

# 煤气化灰渣烘烤球磨活化技术研究\*

Research on the Activation Technology of Coal Gasification Ash by Baking Ball Milling

聂庆科<sup>1,3</sup>, 李华伟<sup>1,2</sup>, 张日华<sup>1,2</sup>, 王庆军<sup>1,3</sup>, 刘双辰<sup>1</sup>

- 中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050200;
- 河北省工业固体废弃物综合利用重点实验室, 河北 石家庄 050200;
- 河北省岩土技术创新中心, 河北 石家庄 050200)

**摘要:** 为了提高煤气化灰渣的活性, 增加煤气化灰渣资源化利用的途径和范围, 实现煤气化灰渣的高值化利用, 采用烘烤-球磨-筛分的方法对其进行处理。通过粒径分布试验和 SEM 试验分析活化前后、不同研磨时间的煤气化灰渣的粒度分布和物质形态, 发现颗粒细度直接影响煤气化灰渣的活性, 而煤气化灰渣颗粒的分布特征会影响胶凝材料整体的紧密堆积, 从而决定硬化体的微观密实程度。通过活化前后的煤气化灰渣与熟石灰的抗压和抗折强度试验验证煤气化灰渣烘烤球磨活化技术的有效性。结果表明: 活化后的煤气化灰渣混合料的抗折和抗压强度是未经过活化的煤气化灰渣熟石灰混合料的 1.4~3.0 倍, 证明了煤气化灰渣活化技术的可行性。

**关键词:** 煤气化灰渣; 高值化利用; 活化技术; 地质聚合物

**中图分类号:** TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0045-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.009

NIE Qingke<sup>1,3</sup>, LI Huawei<sup>1,2</sup>, ZHANG Rihua<sup>1,2</sup>, WANG Qingjun<sup>1,3</sup>, LIU Shuangchen<sup>1</sup>

- China Hebei Construction & Geotechnical Investigation Group Ltd., Shijiazhuang 050200, China;
- Key Laboratory for Industrial Solid Waste Comprehensive Utilization of Hebei province, Shijiazhuang 050200, China;
- Geotechnical Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050200, China)

**Abstract:** In order to improve the activity of coal gasification ash, increase the ways and scope of resource utilization of coal gasification ash, and achieve high-value utilization of coal gasification ash, the method of baking ball milling screening is used to treat it. The particle size distribution and material morphology of coal gasification ash before and after activation and at different grinding times were analyzed through particle size distribution experiments and SEM experiments. It was found that the particle size directly affects the activity of coal gasification ash, and the distribution characteristics of coal gasification ash particles can affect the overall compact stacking of cementitious materials, thereby determining the micro compactness of the hardened body. The effectiveness of coal gasification ash roasting ball milling activation technology was verified through compressive and flexural strength tests of coal gasification ash and hydrated lime before and after activation. The results showed that the flexural and compressive strength of the activated coal gasification ash mixture was 1.4~3.0 times higher than that of the non activated coal gasification ash hydrated lime mixture, proving the feasibility of coal gasification ash activation technology.

**Keywords:** coal gasification ash; high value utilization; activation technology; geopolymer

\* 基金项目: 河北省重点研发项目计划 (19211505D); 中央引导地方科技发展资金计划 (216Z1501G)。

作者简介: 聂庆科 (1965—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 工业固废、岩土工程。

收稿日期: 2023-05-12

## 材料科学

## 0 引言

煤气化灰渣是煤化工生产中,在气化炉内的煤浆颗粒经雾化燃烧被提取有用化工成分后产生的微粒,这些微粒进行碰撞烧结后,随着气流夹带进入冷水浴,经过激冷破碎后形成,它包括粗渣(气化炉底渣)和细渣(飞灰及黑水滤饼等)两部分。

煤气化灰渣是较大的工业固废源之一,一般每生产 1 t 化工产品会产生 1~3 t 煤气化灰渣,有的会高达 12 t。目前,国内很多煤化工企业按照 GB 18599《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》<sup>[1]</sup>及其相关标准要求建有企业自用的填埋场,用于填埋锅炉灰渣、气化渣和滤饼,其相对投资少、处理容量大、处理速度快,但需要占用宝贵的土地资源,这在土地资源紧张的地区矛盾愈发明显;另外填埋场产生的渗透或粉尘也容易造成环境污染,直接或间接危害人民健康。

