

T/GRM

T/GRM 130—2025

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

矿山绿色技术体系

Green technology system for mines

2025 - 06 - 27 发布

2025 - 06 - 27 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目次

前言 III

1 范围 4

2 规范性引用文件 4

3 术语和定义 4

4 总则 14

 4.1 基本原则 14

 4.2 基本要求 14

5 体系结构 14

6 勘探 15

 6.1 地球物理勘探 15

 6.2 地球化学勘探 17

 6.3 遥感 19

 6.4 钻探 20

7 开采 21

 7.1 露天矿山 21

 7.2 地下矿山 21

 7.3 非常规采矿 23

8 选矿 24

 8.1 高效碎磨技术 24

 8.2 预富集技术 25

 8.3 干式分选技术 25

 8.4 分选药剂绿色化技术 25

 8.5 深度低碳高效脱水技术 26

 8.6 低品位复杂难选技术 26

 8.7 选矿工艺优化技术 26

9 节能降碳 26

 9.1 节能技术 26

 9.2 机械能储存 27

 9.3 碳捕集 28

 9.4 碳利用 29

 9.5 碳封存 31

 9.6 碳运输和生态碳汇 31

10 智能化 32

 10.1 自动化技术 32

 10.2 智能设备 32

 10.3 机器人技术 33

 10.4 数字孪生技术 33

10.5 大数据大模型技术	33
10.6 信息化集成技术	33
11 环境治理	34
11.1 粉尘治理	34
11.2 噪声治理	35
11.3 有害气体治理技术	36
11.4 土壤污染治理技术	37
11.5 废水污染治理	37
11.6 污染物监测技术	38
12 灾害防治	38
12.1 水害防治技术	38
12.2 火灾防治技术	38
12.3 瓦斯防治技术	39
12.4 地压防治技术	39
12.5 煤尘爆炸防治技术	39
12.6 边坡稳定技术	40
12.7 灾害监测技术	40
13 固体废物处理与利用	40
13.1 固体废物处理技术	40
13.2 固体废物利用	40
14 生态修复	41
14.1 土壤改良技术	42
14.2 植被重建技术	42
14.3 生物多样性恢复技术	42
14.4 生态修复监测技术	42
15 矿区改造利用	43
15.1 废弃矿山资源再利用	43
15.2 空间再利用技术	44
参 考 文 献	45

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。

请注意本文件某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

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：中关村绿色矿山产业联盟秘书处、中国矿业大学（北京）、国能神东煤炭集团有限公司、山东黄金集团有限公司、国家能源集团神东煤炭公司上湾煤矿、湖北三峡职业技术学院、四川华锋钻探工程有限责任公司、商洛学院、浙江公铁建设工程有限公司、陕西省一八五煤田地质有限公司、新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、广东磊蒙智能装备集团有限公司、中国煤炭地质总局水文地质局、中煤科工集团重庆研究院有限公司、山东科技大学、中国环境科学研究院、西安建筑科技大学、中国地质大学（北京）、西安科技大学、中国矿业大学、昆明理工大学、内蒙古煤矿设计研究院有限责任公司、重庆大学、北京科技大学、辽宁石油化工大学、华南理工大学、中石油煤层气有限责任公司、北京众华高科咨询有限公司、华能内蒙古东部能源有限公司、华能伊敏煤电有限责任公司、内蒙古自治区地质调查研究院、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、北京绿海盛源认证服务有限公司、北京市海淀区绿智职业技能培训学校、湖北金源绿通生态环境工程有限公司、新疆碳汇环境科技有限公司。

本文件主要起草人：彭苏萍、金章利、王亮、李文涛、刘鹏、高瑞岗、黄佳岗、孔卫开、蒋清燕、刘明宝、南宁、周咸领、高文清、张宏强、袁分波、胡昌俊、刘晓东、曾华栋、张发旺、李冲、李鹏、邓久帅、韩雨、吴海军、许莉、杨森、赵伟伟、王若含、胡运兵、康跃明、张二锋、易洪春、郝宪杰、赵曰茂、吕珊珊、杨磊、赵丽娜、顾清华、丰奇成、王宏、王达、刘学生、彭守建、刘兴宇、李凯、桑树勋、赵毅鑫、黄占斌、石博强、卢其威、李沛涛、张增起、李晓慧、卢桂宁、苏宸、范立民、李永臣、李继、于大鹏、王利国、司国斌、张勇、魏金凯、李林凤、李蕾蕾、刘高鹏、王海鸿。

本文件为第一次发布。

矿山绿色技术体系

1 范围

本文件规定了以勘探、开采、选矿、节能降碳、智能化、环境治理、灾害防治、固体废物处理与利用、生态修复和矿区改造利用为主的固体矿山绿色技术体系。

本文件不包含对生态环境破坏较大的技术。

本文件适用于绿色矿山团体标准立项与发布，科技成果评价、评审，技术认定、选择等，未被列入的新技术参照执行。

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。

GBZ 2.1 工作场所有害因素职业接触限值
GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
GB 3095 环境空气质量标准
GB 3096 声环境质量标准
GB 3838 地表水环境质量标准
GB 6566 建筑材料放射性核素限量
GB 8624 建筑材料及制品燃烧性能分级
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 16297 大气污染物综合排放标准
GB/T 18046 用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
GB 18918 城镇污水处理厂污染物排放标准
GB/T 19923 城市污水再生利用 工业用水水质
GB 20426 煤炭工业污染物排放标准
GB/T 20491 用于水泥和混凝土中的钢渣粉
GB 21522 煤层气（煤矿瓦斯）排放标准
GB 34330 固体废物鉴别标准
GB/T 40112 地质灾害危险性评估规范
GB/T 42797 二氧化碳捕集、输送和地质封存 管道输送系统
GB/T 43935 矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范
GB/T 44934 电力储能用飞轮储能系统技术规范
GB/T 50107 混凝土强度检验评定标准
GB 50300 建筑工程施工质量验收统一标准
TD/T 1036 土地复垦质量控制标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

矿山绿色技术 green mining technology

在矿山全生命周期中以资源开发和生态环境保护相协调为目标，具备节能、降碳、减污、扩绿、节水、节地、资源循环利用及生态功能维持等特征的系统性方法和工艺。

3.2

重力勘探技术 gravity exploration technology

通过测量地球重力场的变化来研究地质结构和密度分布的地球物理勘探方法和工艺。

3.3**磁法勘探技术 magnetic exploration technology**

通过测量和分析地壳中岩石或矿体的磁化率，来探测地质构造、矿产资源或环境目标的地球物理勘探方法和工艺。

3.4**电法勘探技术 electrical exploration technology**

根据地壳中各类岩石或矿体的电磁学性质（如导电性、介电性）和电化学特性的差异，通过对人工或天然电场或电化场的空间分布规律和时间特性的观测和分析，寻找不同类型有用矿床、查明地质构造及解决地质问题的地球物理勘探方法和工艺。

3.5**电磁法勘探技术 electromagnetic exploration technology**

通过测量和分析地下介质的电磁特性（如电导率、磁导率等），来研究地质结构和矿产资源分布的地球物理勘探方法和工艺。

3.6**地震勘探技术 seismic exploration technology**

采用天然或人工激发地震波，通过分析地震波在地下介质中的传播特性，来研究地下地质结构和矿产资源分布的地球物理勘探方法和工艺。

3.7**放射性勘探技术 radioactive exploration technology**

通过测量地下岩石或矿石中天然放射性元素（如铀、钍、镭等）的辐射强度，来研究地质结构和矿产资源分布的地球物理勘探方法和工艺。

3.8**地温勘探技术 geothermal exploration technology**

通过测量和分析地下热场分布，来研究地下地热资源分布和地质结构的地球物理勘探方法和工艺。

3.9**岩石地球化学测量技术 rock geochemical measurement technology**

通过系统地采集岩石样品，分析其中的元素含量或其他地球化学特征，发现与矿化有关的各类原生异常，达到矿产勘查等目的的地球化学勘探方法。

3.10**土壤地球化学测量技术 soil geochemical measurement technology**

通过系统地测量土壤中的元素含量或其他地球化学特征发现与矿化有关的各类次生异常，达到矿产勘查等目的的地球化学勘探方法。

3.11**水系沉积物地球化学测量技术 aqueous sediment geochemical measurement technology**

以水系沉积物为采样介质，分析其中元素含量或其他地球化学特征，发现水系沉积物地球化学异常，解释与评价异常，达到矿产勘察目的的地球化学勘探方法。

3.12

水地球化学测量技术 hydrogeochemical measurement technology

通过系统地采集地表水或地下水的样品,分析水中的微量元素及其他地球化学特征,发现与矿化有关的水化学异常,达到矿产勘查等目的的地球化学勘探方法。

3.13

生物地球化学测量技术 biogeochemical measurement technology

通过分析植物、动物和微生物等生物体内的微量元素含量或化学特征,发现与矿化有关的生物地球化学异常,达到矿产勘查等目的的地球化学勘探方法。

3.14

气体地球化学测量技术 gas geochemical measurement technology

通过系统采集岩石和土壤等地下气体和地表气体介质,分析其化学成分、浓度等,推断矿产资源分布的地球化学勘探方法。

3.15

光学遥感技术 optical remote sensing technology

利用光学传感器,获取目标物体发射的电磁波信息,并进行分析和处理的探测方法。

3.16

红外遥感技术 infrared remote sensing technology

利用传感器探测目标物体发射的红外波段电磁波,通过数据处理和分析来识别、评估目标特征的探测方法和工艺。

3.17

微波遥感技术 microwave remote sensing technology

利用主动发射电磁波或者被动接收微波波段信息,通过分析回波特征以提取目标的位置、形状、结构及材质等信息,实现非接触式、远距离探测的方法和工艺。

3.18

高光谱和多光谱遥感技术 hyperspectral and multispectral remote sensing technologies

获取地表或目标物体连续且狭窄波段电磁波信息的探测方法和工艺。

3.19

液压钻机钻探技术 hydraulic drilling rig drilling technology

利用液压传动系统,通过操纵液压系统中的流体压力,带动钻床实现高效、高精度的钻进工作。

3.20

定向钻探技术 directional drilling technology

采用人工控制和专门的钻进技术,使钻孔(井)按设计要求的轨迹运行的方法。

3.21

自动化智能化钻探技术 automated and intelligent drilling technology

借助计算机和传感器等设备,实现对钻进作业的自动控制和智能化管理,大大提高了钻探作业的效率 and 安全性。

3.22

内凹式开采技术 concave mining technology

生产台阶不推进到边缘，四周暂留一定宽度的未开采带以形成凹陷开采空间，但随着开采推进，生产台阶和四周暂留地貌逐步下降的开采方法和工艺。

3.23

内排式开采技术 internal exhaust mining technology

将剥离的岩土废料排弃至已到边界的矿坑内部，实现矿坑内部回填的开采方法和工艺。

3.24

保水开采技术 water mining technology

通过控制岩层移动，确保具有供水功能和生态价值的含水层（岩组）功能、结构稳定，或将水位变化控制在合理范围内，在矿产资源开采量与区域水资源承载力之间找到最优平衡点，从而实现资源开发与环境保护的双重目标的矿产开采方法和工艺。

3.25

充填开采技术 filling mining technology

随着回采工作面推进，将矿山产生的固体废弃物、尾矿、工矿垃圾等制成充填料充入采空区的开采方法和工艺。

3.26

煤与煤层气共采技术 coal and gas of coal mine co-mining technology

通过地质勘探、煤层气预抽采、采动卸压抽采、采空区煤层气抽采等环节的协同设计，实现煤炭与煤层气资源的同步开发和利用的方法和工艺。

3.27

煤炭地下气化技术 underground coal gasification technology

将地下煤炭资源通过原位气化方式转化为可燃气体的方法和工艺。

3.28

煤-水-热共采技术 coal-water-heat co-mining technology

将煤炭资源、矿井涌水、矿井地热同步开发与利用的方法和工艺。

3.29

富油煤地下热解技术 oil-rich coal underground pyrolysis technology

通过向地下煤层注入热能，在特定温度和压力条件下，使富油煤中的有机质发生热解反应，分解生成焦油、煤气和半焦等产物的方法和工艺。

3.30

堆浸开采技术 heap leaching mining technology

通过化学溶剂从低品位矿石中提取目标金属的方法和工艺。

3.31

共伴生矿产协调开采技术 associated minerals coordinated mining technology

在同一矿区内，针对同一矿床中共生或伴生的多种矿产或有用组分，通过综合规划、协同开发，实现资源高效利用的方法和工艺。

3.32

控制爆破技术 controlled blasting technology

通过一定的工艺措施严格控制爆炸能量和爆破规模，使爆破的声响、振动、飞石、倾倒方向、破坏区域以及破碎物的散塌范围在规定限度以内的爆破方法。

3.33

非爆破开采技术 non-blasting mining technology

不依赖炸药爆破，采用机械、化学或物理手段对岩体进行分裂或破碎的开采方法和工艺。

3.34

高效碎磨技术 high-efficiency grinding technology

能够显著降低能耗和球耗、提高矿物解离度和处理效率的碎磨方法和工艺。

3.35

预富集技术 pre-enrichment technology

利用矿石中各组物理、化学性质的差异，采用适当的工艺实现矿石中有价组分与脉石或其他无用组分预先分离的方法。

3.36

干式分选技术 dry separation technology

利用气流、振动、磁选、光电选或筛选等物理方法替代传统湿法选矿，避免水资源消耗和废水污染的分选方法和工艺。

3.37

分选药剂绿色化技术 separation agent greening technology

在保证作业效率的前提下，通过分子结构设计、作用机制优化及循环利用体系构建，降低药剂的毒性、生物累积性和环境负荷，实现资源高效回收与生态安全的技术。

3.38

深度低碳高效脱水技术 deep low-carbon and highly efficient dehydration technology

在实现矿物产品深度脱水的同时，通过创新工艺、设备及管理手段，大幅减少能源消耗与碳排放的综合性方法和工艺。

3.39

低品位复杂难选技术 low-grade and complex refractory ores separation technology

针对低品位、矿物组成复杂，传统选矿方法难以高效利用的矿石所开发的低碳高效回收技术。

3.40

选矿工艺优化技术 mineral processing process optimization technology

通过改进传统选矿流程、引入先进技术手段或智能化方法，对矿石破碎、磨矿、分选、脱水等环节进行系统性调整与升级，以提高资源利用率、降低能耗与成本、减少环境污染，实现选矿过程高效、经济、绿色、低碳目标的综合性方法和工艺。

3.41 清洁能源利用技术 clean energy utilization technology

在矿山生产和运营过程中，采用对生态环境低污染或无污染的能源利用方法和工艺。

3.42

无功补偿和谐波抑制技术 reactive power compensation and harmonic suppression technology

通过在电力系统中引入一个或多个补偿装置，对系统进行无功补偿和谐波抑制，提高功率因数，降低系统总电流的方法和工艺。

3.43

闭环控制技术 closed-loop control technology

被控的输出以一定方式反馈到控制的输入端，和输入信号一同对系统施加控制的方法和工艺。

3.44

能量回馈技术 energy feedback technology

将电机或其他动力设备在运行过程中产生的多余能量回收并回馈到电源或其他能源系统中的方法和工艺。

3.45

抽水储能技术 pumped storage technology

利用电力系统中多余电能，把高程低的水库（简称为“下池”）内的水抽到高程高的水库（简称为“上池”）内，以势能方式蓄存，待系统需用电时，再从上池放水至下池发电的方法和工艺。

3.46

压缩空气储能技术 compressed air energy storage technology

将电能转化为压缩空气储存于地下盐穴或储气罐，需要时释放压缩空气驱动涡轮发电的方法和工艺。

3.47

飞轮储能技术 flywheel energy storage technology

利用飞轮旋转，以机械能的形式储存能量，储存的能量可通过逆变器将机械能转换为电能输出的方法和工艺。

3.48

燃烧前捕集技术 pre-combustion capture technology

在含碳和含氢燃料燃烧前将 CO_2 从燃料或者燃料转换气中进行分离的方法和工艺。

3.49

富氧燃烧技术 oxygen-enriched combustion technology

利用高浓度氧气作为氧化剂，与化石燃料进行燃烧，对其产生的 CO_2 进行捕集和分离的方法和工艺。

3.50

化学链燃烧技术 chemical chain combustion technology

通过金属氧化物（氧载体）在两个反应器之间循环传递氧，实现燃料与氧气的间接接触燃烧，直接分离出高纯度 CO_2 的新型燃烧和捕集 CO_2 的方法和工艺。

3.51

燃烧后捕集技术 post-combustion capture technology

利用物理或化学方法，从燃烧设备（如锅炉、燃气机等）排放的烟气中捕集 $\text{CO}_{2\text{ff}}$ 的方法和工艺。

3.52

矿化利用技术 mineralization utilization technology

通过模拟自然界的地质过程，使 CO_2 与富含钙、镁、铁等元素的矿物或工业副产品（如矿渣、粉煤灰等）发生化学反应，生成稳定的碳酸盐矿物（如碳酸钙、碳酸镁等），实现 CO_2 的利用或长期封存的方法和工艺。

