doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.025

含锡铁矿中铁锡分离技术国内外研究现状

邵晓琪[1,2,3],赵 冰[1,2,3],靳建平[1,2,3],高 鹏[1,2,3],袁 帅[1,2,3],谭秀民[4]

(1. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628;
2. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819;
3. 难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心,沈阳 110819;
4. 中国地质科学院 郑州矿产综合利用研究所,郑州 450006)

摘 要:铁矿是我国工业体系重要的战略性矿产资源,也是高炉炼铁的核心原料。内蒙古黄岗、云南蒙自等矿区分布有大量典型的复杂难处理含锡铁矿,锡作为高炉炼铁“五害元素”之一,含量过高会严重损害钢材性能,在炼铁行业内大多限定入炉铁矿石锡品位≤0.08%,因此,实现含锡铁矿铁锡高效分离是该类矿产资源化利用的核心难题。本文系统综述国内外含锡铁矿中铁锡分离技术研究现状,先系统梳理含锡铁矿资源概况,再着重梳理传统工艺、焙烧工艺、选冶联合工艺三个方面的研究进展与技术短板:1)传统工艺操作简单、可实现铁资源初步回收,但对细粒嵌布复杂锡铁矿脱锡效果有限,难以达到工业入炉标准。2)针对含锡铁矿,氯化、还原、硫化三类火法焙烧工艺可实现高效脱锡,其中氯化焙烧因污染等问题难以工业化推广;而还原焙烧和硫化焙烧适合复杂锡铁矿,但高温能耗高、易生成“硬头”(Fe-Sn合金),影响锡的挥发脱除。3)选冶联合工艺结合物理选矿与火法焙烧优势,可同步高效回收铁、锡有价组分,但存在流程复杂、成本偏高的短板。综上所述,现有脱锡技术均存在不足,未来需围绕工艺简化、降本降耗、绿色环保等方向优化改进,助力复杂含锡铁矿资源的工业化清洁高效利用。

关键词:含锡铁矿;选矿技术;火法焙烧;选冶联合;研究现状

中图分类号:TD923 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)08-0288-10

Research Status of Iron-Tin Separation Technologies for Tin-Bearing Iron Ore at Domestic and Abroad

Shao Xiaoqi[1,2,3], Zhao Bing[1,2,3], Jin Jianping[1,2,3], Gao Peng[1,2,3], Yuan Shuai[1,2,3], Tan Xiumin[4]

(1. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China;
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. National-Local Joint Engineering Research Center of High-efficiency Development and Utilization Technology for Refractory Iron Ore Resources, Shenyang 110819, China;
4. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Iron ore is a vital strategic mineral resource of China′s industrial system and the key raw material for blast furnace ironmaking. Abundant typical complex refractory tin-bearing iron ores occur in mining areas such as Huanggang in Inner Mongolia and Mengzi in Yunnan Province. As one of the five harmful elements for blast furnace ironmaking, excessive tin content will drastically deteriorate steel properties. The tin grade of blast furnace feed ore is generally controlled at no more than 0.08% in the ironmaking industry. Accordingly, efficient separation of iron and tin from tin-bearing iron ores has become the core bottleneck restricting the resource utilization of such deposits. This paper systematically reviewed global research advances in iron-tin separation technologies for tin-bearing iron ores. It first outlined the general resource situation of tin-bearing iron ores, then elaborated on the research

收稿日期:2026-06-10
基金项目:深地国家科技重大专项项目(2024ZD1004001)
作者简介:邵晓琪(2002—),女,山东临沂人,硕士,主要研究复杂难选矿产资源高效开发与利用。
通信作者:赵 冰(1990—),女,辽宁沈阳人,博士,副教授,主要从事大宗固废无害化资源化处理以及复杂难选矿产资源高效开发与利用、绿色浮选药剂开发与利用研究。

progress and technical limitations of three technical routes, namely traditional mineral processing processes, roasting processes, and combined mineral processing-metallurgy processes: 1) Traditional processes feature simple operation and can realize preliminary recovery of iron resources. Nevertheless, they deliver poor tin removal performance for complex tin-bearing iron ores with finely disseminated minerals and cannot meet industrial feeding standards for blast furnaces. 2) Three pyrometallurgical roasting technologies, including chlorination, reduction and sulfidation roasting, can achieve efficient tin removal for tin-bearing iron ores. Among them, chlorination roasting is hard to realize industrial popularization due to severe environmental pollution. Reduction roasting and sulfidation roasting are applicable to complex tin-bearing iron ores, yet they are plagued by high energy consumption at elevated temperatures and the easy generation of hardhead (Fe-Sn alloy), which impedes the volatilization and removal of tin. 3) Combined mineral processing-metallurgy processes integrate the strengths of physical beneficiation and pyrometallurgical roasting, enabling simultaneous and high-efficiency recovery of valuable iron and tin components. However, such technologies are limited by complicated technological flows and high production costs. In summary, all existing tin removal technologies have inherent drawbacks. Future optimization and improvement should focus on process simplification, cost and energy consumption reduction, and environmental friendliness, so as to promote the clean and efficient industrial utilization of complex tin-bearing iron ore resources.

Key words: tin-bearing iron ore; mineral processing technology; pyrometallurgical roasting; combined mineral processing and metallurgy; research status

0　引言

铁矿不仅是钢铁产业的基础，更是整个工业体系不可或缺的组成部分[1]，其开发利用水平直接关系到国家经济发展和产业竞争力[2-3]。美国地质调查局(USGS)2026年[4]最新发布数据显示，全球铁矿石总储量达2 000亿t，整体储量规模可观。我国铁矿资源总量丰富，据《中国矿产资源报告2024》[5]显示，截至2023年底，我国铁矿石储量为169.17亿t，但铁矿石贫矿多、含铁品位较低，平均品位仅为34.29%，远低于全球铁矿平均品位48.42%[2,6]，且选冶困难、多金属铁矿杂质多且难处理[3]，具有工业利用价值、特别是符合钢铁冶炼品质要求的优质铁矿石资源相对有限。

