



地下金属矿绿色开采模式的内涵、特征与类型分析

赵 源¹, 赵国彦¹, 裴佃飞², 吴 攀¹, 邱 菊¹, 李 洋¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;

2. 山东黄金集团有限公司, 济南 250101)

摘 要: 在新型工业化和生态文明建设的背景下, 采矿业响应国家的资源环保政策提出了绿色开采发展理念。由于金属矿的开采方式、选矿技术、主要污染物等条件与煤矿有较大的区别, 基于煤矿的绿色开采模式和技术体系不完全适用于金属矿。因此, 本文从整体上阐述了绿色开采模式的内涵, 提炼了绿色开采的原则和核心; 然后针对地下金属矿开采存在的困难, 分析了地下金属矿绿色开采模式的特征; 最后从细节上讨论了基于不同伴生资源及尾废特征的绿色开采模式分类, 以及与不同地下金属矿的匹配关系。本研究为地下金属矿山推广绿色开采提供了理论支撑。

关键词: 绿色开采; 地下金属矿; 无废开采; 资源化利用; 无害堆存

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3700-13

中图分类号: TF11.31

文献标志码: A

引文格式: 赵 源, 赵国彦, 裴佃飞, 等. 地下金属矿绿色开采模式的内涵、特征与类型分析[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3700–3712. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40152

ZHAO Yuan, ZHAO Guo-yan, PEI Dian-fei, et al. Analysis on connotation, characteristics and type of green mining mode for underground metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3700–3712. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40152

金属矿山开采活动为现代工业提供了大量的生产原料, 是现代化国家经济发展的重要基础。随着浅部矿床逐渐开采殆尽, 大多数金属矿山逐渐向地下开采和深部开采发展^[1-2]。长期以来, 环境污染和生态破坏都是采矿活动无法避免的伴生问题。传统的矿山开采活动毁坏地表植被, 产生粉尘、固废、废水、废气等污染物, 引发地面沉陷、边坡失稳、泥石流等工程灾害, 给公众留下了不环保、不卫生、高危害的固有印象^[3-5]。因此, 在发展新型工业化的背景下, 为了使传统的环境破坏型矿业成为与生态环境和谐相处的绿色产业, 采矿业提出了绿色开采的发展理念。

以加拿大和澳大利亚为代表的矿业强国在 21 世纪初提出可持续开采的概念, 提出以安全和对环

境负责的方式促进金属和矿物的生产、使用和再循环, 力求最大限度地减少矿山开采业务对环境和生物多样性的影响^[6-7]。

在我国采矿行业内, 绿色开采概念由钱鸣高院士在 2003 年首先提出, 针对煤矿采掘业阐述了绿色开采“低开采、高利用、低排放”的内涵^[8], 并建立了包括减沉开采、煤与瓦斯共采、保水开采、矸石减排、土地复垦与综合治理在内的绿色开采技术体系^[9-10]。

由于金属矿的开采方式、选矿技术、主要污染物等条件与煤矿有较大的区别, 所以煤矿的绿色开采模式和技术体系对于金属矿并不完全适用^[11]。煤矿多为水平矿体, 而金属矿的矿体倾角多样, 形态也相对复杂; 金属矿石品位较低, 选矿中需要添加

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604606); 中南大学研究生自主探索创新项目(2019zzts306)

收稿日期: 2021-04-14; **修订日期:** 2021-08-12

通信作者: 赵国彦, 教授, 博士; 电话: 13507311842; E-mail: gy.zhao@263.net

捕收剂、活化剂、抑制剂等化学药剂,尾矿产率高;地下金属矿的开采深度普遍大于地下开采的煤矿。因此,有必要针对金属矿矿体形态复杂、伴生矿多、开采深度大的特点构建相应的绿色开采模式。近年来,有许多学者综述了金属矿以及非金属硬岩矿山绿色开采的典型案例和先进技术,为构建金属矿绿色开采模式提供了借鉴。李夕兵等^[12]和王少峰等^[2]以开阳磷矿为例综述了硬岩矿山绿色开采的发展历程,提出了循环经济型开采模式,并构建智能化开采方案。姚华辉等^[13]分析了我国金属矿山废石资源的综合利用的现状,提出“因地制宜、分类分段”的利用建议。充填技术的发展提高了充填料浆的浓度,增大了尾砂的利用率^[14-15]。金属资源循环利用技术的发展有助于提高低品位矿石和尾砂中有价成分的回收率^[16]。

在现有先进技术和创新实践的基础上,探讨金属矿绿色开采模式的普遍原则、核心理念,结合各类地下金属矿的实际条件分析适用的绿色开采模式类型,将有助于绿色开采的进一步推广。因此,本文首先从整体上阐述绿色开采模式的内涵,提炼绿色开采的原则和核心;然后针对地下金属矿绿色开采的困难,分析地下金属矿绿色开采模式的特征;最后从细节上讨论不同伴生资源及尾废特征的地下金属矿适宜的绿色开采模式细分类型。

1 绿色开采模式内涵

1.1 绿色开采模式释义

“绿色开采”是一种长期发展理念,它源自循环经济和清洁生产,旨在将绿色发展理念贯彻于矿产资源开发利用的全过程,取得资源、环境、经济和社会效益的和谐统一。

在以往谈论到绿色开采模式时,往往将矿山企业视为被动的执行者,认为实行绿色开采并不能为矿山开采企业带来直接的经济效益,反而要求企业为环境治理买单,因此矿山企业难以自发地实施绿色开采。这种观点忽视了企业的可持续发展需求,错误地将绿色开采和矿山企业对立起来。

在市场经济环境下,能让企业长期发展下去的,不是短期的暴利,而是可持续盈利的能力。矿山企业如果选择破坏生态环境的方式来降低开采成本,那无异于是竭泽而渔。因为恶劣的工作环境

会降低工作岗位对员工和潜在员工的吸引力,在更大的层面会造成社会对企业甚至整个行业的不良印象,随着时间的推移企业就会面临招工难、缺少技术人才、人力成本增加的困境。政府倡导绿色开采、建设绿色矿山实际是在帮助采矿业规避人才困境,实现可持续发展。很多知名国内矿业公司的领导者很早就认识到绿色开采对企业长期发展的重要意义,积极响应绿色矿山建设的号召,发展绿色开采技术,实现了经济和社会整体效益最大化。

绿色开采模式就是为了帮助矿山企业实现长期持续性发展,针对企业的技术革新和绿色生产提出的一套指导性理论和方法体系,它由一系列绿色开采工艺技术和应用这些工艺技术的策略组成。矿山企业通过采用绿色开采的技术手段和生产组织管理,来保证矿山生产的“无废化、高利用、低排放和生态化”^[8],维持好“资源开采—环境保护—矿区可持续发展”的平衡关系,最终达到开采扰动最小化、资源利用最大化、矿区环境生态化、安全高效常态化的效果。

