ICS XXXXXX
CCS X XXX

# 团　　体　　标　　准

T/CIECCPA XXX—20XX

# 多源固废矿化固碳及采空区充填技术规范

Technical specification for $CO_2$ mineralization and goaf backfilling using multi-source solid wastes

（征求意见稿）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会　发布

# 目　次

前　言 ..... IV
1 范围 ..... 1
2 规范性引用文件 ..... 1
3 术语和定义 ..... 2
4　总体要求 ..... 3
4.1　基本原则 ..... 3
4.2　适用性论证 ..... 3
4.3　固废属性 ..... 3
4.4　功能冲突控制 ..... 3
4.5　系统边界 ..... 3
4.6　设计指标 ..... 4
5　材料分类与原材料要求 ..... 4
5.1　材料分类 ..... 4
5.2　通用要求 ..... 4
5.3　骨料 ..... 4
5.4　胶凝材料 ..... 5
5.5　矿化材料 ..... 5
5.6　二氧化碳气源 ..... 5
5.7　水和外加剂 ..... 5
6　配合比设计 ..... 5
6.1　设计原则 ..... 5
6.2　初始配比 ..... 5
6.3　用水量 ..... 6
6.4　试配程序 ..... 6
6.6　性能要求 ..... 6
7　性能试验方法 ..... 7
7.1　取样与样品制备 ..... 7
7.2　原材料 ..... 7
7.3　新拌浆体 ..... 8
7.4　矿化性能 ..... 8
7.5　充填体性能 ..... 8

7.6 环境性能 9
8 充填体制备工艺 9
8.1 原料预处理 9
8.2 混合制浆 9
8.3 矿化固碳 9
9 设备与自动控制 10
9.1 一般要求 10
9.2 储运与预处理设备 10
9.3 制浆与矿化设备 10
9.4 二氧化碳供给与尾气系统 10
9.5 泵送与管路 10
9.6 自动控制与数据 10
10 工程设计与充填施工 11
10.1 工程调查与设计 11
10.2 充填体制备站 11
10.3 输送管路 11
10.4 采空区充填 11
10.5 挡墙与隔离设施 11
10.6 启动、停机与异常处置 11
11 质量控制与验收 12
11.1 检验分类 12
11.2 过程质量控制 12
11.3 结果判定 12
11.4 系统性能验收 12
11.5 充填工程验收 12
12 监测与固碳量核算 12
12.1 过程监测 12
12.2 充填体与地压监测 12
12.3 地下水监测 13
12.4 核算边界与原则 13
12.5 核算质量控制 13
13 安全、环境保护与应急 13
13.1 一般要求 13
13.2 二氧化碳安全 13

13.3 电石渣与碱性物料 13
13.4 设备、管路与井下作业 14
13.5 污染控制 14
13.6 应急 14
附录 A（规范性） 配合比设计与矿化兼容性试验 15
A.1 设计输入 15
A.2 基础配合比 15
A.3 二氧化碳剂量和反应时间 15
A.4 兼容性判定 15
A.5 扩大试验 15
附录 B（规范性） 可泵时间与料浆稳定性试验 16
B.1 原理 16
B.2 试验条件 16
B.3 试验步骤 16
B.4 报告 16
附录 C（规范性） 矿化固碳量核算 17
C.1 理论矿化固碳量 17
C.3 矿化转化率 17
C.4 项目净固碳量 17

# 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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院山西煤炭化学研究所、山东黄金矿业科技有限公司充填工程实验室分公司、陕西天地地质有限责任公司、河北省矾山磷矿有限公司。

本文件主要起草人：李磊、杨晓阳、寇云鹏、李广波、高翔、张思达、吴伟光、马晓博 李文华、杨纪光、高博、吕书平。

本文件为首次发布。

# 多源固废矿化固碳及采空区充填技术规范

## 1 范围

本文件规定了多源固废矿化固碳及采空区充填的总体要求、材料分类与原材料要求、配合比设计、性能试验方法、充填体制备工艺、设备与自动控制、工程设计与充填施工、质量控制与验收、监测与固碳量核算以及安全、环境保护和应急要求。

本文件适用于以煤矸石、粉煤灰、煤气化渣、电石渣、脱硫石膏等一种或多种固体废物为胶凝充填材料或矿化材料，经配伍调制成浆和二氧化碳矿化后，采用泵送或自流方式实施煤矿采空区充填的设计、建设、运行和验收。其他工业固体废物经性能分析、环境安全评价和配合比验证后可参照使用。

## 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/T 176　水泥化学分析方法

GB 749 水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法

GB 8978 污水综合排放标准

GB 12348　工业企业厂界环境噪声排放标准

GB 12697　大气污染物综合排放标准

GB 16297　大气污染物综合排放标准

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 5085.3　危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别

