doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.013
引用格式：廖文胜，王立民，原渊，杜志明. 原地浸出采铜技术进展及其在我国铜矿开采中的应用分析[J]. 矿冶，2026，35(1)：101-108.
LIAO Wensheng, WANG Limin, YUAN Yuan, DU Zhiming. Progress of in-situ leaching copper mining technology and its application analysis in China[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 101-108.

原地浸出采铜技术进展及其在我国铜矿开采中的应用分析

廖文胜[1,2] 王立民[1,2] 原 渊[1,2] 杜志明[1,2]
（1. 核工业北京化工冶金研究院，北京 101149；
2. 铀资源探采与核遥感全国重点实验室，北京 101149）

摘 要：原地浸出开采技术已成为铀矿开采的主流工艺，并在铜、金、稀土等金属资源开发中逐步推广。本文系统梳理了铜矿原地浸出技术的工业应用现状与研究进展，总结了适宜该工艺的矿床地质与水文地质特征及其基本条件要求。在此基础上，结合我国铜矿资源普遍具有低品位、中小型、氧化矿占比高等特点，分析了原地浸出技术在我国的应用潜力与发展方向，以期为推动我国难处理、难利用铜矿资源的高效绿色开发提供参考。

关键词：原地浸出；铜矿开采；技术进展；矿床特征
中图分类号：TF811；TD862 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)01-0101-08

Progress of in-situ leaching copper mining technology and its application analysis in China

LIAO Wensheng[1,2] WANG Limin[1,2] YUAN Yuan[1,2] DU Zhiming[1,2]
(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China;
2. National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: In-situ leaching technology has become the mainstream process for uranium mining and is gradually being applied to the development of metal resources such as copper, gold, and rare earths. This paper systematically reviews the industrial application status and research progress of in-situ leaching technology for copper ores, summarizing the geological and hydrogeological characteristics of deposits suitable for this process as well as its basic requirements. On this basis, considering the common features of copper resources in China, such as low grade, small to medium scale, and a high proportion of oxidized ores, the application potential and development directions of in-situ leaching technology in China are analyzed. The aim is to provide references for promoting the efficient and environmentally friendly development of refractory and difficult-to-utilize copper resources in China.

Key words: in-situ leaching; copper mining; technological progress; deposit characteristics

原地浸出开采（In-situ Leaching Mining，亦称原地回收，简称地浸开采）是一种在矿石天然赋存条件下，通过溶浸试剂与矿物发生化学反应，选择性浸出矿石中有用组分而不移动矿石的新型开采工艺[1]。该技术集采矿、选矿与冶金于一体，无需进行井巷开拓、矿石运输、选矿破碎及尾矿库建设等工序，具有工艺简单、基建投资少、建设周期短、生产成本低、对地表环境影响小以及本质安全性高等突出优点，已成为全球采矿领域一项重要的创新技术[2-4]。

目前，原地浸出工艺已广泛应用于铀、铜、金、稀土等金属矿床的开采[2-4]。2023年，全球地浸铀产量已占世界天然铀总产量的58.8%，在我国这一比例更是达到90%左右，表明原地浸出已成为天然铀生

收稿日期：2025-8-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52374112)；装备预研项目(32101070301)；中核集团基础研究项目(CNNC-JCYJ-202332)
第一作者：廖文胜，正高级工程师，博士，从事地浸采冶工艺研究。E-mail：liaows@cnmstc.com

产的主导工艺[5]。此外，该工艺也常用于溶盐开采[6]。

铜矿的原地浸出研究与工业实践已有四十余年历史，并已取得部分成功应用案例[3,4]。本文系统回顾了该工艺在铜矿开采中的研究进展与应用现状，并对其工业化应用条件进行分析，以期为铜矿资源的绿色高效开发提供参考依据。

1 铜矿原地浸出的应用与研究进展

1.1 铜矿原地浸出的应用

1.1.1 美国原地浸出采铜

1957年，美国学者首次提出采用原地浸出法开采铀矿的设想，并于1961年在美国Shirley Basin矿山成功开展了酸法原地浸出采铀试验[7]。几乎与美国同步，苏联也展开了相关研究，并于1972年在一个渗透性较好的铀矿床中取得试验成功[8]。基于原地浸出采铀的技术积累，各国相继开展了铜矿原地浸出的研究与工程实践，其中美国的研究最为系统深入。

