

高等学校教材

其它类型泵

武汉水利电力学院 陆宏圻 编著

水利电力出版社

高等学校教材

其它类型泵

武汉水利电力学院 陆宏圻 编著

水利电力出版社

TH3

7.7

高等学教教材

其 它 类 型 泵

武汉水利电力学院 陆宏圻 编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 5.25印张 114千字

1989年10月第一版 1989年10月北京第一次印刷

印数0001—1740册

ISBN 7-120-00755-6/TV·258

定价: 1.20元

前 言

根据高等学校水利电力类专业第二轮教材编审出版补充规划〔水电部（88）教学字第16号文〕，《其它类型泵》被列为水利水电动力工程专业（机电排灌工程）用的选修课教材。它包括空气扬水机、拉杆式活塞泵、液环泵、射流泵、自吸装置和自吸泵等5部分内容。着重介绍上述类型泵及装置的流体力学性能及计算方法。通过本书学习，使学生了解这些泵的工作原理、用途和结构，并初步掌握它们的设计配套方法。本书在内容上力求反映国内外最新科研成果及生产实践经验。在文字上力求简明扼要，条理清楚。为了便于学习，各章附有复习思考题。

本书由武汉水利电力学院教授陆宏圻编著。华中理工大学程良骏教授主审，他的审阅，对提高本书质量起了很好作用，对此表示感谢！由于本人水平有限，书中错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

1988年10月

目 录

前 言

第一章 空气扬水机	1
第一节 空气扬水机的工作原理、特点及构造	1
第二节 空气扬水机工作参数和各部件尺寸的确定	2
第三节 空气压缩机的选择和空气扬水装置效率的确定	9
第二章 拉杆式活塞泵	11
第一节 拉杆泵的工作原理及特点	11
第二节 拉杆泵的结构	12
第三节 拉杆泵的工作参数	15
第三章 液环泵	22
第一节 液环泵的工作原理和用途	22
第二节 液环泵的分类及结构	23
第三节 液环泵的性能及选型	24
第四章 射流泵	29
第一节 概述	29
第二节 射流泵的理论基础	33
第三节 液体射流泵设计	36
第四节 液气射流泵设计	55
第五章 自吸装置和自吸泵	69
第一节 概述	69
第二节 排气射流自吸装置	69
第三节 水射流自吸装置	72
第四节 自吸泵	74
参考文献	78

第一章 空气扬水机

第一节 空气扬水机的工作原理、特点及构造

空气扬水机是利用压缩空气作为工作介质来传递能量，进行抽水的机具。如图 1-1，压缩空气从通气管进入井中扬水管的下部，在该处形成气水混合液。气水混合液比重较轻。为了和扬水管外的井中水柱压力相平衡，扬水管中的气水混合液必然上升。通入的空气量越大，气水混合液的比重就越小，它上升的高度就越大。同样，扬水管淹没在井中的深度越深，井中水柱形成的压力越大，气水混合液上升得越高。空气扬水机工作时，除了靠上述井中水柱压力扬水外，还由于空气的喷射把部分动能传给水，以及气泡的上升速度大于水而引起的“挟带作用”等因素带动水流上升。

从上所述，空气扬水机有以下特点：

(1) 井下部分只需要通气管和扬水管，所以结构简单，工作可靠。其动力部分在地面，安装维护方便。

(2) 由于气水混合时的摩阻损失较大，所以它的装置效率较低，一般只有 20% 左右。而且需要一套较复杂笨重的压缩空气设备。

(3) 它的过流面积大，不易堵塞。所以适合抽取含泥沙的水，并适用于井管不直或倾斜的深井抽水。空气扬水机一般用于抽水试验和洗井，即成井装泵前，用以抽吸井内淤塞泥沙和杂物，使水变清并加大井的出水量。它还用于煤矿井下排水，深海采矿及水库底部鱼类增氧等。

空气扬水机的构造，如图 1-2 所示。它主要由通气管、扬水管和喷气管组成。喷气管装在井下扬水管和通气管的下端。它的作用是使压缩空气从喷气管上的一系列小孔喷出，以便和水充分混合。

