

地浸采铀用潜水电泵泵轴结构与材料优选

张翀^{1,2}, 贾皓^{1,2}, 王亚安^{1,2}, 杜志明^{1,2}, 许影^{1,2}, 李学忠³, 余卓华³

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;
2. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149;
3. 南方泵业股份有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 泵轴断裂、泵体腐蚀导致潜水电泵损毁率高。通过理论计算和 ANSYS 数值模拟, 对六棱轴和圆柱轴结构的强度、刚度等力学特性进行了对比, 并开展了 304、316L、904 不锈钢材料的耐腐蚀现场对比试验。结果表明: 在同等载荷和等效直径条件下, 圆柱轴的圆截面所受剪切应力为六棱轴的 64.95%, 且扭转角度仅为六棱轴的 56.25%; 模拟结果显示圆柱轴联轴器最大环向形变为六棱柱轴最大环向形变的 68.4%, 圆柱轴结构的抗扭性能更优; 904 不锈钢抗腐蚀性能最佳, 但 304 和 316L 不锈钢对酸性介质具有类似抗腐蚀性能。综合考虑耐腐蚀余量和制造成本, 建议在地浸采铀专用潜水电泵研发过程中选用圆柱泵轴结构, 沿用现有 316L 不锈钢作为主材的选材方案。

关键词: 地浸采铀; 潜水电泵; 泵轴结构; 不锈钢; 抗腐蚀

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0058-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.01.08

原地浸出采铀工艺(简称地浸采铀)是中国铀矿目前最主要的开采手段^[1-3], 截至 2021 年底通过地浸工艺回收的铀资源量已占国内天然铀总产量的 90% 以上^[4-6]。地浸采铀是一种利用井下潜水电泵等浸出液提升装置^[7-8], 借助化学试剂在天然埋藏条件下将含矿层中的铀溶解出来而不使矿石产生位移的集采、冶于一体的铀矿开采方法^[9-10]。潜水电泵作为地浸矿山用量最大的机械设备之一, 在实际生产中需根据被举升介质的物理、化学性质差异和钻井套管内径大小等因素进行科学选型, 4 英寸不锈钢深井潜水电泵最常用。但在地浸采铀矿山生产运行中潜水电泵故障频发, 主要表现为泵轴断裂和由腐蚀引发的零部件失效, 严重影响了矿山产能和采矿成本。

笔者基于强度、刚度理论计算并应用 ANSYS 软件, 对泵轴结构进行了对比研究; 同时, 选用 304、316L、904 不锈钢材料, 在内蒙古二连盆地某地浸采铀矿山抽液井内开展了耐腐蚀性试验。

1 地浸采铀潜水电泵故障分析

统计结果显示, 新疆伊犁某矿山现役潜水电泵平均无故障运行周期均小于 6 个月、最短寿命仅有 2 天; 内蒙古二连某矿山 2018—2019 年潜水电泵维修和替换费用高达 300 万元。

泵轴断裂是潜水电泵大面积损毁的最主要故障类型(图 1a), 与泵轴物理结构、加工工艺和原材料性能等均关系密切^{[7]5-6}。中国地浸采铀矿山常用潜水电泵品牌众多, 其中格兰富泵轴为圆柱形, 其余均为六棱柱形。六棱泵轴在应力集中且夹杂物密集的变截面区易产生疲劳源, 随交变载荷持续会发生瞬间脆性断裂^[11]; 增大泵轴直径可增大泵轴强度^[12]; 当泵轴基体内部普遍存在以 CaO 为主的大型夹杂物时, 在六棱柱泵轴与联轴器的连接处极易发生疲劳脆性断裂^{[7]3}。地浸采铀矿山 316L 泵轴表面有点蚀和微裂纹存在^[13]; 对泵轴挠度的数值模拟结果与实际测量值较为接