1.2 绿色开采模式遵循的原则

绿色开采模式为矿山企业实现绿色生产提供了技术革新和工艺集成的策略,该策略体系的构建原则上应反映绿色开采的目标。从绿色开采的概念可知,一个成功的绿色开采模式应该能使企业实现可持续盈利、资源充分利用、以及与矿区政府、居民和谐相处的目标。因此,绿色开采模式应遵循可持续盈利、循环经济、地矿和谐这三项原则。

1.2.1 可持续盈利原则

实施绿色开采会减少矿山企业的短期盈利,这是一个不可避免的事实。但是从长期看,实施绿色开采存在提高企业的经济效益,带来可持续盈利的可能。一个成功的绿色开采模式应当能够根据不同类型矿山的特点为企业制定不同的发展策略和实施路线,让矿山企业获得可持续盈利。不符合可持续盈利原则的绿色开采模式将难以被矿山企业接受,无法顺利推行^[17]。

可持续盈利原则契合可持续发展的思想。绿色开采不是简单的矿山绿化和环保工程,而是通过矿产资源的高效利用、节能降耗、循环利用,将“绿色开采”理念贯穿于生产全过程,实现经济效益、社会效益、环境效益、资源效益的协调统一。

可持续盈利原则是绿色开采模式的前提。矿山企业的生产利润很大程度上取决于矿石价格,矿石价格的波动会直接影响企业的经济效益,实现可持续盈利就要帮助矿山企业在矿石价格处于低位时依然能获得利润。因此,绿色开采模式应提升企业的开采效率和资源综合利用能力,仅增加污染治理设施而没有带来利润的绿色化技改不符合可持续盈利原则,不能作为合格的绿色开采模式。

1.2.2 循环经济原则

循环经济理念是绿色开采理念的来源之一,它由美国经济学家肯尼思·鲍尔丁在20世纪60年代首次提出。循环经济的本质是提高生态环境的利用效率,对一切资源的循环再利用,具体来说就是减少消耗的资源数量,对已经使用过的资源进行二次利用,优化资源利用的质量^[18]。

循环经济理念的技术特征表现在资源消耗减少、资源再利用和资源再生化等方面^[19],旨在促进“自然-经济-社会”三者之间的良性循环发展^[20]。从经济学角度理解,循环经济就是企业在原材料投入、生产产品、废弃物处理和产品回收的全过程中,把传统粗放型的生产方式转变为循环经济型的生产方式^[21]。

循环经济原则是绿色开采模式的支撑。实践循环经济原则能够让绿色开采模式为矿山企业创造新的利润。例如,在矿山开采活动中通过共伴生组分综合利用、二次资源回收等途径提高矿产资源的利用率,能够最大限度地利用有限的矿产资源;对矿山生产原料如钢材和水资源进行循环利用,能够减少工程建设和生产成本;将废石和尾砂作为充填材料回填采空区,能够提高回采率并且减轻工程灾害风险。

1.2.3 地矿和谐原则

地矿和谐原则是绿色开采模式社会价值的体现。和谐社会是具有美好内涵的社会形态,构建和谐社会是我国一项重要的战略任务。地矿和谐是矿山企业参与矿区和谐社会建设的体现,它包含社会和谐以及环境和谐两方面的含义。

社会和谐是指矿山企业与矿区地方政府、当地居民和谐共处。在地方政府方面,矿山企业的开采活动要遵守政府制定的各项法律法规,污染物和有害物质的处理和排放要符合相关环保标准。在当地居民方面,矿山企业应避免因为工程用地、污染排

放、生产噪音等问题损害当地居民的合法利益,同时尽可能使矿区居民因为企业的存在而受益。

环境和谐是指矿山建设应尽量减少对环境的破坏,进一步改善当地的景观和能源利用情况。可采取的措施有:在工程建设上集约用地;对开采完毕的露天矿坑和不再使用的尾矿库进行景观化治理;对地下采空区进行综合利用或者充填;发掘矿山的地热资源修建热泵系统等。

1.3 绿色开采模式的核心

矿山企业绿色开采模式的核心可以总结为“一个解决,两个实现”。具体表述为:解决矿山开采方式和采选废弃物造成的环境问题,实现矿山企业长期盈利,实现地矿和谐。

矿山开采的环境问题归根结底来自于矿山开采方式和采选废弃物两个方面。在开采方式上,露天开采必然会造成地表植被破坏,产生扬尘污染;而地下开采则会造成地面沉陷、诱发矿震等工程灾害;当开挖空间位于地下水位以下时,会导致附近区域的地下水位下降。在采选废弃物方面,以废石、尾砂为代表的固体废物堆积在地面导致环境污染和工程灾害;排放矿井水和选矿废水会污染地表和地下水系;部分矿井通风排放出有害气体污染空气,损害动植物生态系统。因此,解决好这两个方面造成的环境问题是绿色开采模式的立足点。

绿色开采模式的另一个核心是实现长期盈利和地矿和谐,它体现了绿色开采模式对经济效益最大化的追求。绿色开采模式是集成各项绿色开采技术的策略集,围绕矿石流为众多的采选生产工艺环节设计最佳的绿色开采技术集成方案,使矿山企业采选生产带来的经济效益和社会效益达到帕累托最优。

2 地下金属矿绿色开采模式的特征

矿山的绿色开采模式需要遵循三项基本原则并围绕“一解决,两实现”的核心,但是由于不同矿山的资源特点和采选方式存在差异,所以不同矿山的绿色开采模式也体现出各自的特征。本文针对地下金属矿的特点,总结地下金属矿实施绿色开采存在的困难,在此基础上分析地下金属矿绿色开采模式的特征。

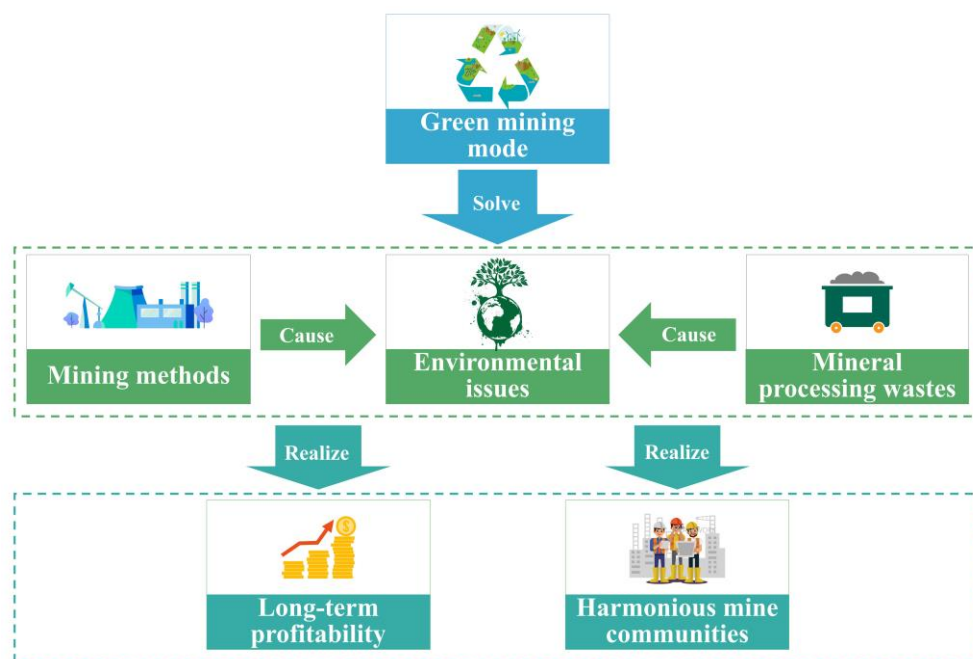


图 1 绿色开采模式核心“一解决, 两实现”的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of “one solution, two realization” at core of green mining mode

