

地浸采铀高强度玻璃钢套管性能研究

李宏星, 侯代稳, 原 渊, 廖文胜, 杜志明, 邓锦勋

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 地浸采铀工艺套管需兼顾防腐性能和耐压性能。针对致密砂岩型铀矿床复杂的地质条件, 对比研究了UPVC、碳钢和玻璃钢三种材质套管的性能。研究表明, UPVC套管防腐性好, 但耐压性差; 碳钢套管耐压性好, 但易腐蚀且成本高; 玻璃钢套管防腐性、耐压性和拉伸强度优异。在固井质量方面, 玻璃钢套管、碳钢套管、UPVC套管与水泥的胶结强度分别为1.80、2.91、0.32 MPa, 玻璃钢套管与水泥的胶结强度表现出明显优势。玻璃钢套管是致密砂岩型铀矿床地浸采铀工艺的最佳选择, 能够满足防腐性能和耐压性能的双重要求, 可保障钻井质量和使用寿命。

关键词: 玻璃钢套管; 耐压性能; 防腐性能; 地浸采铀; UPVC套管

中图分类号: TD262.4; TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)03-0076-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.03.07

在地浸采铀工艺中, 钻井是地下流体自含矿层涌向地表的唯一通道^[1], 其质量至关重要, 成井工艺是确保地浸钻井质量的关键因素之一^[2]。目前, 地浸采铀工艺钻井主要采用UPVC材质套管^[3-4], 石油领域工艺钻井一般采用碳钢材质套管^[5]。

内蒙古地区致密砂岩型铀矿床具有低渗透、岩石致密坚硬、地下水氯离子含量高特征^[6], 需要采用压裂、高压注液等手段对含矿层进行改造; 套管材质既要满足压裂和高压注液等对耐压性能的要求, 又要满足高氯离子地下水对防腐性能的要求。不同材质的套管在防腐性能、耐压性能、塑性破坏等方面存在差异^[7-10]。因此, 需要针对致密砂岩型铀矿床对套管耐压性能和防腐性能的要求开展套管选材研究。

套管与水泥环的胶结强度是评价固井质量的关键参数, 不同材质套管的胶结强度不同。因此, 笔者对比了UPVC、碳钢、玻璃钢三种材质在化学性质、力学性质、固井质量方面的差异, 旨在优选适宜地浸采铀特殊作业(如射孔、压裂、高压注液、高氯离子地下水等)的高强度防腐套管材质。

1 套管材质基本性能

UPVC具有耐腐蚀性强、绝缘性好、重量轻

等优点^[11-12], 尤其是对酸、碱、盐等化学物质具有良好的耐腐蚀性^[13], 已成为地浸采铀工艺钻井套管的主要材料。但UPVC材料承压能力普遍较差, 一般在1.6 MPa以下^[14]; 且UPVC材料低温韧性差^[15], 在紫外线强光照射下易老化^[16]。

碳钢中含碳量越高, 硬度越大, 强度也越高, 但塑性越低^[17]。钢套管具有耐高温、耐高压、使用寿命长等优点, 适用于各种复杂地质条件。据研究, 油田用N80钢套管(规格为 $\phi 139.7 \text{ mm} \times 7.72 \text{ mm}$)的抗内压强度达53.37 MPa^[18]; 但钢套管易被腐蚀, 富含氧气、二氧化碳、高氯离子等条件影响其使用寿命^[19-20]。不锈钢材质在耐腐蚀方面具有优良特性, 但因其价格昂贵会大幅增加施工成本。

玻璃钢(GFRP)重量轻、强度高, 具有良好的耐腐蚀性、绝缘性能、耐候性、抗老化性等优点^[21-22]。玻璃钢的相对密度约为碳钢的1/4, 但其拉伸强度接近于碳钢^[23], 玻璃钢已被广泛应用于化学化工行业。玻璃钢可设计制造成各种形状和尺寸, 能够满足不同的工程需求^[24]。玻璃钢套管具有较好的耐磨性能^[25], 其内壁光滑, 流体摩擦阻力损失小^[26]。

