

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.104



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 燃煤渣基地聚物的制备及热活化效果

黎梦珂<sup>a</sup>, 包申旭<sup>a,b</sup>, 张一敏<sup>a,b,c</sup>, 黄慕洋<sup>a</sup>

(武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室; c. 国家环境  
保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室, 武汉 430081)

**摘要:**针对燃煤渣的低活性、难处理等问题,以低碳环保的理念为核心,对燃煤渣基地聚物的制备工艺和煅烧效果进行研究。基于单因素试验探讨煅烧温度、激发剂掺量和液固比等对地聚物抗压强度的影响,得到了燃煤渣基地聚物的最佳配合比。利用X射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和扫描电镜(SEM)等方法研究地聚物的水化产物和微观形貌,揭示煅烧过程和地聚合反应前后的矿物相变化,阐明其强度增强机理。通过以氧化钙为主、十二水磷酸三钠(TSPH)为辅的联合激发方式成功制备出28 d抗压强度达到34.5 MPa的地聚物。氧化钙提供的碱性环境、成核位点和TSPH提供的磷酸根都有助于促进燃煤渣中活性组分溶解和复杂凝胶相形成,这是地聚物抗压强度的重要来源。此外,在低于1 000 ℃的高温煅烧条件下,燃煤渣不具备像煤矸石、粉煤灰等固废的热活化性,高温煅烧反而会降低燃煤渣的化学反应活性。

**关键词:**地聚物;燃煤渣;钙激发;微观形貌;抗压强度

中图分类号:TU528.044 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)06-0207-07

## Research on preparation and thermal activation effect of geopolymers based on burnt coal cinder

LI Mengke<sup>a</sup>, BAO Shenxu<sup>a,b</sup>, ZHANG Yimin<sup>a,b,c</sup>, HUANG Muyang<sup>a</sup>

(a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment; c. State Key Laboratory of Mining and Metallurgy Resources Utilization and Pollution Control for Environmental Protection, Wuhan University of Technology, Wuhan 430081, P. R. China)

**Abstract:** To address the issues of low activity and difficult treatment of burnt coal cinder, the preparation technology and calcination effect of geopolymers based on burnt coal cinder were investigated, with the concept of low carbon and environmental protection as the core. The influence of calcination temperature, activator dosage and liquid-solid ratio on the compressive strength of geopolymers based on burnt coal cinder was investigated by single factor tests, and the optimal mix ratio was subsequently determined. Using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM), the hydration products and micromorphology of geopolymers were studied. Revealing mineral phase changes

收稿日期:2023-05-31

基金项目:湖北省重点研发计划(2022BAA029)

作者简介:黎梦珂(2000-),女,主要从事固废资源化利用研究, E-mail:1327375869@qq.com。

包申旭(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail:sxbao@whut.edu.cn。

Received: 2023-05-31

Foundation item: Key Research and Development Program of Hubei Province (No. 2022BAA029)

Author brief: LI Mengke (2000-), main research interest: solid waste resource utilization, E-mail: 1327375869@qq.com.

BAO Shenxu (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: sxbao@whut.edu.cn.

during calcination and the geopolymization process, and clarifying the mechanism of strength enhancement. The results indicate that the combined activation method with calcium oxide as the main and trisodium phosphate dodecahydrate (TSPH) as the auxiliary was successfully employed to prepare the geopolymers with a compressive strength of 34.5 MPa at 28 days. The alkaline environment and nucleation sites provided by calcium oxide, along with the phosphate radicals supplied by TSPH, all contribute to the dissolution of active components in the burnt coal cinder and the formation of complex gel phases, which is an important source of compressive strength for geopolymers. Furthermore, at calcination temperatures of 1 000 °C, burnt coal cinder lacks the thermal activation property of solid wastes such as coal gangue and fly ash, and high-temperature calcination diminishes its chemical reactivity.

