

水力喷射对地浸采铀套管冲击效果研究

李宏星¹, 侯代稳¹, 李召坤¹, 徐 腾², 刘双民¹, 谢婷婷¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 湖南中核勘探有限责任公司, 湖南 长沙 410024)

摘要: 探讨水力喷砂射孔对不同材质套管的冲击影响及玻璃钢套管在地浸采铀中的应用前景。以 UPVC 套管和玻璃钢套管为研究对象, 在喷枪和喷嘴布置方式相同的条件下, 使用水砂比为 10%~15% 磨料悬浮液, 进行可靠性试验。通过改变喷射压力和时间, 分析套管的射穿情况和内壁变形情况。结果表明, 在一定压力下, 玻璃钢套管可以被射穿并形成满足水量要求的射孔; 与 UPVC 套管相比, 玻璃钢套管具有更好的耐高压性能, 能满足水力压裂技术对套管抗压的需求, 在地浸开采领域具有较好的应用前景。

关键词: 低渗透; 铀矿; 地浸采铀; 玻璃钢套管; 水力喷砂

中图分类号: TL212; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0081-05

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.04.20

目前, 地浸采铀工艺钻孔主要采用 UPVC 套管, 该类型套管不耐高压^[1]。近年来, 发现了一批储量可观的低渗透砂岩型铀矿, 该类铀矿渗透性低、浸出剂注入困难^[2-4], 采用常规地浸开采方法难以实现经济有效开采。为满足核能资源发展对铀矿资源的战略需求, 亟需开展低渗透砂岩型铀矿开发技术研究。水力压裂技术施工压力高, 对套管抗压要求高, 通过水力压裂技术进行储层改造可有效改善储层渗流条件, 提高渗透性。但中国地浸铀矿山还没有应用耐高压套管的成熟经验^[5]。

玻璃钢套管抗高压、耐腐蚀性强^[6], 但针对通过现有水力喷砂射孔技术能否建立渗流通道并保证射孔尺寸满足水量要求的研究还不完善^[7-10]。为了验证玻璃钢套管的性能及其在地浸采铀领域的应用前景, 进行水力喷砂射孔对 UPVC 和玻璃钢 2 种套管的冲击效果研究, 并分析水力喷砂技术对 2 种材料套管的穿透性及形成不同尺寸射孔对应的压力。

1 水力喷砂射孔机制及研究现状

水力喷砂射孔技术是在高速流动的水中掺入砂砾磨料, 利用水流的高速流动带动磨料冲击套管, 射穿水泥环, 并在地层岩石中形成具有一定深

度的孔眼, 从而在井筒与矿层之间形成渗流通道。塑性材料的破坏形式是在剪应力作用下的塑性破坏, 当水力喷砂的作用力超过塑性套管材料的屈服极限时, 会射穿塑性材料套管; 水力喷射压力 and 作用时间不同, 套管的射穿情况和内壁变形情况也不同^[11]。

20 世纪 80 年代, 水力喷砂射孔技术在美国迅速发展^[12]。目前, 该技术在中国也完成了现场工程试验^[13], 水力喷砂射孔技术在长庆油田与西南油气田的应用取得了较好的效果^[14-15]。采用室内试验和数值模拟相结合的方法研究水力喷砂射孔技术, 优化了施工参数, 为该技术的现场应用奠定了理论基础^[16-17]。研究表明, 该技术可以形成有效的渗流通道, 但存在喷枪易堵塞, 反溅冲蚀严重等问题^[18-19]。通过设计套管井喷砂射孔器, 可缓解反溅冲蚀问题^[20]。目前, 水力喷砂射孔技术在石油行业的应用已较为成熟^[21-22], 但在铀矿开采行业还未进行大规模应用。

2 试验部分

2.1 试验目的

1) 通过地面试验装置模拟实际地浸采铀井下水力喷砂作业, 研究水力喷砂对 UPVC 套管和玻璃钢套管的冲击效果, 观察水力喷砂作业是否能

收稿日期: 2025-04-28

第一作者简介: 李宏星(1982—), 男, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地浸采铀技术研究工作。

射穿玻璃钢套管及其变形情况,为成井套管选择提供依据;2)利用地面试验装置,通过改变水力喷砂射孔压力和作用时间,研究玻璃钢套管和UPVC套管在试验条件下的射穿和内壁变形情况,为水力喷砂射孔施工参数优化提供依据。