自20世纪70年代起，美国先后在亚利桑那州的Safford铜矿、Van Dyke铜矿等地进行原地浸出采铜技术的研究与试验，但具体试验结果未公开发表[9]。至80年代后期，美国矿业局系统研究了铜矿原地浸出工艺，并委托科学应用国际公司编制《原地浸出采铜通用设计手册》，为工程设计与成本分析提供了基本原则与工艺参数。随后，矿业局结合露天采坑与井巷工程，在Santa Cruz、Casa Grande和Mineral Park三处大型铜矿开展了原地浸出试验[9-11]。1988年，美国矿业局在Santa Cruz铜矿实施现场试验，采用两组相连的五点型井组布局，周边四口为抽液井，中心为注液井，抽液井间距38.7 m，井深570 m[10]。成井后进行注水、抽水及示踪试验，注液能力达1.45 $L\cdot s^{-1}$，抽液能力为1.51 $L\cdot s^{-1}$，显示该区域渗透性良好[9,10]。浸出液中铜浓度介于0.3~1.8 $g\cdot L^{-1}$[3]。Casa Grande项目在巷道中施工58口钻井，试验结果显示96%的注入液可被回收[10]，浸出液铜浓度第一年为0.89 $g\cdot L^{-1}$，第二年为0.8 $g\cdot L^{-1}$[3]。Mineral Park矿针对辉铜矿进行了深入研究，系统考察了浸出特性与水文地质参数，测定了导水率与渗透率，并通过溴化钾示踪评估有效孔隙度及液流动态。1996年，该矿采用“浅注深抽”模式开展四注四抽现场试验，先后使用10 $g\cdot L^{-1}$和50 $g\cdot L^{-1}$硫酸溶液浸出，历经约4个月注入与5个月抽液，浸出液铜浓度平均最高达0.55 $g\cdot L^{-1}$，取得了良好效果[11]。

除美国矿业局主导的项目外，BHP、Magma等矿业公司也在San Manuel、Globe-Miami、Kimbley、Nacimiento、Florence、Van Dyke和Safford等铜矿开展了多个原地浸出项目。其中，BHP/Magma公司运营的San Manuel铜矿是成功案例之一[12]。该矿自1986年开始尝试原地浸出，初期结合露天采坑进行；1989年转向地面井-井抽注模式，评估地表回收浸出液的可行性；1993—1994年开展地表矿区现场试验。自1995年1月起，约1 000口井投入运行，注入浸出剂平均pH值为1.3；浸出液性质波动较大，pH值范围为1.5~3.5，铜浓度介于0.20~3.0 $g\cdot L^{-1}$。1998年，井距从12.1 m调整至15.2 m。至1999年项目结束时，该矿原地浸出铜的年产能已达18 000 t，14年间累计产铜148万t，铜浸出率约为42%。总体而言，由于流体不饱和、沟流现象及石膏沉淀等因素，浸出效率仍受到一定限制。此外，Van Dyke铜矿在钻井中实施了水力压裂作业，并采用五点型井组开展了浸出试验[3]。

目前，完全采用钻孔原地浸出工艺、未借助巷道或露天坑的铜矿项目仅有Gunnison和Florence两处。这两处矿体的目标层均位于静水位以下，属承压含水层。工程均设计采用五点型井网，中心为注液井，周围布置四口抽液井，使用潜水泵提升，依托注-抽井之间的水力梯度，驱动浸出剂迁移并浸出氧化矿。此外，Van Dyke铜矿也有计划推进原地浸出开采[13]。Gunnison铜矿项目（Excelsior公司）的矿石包含氧化铜与硫化铜，并伴生钼。该项目于2020年1月启动采矿作业，共布设41口抽液井与注液井，并于2020年12月成功产出首批阴极铜（约90 000磅）。预计原地浸出（ISR）工艺的铜回收率为48.4%，平均波及系数为74%[14]。Florence铜矿项目（Taseko公司）建设了生产试验设施（PTF），包含4口注液井、9口抽液井及15口监测井。井场试验于2019年1月启动，同年4月开始生产阴极铜[15]。

铜矿原地浸出工艺流程示意图见图1。

1.1.2 其他国家原地浸出采铜

基于原地浸出采铀的成功经验，尤其是结合露天采坑与井下巷道工程的应用模式，俄罗斯、澳大利亚及中国等国也相继开展了铜矿原地浸出的研究与实践。

澳大利亚曾在Mount Isa矿区附近进行原地浸出试验。Gunpowder铜矿在1989—1996年间采用爆破方式实施原地浸出，由于缺乏稳定隔水层，浸出液存在流失情况，但可被矿区围岩的碱性环境所中和[4]。目前，EnvirCopper公司正在推进Kapunda铜矿的原地浸出前期研究工作[16]。俄罗斯Gumeshevskoye铜

