

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 117—2025

煤基固体废弃物制备地质聚合物技术导则

Technical guide for preparation of geopolymers from coal-based solid wastes

2025 - 03 - 04 发布

2025 - 03 - 05 实施

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 分类	2
4.1 按原材料分类	2
4.2 按施工工艺分类	2
4.3 按强度分类	2
4.4 按碱激发剂类型分类	2
5 原材料	2
5.1 煤矸石粉	2
5.2 粉煤灰	2
5.3 激发剂	2
5.4 水	3
5.5 掺合料	3
5.6 外加剂	3
6 配合比	3
6.1 煤基固废地聚物配合比的一般规定	3
6.2 煤基固废料的组成及用量	3
6.3 用水量	3
6.4 硅酸钠（钾）的用量	3
6.5 激发剂的模数	3
6.6 氢氧化钠（钾）的用量	3
6.7 外加剂的用量	4
7 制备	4
7.1 煤基固废地聚物制备的一般规定	4
7.2 煤基固废地聚物现场制备及要求	4
7.3 预拌混合料制品地聚物制备及要求	4
7.4 煤基固废地聚物的制备设施技术要求	5
8 污染物控制	5
8.1 煤基固废地聚物产品环境安全性控制	5
8.2 废水及其他污染物排放控制	5
9 技术要求	5
9.1 新拌煤基固废地聚物	6
9.2 硬化煤基固废地聚物	6

10	试验方法	6
10.1	凝结时间	6
10.2	氯离子含量	6
10.3	安定性	6
10.4	强度	6
10.5	耐化学腐蚀性	6
10.6	抗氯离子渗透性	7
10.7	抗碳化性	7
11	检验规则	7
11.1	编号与取样	7
11.2	出厂检验	7
11.3	型式检验	7
11.4	进场复验	7
11.5	判定规则	7
11.6	检验报告	7
12	包装、标志、运输与贮存	7
12.1	包装	7
12.2	标志	8
12.3	运输与贮存	8
附录 A (资料性)	煤基固废地聚物制备的技术路线	9
A.1	煤基固废地聚物制备的技术路线	9
A.2	一种煤基固废地聚物现场制备的案例	9
A.3	一种预拌混合料制品地聚物制备的案例	10
	参考文献	11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：武汉大学、中国矿业大学（北京）、中国科学院武汉岩土力学研究所、中冶赛迪工程技术股份有限公司、中国一冶集团有限公司、中铁建发展集团有限公司、中交第三航务工程局有限公司、中冶南方城市建设工程技术有限公司、中国建筑第五工程局有限公司、金景（海南）科技发展有限公司。

本文件主要起草人：卢海峰、张俊文、张凯、于洪丹、孔晓璇、贺栋、吴月秀、翁磊、李杉、李劼、徐剑波、吕剑锋、王志高、张号军、朱勇、朱遵全、阳栋、常东明、张水、刘宇闻、白颢。

引 言

煤炭是我国的基础能源，在“碳中和、碳达峰”的时代背景下，我国以煤为主的能源资源禀赋短期内难以改变。煤炭生产和使用过程中会产生诸如煤矸石和粉煤灰等大宗固体废物，严重污染水、空气和土壤，是亟需治理的重大污染源。因此，创新煤基固废资源化利用技术是解决其环境污染问题的治本之策。地质聚合物是一种以富硅铝元素矿物或工业废弃物为原材料，在激发剂的作用下，通过溶解-单体重构-缩聚反应得到的一种新型无机绿色胶凝材料，性质与水泥类似，但是相比水泥具有耐腐蚀性和耐久性好、能耗低等一系列优点，是取代水泥等传统建筑材料的理想物质，也是目前煤基固废综合利用的主流发展方向。依据中华人民共和国有关法律法规和相关政策文件要求，为深入推进煤基固废综合利用，本文件从经济效益和应用效果的角度出发，规定了利用煤基固废制备地质聚合物的技术导则，涵盖了煤基固废地质聚合物的原材料选择、配合比设计、生产制备、污染控制、质检规则、贮存运输等内容，为科学利用煤基固废资源制备地质聚合物提供指导和参考，有助于推动煤基固废地聚物新材料在煤炭、市政、道路、生态修复等领域的推广应用，提高煤基固废综合利用水平，促进我国绿色低碳建筑材料的生产发展和技术进步。

