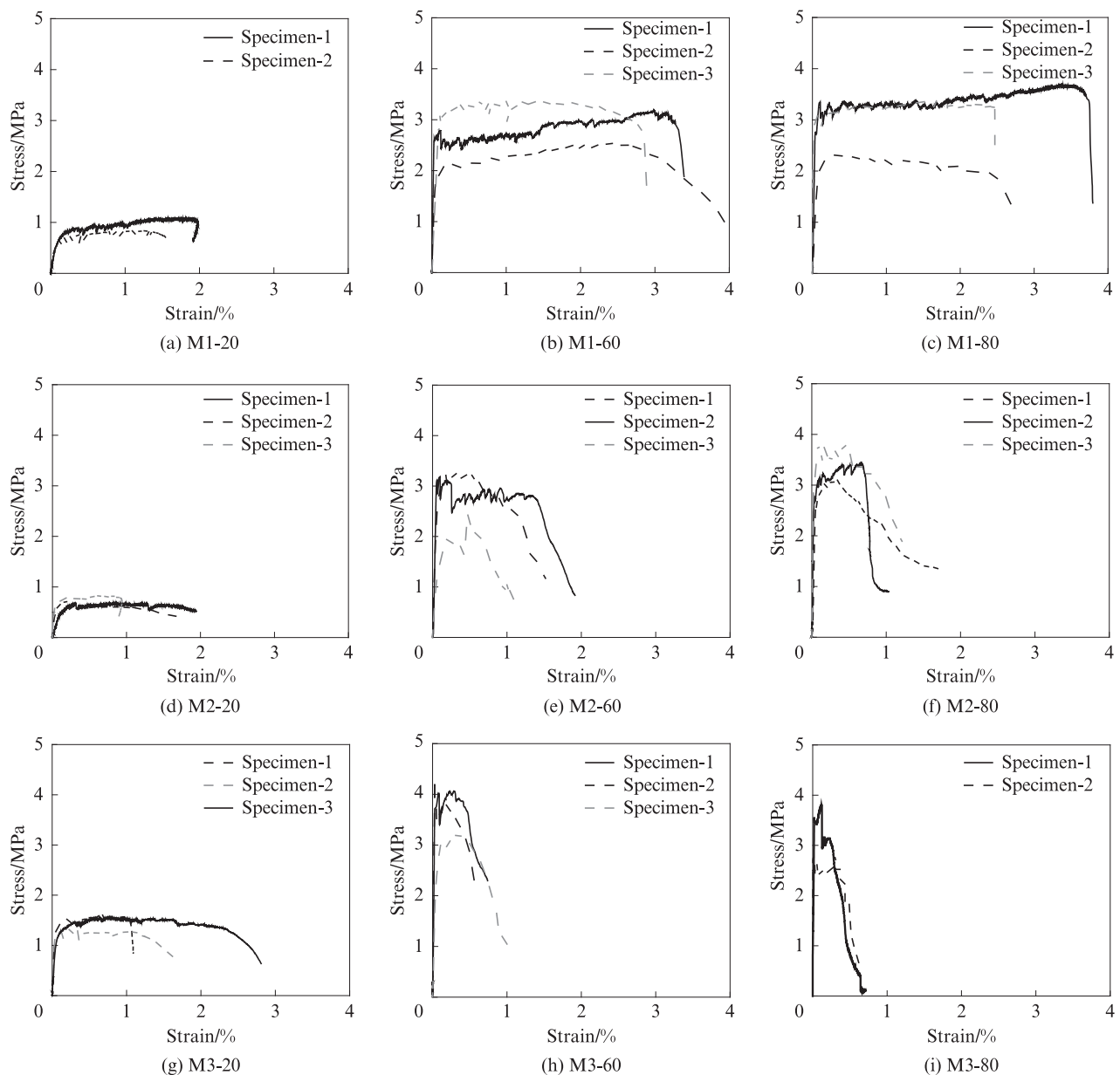


图1 单轴拉伸作用下试件的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of specimens under uniaxial tension

纤维与基体的黏结强度高,纤维在化学脱黏阶段就被拉断,导致拉伸应变随着温度的升高而降低.随着早期养护温度的升高,M1组试件的应变能力不断提高,这与M2、M3组试件相反,原因在于当早期养护温度为20℃时,粉煤灰的激发程度很低,导致界面的黏结性能也很低,纤维在拔出过程中不需要克服较高的界面黏结力和摩擦力,而在60、80℃条件下养

护时,粉煤灰激发程度较高,纤维作用发挥最充分.