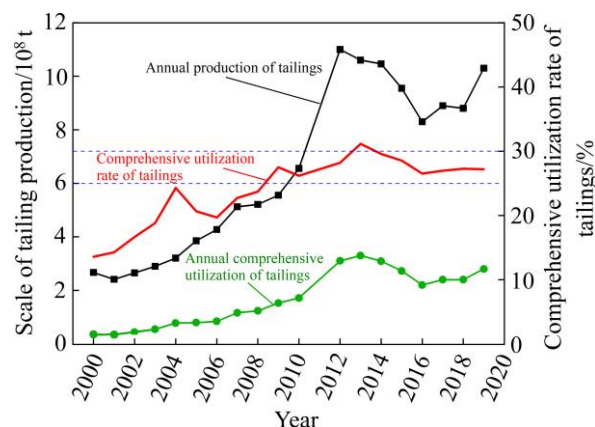
2.1 地下金属矿实施绿色开采的困难

2.1.1 低品位、多伴生矿的资源特点

我国金属矿资源具有总体储量丰富、平均品位低、综合矿多的特点。以铁矿为例, 我国铁矿基础储量列居世界第 4 位, 占世界的 18.3%。2015 年底, 全国铁矿区数量为 4669 处, 查明资源储量 850.77 亿 t, 但是多为品位 30%左右的贫铁矿石。相比之下, 淡水河谷、力拓、必和必拓和 FMG 在 2016 年采出铁矿石的品位分别为 53.60%、63.00%、54.66% 和 59.67%。铜矿、铝土矿、锰矿、金矿等金属矿种也都面临同样的问题。

由于矿石品位低, 导致我国金属矿选矿难度大、成本高, 选矿后产生的尾废量大。但同时, 尾废的利用技术不高, 利用途径有限, 导致综合利用率偏低。根据中国环境统计年鉴的数据, 国内重点调查工业企业 2008 年之前的尾矿综合利用率不足 25%, 2008 年至 2018 年期间的尾矿综合利用率仅在 25%到 30%之间, 如图 2 所示。图 2 中的重点调查工业企业是指主要污染物排放量占各地区(以地市级行政区域为基本单元)全年排放总量 85%以上的工业企业。

较低的尾废综合利用水平导致大量留存的尾矿, 《中国矿产资源节约与综合利用报告(2014)》报告显示, 从 2009 年到 2013 年的 5 年时间里, 我国

图 2 中国重点调查工业企业尾矿产生与利用情况 (2000~2019 年)^[22]Fig. 2 Production and utilization of tailings by key survey enterprises in China (2000–2019)^[22]

尾矿年均排放量接近 15 亿 t^[23]。截止到 2013 年, 我国尾矿和废石累积堆存量已接近 600 亿 t, 其中废石堆存 438 亿 t, 75%为铁铜矿开采产生的废石; 尾矿堆存 146 亿 t, 83%为铁矿、铜矿、金矿开采所形成的尾矿。《全国矿产资源节约与综合利用报告(2019)》表明, 我国尾矿年产量在 2014 年达到高峰后逐年下降, 2018 年我国尾矿年产量下降到 12.11 亿 t, 但综合利用率仅有 27.69%。到 2020 年, 我国尾矿和废石累积堆存量相比 2013 年的尾矿和废石累积堆存量又有增加, 已经接近 700 亿 t, 其中尾

矿约 180 亿 t，废石约 520 亿 t^[14]。

低品位、多伴生矿的资源特点增加了解决采选废弃物造成环境问题的难度。因此，矿山企业实施绿色开采不但要处置好新产生的尾废，还要消除历史遗留尾废的环境影响。

2.1.2 高风险、高成本、低效率的深部开采

随着浅部金属矿资源逐渐开采殆尽，国内越来

越多的金属矿山开始转向深部开采。据不完全统计，截止 2019 年国内开采深度超过 1000 m 的金属矿山已经有 16 座(见表 1)。随着时间的推移，千米以深矿山的数量和开采深度也将继续增长。由于深度“三高一扰动”的复杂环境，导致深部开采相比于浅部开采更容易发生岩爆、突水、顶板大面积冒落和采空区失稳等安全事故，灾害风险更高。

表 1 国内超千米深部金属矿山统计^[24]

Table 1 Statistics of metal mines with mining depth of more than 1000 meters in China^[24]

No.	Mine name	Type of ore	Location	Mining depth/m
1	Gongchangling Iron Mine	Iron	Liaoyang City, Liaoning Province	1000
2	Golden State Mining Group	Gold	Weihai City, Shandong Province	1000
3	No.2 Mine of Jinchuan	Nickel	Jinchang City, Gansu Province	1000
4	Sanshandao Gold Mine	Gold	Laizhou City, Shandong Province	1050
5	Ashele Copper Mine	Copper	Altay Prefecture, Xinjiang	1100
6	Xiangxi Gold Mine	Gold	Huaihua City, Hunan Province	1100
7	Dongguashan Copper Mine	Copper	Tongling City, Anhui Province	1100
8	Linglong Gold Mine	Gold	Zhaoyuan City, Shandong Province	1150
9	Xiaokou Gold Mine	Gold	Tongguan County, Shaanxi Province	1200
10	Gold Mine	Gold	Lingbao City, Henan Province	1300
11	Hongtoushan Copper Mine	Copper	Fushun City, Liaoning Province	1300
12	Qinling Gold Mine	Gold	Lingbao City, Henan Province	1400
13	Jiapigou Gold Mine	Gold	Huadian City, Jilin Province	1500
14	Liuju Copper Mine	Copper	Dayao County, Yunnan Province	1500
15	Huize Lead Zinc Mine	Lead, Zinc	Qujing City, Yunnan Province	1500
16	Yinxin Gold Mine	Gold	Lingbao City, Henan Province	1600

深部开采存在地层的原岩应力高、矿废提升和运输距离远、井下通风和排水系统复杂等问题。这些问题导致矿山深部开采的采场及井巷支护成本、提升运输费、通风系统成本、排水费等都有所上升，最终导致金属矿开采成本随深度的增加而大幅度提高。

同样，矿山的人工开采效率也随着开采深度的增加而降低。一方面，开采深度增加延长了工人每天井下通勤所用的时间，使有效工作时间减少；另一方面，深部开采工作面的高温环境会造成井下工人注意力分散、劳动效率降低。

