



黄学满,饶吉来,杜凯.煤矸石地质聚合物的制备与性能优化研究[J].矿业安全与环保,2023,50(6):92-97.
HUANG Xueman,RAO Jilai,DU Kai.Preparation and performance optimization of coal gangue-based geopolymer[J].
Mining Safety & Environmental Protection,2023,50(6):92-97.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.06.015

扫码阅读下载

煤矸石地质聚合物的制备与性能优化研究

黄学满¹,饶吉来^{2,3},杜凯⁴

(1.重庆工程职业技术学院,重庆 402260; 2.瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆 400037;
3.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400039; 4.山东能源枣庄矿业(集团)有限责任公司,山东 枣庄 277000)

摘要:煤矸石的不合理处置会给生态系统带来巨大的压力和威胁,为了解决煤矸石再利用困难和利用率低的问题,提出利用煤矸石生产地质聚合物的高附加值策略。以未煅烧的煤矸石为原材料,采用单因素实验设计法,研究了高炉矿渣掺入量、水玻璃模数、碱激发剂添加量、液固比和初始 24 h 养护温度等因素对地质聚合物基体抗压强度的影响。结果表明,初始 24 h 养护温度、碱激发剂添加量和水玻璃模数对煤矸石-高炉矿渣基复合地质聚合物的性能有显著影响。通过 X 射线衍射分析和扫描电镜分析发现,在碱激发剂的作用下,未煅烧的煤矸石结构被破坏,与高炉矿渣协同生成水化铝硅酸钠(N-A-S-H)、水化铝硅酸钙(C-A-S-H)和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,从而形成了致密的微观结构。这为煤矸石的大规模资源化利用提供了合理的依据。

关键词:煤矸石;地质聚合物;资源化利用;力学性能;微观结构

中图分类号:TD849.5 文献标志码:A 文章编号:1008-4495(2023)06-0092-06

Preparation and performance optimization of coal gangue-based geopolymer

HUANG Xueman¹,RAO Jilai^{2,3},DU Kai⁴

(1. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China;
2. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China;
3. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;
4. Shandong Energy Zaozhuang Mining Industry(Group) Co., Ltd., Zaozhuang 277000, China)

Abstract: The unreasonable disposal of coal gangue will bring pressure and threat to the ecosystem. In order to solve the problem of difficult reuse and low utilization rate of coal gangue, the high value-added strategy of using coal gangue to produce geopolymers was put forward. In this study, uncalcined coal gangue was used as the raw material, and the effects of the addition amount of blast furnace slag, the modulus of sodium silicate, the addition amount of alkali-activator, the ratio of liquid to solid and the initial 24-hours curing temperature on the compressive strength of geopolymer matrix were studied by single factor experimental design. The results show that the initial 24-hours curing temperature, the addition amount of alkali-activator and the modulus of sodium silicate have significant effects on the properties of coal gangue-blast furnace slag based geopolymer matrix. X-ray diffraction and scanning electron microscope analysis show that the structure of uncalcined coal gangue is destroyed under the action of alkali-activator, and the dense microstructure is formed on the synergic formation of N-A-S-H, C-A-S-H and C-S-H gels with blast furnace slag. This research results provide a reasonable basis for the large-scale resourceful utilization of coal gangue.

Keywords: coal gangue; geopolymer; resourceful utilization; mechanical property; microstructure

收稿日期:2023-05-18;2023-08-16 修订

作者简介:黄学满(1972—),男,江西彭泽人,研究员,主要从事煤矿安全、矿井智能通风及灾害防控等方面的教学与科研工作。E-mail:545444689@qq.com。

煤炭在我国国民经济发展中发挥着重要作用。虽然我国原煤生产量逐年递减,但截至 2021 年年底其在一次能源生产总量中的占比仍不低于 67.0%,煤炭的主体能源地位短期内难以改变^[1]。

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的副产

品,煤矸石堆积除了占用土地,还会造成矿区周边环境污 染、生态系统退化等问题^[2-5]。根据生态环境部最新发布的数据,我国煤矸石综合利用率不足 60%,提升煤矸石综合利用率是实现煤炭绿色开采的重中之 重^[6-7]。