单轴拉伸后试件的裂缝分布见图2.由图2可见:拉伸后M1组试件的裂缝较多且细密,出现多缝开裂现象,试件M1-60、M1-80、M1-20的裂缝条数分别约为90、70、30条;而M2和M3组试件的裂缝较少,M2组试件的裂缝大约在10条左右,M3组试件的裂缝仅有1~2条.

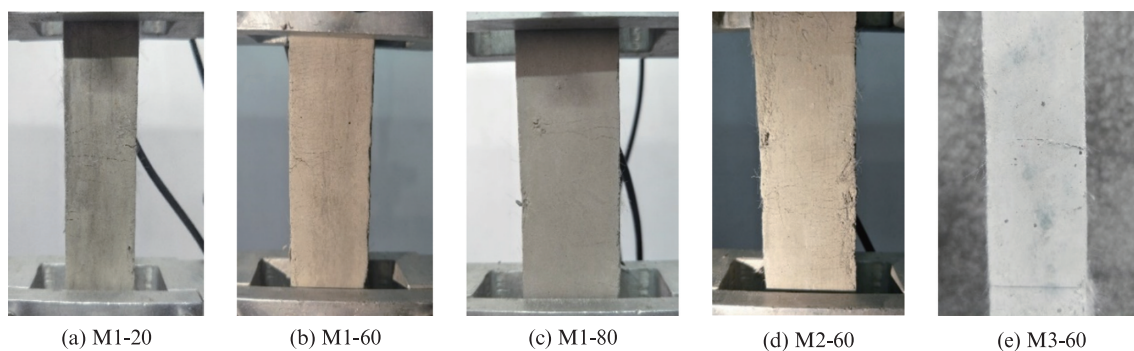


图2 单轴拉伸后试件的裂缝分布
Fig. 2 Distribution of cracks on specimens after uniaxial tension

利用数码显微镜对单轴拉伸后试件的裂缝宽度进行观察测量,结果见图3.由图3可见:M1组试件拉伸后的裂缝普遍较细,试件M1-20、M1-60、M1-80的裂缝宽度分别为46、19~21、26 μm ,适当提高早期养护温度有利于裂缝宽度的控制;M3组

试件的裂缝宽度最大,超过了180 μm ;早期养护温度为60℃时,随着粉煤灰用量的增大,EGC试件的裂缝宽度减小.由此可见,试件M1-60、M1-80属于EGC典型的多缝开裂,纤维对裂缝宽度的控制效果较好.

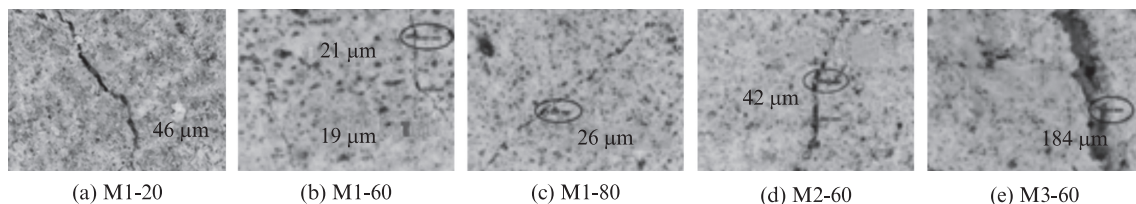


图3 单轴拉伸后试件的裂缝宽度
Fig. 3 Crack width of specimens after uniaxial tension(800 $\times$)

2.2 单纤维拔出

单纤维拔出试件的荷载-位移曲线见图4.由图4可见:(1)试件M3-60的纤维拔出位移很小,仅为0.5 mm左右,达不到纤维的埋置长度,纤维在拔出过程中被拔断.其曲线分为2个阶段,第1阶段表现为线性上升,即线弹性阶段,荷载显著增大但位移变化很小,此阶段位移变化主要是纤维拉伸时的弹性变化,卸载后可恢复;第2阶段为直线下降阶段,此时纤维还未脱黏就被拉断,荷载迅速下降,没有位移.(2)试件M1-20的纤维拔出位移达3.0 mm左右,且荷载在整个过程中没有突然降至0 N,这表明纤维是缓慢拔出而非拔断.其曲线分为3个阶段,第1阶段为线性上升阶段;在第2阶段,荷载在达到200 mN左右时开始