收稿日期: 2024-01-26

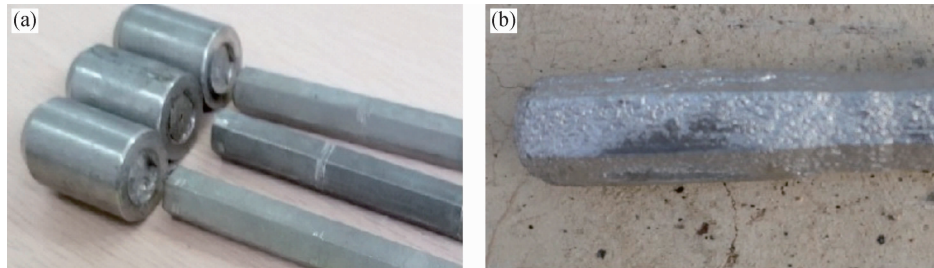
基金项目: 中核集团集中研发-全产业链“卡脖子”攻关科研项目([2022]331); 中核集团青年英才项目-菁英项目([2022]291); 中核铀业铀矿冶自主科研项目([2021]252)。

第一作者简介: 张翀(1988—), 男, 山西晋城人, 博士, 高级工程师, 主要从事原地浸出采铀工艺、铀矿采冶专用装备研发。

近^[14];叶轮磨损、粒径变化、局部浓度、振动参数等对泵轴疲劳寿命均有影响^[15-16]。

从安全和成本角度出发,腐蚀现象(图1b)也不容忽视,故有必要研究在 $\rho(\text{Cl}^-) > 500 \text{ mg/L}$ 、 $\text{pH}=1.5$ 的极端介质条件下,不锈钢材料的耐腐蚀性能。在中等电位下, Cl^- 会破坏钝化膜,形成

点蚀,不锈钢的耐腐蚀性逐渐降低^[17];在高 Cl^- 环境下,选择马氏体不锈钢作为泵轴并不合适^[18]。在裂纹源区存在明显的台阶特征,认为系表面腐蚀造成^[19]。哈氏合金泵轴耐蚀性好,但该材料成本高,暂不适合大面积推广^[20]。



a—联轴器处泵轴断裂;b—六棱柱泵轴轴面腐蚀。

图1 潜水电泵泵轴断裂和腐蚀

Fig. 1 Shaft fracture and corrosion of submersible pump

2 泵轴力学性能理论分析

泵轴是潜水电泵的核心零部件之一(图2),主要作用是传递功率,同时承受弯曲、疲劳、扭转

等复合应力。在相同载荷下,不同端面形状泵轴的强度、刚度并不一致,进而泵的可靠性与稳定性也不尽相同。因此,从强度、刚度等力学特性角度对圆柱轴与六棱轴进行对比分析。

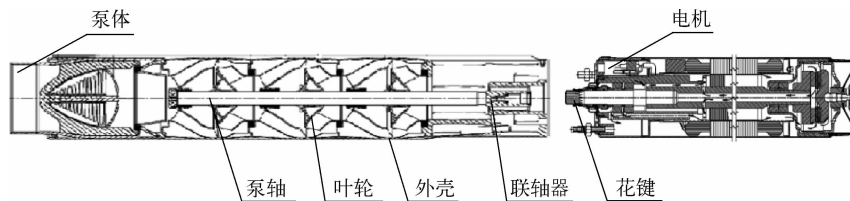


图2 地浸采铀用潜水泵结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of submersible pump for in-situ leaching of uranium

2.1 强度对比

材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度^[21-22]。对比圆柱轴与六棱轴,设圆柱轴截面直径为 d ;为便于比较,设六棱轴截面对角长度也为 d ,即六棱轴的截面边长为 $d/2$ (图3)。