煤矸石成分以铝硅酸盐为主,可用于制备地质聚合物,这使得煤矸石这种大宗固体废弃物能够被回收和再利用。地质聚合物是一种新型无机材料,具备与普通硅酸盐水泥类似的胶凝性能,具有替代水泥用于胶结充填材料的潜力。地质聚合物由于具有低二氧化碳排放量、优异的机械性能、低渗透性和对自然界中常见的恶劣环境(如酸性、海水和高温环境)的高抵抗力等优点,受到了越来越多的关注。地质聚合物是通过原材料与碱性溶液之间的一系列溶解—聚合—凝胶化—硬化—结晶反应合成的。原材料包括含有铝硅酸盐的天然矿物和工业副产品,这些原材料根据化学成分可分为低钙和高钙两类。以偏高岭土、粉煤灰、煤矸石等低钙原材料合成的地质聚合物,反应产物为水化铝硅酸钠(N-A-S-H)凝胶。相比之下,以高炉矿渣等高钙原材料制备地质聚合物时,则形成水化铝硅酸钙(C-A-S-H)凝胶;同时,在水的存在下也会生成钙基水化产物,即水化硅酸钙(C-S-H)凝胶。此外,当 2 种原材料同时使用时,C-S-H 凝胶会与 N-A-S-H、C-A-S-H 凝胶共存。在获得地质聚合物高机械性能和耐久性方面,反应体系中形成的凝胶种类和数量起着重要作用。

未经特殊处理的煤矸石晶体结构稳定、反应活性较低,因此由煤矸石直接制备的地质聚合物性能较差,这大大限制了煤矸石的资源化利用。目前的

研究成果主要集中于通过高温煅烧改善煤矸石的反应性,从而提高地质聚合物的力学性能^[8-11]。然而,其加热过程与生产水泥过程一样需要消耗相当大的能量。近几年,多种原材料在地质聚合物制备中的协调使用引起了相关科技人员的关注^[12]。将高钙材料引入低钙地质聚合物反应体系中,氧化钙 CaO 参与反应,并生成 C-S-H、C-A-S-H 及 N-A-S-H 凝胶,可改善地质聚合物基体的强度。高炉矿渣是炼铁行业的副产品,以煤矸石和高炉矿渣这 2 种来源广泛的固体废弃物为原材料制备地质聚合物具有较高的附加价值和环境效益。

地质聚合物的抗压强度易受包括原材料、养护温度、液固比、碱活化剂含量等多种因素的影响^[13-18],因此,确定最佳合成参数是开发更多具有实用性产品的关键。本研究以未经煅烧的煤矸石和高炉矿渣为原材料制备复合地质聚合物,基于单因素实验设计探索高炉矿渣掺入量、水玻璃模数、碱激发剂添加量、液固比和养护温度等变量与抗压强度之间的关系,并通过 X 射线衍射分析(XRD)和扫描电镜分析(SEM)进一步分析和探讨复合地质聚合物的力学性能和反应机理,为煤矸石的资源化利用提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验所用煤矸石取自朔州煤矿,高炉矿渣从重庆钢铁厂获得。采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)对煤矸石和高炉矿渣的化学组成进行测定,结果见表 1。实验中采用的商业水玻璃的模数为 3.3,分析纯 NaOH 颗粒的纯度大于 99.0%。

表 1 煤矸石和高炉矿渣的化学组成

原材料类别	各组分质量分数/%								
	二氧化硅	氧化铝	氧化铁	二氧化钛	氧化钾	氧化钙	氧化镁	氧化钠	三氧化硫
煤矸石	59.52	36.57	1.24	1.14	0.75	0.26	0.18	—	0.16
高炉矿渣	35.62	14.93	0.60	1.28	0.39	36.31	7.50	0.22	2.29

1.2 地质聚合物制备

采用单因素实验设计法制备地质聚合物,利用单轴压缩强度来评估地质聚合物基体的力学性能。实验中考虑了能够影响地质聚合物基体力学性能的 5 种单因素,在每种单因素实验中考虑 5 种因素水平,共计制备 25 组试样,并分析前驱体中高炉矿渣的质量分数(0、25%、50%、75%、100%)、水玻璃模数(指碱激发剂中 SiO₂/Na₂O 的摩尔比,0.6、0.8、1.0、1.2、1.4)、添加碱激发剂的质量分数(5.0%、

7.5%、10.0%、12.5%、15.0%)、液固比(0.21、0.23、0.25、0.27、0.29)和初始 24 h 的养护温度(以下简称“养护温度”)(30、40、50、60、70 ℃)等因素对地质聚合物基体单轴压缩强度的影响。在本次实验中考虑其中 1 种因素对基体单轴压缩强度的影响时,其余因素的条件按照其设置的中间水平来选择实验参数。

