

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.08.001

中国铀矿采冶回顾与展望

孙占学, Fiaz Asghar, 赵凯, 周义朋, 黎广荣, 徐玲玲

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 中国铀矿包括火山岩型、花岗岩型、碳硅泥岩型、砂岩型和煤岩型等多种类型。铀矿采冶始于 20 世纪 50 年代, 早期以火山岩型和煤岩型铀矿常规地下开采为主, 部分埋藏较浅的矿床则以露天开采的方式进行; 铀的提取采用破磨搅拌浸出或堆浸工艺。20 世纪 90 年代以来逐步向砂岩铀矿开采转型, 以采冶一体的原地浸出方式进行开采和铀的提取, 按浸出剂的不同主要分为酸法、碱法、中性($\text{CO}_2 + \text{O}_2$)等工艺, 其中酸法和中性浸出工艺在中国应用最为广泛。近年来微生物浸出技术在铀矿堆浸和地浸方面均有所突破, 部分实现工业应用。清洁、高效和数字赋能是铀矿采冶发展的主要趋势, 建设绿色、高效、智能的铀矿大基地也正在成为中国天然铀产业高质量发展的新动能。

关键词: 铀矿采冶; 硬岩型铀矿; 砂岩型铀矿; 地下开采; 地浸; 智能矿山

中图分类号: TL212.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2021)08-0001-08

Review and Prospect of Uranium Mining and Metallurgy in China

SUN Zhan-xue, ASGHAR Fiaz, ZHAO Kai, ZHOU Yi-peng, LI Guang-rong, XU Ling-ling

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Uranium mining and metallurgy in China began in 1950 s, including volcanic rock type, granite type, carbonaceous siliceous-pelitic type, sandstone type and coal rock type. In the early stage, conventional underground mining was mainly used for volcanic and coal type uranium deposits, while open pit mining was used for some shallow buried uranium deposits. The ore is ground broken, stirred, leached or heap leached to produce uranium. Since 1990s, uranium mining has been gradually transformed to sandstone type uranium deposits. Mining of sandstone type uranium deposits is carried out by in-situ leaching with integration of mining and metallurgy. According to different leaching agents, it is mainly divided into acid leaching, alkali leaching, neutral ($\text{CO}_2 + \text{O}_2$) leaching process, among which acid leaching and neutral leaching process are most widely used in China. In recent years, bioleaching technology has made great progress in heap leaching and in-situ leaching of uranium ore, and some of them have been applied in industry. Clean, efficient and digital empowerment are the development direction of uranium mining and metallurgy. Building a green, efficient and intelligent uranium mining base is becoming a new driving force for high-quality development of uranium industry in China.

Key words: uranium mining and metallurgy; hard-rock type uranium deposits; sandstone-type uranium deposits; underground mining; in-situ leaching; intelligent mines

收稿日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072285, 41772266)

作者简介: 孙占学(1962-), 男, 江西修水人, 教授

铀是重要的核工业原料,我国具有工业意义的铀矿主要有火山岩型、花岗岩型、碳硅泥岩型、煤岩型和砂岩型等多种类型^[1],开采方式与其他金属矿种既有相似之处,也有自身特点。硬岩型铀矿(包括火山岩型、花岗岩型等)须将矿石采至地表才能进一步选冶加工,开采方式同大多数的多金属矿一样,主要分为露天开采、地下开采及联合开采^[1-2]。可渗透、有隔水顶底板的砂岩型铀矿则采用原地浸出(简称地浸)的开采方式,该类铀矿边界品位可低至0.01%^[3-4]。

同世界产铀大国相比,我国铀资源储量并不丰富。据最新统计,我国探明铀资源储量仅占全球资源量的5%左右,且禀赋较差^[5]。我国铀矿采冶从20世纪50年代起步,至80年代末主要采用搅拌浸出技术,90年代末实现堆浸技术突破并被广泛应用;80年代中期地浸技术逐渐起步和发展,90年代建成工业规模地浸矿山,近十年来逐步成为我国天然铀生产的主要方式^[4]。本文主要介绍了我国铀矿采冶的实践与技术进步,并对未来我们铀矿采冶技术的发展方向进行展望。

1 硬岩型铀矿采冶

1.1 开采方式

硬岩型铀矿露天和地下开采同其他金属矿产基本相同。埋藏较浅的采用露天开采,埋深较大的采用地下开采^[6-7],我国硬岩铀矿大多分布在南方,开采的矿床类型有火山岩型和花岗岩型,主要以地下开采为主,露天开采为辅^[8-10]。