煤基固体废弃物制备地质聚合物技术导则

1 范围

本文件规定了煤基固体废弃物制备地质聚合物的分类、原材料、配合比、制备、污染物控制、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输与贮存。

本文件适用于利用煤基固体废弃物制备地质聚合物。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 209 工业用氢氧化钠
- GB/T 1346 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB/T 1919 工业氢氧化钾
- GB/T 4209 工业硅酸钠
- GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB/T 9142 建筑施工机械与设备 混凝土搅拌机
- GB/T 9774 水泥包装袋
- GB/T 12573 水泥取样方法
- GB 14554 恶臭污染物排放标准
- GB/T 14848 地下水质量标准
- GB/T 17671 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)
- GB 18265 危险化学品经营企业安全技术基本要求
- GB 18597 危险废物贮存污染控制标准
- GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准
- GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰
- GB/T 27974 建材用粉煤灰及煤矸石化学分析方法
- GB/T 29162 煤矸石分类
- GB/T 29163 煤矸石利用技术导则
- GB/T 29423 用于耐腐蚀水泥制品的碱矿渣粉煤灰混凝土
- GB/T 30810 水泥胶砂中可浸出重金属的测定方法
- GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
- GB 50164 混凝土质量控制标准
- GB 50448 水泥基灌浆材料应用技术规范
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计规范
- GB 50684 化学工业污水处理与回用设计规范
- JC/T 480 建筑生石灰粉
- JC/T 1086 水泥氯离子扩散系数检验方法
- JGJ 63 混凝土用水标准
- HG/T 4131 工业硅酸钾

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

煤基固体废弃物 coal-based solid waste

煤基固废

主要指煤炭开采、加工、燃烧和转化等过程的附属产物，包括煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏和煤气化灰渣等。

3.2

地质聚合物 geopolymer

地聚物

一种以富硅铝元素矿物或工业废弃物为原材料，在激发剂的作用下，通过溶解-单体重构-缩聚反应得到的一种无机绿色胶凝材料。

3.3

多源煤基固废地聚物 multi-source coal-based solid waste geopolymer

指以煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏等2种及以上煤基固废为原材料，在碱性激发剂的作用下，得到的一种具有优良机械性能的新型无机绿色胶凝材料。

3.4

碱性激发剂 alkaline activator

以能激发粉煤灰、矿渣粉等材料潜在活性的碱金属为主组成的化合物。

3.5

碱性激发剂的模数 modulus of alkaline activator

碱性激发剂中二氧化硅与氧化钠的分子数之比。

4 分类

4.1 按原材料分类

煤基固废地聚物按所用煤基固废原材料分为：粉煤灰基地聚物、煤矸石基地聚物以及多源煤基固废地聚物。

4.2 按施工工艺分类

煤基固废地聚物按施工工艺分为现浇地聚物和预拌混合料制品地聚物。

4.3 按强度分类

按GB 175的相关规定，煤基固废地聚物分为32.5、42.5、52.5、62.5四个等级。

4.4 按碱激发剂类型分类

煤基固废地聚物按所用碱性激发剂种类分为：水玻璃类碱激发地聚物和非水玻璃类碱激发地聚物。

5 原材料

5.1 煤矸石粉

煤矸石宜采用在煤矿建井、开拓掘进、采煤过程中产生的干基灰分 $>50\%$ 的煤矸石，化学成分指标按GB/T 29162-2012中表3和表4中规定的铝硅型煤矸石（2或3级铝硅比）。煤矸石粉由煤矸石经破碎、粉磨、收集得到，其中比表面积宜控制在 $350\text{ m}^2/\text{kg} \pm 20\text{ m}^2/\text{kg}$ ，并经历过 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 以上且不低于2 h的高温煅烧活化。煤矸石粉的检测方法按GB/T 29163、GB/T 27974的相关规定。

5.2 粉煤灰

理化性能按GB/T 1596-2017中表1和表2规定的F类 I 级、II 级粉煤灰的技术要求，其中化学成分按GB/T 29423-2012中表1的要求。粉煤灰的检测方法按GB/T 27974的相关规定。

5.3 激发剂

5.3.1 水玻璃类激发剂由工业硅酸钠（钾）和工业用氢氧化钠（钾）配制而成，其中工业硅酸钠按 GB/T 4209 的相关规定，工业用氢氧化钠按 GB/T 209 的相关规定，工业硅酸钾按 HG/T 4131 的相关规定，工业氢氧化钾按 GB/T 1919 的相关规定，不应混入杂质。