改革开放以来,随着我国煤气化技术开发和应用取得长足进步,煤气化灰渣的资源化利用研究受到了关注,总体可分为低值化、中值化和高值化利用<sup>[2-3]</sup>。低值化利用包括结构回填、路基填筑、充填矿井等,经济效益较低;中值化利用经济效益一般,包括用作水泥原料、墙体材料等;高值化利用经济

效益较好,包括作为改良或改性材料、土壤改良剂、吸附剂、金属或其化合物分选材料等。

李小宇、Insoo Ye 等<sup>[4-5]</sup>利用煤气化灰渣的排出温度进行灰渣物理热的回收工作;杨帅、方军良等<sup>[6-7]</sup>利用煤气化灰渣的非均粒性、孔隙较少作为回填使用的散体建筑材料;Lu、Zhou 等<sup>[8-9]</sup>利用煤气化灰渣中硅、铝等成分制备精细化工补强剂、氧化铝等高附加值产品。

本文以增加煤气化灰渣资源化利用的途径和范围为导向,为充分利用灰渣中富含的碳酸钙及钙的硅铝酸盐成分,解决由于其粒径分布差异较大、颗粒聚集严重导致其活性降低的问题,研究了一种煤气化灰渣的活化技术。通过改良煤气化灰渣的物理特性使其活性提高,为煤气化灰渣高值化利用提供思路。

## 1 煤气化灰渣活化的可行性分析

煤气化灰渣的主要矿物质通常包括 Si、Al、Fe、Ca 的氧化物,约占 90%,其他主要成分还有 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、SO<sub>3</sub>、未燃烧的碳及多种微量元素<sup>[4-6]</sup>。其化学组成受煤的种类、产地、气化工工艺、气化炉形式及灰的回收方式的影响。

煤气化灰渣取自沧州正元化工有限公司,具体化学成分见表 1。

表 1 煤气化灰渣化学成分  
Table 1 Chemical composition of coal gasification ash

元素类别与含量																/%
Si	Ca	Al	Fe	Mg	K	Na	Ti	S	Mn	Zn	Sr	Cl	P	Cu	Cr	
34.43	30.35	13.73	12.19	2.04	1.91	1.66	1.2	0.88	0.4	0.35	0.34	0.2	0.12	0.11	0.02	
V	Co	Ni	W	Pb	Zr	I	Ga	Sc	Tb	Rb	Bi	Mo	Br	Se	Te	
0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0033	0.005	0.0022	0.0018	0.0016	0.0014	0.0011	0.0003	

由表 1 可以看出,煤气化灰渣化学成分以 Si、Ca、Al 为主,占比可达 78.51%,这是胶凝材料的基础化学矿物质成分,是形成火山灰反应的化学基础,证明煤气化灰渣具备了材料活化的条件。并且机械活化可以进一步增加 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等元素的比表面积和溶解速率,对抗压强度和活性展示出正向影响,加速了水化过程。

## 2 活化方法及结果分析

## 2.1 活化方法

考虑活化方法的成本、安全性以及具备大规模

活化的可行性,选择烘烤-球磨-筛分的方法对煤气化灰渣进行活化处理。

实验室活化技术处理主要步骤如下:

(1) 取 2.5 kg 煤气化灰渣,放入烘箱,温度控制在 110~700 °C,烘烤 5~6 h,来蒸发煤气化灰渣中的水分及未被气化的炭,避免在活化过程中产生结块现象;

(2) 将烘烤后的煤气化灰渣放入水泥球磨机中进行球磨,球磨时间分别为 10、30、60、90、120 以及 180 min,以分析有效球磨时间;

