

低渗砂岩型铀矿液态 CO₂ 相变致裂增透高效开采新模式

白 鑫^{1,2} 骆桂君¹ 王 艳³ 曾 晟¹ 薛希龙¹ 冯倪立¹

(1. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003; 3. 南华大学经济管理与法学学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要 安全稳定的铀资源供应, 对于保障国家安全、促进核工业健康可持续发展具有重要的意义。针对我国低渗透性砂岩型铀矿在地浸开采中渗透性低、浸出困难的技术难题, 提出了低渗砂岩型铀矿液态 CO₂ 相变致裂增透高效开采技术模式, 即采用液态 CO₂ 相变致裂技术, 在地浸采铀抽、注液孔之间产生大量的联通裂隙, 提高低渗透铀矿的渗流能力。采用理论方法计算了液态 CO₂ 相变致裂影响半径, 建立了液态 CO₂ 相变致裂增透地浸开采流程, 系统进行了低渗砂岩型铀矿液态 CO₂ 相变致裂增透高效开采技术特征研究。结果表明: 低渗砂岩型铀矿液态 CO₂ 相变致裂增透技术影响半径为 6.53 m, 该技术能够实现三维应力条件下岩体致裂破坏, 能够有效增加岩体损伤裂隙网络分布, 具有破岩致裂增透、降低化学沉淀及经济可行性。研究结果为有效解决低渗透性造成的砂岩型铀矿地浸开采“难注、难采、低回收率”等难题提供了新途径。

关键词 低渗透性 砂岩型铀矿 地浸开采 CO₂ 致裂 岩石破坏

中图分类号 TD868

文献标志码 A

文章编号 1001-1250(2021)-07-050-08

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.202107006

Feasibility Study on Enhanced Permeability of Low Permeability Sandstone Type Uranium Deposit with Liquid CO₂ Phase Transition Fracturing

BAI Xin^{1,2} LUO Guijun¹ WANG Yan³ ZENG Sheng¹ XUE Xilong¹ FENG Nili¹

(1. School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;
2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control (Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454003, China; 3. School of Economics, Management and Law, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract Safe and stable supply of uranium resources is of great significance for ensuring national security and promoting the sustainable and healthy development of the nuclear industry. Aiming at the technical bottleneck of the high-efficiency mining of low-permeability sandstone-type uranium deposits in our country, a technical idea of a low-permeability sandstone-type uranium deposit with liquid CO₂ phase transition fracturing and high-efficiency mining method was proposed. That is, the liquid CO₂ phase transition fracturing technology was used to generate a large number of interconnected fracture between the in-situ leaching extraction holes and injection holes to improve the seepage capacity of the low-permeability uranium ore. The theoretical method was used to calculate the influence radius of liquid CO₂ phase transition fracturing, and the liquid CO₂ phase transition fracturing and permeability enhancement in-situ leaching mining process was established. The system carried out a feasibility study on low-permeability sandstone-type uranium deposits with liquid CO₂ phase transition fracturing to increase permeability and high-efficiency mining. The results showed that: The influence radius of liquid CO₂ phase change fracturing to increase permeability technology was 6.53 m. This technology can achieve rock fracture failure under three-dimensional stress conditions, could effectively increase the distribution of rock damage and fracture network, and

收稿日期 2021-01-10

基金项目 国家自然科学基金面上项目(编号:11775107);湖南省自然科学基金项目(编号:2020JJ5484, 2019JJ50516);湖南省教育厅科学研究项目(编号:20C1616);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(编号:WS2020B05);湖南省大学生创新创业训练计划项目(编号:S202010555103);湖南省矿山岩土工程创新创业教育中心大学生创新创业项目(编号:2020KSZX09)。

作者简介 白 鑫(1990—),男,副教授,博士,硕士研究生导师。

has the advantages of rock fracturing, reducing chemical precipitation and economic feasibility. The results of this paper provided a possible way to solve the problem of low permeability and low leaching rate in the process of in-situ leaching of sandstone-type uranium deposits, and would be of great significance to the future breakthrough of the low-permeability sandstone uranium ore problem with low leaching rate.

Keywords low permeability, sandstone type uranium deposit, in-situ leaching mining, carbon dioxide fracturing, rock failure

铀资源是国家战略资源,是核工业发展的基础。安全稳定的铀资源供应,对保障我国国家安全,促进核工业可持续健康发展具有重要意义^[1]。近年来,随着核电技术不断发展,作为绿色能源的核电技术在世界范围内迅猛发展,对铀矿资源的需求也与日俱增^[2]。地浸采铀工艺是集采、选、冶于一体的开采工艺,与其他常规采矿方法相比具有明显的优势^[3]。到2020年,地浸采铀技术产能已占我国天然铀产能的90%以上^[4]。2005年,国防科工委发布的《地浸砂岩型铀矿水文地质勘察规范》(EJ/T 1194—2005),明确指出地浸采铀技术仅适用于渗透系数为0.5~10.0 m/d,且具有稳定隔水顶底板的疏松砂岩矿床^[5]。苏学斌等^[6]指出我国铀矿资源不丰富,仅有41.57%为可地浸开采的砂岩型铀矿,矿石渗透系数小于0.5 m/d的致密储层占砂岩型资源储量的70%以上,迫切需要加强低渗透砂岩型铀资源高效开采技术攻关^[6]。根据国际原子能机构发布的《2020年铀资源、生产和需求》报告,2019年我国核电领域铀需求量为9 200 t,而国内铀产量仅为1 600 t,对外依赖度已超过80%,严重影响了我国核工业的可持续发展^[2]。可见,如何有效提高低渗透砂岩铀矿储层的渗透性已成为我国千吨级铀矿基地建设的核心技术。

