



高原高寒矿区生态地质层修复中冻土层构建与应用

梁振新 王佟 王伟超 肖龙 杨成 李聪聪

引用本文:

梁振新, 王佟, 王伟超, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中冻土层构建与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 140–148.
LIANG Zhenxin, WANG Tong, WANG Weichao. Construction and application of frozen soil layers in the restoration of ecological geological layers in high-altitude and plateau cold mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 140–148.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1127>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土高原矿区生态修复固碳机制与增汇潜力及调控

Mechanism, potential and regulation of carbon sequestration and sink enhancement in ecological restoration of mining areas in the Loess Plateau

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 502–513 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-2250>

北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 323–333 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1902>

黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究—PVC板材格构锚杆梁植被种植保障技术

Research on slope ecological restoration and management in mining areas on loess plateau: planting support technology of PVC plates lattice anchor beam

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e6df8415-70c0-4d76-b4e1-f933a434d4aa>

碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战

Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 474–483 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0047>

高寒冻土区露天矿水传输涵养系统构建模式及应用

Construction mode and application of open-pit mineral water transmission and conservation system in alpine permafrost area

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 168–179 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1019>

矿区复垦林地生态修复无人机监测研究

Study on ecological restoration of reclaimed forest land in mining area based on UAV monitoring

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dfe04126-d687-4e56-a570-0a0a6e1b79fe>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

梁振新, 王 佟, 王伟超, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中冻土层构建与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 140–148.

LIANG Zhenxin, WANG Tong, WANG Weichao, *et al.* Construction and application of frozen soil layers in the restoration of ecological geological layers in high-altitude and plateau cold mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 140–148.

高原高寒矿区生态地质层修复中冻土层构建与应用

梁振新¹, 王 佟², 王伟超³, 肖 龙⁴, 杨 成⁴, 李聪聪^{5,6}

(1. 青海煤炭地质一〇五勘探队, 青海 西宁 810007; 2. 中国煤炭地质总局, 北京 100083; 3. 青海煤炭地质局, 青海 西宁 810001; 4. 青海煤炭地质勘查院, 青海 西宁 810001; 5. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 6. 中国煤炭地质总局航测遥感局, 陕西 西安 710199)

摘 要: 冻土层在高寒地区的生态平衡中起着重要作用, 但冻土层的修复与保护在高原高寒矿区生态环境治理中经常被忽略, 鲜有研究。以木里矿区聚乎更区生态环境综合整治实践为例, 通过对原始冻土层的平面分布、垂向分布、地层结构、地温变化等特征的分析, 针对破坏的土壤层、地表层、冻土层、煤层顶板岩层等不同研究对象的生态地质层剖面, 按照模拟季节性冻土、多年冻土差异变化特征及其生态地质功能的思路, 在利用构建人造冻土层和回填层二元结构冻土生态地质层剖面模型的基础上, 提出了以冻土概况调查、剖面模型建立、搭接融合、确定回填时间、设计表层保水、布设截排水沟、地貌重塑为流程的人工构建冻土层的修复技术, 以实现人造冻土层在物质结构、地下含隔水层结构及水力联系、水源涵养等方面的功能基本达到原始冻土层的水平, 同时提供更多对冻土保存有利的条件。采用探坑、钻孔岩心取样和孔内长期地温监测等不同方法手段在以往矿区渣山区和新回填修复采坑内对比实验, 证实了原渣山压覆区域多年冻土顶界在稳定抬升, 采坑内新回填区已经开始形成新的冻土层; 通过对比渣山区自然恢复冻土层和采坑内人工修复冻层形成的时间和厚度, 表明人造冻土层构建更有助于该区冻土快速恢复。

关键词: 高原高寒矿区; 木里矿区; 生态地质层; 生态修复; 冻土层

中图分类号: TD167

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)12-0140-09

Construction and application of frozen soil layers in the restoration of ecological geological layers in high-altitude and plateau cold mining area

LIANG Zhenxin¹, WANG Tong², WANG Weichao³, XIAO Long⁴, YANG Cheng⁴, LI Congcong^{5,6}

(1. Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team, Xining 810007, China; 2. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100038, China; 3. Qinghai Bureau of Coal Geology, Xining 810001, China; 4. Qinghai Institute Coal Geological Prospecting, Xining 810001, China; 5. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 6. China Coal Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Group Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: The permafrost layer plays an important role in the ecological balance of high-altitude and cold regions, but the restoration and protection of permafrost layers are often overlooked in the ecological environment management of high-altitude and cold mining areas on the plateau, and corresponding research still has many gaps. Taking the comprehensive ecological environment improvement practice in Juhugeng Area of Muli Mining Area as an example, through the analysis of the planar distribution, vertical distribution, stratigraphic structure, and ground temperature changes of the original frozen soil layer, and targeting the ecological geological layer profiles of different research objects such as damaged soil layer, surface layer, frozen soil layer, and coal seam roof rock layer, following the idea of simulating the differences in seasonal frozen soil and permafrost changes and their ecological geological functions, Based on the construction of a binary structure frozen soil ecological geological layer profile model using artificial frozen soil layer and backfill layer, a repair technology for artificial frozen soil layer is proposed, which involves investigating the frozen soil overview, establishing the profile model, overlap-

收稿日期: 2023-08-20 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.12438/cst.2023-1127

基金项目: 中国煤炭地质总局科技创新资助项目(ZMKJ-2020-J12)