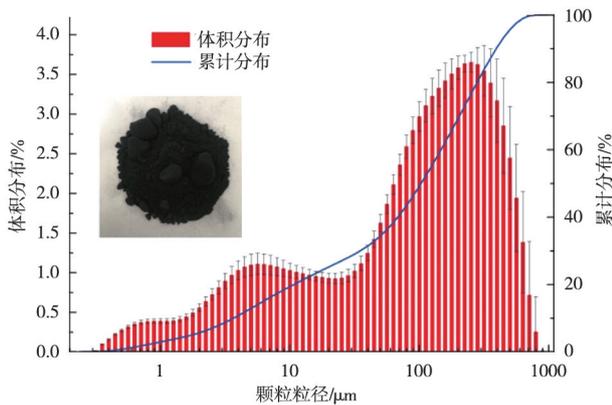
(3) 采用不同目数的筛分机对球磨后的煤气化灰

渣进行筛分，检测球磨效果，确定最佳球磨时间；

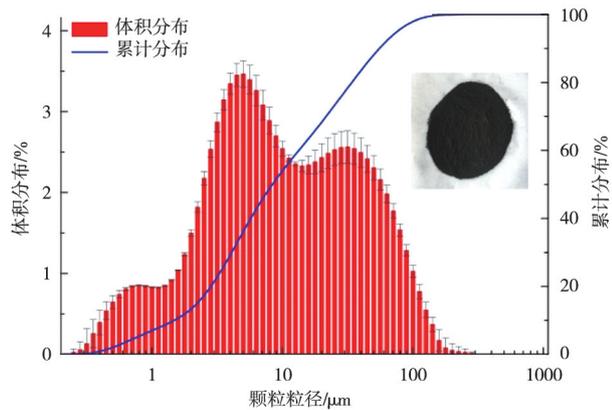
(4) 分别对不同活化时间的煤气化灰渣进行激光粒度分析试验。

### 2.2 粒度分布

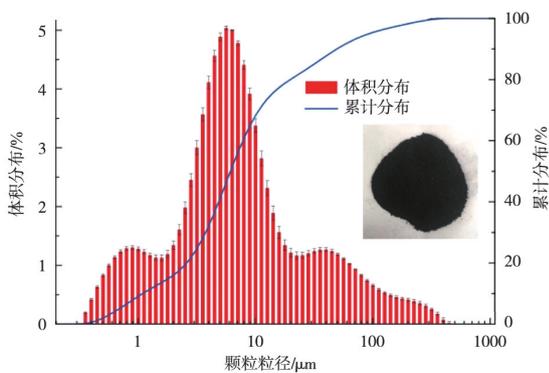
根据上述试验步骤，对不同球磨时间的煤气化灰渣进行激光粒度分析试验。不同球磨时间下颗粒粒度的分布情况见图 1 与表 2，从 (a) ~ (f) 分别为未活化、10、30、60、90、120 和 180 min。



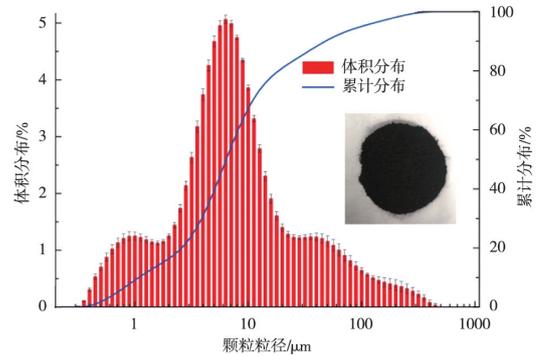
(a) 未活化



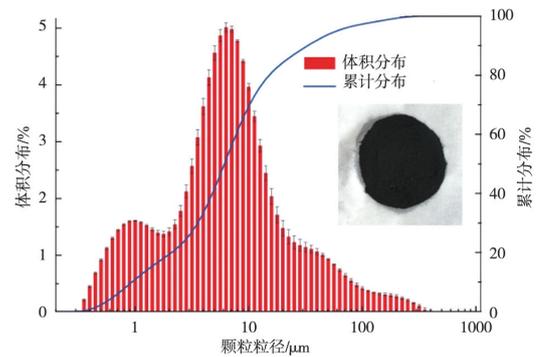
(b) 10 min



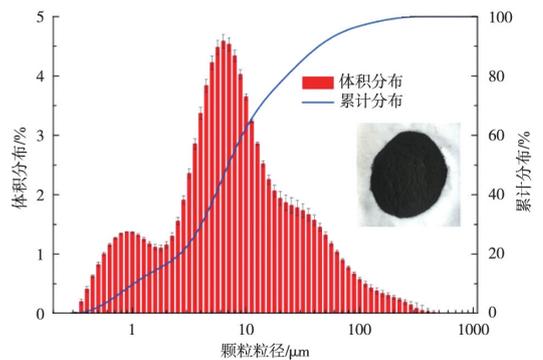
(c) 30 min



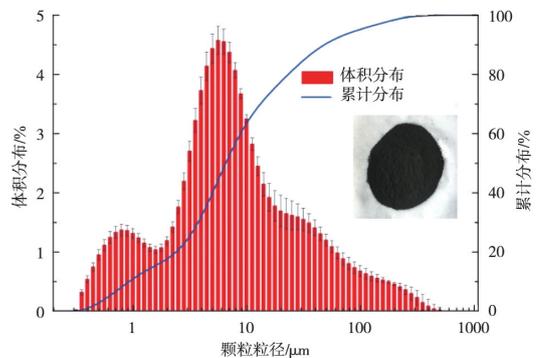
(d) 60 min



(e) 90 min



(f) 120 min



(g) 180 min

图 1 煤气化灰渣不同球磨时间的粒度分布试验结果  
Fig. 1 Test results of particle size distribution of coal gasification ash with different grinding time