当量直径是物体所表现出来的横向尺寸,被定义为物体横截面折算为圆形后的直径,可用来描述物体实际大小,其计算公式为

$$d' = \frac{4A}{S}, \quad (1)$$

式中: d' —当量直径,m; A —横截面面积, m^2 ; S —

截面周长,m。

六棱轴截面积为

$$S_{\text{棱}} = \frac{3\sqrt{3}}{8}d^2. \quad (2)$$

本研究六棱柱截面周长为 $3d$ 。据式(2)计算得六棱柱泵轴的当量直径

$$d' = \frac{\sqrt{3}}{2}d. \quad (3)$$

潜水电泵工作时泵轴高速旋转,扭转时最大剪切应力计算公式为^[21]

$$\tau_{\text{max}} = \frac{T}{W_p} \leq [\tau], \quad (4)$$

式中: T —扭矩, $N \cdot m$; W_p —扭转截面系数, mm^3 。 W_p 计算公式为

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} \quad (5)$$

将各自直径代入(4)(5)计算,可以得出在相同扭矩条件下,圆柱轴圆截面上所受最大剪切应力为六棱轴截面的 64.95%。

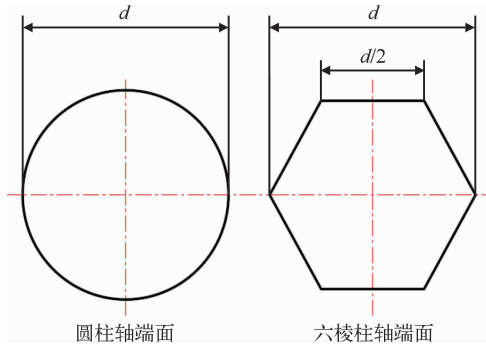


图 3 圆柱泵轴和六棱柱泵轴端面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of end face for cylindrical and hexagonal prism pump shaft

2.2 刚度对比

刚度是指材料或结构在受力时抵抗弹性变形的能力,其最大扭转角度为主要衡量指标。圆柱轴扭转变形计算公式的刚度条件为^{[15]13}

$$\theta_{\max} = \frac{T}{GI_p} \times \frac{180^\circ}{\pi} \leq [\theta], \quad (6)$$

式中: G —切变模量, MPa ; I_p —极惯性矩, mm^4 ; T —扭矩, $N \cdot m$ 。实心圆柱轴的极惯性矩计算公式为

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (7)$$

分别代入圆柱直径与六棱柱当量直径,计算求得在相同扭矩 T 和切变模量 G 下,单位长度圆柱轴的扭转角度仅为六棱轴的 56.25%,六棱轴的环向形变更大,圆柱轴抗扭性较六棱轴更强。

2.3 其他对比

在实际应用中,对圆柱轴和六棱轴在加工难度、传动机构和极端应力特点进行比较(表 1)。可以看出,圆柱泵轴的综合性能更优。

表 1 圆柱泵轴和六棱柱泵轴特点比较

Table 1 Comparison of characteristics between cylindrical and hexagonal prism pump shaft

项目	圆柱泵轴	六棱柱泵轴
加工难度	加工方便,精度和粗糙度易控制;原料允许存在少量杂质	轴向易偏心,精度和粗糙度难保证;原料纯度要求高,要求无杂质
传动件	需要配置自适应传动部件,抗扭性能强	六棱轴自带传动功能,抗扭性能差
极端应力	仅在与电机联轴器连接处存在明显应力集中,泵轴断裂概率低	端面六个棱线处均易发生应力集中,潜水电泵启停时极易发生脆断

3 泵轴强度数值模拟

基于以上计算与理论分析,本研究采用 ANSYS Workbench 软件的 Mechanical 模块开展了有限元数值模拟研究,对等效直径相同的圆柱轴和六棱轴泵轴强度进行了还原、仿真和对比。

先使用 SolidWorks 对 2 种泵轴结构进行三维建模(图 4),模型规格与试验样机相同,且在一端添加联轴器以模拟运行时的实际装配形态。圆柱泵轴直径为 15.88 mm,长为 250 mm;六棱柱泵轴最大直径为 15.88 mm,当量直径为 13.75 mm,长为 250 mm;六棱轴联轴器直径为 25 mm,长为 60 mm,与地浸采铀现场使用的联轴器尺寸一致。2 种结构的对应材料均选择 316L 不锈钢,其材料