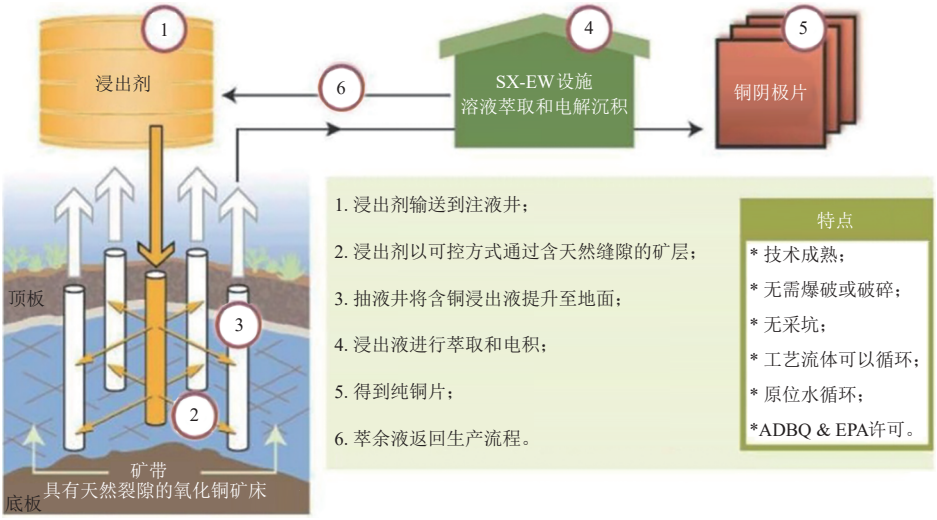


图1　原地浸出采铜工艺示意图（据Gunnison公司流程图改）

Fig. 1　Schematic diagram of in-situ leaching copper (adapted from Gunnison Company's flowchart)

矿于2004年采用原地浸出工艺进行开采[4]，年产铜约5 000 t，浸出液铜浓度为1~4 g·L^{-1}，浸出率达到40%~120%（因部分计算范围外的矿石亦被浸出，导致浸出率超过100%）。

我国也开展了包括原地破碎浸出、巷道钻孔浸出等与原地浸出相关的研究。在“九五”期间，北京矿冶研究总院针对中条山铜矿峪的低品位氧化矿，开展了原地爆破浸出试验，浸出液平均铜浓度为2.189 g·L^{-1}，铜浸出率达77.87%，生产成本约为传统方法的一半[17]。1994年，北京矿冶研究总院在武山铜矿进行了地下钻孔注液、巷道集液的地下溶浸试验，通过钻孔注入浸出剂与矿石反应，并通过集液巷道回收浸出液，取得了铜浸出率68%、浸出液铜含量2.5 g·L^{-1}的成果[18]。同年，长沙矿山研究院与东乡铜矿合作，开展了井下原地破碎浸出试验，收液率达91.73%，铜浸出率为24.04%[19]。

1.2　原地浸出采铜的研究进展

针对原地浸出采铜的技术特点，尤其在渗透性改善与浸出工艺方面，已开展了较多基础性研究。

1.2.1　提高矿床渗透性

受铜矿赋存条件限制，含矿岩层通常透水性与渗透性较差，因此往往需进行增渗改造。目前最常用的增渗方法为水力压裂[20]，通过形成人工裂缝提升岩层的渗流能力。此外，也有研究采用无声破碎剂（SCDA）作为替代压裂手段[21]，该方法可在岩体中产生可控的裂缝网络。与同等规模的水力压裂相比，SCDA形成的裂缝更为密集且分布均匀，有利于流体在矿层中更均匀地运移。其他行业中应用的大功率超声波增渗[22]、CO_2致裂[23]、高能气体压裂[24]、可控冲击波[25]等技术，也为铜矿原地浸出的增渗提供了潜在方向。

1.2.2　新浸出工艺研究

由于地下氧化过程的技术难题，当前铜矿原地浸出主要适用于氧化铜矿。然而，考虑到氧化矿与硫化矿常伴生共存，以及大量低品位硫化铜矿的存在，硫化铜矿的原地浸出已成为研究热点。

1.2.2.1　硫化铜矿的生物浸出

硫化铜矿浸出难度较大，通常需借助高价铁离子实现氧化浸出。与堆浸类似，众多研究关注亚铁离子的生物氧化过程[26]。目前生物浸出工艺主要有两种供氧方式：一种是将含氧浸出液在饱和流动状态下加压注入矿层，利用细菌将亚铁氧化为三价铁。研究表明细菌可耐受数十兆帕的静水压力，即适用于数千米深度的矿床。然而，将氧气加入浸出剂中可能导致气体堵塞，影响渗透性；此外，深部地温升高及地下放热反应也可能抑制细菌活性。另一种方式是在外部生物反应器中利用氧气或空气将亚铁氧化为三价铁，再与浸出液一同泵入矿体，该工艺常被称为间接生物浸出[27]。PATKSTOVAL等[28]针对波兰Rudna铜矿（含石盐和钙质的硫化铜矿）开展了实验室间接生物浸出研究，通过地表铁生物反应器制备三价铁浸出剂，再注入浸出柱。该矿还利用地下岩石生物反应器进行了约1 km深度的现场试验，浸出液最高铜浓度达443 mg·L^{-1}[29]。