通气管和扬水管的配合方式有两种，即平行式和同心式。

平行式如图 1-2 (a) 所示。通气管在扬水管的外边，并列布置。通气管通过喷气管向扬水管中喷气使气水混合。这种布置方式，空气用量较少，效率较高，多用于井孔直径较大的情况。

同心式如图 1-2 (b) 所示。通气管放在扬水管里面，喷气管为一节长 1.5m 左右的管子，周围钻有许多小孔，压缩空气从小孔中喷出和水混合。这种布置方式，适用于较小直径的井孔中 ($D < 100\text{mm}$)。

空气扬水机抽水装置是由电动机、空气压缩机、空气罐、压缩空气管、扬水管、滤风

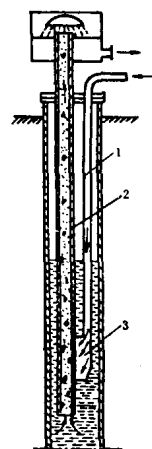


图 1-1 空气扬水机
工作原理图

1—通气管；2—扬水管；3—井管

器、吸气管及各种仪表组成。其平面布置如图 1-3 所示。

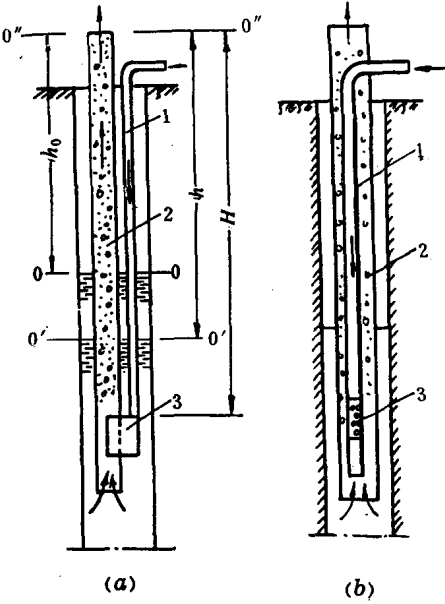


图 1-2 空气扬水机的构造

(a) 平行式; (b) 同心式

1—通气管; 2—扬水机; 3—喷气管

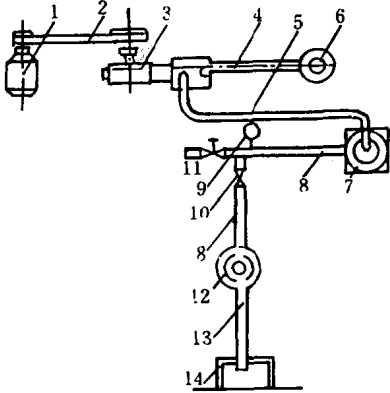


图 1-3 空气扬水机装置平面布置

1—电动机; 2—皮带; 3—空气压缩机; 4—吸气管;
5—出气管; 6—滤风器; 7—空气罐; 8—通气管;
9—压力表; 10—气门; 11—放气阀; 12—水井;
13—扬水管; 14—出水池

第二节 空气扬水机工作参数 和各部件尺寸的确定

一、扬水高度、提水量、空气量及空气压力的确定

(一) 扬水高度计算式

扬水高度 h 是井动水位到扬水管出口的垂直距离,如图 1-4 所示。由于扬水管内是液气两相混合流,流动情况比较复杂。因此,在推导扬水高度计算公式时,采用了一元均匀流动的假定。根据图 1-5 写出单元体 1-1 到 2-2 断面的能量方程

$$\frac{p}{\rho_m g} + \frac{v_m^2}{2g} = \frac{p + dp}{\rho_m g} + \frac{(v_m + dv_m)^2}{2g} - dz + dh_f \tag{1-1}$$

式中 p ——液气混合流体压力, Pa;
 ρ_m ——液气混合流体的密度, kg/m³;
 v_m ——液气混合流体的速度, m/s;
 h_f ——液气混合流体的阻力损失, m;
 z ——液气混合流体距基准面的高度, m;
 g ——重力加速度, m/s²。

