

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.09.019

燃煤渣花岗岩粉基地质聚合物的制备

郑戈弋¹, 周海林¹, 黄青叶¹, 姚瞬雨¹, 李典彤¹, 阚宏博¹, 包申旭^{1,2}

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070)

摘要:采用燃煤渣和花岗岩粉为主要原料制备地质聚合物。结果表明,当燃煤渣与花岗岩粉的质量比为 10, NaOH 溶液(6 mol/L)与燃煤渣比值为 0.25 mL/g, 水玻璃与燃煤渣比值为 0.18 mL/g, 养护温度 60 °C, 带模养护时间 2 天时, 脱模后得到的最终产物在 28 天的抗压强度可达 20.96 MPa。氢氧化钠溶液对试样抗压强度的影响是硅铝溶解、泛霜及孔隙率变化等多重因素综合作用的结果。水玻璃的加入并不能使试样的矿物组成发生较大改变, 但可以显著提高反应体系中硅酸盐低聚离子的浓度, 增加凝胶的生成量。花岗岩粉在碱激发的条件下未表现出明显的地质聚合能力, 但适量掺入仍可以起到骨料和填充作用, 提高地质聚合物的抗压强度。本研究拓宽了制备地质聚合物的原料来源, 为燃煤渣和花岗岩粉在建筑材料方面的利用提供了参考。

关键词:燃煤渣; 花岗岩粉; 综合利用; 地质聚合物; 激发

中图分类号: X758

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2022)09-0133-07

Preparation and Performance Characterization of Granite Powder-Burnt Coal Cinder-Based Geopolymer

ZHENG Ge-yi¹, ZHOU Hai-lin¹, HUANG Qing-ye¹, YAO Shun-yu¹, LI Dian-tong¹, KAN Hong-bo¹,
BAO Shen-xu^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, China)

Abstract: Geopolymers was prepared by applying burnt coal cinder (BCC) and granite powder (GP) as main raw materials. The results show that when the mass ratio of BCC to GP is 10, ratio of NaOH solution (6 mol/L) to BCC is 0.25 mL/g, ratio of waterglass to BCC is 0.18 mL/g, curing temperature is 60 °C, and curing with mold for 2 days, the compressive strength (28 d) of the final product obtained after demolding can reach 20.96 MPa. The influence of NaOH solution on compressive strength of sample is the result of combined effect of multiple factors including dissolution of silica and aluminum, phenomenon of efflorescence and porosity. The addition of waterglass cannot make the mineral composition of sample change obviously, but it can significantly increase the concentration of silicate oligomeric ions in reaction system and increase generation of gels. GP does not show obvious geopolymerization ability under the condition of alkali activation, but it can still play the role of aggregate and filling, improving compressive strength of geopolymer. This study broadens the sources of raw materials for preparation of geopolymers, and provides a reference for utilization of BCC and GP in building materials.

Key words: burnt coal cinder; granite powder; comprehensive utilization; geopolymer; activation

收稿日期: 2022-06-01

基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金资助项目(2021-ZH-A1-01); 国家重点研发计划项目(2018YFC1900606)

作者简介: 郑戈弋(2002-), 男, 本科生; 通信作者: 包申旭(1979-), 男, 教授, 博士生导师

燃煤渣是煤燃烧后排出的废渣,通常又称炉渣,是常见的大宗工业固体废弃物之一。我国每年产生上亿吨燃煤渣^[1],但目前燃煤渣的利用率低,除少部分用于制砖和铺路外^[2-3],渣场填埋依然是国内多数企业处理燃煤渣的首选^[4]。燃煤渣的填埋处理不仅侵占大量土地,还容易造成重金属渗滤等污染,其安全和环保问题日益引起人们重视。我国花岗岩石材分布广泛,花岗岩粉是在花岗岩石材开采和加工利用过程中产生的粉末废料,具有产生量大、质地细、难处置的特点。花岗岩粉露天堆放时易污染空气,损害人类和动物的呼吸系统,引发疾病;雨天则随雨水流入河道,污染水源;此外还会板结农田,对农作物的生长产生抑制,也是一种亟待利用的大宗固体废弃物。

地质聚合物是一种以硅铝四面体为基本结构单元的新型胶凝材料,由于制备过程不需水泥生产中的“两磨一烧”环节,具有制备方便、能耗小、碳排放低等优势。地质聚合物材料在三维空间上具有硅-氧-铝的网状结构^[5],相比普通水泥具有更强的机械强度和更优的耐腐蚀、耐酸碱、耐高温性、抗冻融性等性能^[6],应用前景广阔。