首先,将分析纯 NaOH 颗粒、商业水玻璃和去离子水按实验要求混合制成碱激发剂溶液,充分搅拌

后将溶液在室温条件下陈化 18 h;再将煤矸石和高炉矿渣混合物与碱激发剂溶液按一定质量比混合并充分搅拌后,倒入 20 mm×20 mm×20 mm 的六联立方体金属模具中,在振实台上振动约 15 min 以去除浆体内部气体;最后,将地质聚合物基体放置在恒温养护箱中,以实验要求温度养护 24 h 后脱模,并于室温条件下养护至测试龄期(一般为 28 d)。复合地质聚合物制备过程如图 1 所示。

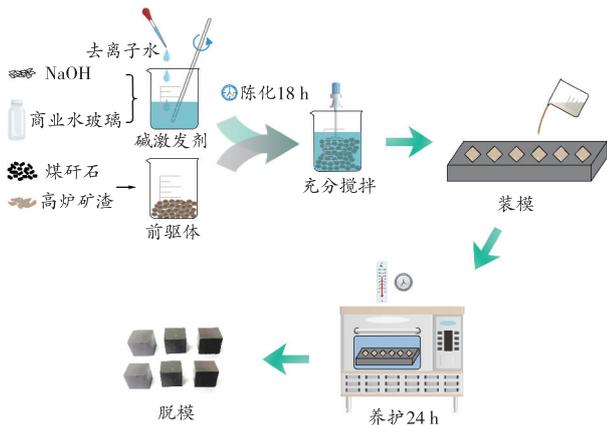


图1 复合地质聚合物制备流程示意图

1.3 性能测试

利用日本岛津公司生产的 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪分析煤矸石和高炉矿渣的化学组成。同时,分别采用荷兰帕纳科公司生产的 X'pert PRO 型 X 射线衍射仪和捷克 TESCAN 公司生产的 VEGA 3 LMH 型扫描电子显微镜分析煤矸石、高炉矿渣和地质聚合物基体的物相组成和微观形貌。针对处于测试龄期的地质聚合物基体进行单轴压缩测试得出其力学参数,每种实验因素水平下测试 3 个试件,以减小实验的偶然性。

2 实验结果与讨论

2.1 地质聚合物基体抗压强度分析

地质聚合物基体的单轴抗压强度随水玻璃模数的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可以发现,地质聚合物基体单轴抗压强度随水玻璃模数的增大而单调递减,从 53.36 MPa 降低至 38.33 MPa。在地质聚合物制备过程中,水玻璃模数即碱激发剂中 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 摩尔比的增大能够降低反应体系中的碱性,这也会增大水溶液中水合硅酸阴离子的聚合度。低碱性环境能够阻碍硅酸根离子高聚物中的 Si—O 键的断裂,从而减缓铝硅酸盐的溶解。同时,更少的铝酸盐和硅酸盐存在于地质聚合物基体中,导致其单轴抗压强度降低。此外,煤矸石的反应活性较差,需要更高的 pH 环境才能得以活化,这也是造成基体抗压

强度降低的原因之一。

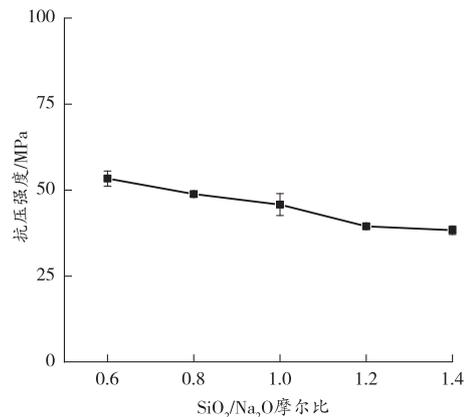


图2 地质聚合物基体抗压强度随水玻璃模数的变化曲线

地质聚合物基体的单轴抗压强度随碱激发剂添加量的变化曲线如图 3 所示。可以看出,当添加碱激发剂的质量分数为 10.0% 时,基体的抗压强度最高,过高或过低的碱激发剂添加量都会导致基体抗压强度的降低。与水玻璃模数因素相同的是,2 种因素均会对地质聚合物反应体系的 pH 环境产生影响。碱激发剂添加量增加,致使 OH^- 增加,环境的碱性逐渐提高。环境中碱性的提高能够促进前驱体材料中的 Si^{4+} 、 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 的反应,从而提升基体的部分强度。然而,随着 OH^- 浓度的持续提高, Si—O 键的合成会受到阻碍,这将导致在高碱性环境中制备的地质聚合物基体强度降低。