参数为:弹性模量 $1.93 \times 10^5 MPa$,泊松比 0.29,质量密度 $7.93 g/cm^3$ 。对 2 种结构的网格进行了无关性验证,从计算精度及算力成本考虑,最终圆柱轴网格选择 261 350 个单元,六棱轴网格选择 221 131 个单元。

将以上模型导入 Mechanical 模块,设置右端面为固定面,由式(8)计算可得其满功率运行下扭矩值^{[21]73}。计算可得左端联轴器表面沿周向施加的扭转载荷(力矩)为 $24.7 N \cdot m$ 。

$$T = \frac{9.550P}{n}, \quad (8)$$

式中: P —电机功率, kW ; n —泵轴转速, r/min 。

泵轴受到施加于联轴器表面的应力影响后会发生应变,直接反映为形变程度。2 种结构均在

联轴器表面形变最大,泵轴右端固定端形变最小(图 5)。在施加相同扭矩条件下对比联轴器最大形变,圆柱轴联轴器沿环向变形距离为 0.13 mm,六棱轴联轴器沿环向变形距离为 0.19 mm,圆柱轴环向变形仅为六棱轴的 68.4%。

由于泵轴受到的扭力主要为对截面的剪切力,安全系数校核时也常采用剪切力为依据。沿联轴器周向施加扭矩后,模拟结果中圆柱轴与六棱轴的等效剪切力见图 6。

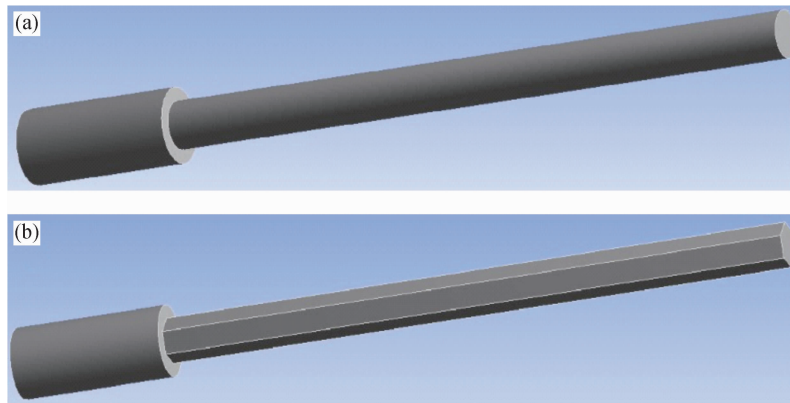


图 4 圆柱泵轴 (a) 和六棱柱泵轴 (b) 结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of circular shaft(a) and hexagonal shaft(b)

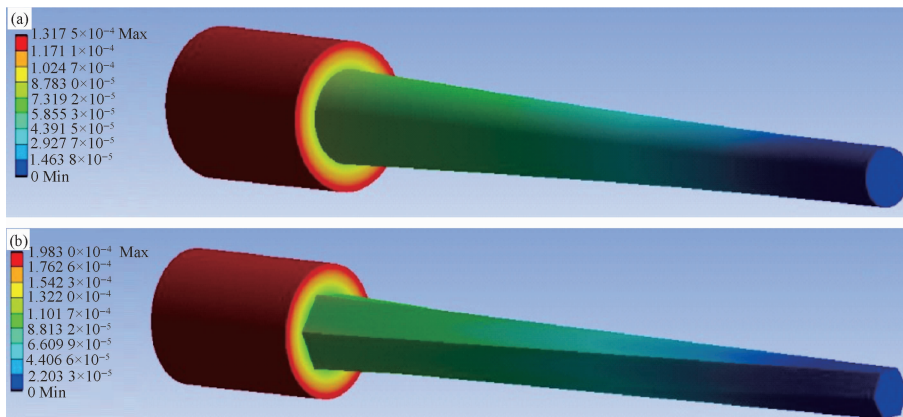


图 5 圆柱泵轴 (a) 和六棱柱泵轴 (b) 扭转后形变云图

Fig. 5 Total deformation of circular shaft(a) and hexagonal shaft(b)