材料科学

根据图 1 可知, 随着球磨时间的增加, 粒径分布图的峰值逐渐由大粒径向小粒径移动; 球磨时间为 10 min 时, 粒径分布曲线出现双峰, 表明大粒径煤气化灰渣正在被球磨, 但仍有球磨空间; 球磨时间在 30 min 以后, 形态基本相似, 谷峰对应粒径在 5 ~ 7 μm。

较未经球磨的试样相比, 通过活化处理后的煤气化灰渣试样粒度分布发生了变化。粒径大于 100 μm 的颗粒, 由 50.83% 降为 2.68% ~ 6.21%; 粒径分布于 1.5 ~ 20 μm 的颗粒, 由 20.57% 升为 58.08% ~ 67.56%; 粒度分布为 90% 时, 其对应粒径最小为 32.89 μm, 是未球磨的煤气化灰渣的对应粒径的 1/12。球磨处理可以有效增加细颗粒在煤气化灰渣中的占比, 减少粗颗粒的占比, 进而有效提高其活化程度。

对比不同球磨时间的粒度分布可知, 在实验室活化时间为 90 min 时, 其粒度分布最佳, 粒径大于 20 μm 明显减少, 仅占 15.71%, 且 D<sub>10</sub>、D<sub>50</sub>、D<sub>90</sub> 也为最小, 分别为 0.95 μm、5.59 μm 以及 32.89 μm。考虑到采用大型工厂设备进行活化以及大型设备活化效率, 其煤气化灰渣颗粒分布情况可作为重要参考依据, 即 D<sub>10</sub> 为不大于 1.0 μm; D<sub>50</sub> 为 5.0 ~ 6.5 μm; D<sub>90</sub> 为 30 ~ 40 μm。

表 2 煤气化灰渣粒度分布情况试验结果

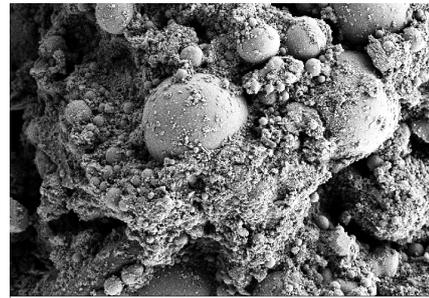
Table 2 Test results of particle size distribution of coal gasification ash

时间 /min	粒度分布比率/%				累计粒度分布粒径/μm		
	0.2~1.5 μm	1.5~20 μm	20~100 μm	>100 μm	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
0	4.63	20.57	23.96	50.83	3.70	104.64	392.08
10	14.13	58.08	21.56	6.21	1.49	8.38	55.36
30	13.63	66.48	15.08	4.81	1.16	5.94	49.50
60	14.01	66.92	14.08	4.99	1.07	6.42	47.90
90	16.73	67.56	13.03	2.68	0.95	5.59	32.89
120	14.52	63.25	19.08	3.15	1.04	6.80	42.96
180	15.45	61.98	17.76	4.81	0.97	6.34	50.78

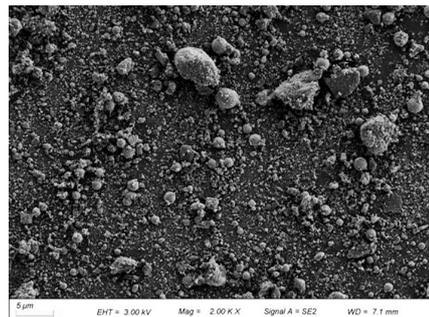
根据表 2 可知, 未经过球磨的煤气化灰渣试样, 粒径大于 100 μm 的颗粒占比可达 50.83%; 粒度分布为 90% 时, 其对应粒径为 392.08 μm。而材料粒度分布以及颗粒粒径的大小会直接影响其活化程度。