**Keywords:** geopolymers; burnt coal cinder; calcium activation; micromorphology; compressive strength

近年来,随着建筑行业的快速发展,水泥需求量日益增加。但随着环保意识的增强,水泥的高能耗、高碳排放成了制约建筑领域经济发展的关键问题<sup>[1]</sup>。在制备过程中,凭借碳排放低<sup>[2]</sup>、快硬早强和产品耐腐蚀等优点,地聚物成为最有潜力替代水泥的新型胶凝材料,被广泛应用于建筑、交通、水利等领域<sup>[3]</sup>。秦磊等<sup>[4]</sup>利用页岩提钒尾渣-赤泥混合煅烧制备了地聚物,实现了危险固体废弃物的资源化利用。汪海风等<sup>[5]</sup>以建筑垃圾、矿渣为原料,以硅酸钠为激发剂,制备出性能优异的地聚物,用于替代水泥。

燃煤渣是发电厂、燃煤锅炉行业及其他工厂燃烧煤后排出的残渣,中国每年产生上亿吨,大部分处理方式为填埋堆积或制备吸附材料<sup>[6-7]</sup>,少部分用作路用粗集料<sup>[8]</sup>。燃煤渣的大量堆存不仅侵占土地,而且易造成重金属渗滤等污染,因此,对其资源化利用成为解决环境问题的关键。燃煤渣作为粉煤灰的同根共源体,却在化学反应活性方面存在巨大差异,由于活性较高的玻璃体质地较轻,大量存在于粉煤灰中,导致燃煤渣的活性较低,在制备地聚物的应用上远不如粉煤灰,且相关研究不足。目前虽已有学者对燃煤渣制备地聚物的方法进行研究<sup>[9-10]</sup>,但并未见对燃煤渣热活化的探索,且燃煤渣基地聚物的制备还局限于传统的氢氧化钠激发,而传统氢氧化钠存在腐蚀性强、易变质等缺陷。

笔者利用盐类激发剂化学性质温和、环境适应性好的特点,有效避免了氢氧化钠强碱激发剂的安全性差、产品性能不稳定等缺陷。提高地聚合技术在多种应用场景中的适应性,最大程度促进地聚合反应进行,保证地聚物性能稳定,并深入研究燃煤渣的热活化效果,进行矿物相和微观形貌变化的理论分析。

## 1 试验部分

### 1.1 原料与试剂

燃煤渣取自湖北省麻城市火力发电厂。燃煤

渣的化学成分如表 1 所示,主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,并含有少量的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  等。燃煤渣的矿物组成如图 1 所示,主要含有石英和莫来石的矿物相以及大量的玻璃相。

表 1 燃煤渣的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of burnt coal cinder

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	其他	烧失量	%
53.98	30.31	4.20	1.77	0.82	0.43	1.81	6.68	

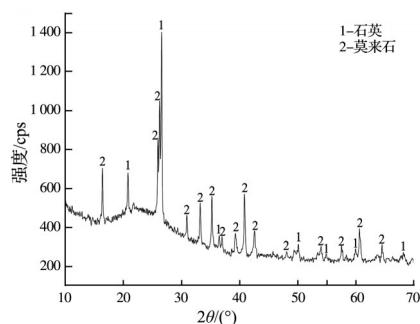


图 1 燃煤渣的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of burnt coal cinder

试验使用的化学试剂为氧化钙(上海麦克林, AR)、十二水磷酸三钠(TSPH)(国药集团沪试, AR)和水玻璃(质量分数 42%, 模数 2.31)。

### 1.2 地聚物的制备

将燃煤渣在 60 °C 烘箱中干燥 24 h,然后将烘干后的燃煤渣与氧化钙混合,在振磨机中振磨 4 min,得到钙化燃煤渣(粒径  $D_{90}=60 \mu\text{m}$ )。将钙化燃煤渣放入马弗炉中煅烧 2 h 后,与 TSPH 混合并振磨 30 s,得到均匀的前驱粉体。将前驱粉体与水玻璃和水在水泥净浆搅拌器中搅拌均匀,得到净浆,后浇筑到 20 mm × 20 mm × 20 mm 的钢制模具中,置于振动机上振动 1 min,以排出气泡。然后将模具放入水泥恒温恒湿养护箱中(温度:60 °C、相对湿度:95%),养护 24 h 后脱模,得到地聚物试样,将试样在室温下养护至规定龄期后,进行测试分析。