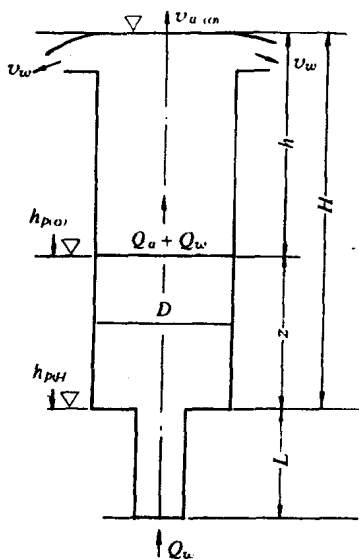


图 1-4 空气扬水机工作参数计算图

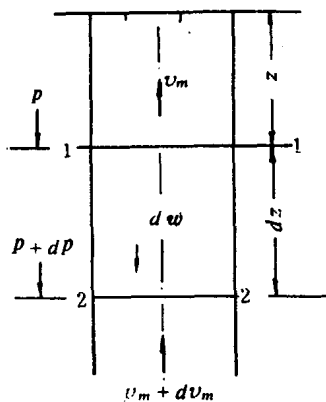


图 1-5 空气扬水机单元体原理图

$$dh_f = \frac{\lambda dz}{D} \frac{v_m^2}{2g} \quad (1-1a)$$

式中 D ——管路直径, m。

为了求解 (1-1) 式及 (1-1a) 式, 必须确定液气混合流体的速度 v_m 、相对速度 u 及密度 ρ_m 。它们都和压力有关, 是位置高度 z 的函数。

1. 液气混合流体速度 $v_m(z)$

$$v_m(z) = \frac{Q_a(z) + Q_w}{f} = v_a(z) + v_w \quad (1-2)$$

式中 $Q_a(z)$ ——空气在高度 z 处体积流量, m^3/s ;

Q_w ——提水流量, m^3/s ;

v_w ——水流速度, m/s ;

f ——总过流断面, $f = \frac{\pi}{4} D^2$, m^2 ;

$v_a(z)$ ——空气在高度 z 处的流速, m/s 。

气体是等温状态下被压缩的, 所以

$$v_{a(z)} = \frac{p_0}{p_z} v_{a(0)}$$

式中 $v_{a(0)}$ ——大气压力情况下空气的流速;

p_0 ——大气压力;

p_z ——高度 z 处的压力。

2. 相对流速 $u(z)$

相对流速 u 是液气混合流速 v_m 与气泡在静水中上升速度 v 之和。

$$\begin{aligned} u(z) &= v_m(z) + v \\ &= \frac{Q_a(z) + Q_w + vf}{f} \end{aligned} \quad (1-2a)$$

3. 混合液体密度 $\rho_m(z)$

$$\rho_m(z) = \frac{\rho_a(z) f_a(z) + \rho_w f_w}{f} \quad (1-2b)$$

式中 $\rho_a(z)$ ——空气在高度 z 处的密度, kg/m^3 ;

ρ_w ——水的密度, kg/m^3 ;

f_w ——水的过流面积, m^2 ;

$f_a(z)$ ——空气过流面, m^2 。

$$f_a(z) = \frac{Q_a(z)}{u(z)} = \frac{fQ_a(z)}{Q_a(z) + Q_w + vf} \quad (1-2c)$$

由于

$$f = f_a(z) + f_w$$

$$f_w = f - f_a(z) = \frac{f(Q_w + vf)}{Q_a(z) + Q_w + vf} \quad (1-2d)$$

将 (1-2c) 及 (1-2d) 式代入 (1-2b) 式, 整理后得

$$\rho_m(z) = \frac{\rho_a(z) Q_a(z) + \rho_w(Q_w + vf)}{Q_a(z) + Q_w + vf}$$

由于空气密度 $\rho_a(z)$ 与水密度 ρ_w 相比很少, 故 $\frac{\rho_a(z)}{\rho_w} \approx 0$ 。

上式可改写为:

$$\begin{aligned} \rho_m(z) &= \frac{\rho_w(Q_w + vf)}{Q_a(z) + Q_w + vf} \\ &= \frac{\rho_w}{\frac{p_0}{p(z)} \left(\frac{v_{a(0)}}{v_w + v} \right) + 1} \end{aligned} \quad (1-2e)$$