1.1.1 露天开采

20世纪50年代初期,我国第一批铀矿山建设从露天开采开始,新疆白杨河矿床就是其中的典型。70年代露天开采得到了较大发展,最高时露天开采矿床占比达三分之一,主要分布于湖南、江西、广东三省^[11-12],其中江西的黄峰岭(719矿)露天开采规模达万吨级。随着浅表矿产开采殆尽,露天开采逐步减少^[13-15],目前我国露天开采的铀矿仅有沽源铀矿(铀钼共采)。

露天开采相对较安全,但地表破坏大,开采形成巨大露天矿坑^[16-17],同时产生大量的放射性粉尘、含铀放射性废水等亦对环境造成危害^[18-20]。

1.1.2 地下开采

地下开采多采用联合开拓(平峒-竖井或者斜井)的方式进行,经历了单一井筒-主副井筒、人工掘进-机械掘进的发展过程^[18]。常见的地下开采技术

主要为充填采矿法、留矿采矿法、全面采矿法、无轨采矿法、原地爆破浸出^[8],其中原地爆破浸出是采冶一体技术。这些地下开采方法多数在我国南方使用,如771矿、721矿。

充填采矿法是20世纪50年代末被我国引进,先后发展起了干式充填、碎石水力充填、水泥胶结充填技术、分级尾砂充填、高水速凝充填、膏体泵送充填等一系列的充填采矿技术。我国铀矿地质条件复杂,充填采矿法是应用最广泛的一种方式,约占到70%^[19]。充填开采具有准切割工程量相对较小、工艺适用性强、矿石损失和贫化小、对围岩扰动小的优点,但工艺复杂,开采成本高,开采边界品位较高^[20]。留矿采矿要求在采矿过程中预留一部分矿石在采矿场上对顶板起支撑作用^[21]。留矿采矿和堆浸技术的结合能进一步提升采矿效率^[22-23]。采用浅孔留矿法相比充填法采矿更为经济,但是充填采矿更为符合绿色矿山需求,同时留矿法可能还会造成大面积的采空区,导致重大危险的发生^[24-26]。

全面采矿系工作面沿矿体走向或倾向全面推进,将贫矿或夹石留下作为矿柱,贵重金属的矿柱可用混凝土替代^[27],具有工艺简单、回采率高、贫化低、采矿成本低等优点^[28]。宋丽霞等^[29]研究发现,全面采矿应用于硬岩型铀矿的开采,存在贫化率相对较大、工序复杂、生产安全性较差的问题,且主要适用于缓倾斜、薄-中厚度矿体,要求矿岩均稳固。全面采矿可与留矿采矿方法相结合进行优势整合^[30-32]。

无轨采矿技术机械化程度较高^[17],先后在衢州铀矿、本溪铀矿开展了探索性试验,后在赣州鹿井铀矿使用。无轨开采利用新型先进无轨设备,大大降低了人工成本,提高了开采效率,安全系数也相对较高,但开采小而薄层的矿体时,废石难剔除,贫化率高,设备保养和维修费用高。

原地爆破浸出技术在地下将矿石破碎,随后通过溶浸直接提取回收铀元素,在井下采场低品位矿石浅孔落矿筑堆浸出基础上发展起来的,具有工艺简单、投资小、建设周期短、能耗低、资源回收率高等优点^[22-33],浸出率可达70%以上^[8]。但是也存在一些问题,包括:矿石块体过大、破碎不完全,矿块微裂隙不发育,因凿岩和出矿频繁造成预埋管网破坏,受矿体形态影响形成溶浸死角,布液技术尚待完备等^[34]。

随着国际铀价持续低迷和砂岩铀矿地浸技术发展进步,我国天然铀生产逐渐向砂岩型铀资源开发

转型,多数硬岩铀矿山关闭,目前仅保留了广东韶关的745矿在产。尽管如此,硬岩铀矿的研究工作依旧在积极开展,技术、装备的进步可使硬岩铀矿开采更加经济和环保^[8,15,35-36]。

1.2 水冶工艺

硬岩矿石采至地表破碎后采用溶浸方式进行铀的提取,主要有搅拌浸出和堆浸两种方式^[37]。

1.2.1 搅拌浸出

搅拌浸出是将采至地表的矿石破磨至合适的粒度,按一定的液固比置入搅拌装置,通过严格控制浸出条件,将铀元素从固相转移至液相的一种常规浸出方法,常用于品位较高的矿石,为我国铀矿冶初期(持续到20世纪80年代末)天然铀回收的主要方式。该技术浸出效率高,基本不受外部环境影响,可以实现均衡和稳定生产^[38]。矿石的充分破碎和搅拌使含铀矿物与浸矿剂充分接触,搅拌槽的温度和浸矿剂的调配相较于堆浸和地浸更好控制,因而搅拌浸出的资源回收率较高,且浸出周期较短。但搅拌浸出存在投资大、操作复杂、水耗、物耗、能耗高的缺点^[39]。磨矿费用高昂且浸出反应完成后固液分离操作繁琐^[40],特别是当铀矿品位较低时,搅拌浸出的劣势体现得更为明显,客观上存在对新浸出工艺或对搅拌浸出进行改良的需要。