GBZ 2.1　工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素

GB/T 749　水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法

GB/T 1345　水泥细度检验方法 筛析法

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 2419　水泥胶砂流动度测定方法

GB 6566 建筑材料放射性核素限量

GB/T 8074　水泥比表面积测定方法 勃氏法

GB/T 9966.3　天然石材试验方法 第 3 部分：吸水率、体积密度、真密度、真气孔率试验

GB/T 14684　建设用砂

GB/T 17671　水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）

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 32150　工业企业温室气体排放核算和报告通则

GB/T 39338　综合机械化固体充填采煤技术要求

GB/T 50080　普通混凝土拌合物性能试验方法标准

GB/T 50081　混凝土物理力学性能试验方法标准

GB/T 50082　普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

HJ 557　固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法

JC/T 603　水泥胶砂干缩试验方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

**多源固废　multi-source solid waste**

来源、物理形态或化学组成不同，并在同一矿化充填体系中承担一种或多种功能的两种及以上工业固体废物，包括但不限于粉煤灰、煤矸石、电石渣、脱硫石膏、气化渣等。

3.2

**骨料　aggregate**

在矿化充填材料中主要形成颗粒骨架、降低收缩并提供体积稳定性的粒状材料。本文件中煤矸石通常作为主要骨料。

3.3

**胶凝材料　cementitious material**

在水、激发剂或 $CO_2$ 矿化共同作用下能够发生水化、火山灰反应、地质聚合或其他胶结反应，使充填体获得强度和整体性的粉体材料。

3.4

**矿化材料　mineralization material**

含有可与 $CO_2$ 反应的活性钙、镁等碱性组分，并以形成稳定碳酸盐固定 $CO_2$ 为主要的材料。

3.5

**有效可矿化钙、镁　mineralized calcium and magnesium**

在规定矿化工艺窗口内能够与 $CO_2$ 反应并转化为稳定碳酸盐的钙、镁组分，不包括原料中原有碳酸盐所含的钙、镁以及经验证在该工艺条件下不参与反应钙、镁。

3.6

**矿化充填料浆　mineralized backfill slurry**

经多源固废共同制浆和 $CO_2$ 矿化形成的，且满足输送、充填、固碳和硬化性能要求的液-固混合料浆。

3.7

**充填体　filler material**

将矿化充填料浆输送到采空区、空洞或待充填空间后，经堆积、沉降、凝结硬化或压实形成的具有一定整体性、强度和稳定性的实体结构。

3.8

**理论矿化固碳量　theoretical mineral carbon sequestration capacity**

按各材料有效可矿化 CaO、MgO 当量及其化学计量关系计算的最大可固定 $CO_2$ 质量。

3.9

**实际矿化固碳量　actual mineral carbon sequestration capacity**

扣除各原材料中原有无机碳后，在矿化过程中新增并以稳定碳酸盐形式固定的 $CO_2$ 质量。

3.10

**矿化转化率　mineralization conversion**

实际矿化固碳量与理论矿化固碳量的比例。

3.11

**净固碳量　net mineral carbon sequestration capacity**

规定核算边界内，实际矿化固碳量扣除能源消耗、材料运输及充填施工等过程温室气体排放后的 $CO_2$ 当量。

3.12

**质量浓度 mass concentration**

料浆中全部干固体质量与料浆总质量的百分比。原材料带入水、工艺水和液体外加剂中的水均不计入固体质量。

3.13

**可泵时间 pumpable time**

从矿化充填料浆制备完成起至其流动性、流变参数、离析状态和输送压力仍能满足设计泵送要求的持续时间。

3.14

**泌水率 bleeding rate**

矿化充填料浆中析出水量与总含水量的比值

## 4 总体要求

### 4.1 基本原则

4.1.1 应遵循固废减量化、资源化、环境风险可控和工程安全优先的原则，建立从原料来源、功能分类、配料、矿化、输送、充填到监测验收的全过程质量控制体系。

4.1.2 应按“骨料-胶凝材料-矿化材料”进行分类。材料名称不得替代功能判定；同一种材料具有多种功能时，应明确主功能、辅助功能和计量归属。

4.1.3 矿化程度应服从充填工程性能要求。不得以提高二氧化碳通入量代替实际固碳效果评价，也不得因过度碳化导致胶凝活性、可泵性或强度不符合要求。

4.1.4 原材料、配合比、$CO_2$ 气源或主要工艺参数发生实质变化时，应重新开展配合比和矿化适应性验证。

### 4.2 适用性论证

工程应用前应完成原材料特性调查、采空区工程地质与水文地质调查、试验室配合比试验、矿化兼容性试验、流变与环管试验、充填体强度与环境安全评价。

### 4.3 固废属性

各类固废应来源明确、批次可追溯，并具有固体废物属性、主要生产工艺和可能污染物信息。经 GB 5085.3 等规定鉴别为危险废物的，不应直接用于本文件规定的矿化充填。不得通过稀释或与其他材料混合的方式规避危险特性鉴别和环境控制要求。

### 4.4 功能冲突控制

电石渣等高碱富钙矿化材料可提供矿化活性和碱激发作用；粉煤灰、气化细渣等胶凝材料可贡献部分矿化能力。配合比设计应同时评价其矿化反应和胶凝反应。矿化后 28 d 强度保持率不应低于 90%，否则应降低二氧化碳剂量、缩短矿化时间、调整加料顺序或补充胶凝组分。

### 4.5 系统边界

矿化充填系统宜包括原料储运与预处理、计量配料、材料制备、矿化尾气处理或循环、料浆调节、泵送输送、采空区充填、在线监测和数据管理等单元。

### 4.6 设计指标

工程设计应明确固废利用率、材料配比、设计充填能力、料浆质量浓度、可泵时间、泌水率、各龄期强度、矿化转化率、环境控制指标、设计充填率以及设备可靠性指标。

## 5 材料分类与原材料要求

### 5.1 材料分类

表 1　典型材料分类

| 功能类别 | 典型材料 | 主要作用 |
|---|---|---|
| 骨料 | 煤矸石；经验证的气化粗渣等 | 形成颗粒骨架、控制收缩和沉降、提供规模消纳量 |
| 胶凝材料 | 粉煤灰、气化细渣、矿渣粉、脱硫石膏、少量水泥及激发剂等 | 水化、火山灰反应或聚合固结，提供早期与长期强度 |
| 矿化材料 | 电石渣、富钙粉煤灰、富钙/镁气化渣、钢渣等 | 提供有效可矿化钙、镁并形成稳定碳酸盐 |

