

团体标准

T/CI XXX—2024

金属露天矿绿色低碳优化设计规范

Green and low-carbon optimization design of metal open-pit mines

(征求意见稿)

2024-X-X 发布

2024-X-X 实施

中国国际科技促进会 发布

中国国际科技促进会(CIAPST)是1988年经中华人民共和国国务院科技领导小组批准而成立的全国性社会团体。制定团体标准、开展标准国际化和推动团体标准实施,是中国国际科技促进会的工作内容之一。任何团体和个人,均可提出制、修订中国国际科技促进会团体标准的建议并参与有关工作。

中国国际科技促进会标准按《中国国际科技促进会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国国际科技促进会征求意见稿经向社会公开征求意见,并得到参加审定会议的80%以上的专家、成员的投票赞同,方可作为中国国际科技促进会标准予以发布。

在本标准实施过程中,如发现需要修改或补充之处,请将意见和有关资料寄给中国国际科技促进会标准化工作委员会,以便修订时参考。

任何团体和个人,均可对本标准征求意见稿提出意见和建议,牵头起草单位联系方式:
guxiaowei@mail.neu.edu.cn

中国国际科技促进会

地址:北京市海淀区中关村东路89号恒兴大厦13F

邮政编码:100190

电话:010-62652520 传真:010-62652520

网址:<http://www.ciapst.org>

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》起草。

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

本文件由东北大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：东北大学、沈阳工业大学。

本文件主要起草人：顾晓薇、胥孝川。

本文件为首次发布。

金属露天矿绿色低碳优化设计规范

1. 适用范围

本文件规定了金属露天矿绿色低碳优化设计基本原则及要求。

本文件适用于金属露天矿山。

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。

本文件没有规范性引用文件。

3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

绿色低碳优化设计（Green and Low-carbon Optimization Design）

在露天矿最终境界设计和开采计划优化设计过程中，把土地破坏、碳排放等环境问题考虑到优化模型和算法中，使生态成本像生产成本一样在最佳方案的求解中直接发挥作用，使求得的最佳方案在经济效益最大化和生态冲击最小化之间达到最佳平衡，实现矿山生产“源头减量”，最大限度降低矿山开采产生的生态冲击。

3.2

生态冲击（Ecological Impact）

采矿对土地、水、大气、生物质等造成不同程度的破坏或损害。土地、水、大气、生物质是构成自然生态系统的基本要素，所以这里把这种破坏和损害统称为生态冲击或生态压力。

3.3

露天采场的土地损毁面积（Land Damage Area of Open Pit Stope）

露天采场指露天矿最终境界圈定的范围，其挖损的土地总面积等于开采方案中最终境界的地表面积。

3.4

排土场的土地损毁面积（Land Damage Area of Waste Dump）

排土场用于堆放采场剥离出来的废石，其压占的土地总面积取决于废石排弃总量、排土场地形、堆置高度和边坡角等。

3.5

尾矿库的土地损毁面积（Land Damage Area of Tailing Pond）

有选矿厂的矿山，需要建立尾矿库以安置选矿厂排放的尾矿，其损毁的土地总面积取决于尾矿排弃总量、尾矿库地形、排弃深度和边坡角等。

3.6

地面设施的土地损毁面积（Land Damage Area of Ground Facilities）

地面设施包括矿山专用道路和厂房、仓储、办公、供电、供水、排水等设施，地面设施的占地面积与开采方案的生产能力有一定的关系。

3.7

表土堆放场的土地损毁面积（Land Damage Area of Topsoil Storage Yard）

按照矿山土地复垦的相关规定，需要对生产中将要损毁的土地上的表土进行剥离并妥善保存，以备复垦时使用。需要堆存表土的占地面积与露天采场、排土场、尾矿库和地面设施区的表土剥离量，以及表土堆置地形、堆置高度、堆置形态等有关。

3.8

温室气体排放（Greenhouse Gas Emissions）

矿山生产过程中的温室气体排放主要包括二氧化碳、甲烷、氮氧化物等，主要来源于柴油、电力和炸药消耗。

3.9

增温潜势（Warming Potential）

某种气体的增温潜势可以理解为该种气体的潜在增温效应与 CO₂ 的潜在增温效应的比值。

3.10

二氧化碳当量（Carbon Dioxide Equivalent）

为了便于衡量矿山开采产生的温室效应，一般把氮氧化物、甲烷等的量根据其“增温潜势”换算为 CO₂ 当量。

3.11

柴油的温室气体排放因子（Greenhouse Gas Emission Factors of Diesel）

单位重量的柴油消耗所产生的温室气体排放量定义为柴油的温室气体排放因子。排放包

括两部分：一是直接排放，即内燃机的尾气，直接排放量主要取决于柴油的热值和内燃机的单位热值排放量；二是间接排放，即从石油开采到加工成柴油的各个生产环节所产生的温室气体排放，在一些文献中也称为携带排放。