铁矿石是高炉炼铁的核心原料，常用的入炉铁矿石类型包括赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)，以及经加工后的人造富矿如烧结矿、球团矿。铁矿石通常需要经过选别工序，以提高含铁量并降低有害元素(如锡、硫、磷)含量。在钢铁工业中，锡一直被作为钢中的有害杂质元素，它影响钢材质量，使钢铁材料产生热脆性、回火脆性[7]、高炉炉壁结瘤[8]，产生裂纹和断裂，影响钢的焊接性能，是钢铁“五害”之一，锡铁矿若不脱锡则不能直接作为高炉炼铁原料使用[9]。GB 50427—2015《高炉炼铁工程设计规范》虽无明确锡限值，但行业通用控制标准：入炉铁矿石中锡品位不高于0.08%，优质钢材更要求低至0.03%以下。因此，实现此类含锡铁矿铁锡高效分离是其资源化利用的核心难题。

本文主要介绍含锡铁矿资源概况，从选矿工艺、焙烧工艺、选冶联合工艺等几个方面对锡铁矿脱锡的国内外研究现状进行总结。

1　含锡铁矿资源概况

含锡铁矿(铁锡矿)是铁、锡元素密切共生的复杂难处理金属矿，工业上多指锡石-磁铁矿型矿石，其核心特点见表1。表1从矿物组成、化学组成、锡的主要赋存物相、结构构造、地质构造五个方面展开介绍，锡铁矿主要特点是微细粒嵌布、共伴生关系复杂、选冶分离难度大[10]。含锡铁矿主要分布在中国、缅甸、俄罗斯、澳大利亚及巴西等国，集中在环太平洋构造域的四大锡铁成矿带内[11]，全球储量约占铁矿的5%～8%，折算矿石量约80亿～130亿t[4]。

我国典型锡铁矿矿区有内蒙古黄岗、云南蒙自、广东连平等地区[12]。针对国内原生锡铁矿的工艺矿物学研究表明(见表2)，国内不同锡矿产地锡赋存物相差异极大。云南、江西、湖南矿区锡绝大多数以解离锡石存在，物理分选具备一定可行性；而浙江铜山、内蒙古黄岗矿区的锡以非锡石相的含锡矿物存在，包括铁氧化矿中的晶格锡、硅酸盐相中锡、胶态锡相等，无法通过磨矿实现解离，单纯重选、磁选、浮选均难以将铁精矿锡降至0.08%以内，必须搭配火法焙烧工艺辅助脱锡[13]。

表1 锡铁矿特点[10,14-16]

Table 1 Characteristics of tin-bearing iron ore[10,14-16]

锡铁矿	主要特点
矿物组成	金属矿物：铁主要为磁铁矿(Fe_3O_4)，次为赤铁矿(Fe_2O_3)、褐铁矿($2Fe_2O_3\cdot H_2O$)；锡几乎全为锡石(SnO_2)，微量黝锡矿 脉石矿物：石英(SiO_2)、萤石(CaF_2)、方解石($CaCO_3$)、透辉石($CaMgSi_2O_6$)等
化学组成	元素品位：TFe 30%～55%，Sn 0.2%～1.2%
锡的主要赋存物相	主要以微细粒锡石形式赋存，部分锡还以非锡石相的含锡矿物存在，包括铁氧化矿中的晶格锡、硅酸盐相中锡、胶态锡相等
结构构造	微细粒嵌布结构：锡石多为2～9 μm微细粒，紧密嵌布于磁铁矿晶粒内部或粒间，占锡金属量56%以上，单体解离度仅20%～30%，极难分离。 包含结构：锡石微晶被磁铁矿完全包裹，常规磨矿无法解离 构造类型：块状构造(致密磁铁矿-锡石集合体)、浸染状构造(锡石稀疏散布于磁铁矿或脉石中)、条带状构造(铁、锡矿物与脉石互层)
地质构造	以夕卡岩型(内蒙古黄岗)为主，次为热液脉型、斑岩型，形成于花岗岩类岩浆期后高温热液接触交代环境

表2 国内典型锡矿产地原生锡矿中锡的物相分析[17-21]

Table 2 Phase analysis of tin in primary tin ores from typical domestic tin deposits[17-21]

地区	锡含量/%	锡石相占有率/%	非锡石相占有率/%
云南蒙自	1.35	80.49	19.51
江西德安	0.56	82.14	17.86
广东连平	0.49	81.67	18.33
浙江铜山	0.24	21.95	78.05
内蒙古黄岗	0.18	61.11	38.89
湖南郴州	0.15	82.76	17.24

2 选矿工艺

传统选矿工艺是建立在不同矿物单体解离的基础上，根据铁锡矿物之间物理性质、表面物理化学性质的差异实现分选回收[22]，主要选别方法有重选、浮选及联合工艺等。传统选矿工艺操作简单、可实现铁资源初步回收，但对细粒嵌布复杂锡铁矿脱锡效果有限，难以达到工业入炉标准。

2.1 重选

重选是利用显著的密度差，已知锡石的密度(约7.0 g/cm^3)远高于常见的铁矿物(约5.0 g/cm^3)，这是重选分离的物理基础。重选工艺具有流程结构简单、设备投资与运行成本低、绿色环保等突出优势，适合锡石嵌布粒度较粗、矿物组成简单的含锡铁矿预处理作业。

王普蓉等[23]以云南昌宁低品位、高泥、含铁难选锡石矿(锡品位0.166%，铁品位4.47%)为研究对象。研究经螺旋溜槽预先抛尾—溜槽精矿摇床分选的单一重选流程，最终获得锡精矿品位为22.82%、回收率为48.86%的指标。在原有流程中增设弱磁除铁作业后，锡精矿品位、回收率分别显著提高至51.96%，86.44%。上述结果说明采用单一重选工艺处理此类资源难以获得理想回收效果[22,24]，在复杂难处理含锡铁矿处理中通常作为前序流程使用。