作者简介: 梁振新(1982—), 男, 山西阳泉人, 高级工程师。E-mail: 182351300@qq.com

通讯作者: 王 佟(1959—), 男, 甘肃会宁人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: wangtong517@126.com

ping fusion, determining backfill time, designing surface water retention, laying interception and drainage ditches, and reshaping the terrain. This technology aims to achieve the material structure, underground aquifer structure, and hydraulic connection of the artificial frozen soil layer. The functions of water source conservation and other aspects have basically reached the level of the original frozen soil layer, while providing more favorable conditions for frozen soil preservation. By using different methods such as pit exploration, drilling core sampling, and long-term monitoring of ground temperature inside the borehole, comparative experiments were conducted in the former slag mountainous area of the mining area and in the newly backfilled and repaired mining pit. It was confirmed that the permafrost top boundary in the original slag mountainous area is steadily rising, and new permafrost layers have begun to form in the newly backfilled area of the mining pit; By comparing the time and thickness of natural restoration of frozen soil layers in Zhashan District and artificial restoration of frozen soil layers in mining pits, it is shown that the construction of artificial frozen soil layers is more conducive to the rapid recovery of frozen soil in this area.

Key words: plateau cold mining area; Muli Mining Area; ecological geological layer; ecological restoration; permafrost layer

0 引言

青藏高原地区高海拔、气温低、广泛分布冻土,冻土的存在使青藏高原气候变化(尤其是气温升高)更加敏感^[1]。冻土作为浅部地下水含隔水层的实质载体和支撑地表植被、湿地等生态环境的基础,同时兼具多重生态地质功能作用^[2-5],对高原高寒地区生态系统的稳定和演化起着重要作用^[6]。

木里矿区是青海省最大的煤炭矿区,也是西北地区重要的炼焦煤资源产地,大规模的露天开采对生态环境产生显著破坏并引起社会广泛关注,为此,政府开展了大面积矿山环境恢复治理工作。期间,研究以“山水林田湖草”为一个生命共同体的理念,从煤炭生态地质勘查角度,针对矿区生态环境与资源的破坏和扰动,在前人的生态环境修复研究基础上^[7-13],结合高原高寒特点开展生态地质勘查及生态修复关键技术研究。王佟等^[14-15]以煤炭生态地质勘查基本构架为基础提出了生态地质层理论,指出矿山生态环境治理的关键是构建和修复生态地质层。根据治理修复对象的不同,生态地质层可划分为土壤层、地形重塑层、煤层顶板岩层、含水层及冻土层,通过基于生态地质层的研究和工程应用,形成了高原高寒区的生态环境修复治理模式和技术方法^[16-23]。实现了木里矿区生态系统质量整体修复提升,与周边自然生态环境有机融合,为高原高寒地区煤矿区生态修复提供借鉴。

在多年冻土发育区域,冻土自身虽具有一定的自我恢复能力,但其自然演化、恢复的时间漫长。根据建立的多年冻土地质剖面原理模型思路,在以往传统的露天采坑回填治理工程中按照冻土人工重构设计进行有序的分层回填等系列工程措施,超前性实现冻土隔水层的水文地质功能并提升其工程力学稳定性,能够更显著地提高多年冻土的恢复速率,同时通过抑制沉降巩固露天采坑回填工程的治理效果,

并为后期覆土复绿工程奠定良好、稳定的基础,为高原高寒特殊自然环境下生态系统的恢复和稳固提供有力保障。生态修复战略主要包括地质勘探、矿山设计、矿山生产、闭矿4个阶段的生态修复,其中冻土的修复与保护也应包含在矿山的全生命周期中。此外,生态修复是矿山环境保护和综合治理、增加碳储量、提升区域生态系统固碳能力的有效途径^[3,5],这在冻土地区意义更为深远。

1 木里矿区自然地理

木里矿区地处祁连山脉的中南部地区,大通山以北,托莱山以南的断陷盆地内,呈现为“两山夹一谷”地貌特征,山脊、谷地走向NWW。盆地总体上呈东南低,西北高的趋势,海拔标高+4 000~+4 300 m。本区地处高寒地带,四季不明显,气候寒冷,昼夜温差大,西南部笔架山一带雪线4 500 m以上常年积雪,属典型的高原大陆性气候。6—8月为雨季,11月至来年5月以降雪为主。矿区地表水系较发育,区内主要有常年性流水上哆嗦河、下哆嗦河和次要常年性流水交合根曲(努日寺沟),都是大通河的发源地之一(图1),主要由大气降水和冰雪融化补给。

2 木里矿区冻土分布特征

2.1 平面分布

青藏高原多年冻土是我国冻土分布面积最广的冻土区。祁连山多年冻土面积约 $7.66 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占中西部地区总冻土面积的28.37%。地处祁连山高寒山地多年冻土区中西部的木里矿区是典型的高海拔多年冻土区^[24]。木里矿区除了在局部的断层构造、湖泊及矿山采坑活动影响下存在冻土融区或不同程度剥离破坏外,其他地区基本连续有冻土分布。区内分布有亚稳定型多年冻土,冻土年平均地温在 $-1.5 \sim -3.0 \text{ }^\circ\text{C}$;少量稳定型多年冻土,冻土年平均地温 $< -3.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其中,聚乎更3、4、7、8号井田主要处

