

# 煤矸石规模化生态利用原理与关键技术

胡振琪<sup>1,3</sup>, 赵艳玲<sup>2,3</sup>, 毛 镇<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 矿山生态安全教育部工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:**煤炭是我国主要能源, 是能源安全的压舱石。煤矸石作为采煤和洗煤加工过程中的必然产物, 每年产出量达7亿t以上, 亟需规模化、生态化利用技术, 以破解煤矸石作为企业发展绊脚石的难题。在分析煤矸石大规模利用中的生态损伤机理的基础上, 提出煤矸石规模化生态利用原理, 从技术视角探讨了环境安全的规模化生态利用具体解决途径, 提出了酸性煤矸石山原位污染控制与生态修复和煤矸石地面充填造地两大规模化生态利用方式关键技术。结果表明: ①煤矸石规模化生态利用的关键是环境污染的防控, 通过对矸石的可利用性和经济性评价, 结合风险管理手段, 可实现煤矸石规模化生态利用。②对已堆积的矸石山采用原位污染控制基础上的植被恢复以实现生态化利用, 提出了污染源头诊断-防灭火与污染阻隔-植被恢复一体化的生态利用技术。基于矸石氧化产酸产热导致污染的机理分析, 采用热红外与测绘技术相耦合进行煤矸石山深部燃点(氧化点)定位; 研发了杀菌剂与还原菌耦合的氧化抑制剂并结合惰性材料覆盖碾压进行抑氧隔氧污染阻隔; 对自燃区采用喷浆控火与注浆灭火结合的安全灭火技术; 氧化抑制剂结合惰性材料覆盖碾压的长效防火技术; 提出以乡土草灌为主的防燃型植被恢复技术, 可实现酸性煤矸石山的原位污染控制与生态修复。③通过地面充填生态化利用可行性分析、充填生态化利用技术和维护管理长期监测, 可实现煤矸石地面充填造地的生态化利用。其关键是矸石材料筛选的污染风险分析、地面充填场地选择的可行性分析以及充填全过程的环保措施, 包括充填前的场地底部防渗阻隔、渗滤液导排等安全环保措施, 充填中的分层充填技术、防火控酸的污染防控和土壤剖面重构技术, 充填后的侵蚀控制、植被恢复等技术。煤矸石规模化生态利用不仅解决了矿区固废堆存带来的生态环境问题, 还通过对新、旧矸石的科学合理利用, 打造矿区生态修复的新模式。

**关键词:**煤矸石; 规模化; 生态利用; 污染防控

中图分类号: TD88 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)02-0978-10

## Principles and key technologies for the large-scale ecological utilization of coal gangue

HU Zhenqi<sup>1,3</sup>, ZHAO Yanling<sup>2,3</sup>, MAO Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Earth Sciences and Surveying and Mapping Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Coal is the main energy in our country and the ballast stone of energy security. As an inevitable product in the process of coal mining and coal washing, coal gangue has an annual output of more than 700 million tons, which is in ur-

收稿日期: 2024-01-21 修回日期: 2024-03-02 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jcs.YH24.0089

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFC1806505); 国家自然科学基金资助项目(41371502, 52004274)

作者简介: 胡振琪(1963—), 男, 安徽五河人, 教授, 博士。Tel: 010-62339045, E-mail: huzq1963@163.com

引用格式: 胡振琪, 赵艳玲, 毛镇. 煤矸石规模化生态利用原理与关键技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 978-987.

HU Zhenqi, ZHAO Yanling, MAO Zhen. Principles and key technologies for the large-scale ecological utilization of coal gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 978-987.



移动阅读

gent need of large-scale and ecological utilization to solve the problem of coal gangue as a stumbling block in enterprise development. Based on the analysis of the mechanism of ecological damage in large-scale utilization of coal gangue, the principle of large-scale ecological utilization of coal gangue was put forward, and the concrete solution of large-scale ecological utilization of environmental safety is discussed from the technical perspective. Two key technologies of large-scale ecological utilization was put forward, namely in-situ contamination control and ecological restoration of acid coal gangue mountain, and ground filling of coal gangue. The results demonstrated that: ① The key to large-scale ecological utilization of coal gangue is prevention and control of environmental contamination. Large-scale ecological utilization of coal gangue can be realized through the evaluation of the availability and economy of gangue that combined with environmental risk management. ② Realized the ecological utilization of accumulated gangue mountain by vegetation restoration based on in-situ contamination control, and developed an ecological utilization technology integrated with pollution source diagnosis, fire prevention, pollution barrier, and vegetation restoration. Based on the mechanism analysis of pollution caused by acid and heat production of gangue oxidation, thermal infrared coupled with surveying and mapping technology was used to locate the deep burning point (oxidation point) in gangue mountain; an oxidation inhibitor coupled with fungicide and reducing bacteria was invented, which covered with an inert materia and rolled to prevent oxygen and pollution; the fire-fighting technology combining shotcrete fire control and grouting is adopted in the spontaneous combustion area; and a fire-proof vegetation restoration technology based on local and grass irrigation was put forward, which realized in-situ contamination control and ecological restoration of acid coal gangue mountain. ③ The ecological utilization of ground filling of coal gangue can be realized through the feasibility analysis of ecological utilization of ground filling, the technology of ecological utilization and the long-term monitoring of maintenance management. The key of ecological utilization is the contamination risk analysis of gangue material screening, the necessity and feasibility analysis of ground filling site selection, and environmental protection measures during the whole filling process, including safety and environmental protection measures such as anti-seepage barrier at the bottom of the site before filling, layered filling technology and soil profile reconstruction technology for fire prevention and acid control in filling, erosion control and vegetation restoration after filling. Large-scale ecological utilization of coal gangue not only solves the ecological environment problems caused by solid waste storage in mining areas, but also creates a new mode of ecological restoration in mining areas through scientific, safe, and reasonable utilization of new and dated gangue.