未来可依托重选绿色低成本优势，构建磁选—多级重选、重选—浮选、选冶联合工艺流程，兼顾经济效益与分选指标。

2.2 浮选

2.2.1 浮选工艺

含锡铁矿浮选是基于铁、锡矿物表面特性差异，利用专属捕收剂、抑制剂等浮选药剂，实现铁、锡矿物有效分离。现有关于含锡铁矿浮选分离的研究以浮锡抑铁(锡石正浮选)为主，主要原因是磁铁矿等铁矿物可借助磁选等工艺实现铁矿物富集，后续仅需要对高铁低锡的含锡铁精矿进行浮选脱锡，实现除杂。

杨波等[25]为回收云南某含锡多金属铁矿尾矿中的有价元素Sn进行浮选试验，采用“优先脱泥—浮硫—微细粒锡石浮选”联合工艺开展闭路试验，最终获得Sn品位为3.86%，回收率54.61%的锡精矿，这说明锡石浮选对预处理环节依赖性较强，需先消除细泥与硫化杂质对锡石浮选的负面影响后，再开展微细粒锡石富集浮选。

铁、锡矿物常规浮选工艺仅适用于低铁伴生锡矿提质分选，但也为锡铁共生矿石采用差异化浮选工艺分别回收铁、锡有价组分提供了实践依据。

2.2.2 浮选药剂

铁锡浮选分离通常浮锡抑铁，浮选药剂是调控锡、铁矿物与脉石矿物有效分离的关键，从铁矿物抑制剂和锡石捕收剂展开介绍。铁矿物抑制剂可分为有机、无机抑制剂，有机抑制剂常用淀粉、糊精和羧甲基纤维素等[26]。锡石浮选常用捕收剂包括油酸钠($C_{17}H_{33}CO_2Na$)、水杨羟肟酸($C_7H_7NO_3$)、苯乙烯膦酸($C_8H_9O_3P$)等[27]。各类传统与新型捕收剂搭配抑制剂、调整剂，可有效提升铁锡石浮选选择性与回收效率，为铁锡矿物浮选分离的药剂制度优化提供实践经验与数据支撑。

在铁矿物抑制剂中，淀粉及其衍生物应用最为普遍，工业上常用品种包括玉米淀粉、薯类淀粉、大豆淀粉等少数几类。Kar等[28]研究了玉米淀粉、可溶性淀粉、大米淀粉和马铃薯淀粉四种不同类型的淀粉对

赤铁矿阳离子浮选的抑制效果。研究表明，在可溶性淀粉作为抑制剂且捕收剂浓度较高时，可获得铁品位63%～65%，回收率85%～88%的指标，该研究为同类铁矿石浮选提质的药剂体系优化提供了重要的技术参考与理论指导。

在锡石浮选捕收剂中，油酸钠($C_{17}H_{33}CO_2Na$)是一种油酸盐，在弱酸或弱碱性条件下对锡石捕收效果较好[29]，由于传统脂肪酸捕收剂的pH适用区间狭窄且受矿浆环境影响明显，水杨羟肟酸($C_7H_7NO_3$)凭借其强螯合能力，能有效吸附于锡石表面，显著提高其浮选回收率。黄茅山选厂以苯乙烯膦酸($C_8H_9O_3P$)为捕收剂，配合调整剂，构建合理药剂制度回收细粒锡石，机理研究证明，苯乙烯膦酸($C_8H_9O_3P$)与锡石表面的作用主要以化学吸附为主，可以获得锡品位25.00%左右的锡精矿[30-32]，为细粒嵌布型含锡铁矿的铁锡分选提供了成熟可行的药剂技术方案。

结合当前选矿药剂智能化、绿色化、精准化发展趋势，锡铁浮选药剂未来发展方向与应用前景：1)优化各类捕收剂复配制度，依托药剂协同作用降低药剂消耗，实现低成本生产；2)研发生物可降解药剂，替代传统药剂，契合矿山绿色生产要求。

2.3　联合工艺

2.3.1　磁选—重选联合工艺

磁选—重选联合工艺利用磁铁矿强磁性实现铁矿物快速富集，再借助重选回收锡矿物，此工艺能够高效回收矿石中的铁矿物，获得较高回收率。

仇云华[33]针对某难选锡铁矿采用阶段磨矿—磁选—重选试验工艺以回收矿石中的锡、铁矿物，可获得铁精矿品位、回收率分别为60.78%、67.21%的指标，其含锡0.86%，与原矿锡铁矿含锡品位0.882%相比，锡的脱除率仅为26%，锡铁分离效果很差，不能得到合格低锡铁精矿。刘淑贤[20]针对内蒙某锡铁矿(铁品位9.90%、锡品位0.18%)，采用磁—重选工艺，强磁精矿经摇床后将铁品位提高至64.45%，而锡品位仅降低4%，该矿石依靠物理选矿的密度、磁性差异难以实现锡与铁的分离分选。

磁选—重选可实现铁资源的高效回收，但由于锡石与铁矿物嵌布紧密，锡的回收率和品位无法保证，仅能作为预富集工艺，后续可结合超细磨矿、精细重选设备优化提升微细粒锡石回收效果，而将该工艺作为焙烧脱锡的前置预处理工序。

2.3.2　浮选—磁选联合工艺

浮选—磁选联合工艺结合浮选、磁选分选优势，可分步脱除杂质、富集铁矿物与锡石，适配细粒嵌布、组分复杂的铁锡共生矿石，综合分选效果优于单一选矿工艺。

北京矿冶研究总院(现矿冶科技集团有限公司)针对黄岗梁多金属铁矿开展选矿试验研究，采用浮选—磁选流程获得铁精矿产率53.35%，品位69.20%，锡产率1.73%，品位19.40%。采用磁选—浮选流程获得铁精矿产率52.64%，品位68.42%，锡产率2.87%，品位14.89%[12]。在锡回收方面，浮选—磁选流程更有利于提升锡精矿品位，而磁选—浮选流程则更有利于提高锡的综合产率。

杨凯志等[34]针对云南某低品位难选铁锡矿，采用“磁选选铁—浮选脱硫—脱泥预处理—浮选回收锡石”联合工艺流程开展分选试验。全流程试验最终获得铁品位、回收率分别为60.69%、78.63%的磁铁精矿，锡品位、回收率分别为5.92%、31.93%的锡精矿，实现了该铁锡矿资源的综合回收。