4. 扬水高度 h 表达式

由于 $v_m = v_m(z) + v_w$

$$= v_{a(0)} \frac{p_0}{p} + v_w \quad (1-2f)$$

$$dv_m^2 = 2(v_w + v_{a(0)} \frac{p_0}{p}) v_{a(0)} \frac{p_0}{p^2} dp \quad (1-2g)$$

式中 p 是任意点处压力。

将 (1-2e)、(1-2f)、(1-2g) 式代入 (1-1) 式, 整理后得

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{p_0}{p} \left(\frac{v_{a(0)}}{v_w + v} \right) + 1 \right] \frac{dp}{dz} = g + \frac{\lambda}{2D} v_w^2 \left(1 + \frac{v_{a(0)}}{v_w} \frac{p_{a(0)}}{p} \right)^2$$

$$+ v_w v_{ao} \left(1 + \frac{v_a(\cdot) p_o}{v_w p} \right) \frac{p_o}{p^2} \frac{dp}{dz} \quad (1-3)$$

令 $h_p = \frac{p}{\rho_w g}$, $h_{p_o} = \frac{p_o}{\rho_w g}$, 代入上式, 整理后得

$$dz = dh_p \left[\frac{1 + \frac{h_{p_o} v_a(\cdot)}{h_p (v_w + v)} - \frac{v_w v_a(\cdot)}{g} \left(1 + \frac{v_a(\cdot) h_{p_o}}{v_w h_p} \right) \frac{h_{p_o}}{h_p^2}}{1 + \frac{\lambda v_w^2}{2gD} \left(1 + \frac{v_a(\cdot) h_{p_o}}{v_w h_p} \right)^2} \right] \quad (1-3a)$$

由图 1-4 可知

$$h = H - z$$

$$H = \int_0^z dz + \int_z^h dz$$

上式积分整理后, 得扬水高度

$$h = \frac{h_{p_o} v_a(\cdot)}{v_w + v} \ln \frac{h_p(H)}{h_{p_o}} + \frac{v_w v_a(\cdot)}{g} \left(\frac{h_{p_o}}{h_p(H)} - 1 \right) + \frac{v_a^2(\cdot)}{2g} \left(\frac{h_{p_o}^2}{h_p^2(H)} - 1 \right) - \Delta h_f \quad (1-4)$$

$$\Delta h_f = h_{p_o} + z - h_p(H) \quad (1-4a)$$

(二) 提水流量计算式

管路水力损失 Δh_f 可以用另一方式表达。

$$\Delta h_f = \frac{\rho_m(H)}{\rho_w} \frac{v_m^2(H)}{2g} + \sum \xi \frac{v_w^2}{2g} \quad (1-5)$$

$$\sum \xi = \xi_H + \frac{\lambda_w L_u}{D_u} \quad (1-5a)$$

$$v_m(H) = v_w + \frac{v_a(\cdot) h_p(\cdot)}{h_p(H)} \quad (1-5b)$$

式中 L_u ——吸水井管长度, m;

D_u ——吸水井管直径, m;

ξ_H ——吸水井管局部阻力系数;

λ_w ——吸水井管沿程阻力系数。

$$\rho_m(H) = \frac{\rho_w}{\frac{h_p(\cdot)}{h_p(H)} \left(\frac{v_a(\cdot)}{v_w + v} \right) + 1} \quad (1-5c)$$