2.2 地下金属矿绿色开采模式特征

国内地下金属矿开采存在着“低品位、多伴生

矿、高风险、高成本、低效率”这五点困难，地下金属绿色开采模式应围绕这些困难设计技术体系，以便能够帮助矿企业解决矿山开采方式和采选废弃物造成的环境问题，并实现矿山企业长期盈利和地矿和谐(见图 3)。

为了解决低品位和多伴生矿的问题，需要采用尾废综合利用技术和有价资源回收技术；为了防范较高的工程灾害风险，需要应用灾害预警及防治技术；为了降低深部开采的成本，需要采用无废开采方式，并利用深地环境的水势能、热能、地压能量等；为了提高深部开采的效率，需要发展基于 5G 通信的井下无人开采技术。最终，地下金属矿绿色开采模式会呈现出“无废化、无害化、高效化”的特征。

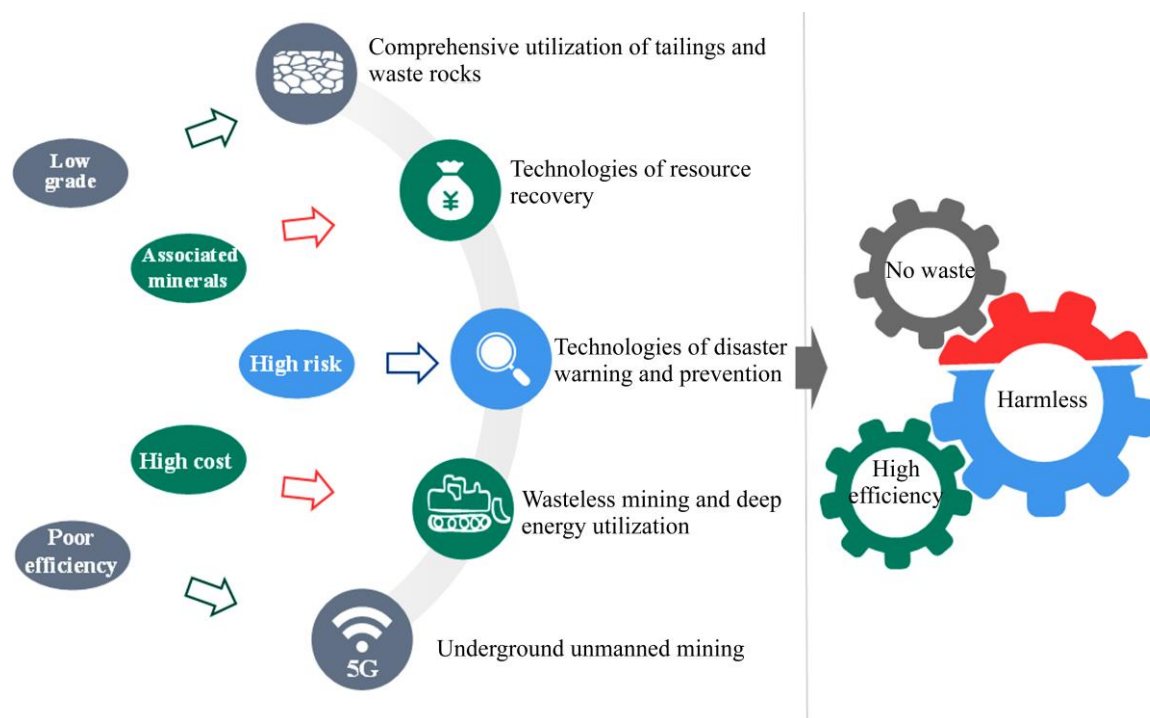


图3 地下金属矿绿色开采模式特征

Fig. 3 Characteristics of green mining mode of underground metal mines

3 地下金属矿绿色开采模式类型分析

3.1 绿色开采模式类型划分

绿色开采模式类型根据不同的划分标准可以有多种类型组合。比如,按照矿山的开采方式,可以分为露天矿山绿色开采模式和地下矿山绿色开采模式;按照矿山伴生资源及尾废特征可以将绿色开采模式划分为无废开采主导型、资源化利用主导型、无害化生态化堆存主导型;按照矿山的开采规模,可以分为大型、中型、小型矿山绿色开采模式;按照矿山开采的工艺流程和生命周期,可以划分为源头预防型、末端治理型和全程管控型三种绿色开采模式。

按照不同标准划分出的绿色开采模式在范畴上相互重叠,需要理清它们之间的层次关系。如图4所示,矿山的开采方式是位于最上层的划分标准,露天开采和地下开采在矿区环境上就会表现出最直观的差别。位于中间层次的划分标准是矿山伴生资源及尾废的特点,根据矿石中伴生资源的比例和尾废产率,可以确定最佳的固废利用和处置途径。

最下面一层是矿山的生产规模,虽然仅生产规模不同的矿山在生产环节上大同小异,但由于矿山开采是一项具有明显规模效益的生产活动,所以大型矿山相比于中小型具有更强的抗风险能力,也具有更短的投资回收期。

在这三层开采模式划分标准中,开采方式和生产规模都主要取决于矿体本身的储藏条件和储量,属于先天条件。而如何利用和处置矿山的伴生资源及尾废,矿山企业可以有多种选择,存在实现绿色开采的核心的最佳技术组合方案。因此,有必要详细讨论基于伴生资源及尾废特征的绿色开采模式类型,总结每种类型适用矿山的资源特点。

3.2 基于伴生资源及尾废特性的模式分类

3.2.1 无废开采主导型

无废开采主导型的绿色开采模式是指一方面要通过低废采准和控制爆破技术降低废石的产量,另一方面将废石和尾矿用于充填采空区,最终实现矿山地表无废化。

低废采准是通过采矿方法设计,减少采准工程开凿和采场冒落的废石,降低矿石贫化率指标。常

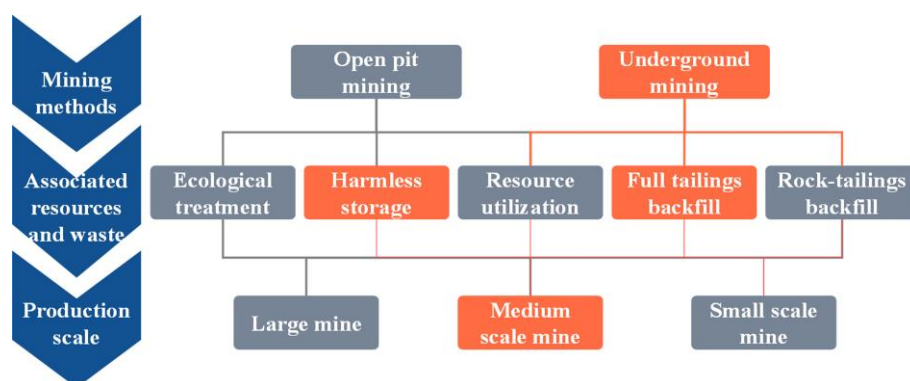


图4 绿色开采模式划分标准的层次关系

Fig. 4 Hierarchical relationship of division standard of green mining mode

用的措施有：将采场底部设计成“V”形，取消出矿横巷，凿岩巷和出矿巷一体化；上向充填开采中可以将下层分段的切割巷用作上层分段的出矿巷；采场顶部设计为菱形或拱形结构，充分利用岩体的自稳能力，防止岩石冒落。控制爆破技术是实施低废采的重要手段，钻爆法具有设备简单、开采效率高、适用性强的优点，目前仍然是金属矿地下开采的主要方法。合理的爆破设计能够在提高产量的同时减少超挖，降低贫化率。