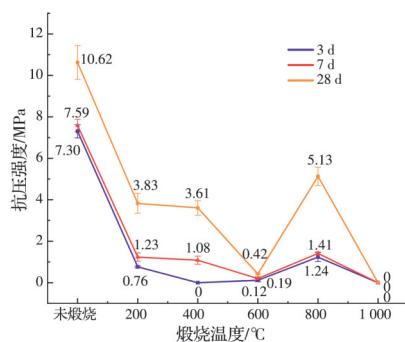
### 1.3 地聚物表征与测试

采用YAW-100E型液压试验机对养护至3、7、28 d的地聚物进行抗压强度测试(GB/T 17671—1999),从每组测试结果中取5个试样的平均值。将破碎后的地聚物在丙酮中浸泡24 h,以终止地聚物的水化反应,将浸泡后的地聚物在80 °C烘箱中干燥24 h后,进行表征。采用X射线衍射仪(XRD,日本RIGAKU公司D/MAX-RB型)对不同条件下的试样进行物相分析,扫描范围为10°~70°。采用傅里叶红外光谱仪(FTIR, Nicolet6700型)对试样进行红外光谱分析:1次/s,波数范围为400~4 000 cm<sup>-1</sup>。采用同步热分析仪(TA, STA449F3型)进行热重分析,条件为氮气气氛,温度范围为30~1 200 °C,加热速率为10 °C/min。采用扫描电子显微镜(SEM,日本电子株式会社JSM-IT300型)对样品的微观结构进行分析,工作电压为15 kV。

## 2 单因素试验

### 2.1 煅烧温度的影响

高温煅烧的目的是除去燃煤渣中的杂质和生成更多的活性矿物相,同时促进燃煤渣的钙化。由煅烧温度对地聚物的影响(图2)可知,未煅烧条件下抗压强度达到最大值,随着煅烧温度的增加,燃煤渣基地聚物的抗压强度整体呈下降趋势,但在800 °C时出现异常回升。而当温度上升到1 000 °C时,抗压强度始终为0 MPa,且不会随着养护时间的延长而出现增长。试验结果表明,煅烧对燃煤渣的影响是负面的,与煤矸石、粉煤灰、脱硫尾渣等的热活化效果并不相同<sup>[4, 11-14]</sup>。



注:燃煤渣为90 g,氧化钙为10 g,TSPH为15 g,水玻璃为20 mL,液固比为0.3。

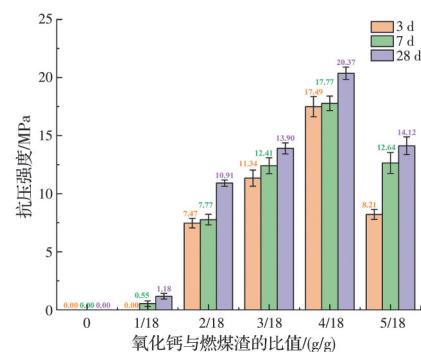
图2 煅烧温度对燃煤渣基地聚物的影响

Fig. 2 Influence of calcination temperature on burnt coal cinder base geopolymers

### 2.2 氧化钙的影响

“钙化”处理是为了在地聚物的制备过程中引入活性钙源,使地聚物发生钙离子相关的化学反

应,用以诱导地聚合反应的进行。图3为燃煤渣基地聚物的抗压强度随着氧化钙的添加从无到有的变化,氧化钙与燃煤渣比值为4/18时,抗压强度最佳,说明氧化钙作为地聚合反应的启动因子有着至关重要的作用。氧化钙水化生成氢氧化钙,不仅放热加速化学反应,还提供了强碱性体系。另一方面,氢氧化钙和C-S-H可为其他凝胶相提供成核位点<sup>[15]</sup>。但过量氧化钙会消耗大量自由水,使浆料硬化加快、流动性降低,同时,生成的过量氢氧化钙会包裹未反应的硅铝质原料<sup>[16]</sup>,阻止地聚合反应的进行,导致试样抗压强度降低。



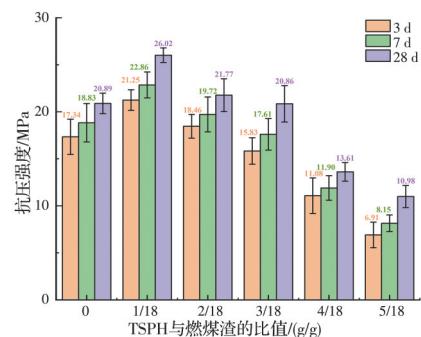
注:燃煤渣为90 g,未煅烧,TSPH为15 g,水玻璃为20 mL,液固比为0.3。