缓慢下降,位移逐渐增大;第3阶段,从位移1.8 mm左右开始,荷载基本呈下降趋势,位移达到3.0 mm左右时荷载降为0 N.(3)试件M1-60与M1-80的荷载-位移曲线基本相似,也可分为3个阶段,第1阶段同为线弹性阶段;第2阶段,随着位移的增大荷载较稳定,但整体呈上升趋势;第3阶段表现为荷载陡降,但位移不变.(4)对M1组试件,随着早期养护温度的升高,纤维的拔出荷载也逐渐增大,这表明较高的早期养护温度可以加快胶凝材料水化反应,产生更多的水化产物,有助于纤维与基体间的黏结,使得纤维与基体的界面处更密实,从而增大其化学黏结强度.从尾部曲线来看,试件M1-60和M1-80属于纤维拔断,原因是随着拔出的过程,纤

维表面剥离越来越严重,剥离的纤维堵塞拔出孔,使得荷载也逐渐增大,这也是曲线中第2阶段荷载上升的原因;而试件M1-20由于黏结强度较低,表现为完全纤维拔出,这也从细观角度解释了其拉伸强度低的原因。(5)对比试件M1-60和M3-60的单纤维拔出荷载-位移曲线可见,在相同早期养护温度下,粉煤灰用量的降低不利于纤维的阻裂作用,虽然试件M3-60的拔出荷载较高,但在其拉伸过程中会被直接拉断,且基本没有拔出的过程,这种较高的拔出荷载得益于纤维与基体间的强化学黏结力,该结果同样印证了试件M3-60在宏观拉伸试验中的表现。

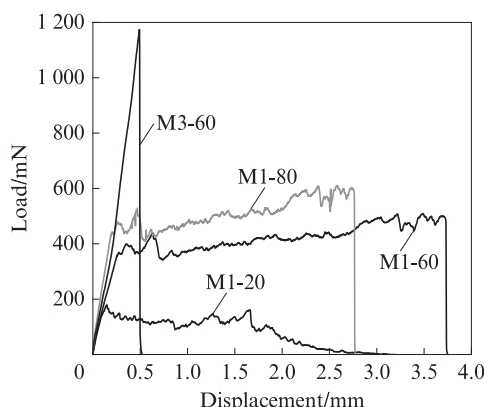


图4 单纤维拔出试件的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of single fiber pull out test of specimens

根据Redon等^[14]提出的方法,计算单纤维拔出试验中纤维-基体的界面性能参数:化学脱黏能 G_d 、摩擦强度 τ_0 和滑移硬化系数 β ,其结果见表3。对于试件M3-60,由于PVA纤维与地质聚合物基体之间的化学脱黏能过大,所以在荷载达到最大值时,纤维发生了断裂,无法通过公式计算其界面参数 G_d 、 β 。由表3可见:随着早期养护温度的升高,M1组试件的 G_d 、 τ_0 、 β 均增大,说明早期养护温度的升高可以有效增加PVA纤维与地质聚合物之间的界面黏结,这也解释了在拉伸试验中随着温度的升高其拉伸应变能力提高的现象,且在化学脱黏后荷载上升,由于PVA纤维与基体的摩擦强度增大,导致滑移硬化系数增大,纤维遭受基体的磨损而发生剥离,纤维最终达到所能承受的最大荷载而断裂;对比试件M1-60与M3-60的单纤维拔出荷载-位移曲线可见,后者纤维所能承受的最大荷载可达1 000 mN以上,高于其他各组,但达到最大荷载后纤维即被拉断,说明M3组试件的纤维与基体间化学黏结过强,不利于纤维发挥桥联作用,宏观上拉伸应变能力较差。

表3 单纤维拔出试验中纤维-基体的界面性能参数
Table 3 Interface property parameters of fiber-matrix in single fiber pull out experiment

