

攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用及其低碳发展意义

冀成庆, 杨耀辉, 徐璐, 陈超, 赵开乐, 李超, 严伟平

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。以攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源为研究对象, 阐述了其综合利用路径及其低碳发展意义。硫是攀西钒钛磁铁矿典型的伴生元素之一, 也是双碳时代粮食-资源-能源的新兴产业链端口元素。本文基于攀西钒钛磁铁矿伴生资源禀赋条件、硫矿物赋存状态, 分析伴生硫资源的现状和特点, 以钒钛磁铁矿采选产业链探讨硫在综合利用过程可能产生的环境影响。从矿产品需求和综合利用成熟度风险评价两方面探讨综合利用潜力分析。在伴生硫资源面临绿色低碳发展挑战的情况下, 本文从规划顶层设计、技术攻关、产线推广等三方面, 提出综合利用建议, 旨在促进以绿色低碳的原则指导硫产业的发展, 重点推广通过源头选硫产线介入方式进行降碳减污。本文研究能为钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用、环境规划及低碳发展提供新的思路及具体建议。

关键词: 矿业工程; 攀西; 钒钛磁铁矿; 伴生; 硫资源; 综合利用; 低碳发展

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.003

中图分类号: TD989;X753 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0019-08

硫资源作为矿产资源的重要组成部分, 在传统农业、现代制造业以及新能源、新材料、新技术等高新领域均发挥不可替代的作用, 逐步成为双碳时代粮食-资源-能源的新兴产业链关键性原材料。硫是攀西钒钛磁铁矿中常见的伴生元素, 目前相关研究主要集中在选钛回收硫方面, 关于钒钛磁铁矿伴生硫综合利用结合产业链分析的研究较少。因此, 针对攀枝花钒钛磁铁矿伴生硫资源的现状和特征, 并结合伴生硫矿物综合利用前景分析, 探讨伴生硫资源的低碳发展措施, 对于支撑攀枝花钒钛磁铁矿开发响应双碳发展战略具有较为重要的意义。

1 攀枝花钒钛磁铁矿伴生硫资源现状

1.1 资源禀赋条件

攀西地区钒钛磁铁矿远景储量达 100 亿 t 以上, 不仅是重要的铁矿资源, 也是钒、钛、铬资

源的主要载体, 是钢铁、钒钛等金属的重要原料, 而且伴生可观的硫化物、铂族元素、稀土元素和分散元素等, 其中钴金属资源量约 90 余万 t。攀西钒钛磁铁矿以含铁、钒、钛、铬等重要金属为主, 攀枝花矿区、白马矿区、太和矿区、红格矿区四个矿区主要金属元素含量差异较大, 均富含硫、钴、镍、镓、钨、铌、钽、铂族、铜、锰等多种有用元素。攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源概略统计显示, 硫铁矿(以硫计)储量为 6000~8000 余万 t, 钴矿储量为约 90 余万 t, 镍矿储量为大于 90 余万 t, 硫铁矿及伴生硫化矿物如钴镍等有色金属资源储量均达到了大型规模。目前攀西地区只有铁、钒、钛等氧化矿物得到了较好的利用, 其他伴生硫资源尚处于初级开发阶段^[1-3]。四川攀西钒钛磁铁矿开发利用“三率”指标要求(试行)明确提出, “矿山企业必须对硫化物进行综合利用。新建或改扩建矿山要在开发利用方案中明

收稿日期: 2023-05-24

基金项目: 自然资源部人才项目基金(12110600000180039-2208); 中国地质调查局地质大调查项目(DD20230039); 国家自然科学基金战略性矿产资源开发利用专项(2021YFC2900800)

作者简介: 冀成庆(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产综合利用开发相关工作。

通信作者: 杨耀辉(1985-), 男, 研究员, 主要从事矿产综合利用技术研发与应用推广相关工作。

确硫化物综合利用的具体要求。”

1.2 硫矿物赋存状态

攀西钒钛磁铁矿载硫矿物矿床与浅成镁铁—超镁铁质有关的铜-镍-铂族元素成矿亚系统相关，其分布于前震旦系至二叠系中。这类岩体与铜、镍、铂族硫化物成矿关系密切，矿床主要产于岩

体底部或内外接触带中。从矿体埋藏深度看，硫含量从上到深部里增加趋势，随着开采深度的增加，硫化矿物含量逐渐增高，硫化矿物对矿产综合过程中的经济、生态、环境的影响更为显著^[2,4-6]。攀西钒钛磁铁矿钴、镍、铜、硫含量参见表 1。矿石钴品位均达到了伴生钴矿的边界品位要求。