将 (1-5a)、(1-5b)、(1-5c) 式代入 (1-5) 式, 并假定静水中气泡上升速度 $v \approx 0$, 整理后得

$$v_w^2 + \frac{v_w v_a(\cdot) h_p(\cdot)}{h_p(H)} \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{D_u} \right)^4 \sum \xi} - 2g \Delta h_f \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{D_u} \right)^4 \sum \xi} = 0 \quad (1-6)$$

$$\text{解上式得 } v_w = \frac{v_{a(o)} h_{p(o)}}{2 h_{p(M)}} \cdot \frac{\kappa}{1 + \left(\frac{D}{D_u}\right)^4 \sum \xi} \quad (1-7)$$

$$k = \sqrt{1 + 8g\Delta h_f \left(\frac{h_{p(M)}}{h_{p(o)} v_{a(o)}}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{D}{D_u}\right)^4 \sum \xi\right]} \quad (1-7a)$$

$$\text{提水量} \quad Q_w = v_w \cdot f \quad (1-8)$$

(三) 空气量的计算

根据等温压缩理论可求出每扬 1 m^3 的水所需的空气量 V_0 ，即所需空气量与扬水量之比

$$V_0 = \frac{Q_{a(o)}}{Q_w} \quad V_0 \text{ 可如下计算}$$

$$V_0 = \frac{h}{2.3\eta \lg \frac{h(k-1)+10}{10}} \quad (1-9)$$

式中 $k = \frac{H}{h}$ —— 喷管淹没系数；

h —— 动水位至出水口的垂直距离，m；

H —— 喷气管到出水口的垂直距离，m；

η —— 空气扬水机的效率（不包括空气压缩机和通气管的效率）。其值随 k 值的增加而增大，如表 1-1 所列。空气扬水机的 V_0 和 η 值，也可用图 1-6 曲线查出。

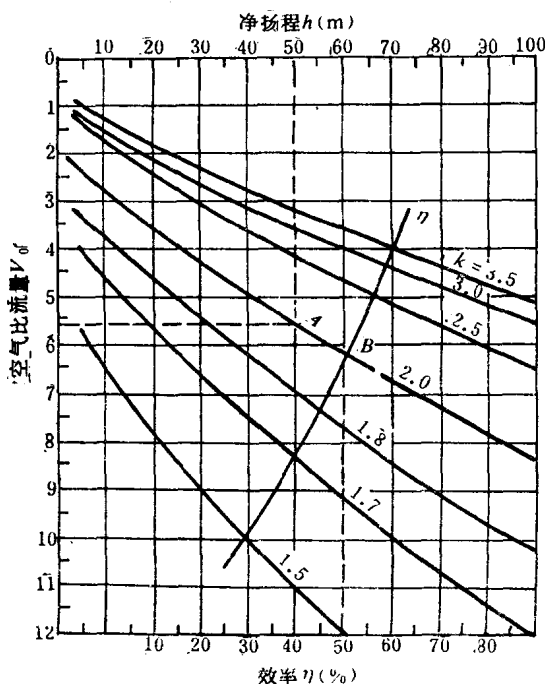


图 1-6 空气扬水机 V_0 、 η 关系曲线

联立水解式 (1-2)、(1-6)、(1-7)、(1-8)、(1-9) 便可求出 h 、 Q_w 、 $Q_{a(o)}$ 等工作参数。计算时可编成电子计算机程序用迭代法求解。

(四) 空气压力计算

空气扬水机启动时，压缩空气所需的压力值 p_1 称为启动压力。 p_1 可如下计算

$$p_1 = 9.81(H - h_0 + h_{f1}) \quad (1-10)$$

式中 p_1 —— 启动压力，kPa；

H —— 喷气管至扬水管出口的垂直距离，m；

h_0 —— 静水位到扬水管出口的垂直距离，m；

h_{f1} —— 启动时能量损失水头，一般为 2 m 左右。

空气扬水机在正常工作时，压缩空气所需要的压力 p_0 称为工作压力。 p_0 可如下

计算

$$p_u = 9.81 (H - h + h_f) \tag{1-11}$$

式中 p_u ——工作压力, kPa;
 h ——动水位至扬水管出口垂直距离, m;
 h_f ——压缩空气流经混合器和通气管所产生的能量损失(一般不能大于5m), m。
在选择空气压缩机的工作压力时, 若 $p_1 > p_u$, 则选用 p_1 , 反之, 采用 p_u 。