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-04-18

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

2 不同套管的力学性能

由于碳钢材质套管的力学性能优异,远远高于目前地浸采铀钻孔对套管力学参数的要求,因此本研究仅对 UPVC、玻璃钢材质套管的力学性能进行对比测试。

2.1 短时失效压力

根据《流体输送用塑料管材液压瞬时爆破和耐压试验方法》(GB/T 15560)对 UPVC 套管开

展短时失效压力试验,根据《纤维增强热固性塑料管短时水压失效压力试验方法》(GB/T 5351)对玻璃钢套管开展短时失效压力试验,使套管试样处于水平状态,均匀、连续加压,直至试样失效。试验结果见表 1。试验表明,UPVC 套管、玻璃钢套管的短时失效压力分别平均为 6.24 MPa 和 28.60 MPa,玻璃钢套管的短时失效压力是 UPVC 套管的 4.58 倍,玻璃钢套管的耐压性能远高于 UPVC 套管的耐压性能。

表 1 UPVC 套管、玻璃钢套管的短时失效压力试验结果

Table 1 Short-term failure pressure test results of UPVC casing and GFRP casing

样品编号	套管材质	试样外径/mm	公称压力/MPa	检验温度/℃	失效压力/MPa	备注
1#	UPVC 套管	148.0	5	20	6.23	试样脆性破裂
2#	UPVC 套管	148.0	5	20	6.17	试样脆性破裂
3#	UPVC 套管	148.0	5	20	6.31	试样脆性破裂
4#	玻璃钢套管	152.8	10	23	28.90	管体渗漏失效
5#	玻璃钢套管	152.8	10	23	28.30	管体渗漏失效

2.2 拉伸强度

根据《热塑性塑料管材拉伸性能测定》(GB/T 8804.2)对 UPVC 套管开展拉伸强度试验,根据《纤维增强热固性塑料管轴向拉伸性能试

验方法》(GB/T 5349)对玻璃钢套管开展拉伸强度试验,将装好试样的夹持装置安装在试验机的两夹头间,均匀、连续加载,直至试样破坏,试验结果见表 2、图 1。

表 2 UPVC 套管、玻璃钢套管的拉伸强度试验结果

Table 2 Tensile strength test results of UPVC casing

样品编号	套管材质	试样外径/mm	试样内径/mm	破坏载荷/kN	备注
6#	UPVC 套管	148.0	143.0	124.07	管体破裂
7#	UPVC 套管	148.0	143.0	120.11	管体破裂
8#	UPVC 套管	148.0	143.0	109.78	管体破裂
9#	玻璃钢套管	152.8	137.5	501.78	夹具螺杆断裂,管体及螺纹完好

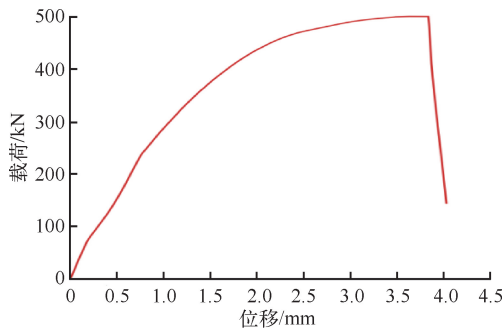


图 1 玻璃钢套管的拉伸强度试验曲线

Fig. 1 Tensile strength test curves of GFRP casing

试验过程中夹具螺杆断裂,试样管体、螺纹与钢接箍连接处均未失效。因此,玻璃钢套管的拉伸强度大于 501.78 kN。试验表明,UPVC 套管的拉伸强度为 117.99 kN,玻璃钢套管的拉伸强度约为 UPVC 套管的 4.25 倍,玻璃钢套管的拉伸强度远大于 UPVC 套管的拉伸强度。