2.2 试验内容

按照现场施工参数和设计的作业程序进行水力喷砂射孔地面模拟试验。以UPVC套管和玻璃钢套管作为水力喷砂射孔靶件,用 $\phi 115$ mm的喷枪(带有 $\phi 3.2$ mm的喷嘴)作为喷射工具,按照射孔泵注程序,对UPVC套管和玻璃钢套管分别进行水力喷砂射孔,通过改变射孔压力和作用时间,观察不同套管材料射穿的孔径尺寸及内部变形情况。

2.3 试验材料及工具准备

选取UPVC套管和玻璃钢套管用于水力喷砂射孔试验。UPVC套管内径125 mm,外径152 mm,壁厚13.5 mm,长1 000 mm,UPVC套管的短时失效压力为6 MPa,拉伸强度大于118 kN;玻璃钢套管内径125 mm,外径143.6 mm,壁厚9.3 mm,长1 000 mm,玻璃钢套管的短时失效压力为29 MPa,拉伸强度大于502 kN;生产厂商为胜利新大新材料公司。

$\phi 115$ mm射孔枪配有3个 120° 圆周均匀分布的喷嘴,喷嘴直径为3.2 mm。喷砂射孔所用液体为水砂比10%~15%的磨料悬浮液,在自来水中加入40目(0.425 mm)的石英砂配制磨料悬浮液。

2.4 试验装置及试验条件

试验装置由悬浮液槽、高压泵、射孔枪、套管、井壁、固定架组成(图1)。先将套管放入在地面预设的井中,并用固定架固定,以避免在喷砂射孔过程中套管发生晃动;再把与高压泵连接的射孔枪放入套管中,通过高压泵来控制喷砂射孔的压力,此时悬浮液槽中的液体便会经高压泵进入射孔枪,充当射孔流体。为了更好地模拟现场实际情况,试验中采用了与实际施工一致的喷砂射孔工具及喷嘴分布方式、试验施工参数、泵入程序,以及套管尺寸等。

套管放在井壁中间,距井壁10 cm,井壁是用水泥作为主要材料,通过人工方式建造。抗拉强度1.94 MPa,泊松比0.24。以工作压力为变量,

UPVC套管和玻璃钢套管各做3组试验,记录射穿时间、射孔尺寸以及套管变形情况。以UPVC套管为例,试验过程中,用固定架将套管材料固定,当做完一组试验后将套管下放30 cm,再做第2组试验;以此类推,用同一根UPVC套管材料做完3组试验。水力喷砂射孔模拟参数见表1。

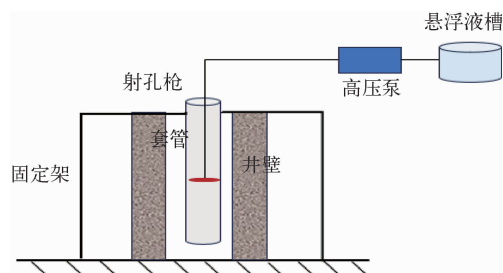


图1 地面模拟试验装置示意图

Fig. 1 Ground simulation experiment equipment diagram

表1 水力喷砂射孔模拟参数

Table 1 Hydroblasting shot hole simulation parameters

试验材料	试验序号	泵注排量/(L/min)	工作压力/MPa
UPVC 套管	1	150	17.0
	2	150	27.2
	3	150	46.6
玻璃钢套管	4	150	20.0
	5	150	21.6
	6	150	35.0

3 试验结果与分析

喷砂射孔试验后,玻璃钢套管喷砂射孔后的孔眼形状为椭圆状,在记录时以椭圆的长径作为射孔尺寸。套管射穿时间与射孔尺寸见表2。可以看出,对于UPVC套管,当压力为17.0 MPa时,10 s射穿,射穿孔径为5.55 mm;当压力为27.2 MPa时,5 s射穿,射穿孔径为6.37 mm;当压力为46.6 MPa时,3 s射穿,射穿孔径为7.47 mm。在所有测试条件下,UPVC套管的内壁均没有出现变形,即喷砂射孔不会导致UPVC套管发生缩径,没有射孔枪被卡的风险。对于玻璃钢套管,当工作压力为20.0 MPa时,20 s射穿,射穿孔呈椭圆状,长径为7.15 mm,短径为