目前,国内外制备地质聚合物的原材料一般是偏高岭土^[7]或一些高硅铝的固体废弃物,如:粉煤灰、矿渣^[8-9]等,但利用偏高岭土会浪费自然资源,另外粉煤灰、矿渣等原料的供给有时也会受到一定限

制。因此,开发利用大宗工业固体废弃物制备地质聚合物有助于拓宽地质聚合物的原料来源,同时也可作为大宗工业固废的处置和综合利用提供新的途径,是当前生态环境和绿色建材领域的重要研究方向。

1 试验

1.1 试验原料

燃煤渣(BCC)与花岗岩粉(GP)分别取自湖北省麻城市火电厂和花岗岩石材加工厂。燃煤渣中含有部分烧结颗粒,预先干燥后在振磨机中粉磨至 $D_{90}=60\ \mu\text{m}$ 。花岗岩粉初始粒度较细, $D_{90}=70\ \mu\text{m}$,因此在使用前仅作烘干处理。试验使用的主要化学试剂有NaOH(工业纯)和水玻璃(质量分数42%,模数2.31)。

燃煤渣的XRD谱如图1a所示,燃煤渣中含有许多石英和莫来石的矿物相以及大量非晶态玻璃相,其化学组成结果(表1)显示,燃煤渣主要是由 SiO_2 和 Al_2O_3 组成,还含有少量 Fe_2O_3 、 CaO 和 K_2O 等。花岗岩粉的XRD谱(图1b)和化学组成(表1)显示,花岗岩粉含有大量的石英、钠长石和微斜长石的矿物相,主要化学组分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,另外还有少量 Fe_2O_3 、 CaO 和 K_2O 。从以上分析结果可以看出,燃煤渣和花岗岩粉中都含有丰富的 SiO_2 和 Al_2O_3 组分,硅铝总含量分别达84.29%和86.33%,具备作为制备地质聚合物原料的可能性。

表1 燃煤渣和花岗岩粉的化学成分

名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	其他	烧失量
燃煤渣(BCC)	53.98	30.31	4.20	1.77	0.82	0.58	0.86	6.68
花岗岩粉(GP)	70.01	16.32	1.78	1.27	4.28	0.52	1.97	0.98

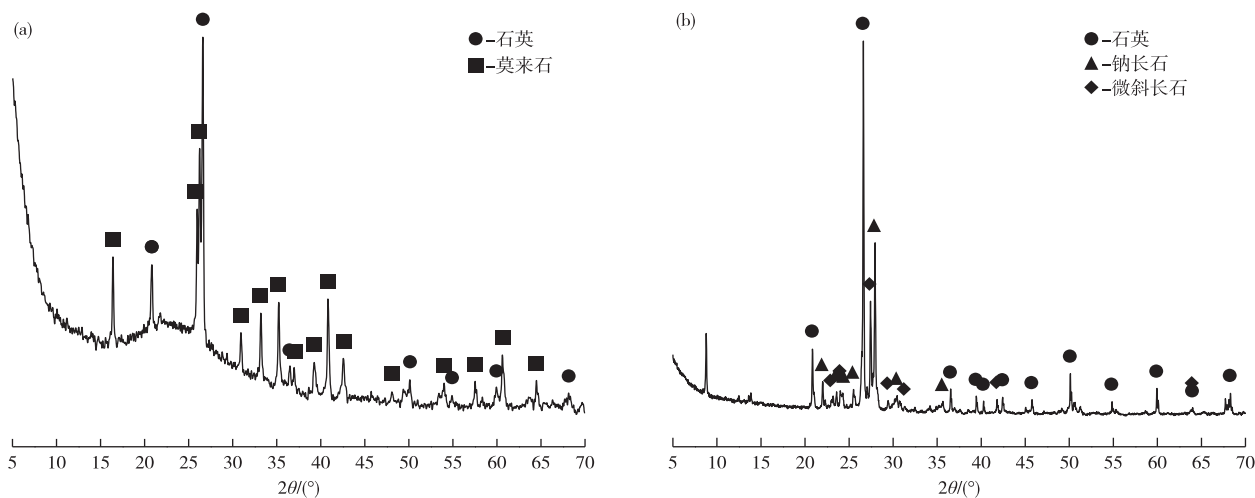


图1 燃煤渣(a)和花岗岩粉(b)的XRD谱

Fig. 1 XRD patterns of BCC(a) and GP(b)

