

万邦烈 编著

# 采油机械的设计计算

高等工业学校  
教学用书

石油工业出版社



33496

T 73  
002

# 采油机械的设计计算

万邦烈 编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是石油高等院校矿场机械专业学生的专业课教材。重点阐述有杆抽油设备、无杆抽油设备、修井设备、压裂和酸化设备以及压气设备（压缩机）的结构特点、工作理论和设计计算方法，同时以一定的篇幅介绍它们的选择和使用问题。

本书可作为从事采油机械方面工作的工程技术人员的参考书。

## 采油机械的设计计算

万邦烈 编著

石油工业部教材编审委员会（北京963信箱）

石油工业出版社出版

（北京安定门内东大街二区一号楼）

地质印刷厂排版

通县向阳印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 25印张 601千字 印1—6,500

1988年6月北京第1版 1988年6月北京第1次印刷

书号：15037·2851 定价：3.90元

ISBN 7-5021-0000-8/TE·1

## 前 言

《采油机械的设计计算》是石油高等院校矿场机械专业学生的专业课教材。

采油机械的种类繁多，用途很广。为了有重点而系统地进行课堂教学，同时考虑到我国油田生产实际和今后发展，便于有关工程技术人员参考，本书由以下五章组成：有杆抽油设备；无杆抽油设备；修井设备；压裂和酸化设备；压气设备。

本书系统地总结了笔者多年来在采油机械方面的教学经验和研究成果，力求反映当前国内外采油机械的水平。本书重点介绍上述采油机械的结构特点，工作理论和设计计算方法。为了提高采油机械的科学管理水平和使用经济效益，本书以一定的篇幅介绍它们的选择和使用的问题。

书中应用了国际单位制。但为了从工程单位制过渡方便起见，压力均以 $1\text{kgf}/\text{cm}^2 \cong 0.1\text{MPa}$ 代替。

本教材由华东石油学院矿机教研室张嗣伟副教授审阅，并提出不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于水平有限，编写的时间比较匆促，书中的缺点和错误在所难免，恳切地希望广大读者批评指正。

万 邦 烈

1986年1月

# 目 录

<b>第一章 有杆抽油设备</b> .....	( 1 )
第一节 概述 .....	( 1 )
第二节 游梁式抽油机 .....	( 2 )
第三节 无游梁式抽油机 .....	( 60 )
第四节 抽油杆 .....	( 79 )
第五节 抽油泵 .....	( 98 )
<b>第二章 无杆抽油设备</b> .....	(113)
第一节 概述 .....	(113)
第二节 水力活塞泵 .....	(114)
第三节 电动潜油离心泵 .....	(140)
第四节 其它无杆抽油设备 .....	(181)
<b>第三章 修井设备</b> .....	(191)
第一节 概述 .....	(191)
第二节 修井机的典型结构 .....	(192)
第三节 修井机驱动功率的确定和起升速度的选择 .....	(204)
第四节 修井机的液力机械传动装置(阿里森传动装置) .....	(209)
第五节 修井机车装设计中的几个问题 .....	(227)
第六节 修井起下操作机械化设备 .....	(230)
第七节 不压井修井设备和工具 .....	(242)
<b>第四章 压裂和酸化设备</b> .....	(248)
第一节 概述 .....	(248)
第二节 压裂与酸化设备的组成、结构和作用原理 .....	(248)
第三节 泵注设备的设计计算 .....	(260)
第四节 混合设备的设计计算 .....	(272)
第五节 液压驱动式压裂泵和泵外加砂装置简介 .....	(283)
<b>第五章 压气设备(压缩机)</b> .....	(288)
第一节 概述 .....	(288)
第二节 活塞式压缩机 .....	(291)
第三节 离心式压缩机 .....	(343)
第四节 螺杆式压缩机 .....	(379)
第五节 压缩机的选择 .....	(394)
<b>参考文献</b>	

# 第一章 有杆抽油设备

## 第一节 概 述

目前，采油方法有自喷采油法和机械采油法两种。自喷采油法的特点是利用地层本身的能量来举升原油。随着油田的不断开发，地层能量逐渐消耗，即使在注水开发的油田，它的中、后期也出现了水淹和强水淹现象。为了保证原油的稳产、高产，这些油井就不能继续用自喷法开采。同时，由于油层的地质特点，有一些油井一开始就不能自喷。对于上述这些不能自喷的油井，就必须用机械采油法进行开采。机械采油法又分为气举法和抽油法两种。气举法的特点是利用压缩气体的能量，把原油提升到地面；而抽油法的特点是将各种结构的泵放到井下进行抽油，所以，抽油法又叫泵法。从国外石油工业最发达的国家来看，用抽油法开采的井数在生产井总数中占绝大多数，约80%左右，而抽油法所开采的原油占总产量的半数以上。由于我国油田发展的特点（处于开发初期和中期，采用注水措施），目前，不论在生产井数方面还是在原油总产量方面，自喷法都占相当大的比重。但从油田的发展趋势来看，采用机械采油法，特别是抽油法的井数和产量都在增长，在一些老油田几乎全用抽油法采油。因此，本教材的前面两章就讨论抽油法开采用的设备即抽油设备。