图3 氧化钙对燃煤渣基地聚物抗压强度的影响

Fig.3 Influence of calcium oxide on compressive strength of burnt coal cinder base geopolymers

### 2.3 TSPH的影响

按氧化钙与燃煤渣比值为4/18的最优值继续设计试验,研究十二水磷酸三钠(TSPH)掺量的影响。由TSPH对燃煤渣基地聚物抗压强度的影响(图4)可知,当TSPH掺量达到1/18时,燃煤渣基地聚物的抗压强度达到最大值。TSPH的适量添加可为地聚合反应提供P,从而形成更复杂的Si-Al-P胶凝结构<sup>[17]</sup>,进一步提高试样的抗压强度。但过量



注:燃煤渣为90 g,氧化钙为20 g,未煅烧,水玻璃为20 mL,液固比为0.3。

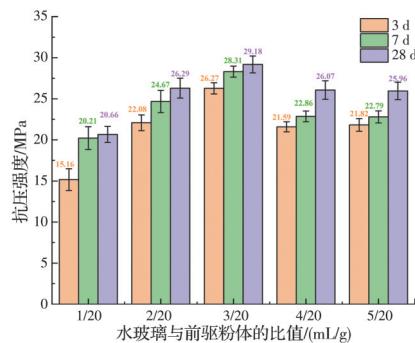
图4 TSPH对燃煤渣基地聚物抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of TSPH on compressive strength of burnt coal cinder base geopolymers

TSPH 的添加会使试样中  $\text{Na}^+$  显著增加, 导致地聚合物“泛霜”现象严重<sup>[18]</sup>, 进而降低试样的抗压强度。

## 2.4 水玻璃的影响

按 TSPH 与燃煤渣比值为 1/18 的最优值继续设计试验, 研究水玻璃掺入量的影响, 图 5 为水玻璃掺量对地聚合物抗压强度的影响图。水玻璃是地聚合物反应中常见的硅质调整剂, 其引入活性硅组分, 促进了地聚合物的形成<sup>[19]</sup>。但过量的水玻璃会显著增加溶液黏度, 降低反应物表面的离子移动能力, 导致凝胶生成受阻, 因此地聚合物抗压强度出现下降。同时, 过量的活性硅会阻碍 P 取代 Si, 导致 Si-Al-P 的复杂凝胶结构难以形成<sup>[20]</sup>。



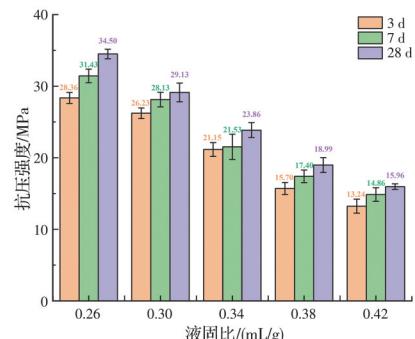
注: 燃煤渣为 90 g, 氧化钙为 20 g, 未煅烧, TSPH 为 5 g, 液固比为 0.3。

图 5 水玻璃对燃煤渣地聚合物抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of sodium silicate on compressive strength of burnt coal cinder base geopolymers

## 2.5 液固比的影响

按水玻璃与前驱粉体比值为 3/20 的最优值继续设计试验, 研究液固比的影响。从液固比对燃煤渣地聚合物抗压强度的影响(图 6)可以看出, 液固比与抗压强度负相关。液固比为 0.26 时, 地聚合物抗压强度达 34.50 MPa。液固比的增加使混合物形态从团聚粉末变为具有更高流动性的浆料, 而液固比为 0.26 为混合物具有搅拌性的下限值。反应体系



注: 燃煤渣为 90 g, 氧化钙为 20 g, 未煅烧, TSPH 为 5 g, 水玻璃为 15 mL。

图 6 液固比对燃煤渣地聚合物抗压强度的影响

Fig. 6 Influence of liquid-solid ratio on compressive strength of burnt coal cinder base geopolymers

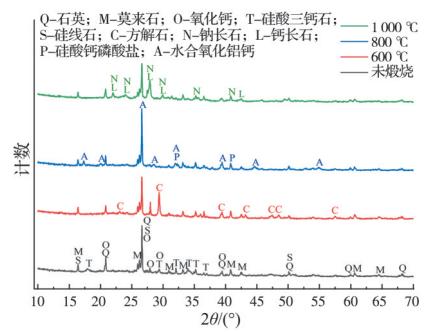
中过多的水会阻碍凝胶形成, 且浆体硬化过程中水的蒸发会增加产物的孔隙率<sup>[21-22]</sup>, 导致试样抗压强度显著降低。