表 1-1 淹没系数 k 与效率 η 关系

k	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
η	0.3	0.5	0.57	0.59	0.605

二、扬水管和通气管直径的确定

管径若选得大, 则能量损失小, 但价格高; 管径小, 则相反。研究表明: 当扬水管水气混合液的流速在 6 ~ 8 m/s 和通气管流速为 8 ~ 10 m/s 时, 较为经济合理。扬水管及通气管直径可根据上述经济流速确定。

三、喷气管尺寸的确定

空气扬水机如为同心式布置方式, 则喷气管在扬水管内部, 其型式和尺寸如图 1-7 和表 1-2 所列。采用平行式布置方式时, 喷气管在扬水管外面, 其型式和尺寸如图 1-8 和表 1-3 所列。表 1-4 是喷气管喷气孔的布置尺寸, 可供查用。

表 1-2 同心式布置喷气管的尺寸

通气管直径 (mm)	喷气管长度 (mm)	每列气孔数 (孔)	气孔直径 (mm)	通气管直径 (mm)	喷气管长度 (mm)	每列气孔数 (孔)	气孔直径 (mm)
19	1490	6	4	50	1490	8	6
25	1490	8	4	65	2075	12	6
32	1490	8	5	75	2075	15	6
38	1490	8	6	100	2075	22	6

表 1-3 平行式布置喷气管尺寸 (单位: mm)

扬水管直径 D	通气管直径 d	各部分尺寸代表符号 (图 1-8)						井孔最小直径 D_0
		A	B	C	E	F	L	
50	19	100	75	500	800	800	2500	150
	25	110	75	500	800	800	2500	150
	32	120	75	500	800	800	2500	150
65	25 ~ 32	130 ~ 140	90	500	800	800	2500	150
75	25 ~ 32	145	100	800	1000	1000	3500	150
	38	145	100	800	1000	1000	3500	150
87	32 ~ 38	170	120	800	1000	1000	3500	200
100	32	175	135	1000	1500	1000	4000	200
	38	180	135	1000	1500	1000	4000	200
150	50	250	190	1100	1500	1000	4000	250
	65	265	190	1100	1500	1000	4000	300

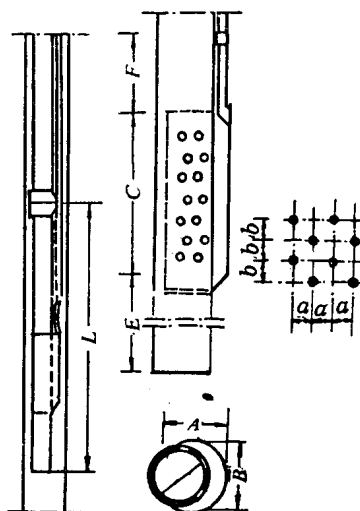


图 1-8 平行式布置喷气管形式和尺寸

(单位: mm)

第三节 空气压缩机的选择和空气扬水装置效率的确定

一、空气压缩机风量的确定

$$W = aV_0Q \quad (1-12)$$

式中 W ——空气压缩机的供气量, m^3/min ;

a ——安全系数, 考虑空气的温度、湿度和大气压的变化和各项空气漏损等因素的影响, 一般采用 $a = 1.1 \sim 1.3$;

V_0 ——空气比流量, 按式 (1-1) 确定;

Q ——扬水量, m^3/min 。

二、空气压缩机风压的确定

根据式 (1-10)、(1-11) 分别求出空气扬水机的起动压力 p_1 和工作压力 p_2 , 进行比较, 选其大者, 作为所选空气压缩机供给的风压。

三、空气压缩机轴功率的确定

$$N = W \cdot p \cdot N_0 \quad (1-13)$$

式中 N ——空气压缩机的功率, W ;

W ——空气压缩机风量, m^3/min ;

p ——空气压缩机风压, kPa ;