1.2 地质聚合物制备

首先探究单独采用燃煤渣制备的地质聚合物的性能。制备流程如下:将粉磨后的燃煤渣置于水泥浆搅拌机中并依次加入 NaOH 溶液和水玻璃,搅拌均匀并充分混合形成浆体。将浆体注入钢制模具(20 mm×20 mm×20 mm)中,在振实台上振动 2 分钟后得到较为密实的试件。最后,将模具在 60 °C 和 95% 相对湿度下的养护箱中养护 2 天,脱模得到燃煤渣地质聚合物试样,然后在室温(20±5)°C 下继续养护,分别测量其 3 天,7 天和 28 天的抗压强度。在此基础上,当制备燃煤渣基浆体时添加一定量的花岗岩粉作为骨料,后续操作同上,脱模后得到燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物试样。

1.3 测试和表征方法

根据 GB/T 17671—1999 方法采用 YES-100 型数显式液压压力试验机进行地质聚合物试样的抗压强度测试;采用 Zetium 型 X 射线荧光谱仪进行化学组成分析,工作功率 4 kW;采用锐影 Empyrean 型 XRD 仪进行物相分析;采用 VERTEX72 型傅里叶红外光谱仪(FTIR)进行样品红外光谱分析;采用扫描电子显微镜(SEM, JSM-IT300)观察样品的微观结构;采用 STA449F3 型同步热分析仪进行热重分析,条件为空气气氛,加热速率 10 °C/min。

2 结果与讨论

2.1 NaOH 浓度对燃煤渣地质聚合物抗压强度的影响

在 NaOH 溶液与燃煤渣比值为 0.30 mL/g,养护温度 60 °C,带模养护时间 2 天的条件下,改变 NaOH 浓度,制备燃煤渣地质聚合物。从图 2 可知,同一龄期样品的抗压强度总体上随着 NaOH 浓度的增加出现先增加后下降的变化趋势。三组不同龄期地质聚合物的抗压强度均在 NaOH 浓度为 6 mol/L 时达到最大值。另外,不同 NaOH 浓度下制备的燃煤渣地质聚合物在养护早期(3 d、7 d)抗压强度极低,直到养护 28 d 时强度才出现较明显的提升。这一现象表明,燃煤渣的早期水化反应速率及程度均较低,需要长时间的养护和固化脱水才能使产品获得一定的抗压强度。

地质聚合物的抗压强度主要来自溶出的硅铝配合物对晶体颗粒的键合作用,且 NaOH 浓度对硅铝溶解有着显著的影响^[10]。NaOH 浓度过低,原料硅铝酸盐中高度聚合的 Si—O—Si(Al) 等共价键难以断裂,无法溶解进入液相中重组,不利于水化硅铝酸

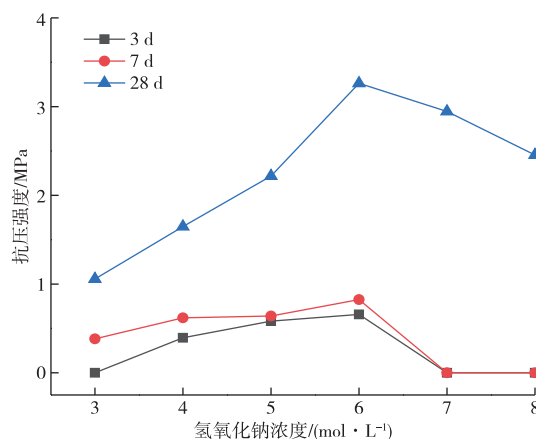


图 2 NaOH 浓度对燃煤渣地质聚合物抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of NaOH concentration on compressive strength of BCC-based geopolymer

钠(N—A—S—H)凝胶结构的形成;NaOH 浓度过高,在养护后期不参与凝胶结构中电荷平衡的 Na⁺ 随水分分离至试样表面,与空气中的 CO₂ 反应生成 Na₂CO₃,导致表面剥落、内部致密结构破坏、孔隙扩张等负面影响(即“泛霜”效应),从而使得燃煤渣地质聚合物的抗压强度显著下降^[11]。