## 3 机理分析

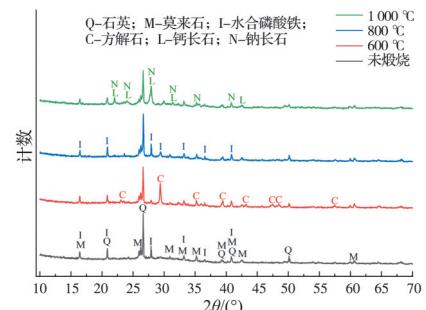
根据煅烧温度对燃煤渣地聚合物的影响趋势(图 2)以及后续的机理分析可以发现, 从未煅烧到 600 °C, 只是变化趋势增强了, 与 600 °C 时的机理变化并没有实质性区别。而 800、1 000 °C 时抗压强度的异常回升以及完全消失均需关注。因此, 选取未煅烧、600 °C、800 °C、1 000 °C 四种煅烧条件来进行表征, 以反映整体趋势及机理变化。

### 3.1 物相分析

图 7 为不同煅烧温度下地聚合物反应前后矿物组成变化的 XRD 图谱。未煅烧的前驱粉体(图 7(a))主要由石英、莫来石、氧化钙、硅酸三钙石和硅线石组成, 相应的地聚合物(图 7(b))主要包含石英、莫来石和新生成的水合磷酸铁。在 600 °C 煅烧温度下, 前驱粉体的石英和莫来石衍射峰仍存在, 但硅酸三钙石和硅线石的衍射峰强度显著降低, 氧化钙被方解石替代(图 7(a)), 且地聚合物后方解石特征峰仍存在(图 7(b))。当煅烧温度提高到 800 °C 时, 方解石的衍射峰显著降低, 前驱粉体中出现了水合氧化铝钙和硅酸钙磷酸盐的衍射峰(图 7(a)), 地聚合物中再次出现了水合磷酸铁的特征峰(图 7(b)), 与未



(a) 前驱粉体 XRD 图谱



(b) 地聚合物 XRD 图谱

图 7 不同煅烧温度下前驱粉体和地聚合物的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of precursor powders and geopolymers at different calcination temperatures

煅烧时相同。1 000 ℃煅烧后,前驱粉体和地聚物中均出现了石英、莫来石、钙长石和钠长石(图7)。

上述现象表明,石英、莫来石、方解石、钙长石和钠长石作为惰性组分稳定存在,而氧化钙、硅酸三钙石、硅线石、水合氧化铝钙和硅酸钙磷酸盐作为活性组分参与地聚合反应。未煅烧的前驱粉体含有最多的活性成分,因此具有最高的抗压强度(图2)。随着煅烧温度的增加,大量活性钙源转变为惰性的方解石,导致抗压强度降低。但当煅烧温度达到800 ℃附近时,方解石分解转化为新的活性钙源,地聚物的抗压强度出现一定回升。煅烧温度达到1 000 ℃时,活性组分全部转化为长石类的惰性矿物,因此,无论如何延长试样的养护时间都无法产生抗压强度。

### 3.2 红外光谱分析

图8为不同煅烧温度下燃煤渣基地聚物的FTIR图谱。其中主吸收带(950~1 100 cm<sup>-1</sup>)属于Si-O-T(Si, Al)的不对称伸缩振动,主吸收带的偏移表明凝胶相的形成<sup>[23]</sup>。与Si-O相比,Al-O具有更高的离子性质,因此,凝胶相的Si-O-Al键比例增加导致主吸收带向较低波数移动<sup>[24]</sup>。在600、1 000 ℃条件下,主吸收带均在1 030 cm<sup>-1</sup>以上的高波数区,而在未煅烧和800 ℃条件下,主吸收带均向1 030 cm<sup>-1</sup>的低波数偏移,因此生成更多的凝胶相,与抗压强度的表现一致(图2)。1 440、875、714 cm<sup>-1</sup>分别对应于C-O反对称拉伸振动、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>平面外变形振动和O-C-O平面内变形振动<sup>[25]</sup>。600、800 ℃条件下出现了碳酸盐的吸收带,且600 ℃条件下最显著,与图7中矿物相的变化一致,碳酸盐惰性矿物减少但不完全消失是地聚物抗压强度(800 ℃)出现回升但仍低于未煅烧条件下制备地聚物抗压强度的主要原因。