N_0 ——比功率, 即空压机在 98.1kPa , 工作压力下产生 $1\text{m}^3/\text{min}$ 的压缩空气所需功率。 N_0 的选用可参照表 1-5。

表 1-5

空气压缩机的比功率 N_0

(单位: W)

风压 p (kPa)	单级空压机	双级空压机
785		746 ~ 783
687		806 ~ 843
589	970 ~ 1044	858 ~ 903
491	1029 ~ 1119	933 ~ 977
392	1104 ~ 1194	1082 ~ 1134
294	1201 ~ 1298	1306 ~ 1358
196	1276 ~ 1410	

四、空气扬水机装置效率

$$\eta = \frac{1000Qh}{N} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中 η ——空气扬水机装置效率, %;

Q ——空气扬水机出水量, m^3/s ;

h ——动水位到扬水管出口垂直距离, m 。

求出风量, 风压和轴功率后, 就可根据产品样本选择所需型号和规格的空气压缩机, 再根据空压机轴功率选配动力机。

复习思考题

- 1-1 空气扬水机为什么能提水，如何增大扬水机的提水高度？
- 1-2 空气扬水机有什么特点，它应用在什么场合？
- 1-3 空气扬水机有哪几种型式，其优缺点如何？
- 1-4 如何确定扬水量及空气量？
- 1-5 淹没系数 k 与扬水机效率 η 有何关系？
- 1-6 如何选择空气压缩机？

第二章 拉杆式活塞泵

第一节 拉杆泵的工作原理及特点

· 拉杆式活塞泵（拉杆式往复泵）简称拉杆泵。图 2-1 是一种游梁式拉杆泵的结构简图。它主要由泵体、出水部分（包括拉杆）和井上传动部分组成。

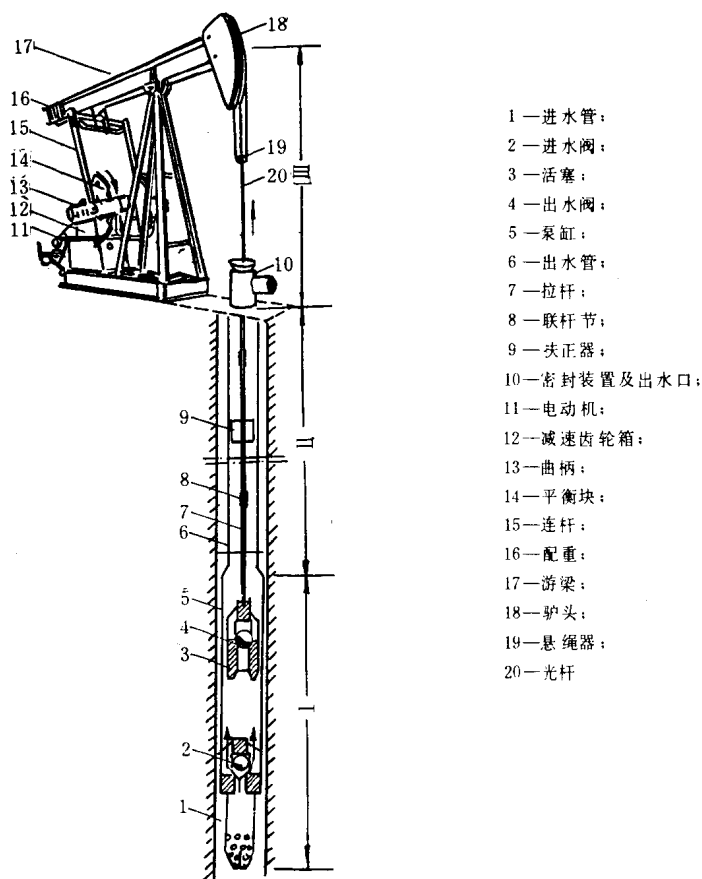


图 2-1 游梁式拉杆泵

I—泵体；II—出水部分；III—井上传动部分

拉杆泵的工作原理如图 2-2。在未工作前，泵缸淹没在水面以下，泵缸中充满了水，活塞位于泵缸的最下部（称下死点）。当活塞向上运动时（图 2-2a），活塞下面的泵缸容积增大，压力减小。水在大气压和井中水柱的压力作用下，经滤水网顶开进水阀进入泵缸下部，形成“吸水作用”。与此同时，由于出水阀被活塞上面的水柱压紧而关闭，所以当活塞上行时，上面的水就被迫随活塞一起向上运动，从泵缸流进水管中。当活塞上升到泵缸最上端时（称上死点），出水管中水位也上升到某一高度而停止，形成“扬水作用”。当