3. 53

化工利用技术 chemical engineering utilization technology

将CO₂转化为各种化工产品（如尿素、甲醇、合成气、低碳烃、含氧有机化合物单体、高分子聚合物等）的方法和工艺。

3. 54

生物利用技术 bioutilization technology

利用植物或微生物通过光合作用吸收CO₂，将其转化为生物质的方法和工艺。

3. 55

地质利用技术 geological utilization technology

通过CO₂与传统驱油方法协同，注入具有稳定盖层和低渗特性的地层，利用超临界调控等实现高效驱油的技术。

3. 56

地质封存技术 geological sequestration technology

通过工程技术手段将CO₂注入适宜地质体中，实现与大气长期隔绝的方法和工艺。

3. 57

海洋封存技术 marine storage technology

将捕获的CO₂通过特定方式注入海洋环境，利用海洋的物理、化学或生物过程实现长期封存的方法和工艺。

3. 58

碳运输技术 carbon transportation technology

将捕集到的CO₂安全有效地运输到利用或封存地点的方法和工艺。

3. 59

生态碳汇技术 ecological carbon sink technology

通过保护、恢复和可持续管理自然生态系统（如森林、湿地、草原、海洋等），增强其固碳能力，并借助科技手段量化、监测及交易碳汇的综合性方法和工艺。

3. 60

自动化技术 automation technology

通过先进的传感器、仪器仪表、网络通信、数据处理和自动控制系统实现矿山生产、设备运转的有序自动运行或远程操控的方法和工艺。

3. 61

智能设备 intelligent equipment

在矿山建设中具备智能化、自动化、高效化、环保化等特点，提高矿山生产效率，降低能耗和环境污染，推动矿山的可持续发展的设备。

3. 62

机器人技术 robot technology

通过嵌入式动力系统、智能运动机构及自主可控算法实现某种特定功能，支持远程遥控或自主作业的方法和工艺。

3.63

数字孪生技术 digital twin technology

基于地质勘探数据、设备传感器数据、环境监测数据等多源数据融合以及高精度三维建模与动态仿真技术，构建与物理矿山实时交互的虚拟数字模型，形成覆盖矿山全生命周期的状态感知-分析决策-优化控制的方法和工艺。

3.64

大数据大模型技术 big data and big model technology

基于监测、监控、地质文献、应急预案、生产等海量矿山数据构建数据资源层，整合地质、环境、设备运行、经营管理等多维度信息，优化资源调度、能耗管理、经营决策和安全指挥的方法和工艺。

3.65

信息化集成技术 information integration technology

基于统一数据标准与系统互操作协议，实现环境监测、设备控制、生产调度等矿山自动化系统以及信息化系统、外部监管平台的多源异构数据融合与业务协同，构建覆盖全要素、全流程的智能管控方法和工艺。

3.66

机械除尘技术 mechanical dust removal technology

利用重力、惯性力、离心力等物理作用力，使粉尘颗粒与气流分离，实现除尘目的的方法和工艺。

3.67

电除尘技术 electrostatic dust removal technology

利用高压电场使粉尘颗粒荷电，通过静电场力作用实现尘粒与气流的分离和捕集的方法和工艺。

3.68

过滤除尘技术 filter dust removal technology

利用过滤介质捕集含尘气体中粉尘的方法和工艺。

3.69

湿式除尘技术 wet dust removal technology

利用水或其他液体与粉尘颗粒接触，使粉尘润湿、团聚，实现与气体分离的方法和工艺。

3.70

复合式除尘技术 compound dust removal technology

将两种或多种除尘技术有机结合，形成协同作用，实现综合除尘的方法和工艺。

3.71

声源控制技术 sound source control technology

通过分析装备发声机理，匹配性设计动力元件与结构元件、优化加工装配质量、采取振动控制措施及适应性操作规程来降低噪声源的噪声发射功率的方法和工艺。

3.72

噪声传播途径控制技术 noise transmission path control technology

通过合理规划和布局，利用地形、地物、防噪林带、隔声屏障等物体衰减噪声的方法和工艺。

3.73

个体防护技术 personal protection technology

采用佩戴耳塞、隔声棉、耳罩和防声头盔等方式，减小噪声影响的方法和工艺。

3.74

有害气体治理技术 harmful gas treatment technology

对矿山活动中产生的甲烷、硫化氢、一氧化碳、氮氧化物等有害气体进行源头控制、高效净化及能源转化的方法和工艺。

3.75

土壤污染治理技术 soil pollution control technology

采用化学、物理或生物手段，对矿山土壤中的污染物进行固定、降解处理，降低其浓度；或将污染物转化为低毒/无毒物质，或阻断污染物在生态系统中的迁移路径的方法与工艺。

3.76

矿井水治理技术 mine water treatment technology

采用物理、化学或生物方法，将矿井水中污染物去除或转化为无害物质的方法和工艺。

3.77

矿物加工废水治理技术 mineral processing wastewater treatment technology

针对矿物加工过程中造成的水污染问题，采取的科学、环保的治理方法和工艺。

3.78

生活污水治理技术 domestic sewage treatment technology

采用物理、化学、生物的方法清除生活污水中的杂质，使水质达到排放标准或使用要求的方法和工艺。

3.79

污染物监测技术 pollutant monitoring technology

对代表环境污染和环境质量的各种环境污染物进行收集采样、测试分析和动态监测，从而科学评价环境质量及其变化趋势的方法和工艺。

3.80

水害防治技术 water hazard prevention and control technology

为预防和控制矿山井下巷道或采空区等发生的水害而采取的一系列方法和工艺。

3.81

火灾防治技术 fire prevention and control technology

针对安装有大型机电设备的巷道、工作面 and 采空区等火灾危险区域，采取的一系列预防、监测、控制和扑救的技术手段和方法。

3.82

瓦斯防治技术 gas prevention and control technology

对井下瓦斯灾害所采取的一系列预防、控制和治理的方法和工艺。

3.83

地压防治技术 ground pressure prevention and control technology

对巷道围岩变形、冒顶、岩爆、冲击地压等问题所采取的一系列预防、控制和治理的方法和工艺，确保围岩的稳定性。

3.84

煤尘爆炸防治技术 coal dust explosion prevention and control technology

通过系统性工程技术措施,预防或抑制煤矿、煤化工等场所中悬浮煤尘达到爆炸浓度、触发点火源以及阻断爆炸传播的一系列安全防控方法和工艺。

3.85

边坡稳定技术 slope stability technology

在露天开采中进行边坡设计优化、排水、边坡加固、监测预警,保障矿山安全生产的方法和工艺。

3.86

灾害监测技术 disaster monitoring technology

运用各种科学技术手段对矿山可能发生的灾害进行长期、系统地观测、分析和预警的方法和工艺。

3.87

固体废物处理技术 solid waste treatment technology

通过系统化的工程措施和管理方法,对矿山产生的固体废物进行安全、环保的临时或长期存储的方法和工艺。

3.88

资源回收技术 resource recycling technology

通过物理、化学、生物等手段,从固体废物中提取有价值的物质或资源,并将其转化为可再利用的产品或资源,实现资源循环利用、减少环境污染的方法和工艺。

3.89

制备建筑材料技术 preparing building materials technology

通过物理、化学或生物等手段,将固体废弃物加工转化为具有工程应用价值的建筑材料的方法和工艺。

3.90

制备生态修复材料技术 preparing ecological restoration materials technology

通过物理、化学或生物手段,将固体废弃物加工转化为生态修复材料的方法和工艺。

3.91

制备环境治理材料技术 preparing environmental governance materials technology

通过物理、化学、生物等手段,将固体废物加工转化为环境治理材料的方法和工艺。

3.92

土壤改良技术 soil improvement technology

对矿山受损的污染和退化土壤进行处理,改善土壤的物理结构、化学性质和生物活性,提高土壤水肥保持能力,为植物生长创造良好土壤条件的方法和工艺。

3.93

植被重建技术 vegetation reconstruction technology

根据矿山地区的自然条件、土地利用类型、土壤特性和修复需求,因地制宜,选择适宜本地的植物种类及其组合,采用人工种植、播种等自然恢复的方式,在采矿场地、排土场、尾矿库等区域构建植被类型,促进植被演替并重建生态系统的方法和工艺。

3.94

生物多样性恢复技术 biodiversity restoration technology

通过生态学原理与工程技术结合，对因采矿活动受损的生态系统进行系统性修复，旨在重建植物、动物及微生物群落的结构与功能，恢复区域生物多样性，并实现生态系统的自我维持与可持续发展的方法和工艺。

3.95

生态修复监测技术 ecological restoration monitoring technology

通过系统性、动态化的数据采集、分析与评估，对矿区生态修复工程的实施效果进行科学跟踪与验证的方法和工艺。

3.96

厂区设施再利用技术 factory area facilities reuse technology

在工业厂区或工业设施停止运营后，对其进行合理、可持续的再利用，以实现厂区设施的最大化利用和对环境的最小化影响的方法和工艺。

3.97

废旧设备再利用技术 waste equipment reuse technology

将废弃的设备、产品或零部件修复、翻新和再加工，使其重新满足原有或类似的功能和性能的方法和工艺。

3.98

废旧材料再利用技术 waste materials reuse technology

在矿山生产和生活过程中产生的，已经失去全部或部分使用价值的各种废旧材料，经过回收、加工处理，能够使其重新获得使用价值的方法和工艺。

3.99

空间再利用技术 space reuse technology

对矿区空间或废弃矿山进行有效利用的方法和工艺。

4 总则

4.1 基本原则

- 4.1.1 坚持地质环境保护与修复治理。勘查中减少对环境的扰动，生产中有利于对环境的修复治理。
- 4.1.2 坚持提高工作效率。有利于提高矿产勘查效率及矿山生产效率。
- 4.1.3 坚持提高资源综合利用水平。有利于提高矿产资源“三率”指标，促进资源的节约集约利用。
- 4.1.4 坚持节能降耗。有利于矿产资源勘查、开发中降低能耗，实现节能。
- 4.1.5 坚持成本费用控制。有利于降低矿产勘查与矿山生产的成本费用。
- 4.1.6 坚持安全生产。矿产资源勘查、开发工作中坚持以人为本，降低安全风险。

4.2 基本要求

- 4.2.1 符合矿产资源勘查、开发工作预期目的要求。
- 4.2.2 应综合考虑经济效益、生态效益和社会效益。
- 4.2.3 不属于国家明确禁止与淘汰的技术和装备范围。
- 4.2.4 加强矿山绿色技术跟踪和应用评估。

5 体系结构

技术体系包括一级分类10项，二级分类26项，共涉及98项矿山绿色技术。
矿山绿色技术体系结构见图1。

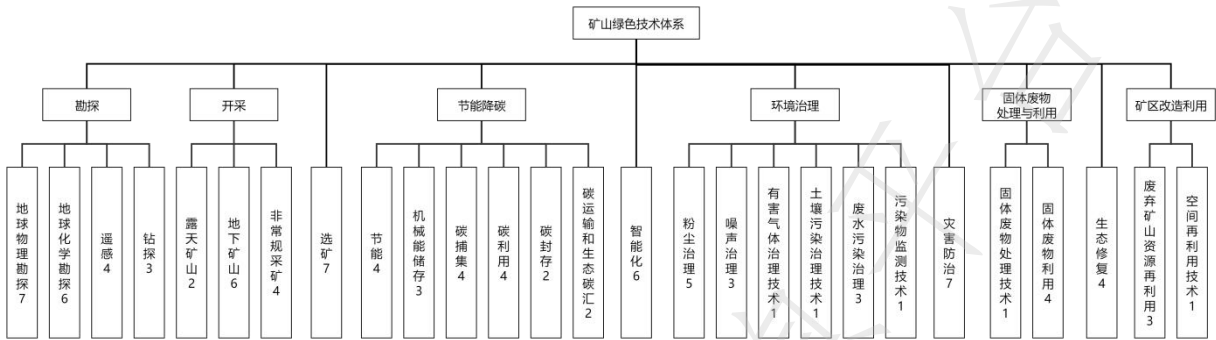


图1 矿山绿色技术体系结构

6 勘探

6.1 地球物理勘探

6.1.1 重力勘探技术

主要技术特点：

- a) 重力场异常的有效测量与分离能力。能够有效识别由地质构造或矿体引起的重力变化，支持基本重力梯度测量，可区分区域性重力场与局部异常；
- b) 复杂环境适应性。可在山区、荒漠、海洋等复杂地形，以及高温、低温、强磁等极端气候条件下作业；
- c) 抗干扰能力。可将地表起伏、温度变化对仪器的影响等环境干扰降低至仪器本底噪声水平，保障数据稳定性；
- d) 微弱信号捕捉与深部地质体识别能力。可识别地下数千米深度的密度界面变化，精准识别深部地质体；
- e) 高分辨率数据采集与处理技术。可通过数据校正，消除非目标因素干扰，精准定位异常区。

6.1.2 磁法勘探技术

主要技术特点：

- a) 磁场异常的有效测量与分离能力。应有效识别地质构造或矿体引起的磁异常，以及分离区域性磁场背景与局部异常；
- b) 复杂环境适应性。可在山区、冻土等复杂地形和强风、雨雪等极端气候下作用；
- c) 抗干扰能力。数据处理过程可消除地表岩石磁性干扰和地磁场昼夜波动，保障数据稳定性；
- d) 微弱信号捕捉与精细目标识别能力。可识别深部磁性体或小尺度目标，深部磁性体埋深、产状的计算精度以及小尺度目标的空间定位精度应满足要求；
- e) 外部电磁干扰抑制。可通过电磁屏蔽技术、频域滤波等技术抑制工业电网干扰以及对观测值进行日变校正，消除太阳风引发的地磁场波动。

6.1.3 电法勘探技术

主要技术特点：

- a) 多参数探测能力。应有效获取导电性、极化率、介电常数等多维度信息，识别目标地质体的基本空间分布特征；
- b) 复杂环境适应性。可适应复杂地质条件、险峻地形地貌、极端气候条件等环境；
- c) 抗干扰能力。可抵抗外部电磁和噪声干扰；
- d) 微弱信号识别与深部精细探测。可探测微弱电流或微弱磁场变化，人工场法具有能实现增大发射电流或延长电极距的功能。

6.1.4 电磁法勘探技术

主要技术特点：

- a) 多参数综合探测与信号区分能力。应同步获取电阻率、电磁感应强度、相位、极化率等基础物性参数，通过多参数综合分析构建更全面的地下介质模型，有效区分背景电磁干扰与目标地质体异常信号；
- b) 复杂地质与极端环境适应性。设备应适用于高电阻率围岩、低缓异常区、地形起伏剧烈等复杂场景，应具备抗高温、低温、潮湿、强风等性能；
- c) 抗干扰能力。可抵抗如工业用电、无线通信信号等外部电磁干扰对数据的影响；
- d) 复杂电磁环境的主动抑制能力。可通过多维度技术手段实现对复杂电磁环境的动态调控与干扰压制。

6.1.5 地震勘探技术

主要技术特点：

- a) 地震波异常捕捉。能有效捕捉地质构造或矿体引起的地震波异常信号；
- b) 图像功能。地下地质界面的二维/三维图像应有效区分主要地层界面（如侏罗系与白垩系分界面）、断裂带产状等特征；
- c) 复杂地质与极端气候环境适应性。可适用于山区等地表起伏剧烈、逆冲断层带等地下构造复杂或城市周边等高噪声区，设备具备抗高温、低温、潮湿、强风等性能；
- d) 有效信号的信噪比合理。可剔除低频环境振动以及消除面波、直达波等规则干扰；
- e) 绿色震源技术。宜使液压振动器发射低频扫描信号激发地震波或利用天然地震、海洋涌浪、工业噪声等环境振动作为震源，不宜使用炸药爆炸作为地震源；
- f) 精细勘探与微弱信号解析。应具有薄层识别能力以及实现河道砂体、小断层等小尺度地质体的精细成像功能，以及对微弱地震信号进行解析的能力；
- g) 多波联合采集与解译。可同步采集纵波、横波、面波等数据并联合解译，构建地下介质弹性参数模型。

6.1.6 放射性勘探技术

主要技术特点：

- a) 放射性异常检测与背景区分能力。应有效检测天然或人工放射性异常，识别与矿体相关的地质放射性特征，应具备区分背景辐射与目标异常信号的基础能力；
- b) 复杂地质与极端环境适应性。可适用于酸性岩浆岩分布区等高背景辐射区、松散沉积物掩盖的铀矿化带等覆盖层厚区，设备具备抗高温、高湿性能；应具备抗环境背景辐射干扰的能力，异常信号真实、可靠；
- c) 微弱信号捕捉与深部勘探能力。高精度探测技术捕捉低丰度放射性异常和识别小尺度异常，可通过地表异常的空间展布和能谱特征反推深部矿体埋深和规模，探测隐伏矿体；
- d) 抗干扰性。可采用被动式或低辐射激发技术，避免对地下辐射场的扰动与辐射残留。

6.1.7 地温勘探技术

主要技术特点：

- a) 地温异常检测与背景区分能力。应有效识别断层、裂隙带等地质构造或高导热水体、岩浆侵入体等矿体相关的温度场特征，区分背景温度场与目标异常信号，保障异常解译的地质可靠性；
- b) 复杂环境适应性。可适用于高导热率岩层、热液活动区等场景，设备宜具备宽温工作范围和抗环境温度波动的能力；
- c) 抗干扰能力。可抑制日照、降水、人为热源等外部因素对浅层地温测量的干扰；
- d) 微弱异常捕捉与深部热源识别。可捕捉微尺度温度异常，对岩储层等深部热源或隐伏矿体等小尺度热异常精度定位；

- e) 多参数联合分析。可采集地温、地热梯度、热导率、热扩散率等热物理参数，构建地层热物性模型；
- f) 非侵入式天然热场原位测量技术。可避免对地下热平衡状态的扰动，可在生态敏感区或文物保护单位区域直接测量天然热场分布；
- g) 低干扰。采用微创钻孔、地表非接触式测温以及随钻测温等技术获取地层温度数据。