Specimen	$G_d/(J \cdot m^{-2})$	τ_0/MPa	β
M1-20	2.07	1.18	0.016 4
M1-60	2.30	2.91	0.042 5
M1-80	3.15	3.51	0.057 3
M3-60		9.17	

试件M1-80在单纤维拔出过程中及拔出后的状态见图5。由图5可见:拔出过程中纤维处于轴向拔出拉伸状态,此时纤维的长度比原长长,这是因为除一部分纤维拔出以外,还有一部分纤维处于弹性延伸状态;基体中拔出孔附近有部分丝状纤维剥离物(见图5(b));拔出纤维略有变形且表面粗糙不平,覆有基体水化产物,说明纤维在拔出过程中受到磨损,且纤维端部受挫更加严重,表面基体残渣明显(见图5(d))。

2.3 水化产物分析

EGC的XRD图谱见图6。由图6可见,当基体中不掺粉煤灰时:在 $2\theta=30^\circ$ 左右有1个明显的峰,其水化产物中水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的峰值较高;随着粉煤灰用量的增加,该峰越来越低,在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 范围内出现“鼓包峰”,这可能是因为随着粉煤灰的掺入,EGC的水化产物中出现了水化硅铝酸钠(N-A-S-H),其不定形程度要高于水化硅(铝)酸钙(C-(A)-S-H)凝胶。刘泽等^[23]对粉煤灰-矿渣地质聚合物砂浆水化产物的研究中也表明有大量N-A-S-H凝胶生成。试件M3-60、M2-60、M1-60的水化产物中均存在少量水滑石,这是由矿渣的水化产生;当基体中掺有粉煤灰时,其水化产物的XRD图谱均出现了新的峰,主要为莫来石、钙矾石及硅铝酸相物质。在试件M1-60的水化产物中还发现有 SiO_2 ,这是 SiO_2 作为原材料中未完全反应的矿物成分而被保留了下来^[24]。

试件M1-20、M1-60、M1-80的水化产物中均有C-S-H凝胶、莫来石、硅铝酸相物质、钙矾石及水滑石,说明早期养护温度的不同对地质聚合物基体水化产物的种类无明显影响;随着早期养护温度的升高, $2\theta=30^\circ$ 附近的峰越来越明显,这说明较高的早期养护温度促进了矿渣粉和粉煤灰的水化,使水化产物的含量更高,C-(A)-S-H的峰越来越高,N-A-S-H让“馒头峰”越来越明显。同时,随着早期养护温度的提高,莫来石及硅铝酸相物质的峰也越来越高,且早期养护温度从 $20^\circ C$ 提高到 $60^\circ C$ 时,其峰的提升要比从 $60^\circ C$ 提高到 $80^\circ C$ 时更明显,说明适当提高早期养护温度会促进地质聚合物的水化。