用抽油法开采，国内外应用最广泛的抽油设备是游梁式抽油机-抽油泵装置，或称作有杆抽油设备。它的结构简单、制造容易、维护方便。图1-1为游梁式抽油机-抽油泵装置简图。整套装置由三部分组成：一是地面部分——游梁式抽油机，它由电动机、减速箱和四连杆机构组成；二是井下部分——抽油泵，它悬挂在套管中油管的下端；三是联系地面和井下的中间部分——抽油杆柱，它由一种或几种直径的抽油杆和接箍组成。由图可见，电动机通过三角皮带传动带动减速箱。减速后，由四连杆机构（曲柄、连杆、横梁和游梁）把减速箱输出轴的旋转运动变为游梁驴头的往复运动。用驴头带动光杆和抽油杆作上下往复的直线运动。通过抽油杆再将这个运动传给井下抽油泵中的柱塞。在抽油泵泵筒的下部装有固定阀（吸入阀），而在柱塞上装有游动阀（排出阀）。当抽油杆向上运动、柱塞作上冲程时，固定阀打开，泵从井中吸入原油。同时，由于游动阀关闭，柱塞将它上面油管中的原油上举到井口。这就是抽油泵的吸入过程。当抽油杆向下运动，柱塞作下冲程时，固定阀关闭而游动阀打开，柱塞下面的油

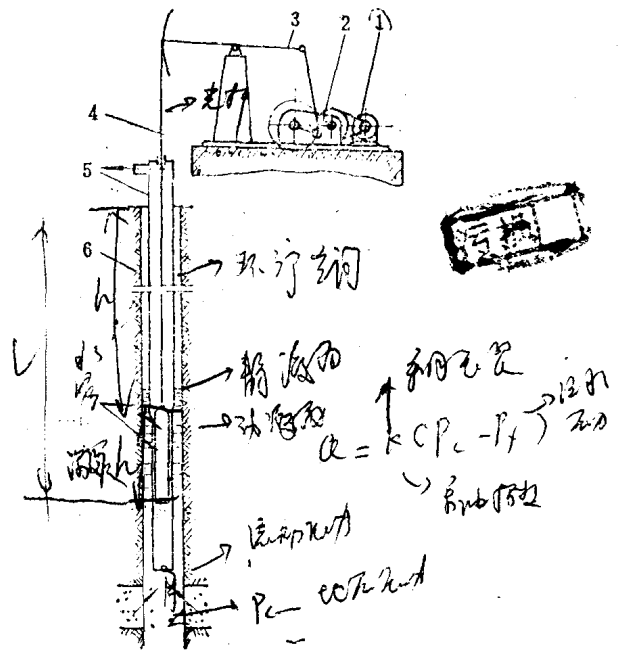


图 1-1 游梁式抽油机-抽油泵装置简图

- 1—电动机；2—减速箱；3—四连杆机构；
- 4—抽油杆柱；5—油管；6—套管；7—抽油泵

通过游动阀排到它的上面。这就是抽油泵的排出过程。实际上,游梁式抽油机-抽油泵装置相当于一个特殊结构的单缸单作用柱塞泵,只不过将它的水力部分放到井下成为抽油泵,将它的驱动部分放在地面变为游梁式抽油机,两者用又细又长的活塞杆——抽油杆连接起来。

随着井深和产量的不断增加,同时随着油井开采复杂条件的经常出现(如高粘、多蜡、多砂、多气、水淹和强腐蚀性等条件),游梁式抽油机-抽油泵装置的缺点就很明显,主要是抽油机的重量增大;在生产中抽油杆的事故增多而抽油泵的排量降低。

为了减轻抽油机的重量,采用无游梁式抽油机。它分为机械式无游梁抽油机和液压式无游梁抽油机(即液压式抽油机)两种。它们的共同特点是保留抽油杆,维持有杆抽油设备的工作方式。无游梁式抽油机,特别是液压式抽油机的采用,可以降低抽油杆柱中的应力和改善它的工作条件,因而扩大了有杆抽油设备的使用范围。

为了减少抽油杆事故和克服抽油泵排量降低的缺点,彻底改变有杆抽油设备的工作方式,近年来,大力发展了无杆抽油设备。无杆抽油设备的特点是:取消抽油杆,把发动机移到井下,直接带动泵抽油。关于无杆抽油设备的结构原理和设计计算将在第二章中讨论。