### 5.2 通用要求

a）　原材料应按干基计量。湿排物料应测定含水率并进行实时或逐批修正；含水率显著波动时应设置在线水分监测或增加检测频次。

b）　原材料中不得混入木材、塑料、金属、油污、生活垃圾和影响设备、矿化反应或充填体性能的杂物。

c）　应测定主要化学组成、矿物组成、含水率、烧失量或残余碳、粒径分布、密度、原有无机碳、有效可矿化钙镁及特征污染物。检测项目可根据材料功能和来源风险调整，但不得遗漏影响安全、固碳量和地下水环境的项目。

d）　各材料应分仓、分区储存并设置清晰标识。电石渣及其他高活性矿化材料应密闭或覆盖储存，避免吸潮、扬尘和非受控预碳化。

### 5.3 骨料

#### 5.3.1 煤矸石骨料

a) 应经分选、破碎、筛分和均化处理，粒径应在 15~25 mm。

b) 含碳量大于 20%或存在明显自燃倾向时，应进行分选降碳；总硫含量大于 3%或黄铁矿富集时，应进行脱硫、稳定化或酸性产水风险论证。

c) 遇水易泥化、崩解或膨胀的煤矸石，应通过浸水稳定性和体积安定性试验确定允许掺量。存在持续膨胀、明显酸性产水或有害气体释放风险的，不应使用。

d) 煤矸石的残余碳、硫和天然放射性核素应根据来源特征进行控制；可能影响地下水的砷、铅、镉、铬、汞、氟化物和硫酸盐等应列为特征污染物。

#### 5.3.2 其他骨料

气化粗渣等其他固废作为骨料时，应满足 5.3.1 中与粒径、稳定性、残余碳和环境安全有关的要求，并通过泵送磨蚀、离析和强度试验确认。

### 5.4 胶凝材料

a) 用于胶凝材料的粉煤灰和气化细渣应粉体 45 μm 筛余宜不大于 30%；超过时应通过粉磨、分级或实际配合比性能验证。

b) 粉煤灰或气化细渣烧失量大于 12%时，宜进行分选除碳。高残碳材料直接使用时，应验证其对减水剂吸附、料浆需水量、气泡稳定性、矿化传质和强度的影响。

c) 脱硫石膏用于调凝或硫酸盐激发时，应控制游离水、可溶性盐、氯离子及酸性杂质；掺量应通过凝结时间、膨胀和长期稳定性试验确定。

d) 胶凝材料可由固废粉体、少量水泥、矿物掺合料和激发剂复合组成。

### 5.5 矿化材料

a) 矿化材料的有效可矿化 CaO 与 MgO 当量之和应不低于 50%（干基）。

b) 电石渣中游离 $CaC_2$应充分水解，不应检出持续乙炔释放。未经充分水解、陈化和稳定化处理的电石渣不应进入反应器和井下系统。

c) 应测定矿化材料原有无机碳含量程度。原有碳酸盐所含二氧化碳不应计入实际矿化固碳量；长期露天堆存导致活性显著降低时，应重新测定有效可矿化组分。

d) 含游离 CaO、MgO 或其他膨胀组分的矿化材料，应评价矿化前后体积安定性。不能通过矿化或养护消除膨胀风险的，不应使用。

e) 矿化材料的细度应满足气液固传质和料浆流变要求。比表面积提高导致需水量、黏度或急凝明显增加时，应通过分级、复配和外加剂调控。

### 5.6 二氧化碳气源

a) 二氧化碳气源应来源明确，可采用高纯 $CO_2$ 气体或工业排放含 $CO_2$ 烟气。采用工业烟气时，应根据杂质组成进行除尘、脱硫、脱硝、除湿或稳压处理。

b) $CO_2$ 组成要求：高纯 $CO_2$ 体积分数宜不低于 99%；工业烟气 $CO_2$ 体积分数宜不低于 15%。

c) $CO_2$ 压力：宜控制在常压～2.0 MPa，流量波动宜控制在设定值的±5%以内

d) $CO_2$ 气源中 $SO_2$、NOx、水分、颗粒物及其他杂质不应对矿化反应、设备运行和产物性能产生不利影响。

### 5.7 水和外加剂

工艺用水不应含有影响矿化、胶凝、设备和地下水环境的有害物质。回用水、矿井水和洗管水再利用前，应检测 pH 值、悬浮物、氯离子、硫酸盐、总溶解性固体及特征污染物。减水剂、缓凝剂、分散剂、稳定剂和激发剂应通过相容性试验确定，液体外加剂所含水分应计入总用水量。