尾矿充填利用是无废开采主导型绿色开采模式的核心。目前最流行的全尾砂充填技术是将选厂排放的尾砂通过旋流器、浓密机或压滤机进行浓缩脱水后，添加一定的胶凝材料和改性剂制备成高浓度的充填料浆，实现粗颗粒和细颗粒尾砂的全部利用，理论利用率可达100%。但是，由于井下充填的采空区有限，甚至部分矿山要求添加废石等粗骨料来制备高强度的充填体，因此要充填利用100%的尾砂时，矿石的尾砂产率不能过高。

从采充平衡的角度分析，假设充填技术可以利用所有粒径的尾砂，在采充比为1且不考虑充填体的沉缩比和流失系数的条件下，尾砂利用率的估算公式为：

$$U = \frac{f}{\rho \cdot \alpha} \quad (1)$$

式中： U 为尾砂充填利用率； f 为单位体积充填料浆尾砂消耗量， t/m^3 ； ρ 为矿石密度， t/m^3 ； α 为单位矿石尾砂产率。

例如一座矿山想要实现尾砂充填利用率 U 达100%，假设每立方米排水后的胶结尾砂充填体大概

含有1.3 t的尾砂， f 取值为1.3 t/m^3 ；矿石密度 ρ 在2.5~2.8 t/m^3 之间。由式(1)可计算出单位矿石尾砂产率 α 应限制在52%以内，只有这样才能通过充填的途径利用全部的尾砂。

研究经过文献调研，本文作者获得了铁矿^[25-29]、锰矿^[30-32]、铜矿^[33-36]和金矿^[37-41]四种主要金属矿的选矿数据(见表2)。由表2可知，只有铁矿能够实现以充填方式利用全部的尾砂。锰矿的尾矿产率偏高，如能资源化利用这一小部分尾砂，则可以实现无废开采主导型的绿色开采模式。

相对于常规的采、选、冶开采方法，原位浸出开采是一种新型的无废开采工艺，能够节约开采提升成本，而且不产生尾砂和废石^[24]。它采用钻孔的方式将浸矿溶液通过注入管道输送到已经压裂或者破碎的矿层，经过充分反应后将浸出的矿物富集液由抽送管道返回至地表回收金属^[42]。但是由于原位浸出开采要求浸矿液与矿石内部充分反应且开采效率较低，目前多应用于低品位砂岩型铀矿、铜矿和金矿，大多数地下金属矿开采仍然要采用常规的采、选、冶开采方法。

3.2.2 资源化利用主导型

资源化利用主导型绿色开采模式主要是对尾砂和废石进行资源化加工，尤其像铜矿和金矿这样尾废产率在90%以上的矿种，有一半以上的尾矿都需要采用资源化利用的方式处置，因此适合资源化利用主导的绿色开采模式。

资源化利用主导型模式需要根据尾废的成分和粒径特性，选择合适的利用方式。对于多伴生金属矿，有价成分再选是优先考虑的资源化利用方

表 2 四种主要金属矿种的选矿数据

Table 2 Beneficiation data of four main metal ores

Type of ore	Name	Ore grade/%	Concentrate yield/%	Concentrate grade/%	Recovery rate/%	Yield of tailing/%
Iron ore	Kaolinite type pyrite	24.0	36.0	59.3	89.0	64.0
	Pig iron ore	46.0	63.7	52.7	73.0	36.3
	High-phosphorus olive iron ore	42.7	50.0	67.5	79.0	50.0
	Hematite	47.3	50.9	67.7	72.9	49.1
	Hematite	48.3	71.3	64.2	94.8	28.7
Average		41.7	54.4	62.3	81.7	45.6
Manganese ore	Refractory manganese ore	28.2	36.0	44.6	56.8	64.0
	Low grade manganese ore	11.6	29.0	30.9	77.2	69.2
	Manganese-containing low grade iron ore	20.7	46.3	36.5	81.7	63.5
	Average	20.2	37.1	37.3	71.9	65.5
Copper	Copper oxide ore	1.46	4.28	29.4	86.0	95.7
	Copper oxide ore	0.84	3.34	21.6	85.9	96.7
	Copper ore	0.96	4.53	18.9	90.9	95.5
	Gold-silver-copper oxide ore	0.96	3.80	19.1	75.8	96.2
	Average	1.05	3.99	22.2	84.7	96.0
Gold ore ¹⁾	Duolonglawa gold deposit, Qinghai	3.22	4.89	57.9	88.3	95.1
	Refractory gold ore	2.43	5.79	34.1	81.2	94.2
	Gold-copper-arsenic ore	5.09	5.60	87.2	96.0	94.4
	Gold ore	2.67	9.20	27.5	94.9	90.8
	Low grade gold ore	1.79	7.20	21.3	85.5	92.8
	Gold-silver-copper oxide ore	1.53	3.80	36.0	89.3	96.2
	Average	2.79	6.08	44.0	89.2	93.9

1) The unit of beneficiation data of gold ore is g/t.

式。例如, 某大型金矿的尾矿中含有 0.6 g/t 的金和 39.65% 的钨, 经过重选脱泥、磁选除铁、浮选回收金硫、分级磁选联合再选工艺流程可以回收品位 56.22% 的钨精矿和 24.25 g/t 的金精矿^[43]。钨精矿和金精矿的产率分别为 39.65% 和 1.19%, 由此推算再选环节的尾矿产率在 60% 左右, 资源化利用了近一半的尾矿。

对于有价成分含量不高因而难以提取出来的尾矿, 在不含有有害成分的前提下可以作为建筑材料利用, 具体的利用方式和尾砂的粒径有关。

图 5 中整理了几种常见的利用途径对尾砂粒径的要求。按照建筑用砂粒径的要求, 粒径>250 μm

的尾砂可以用作砂子的替代品; 粒径在 100~250 μm 之间的尾砂可以加工成轻质免烧砖^[44]; 粒径为 10~150 μm 且含有长石的尾砂, 在降低铁和硫的含量之后, 可以生产用作建筑陶瓷原料的长石粉^[45]; 在生产超高性能混凝土时, 粒径 10~120 μm 的尾砂可以替代 12% 的水泥, 粒径<12 μm 的尾砂可以替代 40% 的粉煤灰^[46]; 粒径<75 μm 的尾砂可以经过热处理工艺生产烧结砖和微晶玻璃^[47-48]。以上利用方式均取得了不错的效果。

