

文章编号:1005-9865(2015)04-0101-07

深海采矿锰结核泵的试验研究

唐达生¹, 阳 宁¹, 龚德文¹, 肖 红¹, 夏建新²

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室,湖南长沙 410012;2.中央民族大学 生命与环境科学学院,北京 100081)

摘 要: 锰结核泵是深海采矿扬矿系统中的关键设备,为了研究泵结核矿浆工作性能,在实验室构建了一套高 30 m、内径 204 mm,可提供最大管网阻力 2.5 MPa 的泵矿浆性能试验系统,采用不同模拟结核粒径进行了泵矿浆工作特性试验。试验结果表明,锰结核泵基本上达到了预期设计指标,分析了模拟结核粒径 $d \leq 50$ mm 矿浆回流试验泵流道堵塞的原因,初步讨论了锰结核泵的环形格栅通道和泵流道问题,可作为我国中试多级锰结核泵的设计依据。

关键词: 深海采矿;提升管道;泵;锰结核;粒径

中图分类号:P754 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2015.04.013

Experimental study of manganese nodules pump in deep-sea mining

TANG Dasheng¹, YANG Ning¹, GONG Dewen¹, XIAO Hong¹, XIA Jianxin²

(1. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., State Key Laboratory of the Exploration and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources, Changsha 410012, China; 2. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Manganese nodules pump is the key equipment of deep ocean mining system. In order to study the working performance of the pump, a pump slurry performance test system, which is 30 m high with 204 mm diameter and can provide 2.5 MPa maximum pipe resistance, was constructed in the laboratory. Working characteristics of the pump with different particle sizes of simulation nodules were tested. The results show that the designed manganese nodules pump basically reaches the expected goals. Blockage causes for the particle size of $d \leq 50$ mm in reflux test are analysed. The problems of the annular grid runner section and pump flow channel for the manganese nodules pump are discussed preliminarily, thus providing the basis for the design of the pilot multistage manganese nodules pump.

Keywords: deep-sea mining; lifting pipeline; pump; manganese nodules; particle size

国外对深海采矿锰结核泵进行了开发研究,1978 年德国 KSB 公司研制了 2 台 6 级潜水电泵^[1],泵流量 500 m³/h,扬程 265 m,功率 800 kW,在太平洋 C-C 区 5 000 m 水深获得了海上试采的成功,共提升锰结核约 800 t。1988 年日本荏原制作所羽田工厂设计制造出用于海上中试的 2 台 8 级离心泵^[2],流量 450 m³/h,扬程 715 mH₂O,功率 1 700 kW/1 200 kW,但未经海上试验验证,其原因不太清楚。2009 年 5~6 月,韩国地质资源研究院(KIGAM)研制了 1 台 2 级潜水电泵^[3],泵流量 150 m³/h,扬程 70 m,功率 110 kW,在韩国东海 Hupo 海港附近水深约 100 m 进行了模拟结核水力提升试验。

我国对矿浆泵、清水泵、射流泵和空气泵提升等多种扬矿方案进行了试验研究和技术经济比较。以上四

收稿日期:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51174037,51339008)

作者简介:唐达生(1954-),男,湖南湘潭人,教授级高级工程师,主要从事深海采矿扬矿技术方面的研究。

种方案中,空气泵提升结构简单、水下无任何运动部件,但提升效率较低^[4],最大不超过 20%。射流泵提升具有与空气泵提升同样的优点,但提升效率更低^[5],最大也仅 12%。清水泵提升锰结核不通过泵,减少泵的磨损,提升效率较高,但要实现海底高压给料,给料装置复杂,可靠性较差。矿浆泵提升工艺简单,工作可靠,提升效率可达 50%以上,虽然锰结核通过泵会造成泵的磨损及锰结核的粉化,但磨损和粉化都不严重。日本学者研究结果^[6],锰结核的磨损是石英砂的 1/15,我国进行了提升过程多金属结核的破碎与粉化规律研究^[7],结果得出经过矿浆泵水力提升后-0.105 mm 粒级细泥不超过干结核提升量 1.04%,考虑到金属品位贫化,实际提升过程造成的金属损失不超过干结核产量的 0.51%。根据以上分析比较,确定矿浆泵作为海上中试技术设计扬矿方案的锰结核泵。