## 6 配合比设计

### 6.1 设计原则

a) 配合比应以采空区稳定、管输安全和环境风险控制为约束，以固废利用量和净固碳量优化为目标。

b) 应分别确定骨料、胶凝材料和矿化材料的干基质量，不得因材料兼具多种功能而重复计量。

c) 应设置未通入二氧化碳的参比组，用于评价矿化对流动性、凝结、可泵时间和强度的影响。

d) 配合比试验应覆盖原材料合理波动范围，不应仅以单一最佳批次数据作为工程设计依据。

### 6.2 初始配比

试配时，煤矸石骨料、胶凝材料和矿化材料占干固体的质量分数可分别从 45%～70%、20%～45%

和 5%～20%范围选取，但三类材料干基质量之和应为 100%。多源固废干基质量占干固体总质量不应低于 70%，外加剂不计入干固体总量。

### 6.3 用水量

总用水量应包括工艺水、湿固废带入水、回用水和液体外加剂带入水。应以设计质量浓度、坍落度、泌水率和泵送压力综合确定。

### 6.4 试配程序

配合比设计应按附录 A 进行，至少包括基础配合比筛选、矿化时间梯度、加料与通气顺序优化、可泵性试验、强度与耐久性试验、浸出试验及固碳量核算。

### 6.6 性能要求

#### 6.6.1 矿化充填料浆性能

##### 6.6.1.1 流动性能

坍落度宜为 180 mm～260 mm。

##### 6.6.1.2 凝结时间

初凝时间不宜少于 2 h，且应满足浆体制备、输送和充填施工要求；终凝时间不宜超过 24 h；

##### 6.6.1.3 质量浓度

新拌矿化浆体质量浓度宜为 65%～85%，实测值与设计值的偏差宜控制在±2%以内；

##### 6.6.1.4 密度

密度宜为 1.70 g/cm³～2.30 g/cm³；

##### 6.6.1.5 泌水率

泌水率≤5%。

#### 6.6.2 充填体性能

充填施工完成后，矿化充填料浆形成的充填体，其力学性能、物理性能、耐久性能和环保性能应满足工程设计及本文件的要求。

#### 6.6.3 力学性能

##### 6.6.3.1 抗压强度

充填体 7 d、28 d 和 56 d 单轴抗压强度应满足采空区稳定性及工程设计要求，其中 3 d 单轴抗压强度不应低于 1 MPa、7 d 单轴抗压强度不应低于 3.0 MPa、28 d 单轴抗压强度不应低于 5MPa。

##### 6.6.3.2 变形模量

充填体变形模量应根据采空区围岩性质、地压条件和充填体承载要求确定，宜控制在 0.2 GPa～5.0 GPa。

##### 6.6.3.3 压缩性能

充填体在设计荷载作用下不应发生明显压溃或失稳，轴向压缩率应≤10%。

#### 6.6.4 物理性能

##### 6.6.4.1 密度

充填体硬化后的干密度宜控制在 1.50 g/cm³～2.30 g/cm³。

##### 6.6.4.2 吸水率

充填体吸水率应≤不大于 15%。

#### 6.6.4.3 孔隙率

充填体总孔隙率应≤30%。

### 6.6.5 耐久性能

#### 6.6.5.1 耐水性

充填体经水中浸泡 28 d 后，不应出现明显开裂、剥落、粉化或软化，抗压强度保持率应≥80%。

#### 6.6.5.2 抗渗性

有防渗、隔水或地下水保护要求时，充填体渗透系数应≤$1.0\times10^{-7}$ cm/s。

#### 6.6.5.3 干湿循环性能

充填体经 10 次干湿循环后，不应出现明显开裂、剥落和粉化，质量损失率应不大于 5%，抗压强度保持率应≥80%。

#### 6.6.5.4 抗冻性

处于冻结或季节性冻融环境中的充填体，经 25 次冻融循环后，质量损失率应≤5%，抗压强度损失率应≤20%。

#### 6.6.5.5 耐化学腐蚀性

充填体经矿井水、硫酸盐或氯盐等实际腐蚀介质浸泡 28 d 后，不应出现明显开裂、剥落、粉化或软化，质量损失率应≤5%，抗压强度保持率应≥80%。

#### 6.6.5.6 长期稳定性

充填体在长期荷载、矿井水和地下环境作用下，不应发生明显强度衰减、过量变形或结构失稳。

### 6.6.6 环保性能

#### 6.6.6.1 放射性

内照射指数，外照射指数。

#### 6.6.6.2 重金属浸出毒性

充填体浸出液中重金属及其他有害元素浓度应符合 GB 5085.3 规定的浸出毒性鉴别标准值。

## 7 性能试验方法

### 7.1 取样与样品制备

固体原料应按同来源、同工艺和同一质量控制批取代表性样品，并按干基计算。料浆样品应在矿化完成后、进入输送管线前的均匀料流中采取。用于固碳量检测的样品应立即密封，避免继续吸收空气中二氧化碳或发生失水碳化。

### 7.2 原材料

#### 7.2.1 化学组成

煤矸石、粉煤灰及电石渣等原料主要化学组成按 GB/T 27974 或 GB/T 176 测定测定。

#### 7.2.2 细度

按 GB/T 1345 测定，比表面积按 GB/T 8074 测定。

#### 7.2.3 粒径与级配

参照 GB/T 14684 测定。

7.2.4 含水率

按相应固体废弃物原料检测标准执行，或采用烘干法测定。

7.2.5 矿物组成

宜采用 X 射线衍射法，定量时宜采用内标法或 Rietveld 全谱拟合。

7.2.6 烧失量、原有无机碳、有效可矿化 Ca/Mg 和电石渣产气安全性

按附录 C 和经验证的方法测定。

7.3 新拌浆体

a） 质量浓度按取样称量、（105±5）℃烘干至恒量计算，或采用经标定的在线密度-浓度关系测定；
b） 坍落度和密度按 GB/T 50080 中适用方法测定；
c） 流动度：按 GB/T 2419 执行；
d） 凝结时间：按 GB/T 1346 执行；
e） 密度：按 GB/T 50080 执行；
f） 泌水率以规定静置时间内析出水质量占料浆初始水质量的百分比表示，静置容器和测试时间应在配合比文件中固定；工程控制宜采用 2 h 泌水率；
g） 可泵时间按附录 B 测定，或采用经环管试验建立的流动度、屈服应力和泵压综合判据测定；
h） 料浆 pH 值应采用耐高碱、抗磨损电极测定。