整体而言，浮选—磁选联合工艺可显著提升铁锡分选效率与资源综合利用率，但仍局限于物理分选机制，仅能脱除单体解离的锡矿物，对晶格态锡脱除效果有限，难以实现铁精矿深度脱锡，仅可作为预处理提质工艺。

2.3.3　磁选—重选—浮选联合工艺

磁选—重选—浮选联合工艺可充分发挥三种选矿方法的技术优势，弥补单一分选工艺在粒级适配、矿物选择性上的短板，实现铁、锡两种有价组分的综合回收，有效应对矿石嵌布粒度不均匀、共生关系复杂带来的分选难题。

田小松等[35]以缅甸某低品位复杂难选铁锡共生矿为试验对象，构建一套多级联合分选工艺实现铁锡综合回收：首先采用湿式弱磁预选分离铁矿，然后通过“摇床重选—中矿再磨后高梯度强磁选除铁—二次摇床分选”流程富集锡石，最后对锡粗精矿开展浮选脱硫—磁选除铁提纯。最终获得了锡品位、回收率分别为57.96%、69.08%的锡精矿，铁品位、回收率分别为65.21%、48.22%的铁精矿，证明该工艺可高效实现该类型铁锡矿产资源的综合利用。

磁选—重选—浮选联合工艺存在工艺流程冗长、设备配套多、药剂与能耗成本偏高、对矿石泥化程度敏感等短板。未来可通过工艺精简、药剂绿色化、生产智能化升级，进一步拓展磁—重—浮联合工艺在低品位、细粒难选含锡铁矿领域的应用范围。

3　焙烧工艺

传统物理选矿工艺虽在一定程度上能够实现铁

锡分离，但难以将铁锡分离至工业中炼铁所要求的锡含量标准(Sn≤0.08%)[9]。因此，需要辅以选冶联合工艺进一步实现铁锡分离，以满足工业生产需求。当前在含锡铁精矿脱锡与铁锡分离的研究中，火法焙烧工艺拥有物相重构、选择性挥发的技术优势而占据主导地位，主要包括氯化焙烧法、还原焙烧法及硫化焙烧法三大类[36-37]。

3.1 氯化焙烧

氯化焙烧法实现锡、铁分离，主要是在氯化剂与还原剂协同作用下，含锡铁矿中的锡矿物转化为可挥发的氯化锡，以气相形式逸出，铁矿物则留存于焙烧残渣中，以此完成锡与铁的分选。锡石在氯化过程中可能发生的反应如式(1)～(4)[38]所示：

$$SnO_2+CO(g)=SnO(g)+CO_2(g) \quad (1)$$

$$SnO+CO(g)=Sn(g)+CO_2(g) \quad (2)$$

$$SnO(g)+Cl_2(g)=SnCl_2(g)+1/2O_2(g) \quad (3)$$

$$Sn+Cl_2(g)=SnCl_2(g) \quad (4)$$

刘新阳[39]以云南个旧高铁含锡铁精矿(TFe 61.88%、Sn 0.93%)为原料，采用氯化钙为氯化剂开展还原氯化焙烧试验。在焙烧温度为1 000 ℃、氯化钙添加量为5%、石灰用量为2.7%条件下，锡挥发率可达96.88%，试验后锡品位降至0.029%，满足高炉入炉锡杂质控制标准。

氯化挥发过程中生成的氯气及氯化氢气体，因其化学活性较强，对工业设备可造成腐蚀。此外，挥发出来的锡、锌、砷等氯化物在后续分离过程中分离效果不佳，难以实现锡的高效回收[36]。同时，氯化焙烧工艺还存在操作环境恶劣、金属损失率高、能耗较大以及环境污染严重等问题，因此在工业实际生产中尚未得到广泛应用[37]。未来需重点开发可循环低腐蚀氯化剂、烟气资源化回收技术，推动氯化焙烧工艺绿色低碳升级。

3.2 还原焙烧

还原焙烧是应用广泛的火法铁锡分离工艺，该工艺向含锡铁精矿中配加还原剂，高温条件下将锡石(SnO_2)还原为氧化亚锡(SnO)；相较于SnO_2与金属锡(Sn)，SnO高温蒸气压更高，可优先挥发脱除，以此完成铁锡分离[37]。Sn、SnO、SnO_2的饱和蒸气压与温度的关系可由以下经验公式描述，据此可绘制相应的蒸气压-温度曲线(图1)[38]。

$$\lg P(Sn)=-15500/T-\lg T+11.5 \quad (5)$$

$$\lg P(SnO)=-13160/T+10.775 \quad (6)$$

$$\lg P(SnO_2)=-28800/T+16.5 \quad (7)$$

许多研究者对还原挥发工艺处理含锡铁矿进行了

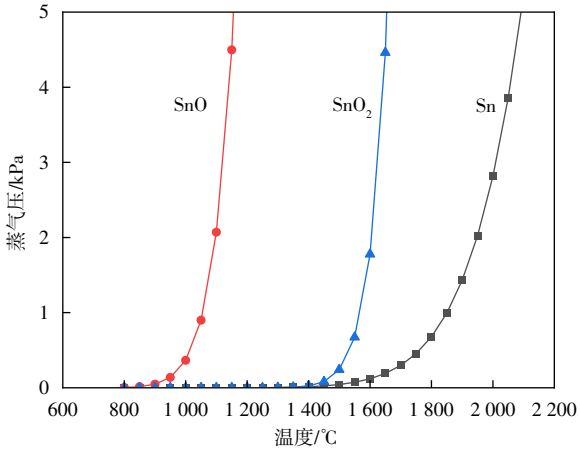


图1 Sn、SnO、SnO_2的蒸气压-温度曲线

Fig. 1 Vapor pressure-temperature curves of Sn, SnO and SnO_2

研究，主要针对含锡铁精矿[39-42]，所用还原剂主要包括焦粉、无烟煤、褐煤、CO/CO_2混合气体等，该工艺以弱还原焙烧为主，可分别制备浮氏体球团与金属化球团，常规工艺参数区间为焙烧温度950～1 040 ℃，焙烧时间30～180 min。无论是实验室规模还是半工业试验，还原挥发法均可取得较好的铁锡分离效果，但存在能耗较高、还原剂消耗量大的问题。