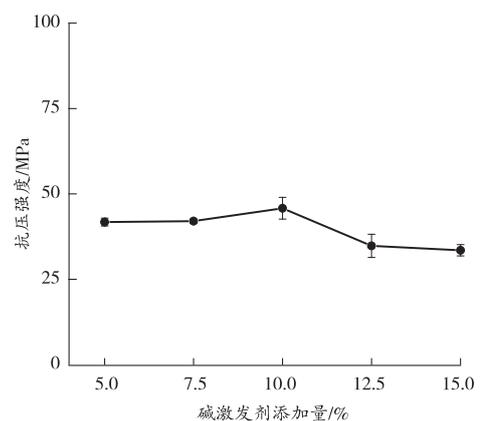


图3 地质聚合物基体抗压强度随碱激发剂添加量的变化曲线

地质聚合物基体的单轴抗压强度随液固比的变化曲线如图 4 所示。可以看出,基体单轴抗压强度随液固比的增大而呈现先增高再降低的趋势,当液固比为 0.27 时,其强度最大为 46.44 MPa。水在地质聚合物的制备过程中起到重要作用,能够促进反应中前驱体材料的溶解、缩聚和胶凝。在反应中水含量的降低,会降低反应速率,导致地质聚合物无法完全反应,脱模后的基体压实度较低,基体的强度也

会降低。因此,当反应系统中的水含量处于合理水平,即液固比在 0.21~0.27 内时,随着液固比的增大,基体的强度持续增高。当水含量持续增加时,一方面使地质聚合物基体在制备过程中的浆体黏滞系数降低,基体成型后内部结构疏松;另一方面,在地质聚合物反应中其状态由水解(消耗水分子)转变为缩聚(生成水分子),过多的水分子将会阻碍缩聚反应。这两点均会导致基体强度下降。

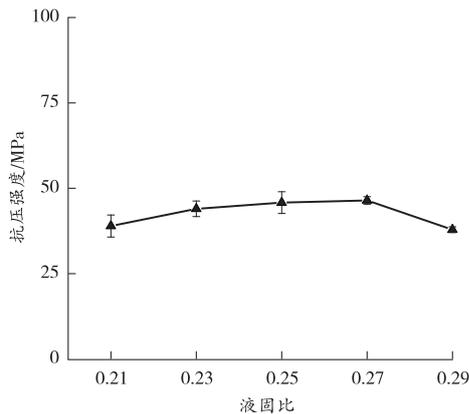


图 4 地质聚合物基体抗压强度随液固比的变化曲线

地质聚合物制备过程中,不同养护温度对基体抗压强度的影响见图 5。由图 5 可以发现,随着养护温度的升高,地质聚合物基体的强度明显降低。当养护温度为 30 °C 时,地质聚合物基体强度为 80.76 MPa;当养护温度为 70 °C 时,地质聚合物基体强度为 37.27 MPa。这表明养护温度对地质聚合物基体强度有着剧烈影响,高温养护不利于地质聚合物强度的进一步提高。在高温养护条件下,地质聚合物浆体受到的蒸发作用增大,小部分水分子流失;同样,基体中的孔隙也会进一步扩张,导致其孔隙率增大。此外,高温条件下活化分子数增加,加速了 C-S-H 凝胶和地质聚合物凝胶的发展,从而阻碍了前驱体材料在溶液中的溶解浸出。这些原因都将导致地质聚合物基体在高温养护条件下强度降低。

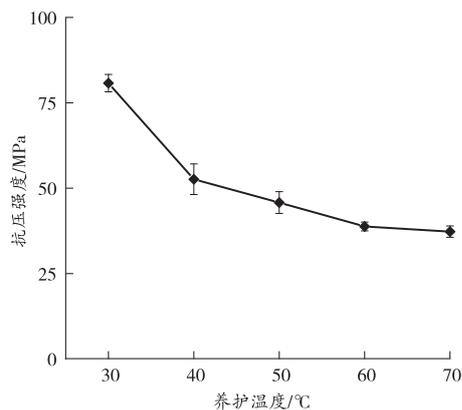


图 5 地质聚合物基体抗压强度随养护温度的变化曲线

地质聚合物基体的单轴抗压强度随高炉矿渣掺入量的变化曲线如图 6 所示。可以看出,基体的强度随着高炉矿渣掺入量的增加而快速增高。尤其是当高炉矿渣掺入的质量分数为 10% 时,其强度只有 15.88 MPa;而当高炉矿渣掺入的质量分数增长至 30% 时,其强度为 41.20 MPa,增长了 159%。这是因为高炉矿渣的成分中含有质量分数为 36.31% 的 CaO,而在碱性环境中 CaO 比 SiO₂ 和 Al₂O₃ 更容易溶解。同时,Ca²⁺与铝硅酸盐也更容易形成 C-(A)-S-H 凝胶,溶液中 Ca²⁺的减少又会反过来促进 CaO 的溶解,从而提升地质聚合物反应的整体速率。此外,矿渣衍生的基体中生成了 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶。这 2 种凝胶的致密结构能够降低地质聚合物基体的孔隙率,促进基体抗压强度的提升。