表 1 攀西钒钛磁铁矿伴生中钴、镍、铜、硫的含量
Table 1 Associated cobalt, nickel, copper and sulfur content of Panxi vanadium titanium magnetite

伴生元素种类及含量/%	攀枝花矿区	白马矿区	太和矿区	红格矿区
TFe	33.88~23.65	22.62~22.47	28.30	31.72~26.51
Co	0.02~0.013	0.014~0.012	0.014~0.022	0.026~0.015
Ni	0.023~0.011	0.022~0.019	0.008	0.070~0.048
Cu	0.020~0.016	0.032~0.027	0.011	0.035~0.024
S	0.19~1.36	0.31~0.98	0.4~1.33	0.12~0.67

不同矿区综合样主要硫化物类别含量表参见表 2。硫以硫化物的形式存在硫化物在攀西钒钛磁铁矿中的含量约占 1.6%~2.0%。大多数硫矿物不规则浸染状分布于铁、钛氧化物与硅酸盐矿物颗粒间，少数呈乳滴状或不规则状分布于钛磁铁矿和钛铁矿物内，呈细脉状沿裂隙穿插于钛磁铁矿与钛铁矿物中。硫化物种类繁多^[6-8]，包括少量砷化

物和铋化物在内共计 33 种。不同种类矿物量差别很大，其中主要的矿物为磁黄铁矿和黄铁矿，含量占硫化物总量 90% 以上。金属矿物比较常见的有黄铜矿、镍黄铁矿-钴镍黄铁矿、紫硫镍矿-钴紫硫镍矿，微量的有辉钴矿-镍辉钴矿、硫钴矿-硫镍钴矿、针镍矿马基洛矿、哈帕来矿、墨铜矿、方黄铜矿等。

表 2 不同矿区综合样主要硫化物类别含量
Table 2 Content of main sulfide categories in comprehensive samples from different mining areas

矿区	矿段	矿石类型	矿石中硫化物含量/%	硫化物各类矿物含量/%			
				磁黄铁矿	黄铁矿	黄铜矿	其他硫化物
攀枝花	兰家火山	辉长岩	1.62	87.51	11.74	0.67	0.17
	朱家包包	辉长岩	1.50	91.86	3.64		
	尖包包	辉长岩	1.50				
白马	岌岌坪	橄榄辉长岩	1.14~1.45	87.66	5.96	6.38	
	田家村	橄榄辉长岩	1.54~1.76	90.01	6.64	3.35	
太和		辉长岩	1.12	24.00	75.00	1.00	
		辉长岩	1.70	21.18	78.14	0.54	0.14
红格	北矿区	辉石岩	1.27	79.91	17.18	2.51	0.40
		橄榄岩	1.67	77.66	11.92	6.99	3.43
		辉长岩	1.44	32.17	65.43	2.19	0.21
	南矿区	辉石岩	1.30	67.99	26.45	3.61	1.95
	橄榄岩	1.60	90.06	3.61	2.68	3.65	

硫化物主要呈他形晶粒状或集合体分布于脉石矿物间隙或铁、钛氧化物与脉石矿物接触处，接触界线平坦光滑，粒度较粗，少数呈不规则粒状、乳滴状，包于钛磁铁矿、钛铁矿物中，或呈半自形晶粒、板条状、针状、羽毛状分布于脉石矿物中，粒度中等偏细，一般为 0.025~0.06 mm，

细的小于 0.002 mm。攀西四大矿区硫化物的分布特征参见图 1，硫化物在钛磁铁矿、钛铁矿物、脉石均有分布，其中脉石矿物中分布最多^[6-8]。各矿区矿石中的硫化物分布很分散，其中有 60.85%~77.58% 嵌布于脉石中，足见硫化物回收利用的困难。

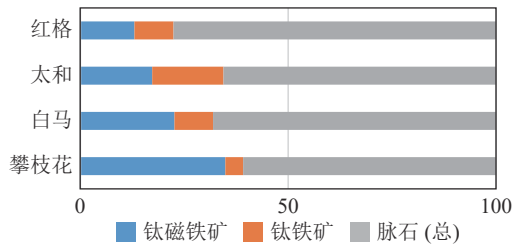


图1 各矿区硫化物的分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of sulfides in various mining areas