3.12

电力消耗的温室气体排放因子（Greenhouse Gas Emission Factors of Electricity Consumption）

电网提供单位电量所产生的温室气体排放量。电力消耗的温室气体排放不是在矿山生产过程中直接产生的，而是在发电和输送中产生的。从这个意义上讲，电力消耗的温室气体排放对矿山而言属于间接排放。但矿山只要消耗电能，就会连带产生这一排放，所以必须计算在内。

3.13

炸药的温室气体排放因子（Greenhouse Gas Emission Factors of Explosive）

炸药的温室气体排放包括炸药爆炸产生的直接排放和炸药组分在其生产过程中产生的排放（即间接排放）。单位重量的炸药消耗所产生的温室气体排放量定义为炸药的温室气体排放因子。

3.14

单位作业量的温室气体排放量（Greenhouse Gas Emission Factors of Unit Workload）

把露天矿生产的各种作业归纳为废石剥离、矿石开采和选矿三大类，分别计算其单位作业量的温室气体排放量。

3.15

污染足迹（Pollution Footprint）

矿山生产所产生的污染足迹是为吸收矿山生产中排放的除温室气体之外的其他空气污染物以及水和土壤污染物所需要的土地面积。

3.16

携带足迹（Carrying Footprints）

携带足迹是矿山生产中消耗的辅助材料（钢材、水泥、木材等）和设备在其制造过程中的各种消耗和排放的足迹。携带足迹的计算需要从辅助材料和产品一直追踪到原料开采，需要大量的相关数据。

3.17

土地生态功能（Land Ecological Function）

土地的生态服务功能可分为两大类：一是为人类提供生活需要的生物质，如粮食、肉、奶、木材等；二是为人类的生活和各种生物的生存提供适宜稳定的生态环境。

3. 18

矿区生态系统分类（Classification of Ecological Systems in Mining Areas）

我国的金属矿山一般地处山区（包括丘陵），按照我国生态学界对此类地区生态系统的分类，分为森林生态系统、草地生态系统和农耕生态系统三个大类。这三类生态系统恰好与生态足迹对生态生产性土地分类中的林地、牧草地和农耕地相对应。

3. 19

矿山生态成本（Ecological Cost of Mining）

矿产开采的生态成本的主体是对遭到破坏的生态系统的功能损失的经济度量，包括：矿山生产对生态系统的破坏和损害所造成的生态功能的价值损失，以及矿山企业为恢复生态功能而支出的各种费用。

3. 20

直接生态价值损失（Direct Ecological Value Loss）

直接生态价值是给定的生态系统能够提供的生物产品（粮食、肉类、奶类、林产品等）在特定市场条件下的价值，因此又称为生物质生产价值，可用收益法计算。

3. 21

复垦成本（Reclamation Costs）

把矿山生产所破坏的各类土地，按复垦方案中确定的复垦方向，恢复到具有破坏前或期望的生态生产力所需要的费用，又称为生态恢复成本。

3. 22

环境治理成本（Environmental Governance Costs）

矿山生产过程中复垦以外的与环境治理有关的费用，环境治理的目的是防止对生态系统造成污染和对人体健康造成损害，因此也是生态成本的一部分。环境治理成本主要是污染治理、检测、监测等费用。

3. 23

外部生态价值损失（External Ecological Value Loss）

外部生态价值是土地可提供的除了带来直接生态价值的生态服务之外的其他生态服务的价值，这些生态服务没有直接进入经济系统或矿山企业的财务核算体系，故称之为“外部生态价值”。主要体现在：涵养水源、防风固沙、净化环境、调节气候、光合固碳、释放氧

气、土壤保持、养分循环、维持生物多样性等。

3.24

温室气体排放生态成本 (Ecological Cost of Greenhouse Gas Emissions)

为了处理掉由于矿山生产排放的温室气体,所需要投入的成本即为温室气体排放的生态成本。

3.25

最优采场 (Optimal Mining Stope)