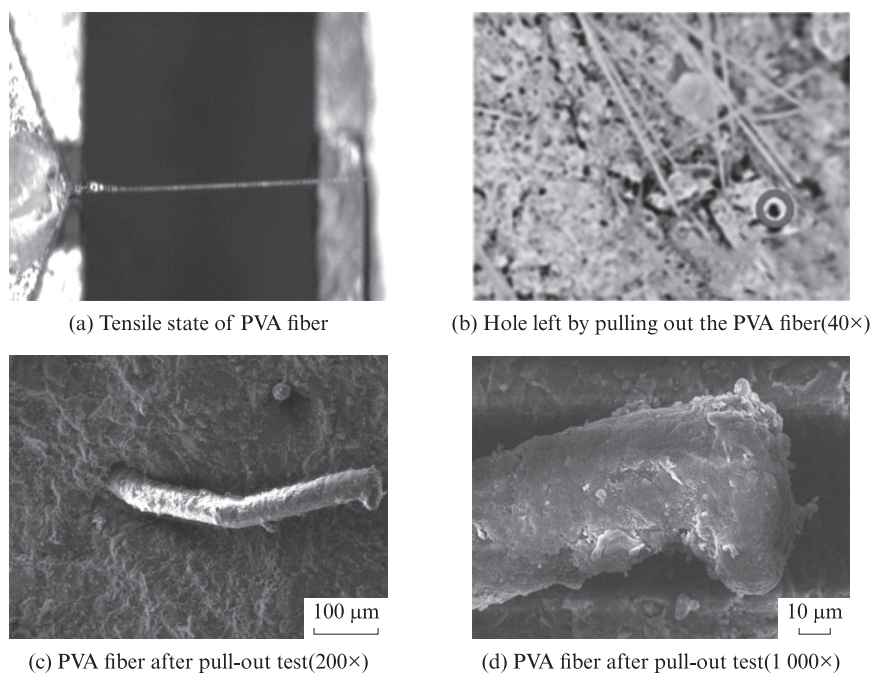


图5 试件 M1-80 在单纤维拔出过程中及拔出后的状态

Fig. 5 State of M1-80 specimen during and after single fiber pull out test

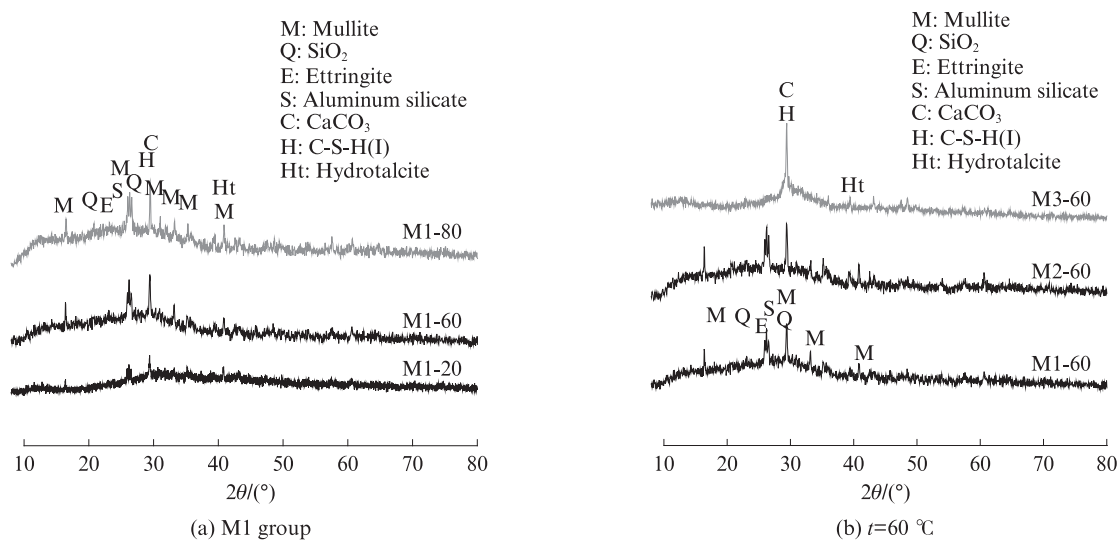


图6 EGC 的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of EGC

3 结论

(1) 相同早期养护温度下,随着粉煤灰用量的减小,工程地质聚合物复合材料(EGC)的拉伸性能显著降低;适当提高早期养护温度有利于EGC拉伸性能的提高,但应变有所降低;早期养护温度的提升有利于EGC多缝开裂及裂缝宽度的控制.粉煤灰用量80%、早期养护温度60℃或80℃时,EGC拉伸应变可达到3.5%以上.

(2) 纤维直接拔出与拉断均不利于EGC的多缝

开裂及应变硬化;只有在拉拔过程中存在较长的强化阶段,试件的拉伸性能才更优异;随着早期养护温度的提高,纤维-基体的界面性能参数有所增大,界面黏结性能增强.粉煤灰用量80%、早期养护温度80℃的EGC化学脱黏能、摩擦强度及滑移硬化系数分别达到了3.15 J/m²、3.51 MPa和0.057 3.