6.2 地球化学勘探

6.2.1 岩石地球化学测量技术

主要技术特点：

- a) 异常识别与背景区分。应精准检测岩石中成矿元素、伴生元素等与矿化直接相关的元素或化合物的浓度、分布模式等异常特征，区分自然背景波动与矿化引起的目标异常；
- b) 环境适应性。可适用于火成岩、沉积岩、变质岩等多种岩性，可在造山带、盆地、岩浆活动区等地质构造单元中应用，可耐受高温、低温、高湿度、粉尘等极端条件；
- c) 抗干扰能力。可具有抗地表土壤、水系等外部因素对样品干扰的能力；
- d) 环境安全与防护设计。在样品采集、存储与分析过程中，应避免有害气体或废液排放以及试剂挥发或样品污染；
- e) 微量元素检测精度。可有效识别分散晕、原生晕边缘等弱矿化信号，具有对复杂背景下微量元素异常的识别能力；
- f) 多维度数据联合解译。可支持元素含量、同位素比值、矿物相态等多维度数据的联合解译与建模，构建多维地球化学模型，整合多源数据，可揭示成矿时代、物质来源、成矿物理化学条件等信息，辅助圈定成矿靶区；
- g) 无损或微损分析技术。宜采用激光诱导击穿光谱、质子激发 X 射线荧光分析等技术，直接对岩石样品表面或浅表层进行元素分析，无需化学溶解或大规模物理破碎，对于需获取内部成分的样品，可采用微钻取样或纳米压痕技术，在保留样品主体结构完整性的前提下实现化学信息提取。

6.2.2 土壤地球化学测量技术

主要技术特点：

- a) 异常识别与背景区分。应建立分层地球化学背景模型，采用数理统计方法划分自然背景与矿化异常阈值，应解析元素共生组合规律及矿物共生关系，具有识别弱地球化学异常的能力；
- b) 复杂环境适应性。可适应淋溶型土壤、盐渍化土壤、火山灰土等土壤类型，以及山地、覆盖区、高湿高粉尘区等复杂地表条件；
- c) 实现野外现场元素半定量分析。可实时判别元素含量异常，动态调整采样密度与异常边界圈定，减少无效采样工作量；
- d) 污染检测。应淘汰含氰化物、重金属的传统消解试剂，实现“无氰化”“无汞化”检测；
- e) 样品封闭式处理。应在负压超净工作台完成样品研磨、过筛工序，配套废气应经活性炭吸附处理，废水应经中和沉淀后循环利用或符合 GB 8978 等相关要求后排放；
- f) 全流程密封防护。采样容器应采用聚四氟乙烯（PTFE）密封瓶，运输过程应使用防震防漏箱，保障样品无污染、无泄漏；实验室应配备试剂泄漏应急处理装置，严格防控试剂污染土壤或地下水；
- g) 痕量元素检测。应对痕量元素或微弱地球化学异常进行检测，具有对弱矿化信号识别的能力；
- h) 多维度数据联合解译。可测定多种元素含量、土壤 pH 值、有机质等指标，通过统计分析方法解析元素含量与 pH 值的相关性以及有机质对元素赋存形态的影响机制，支持地球化学异常解释；
- i) 非破坏性分析技术。可采用能量色散 X 射线荧光光谱（EDXRF）、近红外光谱（NIRS）对原状土壤进行表面扫描，获取元素半定量数据与有机质含量，保护土壤微结构。

6.2.3 水系沉积物地球化学测量技术

主要技术特点：

- a) 异常特征识别与背景区分。应排除岩石风化、土壤侵蚀等非矿化因素干扰，有效识别水系沉积物中与矿化相关的元素或化合物异常，以及区分自然背景值与目标异常；
- b) 复杂水体环境适用性。可适应河流、湖泊、海洋等多种水体环境，以及丰水期、枯水期、潮汐作用等动态水文条件，具有剔除砾石、有机质校正等抗干扰预处理能力，消除水体浊度、盐度及微生物活动对检测数据的不利影响；
- c) 污染控制。检测过程不应使用含氰、Hg 等有毒试剂，采样器具及分析设备应具备密封防水设计，试剂泄漏或样品不应外溢污染水体；
- d) 痕量异常检测。可实现对痕量元素或微弱地球化学异常的精准检定，具有对低丰度矿化信号的识别能力；
- e) 多维度数据联合解译。可支持沉积物元素含量、粒径分布、有机质结合态等多维度数据联合解译；
- f) 检测技术。宜采用低扰动采样设备或对样品原位无损检测技术。

6.2.4 水地球化学测量技术

主要技术特点：

- a) 异常特征识别与背景区分。应有效识别水体中与矿化相关的指标或化合物异常，区分热液活动或矿体溶解引起目标异常与自然背景；
- b) 复杂水体环境适用性。可适应淡水、咸水、温泉水等多种水体类型以及季节变化、径流强度、潮汐周期等动态水文条件；
- c) 污染防控。应采用无氰化物萃取、微波消解等清洁技术，禁止使用 Hg、Cr 等有毒试剂；采样瓶宜使用聚丙烯或硼硅玻璃材质，配备防漏瓶盖，运输过程应采用防震密封箱，避免试剂泄漏污染水体；
- d) 痕量异常检测。可依托高灵敏度分析技术实现弱信号捕获，可精准检测痕量元素或低浓度地球化学异常，增强弱矿化信号识别能力；可对较大范围的隐伏矿体进行异常识别；
- e) 多维度数据联合解译。可整合多源数据构建异常解释模型，判断元素迁移路径、追溯异常物质来源、分析水体化学类型与矿化的关联性；
- f) 检测技术。宜采用非侵入式或低扰动方法减少环境影响，减少对水体自然流动与生态结构的干扰。

6.2.5 生物地球化学测量技术

主要技术特点：

- a) 异常特征识别与背景区分。应有效对比生物体内目标元素或化合物含量与区域生物地球化学背景值，区分矿化引起的异常与自然变异；
- b) 复杂生态系统的适应性。可适配森林、草原、荒漠等多种生态系统及季节、气候动态变化；
- c) 生态保护。应采集非侵入性样本，不直接捕集或伤害个体，禁止使用重金属防腐剂进行样本预处理；
- d) 痕量异常检测。可依托高分辨分析技术实现生物微区信号解析，精准测量植物组织微区元素分布、识别矿化诱导的代谢异常、筛选与矿化相关的指示菌种；
- e) 多维度数据联合解译。可整合生物多维度数据构建矿化预测模型判断元素来源、量化生物应激响应强度、揭示生物对矿化元素的耐受机制；
- f) 生态友好型采样技术：宜采用非侵入式采样方法和原位分析技术，避免直接损伤生物个体；宜结合遥感技术辅助识别生物群落分布，优化采样点布局以减少对生态系统的扰动。

6.2.6 气体地球化学测量技术

主要技术特点：

- a) 异常成分识别与矿化关联。宜运用气相色谱-质谱联用、原子荧光光谱等技术，检测地下或地表气体中与矿化相关的特征成分；可通过与区域背景值对比识别异常，建立气体成分分布与矿产资源的空间关联，从而圈定矿化靶区；
- b) 复杂介质及环境适应性。可适配土壤气、地热气、岩石气等多种气体介质类型及气温、气压、抗降水干扰等动态环境条件；

- c) 环境安全。宜使用惰性材质容器避免气体吸附或反应实现无污染采样，采样接口宜采用金属波纹管密封；运输过程宜使用恒温防震箱，进行防泄漏设计；应在通风橱中解析高浓度有害气体样品，通过碱液吸收池处理尾气处理废气；
- d) 痕量异常检测。具备基于高灵敏度检测仪器的弱信号采集能力，采用预富集技术实现信噪比优化，支持气体浓度二维分布实时成像及异常源定位功能；
- e) 多维度数据联合解译。可整合气体成分、同位素及物理参数构建综合解释模型，实现同位素示踪、推断异常垂向运移路径、建立矿化概率预测模型；
- f) 生态友好型采样技术。宜采用非主动干预的被动式采样技术，避免泵吸式采样对土壤/岩石孔隙中气体自然扩散场的扰动；可通过长期原位测定气体地表释放通量及成分特征，识别与深部碳酸盐岩蚀变、烃类微渗漏等相关的异常信号，实现无接触式矿化靶区圈定。

6.3 遥感

6.3.1 光学遥感技术

主要技术特点：

- a) 异常成分识别与矿化关联。能通过高光谱成像仪获取地表或地质目标的连续光谱曲线，对比标准光谱数据库，识别与矿化相关的特征谱，可指示热液蚀变、辅助圈定铁矿化区域以及矿化导致的土壤重金属富集；
- b) 复杂地表与大气条件适应性。可适配裸岩、植被、水体等不同地表覆盖类型及气溶胶、云层等大气干扰；
- c) 环境安全。宜采用被动式探测，不宜主动发射电磁辐射；传感器镜头配备自动光圈和滤光片，能自适应调节进光量并过滤强光；
- d) 微弱异常与小目标识别。可通过高空间分辨率与光谱分辨率技术提升探测能力，识别厘米级蚀变矿物露头 and 提取线性构造与环形构造，提取亚像元级矿化信息以及突出微弱光谱差异；
- e) 空-地协同立体探测技术。宜基于多高度平台光学数据融合的立体探测体系，实现区域矿化带宏观圈定与露天矿边坡蚀变动态追踪，提升矿化信息提取完整性；
- f) 绿色能源与可持续运行。无人机及地面站宜配备太阳能板或氢燃料电池，可实现野外无外接电源作业，宜采用智能化电源管理，减少整体能耗；
- g) 被动探测。宜采用非接触式观测技术，不对地表植被、土壤微结构产生物理损伤，避免对野生动物视觉系统造成影响。

6.3.2 红外遥感技术

主要技术特点：

- a) 热辐射异常识别与地质关联。能通过热红外传感器获取地表或地质目标的热辐射亮度温度，结合地物发射率校正，识别与矿化、地热相关的矿化区热异常、地热活动信号、火山活动等温度异常；
- b) 复杂地表与气象条件适应性。可适配裸岩/荒漠、植被覆盖区、水体/冰雪等地表类型，针对云层遮挡、大气水汽吸收、地表热惯量差异等干扰，能通过多源数据融合、夜间成像及热红外辐射传输模型校正，实现不同环境下的热信号有效提取；
- c) 微弱热信号与小目标探测。可通过高分辨率技术与算法优化，识别矿山边坡裂隙的局部热异常，捕捉 0.5℃ 以下的微弱温度差异，区分矿体与围岩；
- d) 多平台数据融合与应用。可整合不同高度平台构建立体监测体系，对火山、地震前兆进行长期监测，能实现无人机对矿区实时热异常巡查，连续监测热流变化，提高异常解释的可靠性。

6.3.3 微波遥感技术

主要技术特点：

- a) 强穿透性与隐蔽目标探测。可穿透云层、植被等覆盖物，获取地表或地质目标的微波辐射或散射特征，识别岩石类型、断裂带、矿产露头的微波异常，辅助定位隐伏矿体；
- b) 主动发射。能主动发射电磁波并接收回波，实现昼夜连续观测以及在台风、暴雨等极端天气下仍能获取可靠数据；无人机电载雷达等可采用轻量化设计与低功耗元件；

- c) 被动接收。仅接收目标自身辐射的微波信号，对生态环境无干扰；
- d) 多频段互补与穿透能力优化。可实现高低频段的自由选择，适用于深层地质结构探测或矿化露头纹理等地表细节的分析。

6.3.4 高光谱和多光谱遥感技术

主要技术特点：

- a) 光谱分辨率与波段特性。多光谱遥感技术能覆盖可见光至短波红外，侧重对植被、水体、土壤等地表宏观特征的区分，高光谱遥感技术能捕捉地物精细光谱特征，支持物质成分的精准识别与定量分析；
- b) 矿化与蚀变识别能力。多光谱遥感技术、高光谱遥感技术均能通过特征光谱信息识别与矿化、蚀变相关的异常，指示含羟基、碳酸盐的矿物的热液蚀变带以及铁氧化物在可见光波段呈现强反射或吸收特征；
- c) 环境适应性。多光谱遥感技术、高光谱遥感技术均能适应植被、冰雪、裸岩等多种地表覆盖类型。宜通过波段组合分析、光谱指数计算等方法，有效识别不同地物特征；
- d) 数据解译与精度。多光谱遥感技术可通过波段组合提取地物类别信息，高光谱遥感技术可实现对相似矿物的精细区分，提升微弱光谱异常的识别精度，多光谱遥感技术和高光谱遥感技术的协同可优化矿产勘探中的目标定位效率。

6.4 钻探

6.4.1 液压钻机钻探技术

主要技术特点：

- a) 高效能动力系统。具有高效能动力系统，功率密度高、扭矩大，可适应复杂地层的高效钻进；
- b) 精准控制与自动化。具有实现精准控制与自动化的功能，可通过液压伺服系统实现转速、压力、进给量的精准调节，实现自动化钻孔参数优化；
- c) 模块化设计与工况适用性。具备模块化与灵活性特性，快速更换钻头、钻杆组合，可适应多种工况；
- d) 低噪音与低振动设计。宜通过优化机械结构与液压系统设计，降低作业噪音和振动对周边生态的影响；
- e) 极端环境适应性。在高温深井环境中能防止液压系统易过热失效，在极地低温环境中能防止液压油黏度剧增；
- f) 环境风险防控。能降低环境影响，防止液压油泄漏，能处理含重金属和油污的钻屑与泥浆；
- g) 低冲击钻进工艺。宜采用低冲击钻进技术，减少对地质结构的物理扰动及孔壁稳定性破坏。

6.4.2 定向钻探技术

主要技术特点：

- a) 高精度轨迹控制能力。应集成随钻测量与旋转导向系统，实时动态调整钻孔轨迹，精准实现水平钻进、多分支钻孔或三维空间轨迹控制；
- b) 非开挖与低干扰作业。宜优先采用非开挖技术，最大限度减少地表开挖面积与作业干扰；
- c) 复杂地层适应性。应具备穿越硬岩、破碎带等复杂地质条件的卓越能力；
- d) 大深度与超长距离钻进优化。可提升大深度或超长距离钻孔的轨迹控制精度，有效降低因多次纠偏造成的资源消耗；
- e) 低扰动钻进工艺。可优化钻进压力与转速控制策略，最大限度减少对地质结构的物理扰动及孔壁稳定性破坏；
- f) 环境风险防控。能通过全流程污染控制与实时地质扰动监测技术，系统性降低环境污染风险与地质扰动风险；
- g) 随钻地质信息采集。能在钻进过程中获取岩性、孔隙度等多维度地质信息，减少重复钻孔需求。

6.4.3 自动化智能化钻探技术

主要技术特点：

- a) 高精度感知与闭环控制。宜采用高精度传感器与闭环控制系统，获取钻机自动调节钻压、转速、进给速度等关键参数；
- b) 实时数据驱动的智能决策。宜通过传感器和数据采集系统对钻探过程中的重要参数进行实时监测，分析钻探数据与地层信息，自主优化钻速、进给策略及路径规划；
- c) AI 赋能的全流程自动化。宜通过 AI 算法实现钻机自动定位、自动钻进、自动换杆等功能，减少人工干预，提高作业连续性。

7 开采

7.1 露天矿山

7.1.1 内凹式开采技术

主要技术特点：

- a) 精准开采与稳定性控制。宜采用高精度地质测绘与爆破控制技术，精确定位矿体边界，严格控制开采边界精度，避免超挖或欠挖；宜具备基础岩体稳定性控制能力，预防因开采引发的局部塌陷或结构失稳；
- b) 地质适应性。宜依据山坡露天矿的山体坡度、岩层分布等地形地质特征，在开采区域四周预留规定宽度的未开采隔离带，构建内凹型开采空间；
- c) 地灾防治。预留的未开采隔离带应作为天然缓冲屏障，用于降低边坡整体暴露面积与高度，延缓边坡岩体风化速度，从源头上降低滑坡、崩塌等地质灾害风险；
- d) 减少剥离量。可充分利用山坡地形的自然临空面，将初始剥离作业集中于山体内部区域，最大限度减少前期地表大范围表土及围岩的剥离量；
- e) 水土保持。四周预留的未开采隔离带应保留山体原有植被与表土结构，维持地表径流的自然路径，降低暴雨冲刷引发泥石流的风险；应随开采台阶下降，在各生产台阶同步设置截水沟、沉砂池等水土保持设施，形成“分层拦截、分级沉淀”的径流控制系统，有效截留雨水、降低坡面径流流速、防止水土流失；
- f) 粉尘污染控制。开采作业应集中于内凹开采空间内，利用四周未开采山体形成的天然地形屏障，抑制爆破、铲装等工序产生的粉尘向矿区外围扩散；应配套喷雾降尘、负压吸尘等粉尘控制设备，进一步缩小粉尘扩散范围；
- g) 废水循环利用。建立封闭或半封闭的废水收集系统。各开采台阶产生的矿坑水、设备冲洗水应通过截水沟汇入底部沉淀池，经处理达标后回用于生产过程；
- h) 噪声隔离效应。利用未开采山体对机械噪声的天然阻隔效应，结合选用低噪声设备与设置隔音屏障等措施，确保矿区边界噪声符合相关标准限值要求。