2 伴生硫资源环境影响分析

攀西地区的硫、钴资源部分以磁黄铁矿等硫化物形式赋存，随着钒钛磁铁矿采选产业链进行迁移，见图2。

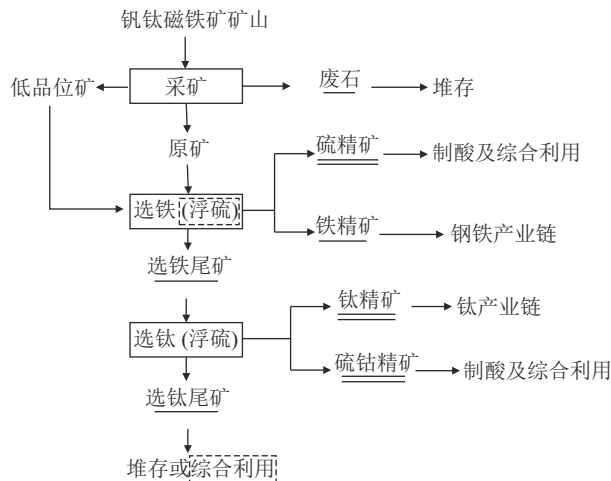


图2 钒钛磁铁矿采选产业链（注：虚线框内表示尚未实现产业化）

Fig.2 Vanadium titanium magnetite mining industry chain

在钒钛磁铁矿的选别过程中部分硫钴资源在选铁作业可以实现综合回收得到硫钴精矿。攀钢集团、龙佰集团均在此工序中开展了钛矿伴生硫资源浮选回收，得到了硫钴精矿产品。攀西钒钛磁铁矿硫钴精矿企业标准参见表3。

表3 攀西硫钴精矿主要企业标准/%
Table 3 Main enterprise standards for Panxi cobalt concentrate

	S	Co	Fe	Cu	Ni	标准名称
攀钢矿业企业标准	≥30.0	≥0.25	≥48.0			
龙佰攀枝花基地企业标准一	≥28.0	≥0.3				SGJK 0.3
龙佰攀枝花基地企业标准二	≥30.0	≥0.5		≥0.8	≥1.2	SGJK 0.5

部分硫、钴资源会富集到钒钛铁精矿。这类含有硫、钴的钒钛铁精矿因其硫含量较高，在烧

结过程中会产生SO₂气体^[9]，直接排放会造成大气污染或通过石灰脱硫也会带来石膏等固体废弃物堆存等问题。据调研，攀西钒钛磁铁矿硫含量（以S计算）高达0.7%以上，（国内其他普通铁矿中硫含量仅在0.1%左右，部分进口矿的硫含量仅为0.03%左右。）其中烧烟烟气中SO₂含量最高时达9000 mg/m³，是进口矿的近10倍。高浓度烧烟烟气脱硫技术难度大，高炉冶炼渣量大，综合利用难度大，尤其在超低排放要求增加巨额环保投资。目前攀钢吨钢环保运行成本较国内平均水平高60元以上，其中每吨烧烟矿脱硫成本平均达到20元以上（国内平均为5元左右），此部分费用已经与选硫作业成本接近或超出。另一方面攀西钒钛铁精矿与普通铁矿相比硫含量高、铁品位低，铁矿石冶炼难度大。铁精矿经过高温冶炼后，铁水中的硫含量仍然是普通铁水的两到三倍，不仅耗费脱硫剂，对原材料中钒和铁的损耗也是极大，且需要增加大量的磁选设备以增加钒铁物料的回收效率。

进入尾矿中的硫元素对水资源的安全有着重要的影响。首先，硫元素在矿业开发过程中会导致水体污染，如硫化物的排放会对水体的生物多样性造成损害，并且会影响到水质。其次，硫元素还会影响水资源的可持续发展，如硫化物的排放会导致水体酸化，从而影响水资源的可持续发展。此外，硫化物排放也会影响水体的水质，从而影响水资源的安全。攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中主要金属元素淋滤浸出行为研究结果表明低pH值条件能促使尾矿中的大部分金属溶出^[10]。研究结果表明：钒钛磁铁矿的铁尾矿中Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti和Zn等金属元素的浸出浓度受到浸提液酸性强度的影响。酸度越大，金属离子浸出的数量逐步增加，在pH=2酸性条件下各金属分别达到极大溶出浓度，Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti和Zn等金属元素的浓度分别为0.06161 mg/L、0.02721 mg/L、0.06245 mg/L、11.01267 mg/L、0.18061 mg/L、0.01710 mg/L和0.22507 mg/L^[8]。随着尾矿中硫含量的降低，尾矿吸氧酸化的趋势亦随之降低，足见伴生硫矿物综合利用可从源头上大幅降低含硫尾矿次生酸性矿山废水的潜在威胁。