李光辉等[43]通过试验证明：锡的挥发脱除主要集中于弱还原气氛焙烧阶段。以含锡铁精矿(Sn：0.26%；TFe：65.7%)为研究对象进行还原焙烧，在焙烧温度为925～950 ℃、焙烧时间为30 min、CO浓度为40%～50%条件下，最终获得了锡品位、挥发率分别为0.031%、88.88%的良好指标。该研究明确弱还原环境可高效实现铁锡分离，为工业化焙烧气氛调控提供试验依据。

矿物组成对铁矿还原脱锡行为影响显著。有学者研究了不同C/M(锡石/磁铁矿)质量比的样品中磁铁矿对SnO_2相变的影响，结果表明，磁铁矿对SnO_2在$CO-CO_2$气氛下的挥发和物相转变有显著影响，还原过程中易形成Fe-Sn尖晶石，在高温下焙烧促进Fe-Sn尖晶石的形成，不利于Sn的挥发，这阐明了铁锡共生难脱除本质原因，为工艺改性指明了优化方向[44]。Zhang等[45]发现石英对含锡铁精矿在$CO-CO_2$气氛中还原锡的挥发行为有明显影响。随着二氧化硅含量的增加，从含锡铁精矿中脱锡的最佳CO含量和焙烧温度范围会扩大。试验证明含锡铁精矿中的残留石英有助于扩大CO含量和还原温度的操作范围，可依托矿石自身矿物优化生产条件。

还原焙烧技术能够弥补物理选矿难以脱除晶格锡的不足，可为复杂高铁含锡铁矿实现深度脱锡与铁

资源清洁化利用提供可行的技术路径，具备良好的工业化应用潜力与发展前景。

3.3　硫化焙烧

硫化焙烧是铁锡分离领域常用工艺，整个过程包含还原、硫化挥发两个反应阶段。弱还原性气氛可有效促进锡组分挥发脱除，动力学计算结果显示，该挥发过程表观活化能E为13.96 kJ/mol，反应过程受扩散步骤控制[46]。该工艺分选机理为利用铁氧化物与SnS饱和蒸气压的差异，实现锡的选择性挥发分离[36]。但硫化焙烧过程会产生含硫有害硫化物，易引发环境污染问题，这也是制约该工艺工业化推广的核心因素。

王世定[47]以$H_2S(g)$为还原硫化剂开展硫化焙烧试验，在焙烧温度为1 000 ℃、焙烧时间为20 min和混合气氛为60% CO(g)+40% $H_2S(g)$的试验条件下，锡的挥发率可达95.34%。此工艺适合高锡含量铁精矿深度脱锡，但$H_2S(g)$属于有毒腐蚀性气体，污染风险较高。李磊等[16]进行还原—硫化复合焙烧试验，在氮气流量、焙烧温度、焙烧时间、高硫煤添加量分别控制在0.6 L/min、1 273 K、40 min、10%条件下，可将锡铁精矿含锡降至0.043%。该工艺既简化了气氛供给系统，又利用高硫煤降低药剂成本，不足之处在于高硫煤易造成铁精矿硫杂质上升，实际生产中需要兼顾脱锡与控硫双重工艺要求。

Yu等[48]提出了一种以黄铁矿(FeS_2)为还原剂从含锡铁精矿中分离锡并获得合格低硫铁精矿的新方法，结果表明，在CO含量为28.0%、焙烧时间为60 min、焙烧温度为1 473 K、黄铁矿(FeS_2)和锡石(SnO_2)质量配比为9∶1的条件下，含锡铁精矿中锡含量降至0.0028%，脱锡效果极为显著，但需严格控制黄铁矿添加比例，避免铁精矿硫超标。

Yu等[49]发现了石膏废料($CaSO_4\cdot 2H_2O$)中的S在与含锡铁精矿在35% CO和65% CO_2混合气体中焙烧时，最后转化的$SO_2(g)$和$COS(g)$能将Sn(l)硫化为SnS(g)。该工艺实现了石膏废料的循环利用、锡的有效去除以及含锡铁精矿的铁预还原。

未来可重点围绕低成本固体硫化剂复配、低温硫化强化技术开展研究，在保证锡高效挥发脱除的前提下降低焙烧温度与能耗。

4　选冶联合工艺

若常规的重选、浮选、磁选或单一焙烧等工艺难以实现锡铁矿物与脉石矿物的有效分离，采用选冶联合工艺可充分发挥传统工艺与火法焙烧工艺的协同优势，显著提升铁精矿与锡精矿的品位及回收率，成为处理复杂难选含锡铁矿的高效技术途径。

童雄等[50]采用焙烧—凝聚—磁选新工艺，确定最优工艺参数：焙烧温度为898 K、还原剂用量为5%、焙烧时间为40 min、凝聚剂用量为6 kg/t。在该条件下开展试验，获得铁品位为66.58%的铁精矿和锡品位为4.56%的锡精矿。新工艺引入凝聚工艺，促进微细粒锡铁矿物团聚分选，焙烧温度较低、能耗可控，可同步产出合格铁精矿与锡精矿，实现铁锡双向回收；但锡精矿品位偏低，锡富集提质效果有限，凝聚药剂用量较大，增加选矿药剂成本。

Li等[51]提出了一种涉及预浓缩、还原焙烧和磁选的新技术，从含锡尾矿中回收和分离含锡石和含铁矿物，使用新技术处理锡品位为0.14%和铁品位为12.79%的含锡尾矿，获得铁精矿品位61.95%、回收率68.08%，以及锡中矿品位2.93%、回收率70.88%。此工艺适配低品位含锡尾矿，实现尾矿二次资源化利用，提高有价金属综合回收率；但涉及预处理、焙烧、磁选多项工艺，流程繁琐，针对低品位含锡铁矿分选能耗较高。