1.2.2 堆浸

从1965年开始我国就尝试探索铀矿堆浸技术,1969—1971年进行了首个地下堆浸(071-2工程),铀回收率达到80.2%,但淋浸周期长达155 d。1977年在094矿、016矿、015矿、001矿开展了工业-半工业的堆浸试验,1985年在019矿和094矿分别开展了5 000 t(后发展为万吨规模)和2 000 t的工业试验,浸出率分别达到94.4%和96.5%,浸矿周期分别为50 d和96 d,达到国际先进水平^[39]。我国早期对铀矿堆浸技术较为粗放,堆浸工艺的漫长浸出周期掩盖了堆浸工艺本来具有的低成本、工艺简单的优点^[39,41]。20世纪90年代逐渐发展出了酸熟化—高铁淋滤堆浸、低渗透性矿石制粒堆浸、细粒级矿石堆浸、联堆浸出、细菌氧化堆浸、伴生铀矿综合堆浸、渗滤浸出,对不同矿石针对性使用这些技术可提高铀回收率,降低浸出成本^[42]。堆浸过程中也遇到了一些问题,如板结问题。史维浚等^[43]在堆浸工艺的基础之上利用微生物池浸相山721矿的矿石,板结现象明显改善。为了进一步节约成本与改善对环境的影响,将来直接在地下开展堆浸或原位爆破浸出有可能成为硬岩型铀矿开采主要方式之一。

2 煤岩型铀矿采冶

煤岩型铀矿是在煤的吸附和强还原作用下铀被吸附固定下来形成富铀煤层^[44]。由于铀在煤层中以非常分散的吸附态形式存在,所以很难通过选矿的方法将煤层和铀进行分离。通常采用将煤进行低温(1 000℃以下)燃烧,然后用硫酸对煤灰进行溶浸提取铀,但该工艺铀回收率较低^[45-46]。煤岩型铀矿床在我国的铀资源储量中占据一定比例,20世纪60年代新疆的509矿采取从地下采出后进行焚烧浸取铀的方式,该矿在1982年基本结束开采,共回收金属532.58 t。20世纪80年代末此类矿床的开采全部关停^[47]。

3 砂岩型铀矿采冶

砂岩型铀矿床是指工业铀矿化主要产于砂岩(包括含砾砂岩、粉砂岩、泥岩)中的铀矿床^[48]。由于砂岩型铀矿的载矿砂体固结程度通常较低,矿层中富含地下水,基本上不满足地下开挖施工的地质条件,一般采用地浸工艺进行开发。地浸是天然埋藏条件下,通过将浸矿剂注入地下,使浸矿溶液有选择地同地下目标物质在矿层发生原位浸出反应的集采、冶于一体的铀矿开采方法^[46,49-50]。

地浸工艺最早的研究和应用可以追溯至16世纪西班牙用该法开采有色金属矿,工业化应用在20世纪墨西哥(1924)和乌拉尔(1939—1942)回收铜。铀矿地浸则于1957年由美国科学家最初提出,系统研究在20世纪60年代逐步兴起。最早的地浸采铀试验是由美国和苏联开展的,1961年苏联水文地质工程师设计了原位抽注试验,用以开采1959年被搁置作呆矿处理的某砂岩型铀矿,1978年开采完毕,铀回收率达到了77%。同期,在美国也相继开展了一系列的地浸采铀试验,并取得了较好的成果。至1992年美国关闭所有常规的矿山,地浸工艺采铀也在其铀矿产业中渐渐占据支配地位,随后保加利亚、捷克斯洛伐克、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦也掌握了该项技术,实现了工业化生产^[51-52]。可实施地浸开采工艺的砂岩型铀矿床通常以胶结程度较差,具有稳定的隔水顶底板,地下水矿化度较低为特点^[53-54]。按照不同的浸矿剂进行划分,可以分为酸法地浸、碱法地浸、中性($\text{CO}_2 + \text{O}_2$)地浸^[49]。

我国地浸采铀的研究与应用并不是从国外直接引进,而是由我国科学家在查阅国外专家地浸工艺的基础之上提出设想,独立研发成功。我国砂岩型

铀矿地浸开采工艺的发展大致可分为四个阶段:探索研究阶段(1969—1981年),工业试验和生产阶段(1982—1995年),规模化生产阶段(1995—2010年),大基地建设阶段(2010年至今)。