**Key words:** coal gangue; large-scale; ecological utilization; pollution control

煤炭作为基础能源在我国一次能源消费中的占比长期大于 50%, 为我国的经济建设、社会发展贡献了重要力量。2022 年, 我国煤炭产量达到 45.6 亿 t, 煤炭消费量占一次性能源消费总量的 56.2%<sup>[1]</sup>。随着碳达峰、碳中和战略实施以及国家能源产业结构的调整, 煤炭消费量在一次能源消费总量的占比将会有所下降, 但煤炭作为我国能源安全的压舱石地位短期不会发生改变<sup>[2]</sup>。

煤矸石是采煤和洗煤加工过程所排出的主要固体废物, 产量占原煤产量的 15%~30%, 有的地方甚至达到 30%~40%, 占中国工业废弃物年排放量的 25%<sup>[3]</sup>。2021 年我国煤矸石产生量达到 7.43 亿 t, 根据预测到 2025 年, 我国煤矸石年产量将达到 8.00 亿 t<sup>[4]</sup>。不同聚煤阶段沉积的含煤地层的岩性和矿物成分不同, 煤矸石的成分也不同, 呈现出一定的区域差异。由于成分差异较大, 煤矸石的综合利用途径也不同。在资源节约、能源利用、生态保护、污染防治等政策

要求和相关激励机制的支持下<sup>[5]</sup>, 煤矸石综合利用途径越来越多。目前, 煤矸石在建筑<sup>[6]</sup>、发电<sup>[7]</sup>、农业<sup>[8]</sup>和回填<sup>[9]</sup>等领域得到了广泛应用。也探索了将煤矸石转化成化工产品、环保材料<sup>[10]</sup>, 进行有价元素提取<sup>[11]</sup>和用于对采空区的充填<sup>[12]</sup>等方面的应用。多年来, 研究人员一直致力于开发大规模有效利用煤矸石的方式。2020 年, 我国 56% 的煤矸石用于采空区回填、筑路和土地复垦, 30% 左右用于发电, 其余用于生产建筑材料<sup>[13]</sup>。据《2022 年煤炭行业发展报告》, 2022 年全国煤矸石综合利用率 73.2%<sup>[14]</sup>。且东西部差异巨大, 我国西部山西、内蒙古、陕西、新疆和贵州等产煤大省其煤矸石产生量占到全国总产生量的 78.74%<sup>[5]</sup>, 但利用效率明显低于东部地区, 其主要原因为: 一方面煤矸石井下充填成本高, 经济合理性有待提高; 另一方面煤矸石发电、制砖等利用方式不仅在总量上无法满足处置要求, 而且受市场因素影响波动较大。因此, 缺乏合理利用途径、大量煤矸石堆积已成为阻碍

矿区可持续发展的“绊脚石”。

目前我国现有煤矸石累计存量已超过 70 亿 t, 形成万座以上矸石山, 压占大量土地<sup>[15]</sup>。不合理的煤矸石堆积不仅压占土地, 还易引发大气、水、土壤污染, 甚至泥石流、滑坡等地质灾害。根据国家发展改革委等 10 部委联合发布的《煤矸石综合利用管理办法(2014 修订版)》, 禁止新建煤矿及选煤厂建设永久性煤矸石堆场, 加上建设用地指标紧张等政策约束, 新排煤矸石亟需大规模利用途径解决其出路问题。目前许多矿山正在进行矸石地面充填造地等规模化利用实践, 但存在许多环境方面的质疑和限制, 导致难以推进。因此, 煤矸石规模化的生态利用就成为亟待解决的难题。究竟能否在规模化利用时实现生态化和环境安全呢? 笔者正是针对当前煤矿企业发展中亟待破解的煤矸石规模化生态利用难题, 提出一些见解, 以期促进矿山绿色发展。

## 1 煤矸石规模化生态利用的概念与原理

### 1.1 煤矸石规模化生态利用的概念与原则

煤矸石规模化生态利用即以生态化的方式将煤矸石回归自然, 实现大规模利用的同时, 减少其对生态环境的影响。煤矸石规模化生态利用的方式主要包括 2 类: 已堆积煤矸石山原位生态修复方式和新排煤矸石地面充填造地方式。

笔者认为, 煤矸石规模化生态利用需要遵循以下原则: ①利用量大, 占比产矸量的 30% 以上; ②对周边生态风险可控; ③利用方式生态; ④技术经济可行。目前, 我国近 60% 的煤矸石采用堆积原位生态修复和地面充填采煤塌陷区或荒沟造地的方式进行利用, 本文称其为规模化利用方式。尽管这 2 种利用方式受到很多质疑、制约和挑战, 但现实中这 2 种方式确实存在且能够大量消纳煤矸石。其关键是针对规模化利用中的环境风险, 如何形成环境风险可控的生态化利用技术。因此, 厘清煤矸石规模化生态利用原理, 研发规模化生态利用技术, 对于破解矿区煤矸石综合利用瓶颈, 实现矿区生态环境保护具有重要意义。

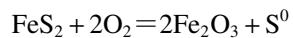
### 1.2 煤矸石规模化利用的生态损伤机理

煤矸石规模化利用时, 引发生态损伤的关键因子包括: ①煤矸石性质。煤矸石中可能含有的黄铁矿等硫化物, 在雨水淋溶以及氧化亚铁硫杆菌 (T.f 菌) 等氧化菌的共同作用下, 产生酸性废水, 并将煤矸石中重金属等有毒有害物质溶出, 造成水土污染; 若煤矸石中硫铁矿质量分数较高, 则可能发生氧化引起自燃, 释放出 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO、NO<sub>x</sub> 等, 成为区域大气污染的

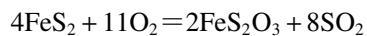
重要来源。②污染驱动要素。空气为硫铁矿氧化提供了氧气, 导致自燃的发生; 风是煤矸石扬尘的动力。③微生物催化氧化。经研究, 煤矸石中存在的氧化亚铁硫杆菌等氧化菌可使硫铁矿氧化速率提高数十倍。④堆积或充填方式。松散的堆积或充填方式, 真石间隙内存有一定量的 O<sub>2</sub>, 为氧化提供了条件。而且, 若煤矸石山的堆积角过大, 在雨水、山洪作用下极易失稳, 引发塌方、爆炸和滑坡等灾害, 有可能造成严重的人员伤亡和经济损失。

笔者认为, 煤矸石规模化利用造成的生态损伤机理可以从源头损伤机理和迁移过程机理 2 个方面进行解释。其中生态损伤的源头主要是煤矸石中含有黄铁矿等硫化物的氧化。

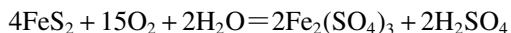
当矸石山内部供氧不足时, 主要发生如下反应<sup>[15]</sup>:



当空气系数 > 1% 时, 硫铁矿 (FeS<sub>2</sub>) 与过量空气接触, 燃烧反应激烈, 释放出大量的热量和 SO<sub>2</sub><sup>[15]</sup>:



湿润环境中, 在嗜酸性氧化亚铁硫杆菌的作用下, 将 FeS<sub>2</sub> 氧化为 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>[16]</sup>:



这些氧化作用产生的 SO<sub>2</sub> 等气态污染物随着大气传输, 对周边大气环境造成污染; 酸性物质进一步将煤矸石中可能存在的重金属等有毒有害物质溶出, 并随着渗滤液和地表径流迁移, 进入周边土壤或地下水, 造成水土污染 (图 1)。

### 1.3 煤矸石规模化生态利用原理

基于煤矸石规模化利用的生态损伤机理, 笔者提出煤矸石规模化生态利用的基本原理是从源头控制、过程截断 2 个方面控制规模化利用的生态环境风险, 在此基础上结合土壤重构理论和仿自然的生态恢复技术完成煤矸石规模化利用后生态价值和生态功能的实现。针对煤矸石中 FeS<sub>2</sub> 氧化造成的源头损伤问题, 主要采取抑制氧化的方法阻止氧化反应的发生, 进行源头控制, 具体包括: 通过注浆、覆盖、分层充填技术隔绝氧气; 喷洒复合专性杀菌剂杀灭氧化亚铁硫杆菌或是采用硫酸盐还原菌进行生物固硫, 有效控制煤矸石氧化产酸, 从而控制 SO<sub>2</sub> 等气态污染物的产生和酸性物质、重金属的溶出。针对污染物迁移问题, 采用污染阻隔技术构建阻隔层, 有效截断污染物迁移途径, 防止有害物质渗出造成水土污染; 同时, 以“土层生态位”和“土壤关键层”理论为基础, 将污染阻隔层的设计纳入土壤剖面重构中, 从源头控制规模化生

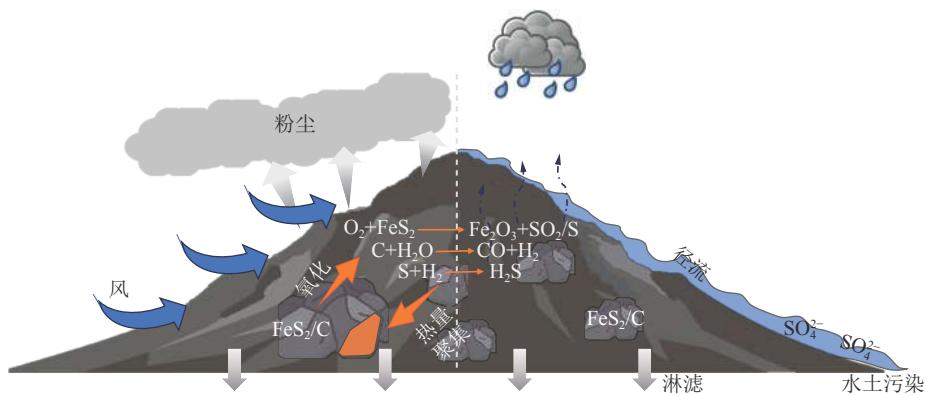


图1 煤矸石规模化利用生态损伤机理

Fig.1 Ecological damage mechanism of coal gangue utilization on a large scale

态利用的风险并促进土壤生态功能提升,从而促进生态系统的恢复和生态价值的实现。

#### 1.4 煤矸石规模化生态利用流程

煤矸石规模化生态利用流程可大致分为2个部分,分别是对于新排矸石的生态化利用和对现存煤矸石山的生态化利用。对于新排矸石规模化生态利用首先要进行可利用性和经济性评估,根据GB/T 29163—2012《煤矸石利用技术导则》,根据其特性判断其是否可作为燃料、建材、路基、生产化工产品或是农用,综合考虑其运输、加工等可能的成本,综合判断其产品化利用的可能性。如果煤矸石不具备产品化利用的可能性,可考虑进行生态化地面充填。生态化充填首要考虑的是安全性的问题,要在对充填场地及其周边受影响区域进行生态环境、水文地质、气象、土地利用情况等现状进行调查和对需充填的煤矸石进行污染特征分析的基础上开展生态化充填的风险评估,包括对于充填造地需求的必要性分析、充填场地的地质稳定性的评估和环境风险评估。如果评估结果风险可接受,可以直接开展充填和配套的污染控制工程的设计、施工等;如果评估结果风险不可接受,则需要在充填前设计阻隔层等风险管控措施,最后进行生态恢复。对于现存的矸石堆场,首先也是要进行风险评估,评估堆场稳定性和对周边生态环境的风险,如果风险可接受则可以直接进行生态恢复;如果风险不可接受,则需要进行风险管控和污染的源头治理(灭火、防火、污染阻隔等),最后进行生态恢复工程。无论是生态化充填造地还是煤矸石山原位污染控制与生态修复都需要实行长期监测,确保对周围的生态环境不会造成影响。具体技术流程如图2所示。

## 2 煤矸石山原位污染控制与生态修复技术

对于已经堆积成山的煤矸石中,原位污染控制与

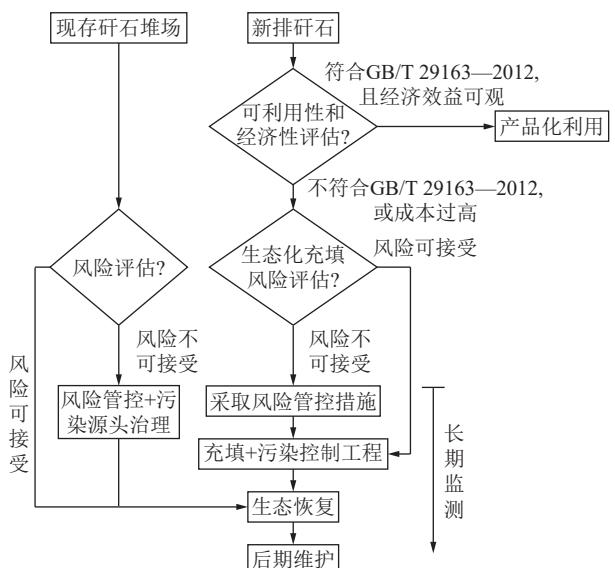


图2 煤矸石规模化生态利用流程

Fig.2 Process of ecological utilization of coal gangue on a large scale

生态修复是最佳的固废规模化生态利用方式,其最大的难点是:①矸石可能氧化产酸、产热和自燃,如何原位控制污染风险;②矸石山困难立地条件下如何植被重建与生态利用。在我国煤矸石山原位治理的几十年发展过程中,取得了许多成功的案例,但酸性自燃煤矸石山的生态修复利用难度最大,复燃率高达60%。从图1可知,酸性煤矸石山会存在内部高温区,甚至已经发生自燃,其安全、有效的治理是世界性难题。难点在于:①缺乏精准自燃监测与诊断技术,对自燃位置、面积等情况无法准确判断;②煤矸石山空间变异大、自燃条件复杂,缺乏有效的、安全的灭火措施;③防火措施易失效;④立地条件差,种植植被难。