3 不同套管的固井质量对比

固井质量的好坏直接关系到钻孔的使用寿命。在地浸采铀固井工艺中,套管和水泥环的接

触界面被称为第一胶结面。良好的第一胶结面胶结强度能够保证套管与水泥环之间的密封性能,可防止井内流体在套管和水泥环之间窜流,为后续的高压射孔、压裂、抽注液等工艺环节提供基础保障。不同材质的套管与水泥之间的胶结强度不同,可通过第一胶结面胶结强度试验来测试不同套管的固井质量。

在胶结强度试验中,采用同心双圆筒模拟钻孔,内环模拟套管,外环模拟地层,内外环之间装填水泥,内环外表面与水泥之间的界面模拟第一胶结面,使用力学万能试验机测试不同材质套管与固井水泥之间的胶结强度。

3.1 试样制备

将水灰比 1:1 的水泥混合物分别装填至不同材质套管的装置内,静置 72 h 后进行试验,试验套管的材质有 UPVC、光滑面玻璃钢、粗糙面玻璃钢、碳钢,对每种材质分别进行 3 次试验。不同材质套管与水泥胶结情况见图 2。

3.2 胶结强度试验

使用力学万能试验机对不同管材分别进行破坏力试验,取得破坏力数值,从而计算不同材质与水泥粘接的胶结强度。不同材质套管的胶结强度试验结果见图 3、表 3。

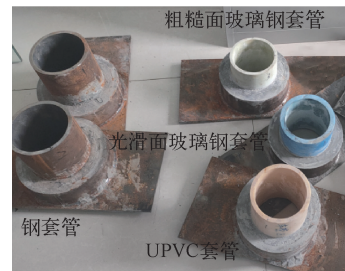


图 2 不同材质套管与水泥胶结情况

Fig. 2 Cementation of different materials casing with cement

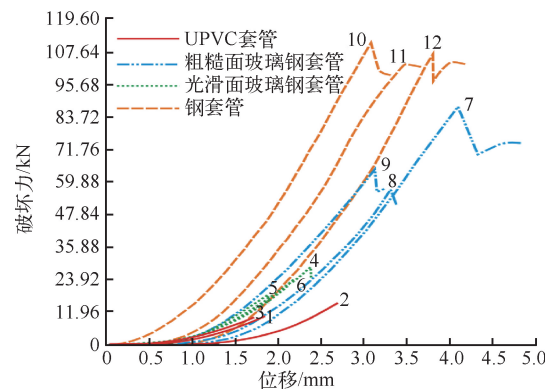


图 3 不同材质套管的胶结强度试验结果

Fig. 3 Cementation test results of different materials casing

表 3 不同材质套管胶结强度试验结果

Table 3 Test results of cementation strength of casing with different materials

管材	管材外径	粘接长度/mm	初次破坏力/kN	胶结强度/MPa	平均胶结强度/MPa
UPVC 套管	148.0	80	10.18	0.27	0.32
			15.24	0.41	
			9.86	0.27	
光滑面玻璃钢套管	152.8	80	26.40	0.69	0.60
			18.00	0.47	
			25.00	0.65	
粗糙面玻璃钢套管	142.9	80	79.40	2.21	1.80
			55.00	1.53	
			60.00	1.67	
钢套管	146.2	80	111.22	3.03	2.91
			103.22	2.81	
			106.83	2.91	

从表 3 可看出,UPVC 套管的平均胶结强度为 0.32 MPa,光滑面、粗糙面玻璃钢套管的平均

胶结强度分别为 0.60 MPa 和 1.80 MPa,钢套管的平均胶结强度为 2.91 MPa。因此,不同材质套

管的胶结强度由高到低依次为钢套管、粗糙面玻璃钢套管、光滑面玻璃钢套管、UPVC套管,故选用玻璃钢套管作为地浸采铀工艺套管,其胶结强度远高于目前使用的UPVC套管,能够满足现场需要。对玻璃钢套管外表面进行粗糙化处理,能够增大套管外表面摩擦力,进一步提高固井质量。