依据“大洋多金属结核资源研究开发第一期发展规划”提出的年产 300 万吨干多金属结核的目标^[8],商业开采系统采用两套系统实施。中试系统按商业系统 1:10,即 15 万吨/年,其小时生产能力为 30 t/h(干结核)或 43 t/h(湿结核),即泵提升能力应满足系统生产能力。锰结核赋存于 5 000 m 水深的极稀软海底沉积物表面,锰结核粒径在 20~100 mm 左右。为了满足中试采矿系统提升管道对锰结核粒径的限制,破碎机将锰结核破碎到 50 mm 以下,即泵提升的颗粒粒径不大于破碎机破碎后的粒径。如满足以上采矿技术要求,通过分析计算,中试系统输送矿浆流量 360 m³/h,扬程 600 mH₂O,这就要求泵必须具备低流量、高扬程和通过大颗粒的能力。鉴于我国大洋多金属结核研究开发长远规划,考虑到中试多级锰结核泵的研制难度,泵研制过程分两步进行,先设计加工出一台两级锰结核泵,两级锰结核泵的结构与中试多级锰结核泵的结构一样,两级锰结核泵设计作业点的技术参数^[9],清水流量 420 m³/h,扬程 80 mH₂O,效率 60%,额定功率 200 kW,额定电压 380 V,额定转速 1 450 rpm,输送粒径≤50 mm,进行泵性能和各项技术指标的试验。在此基础上进行改进和完善,再设计加工中试多级锰结核泵。

1 试验系统和试验方法

1.1 试验系统

为满足锰结核泵技术参数的试验要求,采用两套模拟系统进行试验^[10-11]。一套是高度 30 m、管道内径 204 mm 的闭环试验系统,主要是模拟锰结核开采泵的提升过程;另一套是高度 24 m、管道内径 204 mm 的开环试验系统,主要是模拟在提升过程中消耗泵的扬程。图 1 为泵性能试验系统。

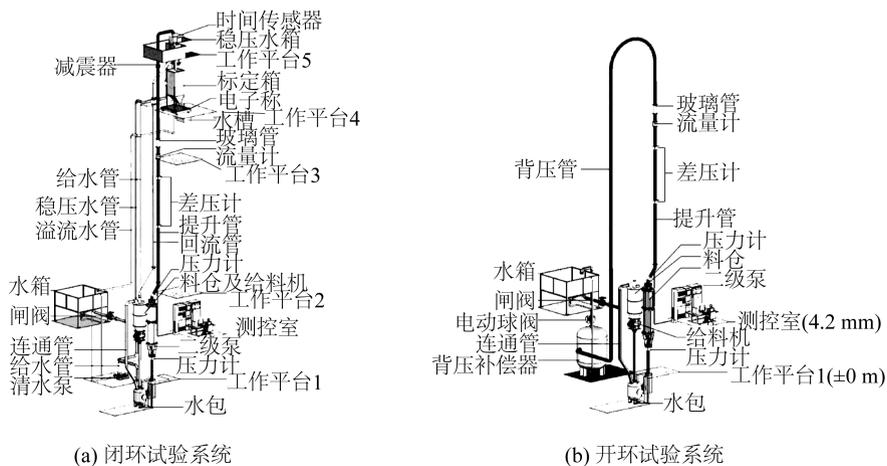


图 1 泵性能试验系统

Fig. 1 Pump performance test system

闭环试验系统包括:供水稳压器系统,由 10 m³水箱、Φ100 mm 给水管、Φ150 mm 溢流管、Φ204 mm 稳压管、4 m³稳压水箱和清水泵组成;提升子系统,Φ204 mm 提升管和回流管、0.9 m³水包和锰结核泵组成;给料子系统,由 1.6 m³料仓、给料机和液压控制系统组成;人工标定子系统,由 1.5 m³流量标定箱、Φ100 mm 回水管路和水槽组成;控制与测量子系统,由 200 kW 变频调速器、流量计、压力变送器、差压变送器、电子称、液压站、温度计、转速传感器和测控柜等组成。