为改善低渗透砂岩铀矿储层的渗透性,TAN^[7]、刘玉龙等^[8]通过柱浸试验表明,在浸出液中加入不同浓度的表面活性剂可使含矿层的渗透系数提高42.7%~88.6%。杜志明等^[9]研究表明,15 kW大功率超声波解堵增渗技术对砂岩铀矿抽注孔具有解堵增渗作用,可以改善地层的渗透性和联通性。王伟等^[10]提出了低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗方法,开展了低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗初步模型试验和优化模型试验及模型渗透性试验,发现爆破后模型渗透率由 4.62×10^{-5} D增加至0.002~0.086 D,提高了42~1 858倍。文献[7-8]采用化学方法改善了储层与溶浸液的侵水性,提高了溶浸液进入矿层的数量;文献[9]通过物理方法清除了铀矿层化学沉淀堵塞,从而改善了矿层渗透性;文献[10]通过爆生气体冲击波对矿层进行破坏,增加储层的裂隙含量,但由于砂岩铀矿储层特殊的水文地质条件及开采工艺要求,爆破瞬间释放能量大,可能会导致顶底板破坏,

形成优势流通道,因此亟需对低渗砂岩铀矿致裂增透技术进行研究。

液态CO₂相变致裂技术是利用CO₂瞬间受热气化膨胀,产生高压气体射流进行岩石致裂破碎的一种物理爆破方法,克服了以往用炸药爆破致裂存在的破坏性大、危险性高等缺点,已被广泛应用于低透煤层致裂增渗、临近建筑土石方开挖等工程^[11]。2014年,董庆祥等^[12]对Cardox系统进行了改进,提出了液态CO₂相变致裂增透技术,理论分析及现场实践验证了该技术的煤层致裂增透效果。近年来,张东明^[13-14]等建立了液态CO₂相变气体射流压力模型,分析了液态CO₂相变射孔破岩力学机理,提出了煤层液态CO₂相变定向射孔致裂优势方向判断方法。针对我国低渗砂岩型铀矿地浸高效开采需求,在前期低渗煤层液态CO₂相变致裂增透技术理论及应用研究的基础上,本研究提出了采用液态CO₂相变致裂技术进行低渗含铀砂岩储层改造增渗的技术模式,即利用液态CO₂相变致裂技术,在地浸采铀抽、注液孔之间产生大量的联通裂隙,增加溶浸液与铀矿石之间的接触面积,提高低渗透铀矿储层的渗流能力。在系统分析砂岩型铀矿地浸采铀技术现状、地浸开采渗透率的主要影响因素及现有处理技术的基础上,结合液态CO₂相变致裂技术原理,分析了该技术的TNT当量,根据爆破工程相关理论,计算了液态CO₂相变致裂技术影响半径。结合CO₂+O₂地浸开采工艺,提出了低渗砂岩型铀矿液态CO₂相变致裂增透地浸采铀技术流程,采用自主研发的液态CO₂相变致裂实验装置,开展了岩石试件致裂破坏试验,并进一步分析了该技术用于破岩致裂的可行性。

1 砂岩型铀矿CO₂+O₂地浸开采工艺及影响因素

1.1 地浸采铀技术概况

地浸采铀是在天然产状条件下,通过地表钻孔将溶浸液注入矿床,与矿石中的有用矿物发生化学反应,生成可溶性化合物在扩散、渗流作用下离开化学反应区,进入沿矿层渗透迁移的溶浸液^[15]。溶浸液经过矿层从另外的钻孔提升至地表,抽出后输送至回收车间进行离子交换等工艺处理,最后得到合格产品,地浸采铀工艺流程如图1所示。

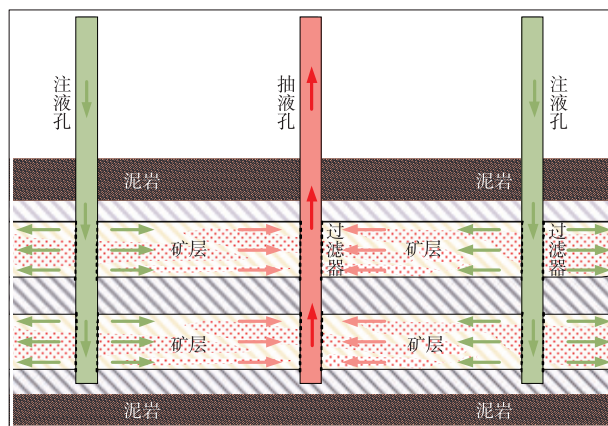


图 1 地浸采铀工艺方法示意

Fig. 1 Schematic of in-situ leaching uranium mining process

地浸采铀工艺可避免常规采矿方法中巷道开拓、回采、通风、矿石运输等复杂工序,具有流程简单、投资少、建设周期短、产品成本低、有利于环境保护和安全生产等优点。目前,常用的地浸采铀工艺主要有酸法地浸、碱法地浸、 CO_2+O_2 地浸。