一个采场 C^* 是所有含矿量为 Q , 且工作帮坡角不大于给定最大工作帮坡角 θ 的采场中, 剥采比 (即 $(V-Q)/Q$) 和单位采矿量的地表挖损面积 (即 A/Q) 均最小的那个采场即为最优采场。

3.26

浮锥排除法 (Floating Cone Exclusion Method)

构造一个锥面倾角等于露天矿最终帮坡角的锥体, 通过在矿床数值模型中移动该锥体并计算落入锥体内的矿岩量和利润值, 做出是否排除掉锥体内矿岩的决策。

3.27

最终境界绿色低碳优化 (Green and Low-carbon Optimization of Ultimate pit)

在境界优化过程中, 使用浮锥排除法, 同时考虑生态环境影响和技术经济影响, 获得露天矿最佳地表开采范围、竖直开采深度和三维几何形态。

3.28

开采计划绿色低碳优化 (Green and Low-carbon Optimization of Mining Plans)

在开采计划优化过程中, 对所有最优采场序列进行动态排序, 将每年可能开采的矿岩量以及开采区域与单位生产量的生态成本结合, 使用枚举法和移动产能域法等数学方法, 获得考虑生态影响的年采剥量、最佳推进位置和开采年限。

4. 总则

4.1 应在矿山开采方案的设计和评价中纳入生态成本, 寻求经济与生态总效益最大的开采方案, 即以实现露天开采总体效益 (经济和生态效益) 最大化为目标。

4.2 金属露天矿绿色低碳优化设计需在最终境界和生产计划优化过程中, 把生态成本纳入进去。

4.3 在矿产开发项目的规划设计中就要考虑矿山生产对生态环境的冲击问题, 把“为环境设计”的新理念贯穿于技术经济决策之中。

4.5 金属露天矿绿色低碳优化设计在需要优化的众多要素中, 确定各种方案和众多参数,

组成露天开采的大方案，做出科学的决策。

4.6 优化设计的最佳方案在经济效益最大化和生态冲击最小化之间达到最佳平衡。

4.7 金属露天矿绿色低碳优化设计标准，具有专业化的专业队伍，保障标准持续运行。

4.8 根据企业运行的深度和广度及要求，可单纯经济优化，也可考虑生态成本的生态化优化，根据自身实际情况确定设计方案。

5. 生态冲击量化

5.1 一般规定

我国的金属矿山一般地处山区（包括丘陵），按照我国生态学界对此类地区生态系统的分类，分为森林生态系统、草地生态系统和农耕生态系统三个大类。根据矿山生产对生态系统造成的生态冲击的特点，矿山生态冲击可分为土地直接占用、矿山能源消耗的温室气体排放、污染足迹和携带足迹四大部分。

5.2 生态冲击量化要求

5.2.1 矿山直接破坏的土地单元包括：露天采场挖损、排土场或废石堆场占压、尾矿库挖损和占压、表土堆放场占压、塌陷区破坏、专用道路挖损和占压、选矿厂挖损和占压、办公区占压、专用设施及场地占压等。

5.2.2 矿山开采直接破坏的土地单元面积与矿山储量规模、生产规划、工业场地布置、矿区地形和矿岩特性等有关。

5.2.3 在最终境界优化过程中，露天采场挖损总面积可以依据其最终境界的地表周界线（闭合多边形）上的顶点坐标直接计算。在生产计划优化过程中，需要考虑采场每年随采剥位置变化的实时采场占地面积。

5.2.4 在最终境界优化设计阶段，一般没有排土场的完整设计，只能按容量需求对排土场的占地总面积进行估算。在生产计划优化过程中，需要考虑每年岩石剥离量对排土场面积的需求量。

5.2.5 在最终境界优化设计阶段，尾矿库的占地面积可以根据尾矿产生量结合尾矿库设计参数进行估算；在生产计划优化过程中，如果拟建多个尾矿库，可以根据各个尾矿库的最大容量和相关参数，分别估算每个尾矿库的占地总面积，并基于开采方案的累计入选矿量随时间的变化关系和各个尾矿库的使用顺序安排，估算每个尾矿库的投入使用时间和尾矿库的土地损毁面积随时间的变化关系。

5.2.6 地面设施的土地损毁面积在一定的生产能力范围内变化不大，可以看作常数；当生产能力的变化足以引起这一面积变化时，二者之间的函数关系也难以确定。而且这一面积与