2.2 NaOH 溶液的用量对燃煤渣地质聚合物抗压强度的影响

在养护温度 60 °C,带模养护时间 2 天的条件下,改变 NaOH 溶液(6 mol/L)用量,得到的试样在 NaOH 溶液与燃煤渣比值为 0.25 mL/g 处表现出最高抗压强度,用量继续增加后抗压强度出现显著下降(图 3)。NaOH 溶液与燃煤渣比值的改变除了

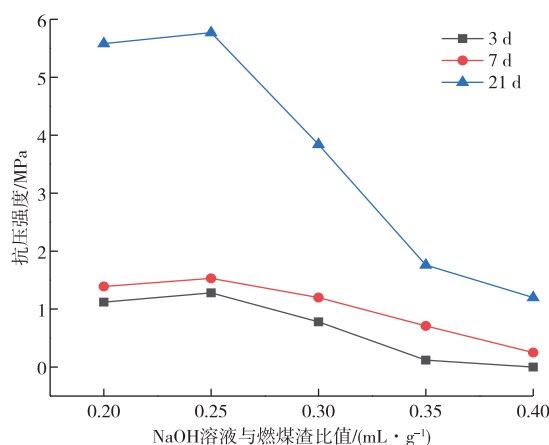


图 3 NaOH 溶液用量对燃煤渣地质聚合物抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of dosage of NaOH solution on compressive strength of BCC-based geopolymer

与地质聚合反应中金属阳离子的数量直接关联,也会引起浆体的含水量变化。水作为地质聚合反应的重要组分,既是反应初期的媒介,促进原料中化学键的断裂和硅铝酸盐的溶解,又在缩聚阶段随地质聚合物的固化而脱出,脱水量直接影响到地质聚合物内部的孔隙度与致密性。当整个反应体系中存在过多的水时,参与反应的可溶性离子会被再次浸出释放,从反应体系中脱离,导致燃煤渣基地质聚合物的抗压强度明显降低^[12]。

2.3 水玻璃用量对燃煤渣基地质聚合物的抗压强度的影响

在 NaOH 溶液 (6 mol/L) 与燃煤渣比值为 0.25 mL/g 的条件下,引入水玻璃,当水玻璃与燃煤渣比值在 0~0.18 mL/g 变化时,燃煤渣基地质聚合物的抗压强度随着水玻璃的用量的增大而提高(图 4),用量继续增大后开始出现下降。未加入水玻璃作为激发剂时,NaOH 溶液溶出的 Si—O 和 Si—O—Si(Al) 键较少,加入水玻璃后,提高了反应体系中硅酸盐低聚离子的浓度,有利于地质聚合反应的进行,促进了燃煤渣基地质聚合物的强度发展。但水玻璃本身属于黏稠性液体,流动性较差,加入过多会降低浆料的流动性,离子的迁移受到阻碍,抑制体系中各类反应物的活动,降低了反应速率,进而显著降低样品的抗压强度^[13]。

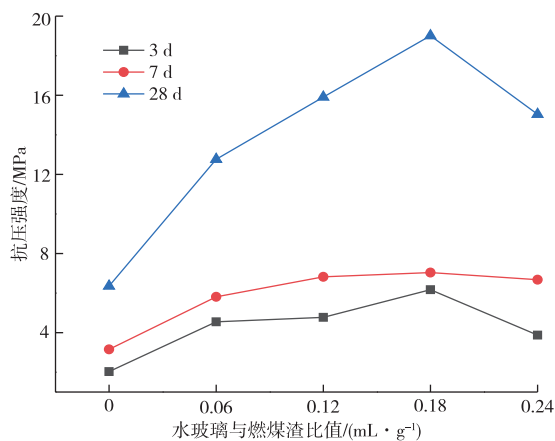


图4 水玻璃与燃煤渣对比对燃煤渣基地质聚合物的抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of ratio of waterglass to BCC on compressive strength of BCC-based geopolymer

2.4 花岗岩粉的掺入量对样品抗压强度的影响

如图5所示,随着花岗岩粉掺入量的增大,不同龄期的地质聚合物的抗压强度先增大后减小。花岗岩粉化学性质十分稳定,即使在强碱性环境下也很

难破坏其石英和长石类矿物晶体结构(图1b),因此其硅铝组分很难溶出,在燃煤渣基地质聚合物中绝大多数只起到骨架和支持作用,用于填补燃煤渣基地质聚合物中的孔洞,减少了燃煤渣基地质聚合物中孔隙对胶凝材料的损耗。当花岗岩粉在原料中占比过多时,会导致原料中参与地聚合反应的活性燃煤渣相对减少,相对地需要被胶结的骨料增加,从而使得试样的抗压强度明显降低。