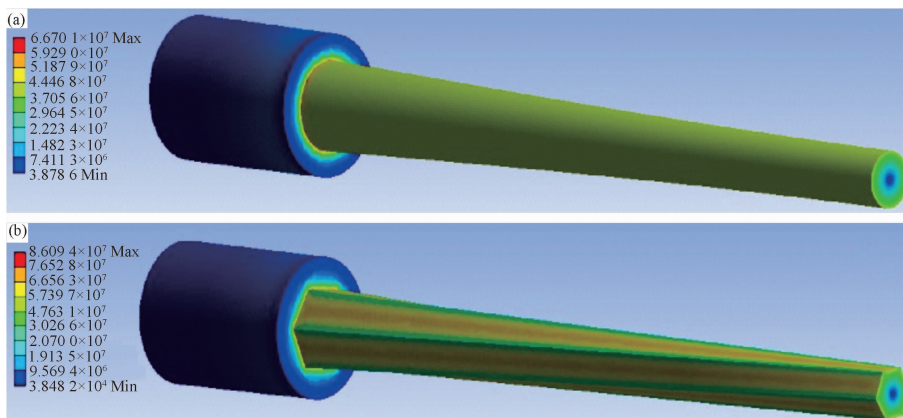


图 6 圆柱泵轴 (a) 和六棱柱泵轴 (b) 等效应力图

Fig. 6 Equivalent stress of circular shaft(a) and hexagonal shaft(b)

从图 6 可看出,2 种结构的最大等效应力均出现在联轴器与泵轴结合的根部位置,且六棱轴根部等效应力大于圆柱泵轴,约为其 1.3 倍。这说明圆柱轴具有更优良的力学性能,与计算分析结论一致:即在相同直径与材料条件下,圆柱轴较六棱轴具有更佳的抗扭性能。2 种结构均在联轴器与泵轴相连的根部出现了应力集中现象,这也解释了地浸采铀实际生产中泵轴断裂位置多发于此处的原因(图 1a)。

4 材料抗腐蚀性能对比

地浸采铀行业所用潜水电泵应适应高酸碱、高矿化度、高运行强度的要求,酸法地浸采铀工艺为 H_2SO_4 浸出体系,pH 介于 1.0~3.0, Cl^- 质量浓度为 200~600 mg/L。由于行业中缺少针对性的试验和标准,为确保充足的腐蚀裕量,在矿山设计和设备选型中通常要求泵体材料符合国标 316L 不锈钢牌号标准。因此,本研究针对 304、316L、904 材料开展抗腐蚀性能对比试验,以优选最适合酸法地浸工艺的不锈钢材料。

4.1 方案设计

潜水电泵实际运行工况受地下水化学环境、设备运转周期和特殊状态等条件影响。为研究不同型号的不锈钢材质防腐性能,选用 304、316L、904 材料小型样板各 8 片,制成 50 mm×20 mm×2 mm 的长方体板材(图 7),同时捆绑于潜水电泵下方,在盐度高、酸度高的酸法地浸采铀体系中进行试验。

将材料样板下放于内蒙某铀矿山 KC7030# 抽井内进行原地浸泡,该抽液井浸出液总盐度 ≥ 55.9 g/L、酸度约 10 g/L,具体化学成分见表 2。试验周期为 80 d,每 20 d 取样 1 次,每次取各标

号样品 2 片(如第 1 次,取 304-1,304-2;316L-1,316L-2;904-1,904-2),直至取样完毕。利用直读光谱仪对浸泡前后的样品进行测试,获取样品的化学组分及质量分数后,评价不同标号不锈钢在酸性介质条件下的抗腐蚀性能。

4.2 试验结果

浸泡试验前与第 80 天最后 1 次取样的不锈钢板的化学组分测试结果见表 3。在误差允许范围内,各组分的具体数值虽然发生了一定变化,但均在国标要求的范围内。因此认为在试验周期内,该酸性介质环境对 904、304 和 316L 不锈钢材料并未造成明显腐蚀。