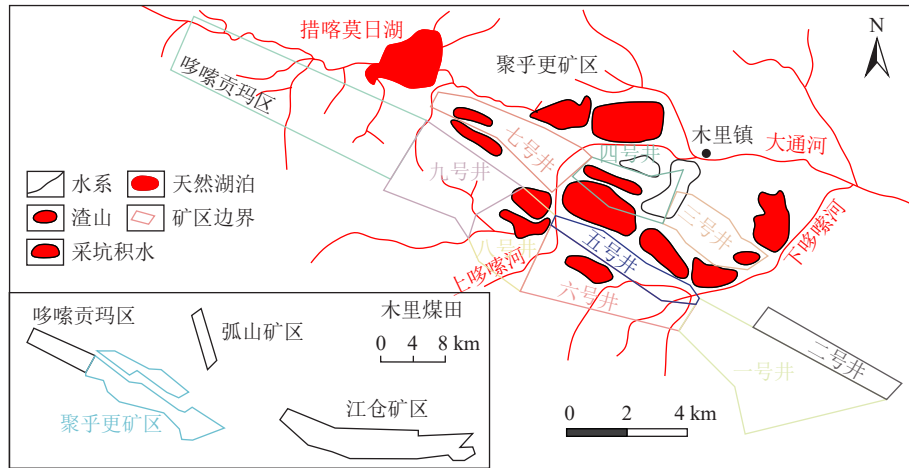


图 1 木里煤田位置及聚乎更井田分布

Fig.1 Muli Coalfield position and Juhugeng Minefield distributions

于山前缓坡高含冰量冻土区;5号井田中部处于基岩山区低含冰量冻土区,其东西部分处在缓坡高含冰量冻土区;9号井田主要处于基岩山区低含冰量冻土区(图2)。

2.2 垂向分布

多年冻土在受当年季节性气候变化影响下,随着每年5月至9月地表温度上升多年冻土表层开始融化。在多年冻土上部从冰水混合层到冻结层,一般在7~8m内冻土层的地温呈现急剧变化的趋势。在该地温“急剧变化”区段还可以细分为上部受太阳辐射影响为主的温度剧降的AB段和下部地表环境因素影响逐渐减弱的相对急剧升温的

BC段。矿区多年冻土层厚度大。在多年冻土层上部地温“急剧变化”区段和下部地温“稳定变化”区段的屏蔽下,厚大的多年冻土层中部受外界环境的影响基本被消除,相应出现了地温相对“恒定”变化的CD区段。矿区这一相对“恒定”区段厚度约15m。在多年冻土下部至其底界之下的一定深度段内,其地温呈较稳定的速率逐渐上升的DF区段规律变化,最终趋近于正常地层的温度规律。多年冻土与下部正常地层在充分热交换前提下即相对稳定连续温度平衡下呈现出的稳定变化趋势。一般以0.016℃/100m的地温梯度变化逐渐上升至正常的地温梯度,呈现多年冻土地温稳定变化的规律(图3)。



图 2 木里矿区各井田冻土类型分布(据周幼吾等^[24]修改)

Fig.2 Distribution of frozen soil types in muli field of Muli Mining Area(after reference Zhou Youwu^[24])

2.3 多年冻土层顶底界

根据已知的冻土常观孔多年地温测量数据,多年冻土的顶界最深的在木里矿区聚乎更东部1号井为3.2m,哆嗦公马多年冻土顶界在1.0m以浅。据

木里矿区以往钻孔测温记录,该区多年冻土厚度西部厚度大,中部厚度小,东部厚度又逐渐变大。多年冻土呈连续分布,厚度介于50~136m,冻土厚度变化主要与区内地形地貌、矿业活动等关系密切。

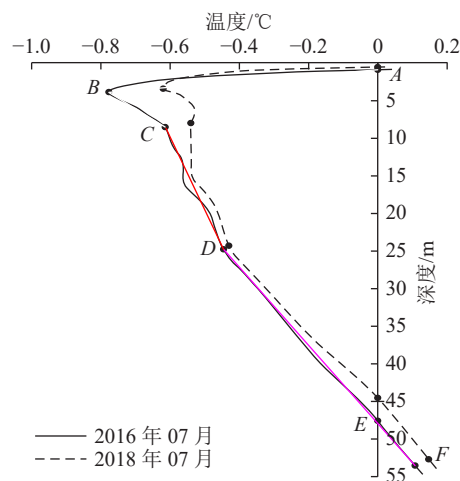


图3 多年冻土典型地温曲线形态

Fig.3 Typical ground temperature curve form of permafrost

3 冻土层的构建修复方法

按照防季节性冻土、多年冻土及其在生态环境功能的思路,通过人工有针对性干预,制定出针对木里矿区开采破坏冻土的具体构建修复方法,主要包括冻土概况调查、剖面模型建立、搭接融合、确定回填时间、设计表层保水、布设截排水沟、地貌重塑共7个环节(图4)。

