

废弃矿山固废资源化利用与生态修复一体化工程研究

宋司马

四川省自然资源勘察设计集团生态环境有限公司 四川 成都 610055

摘要：传统矿山治理模式有个突出毛病，固废处置和生态修复各干各的，资源利用率上不去，治理成本偏高。本文以废弃矿山固废资源化利用与生态修复一体化工程为研究对象，从矿山场地的实际破损特征和固废资源条件出发，梳理了矿山固废预处理、分级资源化利用的核心技术体系，并按类别探讨了建筑填料、生态基质、高值尾矿的多元化利用路径。在此基础上，配套研究场地安全整治、土壤重构改良、植被生态修复、水土与水系治理等一整套生态修复关键技术，最终形成固废消纳利用与生态重构协同联动的一体化治理模式。

关键词：废弃矿山；固废资源化利用；生态修复一体化；工程

引言

现阶段国内矿山治理，大多还是固废单独处置、生态单独修复，各做各的。两套技术体系相对独立，工程层面缺少协同。大量本可以二次利用的矿山固废被简单填埋，资源浪费严重；另一边，生态修复工程又要消耗不少天然土方和建材，形成双向浪费。传统治理方式还有施工流程繁琐、治理周期长、后期生态稳定性差等问题，很难对矿山场地进行系统性、根本性的修复。面对这些行业痛点，一体化综合治理的理念正逐步成为废弃矿山修复的主流方向。

1 矿山固废资源化利用关键工程技术

1.1 固废预处理技术

（1）筛分处理是固废预处理的基础环节，目的就是按颗粒粒径大小把物料分开。矿山原生固废粒径分布很杂，大块岩石、细碎渣土、粉尘杂质混在一起，不同粒径的物料用途差别也大。用多级筛分的方式，可以把混杂固废分成不同粒度等级，挑出其中的轻质杂质、腐殖物和无用碎屑，做到物料初步归类。（2）破碎工序主要针对筛分后留下的大块坚硬废石、结块尾矿等物料做细化处理^[1]。原生大块固废结构完整，强度高，直接拿来用于生态覆土或建材再生是不行的。通过可控破碎，把大块物料加工到符合工程粒径要求的颗粒，同时优化颗粒级配，提高堆积密实度。（3）清洗工艺用来清除固废颗粒表面附着的泥土、可溶性盐和污染物。矿山固废长期露天堆放，表面容易吸附各种杂质和有害可溶物，这些东西既影响后续改性和资源化产品质量，也可能对修复区的土壤和水体造成隐患。用清水冲洗加机械剥离的办法，能有效降低物料表面的污染物含量，把基质净化一下，为后续改性处理打好基础，同时也避免固废利用过程中的二次污染。（4）改性稳定化是预处理里的核心提

质环节，主要针对矿山固废稳定性差、活性不均、固结能力不足这些短板。根据固废本身的理化特性，选用环保型改性材料和温和的稳定化工艺，调整固废的内部结构和化学组成，降低遇水软化、松散坍塌的倾向，改善力学性能和环境稳定性。

1.2 不同类型固废资源化利用路径

（1）建筑骨料与路基填料制备，是矿山大块废石、碎石类固废最基础的利用方式。前期经过破碎筛分和净化改性的硬质固废物料，内部结构致密稳定，力学承载性能良好，具备替代天然砂石的条件。通过精细化粒度调控和性能优化，可以把规整后的物料加工成符合工程标准的粗细骨料。这类再生骨料可用于矿山局部场地硬化、边坡防护基层浇筑等配套工程，改性后达标的物料还能做高强度路基填充材料，替代天然石料，减少自然资源开采。（2）土壤改良基质与生态覆土制备，这条路径跟矿山生态修复很契合^[2]。矿山原有土壤大多在开采过程中被破坏，土层贫瘠、结构松散、保水保肥能力差。粒径小的矿山渣土、轻质改性固废物料，经过深度无害化处理后，再配上无害有机调理物料进行复配。这样制出来的生态基质可以改善土体孔隙结构，提高土层保水蓄肥能力，缓解修复区土壤贫瘠、板结的问题。（3）尾矿物料化学组分比较特殊，与普通废石渣土有明显区别，具备较高的深度开发价值，适合开展有价值组分提取和高值化利用。如果采用常规粗放填埋的方式处理，尾矿里的稀有金属、有用矿物组分就会白白浪费。通过物理分选、温和浸取这类绿色工艺，可以精准分离回收尾矿中的有效矿物组分。剩余尾料经过稳定化处理后，还能继续用于生态修复配套作业，形成梯级利用。