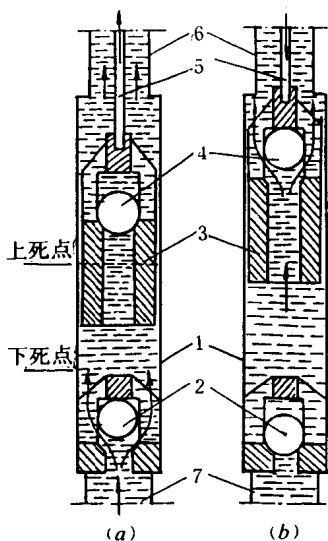


图 2-2 拉杆泵扬水原理图
(a) 活塞上行; (b) 活塞下行
1—泵缸; 2—进水阀; 3—活塞; 4—出水阀;
5—拉杆; 6—出水管; 7—进水管;

活塞向下运动时 (图 2-2b) 泵缸内压力增加, 迫使进水阀关闭, 活塞下面的水通过活塞中心孔顶开出水阀, 流到活塞上面, 填充活塞下行时所空出的空间。可见, 在活塞下行时并不起吸水和扬水作用, 只是把活塞下面的水随着活塞的下行而流到活塞的上面。当活塞再次向上运动时, 活塞下面又形成吸水作用, 活塞上面则形成扬水作用, 迫使出水管中水面继续上升。这样, 活塞上下不断运动, 出水管中水面不断上升, 最后流出管口。

拉杆泵和长轴井泵、潜水电泵相比, 具有扬程高, 起动操作方便, 泵体结构简单等优点。但它的流量小, 活塞易磨损, 金属用量大并需要复杂笨重的传动设备。

拉杆泵在石油开采中应用较多, 井下扬程已达 1500m。在农用井泵中对高扬程 (超过 100m), 小流量 ($2 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$) 的深井提水比较合适。

第二节 拉杆泵的结构

拉杆泵的主要部件是: 活塞、泵缸、拉杆和传动机构。

一、活塞和泵缸

活塞一般为圆筒形, 由铸铁加工而成, 它的外周设有密封结构。根据活塞和泵筒间的密封方式的不同, 分为摩擦环式和水封环式两种 (图 2-3、图 2-4)。

摩擦环式密封是活塞与泵缸内壁之间用金属或耐磨橡胶环。

水封环式密封是泵缸内壁和活塞外壁之间留有一定的微小缝隙, 在沿活塞外壁长度上, 加工成许多环形沟槽, 当活塞上面泄漏的水量沿具有沟槽的缝隙流动时, 连续进行收缩和扩散, 消耗能量, 增大阻力, 以防止水的通过, 达到密封效果。这种密封方式具有机械磨损小, 效率高, 使用寿命长等优点。但活塞加工精度要求较高, 制造较复杂。

为了减少活塞和泵缸之间的磨损, 泵缸内表面必须光滑和耐磨。

二、拉杆

拉杆是把井上部分和井下部分连接起来, 并通过它传递能量的部件。在运行过程中, 拉杆受力复杂。容易发生断杆事故。所以在设计、制造、安装和使用时, 要特别重视。它分为刚性和柔性拉杆两种。

刚性拉杆由许多实心钢杆通过连杆节连接而成。拉杆的连杆节型式很多, 图 2-5(a) 是采用螺纹箍相联方式, 图 2-5(b) 是先把几根钢杆焊在一起, 然后用螺纹连接。图 2-6