(1)酸法地浸。酸法浸出是利用硫酸和铀能够发生化学反应的特性,使矿床中的铀溶解在含酸性溶浸液中成为浸出液。酸法地浸工艺溶浸液和铀矿石的化学反应剧烈,铀的浸出速度快、浓度高、周期短、回收率高。酸法地浸工艺的缺点为^[16]:①浸出液成分复杂,水冶难度大;②地下水污染风险大,修复困难;③仪器管路腐蚀严重。

(2)碱法地浸。碱法地浸利用 HCO_3^- 与六价铀反应生成易溶解络合物的原理,采用 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 NH_4HCO_3 等作为溶浸液^[17]。碱法地浸工艺比酸法浸出选择性好,Ca、Me、Fe、Al等元素在碱性浸出环境下很难溶解,碱性浸出液的腐蚀性较小。该工艺适用于碳酸盐含量较高的矿床,不足之处在于浸出率较低、浸出时间长。

(3) CO_2+O_2 地浸。 CO_2+O_2 地浸采铀工艺是在碱法地浸基础上发展起来的第三代铀矿采冶技术,是在自然埋藏条件下,通过注入 CO_2+O_2 溶浸液,将非溶性铀(IV)氧化为可溶铀(VI),形成络合阴离子,随浸出液抽出地表^[18]。由于 CO_2+O_2 地浸方法具有生产成本低、地下水污染风险低、腐蚀性较小、浸出液铀浓度稳定等优点,因此该工艺已成为国内外砂岩型铀矿的主要开采方式。

1.2 砂岩型铀矿 CO_2+O_2 地浸开采渗透率影响因素

CO_2+O_2 地浸开采渗透率的主要影响因素有^[3,6,10,16]矿层渗透性、化学沉淀堵塞等。

(1)矿层渗透性。 CO_2+O_2 地浸开采过程中,含铀矿层的渗透性是决定浸出效率的重要因素。受矿层矿物成分、孔隙结构、黏土及其他胶结物等因素影

响,含铀砂岩矿层多为低渗透性储层^[10]。以内蒙古某盆地含铀砂岩地浸开采远景区为例,该区域砂岩型铀矿矿物成分以石英、钾长石和钠长石为主,多为灰色疏松或次疏松结构,发育有以蒙脱石、绿泥石、高岭石等黏土矿物为主的孔隙式胶结,遇水后黏土矿物胶结物体积膨胀,严重降低了矿层的渗透性^[3,9-10]。孔径分析表明,该区域矿层孔隙度为15.5%~20.1%,孔喉半径为2.95~4.07 μm ,平均孔喉半径仅为3.45 μm ,因此矿层的低孔隙度、低孔喉分布也是造成渗透率低的因素之一。

(2)化学沉淀堵塞。 CO_2+O_2 地浸开采过程中化学沉淀主要受浸出过程中溶浸液与矿层中的矿物质一系列化学反应影响。由于含铀砂岩矿层中分布大量碳酸盐矿物质, CO_2+O_2 地浸开采过程中, CO_2 与碳酸盐反应生成 HCO_3^- 的同时,也产生了大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子,在矿层中形成钙、镁沉淀,堵塞矿层中溶浸液运移通道^[16,19]。另一方面,矿层中黄铁矿与氧化剂 O_2 反应生成铁离子,在一定的酸性条件下水解形成氢氧化铁沉淀,堵塞孔隙。由此可见,化学沉淀会堵塞矿层孔隙,减少溶浸液运移通道,严重影响矿层的渗透性,从而影响了地浸开采效率。

1.3 提高 CO_2+O_2 地浸开采砂岩渗透性的方法

(1)堵塞产生。抑制堵塞产生主要的措施有^[16]:①合理控制 CO_2 、 O_2 用量,控制矿层中碳酸钙、硫酸钙、氢氧化铁沉淀。但此方法在应用过程中会降低氧化剂氧化铀的效率,影响浸出铀的效率。②降低钙镁离子浓度,采用阳离子交换树脂来降低 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的浓度,减少化学沉淀。该方法的不足为,长时间离子吸附后,会增加地下水中其他离子浓度,引起黏土膨胀问题。③降低矿化度,通过向矿层注入淡水,控制溶浸液pH值,降低碳酸钙沉淀,但对于淡水缺乏的我国北方地区,此方法不适用。

(2)钻孔洗井。在 CO_2+O_2 地浸开采过程中,在化学反应作用下,产生的沉淀不断积累,会造成矿床渗透率降低。以往的钻孔洗井技术是采用强酸浸泡洗孔,但由于强酸作用下会对矿层产生二次伤害,如产生水锁效应、铁离子沉淀、黏土膨胀等问题。目前常用的钻孔洗井解堵方法是利用表面活性剂作为前置液,盐酸为主酸与其他各类添加剂配置形成综合解堵剂,预防铁离子沉淀,并防止黏土矿物膨胀^[7-8]。

(3)深孔爆破。深孔爆破增透技术已在煤层气、石油开采领域进行了广泛应用,但在低渗砂岩型铀矿增透方面还处于试验研究阶段^[10]。该技术原理为利用爆破产生的爆炸冲击波使得岩体产生裂纹,利用微差爆破产生大反射拉伸波场,使得破坏裂隙进