1.3 固废资源化产品质量控制标准

（1）原料源头把控，质量就从这里开始管起。所有

用于资源化加工的矿山固废,提前做好无害化筛查和性能检测。工作人员需要把物料的污染物含量、重金属富集情况、结构稳定性能都查一遍,挑出那些重度污染、性能波动过大的不合格物料。源头卡住了,劣质原料就进不了加工环节,后面成品性能不达标、环境风险超标的问题也能减少很多,给标准化生产打好基础。(2)生产加工过程中的动态质控,关系到产品是否均匀。固废再生产品的性能,容易受破碎粒度、改性配比、加工时长等多个因素影响。施工和生产过程中,要持续关注物料级配均匀度、改性固化效果、杂质去除程度。随时调整工艺参数,把物料处理标准统一起来,减少不同批次之间的性能偏差。(3)成品常态化检测,是质量能否真正达标的关键一步。针对不同用途的资源化产品,检测指标需要区别对待^[3]。用于路基和边坡支护的硬质再生骨料,重点检测力学强度、压实度、耐久性和抗渗性能。用于生态修复的土壤基质和覆土物料,重点考察养分结构、孔隙性能、重金属含量以及污染物浸出水平。(4)还需要建立一套适配矿山一体化工程的质量验收规范和长效管控机制。参照国土生态修复和建材再生利用的通用标准,细化现场验收流程,完善产品台账记录和质量追溯体系。持续跟踪再生产品在场内填充、土层重构、植被养护过程中的性能变化,用全过程的质量管控保障固废资源化产品的安全稳定

2 矿山生态修复配套工程技术

2.1 场地安全整治工程

(1)危岩清理是场地整治的前置活儿,长期裸露风化,矿山坡面上会长出不少松动岩体和悬空碎石,这些松散岩块附着力很差,雨水一冲、风一吹就容易掉下来,对施工人员和后续生态都是持续威胁。整治时要把坡面全域仔细排查一遍,找出表层松动岩块、风化剥落层和悬空危体。人工配合轻型机械,有序清理掉这些隐患,同时把坡面基础形态整平,给后续边坡治理减少点麻烦。(2)边坡加固主要针对清理后裸露的破损边坡做稳定性强化,矿山开采形成的人工边坡,普遍坡度陡、岩体裂隙发育,整体抗冲刷能力和结构稳定性都不太行。光靠清理危岩撑不了太久,得结合坡面结构特征做系统性加固。用上土体岩体补强、坡面防护、结构固结这些无害化工程手段,提高边坡的抗滑性能和抗风化能力。这样能有效控制雨水侵蚀引起的坡面冲刷、滑坡和崩塌,让边坡形态和结构长期稳定,给后期植被生长提供一个牢靠的载体。(3)塌陷区治理是矿山场地整治里比较棘手的一块,地下开采留下的采空区,会引发地表沉降、土体空洞、土层错位这些问题,造成场地地形高

低不平,土体结构破碎松散。治理思路主要是土体回填压实、空洞充填固结、场地平整夯实。用预处理后合格的矿山固废物料就地充填,分层填筑、分层压实,把塌陷区的地面平整度恢复起来。重构一个密实稳定的场地土体结构,消除地下空洞带来的沉降风险,让废弃场地的地形地貌规整起来,满足后续生态修复和资源化工程对场地的使用要求。

2.2 土壤重构与改良修复技术

(1)土壤重构的重点是搭出土层结构,针对矿山塌陷坑、裸露坡面、平整作业区等不同形式的受损场地,分层把土体搭建起来。用预处理后的无害化固废生态基质做底层填充材料,代替传统的天然土方进行铺垫。按照自然土壤的层级分布规律,依次铺设底层支撑层、透水缓冲层和表层种植层,逐步恢复场地的完整土层厚度。重构过程中要注意控制土体的密实程度,太紧了根系扎不下去,太松了又会影响整体稳定,避免后期出现土层流失或塌陷。(2)土壤改良主要针对重构后形成的新土体以及原有受损土壤进行性能优化,矿山废弃场地的土体,普遍存在有机质含量低、微生物活性不足、养分单一等问题。搭配绿色无害的有机调理物料和生物改良组分,对土体做全方位改性^[4]。逐步提高土壤中的有机质含量,激活微生物群落活性,改善土体孔隙结构,让土壤的透气和储水能力恢复过来。同时调整土体内部的酸碱比例,缓解矿山场地常见的土壤板结和盐碱化问题。(3)整个修复过程中,要坚持因地制宜。不同修复区域的土体破损程度不同,立地条件也有差别,重构厚度和改良配比方案需要相应调整,不能搞一刀切的粗放处理。要保证不同区域的土壤在肥力、透气性和稳定性上,都能适配当地乡土植被的生长习性。经过重构和改良之后,土壤能够形成一个自我调节的良性系统,即使后续不依赖人工干预,也能持续改善土壤环境,逐步恢复矿山区域的自然生态功能,助力生态系统实现长效稳定修复。