1.2.2.2　电动原地浸出（EK-ISL）

电动原地浸出是一种新兴工艺，通过施加低压

直流或交变电场，驱动浸出剂（如氯化铁或硫酸铁）在硫化铜矿石孔隙中迁移，促进硫化铜矿物的溶解。电场可诱导浸出剂发生电渗透与电迁移，增强其在矿层中的均匀分布和离子定向运移速度，从而提高浸出剂与矿物的接触效率，实现金属的高效回收[30,31]。该工艺的优势在于其浸出效果基本不受岩层水力传导率制约，因此对渗透性较低的斑岩铜矿和沉积岩铜矿具有良好适应性。MARTENS等[31]的研究表明，电场可驱动浸出剂在未破裂的致密矿石中迁移，并有效回收铜。在电动原地浸出过程中，铜主要依靠电压梯度迁移，所需浸出剂量显著低于传统方法，这不仅减轻了环境影响，也降低了浸出液中的杂质含量[30]。此外，电场可控制浸出范围，降低浸出剂外泄风险，并有助于加速地下水修复[32]。

实验室规模实验已证实电动原地浸出对斑岩硫化铜矿的适用性。在矿石渗透性极低（渗透率=6.1 mD，孔隙度=10.6%）的条件下，铜回收速率较快（94天内回收率达57%）[31]。ORTEGA-TONG等[33]对电动原位浸出过程中次生浸出产物的形成与演变进行了表征，结果表明多硫化物的持续溶解不断暴露出新的矿物表面，为次生相再溶解创造了条件，从而可进一步提升铜回收率。

2 适宜原地浸出开采的铜矿床特征

原地浸出工艺虽具有成本低、可开发低品位资源的显著优势，但并非适用于所有铜矿床。该工艺对地质与水文地质条件有较为严格的要求，其中水文地质条件是原地浸出区别于其他开采方法的核心特征[3]。

2.1 铜矿原地浸出开采的地质特征

与常规开采或堆浸类似，铜矿原地浸出要求具备经济合理的含矿条件（通常以米百分数或平米矿量表征）；矿石应易于浸出，且脉石矿物对浸出剂的消耗低；同时，有用矿物需均匀分布于孔隙或裂隙表面[2]。

原地浸出对铜矿品位的要求较低（表1）。目前开采品位最低的为Gunnison项目，其平均品位仅为0.29%，边界品位低至0.05%[14]。由于平均品位与边界品位大幅降低，原地浸出工艺相比常规开采可显著提升资源量/储量。然而，该工艺要求矿体具有一定厚度，且含矿层厚度与矿体厚度比值需处于合理范围（表2），一方面可减少浸出剂的稀释效应，另一方面确保钻井单元控制面积内的可采金属量达到经济要求[4]。

在地球化学性质方面，除脉石矿物对浸出剂的总体消耗外，硫化铜矿的含量或所占比例也是一项关键指标。虽然理论上硫化铜矿可通过氧化作用实现溶解开采，但其浸出速率和试剂消耗量仍是实际应用中的难题。迄今为止，已实现规模化原地浸出开采的铜矿仍以氧化矿为主。

目前，美国的原地浸出开采主要应用于风化型斑岩铜矿。这类矿体垂向上常发育规模达数百米至

表1 几个主要的铜矿原地浸出试验矿点地质参数

Table 1 Geological parameters of several major copper in situ leaching tests /%

技术指标	项目名称				
	Sam manuel	Globe-miami	Gunnison	Florence	Van dyke
边界品位	–	–	0.05	0.05	0.05
平均品位	0.52	0.31	0.29	0.33	0.33
浸出率	42	–	48	71	68

表2 地浸开采地质条件评价参数及标准[34]

Table 2 Evaluation parameters and standards for geological conditions of in-situ leaching[34]

序号	评价参数	评价等级		
		有利的	可行的	不利的
1	矿体形态、规模	卷状，层状，规模大	透镜体，狭长条带状，规模小	–
2	含矿层倾角/(°)	≤10	10~30	>30
3	矿体埋深/m	<200	200~500	≥500
4	平米铀量/(kg·m^{-2})	≥5	5~3	粉砂岩、<3砂质泥岩
5	矿石岩性	粗砂岩、中粗砂岩、中粒砂岩、中细粒砂岩	砂砾岩、含砾砂岩、细砂岩	较致密、致密
6	胶结程度	疏松	次疏松	
7	含矿层与矿体厚度比值	≤5	5~10	>10
8	矿石中黏土粉砂质含量/%	<10	10~30	≥30
9	矿石中CO_2含量（对酸法）/%	<0.5	0.5~1	>1
10	矿石中Fe_2S含量（对碱法、中性浸出）/%	<1	1~2	>2
11	铀的存在形式	次生铀矿物，呈分散吸附状态存在的铀	铀的简单氧化物，铀石	钛铀矿等复杂氧化物，含铀矿物