5.60 mm;当工作压力为 21.6 MPa 时,18 s 射穿,射穿孔呈椭圆状,长径为 9.91 mm,短径为 7.36 mm;当工作压力为 35.0 MPa 时,11 s 射穿,射穿孔呈椭圆状,长径为 14.38 mm。在泵注排量不变的情况下,随着喷砂射孔压力的提高,射穿时间不断缩短,射孔尺寸会增大,但射孔时间与射孔尺寸的变化与喷射压力的变化不是线性关系。其中对于 UPVC 套管,当射孔压力平均提升 65%时,射穿时间平均降低 45%,射孔尺寸平均提高 16%;对于玻璃钢套管,当射孔压力平均提升 35%时,射穿时间平均降低 24%,射孔尺寸平均提高 41%。射孔压力的变化,对 UPVC 套管的射穿时间的影响大于对射孔尺寸的影响,对玻璃钢套管射孔尺寸的影响大于对射穿时间的影响。

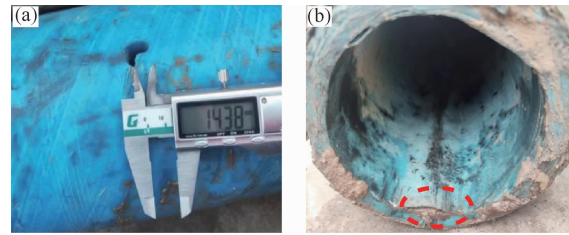
UPVC 套管的壁厚大于玻璃钢套管的壁厚。玻璃钢套管在 21.6 MPa 射孔压力下,需要 18 s 射穿,射孔尺寸为 9.91 mm;UPVC 套管材料在 17 MPa 射孔压力下,需要 10 s 射穿,射孔尺寸为 5.55 mm。可见,与 UPVC 套管相比,玻璃钢套管抗冲击性能更好,抗压强度更高。

在喷砂射孔后,玻璃钢套管的射孔呈不规则椭圆状,且玻璃钢套管的内壁产生了明显的条状轴向凸起变形(图 2),凸起宽度 45.27 mm、高度 11.37 mm、长度约 500 mm。玻璃钢套管内径为 125 mm,如果玻璃钢套管在轴向对称方向均出现凸起变形情况,则玻璃钢套管内径可能缩小至约 100 mm,从而破坏套管的完整性;此时喷枪外径(115 mm)会大于玻璃钢套管内径,存在套管卡住喷枪的风险。

表 2 水力喷砂射孔试验数据

Table 2 Experimental data of hydroblasting shot hole

试验材料	试验序号	工作压力/MPa	射穿时间/s	射孔尺寸/mm
UPVC 套管	1	17.0	10	5.55
	2	27.2	5	6.37
	3	46.6	3	7.47
玻璃钢套管	4	20.0	20	7.15
	5	21.6	18	9.91
	6	35.0	11	14.38



(a)工作压力 35.0 MPa;(b)凸起变形。

图 2 水力喷砂射孔对玻璃钢套管的冲击

Fig. 2 Impact of hydroblasting shot hole on fiberglass reinforced plastic casing

随着射孔压力的提高,射穿时间缩短,可减少磨料悬浮液在射孔枪中的流动时间,降低对射孔枪的磨损,从而在一定程度上延长水力喷砂射孔工具的使用寿命。

本试验模拟矿山实际射孔施工条件,试验结果较为可靠。借鉴试验结果,现场施工时可以根据射孔尺寸优化水力喷砂压力。此外,由于在地面模拟过程中没有进行固井,即井壁与套管之间处于环空状态,套管外部未受挤压,故实际工况下射穿时间会相应增加。

4 结论

1)水力喷砂对套管具有显著的冲击作用,在一定压力下,玻璃钢套管可以被射穿;随着喷砂射孔压力的提高,射孔尺寸变大,射穿时间缩短。不同材质的套管在相同条件下的射穿情况和内壁变形情况不同,UPVC 套管在试验条件下内壁未出现变形情况,而玻璃钢套管内壁产生了明显的条状轴向凸起变形,因此需要对玻璃钢套管材料的配比进行改进。

