

湘南白钨矿资源分布特征与开发利用现状分析

包启龙

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年5月17日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

湘南地区位于南岭钨锡多金属成矿带中段, 其白钨矿资源具有优越禀赋, 是我国钨资源战略保障方面非常关键的区域。本文全面梳理了湘南白钨矿的成矿地质背景、资源分布特征, 着重把柿竹园、新田岭、瑶岗仙、汝城、水源山等具有代表性的矿区当作研究对象, 从采选工艺、产业组织、共伴生资源综合利用还有绿色矿山建设这四个方面, 对当前开发利用的状况、所取得的进展展开了剖析。分析得出, 湘南白钨矿资源有这样一些共性特征, 即“矽卡岩型占主导地位、多金属共伴生情况比较普遍、矿床规模大但品位较低、深边部找矿存在较好潜力”。在开发利用进程中, 取得了钨回收率大幅提高、多金属综合回收模式初步建立起来、绿色矿山建设取得明显成效等比较积极的进展。但是, 矿石品位不断下降、含钙脉石浮选分离存在困难、尾矿资源化利用不够充分、生态修复方面存在历史遗留问题等挑战依旧非常突出。建议从选矿技术创新、全产业链整合升级、尾矿资源综合回收、绿色矿山建设这四个方面协同推进, 以此推动湘南白钨矿产业实现高质量可持续发展。

关键词

湘南地区, 白钨矿, 资源分布, 开发利用, 矽卡岩型矿床, 选矿工艺

Analysis of Distribution Characteristics and Development and Utilization Status of Scheelite Resources in Southern Hunan

Qilong Bao

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: May 17, 2026; accepted: June 16, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

Southern Hunan is located in the middle of the Nanling tungsten-tin polymetallic metallogenic belt. Its scheelite resources have superior endowments and are a very critical area for the strategic guarantee of tungsten resources in China. This paper comprehensively combs the metallogenic geological background and resource distribution characteristics of scheelite in southern Hunan, and focuses on the representative mining areas such as Shizhuyuan, Xintianling, Yaogangxian, Rucheng and Shuiyuanshan as the research objects. From the four aspects of mining and dressing process, industrial organization, comprehensive utilization of associated resources and green mine construction, the current situation of development and utilization and the progress made are analyzed. The analysis shows that the scheelite resources in southern Hunan have some common characteristics, that is, “the skarn type is dominant, the polymetallic symbiosis is common, the deposit is large but the grade is low, and there is a good potential for prospecting in the deep edge”. In the process of development and utilization, the tungsten recovery rate has been greatly improved, the multi-metal comprehensive recovery model has been initially established, and the green mine construction has achieved remarkable results. However, challenges such as declining ore grade, difficulties in flotation separation of calcium-containing gangue, insufficient utilization of tailings resources, and historical problems in ecological restoration are still very prominent. It is suggested that the four aspects of mineral processing technology innovation, integration and upgrading of the whole industrial chain, comprehensive recovery of tailings resources and green mine construction should be promoted together to promote the high-quality and sustainable development of the scheelite industry in southern Hunan.

Keywords

Southern Hunan, Scheelite, Resource Distribution, Development and Utilization, Skarn Type Deposit, Beneficiation Process

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钨作为一种稀有金属，具备高熔点、高硬度、高密度的特性，有着“工业牙齿”的称号，在硬质合金、航空航天、军工装备、新能源、半导体等战略性领域有着广泛的应用[1]。鉴于其稀缺性和不可替代性，钨被世界各国列为关键战略金属。中国是全球钨资源最为丰富的国家，储量约占到全球总储量的52%，产量占到全球约82%，在国际钨供应链里处于主导地位[2]。在国内钨资源格局当中，白钨矿已探明储量约占全国钨矿总储量的71%，不过因为白钨矿品位偏低、嵌布粒度细并且常常与含钙脉石紧密共生，选矿分离难度较大[3]，当前实际开采仍旧是以黑钨矿为主，所以白钨矿的高效开发利用成为关系到我国钨资源可持续保障的重大命题[4]。

湘南地区处在南岭钨锡成矿带的中段位置，是湖南省内甚至是全国钨资源最为集中富集的区域[5]。这个区域主要是以矽卡岩型白钨矿为主，已经探明了像柿竹园、新田岭、瑶岗仙等多个大型、超大型的钨多金属矿床，建立起了从采选、冶炼一直到精深加工、贸易物流的完整钨产业链生态环境。该区域的白钨矿普遍有着品位比较低、多金属共生关系繁杂的特性，其开发利用面临着一系列技术方面与经济

方面的挑战。在这种背景状况下，从资源分布特征、开发利用现状这两个维度来对湘南白钨矿展开系统的分析，对于加深对该区域钨资源禀赋的认知、梳理清楚产业发展的瓶颈与路径、推动钨矿产业实现高质量发展，具备重要的理论参考价值、现实意义[6]。

2. 湘南白钨矿成矿地质背景

2.1. 区域地质概况

湘南地区处在华南板块南岭的中段位置，位于扬子地块跟华夏地块的构造结合地带，历经加里东期、印支期、燕山期等多个时期的构造-岩浆活动，其成矿地质条件相当有利。该区域在中生代燕山期的时候出现了大规模的酸性岩浆侵入活动，进而形成了一系列高分异花岗岩体，像千里山岩体、骑田岭岩体、王仙岭岩体等。这些花岗岩体含有丰富的钨、锡、钼、铋等成矿元素，为区域内钨多金属矿床的形成给予了充足的物质来源。沿着岩体与碳酸盐岩地层的接触地带，矽卡岩化蚀变广泛发育，造就了区域内白钨矿最为主要的赋矿空间。成矿时代主要是中侏罗世(约 160~155 Ma)，属于华南中生代大规模钨锡成矿的高峰期[7][8]。

在该区域内出露的地层当中，泥盆系碳酸盐岩的数量是最多的。其岩性包括灰岩、白云质灰岩、泥灰岩等。这些岩石的化学性质比较活泼，当遇到含矿热液的时候，很容易发生交代反应进而形成矽卡岩。矿集区的空间展布受到北东向和北北东向断裂构造的控制。

2.2. 矿床类型与分布格局

湘南地区的白钨矿当中，矽卡岩型占据着绝对主导地位，还存在云英岩型、石英脉型、风化残坡积型等多种不同的矿化类型[9]。其中，矽卡岩型白钨矿主要产出之处在于花岗岩体与碳酸盐岩地层相接触的地带、其附近区域，矿体呈现出层状、似层状或者透镜状的形态，其品位相对而言比较低，不过规模非常巨大，像柿竹园和新田岭这两个地方就是如此。云英岩型白钨矿主要集中分布于花岗岩体的内部或者顶部位置，例如水源山矿区便是这种情况。石英脉型主要是以黑钨矿为主，然而在部分矿区，像瑶岗仙，它同时具备石英脉型黑钨矿、矽卡岩型白钨矿这两种矿化类型[10]。

就空间分布而言，湘南白钨矿主要沿着千里山、骑田岭、王仙岭、瑶岗仙等花岗岩体的周边呈带状分布开来，进而建立成了“东西成带、北东成串”这样一种分布格局。矿集区明显受到花岗岩体接触带的控制，由此形成了以柿竹园矿田作为核心的钨多金属成矿密集区域。近年来新发现的水源山矿区进一步让该区白钨矿的类型组合变得丰富起来，在区内发现了风化残坡积型白钨矿、云英岩型白钨矿、矽卡岩型白钨矿等多种矿化类型，这表明湘南白钨矿的成矿类型比之前所认识到的要丰富得多[11]。而且，汝城地区在边深部找矿方面也接连取得了进展，在 2024 年年末新发现了 3 个隐伏矽卡岩型中等规模白钨矿体，到了 2025 年茶山脚边深部、走马坪勘查区找矿取得突破，预估钨金属增储 6 万吨。