开环试验系统包括:提升子系统,由 Φ204 mm 提升管、0.9 m³水包和锰结核泵组成;供水给料子系统,由

10 m³水箱、1.6 m³料仓和给料机组成;背压子系统,由 Φ204 mm 背压管、倒 U 型管、9.6 m³背压补偿器、电动球阀和回水管路等组成;控制与测量子系统与闭环试验系统相同。

锰结核泵采用筒装式整体结构,分上下两个部分。上部为节段式两级泵,两级泵为高比转速的离心泵类型,叶轮形状为扭曲型叶片,叶片数 $Z=3$,按输送粒径要求,泵流道(包括吸入壳、叶轮、导叶)内最小过流尺寸 ≥ 75 mm。下部为环形格栅通道,通道数 $Z'=3$,按输送流速要求,每个通道尺寸为 120 mm×90 mm。

1.2 试验方法

泵性能试验分两步进行。

第一步,采用闭环试验系统,试验是指料仓中的锰结核由给料机通过锰结核泵和管道再返回到料仓。通过变频调速器将锰结核泵的转速调至低转速,进行在低转速条件下的矿浆工作特性试验和提升系统事故停车的矿浆回流能力试验。

第二步,采用开环试验系统,试验是指料仓中的锰结核由给料机通过锰结核泵和管道输送到背压补偿器,结核不再返回料仓。通过调节电动球阀开度来控制泵出口压力,进行泵作业点的矿浆工作特性。

试验物料采用人工模拟结核,结核密度 2 000 kg/m³。按我国矿区锰结核经破碎机破碎后的结核粒级组成进行配料,根据经破碎机破碎后的锰结核粒级组成要求,试验用模拟结核粒级组成如表 1 所示。

表 1 试验用模拟结核粒级组成

Tab. 1 Nodule particle sizes in the test

粒级/mm	50~40	40~30	30~20	20~10	<10
≤50 mm 试验	7.5	14.3	31.7	34.5	12.0
≤40 mm 试验		14.5	30.2	39.8	15.5
≤30 mm 试验			33.4	45.7	20.9
≤20 mm 试验				31.5	68.5
≤10 mm 试验					100.0

2 试验结果及分析

2.1 泵试验技术参数的确定

泵试验技术参数包括流量、扬程、轴功率、有效功率和效率,确定方法如下:

- 1) 泵流量是单位时间内排出矿浆的容积,采用电磁流量变送器测量。
- 2) 泵扬程等于泵的出口总水头与入口总水头代数差,采用压力变送器测量,即:

$$H_m = (H_{\text{出}} - H_{\text{入}}) + H_{\text{泵}} \quad (1)$$

式中: H_m 为扬程,m; $H_{\text{出}}$ 为出口总水头,m; $H_{\text{入}}$ 为入口总水头,m; $H_{\text{泵}}$ 为泵出口与入口长度,m。

- 3) 泵轴功率是电机驱动泵所需功率,由 SINAMICS G150 变频器测量确定。
- 4) 泵有效功率可采用下式计算:

$$P_e = \frac{\rho_m g Q_m H_m}{102} \quad (2)$$

式中: P_e 为有效功率,kW; ρ_m 为浆体密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; Q_m 为浆体流量,m³/h; H_m 为扬程,m。

- 5) 泵效率可采用下式计算:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_b} \quad (3)$$