7.1.2 内排式开采技术

主要技术特点：

- a) 内部排土与稳定性控制。能有效利用采空区进行内部排土，减少外部排土场占地需求，并具备基础废石堆放稳定性控制能力，防止排土区域塌陷或滑坡；
- b) 地质适用。应适用于对排土场要求较高的区域，以及地形平坦或缓坡、大规模露天开采的矿区；
- c) 污染防控设计。爆破、装运、排土过程应采取降尘、抑尘措施，不产生超标扬尘或有害物质扩散，符合 GB 16297 要求；应对基础防渗与排水进行设计，避免废石淋滤液污染土壤及地下水；
- d) 同步生态修复。在回填废石层达到设计标高后，及时开展表土覆盖、土壤改良及植被预修复作业，加速排土场生态系统重建；
- e) 地质结构保护。宜采用阶梯式排土结构与柔性边坡防护体系，通过阶梯式结构分散荷载、柔性护坡适应变形等机制增强稳定性并降低地质扰动；
- f) 废石资源化利用。宜配置移动筛分站，在排土过程中分拣出可利用的废石和保存分离的表土；
- g) 排土-复垦一体化。应遵循“前期排土规划即后期复垦设计”的理念，在设计中将排土场堆筑形态、台阶参数与未来土地复垦目标深度融合。

7.2 地下矿山

7.2.1 保水开采技术

主要技术特点：

- a) 含水层保护与突水防控。宜采用留设安全防水煤柱、注浆加固底板隔水层、动态监测地下水流程等技术手段，避免隔水层隔水性失稳，保障工作面的安全高效开采和含水层结构稳定；
- b) 低扰动含水层保护。宜采用充填开采、限高开采等工艺，从源头减少开采活动对含水层的扰动；
- c) 疏干水资源化与含水层修复。坚持水资源价值最大化与生态功能可持续原则，宜对矿井疏干水进行资源化利用，可实现“矿水共采”，同时通过注浆加固隔水层、铺设防渗膜等措施恢复含水层储水功能；
- d) 水文环境容量控制。实施“限采-保水”动态调控和坚持矿区水文环境的扰动量小于区域水文环境容量的原则，宜在雨季减少开采量，旱季启用储水设施补水；
- e) 人工干预加速水文恢复。开采过程中同步实施人工补径排技术或生态储水结构建设，宜在地表修建渗水井、蓄水池，雨季收集雨水回灌地下，在采空区上方种植深根植物，增强土壤蓄水能力。

7.2.2 充填开采技术

主要技术特点：

- a) 力学稳定性控制。应通过合理的充填料和胶凝材料配比，保障充填体的强度和稳定性，有效支撑采空区顶板，抑制岩层垮落和地表沉降；
- b) 固废资源化与环境减负。应利用采矿过程中产生的尾矿、废石等固体废弃物，减少固废堆存和占地面积，降低环境负荷；
- c) 地表与生态保护。可通过高精度沉降控制与水文系统保护，构建地表生态安全屏障，有效保护地表建筑物、农田和水体，避免因沉降导致的房屋开裂、耕地损毁等问题发生，以及因地下水漏失导致的植被枯萎、河道干涸等生态问题；
- d) 资源高效利用。可通过充填体支撑，提高回采率，减少采矿过程中的混废现象，降低矿石贫化率；
- e) 环境安全保障。禁止使用含重金属、持久性有机物等有毒有害物质的充填材料。

7.2.3 煤与煤层气共采技术

主要技术特点：

- a) 协同作业与安全保障。可通过预抽采、采动卸压抽采等技术，在煤炭开采前或过程中降低瓦斯含量，避免瓦斯超限引发爆炸风险；
- b) 精准抽采。根据采煤工作面推进速度，可动态调整瓦斯抽采速率，针对断层带、高渗透率煤层等瓦斯富集区实施定向抽采，提高资源回收率；
- c) 地质适应性。能适应不同煤层厚度、倾角、埋深及地质构造；
- d) 安全防护。抽采瓦斯应具备防爆与密闭设计，防止瓦斯泄漏或积聚引发安全事故；
- e) 减少温室气体排放。宜采用膜分离或低温蒸馏等工艺，提高瓦斯回收量，提高瓦斯的浓度，减少瓦斯排放；
- f) 梯级利用。回收的低浓度瓦斯可用于矿区供热或瓦斯发电，高浓度瓦斯可用于工业燃料或精细化工；
- g) 抽采时序与结构优化。可通过调整采煤与抽采的时间顺序，减少开采对煤层及围岩的扰动，降低瓦斯逸散通道的形成概率，抑制岩层裂隙过度发育引发的瓦斯突出风险；
- h) 增透。宜采用物理破岩、化学溶蚀、热力致裂等多元增透技术，提高煤层裂隙范围、渗透率、透气系数，提升瓦斯的抽采效率。

7.2.4 煤炭地下气化技术

主要技术特点：

- a) 可控气化反应与燃烧控制。可通过温度、压力、气化剂注入量等参数调控，实现煤层气化区域的精准控制，防止燃烧失控导致的资源浪费或地层塌陷；

- b) 地质适应性与腔体稳定性。适应不同煤层赋存条件及地质构造,可通过抗地层扰动的基础设计,保障气化腔体稳定性与气体传输通道完整性;
- c) 环保性与污染防控。气化过程不产生或少产生有害气体泄漏,不造成地下水污染,应符合 GB 8978 和 GB 16297 要求,应对基础气体监测、密闭隔离设计,避免污染物扩散至非目标区域;
- d) 人工屏障与污染阻断。宜在燃空区与含水层间设置物理屏障或化学阻隔层,避免重金属、酚类等气化副产物渗入地下水;
- e) 渗透率提升与反应优化。宜采用气体净化与碳封存一体化技术,减少硫化物、CO₂等有害成分排放。

7.2.5 煤-水-热共采技术

主要技术特点:

- a) 模型构建。构建深部热害威胁下热-流-固时空耦合模型,揭示采煤与地热、矿井水开发之间的相互协同机制;
- b) 三区划分。规划超前采热区、同步采热区、滞后利用区“三区”的煤热开采时序;
- c) 时空协同。通过智能优化研究,优化采煤与地热开发的时空序列,解决采煤与地热-矿井水开发的协同优化的空间与时间冲突;
- d) 采热。在精准定位抽水靶区,采用耦合热泵机组,对高温及余热水热源进行采热;
- e) 回灌。消热后应用分层加压注入技术,开发“一层一压,一孔多靶”的高效回灌模式,实现水害消除、热害治理与地热开发三重目标;
- f) 废弃矿井利用。开采煤炭后保留的巷道用于建立热能交换站,抽采地热水用于井下降温或地面供暖,尾水回注至热储层实现循环利用;
- g) 减损。采用分布式梯级制冷接力技术,减少冷量输送损失;同时通过热能交换设备将地热水热量转换为供暖或发电能源;
- h) 矿井水深度处理。采用先进的高矿化度矿井水深度处理工艺,将处理后的矿井水用于绿化、生产等环节。

7.2.6 富油煤地下热解技术

主要技术特点:

- a) 可控热解反应与产物利用。可通过精准控制温度、压力和反应时间,实现富油煤地下原位热解,生成高附加值的液态焦油、气态煤气和固态半焦;
- b) 地质适应性。能适用于埋藏深度适中、煤层厚度适宜、结构相对完整的富油煤储层;
- c) 抗扰动设计。热解腔体宜采用耐高压材料或化学固结技术,防止地层应力变化导致腔体变形、产物通道堵塞或泄漏;
- d) 环境安全与污染防控。宜采用水泥、膨润土注浆等通过人工屏障或防渗膜阻断热解区与含水层的水力联系,避免污染物扩散至非目标区域;
- e) 污染监测。在热解区域周边应布设地下水监测井,实时对污染物进行监测;
- f) 热能高效传递技术。宜采用超临界水热解或微波辅助加热等手段,提高热能传递效率;
- g) 重金属吸附。宜采用化学螯合剂或生物炭等手段吸附重金属,结合注浆等技术隔离污染扩散路径。

7.3 非常规采矿

7.3.1 堆浸开采技术

主要技术特点:

- a) 防渗漏设计。宜对堆浸场地进行防渗漏设计,降低环境污染风险;
- b) 环境保护。宜使用低毒或无毒的药剂。宜研发无氰浸金剂,减少氰化物的环境危害或使用生物堆浸技术利用微生物代谢活动溶解金属,实现绿色提取;
- c) 药剂特性。应具有较高的反应活性,与目标组分快速反应生成可溶性络合物;应具有较好的稳定性,在复杂环境中保持化学活性,避免分解或沉淀;

- d) 浸出液循环利用。宜通过沉淀、电解等工艺回收浸出后的废液，采用化学沉淀、离子交换或吸附材料去除废水中的重金属离子，废水重复用于浸出，减少药剂消耗和废水排放。

7.3.2 共伴生矿产协调开采技术

主要技术特点：

- a) 避免资源浪费。应通过优化钻孔布置、爆破参数及采装设备，实现主矿体与共伴生矿体的同步回采；
- b) 适应复杂地质条件。能适应不同矿体倾角、厚度及赋存深度等不同矿体组合及复杂地质条件；
- c) 地灾防治。开采过程应采取措施消除多矿体扰动引发地表沉降等地质灾害；应采用微震监测系统实时追踪开采扰动引发的岩体破裂；
- d) 回收率。宜采取选矿工艺优化等措施提升共伴生矿产综合回收率，宜采用破碎、磨矿等粗加工设施，减少重复建设，降低单位资源开采的综合能耗；
- e) 优化采场布局与开采时序。应遵循“先上后下、先易后难”原则，优先开采浅部共伴生矿，为深部主矿开采创造条件，对相互影响的矿体，应采用“分区开采、间隔支护”避免应力叠加。

7.3.3 控制爆破技术

主要技术特点：

- a) 精准能量释放与均匀破碎。宜控制爆炸过程的能量释放和介质破碎，使岩石破碎更加均匀，降低大块率，爆堆集中，提高爆破效率；
- b) 爆破控制。应将爆破范围、方向及爆破地震波、空气冲击波等危害控制在规定限度之内，使岩体按预设方向倾倒，避免威胁周边设施；
- c) 污染控制。应降低爆破作业对周围环境的影响，减少噪声、振动、粉尘和飞石等公害污染，保障周边居民和生态环境的安全；
- d) 有毒气体控制。宜选用低爆温、低毒性炸药，严控爆炸反应生成的 NO_x 、CO 等有毒气体量；
- e) 瓦斯安全。在瓦斯矿井中，宜采用抗静电、防爆型起爆器材，配合瓦斯监测系统，确保爆破过程无引爆风险；
- f) 精准建模控爆。构建高精度矿岩边界模型，明确矿体与夹层、围岩接触带，优化地质模型及孔网参数、起爆顺序；
- g) 精准爆破。宜基于矿区岩石分级，划分不同岩性区域爆破参数，实施高精度矿岩分界爆破，减少超挖；
- h) 降低贫化率。宜在矿体与围岩、夹层接触带缩小孔距，降低大块率，减少废石混入，降低矿石贫化率。

7.3.4 非爆破开采技术

主要技术特点：

- a) 安全低害开采。宜采用二氧化碳、液氧、电解水、水压致裂、机械等非炸药爆破方式破岩，减少开采振动、飞石、噪声和冲击波，降低人员伤亡和次生灾害；
- b) 环境保护。可减少粉尘、有毒有害气体的产生，无火花外露，降低环境污染；
- c) 生态保护。机械剥离法可通过优化切割路径与作用力分布，减少对围岩结构及地表植被的破坏；
- d) 完整取材。定向劈裂技术可使切割精度达厘米级，适用于高价值矿体的完整开采。

8 选矿

8.1 高效碎磨技术

主要技术特点：

- a) 多碎少磨原则。协同优化破碎、磨矿、分选全流程，宜通过高压层压破碎、超细粉碎与分级耦合等方式降低碎矿产品粒度，提升细粒级物料占比，减少磨矿负荷；
- b) 选择性解离技术。可利用矿石和脉石的硬度、解理、韧性等物理力学性质及晶体结构的差异，通过优化破碎方式，调整磨矿介质与流程参数，使破碎与磨矿过程优先沿矿物晶界发生；

- c) 精准分级技术。可通过高效分级设备与智能控制系统协同，实现粒度精准分离与高效分级，宜采用空气涡流分级机、水力旋流器、叠层高频细筛等设备，利用离心力、惯性力、流体动力学差异，对矿粒进行精确分级；
- d) 水资源循环系统。应构建以闭路水循环为核心的高效水资源循环利用体系，通过分级沉淀、过滤、絮凝等预处理工艺，去除循环水中的悬浮物、细粒矿物等杂质，防止其对碎磨设备造成磨损，宜采用膜分离、离子交换等深度净化技术，控制循环水中的硬度离子、重金属含量，避免因水质恶化影响浮选、磁选等后续分选效果；
- e) 耐磨材料应用。破碎机、磨矿机衬板或其他易磨损部位宜采用可回收的复合高效优质耐磨材料，分级设备关键部件宜采用碳化硅或聚氨酯等耐磨材料；
- f) 磨矿介质。宜选用高硬度、低损耗的轧制球、钢锻或陶瓷等作为磨矿介质；
- g) 智能控制系统。宜采用在线检测与智能控制系统，实现碎磨工艺参数的实时监测与自动调整。

8.2 预富集技术

主要技术特点：

- a) 智能识别与高效富集。宜采用 X 射线荧光分选（XRF）、激光诱导击穿光谱（LIBS）等技术，对矿石元素组成进行毫秒级在线检测，精准识别目标矿物，在矿石下落过程中实现单体级别的精准分离；
- b) 适应性。能针对煤矿、有色金属、非金属矿等矿石类型提供差异化预富集方案；
- c) 绿色环保分选。可优先使用重选、磁选、光电等物理分选与生物分选技术，减少化学药剂使用，分选过程严禁使用氰化物等有毒药剂，不产生或少产生有害废弃物；
- d) 短流程低碳工艺。宜选用集成化、智能化的短流程分选技术，实现复杂组分与目标元素定向高效分离；
- e) 能源效率优化。宜通过设备升级、工艺集成与智能控制，降低单位矿石预富集的能源消耗，提高能效水平；
- f) 资源回收。能通过精准分选技术与流程优化，提升目标矿物回收率并降低入选矿量。

8.3 干式分选技术

主要技术特点：

- a) 精准识别与高效分选。宜通过 X 射线荧光、激光诱导击穿光谱、高分辨率工业相机等技术，对矿石的元素组成、表面特征及内部结构进行毫秒级在线检测，精准区分有用矿物与杂质，在矿石传输过程中实现单体级精准分离；
- b) 粉尘与噪声协同控制。应配备多级除尘系统有效控制生产过程中产生的粉尘，分选设备宜采用弹性隔振基础与隔音罩，振动筛加装橡胶缓冲垫等措施有效控制生产过程中产生的噪声；
- c) 全粒度适应性。可通过差异化技术组合，实现对金属矿、非金属矿、煤矿等不同矿石类型及粗、中、细颗粒不同粒度的高效干式分选；
- d) 低碳节能。宜采用超导磁选设备、智能变频控制，降低单位矿石分选的能源消耗，提高能效水平；
- e) 细粒级分选。宜采用静电分选、摩擦电选、流化床分选等技术针对细粒级矿石进行分选；
- f) 复杂矿石差异化分选。宜针对矿物组成复杂、物理性质相近的矿石，采用光电光谱识别、复合力场分选协同技术，实现精准分离。

8.4 分选药剂绿色化技术

主要技术特点：

- a) 低毒环保药剂。应研发或选用低毒、低挥发性、低腐蚀性、高生物降解性等环境友好型分选药剂；
- b) 精准靶向分选。应实现目标矿物与脉石矿物的精准识别与分离。药剂具有特异性吸附功能，可定向吸附于目标矿物表面以及选择性抑制脉石矿物等特点；
- c) 快速降解特性。药剂具备高效环境降解能力，在自然环境中无长期残留风险；
- d) 广泛适应性。宜研发和使用具有绿色属性与多场景适用性的分选药剂，满足不同类型矿石及浮选工艺需求。

8.5 深度低碳高效脱水技术

主要技术特点：

- 极限脱水性能。宜通过物理场强化、设备创新及工艺优化，深度降低物料含水率；
- 环保型脱水助剂。可采用微生物发酵制备的多糖类絮凝剂，避免土壤和水体污染，可通过改变矿物表面润湿性和孔隙结构，提高过滤速度；
- 零污染脱水。宜采用密闭式脱水系统、微波选择性脱水及能量循环利用等技术实现废水零排放、化学零污染；
- 脱水时间降低。宜采用超重力离心脱水、陶瓷真空过滤及能量回收技术，缩短脱水时间、降低单位能耗、减少碳排放；
- 节能技术。宜采用高频振动脱水筛、超声波空化效应与能量优化技术，实现深度脱水、减少碳排放。

8.6 低品位复杂难选技术

主要技术特点：

- 精准解离与智能分选。可采用矿物微观特性解析与高效解离技术，结合智能化分选装备，实现目标矿物的精准分离；
- 绿色环保分选工艺。应采用无毒药剂、少药剂工艺及废弃物循环利用技术，减少高药剂消耗与降低高污染风险；
- 多金属协同回收。突破单一金属回收局限，实现多金属、稀贵元素的综合回收，以及尾矿、废渣中有效组分的协同提取；
- 分选效率。针对低品位复杂矿石中矿物嵌布细、分选难度大的特点，可采用高压脉冲电选、微泡浮选等分离技术，在提升分选回收率的同时降低能耗与药剂消耗，实现效率与低碳的双重优化；
- 高选择性分离。宜针对表面性质相似矿物，研发分子识别捕收剂。