7.4 矿化性能

理论矿化固碳量、实际矿化固碳量及矿化转化率按附录 C 计算。固相无机碳可采用燃烧-红外法、热重法或经标准样验证的化学分析法。

7.5 充填体性能 7.5.1 抗压强度

按 GB/T 17671 执行。

7.5.2 弹性模量

按 GB/T 50081 执行。

7.5.3 密度

按 GB/T 50081 或 GB/T 9966.3 执行。

7.5.4 吸水率

按 GB/T 50080 执行。

7.5.5 孔隙率

采用压汞法或其他适用方法执行。

7.5.6 抗冻性

按 GB/T 50082 执行。

7.5.7 抗渗性

按 GB/T 50082 执行。

7.5.8 干缩率

按 JC/T 603 执行。

7.5.9 耐化学腐蚀性

按 GB/T 749 执行。

7.6 环境性能 7.6.1 放射性

按 GB 6566 执行。

7.6.2 重金属浸出毒性

按 HJ 557 执行。

## 8 充填体制备工艺

### 8.1 原料预处理

8.1.1 煤矸石应进行分选、破碎、筛分和均化处理，去除木屑、金属、塑料及其他影响设备运行和充填体性能的杂物粒径应在 15~25 mm，含碳量较高的煤矸石宜进行分选除碳处理。

8.1.2 粉煤灰、气化渣或脱硫石膏等应进行干燥、筛分和均化处理，去除结块颗粒及其他杂质；受潮或含水率波动较大时，应进行干燥处理，并按干基质量进行配料计算；烧失量或未燃碳含量较高的粉煤灰宜进行分选除碳处理，以减少其对浆体流动性和矿化反应的影响。

8.1.3 湿排电石渣应进行脱水、干燥、破碎、筛分和均化处理。其含水率应保持稳定，并按干基质量进行配合比计算；电石渣中不应含有未完全水解的电石颗粒。存在残余 $CaC_2$或可能释放可燃气体组分时，应进行充分水解、陈化或稳定化处理后方可使用。电石渣应采取密闭或覆盖方式储存，防止扬尘、吸潮和长期暴露造成的预碳化。

8.1.4 不同含水状态、不同活性和不同来源的物料应分别储存。不得以仓内自然混合代替计量复配。

### 8.2 混合制浆

a） 骨料、胶凝材料、矿化材料和水应独立计量。固体物料动态计量允许偏差不宜大于±1.0%，水和液体外加剂不宜大于±0.5%，二氧化碳累计计量允许偏差不宜大于±2.0%。

b） 宜先加入 60%～80%的设计用水进行预湿分散，再加入骨料、胶凝材料及矿化材料共同搅拌，最后用剩余水和外加剂调整至设计质量浓度。

c） 制浆后不应有干粉团、骨料堆积或明显分层。进入矿化段前应检测质量浓度、密度和初始 pH 值。

### 8.3 矿化固碳

a） $CO_2$应采用微孔曝气、喷射混合、静态混合、文丘里吸气或其他能够均匀分散的方式通入，防止局部过度碳化和大气泡夹带。

b） 常规反应温度宜为 15 ℃～60 ℃，表压宜为 0 MPa～0.6 MPa，反应停留时间宜为 10 min～60 min。超出上述范围时，应进行压力设备、反应热、胶凝活性和泵送安全专项验证。

c） 矿化过程中应连续监测二氧化碳进出口浓度和流量、温度、压力、pH 值；间歇系统还应记录每批干料量和累计通气量。

d） 应通过搅拌、循环或连续剪切防止骨料沉降。矿化反应器的有效混合强度应通过均匀性试验确定，不宜简单以空载转速作为控制指标。

e） 矿化终点不应仅以固定反应时间判定。应采用累计 $CO_2$ 剂量、尾气 $CO_2$ 浓度变化和浆体 pH 值等指标作为判定依据。终点控制区间应在配合比试验中确定。

- 达到设计 $CO_2$ 剂量后，尾气 $CO_2$ 浓度快速上升且吸收速率持续低于设定值；
- 浆体 pH 值进入试配确定的终点范围并在规定时间内变化不大；
- 矿化转化率已达到设计值，且固碳量物料衡算闭合。

矿化反应结束后，应及时检测矿化充填料浆的流动性、凝结时间、质量浓度、密度和稳定性，其性能应符合 6.6 的规定。检测结果不符合要求时，应通过调整液固比、$CO_2$ 流量、矿化时间或搅拌速率等工艺参数进行优化。

## 9 设备与自动控制

### 9.1 一般要求

设备处理能力应与设计充填能力相匹配，连续系统的关键单元宜按设计最大小时能力的 1.10～1.20 倍配置。易发生堵塞、磨损、腐蚀或停机导致料浆固结的关键设备应设置备用、旁路或快速排空措施。