(3) 较高的粉煤灰用量使地质聚合物基体水化产物中增加了水化硅铝酸钠(N-A-S-H)、水滑石及硅酸铝相物质,提高早期养护温度可以促进地质聚合物基体的水化,莫来石及硅铝酸相含量增大,从而

有助于工程地质聚合物复合材料拉伸性能的提高。

参考文献:

- [1] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2):429-441.
- [2] 张书政, 龚克成. 地聚合物[J]. 材料科学与工程学报, 2003 (3): 430-436.
ZHANG Shuzheng, GONG Kecheng. Geopolymer [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003 (3): 430-436. (in Chinese)
- [3] 袁鸿昌, 江尧忠. 地聚合物材料的发展及其在我国的应用前景[J]. 硅酸盐通报, 1998 (2):3-5.
YUAN Hongchang, JIANG Yaozhong. The development of geopolymer and its future application in our country [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1998(2):3-5. (in Chinese)
- [4] TURNER L K, COLLINS F G. Carbon dioxide equivalent ($\text{CO}_2\text{-e}$) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 43:125-130.
- [5] 张云升, 孙伟, 沙建芳, 等. 粉煤灰地聚合物混凝土的制备、特性及机理[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(3):237-242.
ZHANG Yunsheng, SUN Wei, SHA Jianfang, et al. Preparation, properties and mechanism of fly ash based geopolymer concrete [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6 (3):237-242. (in Chinese)
- [6] KURTOGLU A E, ALZEEBAREE R, ALJUMAILI O, et al. Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete [J]. Advances in Concrete Construction, 2018, 6(4):345-362.
- [7] ALBITAR M, ALI M S M, VISINTIN P, et al. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes [J]. Construction and Building Materials, 2017, 136:374-385.
- [8] ALANAZI H, ZHANG D L, YANG M J, et al. Early strength and durability of metakaolin-based geopolymer concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(1):46-54.
- [9] 彭佳, 颜子博. 地质聚合物的研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2014 (1):16-19.
PENG Jia, YAN Zibo. Recent research progress of geopolymer [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2014(1):16-19. (in Chinese)
- [10] RYU G S, LEE Y B, KOH K T, et al. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 409-418.
- [11] NOUSHINI A, BABAEI M, CASTEL A. Suitability of heat-cured low-calcium fly ash-based geopolymer concrete for precast applications [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68(4):163-177.
- [12] FARHAN N A, SHEIKH M N, HADI M N S. Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 196:26-42.
- [13] PAN Z, SANJAYAN J G, RANGAN B V. Fracture properties of geopolymer paste and concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(10):763-771.
- [14] SARKER P K, HAQUE R, RAMGOLAM K V. Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete [J]. Materials and Design, 2013, 44:580-586.
- [15] SHAIKH F U A. Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites [J]. Materials and Design, 2013, 50:674-682.
- [16] NEMATOLLAHI B, SANJAYAN J, SHAIKH F U A. Tensile strain hardening behavior of PVA fiber-reinforced engineered geopolymer composite [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10):04015001.
- [17] LEE B Y, CHO C G, LIM H J, et al. Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar—A feasibility study [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:15-20.
- [18] OHNO M, LI V C. A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites [J]. Construction and Building Materials, 2014, 57:163-168.
- [19] NEMATOLLAHI B, SANJAYAN J, QIU J S, et al. High ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced one-part geopolymer composite: A micromechanics-based investigation [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(3): 555-563.
- [20] NEMATOLLAHI B, QIU J, YANG E H, et al. Microscale investigation of fiber-matrix interface properties of strain-hardening geopolymer composite [J]. Ceramics International, 2017, 43(17): 15616-15625.
- [21] NEMATOLLAHI B, RANADE R, SANJAYAN J, et al. Thermal and mechanical properties of sustainable lightweight strain hardening geopolymer composites [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(1):55-64.
- [22] 郭丽萍, 湛正凯, 杨亚男. 一种短切超细有机纤维与水泥基复合材料界面粘结强度的测试方法: CN104807749A [P]. 2015-07-29.
GUO Liping, SHEN Zhengkai, YANG Yanan. A test method for interfacial bond strength of short-cut ultrafine organic fiber and cement-based composite material: CN104807749A [P]. 2015-07-29. (in Chinese)
- [23] 刘泽, 程国东, 黄天勇, 等. 粉煤灰-矿渣地质聚合物砂浆性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6):1883-1888.
LIU Ze, CHENG Guodong, HUANG Tianyong, et al. Research on properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38 (6):1883-1888. (in Chinese)
- [24] XU L H, DENG F Q, CHI Y. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2017, 145:619-638.