此类选冶联合工艺分离效果显著，可实现铁锡矿物的高效分离及有价组分的同步回收，但工艺流程相对复杂，存在流程较长、生产成本相对偏高的问题，后续可精简工艺、优化低温焙烧参数，降低药剂及能耗成本，简化作业流程。

5　结论与展望

1）我国锡铁矿产资源储量大、分布广，赋存状态复杂、难处理资源占比高，现阶段整体综合开发利用水平偏低。含锡铁矿高效脱锡与铁锡分离技术攻关，不仅是保障钢铁工业高品质原料供给的迫切需求，也是提升矿产资源利用率的重要途径。

2）现有技术体系中，传统选矿工艺成熟、成本低廉，适用于粗粒嵌布锡铁矿初步分选，但对微细粒、类质同象型锡铁矿分离能力有限，其中浮选药剂正向高选择性、绿色低毒、适配细粒矿物浮选方向发展；氯化、还原、硫化焙烧可实现高效脱锡，但普遍存在能耗高、环保压力大、设备腐蚀严重等短板；选冶联合工艺分选效果最优，但仍存在工艺流程复杂，成本较高等问题，无法进一步工业化推广。

3）在传统选别工艺及现有焙烧技术均难以实现锡铁矿资源经济、高效利用的现实背景下，未来相关研究可重点围绕以下方向开展技术攻关：(1)精简联合分选工艺流程，优化低温焙烧、预选富集等关键工

序参数，从工艺层面降低生产能耗与药剂运维成本；(2)开发绿色高效浮选药剂，在提升铁锡分离选择性的同时减轻环保治理压力；(3)结合矿物赋存特征，针对性抑制“Fe—Sn”尖晶石等难分离物相生成，突破铁锡矿物嵌布紧密的分选瓶颈。通过工艺、药剂、机理多维度协同优化，推动复杂含锡铁矿清洁、高效、规模化开发利用，助力矿产资源绿色低碳发展与我国钢铁工业高质量可持续发展。

参考文献

[1] 于木炎，李磊，桑秀丽，等. 锡铁精矿硫化焙烧反应热力学及铁还原动力学[J]. 材料导报，2015，29(增刊2)：207-212.
Yu Muyan, Li Lei, Sang Xiuli, et al. Thermodynamics of sulfide roasting reaction and iron reduction kinetics of tin iron concentrate[J]. Materials Reports, 2015, 29(S2): 207-212.

[2] 刘航涛，吕振福. 国内外铁矿资源利用状况及发展趋势研究[J]. 中国矿业，2025，34(7)：315-323.
Liu Hangtao, Lü Zhenfu. Utilization status and development trend of iron ore resources at domestic and abroad[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 315-323.

[3] 郑明贵，吴萍，尤碧莹. 中国铁矿资源经济安全评价与预警[J]. 地质通报，2022，41(5)：836-845.
Zheng Minggui, Wu Ping, You Biying. Economic security evaluation and early warning of iron ore resources in China[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5): 836-845.

[4] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2026[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2026.

[5] 《中国矿产资源报告(2024)》发布[J]. 中国有色金属，2024(21)：24.
Release of China Mineral Resources Report(2024)[J]. China Nonferrous Metals, 2024(21): 24.

[6] 吴松涛，薛宇，于新磊. 低品位铁矿资源开发利用保护综合评价：以内蒙古乌拉特前旗低品位铁矿为例[J]. 地质科学，2024，59(3)：841-851.
Wu Songtao, Xue Yu, Yu Xinlei. Comprehensive evaluation of the development, utilization and protection of low-grade iron ore resources: taking low-grade iron ore in Wulate Qianqi, Inner Mongolia as an example[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 2024, 59(3): 841-851.

[7] 韩纪鹏，李阳，姜周华，等. 钢中低熔点元素的危害及含锡钢的发展研究[J]. 钢铁研究学报，2014，26(4)：1-6.
Han Jipeng, Li Yang, Jiang Zhouhua, et al. Harmful effect of low-melting elements and development prospects of tin-containing steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(4): 1-6.

[8] 唐荣，刘广全，伍强. 新钢11号高炉炉身顽固结厚原因分析及控制[J]. 江西冶金，2019，39(3)：20-24.
Tang Rong, Liu Guangquan, Wu Qiang. Analysis on causes and solutions of the accretion-on Xin Steel's No. 11 BF stack[J]. Jiangxi Metallurgy, 2019, 39(3): 20-24.

[9] Zhang Y B, Jiang T, Li G H, et al. Tin and zinc separation from tin, zinc bearing complex iron ores by selective reduction process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2011, 38(8): 613-619.

[10] 牛福生. 某锡铁矿选矿厂选矿工艺优化研究与实践[J]. 中国矿业，2009，18(1)：81-82，94.
Niu Fusheng. Reform and practice of iron and tin concentrator plant mineral processing in Inner Mongolia area[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(1): 81-82, 94.

[11] 张晶，简胜，唐鑫，等. 国外某锡精矿提质工艺研究[J]. 云南冶金，2022，51(1)：48-53.
Zhang Jing, Jian Sheng, Tang Xin, et al. Technical study on quality improvement of one foreign tin concentrate[J]. Yunnan Metallurgy, 2022, 51(1): 48-53.

[12] 内蒙黄岗铁锡钨多金属矿选矿实验报告[R]. 北京：北京矿冶研究总院，2004.
Experimental report on mineral processing of Huanggang iron-tin-tungsten polymetallic ore, Inner Mongolia[R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

[13] 张元波，姜涛，苏子键. 锡铁复合资源活化焙烧原理与综合利用新技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2022.
Zhang Yuanbo, Jiang Tao, Su Zijian. Tin-iron complex resources: activated roasting principles and novel comprehensive utilization techniques[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022.