湘南地区白钨矿床的空间分布格局展示在图 1 当中。通过查看该图能够清楚地发现，区域内已知的白钨矿床(点)在空间方面受到中生代花岗岩体的严格控制，主要沿着千里山、骑田岭、王仙岭、瑶岗仙等岩体的周边呈带状分布。举例来说，柿竹园、新田岭、远景(杨林坳)等大型-超大型矿床集中于千里山-骑田岭岩体接触带附近，进而形成了湘南白钨矿的核心矿集区，瑶岗仙矿区处于矿集区东侧，受到瑶岗仙岩体、跳马涧组与棋梓桥组过渡带地层的联合控制，近些年来新发现的水源山矿区位于王仙岭岩体北东接触带，使得区域找矿空间得到了拓展[12]。这样的分布格局呈现出“东西成带、北东成串”的规律，矿集区的展布方向和区域北东向断裂构造走向一致，表明中生代构造-岩浆活动对于成矿作用具有统一的控制。

3. 湘南白钨矿资源分布特征

3.1. 资源储量与空间分布

湘南地区以郴州市为核心，钨资源的保有储量非常丰富。依据中钨高新 2025 年发布的公告、评估报告的数据，单单是中钨高新所控制、受托管理的矿山，其合计保有钨资源量就已经达到了大约 120 万吨，在全国已探明储量中所占比例超过 40%。其中，已经注入上市公司的柿竹园钨金属储量为 56 万吨，而托管矿山，包括新田岭、瑶岗仙、远景钨业、香炉山钨业、湘东钨业，合计约有 64.3 万吨。中国五矿旗下的柿竹园、新田岭、瑶岗仙、远景钨业、香炉山钨业这 5 家矿山企业，其合计保有钨资源量达到 123 万吨，每年生产钨精矿约 2.5 万吨。从矿种构成方面来看，该区域内的钨资源以白钨矿作为主体，黑钨矿也存在一定的分布情况，特别是在瑶岗仙矿区比较集中。矿集区集中分布在了郴州市的苏仙区、北湖区、宜章县、汝城县等区县。

汝城县钨矿资源远景金属量超过 50 万吨，这点值得关注。目前其已探明储量处于 10 万吨级别，然而在新一轮找矿突破战略行动推动下，此地边深部找矿不断有新发现，显现出支持钨全产业链发展的巨大资源潜力[13]。

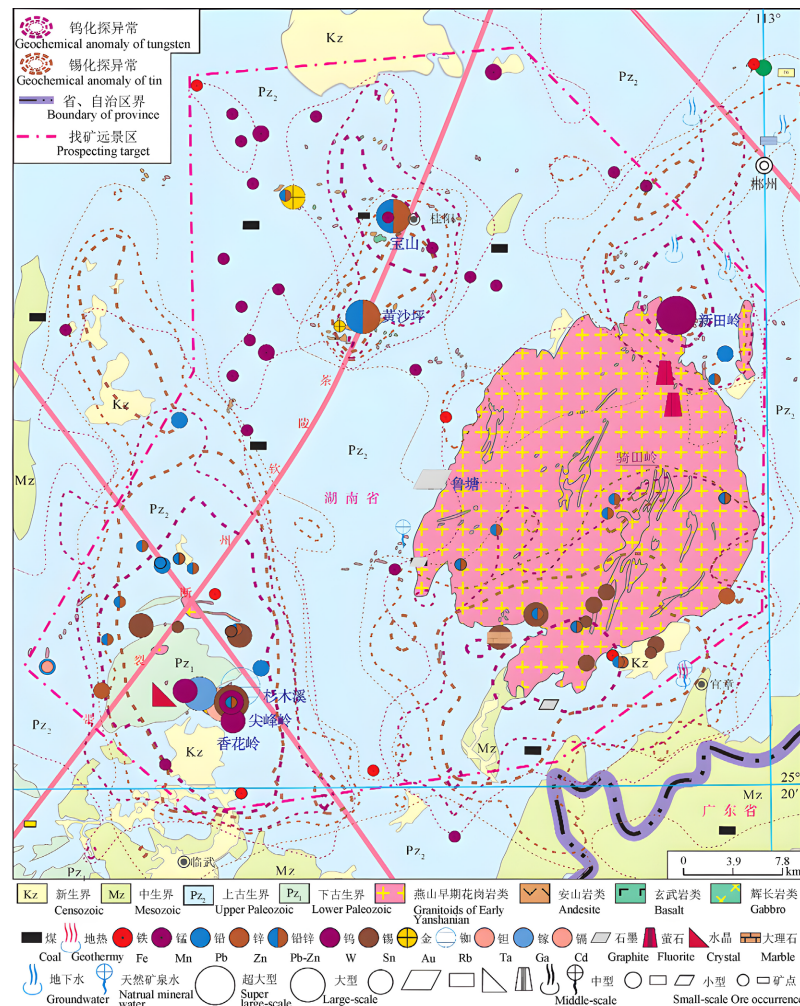


Figure 1. Geological map of distribution of main tungsten deposits in southern Hunan
图 1. 湘南地区主要钨矿床分布地质简图

3.2. 各主要矿区资源特征

柿竹园矿区是全球最大的单体钨矿床，被称作“世界有色金属博物馆”。该矿床属于矽卡岩型、云英岩型复合矿床，钨金属储量达 56 万吨。矿石里钨、钼、铋、萤石、锡等多种具有价值的组分共同存在，其中铋金属储量在全球总储量中占比为 57.2%，在中国总储量中占比为 76.25%。区内内有着 140 多种矿物，资源条件优良然而矿物的嵌布关系极其复杂，属于世界级难选的多金属矿[14]。

新田岭矿区在郴州市北湖区，处在骑田岭岩体的北接触带位置，属于华南地区乃至中国规模较大的矽卡岩型白钨矿床。按照中钨高新在 2025 年发布的公告来看，这个矿拥有的资源量是 5800 万吨矿石，平均品位是 0.31% WO_3 ，钨金属量达到了 18.0 万吨，其设计年采选能力是 150 万吨，每年大概能生产 3000 吨钨精矿。这个矿床是由侏罗纪岩浆-热液成矿系统作用而形成的，成矿矽卡岩经历了一定程度的退变质成矿作用过程。在 2025 年的时候，新田岭钨业资源增储勘查取得了突破性成果，新增的钨矿石资源量比较可观，选矿回收率累计为 87.17%，在 11 月创下了历史最高值 88.97% [15]。

瑶岗仙矿区处于郴州市宜章县，它有着比较长的开采历史，在 1914 年就开始了黑钨矿的开采工作。这个矿区是世界上很特别的特大型矿田，特别之处在于有黑钨矿和白钨矿，同时进行黑钨精矿和白钨精矿的生产，它是由脉状黑钨矿床、层状白钨矿床这两种矿化系统相互叠加形成的。其保有资源量是 2500 万吨矿石，平均品位为 0.45% WO_3 ，钨金属量有 11.2 万吨。白钨矿体呈现层状或似层状产出，主要在跳马涧组与棋梓桥组过渡带的地层中，是早期隐伏含矿花岗岩成矿作用造成的。2021 年白钨矿露天开采正式投产后，瑶岗仙达成了黑钨与白钨并行生产的状况[16]。