3.1 探索研究阶段

我国最初地浸试验选择在广东河源进行,试验从1970年持续到1973年,但没有取得预期结果。1978年在黑龙江501矿床再次开展试验,试验持续到1981年。两次探索性的试验并没有取得突破性成果,但在技术、设备和方法等方面积累了一些经验,为后期再次启动试验打下了一定的基础。

3.2 工业试验阶段

工业试验阶段的场地主要在新疆的512矿床和云南的381矿床进行,同期在511矿床和382矿床也开展了部分工作。1980年冬天,地浸试验的研究主要场地转至云南381矿,1984年381矿的地浸条件试验成功,1991建成试验生产矿山,年回收金属3~5 t,我国初步掌握地浸采铀技术。在381矿条件试验成功的基础上,自1986年始,新疆伊犁512矿床相继开展条件试验(1986-1990年)和半工业生产试验(1991-1993),试验取得成功,并将该矿作为我国首个工业化规模地浸铀矿山进行建设。

3.3 规模化生产阶段

1995年512矿山已经具备50 t的国家重点工业性试验开始建设,1996年正式投产,1998年通过了验收,1999年二期扩建工程开始启动,2000年全面建成,与此同时,511和十红毯矿床也开始进行酸法和中性地浸试验,并先后建成投产。这一阶段,我国地浸开采技术发展成熟^[51,53],天然铀生产也逐渐形成砂岩铀矿地浸开采和硬岩铀矿常规开采并行格局。

3.4 大基地建设阶段

2004年“铀矿大基地”被首次提出,2010年中核集团启动重点科技专项研究,提出第一类的铀矿大基地建设包括伊犁、鄂尔多斯、二连、通辽、巴音戈壁、相山和广东诸广岩体南部,并对伊犁、二连、东胜三个砂岩型铀矿基地及相山和广东诸广岩体两个硬岩型大基地的成矿机制和勘查前景开展细致研究^[54]。2015年我国伊犁基本建成年产量500 t规模的天然铀生产基地,2017年蒙其古尔项目全面达产,标志着我国首个千吨级铀矿山建成。目前,内蒙古通辽、鄂尔多斯地区两个千吨级天然铀大基地建设正在有序进行^[55]。

4 展望

近年来,随着砂岩铀矿勘查陆续取得了重大突破,以及以 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 中性地浸工艺为代表的第三代地浸采铀技术工业化应用^[56],我国天然铀生产逐渐完成从硬岩铀矿传统开采为主向砂岩铀矿地浸开采为主的战略转型,矿山建设周期更短,形成产能更快,同时也更加安全、经济和环保。加快科技创新和数字技术融合,推动我国天然铀产业高质量发展,是当前和未来中长期的重要任务。

一方面,要加快铀矿采冶工艺技术创新,发展更加绿色、高效的新技术、新工艺,推动铀矿采冶技术进步和产业拓展。“绿色、高效”一直是铀矿采冶追求的目标,在环保安全的前提下实现矿产资源的高效回收需要依赖于采矿技术及装备的升级^[57]。铀矿采冶技术发展历程中,地浸是一次重要的技术革新,它使原来不可开采的低品位资源利用变为现实。尽管铀矿采冶技术仍在不断进步,例如, $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 中性浸出技术的发展、微生物浸铀技术的探索和工艺改良等,对解决高碳酸盐、高矿化度以及低品位、强还原等复杂铀资源开发利用起到了重要作用^[58-59],但仍有很多难题尚未解决,比如矿层堵塞问题、堆体板结问题、树脂中毒问题,低渗透铀矿地浸、深埋藏铀资源地浸问题,碳硅泥岩型铀矿和海水提铀等非传统铀资源开发问题,以及铀-油、铀-钼、铀-煤、铀-其它稀有金属资源综合利用问题等等,这些都有待于从理论到技术的创新和突破。

另一方面,随着数字化技术的日新月异以及人工智能的迅猛发展,数字化和智能化已成为当下和未来矿山发展的显著趋势^[60]。自20世纪下半叶以来,加拿大、德国、英国、澳大利亚等国家,大力发展智能矿山技术,传统矿山遥控采矿、无人工作面甚至无人矿井等已成为现实。近十几年来,我国地浸矿山在自动化和信息化方面取得较大进步,天山铀业的蒙其古尔、内蒙铀业的巴彦乌拉、通辽铀业均已达到较高度度的自动化和信息化^[61],但与美国、加拿大、澳大利亚和国内石油、地调局等地矿行业差距大,严重滞后于国家“大数据战略”和“数字经济”发展进程,数字化和智能化还任重道远。当前我国地浸矿山缺乏浸出综合数据体系、大数据分析系统和综合智能化调控平台,地质、水文地质、物探、化学分析以及井场工艺参数等各类数据分散,地下工程和地质体的数字化、地浸流场的数值计算、浸出水岩反应模拟与分析、浸出大数据分析等关键技术研究