5.3.2 非水玻璃类激发剂的各组成材料中，氢氧化钠按 GB/T 209 的要求，氢氧化钾按 GB/T 1919 的要求。

5.3.3 液体激发剂不应有沉淀分层；粉状激发剂不应结块，细度应满足过 80 μm 筛且筛余不大于 20%。

5.4 水

煤基固废地聚物根据用途其用水水质按 JGJ 63-2006 中表 3.1.1 的相关规定。

5.5 掺合料

硅灰按 GB/T 27690-2011 中表 1 的相关技术要求，生石灰粉按 JC/T 480 中一等品或优等品钙质生石灰粉的技术指标。

5.6 外加剂

外加剂不应应对煤基固废地聚物产生有害影响，减水剂等外加剂的质量要求按 GB 8076 的相关规定。

6 配合比

6.1 煤基固废地聚物配合比的一般规定

煤基固废地聚物的配合比应按下列步骤顺序进行计算：

- a) 确定煤基固废料的组成及用量；
- b) 计算水的用量；
- c) 计算硅酸钠（钾）的用量；
- d) 计算氢氧化钠（钾）的用量；
- e) 计算外加剂的用量。

6.2 煤基固废料的组成及用量

煤基固废料组成及用量的确定应符合以下规定

- a) 煤基固废料可单独使用煤矸石粉、粉煤灰中的一种；
- b) 煤基固废料由煤矸石粉、粉煤灰共同组成时，其中煤矸石粉、粉煤灰的质量比宜控制在 (1-5) : (1-7)。

6.3 用水量

煤基固废地聚物中，水与煤基固废料的质量比宜控制在 (0.25-0.55) : 1。

6.4 硅酸钠（钾）的用量

硅酸钠（钾）用量的确定应符合以下规定：

- a) 对于煤矸石基地聚物，硅酸钠（钾）与煤矸石的质量比宜控制在 (0.09-0.15) : 1；
- b) 对于粉煤灰基地聚物，硅酸钠（钾）与粉煤灰的质量比宜控制在 (0.05-0.10) : 1；
- c) 对于多源煤基固废地聚物，硅酸钠（钾）与煤基固废料的质量比宜控制在 (0.06-0.12) : 1。

6.5 激发剂的模数

激发剂模数的确定应符合以下规定：

- a) 对于煤矸石基地聚物，水玻璃类碱性激发剂的模数宜控制在 1.3 ± 0.2 ；
- b) 对于粉煤灰基地聚物，水玻璃类碱性激发剂的模数宜控制在 1.4 ± 0.2 ；
- c) 对于多源煤基固废地聚物，水玻璃类激发剂的模数可根据原材料具体的化学成分适当取值，宜控制在 1.0-2.0。

6.6 氢氧化钠（钾）的用量

碱激发剂由氢氧化钠（钾）和硅酸钠（钾）配制得到。按6.4和6.5的相关规定，以氢氧化钠为例，其用量可根据式（1）计算：

$$m_{(NaOH)} = 2 \cdot Ar_{(NaOH)} \cdot \frac{x-c}{c} \cdot \frac{m_{(Na_2O \cdot xSiO_2)}}{Ar_{(Na_2O \cdot xSiO_2)}} \dots \dots \dots (1)$$

式中： $m_{(NaOH)}$ —氢氧化钠的用量，单位（g）；

$Ar_{(NaOH)}$ —氢氧化钠的相对分子质量；

c —激发剂的模数；

x —硅酸钠的模数；

$m_{(Na_2O \cdot xSiO_2)}$ —硅酸钠的质量，单位（g）；

$Ar_{(Na_2O \cdot xSiO_2)}$ —硅酸钠的相对分子质量。

6.7 外加剂的用量

加入减水剂时，减水剂可选用聚羧酸减水剂或萘系减水剂，减水剂与煤基固废料的质量比宜控制在（0.007-0.01）:1。

7 制备

7.1 煤基固废地聚物制备的一般规定

- 煤基固废地聚物可在施工现场直接制备；也可在预制厂预先配制除水和液态外加剂外的煤基固废地聚物预拌混合料，使用时，运输至施工现场加水和液态外加剂拌合制备；煤基固废地聚物制备的技术路线及相关示例参见附录A；
- 煤基固废地聚物在制备时应采用强制式搅拌机，强制式搅拌机按GB/T 9142要求；宜采用振动搅拌等其他可使物料分散更均匀、搅拌效果更好的搅拌设备。