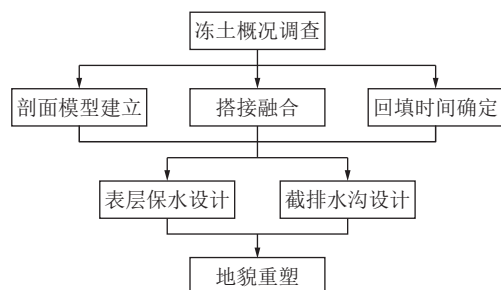


图4 冻土层构建修复流程

Fig.4 Permafrost construction and repair process

1) 冻土概况调查。通过遥感监测、专项勘查、以往冻土资料搜集或采用钻探、温度监测、测温、地质测量等方法调查认识冻土的基本特征、岩层序列以及原始冻土层破损情况。

木里矿区多年冻土顶界深度一般在 3.2 m 以浅,局部顶界深度约到 7.0 m,个别湖泊及河流等自然因素影响下多年冻土的顶界深度更深。木里矿区三号井、四号井、五号井、七号井、八号井、九号井和哆嗦公马 7 个井田中,开挖深度最浅的九号井露天采坑深度一般在 6~20 m,基本挖穿了多年冻土的活动层。按照几个井田露天采坑的面积统计,多年冻土上部的活动层因露天采坑开挖直接造成的破坏面积累计 1 272.86 万 m^2 (表 1)。木里矿区三号井、四号

井、五号井和八号井 4 个井田的开采最深处的深度在 87~200 m,基本揭穿了多年冻土层的底界,形成了多年冻土层洞穿破坏性“天窗”。相比之下,其他几个井开采最深处的深度为 32 m,基本只对多年冻土的中上部造成挖损破坏,未造成洞穿或明显改变其地质条件。按照冻土底界的平均深度 93 m 统计,三号井 3 951 标高多年冻土直接性破坏区位于三号井露天采坑中西部,长 957.13 m,宽 747.01 m,面积为 $64.38 \times 10^4 \text{ m}^2$;四号井 3 893 标高多年冻土直接性破坏区位于四号井露天采坑中部及西部(即西采坑),长 2 201.61 m,宽 442.58 m,面积为 $92.45 \times 10^4 \text{ m}^2$;五号井多年冻土直接性破坏区位于五号井露天采坑中部,长 1 927.29 m,宽 132.18~355.08 m,面积为 72.75 m^2 。

表 1 多年冻土上部的活动层直接破坏统计

Table 1 Direct damage statistics of active layer in upper permafrost

序号	井田	面积/ 10^4 m^2
1	三号井	377.05
2	四号井	304.64
3	五号井	171.53
4	七号井	149.40
5	八号井	101.32
6	九号井	116.66
7	哆嗦公马	52.26
合计		1 272.86

2) 构建二元结构冻土生态地质层剖面模型。针对季节性冻土和多年冻土,确定冻土的层状结构特征,构建再造层和回填层的二元结构冻土生态地质层剖面模型。回填层以参照临近原始多年冻土剖面通过工程手段分层回填和压实,利用大气降水或注水,形成有利于多年冻土快速恢复的环境,恢复对水、气的封存和隔绝功能。再造层以有利于增加水源涵养为目的,以季节性冻土底界为参照通过分层回填和一次性压实的工程措施形成再造层,以恢复地下水的渗流场和与周围完好土壤层等生态地质层的联系。再造层之上到地表称为冻土的保护层,主要指地表土壤层再造和复绿,土壤层复绿后的植被可调节地表能量(热辐射)、水分、湿度等,可对冻土起到保护作用(图5)。