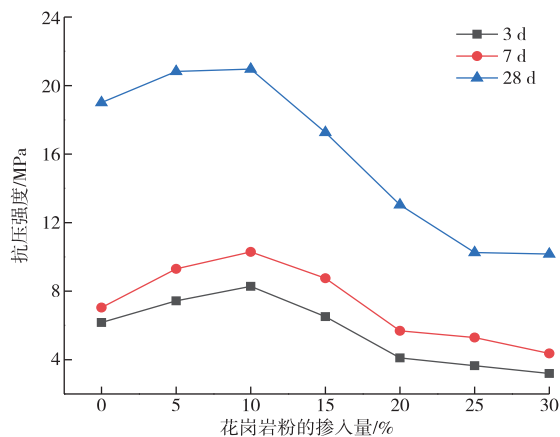


图5 花岗岩粉的掺入量对地质聚合物抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of amount of granite powder on compressive strength of geopolymer

2.5 产品表征

根据以上单因素试验结果,确定了燃煤渣-花岗岩粉基地质聚合物制备的最优单因素工艺条件为:燃煤渣与花岗岩粉的质量比为10,NaOH溶液(6 mol/L)与燃煤渣的比值为0.25 mL/g,水玻璃与燃煤渣的比值为0.18 mL/g,在60℃和95%相对湿度下的养护箱中养护2天,此条件下制备的燃煤渣-花岗岩粉基地质聚合物28 d的抗压强度可达20.96 MPa。

2.5.1 燃煤渣基地质聚合物的XRD分析

图6为水玻璃与燃煤渣比值分别为0和0.18 mL/g的燃煤渣基地质聚合物试样(28 d)的XRD谱。可以看出,无论是否加入水玻璃,样品在 $2\theta=20^\circ\sim35^\circ$ 内均出现较宽的玻璃相的弥散峰,这与硅铝原料生成的无定形的凝胶相(N-A-S-H)有关^[14],水玻璃的加入并未使矿物组成发生较大改变。但是,掺加水玻璃的试样中各种矿物相的峰面积均有所减少,由于试样中的主要矿物相为惰性矿物石英和莫来石,一般不参与地聚合反应,推测出现这个现象的原因主要是,水玻璃的加入使

地聚合反应产生了更多的无定形凝胶相,包裹住了石英和莫来石晶体^[15],说明水玻璃的加入对地质聚合反应产物有一定促进作用,有利于最终产品强度的提升。

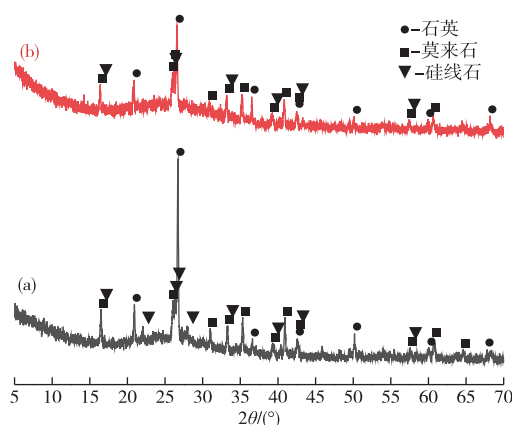


图6 水玻璃与燃煤渣比为0(a)和0.18 mL/g(b)时的燃煤渣基地质聚合物的XRD谱
Fig. 6 XRD patterns of BCC-based geopolymer with ratio of waterglass to BCC of 0(a) and 0.18 mL/g(b)