式中: η_m 为泵效率; P_b 为泵轴功率,kW。

2.2 清水工作特性试验

试验采用闭环试验系统,在泵转速 $n=1\,450$ rpm 的条件下进行清水工作特性试验,流量通过泵出口管路中的阀门开度进行调节,试验流量范围 0~650 m³/h。

图 2 为泵清水工作特性曲线。由图 2 可以看出,泵清水扬程随流量的增加而减小,而功率和效率随流量

的增加而增加。为了进行对比,图中给出了该泵出厂的试验结果(试验流量范围 $0 \sim 719 \text{ m}^3/\text{h}$),两家清水试验结果基本一致。但本院试验的泵扬程、功率和泵效率略低于石泵的试验结果,其泵清水效率最大相对差值为 6% ,这说明该泵在不同的装置上进行清水工作特性试验,其试验结果基本相同。

2.3 矿浆工作特性试验

2.3.1 不同转速下泵工作特性试验

试验采用闭环试验系统,在泵转速 $n=1\,000 \text{ rpm}$ 、 $n=1\,200 \text{ rpm}$ 的条件下进行矿浆工作特性试验,试验采用两组不同模拟结核粒径 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$),试验体积浓度 $C_v = 8\%$,试验流量范围 $256.1 \sim 461.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

图 3、图 4 和图 5 分别为两组不同模拟结核粒径组成的泵扬程、功率、效率与流量之间的关系曲线,同时给出了泵清水工作特性。由图可以看出:1) 两组不同模拟结核粒径 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$) 组成的同一浓度 ($C_v = 8\%$),其泵扬程随流量的增加而降低,泵功率变化不大,而泵效率随流量的增加而增加;2) 在同一泵流量的情况下,两组不同模拟结核粒径 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$) 组成的同一浓度 ($C_v = 8\%$),泵扬程和功率随转速的增加而增加,而泵效率随转速的增加而降低;3) 对比泵清水工作特性,在泵不同转速的条件下,两组不同模拟结核粒径 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$) 组成的同一浓度 ($C_v = 8\%$),其泵扬程、功率和效率十分接近并大于清水。

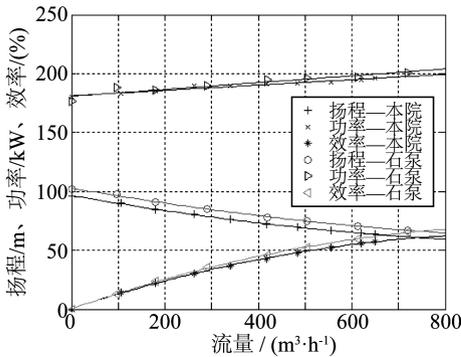


图 2 泵清水工作特性

Fig. 2 Pump water operating properties

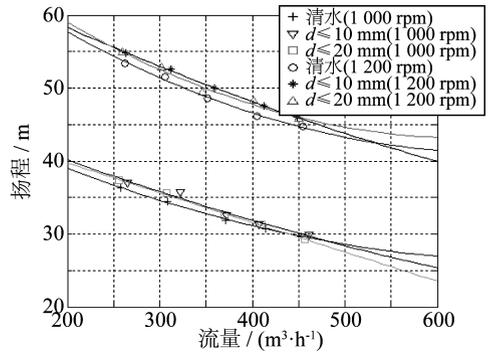


图 3 扬程与流量关系曲线 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$)

Fig. 3 Relation curve of head and flow rate ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$)

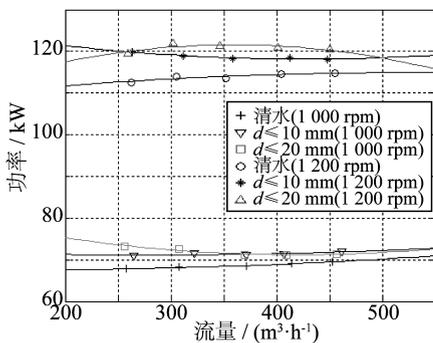


图 4 功率与流量关系曲线 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$)

Fig. 4 Relation curve of power and flow rate ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$)