3) 人造冻土层与原始冻土层之间的搭接融合。冻土层与原始地层搭接面的修复,以往治理中未考虑原始地层与新建冻土层连接处的搭接面构建,后

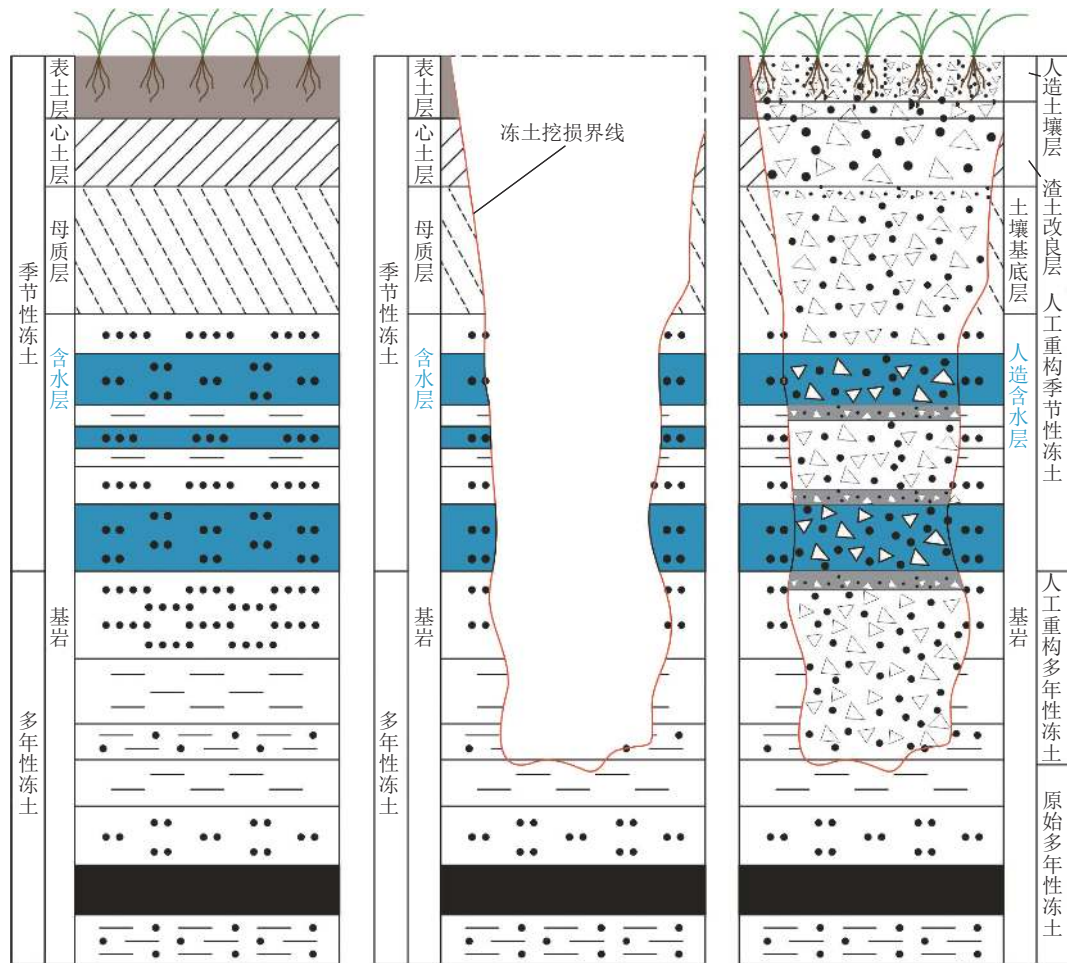


图 5 冻土层二元结构构建修复剖面 (据王佟等^[15]修改)

Fig.5 Construction and restoration profile of permafrost dual structure

期在连接处通常发生冻融或出现热融, 搭接面成为水流通道, 形成和断层带一样的导通结构。因此冻土层修复时, 搭接面的构建是冻土生态地质层修复的关键。为防止冻融, 选择泥质细渣土和导水措施、上部碎石散热层等措施实现对考虑剖面上冻土层与原始地层的搭建面处有效衔接。

季节性冻土层 (0~3 m) 重构, 需要通过分层回填、压实、覆土复绿等工程措施实现物质结构、地下含水层结构、水源涵养能力等相似并与原始季节性冻土能搭接融合, 如图 6 所示。多年冻土层重构 (3 m 至采坑底部), 需要通过选择泥质细渣土导水措施和上部构建碎石散热层等措施实现对已经破坏的原始冻土层与重构冻土层有机搭接融合, 如图 7 所示。

通过上述构建方法, 实现重构冻土层物质结构、地下含隔水层结构及水力联系、水源涵养能力相似与原始冻土层及其功能搭接融合的冻土层修复。

4) 回填时间。李金平等^[25]采用数值模拟方法对高原高寒露天采坑回填后对一定初始温度条件和不同边界条件下露天开挖回填后的冻土恢复速度进行

预测分析, 认为当填土温度由 0℃ 以上降低为 0℃ 以下时, 冻土的恢复速率明显加快, 厚度明显增大; 当填土表面温度为正温时, 坑底内的冻土恢复速率慢; 当填土表面温度为负温时, 坑底内的冻土恢复速率更快, 冻土厚度更厚; 随着天然地表温度的降低, 冻土恢复速率逐渐加快, 冻土厚度也逐渐增厚。本

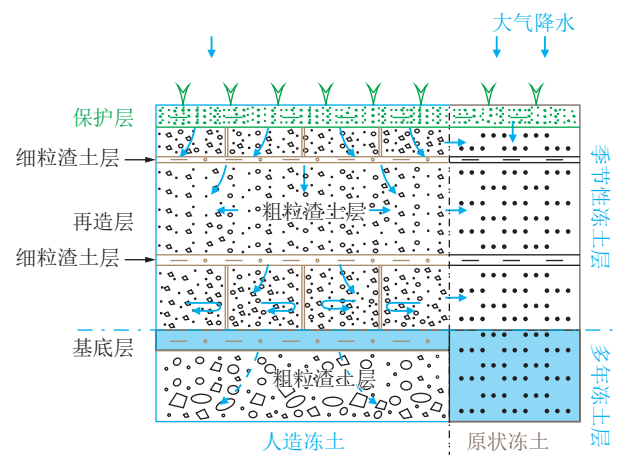


图 6 季节性冻土重构

Fig.6 Seasonal permafrost reconstruction

次木里矿区生态修复时间选定在 10—12 月,最低气温低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证了冻土快速恢复并保持稳定,有利于矿区的生态环境恢复。

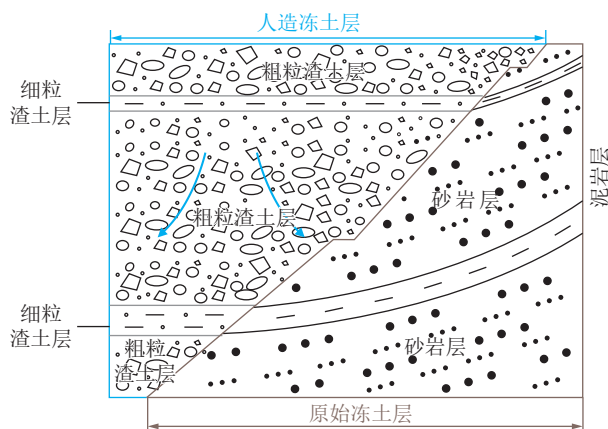


图 7 露天采坑多年冻土重构

Fig.7 Permafrost reconstruction in open pit

5) 表层保水设计。以上针对性的冻土层层状结构构建思路中重点体现了强化冻土层储水、蓄水的能力。尤其是基于季节性冻土上部蓄水能力提升和底部水侧流抑制思路设计的再造结构,其次是在土壤基质层重构中对基质层内渣土粒级和土质含量在垂向自下向上的递变等设计,更有利于雨水下渗和保持(图 8)。