针对上述问题,提出污染源头诊断-防灭火与污染阻隔-植被恢复一体化的生态利用技术,其思路如图3所示。

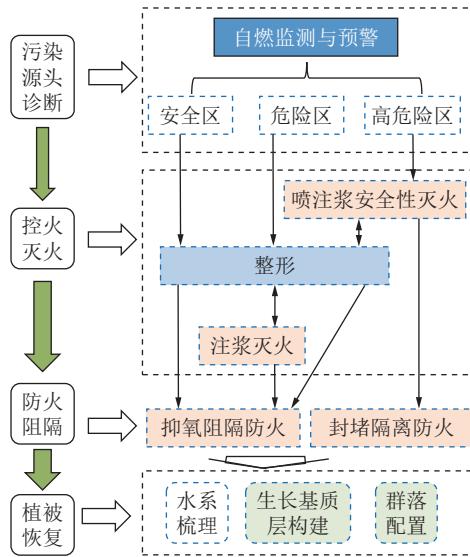


图3 污染源头诊断-防灭火与污染阻隔-植被恢复一体化的生态利用技术

Fig.3 Ecological utilization technology integrating pollution source diagnosis, fire prevention and pollution containment, and vegetation restoration

## 2.1 自燃分期

综合国内外矸石山自燃机理的研究,以矸石山可燃物自热起燃为自燃标志,将自燃划分为孕育期、发生期、发展期和衰退期。并以自燃的点、线、面温度变化为主要线索描述矸石山自燃发展过程<sup>[17]</sup>。

## 2.2 自燃监测与治理分区

燃点定位是精准灭火、抑制污染物排放的基础。常用方法为人工点温度计测温<sup>[18]</sup>、打钻测温<sup>[19]</sup>等,工作量大、深部燃点位置定位精度低,且存在安全隐患的问题,团队发明了热红外与测绘技术相耦合的表面自燃位置定位技术,重点解决了多源监测设备站位优化、控制点布设、特征点识别、坐标基准耦合等问题;提出了热红外温度信息的距离、气候等补偿模型,解决了温度信息与空间信息的数据融合问题,构建了表面自燃温度场的四维模型(图4),解决了表面自燃位置定位的问题,定位误差为 $\pm 0.15$  m,温度偏差 $\pm 3$  °C。

基于大量自然、不自然及灭火后的矸石山内部温度变化多传感器监测数据,利用空间热力学、传热学等理论,依据矸石山多孔非连续介质导致热量非均匀传播的特性,通过物理和数值模拟试验、数据挖掘,修正了连续介质热传导模型,利用深部自燃点所垂直对应表面温度与邻近温度比值的推演,建立了基于表面自燃温度的矸石山深部燃点位置解算模型,采用拟合逼近真值的方法进行数值求解,形成了一种自燃煤矸石山着火位置确定方法。经验证,深部燃点定位误差为 $\pm 0.50$  m,满足精准灭火要求。

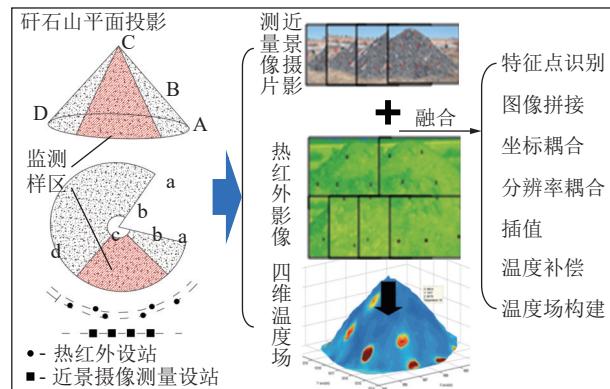


图4 煤矸石山表面自燃温度监测定位示意

Fig.4 Schematic diagram for monitoring and localization of spontaneous combustion temperatures on the surface of gangue piles

结合煤矸石山自燃分期、地形特征等,将矸石山划分为安全区、危险区和高危险区,其中安全区为自燃孕育期,且地形稳定;危险区为自燃发生期,或地形不稳定;高危险区为自燃发展期和衰退期,或存在高陡、极不稳定边坡的区域。该区域划分可为后续治理提供依据。

## 2.3 安全控火灭火技术

灭火是控制矸石山有害气体析出的关键。常用方法为挖除法、注浆法<sup>[17]</sup>等,可能引发尘爆、汽爆等。且着火区存在爆炸风险、有毒有害气体体积分数高及温度过高,导致人员无法接近。因此,安全、高效灭火是难点。笔者团队<sup>[17]</sup>发明了远距离(30~50 m)、大流量(80 m<sup>3</sup>/h)浅层喷浆控火技术,其工法是采用自下而上等高线环带式作业,快速封堵底部“风门”切断氧气供应、抑制燃烧,同时保障内部热量从上部逐步释放。

当温度降至安全范围、可以靠近操作时,在灭火区科学布设钻孔至精准定位深度,间隔性对其中一部分进行注浆,其余作为排气孔,逐步完成所有钻孔的注浆;注浆时先低温区后高温区,先低浓度灭火散热再高浓度包裹封堵,并依据温度变化在施工中动态调整注浆浓度,达到逐步围控内部燃烧区、封堵气道、阻隔灭火的目的,有效防止了因排气阻滞引起的气爆以及长效灭火的问题。灭火效率提高近3倍,实现安全、高效灭火(图5)。