3 伴生硫资源低碳综合利用可行性分析

硫是钢铁冶炼产品的有害元素之一，也是有

色金属的重要载体，通常需要采取多种工艺措施预先脱除。我国不少铁矿石都伴生有害硫组份，如湖北大冶、南京梅山及海南昌江铁矿等矿山。铁矿石高硫脱除可采用焙烧脱硫或选矿脱硫，这两种工艺对伴生硫都可以脱除，但其经济效益、环境效益及资源效益差异较大，其中梅山钢铁多年的实践表明，铁矿石伴生硫综合利用与加工分为烧结脱硫排空阶段、选矿脱硫回收硫精矿阶段和硫精矿深加工增值阶段。（1）烧结脱硫排空阶段：通过烧结过程中的高温燃烧将硫元素转化为气态硫化物，然后通过烟气排放进一步处理。这种方法会造成严重的空气污染。（2）选矿脱硫回收硫精矿阶段：使用磁选-浮选等选矿技术对铁矿石进行脱硫处理，通过物理和化学方法分离硫化物，将硫精矿回收。减少硫元素的排放，综合利用回收硫资源。（3）硫精矿深加工增值阶段：对硫精矿进行浮选、冶炼、氧化等处理，将其转化为具有更高附加值的产品，如硫酸、硫酸钴、硫酸镍、铂族金属等，提高资源利用率和经济效益。选矿脱硫可以更好的改善经济效益、环境效益及资源效益，为攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用提供了良好的指导实践参考。

钒钛磁铁矿脱硫是一种矿冶工业常见的工艺过程，采用煅烧脱硫、选矿脱硫、生物脱硫等多种方式用于去除矿石中的硫化物，以减少对环境的污染和改善冶炼过程。不同工艺技术路线脱硫

过程的能耗和 CO₂ 排放量是与所采用的技术密切相关的。在双碳要求越来越高的形式下，选择更加节能和低碳环保的脱硫技术路线组合可以减少能源消耗和 CO₂ 排放，有利于可持续发展和环境保护。目前我国选矿脱硫主要采用浮选法对伴生硫矿物进行回收，但由于两个方面的原因，造成企业回收硫的经济效益甚微。一是原矿中硫品位较低；二是由于伴生硫矿物价值相对较低。硫在选矿脱硫流程中的价值流向分布参见图 3。目前钒钛磁铁矿伴生硫资源回收一方面注重矿产开发利用产生的经济效益，另一方面开始聚焦矿产综合利用衍生的低碳环保效益。以攀西钒钛磁铁矿为例，参照国家标准 GB21256-2013《粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额》提及烧结原料中钒钛磁铁矿氧量每加 1%，烧结工序能耗限定值在能耗定额的基础上增加 0.15 kgce/t。按钒钛铁精矿硫含量（以 S 计算）高达 0.7% 以上，通过选矿脱硫每降低 0.1% 品位 S，钒钛铁精矿烧结工序可减排 CO₂ 0.04155 kg/t。降低到常规铁矿石硫品位，烧结工序可减排 CO₂ 0.25 kg/t。通过选矿物理脱硫+煅烧氧化脱硫两种组合方式对钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用，可实现矿产品的提质增效并获得良好的节能降碳效益。随着深部矿石开发利用规模的增加以及高精度选硫产线的推广，钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用呈现出的绿色经济效益愈加显著。

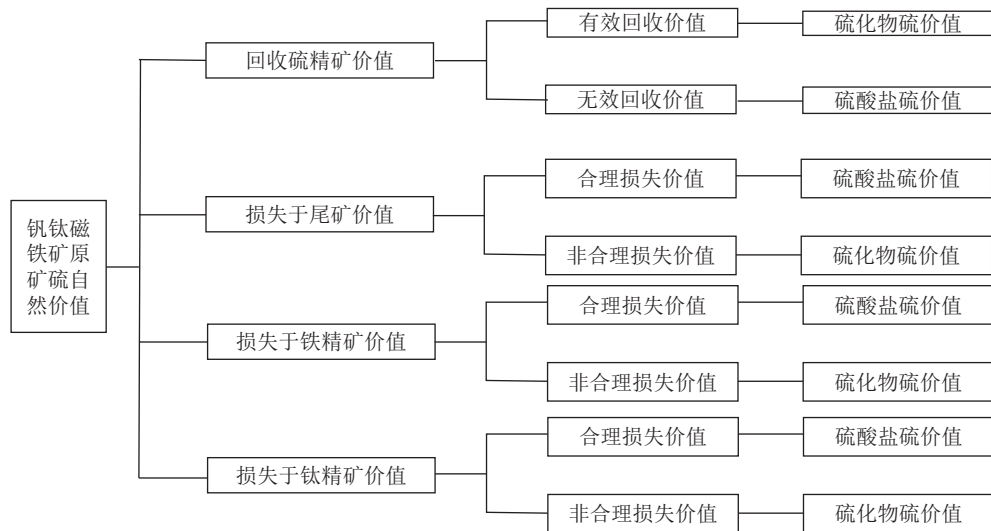


图 3 硫在选矿脱硫流程中的价值流向分布

Fig.3 Distribution of value flow direction of sulfur in mineral processing desulfurization process