与应用比较落后,这些是制约地浸地下过程优化调控的关键技术问题。未来3~5年实现数字化、10~15年实现智能化,将是我国铀矿采冶技术实现从第三代向第四代跨越的重要任务。

5 结语

从1954年在广西发现我国第一块铀矿石以来的近70年间,我国天然铀产业经历了从无到有、从小到大、从落后到进步的发展历程。目前我国对天然铀的需求量已经跃居世界第三,天然铀供应严重依赖进口,加大国内铀资源勘查和采冶技术创新,提升国内天然铀保障能力对国家能源安全具有重要的战略意义。由于我国铀资源禀赋较差,要缓解国内天然铀供需矛盾,必须走技术创新之路,尤其是要通过铀矿采冶理论和技术创新,降低可采边界品位、扩大可采资源量,降低采冶成本、提高经济效益,发展绿色采冶技术、建设生态矿山,加快数字化和大数据分析应用、提升铀矿采冶数字赋能水平,来实现我国铀矿采冶在新时代的高质量发展。

参考文献

- [1] 叶永钦,陈友良,倪师军,等.我国硬岩型铀矿床垂直分带模式研究现状[J].华南地质与矿产,2017,33(2):144-149.
YE Y Q, CHEN Y L, NI S J, et al. Hard rock uranium ore mining technology development and equipment collocate application analysis at home[J]. South China Geology and Mineral Resources, 2017, 33(2): 144-149.
- [2] 陈凡.我国金属矿开采技术发展趋势研究[J].中国金属通报,2021(2):1-2.
CHEN F. Research on the development trend of metal mining technology in China[J]. China Metal Bulletin, 2021(2): 1-2.
- [3] MUDD G M. Critical review of acid in situ leach uranium mining; 1. USA and Australia[J]. Environmental Geology, 2001, 41(3/4): 390-403.
- [4] 苏学斌,张万亮,汤庆四,等.地浸砂岩型铀矿储量关键指标技术经济分析[J].铀矿冶,2015,34(3):144-147.
SU X B, ZHANG W L, TANG Q S, et al. The technical and economic analysis of key indicators on reserves of in-situ leaching sandstone type uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2015, 34(3): 144-147.
- [5] 高兵,冯聪,薛亚洲.全球资源争夺:中国应练好内功[N].地质勘查导报,2010-11-09(1).
GAO B, FENG C, XUE Y Z. Global resource scramble; China should practice internal skills [N]. Geological exploration guide, 2010-11-09(1).
- [6] 王鉴,王鉴夫,王昌汉,等.中国铀矿开采[M].北京:原子能出版社,1997:1617.
WANG J, WANG J F, WANG C H, et al. Gold Science and Technology [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 1617.
- [7] 许军,郭凤喜,孙彩敏.从铀矿开采的最佳实践中学习安全与环保管理经验[J].中国矿业,2010,19(4):54-57.
XU J, GUO F X, SUN C M. Learn safety and environmental management experiences from the best practices in uranium mining [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(4): 54-57.
- [8] 李秦,郭元,王泽江,等.国内硬岩铀矿采矿技术发展及设备配置应用分析[C]//第十届全国采矿学术会议论文集——专题一:采矿与井巷工程,内蒙古鄂尔多斯,2015:740-746.
LI Q, GUO Y, WANG Z J, et al. Analysis on the development of mining technology and the application of equipment configuration in domestic hard rock uranium mine [C]//Proceedings of the 10th National Mining Academic Conference——Topic I: Mining and Roadway Engineering, Ordos, Inner Mongolia, 2015: 740-746.
- [9] 邵飞,许健俊,陈志平.江西省铀资源及开发利用对策[J].东华理工大学学报(自然科学版),2013,36(增刊2):60-63.
SHAO F, XU J J, CHEN Z P. Uranium resources in Jiangxi province and its development and utilization countermeasure[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2013, 36(S2): 60-63.
- [10] 李开文.中国铀矿开采技术特点及发展水平[J].中国矿业,2002,11(1):23-27.
LI K W. Mining technological properties and development level of Chinese uranium ore mines [J]. China Mining Magazine, 2002, 11(1): 23-27.
- [11] 肖金锋.七一九铀矿堆浸液的加工处理[J].铀矿冶,1994,13(4):268-271.
XIAO J F. Processing of uranium ore heap leaching solution of at mine No. 719 [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1994, 13(4): 268-271.
- [12] 李开文.我国铀矿露天开采的技术状况及发展方向[J].铀矿冶,1986,5(1):1-6.
LI K W. Situation and development of uranium open-pit mining techniques in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1986, 5(1): 1-6.
- [13] 李顺金.相山铀矿田开采的统计分析[J].铀矿冶,