### 3.3 热分析

图9为燃煤渣基地聚物的热分析曲线(包括累

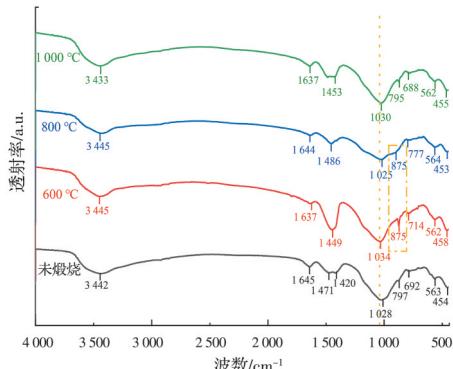


图8 不同煅烧温度下燃煤渣基地聚物的FTIR图谱

Fig. 8 FTIR spectra of burnt coal cinder base geopolymers at different calcination temperatures

计质量损失TG、质量损失速率DTG、差示扫描热DSC),用以推测各种凝胶相的存在情况。在30~100 ℃之间,强吸热峰为自由水的损失,而100~310.6 ℃之间为结合水的持续损失,主要涉及典型的C-S-H或(C, N)-A-S-H脱水<sup>[26-27]</sup>。(C, N)-A-S-H具有牢固的三维网状结构,对水分子的结合力最强,因而对应最高的失水温度,300 ℃附近的质量损失为推测地聚物凝胶存在的特征区域<sup>[28]</sup>。在400~800 ℃之间,质量损失仍在进行,这是由于碳酸盐和Ca(OH)<sub>2</sub>等物质的分解所致<sup>[29]</sup>。

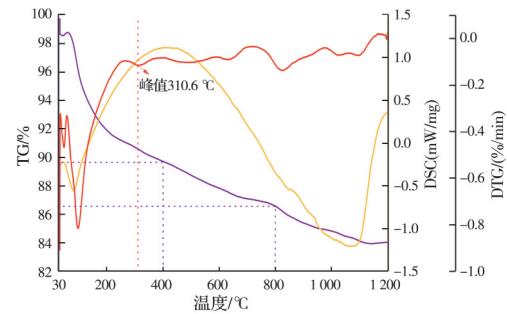


图9 未煅烧燃煤渣基地聚物的TA曲线

Fig. 9 TA curves of uncalcined burnt coal cinder base geopolymers

### 3.4 形貌分析

图10为不同煅烧温度下燃煤渣基地聚物的SEM图。由图10可见,未煅烧得到的地聚物表面为许多海绵状凝胶的沉积态,包裹、附着小颗粒形成完整基质,微观结构致密。煅烧温度为600 ℃时,颗粒的形貌清晰可见,暴露出来的颗粒一般为未反应的石英、莫来石以及新产生的方解石,胶凝材料显著减少,表面存在明显间隙。煅烧温度为800 ℃时,颗粒仍存在许多孔隙,但相对于600 ℃时,颗粒出现聚集成团的趋势,这是由于凝胶生成量增加所

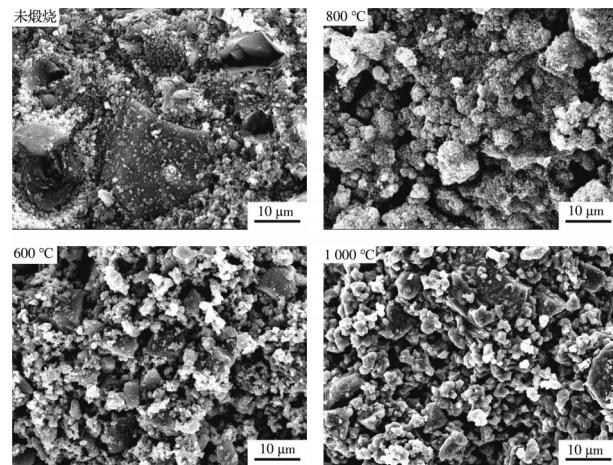


图10 不同煅烧温度下燃煤渣基地聚物的SEM图

Fig. 10 SEM images of burnt coal cinder base geopolymers at different calcination temperatures