### 9.2 储运与预处理设备

a） 煤矸石料仓应设置防架桥、破拱和超粒径拦截装置；粉体仓应设置除尘、料位、破拱和防吸潮设施。

b） 电石渣仓或调浆槽应设置通风、气体检测、温度监测和防非受控碳化措施。

c） 破碎、筛分和输送设备应便于清除金属和异物；设备材质应满足磨蚀和碱腐蚀要求。

### 9.3 制浆与矿化设备

a） 制浆矿化设备应保证气液固均匀接触和骨料悬浮，不应存在明显死区、短流和积料。

b） 承压反应器、管道和附件的设计、制造、检验和使用应符合压力设备有关规定；安全阀、爆破片或泄压装置不得被浆体堵塞。

c） 反应器、缓冲槽和储浆槽应设清洗、排空、检修和取样设施。设备内壁及搅拌部件应耐磨、耐碱和耐碳酸盐结垢。

d） 矿化结束至进入输送管线的停留时间应小于配合比确定的允许停留时间；储浆槽应持续低速搅拌或循环。

### 9.4 二氧化碳供给与尾气系统

a） 供气系统应设置稳压、计量、止回、超压泄放和防料浆倒灌装置。

b） 尾气应有组织收集。宜设置除雾、气液分离和二氧化碳循环；尾气排放点不得位于人员作业区、井口进风侧或其他可能形成积聚的位置。

c） 供气管线和阀门应标识介质和流向；低温液态二氧化碳汽化系统应采取防冻伤、结冰堵塞和异常升压措施。

### 9.5 泵送与管路

泵型应根据质量浓度、塑性黏度、骨料最大粒径、输送距离和高差选择。管路设计压力不应低于系统最大可能压力的 1.25 倍；弯头、三通、变径和垂直管底部应加强耐磨。

### 9.6 自动控制与数据

a） 控制系统应实现原料断料、供水异常、搅拌停转、温压超限、二氧化碳泄漏、尾气异常、泵送超压和堵管等联锁。

b） 关键过程数据采集间隔不宜大于 1 min，并应保留批次号、时间戳、校准状态和人工干预记录。

c） 流量、称量、密度、pH 值、温度、压力和二氧化碳分析仪应按计量管理要求定期校准或核查。

## 10 工程设计与充填施工

### 10.1 工程调查与设计

充填前应查明采空区范围、形态、顶底板、裂隙、积水、通风、瓦斯、自燃、水害、与邻近巷道和地表水体的连通关系。应依据调查结果确定充填方式、分区、充填顺序、设计充填量、挡墙、排气泄水、管路和监测方案，并符合《煤矿安全规程》及 GB/T 39338 等规定。

### 10.2 充填体制备站

a） 制备站位置应综合原料运输、二氧化碳来源、供水供电、井口或钻孔、地形和环境敏感目标确定。

b） 应设置原料区、制浆矿化区、气源区、泵送区、控制室和事故料浆收集区；人流与物流、二氧化碳输送与火源区域应合理分隔。

c） 场地和沟槽应采取防扬散、防流失和防渗漏措施；事故料浆和洗管水应集中收集并优先回用。

### 10.3 输送管路

a） 输送方式可采用自流、泵压或联合输送。管径和流速应通过流变、沉降和环管试验或可靠工程类比确定。

b） 管路布置应短直、平缓并减少急弯和突变。弯头曲率半径宜不小于 3 倍管径；低点、末端和易堵部位应设排浆或冲洗口，高点宜设排气设施。

c） 应设置压力、流量和必要的密度监测点。压力异常升高、流量下降或波动超限时，不应强行提高泵压。

d） 停充后应及时排空或清洗。清洗水和残余料浆应回收，不得无组织排入巷道、地表或水体。

### 10.4 采空区充填

a） 存在漏浆通道、导水裂隙或与非充填区域连通时，应先进行封堵、隔离和试压或低浓度试充。

b） 充填宜遵循由低到高、由远到近、分区分段的原则；复杂采空区应划分充填单元。

c） 充填过程中应连续监测料浆流量、压力、累计充填量、采空区液位或充填标高、挡墙状态和回流情况。

d） 因故停充时，应按允许中断时间处置。超过允许时间后恢复充填，应重新检查管路和已充填料浆状态。

e） 充填终点应根据设计充填量、充填标高、排气孔或观察孔出浆、回流和压力变化综合判定。

### 10.5 挡墙与隔离设施

挡墙和隔离设施应根据最大充填高度、料浆侧压力、泵送附加压力、施工荷载和围岩条件设计，满足承载、抗滑、抗倾覆、防渗和长期稳定要求。应设置注浆管、排气管、观察管和必要的泄水设施。达到设计强度并经专项验收后方可充填。

### 10.6 启动、停机与异常处置

系统启动应依次完成清水试验、低浓度料浆试验和设计浓度料浆试验。正常停机应停止固体给料、停止二氧化碳、排空或转移反应器料浆并清洗管路。停电、停水、搅拌故障、供气失控或堵管时，应优先切断二氧化碳和固体给料，保持安全泄压和人员疏散。

## 11 质量控制与验收

### 11.1 检验分类

检验分为进场或入仓检验、过程检验、出站料浆检验、充填体性能检验和型式检验。首次使用新材料、新配合比、新气源、新设备，或停产三个月以上恢复生产时，应进行型式检验。

### 11.2 过程质量控制

每批或连续生产班次应记录实际干基配料量、总用水量、质量浓度、二氧化碳进出口流量与浓度、温度、压力、pH 值、矿化时间、尾气状态、流动性能、泵送压力和累计充填量。出现超出控制限的趋势时，应停止符合性放行并查明原因。