- 2010,29(4):169-172.
- LI S J. Statistical analysis of mining of Xiangshan uranium ore field[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2010,29(4):169-172.
- [14] 施祖远. 我国铀矿开采技术成就与发展对策[J]. 铀矿冶, 2011,30(4):175-179.
- SHI Z Y. Achievements in uranium mining technique of China and its development countermeasures[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2011,30(4):175-179.
- [15] 王合祥. 无轨采矿技术在我国铀矿山的应用与发展思路[J]. 铀矿冶, 2006,25(3):116-121.
- WANG H X. Application and prospects of trackless mining technique in uranium mines of China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006,25(3):116-121.
- [16] 刘海洋. 浅谈露天采矿技术分析[J]. 设备管理与维修, 2021(6):149-150.
- LIU H Y. Discussion on technical analysis of open pit mining[J]. Equipment Management & Maintenance, 2021(6):149-150.
- [17] 赵忠, 李小军. 露天煤矿的矿区环境保护[J]. 北方环境, 2013,25(7):115-117.
- ZHAO Z, LI X J. Environmental protection of mining area of coal mine [J]. Northern Environment, 2013, 25(7):115-117.
- [18] 胡光华. 江西铀矿地下开采若干方面的回顾[J]. 江西有色金属, 1991(1):46-49.
- HUANG G H. Review on some aspects of underground mining of uranium mine in Jiangxi [J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 1991(1):46-49.
- [19] 刘杰. 充填采矿法的应用现状及发展[J]. 当代化工研究, 2020,60(7):8-9.
- LIU J. Application status and development of filling mining method [J]. Contemporary Chemical Industry Research, 2020,60(7):8-9.
- [20] 原虎军, 钟超. 非煤矿山中充填采矿法应用研究[J]. 中国金属通报, 2020(10):30-31.
- YUAN H J, ZHONG C. Research on application of backfill mining method in non-coal mine [J]. China Metal Bulletin, 2020(10):30-31.
- [21] 波波夫, 陈深. 留矿采矿法[Z]. 有色金属, 1954:1-12.
- BOBOV, CHEN S. Ore retention mining method[Z]. Nonferrous Metals, 1954:
- [22] 谢建兵, 朱和玲, 张新光. 矿房留矿堆浸采矿方法研究与应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2009,61(2):4-6.
- XIE J B, ZHU H L, ZHANG X G. Research and application of stope shrinkage heap leaching mining method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2009, 61(2):4-6
- [23] 张飞凤, 苏学斌, 邢拥国, 等. 地浸采铀新工艺综述[J]. 中国矿业, 2012,21(增刊1):9-12
- ZHANG F F, SU X B, XING Y G, et al. New progresses on in-situ leaching of uranium deposit[J]. China Mining Magazine, 2012,21(S1):9-12
- [24] 全爱国, 李秦, 宋丽霞, 等. 花岗岩型低品位铀矿体开发技术探讨[J]. 中国矿业, 2012,21(增刊1):306-309.
- QUAN A G, LI Q, SONG L X, et al. The study of the development technology of the granite type low grade uranium ore[J]. China Mining Magazine, 2012,21(S1):306-309.
- [25] 周家祥, 张志超, 张增贵. 某铁矿山充填采矿法的应用及优化[J]. 现代矿业, 2019,35(10):58-60,65.
- ZHOU J X, ZHANG Z C, ZHANG Z G. Application and optimization of filling and mining method in an iron mine[J]. Modern Mining, 2019,35(10):58-60,65.
- [26] 罗一忠. 大面积采空区失稳的重大危险源辨识[D]. 长沙:中南大学, 2005.
- LUO Y Z. Major hazard source identification of wide spread mined-out area instability [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [27] 王昌汉, 李开文. 铀矿床开采[M]. 北京:原子能出版社, 1997:65.
- WANG C H, LI K W. Mining of Uranium Deposits[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997:65.
- [28] 董峻岭, 庞曰宏, 任吉明. 全面采矿法研究与应用[J]. 矿业快报, 2006,25(7):67-68.
- DONG J L, PANG Y H, REN J M. Research and application of full mining method [J]. Express Information of Mining Industry, 2006,25(7):67-68.
- [29] 宋丽霞, 吴德波, 谭亚辉, 等. 全面采矿法在某铀矿床应用的探讨[J]. 铀矿冶, 2012,31(3):113-115.
- SONG L X, WU D B, TAN Y H, et al. Discussion on application of shrinkage method in a uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2012, 31(3):113-115.
- [30] 刘爽, 赵天野. 全面采矿法在矿山生产实践中的应用与探究[J]. 世界有色金属, 2017(11):70-71.
- LIU S, ZHAO T Y. Application and exploration of comprehensive mining method in mine production practice[J]. World Nonferrous Metals, 2017(11):70-71.
- [31] 刘华生, 胡首权. 我国应用留矿全面采矿法的现状[J]. 金属矿山, 1993(3):23-28.
- LIU H S, HU S Q. Present situation of shrinkage-full mining method used in China[J]. Metal Mine, 1993(3):23-28.
- [32] 曾庆强, 王昇, 李定龙, 等. 全面采矿法在倾斜薄窄矿体