2)在使用常规喷枪安装 3 个 120°圆周均布喷嘴的情况下,玻璃钢套管内壁的变形可能会更严重,甚至可能破坏套管的完整性。由于喷枪的外径较大,存在套管卡住喷枪的风险,在实际操作中还需要注意喷枪与套管的匹配问题,避免出现卡住管柱等情况。

3)与 UPVC 套管相比,玻璃钢套管具有持续抗高压、耐腐蚀等优势性能,在一定射孔压力下可以被射穿,并与矿层形成渗流通道。因此,对于需要进行水力压裂储层改造的铀矿,选用玻璃钢套管更具优势。

参考文献:

- [1] 李宏星,侯代稳,原渊,等.地浸采铀高强度玻璃钢套管性能研究[J].铀矿冶,2025,35(1):1-7[2025-05-28].<https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2025.03.07>.
LI Hongxing, HOU Daiwen, YUAN Yuan, et al. Performance of high-strength glass fiber reinforced plastic casing for in-situ leaching uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 35(1): 1-7[2025-05-28]. <https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2025.03.07> (in Chinese).
- [2] 王伟,李小春.低渗透砂岩型铀矿床增渗方法及其可行性研究[J].岩土力学,2009,30(8):2309-2314.
WANG Wei, LI Xiaochun. Study of enhanced permeability methods and their feasibility in low-permeability sandstone-type uranium deposit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2309-2314 (in Chinese).
- [3] 卓锦沂.低渗透砂岩铀矿爆破增渗可改造性评价[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022:1-8.
- [4] 姜岩,廖文胜,江国平,等.某低渗透砂岩铀矿层渗流特征分析[J].铀矿冶,2016,35(1):31-38.
JIANG Yan, LIAO Wensheng, JIANG Guoping, et al. Analysis of seepage characteristics of one low permeable sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(1): 31-38 (in Chinese).
- [5] 刘建生.低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗数值模拟研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2014:1-2.
- [6] 丛科,李晓刚,刘英伟,等.玻璃钢套管在苏拉特盆地煤层气井的应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(12):106-108.
CONG Ke, LI Xiaogang, LIU Yingweng, et al. Application of FRP casing in coalbed methane wells in Surat Basin[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(12): 106-108 (in Chinese).
- [7] 冯定,马威,刘显,等.N80石油套管的冲击试验与分析[J].石油天然气学报,2013,35(10):158-160.
FENG Ding, MA Wei, LIU Xian, et al. Impact test and analysis of N80 oil casings[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(10): 158-160 (in Chinese).
- [8] 蔺卫平,李娜,张华佳,等.两种管材夏比冲击试验影响因素分析[J].石油管材与仪器,2019,5(6):16-18.
LIN Weiping, LI Na, ZHANG Huajia, et al. Influencing factors of two kinds of tubular goods Charpy impact test[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5(6): 16-18 (in Chinese).
- [9] 贾曦雨,王树山,马峰,等.射孔冲击相变对射孔套管抗挤性能的影响[J].石油学报,2017,38(3):348-355.
JIA Xiyu, WANG Shushan, MA Feng, et al. Influence of perforation shock-induced phase transformation on the collapsing strength of perforated casing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 348-355 (in Chinese).
- [10] 唐汝众,王同涛,闫相祯,等.射孔参数对套管强度影响的有限元分析[J].石油机械,2010,38(1):32-34.
TANG Ruzhong, WANG Tongtao, YAN Xiangzhen, et al. Finite element analysis of the effect of injection parameters on casing strength[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(1): 32-34 (in Chinese).
- [11] 麻慧博,罗天雨,刘亚明.水力喷砂射孔、压裂优化设计[J].新疆石油天然气,2012,8(S1):51-54.
MA Huibo, LUO Tianyu, LIU Yaming. Optimized design for hydraulic sandblasting injection and fracturing[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2012, 8(S1): 51-54 (in Chinese).
- [12] 庄伟.水力喷砂射孔理论与实验研究[D].北京:中国石油大学,2008.
- [13] 王步娥,舒晓晖,尚绪兰,等.水力喷射射孔技术研究与应用[J].石油钻探技术,2005,33(3):51-55.
WANG Bu'e, SHU Xiaojun, SHANG Xulan, et al. The study and application of the water-jet perforation technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(3): 51-55 (in Chinese).
- [14] 韩继勇,逢仁德,王书宝,等.水力喷射环空压裂技术在长庆油田的应用[J].钻采工艺,2015,38(1):48-50.
HAN Jiyong, PANG Rende, WANG Shubao, et al. Application of hydraulic jet annulus sand-filled fracturing technology in Changqing oil field[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1): 48-50 (in Chinese).
- [15] 吴成斌,方泽本,游韬,等.水力喷射环空压裂技术在合川区块的应用[J].油气井测试,2012,21(1):50-52.
WU Chengbin, FANG Zeben, YOU Tao, et al. Application of hydraulic jet annulus fracturing technology in Hechuan block[J]. Well Testing, 2012,