### 11.3 结果判定

a） 原材料任一安全或环境项目不合格时，该批材料不得使用；一般性能项目不合格时，可加倍取样复检一次，复检仍不合格则判该批不合格。

b） 出站料浆质量浓度、可泵性或泌水率不合格时，不应直接充填；经调整后应重新取样检验。

c） 强度检验每组平均值应不低于设计值，任一试件不应低于设计值的 85%。不满足时应复核取样、养护和检测，并对对应充填区进行专项评估。

d） 矿化转化率、固碳保持率不合格时，不得以增加二氧化碳投加记录替代整改，应重新优化矿化工艺。

### 11.4 系统性能验收

制备系统应完成单机试运、联动水试、低浓度料浆试运和设计工况试运。连续性能考核期间，设计处理能力、计量精度、料浆性能、矿化转化率、设备可用性、二氧化碳泄漏报警和应急联锁应符合设计要求。

### 11.5 充填工程验收

a） 实际充填量不宜低于设计充填量的 85%，充填范围、标高、顺序和单元划分应符合设计文件；

b） 挡墙、管路、支吊架、排气泄水和监测设施应完整，不应有影响安全的变形、开裂和渗漏；

c） 料浆、充填体、环境指标应符合 6.6 及设计要求；

d） 不合格区域应采取补充充填、注浆加固、隔离或其他经论证的措施，复检合格后方可通过验收。

## 12 监测与固碳量核算

### 12.1 过程监测

应连续监测配料、加水、二氧化碳供给、反应温压、pH 值、尾气二氧化碳、料浆流量、输送压力和充填量。

### 12.2 充填体与地压监测

a） 应监测充填体强度、沉降、挡墙变形、顶底板移近及必要的充填体应力；

b） 充填完成后 7 d 内宜每日监测一次，8 d～30 d 宜每周一次，1 个月～6 个月宜每月一次，稳定后按季度或设计要求监测；

c） 出现沉降加速、压力突增、挡墙变形或围岩异常时，应停止相关作业并启动专项评估。

### 12.3 地下水监测

a） 应根据地下水流向在充填区上游设置背景点，在下游及可能受影响区域设置监测点；

b） 充填前应取得背景值，施工期间宜每月监测一次，完成后第一年宜每季度一次，稳定后宜每半年一次；

c） 监测项目应包括 pH 值、总溶解性固体、硫酸盐、氯化物、氟化物、钙、镁和原料识别出的砷、镉、铬、铅、汞等特征污染物；

d） 水质异常时应加密监测、排查渗漏和串浆，并采取封堵、截排水、加固或停止充填等措施。

### 12.4 核算边界与原则

固碳量核算应按附录 C 执行。实际矿化固碳量以原料进入制备系统为起点、矿化料浆或规定龄期充填体为终点；项目净固碳量还应包括原料预处理、二氧化碳捕集后调理与输送、制浆矿化、泵送充填、用电、燃料、热力、外加剂和运输等边界内排放。

### 12.5 核算质量控制

a） 气体物料衡算结果与固相无机碳分析结果的相对偏差不宜大于 10%；超过时不得直接取较大值，应检查含湿量、流量标定、尾气短路、溶解无机碳和取样代表性；

b） 固碳量应按干基、统一标准状态和统一时间边界计算；原料原有碳酸盐、回用料所带碳酸盐不得重复计算；

c） 项目净固碳量为负时，不应宣称实现净固碳，但可报告新增矿化固碳量和造成净值为负的排放来源。

## 13 安全、环境保护与应急

### 13.1 一般要求

工程建设和运行应符合《煤矿安全规程》、职业健康、压力设备、消防和环境保护有关规定。应开展二氧化碳窒息、可燃气体、碱灼伤、粉尘、机械伤害、压力释放、堵管爆管、挡墙失稳和浆体泄漏风险辨识。

### 13.2 二氧化碳安全

a） 二氧化碳储存、汽化、反应和尾气区域应保持有效通风，并设置固定式二氧化碳和氧气监测报警装置；报警值和职业接触控制应符合 GBZ 2.1 及安全评价要求。

b） 报警、通风、供气切断和人员疏散宜联锁。二氧化碳浓度超限时，人员不得在无有效呼吸防护和监护条件下进入。

c） 井下使用或排放二氧化碳时，应评价其向低洼、封闭和回风区域积聚的风险，不得影响矿井通风和人员安全。

### 13.3 电石渣与碱性物料

a） 电石渣处理前应确认无持续乙炔释放。检测到可燃气体时应停止入仓和制浆，隔离火源并强化通风。

b） 高碱料浆作业点应配备防碱工作服、手套、护目镜、洗眼和冲淋设施；发生皮肤或眼睛接触时应立即冲洗并按应急预案处理。

c） 酸性清洗剂不得与电石渣、高碱料浆和含碳酸盐沉积物无控制混合，以防剧烈反应和二氧化碳瞬时释放。

### 13.4 设备、管路与井下作业

转动、承压和带电设备应设置防护、联锁和检修隔离。处理堵管或检修反应器前应停止给料与供气、泄压、排空并确认无二氧化碳积聚。挡墙附近和高压管线正前方不得安排无关人员停留。