一步破碎;且爆破生成的高温高压气体进入岩体致裂裂隙,在应力集中作用下,裂纹尖端持续扩展,使得微裂隙贯通形成联通裂隙,从而提高低渗透矿层的渗透性^[10]。该技术应用过程中由于释放能量大,会导致矿层顶底板隔水层破坏,造成溶浸液渗透进入地下水,造成水体污染,因此目前该技术还处于理论研究阶段,尚未在铀矿地浸开采中进行工业应用。

2 低渗砂岩型铀矿液态CO₂相变致裂增透原理及影响半径

2.1 液态CO₂相变致裂技术原理

液态CO₂相变致裂器主要由释放管、储液管、定压破裂片、加热器、通缆钻杆、封孔器及其他配件组成(图2)。其中,储液管直径为150 mm,长度为1 100 mm;破裂片阈值为276 MPa。该技术的原理为:将内含液态CO₂、发热器的致裂器置于低渗砂岩型铀矿储层,接通电流启动加热器,管内CO₂迅速从液态转化为气态,使其压力剧增,高压液态CO₂冲破定压剪切片迅速转化为气态,体积膨胀600多倍^[11];高压CO₂气体通过释放管的排放孔,形成高压CO₂气体射流,作用于孔壁,使砂岩型铀矿储层产生张拉裂隙,致使储层破碎。

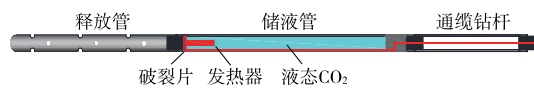


图2 液态CO₂相变致裂器结构示意图

Fig. 2 Schematic of L-CO₂ phase change cracker structure

2.2 液态CO₂相变致裂当量理论计算

根据液态CO₂相变致裂技术原理可知,该技术是一个物理变化过程,该过程所释放的能量主要与气体压力、容器容积以及介质在容器内的相态有关。目前对于介质全部为液体、液化气体与高温饱和水、压缩气体3种物理状态的相变爆炸能量计算方法较为常用^[12]。在液态CO₂相变致裂过程中,储液管内液态CO₂瞬间受热膨胀,处于压缩气体状态,当其压力大于定压破裂片额定压力后,产生相变爆炸,忽略液态CO₂受热气化过程做功,由压缩气体相变爆炸能量计算方法得到液态CO₂相变致裂器释放的爆破能量为^[12]

$$E_g = \frac{p \cdot V}{k-1} \left[1 - \frac{0.1013 \frac{k-1}{k}}{p} \right] \times 10^3, \quad (1)$$

式中, E_g 为气体的爆破能量,kJ; V 为容器的容积,m³; p 为容器内绝对压力,MPa; k 为绝热系数,液态二氧化碳气体 $k=1.295$ 。

本研究使用的定压泄能片的破裂压约276 MPa,储液管的容积约4.99 L(储液管内径为76 mm,长度

为1.1 m),能够启动致裂的装液量约1.46 kg。利用式(1)计算的液态CO₂相变致裂装置释放的能量近似为4 658.67 kJ。

液态CO₂相变致裂技术的TNT当量 W_{TNT} 可进行如下计算:

$$W_{TNT} = E_g / Q_{TNT}, \quad (2)$$

式中, Q_{TNT} 为1 kg TNT炸药的爆炸能,取4 250 kJ/kg。

经式(2)计算,该型储液管的致裂当量为1.10 kg TNT。

2.3 液态CO₂相变致裂影响半径理论计算

2.3.1 液态CO₂相变致裂裂隙区形成过程

孔内液态CO₂相变致裂器启动后,相变膨胀形成高压气体冲击波,直接作用在砂岩铀矿孔壁上,使得砂岩铀矿破裂形成预裂破碎区。之后,冲击波经过衰减,能量不断减小,高压气体进入破碎裂隙及原生裂隙,使得破碎区尖端裂纹继续扩展,形成交叉裂隙网,即裂隙区,整个过程如图3所示。

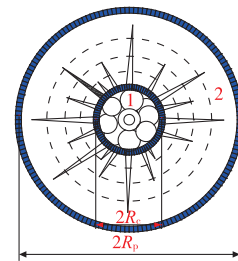


图3 钻孔围岩裂隙发育示意图

Fig. 3 Schematic of fracture development around hole

R_c —破碎区半径; R_r —裂隙区半径; 1—破碎区; 2—裂隙区

2.3.2 液态CO₂相变致裂裂隙区半径理论分析

由上述分析可知:液态CO₂相变致裂TNT当量为1.10 kg,致裂器长度为2.7 m,直径150 mm,钻孔直径210 mm。本研究将液态CO₂相变致裂等效为TNT孔内爆炸,根据炸药爆破工程中不耦合装药条件下的相关理论进行致裂裂隙区半径计算。