水源山矿区是近些年新找到的一处有大型规模潜力的钨矿产地，位于王仙岭岩体北东接触带附近区域。该区内矿化类型相当多样，已发现风化残坡积型白钨矿、云英岩型白钨矿、云英岩型锡矿、石英脉型黑钨矿、矽卡岩型白钨矿、构造破碎带型铅锌多金属矿这六种矿床类型。当中，风化残坡积粘土型白钨矿单矿体规模有大型，类型新颖，远景不错[17]。

Table 1. A list of resource characteristics of main scheelite deposits in southern Hunan

表 1. 湘南主要白钨矿床资源特征一览表

矿区名称	矿床类型	保有资源量 (矿石量/万吨)	钨金属量 /万吨	平均品位 (WO_3 %)	主要共 /伴生组分	当前状态/特点
柿竹园	矽卡岩-云英岩 复合型	19,000	56	0.29	钼、铋、萤 石、锡	“世界有色金属博物馆”， 世界级难选多金属矿
新田岭	矽卡岩型	5800	18.0	0.31	钼、铋、萤 石	华南最大矽卡岩型白钨矿床 之一
瑶岗仙	矽卡岩型 + 石 英脉型	2500	11.2	0.45	钼、萤石	百年老矿，黑、白钨矿并行 生产
远景(杨林坳)	石英脉型	4036	15.45	0.38	钼、铋、锡	磨矿工艺优化成效显著
水源山	风化残坡积型、 云英岩型等	远景规模，无精 确矿石量数据	大型	未提及具体 品位	锡等	新发现矿产地，类型新颖

注：数据来源于《湖南柿竹园矿田柴山石英脉型钨矿体的发现及其深部勘查指示》《地球科学大辞典》《南岭中段新田岭矽卡岩型钨矿床成矿流体演化和成矿机制研究》等[18]-[31]。

远景钨业旗下的杨林坳钨矿，其保有资源量是 4036 万吨矿石，在此之中钨金属量达到了 15.45 万吨。汝城地区的小垣矿区有新的发现情况，发现了 3 个隐伏白钨矿体，茶山脚、走马坪等区域的探矿成果也在持续扩大[32]。

由表 1 可知，湘南主要白钨矿床在矿床类型、资源规模、共伴生组分等诸多方面有着独特之处，呈

现出一定规律。资源规模上，柿竹园以 56 万吨钨金属量在众多矿床中排名第一，是世界级超大型矿床，新田岭、远景钨业、瑶岗仙这三座矿山的钨金属量都超过 10 万吨，共同构成了湘南白钨矿资源的主体。矿床类型方面，矽卡岩型占主导，只有水源山矿区有风化残坡积型、云英岩型自身的特点，瑶岗仙存在矽卡岩型和石英脉型两种矿化特征。品位分布上，区内矿石 WO_3 品位集中在 0.28% 至 0.45% 这个范围，整体处于较低水平，瑶岗仙以 0.45% 的平均品位相对较优质。共伴生组分中，钼、铋、萤石在各矿区存在，柿竹园的多金属共伴生组合最为复杂，资源综合利用潜力大但分离难度也最大。表 1 展示的资源特征为后文探讨开发利用过程中的技术瓶颈、产业路径奠定了基础地质依据。

3.3. 湘南白钨矿资源的共性特征

综合上述各矿区的资源禀赋特征，湘南白钨矿呈现以下共性规律。

首先，矽卡岩型占据绝对主导地位。湘南地区的白钨矿以矽卡岩型作为主体，在矿石当中普遍富含萤石、方解石等含钙脉石矿物，这既是实现资源综合利用的潜力之处，亦是选矿分离面临的首要技术难题。

其次，多金属共伴生的情况比较普遍。钨常常会 and 钼、铋、锡、萤石等一同产出。就拿柿竹园作为典型例子来说，矿石里面钨、钼、铋、萤石等多种组分所具备的综合利用价值非常巨大，不过分离的难度是非常高的。

第三点，矿床规模相对来讲较大，然而品位偏低。湘南白钨矿的矿石品位大多处在 0.2% 至 0.5% WO_3 这个区间之中。以新田岭为例，其平均品位是 0.31%，远景钨业的平均品位为 0.383%，柿竹园低品位矿石所占的比例有上升的趋向。依据中国钨协的统计数据，在 2024 年至 2025 年这段时间，中国钨矿原矿平均品位从 0.42% 降至了 0.28%，在中国钨矿原矿品位整体呈现下降趋势的状况下，湘南白钨矿的贫矿特征越来越显著[33] [34]。

第四，所探明的资源储量比较可观，在深边部区域具备良好的找矿潜力。到 2025 年时，省矿调所在郴州的柿竹园、宝山、新田岭、小垣、西岔等多个矿区成功探获了一批重要资源，新增加了钨、锡、钼、铋等多种资源量。柿竹园达成了“探矿新增量大于消耗量”这样一种良性循环状态[35]。这些勘查所取得的进展说明，湘南白钨矿深边部的找矿工作依旧存在着较大的潜力。

上述四项共性特征——矽卡岩型主导、多金属共伴生普遍、规模大但品位低、深边部潜力可观——并非孤立存在，而是相互关联、共同塑造了湘南白钨矿的开发利用基本面。具体而言：矽卡岩型主导意味着矿石中广泛发育方解石、萤石等含钙脉石矿物，这类矿物与白钨矿($CaWO_4$)表面化学性质高度相似，是浮选分离困难的根本原因；多金属共伴生虽然提升了矿床的综合经济价值，却使得选矿流程显著复杂化、药剂制度更加精细，钨、钼、铋、萤石等多种有用组分在同一矿浆体系中竞争吸附，对分离选择性提出苛刻要求；规模大但品位低则直接推高了单位精矿的开采与选矿成本，使得技术进步成为经济可行性的前提条件；深边部找矿潜力虽然为资源接续提供了希望，但深部矿石往往品位更低、嵌布关系更复杂，进一步放大了选矿难度。由此可见，湘南白钨矿的资源禀赋既是其战略价值的物质基础，也是开发利用过程中一系列技术瓶颈与成本压力的直接来源。下文将从采选工艺、产业组织、共伴生资源利用和绿色矿山建设四个维度，系统分析在上述资源特征约束下所取得的进展与面临的挑战。

4. 湘南白钨矿开发利用现状

4.1. 采选技术现状

湘南白钨矿目前主要采用露天开采与地下开采相结合的方式采矿作业，选矿环节则是以浮选工艺作为核心。近些年来，各个矿山企业针对低品位复杂矿石的高效回收问题展开了诸多技术攻关工作，

最终取得了一系列具有标志性意义的进展。

“柿竹园法”是湘南白钨矿选矿技术突破的典型范例。该技术属于国家“八五”“九五”重点科技攻关项目，以主干全浮流程为基础，采用螯合捕收剂核心技术，通过选择性络合矿物表面金属离子、提高捕收剂在目标矿物表面的吸附选择性，实现黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、辉铋矿、萤石的综合浮选利用。柿竹园公司联合中南大学进一步研发的“双 pH 双流程钨锡异步浮选法”，针对柿竹园矿区 143 种矿物共生的复杂局面，在粗选段采用弱碱性介质优先浮选硫化矿物，在精选段调控至中性 - 弱酸性环境强化钨锡氧化矿浮选，以分步调控矿浆 pH 值的方式解决钨锡矿物在同一体系中浮选行为差异大的矛盾。通过“柿竹园法”与持续的技术迭代，柿竹园建成了以该技术为核心的钨多金属综合回收模式，成功将钨回收率从建厂初期的 26.8% 大幅提高至 73%，锡实现从无到有的产业化回收，冶炼能耗降低 20% 以上，每年新增效益超千万元。柿竹园针对复杂难选多金属矿钼、铋、萤石的综合回收率分别达到了 76%、66%、65%，锡、铁、硫等伴生资源的综合回收效率有了比较明显的提高。到了 2025 年，柿竹园的“南岭成矿带复杂钨锡资源选冶联合清洁提取技术及应用”达到了国际领先水平，全产业链的攻关收获了明显成效：采矿端矿石贫化率降低了 1%，选矿端萤石回收率提高 5.46%，钼回收率提高超过 3%。柿竹园“双 pH 双流程”钨锡异步浮选工艺流程图如图 2 所示[36]。