### 13.5 污染控制

a） 破碎、筛分、粉磨、储运和配料工序应密闭或设置除尘设施，排放应符合 GB 16297 及地方要求；

b） 生产废水、洗管水、泌出液和事故料浆应分区收集、优先回用，外排时应符合 GB 8978 及排污许可要求；

c） 厂界噪声应符合 GB 12348；一般工业固废和危险废物的贮存分别符合 GB 18599 和 GB 18597；

d） 不得将不合格料浆、沉渣、除尘灰和试验废物无记录排入采空区或外环境。

### 13.6 应急

应编制二氧化碳泄漏、可燃气体、超温超压、停电停水、搅拌故障、堵管爆管、浆体泄漏、挡墙异常和人员灼伤窒息等专项处置卡，并定期演练。事故状态下应优先保证人员安全和气源切断，未经风险确认不得强行排浆、升压或进入受限空间。

# 附录 A
（规范性）
# 配合比设计与矿化兼容性试验

## A.1 设计输入

设计输入应包括三类材料的干基组成及波动范围、有效可矿化 Ca/Mg、原有无机碳、设计充填能力、管输条件、采空区稳定要求、地下水控制要求和二氧化碳气源条件。

## A.2 基础配合比

A.2.1 按 6.2 选取不少于 3 组“骨料+胶凝材料+矿化材料”比例。

A.2.2 每组设置不少于 3 个质量浓度或用水量水平。

A.2.3 测定坍落度或扩展度、密度、泌水率、可泵时间和 3 d、7 d、28 d 强度。

## A.3 二氧化碳剂量和反应时间

对每个候选基础配合比，宜设置理论矿化固碳量的 0%、40%、60%和 80%二氧化碳剂量，并设置不少于 3 个反应时间。应记录温度、压力、pH 值、尾气和流变变化。

## A.4 兼容性判定

矿化组应同时满足 6.6 矿化转化率、可泵时间、泌水率和强度保持率。若矿化转化率达标而强度保持率不足，应优先调整通气顺序和剂量，不宜简单增加水泥用量掩盖过度碳化。

## A.5 扩大试验

试验室结果应经中试搅拌和环管泵送验证。扩大试验应采用工程粒径煤矸石和实际气源，验证连续计量、二氧化碳分散、结垢、磨损、堵管及 72 h 连续运行稳定性。

# 附录 B
（规范性）
可泵时间与料浆稳定性试验

## B.1 原理

在规定温度和低速搅拌或循环条件下，定时测定矿化料浆流动性、泌水或模拟泵送压力，确定其持续满足设计输送判据的时间。

## B.2 试验条件

样品应取自矿化结束后的均匀料浆。试验温度应与工程最不利温度一致，试样体积不宜小于 20 L；含粗骨料时容器内径不应小于最大粒径的 10 倍。

## B.3 试验步骤

1） 记录起始时间、温度、质量浓度、坍落度或扩展度、密度和泌水率；

2） 按工程储浆条件进行低速搅拌或循环，每 30 min 测定一次流动性；每 1 h 测定一次泌水和流变参数；

3） 具备环管时，同步记录规定流量下单位长度压降和泵送压力；

4） 当坍落度或扩展度低于设计下限、单位长度压降超过设计允许值、出现不可恢复结团/离析或泌水率超过 2%时，判定不再可泵；

5） 从制浆完成至首次不满足判据的时间为可泵时间。

## B.4 报告

报告应包括原料批次、配合比、矿化参数、温度、搅拌或循环制度、各时点流动与压降数据、失效判据和可泵时间。

# 附录 C
（规范性）
矿化固碳量核算

## C.1 理论矿化固碳量

当有效可矿化组分以 CaO 和 MgO 当量表示时，理论矿化固碳量按式（C.1）计算：

$$Mth = \sum m_i \times \left[(44/56)w_{CaO,act,i} + (44/40)w_{MgO,act,i}\right] \cdots\cdots (C.1)$$

式中：

Mth 为理论矿化固碳量，kg；

mi 为第 i 种材料干基质量，kg；

wCaO,act,i 和 wMgO,act,i 分别为第 i 种材料中有效可矿化 CaO、MgO 当量的质量分数。

## C.2 实际矿化固碳量

实际矿化固碳量应按式（C.2）计算：

$$Mac = mp \cdot wCO_2,p - \Sigma(mi \cdot wCO_2,i) - Munstabl \cdots\cdots (C.2)$$

式中：

Mac 为实际矿化固碳量，kg；

mp 为矿化后产物干基质量，kg；

$wCO_2$,p 为矿化后产物中以 $CO_2$计的稳定碳酸盐质量分数；

$wCO_2$,i 为第 i 种原料中以 $CO_2$计的原有稳定碳酸盐质量分数；

Munstable 为物理吸附、溶解无机碳或经稳定性验证不能保留部分折算的 $CO_2$质量，kg。

## C.3 矿化转化率

$$\eta cc = Mac / Mth \times 100\% \cdots\cdots (C.3)$$

式中：

ηcc 为矿化转化率

## C.4 项目净固碳量

$$Mnet = Mret,28 - \Sigma(ADj \times EFj) \cdots\cdots (C.4)$$

式中：

Mnet 为项目净固碳量，kg $CO_2e$；

ADj 为核算边界内第 j 项能源、材料或运输活动数据；

EFj 为相应温室气体排放因子。

活动数据和排放因子应符合 GB/T 32150 及适用行业核算要求。