(1)破粉碎区半径。液态CO₂相变致裂器在孔内启动后,会在孔内形成高压气体冲击波。由于冲击波的强度远大于孔壁砂岩铀矿岩体的抗压强度,岩体将被强烈压缩粉碎,形成压碎圈。根据TNT当量计算结果,结合弹性力学及断裂力学相关理论,可以得到破碎区半径为^[20]

$$R_c = \left(\frac{\rho_0 \cdot D^2 \cdot n \cdot K^{-2\gamma} \cdot l_e \cdot B}{8\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{1/\alpha} \cdot d_b, \quad (3)$$

$$B = \left[(1+b)^2 - 2\mu_d(1-b)^2 \cdot (1-\mu_d) + (1+b)^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

式中, R_c 为破碎区半径,m; ρ_0 为等效装药密度,根据

TNT 当量与致裂器封孔器隔断部分钻孔空间体积计算得到,取 15.12 kg/m^3 ; D 为 TNT 爆速,取 $3\ 600 \text{ m/s}$; n 为爆轰产物碰撞炮孔壁的压力增大系数,取 10; K 为装药径向不耦合系数, $K = d_b/d_c$; d_c 为致裂器直径,取 0.15 m ; d_b 为钻孔直径,取 0.21 m ; γ 为膨胀绝热指数,取 1.29; l_e 为装药轴向不耦合系数,取 0.53; α 为载荷传播衰减指数, $\alpha = 2 + \mu_d/(1 - \mu_d)$; μ_d 为砂岩铀矿岩体动态泊松比,取 0.16; σ_{cd} 为砂岩铀矿岩体动态抗压强度,取 21 MPa ; b 为侧向应力系数, $b = \mu_d/(1 - \mu_d)$ 。

(2) 裂隙区半径。液态 CO_2 相变膨胀产生的冲击波在传递过程中逐渐衰减。衰减后的高压气体对孔壁围岩产生切向拉伸作用,当切向拉伸强度大于岩体抗拉强度时,产生的径向裂隙区半径为^[20]

$$R_p = \left(\frac{\sigma_R \cdot B}{\sqrt{2} \sigma_{td}} \right)^{1/\beta} \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot D^2 \cdot n \cdot K^{-2\gamma} \cdot l_e \cdot B}{8\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{1/\alpha} \cdot d_b, \quad (5)$$

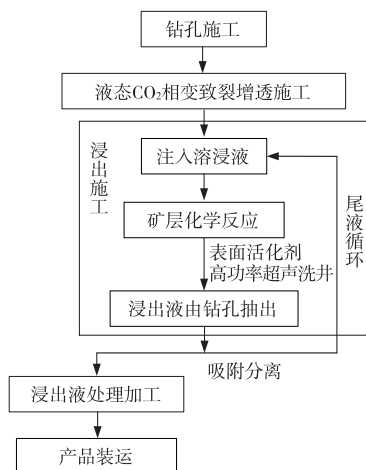
式中, σ_R 为径向应力, MPa , $\sigma_R = \sqrt{2} \sigma_{cd}/B$; σ_{td} 为砂岩铀矿岩体的动态抗拉强度, 5 MPa ; β 为应力波向外传播的衰减指数, $\beta = 2 - \mu_d/(1 - \mu_d)$ 。

根据式(3)、式(5)计算的液态 CO_2 相变致裂破粉碎区半径 $R_c=0.28 \text{ m}$, 裂隙区半径 $R_p=6.25 \text{ m}$, 故液态 CO_2 相变致裂影响半径 R 为 6.53 m 。

3 低渗砂岩型铀矿液态 CO_2 相变致裂增透技术特征

3.1 技术优势及工艺流程

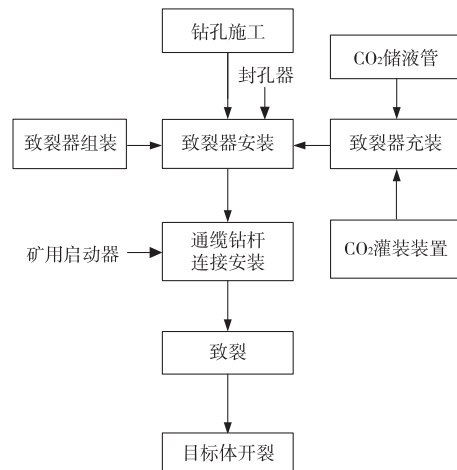
CO_2+O_2 地浸采铀工艺流程主要分为^[3,6]: ① 钻孔



(a) 工艺流程

施工; ② 将配制的溶浸液通过注液孔注入矿层; ③ 溶浸液在矿层中渗透运移, 与铀矿物发生化学反应; ④ 浸出液通过抽液钻孔抽出地表。在上述工艺流程中, 影响 CO_2+O_2 地浸采铀效率的主要是流程③, 主要影响因素为含铀砂岩渗透率、溶浸过程中产生的化学沉淀堵塞。目前的增透技术主要针对化学沉淀堵塞进行处理^[16,19], 如抑制堵塞产生、钻孔洗井等技术, 但该类技术无法有效提高矿层本身的渗透率。深孔爆破增透技术虽然具有一定的应用前景^[10], 但由于炸药爆破释放能量大, 不仅会对矿层顶底板、钻孔产生一定程度的破坏, 而且易造成溶浸液渗漏, 污染地下水环境。