目前攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用尚处于产业化开发初级阶段，在发展过程中存在一些问题。一是钒钛磁铁矿生产企业对伴生硫资源

综合利用的经济和低碳价值普遍认识不足，各矿山采选综合利用产业发展不平衡；二是伴生硫资源综合利用利用率偏低，缺乏可持续的综合利用技术

支撑体系；三是政策支持力度不够，尚无明晰的产业专项相关规划进行指导。

4 伴生硫资源低碳综合利用潜力分析

在双碳形势下，钒钛磁铁矿伴生硫资源的综合利用具有重要的低碳发展意义。以下是该方面的主要论述：

(1) 低碳能源转型：钒钛磁铁矿伴生硫资源的综合利用可以为攀西矿业基地低碳能源转型做出贡献。硫资源可以用于生产硫酸和镍钴硫酸盐等化学品，进而用于制造新能源技术中的电池和储能设备，推动清洁能源的发展和应用。通过综合利用硫资源，另一方面可以减少火法冶金过程中高碳能源的消耗。

(2) 资源高效综合利用：综合利用钒钛磁铁矿伴生硫资源有助于实现资源的高效利用。通过开发和利用硫资源，大幅减少了钒钛磁铁矿矿山的开采作业和磨矿作业能耗，可以实现钴、镍、铜、铂族金属等稀有金属资源的节约与综合利用。

(3) 环境保护与减排：通过综合利用硫资源，可以有效减少二氧化硫以及二氧化碳的排

放，降低钢铁冶金的脱硫负荷和投资运营成本，并将其转化为有用的化学品和能源产品，实现环境友好型利用。

(4) 创新和产业发展：综合利用硫资源该领域的研究和技术创新将推动新材料、新能源和新技术的发展，带动相关综合利用产业链的形成和发展。通过培育硫资源综合利用产业，可以促进综合利用技术进步、提高产业核心竞争力，实现经济发展与低碳发展的良性循环。

综上，加强钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用的产业化研究与工程化实践，围绕硫产业链发展，加快“建链补链延链强链”开发，对于推动低碳发展、促进攀西区域绿色经济和实现可持续发展具有重要意义。

硫产业链作为化工行业中最基础的环节，面临着复杂多变的运行环境。后疫情时代，攀西地区攀钢集团、龙佰集团、川发龙蟒等企业“硫磷铁钛锂钙”循环经济全产业链成长迅速，同时新能源行业的发展带动硫需求持续增加，作为原材料的硫资源综合利用行业面临着新的机遇^[11-15]。钒钛磁铁矿产业链（见图4）增加新的驱动力。

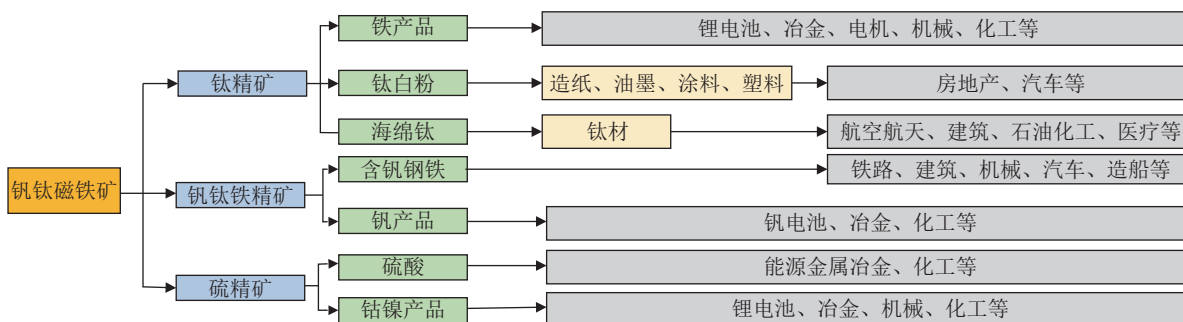


图4 钒钛磁铁矿产业链分析
Fig.4 Analysis of vanadium titanium magnetite industry chain

钒钛磁铁矿载硫矿物富含钴镍铂族金属，其综合利用产出的矿产品目前处于长期收益窗口期。钴镍以及贵金属铂族金属是重要的新能源金属，对外依存度均超过40%。在国内资源远远不能满足的情况下，我国新能源金属资源对外依存度逐年攀升，钴镍铂族金属相关矿产品的价格相较疫情前出现了倍增式跃升。在“双碳”目标的带动下，新能源产业将快速发展，矿产资源需求、矿生产方式将发生结构性变化。结合对资本市场的历时性回顾，伴随着国际政治经济格局的深度变化，地缘政治因素或将从供给端对有色金属的生产、运输等造成扰动，基于气候变化的绿色