8.7 选矿工艺优化技术

主要技术特点：

- 全流程效能。应通过“破碎-磨矿-分选-脱水”全流程协同设计、装备智能化升级及工艺参数动态匹配，系统性提升目标矿物分选效率与回收率，降低全流程能耗；
- 流程简化与高效重组。宜通过冗余工序合并、功能单元集成及短流程工艺创新，构建“紧凑化、高效化、低碳化”的选矿流程，解决传统工艺环节繁琐、能耗高的问题；
- 多指标平衡。宜通过多目标函数建模、动态权重分配及实时反馈调控优化选矿工艺，统筹优化回收率、品位、能耗、成本等核心指标，避免单一指标变化导致的系统性风险。

9 节能降碳

9.1 节能技术

9.1.1 清洁能源利用技术

主要技术特点：

- 多能互补集成体系。能实现太阳能、风能、地热能、生物质能等非化石能源的高效转化与协同利用，通过“光伏+风电+储能”等模式替代传统化石能源，提升能源供给灵活性；
- 能源系统稳定性技术。宜配置锂电池、飞轮储能等储能装置与智能调控系统，平抑自然条件波动导致的能源输出间歇，保障矿山生产连续供电；
- 高效资源利用与系统兼容。宜选择受地热能、生物质能等受天气、季节等影响小的能源形式，确保长期稳定供应，采用标准化接口设计，与现有矿山设备系统兼容，减少大规模改造；
- 智能化能效优化。宜通过物联网与大数据分析，动态优化多能源配比，提升系统综合能效；
- 兼容性。宜最大可能与矿山现有的设备系统兼容，无需进行大规模的设备改造或升级；

- f) 生态化土地利用。可优先在排土场、废弃矿区等矿区闲置土地或已破坏区域部署光伏阵列、风力发电机等设施，提升土地复用率。

9.1.2 无功补偿和谐波抑制技术

主要技术特点：

- 无功补偿。应对矿山电力系统中的无功功率进行补偿，提升功率因数；
- 谐波治理与电能净化。宜通过有源滤波、无源滤波及新型电力电子设备的协同应用，抑制矿山设备运行产生的谐波电流、电压畸变，避免补偿装置自身引入新的电能质量问题；
- 自适应智能调控。宜通过工况识别系统、补偿装置的动态调节机制减少电压波动和谐波，改善电能质量；
- 低耗高效设计。宜采用拓扑优化、智能休眠技术设计自动调整补偿容量和补偿方式，确保在不同的工况下都能保持最佳的补偿效果；
- 集成化综合治理。设计时宜选用多功能电能质量调节器，融合无功补偿、谐波抑制与电压暂降治理功能，降低补偿过程的自身能耗，提高无功补偿装置能效水平；
- 可靠性提升。应设计优化电磁兼容性与散热结构，降低设备运行噪声与故障率；
- 降损增效。通过无功功率补偿降低视在电流、谐波抑制减少附加损耗，系统性降低矿山电力系统的变压器负载与线路损耗。

9.1.3 闭环控制技术

主要技术特点：

- 实时监测与动态调控。应实时监测设备运行状态，根据反馈信息动态调整控制参数，使设备保持在最佳运行状态；
- 节能降耗。应根据实际需求调整设备运行参数，减少设备空转、磨损和低效运行，降低能源消耗和运行成本，延长使用寿命；
- 安全风险主动防控。应及时发现设备异常，预防故障发生，保障设备在安全范围内运行，降低事故风险；
- 多目标协同。可实现能耗、效率、安全等多目标的动态平衡，提升系统综合性能；
- 高速精准控制。应优化信号传输与处理架构，提升系统动态响应速度与控制精度。

9.1.4 能量回馈技术

主要技术特点：

- 高效能量转换。应提高将多余能量转换为可回馈形式的效率；
- 全工况适配能力。能适应多种不同类型设备、不同工况下的能量回收需求；
- 绿色零排放设计。在能量回收和回馈过程中，应不产生或少产生污染物排放；
- 回馈效率与储能优化。宜通过高功率密度变流技术、储能系统协同控制及能量管理策略优化，实现高效率的能量回馈；
- 电网友好型设计。宜通过低谐波逆变技术、宽范围电网适应能力及动态无功补偿，确保能量回馈过程对电网无污染、无冲击，兼容不同电压等级与电网结构；
- 高可靠性运行保障。在恶劣的工作环境下应能长期稳定运行，具备良好的防尘、防潮、防震、抗电磁干扰等性能。

9.2 机械能储存

9.2.1 抽水储能技术

主要技术特点：

- 能量转换与调节能力。通过电能驱动水泵将下池水体提升至上池储存势能，再通过水轮发电机将势能转换为电能释放，实现能量充放电循环，并具备基础容量调节能力，满足电网调峰、调频的基本需求，满足 GB/T 44934 要求；
- 可靠性与稳定性。水泵水轮机、电动发电机等核心设备的设计服务年限不小于 30 年，应采用双冗余控制系统，在传感器故障或通信中断时自动切换至备用模式，确保连续运行；

- c) 地质条件。上下池应建于地质构造稳定、岩体坚硬完整且透水性低的区域，避开断层、滑坡、泥石流等不良地质灾害风险区，上池应具备良好的天然或人工防渗条件，下池应有可靠的水源补给且水位变幅适应抽水蓄能运行需求；
- d) 低扰动生态安全运行。运行过程中应避免生态扰动，设备安装需符合库区地质承载能力及防渗要求；
- e) 环境友好性。运行过程中应无液态、气态污染物排放，且噪声排放符合环保 GB 12348 要求；
- f) 部署特性。适用于具备显著地形落差的矿区，满足水体容量及落差要求。能通过集中式大型水库实现能量储存，支撑区域电网稳定。

9.2.2 压缩空气储能技术

主要技术特点：

- a) 能量转换与调节能力。电能驱动压缩机将空气压缩为高压气体储存势能后，通过膨胀机将势能转换为机械能驱动发电机发电，完成能量充放电循环。应具备基础容量调节能力，满足电网调峰、调频及长时储能的需求；
- b) 储气系统稳定性。宜通过压力控制系统实现储气压力精准调控，结合压缩热回收系统与绝热保温设计，降低热力循环损耗，保障系统长期运行稳定性；
- c) 地下储气库设计。宜通过密封性检测、岩层稳定性评估及环境监测系统，防范气体泄漏、地下结构破坏、环境污染及超压过热风险；
- d) 地面储气罐灵活性。支持模块化、分布式部署，可灵活安装于工业园区、数据中心等场景，适用于土地资源紧张或无天然洞穴的区域；
- e) 资源循环。宜利用矿区废弃空间构建储气库，减少新增用地对自然地貌的占用，降低生态扰动；
- f) 污染防控。施工期采用废水沉淀回用系统、扬尘喷淋装置，运行期通过隔音罩、减振垫等措施控制噪声，设备油系统设置双重防泄漏围堰；
- g) 热管理能力。宜通过换热器与储热装置，实现压缩热的回收与再利用；
- h) 废弃空间利用。改造已闭坑的金属矿竖井、水平巷道，混凝土密封与压力测试达到要求后可作为储气腔体。

9.2.3 飞轮储能技术

主要技术特点：

- a) 功率密度与响应能力。能在短时间内释放或吸收大量能量，具备高功率密度和快速响应能力，满足电网调频、备用电源等场景对动态响应的需求；
- b) 控制颗粒物外泄。可通过封闭结构设计防止机械磨损颗粒外泄，满足环境安全要求；
- c) 低噪音控制。宜配备减振系统以及加装隔音罩，设备运行噪音满足 GB 12348 要求；
- d) 高循环效率。系统整体充放电循环效率符合 GB/T 44934 要求，不低于 80%；
- e) 使用寿命提高。飞轮转子宜采用高强度复合材料或碳纤维，提升结构强度并降低转动部件质量，允许更高转速以提高储能密度，宜通过磁悬浮轴承等技术降低机械磨损，延长使用寿命；
- f) 故障响应。系统具备故障自诊断功能，能在故障发生后 2 秒内触发保护停机，定位故障点。

9.3 碳捕集

9.3.1 燃烧前捕集技术

主要技术特点：

- a) 高效分离 CO₂。应通过特定的分离工艺和设备，利用物理或化学方法，实现对混合气体中 CO₂ 的高效分离；
- b) 适配矿山燃料及装置参数。应适配矿山典型燃料类型，匹配气化炉或重整装置输出参数；
- c) 维持连续分离效能。捕集单元应具备良好的稳定性和适应性，在燃料组分波动时应仍能维持连续分离效能，避免碳泄漏风险；
- d) 提升资源综合利用效率。可同步分离利用混合气中的 H₂、CO 等组分，实现资源化利用；
- e) 降低能耗。应采用新型吸附剂或膜材料，降低解吸环节的蒸汽消耗或压力调控能耗。

9.3.2 富氧燃烧技术

主要技术特点：

- a) 氧气浓度调控与燃尽率提升。应通过氧气浓度调控，提升燃料燃尽率，减少单位产出的燃料消耗；
- b) 高浓度 CO_2 烟气预处理。应实现烟气中 CO_2 浓度富集，为后续碳捕集提供高效预处理条件；
- c) 燃料适应性与燃烧稳定性。宜兼容煤炭、油气等典型化石燃料类型，适应燃料组分波动下的稳定燃烧；
- d) 氧燃比动态平衡控制。宜实现氧气输入与燃料供给的动态平衡，避免缺氧或过量氧导致的效率损失，应针对燃烧难点区域设计局部氧气浓度提升模块，改善燃烧均匀性；
- e) 低氮氧化物燃烧技术。可通过分区控温抑制 NO_x 生成，减少末端治理负荷；
- f) 高效余热回收。燃烧产生的高温烟气余热可通过多级换热装置回用于矿区其他工艺流程；
- g) 耐高温抗腐蚀材料。燃烧室应采用新型耐高温抗腐蚀材料，延长设备在富氧高温工况下的使用寿命；
- h) 多燃料掺烧优化。宜支持两种以上燃料在富氧条件下的掺烧优化，提升燃料灵活性及低碳属性。

9.3.3 化学链燃烧技术

主要技术特点：

- a) 实现空间分离与高浓度 CO_2 产出。应通过载氧体在燃料反应器与空气反应器间的循环，实现燃烧与再生的空间隔离，产出高纯度 CO_2 ；
- b) 保障载氧体性能。载氧体材料宜在还原-氧化循环中应保持化学活性与物理结构完整性，避免循环效率衰减；
- c) 适应多种燃料。兼容矿山常见燃料，能适应不同燃料热值及反应特性的差异；
- d) 维持热力学稳定性。反应器设计应实现燃料燃烧释热与载氧体再生吸热的动态匹配，保障连续运行热力学稳定性；
- e) 减少氮氧化物生成。宜通过缺氧燃烧机制减少氮氧化物生成，降低末端脱硝治理负荷；
- f) 提升载氧体性能的技术手段。宜采用多金属协同或载体修饰技术，提升载氧体反应速率与抗积碳能力；
- g) 余热回收与能效提升。宜通过多级换热回收燃料反应与载氧体再生环节的余热，提升系统综合能效；
- h) 支持多种燃料耦合燃烧。宜支持气态、液态或固态燃料在单一系统中的耦合燃烧，增强技术灵活性；
- i) 资源协同利用。宜对燃烧过程中产生的微量金属氧化物或灰分进行定向提取，实现资源协同利用。

9.3.4 燃烧后捕集技术

主要技术特点：

- a) 直接加装特性。应对原有燃烧设备进行大规模改造，可直接集成至矿山现有燃煤/燃气设备的烟气处理系统中；
- b) 燃料普适性。能适用于煤炭、天然气、生物质等多种燃料燃烧后的烟气处理，能灵活适配矿山能源结构的多元化需求，对混合燃料或燃料组分波动的场景兼容性强；
- c) 高效捕集效能。可通过优化物理吸附或化学吸收工艺，实现对烟气中 CO_2 的高效富集与分离，满足工业级碳捕集需求。
- d) 低碳吸附材料。宜采用生物基吸附材料或工业固废衍生材料，降低捕集剂生产环节的隐含碳排放；
- e) 长寿命与抗干扰能力。宜通过纳米涂层、复合膜等材料改性技术提高吸附材料或膜材料的化学稳定性和抗杂质干扰能力，延长使用寿命；
- f) 多污染物协同脱除。捕集装置可与脱硫、脱硝系统协同运行，同步脱除 NO_x 、 SO_2 及 VOCs；
- g) 灵活性与安全性。捕集过程应独立于燃烧过程，在不影响原有设备运行的前提下实现碳捕集，避免燃烧工艺调整带来的风险，适合矿山复杂工况下的稳定运行。

9.4 碳利用

9.4.1 矿化利用技术

主要技术特点：

- 矿化物稳定性要求。生成的碳酸盐矿物应具有高度的化学、物理稳定性，确保 CO_2 在自然环境下不会重新释放；
- 残留物安全达标。矿化反应产生的残留物应重金属含量低，避免浸出风险；
- 原料兼容性与适应性。技术应兼容矿区常见碱性固废或低品位矿石，适应不同原料的化学活性差异，充分利用矿区现有资源；
- 以废治废与资源循环。宜优选高活性矿物或工业废料，实现“以废治废”和资源循环利用；
- 高效低耗的反应加速技术。宜通过催化剂或微生物诱导技术加速常温常压下矿化反应速率，降低能源消耗；
- 动态优化反应条件。宜基于原料成分实时分析动态优化反应条件，提升 CO_2 固定效率；
- 多污染物协同固化。矿化过程中， CO_2 与钢渣中游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应过程中， SO_2 被碱性物质吸收生成 CaSO_4 ，经曝气氧化后形成稳定的 CaSO_4 沉淀，重金属离子通过化学沉淀和钢渣矿物表面离子交换吸附实现固定；
- 产物定向调控与高值化利用。宜定向调控矿化产物晶型与纯度，满足 GB/T 50107 要求；
- 热能回收与综合利用。宜利用矿化放热反应产生的热能预热原料或供应矿区其他用热需求；
- 生态修复与碳封存协同。矿化产物可直接作为矿区生态修复基材，同步实现碳封存与土地复垦。

9.4.2 化工利用技术

主要技术特点：

- 定向转化与原子高效利用。应通过催化反应精准控制 CO_2 转化路径，确保目标化学品（如尿素 $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 、甲醇 CH_3OH 、烯烃等）的定向生成，满足行业基准的碳原子利用率要求；
- 高选择性与低副产物。应采用新型催化剂抑制副反应、减少副产物，提高目标产物收率；
- 产物稳定性与碳封存。化工合成产物应具备长期化学稳定性，避免使用阶段 CO_2 再释放；
- 选用高效催化剂。宜选择高活性、高选择性和长寿命的催化剂，以降低反应能耗并提高转化率；
- 生物催化路径。宜利用微生物或酶催化体系，在常温常压下实现 CO_2 生物转化，合成生物燃料或生物基化学品。

9.4.3 生物利用技术

主要技术特点：

- 稳定碳固定。应通过生物载体实现 CO_2 的稳定固定与转化，避免生物降解过程中 CO_2 的二次释放；
- 原料适应性。应兼容不同浓度与来源的 CO_2 ，耐受原料中常见杂质；
- 生态安全性。生物代谢产物应无毒性物质残留或基因污染风险；
- 低碳节能。应利用光合微生物直接耦合光能转化与 CO_2 固定，降低外部能源输入需求；
- 高附加值产物导向。宜定向调控生物代谢路径生成高附加值产物，替代传统化工原料；
- 协同修复矿区复合污染。可降解 CO_2 与矿区其他污染物，扩展生态修复功能；
- 耐极端环境的生物选育。宜选育耐高温、耐酸碱性菌株，适配矿区特殊工况；
- 副产物循环利用。宜将生物反应副产物循环用于矿区土壤改良或生物能源生产，实现零废弃物排放。

9.4.4 地质利用技术

主要技术特点：

- 与传统驱油方法协同。应与传统水驱、化学驱形成协同，在中高渗油藏优先采用 CO_2 驱，提升驱油效率；
- 高效驱油性能。应实现 CO_2 对目标油藏的原油有效驱替，达到行业基准的原油采收率提升效果；
- 采收率提升与化学稳定性。 CO_2 应与地层水、原油保持化学惰性，避免生成 CaCO_3 沉淀或 H_2S 腐蚀性物质，通过混相驱替或非混相驱替，使原油采收率较开发初期提升；

- d) 地质结构要求。 CO_2 注入层位应具有稳定盖层和低渗特性，防止泄漏污染地下水源或地表生态系统；
- e) 超临界状态调控。应通过压力/组分调控实现超临界 CO_2 与原油的混相驱替，突破非混相驱效率限制；
- f) CO_2 捕集回注。宜对伴随原油产出的 CO_2 进行捕集回注，构建闭环碳流系统；
- g) 复合技术集成。宜结合 CO_2 驱油与储层压裂/酸化改造，激活低渗透油藏开发潜力。

9.5 碳封存

9.5.1 地质封存技术

主要技术特点：

- a) 封存地质体。封存地质体应稳定，封存容量大，时间长，安全性强；
- b) 匹配储层物性特征。不同的地质宿体有不同的物性特征，应匹配储层物性特征，满足 CO_2 有效注入与分布需求，对于枯竭油气藏和深部咸水层，其孔隙度和渗透率应较好，以利于 CO_2 的注入和在储层中的扩散，使 CO_2 能够均匀分布在储层中，提高封存效率，对于难开采煤层，要考虑煤层的透气性、吸附特性等，确保 CO_2 能够顺利注入并被煤层有效吸附；
- c) 不破坏周围环境。 CO_2 与储层岩石/流体相互作用应不产生有害化合物或地质结构破坏；
- d) 实现“废地复用”。宜研究闭坑后的煤矿、金属矿巷道作为封存场地的可行性；
- e) 防泄漏。应实现地质盖层、岩层吸附、溶解矿化等多重机制防止泄漏；
- f) 应急响应。应建立泄漏应急响应机制，配备激光雷达实时监测 CO_2 浓度，联动地下液压封隔器，阻断泄漏路径；
- g) 矿化固定。宜利用富含钙镁矿物的储层促进 CO_2 原位矿化固定。