- 开采中的应用[J]. 铀矿冶, 2013, 32(2): 57-59.
- ZENG Q Q, WANG S, LI D N, et al. Application of overall stoping method in inclined thin narrow ore bodies [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(2): 57-59.
- [33] 刘立顺, 吴春平, 李书强, 等. 某铀矿床原地破碎浸出开采技术[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(5): 1-4.
- LIU L S, WU C J, LI S Q, et al. In-situ crushing leaching mining technology of a uranium deposit [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2016, 68(5): 1-4.
- [34] 谢望南, 董春明. 影响大布铀矿床原地爆破浸出效果的因素分析[J]. 铀矿冶, 2014, 33(1): 4-7.
- XIE W N, DONG C M. Analysis of factors affecting the effect of stope leaching [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(1): 4-7.
- [35] 丁福龙, 解洪亮. 青龙铀矿绿色矿山建设与实践[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增刊1): 12-16.
- DING F L, XIE H L. Construction and practice of the green mine at Qinglong uranium deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(S1): 12-16.
- [36] 吴铁军, 李兆鹏, 王之虎. 无轨开采技术在某铀矿山的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(6): 6-9.
- WU T J, LI Z P, WANG Z H. Application of trackless mining technique in a uranium mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2015, 67(6): 6-9.
- [37] 孙占学, 刘金辉, 刘亚洁, 等. 硬岩铀矿生物堆浸研究进展[C]//全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集(下), 海口, 2012: 443-446.
- SUN Z X, LIU J H, LIU Y J, et al. Research progress on biological heap leaching of hard rock uranium ore [C]// Proceedings of the Symposium on the Construction of Large Uranium Mining Base (II), Haikou, 2012: 443-446.
- [38] 谭雄, 叶勇军, 刘再道, 等. 南方某铀矿床高含泥量矿石搅拌浸出试验研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(2): 27-31.
- TAN X, YE Y J, LIU Z D, et al. The agitation leach experiments of high silt content uranium deposit ore in the South of China [J]. Journal of University of South China (Science & Technology), 2016, 30(2): 27-31.
- [39] 曾毅君, 张飞凤, 王廷学. 我国硬岩铀矿资源开发的技术基础及研究前景[J]. 铀矿冶, 2005, 24(1): 1-5.
- ZENG Y J, ZHANG F F, WANG T X. Development of China's hard rock uranium resources: Supporting technology and research prospect [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(1): 1-5.
- [40] 刘艳, 高任喜, 万红金, 等. 近几年铀水冶技术研究进展综述[C]//中国核科学技术进展报告(第二卷)-中国核学会 2011 年学术年会论文集第 10 册(核情报(含计算机技术)分卷、核技术经济与管理现代化分卷), 北京: 中国原子能出版社, 2011: 34-39.
- LIU Y, GAO R X, WAN H J, et al. A review of recent research progress in uranium hydrometallurgy technology [C]// Progress Report on China's Nuclear Science and Technology (Vol. 2): Proceedings of the 2011 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society (Section 10 of Nuclear Information (including Computer Technology), Modernization of Nuclear Technology, Economy and Management). Beijing: China Atomic Energy Press, 2011: 34-39.
- [41] 李明, 全爱国. 铀矿堆浸在我国的试验研究与发展[J]. 铀矿冶, 1990, 9(4): 8-12, 31.
- LI M, QUAN A G. Research and development of uranium ore heap leaching in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1990, 9(4): 8-12, 31.
- [42] 李建华. 中国地浸技术的创新突破[J]. 中国核工业, 2016(11): 19-21.
- LI J H. Innovative breakthrough of in-situ leaching technology in China [J]. China Nuclear Industry, 2016(11): 19-21.
- [43] 史维浚, 周义朋, 孙占学, 等. 硬岩铀矿快速高效微生物池浸方法[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(4): 369-374.
- SHI W J, ZHOU Y P, SUN Z X, et al. A kind of quick and efficient sink bio-leaching technology for hard rock type uranium mine [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(4): 369-374.
- [44] 黄世杰. 我国铀矿地质勘查史略[J]. 铀矿地质, 2018, 34(5): 300-304.
- HUANG S J. Brief history of uranium exploration in China [J]. Uranium Geology, 2018, 34(5): 300-304.
- [45] 张仁里. 铀-煤共生矿的成因及矿石加工类型划分的探讨[J]. 地质论评, 1984(1): 73-76.
- ZHANG R L. The origin of uranium-coal complex ore and its types of ore processing [J]. Geological Review, 1984(1): 73-76.
- [46] 陈敬忠. 褐煤提铀的工艺技术和生产实践[J]. 铀矿冶, 1991, 10(1): 20-25.
- CHEN J Z. Technology and production practice of uranium extraction from lignite [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1991, 10(1): 20-25.
- [47] 王前裕. 浅谈 509 煤型铀矿床的开采特点[J]. 铀矿冶, 1997, 16(2): 78-83.
- WANG Q Y. Discussion on mining characteristics of coal type uranium deposit 509 [J]. Uranium Mining and