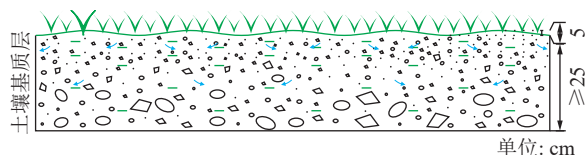


图 8 土壤层的蓄水保水设计

Fig.8 Water storage and conservation design of soil layer

对基质层进行人工或机械耙犁,干预构建 5.0 cm 左右“波状”土层顶面,以有效消减大气降水的地表径流流失量、增加壤中流(图 8),提升重构保护层的保水能力。其次,在筛选复绿草籽时,在考虑气候、环境适应性的同时,优选宽叶类植被也可以降低雨水的冲刷作用和地表径流量,增强大气降水下渗转化为壤中流,提升保水能力。

6) 截排水沟布设。在相对平整的渣山顶面,尤其是在回填的采坑面,主要设计布设排水沟和蓄水型截水沟,沟壁保持自然裸露、较平顺。蓄水型截水沟基本上沿等高线布设。整个截排水沟的设计不能因造成地表显著积水进而引起冻土局部融化并逐步向热融湖塘演变,同时可以大幅减少大气降水的径流流失。

7) 地貌重塑。在矿山恢复治理过程时,一般都要对渣山进行消顶,对采坑进行和填平补齐,在此过程中同步达到对地貌的重塑,使其与周边地形、地貌相协调。地貌重塑时,可以从地形和坡面控制 2 个方面进行冻土保护。通过地形的干预控制,减小采坑垂深落差、边坡削坡、改变坡面朝向、渣山削顶降高,以提升治理区地表空气流通性,增加地气间的热交换,强化对冻土的保护作用。通过控制渣山顶部、采坑回填面等平面区域场地坡面平整至微斜坡(坡度 $0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$)及采取小平距缓坡与大平距平面相结合的坡面设计可以减弱大气降雨坡面流速,减弱地表径流量,增强大气降雨的保水能力,减少水土流失,促进植被生长发育,间接促进冻土的保护。

4 冻土层修复效果验证与对比

4.1 探坑验证

木里矿区采坑回填于 2020 年 10 月至 12 月完成,2021 年 5—6 月进行了覆土、土壤改良及种草复绿,至 2022 年 6 月地表植被草全部返青,复绿成效显著。2022 年 7 月对四号井东采区坑底渣石回填区、五号井东采区坑底渣石回填区和七号井东采区煤层露头封堵区等有代表性的回填地段同步揭露和观测,如图 9 所示。在探坑中使用 SOIL TESTER 土壤测温仪(型号 DT-001)和高精度玻璃棒红水温度计进行测温,其中四号井探坑深度为 210 cm,五号井探坑深度为 230 cm,七号井探坑深度为 230 cm,见表 2。

由表 2 可以看出,随着探坑深度不断加大,渣土温度逐渐降低,其中四号井探坑在 210 cm 深度处降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,五号井探坑在 230 cm 深度处降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,七号井在 180 cm 深度处降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,充分说明通过两年度的回冻,采坑渣土回填区冻土已经开始形成。测温结果表明:裸露地表气温明显高于有植被覆盖的地表气温;随着探坑深度不断加大,回填渣土温度逐渐降低至零度,不仅说明回填区冻土已经开始形成,同时也说明在回暖季节,因热融作用形成了活动层,冻土保护与修复成效显著。

4.2 钻探揭露对比

2020 年 11 月在五号井采坑南边帮施工的地温监测孔 HF-4,拟稳态测温解释初步判定多年冻土上限深度为 9.40 m,原第四系顶界孔深 14.90 m,表明该孔处多年冻土上限已抬升至原地表以上 5.40 m。

矿区开采过程中堆放形成的渣山,堆放过程未开展任何构建和压实工作,渣堆在降水淋滤并经过多年融冻,渣山浅部逐渐形成新的冻土,2020 年在聚



图 9 采坑回填区渣土冻结状况探坑观测
Fig.9 Freezing observation of dregs in backfill area of mining pit

乎更四号井南渣山上施工的 ZK-5 等 6 个勘察钻孔的岩心观察编录中, 在 25 ~ 32 m 孔深后均可直接观

察到冰层和冰砾 (图 10), 证明四号井南渣山重新形成了冻土, 其顶界深度在 25 ~ 32 m。以上钻探揭露的冻土信息表明, 木里矿区重新堆填的渣山经过一定时间, 渣山中已经开始形成新的冻土, 同时渣山的存在并未造成压覆地原冻土顶界下移, 在木里高原高寒气候条件下, 冻土层具有较好的自然恢复能力。

4.3 钻孔地温监测

以钻探工程为基础手段, 一般以控制季节性冻土底界和多年冻土底界不同界面为参照确定常观孔深度, 随后通过在常观孔内按 0.20 ~ 20 m 不同点距布设温度传感器和数据采集装置, 通过无线信号发送装置定期发送测温数据, 实现对冻土地温的实时高频率监测。本次研究在木里矿区部署了 2 个地温监测孔, 其中 01 号孔监测深度 150 m, 位于五号井采坑南侧, 距采坑 50 m; 02 号孔监测深度 30 m, 位于四号井采坑北侧, 距离采坑 20 m, 如图 11 和图 12 所示。