## 2.4 防火防污阻隔技术

矸石山存在大量可燃物质,防火是治本之策。硫铁矿的氧化是煤矸石产酸、升温、自燃的主要原因,因此,抑制氧化、隔绝氧气是有效的防火措施。笔者团队研发了复合专性杀菌剂,如十二烷基硫酸钠与三氯生或苯甲酸钠复合,可有效杀灭T.f菌,对Fe<sup>2+</sup>氧化抑

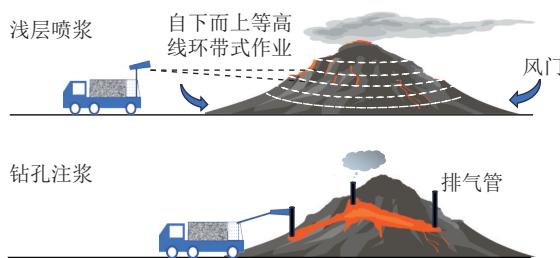


图 5 喷浆控火与注浆灭火结合的安全灭火技术

Fig.5 Safe fire extinguishing technology combining slurry fire control and grouting fire extinguishing

制率在 75% 以上。也可与保水剂混合制成缓释剂, 延长抑菌作用时间。自主分离出硫酸盐还原菌 (SRB)<sup>[20]</sup>, 接种该菌株 18 d 后, 可将已酸化煤矸石的 pH 由 3.09 提升至 4.62, 同时去除 48.25% 的硫酸盐离子和 88.40% 以上的重金属离子<sup>[21]</sup>。在煤矸石表面喷洒上述 2 者组合形成的氧化抑制剂, 用量为 1~4 L/m<sup>2</sup>, 溶液质量分数为 0.3%~0.5%, 可从源头上抑制矸石氧化产酸、升温, 达到防火目的。

氧气是煤矸石氧化产酸产热的驱动力。为了隔绝氧气达到长效防火与阻隔污染目的, 提出了惰性材料覆盖碾压的隔氧防火与污染阻隔方法<sup>[22]</sup>。以黏土、粉黏土、粉煤灰等不同基质混合制成复合覆盖材料阻隔氧气和污染物, 以氧气入渗量为指标, 优选出一定渗透率下的最优表面覆盖阻隔层的材料配比。针对松散覆盖惰性材料无法满足煤矸石山防燃有效隔氧的问题, 采用平碾、强夯等方法增加覆盖材料的密度。基于空气阻隔性和达西定律, 构建了粉煤灰与黄土配比的关系模型和覆盖厚度的优选模型, 其配比是: 黄土添加 20%~30% 粉煤灰, 覆盖厚度为 15~20 cm。将惰性材料覆盖在矸石表面后, 使用专制碾压设备 (图 6) 多次碾压, 使得压实度达到 85% 以上, 达到隔绝氧气、防火防污阻隔的目的<sup>[23]</sup>。



图 6 覆盖碾压隔氧施工现场

Fig.6 Construction site covered with milled oxygen barrier treatment

## 2.5 植被恢复技术

植被恢复是煤矸石山生态化利用的最终目的。针对矸石山原生堆放和防灭火后的困难立地条件, 开

发了防燃型植被恢复技术 (图 7), 实现植被恢复后覆盖率在 80% 以上。



图 7 植被恢复示意

Fig.7 Schematic diagram of revegetation techniques

研究表明不同类型矸石山生态恢复过程中选用植被的类型和生长情况差异明显, 植物群落的梯度变化主要受土壤阳离子交换量、总孔隙度和土壤养分控制<sup>[24]</sup>。针对防火层不利于植被根系发育的问题, 筛选出抗逆性强、生态位宽、浅根系、须根发达、地上生物量小的自燃煤矸石山适生的乡土植物 23 种, 如剑麻、紫穗槐、胡枝子、蜀葵等, 根据物种生态学特征与种间关系及生物多样性原理, 构建了生态结构稳定、防燃型草灌植物群落。

## 3 煤矸石地面充填造地规模化生态利用技术

煤矸石作为充填材料充填采煤塌陷区造地已有 50 多年的历史, 煤矸石充填塌陷区作为工业园区、林地、草地以及耕地等均有成功案例。《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》(发改环资〔2021〕381 号) 指出, 在煤炭行业推广“煤矸石井下充填+地面回填”, 促进矸石减量。江苏张双楼煤矿采取煤矸石深埋充填复垦塌陷地技术, 高质量复垦了采煤塌陷地 151 亩 (10.07 ha)<sup>[25]</sup>。在我国晋陕蒙矿区, 将煤矸石地面充填至丘陵沟壑, 可塑造出大面积的平地, 实现煤矸石规模化利用和造地结合, 已做出有益的探索<sup>[26]</sup>。

煤矸石地面充填造地规模化生态利用技术主要需要解决三大问题: ①环境安全。煤矸石作为工业废物可能带来污染问题, 如何做到环境安全; ②水土流失控制。许多充填区域是荒沟, 极易水土流失, 煤矸石充填后如何控制水土流失; ③造地质量。充填造地工程后土壤质量是否满足土地利用要求。针对以上问题, 笔者从充填生态化利用可行性分析、充填生态化利用技术体系和维护管理长期监测 3 个方面, 阐述充填造地规模化生态利用技术的实现途径与关键问题 (图 8)。

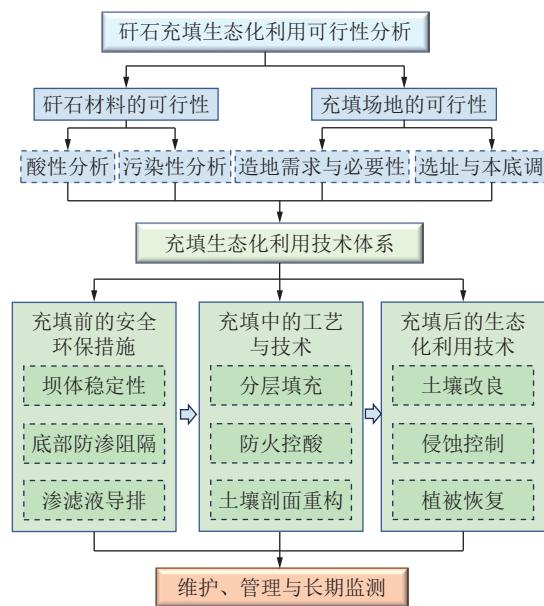


图8 煤矸石地面充填生态利用技术流程

Fig.8 Technical flowchart of coal gangue backfilling and utilization

### 3.1 砧石充填造地生态化利用可行性分析

#### 3.1.1 砧石材料的可行性

对于地面充填造地的煤矸石总体要求是I类一般工业固体废物,除此之外,需重点关注煤矸石的酸性和污染性。

以往对于煤矸石的潜在酸性的评价指标主要是pH。由于煤矸石的pH仅仅表现当时煤矸石浸泡溶液中H<sup>+</sup>浓度的相对大小,只是一个暂时衡量其酸碱性的静态数值。因此,仅使用pH来确定煤矸石的酸碱性及其酸性危害存在许多缺陷。笔者团队建议采用净产酸潜力或净产酸量指标对矸石山的酸性进行诊断评估,当净产酸潜力≤3时,矸石具有极强的产酸潜力;当3<净产酸潜力≤5时,矸石具有一定的产酸潜力;当净产酸潜力>5,矸石一般不会造成酸性污染<sup>[27]</sup>。