采场、排土场和尾矿库的占地总面积相比非常小，没有必要在开采方案优化中详细考虑其随开采方案的变化。

5.2.7 根据场地条件，表土可以集中堆存（全矿只设一个表土场）或就近分散堆存。后者是在露天采场、排土场、尾矿库等附近分别设置表土场，把剥离的表土就近堆存在各自的表土场中，这样可以最大限度地缩短表土搬运距离。

5.2.8 为了便于在开采方案优化中应用，把露天矿生产的各种作业归纳为废石剥离、矿石开采和选矿三大类，根据不同温室气体排放当量将不同温室气体等量转换为二氧化碳排放，结合柴油、电力、炸药等的碳排放因子和单位采、剥、选工艺的能源消耗量，计算单位作业量的碳排放量。

5.2.9 污染足迹可以收集、测算类似矿山的水体和土壤的污染面积进行评估。水污染足迹的占地类型为水产地；土壤污染足迹的土地类型可视为林地，因为金属矿山大都地处山区，其植被多为林地。另外，被污染的土壤的生物生产力大幅降低或完全被破坏，所以土壤污染相当于直接破坏。

5.2.10 携带足迹的计算需要从辅助材料和产品一直追踪到原料开采，需要大量的相关数据。

6. 生态成本量化

6.1 一般规定

对生态功能的价值损失的计量，首先需要找到对生态系统性质的表征和对生态功能损失的计量基础。可以以生态冲击中对生态系统的分类作为对生态系统的性质的表征，以矿区各类土地的需求面积和温室气体排放量作为生态系统的功能损失的计量。如果矿区占用多类型生态系统，为了体现不同类型土地的当地经济价值和生态价值，各类土地的面积均为生态足迹中同类土地的当地面积，即不换算为全球公顷（或国家公顷）。

6.2 生态成本量化要求

6.2.1 对于森林生态系统、草地生态系统和农耕生态系所对应的林地、草地和农耕地，土地价格是被占用土地的直接生态价值的一种综合体现，因此，用土地价格度量这三类生态系统的直接生态价值是合理的。

6.2.2 不同地区、不同类型的土地的价格不同，在同一地区，同一类型、不同植物种类（如不同林种的林地、不同作物的农耕地）或不同生态条件的土地的价格也不同。可视具体情况，根据当地同类土地和类似生态条件的土地价格、与土地所有权（或使用权）人的协商价格、政府的征地补偿费指导价格等确定。

6.2.3 复垦工程完成后，需要一段时间（一般为 3~5 年）的养护，以保障生态恢复质量（如植物成活率、植被覆盖率等）符合要求。所以，复垦成本应包含养护成本。

6.2.4 由于在开采方案确定之前，不可能有土地复垦计划和预算，所以在新矿山的开采方案优化中，单位面积的复垦成本取值只能参照条件类似的矿山的复垦成本估算。

6.2.5 对于生产矿山，环境治理成本可从企业的财务账目中查得，对新建矿山可参照类似矿山的相应成本估算。复垦过程中为复垦目的进行的污染物治理费用可归到复垦成本之中。

6.2.6 对外部生态价值的估算中所考虑的生态功能没有包括许多人类已经认识到的但不易量化的功能（如景观、旅游、文化等），更没有涵盖人类尚未意识到的功能。

6.3 生态成本分配说明

6.3.1 为了便于把生态成本纳入优化过程中的盈利计算，需要把各项生态成本进行归纳和分摊，得出废石剥离、矿石开采和选矿的单位生态成本，分别称之为单位剥离生态成本、单位采矿生态成本和单位选矿生态成本。为此，需要把各个土地损毁单元的面积依据它们与废石剥离、矿石开采和选矿之间的关系，进行归纳和分摊，得出由废石剥离、矿石开采和选矿造成的土地损毁面积。

6.3.2 排土场对土地的损毁完全源于岩石剥离，所以排土场的占地面积全部归入岩石剥离的土地损毁面积。尾矿库对土地的损毁完全源于选矿，所以尾矿库的占地面积全部归入选矿的土地损毁面积。

6.3.3 采场（境界）的土地挖损面积是由岩石剥离和矿石开采造成的，所以按境界内的废石体积和矿石体积分摊到岩石剥离和矿石开采。

6.3.4 考虑到选矿专用设施的体量占全部地面设施的比例较小，而废石量一般大于矿石量，可以把地面设施的占地总面积分别按约 0.45、0.35 和 0.20 的比例分摊到废石剥离、矿石开采和选矿。