7.2 煤基固废地聚物现场制备及要求

7.2.1 配合比

煤基固废地聚物的现场配合比设计应符合第6章的相关规定，加入其他掺合料时，其他掺合料掺量不宜超过煤基固废料质量的20%。

7.2.2 搅拌

- 现场进行混合搅拌操作时，宜采取先均匀混合除水及液态外加剂之外的原材料，再加入水和液态外加剂并进行搅拌；也可先配置好液态激发剂，再将固体原材料与液态激发剂和液态外加剂混合搅拌；预先配制的液体激发剂不宜直接在低于-10℃的施工环境下使用；
- 冬季施工或施工温度低于-10℃时进行搅拌操作，宜使用不高于60℃的热水提高拌合物温度，搅拌要求按GB 50164的相关规定进行。

7.2.3 养护

- 浇筑后宜进行及时保湿养护。养护用水按JGJ 63的规定；
- 自然养护时，浇筑完毕的地聚物宜保持不少于7d保温保湿养护，自然养护温度、湿度及措施要求按照GB 50164中的相关规定执行；
- 蒸汽养护时，蒸汽养护的养护制度宜为静停2h，升温3h，恒温4h，恒温温度75℃±3℃，降温2h。蒸汽养护后，还需进行适当的自然养护。蒸汽养护的升温速度、降温速度、撤除养护措施的要求按照GB 50164中的相关规定执行。

7.3 预拌混合料制品地聚物制备及要求

7.3.1 制备

- 预拌混合料的配合比设计应符合第6章的相关规定；加入其他掺合料时，其他掺合料掺量不宜超过煤基固废料质量的20%；

- b) 预拌混合料中碱含量按氧化钠质量分数的计算值表示，用户要求提供低碱预拌混合料时，混合料中的碱含量应不大于 0.60%。

7.3.2 使用

- a) 使用时，将预制混合料与水及其它液态外加剂均匀混合，制备地聚物净浆；
 b) 预拌混合料制品地聚物不宜与其他类型的胶凝材料混合使用；
 c) 采用预拌混合料制品地聚物作为胶凝材料，不宜在现场再参加其他细磨矿物掺合料；
 d) 采用预拌混合料制品地聚物作为胶凝材料，施工后宜保持 7 d 以上的湿气养护。

7.4 煤基固废地聚物的制备设施技术要求

7.4.1 用于碱激发剂的配制及贮存相关设施要求

- a) 用于碱激发剂的配制、投加以及输送装置应采用防腐材料；
 b) 碱激发剂原料的贮存设施应专门建设，不应与煤基固废、水等其它地聚物原材料混合贮存；
 c) 用于配制碱激发剂的工业硅酸钠（钾）和工业用氢氧化钠（钾），其贮存技术要求应分别符合 GB/T 209 和 GB/T 1919 的相关规定；
 d) 碱激发剂贮存设施的设计、安全防护等按 GB 18265 中危险化学品产库安全技术基本要求的相关规定；
 e) 多余、失效的碱激发剂以及碱激发剂的泄露液、清洗液、浸出液不应随意倾倒或排放，应专门建设相应的固体或液体废物贮存设施，贮存设施的污染防治按 GB 18597 中的相关要求。危险废物贮存区的安全设施按 GB 18265 中的相关要求。

7.4.2 用于煤基固废料的贮存相关设施要求

- a) 煤基固废料贮存场设施的选择按 GB 18599 中 I 类场的相关技术要求；
 b) 煤基固废料的污染性监测设施要求按 GB 18599 中的相关规定执行。

8 污染物控制

8.1 煤基固废地聚物产品环境安全性控制

煤基固废地聚物产品环境安全性应满足：

- a) 煤基固废地聚物产品中可浸出重金属含量的测定方法按照 GB/T 30810 进行，污染物的检测及浸出浓度值的要求应达到 GB/T 14848 中地下水使用功能对应标准值；
 b) 煤基固废地聚物产品在制备、贮存、使用过程中大气污染物排放和无组织排放限值以及周边环境质量监控按 GB 4915 执行。