2.3 SEM 试验结果

采用活化方法进行煤气化灰渣的活化处理, 球磨时间为 90 min, 其活化前后 SEM 试验结果如图 2 与图 3 所示。

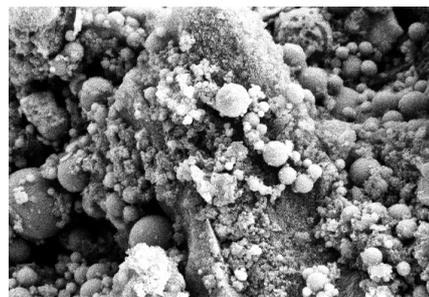


(a) 活化前

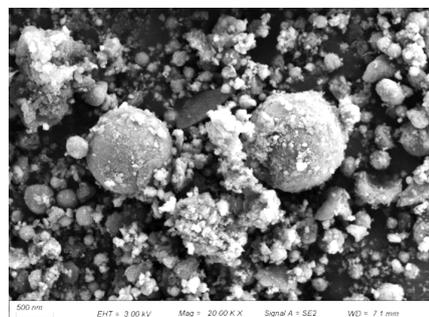


(b) 活化后

图 2 5 μm 级别的活化前后 SEM 图  
Fig. 2 SEM images of coal gasification ash before and after activation at 5 μm level



(a) 活化前



(b) 活化后

图 3 500 nm 级别的活化前后 SEM 图  
Fig. 3 SEM images of coal gasification ash before and after activation at 500 nm level

从图 2、3 中图像对比可知：未经活化处理的煤气化灰渣颗粒粒径大小差异较大，颗粒之间被无定形的团聚结块所包裹；经过活化处理后，颗粒间的无定形聚结块被活化打散，增加了煤气化灰渣颗粒的比表面积和溶解率，整体表现为较为均匀、单一的球形颗粒。

### 3 熟石灰煤气化灰渣混合料强度试验

#### 3.1 试验设计

为了探究煤气化灰渣的活化效果，采用煤气化灰渣与熟石灰的净浆强度试验，设计了 25 组熟石灰煤气化灰渣配合比试验，配合比方案见表 3。序号 1-5 组为未经活化的煤气化灰渣与不同熟石灰（熟石灰与灰渣比例为 3:1、3:2、1:1、2:3、1:3）在水溶液的配合比，作为空白对照组；6-10 组为经活化处理的煤气化灰渣（球磨时间 90 min）与不同熟石灰（熟石灰与灰渣比例为 3:1、3:2、1:1、2:3、1:3）在水溶液的配合比，作为试验组探究活化处理前后的煤气化灰渣在混合料中的强度影响；11-25 组为煤气化灰渣的地质聚合物研究试验，探究不同浓度（3、6 及 9 mol/L）氢氧化钠溶液下煤气化灰渣与不同熟石灰比例的强度。

根据表 3 可知，将熟石灰与煤气化灰渣按比例混合后，分别将其与水溶液和 3、6 以及 9 mol/L 的碱溶液进行反应，将其制备成型为 160 mm×40 mm×40 mm 试样，如图 4 所示。

表 3 熟石灰煤气化灰渣混合料配合比

Table 3 Proportion of the mixture of the hydrated lime and coal gasification ash

序号	编号	熟石灰与灰渣比例	熟石灰占比/%	煤灰占比/%	溶液类型
1	SA-1-0	3:1	75	25	水溶液
2	SA-2-0	3:2	60	40	
3	SA-3-0	1:1	50	50	
4	SA-4-0	2:3	40	60	
5	SA-5-0	1:3	25	75	
6	SA-1-0	3:1	75	25	水溶液
7	SA-2-0	3:2	60	40	
8	SA-3-0	1:1	50	50	
9	SA-4-0	2:3	40	60	
10	SA-5-0	1:3	25	75	

续表

11	SA-1-3	3:1	75	25	3 mol/L 氢氧化钠溶液
12	SA-2-3	3:2	60	40	
13	SA-3-3	1:1	50	50	
14	SA-4-3	2:3	40	60	
15	SA-5-3	1:3	25	75	
16	SA-1-6	3:1	75	25	6 mol/L 氢氧化钠溶液
17	SA-2-6	3:2	60	40	
18	SA-3-6	1:1	50	50	
19	SA-4-6	2:3	40	60	
20	SA-5-6	1:3	25	75	
21	SA-1-9	3:1	75	25	9 mol/L 氢氧化钠溶液
22	SA-2-9	3:2	60	40	
23	SA-3-9	1:1	50	50	
24	SA-4-9	2:3	40	60	
25	SA-5-9	1:3	25	75	