煤矸石的污染性主要是指煤矸石本身含有的重金属等可能造成污染。常用的方法是按照HJ 557—2010《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》规定方法获取浸出液,并按照GB 8978—2002《污水综合排放标准》中的方法测定特征污染物种类、浓度等。但由于煤矸石具有一定产酸能力,酸性条件下重金属离子更容易溶出,因此可按照HJ 299—2007《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》中规定的方法或采用毒性浸出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)提取煤矸石浸出液,并根据GB 5085.3《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》中的规定进行毒性鉴别。考虑到重金属的不同形态在环境中的迁移

性和潜在危害性差异较大,可采用三步提取法(European Community Bureau of Reference, BCR法)分析土壤中重金属的形态,并利用风险评估编码(Risk Assessment Code, RAC)法<sup>[28]</sup>对煤矸石内重金属的潜在生态风险进行评估,确定充填工程的生态风险。

#### 3.1.2 充填场地的可行性

首先需要根据区域土地利用状况对充填造地的需求和必要性进行深入分析,对充填场地是否属于塌陷区、荒地等进行详细阐述,对当地土地利用、土地整治状况与可行性以及复垦造地政策进行介绍。通过对充填造地的需求与必要性分析,评估充填造地合理性。

第2,充填场地选址应符合环境保护法律法规及相关法定规划要求,应与当地城市总体规划和国土空间规划协调一致,应与当地国土空间规划协调一致。考虑经济合理、生态可控、工程安全等,充填位置选址应位于地质稳定区域,并遵循以下原则:①交通便捷,运距合理。②不占用基本农田、林地、草地等,采煤塌陷区内未利用地最佳。③不在国务院和国务院主管部门及省、自治区、直辖市人民政府划定的自然保护区、风景区、生活饮用水源地和其他特别保护的区域内。④不在居民密集居住区。⑤无通水水系。⑥不在断裂带、地下蕴矿带、石灰坑及溶岩洞区。

第3,需要进行本底调查,主要关注当地的水文地质情况、周围自然环境、环境质量本底、环境保护目标和区域污染源等。可采取文献调研、资料收集、现场调查和人员访谈相结合的方式。从工程地质稳定性的角度和生态环境风险角度进行分析评估。根据评估结果,判断充填的可行性,并给出生态环境风险管控目标、管控措施要求以及稳定性措施要求等,确保风险可接受。

### 3.2 充填生态化利用技术体系

充填生态化利用体系按照充填工程施工的顺序分为:充填前的安全环保措施、充填中的工艺与技术以及充填后的生态化利用技术。

#### 3.2.1 充填前的安全环保措施

安全与环保措施是充填生态化利用的关键,需要加大环境风险的防控措施和水土流失的控制工程,保障项目得到环保和水土保持部门的认可,促进该技术的顺利实施。

根据区域地质环境特征、污染物特征、风险水平,以及在环境中的迁移转化和影响途径,最终确定充填工程风险管控方案。通过拦矸坝、防渗阻隔设施、渗滤液导排设施等一系列措施确保充填工程的稳定性、生态环境风险可控,解决充填造地规模化生态利用

中可能带来污染问题和水土流失问题。

拦矸坝既是防止地质灾害和水土流失的措施,也是地貌重塑设计的重要内容。应依据当地地形合理设计坝体的数量、位置、高度等。一般设置在沟谷地带的沟口处,采用混凝土浇筑,其顶部宽度不少于2 m,内侧呈直角,外侧呈梯形,外部覆土。同时在马道内侧设置挡墙,墙内侧进行封堵防火措施。

底部防渗阻隔设施主要由高密度聚乙烯(HDPE)和由黏土、合成防渗土或复合防渗材料共同组成。这些材料具有良好的防渗阻隔性能,能够有效地阻止渗滤液渗漏,截断污染物迁移途径。

渗滤液导排系统一般设置在矸石堆层和防渗阻隔层中间,铺设30 cm厚的卵石,下设置土工复合排水网,具体结构如图9所示。

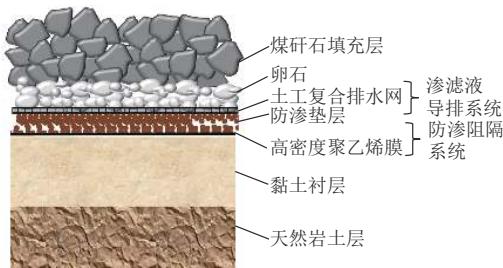


图9 充填体底部构造

Fig.9 Bottom construction of the backfill

### 3.2.2 充填中的工艺与技术

充填过程中涉及的相关工艺技术主要包括分层充填技术、防火控酸技术和土壤剖面重构技术。

煤矸石充填时采用“分层充填,夹层隔离,表层覆土”的工艺,具体如图10所示。通常在底部防渗隔离层基础上采用1层矸石1层土壤的方式进行分层充填,以土壤作为隔离夹层的目的是为了阻隔空气,避免煤矸石氧化产酸,引发内部升温;在最后一层矸石上面覆盖以黏土、粉黏土、粉煤灰等混合制成惰性材料阻隔层以阻隔氧气和污染物;最后在阻隔层上面进行表层覆土以保障植被生长。表层覆土可与土壤剖面构建技术结合,以土层生态位为理论基础、土壤关键层为构造核心,仿照自然土壤结构与形成过程,设计和优化土壤剖面构型,获得最佳生产力功能的土壤剖面构型<sup>[29-30]</sup>。