液态 CO_2 相变致裂技术与深孔爆破相比, 属于物理爆破范畴, 其运输、储存和使用可避免火工品管制带来的繁琐审批流程, 无需验炮、操作简便, 被广泛应用于煤层气开采、料仓清堵、土石方开挖等工程, 因此可将其应用于低渗透性砂岩铀矿增透。本研究提出的低渗砂岩型铀矿液态 CO_2 相变致裂增透技术, 是在 CO_2+O_2 地浸开采工艺的基础上, 增加液态 CO_2 相变致裂增透施工过程, 即在注液孔和抽液孔施工完毕后, 将液态 CO_2 相变致裂器安装进入目标矿层, 启动致裂器, 在高压气体作用下使孔壁产生破坏裂隙, 其施工工艺流程如图 4(a) 所示, 具体的液态 CO_2 相变致裂增透施工过程如图 4(b) 所示。该技术主要产物为 CO_2 , 进入矿层可参与溶浸液 pH 调节, 因此可与现有的 CO_2+O_2 地浸开采工艺协同实现低渗砂岩型铀矿高效开采。



(b) 液态 CO_2 相变致裂增透施工过程

图 4 低渗砂岩型铀矿液态 CO_2 相变致裂增透地浸采铀技术原理

Fig. 4 Technical principle of low permeability sandstone-type uranium deposit with L- CO_2 phase transition fracturing

孔距为 20 m 的 7 点型网状钻孔布置及其致裂增透效果如图 5 所示。由上述理论计算可知液态 CO_2

相变致裂增透影响半径为 6.53 m , 即在注液孔及抽液孔周围 6.53 m 范围内产生裂隙区, 增加溶浸液在该区

域内的渗漏速度及与矿体的接触面积,可加快铀矿与溶浸液的反应速度。为了避免注液孔与抽液孔之间形成连通裂隙,产生优势流通道,造成溶浸液渗流速度过快,不利于铀矿溶浸反应,在相邻注液孔、抽液孔之间分别保留至少6.94 m、7.52 m的原始渗流区域,使得含铀溶浸液在压差作用下由注液孔向抽液孔渗流。

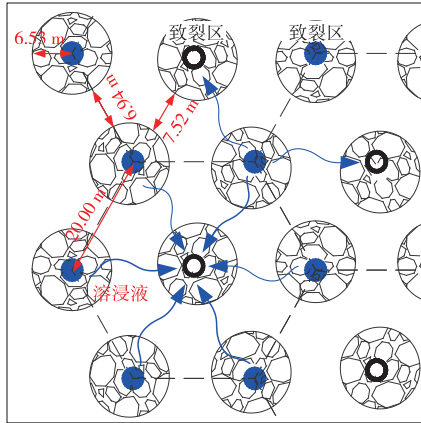


图5 钻孔布置及致裂效果示意

Fig. 5 Schematic of drilling layout and cracking effect

●—注液孔; ○—抽液孔

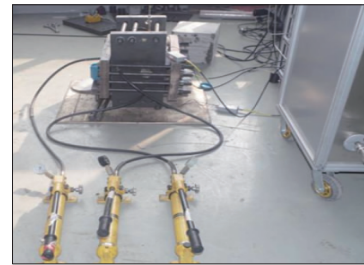
3.2 破岩致裂

为深入分析液态CO₂相变致裂技术的致裂破岩效果,研发了液态CO₂相变致裂实验装置^[11],如图6所示。该系统主要由液态CO₂相变致裂系统、三轴加载系统、测试系统、数据采集系统等组成,结合声发射监测系统,开展了地应力条件下含铀砂岩液态CO₂相变致裂试验研究,采用尾矿砂、石膏、水泥按照5:1:3比例,浇筑制备成边长200 mm的立方体相似材料试件,干燥后保存备用。

试验过程中,为模拟地层三维应力状态,将 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 均设置为4.5 MPa,试验系统内CO₂初始压力设



(a) 实验装置

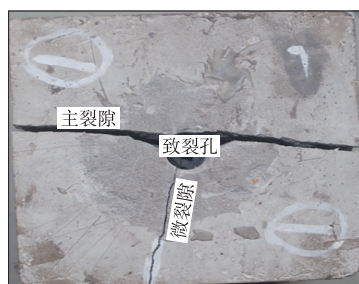


(b) 三轴加载系统

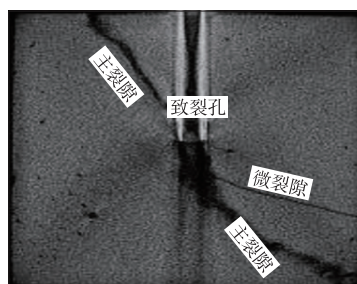
图6 液态CO₂相变致裂实验装置

Fig. 6 Liquid CO₂ phase transition rock cracking experiment device

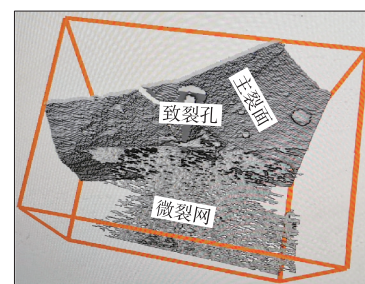
置为14 MPa,得到该条件下试件破坏形态如图7(a)所示。由该图可以看出,液态CO₂相变致裂后,致裂孔周边产生明显的致裂裂隙,结合CT层析扫描结果(图7(b)和图7(c)),可以看出岩石试件由致裂孔处产生的主裂隙已完全贯通试件,在致裂孔附近还有部分微裂隙产生,且微裂隙联通形成裂隙网络,表明液态CO₂相变致裂技术能够实现三维应力条件下岩体致裂破坏,能够有效增加岩体损伤裂隙网络分布。故该技术应用于低渗砂岩型铀矿进行矿层致裂,可有效增加其联通裂隙数量,提高溶浸液在矿层中的渗透率,增加溶浸液与矿层的接触面积,实现低渗砂岩型铀矿的高效开采。