表 2 探坑揭露采坑回填渣土冻结-热融情况
Table 2 Freeze-heat melting of backfill dregs revealed by pit exploration

深度/cm			温度/℃			备注
四号井坑底回填区 高程: +3 998 m	五号井坑底回填区 高程: +4 013 m	七号井坑底回填区 高程: +4 105 m	四号井坑底回填区 高程: +3 998 m	五号井坑底回填区 高程: +4 013 m	七号井坑底回填区 高程: +4 105 m	
0	0	0	19	21	26	裸露地表气温
0	0	0	17	19	13	植被覆盖地表气温
2	2	2	15	18	19	裸露表土温度
2	2	2	14	13	11	植被覆盖表土温度
20	20	10	10	10	9	重构土壤底部温度
25	25	20	10	10	6	—
35	35	45	10	10	4	—
55	55	60	8	8	3	—
80	80	80	7	6	3	—
100	100	100	6	5	2	—
130	130	130	4	2	1	—
170	200	180	3	0	0	—
210	230	230	0	-1	-1	见冰花, 挖掘面为白痕

经过一年多的监测, 通过不同孔一年多后持续地层温度监测对比分析认为: 01 号孔多年冻土层顶界为 3 m, 底界深度为 63 m, 02 号孔多年冻土层顶界为 3.5 m, 多年冻土的顶界已基本恢复至区域多年冻土的顶界深度, 该顶界深度以下, 低温基本能稳定维持在零摄氏度以下; 但相比矿区及区域上多年冻土的底界深度还略显偏小, 仍需一个持续逐步恢复的过程才能逐步趋向于原始多年冻土的厚度。



图 10 ZK-5 号钻孔含冰屑岩心照片
Fig.10 Photo of ZK-5 borehole core containing ice debris

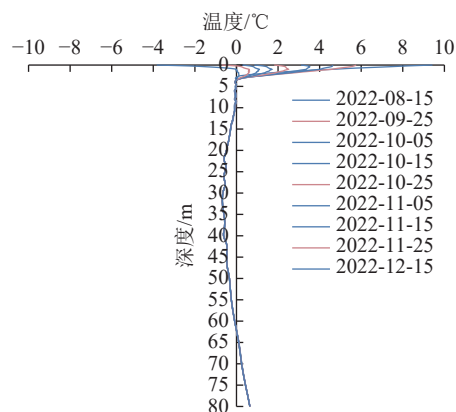


图 11 01 号地温监测孔测温曲线

Fig.11 Temperature measuring curve of No. 01 ground temperature monitoring hole

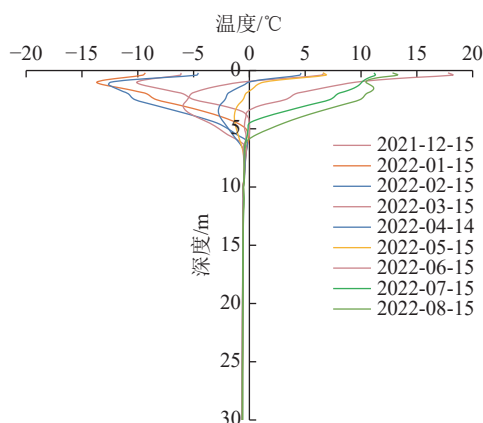


图 12 02 号地温监测孔测温曲线

Fig.12 Temperature measuring curve of No. 02 ground temperature monitoring hole

5 结 论

1) 在冻土层修复关键技术研究利用了二元结构冻土生态地质层剖面模型,采用模拟原始冻土层结构的方法,通过实践可以修复出一个与开采破坏前的原始地层成分、结构、功能作用相似的人造冻土层。

2) 从冻土概况调查、剖面模型建立、搭接融合、确定回填时间、设计表层保水,布设截排水沟,地貌重塑共 7 个方面思考总结了冻土构建的具体方法。

3) 探坑、钻探等方法揭露观测表明,通过对冻土人工构建和修复,在为治理区内冻土自我恢复能力的塑造和提升奠定坚实基础的同时,冻土的保护将为植被再生能力的提升提供水源涵养、水土保持等更为有利的条件,促进高原高寒生态修复区生态系统快速稳定。

4) 冻土层构建技术作为高原高寒生态地质层修复关键技术之一,在木里生态环境修复治理项目中

得到了良好的应用,生态治理恢复成效显著,证明冻土层构建思路和技术方法正确性,具有较大的实践意义,也为高原高寒地区同类地区冻土成重构和大面积生态地质层修供参考和借鉴。

参考文献(References):