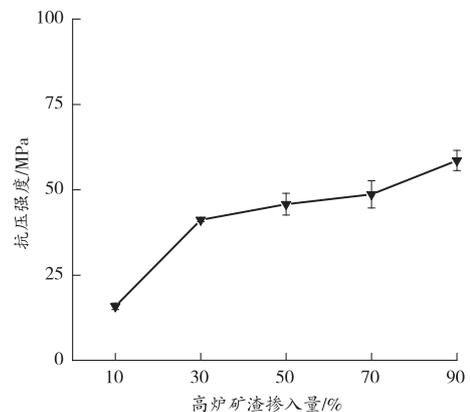


图 6 地质聚合物基体抗压强度随高炉矿渣掺入量的变化曲线

2.2 敏感性分析

上述分析可知,高炉矿渣掺入量、水玻璃模数、碱激发剂添加量、液固比和养护温度等 5 种因素均会对地质聚合物基体的强度产生影响。高炉矿渣掺入量的增加会降低煤矸石的含量,因此在敏感性分析中不予考虑该因素。选择影响显著的 3 种单因素进行敏感性分析,分别为水玻璃模数、碱激发剂添加量和养护温度,结果见图 7~8。以水玻璃模数作为参照,分析碱激发剂添加量与养护温度对地质聚合物基体强度影响的敏感性。从图 7 中可以看出,基体的较高强度出现在水玻璃模数为 0.6~0.8 和添加碱激发剂的质量分数为 7.5%~12.5% 区间内,而基体的低强度则出现在水玻璃模数为 1.0~1.2 和添加碱激发剂的质量分数为 12.5%~15.0% 区间内。当水玻璃模数增加至 1.0 时,添加碱激发剂的质量分数为 15.0% 条件下基体强度要低于添加碱激发剂的质量分数为 5.0% 条件下基体强度,这表明强碱性环境更容易削弱地质聚合物基体的强度。