致。1 000 ℃煅烧温度下,整个结构更加疏散,颗粒之间的约束更少,只剩下惰性颗粒的简单堆积,与图7中得到的无凝胶相生成的结论一致。

## 4 结论

1)燃煤渣:氧化钙:TSPH=18:4:1混合后振磨4 min,得到前驱粉体,按水玻璃与前驱粉体比为0.15 mL/g、液固比为0.26 mL/g制备出28 d抗压强度达到34.5 MPa的地聚物,满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)中矿渣硅酸盐水泥32.5 R的国家标准。

2)在低于1 000 ℃的高温煅烧条件下,燃煤渣不具备煤矸石、粉煤灰等固废的热活化性,这主要是由于煅烧会导致其活性组分向惰性的方解石、长石等转化,显著减少了可参与地聚合反应的物质。但800 ℃煅烧温度下方解石开始分解,产生的部分活性组分使地聚物的抗压强度出现回升。当煅烧温度达到1 000 ℃时,煅烧后的产物主要为惰性的长石相,基本无活性的硅铝组分形成提供强度的无定形凝胶,因而抗压强度始终为0 MPa。

3)通过氧化钙与磷酸三钠的联合激发,促进了燃煤渣参与地聚合反应并形成多种复杂的凝胶相(C-S-H和(C,N)-A-S-H),复杂凝胶相的生成使微观结构更加致密,这也是地聚物抗压强度的主要来源。但磷酸三钠的选择会引入过多的钠离子,限制了磷酸三钠的掺量以及地聚物强度的进一步提高。

## 参考文献

- [1] 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.  
ZHANG S Z, GONG K C. Geopolymer [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, 21(3): 430-436. (in Chinese)
- [2] 张大旺,王栋民.地质聚合物混凝土研究现状[J].材料导报,2018,32(9): 1519-1527, 1540.  
ZHANG D W, WANG D M. Research status of geopolymer concrete [J]. Materials Reports, 2018, 32 (9): 1519-1527, 1540. (in Chinese)
- [3] 刘庆,臧浩宇,王俊祥,等.矿渣基地聚物的制备及其性能研究综述[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(3): 43-49.  
LIU Q, ZANG H Y, WANG J X, et al. An overview of preparation and performance of slag based geopolymer [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(3): 43-49. (in Chinese)
- [4] 秦磊,包申旭,张一敏,等.页岩提钒尾渣-赤泥混合煅烧制备地聚物研究[J].有色金属(冶炼部分),2020(4): 51-56.  
QIN L, BAO S X, ZHANG Y M, et al. Preparation of geopolymer from vanadium tailings and red mud by mixed calcination [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(4): 51-56. (in Chinese)
- [5] 汪海风,刘杰,阙永生,等.建筑垃圾—矿渣地聚合物材料的制备及性能[J].材料科学与工程学报,2016,34(6): 895-899.  
WANG H F, LIU J, QUE Y S, et al. Preparation and properties of geopolymer based on construction waste-slag [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(6): 895-899. (in Chinese)
- [6] 包申旭,桂娅琼,黄敏,等.一种基于花岗岩废料和燃煤渣的免烧透水砖及其制备方法:CN113603440B[P].2022-10-14.  
BAO S X, GUI Y Q, HUANG M, et al. Unfired water permeable brick based on granite waste and fire coal slag and preparation method of unfired water permeable brick: CN113603440B [P]. 2022-10-14. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] FERREIRA V J, SÁEZ-DE-GUINOA VILAPLANA A, GARCÍA-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.
- [9] 包申旭,黄慕洋,张一敏.一种利用花岗岩石粉和燃煤渣制备一体化胶凝材料的方法:CN113620618A[P].2022-10-14.  
BAO S X, HUANG M Y, ZHANG Y M. Method for preparing integrated cementing material by using granite stone powder and fire coal slag: CN113620618A [P]. 2022-10-14. (in Chinese)
- [10] 郑戈弋,周海林,黄青叶,等.燃煤渣花岗岩粉基地聚合物的制备[J].有色金属(冶炼部分),2022(9): 133-139.  
ZHENG G Y, ZHOU H L, HUANG Q Y, et al. Preparation and performance characterization of granite powder-burnt coal cinder-based geopolymer [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(9): 133-139. (in Chinese)
- [11] LI D X, SONG X Y, GONG C C, et al. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1752-1759.
- [12] 朱愿愿,王爱国,孙道胜,等.煅烧煤矸石细骨料特性及其对砂浆性能的提升作用[J].煤炭学报,2021, 46