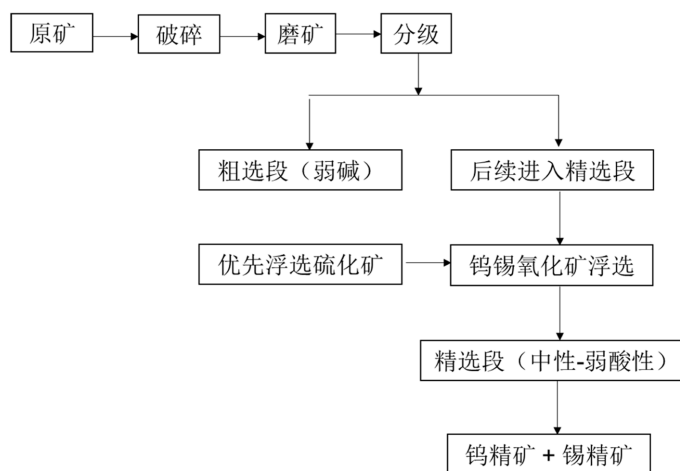


Figure 2. Shizhuyuan's "double pH double process" tungsten-tin asynchronous flotation process flow chart

图 2. 柿竹园“双 pH 双流程”钨锡异步浮选工艺流程图

白钨矿常温浮选与柱机联合工艺流程图如图 3 所示。推广常温浮选与柱机联合工艺对于降低选矿能耗而言十分关键。传统加温浮选采用“彼得洛夫法”，即将白钨粗精矿在高浓度(50%~70%)矿浆中，添加大量水玻璃(每吨精矿添加 20~150 kg)，加热至 90℃ 以上并保温约 1 小时，再稀释脱药进行常温浮选，此方法虽然可获得合格白钨精矿，但能耗大、成本高、操作复杂[37]。常温浮选法则在常温条件下操作，不需要浓缩粗精矿，节能降耗显著，但对浮选过程中的药剂控制要求更高，处理含方解石、萤石较高的矿石时指标波动较大[38]。针对湖南某低品位白钨矿加温浮选能耗大、回收率不理想等问题，王龙等采用 CK-5 为捕收剂、水玻璃为硅酸盐脉石抑制剂、CF 为萤石及方解石特效抑制剂，通过实验室闭路试验取得精矿 WO_3 品位 50.20%、回收率 72.54% 的指标，成功将加温浮选改为常温浮选，白钨回收率较矿山 2021 年现场生产回收率提高了 7.86 个百分点。旋流 - 静态微泡浮选柱(FCSMC)是一种针对细粒/微细粒矿物分选的高效浮选设备，其核心原理是通过旋流场和静态矿化区相结合，产生微细气泡以增加气泡与矿物的碰撞概率，同时在静态条件下实现矿化泡沫与矿浆的分离，降低矿物脱附概率，从而在精矿品位和回收

效果方面具有优势[39]。研究表明,旋流-静态微泡浮选柱(FCSMC)在分选微细粒级白钨矿时具有显著优势,-0.074 mm 粒级的回收率比传统浮选机高出 5~8 个百分点。范仕清等以衡阳远景钨业杨林坳选厂为对象,开展了柱机联合试验:柱机联合 1 粗 1 精 1 扫流程与现场 1 粗 1 精 3 扫流程相比,低温条件下精矿 WO_3 品位低 2.832 个百分点,但回收率提高了 6.65 个百分点;常温条件下精矿 WO_3 品位低 0.709 个百分点,回收率提高了 1.05 个百分点。在此基础上,提出了增加 1 台 FCSMC 浮选柱替代原有 22 台浮选机的技改方案,预计可新增经济效益 997.47 万元/年。纪道河等针对湖南某低品位白钨矿进行的柱机联合试验表明,在最佳条件(处理量 25 kg/h,捕收剂硝酸铅和 MTC 各 900 g/t,硫酸铝 450 g/t,水玻璃 600 g/t)下,采用“一粗一精二扫”流程可获得钨品位 15.93%、回收率 79.02%的精矿,相比全浮选机工艺(48.5%回收率)和全浮选柱工艺(68.74%回收率),柱机联合工艺分别提高了回收率 30.52 和 10.28 个百分点。瑶岗仙矿业也在白钨粗选段开展了旋流-静态微泡浮选柱半工业试验研究,在低温条件下钨粗选段回收率比现场回收率高出 9.64 个百分点。

Table 2. Summary table of key mineral processing technology progress of scheelite in southern Hunan
表 2. 湘南白钨矿关键选矿技术进展简表

应用矿区	关键技术/方法	核心效果/指标提升	来源/完成单位
柿竹园	“柿竹园法”	钨回收率从 26.8%→70%以上	柿竹园公司
瑶岗仙	旋流-静态微泡浮选柱试验	低温下钨粗选回收率提高 9.64 个百分点	瑶岗仙矿业
杨林坳	磨矿精确化球径配比优化	处理能力提升 23.4%, 能耗降 13.5%	远景钨业
新田岭/临武	组合捕收剂/抑制剂技术	从复杂矿石当中获取了高品质钨精矿,其所含 WO_3 的比例达到 64.89%, 回收率为 90.85%。	中南大学等

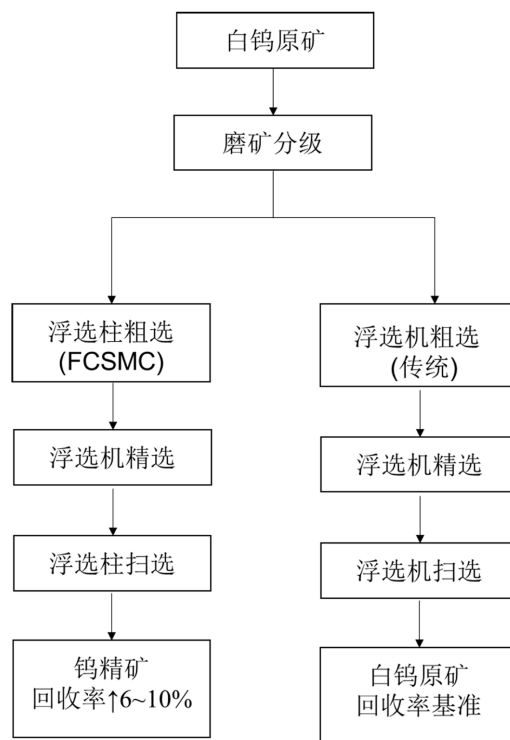


Figure 3. Scheelite flotation at room temperature and column machine combined process flow chart
图 3. 白钨矿常温浮选与柱机联合工艺流程图

磨矿工艺进行优化能够降低过粉碎情况的发生,还能提高分选效率,这有着重要意义[40]。杨林坳钨矿精确化球径配比并优化磨矿参数后,球磨机处理能力从每小时 32 吨提高到每小时 39.5 吨,提高幅度为 23.4%,磨机单位运行功率从每小时 11.43 千瓦每吨降低到每小时 9.89 千瓦每吨,降幅为 13.5%,介质消耗降低了 10.5%,节能降耗方面取得了较好效果。