9.5.2 海洋封存技术

主要技术特点：

- a) 封存区要求。目标封存区域应具备稳定的海底地质构造，避免断层活动或沉积物滑移导致的封存失效；
- b) 风险可控。封存后 CO_2 泄漏风险应较低，对海洋生态系统的潜在影响可控；
- c) 生态系统保护。封存过程应不破坏深海生态系统平衡或生物群落结构；
- d) 应急响应体系。应部署水下传感器网络实时监测 CO_2 浓度与水体 pH，联动深海机器人搭载凝胶注入装置，4 小时内响应并封堵泄漏点；
- e) 立体存储体系构建。宜构建浅层溶解封存与深层地质封存的立体存储体系；
- f) 原位矿化增强。宜利用海底玄武岩等矿物层促进 CO_2 原位矿化；
- g) 生物泵机制。宜通过投放铁营养盐促进浮游植物爆发式生长，增强 CO_2 从表层向深海的垂直输送。

9.6 碳运输和生态碳汇

9.6.1 碳运输技术

主要技术特点：

- a) 防泄漏设计。运输系统应全流程密封，管道运输采用抗腐蚀钢材，避免 CO_2 泄漏造成土壤、水体的酸化以及对人员造成危害；
- b) 实时监测与应急响应。运输过程应配备传感器实时监测压力、温度、泄漏等参数，集成智能预警系统，及时发现问题并处理潜在泄漏风险；
- c) 合规性。应符合 GB/T 42797 等相关要求；
- d) 相态运输支持。应支持 CO_2 的气态、液态、超临界态等多种物理相态运输，适配不同捕集源的输出条件；
- e) 系统兼容性。管道运输应匹配捕集端输出参数，确保与上游捕集装置和下游利用/封存环节无缝衔接；
- f) 相态调控技术。应采用压缩、液化或超临界状态等技术提升运输效率，减少运输体积；

- g) 自动化管理。应采用物联网、大数据分析实现运输路径优化、设备状态监控及故障预测，减少人为操作失误，提升运输可靠性；
- h) 材料与设备耐久性。管道材料应具备高抗压性和抗腐蚀性以及长期运行的可靠性。

9.6.2 生态碳汇技术

主要技术特点：

- a) 增强碳固定能力。宜通过矿区土壤改良、植被重建、水体生态修复等方式，提升土壤、植被、水体等载体的碳固定效率，宜利用遥感技术、地理信息系统及地面监测网络，实时追踪碳汇量变化，建立可计量、可核查的碳汇数据库；
- b) 整合多层次固碳路径。宜整合地上植被、地下土壤、水体微生物等多层次固碳路径，形成立体碳汇网络；
- c) 构建耐极端环境的高固碳植物群落。应选择耐旱、耐贫瘠、抗污染的乡土植物，结合基因改良技术培育高固碳品种，采用混交林、草灌结合等模式，增强植物群落对干旱、高温、土壤重金属等极端环境的适应性，确保碳汇功能的长期稳定性，可通过多样化物种搭配，提升生态系统对气候变化的缓冲能力，避免碳汇能力因气候异常大幅下降；
- d) 废弃物资源化固碳。宜将采矿废渣、煤矸石、农作物秸秆等废弃物通过热解技术转化为生物炭。可利用尾矿中的矿物质与 CO_2 发生化学反应，形成碳酸盐类物质实现碳封存。

10 智能化

10.1 自动化技术

主要技术特点：

- a) 能耗与效率优化。能通过物联网实时采集设备能耗数据，结合大数据处理与能效模型动态生成优化策略，利用自动化控制系统对电机转速、泵机功率、通风频率等参数进行调整；
- b) 安全监测与隐患处理。应通过自动化传感器实时采集矿山生产环境、设备状态、人员位置等数据，利用智能化算法自动分析并识别安全隐患，触发自动化控制系统；
- c) 设备自动启停与远程操控。基于生产流程的预设逻辑或人工指令，可通过自动化控制系统实现设备的自动启停和远程操控；
- d) 系统集成与协同作业。宜与矿山智能决策系统高度集成，通过可视化平台化操作和数据库规范统一，实现跨环节数据驱动的协同作业；
- e) 功能定制化与场景适配。基于矿山设备的物理特性和工艺需求，宜通过定制自动化控制逻辑实现设备的自动化功能；
- f) 数据存储与健康管理。宜通过数据库存储设备历史、实时、预警数据，运用图表分析、算法模型评估设备运行健康状态。

10.2 智能设备

主要技术特点：

- a) 模块化设计。采用标准化模块设计，动力模块、传感模块、执行模块等功能单元独立设计，支持快速拆卸、维修与更换，减少停机时间，提升设备可靠性与生命周期管理效率；
- b) 远程升级能力。支持空中下载技术（OTA）在线升级，通过云端平台实时推送软件更新，可实现功能自动迭代，保障设备在硬件生命周期内持续满足生产需求；
- c) 安全防护。宜集成物理防护、电子防护、智能防护等三级安全防护体系，结合人员定位与设备联动，保障人员安全与资产稳定运行；
- d) 清洁能源驱动。大型作业设备宜采用电动或其他清洁能源驱动，减少化石燃料的消耗和排放，降低环境污染；
- e) 优化能源效率。可通过流体力学设计、能量高效回收、智能负载平衡，动态调整设备输出功率；
- f) 自动化与智能化集成。融合视觉、激光雷达、倾角传感器等多源传感器以及边缘计算单元、5G/6G 远程操控系统，实现设备自主导航、路径规划、协同作业。宜通过 AI 算法实时优化生产流程，提升效率的同时降低人为操作风险；

- g) 健康管理系统。内置物联网监测模块，实时采集设备振动、温度、油液状态等数据，通过大数据分析，自动生成维保计划，预警潜在故障；
- h) 数据驱动与决策支持。具有生产、能耗、安全等数据采集能力，可通过边缘计算与云端平台整合，输出可视化生产看板、能耗分析报告、设备效率评估报告等，为资源配置与生产调度提供支持；
- i) 系统兼容性。提供标准化 API 接口、支持 OPC UA 通信协议、通过边缘计算网关实现协议转换与数据交互，支持与矿山现有的 ERP、MES、安全监控等系统无缝对接，实现数据跨平台流通；
- j) 自适应调节功能。基于模糊控制算法、神经网络模型，可实时感知矿石硬度、环境温湿度、上下游设备负荷等工况变化，自动调节挖掘力度、行驶速度、电机功率等工作参数，保障全流程稳定运行。

10.3 机器人技术

主要技术特点：

- a) 自主适应与决策能力。可根据环境变化和任务要求，自主运行状态下实时调整工作策略、路径规划、安全策略及自主运行；
- b) 远程操控低时延与可靠性。远程操控系统应满足低时延、高可靠性要求；
- c) 可更换动力系统与高防护等级。充分考虑作业环境特殊性，可更换 IP67 以上防护等级的电动动力系统，提升持续作业能力；
- d) 小型化与便携性。在保障功能的前提下，体积向小型化、便携式方向优化，提升机器人工作效率和环境适应能力；
- e) 多功能集成设计。可通过集成多种功能，实现远程操控以及环境及自身状态参数采集、上传功能。

10.4 数字孪生技术

主要技术特点：

- a) 高精度三维地质模型。应反映矿体形态、岩层分布、构造特征等，实现资源储量动态更新与开采方案优化；
- b) 建模与仿真功能。应涵盖几何结构、物理特性及运行逻辑等全要素建模，实现生产作业能耗模拟、设备协同效率分析等数字化预演功能；
- c) 多源数据实时同步。应实时采集矿山环境、设备状态、生产指标等数据，同步更新数字孪生体状态；
- d) 仿真驱动的闭环优化。应基于实时数据模拟矿山运行场景，通过仿真结果反向优化物理系统参数。

10.5 大数据大模型技术

主要技术特点：

- a) 自动识别并控制污染源。可通过传感器数据结合计算机视觉算法或时序数据分析实现污染源定位；
- b) 统一数据标准与多维度整合。应建立统一数据标准，整合地质构造、设备工况、环境参数、生产等指标，实现结构化数据与非结构化数据的时空对齐、统一存储与管理；
- c) 生产数据驱动的优化与调度。应收集和分析矿山生产数据，实现生产流程的优化和智能调度，为决策提供科学依据，避免资源浪费和过度开采；
- d) 动态调整与应急响应。宜基于井下人员定位、设备故障报警等实时数据重新调度资源，及时应对突发事件；
- e) 能源优化与效率提升。应优化能源使用方式，减少电力和燃料消耗，提高能源利用效率；
- f) AI 技术栈与云协同。可通过视觉识别、自然语言处理（NLP）、预测分析等技术，实现边缘侧实时推理与中心云模型训练。

10.6 信息化集成技术

主要技术特点：

- a) 环境监测与污染源控制。可通过环境监测系统，自动识别并控制污染源，联动除尘降尘设备，减少有害气体和粉尘排放；
- b) 能源监测与优化。可通过能源监测系统，分析能耗变化情况，优化能源使用，减少电力、煤炭、汽油、工业用水、用气等能源的消耗，提高能源利用效率；
- c) 地质与开采计划优化。可通过现场取样及地质变化情况监测系统，优化开采计划编制和执行，避免资源浪费和过度开采；
- d) 全流程数据驱动决策。可通过计量、外销、能耗等监测系统收集和分析矿山生产数据、销售数据、能耗数据，为决策提供科学依据；
- e) 内外部数据共享与协同。宜整合矿山内外部信息资源，实现矿山、集团、监管等部门数据共享和业务协同；
- f) 智能调度与动态调整。可根据实时生产数据、车辆安排情况、运输道路情况、调度平台智能化算法等和智能算法生成优秀的调度方案，结合生产实际情况，及时应对突发事件，保障生产的连续性和稳定性；
- g) 技术架构与安全保障。采用“边缘-平台-应用”三级架构，统一数据编码规范，可实现跨系统交互，具备工业防火墙、容灾备份等数据异常处理能力。

11 环境治理

11.1 粉尘治理

11.1.1 机械除尘技术

主要技术特点：

- a) 特定粒径粉尘高效捕集与基础空气质量保障。针对 $\geq 10\mu\text{m}$ 粗大颗粒粉尘具备高效捕集特性的技术优势，结合工业生产、矿山开采、建筑施工等典型应用场景，可通过精准控制粉尘粒径分布区间的捕集效率，满足工作环境空气质量符合 GBZ 2.1 的要求；
- b) 低能耗与能效优化。在相同粉尘处理工况下，重力沉降室、惯性除尘器等无动力机械式除尘技术的运行能耗应显著低于过滤式、静电式除尘技术；对于旋风除尘器等动力型机械式设备，可通过优化流场结构，降低单位除尘量的能源消耗；
- c) 防二次扬尘。应通过灰斗密封结构优化、清灰机制改良等设计，有效抑制二次扬尘问题；
- d) 无二次污染要求。纯物理分离过程需不应引入化学药剂，除电磁、噪声污染外无其他新增污染源，满足 GB 3096 等相关要求；
- e) 增强微细颗粒捕集。对微细颗粒捕集效率较低，可结合过滤、静电等技术实现全粒径粉尘治理；
- f) 低阻力与噪声控制。通过流线型气流通道设计降低系统运行阻力，可加装消声结构控制噪声污染；
- g) 集成化与场景适配。宜采用模块化集成结构，通过紧凑布局和流场优化同步减少设备体积与风阻损失，从而适用于井下巷道、隧道施工等狭窄空间及可快速拆装转场的移动式作业场景，兼顾狭窄空间下的安装便利性与除尘效率。

11.1.2 电除尘技术

主要技术特点：

- a) 高效细粉尘捕集与低二次污染。可通过高压电场使粉尘荷电，提升细粉尘（如 $\leq 1\mu\text{m}$ ）的捕集效率，适用于中低粉尘浓度环境的深度净化，满足 GBZ 2.1 要求，除尘过程无需添加化学药剂，应通过脉冲清灰、臭氧催化分解等设计，臭氧排放浓度符合 GB 3095 的要求；
- b) 电源稳定性与宽工况适应性。应配备稳定可靠的供电系统，可根据粉尘浓度、粒径分布等工况动态调节电场参数，保障不同负荷下除尘效率的稳定性；
- c) 高比电阻粉尘适应性与防逃逸设计。宜通过脉冲供电、电极结构优化等技术，改善对高比电阻粉尘的捕集效果，可通过芒刺电极、气流均布装置等抑制微细颗粒二次逃逸；
- d) 高频智能供电与能耗优化。宜采用高频开关电源及智能控制系统，根据实时粉尘浓度动态调整供电功率；

- e) 长周期运行与低维护需求。设备结构宜紧凑，除尘元件耐磨性强，可实现连续运行时间长，清灰周期长、维护成本低。

11.1.3 过滤除尘技术

主要技术特点：

- a) 高效过滤与密封优化。宜通过滤料的筛分、惯性碰撞等作用，对各类粒径粉尘实现高效捕集，满足 GB 16297 要求与 GBZ 2.1 要求，设备应采用密封结构设计，防止粉尘旁路泄漏；
- b) 单一污染物高效处理。主要针对工业粉尘实现高效净化，虽对 SO_2 、 NO_x 、VOCs 等气态污染物无直接处理能力，可与脱硫、脱硝、活性炭吸附等技术协同应用，实现多污染物一体化控制；
- c) 能耗特性与阻力管理。系统运行阻力高于机械式除尘，可通过滤料表面疏水处理、脉冲清灰频率优化等手段降低风阻能耗，延长滤料清洁周期；
- d) 滤料寿命与环保设计。滤料材料可采用耐磨聚酯纤维或可回收/可降解材质，通过表面抗黏附处理减少粉尘黏结；
- e) 表面处理技术强化。可采用涂层、覆膜、烧毛等工艺优化滤料表面结构，降低高湿度或黏性粉尘的堵塞风险，维持稳定过滤效率。

11.1.4 湿式除尘技术

主要技术特点：

- a) 稳定高效的粉尘捕集能力。宜通过雾化喷淋、文丘里效应等机制，实现对各类粉尘的持续捕集能力，满足 GB 16297 与 GBZ 2.1 要求，确保不同工况下核心除尘效能无明显衰减；
- b) 环保合规性。除尘过程不应添加无需化学药剂，产生的废水经沉淀、过滤等预处理后可满足 GB/T 19923 和 GB 8978 要求，无二次污染风险；
- c) 能耗优化与智能调控。风机、水泵等关键能耗单元配备变频调速装置，可根据粉尘浓度实时调节运行功率；
- d) 气液分离与防二次夹带设计。气液分离装置应保证处理后的气体中无明显液态残留，杜绝介质二次夹带；
- e) 超细颗粒捕集强化。宜通过流场优化或界面改性技术，提升对 $\text{PM}_{2.5}$ 及以下超细颗粒的捕获效率；
- f) 循环经济与资源回用。应具有多级水处理模块，支持除尘介质的高纯度循环再利用；
- g) 多功能协同治理。宜采用湿式洗涤工艺，在碱性液体环境中，通过碱性溶液与 SO_x 发生中和反应，同步实现粉尘颗粒捕集与酸性气体的吸收。应根据目标污染物的种类和浓度水平，专项优化碱液类型、液气比、反应停留时间等关键参数，以实现多污染物协同治理目标。

11.1.5 复合式除尘技术

主要技术特点：

- a) 多原理协同强化除尘效率。应整合至少两种不同除尘机制，利用物理分离、过滤拦截、静电捕集等原理互补，排放指标符合 GB 16297 与 GBZ 2.1 要求；
- b) 环保合规与二次污染控制。可通过封闭式结构与废弃物处理模块，确保除尘过程无粉尘外溢，废水排放指标满足 GB/T 19923 和 GB 8978 要求；
- c) 宽域工况适应性。能适应高温、高湿、高腐蚀性气体环境，以及粉尘浓度、粒径分布的动态变化，保障稳定运行；
- d) 能耗优化与能量回收。可通过多级除尘单元协同运行与能量回收机制，实现整体能耗最小化；
- e) 超微颗粒深度治理。宜针对 $\text{PM}_{1.0}$ 以下超细微粒，增加梯度拦截或荷电增强机制，减少逃逸率；
- f) 多污染物协同处理。除尘过程中能同步实现重金属气溶胶或挥发性有机物的吸附/降解功能。