[14] 周振华. 内蒙古黄岗夕卡岩型锡铁矿床矿物晶体产出特征简介[J]. 宝石和宝石学杂志，2014，16(2)：1-9.
Zhou Zhenhua. Brief introduction of output features of mineral crystals in the Huanggang skarn Sn-Fe deposit, Inner Mongolia[J]. Journal of Gems & Gemmology, 2014, 16(2): 1-9.

[15] 张锦瑞. 某含锡铁矿石选矿试验研究[J]. 中国矿业，2011，20(10)：92-94，112.
Zhang Jinrui. Experimental research on dressing of tin-iron ore[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(10): 92-94, 112.

[16] 李磊，邱在军，王华，等. 锡铁精矿硫化焙烧脱锡[J]. 中国有色金属学报，2014，24(2)：519-527.
Li Lei, Qiu Zaijun, Wang Hua, et al. Removing tin

from tin-bearing iron concentrates with sulfidation roasting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 519-527.

[17] 杨年强. 磁铁矿晶格中Sn^{4+}问题的研究[J]. 矿物岩石, 1982, 2(1): 15-28, 129.
Yang Nianqiang. A study of Sn^{4+} in the lattice of magnetite[J]. Mineralogy and Petrology, 1982, 2(1): 15-28, 129.

[18] 李洁兰. 广东鹿湖嶂锡多金属矿锡的赋存状态及工艺矿物学研究[D]. 长沙：中南大学, 2010.
Li Jielan. Study on the occurrence state and process mineralogy of tin of Luhuzhang tin-polymetallic deposit, Guangdong Province[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[19] 周振华, 刘宏伟, 常帼雄, 等. 内蒙古黄岗锡铁矿床夕卡岩矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(1): 97-112.
Zhou Zhenhua, Liu Hongwei, Chang Guoxiong, et al. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn-Fe deposit of Inner Mongolia and their metallogenic indicating significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(1): 97-112.

[20] 刘淑贤. 内蒙某锡铁矿选矿试验研究[J]. 矿山机械, 2009, 37(7): 101-103.
Liu Shuxian. Experimental research on separation in a certain tin and iron ore in Inner Monggol[J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37(7): 101-103.

[21] 徐阳宝. 锡石多金属硫化矿选矿工艺及机理研究[D]. 长沙：中南大学, 2012.
Xu Yangbao. Mineral processing technology and theory research on tin polymetallic sulfide ore[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[22] Angadi S I, Sreenivas T, Jeon H S, et al. A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices[J]. Minerals Engineering, 2015, 70: 178-200.

[23] 王普蓉, 徐国印, 苏刚. 昌宁含铁低品位高泥锡石矿重-磁选工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2022, 43(1): 136-141.
Wang Purong, Xu Guoyin, Su Gang. Study on gravity and magnetic separation process of an iron-containing low-grade and high slime tin ore in Changning[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022, 43(1): 136-141.

[24] 孙广周, 王德英, 曾茂青. 细粒嵌布难选锡尾矿二次资源综合回收利用[J]. 矿物学报, 2011, 31(增刊1): 728-729.
Sun Guangzhou, Wang Deying, Zeng Maoqing. Comprehensive recovery and utilization of secondary resources of fine-grained disseminated refractory tin tailings[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(S1): 728-729.

[25] 杨波, 王晓, 谢贤, 等. 云南某含锡多金属矿尾矿回收微细粒锡石试验[J]. 矿物学报, 2023, 43(4): 433-440.
Yang Bo, Wang Xiao, Xie Xian, et al. An experimental study on the recovery of the microparticle sized cassiterite from tailings of polymetallic ores in Yunnan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2023, 43(4): 433-440.

[26] 杨诚, 张晨, 李明阳, 等. 有机抑制剂在铁矿石反浮选中的应用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(4): 141-149.
Yang Cheng, Zhang Chen, Li Mingyang, et al. Research development of application of organic depressant in iron ore reverse flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(4): 141-149.

[27] 刘杰, 韩跃新, 朱一民, 等. 细粒锡石选矿技术研究进展及展望[J]. 金属矿山, 2014, 43(10): 76-81.
Liu Jie, Han Yuexin, Zhu Yimin, et al. Research status and prospective on separation technology of fine cassiterite[J]. Metal Mine, 2014, 43(10): 76-81.

[28] Kar B, Sahoo H, Rath S S, et al. Investigations on different starches as depressants for iron ore flotation[J]. Minerals Engineering, 2013, 49: 1-6.

[29] 陈文岳. 细粒锡石的表面特性及其可浮性研究[D]. 沈阳：东北大学, 2014.
Chen Wenyue. Study on surface characteristics and floatability of fine cassiterite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.

[30] 彭蓉, 魏志聪, 曾明, 等. 锡石捕收剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 165-171.
Peng Rong, Wei Zhicong, Zeng Ming, et al. Research development of cassiterite collector[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4): 165-171.

[31] 刘畅, 刘杰, 李艳军, 等. 苯乙烯膦酸对锡石可浮性影响及其作用机理分析[J]. 金属矿山, 2019, 48(2): 106-110.
Liu Chang, Liu Jie, Li Yanjun, et al. Influences of styrene phosphonic acid on the floatability of fine cassiterite and its mechanism[J]. Metal Mine, 2019, 48(2): 106-110.

[32] 王孝愈. 苯乙烯膦酸浮选锡细泥工业试验[J]. 有色金属(选矿部分), 1980(3): 42-44.
Wang Xiaoyu. Industrial test of flotation of tin slime with styrene phosphonic acid[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1980(3): 42-44.

[33] 仇云华. 云锡某难选锡铁矿选矿工艺试验研究[J]. 有色

金属(选矿部分), 2015(1): 31-35.
Qiu Yunhua. Experimental study on separation process of a refractory tin-iron ore from Yunnan Tin Corporation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(1): 31-35.

[34] 杨凯志, 汪泰, 胡真, 等. 云南某低品位难选铁锡矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2021, 50(9): 72-78.
Yang Kaizhi, Wang Tai, Hu Zhen, et al. Experimental study on beneficiation of a low grade refractory iron-tin ore in Yunnan Province[J]. Metal Mine, 2021, 50(9): 72-78.