在矽卡岩型白钨矿浮选分离技术领域,中南大学等相关机构一直努力攻克白钨矿与含钙脉石因可浮性相近而产生的浮选分离难题,从矿物颗粒表面性质调控、绿色药剂筛选这两方面入手,提出了全新方案,还在新田岭、临武等矿山进行推广应用。油酸钠-苯甲羟肟酸之类的组合捕收剂、水玻璃-六偏磷酸钠之类的组合抑制剂,在难处理白钨矿浮选中的应用取得了不错效果。在原矿 WO_3 品位仅为 0.90% 的情形下,经过全流程闭路试验,成功得到了 WO_3 品位达 64.89%、回收率为 90.85% 的钨精矿。

通过表 2 能够发现,湘南白钨矿的选矿技术进步呈现出明显的“问题导向”特质。各个矿山根据自身矿石性质不一样,围绕提高回收率、降低能耗、处理复杂矿石等方面展开了相关研究工作。柿竹园利用“柿竹园法”成功解决了超大型多金属矿综合回收这个世界级难题,把钨回收率从建厂初期的 26.8% 大幅提高到 70% 以上,瑶岗仙使用旋流-静态微泡浮选柱,有效处理了低温条件下白钨矿浮选指标波动的状况,杨林坳矿区从磨矿环节着手,借助精确的球径配比实现了处理能力提高、能耗降低。这些技术发展说明,湘南白钨矿的选矿实践已从早期的粗放式生产慢慢转变为精细化、差异化、低碳化的技术路线,为区域白钨矿资源的高效开发利用奠定了工艺基础。不过表 2 所呈现的技术突破大多集中在个别矿山的特定环节,像含钙脉石浮选分离、微细粒级高效回收等共同难题依旧需要形成系统性的技术解决方案。

4.2. 产业组织与经营格局

湘南白钨矿的开发利用呈现出一种产业格局,这种格局是以中国五矿集团作为龙头,且主要是通过其旗下的中钨高新来实现的,呈现出高度集中的趋势。中钨高新当前对柿竹园公司持有控股权,同时采用托管的方式来管理新田岭钨业、瑶岗仙矿业、远景钨业、香炉山钨业等矿山企业。把已注入的柿竹园也算在内,该公司所控制或者托管的钨资源总量大概为 120 万吨,占据全国已探明储量的 40% 以上。中国五矿在郴州地区安排部署了多家矿山企业,从而形成了区域性的钨产业集群,在资源保障、技术研发、市场调控等方面具备一定优势。

在产业链延伸这一方面,湘南钨产业正加快速度从单纯的“原矿输出”朝着“精深加工、技术研发、品牌输出”的全价值链方向进行升级。汝城县已经成功建成了每年能够生产 1 万吨 APT、3000 吨蓝钨的精深加工生产线,并且还积极地引进钨金属高精尖航空航天动力装置企业的下游项目。祺祥矿业研发出了高梯度磁选-黑钨全浮选新工艺,使得资源综合利用率和回收率都得到了全面提高。汝城县钨金属开采指标在全国所占比例接近 5%,这进一步稳固了它在国家、省级钨资源格局当中的战略地位。

在宏观政策方面,钨矿开采受到国家开采配额的刚性限制。2025 年中国第一批钨矿开采总量的控制指标是 5.8 万吨,相比于 2024 年度第一批指标减少了 4000 吨,下降幅度为 6.45% [41]。而且,开采指标不再区分主采指标与综合利用指标,对于共伴生钨矿资源量达到大中型规模的矿山会继续下达开采指标,并且在分配上给予倾斜,这样的政策调整为湘南白钨矿综合利用营造了更有利的制度环境。

4.3. 共伴生资源综合利用

湘南白钨矿存在多金属共伴生这样的特性,而凭借这一特性,综合利用就成了提高矿山经济价值的关键做法。当前,综合利用着重关注的方向主要集中于以下几个方面[30]。

伴生萤石回收属于综合利用的首要研究课题。柿竹园伴生萤石矿区的资源量高达 6500 万吨,是全球

最大的伴生萤石矿。当前，像柿竹园、新田岭等企业，在回收钨资源之后，对浮钨尾矿展开萤石综合回收工作。柿竹园把尾矿伴生萤石的回收率从不到 30% 提高至 65% 以上，每年减少尾砂排放超过 15%。柿竹园针对白钨浮选尾矿综合回收萤石所进行的试验研究，采用硫酸作为活化剂，水玻璃作为抑制剂，能够得到萤石精矿品位为 94.31%、回收率为 70.06% 的试验结果。瑶岗仙在萤石综合回收方面也有新的成果，实现了萤石回收率 $\geq 30\%$ 、精矿品位 $\geq 83\%$ 的技术目标。然而，由于现有技术的制约，传统钨回收工艺中投入的大量抑制剂致使萤石受到强烈抑制，萤石回收精矿的指标、回收率还有很大的提高余地。

尾矿里边石英等非金属矿物的回收属于尾矿资源化里的关键方向。湖南有个钨浮选尾矿，其中石英含量高达 59.46%，针对这个情况研究推出了一套回收工艺，先是通过磁选去除铁，接着进行浮选以脱掉铝硅矿物，之后再经过再磨解离步骤，最后又进行浮选来再次脱掉铝硅矿物，按照这样的流程能够得到 SiO_2 品位 99.50% 的石英精矿，给同类复杂难选的石英资源实现高值化利用给予了技术方面的参考。

柿竹园收获了比较显著的成果，也就是建立起了多产品谱系。借助科技创新的方式，柿竹园的产品谱系从最初的 3 种发展到了 7 种，锡资源从原本没有实现了产业化回收，低品位伴生矿资源的综合回收价值也得到了充分挖掘。

上述资源特征——矽卡岩型主导、含钙脉石广泛发育、多金属共伴生、品位偏低——直接决定了湘南白钨矿开发利用的技术路径与核心瓶颈。含钙脉石(方解石、萤石等)与白钨矿表面化学性质相似，是浮选分离困难的根本原因；多金属共伴生虽提升了综合回收价值，却使选矿流程趋于复杂、药剂制度更加精细；低品位则对选矿成本控制和回收率指标提出了更高要求。以下将基于这些资源特征，系统梳理湘南白钨矿选矿技术的研究进展与面临挑战。

4.4. 绿色矿山建设与生态修复

白钨矿(CaWO_4)与含钙脉石矿物(方解石 CaCO_3 、萤石 CaF_2 等)的表面化学性质相似，在脂肪酸类捕收剂体系中均发生化学吸附，导致浮选分离极为困难。这是白钨矿选矿领域最具挑战性的科学问题，也是限制精矿品位和回收率的最关键技术瓶颈。湘南白钨矿以矽卡岩型为主体的资源特征，使得这一矛盾在该区域表现得尤为突出：矽卡岩化过程中形成的方解石、萤石等含钙脉石广泛发育，与白钨矿紧密共生(表 1)，且嵌布粒度细、解离难度大。同时，柿竹园等矿区多金属共伴生的复杂性进一步放大了分离难度——钨、钼、铋、萤石等多种有用组分在同一矿浆体系中竞争吸附，对浮选药剂的选择性提出了苛刻要求。因此，湘南白钨矿的选矿技术创新，本质上是在资源禀赋约束下寻求白钨矿与含钙脉石、白钨矿与伴生金属之间的多重选择性分离。