- (11): 3657-3669.
- ZHU Y Y, WANG A G, SUN D S, et al. Characteristics of coal gangue fine aggregates after calcination and its effects on the improvement of mortar properties [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3657-3669. (in Chinese)
- [13] 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.
- YANG S Y, ZHAO R D, JIN H S, et al. Research on influence parameters of early strength of fly ash-based geopolymer mortar [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 162-169. (in Chinese)
- [14] MCCARTER W J. Thermal and chemical activation of fly-ash: Electrical response during early hydration [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(10): 3163-3166.
- [15] 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.
- [16] 周宇, 徐方, 顾功辉, 等. 地聚合物早期抗压强度及分子动力学模拟[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 93-98, 120.
- ZHOU Y, XU F, GU G H, et al. Early compressive strength and molecular dynamics simulation of geopolymer [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 93-98, 120. (in Chinese)
- [17] 董腾, 邹艺璇, 宋培, 等. 微波养护偏高岭土磷酸基地聚物的特征与表征[J]. 中国粉体技术, 2020, 26(4): 52-58.
- DONG T, ZOU Y X, SONG P, et al. Characteristics and characterization of metakaolin phosphoric acid-based geopolymer cured by microwave [J]. China Powder Science and Technology, 2020, 26(4): 52-58. (in Chinese)
- [18] 孔祥明, 路振宝, 石晶, 等. 磷酸及磷酸盐类化合物对水泥水化动力学的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11): 1553-1558.
- KONG X M, LU Z B, SHI J, et al. Impacts of phosphoric acid and phosphates on hydration kinetics of Portland cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(11): 1553-1558. (in Chinese)
- [19] 刘俊霞, 李忠育, 张茂亮, 等. 赤泥地聚物水泥力学性能和聚合机理[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 178-183.
- LIU J X, LI Z Y, ZHANG M L, et al. Mechanical property and polymerization mechanism of red mud geopolymer cement [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2): 178-183. (in Chinese)
- [20] HUANG M Y, BAO S X, ZHANG Y M, et al. The combined effects of calcium oxide and phosphate on burnt coal cinder-based cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2023, 362: 129720.
- [21] CHOTETANORM C, CHINDAPRASIRT P, SATA V, et al. High-calcium bottom ash geopolymer: Sorptivity, pore size, and resistance to sodium sulfate attack [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(1): 105-111.
- [22] LLOYD R R, PROVIS J L, SMEATON K J, et al. Spatial distribution of pores in fly ash-based inorganic polymer gels visualised by Wood's metal intrusion [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2009, 126(1/2): 32-39.
- [23] ZHANG B F, YUAN P, GUO H Z, et al. Effect of curing conditions on the microstructure and mechanical performance of geopolymers derived from nanosized tubular halloysite [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121186.
- [24] 李剑锋. 煤矸石-电石渣地聚物胶凝材料固化软土的试验研究与应用[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- LI J F. Experimental study and application of coal gangue-carbide slag geopolymer cementing material for curing soft soil [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [25] ABOULAYT A, RIAHI M, OUAZZANI TOUHAMI M, et al. Properties of metakaolin based geopolymer incorporating calcium carbonate [J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(9): 2393-2401.
- [26] 张海燕, 曹亮, 吴波. 地聚物砂浆高温后抗拉和粘结性能及退化机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 128-134.
- ZHANG H Y, CAO L, WU B. Tensile and bond properties and strength degradation mechanism of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 128-134. (in Chinese)
- [27] TAJUELO RODRIGUEZ E, GARBEV K, MERZ D, et al. Thermal stability of C-S-H phases and applicability of Richardson and Groves' and Richardson C-(A)-S-H(I) models to synthetic C-S-H [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 93: 45-56.
- [28] WANG D X, WANG R H, BENZERZOUR M, et al. Comparison between reactive MgO- and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-activated low-calcium fly ash-solidified soils dredged from East Lake, China [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(9): 1046-1055.
- [29] BARBOSA V F F, MACKENZIE K J D. Synthesis and thermal behaviour of potassium sialate geopolymers [J]. Materials Letters, 2003, 57(9/10): 1477-1482.