4 结论

针对致密砂岩型铀矿床地质条件,通过对不同材质套管的性能研究,综合考虑耐压性能、防腐性能和固井质量,得出以下结论:

1)玻璃钢套管综合性能优异,兼具耐压性(短时失效压力 28.3 MPa)、高强度(拉伸强度 >501.78 kN)、耐腐蚀性、绝缘性和抗老化等优良特性,其耐压性能和强度显著优于UPVC套管(短时失效压力 6.17 MPa,拉伸强度 109.78 kN),其防腐性能优于碳钢套管。

2)在固井质量方面,不同材质套管与水泥之间的胶结强度差异显著。玻璃钢套管的胶结强度(粗糙面玻璃钢套管 1.80 MPa)仅次于碳钢套管(2.91 MPa),远高于UPVC套管(0.32 MPa),能够满足高压作业钻井的固井质量要求。

3)玻璃钢套管是该矿床地浸采铀工艺钻井套管的最佳选择,可满足地浸采铀特殊作业(如射孔、压裂、高压注液、高盐水等)对钻井套管耐压性能和防腐性能的要求,同时其固井质量也较好,能够有效保障钻井的质量和使用寿命。

参考文献:

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] 王海峰,李建东,刘正邦,等.中国地浸采铀钻孔施工与成井技术研究进展[J].铀矿冶,2022,41(3):195-201.
WANG Haifeng, LI Jiandong, LIU Zhengbang, et al. Research progress of borehole drilling and well completion technology for in-situ leaching uranium in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3): 195-201 (in Chinese).
- [3] 杨立志,甘楠,冯国平,等.填砾式钻井结构成井工艺若干问题与切割建造过滤器探讨[J].铀矿冶,2017,36(4):253-256.
YANG Lizhi, GAN Nan, FENG Guoping, et al. Discussion on casing cutting filter and questions in gravel-filling structure drilling well construction [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(4): 253-256 (in Chinese).
- [4] 李博,刘晓阳,胡柏石,等.地浸采铀工艺钻孔施工与成井技术现状及改进建议[J].铀矿地质,2017,33(4):252-256.
LI Bo, LIU Xiaoyang, HU Baishi, et al. Development status and improvement suggestions of well-drilling and well-constructing for uranium in-situ leaching [J]. Uranium Geology, 2017, 33(4): 252-256 (in Chinese).
- [5] 李友峰,韩建增.油套管使用技术研究进展及展望[J].宝钢技术,2009(6):27-31.
LI Youfeng, HAN Jianzeng. Research progress and prospect of the application technology of tubing and casings [J]. Baosteel Technology, 2009(6): 27-31 (in Chinese).
- [6] 王凤岗,侯树仁,张良,等.巴音戈壁盆地南部塔木素铀矿床水岩作用特征及其与铀成矿关系研究[J].地质论评,2018,64(3):633-646.
WANG Fenggang, HOU Shuren, ZHANG Liang, et al. Study on the characteristics of water-rock interaction and its relation to uranium mineralization in tamusu uranium deposit, Southern Bayin Gobi Basin [J]. Geological Review, 2018, 64(3): 633-646 (in Chinese).
- [7] 赵涛,黄志亮,夏同成,等.耐腐蚀材料在氯碱行业中的应用[J].武汉轻工大学学报,2018,37(3):98-100.
ZHAO Tao, HUANG Zhiliang, XIA Tongcheng, et al. Application of anticorrosive material in chlor-alkali chemical industry [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2018, 37(3): 98-100 (in Chinese).
- [8] 李坡,杨立志,赵利信,等.非均匀地应力条件下新疆某铀矿地浸井套管稳定性研究[J].铀矿冶,2022,41(4):368-376.
LI Po, YANG Lizhi, ZHAO Lixin, et al. Study on casing stability under non-uniform ground stress for in-situ leaching well of a uranium deposit in Xinjiang [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4): 368-376 (in Chinese).
- [9] 吴志怀,董淼.宁夏盐池油田井下J55、N80套管腐