- [1] 程国栋,赵林,李韧,等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795.
CHENG Guodong, ZHAO Lin, LI Ren, *et al.* Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [2] 王欠鑫,曹巍,黄麟. 青藏高原生态系统功能稳定性演化特征及分区[J]. 地理学报, 2023, 78(5): 1104-1118.
WANG Qianxin, CAO Wei, HUANG Lin. Evolutionary characteristics and zoning of ecosystem functional stability on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(5): 1104-1118.
- [3] 李文华,赵新全,张宪洲,等. 青藏高原主要生态系统变化及其碳源/碳汇功能作用[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 172-178.
LI Wenhua, ZHAO Xinquan, ZHANG Xianzhou, *et al.* Change mechanism in main ecosystems and its effect of carbon source/sink function on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 172-178.
- [4] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 5-12.
SUN Honglie, ZHENG Du, YAO Tandong, *et al.* Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 5-12.
- [5] 韩道瑞,曹广民,郭小伟,等. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7408-7417.
HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, *et al.* The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [6] 王伟超,梁振新,张文龙,等. 青海省祁连山聚乎更矿区冻土特征及其生态地质功能作用研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(7): 56-60, 66.
WANG Weichao, LIANG Zhenxin, ZHANG Wenlong, *et al.* Research on permafrost characteristics and eco-geological function of Juhugen Mining Area, Qilian Mountains, Qinghai Province[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(7): 56-60, 66.
- [7] 彭苏萍,毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [8] 周妍,苏香燕,应凌霄,等. “双碳”目标下山水利田湖草沙一体化保护和修复工程优先区与技术策略研究[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3371-3383.
ZHOU Yan, SU Xiangyan, YING Lingxiao, *et al.* Research of priority areas and technical strategies of the integrated protection and restoration projects for full-array ecosystems with carbon peak and carbon neutrality goals in China[J]. *Acta Geographica Sinica*,

- 2023, 43(9): 3371–3383.
- [9] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 455–465.
- BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong. Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 455–465.
- [10] 李树志, 李学良, 尹大伟. 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 292–298.
- LI Shuzhi, LI Xueliang, YIN Dawei. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 292–298.
- [11] 王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 5–10.
- WANG Tao, GAO Feng, WANG Bao, *et al.* Status and suggestions on ecological protection and restoration of Qilian Mountains[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2017, 39(2): 5–10.
- [12] 王锋利, 王佟, 方惠明, 等. 祁连山南麓露天采坑生态环境修复技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(8): 49–55.
- WANG Fengli, WANG Tong, FANG Huiming, *et al.* Study on environment rehabilitation technology of open pits in south foot of Qilian Mountains[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(8): 49–55.
- [13] 杨鑫光. 高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- YANG Xinguang. Study on vegetation recovery potential of coal mine spoils in an alpine coal mining area[D]. Xining: Qinghai University.
- [14] 王佟, 孙杰, 江涛, 等. 煤炭生态地质勘查基本构架与科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 276–284.
- WANG Tong, SUN Jie, JIANG Tao, *et al.* Basic configuration and scientific problems of coal eco-geological survey[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 276–284.
- [15] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. 生态地质理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3759–3773.
- WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, *et al.* Theory of ecological layer and its application in mine environment remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3759–3773.
- [16] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 230–244.
- WANG Tong, DU Bin, LI Congcong, *et al.* Ecological environment rehabilitation management model and key technologies in plateau alpine coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 230–244.
- [17] 王佟, 章梅, 徐辉, 等. 青海木里煤田聚乎更矿区土壤肥力及重金属风险评价[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(4): 113–120.
- WANG Tong, ZHANG Mei, XU Hui, *et al.* Soil fertility and heavy metal risk assessment in Juhugeng Mining Area, Muli Coalfield, Qinghai Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(4): 113–120.
- [18] 王佟, 蔡杏兰, 李飞, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中的土壤层构建与成分变化差异[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2407–2419.
- WANG Tong, CAI Xinglan, LI Fei, *et al.* Soil layer construction and composition changes in restoration of ecological and geological layer in alpine mining area on plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2407–2419.
- [19] 李聪聪, 王佟, 王辉, 等. 木里煤田聚乎更矿区生态环境修复监测技术与方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1451–1462.
- LI Congcong, WANG Tong, WANG Hui, *et al.* Monitoring technology and method of ecological environment rehabilitation and treatment in Juhugeng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1451–1462.
- [20] 杨创, 王佟, 李聪聪, 等. 青海高原高寒地区生态环境修复治理中的水系连通技术[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(4): 46–51.
- YANG Chuang, WANG Tong, LI Congcong, *et al.* Hydrographic net connection technology in Qinghai Plateau Frigid Zone Environmental Rehabilitation Governance[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(4): 46–51.
- [21] 刘帅, 熊涛, 孙浩, 等. 高原高寒木里矿区生态治理中土壤重构治理效果研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(11): 77–80, 86.
- LIU Shuai, XIONG Tao, SUN Hao, *et al.* Study on plateau frigid Zone Muli Mining Area ecological management soil reconfiguration effect[J]. China Coal Geology, 201, 33(11): 77–80, 86.
- [22] 王佟. 青海高原高寒木里矿区生态环境修复治理图解[M]. 中国经济出版社, 2022.
- [23] 赵欣, 王佟, 李聪聪, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中地形重塑层的构建与修复技术[J/OL]. 煤田地质与勘探: 1–11[2023–06–05].
- ZHAO Xin, WANG Tong, LI Congcong, *et al.* Construction and restoration technology of terrain remodeling layer in ecological geological layer restoration of Plateau and Alpine mining area[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–11[2023–06–05].
- [24] 周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [25] 李金平, 盛煜, 曹伟, 等. 露天煤矿矿坑回填对冻土恢复的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 125–130.
- LI Jinping, SHENG Yi, CAO Wei, *et al.* An analysis of the impact of opencast coal-mining pit backfill on permafrost recovery[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 125–130.