8.2 废水及其他污染物排放控制

废水及其他污染物排放应满足表1要求：

表 1 废水及其他污染物排放控制要求

控制项目	要求
废水	煤基固废地聚物及其原材料的运输、贮存、预处理、制备及设施清洗产生的废水应在收集后采用密闭运输送到城市污水处理厂处理、排入城市排水管道进入城市污水处理厂处理或自行处理等方式处理。废水排放应满足GB 8978中的水污染物排放标准要求。
污泥	煤基固废地聚物在运输、清洗等过程中产生的废水处理污泥应作为危险废物进行管理和处置。污泥处置应根据污泥性质按照GB 50684中的规定执行。
废气	煤基固废地聚物的原材料在贮存、制备等设施中产生的废气应经过处理低于GB 14554规定的值排放。

9 技术要求

9.1 新拌煤基固废地聚物

9.1.1 凝结时间

新拌煤基固废地聚物的初凝时间不宜小于45 min。

9.1.2 氯离子含量

新拌煤基固废地聚物中氯离子含量应不大于0.15%。

9.1.3 安定性

按GB 175中的煮沸法测试合格。

9.2 硬化煤基固废地聚物

9.2.1 地聚物强度

强度等级依据立方体抗压强度标准值大小划分为32.5、42.5、52.5、62.5四个等级，按照GB 175的相关规定，煤基固废地聚物的各龄期强度见表2。

表2 地聚物强度数值

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
32.5	≥15.0	≥32.5	≥3.5	≥5.5
42.5	≥22.0	≥42.5	≥4.0	≥6.5
52.5	≥27.0	≥52.5	≥5.0	≥7.0
62.5	≥32.0	≥62.5	≥5.5	≥8.0

9.2.2 耐化学腐蚀性

按GB/T 29423规定的方法进行测定。其中，用于酸性侵蚀环境时，应进行耐酸腐蚀性能试验，耐酸腐蚀系数应不小于0.80。用于碱性侵蚀环境时，应进行耐碱腐蚀性能试验，耐碱腐蚀系数应不小于0.80。用于硫酸盐等盐类侵蚀环境时，应进行耐盐腐蚀性能试验，耐盐腐蚀系数应不小于0.75。

9.2.3 抗氯离子渗透性

煤基固废地聚物28 d相对氯离子扩散系数不大于 $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

9.2.4 抗碳化性

按GB 50164-2011表3.3.4中的规定进行抗碳化性能等级划分。

10 试验方法

10.1 凝结时间

按GB/T 1346的方法，测定标准稠度用水量时煤基固废地聚物净浆的凝结时间。

10.2 氯离子含量

氯离子含量测定按GB/T 50476的附录D要求的方法进行。

10.3 安定性

按GB/T 1346的方法进行。

10.4 强度

按GB/T 17671规定的方法进行测定。

10.5 耐化学腐蚀性

耐化学腐蚀性能试验按GB/T 29423中附录A-附录C的方法进行。

10.6 抗氯离子渗透性

按JC/T 1086规定的方法进行。

10.7 抗碳化性

按GB/T 50082规定的方法进行测定。

11 检验规则

11.1 编号与取样

煤基固废地聚物预拌混合料采用袋装包装，出厂前按同强度等级编号和取样。每一组编号为一取样单位。出厂编号按年生产能力 10×10^4 t及以上，不超过400 t为一组编号； 10×10^4 t以下，不超过200 t为一组编号。取样方法按GB/T 12573，宜连续取，或从20个以上不同部位取等量样品，总量应不少于25 kg。

11.2 出厂检验

出厂检验项目按9.1.1、9.1.2、9.1.3和9.2.1中规定。

11.3 型式检验

型式检验按第9章。有下列情况之一者，应进行型式检验：

- a) 正常生产时，每半年检验一次；
- b) 原料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 产品长期停产后，恢复生产时；
- d) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时；
- e) 其他需进行型式检验要求时。

11.4 进场复验

产品进场时应进行抽样复验，复验项目包括煤基固废地聚物材料性能和净含量。煤基固废地聚物材料性能项目按9.1.1、9.1.2、9.1.3和9.2.1中规定。

产品进场时应查验和收存型式检验报告、使用说明书、出厂检验报告（或产品合格证）等质量证明文件。

11.5 判定规则

11.5.1 出厂检验按9.1.1、9.1.2、9.1.3和9.2.1要求的为合格品，其中任何一项不符合要求的为不合格品。

11.5.2 型式检验按第9章要求的为合格品，其中任何一项不符合要求的为不合格品。

11.5.3 进场复验时，煤基固废地聚物材料包装净含量检验按GB 50448的规定执行，符合要求的为合格品；煤基固废地聚物材料性能符合9.1.1、9.1.2、9.1.3和9.2.1要求的为合格品。其中任何一项不符合要求的为不合格品。复验合格后方可用于施工。