分层充填的关键是:①确定3个厚度。煤矸石单层充填厚度、夹层隔离厚度和表层覆土厚度。一般来说,单层充填厚度3~5 m,夹层隔离厚度0.5 m,表层覆土厚度不低于1 m。②压实强度。为了尽可能减少不均匀下沉,分层矸石充填后需进行压实,压实强度根据造地的利用方向选择。

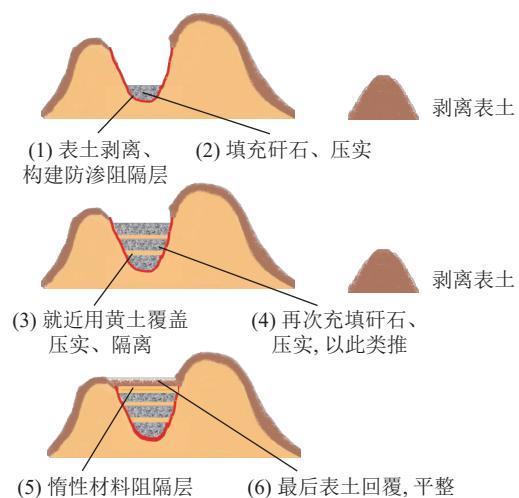


图10 煤矸石地面充填造地工艺示意

Fig.10 Schematic diagram of gangue ground backfilling process

### 3.2.3 充填后的生态化利用技术

充填后的生态化利用技术主要包括土壤改良、侵蚀控制和植被恢复的构建。

土壤改良主要是根据需求辅以适当的土壤改良剂、微生物菌剂等达到增肥、保水等目的,最终使土壤功能和生产力得到恢复,并长期稳定。一般情况下通过科学的土壤剖面构建可以大大省去土壤改良的成本。

侵蚀控制工程的主要目的是控制冲充填后坡面侵蚀造成的地质灾害。其中地表径流排水系统的设计是防止坡面侵蚀、水土流失的关键,可根据自然径流流向设计由纵向和横向排水沟组成的网状排水系统,并尽可能采用柔性排水设施,降低了渗漏的风险同时,确保降水能够及时排出。亦可在坡面上设置石头或者板栅等结构构成横向护坡,防治土壤被冲走。

土壤改良后的土地利用方向一般有林草地、农用地、建设用地等。如果后期用作林草地,充填后则需要进行植被的恢复。首先要筛选出抗旱、抗寒、抗瘠薄、繁衍迅速、覆盖效果好、根系发达、抗病虫害的与当地气候土壤条件适应的乡土品种,例如朱琦等<sup>[31]</sup>筛选出紫花苜蓿、兴安黄耆和茵陈蒿能够适应华北地区煤矸石山斜角大、贫瘠和干旱等生境,具备作为酸性煤矸石山植被恢复先锋物种的潜力。筛选出合适的植被品种后,在综合考虑坡度、覆盖系统的结构类型、土地利用与水土保持、堆体稳定性等因素的基础上利用生态学原理进行合理的植被配置,促进群落向正向演替的方向发展,达到丰富植被多样性和水土保持的目的。为了保证煤矸石山植物的成活率,应根据植被生长的基本规律与主要影响因子,选择适宜的植物种植技术,根据自然演替规律合理规划栽种时间,完善抚育措施,以保证栽植植被的成活率,最终恢复生物

多样性和构建持续稳定的植物群落。

进行植被种植的同时还需构建相关的地表配套设施,包括配套铺设可供大型机械进入的道路以及植被抚育期的喷灌设施等。除此之外,还可根据工程具体需要设计渗滤液收集处理系统,处理意外情况下排出的酸性含重金属废水。

### 3.3 后期维护、管理与长期监测

充填工程完成后需要对工程进行整体的维护和管理。如果是林草地生态利用方向,一般需要对植被进行2~3 a的抚育和浇灌,加强水、肥的管理和病虫害防治,促进植被生态系统实现自我演替。同时需要结合环境质量本底调查结果,布设土壤、地下水、地表水监测点,长期监测其对周边生态环境的影响。若是农用地利用方向,还需要监测农产品质量与产量;建设用地需监测稳定性等。

## 4 结论与展望

(1) 通过分析煤矸石规模化利用的生态损伤机理,提出其生态化利用原理,即从源头控制、过程截断2个方面控制规模化利用的生态环境风险,在此基础上结合土壤重构理论和仿自然的生态恢复技术完成生态价值和生态功能的实现。

(2) 针对酸性煤矸石山,发明了自燃监测、安全控火灭火、长效防火、植被恢复等系列关键技术,形成了一体化原位污染控制与生态修复技术。

(3) 对于煤矸石地面充填造地技术,应从矸石的选择、充填位置的选址、环境与安全控制、科学的充填工艺以及后期维护、管理与长期监测等环节,进行生态化利用,解决固废大规模充填造地利用过程中可能存在的污染、水土流失和土壤质量问题。

煤矸石规模化生态利用技术可实现煤矸石的大规模消纳,破解煤炭企业固废处置困境,同时也解决了废弃矿山生态修复材料来源问题,控制了污染和生态风险,恢复了周边生态环境,增加了可利用土地,打造了矿区生态修复的新模式,对促进煤炭行业的高质量发展和改善矿区生态环境质量起到重要作用。

本文对目前亟待解决的煤矸石大规模消纳能否生态环境安全的难题,从技术视角探讨了环境安全的生态利用方法,为推动矸石山原位生态修复和矸石充填造地2种已经现实存在的矸石规模化生态利用方式的推广应用提供依据和支撑。