柿竹园在生态修复领域已经投入了十二年时间。在这十二年里，总共完成了二十五项生态修复工程，在生态修复方面取得了不错的成效，成功复垦了两千五百六十多亩生态区域，重建了四十五亩生态湿地。而且还创新性地运用了“微生物修复 + 植物固土”技术，让废弃矿渣场变成了充满生机的矿山公园。这个矿山已经连续三年获得湖南省“环保绿牌”单位的荣誉。在智能化建设方面，柿竹园累计投入超过八千万元来推进智能矿山建设，建立了一套智能化运营模式。采矿能够实现远程遥控，选矿的全流程实现自动化，固定装备能够无人值守，生产管理系统实现数字化集成等。该模式建设取得了积极成果，井下作业人员数量减少了一半，采矿量增长到了原来的三倍，采矿效率提高到原来的六倍。2025 年，柿竹园尾矿库项目变更选址后，只用了十九个月就完成了从立项到主体建设的全过程，并且顺利通过了环保督察整改验收，展现出了令人瞩目的“柿竹园速度” [42]。

瑶岗仙矿业作为一家有着百年历史的老矿，在环保工作上投入了诸多资金，其投入总额超过了 4 亿元，用于进行一系列环保相关工程。该矿收获了一些成果，清运的尾矿达到了 162 万立方米，复绿面积也有 27.42 万平方米，基于这些成果，在 2021 年被列入全国绿色矿山名录。展望 2025 年，瑶岗仙矿业会

继续专心于生态复绿工作，累计完成的生态复绿面积将会达到 28 万平方米。

新田岭钨业把“城市中的矿山”作为自身定位，先后累计投入超过 6800 万元用于废弃尾矿库、矿点的复垦复绿工作，最终成功让大约 730 亩土地实现复绿。在资源利用这一方面，大力推广“阶段深孔空场 + 嗣后充填”这种采矿方法，使得矿石回采率从原本的 50% 提高到 87% 以上，同时建立了尾砂利用的“双循环”模式，累计减少尾砂排放达 360 万吨，还带动了下游产业创造出经济效益约 1.5 亿元。郴州市目前已经建成国家级绿色矿山 18 家，其数量在湖南省处于首位[43]。

Table 3. Comparison table of green mine construction effect of main mines in southern Hunan

表 3. 湘南主要矿山绿色矿山建设成效对比表

矿山企业	关键举措	主要成效
柿竹园	持续 12 年生态修复、智能矿山建设	恢复生态 2560 余亩，减人增安提效，连续三年“环保绿牌”
新田岭钨业	“嗣后充填”采矿法、废弃地复垦	回采率 50%→87%，减少尾砂 360 万吨，复绿 730 亩
瑶岗仙矿业	尾矿清运、全面复绿	清运尾矿 162 万 m ³ ，复绿 28 万平方米，入列全国绿色矿山

表 3 在生态修复、资源利用、智能转型三个维度上，展示了湘南主要白钨矿山于绿色矿山建设进程中的差异化实践路径。需要进一步指出的是，绿色矿山建设并非纯粹的成本负担，而是与产业链附加值提升形成了正向循环。其一，以新田岭钨业为代表的“嗣后充填”采矿法，将尾砂转化为充填材料，累计减少尾砂排放 360 万吨，同时带动下游充填材料产业创造经济效益约 1.5 亿元——这本身就是产业链的横向延伸与附加值的直接创造。其二，柿竹园的智能化矿山建设(采矿远程遥控、选矿全流程自动化)使井下作业人员减少 50%、采矿效率提高至原来的 6 倍，大幅降低了单位精矿的人工成本与安全成本，从而在钨精矿价格波动中获得了更强的成本韧性和利润空间，为向高附加值精深加工环节(如 APT、硬质合金)进行资本投入提供了资金基础。其三，生态修复形成的矿山公园、绿色品牌形象(如柿竹园连续三年获湖南省“环保绿牌”单位)有助于矿山企业在绿色金融、碳交易、ESG 评级中获得更优条件，降低融资成本，提升品牌溢价。其四，瑶岗仙从“生态欠账”到“全国绿色矿山”的转型，证明了历史遗留矿山通过系统治理可以重新获得政策支持与社会许可，为后续资源接续、矿区土地复垦后再开发(如工业旅游、新能源项目)创造了条件。综上，绿色矿山建设通过降低成本、延伸产业、提升品牌、撬动资本四条路径，与产业链附加值提升形成了相互增强的良性循环。这一认识对于理解湘南白钨矿产业从“资源依赖型”向“价值驱动型”转型的内在逻辑具有重要意义。

5. 开发利用面临的主要挑战

5.1. 矿石品位持续下降与资源贫化

在经过长时间高强度开采之后，湘南白钨矿的矿石品位持续下降，已成为制约产业发展的关键瓶颈。湘南白钨矿品位大多介于 0.2%~0.35% WO₃ 之间，远低于黑钨矿。据中国钨协统计，国内钨矿原矿平均品位已从 2004 年的 0.42% 下降至目前的 0.28%，降幅达 33%。由于每开采 1 吨钨精矿(65% WO₃)需处理原矿 300~400 吨，单位精矿开采成本已攀升至 10 万元/吨以上。环保高压下，国内中小矿山停产比例超过 30%，矿山开工率不足 35%。同时，吨矿尾矿处理成本持续升高。当钨精矿价格突破 15 万元/吨时，WO₃ 品位 0.18% 的资源在回收率 82%、选矿成本 100 元/吨条件下可达盈亏平衡；目前 65% 白钨精矿价格已报至 28.7 万元/标吨，这也为湘南大量低品位白钨矿资源的开发利用提供了新的经济可行性窗口。部分矿山转入深部开采以后，矿石性质变得越发复杂。选矿指标波动问题非常突出。给企业的稳定生产、成本控制带来了严峻挑战[44]。

5.2. 复杂共伴生矿的选矿技术瓶颈

湘南白钨矿主要为矽卡岩型，矿石中含钙脉石(方解石、萤石等)含量高，嵌布关系复杂。白钨矿(CaWO_4)与含钙脉石矿物表面化学性质相似，浮选分离极为困难。当前分离难题主要体现在几个方面：其一，药剂制度复杂，为抑制含钙脉石需添加大量水玻璃等抑制剂，用量可达每吨矿石数千至数万克，加之捕收剂用量偏大，选矿药剂成本约为 5~12 元/吨原矿，且导致矿浆粘度增加、脱水沉降困难。其二，现有工艺下常规流程虽可获得 WO_3 品位约 59% 的精矿，但提高品位往往以牺牲回收率为代价，精矿品位与回收率之间存在突出矛盾。其三，多金属共伴生致使选矿流程长、分选效率低。纪道河等的研究表明，采用传统全浮选机工艺处理低品位白钨矿时，钨精矿回收率仅为 48.5%，远低于设计要求。多金属共伴生致使选矿流程变长、药剂制度变得复杂，进而增加了技术难度。虽然柿竹园等单位在组合捕收剂、选择性抑制剂方面有一定进展，然而针对不同矿区矿石性质的差异化药剂制度优化、微细粒级高效回收、大规模工业化稳定运行仍有诸多技术工作需要去完成[45]。