11.6 检验报告

煤基固废地聚物预拌混合料检验报告应包括出厂检验项目、煤基固废混合料、掺合料、外加剂、激发剂的品种和掺量以及其他技术要求。生产者应自煤基固废地聚物发出之日起7 d内寄发除地聚物28 d强度外的检验结果，并在32 d内补报28 d强度的检验结果。

12 包装、标志、运输与贮存

12.1 包装

除水和液态外加剂外的煤基固废地聚物预拌混合料采用袋装包装,袋装预拌混合料每袋净含量为50 kg,且应不少于标识质量的99%;随机抽取20袋总质量(含包装袋)应不少于1000 kg。煤基固废地聚物预拌混合料的包装袋按GB/T 9774的相关规定。使用液态激发剂时宜采用清洁的铁桶、塑料桶或槽车密封包装。

12.2 标志

煤基固废地聚物预拌混合料的包装袋上应清楚标明:本文件编号、煤基固废地聚物的品种、强度等级、生产者名称、生产许可证标志及编号、出厂编号、包装日期、净含量。

12.3 运输与贮存

12.3.1 袋装煤基固废地聚物预拌混合料在运输与贮存时不应受潮和混入杂物,不同品种和强度等级的袋装煤基固废地聚物预拌混合料在贮运中应避免混杂。液态激发剂运输与贮存的密封方法按GB/T 4209的相关规定。