**致谢:** 论文撰写过程中得到了肖圣同学的帮助,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报 [N/OL]. [Https://www.Gov.Cn/Xinwen/2023-02/28/Content\\_5743623.Htm](Https://www.Gov.Cn/Xinwen/2023-02/28/Content_5743623.Htm).
- [2] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612.  
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.
- [3] 王小云, 牛艳霞. 煤矸石研究综述: 分类、危害及综合利用[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(11): 18–25.  
WANG Xiaoyun, NIU Yanxia. Review of research on coal gangue with its classification, hazards and comprehensive utilization[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(11): 18–25.
- [4] 范晓平, 刘京, 常哲, 等. 煤矸石综合利用与矿山生态修复的战略思考[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(1): 8–15.  
FAN Xiaoping, LIU Jing, KANG Zhe, et al. Strategic thinking of comprehensive utilization of coal gangue and ecological restoration of mines[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2023, 31(1): 8–15.
- [5] 常纪文, 杜根杰, 杜建磊, 等. 我国煤矸石综合利用的现状、问题与建议[J]. 中国环保产业, 2022(8): 13–17.  
CHANG Jiwen, DU Genjie, DU Jianlei, et al. Current situation of the comprehensive utilization of coal gangue in China and the related problems and recommendations[J]. China Environmental Protection Industry, 2022(8): 13–17.
- [6] LIU Haibin, LIU Zhenling. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12): 1331–1340.
- [7] LI Jiayan, WANG Jinman. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
- [8] WANG Jinman, QIN Qian, HU Sijia et al. A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 631–638.
- [9] MA Dan, ZHANG Jixiong, DUAN Hongyu, et al. Reutilization of gangue wastes in underground backfilling mining: Overburden aquifer protection[J]. Chemosphere, 2021, 264: 128400.
- [10] GAO Jida, LIN Qianji, YANG Tingzhi, et al. Preparation and characterization of ZSM-5 molecular sieve using coal gangue as a raw material via solvent-free method: Adsorption performance tests for heavy metal ions and methylene blue[J]. Chemosphere, 2023, 341: 139741.
- [11] QIN Qizheng, DENG Jiushuai, GENG Huanhuan, et al. An exploratory study on strategic metal recovery of coal gangue and sustainable utilization potential of recovery residue[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 340: 130765.
- [12] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 煤矿井下煤矸石智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 417–430.  
ZHANG Ji Xiong, TU Shi Hao, CAO Yi Jun, et al. Coal gangue in-

- telligent separation and backfilling technology and its engineering application in underground coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 417–430.
- [13] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10): 54–66.  
WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 54–66.
- [14] 中国煤炭工业协会. 2022年煤炭行业年度发展报告[R]. 北京, 2023.
- [15] 胡振琪, 宫有寿. 煤矸石山生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [16] 徐晶晶, 胡振琪, 赵艳玲, 等. 酸性煤矸石山中氧化亚铁硫杆菌的杀菌剂研究现状[J]. *中国矿业*, 2014, 23(1): 62–65.  
XU Jingjing, HU Zhenqi, ZHAO Yanling et al. The bactericide of acidithiobacillus ferrooxidans in the acid coal waste piles[J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(1): 62–65.
- [17] 位蓓蕾, 胡振琪, 王晓军, 等. 煤矸石山的自燃规律与综合治理工程措施研究[J]. *矿业安全与环保*, 2016, 43(1): 92–95.  
WEI Beilei, HU Zhenqi, WANG Xiaojun, et al. Study on Spontaneous combustion rule of gangue dump and its comprehensive control measures[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2016, 43(1): 92–95.
- [18] LY/T 2991—2018, 煤矸石山生态修复综合技术规范[S].
- [19] 汪洋, 彭斌, 白宇, 等. 高硫煤矸石山自燃火灾治理技术研究[J]. *能源技术与管理*, 2020, 45(5): 52–54.
- [20] 胡振琪, 马保国, 张明亮, 等. 高效硫酸盐还原菌对煤矸石硫污染的修复作用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(3): 400–405.  
HU Zhenqi, MA Baoguo, ZHANG Mingliang, et al. Bioremediation of sulfuric contamination from coal wastes by sulfate-reducing bacteria (SRB)[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(3): 400–405.
- [21] 蔡云, 朱琦, 胡振琪. 某硫酸盐还原菌株的分离及其在矸石山酸化污染修复中的应用[J]. *金属矿山*, 2023, 52(7): 254–260.  
CAI Yun, ZHU Qi, HU Zhenqi. Isolation of an SRB strain and its application in remediation of coal gangue acidification pollution[J]. *Metal Mine*, 2023, 52(7): 254–260.
- [22] 胡振琪、张庆恒、陈胜华, 等. 自燃煤矸石山治理与生态重建技术[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [23] 陈胜华, 胡振琪, 陈胜艳. 煤矸石山防自燃隔离层的构建及其效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 235–243.  
CHEN Shenghua, HU Zhenqi, CHEN Shengyan. Construction of isolation layers for preventing spontaneous combustion of coal gangue dump and its effects[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(2): 235–243.
- [24] 刘龙昌, 贾娟, 徐国瑞, 等. 煤矸石山植被自然恢复规律及其环境影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(S1): 99–104.  
LIU Longchang, JIA Juan, XU Guorui, et al. Effects of soil properties on vegetation restoration in coal-gangue pile[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 38(S1): 99–104.
- [25] 李正军. 煤矸石深埋充填采煤塌陷区复垦造地技术研究[J]. *煤炭科技*, 2017(2): 42–46.  
LI Zhengjun. Study on reclaimed land reclamation technology of coal gangue in deep filling mining subsidence area[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2017(2): 42–46.
- [26] 杨智涛, 黄健华. 煤矸石充填沟壑土地复垦生态修复工程的探索与实践[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2023(4): 84–87, 92.  
YANG Zhitao, HUANG Jianhua. Exploration and practice of ecological restoration project of coal gangue filling and gully land reclamation[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2023(4): 84–87, 92.
- [27] 张明亮. 煤矸石产酸潜力及粉煤灰与马粪堆肥对重金属的吸附机理[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.  
ZHANG Mingliang. Acid potential of coal refuses and the mechanism of heavy metals absorption on fly ash and horse manure compost[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2009.
- [28] 殷文文, 张理群, 丁丹, 等. 淮南潘一矿煤基固废精细化学结构及重金属生态风险评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(12): 176–184.  
YIN Wenwen, ZHANG Liqun, DING Dan, et al. Coal-based solid waste from the Panyi Mine in the Huainan mining area: Fine-scale chemical structure and ecological risk assessment of heavy metals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(12): 176–184.
- [29] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2499–2515.  
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499–2515.
- [30] 胡振琪, 张子璇, 孙煌. 试论矿山生态修复的地质成土[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(12): 21–29.  
HU Zhenqi, ZHANG Zixuan, SUN Huang. Geological soil formation for ecological restoration of mining areas and its case study[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 21–29.
- [31] 朱琦, 聂欣然, 张勇, 等. 华北地区煤矸石山生态修复草本植物种优选[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(8): 90–97.  
ZHU Qi, NIE Xinran, ZHANG Yong, et al. Selection of herb species for ecological restoration of coal gangue piles in North China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(8): 90–97.