从图 5 可以看出粒径>100 μm 的尾砂主要用作替代砂和制作免烧砖, 这两个途径均有加工方式简单、利用量大的优点。目前, 为了提高选矿回收

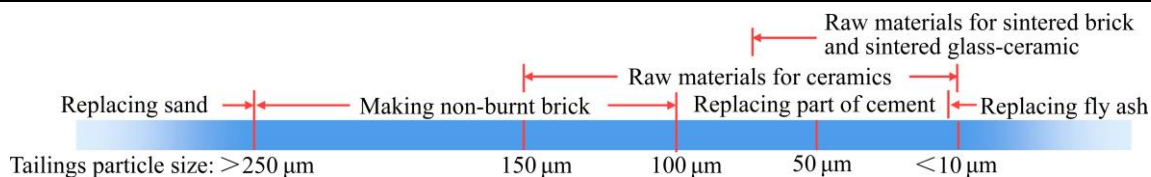


图5 建筑材料类利用方式对尾砂粒径的要求

Fig. 5 Requirements for the particle size of tailings used as building materials

率需要将矿石磨得更细, 所以造成尾矿粒度也越来越细^[49]。细粒级尾砂用于加工陶瓷原料或者制备超高性能混凝土时利用量有限, 制作烧结砖和烧结微晶玻璃需要建设额外的生产线。因此, 部分尾砂也会需要临时性的堆存。

3.2.3 无害化生态化堆存主导型

部分矿山由于尾矿仍然具有值得再选的有价成分, 或是加工生产线没有到位的原因, 不能采取充填的方式处置尾矿, 仍然需要将尾矿堆存在地表。这些矿山适合采取无害化生态化堆存主导的绿色开采模式。这一模式的主要思想是对排土场和尾矿库进行无害化封闭, 对长期堆存的尾矿库进行绿化, 以杜绝堆存的尾废危害人类和环境。

无害化堆存一般是将尾矿经浓密处理后, 进行干式堆存、膏体堆存或者固结堆存。我国矿山以前主要采用的湿式堆存不易将尾矿完全封闭, 尾矿坝设施也存在安全风险, 不适合作为无害化堆存的方式。

干式堆存将尾矿料浆压滤成滤饼后进行排放, 滤饼质量分数在 80% 以上, 具有大幅提升有效库容量、延长尾矿库服务年限、大幅降低建库成本和管理成本、经济效益显著等优点。

膏体堆存是 20 世纪 90 年代后期, 人们综合尾砂湿排和干堆的优点提出的一种尾砂半干排的方法^[50]。膏体堆存具有尾砂不离析、高黏度、渗透率低等特点, 既能够管道输送, 又能减轻环境污染和溃坝、渗水危险, 有利于尾矿堆体的稳定性。

固结堆存是一种平地堆存方式。通过选择性地向堆场四周的尾砂添加适当胶凝材料, 将尾砂堆场四周固结, 形成表层为硬壳的尾砂堆场。固结堆存形成的尾矿堆体具有自稳性高、防渗能力强、成本低、安全性好的特点。

对长期甚至永久性堆存的尾矿库在无害化封闭的基础上还要进行生态化修复。由于重金属污染物具有难降解、易聚集、污染时间长的特点, 潜在

污染风险较严重^[51], 因此, 需要采用改良剂修复、植物修复、微生物修复三类技术手段来降低长期堆存的风险^[52]。最后在修复后的尾矿库表面进行绿化, 使尾矿库与环境融为一体。

4 结论

1) 绿色开采模式是为了帮助矿山企业实现长期地持续性发展, 针对企业的技术革新和绿色生产提出的一套指导性理论, 它由一系列绿色开采工艺技术和应用这些工艺技术的策略组成。

2) 绿色开采模式应遵循可持续盈利、循环经济、地矿和谐这三项原则。可持续盈利原则是绿色开采模式的前提, 循环经济原则是绿色开采模式的支撑, 地矿和谐原则是绿色开采模式社会价值的体现。矿山企业绿色开采模式的核心是“一个解决, 两个实现”。解决矿山开采方式和采选废弃物造成的环境问题, 实现矿山企业长期盈利, 实现地矿和谐。

3) 围绕“低品位、多伴生矿、高风险、高成本、低效率”这五点困难, 国内地下金属矿的技术体系由尾废综合利用技术、有价资源回收技术、灾害预警及防治技术、无废开采及深地能利用技术、井下无人开采技术等五类技术构成, 呈现出“无废化、无害化、高效化”的特征。

4) 绿色开采模式类型可以依据开采方式、伴生资源及尾废、生产规模来划分。其中开采方式和生产规模类型都取决于矿山的先天条件。根据矿山伴生资源及尾废的特点, 以铁矿和锰矿为代表, 矿石尾废产率在 50% 左右甚至更低, 且能够通过充填利用 90% 以上尾废的矿山适合无废开采主导型模式; 以铜矿和金矿为代表, 矿石尾废产率在 90% 以上的矿山适合资源化利用主导型模式; 部分尾矿具有利用价值但是不具备资源化加工能力的矿山, 适合采取无害化生态化堆存主导型模式。

REFERENCES

- [1] 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236–1262.
LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236–1262.
- [2] WANG Shao-feng, SUN Li-cheng, HUANG Lin-qi, et al. Non-explosive mining and waste utilization for achieving green mining in underground hard rock mine in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1914–1928.
- [3] AZAPAGIC A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(6): 639–662.
- [4] NURMI P A. Green mining — A holistic concept for sustainable and acceptable mineral production[J]. Annals of Geophysics, 2017, 60(7). <https://doi.org/10.4401/ag-7420>.
- [5] FARJANA S H, HUDA N, MAHMUD M A P, et al. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1200–1217.
- [6] FITZPATRICK P, FONSECA A, MCALLISTER M L. From the Whitehorse mining initiative towards sustainable mining: Lessons learned[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(4): 376–384.
- [7] LAURENCE D, STAMFORD C, BARRY S, et al. A guide to leading practice sustainable development in mining[R]. Australian Government Department of Resources and Tourism, Canberra, 2011.
- [8] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. 煤炭科技, 2003(4): 1–3.
QIAN Ming-gao. Technological system and green mining concept[J]. Coal Sci-Tech, 2003(4): 1–3.
- [9] 卢明银, 王晓宇. 绿色开采的概念、技术体系与发展趋势[J]. 化工矿物与加工, 2007, 36(4): 36–38.
LU Xiao-yin, WANG Xiao-yu. Concept, technical system and development trend of green mining[J]. Chemical Minerals and Processing, 2007, 36(4): 36–38.
- [10] 许家林, 钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架[J]. 科技导报, 2007, 25(7): 61–65.
XU Jia-lin, QIAN Ming-gao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science and Technology Guide, 2007, 25(7): 61–65.
- [11] 王建法, 刘建兴, 陈晃. 金属矿绿色开采的理念与技术框架[J]. 矿业工程, 2016, 14(6): 16–18.
WANG Jian-fa, LIU Jian-xing, CHENG Huang. Framework of green metal mining technology[J]. Mineral Engineering, 2016, 14(6): 16–18.
- [12] 李夕兵, 曹芝维, 周健, 等. 硬岩矿山开采方式变革与智能化绿色矿山构建——以开阳磷矿为例[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2364–2380.
LI Xi-bing, CAO Zhi-wei, ZHOU Jian, et al. Innovation of mining models and construction of intelligent green mine in hard rock mine: In Kaiyang Phosphate Mine as an example[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2364–2380.
- [13] 姚华辉, 蔡练兵, 刘维, 等. 我国金属矿山废石资源化综合利用现状与发展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1649–1660.
YAO Hua-hui, CAI Lian-bing, LIU Wei, et al. Current status and development of comprehensive utilization of waste rock in metal mines in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6): 1649–1660.
- [14] 李夕兵, 刘冰, 姚金蕊, 等. 全磷废料绿色充填理论与实践[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1845–1865.
LI Xi-bing, LIU Bing, YAO Jin-rui, et al. Theory and practice of green mine backfill with whole phosphate waste[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1845–1865.
- [15] 张修香, 乔登攀, 孙宏生. 废石-尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(5): 1092–1101.
ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan, SUN Hong-sheng. Simulation on conveying characteristics in pipe about high-density slurry with waste rock-tailing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(5): 1092–1101.
- [16] 郭学益, 田庆华, 刘咏, 等. 有色金属资源循环研究应用进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1859–1901.
GUO Xue-yi, TIAN Qing-hua, LIU Yong, et al. Progress in research and application of non-ferrous metal resources recycling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1859–1901.
- [17] ZHAO Y, ZHAO G, ZHOU J, et al. What hinders the promotion of the green mining mode in China? A game theoretical analysis of local government and metal mining companies[J]. Sustainability, 2020, 12(7): 2991.