转型将从需求端赋予能源金属等成长属性，叠加宏观经济周期性波动，有色金属供需关系的复杂性大概率将上升，镍钴铂族等有色金属价格波动率或将加大，头部上市公司并购项目或将更加频繁，这些都将是给市场投资者带来潜在机会。

钒钛磁铁矿伴生资源量大、储量大的硫元素，双碳形势下综合利用产业化技术基础逐步成熟。后疫情时代，已逐步具备回收钴、镍、铜、硫资源的产业化技术，并不断进行技术创新，提高硫精矿中钴、镍、铜、硫的回收率。随着近年来选矿药剂、技术、设备的发展，硫钴精矿的回收率已进一步提高，将显著提升钒钛磁铁矿中

钴、镍、铜、硫的资源综合利用水平。

钒钛磁铁矿伴生硫矿产综合利用规模化生产实施设备技术升级加速。伴生硫矿产综合利用选矿工艺已较成熟，一般以浮选法为主^[6,16-17]。近年来浮选设备发展趋势加速，为规模化生产实施伴生硫矿产综合利用形成落地机遇。一方面是浮选设备的大型化成熟，目前选矿厂日处理量的增大，单槽容积大于 100 m³ 的浮选设备已经大量进入工业应用，国内最大规格的浮选机容积达 320 m³，也是当今世界上用于工业生产的最大容积的浮选机。一方面是浮选设备的节能降耗显著。通过叶轮结构设计和外加充气等方式，使浮选的效率提高，同时降低浮选机的电耗和减少了浮选机部件

的磨损。一方面是高精度浮选设备的多样化创新迭代。粗粒、细粒浮选设备均得到快速的发展，随着复合力场的引入，大大增强了浮选机对不同可浮性矿物浮选的适应性。

结合攀西钒钛磁铁矿资源综合利用水平技术评估论证的资料调研，参照原材料制造业制造成熟度评价指南 T/GITIF 010-2022，对钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用成熟度进行了风险评价，参见表 4。结果表明。钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用工业基础与制造、设计、技术成熟度、工艺、物料、设备设施、制造人员、制造管理、质量管理、成本与资金等要素基本齐全，目前基本具备了钒钛磁铁矿产业化回收硫资源的低碳发展条件。

表 4 钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用成熟度风险评价

Table 4 Maturity risk assessment for comprehensive utilization of associated sulfur resources of vanadium titanium magnetite

评价指标		等级			
大类	小类	完全满足	大部分满足	一般满足	不满足
A—工业基础与制造	A.1—工业基础		√		
	A.2—制造技术体系		√		
B—设计	B.1—生产性		√		
	B.2—设计成熟度		√		
C—技术成熟度	C.1—技术成熟度			√	
D—工艺	D.1—工艺建模仿真			√	
	D.2—工艺成熟度		√		
	D.3—合格率与生产率			√	
E—物料	E.1—物料成熟度	√			
	E.2—物料可获取性	√			
	E.3—供应链管理			√	
	E.4—特殊物料的处理			√	
F—设备设施	F.1—制造设备		√		
	F.2—生产设施		√		
G—制造人员	G.1—制造人员			√	
H—制造管理	H.1—制造计划与进度安排			√	
	H.2—物料准备计划		√		
I—质量管理	I.1—过程质量管理			√	
	I.2—产品质量管理			√	
	I.3—供应商产品质量/质量管理			√	
J—成本与资金	J.1—成本模型			√	
	J.2—成本分析			√	
	J.3—制造投资预算				√

5 对策建议

(1) 加强攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源节约与综合利用顶层设计。规划顶层设计的层次要求要把绿色发展融入到攀西钒钛磁铁矿综合利用方案的制订过程中，细化硫资源相关的产业链图、技术路线图、应用领域图、区域分布图和重点企业清单、重点项目清单、重点集群清单、问题清单

和政策清单，明确各细分领域重点发展方向。制订综合利用创新路线图，出台指导性文件鼓励硫综合利用矿化一体开发，优化主要矿山资源节约与综合利用产业布局，系统制订钒钛磁铁矿伴生硫矿产综合利用发展规划。增加钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用政策支持力度，推进伴生硫矿产综合利用与工业减碳管理挂钩。