- 21(1):50-52(in Chinese).
- [16] 黄中伟,李根生,史怀忠,等.围压下磨料射流喷射套管及灰岩实验研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(6):85-90.
HUANG Zhongwei, LI Gensheng, SHI Huazhong, et al. Experimental study on abrasive water jet blasting casing and limestone under ambient pressures[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(6):85-90(in Chinese).
- [17] 李根生,牛继磊,刘泽凯,等.水力喷砂射孔机理试验研究[J].石油大学学报(自然科学版),2002,26(2):31-34.
LI Gensheng, NIU Jilei, LIU Zekai, et al. Experimental study on mechanisms of hydraulic sand blasting perforation for improvement of oil production[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2002, 26(2):31-34(in Chinese).
- [18] 袁玉,赵金,曹立虎,等.水力喷砂射孔技术在煤层气开发中的应用[J].煤炭科学技术,2016,44(5):68-74.
YUAN Yu, ZHAO Jin, CAO Lihu, et al. Application of hydraulic sand jetting perforation to coalbed methane development[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5):68-74(in Chinese).
- [19] 于永,杨彪,杜宝坛,等.水力喷砂射孔在油气田开发中的应用[J].特种油气藏,2002,9(4):56-58.
YU Yong, YANG Biao, DU Baotian, et al. Application of hydraulic jet perforation in oilfield development[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2002, 9(4):56-58(in Chinese).
- [20] 王大江,费成俊,刘军,等.一种套管井喷砂射孔器:CN204283372U[P].2015-04-18.
- [21] 艾娟,张海,李鹏勃,等.水力喷射分段压裂技术在靖边油田水平井中的应用[J].延安大学学报(自然科学版),2015,34(3):85-89.
AI Juan, ZHANG Hai, LI Pengbo, et al. Application of hydraulic jet staged fracturing technology in horizontal wells of Jingbian oilfield[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition), 2015, 34(3):85-89(in Chinese).
- [22] 王绪性,冯青,李湾湾,等.海上中低渗透层水力喷射压裂技术[J].油气井测试,2021,30(1):46-51.
WANG Xuxing, FENG Qing, LI Wanwan, et al. Hydraulic jet fracturing technology for offshore medium and low permeability reservoirs[J]. Well Testing, 2021, 30(1):46-51(in Chinese).

Impact Effect of Hydraulic Jetting on the Casing of In-situ Leaching Uranium

LI Hongxing¹, HOU Daiwen¹, LI Zhaokun¹, XU Teng², LIU Shuangmin¹, XIE Tingting¹

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;

2. Hunan China Nuclear Exploration Co., Ltd., Changsha 410024, China)

Abstract: This paper discusses the impact effect of hydroblasting shot hole on casing of different materials and the application prospect of FRP casing in in-situ leaching uranium. Taking UPVC material casing and FRP material casing as the research objects, under the condition of the same arrangement of spray gun and nozzle, the reliability test was carried out by using abrasive suspension with sand ratio of 10%~15%. By changing the spray pressure and time, the shot-through condition and inner wall deformation of the casing were analyzed. The results show that the FRP casing can be shot through and form shot holes to meet the water volume requirements under a certain pressure; compared with UPVC material, the FRP casing has better high-pressure resistance performance, which can satisfy the demand of hydraulic fracturing technology for casing pressure resistance, and it has a better application prospect in the field of in-situ leaching uranium.

Key words: low permeability; uranium mine; in-situ leaching uranium; fiberglass casing; hydroblasting