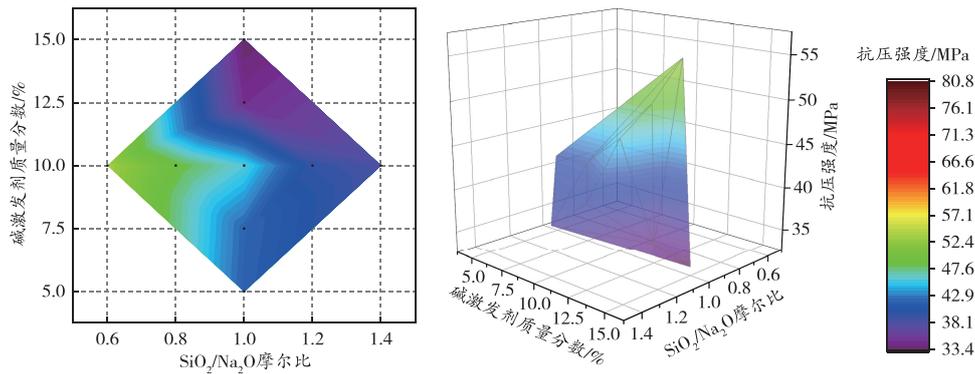


图 7 水玻璃模数与碱激发剂添加量对基体抗压强度敏感度分析

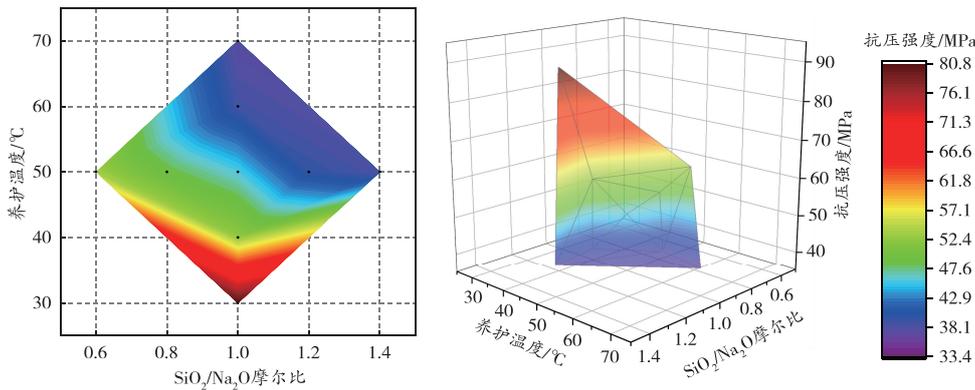


图 8 水玻璃模数与养护温度对基体抗压强度敏感度分析

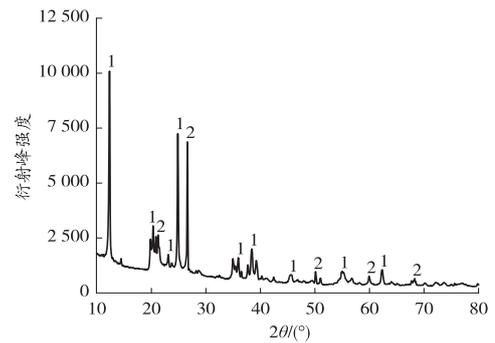
图 8 中基体的较高强度出现在水玻璃模数为 0.8~1.2 和养护温度为 30~40 °C 的区间内,而基体的较低强度则出现在水玻璃模数为 1.0~1.2 和养护温度为 60~70 °C 的区间内。养护温度的升高使得基体强度迅速降低。

通过分析 3 种因素对基体强度的影响,发现基体强度最容易受到养护温度的影响,其次是碱激发剂添加量,最后是水玻璃模数。

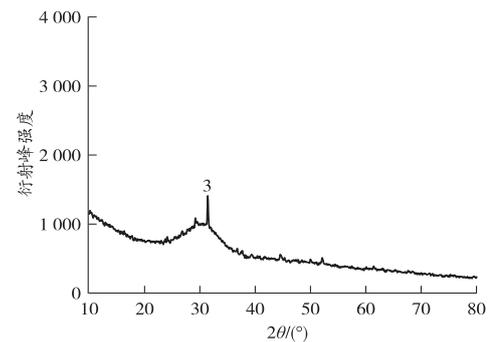
2.3 微观结构和微观形貌分析

煤矸石、高炉矿渣和地质聚合物基体的 XRD 图谱如图 9 所示。煤矸石中以结构稳定的高岭石和石英矿物相为主(见图 9(a));高炉矿渣由无定形馒头峰和钙铝黄长石组成(见图 9(b));由煤矸石和高炉矿渣合成的复合地质聚合物基体中主要存在结晶峰和弥散峰(见图 9(c)),在地质聚合物基体的 XRD 图谱中观察到未反应的高岭石和石英相,但这些衍射峰的数量或强度急剧降低,这一现象表明晶相已经转变为非晶相。此外,在聚合反应之后,还观察到方钠石(N-A-S-H)的形成。说明 Na⁺可能被整合到地质聚合物基体结构中,从而形成 N-A-S-H 凝胶。在 30 °C 左右的弥散峰与 C-S-H 凝胶有关^[19]。C-S-H 凝胶是由高炉矿渣的水化反应生成的。具体过程为,从高炉矿渣中的 CaO 溶解出来的 Ca²⁺可

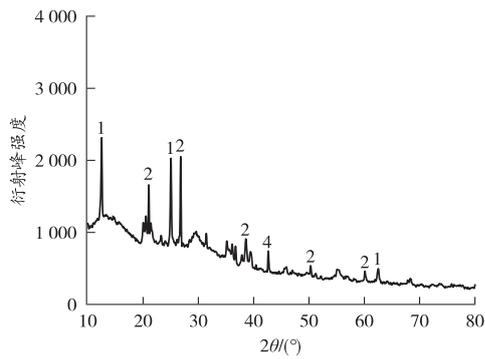
以与碱性溶液或原料中的[SiO₄]⁴⁻反应,从而形成 C-S-H 凝胶。此外,在复合地质聚合物中生成的 N-A-S-H 和 C-(A)-S-H 凝胶相之间没有明确的界线^[20],很难在 XRD 图谱中检测到,因为这两者共同存在,并且可与结晶峰重叠^[21]。