11.2 噪声治理

11.2.1 声源控制技术

主要技术特点：

- a) 直接降噪与频段针对性。应在声源处直接降低噪声产生强度，确保对目标噪声频段的显著削减能力，满足 GBZ 2.1 要求；
- b) 环保与设备兼容性。在不涉及化学药剂或电磁辐射的前提下，宜采用物理减振、声学材料包覆等纯机械/声学方法，避免对设备润滑系统、散热性能及周边土壤、水体生态产生负面影响；
- c) 长期稳定性与耐用性。核心降噪组件应具备长期稳定性能，避免因磨损或老化导致的效能衰减；
- d) 宽频段覆盖与适应性。应覆盖矿山典型噪声频段，不局限于单一频率区间的控制，能实现全频段噪声有效治理；
- e) 智能动态调控。宜集成声学传感器与 PLC 控制系统，实时采集噪声频谱数据，自动调整减振器刚度、消声器开度等参数，匹配不同工况下的声源特性变化；
- f) 高性能阻尼材料应用。宜采用黏弹性阻尼涂层、金属基复合材料等，兼具耐腐蚀与高损耗因子，延长核心降噪单元的使用寿命；
- g) 抗共振结构优化。可通过模态分析规避设备固有频率与激励频率耦合，采用非对称结构设计减少机械部件间隙，从根源降低碰撞噪声与共振幅值。

11.2.2 噪声传播途径控制技术

主要技术特点：

- a) 强效物理隔离与能量吸收。应显著削弱噪声在空气或结构中的传播能量，确保对矿山典型噪声传播路径的物理隔离或能量吸收能力，满足 GB 3096 要求；
- b) 环保材料应用与无污染性。降噪材料或结构不释放或少释放有害物质，避免对矿区土壤、水体或空气造成次生污染；
- c) 结构稳定与安全可靠。隔声屏障结构应稳定、耐久性好、安全性好；
- d) 与生产流程协同设计。降噪装置的布局设计应与矿山既有设施和作业流程无缝衔接，避免干扰正常生产活动；
- e) 宽频噪声全覆盖治理。应对矿山噪声的主要频段均能实现基础衰减，确保各频率区间噪声均得到有效控制，符合 GB/T 50087 的基本要求；
- f) 多层级吸声优化设计。宜通过外层隔声板、中间吸声层、内层透声面料的复合结构，提升对不同频率噪声的吸收能力，减少声反射；
- g) 地形与植被协同利用。可依托矿区天然地形或种植防噪林带，利用自然屏障衰减噪声，降低人工降噪设施投入成本。

11.2.3 个体防护技术

主要技术特点：

- a) 材料安全性与皮肤适应性。应采用医用级硅胶、慢回弹 PU 海绵等无毒、低致敏材料，避免传统石油基塑料对皮肤刺激和环境污染；
- b) 降噪效能与佩戴舒适性平衡。可根据噪声频段选择适耳塞、耳罩等配防护器具，佩戴舒适，能有效隔绝噪声；
- c) 被动降噪为主的频段覆盖。应依赖物理隔声原理，实现对中高频噪声阻隔效果显著，但对低频噪声，防护能力有限，在强振动设备机房、低频噪声主导的矿山开采区等特殊场景，可结合主动降噪设备协同控制。

11.3 有害气体治理技术

主要技术特点：

- a) 多气体适应性与高效净化。能适应 CH_4 、 H_2S 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 等种类的气体和浓度，采用针对性净化工艺；
- b) 多技术协同治理体系。应实现多污染控制协同，协同治理多种有害气体，满足 GB 16297、GB 20426 和 GB 21522 要求；
- c) 二次污染防控。治理过程中应采用闭环循环系统、副产品合规处置，避免在治理过程中产生二次污染；

- d) 源头与末端双重控制。应从源头通过工艺改进、设备密封升级、过程自动化控制等方式直接削减目标有害气体的产生量，结合末端治理技术对排放端残留污染物进行深度处理，实现目标有害气体浓度削减；
- e) 抗干扰材料与长寿命设计。催化或吸附材料应采用表面疏孔结构设计以抗粉尘遮蔽，通过贵金属元素掺杂提升抗化学中毒能力，延长核心单元使用寿命；
- f) 资源化利用与循环经济。宜针对具备技术经济可行性的 SO_2 、高浓度 VOCs 等有害气体，宜采用脱硫制酸、活性炭吸附回收等工艺实现资源化转化；
- g) 特定 VOCs 场景适应性。宜针对苯系物、酚类等含挥发性有机物的矿山废气，集成“活性炭吸附浓缩-热脱附-RCO”催化燃烧一体化模块，处理中低浓度 VOCs 废气，实现有机物的吸附富集与催化氧化分解。

11.4 土壤污染治理技术

主要技术特点：

- a) 污染物高效处理能力。应通过化学淋洗、生物降解、稳定化等技术，直接降低其环境风险或生物可利用性；
- b) 环境友好性。治理过程应采用闭环操作、低毒药剂，避免二次污染向空气、地下水或周边土壤扩散；
- c) 特殊地质条件适应性。干旱区宜采用耐旱微生物修复，高盐土壤宜采用“耐盐植物-微生物”联合修复，冻土区宜采用“热脱附-生物”强化复合工艺，实现不同地貌下的修复技术适配；
- d) 自然协同与生态保护。应优先采用原位修复技术，减少土壤开挖扰动，保留土壤孔隙结构与微生物群落；
- e) 资源化利用潜力。可根据污染物类型与修复目标专项设计，实现污染物资源化；
- f) 复合型污染治理能力。宜通过技术组合，处理重金属、有机物、油类等复合型污染问题。

11.5 废水污染治理

11.5.1 矿井水治理技术

主要技术特点：

- a) 污染物深度去除与水质达标。宜通过混凝沉淀、离子交换、膜处理等技术，将目标污染物的浓度至安全阈值以下，实现污染物的深度去除，修复后水体需达到 GB 8978 的要求；
- b) 化学稳定性与二次污染防控。宜通过 pH 值调节、钝化处理等手段，确保处理后的出水长期储存或回用过程中不发生氧化还原反应导致污染物二次释放；
- c) 清洁工艺与无有毒副产物。宜采用绿色水处理药剂、物理处理工艺，避免化学反应产生有毒副产物，宜采用生物可降解药剂、无磷絮凝剂等绿色水处理药剂，及膜分离、吸附、紫外氧化等物理处理工艺，避免使用含重金属、氰化物的化学品或强酸性/强碱性药剂，从源头防止化学反应产生游离氯、重金属络合物等有毒副产物；
- d) 资源回收与循环利用。可通过电解法回收重金属、蒸发结晶提取盐分等技术将矿井水中重金属、盐分等成分回收为工业原料；
- e) 复合型污染协同处理。可同步去除无机污染物、有机污染物及病原微生物等复合污染问题；
- f) 多场景水质适配性。可根据矿井水回用需求，定制化调整处理流程，确保出水满足 GB 3838 的要求。

11.5.2 矿物加工废水治理技术

主要技术特点：

- a) 高效污染物去除与多场景适配。宜通过氧化还原、生化处理、膜分离等技术，降解、吸附或分离废水中目标污染物，修复后水体达到 GB 8978 对应功能区要求，若处理后的废水回用，需满足相关回用标准；
- b) 低环境负荷与清洁生产。应采用无二次污染的处理工艺和环境友好型药剂，确保修复过程无新增污染物排放，减少碳排放与药剂消耗；

- c) 自然生态协同与资源化利用。宜结合人工湿地、稳定塘等自然生态系统，通过植物吸收、微生物降解实现污染物去除，并同步回收资源，构建可持续修复体系，构建稳定可持续的修复系统；
- d) 复合污染协同处理与成本优化。可同步去除重金属、有机物、氮磷等复合污染物，降低分步处理成本。

11.5.3 生活污水治理技术

主要技术特点：

- a) 复合污染物协同处理。应通过生化处理和深度处理工艺，直接降解或分离生活污水中的有机物、悬浮物、氮磷营养盐、病原微生物等复合污染物，应直接降解或分离生活污水中的目标污染物，处理后出水应全面符合 GB 18918 要求，若用于工业回用应处理至 GB/T 19923 对应指标；
- b) 污染排放控制。处理过程应采用密封式处理设备和环保型药剂，不释放有毒气体或有害副产物，避免污染周边空气或水体；
- c) 废弃资源回收。应将污水中的有机物转化为可利用资源，或回收氮磷元素用于农业或工业原料；
- d) 系统稳定性与可持续性。应同步去除有机物、氮磷等复合污染物。

11.6 污染物监测技术

主要技术特点：

- a) 高精度污染物识别。应采用质谱、光谱等分析技术，精确识别目标污染物的种类与特性，检测限低至 ppb 级，应避免误判或漏检导致监管失效；
- b) 复合污染全面监测。监测范围应覆盖目标场景的关键污染物类别，支持复合污染场景的综合评估与风险研判；
- c) 动态数据采集与预警。宜通过在线监测设备实现分钟级连续数据采集，实时捕捉污染物浓度的瞬时变化，结合预设阈值自动触发预警；
- d) 污染源追溯与责任界定。宜通过特征指纹识别或扩散模型，关联污染源与监测数据，支持快速责任追溯；
- e) 多介质协同监测。可同步监测空气、水体、土壤等多介质污染物，减少设备重复部署；
- f) 抗干扰检测技术。核心传感单元应具备抗其他成分干扰能力，确保复杂基质下的检测精度。

12 灾害防治

12.1 水害防治技术

主要技术特点：

- a) 地表水综合治理。宜通过修筑截水沟、引流沟渠等工程设施，将地表水拦截、引导至远离矿区的安全区域，避免其渗入井下，宜采用生态友好型材料和施工工艺，确保防治过程中不引发次生地质破坏，不污染含水层，维持区域生态平衡；
- b) 地下水的有效疏干与管理。宜利用钻孔疏水、巷道疏水等物理拦截手段，在关键位置设置排水通道，将地下水有序引导排出。宜针对涌水量较大区域，采用水闸墙、防水密闭门等封堵设施，有效控制水害扩散；
- c) 多源水精准探测与预报。宜运用地质雷达、瞬变电磁法等地球物理探测技术，对井下地质构造和水源分布进行超前探测，宜快速识别自然含水层渗水、老空水、地表水等不同水源类型，支撑针对性防治策略制定；
- d) 高效排水系统构建与源头防控。宜根据矿井涌水量预测和井下布局，设计并建设具备足够排水能力的排水系统，宜采取源头控制技术及措施来减少水害的发生；
- e) 涌水净化回用与资源节约。宜采用混凝沉淀、过滤、消毒等净化处理工艺，对防治过程中的涌水或疏排水进行净化，净化后的出水可用于井下防尘洒水、设备冷却等，实现水资源的循环利用，减少水资源浪费，降低矿山生产成本。

12.2 火灾防治技术

主要技术特点：

- a) 环保型防灭火材料技术。选用的防灭火材料应满足安全性和环保性要求，符合 GB 8624 的相关要求；
- b) 精准灭火与低碳技术。宜结合 AI 热成像、束管防灭火气体监测等火源定位技术，精准释放灭火剂，减少资源浪费；
- c) 典型场景技术配置。在地面的防火设备宜优先使用太阳能、风能供电，降低碳排放。

12.3 瓦斯防治技术

主要技术特点：

- a) 多手段浓度控制。宜运用通风稀释技术，合理规划通风系统，确保井下各区域瓦斯浓度被稀释至安全阈值以下，宜在瓦斯涌出量大的区域，部署高效抽采设备，精准抽采瓦斯，宜在有必要的场所，应用阻燃材料与抑爆装置，抑制瓦斯燃烧爆炸；
- b) 智能监控与应急联动。宜采用高精度瓦斯传感器、风量传感器以及环境监测设备，实时采集井下瓦斯浓度、风量、温度、湿度等关键数据，设定瓦斯浓度等参数的安全阈值，宜在监测数据超出阈值，立即自动触发声光报警、短信推送等警报机制，联动井下通风设备、断电装置等应急设施，自动调节通风量或切断危险区域电源，遏制瓦斯灾害的发生与蔓延；
- c) 自动化抽采技术。宜引入自动化瓦斯抽采设备，集成智能控制模块与传感器反馈系统，应通过瓦斯浓度、抽采流量等实时监测数据，自动调节抽采泵的运行频率、抽采负压等参数，实现抽采强度的精准控制，确保在不同地质条件与开采阶段下，能维持高效稳定的抽采效果；
- d) 瓦斯资源化利用。宜通过脱硫、脱水、脱碳等工艺，对抽采出的瓦斯去除杂质与有害成分的处理，提质为合格的清洁能源；
- e) 精准溯源与靶向防治。宜综合运用地质勘探、地球物理探测以及气体成分分析等技术手段，精准识别煤层自然释放、采空区积聚、地质构造逸出等不同瓦斯来源，有针对性地制定瓦斯防治策略；
- f) AI 驱动风险预测。宜利用 AI 算法深度挖掘瓦斯涌出历史数据、地质条件数据、开采工艺数据以及设备运行数据等多源信息，构建瓦斯涌出预测模型；可对实时监测数据的动态分析，提前预测瓦斯涌出异常变化趋势，实现瓦斯灾害风险的超前预测与分级预警。

12.4 地压防治技术

主要技术特点：

- a) 高效支护材料与动态结构。宜采用吸能锚杆、高强度锚杆、钢纤维喷射混凝土、金属网等支护材料，提升围岩初期承载能力，宜推广可缩性 U 型钢支架、让压锚索等动态支护结构，通过滑动接头、吸能装置适应围岩变形，减少应力集中破坏；
- b) 智能化精准支护设计。宜基于地应力测试与围岩分级，优化锚杆间距、锚索长度等参数，避免过度支护，可根据微震监测、位移数据动态调整支护时机，实现“按需支护”；
- c) 低扰动施工与绿色工艺。宜采用液压破碎、静态爆破等非爆破工艺，控制振动速度，减少围岩损伤；宜配备干式除尘器、水性锚固剂，替代传统溶剂型材料，降低粉尘与 VOCs 排放，选用电动液压钻机、变频通风机等低能耗设备，降低单位支护能耗；
- d) 主动卸压与能量调控技术。宜对顶板实施巷道深孔爆破、井下水力压裂、地面水力压裂、高位人造预裂层、机械切顶卸压等技术；宜对煤层实施煤体爆破、煤体水力压裂、大直径钻孔卸压、高压水射流等技术；宜对底板实施断底爆破、开槽卸压等技术；针对部分高应力区域，宜补充实施大直径钻孔卸压、钻孔爆破卸压等技术，释放围岩积聚能量，降低冲击地压/岩爆风险；宜结合微震监测、应力监测、矿山压力监测动态调整卸压参数，避免能量突然释放导致的冲击地压/岩爆；
- e) 支护材料循环利用。宜推广可回收树脂锚杆、模块化 H 型钢支架，支护结束回收支持材料；喷射混凝土废料经破碎筛分后，可作为路基填料或再生骨料重复利用。

12.5 煤尘爆炸防治技术

主要技术特点：

- a) 源头控尘工艺。开采环节应采用喷雾降尘或煤层注水等湿式作业，从源头减少粉尘产生，在煤仓、输送带转运点等产尘集中区域，应配备负压密闭罩和布袋除尘器，通过密闭与净化协同控

制粉尘外溢，在露天开采面或储煤场应选用可生物降解型抑尘剂，按设计浓度均匀喷洒，抑制煤尘；

- b) 工艺优化与通风调控。应优化开采工艺，减少岩（煤）体破碎程度，降低煤尘产生量，应优化通风系统，合理分配风量，确保巷道内风速稳定在合适范围；
- c) 可降解抑尘材料。宜推广具有良好的粘结性和保湿性的可生物降解的抑尘材料，有效吸附煤尘，在喷雾降尘系统中，可选用可降解的环保型喷雾助剂，提高对煤尘的捕获能力。

12.6 边坡稳定技术

主要技术特点：

- a) 边坡结构优化设计技术。应根据岩体力学参数与开采工艺，采用极限平衡法结合数值模拟计算安全边坡角，设计安全平台和 清扫平台的宽度和坡度；常规台阶高度可根据设备能力确定，高陡边坡采用微台阶结合坡脚回填，降低单级滑塌风险及总边坡角；
- b) 立体排水系统构建。宜在边坡顶部外沿 5-10m 处设置梯形截水沟，确保遇暴雨排水顺畅。宜在潜在滑面以下 3-5m 施工水平疏干孔，孔内铺设带滤水孔的 PVC 管或钢管，外包反滤层，宜在边坡低凹处设置疏干竖井，内置潜水泵，实现地下水水位动态控制；
- c) 多元化边坡加固技术。宜采用锚固技术、抗滑桩工程、裂隙注浆加固、地下连续墙防渗等工艺技术稳固潜在滑面，确保露天边坡稳定，宜在高陡边坡种植藤蔓植物护坡，减少雨水冲刷。

12.7 灾害监测技术

主要技术特点：

- a) 多灾种协同监测技术。宜采用激光光谱瓦斯传感器在回采工作面、回风巷等区域实时监测 CH_4 浓度，采用微震监测系统和光纤光栅应力计，监测岩体破裂信号与支护结构载荷，宜采用粉尘监测仪实时测量呼吸性粉尘浓度，联动喷雾系统自动降尘，宜采用压力式水位计和电磁流量计监测地下水水位与涌水量，预警值设定为接近隔水层安全厚度，实现多源数据融合；
- b) 地质灾害监测。通过传感技术、物联网技术、大数据处理技术等新一代信息技术结合专业地质灾害监测设备，实现地灾数据采集、实时监测、预警预报、信息管理等功能；
- c) 高精度定位与智能分析。宜在巷道安装通讯基站，实时追踪人员与设备位置，实现灾害预警区域人员分布情况显示，结合风流模拟与传感器响应时间，反演瓦斯突出或透水点坐标，采用卡尔曼滤波算法融合瓦斯、地压、水文数据，消除单一传感器噪声，提升数据可靠性，构建灾害特征知识库，存储历史灾害案例的前兆特征，实现与实时数据比对的功能；
- d) 绿色供能与设备优化。宜采用太阳能、风能等清洁能源为地面监测站供电，配备本安型锂电池、温差发电装置为井下设备供电；
- e) 多维度预警与应急联动。宜实现黄色、橙色、红色等三级预警机制，建立灾害异常与设备联动，及时广播系统。