2.5.2 燃煤渣基地质聚合物的FTIR分析

水玻璃与燃煤渣比值为0和0.18 mL/g的燃煤渣基地质聚合物的红外吸收光谱图(图7)总体上比较接近,这说明水玻璃的引入虽然会影响地质聚合反应的进程,但产物的成分大致相同,只是在含量上出现一定的变化。样品在 $3\,446\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,647\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰是H—O—H伸缩振动峰和弯曲振动峰,这表明试样中存在少量的结合水。在 $1\,400\text{ cm}^{-1}$ 附近是 CO_3^{2-} 中O—C—O的伸缩振动峰,推测是由于空气中的 CO_2 与溶液中的碱反应生成了 CO_3^{2-} ,即产生了“泛霜”现象。在FTIR的指纹区中, 460 cm^{-1} 附近的吸收峰来源于硅铝酸盐原料中的Si—O键的弯曲振动,它的存在较为普遍和稳定,不随水玻璃的添加量变化而改变。而 560 cm^{-1} 附近的吸收峰是Al—O的弯曲振动峰,可以体现Al随机取代Si—O中Si的水平。 $600\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 处是Si—O—Si(Al)的对称伸缩振动峰。 $1\,028\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,017\text{ cm}^{-1}$ 处的峰是来自原料中的硅酸盐矿物以及地质聚合物中N—A—S—H凝胶的Si—O—Si(Al)的非对称伸缩振动峰^[16-18]。

当水玻璃与燃煤渣比值由0到0.18 mL/g变化时,FTIR谱图最主要的变化是在 $1\,010\sim 1\,030\text{ cm}^{-1}$

内的不对称伸缩振动峰向低波数移动,说明原料中Si—O—Si链上的 AlO_4 基团数量增加,从而造成Si—O键伸缩振动峰产生一定的偏移。上述现象表明,水玻璃的引入使得更多的Si—O—Al结构单元形成,生成了更多胶凝材料,促进了试样抗压强度的提高^[19-20]。

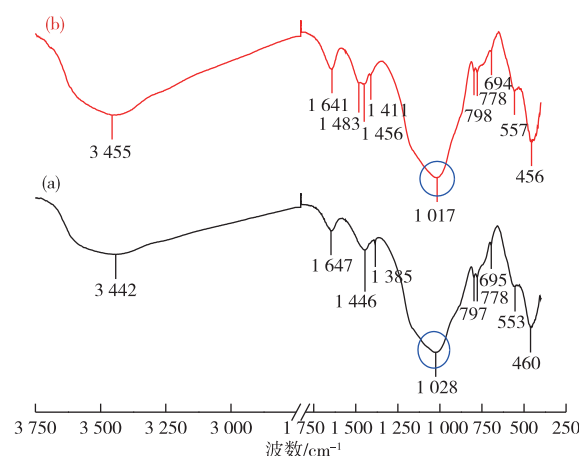
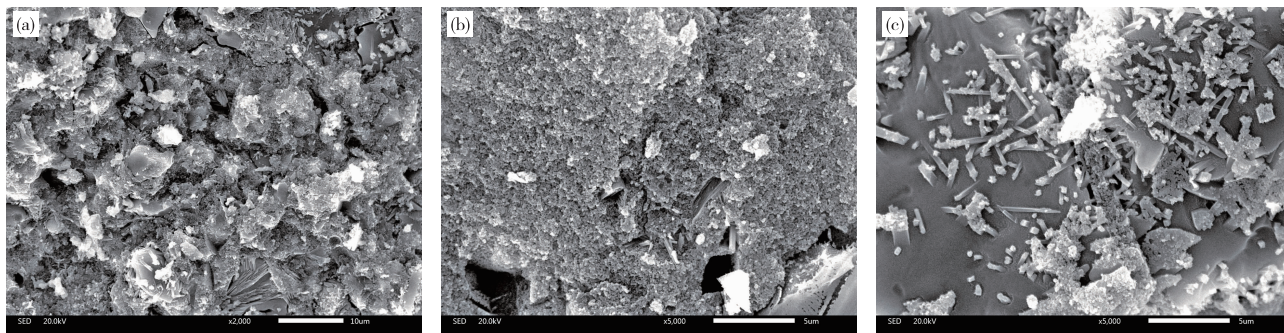


图7 水玻璃与燃煤渣比为0(a)和0.18 mL/g(b)时的燃煤渣基地质聚合物的FTIR谱
Fig. 7 FTIR patterns of BCC-based geopolymer with ratio of waterglass to BCC of 0(a) and 0.18 mL/g(b)

2.5.3 SEM分析

图8为不同条件下制备的地质聚合物试样的断面SEM微观形貌图。对比图8a可以看出,水玻璃与燃煤渣比值为0的试样中,断面上存在较大孔隙与裂纹,说明层状凝胶物质生成数量较少且分布不均,仅能够在内部将原料黏连胶结。水玻璃与燃煤渣比值为0.18 mL/g时,可以明显观察到凝胶物质的生成量更多,矿物颗粒之间的黏结更加紧密(图8b),孔隙率得到一定程度减少,表面相对致密平整。