[35] 田小松, 武立伟, 赵洵, 等. 缅甸某低品位复杂难选铁锡矿石综合回收试验研究[J]. 金属矿山, 2024, 53(4): 135-141.
Tian Xiaosong, Wu Liwei, Zhao Xun, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a low-grade complex refractory iron and tin ore in Myanmar[J]. Metal Mine, 2024, 53(4): 135-141.

[36] 于勇. 含锡铁精矿硫化焙烧分离锡的基础研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
Yu Yong. Basic research on separation of tin from tin-bearing iron concentrate by sulfidation roasting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[37] 刘汉燕. 湿式磁选取代氯化焙烧降锡[J]. 有色金属(选矿部分), 1986(3): 57-58.
Liu Hanyan. Wet magnetic separation replaces chlorination roasting to reduce tin[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1986(3): 57-58.

[38] 李燚, 吕晋芳, 李志远, 等. 复杂难选锡铁矿分离技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(9): 71-78.
Li Yi, Lü Jinfang, Li Zhiyuan, et al. Research progress on separation technology of tin and iron in complex and difficult-dressing ores[J]. Industrial Minerals & Processing, 2024, 53(9): 71-78.

[39] 刘新阳. 高铁含锡矿氯化及还原-硫化焙烧试验研究[J]. 有色设备, 2021, 35(4): 39-42.
Liu Xinyang. Experimental research on chlorination and reduction sulfide roasting of high iron tin ore[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2021, 35(4): 39-42.

[40] 韩桂洪, 张元波, 姜涛, 等. 含锡锌铁精矿链篦机-回转窑法制备炼铁用球团矿的研究[J]. 钢铁, 2009, 44(6): 8-13.
Han Guihong, Zhang Yuanbo, Jiang Tao, et al. Study on preparation of pellets for iron-making from tin, zinc-bearing iron concentrates by grate-kiln process[J]. Iron & Steel, 2009, 44(6): 8-13.

[41] Zhang Yuanbo, Li Guanghui, Jiang T, et al. Reduction behavior of tin-bearing iron concentrate pellets using diverse coals as reducers[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 110/111: 109-116.

[42] Wang Zhenwen, Wang Chengyan, Lu Huimin. Investigation on removal of tin from Sn-bearing iron concentrates by reduction roasting[J]. Min. Metall. 2005, 14, 63-66.

[43] 李光辉, 贾志鹏, 张元波, 等. 含锡铁精矿CO还原分离锡铁的行为研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(4): 83-86.
Li Guanghui, Jia Zhipeng, Zhang Yuanbo, et al. Research on separating tin and iron from tin-bearing iron concentrate by CO reduction[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(4): 83-86.

[44] Su Zijian, Zhang Yuanbo, Liu Bingbing, et al. Reduction behavior of SnO_2 in the tin-bearing iron concentrates under CO-CO_2 atmosphere. Part I: effect of magnetite[J]. Powder Technology, 2016, 292: 251-259.

[45] Zhang Yuanbo, Su Zijian, Liu Bingbing, et al. Reduction behavior of SnO_2 in the tin-bearing iron concentrates under CO-CO_2 atmosphere. Part Ⅱ: effect of quartz[J]. Powder Technology, 2016, 291: 337-343.

[46] 邱在军, 李磊, 王华, 等. 含锡铁精矿硫化焙烧脱锡的反应特征[J]. 过程工程学报, 2012, 12(6): 957-961.
Qiu Zaijun, Li Lei, Wang Hua, et al. Reaction characteristics of removal of tin from tin-bearing iron concentrate by sulfidation roasting[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(6): 957-961.

[47] 王世定. 气相硫化法脱除锡铁精矿中锡的基础研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
Wang Shiding. Basic study on removal of tin from tin concentrate by gas phase vulcanization[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.

[48] Yu Yong, Li Lei, Wang Jiayun, et al. Phase transformation of Sn in tin-bearing iron concentrates by roasting with FeS_2 in CO-CO_2 mixed gases and its effects on Sn separation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 750: 8-16.

[49] Yu Yong, Li Lei. Transformation behaviour of sulfur from gypsum waste ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) while roasting with tin-bearing iron concentrate for tin removal and iron recovery[J]. ISIJ International, 2020, 60(10): 2291-2300.

[50] 童雄, 周永诚, 吕晋芳, 等. 焙烧—凝聚—磁选工艺回收云锡脉锡型尾矿中的锡和铁[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1696-1704.
Tong Xiong, Zhou Yongcheng, Lü Jinfang, et al. Recovering tin and iron from veintin tailings in Yunnan

tin group by roasting-cohesion-magnetic separation technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(7): 1696-1704.

[51] Li Yi, Lü Jinfang, Li Zhiyuan, et al. A novel technology for the recovery and separation of cassiterite-and iron-containing minerals from tin-containing tailing[J]. Minerals, 2024, 14(10): 1058. DOI: 10.3390/min14101058.

（本文编辑 汪东芳）

【缅怀寄语】

孙传尧院士是我国顶尖的矿物加工工程专家，也是东北大学资源与土木工程学院的杰出校友。1968年从东北工学院毕业后，他主动奔赴极寒的可可托海矿区，扎根一线整整十年，将最宝贵的青春奉献给了祖国矿冶事业。

品读先生《足迹与情怀》，我深受触动。青年时期的他从普通选矿工人做起，在零下四十度的艰苦环境下攻坚克难。面对8859选厂低品位锂矿分选难题，他反复调试浮选流程、优化药剂制度，攻克锂精矿不达标、生产滞销的技术难关。筹建8766选矿厂时，他日夜坚守现场、自制试验设备，一心扑在科研生产中。

功成名就后，先生始终心系东大资土学院，常返校讲学、悉心指导后辈，反复告诫我们选矿科研不能只依赖仪器数据，必须扎根现场、立足实践。先生一生知行合一、潜心治学、立德树人。前辈风骨永存，可可托海的奋斗足迹与东大育人初心，将永远勉励我们资土学子脚踏实地、潜心深耕矿冶领域。

——靳建平