(a) 表面裂隙分布



(b) CT测试所得剖面裂隙分布



(c) 三维裂隙重构结果

图7 液态CO₂相变致裂岩石破坏形态及内部裂隙分布

Fig. 7 Fracture mode and internal fracture distribution of L-CO₂ phase transition fractured rock

3.3 降低化学沉淀

由上述分析可知,化学沉淀堵塞之所以会降低CO₂+O₂地浸开采过程矿层渗透率,主要是因为产生了Ca(Mg)CO₃沉淀。目前预测Ca(Mg)CO₃沉淀的主要方法为Stiff & Davis饱和指数法,计算公式为^[21]

$$SI = \lg[w(\text{Ca}^{2+})] + \lg[w(\text{HCO}_3^-)] + \text{pH} - 1.85, \quad (6)$$

式中:SI为饱和指数; $\lg[w(\text{Ca}^{2+})]$ 为Ca²⁺离子浓度的对数值; $\lg[w(\text{HCO}_3^-)]$ 为HCO₃⁻离子浓度的对数值;pH为溶液pH值。当SI=0时,Ca(Mg)CO₃处于溶解平衡状

态,不产生沉淀;当 $SI > 0$ 时;地下水呈过饱和状态, $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 析出产生沉淀,且 SI 越大沉淀量越大;当 $SI < 0$ 时,地下水呈不饱和状态,不会产生沉淀。

结合式(6)进一步分析可知: $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 沉淀产生的主要因素为地下水中 Ca^{2+} 浓度、 Mg^{2+} 浓度、 HCO_3^- 浓度与pH值。地下水中, Ca^{2+} 浓度、 Mg^{2+} 浓度、pH值增加,形成 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 沉淀的倾向性增加;溶液中pH值减小,形成 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 沉淀的倾向性减小。因此,在地浸开采过程中如果发生 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 沉淀,通过改变 Ca^{2+} 浓度、 Mg^{2+} 浓度、 HCO_3^- 浓度与pH值,可使沉淀的 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 再次溶解。采用液态 CO_2 相变致裂技术进行低渗砂岩铀矿床增透过程中,产生的 CO_2 气体进入矿床,降低了地下水pH值,增加了地下水中 HCO_3^- 浓度,可在一定程度上溶解部分 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ 沉淀,避免化学沉淀堵塞降低矿层渗透率。

3.4 经济性

在实际生产过程中,砂岩型铀矿的渗透率不仅影响地浸开采效率,而且对钻孔间距会产生重要影响^[22]。对于渗透性较好的矿层,在地浸开采过程中可以适当增加钻孔间距。地浸采铀过程中,钻孔施工基建费用一般占地浸产品成本的30%。因此采用液态 CO_2 相变致裂技术进行低渗砂岩型铀矿增透,不仅可以提高溶浸液渗流速度,还可以减少钻孔施工量,有助于降低生产成本,经济性较显著。

4 结 论

(1)针对我国低渗透性砂岩型铀矿在地浸开采中存在的浸出困难技术难题,提出了低渗砂岩型铀矿液态 CO_2 相变致裂增透高效开采技术模式,采用理论方法计算了液态 CO_2 相变致裂影响半径,建立了液态 CO_2 相变致裂增透地浸开采流程,系统进行了低渗砂岩型铀矿液态 CO_2 相变致裂增透高效开采技术特征研究。研究成果对今后突破低渗透性砂岩铀矿地浸浸出率低的难题具有重要的意义。

(2)理论分析得到液态 CO_2 相变致裂器TNT当量为1.10 kg,其致裂影响半径为6.53 m。试验及分析表明:该技术能够实现三维应力条件下岩体致裂破坏,能够有效增加岩体损伤裂隙网络分布,具有破岩致裂增透、降低化学沉淀的技术特点。