数千米的淋滤带与次生富集带[14,15]。通常，上部铜淋滤带覆盖于以辉铜矿为主的次生富集带之上。在氧化作用下，形成了一套可溶的次生铜矿物组合，包括硅孔雀石、孔雀石、氯铜矿、赤铜矿等[14,15]。斑岩铜矿在全球分布广泛，其矿化裂隙通常密集且均匀，加之风化过程产生的可浸出铜矿物，使其适合采用原地浸出工艺。在溶浸过程中，溶液流经断裂网络，浸出剂得以渗透并溶解裂隙表面的铜矿物，同时降低试剂消耗。岩石裂隙越发育，可供溶解的铜表面积越大，浸出效率也相应提高[11]。

对于沉积岩型铜矿（如砂岩铜矿），矿化一般赋存于具还原性（常富含有机质）的沉积岩层中，由还原物质与氧化性含铜流体反应形成浸染状铜硫化物。此类矿床通常由数米至30 m厚的薄层含硫化物带构成，矿体多呈板状、层状或不规则状，产状以水平或陡倾为主。若铜矿物在原生环境下可被浸出，且铜均匀分布于孔隙或裂隙系统中，亦具备采用原地浸出工艺的潜力。

2.2 铜矿原地浸出开采的水文地质条件

与常规堆浸、就地浸出等工艺相比，原地浸出对水文地质条件有特定要求，主要包括：矿层具备较好的渗透性、存在隔水顶底板、以及具有一定的承压水头，从而能够实现浸出剂在矿层内的饱和流动与有效控制。

首先，矿床需具备良好的渗透性，以确保浸出剂可顺利注入矿层，并能通过抽液井将含金属流体输送至地表处理厂[11]。矿床的渗透性主要取决于天然孔隙和裂隙的发育程度。一般而言，渗透率需达到数百毫达西以上，这就要求岩层具有较发育的连通孔隙或天然裂隙网络。若天然渗透性不足，则需进行人工增渗改造。

SINCLAIR等[3]对多个原地浸出开采矿床或项目的渗透性进行了系统总结，结果显示其差异较大：孔隙度分布范围为3%~21%，渗透系数介于23毫达西（Mineral Park）至6 029毫达西（Kimbley）。以Mineral Park项目为例，尽管其矿床平均渗透系数较低（图2氧化矿带），但在抽注过程中平均抽液速度仍可达3.9 $m^3 \cdot h^{-1}$，能够满足生产要求[11]。隔水顶底板的主要作用是控制地下流体在含矿含水层中的运移范围，从而提高浸出效率、减少浸出剂稀释。隔水层的渗透性应显著低于矿层，且具备一定的力学强度。针对Mineral Park矿床试验，研究人员对自上而下各含水单元与非含水单元的渗透系数进行了测定，结果如图2所示。可见，中细粒层（MFGU）的渗透系数明显低于其他单元，可作为有效的隔水顶板，而硫化矿层则充当隔水底板，从而使浸出作用被有效限制在氧化矿带内。

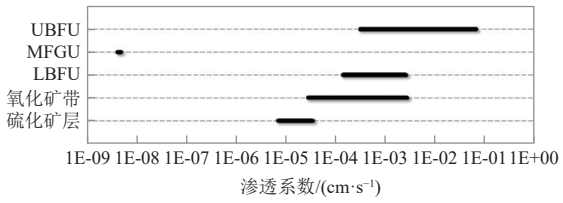


图2 Mineral Park矿从上至下各层渗透系数分布[11]

Fig. 2 Distribution of Hydraulic Conductivity of strata in Mineral Park[11]

在铜矿原地浸出开采过程中，流体运移主要依靠水力梯度进行控制。通过在注液井与抽液井之间形成向内的水力梯度，使注入的浸出剂定向流向目标浸出区，与铜矿物反应后从抽液井抽出。为确保抽液作业正常进行，含矿层需位于静水位以下，并具备一定的承压水头。

相关地质与水文地质条件可参考原地浸出采铀的技术要求（见表2、表3）[34]。然而需指出的是，原地浸出采铀的工艺参数不能直接照搬用于铜矿开采。这是由于铜矿床与砂岩型铀矿在地质结构、水文特

表3 地浸开采水文地质条件评价参数及标准[34]

Table 3 Evaluation parameters and standards for hydrogeological conditions of in-situ leaching[34]

序号	评价参数	评价等级		
		有利的	可行的	不利的
1	单位涌水量/($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	≥0.1	0.05~0.1	<0.05
2	矿层渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	10~2	2~0.5	≥10或<0.5
3	矿层与围岩渗透系数比值	≥1	1~0.75	<0.75
4	含矿层厚度/m	<20	20~50	≥50
5	顶底板隔水层	具有稳定的隔水顶底板	隔水底板稳定，顶板不连续	隔水顶底板缺失或底板不连续
6	水位埋深/m	<50	50~150	≥150
7	地下水中的矿化度/($g \cdot L^{-1}$)	<2	2~5	≥5
8	承压水头高度/m	≥50	50~20	<20