13 固体废物处理与利用

13.1 固体废物处理技术

主要技术特点：

- a) 复合防渗与渗滤液处理。应采用复合防渗层及渗滤液收集与处理设施，阻断污染物迁移；
- b) 抑尘与二次污染控制。应喷洒抑尘剂或封闭式堆存设计，减少颗粒物扩散，所用抑尘剂应为环境友好型材料，不得造成二次污染；
- c) 有毒有害成分消除。处理过程应消除废弃物中的有毒有害成分，确保环境安全性；
- d) 长期稳定性。处理后产物应通过抗浸出性测试与抗风化试验，确保物理化学性质长期稳定；
- e) 井下充填与干式堆存。宜通过井下充填、干式堆存等技术减少地表堆存体量；
- f) 生态修复与景观再造。宜对无法利用的废石堆场进行植被恢复或景观再造，促进生态修复。

13.2 固体废物利用

13.2.1 资源回收技术

主要技术特点：

- a) 高效分离与高值回收。宜采用磁选、浮选、电选等物理手段分离金属矿物，宜或通过化学浸出、生物冶金实现目标元素高效分离；
- b) 绿色回收过程控制。应以硫代硫酸盐替代氰化物用于金矿浸出，或采用生物基捕收剂替代化学药剂，减少有毒物质使用与残留，浸出液经膜分离回收重金属离子后，清水应全部回用至生产流程；
- c) 全组分梯级利用。基于对废弃物成分的全面分析，宜针对不同物质的特性与价值，实现废弃物中可回收物质的梯级提取；
- d) 智能化精准分离技术。利用 X 射线荧光光谱在线分析废弃物成分，结合深度学习算法控制高压水射流或机械臂分拣，提升复杂组分的分离精度；
- e) 微生物强化回收技术。低品位矿或尾矿回收时可利用氧化亚铁硫杆菌等微生物代谢活动产生的酸或氧化剂，溶解矿石中的铜、钴等金属。

13.2.2 制备建筑材料技术

主要技术特点：

- a) 有害物质限量达标。制备的建筑材料应符合 GB/T 1596、GB/T 18046、GB/T 20491、GB 6566 等相关要求；
- b) 环境耐受性设计。制备的建筑材料应具备抗风化、抗冻融等基础环境耐受能力；
- c) 功能化特性拓展。制备建筑材料应具有保温、隔音、透水等功能特性；
- d) 力学性能强化技术。宜通过改性或纤维掺杂等手段提高建筑材料的力学强度与耐久性；
- e) 重金属固化技术。宜采用化学螯合或高温固化等手段固化重金属等易浸出污染物，防止污染物的渗出。

13.2.3 制备生态修复材料技术

主要技术特点：

- a) 环保安全性。原材料应不含有毒有害物质，不产生二次污染；
- b) 物理结构稳定性。制备后的材料应具备抗侵蚀、抗流失的稳定性物理结构；
- c) 生态友好性。应通过构建多孔介质结构、添加微生物菌剂与缓释肥，创造适宜植物根系穿透和微生物群落定植的生境，禁止使用妨碍生物生长的硬化材料或有毒药剂；
- d) 长效营养供给。应构建复合缓释营养体系，通过科学配比 N、P、K 等基础营养元素，并添加 Ca、Mg、Fe 等微量元素，满足植物不同生长阶段的营养需求；
- e) 重金属防控。应通过添加化学稳定剂与重金属形成难溶化合物，或利用活性炭等吸附剂去除重金属等手段，防止生态修复材料在使用过程中产生二次污染；
- f) 孔隙率与透水性优化。应通过发泡剂或造孔工艺等手段提高生态修复材料的孔隙率和透水性。

13.2.4 制备环境治理材料技术

主要技术特点：

- a) 专一性吸附/转化。应通过材料功能化设计实现重金属、有机污染物、氮磷营养盐的定向去除；
- b) 环境稳定性与安全性。应在酸、碱、盐等环境中保持化学性质稳定，溶出毒性物质不产生次生污染；
- c) 物理/化学再生。饱和吸附材料可通过酸碱洗脱、高温焙烧或电化学还原恢复活性；
- d) 绿色降解产物。生物基治理材料降解后可生成 CO₂ 和水，无持久性有机污染物残留，对生态环境无负面效应；
- e) 多污染物协同去除。宜利用铁碳微电解材料同步去除废水中的重金属和色度等复合型污染；
- f) 化学-生物协同稳定。宜采用化学稳定与生物矿化协同技术，结合表面包覆硅烷偶联剂，阻断污染物渗出，确保材料无有害物质释放；
- g) 表面靶向修饰。宜通过功能化修饰，提升对特定污染物的靶向吸附能力；
- h) 异质构建。宜通过异质构建等手段，提升材料的催化效率。

14 生态修复

14.1 土壤改良技术

主要技术特点：

- a) 修复标准适配性。依据 TD T1036 等相关修复标准或规程，针对损毁土地的不同规划用途，定制土壤改良方案；
- b) 污染风险管控。应降低土壤重金属和有机污染等污染物的生物活性，减少对生态环境和人体健康的危害；
- c) 土壤肥力与结构优化。应改善土壤的团粒结构、土壤的通气性和保水性，增加土壤有机质和养分，为植被恢复提供良好的土壤环境；
- d) 生物多样性与抗蚀能力强化。应提高土壤的生物多样性，提高土壤的抗侵蚀，增加土壤质量和可持续利用性；
- e) 有害物质无害化转化。应将有害物质转化为无害或可利用形态。

14.2 植被重建技术

主要技术特点：

- a) 抗逆植物筛选与优化组合。应筛选耐贫瘠、抗逆性强的本地优势物种和具有固氮/重金属富集功能的植物物种优化组合，确保成活率和存活率；
- b) 植被覆盖与水土保持。应提高植被覆盖指数，降低坡地径流对地表冲刷，减少水土流失，保护土壤资源；
- c) 自维持植物群落构建。建群物种应能形成自我维持的植物群落；
- d) 生态系统功能提升。应促进植被自然演替和提升生产力，促进至植被生物多样性恢复和达到 TD/T 1036 要求；
- e) 小气候调节效应。宜通过植物蒸腾与冠层遮荫调节地表温度，提升空气湿度，改善区域小气候环境；
- f) 废弃物资源化协同。植被系统宜充分利用废弃物特性，实现植被重建与废弃物减量化功能。

14.3 生物多样性恢复技术

主要技术特点：

- a) 本土物种优先与入侵风险防控。植物物种应为适应当地环境的本土植物物种，合理规划植物群落结构，不同物种高低错落、根系深浅搭配，增强群落稳定性。建立严格的外来物种引入审查机制，开展入侵物种风险评估，避免外来物种入侵风险；
- b) 微观与宏观多样性协同提升。应提升微观的土壤微生物多样性，提升宏观的景观生态多样性，确保生态多样性的完整性；
- c) 生态系统稳定性强化。宜加强生物多样性维护机制，提升植被的抗逆能力，确保生态系统稳定；
- d) 濒危物种保护与繁衍支持。宜形成特殊保护机制支持区域濒危物种繁衍。

14.4 生态修复监测技术

主要技术特点：

- a) 多参数与空间多维度监测。应对区域内土地利用类型、土壤理化指标、植被覆盖度、气象因子等多参数监测，结合地面监测点、无人机航测、卫星遥感，构建监测网络，实现多参数和空间多维度，多要素监测；
- b) 环境友好型监测设备。宜采用太阳能供电传感器、可降解生物传感器等低功耗、可降解或可回收材料的传感器，减少监测设备自身对生态环境的二次污染；
- c) 高精度监测与智能分析。宜采用高精度传感器和智能分析系统，保障监测数据的质量，结合 GB/T 43935 对矿山修复的土壤、植被和环境效应综合分析评价；
- d) 物联网自主感知与预警。宜布置物联网系统，采集实时采集温湿度、CO₂浓度、土壤墒情等数据，当指标超出阈值报警；
- e) 空-天-地遥感数据融合。宜整合无人机可见光/多光谱影像、卫星雷达数据、地面物联网数据，应通过时空卷积网络实现数据融合，生成生态修复动态专题图；

- f) 生态演变预测模型构建。宜基于长时间序列监测数据,构建生态演变模型,模拟植被演替、土壤侵蚀等过程,预测未来一段时间生态指标变化趋势,为修复方案调整提供科学依据。

15 矿区改造利用

15.1 废弃矿山资源再利用

15.1.1 厂区设施再利用技术

主要技术特点:

- 满足安全标准与用途匹配。设施改造后应满足 GB 50300 要求,新用途要应与原建筑的空间特征、结构特点等相适配,充分考虑建筑的原有条件和限制,确保改造后的功能能够在安全的前提下合理实现;
- 保留材料与优化能耗。应尽量保留原设施 50% 以上的主体建筑材料,通过合理的设计和施工,减少建筑垃圾的产生和新材料的开采,从源头上降低对环境的影响。应采用节能技术和设备,优化设施的能源利用效率,降低能耗;
- 可逆式改造。宜采用可逆式改造技术便于未来功能转换,较容易地将建筑恢复到原来的状态或进行再次改造,而不会对建筑结构造成太大破坏;
- 能源交换网络。与矿区新能源系统形成能源交换网络,可将厂区设施与矿区的太阳能、风能等新能源发电设施连接起来,实现能源的互补和共享;
- 多功能公共服务属性。空间改造后应成为具备集文化、娱乐、商业、社区服务等多种功能于一体的,具有多功能公共服务属性的场所;
- 增强极端天气应对能力。通过提升建筑的防风、防洪、隔热、保温等性能,增强极端天气应对能力。

15.1.2 废旧设备再利用技术

主要技术特点:

- 高比例材料保留与核心功能维持。应保留原设备 60% 以上主体材料,保留原设备 60% 以上主体材料,从源头上减少新材料的需求,降低资源开采与加工过程中的能耗及环境影响;
- 能耗控制与能效优化。应通过对设备动力系统、传动系统及控制系统的全面优化,实现运行能耗应不高于同类新设备标准值;
- 现代化模块集成。宜集成智能控制系统等现代化模块,应赋予废旧设备智能化、自动化运行能力。在再利用的工业生产设备中,引入先进的可编程逻辑控制器与传感器网络,构建智能控制系统;
- 清洁能源适配改造。宜适配清洁能源动力系统改造,助力废旧设备融入绿色能源体系,针对以燃油、燃煤为动力的废旧设备,开展清洁能源替代改造,结合矿区丰富的太阳能、风能资源,在设备合适位置安装太阳能光伏板,或接入矿区风能发电网络,作为辅助供电方式;
- 可快速更换结构设计。关键部件应采用可快速更换结构,可提升设备维护效率与运行连续性。在设备再制造过程中,对易损、易耗的关键部件进行结构优化设计,采用标准化、模块化接口;
- 物联网远程监控与诊断。应支持物联网远程监控与诊断,实现设备全生命周期智能化管理,利用物联网技术,在再利用设备上部署各类传感器,将设备运行数据实时传输至远程监控中心,开展远程诊断和预警;
- 设备集群智能联动控制。应实现设备集群智能联动控制,提升矿区整体生产协同效率,在矿区环境中,能将多台再利用设备构建成智能设备集群,对设备进行集中管理与协同控制。

15.1.3 废旧材料再利用技术

主要技术特点:

- 符合标准与性能基准。处理后的材料应符合 GB 34330 要求,确保不会对环境和人体健康造成威胁;
- 低污染物排放。再利用过程中,应严格控制废气、废水、废渣等废弃物的产生与排放;

- c) 成本控制。应通过优化回收流程、采用高效低成本的加工技术，确保处理成本应不超过新材料采购价 30%；
- d) 性能升级与功能拓展。宜实现材料性能升级或功能拓展，使再生材料具备更优异的性能或实现新的功能；
- e) 内部循环利用体系。在矿区内部实现材料的回收、处理和再利用的闭环管理，形成矿区内部材料循环利用体系；
- f) 废料协同处理。不同品类废料协同处理形成新材料，宜充分发挥各种废旧材料的特性，实现资源的最大化利用。

15.2 空间再利用技术

主要技术特点：

- a) 安全与基础功能保障。空间改造后应满足 GB 50300 相关要求，并具备符合要求的空气流通系统以及排水系统等；
- b) 应急避险能力保留。依据《矿山安全规程》要求，保留或新建符合规范的避险通道，确保在突发情况下人员能够快速、安全撤离；
- c) 地下空间多功能转化。宜充分挖掘地下空间潜力，将其改造为多样化功能性场所，如将地下空间改造为仓储中心、科研基地、地下博物馆、工业研学区、科普场馆或储能设施等功能性场所；
- d) 地表空间复合利用。宜将地表空间改造为生态公园、工业园区、复垦农田、人工湖泊、垃圾处理设施、光伏电站或林下经济区等多样化场所。

参 考 文 献

- [1]GB/T 15187-2017 湿式除尘器性能测定方法
- [2]GB/T 31456-2015 石油与天然气地表地球化学勘探技术规范
- [3]GB/T 33017.6-2024 高效能大气污染物控制装备评价技术要求第6部分：湿式电除尘器
- [4]GB/T 37071-2018 农村生活污水处理导则
- [5]GB/T 37573-2019 露天煤矿边坡稳定性年度评价技术规范
- [6]GB/T 37758-2019 高矿化度矿井水处理与回用技术导则
- [7]GB/T 37764-2019 酸性矿井水处理与回用技术导则
- [8]GB/T 38678-2020 浅层地热能利用通用技术要求
- [9]GB/T 40112-2021 地质灾害危险性评估规范
- [10]GB/T 40505-2021 湿式电除尘器性能测试方法
- [11]GB/T 40514-2021 电除尘器
- [12]GB/T 42251-2022 采矿沉陷区生态修复技术规程
- [13]GB/T 43933-2024 金属矿土地复垦与生态修复技术规范
- [14]GB/T 43934-2024 煤矿土地复垦与生态修复技术规范
- [15]GB/T 43935-2024 矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范
- [16]GB/T 50087 工业企业噪声控制设计规范
- [17]DB11/T 1677-2019 地质灾害监测技术规范
- [18]DB13/T 5873-2023 石灰岩矿山生态修复土壤重构技术规程
- [19]DB14/T 2535—2022 煤炭绿色开采技术指南
- [20]DB21/T 3974-2024 露天矿地质灾害治理植被生态修复技术规范
- [21]DB21/T 3975-2024 闭坑露天煤矿地质灾害治理边坡监测规范
- [22]DB34/T 4442.1-2023 煤矿水害防治第1部分：顶板水害防治
- [23]DB34/T 4442.2-2023 煤矿水害防治第2部分：井下底板注浆加固
- [24]DB34/T 4442.3-2023 煤矿水害防治第3部分：地面区域治理
- [25]DB34/T 4442.4-2023 煤矿水害防治第4部分：老空水害防治
- [26]DB36/T 2104-2024 生态环境监测质量管理技术规范
- [27]DB41/T 2787-2024 露天矿山生态修复遥感监测技术规范
- [28]DB42/T 911-2013 地质灾害防治工程施工技术规程
- [29]DB43/T 2373-2022 绿色勘查地质钻探技术规范
- [30]DB45/T 2426-2021 铅锌矿采选行业地块土壤污染风险管控和修复效果评估技术规范
- [31]DB61/T 1803-2023 水工隧洞软弱围岩变形控制技术规范
- [32]DB61/T 1387-2020 地下水污染监测与评价规范
- [33]DB62/T 5034-2024 非金属类矿山土地复垦与生态修复技术规范
- [34]DB64/T 2091—2024 砂石土矿矿山生态修复技术规程
- [35]DB64/T 2095—2024 煤矸石堆场生态修复治理技术规程
- [36]DB3204/T 1069-2024 生态修复与生态旅游融合发展实践地建设指南
- [37]DB3603/T 3-2022 煤矿地下空间开发适宜性评价指南
- [38]DB3708/T 12-2022 露天非煤矿山开采大气污染治理技术导则
- [39]DB3711/T 128-2023 露天矿山生态修复绿化技术规范
- [40]DZ/T 0300-2017 煤田地震勘探规范
- [41]HJ 451 清洁生产标准 水处理剂制造业
- [42]HJ 454 环境标志产品技术要求 防火材料
- [43]JB/T 9055-2015 机械振动类袋式除尘器
- [44]JB/T 11824-2014 污泥深度脱水设备
- [45]JB/T 14085-2020 除尘器过滤元件工况模拟过滤性能评价技术规范

- [46]MT/T 2-2005 选煤厂破碎设备工艺效果评定方法
[47]MT/T 1036-2007 煤矿井下深孔控制预裂爆破技术条件
[48]MT 1037-2007 预抽回采工作面煤层瓦斯防治煤与瓦斯突出措施效果评价方法
[49]MT/T 1183-2020 露天矿边坡稳定性分析及岩移监测方法
[50]NB/T 10727-2021 煤矿膏体充填开采技术规范
[51]NB/T 11524-2024 矿用喷水灭火机器人通用技术要求
[52]SY/T 5771-2011 地面磁法勘探技术规程
[53]SY/T 5819-2024 陆上重力磁力勘探技术规程
[54]SY/T 6687-2022 井中电磁勘探技术规程
[55]T/GRM 052-2022 非金属矿山绿色矿山建设规范
[56]T/GRM 090-2023 绿色勘探技术规程
-