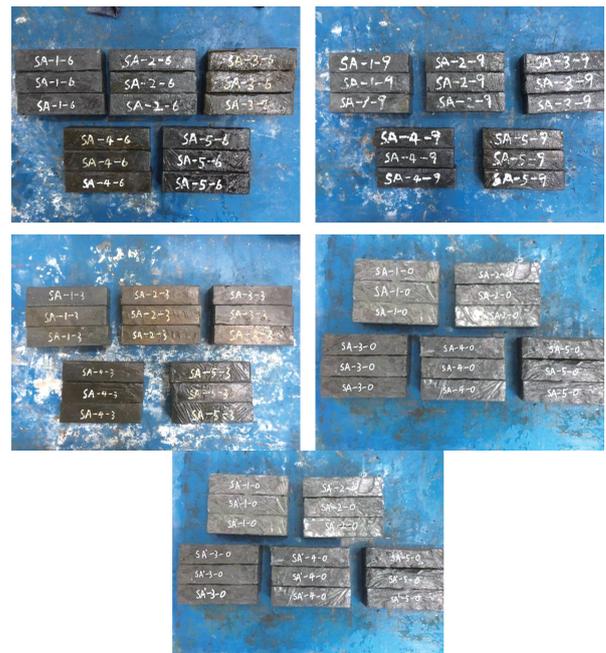


图 4 熟石灰煤气化灰渣试块

Fig. 4 Test block of slaked lime gasification ash

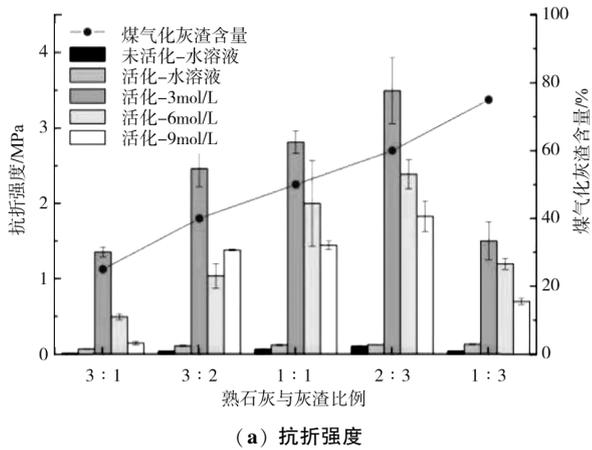
#### 3.2 试验结果及分析

参考 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》<sup>[10]</sup>，根据上述配合比进行强度试验，测定其 7 与 28 d 的抗折、抗压强度，试样为 160 mm×40 mm×40 mm。其试验结果如图 5、图 6 所示。

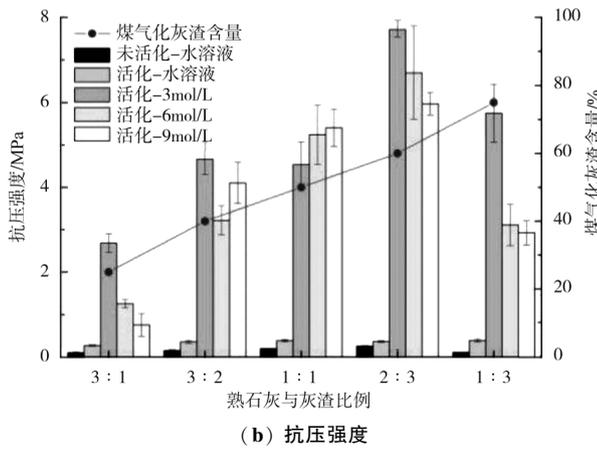
由图 5、图 6 可知，活化后的煤气化灰渣与熟石灰混合料，其抗折与抗压强度是未活化混合料抗折（压）强度（图中黑色柱体）的 1.4~3 倍；加入碱溶液的抗折（压）强度是水溶液的 3.3~5 倍；当碱溶液浓度在 3 mol/L 时，抗折（压）强度达到最大，后逐渐减小；随煤气化灰渣含量增加，混合料的抗折

材料科学

(压)强度先增大后减小,当熟石灰与煤气化灰渣比例为2:3、氢氧化溶液浓度为3 mol/L时,其强度达到最大,28 d抗压强度为14.43 MPa,28 d抗折强度为3.5 MPa,是未活化、水化反应条件下的抗折(压)强度的12倍。