征等方面存在显著差异，必须结合具体矿床条件开展技术经济评价，并进行适应性调整与应用。

3 原地浸出采铜在我国铜矿开采中应用分析

结合我国铜矿资源特点，现对原地浸出工艺在我国铜矿开采中可能的应用前景分析如下。

3.1 低品位氧化铜矿资源的利用

我国铜资源以低品位矿为主，富铜矿（Cu≥1%）占比较低。经过数十年的高强度开采，部分矿山资源储量已显著减少，甚至趋于枯竭[35]。原地浸出工艺在矿体厚度适宜的条件下，可处理平均品位低至约0.2%的矿石[3]。该工艺不仅有利于盘活我国低品位铜矿资源，还能通过降低工业品位要求，显著提升资源量与可采储量。

我国绝大多数铜矿床浅部均发育氧化带，同时分布有相当数量独立的大中型氧化铜矿床[36]。低品位氧化铜矿往往难以通过常规分选方法经济回收，而氧化铜矿的原地浸出技术难度相对较低。因此，发展低品位氧化铜矿原地浸出技术，将成为我国有效利用该类资源的重要方向。

3.2 选择有利的水文地质条件

从国外实践来看，原地浸出工艺可适用于多种铜矿类型，斑岩铜矿与砂岩铜矿均有试验先例。但该工艺对水文地质条件有特定要求，其中较好的地下渗透性和一定的承压水头是实施原地浸出开采的前提条件。值得注意的是，常规露天或井下开采往往期望矿床富水性弱、矿坑涌水量小[37,38]，以降低防治水成本，这与原地浸出对水文条件的需求形成鲜明对比。

对于弱承压或非承压含水条件的矿床，可借鉴原地浸出采铀的经验，采用帷幕注水等方式人工抬升地下水位[39]，创造适宜原地浸出的水文环境。

3.3 优先考虑砂岩型铜矿

砂岩型铜矿在全球及我国均为重要的铜矿类型[40]，是仅次于斑岩型铜矿的第二大铜资源，占比超过20%。由于砂岩型铜矿为层状沉积岩或沉积变质岩，通常具备一定的透水性和较好的富水性，且多具有完整的隔水顶底板。此外，从原地浸出技术发展历程看，目前仅有砂岩型铀矿的原地浸出实现了全面工业化，技术成熟、经验丰富[2]。这些条件使得砂岩型铜矿成为我国开展原地浸出采铜的优先选择。

3.4 中小型矿床的规模化利用

我国铜资源具有中小型矿床多、大型-超大型矿床少的特点，导致矿山生产规模普遍偏小，开采难度大、成本高、资源利用率低。原地浸出工艺在同等采-选-冶条件下通常成本最低，其主要投入集中于钻井与井场建设，地面设施投资相对较小。对于规模较小的矿床，井场规模也可相应缩减，规模效应不显著。因此，该工艺为我国大量中小型、低品位、难选氧化铜矿的开采提供了可行路径，有助于降低成本、提高资源利用效率，并减轻环境扰动[41]。

对于分布零散的小型铜矿床，可借鉴原地浸出采铀中“分散吸附、集中淋洗”的模式[42]，推行“分散萃取、集中电积”的运营方式。即在各分散矿段设置萃取车间，对浸出液进行预浓缩处理，再将富铜液输送至“中心厂”统一进行电积提铜。这种“卫星厂-中心厂”协同模式能够简化流程、提高设备利用率、降低投资，对零星矿体的综合回收具有较好的经济性。

4 结论

原地浸出工艺是一种适用于特定地质与水文地质条件的绿色采矿方法，目前已成功应用于砂岩型铀矿，并在美国多个铜矿项目中实现工业化验证。该工艺通过钻井注抽实现金属原位浸出，具有投资少、环境影响小、可经济开采低品位资源等显著优势。

然而，该技术在铜矿的应用仍面临关键制约：一方面需具备渗透性良好、具承压水头及完整隔水层的矿层条件；另一方面，针对硫化铜矿的浸出效率、试剂消耗及增渗技术等仍需进一步攻关。我国铜矿资源以低品位、中小型氧化矿床为主，且多伴生复杂水文地质特征，因此发展适应我国矿床特点的原地浸出技术，将成为盘活难利用资源、提升资源保障能力的重要方向。未来应加强水文地质评价、增渗工艺、浸出动力学及“分散萃取—集中回收”模式等研究，推动该技术在我国铜矿资源开发中的有序应用。

参考文献

[1] 阙为民，谭亚辉，曾毅君，等. 原地浸出采铀反应动力学和物质运移[M]. 北京：原子能出版社，2002: 1-5.
QUE W M, TAN Y H, ZENG Y J, et al. Geochemical kinetic and mass transport of in-situ uranium leaching[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 1-5.

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Manual of acid in situ leach uranium mining technology (IAEA-TECDOC-1239)[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001: 1-30.

[3] SINCLAIR L, THOMPSON J. In situ leaching of copper:

challenges and future prospects[J]. Hydrometallurgy, 2015, 157: 306-324.