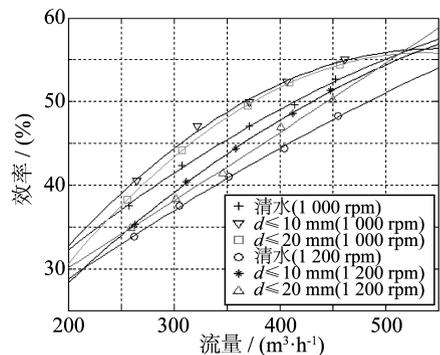


图 5 效率与流量关系曲线 ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$)

Fig. 5 Relation curve of efficiency and flow rate ($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$)

2.3.2 泵作业点工作特性试验

试验采用开环试验系统,泵作业点是考核泵工作特性的重要技术指标之一。泵作业点工作参数,泵转速 $n=1\,450 \text{ rpm}$,试验流量 $Q_m = 420 \text{ m}^3/\text{h}$,试验体积浓度 $C_v = 8\%$ 。

泵作业点试验结果如表 2 所示,由表 2 可以看出:1) 在同一试验流量和试验浓度的条件下,三组不同结核粒径 ($d \leq 50 \text{ mm}$ 、 $d \leq 40 \text{ mm}$ 、 $d \leq 30 \text{ mm}$) 的矿浆,泵扬程、效率随结核粒径的减小而增加,泵功率随结核粒径的减小而降低;2) 结核粒径 $d \leq 30 \text{ mm}$ 矿浆的泵效率最高,泵效率值为 45.5% ;3) 在试验浓度和试验流量范围内,三组不同结核粒径组成的锰结核均可通过泵。

表2 泵作业点试验结果

Tab. 2 Test results of pump operating point

工况	结核粒径 d/mm	流量 Q_m $/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	体积浓度 $C_v/(\%)$	扬程 H_m/m	功率 P_b/kW	效率 $\eta_m/(\%)$
1	≤ 50	420	8	69.9	210.1	41.4
2	≤ 40	420	8	70.7	206.1	42.5
3	≤ 30	420	8	72.1	196.9	45.5

2.3.3 提升系统突然停车矿浆回流试验

1) 矿浆回流试验结果

矿浆回流试验是考核锰结核在泵流道内的回流能力。试验采用闭环试验系统,试验是在提升系统正常运行状况下泵突然停止运行,然后对泵管路进行拆卸,测定泵进口管路、出口管路和流道内的结核量。

试验采用三组不同模拟结核粒径($d \leq 10 \text{ mm}$ 、 $d \leq 20 \text{ mm}$ 、 $d \leq 50 \text{ mm}$),试验体积浓度 $C_v = 5\%$ 、 $C_v = 8\%$ 。试验结果如表3所示,由表3可知:

① 在输送流速为 3.57 m/s 时突然停泵的条件下,结核粒径 $d \leq 10 \text{ mm}$ ($C_v = 8\%$)、 $d \leq 20 \text{ mm}$ ($C_v = 5\%$),泵进口管路内的结核量分别为 74 kg 和 92 kg ,泵出口管路和泵流道内均无结核,说明提升系统矿浆回流时结核可通过泵。

② 在输送流速为 3.06 m/s 时突然停泵的条件下,结核粒径 $d \leq 50 \text{ mm}$ ($C_v = 8\%$),泵进口管路内的结核量只有 18 kg ,泵出口管路、泵流道内的结核量分别为 79 kg 和 72 kg ,这说明提升系统矿浆回流时结核不能通过泵。其原因是矿浆在泵流道内回流过程中,粗颗粒之间的相互碰撞使得颗粒沉降速度降低,颗粒聚集使得矿浆浓度增加,从而出现了泵流道堵塞现象。