- Metallurgy, 1997, 16(2): 78-83.
- [48] 余达淦, 吴仁贵, 陈培荣. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- YU D G, WU R G, CHEN P R. Uranium Resource Geology [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005.
- [49] 周义朋, 沈照理, 史维浚, 等. 地浸采铀工艺分类方法的探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(1): 37-41.
- ZHOU Y P, SHEN Z L, SHI W J, et al. Discussion on technology classification of in-situ leaching uranium mining[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(1): 37-41.
- [50] 苏学斌, 杜志明. 我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J]. 中国矿业, 2012, 21(9): 79-83.
- SU X B, DU Z M. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79-83.
- [51] 阙为民, 王海峰, 田时丰, 等. 我国地浸采铀研究现状与发展[J]. 铀矿冶, 2005, 24(3): 113-117.
- QUE W M, WANG H F, TIAN S F, et al. Research status and development of in-situ leaching uranium techniques in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3): 113-117.
- [52] 李德平, 顾连兴, 王敢. 砂岩型铀矿床地浸地质工艺性能综合定量评价指标——地浸指数的设计与应用[J]. 铀矿地质, 2003(3): 186-192.
- LI D P, GU L X, WANG G. Design and application of in-situ leach index: An integrated quantitative index of evaluation for geological technological feature about in-situ leach uranium mining from sandstone-type uranium deposits [J]. Uranium Geology, 2003 (3): 186-192.
- [53] 杜运斌. 我国地浸采铀工艺的述评及展望[J]. 铀矿冶, 1996, 15(4): 221-226, 275.
- DU Y B. Review and prospect for uranium mining technique in situ leaching in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1996, 15(4): 221-226, 275.
- [54] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 铀矿大基地资源扩大与评价技术研究进展与主要成果[J]. 铀矿地质, 2015(增刊 1): 32-39, 59.
- CAI Y Q, ZHANG J D, LI Z Y, et al. Progress and achievement of evaluation and enlargement technology on the study of big uranium resource base[J]. Uranium Geology, 2015(S1): 32-39, 59.
- [55] 曾毅君. 创新铀矿冶技术支撑大基地建设[J]. 中国核工业, 2015(11): 25-27.
- ZENG Y J. Construction of innovative uranium mining and metallurgical technology support base [J]. China Nuclear Industry, 2015(11): 25-27.
- [56] 张金带, 刘鑫扬, 常京涛. 创新合作理念夯实我国天然铀供应保障体系[J]. 中国核工业, 2016(11): 11-13.
- ZHANG J D, LIU X Y, CHANG J T. Innovation and cooperation concept to consolidate China's natural uranium supply and guarantee system [J]. China Nuclear Industry, 2016(11): 11-13.
- [57] 苏学斌. 第三代铀采冶技术有望成为“走出去”的新生力量[J]. 中国核工业, 2015(11): 28-29.
- SU X B. The third generation uranium mining and smelting technology is expected to become the new force of “going out” [J]. China Nuclear Industry, 2015(11): 28-29.
- [58] 刘红静. 511 矿床地浸采铀末期溶浸方法的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
- LIU H J. Research on leaching method of acid in-situ leaching uranium at the last stage of 511 deposit[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2018.
- [59] 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 X X, SUN Z X, ZHOU Y P, et al. Advances in research on microbial leaching of uranium [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(2): 411-420.
- [60] 刘玲. 初探数字化矿山发展之路[N]. 中国有色金属报. 2009-01-01(3).
- LIU L. Preliminary study on the development road of digital mine [N]. China Nonferrous Metals News, 2009-01-01(3).
- [61] 关键, 侯江, 苏艳茹, 等. 数字铀矿山发展思路[J]. 铀矿冶, 2017, 36(4): 241-247.
- GUAN J, HOU J, SU Y R, et al. Development ideas for digital uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(4): 241-247.