- 蚀因素分析[J]. 矿产勘查, 2020, 11(10): 2302-2308.
- WU Huaizhi, DONG Miao. Corrosion factors of J55 and N80 casing pipe in Yanchi oilfield, Ningxia[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(10): 2302-2308 (in Chinese).
- [10] 朱达江, 范宇, 张华礼, 等. 耐蚀合金油管与高钢级碳钢管在钻井液中的电偶腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2022, 55(9): 27-33.
- ZHU Dajiang, FAN Yu, ZHANG Huali, et al. Study on galvanic corrosion behavior of corrosion resistant alloy oil tubing and high grade carbon steel casing in drilling fluid[J]. Materials Protection, 2022, 55(9): 27-33 (in Chinese).
- [11] 郝博. UPVC 排水管在建筑排水工程中的应用[J]. 石化技术, 2010, 17(3): 53-55+60.
- HAO Bo. Application of UPVC pipes in the construction of drainage facility[J]. Petrochemical Industry Technology, 2010, 17(3): 53-55+60 (in Chinese).
- [12] 马建华, 郑化安, 王小宪, 等. PVC-U 管材的技术现状和发展趋势[J]. 聚氯乙烯, 2017, 45(9): 7-10.
- MA Jianhua, ZHENG Hua'an, WANG Xiaoxian, et al. Technical status and development trend of PVC-U pipes[J]. Polyvinyl Chloride, 2017, 45(9): 7-10 (in Chinese).
- [13] 卢予北. PVC-U 塑料管在浅层地热能 and 地下水资源开发工程中应用与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008(11): 1-6.
- LU Yubei. Application and research on PVC-U plastic pipe for exploration of shallow geothermal energy and groundwater resource[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008(11): 1-6 (in Chinese).
- [14] 段会军, 赵大军, 黄晟辉, 等. UPVC 井管在云南抗旱供水井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(5): 34-36.
- DUAN Huijun, ZHAO Dajun, HUANG Shenghui, et al. Application of UPVC well pipe for drought relief in Yunnan[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(5): 34-36 (in Chinese).
- [15] 张楠, 陈静茹, 施均, 等. 常用给排水管材管件耐寒能力分析[J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(2): 87-90.
- ZHANG Nan, CHEN Jingru, SHI Jun, et al. Analysis of cold resistant ability of commonly used wa-
- ter supply and drainage pipe fittings[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2017, 46(2): 87-90 (in Chinese).
- [16] 朱生高, 林文, 蒋荃, 等. PVC-U 排水管材户外老化影响因素综述[J]. 中国建材科技, 2013, 22(2): 1-3.
- ZHU Gaosheng, LIN Wen, JIANG Quan, et al. Reviews of factors which affect the weathering resistance of unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U) drainage pipe[J]. China Building Materials Science & Technology, 2013, 22(2): 1-3 (in Chinese).
- [17] 陈弛文, 胡清根, 江立信. 碳素钢含碳量与力学性能的关系研究[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(7): 49-50.
- CHEN Chiwen, HU Qinggen, JIANG Lixin. Study on the relationship between carbon content and mechanical properties of carbon steel[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2021, 50(7): 49-50 (in Chinese).
- [18] 张毅, 李晶. 注水开发井套管的选择[J]. 钢管, 2014, 43(3): 64-69.
- ZHANG Yi, LI Jing. Selection of casings for waterflooding development well[J]. Steel Pipe, 2014, 43(3): 64-69 (in Chinese).
- [19] 慕立俊, 张军, 赵文轸, 等. 均匀腐蚀下油气井套管的强度及其寿命[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2010, 27(6): 10-13.
- MU Lijun, ZHANG Jun, ZHAO Wenzhen, et al. Strength and service life of casing under uniform corrosion[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2010, 27(6): 10-13 (in Chinese).
- [20] 谢涛, 林海, 许杰, 等. 不同材质油套管的 CO₂ 腐蚀行为[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 211-217.
- XIE Tao, LIN Hai, XU Jie, et al. CO₂ corrosion behavior of oil casing steel made from different materials[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 211-217 (in Chinese).
- [21] 王占东, 张海雁. 浅谈纤维增强复合材料标准化现状[J]. 中国标准化, 2020(10): 91-96.
- WANG Zhandong, ZHANG Haiyan. Discussion on the standardization of fiber reinforced composites[J]. China Standardization, 2020(10): 91-96 (in Chinese).
- [22] 庄贵涛, 樊学华, 杨阳, 等. 高含盐 CO₂ 工况下环氧树脂钢管的环境兼容性[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 824-827.
- ZHUANG Guitao, FAN Xuehua, YANG Yang, et