(2) 加强对攀西钒钛磁铁矿硫资源综合利用产线技术攻关, 从矿产采选冶综合利用全过程, 把握各个环节, 统筹兼顾, 提高伴生硫等稀有金属资源综合利用的整体水平。技术攻关部门加快推动新技术与新工艺研究, 完善绿色发展的理论和实践机制, 针对硫、钴、镍、铜等硫化物组分, 要尽可能的提高回收率, 针对其他暂难利用但有一定潜力的元素如铂族元素等, 应有计划的将部分成矿特性优于其他部位的进行有组织的堆排, 并留下相应的记录; 选矿工艺流程中, 对具有富集伴生元素的流程点进行重点监控管理, 必要时将已有富集的流程产物进行有计划的堆存; 同时加强尾矿指标的检测, 尾矿库有组织的堆存, 对堆存的尾矿中的伴生元素含量定期进行相应的记录; 在冶炼、深加工过程中, 对加工工艺的物料走向, 加工介质中是否有伴生元素富集进行检测, 有计划的管理。开发出钒钛磁铁矿伴生硫资源与综合利用工艺、技术、装备等认定与应用指南, 推广综合利用技术与装备切入攀西钒钛综合利用产业链中。

(3) 推广通过源头选硫产线介入方式支撑钒钛磁铁矿综合利用企业节能降碳减污。钒钛磁铁矿开发过程中, 需重点评估并制定减少酸性岩石排水生成的方法。针对可能出现酸性岩石排水和硫化钴镍矿物资源量大的矿区, 鼓励矿山企业对伴生硫资源开采回采率、选矿回收率、共伴生矿产综合利用等“三率”进行工业化挖潜, 达到降本增效兼顾缓解矿山安全环保方面压力的目标。伴生硫资源的综合利用可借助新兴产业链的重塑, 建造新的加工企业和科学产业园等, 助力新能源发展。

参考文献:

[1] 中国地质科学院矿产综合利用研究所. 攀西钒钛磁铁矿资源及综合利用技术 [M]. 冶金工业出版社, 2015.
Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. Panxi vanadium titanium magnetite resources and comprehensive utilization technology [M]. Metallurgical Industry Press, 2015.

[2] 刘亚川, 丁其光, 徐明. 攀西钒钛磁铁矿共伴生资源及利用 [M]. 冶金工业出版社, 2014.
LIU Y C, DING Q G, XU M. Co associated resources and utilization of Panxi vanadium titanium magnetite [M]. Metallurgical Industry Press, 2014.

[3] 朱昌洛. 我国钒资源的开发利用现状及前景 [J]. 矿产综

合利用, 1991(4):32-35.

ZHU C L. Current situation and prospects of the development and utilization of vanadium resources in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1991(4):32-35.

[4] 惠博, 杨耀辉. 攀西红格矿区橄辉岩型钒钛磁铁矿矿石性质研究及对选矿工艺的影响 [J]. 矿产综合利用, 2020(4): 126-129.

HUI B, YANG Y H. Properties of olive-pyroxene vanadium-titanium magnetite ore in Hongge mining area of Panxi research and influence on Mineral Processing Technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):126-129.

[5] 胡厚勤. 攀枝花钒钛磁铁矿中硫化物的工艺矿物学研究 [J]. 钢铁钒钛, 2015(5):57-62.

HU H Q. Study on process mineralogy of sulfides in Panzhihua vanadium titanium magnetite[J]. Steel, Vanadium and Titanium, 2015(5):57-62.

[6] 曾钦林, 谢应龙. 浅析钒钛铁精矿中硫的来源与影响 [J]. 攀钢技术, 1997(5):46-47+58.

ZENG Q L, XIE Y L. Analysis of the source and influence of sulfur in vanadium titanium iron concentrate[J]. Pangang Technology, 1997(5):46-47+58.

[7] 薛忠言, 曾令熙, 刘应冬. 太和钒钛磁铁矿中硫化物的工艺矿物学研究 [J]. 矿产综合利用, 2019(3):78-81.

XUE Z Y, ZENG L X, LIU Y D. Process mineralogy of the sulfide in the Taihe vanadium titanomagnetite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):78-81.

[8] 李潇雨, 周满庚, 王婧, 等. 攀西钒钛磁铁矿硫族元素工艺矿物学研究 [J]. 中国矿业, 2016(1):118-124,134.

LI X Y, ZHOU M G, WANG J, et al. Research on mineralogy of sulfur group element process of Panxi vanadium titanium magnetite[J]. China Mining, 2016(1):118-124,134.