[4] SEREDKIN M, ZABOLOTSKY A, JEFFRESS G. In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 79: 500-514.

[5] IAEA, OECD-NEA. Uranium 2024 resources, production and demand[M]. London: OECD, 2024: 55-71.

[6] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-20.
WANG Q M. Water-soluble mining of salt deposits[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 1-20.

[7] HUFF R V, DAVIDSON D H, BAUGHMAN D, et al. Technology for in situ uranium leaching[J]. Mining Engineering, 1980, 32(2): 163-167.

[8] MUDD G M. Critical review of acid in situ leach uranium mining: 2-Soviet block and Asia[J]. Environmental Geology, 2001, 41(3/4): 404-416.

[9] 陈顺妹. 美国原地浸出采铜技术研究的新进展[J]. 有色矿山, 1992(4): 21-23.
CHEN S M. New progress in the research of in-situ leaching copper technology in the United States[J]. Nonferrous Mines, 1992(4): 21-23.

[10] 梁德辉. 美国矿务局原地采铜研究的进展[J]. 有色矿山, 1994(4): 26-27.
LIANG D H. Progress in in-situ copper mining research of the United States Bureau of Mines[J]. Nonferrous Mines, 1994(4): 26-27.

[11] DRUMMOND E III. In situ recovery & remediation of metals[M]. Colorado: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2020: 15-30.

[12] SUTTON G A. Reconciling mineral reserves at the well-to-well in-situ copper leaching operation at San Manuel mine, Arizona, USA[J]. CIM Journal, 2019, 10(3): 133-141.

[13] Copper Fox Metals Inc. NI 43-101 technical report and updated resource estimate for the Van Dyke copper project[R]. Arizona: Copper Fox Metals Inc., 2020: 139-142.

[14] ZIMMERMAN R, GUSTIN M, ROMAN R J, et al. NI 43-101 technical report: feasibility study (Gunnison)[R]. Cochise County, Arizona, USA, 2017.

[15] JOHNSON D. NI 43-101 technical report: Florence copper project[R]. Arizona, USA: Taseko Mines Limited, 2017.

[16] WANG H, XU C S, PETER A D, et al. Modelling in-situ recovery (ISR) of copper at the Kapunda mine, Australia[J]. Minerals Engineering, 2022, 186, 107752.

[17] 吉兆宁. 地下溶浸采矿技术在我国铜矿山的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2002, 54(3): 11-13.
JI Z N. Application of underground leaching mining technology in copper mines in our country[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2002, 54(3): 11-13.

[18] 吉兆宁, 黄光柱. 地下溶浸采矿技术与我国铜矿山的可持续发展[J]. 有色金属, 2002, 54(4): 99-101, 113.
JI Z N, HUANG G Z. Underground leaching technology and copper mines sustainable development[J]. Nonferrous Metal, 2002, 54(4): 99-101, 113.

[19] 高玉宝, 余斌, 龙涛. 有色矿山低品位矿床开采技术进步与发展方向[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(2): 4-7.
GAO Y B, YU B, LONG T. Progress and development direction of low-grade deposits mining technology in non-ferrous mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2010, 62(2): 4-7.

[20] YEGULALP T M, KIM K. Application of percolation theory by the assessment of permeability enhancement by micro-hydrofracturing for in situ copper leaching[J]. Mining Engineering, 1996, 48(1): 45-48.

[21] SILVA V R S D, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. A low energy rock fragmentation technique for in-situ leaching[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204: 586-606.

[22] 杜志明, 廖文胜, 赵树山, 等. 地浸铀矿大功率超声波解堵增渗技术的应用研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(增刊2): 344-347, 352.
DU Z M, LIAO W S, ZHAO S S, et al. Application and research of super power ultrasound releasing blockage and increasing permeability technology in leaching uranium mine[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Sup.2): 344-347, 352.

[23] 白鑫, 骆桂君, 王艳, 等. 低渗砂岩型铀矿液态CO_2相变致裂增透高效开采新模式[J]. 金属矿山, 2021(7): 50-57.
BAI X, LUO G J, WANG Y, et al. Feasibility study on enhanced permeability of low permeability sandstone type uranium deposit with liquid CO_2 phase transition fracturing[J]. Metal Mine, 2021(7): 50-57.

[24] 张友澎, 赵利信, 王亚奴, 等. 高能气体致裂技术在低渗砂岩型铀矿地浸开采中的应用[J]. 铀矿冶, 2024, 43(3): 1-8.
ZHANG Y P, ZHAO L X, WANG Y N, et al. Application of high energy gas fracturing in in-situ leaching of low-permeable sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3): 1-8.

[25] 赵树彬, 张命俊, 路远涛, 等. 可控冲击波增产技术在大庆油田的应用[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(5): 76-80.
ZHAO S B, ZHANG M J, LU Y T, et al. Application of controllable shock wave stimulation technology in Daqing oilfield[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022, 8(5): 76-80.