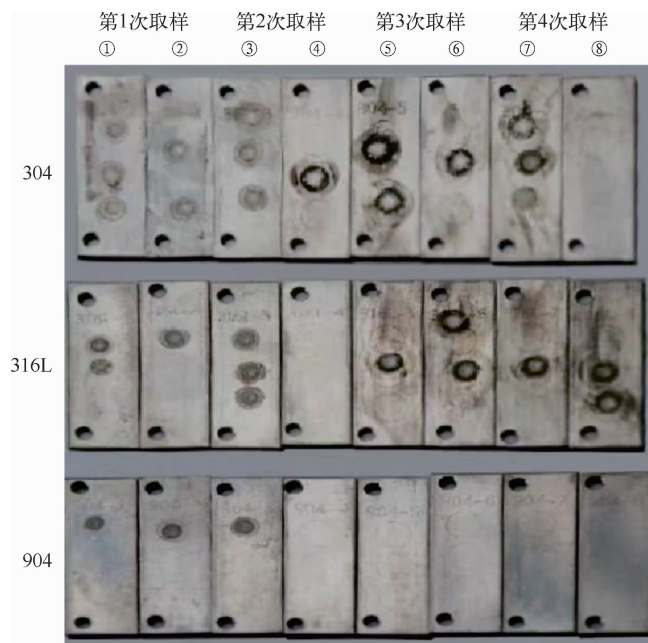


图 7 不锈钢材质样板和取样顺序
Fig. 7 Stainless steel sample plates
(before test) and sampling sequence

表 2 浸出液化学组分
Table 2 Composition of leaching solution

检测项目	Li	Be	Na	Mg	Al	K	Ca	Sc	Tb	Dy	Ho	Er
含量	5.1	0.5	1 702	2 098	3 644	1 797	359	0.7	1.3	8.0	1.5	3.7
检测项目	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Tm	Yb	Lu	Th
含量	1.9	19.8	2.3	46.8	5 239	1.8	0.1	24.0	0.5	3.0	0.4	2.3
检测项目	Ga	Se	Rb	Sr	Y	Mo	Cd	Cs	U	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
含量	0.7	0.7	4.0	41	18.5	10.2	0.2	0.4	17.2	437	39 800	237
检测项目	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	SiO_2	Zr	TOC	pH
含量	0.4	35.9	89.6	9.1	34.5	6.8	1.4	8.2	199	—	4.4	1.22

注:pH无量纲。

研究发现,在浸泡试验前后,904 样品表面未见明显变化,化学组分测试结果在误差范围内变化不大;原因是其 Ni、Cr、Mo、Ti 等质量分数较高,且 S 等杂质元素质量分数较低,使其在酸性介质条件下的防腐性能表现最佳。304 和 316L 标号不锈钢表面均出现明显的氧化发乌现象,经试纸擦拭后即恢复至光洁,推测这是由电化学腐蚀在 80 天测试周期内产生的沉淀物。考虑到 304 和 316L 不锈钢样品表面均无明显的腐蚀缺陷,

认为该发乌现象不会直接导致零部件损毁;且二者化学组分测试结果均在国标要求范围内,因此认为 304 和 316L 对酸法地浸采铀介质具有相似的抗腐蚀性能。

同时,标号为 304、316L 和 904 不锈钢管材的价格比约为 1:1.5:4,由于制造单台潜水泵所需不锈钢材料不足 50 kg,在设备总造价中占比有限,故综合考虑腐蚀余量与制造成本,建议沿用 316L 为主材料。

表 3 不锈钢样品浸泡试验前后化学组分

Table 3 Chemical components of stainless steel samples before and after the submerge test