[9] 郝建璋, 曾冠武. 钒钛磁铁矿铁、钒、钛一步分离试验 [J]. 矿产综合利用, 2020(6):73-78.

HAO J Z, ZENG G W. New technique for the separation of iron, vanadium and titanium in vanadium titanium magnetite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):73-78.

[10] 刘应冬, 徐力, 王先达, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中主要金属元素淋滤浸出行为研究 [J]. 矿产综合利用, 2020(6):84-90.

LIU Y D, XU L, WANG X D, et al. Study on leaching behavior of main metal elements from Panzhihua vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):84-90.

[11] 汤铁. 攀枝花钒钛磁铁矿综合利用研究及未来发展方向 [J]. 攀枝花科技与信息, 2016(3):1-5.

TANG T. Panzhihua vanadium titanium magnetite comprehensive utilization research and future development direction[J]. Panzhihua Science and Technology and

Information, 2016(3):1-5.

[12] 赵国君, 申文金, 赵祺彬, 等. 攀西红格矿区钒钛磁铁矿开发利用探讨[J]. 中国国土资源经济, 2018(10):36-38+73.

ZHAO G J, SHEN W J, ZHAO Q B, et al. Discussion on the development and utilization of vanadium titanium magnetite in Panxi Hongge mining area[J]. China Land Resources Economy, 2018(10):36-38+73.

[13] 杨保祥, 伍良英. 国内外钴生产—消费—营销趋势及攀枝花硫钴精矿的综合利用[J]. 攀钢技术, 1998(3):23.

YANG B X, WU L Y. Trends in cobalt production, consumption, and marketing at home and abroad and the comprehensive utilization of Panzhihua cobalt concentrate[J]. Pangang Technology, 1998(3):23.

[14] 严伟平, 曾小波. 攀西地区钒钛磁铁矿资源开发利用水平评估方法研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):79-83.

YAN W P, ZENG X B. Study on the evaluation method of development and utilization level of vanadium-titanium magnetite mine in Panxi district[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):79-83.

[15] 陈燃, 唐中相, 李发斌. 攀西地区主要矿区钒钛磁铁矿“三率”指标现状及影响因素分析[J]. 西部探矿工程, 2019(10):159-164.

CHEN R, TANG Z X, LI F B. Analysis on the status quo and influencing factors of the "three rates" index of vanadium titanium magnetite in the main mining areas in Panxi area[J]. Western Exploration Project, 2019(10):159-164.

[16] 吴宁. 攀西某钒钛磁铁矿浮选脱硫实验[J]. 矿产综合利用, 2022(3):126-131.

WU N. Experimental study on the flotation desulfurization of vanadium titanium magnetite concentrate in Panxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3):126-131.

[17] 李城, 王伟之. 钒钛磁铁矿中钛的柱机联合全浮工艺试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(3):40-43.

LI C, WANG W Z. Experimental research on column-cell integration full flotation technology of titanium in vanadium titanium magnetite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):40-43.

Comprehensive Utilization of Associated Sulfur Resources of Panxi Vanadium Titanium Magnetite and Its Significance for Low-Carbon Development

Ji Chengqing, Yang Yaohui, Xu Lu, Chen Chao, Zhao Kaile, Li Chao, Yan Weiping
(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mining engineering, which takes Panxi vanadium-titanium magnetite associated sulfur resources as the research object, and expounds its comprehensive utilization path and its low-carbon development significance. Sulfur is one of the typical associated elements of Panxi vanadium-titanium magnetite, and it is also a port element of the emerging industrial chain of food-resource-energy in the double carbon era. Based on the endowment conditions of Panxi vanadium-titanium-magnetite associated resources and the occurrence status of sulfur minerals, this paper analyzes the current situation and characteristics of associated sulfur resources, and uses the mining and dressing industry chain of vanadium-titanium magnetite to discuss the possible environmental impact of sulfur in the process of comprehensive utilization. The comprehensive utilization potential analysis is discussed from two aspects of mineral product demand and comprehensive utilization maturity risk assessment. Under the circumstances that associated sulfur resources are facing the challenge of green and low-carbon development, this paper puts forward comprehensive utilization suggestions from the three aspects of planning top-level design, technical research, and production line promotion, aiming to promote the development of the sulfur industry guided by the principle of green and low-carbon, Focus on promoting carbon reduction and pollution reduction through source sulfur selection production line intervention. The research in this paper can provide new ideas and specific suggestions for the comprehensive utilization of sulfur resources associated with vanadium-titanium magnetite, environmental planning and low-carbon development.

Keywords: Mining engineering; Panxi; Vanadium titanium magnetite; Associated; Sulfur resources; Comprehensive utilization; Low-carbon development