[26] FRANK F R, JOHNSON D B. In situ metal recovery: a role for microbiology[C]. ALTA 2018 ISR Symposium Proceedings,

Perth, Australia, 2018.

[27] VARGAS T, ESTAY H, ARANCIBIA E, et al. In situ recovery of copper sulfide ores: alternative process schemes for bioleaching application[J]. Hydrometallurgy, 2020, 196, 105442.

[28] PAKOSTOVAL E, GRAIL B M, JOHNSON D B. Bio-processing of a saline, calcareous copper sulfide ore by sequential leaching[J]. Hydrometallurgy, 2018, 179: 36-43.

[29] BOMBERG M, MIETTINEN H, HAJDU-RAHKAMA R, et al. Indirect in situ bioleaching is an emerging tool for accessing deeply buried metal reserves, but can the process be managed? – A case study of copper leaching at 1 km depth[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32, 103375.

[30] JING S. Electrokinetic in situ leaching: a novel, sustainable technique for metal recovery[J]. Solid Earth Sciences, 2023, 8: 160.

[31] MARTENS E, PROMMER H, SPROCATI R, et al. Toward a more sustainable mining future with electrokinetic in situ leaching[J/OL]. Science Advances, 2021, 7(18): eabf9971. https://doi.org/10.1126/sciadv.abf9971.

[32] 王文吉, 李春光, 刘龙成, 等. 溶浸铀矿开采回顾及电动地浸采铀展望[J]. 核科学与工程, 2023, 43(1): 233-241.
WANG W J, LI C G, LIU L C, et al. Review of leaching uranium mining and prospect of electric in-situ leaching uranium mining[J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, 43(1): 233-241.

[33] ORTEGA-TONG P, JAMIESON J, PROMMER H. Secondary phase formation during electrokinetic in situ leaching of intact copper sulphide ore[J]. Hydrometallurgy, 2023, 216, 105993.

[34] 中国核工业集团公司. 地浸采铀条件试验规范: Q/CNNC JB 16—2014[S]. 核工业标准化研究所, 2014.
China National Nuclear Corporation. Test specification for in-situ leaching uranium mining conditions: Q/CNNC JB 16—2014[S]. Institute of Nuclear Industry Standardization, 2014.

[35] 陈甲斌. 中国铜资源保供需要关注的三个问题[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(10): 4-7, 74.
CHEN J B. Three problems need to be concerned regarding China's copper resource supply guarantee[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(10): 4-7, 74.

[36] 彭宇, 肖发新, 孙树臣. 高碱性脉石低品位氧化铜矿提铜研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(5): 69-74.
PENG Y, XIAO F X, SUN S C. Research progress of copper extraction from low-grade oxidized copper ore with high alkalinity gangue[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020, 11(5): 69-74.

[37] 周友清. 紫金山金铜矿深部铜矿床水文地质特征研究[J]. 世界有色金属, 2023(14): 122-125.
ZHOU Y Q. Study on hydrogeological characteristics of deep copper deposits in Zijinshan gold and copper mine[J]. World Nonferrous Metals, 2023(14): 122-125.

[38] 汪伟, 吴碧娟, 武超峰, 等. 德兴铜矿床富家坞采区水文地质特征研究[J]. 矿产勘查, 2023, 14(10): 2006-2016.
WANG W, WU B J, WU C F, et al. Characteristics of the Fujiawu mining area of Dexing copper deposit[J]. Mineral Exploration, 2023, 14(10): 2006-2016.

[39] 谢廷婷, 王晓东, 谭亚辉, 等. 帷幕注水地浸采铀三维地下水流数值模拟[J]. 铀矿冶, 2015, 34(2): 91-96.
XIE T T, WANG X D, TAN Y H, et al. Three-dimensional numerical modelling of aquifer for in-situ leaching uranium with water injection curtain[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2015, 34(2): 91-96.

[40] 曾瑞垠, 祝新友, 张雄, 等. 海相砂岩型铜矿研究进展及若干问题——以中非加丹加铜矿和云南东川铜矿对比研究为例[J]. 地质通报, 2020, 39(10): 1608-1624.
ZENG R Y, ZHU X Y, ZHANG X, et al. Research progresses on marine sandstone copper deposit and some existent problems: a comparative study of the Katanga copper mine in Central Africa and the Dongchuan copper mine in Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(10): 1608-1624.

[41] 苏国强, 彭钢, 王卉. 铜的原地浸出工艺试验研究[J]. 铜业工程, 2000(2): 14-16.
SU G Q, PENG G, WANG H. In-situ copper leaching process studies[J]. Copper Engineering, 2000(2): 14-16.

[42] 李喜龙, 刘乃忠, 成弘. 内蒙古某铀矿床分散矿体的浸出液处理试验研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(1): 41-45.
LI X L, LIU N Z, CHENG H. The leach liquor processing experimental study for disperse ore bodies of one uranium deposit in the Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(1): 41-45.