(a) 煤矸石



(b) 高炉矿渣

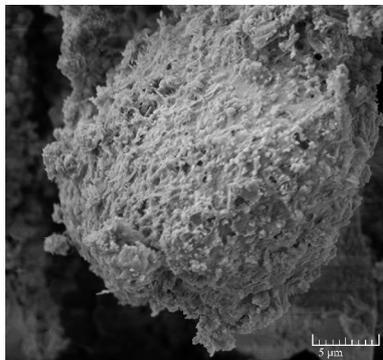


(c) 地质聚合物

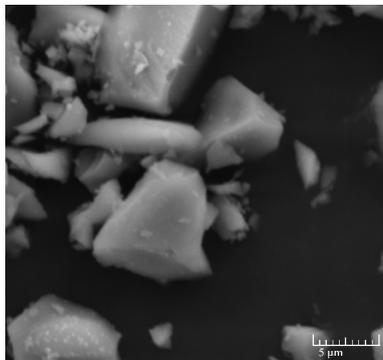
1—高岭石;2—石英;3—钙铝黄长石;4—方钠石。

图 9 煤矸石、高炉矿渣、地质聚合物 XRD 图谱

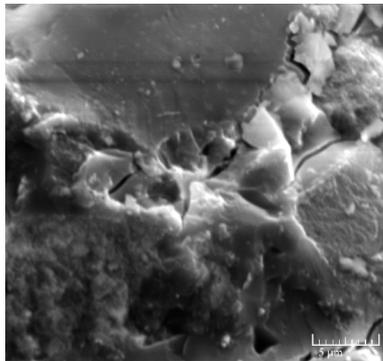
煤矸石、高炉矿渣和地质聚合物的微观形貌如图 10 所示。



(a) 煤矸石



(b) 高炉矿渣



(c) 地质聚合物

图 10 煤矸石、高炉矿渣、地质聚合物扫描电镜图

从图 10(a)中可以看出,煤矸石的微观结构呈

现出不规则的颗粒状,表面粗糙并具有一定的孔洞。高炉矿渣的微观结构为大小不一的块体,其表面较光滑(见图 10(b))。经碱性溶液活化后,地质聚合物基体中生成 N-A-S-H、C-S-H 和 C-A-S-H 凝胶,凝胶覆盖在未反应的煤矸石和高炉矿渣颗粒表面,形成了光滑致密的结构(见图 10(c)),提高了地质聚合物基体的致密性,从而提高了抗压强度。

3 结论

1)通过单因素实验发现,在地质聚合物制备过程中环境碱性程度的提高有助于提升基体的部分强度,但随着 OH⁻浓度的持续提高,基体强度出现下降的趋势;当液固比为 0.25~0.27 时,基体能够保持较高的强度。

2)通过敏感性分析发现,地质聚合物基体强度受养护温度因素的影响最强烈,其次是碱激发剂添加量,最后是水玻璃模数。

3)前驱体材料在碱性环境下能合成 N-A-S-H、C-S-H 和 C-A-S-H 凝胶,这些凝胶在地质聚合物基体内部起到胶结作用,使其结构致密,孔隙率降低,从而提高了基体的抗压强度。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2022[M]. 北京:中国统计出版社,2022.
- [2] XU Z P, QIAN Y H, HONG X P, et al. Contamination characteristics of polycyclic aromatic compounds from coal sources in typical coal mining areas in Huaibei area, China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 873: 162311.
- [3] 陈雪, 许丹丹, 钱雅慧, 等. 淮北矿区煤矸石多环芳烃污染特征及毒性评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 753-760.
- [4] 肖博, 王宇轩, 王梓旭, 等. 固体充填开采中的矸石粒径级配优化试验[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 73-80.
- [5] 杨长俊. 关于煤矸石回填工艺技术的研究和思考[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(1): 104-108.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020: 25-28.
- [7] 张琪, 刘辉. 淮南顾桥矿区绿色矿山建设探讨[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(3): 116-119.
- [8] 王菲, 刘泽, 韩乐, 等. 活化煤矸石地质聚合物的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 914-920.
- [9] ZHAO Y B, YANG C Q, LI K F, et al. Toward understanding the activation and hydration mechanisms of composite activated coal gangue geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 125999.

(下转第 103 页)