在水玻璃与燃煤渣比值为0.18 mL/g的条件下,掺入适量花岗岩粉后,试样的断裂面更加致密(图8c),推测在凝胶材料生成量几乎没有变化的条件下,花岗岩粉替代胶凝材料填充到燃煤渣基地质聚合物的孔洞中,使得更多的凝胶可以发挥出黏结作用,形成较好的物理包覆,提高了地质聚合物的抗压强度。对比图8b,未掺入花岗岩粉的试样由于生成的胶凝材料有限,填补孔隙需要消耗更多的胶凝物质,仅能从内部将各种矿物颗粒和骨料黏结,宏观上表现为地质聚合物的抗压强度降低。



(a)水玻璃与燃煤渣比为0;(b)水玻璃与燃煤渣比为0.18 mL/g;(c)水玻璃与燃煤渣比为0.18 mL/g且花岗岩粉掺入量为10%

图8 燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物的SEM形貌

Fig. 8 SEM morphologies of BCC-GP-based geopolymer

2.5.4 燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物的热稳定性分析

图9为最佳条件制备得到的燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物的热重分析图。TG曲线表明,燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物大约在80~800℃内经历了连续的质量损失,800℃之后,质量几乎保持恒定,总失重约10.97%。质量损失主要是由样品中物理吸附水(80℃<T<200℃)和化学键合水(200℃<T<700℃)脱除引起的^[13]。

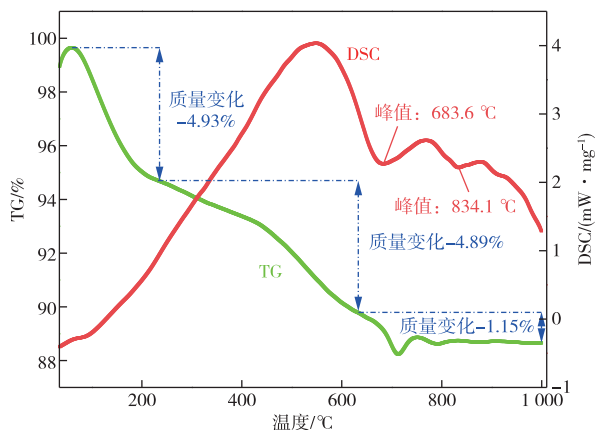


图9 燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物的TG-DSC曲线

Fig. 9 TG-DSC curve of BCC-GP-based geopolymer

DSC曲线在100℃左右出现的微小吸热峰是由样品中的物理吸附水脱除引起的。100℃之后,由于空气中氧气的存在,燃煤渣中残余的碳大量氧化,试样持续放热。在680℃附近出现明显吸热峰,由于样品脱去内部化学键合水以及碳酸的受热分解,需要吸收大量热量,与TG曲线变化吻合。750℃之后,样品中的水分已基本脱除,但又出现数个微小的吸热峰,由于没有明显的质量变化,推测为样品内部发生了晶相转变^[21]。

3 结论

1)以燃煤渣和花岗岩粉为原料制备地质聚合物最优条件为:燃煤渣与花岗岩粉的质量比10,NaOH溶液(6 mol/L)的体积与燃煤渣的质量比为0.25 mL/g,水玻璃的体积与燃煤渣的质量比为0.18 mL/g,在60℃和95%相对湿度下的养护箱中养护2天,此条件下制备的燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物28天的抗压强度可达20.96 MPa。

2)花岗岩粉作为惰性原料掺入燃煤渣中,主要充当填料填充燃煤渣地质聚合物的孔洞,减少对胶凝材料的无效损耗,制备得到的燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物的抗压强度显著优于燃煤渣地质聚合物;但是花岗岩粉掺入过多时,原料中活性组分的相对含量减少,生成的凝胶物质相对减少,不利于燃煤渣-花岗岩粉地质聚合物的抗压强度的提高。

3)利用燃煤渣和花岗岩粉可以制备出满足C20普通混凝土强度要求的地质聚合物砌块,复合碱性激发剂对燃煤渣起到了有效的活化作用,燃煤渣中的硅铝组分充分参与地质聚合反应,为燃煤渣和花岗岩固体废弃物的综合利用提供了参考。