- al. Environmental compatibility of GRE pipes in high-salty and CO₂ conditions [J]. *Corrosion & Protection*, 2015, 36(9):824-827 (in Chinese).
- [23] 陶佳栋,卢明昌,曾万蓉. 玻璃钢管道在油气田的应用与发展[J]. *石油管材与仪器*, 2017, 3(5):1-4. TAO Jiadong, LU Mingchang, ZENG Wanrong. Application and development of fiber reinforced plastic pipe in oil & gas field[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2017, 3(5):1-4 (in Chinese).
- [24] 张兴法,李淑娜. 核电厂玻璃纤维增强塑料玻璃钢管道及材料的应用与探讨[J]. *中国核电*, 2023, 16(6):868-874. ZHANG Xingfa, LI Shuna. Application and discussion of glass fiber reinforced plastic(GFRP) pipes and materials in NPP [J]. *China Nuclear Power*, 2023, 16(6):868-874 (in Chinese).
- [25] 杨玉芬,封惠敏. 玻璃钢夹砂管耐磨内衬材料的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2002(1):17-18. YANG Yufen, FENG Huimin. Study of abrasion resistant liner material for glass reinforced plastic mortar pipes [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2002(1):17-18 (in Chinese).
- [26] 张彦成,王康军,刘宏峰. 高压玻璃钢井下管的技术特点及应用[J]. *全面腐蚀控制*, 2012, 26(8):49-52. ZHANG Yancheng, WANG Kangjun, LIU Hongfeng. The technical characteristics and application of high-pressure fiberglass underground pipe [J]. *Total Corrosion Control*, 2012, 26(8):49-52 (in Chinese).

Performance of High-strength Glass Fiber Reinforced Plastic Casing for In-situ Leaching Uranium

LI Hongxing, HOU Daiwen, YUAN Yuan, LIAO Wensheng, DU Zhiming, DENG Jinxun
(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: The casing for in-situ leaching uranium needs to take into account the anti-corrosion performance and pressure resistance. In view of the complex geological conditions of dense sandstone uranium deposits, the performance of casing made of three materials, namely unplasticized polyvinyl chloride(UPVC), carbon steel and glass fiber reinforced plastic(GFRP), had been comparatively investigated. The results show that UPVC casing has good corrosion resistance but poor pressure resistance; carbon steel casing has good pressure resistance but is easy to corrode and has high cost; GFRP casing is excellent in corrosion resistance, pressure resistance and tensile strength. In terms of cementing quality, the cementing strength of GFRP casing, carbon steel casing and UPVC casing with cement is 1.80, 2.91 and 0.32 MPa respectively, and the cementing strength of GFRP casing with cement shows obvious advantages. GFRP casing is the best choice for in-situ leaching uranium in dense sandstone uranium deposits, which can meet the requirements of anti-corrosion performance and pressure resistance, and can guarantee the quality and service life of the drilling.

Key words: GFRP casing; pressure resistance; anti-corrosion performance; in-situ leaching uranium; UPVC casing