(3)低渗砂岩型铀矿液态 CO_2 相变致裂增透是复杂的系统工程,本研究仅对该方法破岩致裂、降低化学沉淀及经济可行性进行了初步研究,有关该技术的致裂破岩裂隙演化及分布规律、增透效果参数及其持久性等关键科学问题还需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 李开文. 论中国铀资源发展潜力及天然铀工艺技术发展水平[J]. 金属矿山, 2009(S1): 13-23.
LI Kaiwen. On development potential of uranium resources and the technology level of natural uranium[J]. Metal Mine, 2009(S1): 13-23.
- [2] International Atomic Energy Agency. Uranium 2020: Resources, Production and Demand [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020.
- [3] 阙为民. 内蒙古某砂岩铀矿床地浸开采矿石敏感性评价[J]. 金属矿山, 2006(9): 25-28.
QUE Weimin. On Evaluation of ore Sensitivities in in-situ leaching in certain sandstone uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Metal Mine, 2006(9): 25-28.
- [4] 苏学斌, 胥建军. 中国铀矿山绿色安全的现状与发展思路[J]. 铀矿冶, 2017, 36(2): 119-125.
SU Xuebin, XU Jianjun. The present situation and ideas on development of green security uranium mine in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(2): 119-125.
- [5] 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1194—2005 地浸砂岩型铀矿水文地质勘查规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense (COSTIND). EJ/T 1194—2005 Exploration Specification on In-situ Leaching Sandstone Type Uranium Deposits [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense (COSTIND), 2005.
- [6] 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 Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79-83.
- [7] TAN K X, LI C G, LIU J, et al. A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits[J]. Hydrometallurgy, 2014, 150: 99-106.
- [8] 刘玉龙, 谭凯旋, 胡鄂明, 等. 表面活性剂在硬岩型铀矿石浸出中试验研究[J]. 金属矿山, 2008(1): 32-35.
LIU Yulong, TAN Kaixuan, HU Eming, et al. Experimental research on surfactant in leaching of hard rock type uranium ore[J]. Metal Mine, 2008(1): 32-35.
- [9] 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(S2): 344-347.
DU Zhiming, LIAO Wensheng, ZHAO Shushan, 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(S2): 344-347.
- [10] 王伟, 李小春, 袁维, 等. 低渗透砂岩型铀矿床爆破增透模型试验及增透机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1609-1617.
WANG Wei, LI Xiaochun, YUAN Wei, et al. Model test and mechanism study of the blasting-enhanced permeability of sandstone-type uranium deposits of low-permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1609-1617.

- [11] 白鑫,张东明,王艳,等.液态CO₂相变射流压力变化及其煤岩致裂规律[J].中国矿业大学学报,2020,49(4):661-670.
BAI Xin, ZHANG Dongming, WANG Yan, et al. Pressure variation and coal fracturing law of liquid CO₂ phase transition jet[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2020, 49(4): 661-670.
- [12] 董庆祥,王兆丰,韩亚北.液态CO₂相变致裂的TNT当量研究[J].中国安全科学学报,2014,24(11):84-88.
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [13] 张东明,白鑫,尹光志,等.低渗煤层液态CO₂相变定向射孔致裂增透技术及应用[J].煤炭学报,2018,43(7):1938-1950.
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO₂ phase change directional jet fracturing in low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1938-1950.
- [14] BAI X, ZHANG D M, ZENG S, et al. An enhanced coalbed methane recovery technique based on CO₂ phase transition jet coal-breaking behavior [J]. Fuel, 2020, 265: 1-11.
- [15] 刘金辉,孙占学,周义朋,等.适合十红滩铀矿床地浸采铀的水文地球化学条件[J].金属矿山,2010(3):77-79.
LIU Jinhui, SUN Zhanxue, ZHOU Yipeng, et al. Hydrogeochemical conditions of in-situ leaching uranium exploration for Shihongtan Deposit[J]. Metal Mine, 2010(3): 77-79.
- [16] 严佳龙,吴爱祥,王洪江,等.酸法堆浸中矿石结垢及防垢机理研究[J].金属矿山,2010(10):68-71.
YAN Jialong, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Mechanism of incrustation and anti-incrustation during acidic leaching process [J]. Metal Mine, 2010(10): 68-71.
- [17] 史文革,梁建龙,蔡萍莉,等.江西某铀矿石室内碱法浸出试验研究[J].金属矿山,2005(2):39-41.
SHI Wenge, LIANG Jianlong, CAI Pingli, et al. Indoor test on alkaline leaching of a Jiangxi uranium ore[J]. Metal Mine, 2005(2): 39-41.
- [18] 张青林,丁德馨.某砂岩铀矿石CO₂+O₂柱浸试验[J].有色金属(冶炼部分),2017(8):35-39.
ZHANG Qinglin, DING Dexin. CO₂ + O₂ column leaching test of sandstone type uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(8): 35-39.
- [19] 廖文胜,王立民,姚益轩,等.某低渗透砂岩铀矿层渗透性能损害因素分析[J].金属矿山,2009(S1):305-310,323.
LIAO Wensheng, WANG Limin, YAO Yixuan, et al. Impact factors of permeability of low permeable sandstone uranium deposits [J]. Metal Mine, 2009(S1):305-310, 323.
- [20] 彭世龙,饶孜,江浩,等.高突矿井深孔预裂爆破瓦斯“零”超限技术[J].煤矿安全,2017,48(5):84-88.
PENG Shilong, RAO Zi, JIANG Hao, et al. Gas zero overrun technique in high gas outburst mine by deep-hole pre-splitting blasting [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5):84-88.
- [21] 原渊,江国平,廖天伟,等.地浸采铀碳酸钙结垢主要影响因素研究[J].中国矿业,2019,28(11):128-130.
YUAN Yuan, JIANG Guoping, LIAO Tianwei, et al. Research on main influence factors on calcium carbonate scaling of in-situ leaching process[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11):128-130.
- [22] 王成.可地浸砂岩型铀矿技术经济评价方法的研究[J].新疆地质,2002,20(2):146-148.
WANG Cheng. Study on method of technical-economic evaluation for in-situ leachable sandstone-type uranium deposit [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(2):146-148.