③ 结核粒径 $d \leq 10 \text{ mm}$ ($C_v = 8\%$) 的结核量小于结核粒径 $d \leq 20 \text{ mm}$ ($C_v = 5\%$) 的结核量,这是因为结核粒径 $d \leq 10 \text{ mm}$ 的颗粒沉降速度小于结核粒径 $d \leq 20 \text{ mm}$,突然停泵时,提升管内产生瞬间流速,结核粒径 $d \leq 10 \text{ mm}$ 颗粒在提升管内瞬间流速作用下,部分颗粒由提升管输送到回流管,使得提升管上部管路是矿浆,而提升管下部管路是清水的原因。

④ 按矿浆浓度 $C_v = 5\%$ 、 $C_v = 8\%$ 计算,高度 30 m 、内径 204 mm 提升管内的结核量分别是 97 kg 和 155 kg ,这与 $d \leq 20 \text{ mm}$ ($C_v = 5\%$) 和 $d \leq 50 \text{ mm}$ ($C_v = 8\%$) 矿浆回流后的结核量 92 kg 和 169 kg 相当。

表3 矿浆回流试验参数

Tab. 3 Slurry backflow test parameters

工况	结核粒径 d/mm	体积浓度 $C_v/(\%)$	泵进口结核 $/\text{kg}$	泵出口结核 $/\text{kg}$	泵流道结核 $/\text{kg}$	合计 $/\text{kg}$
1	≤ 10	8	74	无	无	74
2	≤ 20	5	92	无	无	92
3	≤ 50	8	18	79	72	169

2) 矿浆回流试验后的分析处理

为了分析结核粒径 $d \leq 50 \text{ mm}$ ($C_v = 8\%$) 矿浆回流试验泵流道堵塞的原因,试验完成后,对提升系统进行了结核清理工作,然后进行泵清水试验。图6为泵清水转速-流量试验曲线(为了进行对比,图中给出了矿浆回流试验前的清水曲线),由图6可以看出:

① 在泵同一清水流量情况下,泵清水的转速大于矿浆回流试验前,这是因为泵流道内有结核堵塞现象。

② 为了进一步分析结核堵塞的原因,对照泵厂的泵清水试验结果,将调节阀门开度的试验点绘制在图中(见图中“ Δ ”号),该试验点与矿浆回流试验后的试验点十分接近,这完全可以说明泵流道内存在粗颗粒结核。

根据这一情况,对泵流道内进行了结核清理工作,发现泵流道内确实有粗颗粒结核,图7是泵环形格栅

通道与泵吸入端清除的结核颗粒(质量 0.57 kg)。清理工作完成后,再次进行了泵清水试验,试验结果一并绘于图 6(见图中“*”号),由图可以看出,泵清水转速-流量曲线与回流试验前十分接近。