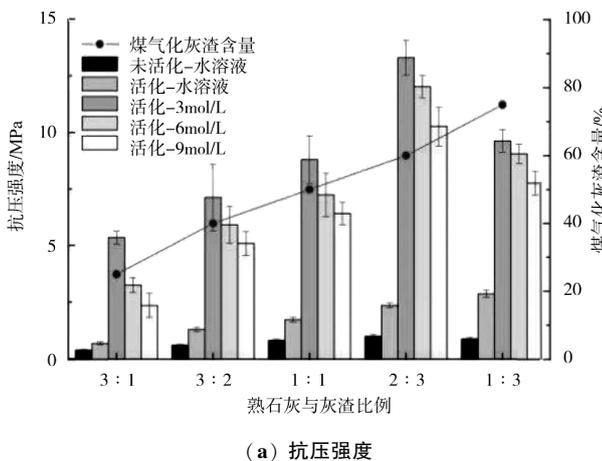
(a) 抗折强度



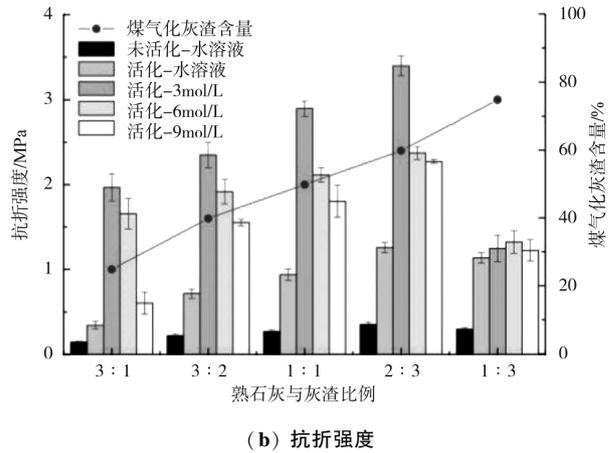
(b) 抗压强度

图5 混合料7 d抗折和抗压强度试验结果

Fig.5 Test results of 7 days flexural and compressive strength of the mixture



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图6 煤气化灰渣-熟石灰28 d强度试验结果

Fig.6 28 d strength test results of coal gasification ash-slaked lime

从试验结果可以看出,经过烘烤球磨的煤气化灰渣熟石灰混合料强度明显高于未经活化处理的混合料,证明了煤气化灰渣烘烤球磨活化技术的有效性。活化处理过程能够打散煤气化灰渣中的团聚颗粒,使得煤气化灰渣颗粒分布更细、更均匀,更细的颗粒意味着可有效增加煤气化灰渣中SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等矿物质成分的比表面积,可进一步加快溶解速率,加速水化反应过程。

加入碱溶液的抗折(压)强度是水溶液的3.3~5倍,是因为煤气化灰渣在碱激发条件下,SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>开始分解,共价键Si-O-Si和Al-O-Si断裂,高分子在凝胶中聚合、成核,得到由Si-O-Al-O键组成的三维聚合链和环结构,最终形成更稳定的三维硅铝酸盐结构地质聚合物。

4 结论

采用烘烤-球磨的物理方法对煤气化灰渣进行了活化处理,并通过相关试验得出如下结论:

(1) 活化后的煤气化灰渣试样,其粒度分布发生了变化,粒径大于100 μm的颗粒,仅占不足5%,最低可达2.68%;而粒径分布于1.5~20 μm的颗粒数量增加,最高可达67.56%,粒度分布为90%时,其对应粒径最小为32.89 μm,其粒径与粉煤灰和水泥粒径分布相似。

(2) 活化后的煤气化灰渣颗粒粒径大小差异减小,颗粒之间团聚结块被活化打散,数量减小,颗粒表面粗糙度降低。而未经活化处理的煤气化灰渣颗粒粒径大小差异较大,颗粒之间易于团聚结块,表面较为粗糙。

(3) 熟石灰与煤气化灰渣混合料强度试验表明, 与未活化的煤气化灰渣相比, 活化后的煤气化灰渣与熟石灰混合物材料的净浆抗压强度可提高 140%~300%, 证明了活化技术的可行性。

(4) 熟石灰与活化煤气化灰渣混合料在碱激发条件下表现出地质聚合物特性, 在 3 mol/L 的碱溶液激发下, 熟石灰与活化煤气化灰渣比例为 2:3 时, 其强度最大, 28 d 抗压强度可达 14.43 MPa, 抗折强度达到 3.5 MPa, 是未活化的煤气化灰渣在水化反应下的抗折(压)强度的 12 倍。

#### 参 考 文 献

- [1] GB 18599—2001, 一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准[S].
- [2] LIU W, OUYANG Z Q, CAO X Y, NA Y J. The influence of air-stage method on flameless combustion of coal gasification fly ash with coal self-preheating technology [J]. Fuel, 2019, 235 (1): 1368-1376.
- [3] GEETA K, PRABU V. CO<sub>2</sub>-air based two stage gasification of

low ash and high ash Indian coals in the context of underground coal gasification, Energy [J]. 2018, 143 (15): 822-832.