参考文献

- [1] 廖桥,彭博,李碧雄. 炉渣建材资源化利用现状[J]. 重庆建筑,2018,17(3):53-57.
LIAO Q, PENG B, LI B X. A review of resource utilization of slag building material [J]. Chongqing Architecture, 2018, 17(3): 53-57.
- [2] FERREIRA V J, SAEZ-DE-GUINOA V A, GARCIA-ARMINGOL T, et al. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: Technical requirements and environmental impact

- assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 130:175-186.
- [3] AZIZ M M A, HAININ M R, YAACOB H, et al. Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and highways [J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(S6):6-255.
- [4] DANG Y, ZHANG R, WU S J, et al. Calcium effect on anaerobic biological treatment of fresh leachate with extreme high calcium concentration[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 95:76-83.
- [5] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1989, 35(2):429-441.
- [6] 孙道胜,王爱国,胡普华. 地质聚合物的研究与应用发展前景[J]. *材料导报*, 2009, 23(7):61-65.
SUN D S, WANG A G, HU P H. Research of geopolymer and its applications and development prospe[J]. *Materials Reports*, 2009, 23(7):61-65.
- [7] 彭晖,李树霖,蔡春声,等. 偏高岭土地质聚合物的配合比及养护条件对其力学性能及凝结时间的影响研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(11):2809-2817.
PENG H, LI S L, CAI C S, et al. Study on effect of mix and curing conditions on the mechanical proper and setting time of metakaolin-based geopolymer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(11):2809-2817.
- [8] 尚建丽,刘琳. 矿渣-粉煤灰地质聚合物制备及力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2011, 30(3):741-744.
SHANG J L, LIU L. Study on preparation and mechanical properties of slag and fly ash base geopolymeric [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 30(3):741-744.
- [9] 韦岩松,田宏荣,何胜先. 锌冶炼转窑渣用于水泥混凝土胶凝材料的研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2016(2):58-60.
WEI Y S, TIAN H R, HE S X. Study on rotary kiln slag of zinc smelting used for cement concrete gelled material[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2016(2):58-60.
- [10] VAN DEVENTER J S J, PROVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3):506-513.
- [11] 申晨. 工程地质聚合物复合材料的力学性能及断裂性能研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2019.
SHEN C. A study on mechanical properties and fracture properties of engineering geopolymer composites [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [12] LIZCANO M, GONZALEZ A, BASU S, et al. Effects of water content and chemical composition on structural properties of alkaline activated metakaolin-based geopolymers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(7):2169-2177.
- [13] 张西玲,陈林,向芸,等. 玻璃微粉和粉煤灰制备地质聚合物的实验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(6):1918-1922.
ZHANG X L, CHEN L, XIANG Y, et al. Preparation of geopolymer from glass powders and fly-ash [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(6):1918-1922.
- [14] 翁履谦, SAGOE-CRENTSIL Kwesi, 宋申华, 等. 地质聚合物合成中铝酸盐组分的作用机制(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(3):276-280.
WENG L Q, SAGOE-CRENTSIL K, SONG S H, et al. Hydrolysis kinetics of aluminates in geopolymers synthesis[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(3):276-280.
- [15] 刘洋,吴锦绣,封春甫,等. 富镁镍渣-粉煤灰地质聚合物的制备与性能表征[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(3):921-928.
LIU Y, WU J X, FENG C F, et al. Preparation and performance characterization of magnesium-rich nickel slag-fly ash-based geopolymer [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(3):921-928.
- [16] LEE W K W, VAN DEVENTER J S J. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, 211(2/3):115-126.
- [17] NATH S K. Geopolymerization behavior of ferrochrome slag and fly ash blends[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181:487-494.
- [18] NATH S K, KUMAR S. Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 233: 117294. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2020. 117294.
- [19] CORNELL R M, SCHWERTMANN U. The iron oxides, structure, properties, reactions, occurrence and uses[M]. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1996.
- [20] KHAN M I, AZIZLI K, SUFIAN S, et al. Sodium silicate-free geopolymers as coating materials: Effects of Na/Al and water/solid ratios on adhesion strength[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(2):2794-2805.
- [21] BARBOSA V F F, MACKENZIE K J D. Synthesis and thermal behaviour of potassium silicate geopolymers[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(9):1477-1482.