- [18] 段 宁. 清洁生产、生态工业和循环经济[J]. 环境科学研究, 2001, 14(6): 1-4.
DUAN Ning. Cleaner production, eco-logical industry and circular economy[J]. Research of Environmental Sciences, 2001, 14(6): 1-4.
- [19] 解振华. 关于循环经济理论与政策的几点思考[J]. 环境保护, 2004, 32(1): 3-8.
XIE Zhen-hua. Reflections on cycle economical theory and policy[J]. Environmental Protection, 2004, 32(1): 3-8.
- [20] 牛文元. 循环经济:实现可持续发展的理想经济模式[J]. 中国科学院院刊, 2004, 19(6): 408-411.
NIU Wen-yuan. Circular economy: An ideal economic model for sustainable development[J]. Journal of the Chinese Academy of Science, 2004, 19(6): 408-411.
- [21] 吴季松. 循环经济的由来与内涵[J]. 科技术语研究, 2006, 8(1): 51-54.
WU Ji-song. The origin and connotation of circular economy[J]. Chinese Science and Technology Terms Journal, 2006, 8(1): 51-54.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 全国大、中城市固体废物污染环境防治年报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/gtfwyhxpgl/gtfw/202012/P020201228557295103367.pdf>.
Ministry of ecology and environment, PRC. Annual report on the control of environmental pollution by solid waste in large and medium-sized cities nationwide[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/gtfwyhxpgl/gtfw/202012/P020202020122855729510.pdf>.
- [23] 中国国土资源经济研究院. 中国矿产资源节约与综合利用报告[R]. 北京: 地质出版社, 2014.
China Academy of Land And Resources Economics. Report on conservation and comprehensive utilization of mineral resources in China[R]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [24] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417-426.
CAI Mei-feng, XUE Ding-long, RENG Fen-hua. Current situation and development strategy of deep mining in metal mines[J]. Journal of Engineering Science, 2019, 41(4): 417-426.
- [25] 黄 利, 白 怡, 冯启明, 等. 高岭石型硫铁矿烧渣破碎粒度与解离度及磁选效果研究[J]. 非金属矿, 2012, 35(3): 9-11.
HUANG Li, BAI Yi, FENG Qi-ming, et al. Study on the relation of liberation degree and magnetic separation effect with crushing size of kaolinite-type pyrite cinder[J]. Non-Metallic Mines, 2012, 35(3): 9-11.
- [26] HE J, LIU C, HONG P, et al. Mineralogical characterization of the typical coarse iron ore particles and the potential to discharge waste gangue using a dry density-based gravity separation[J]. Powder Technology, 2019, 342: 348-355.
- [27] XIAO J, ZHOU L. Increasing iron and reducing phosphorus grades of magnetic-roasted high-phosphorus oolitic iron ore by low-intensity magnetic separation-reverse flotation[J]. Processes, 2019, 7(6): 388.
- [28] TAO D, ZHOU X, DOPICO P G, et al. Evaluation of novel Georgia Pacific clay binders in iron ore flotation[J]. Minerals, Metallurgy & Exploration, 2010, 27(1): 42-46.
- [29] 唐雪峰, 李家林. 某含锰赤铁矿石焙烧-弱磁选-强磁选试验[J]. 金属矿山, 2012(8): 52-55, 60.
TANG Xue-feng, LI Jia-ling. Experiment of roasting-low intensity magnetic separation-high intensity magnetic separation technology of a manganese-bearing hematite ore[J]. Metal Mine, 2012(8): 52-55, 60.
- [30] 刘国庆, 张悦刊, 刘培坤, 等. 三产品重介旋流器分选锰矿石模拟与试验研究[J]. 金属矿山, 2020(11): 215-220.
LIU Guo-qing, ZHANG Yue-kan, LIU Pei-kun, et al. Simulation and experimental research on separation of manganese ore by three-product dense medium hydrocyclone[J]. Metal Mine, 2020(11): 215-220.
- [31] 吴秀玲, 林清泉, 毛耀清, 等. 湖南永州某低品位锰矿的选矿试验研究[J]. 中国锰业, 2013, 31(1): 11-15.
WU Xiu-ling, LIN Qing-quan, MAO Yao-qing, et al. Beneficiation test of low- grade manganese ore in Yongzhou of Hunan[J]. China's Manganese Industry, 2013, 31(1): 11-15.
- [32] 魏宗武. 某难选含锰贫铁矿的选矿试验研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(3): 66-68, 71.
WEI Zong-wu. Research on flotation experiment of a low-grade hematite with high sulfur[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(3): 66-68, 71.
- [33] BAI X, WEN S, FENG Q, et al. Utilization of high-gradient magnetic separation-secondary grinding-leaching to improve the copper recovery from refractory copper oxide ores[J]. Minerals Engineering, 2019, 136: 77-80.
- [34] 傅开彬, 汤鹏成, 秦天邦, 等. 四川某微细粒次生硫化铜矿浮选工艺研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 48-50, 54.
FU Kai-bin, TANG Peng-cheng, QIN Tian-bang, et al. Flotation technology of fine-disseminated secondary sulfide copper ore from Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(6): 48-50, 54.