- [4] 李小宇, 李广宇, 许世森, 等. 液态排渣煤气化炉内灰渣的流动和换热研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (14): 12-17.
- [5] YE I, OH J, RYU C. Effects of design/operating parameters and physical properties on slag thickness and heat transfer during coal gasification [J]. Energies, 2015, 8 (5): 3370-3385.
- [6] 杨帅, 石立军. 煤气化细渣组分分析及其综合利用探讨 [J]. 煤化工, 2013, 41 (4): 29-31+38.
- [7] 方军良, 陆文雄, 徐彩宣. 粉煤灰的活性激发技术及机理研究进展 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2002 (3): 255-260.
- [8] LU GUANGHUA, BAI YONGHUI, LV PENG, et al. Insights into the role of calcium during coal gasification in the presence of silicon and aluminum [J]. Fuel, 2021, 302: 121134.
- [9] ZHOU SHANGKUN, WANG MENG, TAN HOUZHANG, et al. Evaluation of aluminum ash in alleviating the ash deposition of high-sodium and high-iron coal [J]. Fuel, 2020, 273: 117701.
- [10] JTG3420—2020, 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程 [S].

(上接第 21 页)

粉煤灰和磷渣对 28 d 和 90 d 抗压强度影响较大; 煤矸石粉、粉煤灰、磷渣对早期抗压强度存在明显交互作用; 分析各龄期抗压强度的极差, 得整体较优设计配合比为煤矸石粉掺量 20%、粉煤灰掺量 50%、磷渣掺量 10%。

(3) 设计配合比适宜时, 受检胶砂 7 d 和 28 d 活性指数及强度增长比均可达到 JG/T 486-2015《混凝土用复合掺合料》的普通 III 级复合矿物掺合料指标要求, 表明用机械活化煤矸石粉部分替代粉煤灰制备混凝土用复合矿物掺合料完全可行。

(4) 综合考虑各整体较优方案, 确定最优设计配合比为煤矸石粉掺量 20%、粉煤灰掺量 50%、磷渣掺量 10%, 换算成 100% 后配合比为煤矸石粉掺量 25.0%、粉煤灰掺量 62.5%、磷渣掺量 12.5%。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘应应. 谈混凝土掺合料应用的必要性[J]. 山西建筑, 2002 (3): 87-88.
- [2] 姜天华, 管建成, 张秀成. 超高性能混凝土掺合料应用综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (14): 5528-5538.
- [3] 王倩, 王丽花, 张豪. 污泥焚烧灰与粉煤灰混合后用作混凝土掺合料的研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (4): 73-75, 140.
- [4] 姚源, 王敏, 张凯峰, 等. 循环流化床固硫灰与磨细灰渣用作

混凝土掺合料的关键技术研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (2): 88-91.

- [5] 陈先明, 罗小平, 朱丹, 等. 辉绿岩人工砂中石粉作为碾压混凝土掺合料的试验研究[J]. 水力发电, 2020, 46 (1): 20-23.
- [6] 吴红, 徐立飞, 吴习, 等. 煤矸石活化的研究现状与展望[J]. 广州化工, 2017, 45 (1): 7-8, 43.
- [7] 金阳, 毋存粮, 陈小羊, 等. 自然煤矸石作矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2021 (9): 86-89, 93.
- [8] 白春, 麻凤海, 刘书贤, 等. 煅烧煤矸石粉掺合料制备及对混凝土性能影响[J]. 非金属矿, 2017, 40 (2): 38-41.
- [9] 任卫国. 超(亚)临界水热活化煤矸石制备白炭黑及其表面改性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [10] 李甫, 沈毅. 贵州省黄磷渣资源化利用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2007 (4): 18-20.
- [11] 吴红, 卢香宇, 罗忠竞, 等. 活化煤矸石免烧砖制备及机理分析[J]. 非金属矿, 2018, 41 (1): 30-33.
- [12] 程光福. 超细砖粉和石粉对水泥粉煤灰砂浆性能影响的试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [13] 刘庆涛, 岑国平, 吴和盛, 等. 机场道面再生混凝土干缩性能研究与应用[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39 (1): 174-177.
- [14] 周梅, 沈梦阳, 吴景昊, 等. 煤矸石掺合料的制备及对混凝土碱-骨料反应影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (5): 1713-1717.
- [15] 杨秋宇, 景严谊, 张东生. 纤维及矿物掺合料对煤矸石混凝土力学性能的改性研究[J]. 功能材料, 2022, 53 (7): 7150-7156.