5.3. 尾矿资源化利用不足

白钨矿浮选尾矿中萤石、石英、长石等具有较高的回收价值，但当前综合回收率总体偏低。以柿竹园为例，伴生萤石资源量高达 6676.9 万吨，是全国最大的伴生萤石矿。传统钨浮选工艺中大量抑制剂(如水玻璃)致使萤石受到强烈抑制，尾矿伴生萤石回收率虽已从不到 30% 提高至 65% 以上，但仍有进一步提升空间。大量尾矿堆存不仅造成资源浪费，还带来高昂的尾矿库建设和维护成本，每吨精矿对应的尾矿处理成本已逾 10 万元[46]。近年来，尾矿中石英等非金属矿物回收技术持续进步，某钨浮选尾矿经磁选除铁 - 浮选脱铝硅 - 再磨解离后，可获得 SiO_2 品位 99.50% 的石英精矿，使尾矿资源化利用进入高值化阶段。据测算，仅萤石回收一项，若将柿竹园尾矿伴生萤石回收率再提高 10 个百分点，每年可多回收萤石精矿约 50 万吨，新增经济效益数亿元，尾砂排放量亦可同步减少 30% 以上。

5.4. 生态修复历史欠账与环保约束趋紧

湘南地区的部分老矿山已经历了数十年乃至上百年的开采历程，历史遗留下来的生态欠账问题颇为突出。瑶岗仙历经百年开采所造成的生态创伤，需要投入长期、持续且大规模的资源来进行修复。伴随国家对于绿色矿山建设要求的持续提高、“双碳”战略的深入推进，矿山企业面临着经济效益与生态保护这两方面的双重压力。怎样在保障矿产资源供给的情况下，最大程度地降低生态扰动，达成“边开采、边治理、边复绿”的目标，这是所有矿山企业都必须回应的时代命题[47]。

6. 对策建议与发展趋势

6.1. 加大选矿技术创新力度

矽卡岩型白钨矿浮选分离存在难题。要进一步加强矿物界面化学基础研究，深入了解白钨矿与含钙脉石表面性质差异，从而研创新型绿色高效浮选药剂，减少含钙脉石干扰。还要加大常温浮选、柱机联合工艺等成熟技术推广应用力度，通过技术改造提高微细粒级白钨矿回收效率。并且要推动产学研加强合作，把柿竹园、新田岭等大型矿山当作技术孵化平台，加快实验室成果转化为工业化应用进程。

6.2. 推动全产业链整合升级

参考汝城县钨产业链项目所取得的成功经验，促使产业链从中游的采选环节，朝着 APT、氧化钨、钨粉、碳化钨、硬质合金等中下游领域不断延伸拓展，以此提高产品所蕴含的附加价值。助力中钨高新等大型企业集团借助资源整合的方式，进一步施展规模效应、协同优势，全力建立形成采选 - 冶炼 - 加

工-贸易一体化的钨产业集群。并且,充分借助政策调整的有利时机,汝城县已率先把钨等有色金属加工业从负面清单的“禁止类”调整至“准入清单”,加快钨精深加工、高端材料制造项目的落地进程,推动产业链向着价值链的高端位置实现跃升[48]。

6.3. 强化尾矿资源综合回收

将伴生萤石的高效回收当作突破口,去研发耐低温的萤石捕收剂、脉石分步抑制技术,以此打破传统钨浮选药剂制度对萤石回收产生的抑制作用,进而提高浮钨尾矿中有价组分的综合回收率。还要积极探索“磁选预富集-重选-浮选”这种联合工艺,降低尾矿处理成本,达成尾矿的减量化与资源化。另外,要建立尾矿资源属性评价模式,针对历史堆存尾矿进行“二次资源”可利用性评估,从而为尾矿资源化利用提供科学依据。

6.4. 持续推进绿色矿山建设与智能升级

推广新田岭“阶段深孔空场+嗣后充填”这种采矿方法、“边开采、边治理、边复绿”的生态修复模式,这样做在保障开采效率的时候能够最大程度降低生态扰动。加快智能化矿山建设的速度,把柿竹园“采矿远程遥控、选矿全流程自动化”的智能化运营经验推广到其他矿山去,凭借技术进步推动减员增效、本质安全水平的提高。进一步完善矿山全生命周期生态管理模式,对开采、治理、修复、利用各个环节进行统筹规划,实现经济效益与生态效益的统一[49]。

6.5. 发展趋势展望

展望未来,湘南白钨矿的开发利用会展现出以下趋势。其一,会从高品位朝着低品位转变,并且从单一钨向多金属综合回收发展,低品位矿石的高效利用、多金属的协同回收将会成为矿山企业的核心竞争力所在。其二,智能化选矿、数字化矿山建设的进程会加快,以柿竹园万吨技改项目作为标志,湘南钨矿将迈入大规模、智能化且绿色化开发的新阶段。其三,钨产业会持续朝着精深加工、新材料领域延伸,高端硬质合金、光伏钨丝、航空航天钨材等新兴应用会成为产业增长的重要推动力量。其四,在全球钨供应链安全越来越受到重视的背景下,湘南作为中国钨资源核心基地的战略地位会进一步突显,在保障国家战略性关键矿产资源安全方面会发挥更重要的作用。

7. 结论

(1) 湘南地区白钨矿资源储量丰富,矿床类型多样,其中矽卡岩型占绝对主体,同时发育云英岩型、石英脉型、风化残坡积型等多种矿化类型。该区域资源呈现出“矽卡岩型主导、多金属共伴生普遍、规模大但品位低、深边部找矿潜力较好”的共性特征。这一资源禀赋组合具有内在的因果逻辑:矽卡岩型主导直接导致了含钙脉石与白钨矿浮选分离的技术难题;多金属共伴生既提升了综合回收价值,也造成了选矿流程的复杂化;大规模低品位则对选矿成本控制和回收率指标提出了更高的经济与技术要求。因此,湘南白钨矿的开发利用本质上是在特定资源特征约束下,通过技术进步不断突破分离瓶颈、降低单位成本的过程。

(2) 湘南白钨矿以柿竹园、新田岭、瑶岗仙为典型代表,在采选技术上有很大发展。“柿竹园法”让钨回收率从26.8%提高到70%以上,常温浮选与柱机联合工艺切实降低了能源消耗,磨矿工艺的优化达成了节能降耗的目标。产业组织呈现出以中国五矿/中钨高新为首的高度集中格局,产业链从采选朝着精深加工延伸的趋势比较明显。绿色矿山建设成果突出,柿竹园、瑶岗仙、新田岭在生态修复、智能化转型方面成为了行业的典范。

(3) 湘南地区白钨矿的开发利用当前面临着诸多挑战。其中包括矿石品位不断下降的情况,含钙脉石

浮选分离存在困难,尾矿综合回收利用不够充分,生态修复方面存在历史遗留问题、产业链附加值面临瓶颈等。在这种状况下,非常需要从技术、产业、生态、管理这四个维度展开协同应对。

(4) 建议在加大选矿技术创新力度方面展开深入探索,推动全产业链整合升级,强化尾矿资源综合回收工作,持续推进绿色矿山与智能矿山建设。要从这些不同方面协同投入力量,促使湘南白钨矿产业达成从依靠资源驱动转变为依靠创新驱动,从初级开发迈向高质量发展的战略转型目标,进而为保障国家钨资源战略安全提供稳固的支撑。