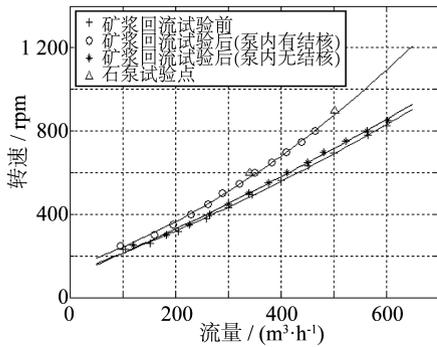


图 6 泵转速与流量清水试验曲线

Fig. 6 Relation curve of pump speed and water flow rate

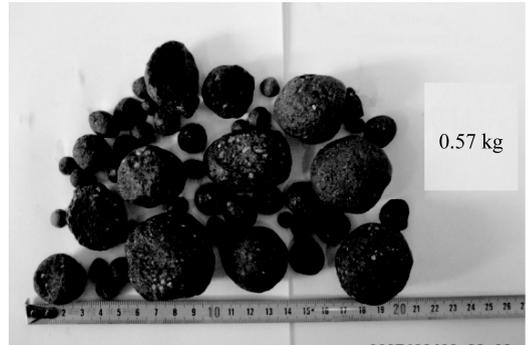


图 7 泵流道内结核

Fig. 7 Nodules in pump flow channel

3 问题与讨论

随着深海矿产资源开发利用技术的发展,在深海采矿系统中,锰结核泵具有一定的商业应用前景,已被国内外高度重视。我国在中国大洋协会的支持下,锰结核泵的开发研究从无到有,到目前为止,已完成了从扬矿方案论证、提升管道参数试验、可行性研究、设计与制造到实验室试验阶段。但是,由于本次试验没有进行更多组次的结核粒径、输送流量和输送浓度试验,尤其是该泵未在动态条件下试验和海上试验验证。因此,认真分析和总结已取得的成果和经验,通过本次试验,有必要对中试锰结核泵的改进和完善进行讨论。

1) 泵清水特性。锰结核泵设计作业点清水流量 $420 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $80 \text{ mH}_2\text{O}$, 功率 200 kW , 效率 60% 。由泵清水试验可知,当泵流量 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,清水扬程 78 m , 功率 194 kW , 清水效率 46% (见图 2), 锰结核泵的清水扬程和功率与设计值基本吻合,但泵的效率小于设计值。如要提高泵效率,其解决办法是改进泵叶轮和导叶的结构尺寸,以提高泵的水力性能。

2) 泵流道。叶轮和导叶是泵的关键部件,叶轮引导水流以最小的损失将输送颗粒的动能转变为压能,导叶收集叶轮的出口浆体输送到下一级叶轮的进口,将速度能转换为压能。按渣浆泵设计经验,叶轮和导叶的最小过流尺寸应大于或等于最大颗粒粒径的 1.5 倍,将不会发生颗粒堵塞现象。锰结核泵输送的颗粒粒径 $\leq 50 \text{ mm}$, 输送浓度约 10% 。可见,泵流道应具有较宽的过流尺寸和较高的能量转换能力,还要考虑矿浆的过流和回流能力。因此,有必要深入研究叶轮和导叶的叶片数、叶片形状及空间几何尺寸。

3) 泵环形格栅通道。锰结核泵结构设计采用了矿浆通过电机外部的环形格栅通道进入泵叶轮,环形格栅通道的断面如图 8 所示,由图 8 可以看出,锰结核泵 3 通道(每个通道尺寸为 $120 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$) 格栅面积为 0.0324 m^2 , $\Phi 200 \text{ mm}$ 管道断面积为 0.0314 m^2 , 泵环形格栅通道的断面积与管道的断面积相等。当泵输送

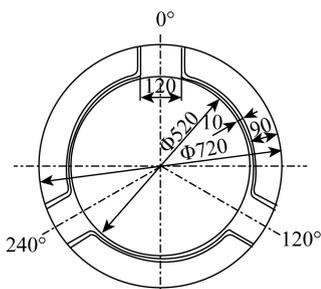


图 8 环形格栅流道断面图(3 通道)

Fig. 8 Annular grid runner section (3 channels)

清水时,管道流速与环形格栅通道的流速相等。当泵输送矿浆时,由于受泵叶轮离心力和轴向力的作用,矿浆可以通过环形格栅通道进入泵叶轮输送。但是,当矿浆回流过泵时,泵上部提升管和泵流道的矿浆作自由沉降运动,自由沉降运动的矿浆难以把矿浆均匀分配到 3 个格栅通道,这就造成了各格栅间的矿浆不均匀沉降,使得某一个格栅通道矿浆浓度局部增大,由此造成该环形格栅通道粗颗粒堵塞。这正是结核粒径 $d \leq 50 \text{ mm}$ ($C_v = 8\%$) 矿浆回流难以通过泵的原因,其解决办法是改进粗颗粒粒径、输送浓度与格栅通道的尺寸匹配。

4 结 语

1)在实验室构建了一套高30 m、内径204 mm,可提供最大管网阻力2.5 MPa的泵矿浆性能试验系统,试验方法可靠,测试数据精确,满足了深海采矿锰结核泵矿浆工作特性的试验要求。