2.3 植被生态修复技术

(1)外来引种的植物,常有水土不服的问题——抗逆性弱、养护成本高,还可能带来生态入侵的隐患。本土乡土植物则不同,它们长期在当地自然环境中生长,早已适应当地的温度、降水和土壤条件,抗旱、耐贫瘠、抗风沙能力都更强。修复工作开展之前,需要先摸清矿区的原生生态特征,筛选根系发达、成活率高、固土能力好的乡土草本、灌木和乔木品种。(2)矿山中的坡面、平台、低洼地带,立地条件差异较大。单一植被种植模式难以应对这种复杂环境。根据不同区域的地形

坡度、土层厚度和光照条件,采用立体化分层搭配的思路来布置植被。乔木、灌木、草本高低搭配,形成多层次的复合植被结构。高层植被可以遮阴挡风,中层灌木能够强化坡面固土,底层草本快速覆盖裸地,减少雨水对坡面土体的直接冲刷,从而全方位提升植被群落的防风固土和水土保持能力。(3)矿山上新栽的植被,生长环境本身就差,初期抗干扰能力弱,养护一旦跟不上就很容易大面积枯死。植被栽植完成后,需要进行一段时间的精细管护,包括苗期补水、清理杂草、长势监测以及绿色防控病虫害。根据植被生长情况动态调整养护节奏,逐步减少人工干预,引导植被自主完成群落演替。持续改善植被生长的微环境,让最初人工栽植的植被群落逐步走向自然化、稳定化。

2.4 水土保持与水系生态修复技术

(1)根据矿山地形起伏,用微地形整理的办法调整地表径流的走法,把集中水流带来的冲刷力分散开。依托前期重构改良过的土体结构,配合生态固土措施把表层岩土稳住,减少表层土体松散流失。地表覆盖度提上来之后,雨水击溅对土体的破坏也能减轻,场地整体的蓄水保土能力逐步提高,坡面侵蚀和泥沙流失速率持续降下来,从源头把矿区水土流失继续恶化的势头按住。

(2)矿山原有的沟渠、低洼蓄水区,常常被废弃渣土淤积填塞,水体流不动,形成大片静态积水。积水时间长了容易滋生环境问题,还会阻碍区域水文循环更新。治理的时候,对淤积的水系适当清淤疏通,规整一下岸线形态,把水系原本的连通通道恢复起来,让地表水能正常流动排泄^[5]。把矿区积水区域和排水路径理顺了,场地积水内涝、水体滞留变质这些衍生环境问题也就跟着解

决了。(3)用生态化岸坡改造代替传统的硬质护坡,保留水体跟土体之间的物质交换通道。适当培育一些适应当地水环境的水生微生物和低等水生植物,慢慢把水体环境净化一下,提高水体的自净能力。持续修复矿区的水文生态链条,让受损的水系重新具备调蓄雨水、涵养水土、调节区域微环境的功能,实现水土资源的动态平衡,推动矿山整体生态环境稳步向好恢复。

结语

总之,一体化工程模式把固废处置和生态修复之间那道墙给拆了,矿山固废就地消纳、梯级利用,固废的资源价值被尽可能挖掘出来,天然资源的开采消耗也相应减少。配上系统化的地质整治和生态重构,矿区的地质安全隐患能彻底清除,区域的水土保持能力和生物栖息环境也在逐步恢复,受损的矿山生态系统慢慢走上自我演替和稳态发展的路子。

参考文献

- [1]胡江,游新月.生态修复与固废处置一体化技术模式构建及应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2026,(5):138-141.
- [2]王育龙,宋雨欣,孙东亮,等.矿山固体废弃物在矿山生态修复中的应用[J].资源导刊,2026,(6):37-40.
- [3]王平,付战勇,王菲,等.多源煤基固体废弃物应用于土壤修复的研究进展[J].洁净煤技术,2026,32(4):273-285.
- [4]吴志坚,万长明,李越.高速公路废弃泥浆资源化利用与生态经济协同路径研究[J].交通节能与环保,2025,21(4):170-173.
- [5]李占营.固体废弃物资源化利用中的环境工程技术创新[J].区域治理,2025,(26):0094-0096.