12.3.2 新拌煤基固废地聚物应缩短运输与贮存的时间,运输与贮存过程中,宜采取覆盖等适宜的方法,避免脱水、雨淋及冰冻。

附录 A
(资料性)
煤基固废地聚物制备的技术路线

A.1 煤基固废地聚物制备的技术路线

煤基固废地聚物制备应按第7章进行，配合比及原材料用量的确定应按第6章进行，煤基固废地聚物制备的技术路线如图A.1所示：

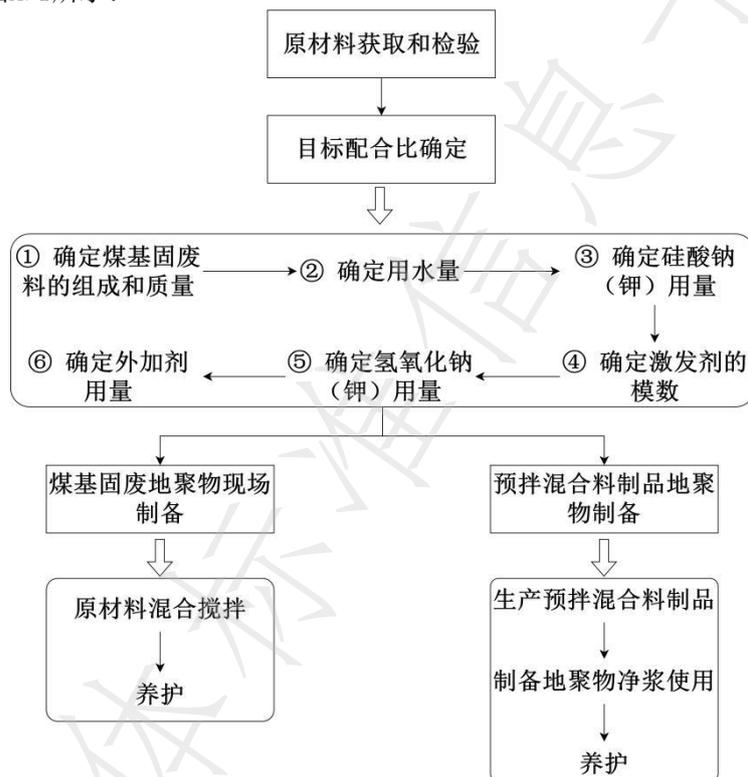


图 A.1 煤基固废地聚物制备的技术路线

A.2 一种煤基固废地聚物现场制备的案例

本条提供了使用煤基固废现场制备地聚物的操作案例，一种煤基固废地聚物现场制备应按下列步骤依次进行：

- a) 选择符合第5章规定的原材料。煤基固废料的组成及用量按6.2的规定执行。案例使用粉煤灰和煤矸石粉的混合料作为煤基固废料，粉煤灰和煤矸石的质量比控制为3:2。混合的煤基固废料质量按1000 kg，粉煤灰和煤矸石的质量分别为600 kg、400 kg；
- b) 用水量按6.3的规定执行。案例控制水与煤基固废料的质量比为0.5:1，用水量为500 kg；
- c) 硅酸钠（钾）用量按6.4的规定执行。案例选用模数为2的硅酸钠和氢氧化钠配置为水玻璃类激发剂，控制硅酸钠与煤基固废料的质量比为0.1:1，硅酸钠用量为100 kg；
- d) 激发剂模数按6.5的规定执行。案例控制水玻璃类激发剂模数为1.3；
- e) 氢氧化钠用量按6.6的规定执行。计算得到案例中氢氧化钠用量为23.67 kg；
- f) 外加剂按6.7的规定执行。案例选用萘系减水剂作为外加剂，控制减水剂与煤基固废料的质量比为0.008:1，外加剂用量为8 kg；
- g) 现场制备按7.1、7.2、7.4的规定执行。案例采用先配置由硅酸钠、氢氧化钠和水组成的液态激发剂，再将粉煤灰、煤矸石粉和外加剂倒入强制式搅拌机中进行混合搅拌，最后向搅拌机中倒入配置好的液态激发剂混合搅拌均匀。材料浇筑后进行为期7 d的自然养护。

A.3 一种预拌混合料制品地聚物制备的案例

本条提供了使用煤基固废制备预拌混合料制品地聚物的操作案例，一种预拌混合料制品地聚物制备应按下列步骤依次进行：

- a) 选择符合第 5 章规定的原材料。煤基固废料的组成及用量按 6.2 的规定执行。案例使用粉煤灰作为煤基固废料，煤基固废料质量按 1000 kg；
- b) 用水量按 6.3 的规定执行。案例控制水与煤基固废料的质量比为 0.4:1，用水量为 400 kg；
- c) 硅酸钠（钾）用量按 6.4 的规定执行。案例选用模数为 2 的硅酸钠和氢氧化钠配置为水玻璃类激发剂，控制硅酸钠与煤基固废料的质量比为 0.08:1，硅酸钠用量为 80 kg；
- d) 激发剂模数按 6.5 的规定执行。案例控制水玻璃类激发剂模数为 1.5；
- e) 氢氧化钠用量按 6.6 的规定执行。计算得到案例中氢氧化钠用量为 11.72 kg；
- f) 外加剂按 6.7 的规定执行。案例选用萘系减水剂作为外加剂，控制减水剂与煤基固废料的质量比为 0.007:1，外加剂用量为 7 kg；
- g) 预拌混合料制品地聚物制备按 7.1、7.3、7.4 的规定执行。案例采用在预制厂预先配制包含煤基固废料、硅酸钠、氢氧化钠在内的煤基固废地聚物预拌混合料，使用时，将预拌混合料运输至施工现场加水 and 外加剂拌合制备地聚物净浆。施工后保持 14 d 的湿气养护。