%

元素	904 不锈钢		304 不锈钢		316L 不锈钢	
	浸泡前	浸泡后	浸泡前	浸泡后	浸泡前	浸泡后
C	0.015	0.019	0.031	0.041	0.011	0.014
Si	0.216	0.285	0.444	0.499	0.404	0.454
Mn	1.575	1.573	1.091	1.097	1.434	1.549
P	0.026	0.027	0.041	0.04	0.037	0.042
S	<0.000 5	<0.000 5	0.005 2	0.007 5	0.002 3	0.011
Cr	19.92	19.88	18.16	18.3	16.77	16.79
Mo	4.403	4.339	0.152	0.159	2.071	2.004
Ni	25.46	25.05	8.005	8.098	10.02	10.05
Cu	1.416	1.631	0.386	0.395	0.167	0.333
Al	0.018	0.023	<0.001	<0.001	0.001 7	0.013
As	0.001 7	0.003 2	0.028	0.029	0.021	0.019
B	0.001 7	0.001 7	0.002 1	0.002 0	0.002 6	0.002 2
Co	0.298	0.298	0.219	0.216	0.419	~0.720
N	0.042	0.043	<0.010	<0.010	<0.010	<0.043
Nb	0.011	0.006 3	0.006 6	0.002	<0.001	0.092
Sn	0.002 9	0.004 6	0.034	0.039	0.020	0.044
Ti	0.108	0.121	0.071	0.068	<0.001	0.005 2
V	0.053	0.055	0.065	0.064	0.111	0.127
W	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	0.125	0.235
Fe	46.41	46.62	71.23	70.91	68.37	64.79
判定	符合国标	符合国标	符合国标	符合国标	符合国标	符合国标

5 结论及建议

1) 在同等载荷和等效直径条件下,圆柱轴的扭转角度仅为六棱轴扭转角度的 56.25%,圆柱轴联轴器最大环向形变仅为六棱柱轴联轴器最大

环向形变的 68.4%。圆柱轴及其联轴器所受的最大剪切应力与环向形变更小,该结构具有更优的抗扭性能,可显著降低泵轴断裂概率。

2) 在 pH=1.22 介质条件下,浸泡 80 天后的 904、304 和 316L 不锈钢材料化学组分仍在国标

要求范围内,三者均未发生明显的腐蚀。

3)在地浸采铀专用潜水电泵研发工作中,建议采用圆柱形泵轴结构;综合考虑耐腐蚀余量和成本因素,建议延续 316L 标号不锈钢为泵体/泵轴主材的传统选材方案。

致谢:

核工业北京化工冶金研究院成弘博士对试验设计和测试方法给予了大力支持,在此特别感谢。

参考文献:

- [1] MAXIM SEREDKIN, ALEXANDER ZABOLOTSKY, GRAHAM JEFFRESS. 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.
- [2] ZHANG C, TAN K X, XIE T T, et al. Flow microbalance simulation of pumping and injection unit in in-situ leaching uranium mining area[J]. *Processes*, 2021, 9(8): 1288.
- [3] BENES V, GORBATENKO O, JONES B L, et al. In situ leach uranium mining: an overview of operations; IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-1. 4 [M]. Vienna, 2016.
- [4] SURESH K BHARGAVA, RAHUL RAM, MARK POWNCEBY, et al. A review of acid leaching of uraninite[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 151: 10-24.
- [5] 王亚安, 闻振乾, 苏学斌, 等. 酸法地浸采铀硫酸稀释放热应用研究[J]. *中国矿业*, 2022, 31(6): 151-157+171.
- [6] ZHANG C, XIE T T, TAN K X, et al. Hydrodynamic simulation of the influence of injection flow-rate regulation on in-situ leaching range[J]. *Minerals*, 2022, 12(7): 787.
- [7] 张翀, 姚益轩, 闻振乾, 等. 地浸采铀用潜水泵断轴原因的实验室研究[J]. *铀矿冶*, 2020, 39(2): 121-126+143.
- [8] 王亚安, 苏学斌, 张翀, 等. 在地浸采铀钻孔中检测潜水泵性能[J]. *铀矿冶*, 2022, 41(4): 454-458+478.
- [9] SU X B, LIU Z B, YAO Y X. et al. Petrology, mineralogy, and ore leaching of sandstone-hosted uranium deposits in the ordos basin, north China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127(prepublish): 103768.
- [10] 姜岩, 姚益轩, 廖文胜, 等. 地浸采铀作业过程地层伤害原因分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告——中国核学会 2009 年学术年会论文集, 第 2 册. 北京: 中国原子能出版社, 2009: 74-84.
- [11] 刘巍栋. 某 660 MW 超超临界机组尖峰循环泵轴断裂分析[C]//电机工程学会. 吉林省电机工程学会 2022 年学术年会获奖论文集. 吉林: 吉林大学出版社, 2022: 443-448.
- [12] 郭绘娟, 方国材, 胡大明, 等. 基于有限元大型竖井贯流泵轴系强度及稳定性分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(5): 169-173.
- [13] 刘立伟, 姚益轩, 杨建炜, 等. 铀矿用不锈钢泵轴断裂原因分析[J]. *表面技术*, 2019, 48(12): 289-295.
- [14] 徐秀生, 刘云鹏, 毛永杰. API610BB5 导叶式径向剖分多级离心泵轴静挠度的计算及验证[J]. *通用机械*, 2017, 176(2): 47-49.
- [15] 胡京招, 曹蕾, 祝志远. 泥泵轴疲劳寿命预测方法与影响因素分析[J]. *工程机械*, 2022, 53(7): 10-16.
- [16] 杨忠炯, 董栋. 振动对 TBM 液压泵泵轴受力及疲劳寿命影响分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(4): 6-10.
- [17] 冯晓庆. 表面改性 904L 不锈钢在含 F⁻ 酸性溶液中的腐蚀行为研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [18] 袁静, 孙剑毅, 毛学强, 等. 高压离心式注水泵泵轴材质选择[J]. *石油和化工设备*, 2015, 18(9): 77-80.
- [19] 梁阳, 张旭东. 某核电厂主给水前置泵泵轴裂纹缺陷分析及处理[J]. *水泵技术*, 2021(2): 49-52.
- [20] 赵洋. 哈氏合金泵轴断裂的研讨与分析[J]. *石油和化工设备*, 2019, 22(4): 81-83.
- [21] 殷有泉, 励争. 材料力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2017: 70-84.
- [22] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. *物理学进展*, 2013, 33(5): 177-351.

Optimization of Shaft Structure and Materials for Submersible Pump of In-situ Leaching of Uranium

ZHANG Chong^{1,2}, JIA Hao^{1,2}, WANG Ya'an^{1,2}, Du Zhiming^{1,2}, XU Ying^{1,2},
LI Xuezhong³, YU Zhuohua³

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

2. China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China;

3. Nanfang Pump Industry Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: The high rates of submersible pump damage due to pump shaft fracture and pump body corrosion have been studied. By conducting theoretical calculations and ANSYS numerical simulations, the mechanical properties such as strength and stiffness of hexagonal and cylindrical shaft structures were compared. Field comparison tests on the corrosion resistance of 304, 316L, and 904 stainless steel materials were also carried out. The results indicate that under the same load and equivalent diameter conditions, the shear stress on the cross-section of the cylindrical axis is 64.95% of the hexagonal axis, and the torsion angle is only 56.25% of the hexagonal axis torsion angle; the simulation results show that the maximum circumferential deformation of the cylindrical shaft coupling is 68.4% of the maximum circumferential deformation of the hexagonal prism shaft, the cylindrical shaft structure exhibits better torsional performance. While 904 stainless steel has the best corrosion resistance, both 304 and 316L stainless steels demonstrate similar corrosion resistance to acidic media. Considering corrosion resistance margins and manufacturing costs, it is recommended to use a cylindrical pump shaft structure and continue using 316L stainless steel as the main material in the development of submersible pumps for uranium mining.

Key words: in-situ leaching of uranium; submersible pump; shaft structure; stainless steel; corrosion resistant