2)在泵不同转速 $n=1\ 000\ \text{rpm}$ 和 $n=1\ 200\ \text{rpm}$ 的条件下,两组不同模拟结核粒径($d\leq 10\ \text{mm}$ 、 $d\leq 20\ \text{mm}$),试验体积浓度 $C_v=8\%$,其泵扬程、功率和效率十分接近并大于清水。在泵转速 $n=1\ 450\ \text{rpm}$,试验流量 $Q_m=420\ \text{m}^3/\text{h}$,试验体积浓度 $C_v=8\%$,三组不同结核粒径 $d\leq 50\ \text{mm}$ 、 $d\leq 40\ \text{mm}$ 、 $d\leq 30\ \text{mm}$ 组成的结核矿浆可通过泵。但是,结核粒径 $d\leq 50\ \text{mm}$ ($C_v=8\%$)的结核矿浆回流时不能过泵。可作为中试锰结核泵的设计参考。

参考文献:

- [1] KUNTZ G. The technical advantages Submersible motor pumps in deep sea technology and delivery of manganese nodules[C]//OTC 3667. 1979;85-94.
- [2] 猪熊明,冈田久,尾山哲夫. 国家プロジェクトマンガン団塊采矿システム[J]. 资源与素材, 1996, 112: 974-983.
- [3] YOON C H, PARK J M, KANG J S, et al. Shallow lifting test for the development of deep ocean mineral resources in Korea [C]//Proceedings of the Ninth (2011) ISOPE Ocean Mining Symposium. 2011:149-152.
- [4] 黄家桢,唐达生.气力提升技术研究[R]. 长沙:长沙矿冶研究院,1995.(HUANG Jiazhen, TANG Dasheng. The study of air lifting technology[D]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining & Metallurgy, 1995. (in Chinese))
- [5] 夏建新,黄家桢,唐达生,等.锰结核开采射流泵提升方式研究[J].矿冶工程,1999, 19(3):13-15. (XIA Jianxin, HUANG Jiazhen, TANG Dasheng, et al. A study of jet-pump lifting methods for manganese nodules mining[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 1999, (19)3:13-15. (in Chinese))
- [6] 杉山和彦.锰结核扬矿用泵的研究[C]//深海采矿技术文集. 北京:中国大洋协会,1995:282-293.(杉山和彦.The research of lifting test for the manganese nodules pump[C]//The Corpus for Deep-sea Mining Technology. Beijing: China Ocean Mineral Resources R & D Association, 1995: 282-293. (in Chinese))
- [7] 唐达生,谢凌虚,夏建新.矿浆泵水力提升多金属结核的破碎及粉化规律研究[C]//大洋矿产资源研究开发学术会议论文集. 北京:中国大洋协会,1996.(TANG Dasheng, XIE Linxu, XIA Jianxin. Broken and pulverization law research for slurry pump hydraulic lifting of polymetallic nodules [C]//The Colloquium Paper of Ocean Mineral Resources Research and Development. Beijing: China Ocean Mineral Resources R & D Association, 1996. (in Chinese))
- [8] 中国大洋协会.进军大洋十五年[M]. 北京:海洋出版社,2006.(China Ocean Mineral Resources R & D Association. 15 years into the ocean[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006. (in Chinese))
- [9] DZQ200 * 2 泵试验报告[R]. 石家庄:石家庄泵业集团有限责任公司, 2005.(Pump test report of DZQ200 * 2 model [R]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Pump Industry Group Co., Ltd., 2005. (in Chinese))
- [10] 阳宁.“十五”深海采矿扬矿系统实验室试验研究[R].长沙:长沙矿冶研究院,2007. (YANG Ning. The study on lift system in deep ocean mining of the fifteen plan [R]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining & Metallurgy, 2007. (in Chinese))
- [11] YANG Ning, TANG Dasheng. The lifting installation of manganese nodules and pump test[C]//Proceedings of the Eighth (2008) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Thailand:[s.n.], 2008:30-35.