- [35] 袁凤香. 预先磁选工艺对某铜矿石浮选的影响[J]. 金属矿山, 2015(S1): 55-58.
- YUAN Feng-xiang. Effect of magnetic separation process in advance of a copper ore flotation[J]. Metal Mine, 2015(S1): 55-58.
- [36] 丁淑芳, 牛艳萍, 张鸿波, 等. 某含金、银氧化铜矿选矿试验研究[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(8): 899-901.
- DING Shu-fang, NIU Yan-ping, ZHANG Hong-bo, et al. Experimental research on flotation of some Au, Ag-bearing copper oxidized[J]. Resource Development & Market, 2014, 30(8): 899-901.
- [37] 胡志宇. 青海多隆拉哇金矿石浮选实验[J]. 矿物岩石, 2018, 38(4): 1-5.
- HU Zhi-yu. Flotation experiment of gold ore in the Duolonglaw gold deposit, Qinghai[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2018, 38(4): 1-5.
- [38] YANG Y, LIU S, XU B, et al. Extraction of gold from a low-grade double refractory gold ore using flotation-preoxidation-leaching process[M]//Rare Metal Technology, 2015. Springer, Cham, 2015: 55-62.
- [39] BOBOZODA S, BOBOEV I R, STRIZHKO L S. Gold and copper recovery from flotation concentrates of Tarror deposit by autoclave leaching[J]. Journal of Mining Science, 2017, 53(2): 352-357.
- [40] 范明阳, 王晓丽, 代淑娟, 等. 某金矿石选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2): 46-48, 53.
- FAN Ming-yang, WANG Xiao-li, DAI Shu-juan, et al. Experimental study on flotation technology for some gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(2): 46-48, 53.
- [41] 邓立佳, 代淑娟, 宿少玲, 等. 某低品位微细粒金矿石浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1): 31-33, 38.
- DENG Li-jia, DAI Shu-juan, SU Shao-ling, et al. Experimental study on flotation of lean ultrafine-grained gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(1): 31-33, 38.
- [42] 文旭祥, 孙占学, 周义朋, 等. 微生物浸铀研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(2): 411-420.
- WEN Xu-xiang, SUN Zhan-xue, ZHOU Yi-peng, et al. Advances in research on microbial leaching of uranium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(2): 411-420.
- [43] 杜芳芳. 某金矿尾矿综合回收金钨试验研究[J]. 矿山机械, 2018, 46(5): 51-55.
- DU Fang-fang. Test study on comprehensive recovery of tungsten and gold from a gold tailings[J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(5): 51-55.
- [44] 冯启明, 王维清, 张博康, 等. 利用四川某铜矿尾矿制作轻质免烧砖的工艺研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(12): 90-92, 95.
- FENG Qi-ming, WANG Wei-qing, ZHANG Bo-lian, et al. Research on techniques of lightweight baking free brick made of copper mine tailings from Sichuan[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(12): 90-92, 95.
- [45] 朱仁锋, 刘家弟, 李宗站. 金矿尾矿综合回收利用工艺技术研究[J]. 黄金, 2011, 32(2): 53-55.
- ZHU Ren-feng, LIU Jia-di, LI Zong-zhan. Research on comprehensive recovery and utilization technology of gold tailings[J]. Gold, 2011, 32(2): 53-55.
- [46] 鲁亚, 刘松柏, 赵筠. 利用铜尾矿制备经济型超高性能混凝土的研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(12): 18-21, 43.
- LU Ya, LIU Song-bai, ZHAO Jun. Study on preparation of economical ultra-high performance concrete (UHPC) by using copper tailings[J]. New Building Materials, 2018, 45(12): 18-21, 43.
- [47] 刘军, 徐长伟, 刘智, 等. 金属尾矿建筑微晶玻璃及其一次烧制制备方法. 中国: CN101298366[P]. 2008-11-05.
- LIU Jun, XU Chang-wei, LIU Zhi, et al. Metal tailings building glass-ceramics and their primary sintering preparation method. China: CN101298366[P]. 2008-11-05.
- [48] 彭建军, 贺深阳, 刘恒波, 等. 白云石质金尾矿制备烧结砖的研究[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(10): 21-23.
- PENG Jian-jun, HE Shen-yang, LIU Heng-bo, et al. Research on preparation of sintered brick by dolomitic gold deposit tailings[J]. New Building Materials, 2012, 39(10): 21-23.
- [49] 齐兆军, 盛宇航, 吕志文, 等. 深锥浓密机在福建某金矿的应用研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 71-73, 78.
- QI Zhao-jun, SHENG Yu-hang, LYU Zhi-wen, et al. Application of deep cone thickener in a gold mine of Fujian[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(6): 71-73, 78.
- [50] 许新启, 杨焕文, 杨小聪. 我国全尾砂高浓度(膏体)胶结充填简述[J]. 矿冶工程, 1998, 18(2): 1-4.
- XU Xin-qi, YANG Huan-wen, YANG Xiao-cong. Cemented fill of high-density unsized tailings in China—A brief review[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1998, 18(2): 1-4.
- [51] 尹一男, 蒋训雄, 王海北. 矿区地下水重金属污染防治初探[C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集. 昆明: 中

国环境科学学会, 2013: 1821–1825.

YIN Yi-nan, JIANG Xun-xiong, WANG Hai-bei. Preliminary study on prevention and control of heavy metal pollution in groundwater of mining area[C]//2013 Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences. Kunming: Chinese Society of Environmental Sciences, 2013:

1821–1825.

[52] 高文谦, 杨晓松. 某钨矿区历史遗留废渣综合治理对策[J]. 有色金属(矿山部分), 2014, 66(3): 48–52.

GAO Wen-qian, YANG Xiao-song. Comprehensive strategies of historical slags treatment in a tungsten mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2014, 66(3): 48–52.

Analysis on connotation, characteristics and type of green mining mode for underground metal mines

ZHAO Yuan¹, ZHAO Guo-yan¹, PEI Dian-fei², WU Pan¹, QIU Ju¹, LI Yang¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Shandong Gold Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In the context of new industrialization and ecological civilization construction, the mining industry has put forward the development concept of green mining in response to the national policy of resource and environmental protection. Since the mining methods, beneficiation technology, main pollutants and other conditions of metal mine are quite different from those of coal mines, the green mining mode and technical system based on coal mine are not fully applicable to metal mine. Therefore, in this article, the connotation of green mining mode was elaborated as a whole, and the principles and core tasks of green mining were refined, then the characteristics of green mining mode of underground metal mines were analyzed in view of the difficulties in underground metal mines, finally the matching relationship between the classification of green mining mode and underground metal mines based on different associated resources and tailings characteristics were discussed in detail. The research provides theoretical support for green mining of underground metal mines.

Key words: green mining; underground metal mine; mining without waste; resource utilization; harmless storage

Foundation item: Project(2018YFC0604606) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(2019zzts306) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, China

Received date: 2021-04-14; **Accepted date:** 2021-08-12

Corresponding author: ZHAO Guo-yan; Tel: +86-13507311842; E-mail: gy.zhao@263.net

(编辑 何学锋)