- [2] 胡社荣,蒋大成. 煤层自燃灾害研究现状与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000,11(4):69-72.
- [3] 赵婧昱,张宇轩,宋佳佳,等. 高温贫氧下不同温度阶段煤体自燃指标气体测试[J]. 西安科技大学学报,2019,39(2):189-193.
- [4] 王永敬. 3#煤层自然发火标志气体及临界值确定[J]. 煤矿安全,2019,50(4):195-199.
- [5] 彦鹏,黄光利,张仰强,等. 双马煤矿 4-1 煤层自然发火标志气体及临界值研究[J]. 矿业安全与环保,2020,47(2):85-89.
- [6] 易欣,张敏,邓寅,等. 淮南矿区煤自燃指标气体及特征参数[J]. 西安科技大学学报,2023,43(3):457-465.
- [7] 杨永辰,赵贺,尹博. 煤炭自燃标志气体实验研究[J]. 煤矿安全,2012,43(9):17-19.
- [8] 朱令起,邵静静,王福生. 基于 CO₂ 与 CO 浓度比值预测模型的煤早期自燃判定[J]. 煤炭科学技术,2015,43(7):60-64.
- [9] 孙留涛,段宇建,黄均泽. 青东煤矿 10 煤层标志气体优选及自燃“三带”划分[J]. 工矿自动化,2018,44(11):56-61.
- [10] 付晶,赵凯,张海洋,等. 灰色关联法在煤自燃标志气体优选中的应用[J]. 煤矿安全,2019,50(5):181-185.
- [11] 边冰,刘奇,何浩. 基于 LVQ 神经网络的煤自然发火预测系统[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2017,39(1):12-16.
- [12] 梁运涛,孙勇,罗海珠,等. 基于小样本的煤层自然发火烷烃气体的光谱分析[J]. 煤炭学报,2015,40(2):371-376.
- [13] 文虎. 矿井煤自燃灾害“时空-分级-适配”监测预警与应急防控[J]. 西安科技大学学报,2020,40(6):932.
- [14] 魏超,童敏明,任子晖,等. 基于激光气体分析的矿井火灾预警装置[J]. 软件,2011,32(4):77-78.
- [15] 刘爱华,蔡康旭. 煤自然发火预报的研究及软件的开发[J]. 煤炭学报,2007,32(7):724-728.
- [16] 谢中朋,宋晓燕. 综放工作面遗煤自然发火及早期预报技术[J]. 矿业安全与环保,2013,40(3):121-124.
- [17] 刘乔,王德明,仲晓星,等. 基于程序升温的煤层自然发火指标气体测试[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(3):362-366.
- [18] 胡新成,杨胜强,周秀红. 煤层自然发火指标气体研究[J]. 煤炭技术,2012,31(5):94-96.
- [19] 姚海飞,张体镇,阚国栋,等. 典型整合矿井煤自燃标志气体判定[J]. 煤炭科学技术,2014,42(2):50-53.
- [20] 邓军,徐精彩,阮国强,等. 国内外煤炭自然发火预测预报技术综述[J]. 西安矿业学院学报,1999,19(4):293-297.

(责任编辑:林桂玲)

(上接第 97 页)

- [10] 葛洁雅,朱红光,李宗徽,等. 煤矸石粗骨料-地聚物混凝土的力学与耐久性能研究[J]. 材料导报,2021,35(增刊 2):218-223.
- [11] 李雅涛,樊玉萍,董宪姝,等. 热活化-碱激发法制备尾煤地质聚合物及吸附 Pb(II) 试验研究[J]. 煤炭科学技术,2022,50(8):277-284.
- [12] 余春松,张玲玲,郑大伟,等. 固废地质聚合物的研究及其应用进展[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(4):529-546.
- [13] 张西玲,郭海峰,汤子奇,等. 钢渣微粉-粉煤灰地质聚合物性能研究及微观结构分析[J]. 硅酸盐通报,2021,40(12):4044-4051.
- [14] 沈杨海,吴新燕,张颖涛,等. 硅酸钠和硅灰激发剂对地质聚合物混凝土性能的影响[J]. 材料导报,2022,36(增刊 2):240-244.
- [15] 张卫清,柴军,冯秀娟,等. 煤矸石地质聚合物的制备及微观结构[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(3):539-547.
- [16] 吴俊,征西遥,杨爱武,等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. 岩土力学,2021,42(3):647-655.
- [17] 封春甫,刘云,刘洋,等. Na₂SO₄/Na₂SiO₃ 复掺激发富镁镍渣-粉煤灰地质聚合物的微观结构及性能研究[J]. 功能材料,2022,53(3):3084-3091.
- [18] 杨世玉,赵人达,靳贺松,等. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. 工程科学与技术,2020,52(6):162-169.
- [19] ABABNEH F A, ALAKHRAS A I, HEIKAL M, et al. Stabilization of lead bearing sludge by utilization in fly ash-slag based geopolymer[J]. Construction and Building Materials,2019,227:116694.
- [20] ZHANG Z H, LI L F, MA X, et al. Compositional, microstructural and mechanical properties of ambient condition cured alkali-activated cement[J]. Construction and Building Materials,2016,113:237-245.
- [21] XU H, GONG W L, SYLTEBO L, et al. Effect of blast furnace slag grades on fly ash based geopolymer waste forms[J]. Fuel,2014,133:332-340.

(责任编辑:李 琴)