参 考 文 献

- [1] 卢海峰, 李中洋, 张凯. 改性粉煤灰材料固沙特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3374-3384.
- [2] 卢海峰, 易金龙, 贺栋, 徐剑波, 孔晓璇, 张凯. 底泥地质聚合物注浆材料制备试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2567-2578.
- [3] 顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2022, 51(1): 1.
- [4] 杨达, 卢明阳, 宋迪, 等. 地质聚合物水泥的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(Z1): 644-649.
- [5] 林升鉴, 饶峰, 郑艳金, 等. 磷尾矿, 磷石膏和黄磷渣的地质聚合反应资源化利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(4): 150-156.
- [6] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3010-3015.
- [7] 许凌云, 张祖华, 史才军, 刘钰中, 杜运兴, 刘翼玮, 邓毓琳. 地质聚合物混凝土力学性能和结构性能的研究进展[J]. 材料导报, 2022(07): 1-29.
- [8] 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(z2): 218-223.
- [9] 宋维龙, 朱志铎, 浦少云, 等. 碱激发二元/三元复合工业废渣胶凝材料的力学性能与微观机制[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22070-22077.
- [10] 万小梅, 张宇, 赵铁军, 等. 碱激发矿渣混凝土的力学性能[J]. 材料导报, 2018, 32(12): 2091-2095.
- [11] 王宇轩, 周国安, 陈佩圆, 等. 激发剂组成对碱激发-矿渣水泥砂浆变形及力学性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(8): 1-4.
- [12] 孙建伟. 碱激发钢渣胶凝材料与混凝土的性能[D]. 中国矿业大学(北京), 2019.
- [13] 吴旻, 谢胜华, 葛根旺. 碱激发钢渣矿渣复合基层材料的强度特性及微观机制[J]. 硅酸盐通报, 2021.
- [14] 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.
- [15] 郑文忠, 邹梦娜, 王英. 碱激发胶凝材料研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 40(1): 28-39.
- [16] 孔德玉, 张俊芝, 倪彤元, 等. 碱激发胶凝材料及混凝土研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2009(1): 151-159.
- [17] 刘鑫, 田轶轩, 黄金凤, 等. 用于地聚合物的粉煤灰活性评价研究[J]. 材料导报, 2022, 36(2): 21010007-7.
- [18] Li Zongyang, Lu Haifeng, Zhang Kai, et al. Mechanism of developing early strength of Portland cement-desert sand system under radiation in desert conditions[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03693.
- [19] Yu Hongdan, Zhang Kai, Lu Haifeng, et al. Experimental study on the use of compound alkaline materials to solidify lake sediments[J]. PCI Journal, 2023, 68(5).
- [20] Zhang, Kai, Xu Hang, Kong Xiaoxuan, et al. Study on the influence mechanism of micro-mechanical properties of heterogeneous geopolymer gel[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107164.
- [21] Zhang, Kai, Lu Haifeng, Li Zhongyang. Effect of precursor element composition on compressive strength of alkali-activated dredged sediment[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024: e03404.
- [22] Zhang, Kai, Lu Haifeng, Yi Jinlong, et al. Preparations of Lake Sediment Geopolymers Using the Alkaline Activation and Their Mechanical Properties[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2023, 51(5): 3451-3463.
- [23] Farooq F, Jin X, Javed M F, et al. Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124762.

- [24] Imbabi M S, Carrigan C, McKenna S. Trends and developments in green cement and concrete technology[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2012, 1(2): 194–216.
- [25] Alhawat M, Ashour A, Yildirim G, et al. Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104104.
- [26] Duxson P, Mallicoat S W, Lukey G C, et al. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, 292(1): 8–20.
- [27] Almutairi A L, Tayeh B A, Adesina A, et al. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00733.
- [28] Amran Y H M, Alyousef R, Alabduljabbar H, et al. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119679.
- [29] Cong P, Cheng Y. Advances in geopolymer materials: A comprehensive review[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, 8(3): 283–314.
- [30] Wang Y, Chen B, Jiang Z, Huang J. Study on the mechanical properties, microstructure and hydration mechanism of phosphogypsum-based geopolymer cement with added micron-sized silica particles[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108483.
- [31] Manzoor T, Bhat J A, Shah A H. Performance of geopolymer concrete at elevated temperature—A critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 420: 135578.
- [32] Giannopoulou I, Robert P M, Petrou M F, Nicolaides D. Mechanical behavior of construction and demolition waste-based alkali activated materials exposed to fire conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 415: 134994.
- [33] Xiong G, Guo X, Zhang H. Preparation of epoxy resin-geopolymer (ERG) for repairing and the microstructures of the new-to-old interface[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 259: 110731.
- [34] Shi X, Xu H, Zhang N, Jiang P, Zhou A, Zhao Y, Ge P. Study on semi-dynamic leaching and microstructure characteristics of MSWI fly ash solidified sediment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119405.
- [35] De Weerd K, Bernard E, Kunther W, Pedersen M T, Lothenbach B. Phase changes in cementitious materials exposed to saline solutions[J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 165: 107071.
- [36] Huang T, Song D, Fang Q, Yang C, Wu D, Li S, Luo Y, Hu Z. Synthesis of nonthermal plasma-irradiated polyvalent manganese (hydro) oxide functionalized nanosilica for intensifying geopolymerized solidification/stabilization of thallium-contaminated soil and mechanism exploration[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143751.
- [37] Zhang Q, Cao X, Sun S, Yang W, Fang L, Ma R, Lin C, Li H. Lead zinc slag-based geopolymer: Demonstration of heavy metal solidification mechanism from the new perspectives of electronegativity and ion potential[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 293: 118509.