6.3.5 根据土地损毁面积在单位采矿、剥岩和选矿上的分摊，结合废石剥离、矿石开采和选矿回收造成的土地损毁生态成本和温室气体排放生态成本，计算单位剥离生态成本、采矿成本和选矿成本。

6.3.6 生态成本中，土地生态系统的外部生态价值的损失是持续性的，从土地被损毁开始一直到完成复垦并恢复生态功能的时间跨度内，每年都发生这些价值的损失，因此这部分生态成本计算需要逐年累加。

7. 最终境界绿色低碳优化

7.1 一般规定

7.1.1 由于在境界的最终设计确定之前没有生产计划，无法估算各个土地损毁单元的面积随时间的变化关系，也就无法估算其处于损毁状态的持续时间。土地处于损毁状态的持续时间最长为 F 年，最短为 1 年，用一个时间系数 ft 估算其平均持续时间（即 Fft 年）。

7.1.2 考虑到矿山生产初期损毁的土地面积大于后期，如果假设绝大部分被毁土地是在矿山开采结束后复垦的，时间系数 ft 可以取 0.75 左右。

7.1.3 对于 F ，在没有生产计划的条件下，可按境界中的可采矿量估算一个合理的年矿石生产能力，并据此计算境界的开采寿命； F 等于开采寿命加上复垦和养护时间，后者一般为 3~5 年。

7.2 最终境界绿色低碳优化方法

7.2.1 设置 cw 、 cm 、 cp 分别表示只考虑生产成本（即不考虑生态成本）的单位剥离、采矿和选矿成本； cw,i 、 cm,i 和 cp,i 分别表示第 i 次迭代中加入生态成本后的单位剥离、采矿和选矿成本； i 为迭代序号。

7.2.2 优化步骤如下：

第一步：令 $i = 0$ ； $cw,i = cw$ ， $cm,i = cm$ ， $cp,i = cp$ ，即不考虑生态成本。

第二步：应用锥体排除法优化境界。在锥体的排除过程中，以 cw,i 、 cm,i 和 cp,i 为成本参数计算锥体的利润，排除那些利润为负的锥体。得到的境界为当前境界，记为 V_i 。

第三步：如果 $i = 0$ ，转到第五步；如果 $i > 0$ ，执行下一步。

第四步：比较当前境界 V_i 和上一次迭代得到的境界 V_{i-1} 的矿岩总量。如果二者相等或足够接近，算法收敛，迭代结束，当前境界 V_i 即为最佳境界；否则，执行下一步。

第五步：依据境界 V_i 的地表周界和境界中的废石总量和矿石总量，估算对应于境界 V_i 的各项土地损毁总面积，即 AD 、 AM 、 AT 、 AB 、 AS ；基于境界中的矿石总量和选定的合理年矿石生产能力，估算该境界的合理开采寿命；进而计算单位剥离生态成本 c_{ew} 、单位采矿生态成本 c_{em} 和单位选矿生态成本 c_{ep} 。

第六步：令 $i = i + 1$ ； $cw,i = cw + c_{ew}$ ， $cm,i = cm + c_{em}$ ， $cp,i = cp + c_{ep}$ ，返回到第二步。

8. 生产计划绿色低碳优化

8.1 一般规定

8.1.1 若某一时段所形成的采场的总量相同，该时段的单位生产成本和投资与采场的位置和形态无关。

8.1.2 采场的位置和形态对能耗和土地损毁环境成本的影响，相对于采剥量和土地损毁面积的影响而言，可以忽略不计。

8.1.3 在任何时候，矿产品的销售价格都显著高于矿石的开采成本（不计剥离）。

8.1.4 矿产市场是正常经济时期的相对稳定市场，矿山企业的产品销售价格和生产成本的上升率都不高于可接受的投资收益率。

8.1.5 求最佳计划方案，需要对所有可能的计划方案进行经济评价，计算其 NPV，而且在评价中必须纳入各项环境成本。

8.2 生产计划绿色低碳优化方法

8.2.1 根据最优采场 C^* 定义，在上述已获得的最终境界中产生一系列最优采场 $\{C^*\}_N$ 。

8.2.2 建立生态成本内生化的生产计划评价模型。

8.2.3 设置生产能力约束范围，去除明显不合理方案，缩小运算规模。

8.2.4 设置产能域约束区间。

8.2.5 建立生产计划绿色低碳优化算法，实现生产计划的生态化优化。