参考文献

- [1] 曾秀颀,周红翠,祝文琪,等. 钨基材料在锂离子电池领域的应用:技术现状与发展展望[J]. 硬质合金, 2025, 42(4): 71-86.
- [2] 王旭,覃文庆,焦芬,等. 中国钨资源储量、钨精矿生产和钨选矿技术综述(英文)[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 2318-2338.
- [3] 王明燕,贾木欣,肖仪武,等. 中国钨矿资源现状及可持续发展对策[J]. 有色金属工程, 2014, 4(2): 76-80.
- [4] 余金杰,杨郢城,陈其慎,等. 中国钨矿的矿床类型划分、空间分布和开发利用现状[J]. 地球学报, 2025, 46(5): 945-953.
- [5] 卢友月,付建明,程顺波,等. 南岭成矿带钨锡矿找矿远景区划分[J]. 矿物学报, 2015(S1): 907.
- [6] 张怡军,黄光华,尚立晓,等. 湘南地区钨矿成矿地质特征[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 246-255.
- [7] 卢友月,付建明,黎传标,等. 湘南桂汝地区青石岭和大岭背钨矿成矿时代及其找矿指示意义[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(1): 14-23.
- [8] 夏杰,卢友月,付建明,等. 南岭湘南吴家坪锡矿成岩成矿时代研究[J]. 地质通报, 2024, 43(4): 572-581.
- [9] 郁凡. 湘南地区矽卡岩型钨锡矿床石榴子石成分特征及其地质意义[D]: [硕士学位论文]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
- [10] 任雯琪. 湘南红旗岭 Sn-W 多金属矿床成矿流体演化特征及意义[D]: [硕士学位论文]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
- [11] 蒋华. 湘南燕山期铜钨锡复合成矿机制研究[D]: [博士学位论文]. 长沙:中南大学, 2025.
- [12] 侯茂松,田旭峰,何战胜,等. 湖南郴州水源山矿区风化残坡积粘土型钨矿地质特征及成因[J]. 华南地质与矿产, 2015, 31(2): 176-181.
- [13] 黎原,肖颖斌,严富贵,等. 湖南省汝城县大岭背矿区钨矿矿床地质特征及找矿前景[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(3): 305-310.
- [14] 王超,李志敏. 湖南新田岭钨矿床白钨矿矿物学特征及其地质意义[J]. 中国钨业, 2023, 38(6): 1-10.
- [15] 马丽. 湖南郴州新田岭钨矿床矿石矿物相学及流体包裹体特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都:成都理工大学, 2023.
- [16] 祝新友,王艳丽,程细音,等. 湖南瑶岗仙石英脉型钨矿床成矿系统[J]. 矿床地质, 2015, 34(5): 874-894.
- [17] 章荣清. 湘南含钨和含锡花岗岩成因及成矿作用:以王仙岭和新田岭为例[D]: [博士学位论文]. 南京:南京大学, 2015.
- [18] 李陈浩,赵正,陈振宇,等. 湖南柿竹园矿田柴山石英脉型钨矿体的发现及其深部勘查指示[J]. 矿床地质, 2024, 43(3): 599-612.
- [19] 吴根耀,关静. 《地球科学大辞典》出版[J]. 地质科学, 2006(4): 710+719.
- [20] 陈应华. 南岭中段新田岭矽卡岩型钨矿床成矿流体演化和成矿机制研究[D]: [博士学位论文]. 北京:中国科学院大学, 2022.
- [21] 中国钨业协会. 中国钨工业发展规划(2016-2020年)[J]. 中国钨业, 2017, 32(1): 9-15.
- [22] 唐卫国,李剑,韩巧玲. 重视矿区矿产资源整合中的资源储量估算——以郴州市北湖区新田岭钨矿区资源整合为例[J]. 国土资源导刊, 2008(4): 70-74.
- [23] 殷顺生,王昌烈. 郴县新田岭钨矿床地质特征[J]. 湖南地质, 1994(4): 205-211.
- [24] 徐克勤. 湘南钨铁锰矿床中矽卡岩型钨矿的发现,并论两类矿床在成因上的关系[J]. 地质学报, 1957(2): 3-126.

- [25] 范仕清, 谭俊峰, 钟久祥, 等. 杨林坳钨矿磨矿优化试验研究及其工业应用[J]. 中国钨业, 2023, 38(6): 24-31.
- [26] 黄善坤. 湖南省衡南县杨林坳矿区地质特征及边深部找矿的几点思考[J]. 世界有色金属, 2019(12): 179-180.
- [27] 余浔, 冯裕果. 低品位复杂黑白钨矿选矿关键技术与装备研究[J]. 中国钨业, 2023, 38(3): 29-38.
- [28] 祝新友, 王艳丽, 王京彬, 等. 南岭地区石英脉型黑钨矿与矽卡岩型白钨矿矿床成因关系探讨[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 367-369.
- [29] 李博. 湘南新田岭白钨矿床中白钨矿和石榴子石成分特征及其对钨成矿过程的指示[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2023.
- [30] 梁恩云. 湘南铜山岭-都庞岭地区钨锡铜多金属矿床成矿机制研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [31] 陈克锋, 邓海波. 钨矿选-冶联合工艺在柿竹园多金属矿应用探讨[J]. 中国钨业, 2013, 28(2): 27-30.
- [32] 姚子云, 崔璐, 李劲峰. 一年暴涨 600%: 钨价飙升背后的供需变局[N]. 经济参考报, 2026-03-19(004).
- [33] 綦晓芹. 让文化建设成为全民的福音[N]. 社会科学报, 2011-11-24(006).
- [34] 吴孔逸, 曾小波, 何雪梅, 等. 湖南钨矿资源开发利用水平分析[J]. 矿产综合利用, 2021(3): 127-131.
- [35] 张文兰, 王汝成, 雷泽恒, 等. 湘南彭公庙加里东期含白钨矿细晶岩脉的发现[J]. 科学通报, 2011, 56(18): 1448-1454.
- [36] 孙传尧, 程新朝, 李长根. 钨铋钼萤石复杂多金属矿综合选矿新技术——柿竹园法[J]. 中国钨业, 2004(5): 13-19.
- [37] 乔小虎, 吕良, 岳铁兵, 等. 浮选-焙烧磁选工艺回收豫西某金尾矿中的钨[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 88-92.
- [38] 杨杰, 易爱君, 范阿永, 等. 湖南某白钨矿常温浮选工艺研究与应用[J]. 有色矿冶, 2024, 40(3): 18-22.
- [39] 艾光华, 刘炯天, 曹亦俊, 等. 旋流-静态微泡浮选柱强化回收微细粒黑钨矿[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 3983-3990.
- [40] Nava, J.V., Coello-Velázquez, A.L. and Menéndez-Aguado, J.M. (2021) Grinding Kinetics Study of Tungsten Ore. *Metals*, **11**, Article 71. <https://doi.org/10.3390/met11010071>
- [41] Zhang, Y.J., Huang, G.H., Shang, L.X., et al. (2014) Geological Characteristics of Tungsten Deposits in Southern Hunan. *Geology in China*, **41**, 246-255.
- [42] 高洁, 周举军, 李桂芳, 等. 抗多元重金属植物的有效筛选及生态修复研究——以湖南柿竹园有色金属矿区为例[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 90-92+242.
- [43] 李宇峰, 曹凌川. 压实生态责任擦亮绿色铭牌——新田岭钨业绿色矿山建设纪实[J]. 中国有色金属, 2026(3): 50-52.
- [44] 肖礼菁. 钨矿资源综合回收工艺的技术经济评价研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [45] 高玉德. 我国钨矿资源特点及选矿工艺研究进展[J]. 中国钨业, 2016, 31(5): 35-39.
- [46] 刘万秀. 金属矿尾矿的综合利用研究进展[J]. 中国金属通报, 2025(9): 11-13.
- [47] 沙迎华, 沙珉, 吴师金, 等. “双碳”背景下江西某白钨矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(4): 86-93+128.
- [48] 徐一鸣. 钨价持续走高产业链上下游企业积极应对[N]. 证券日报, 2025-07-26(B02).
- [49] 孟凡, 赵震宇. 我国非金属矿绿色矿山建设概况[J]. 石材, 2023(6): 7-9+150.