考虑到我国有杆抽油设备的现状和发展特点,本章着重讨论游梁式抽油机和抽油杆的工作理论、设计计算和选择方法,对无游梁式抽油机和抽油泵也作较详细的介绍。

## 第二节 游梁式抽油机

### 一、游梁式抽油机的结构

目前,最常用的游梁式抽油机是采用机械平衡方式,它具有前后臂。如图1—2所示,它主要由游梁、驴头、横梁、连杆、曲柄、减速箱、制动机构、支架、撬座、悬绳器以及平衡重等所组成。这种抽油机,根据发动机安装的位置不同,有两种方案,一种如图1—2所示,将发动机放在机器尾部;另一种将发动机放在游梁支架下面,使撬座减短。如用内燃机带动时,则内燃机放在附加撬座上,内燃机和减速箱用三角皮带传动。根据减速箱放置不同,也有两种结构,如图1—2所示,减速箱直接放在撬座上,其优点是抽油机重量小,但由于曲柄及曲柄平衡重半径过大,工作时需用较高基础将它支起;另一种结构是将减速箱架高,使曲柄及其平衡重可自由旋转,而基础则可降低到地面一样高,安装、修井都很方便,但制造减速箱支架较费钢材。

总的说来,游梁式抽油机的结构较简单,下面着重分析它的主要组成部分:

#### 1. 驴头

驴头用来将游梁前端的往复圆弧运动变为抽油杆的垂直直线往复运动。驴头弧面半径 $R$ (图1—3)应等于前臂长度。为了保证在一定冲程长度下,将圆弧运动变为直线运动,圆弧面长度应为

$$S_x = (1.2 \sim 1.3) S_{max}$$

式中  $S_{max}$ ——驴头悬点(挂抽油杆处)的最大冲程长度。

驴头用钢板焊成。2型抽油机(“2”指驴头悬点的最大载荷为20kN)驴头在修井时可翻到游梁上面,而3型以上的已改为沿垂直轴侧转,称为侧转式驴头。这样操作方便而安全,如图1—4所示,其宽度 $b$ 应保证在修井时让开的位置可使大钩上下活动,自由起吊。

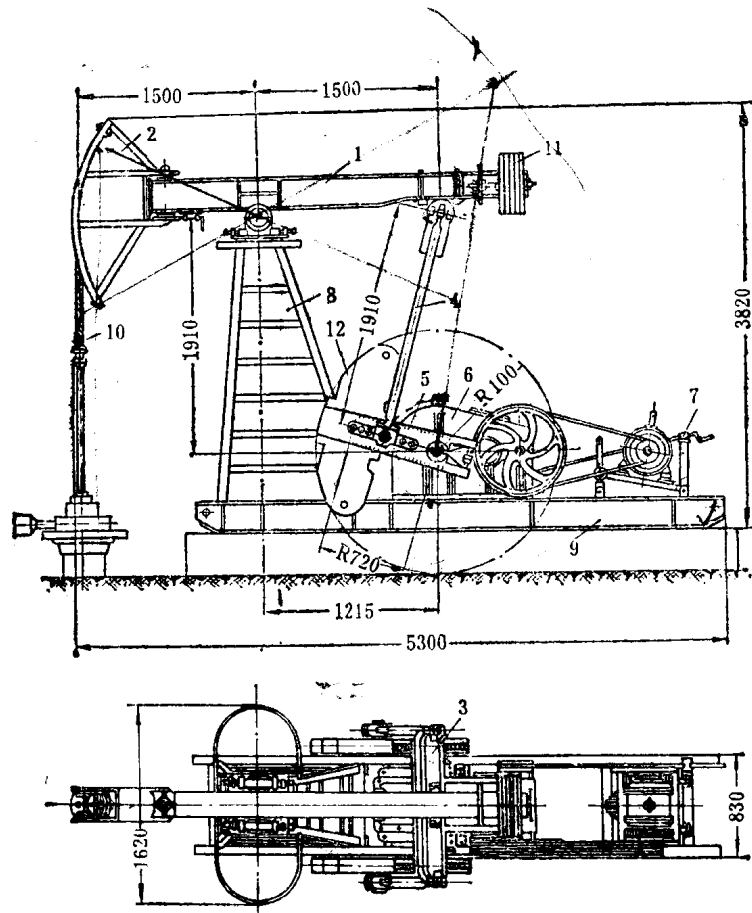


图1-2 CYJ3-1515型抽油机

1—游梁，2—驴头，3—横梁，4—连杆，5—曲柄，6—减速箱，7—制动机构，8—支架，9—底座，10—悬绳器，11、12—平衡重

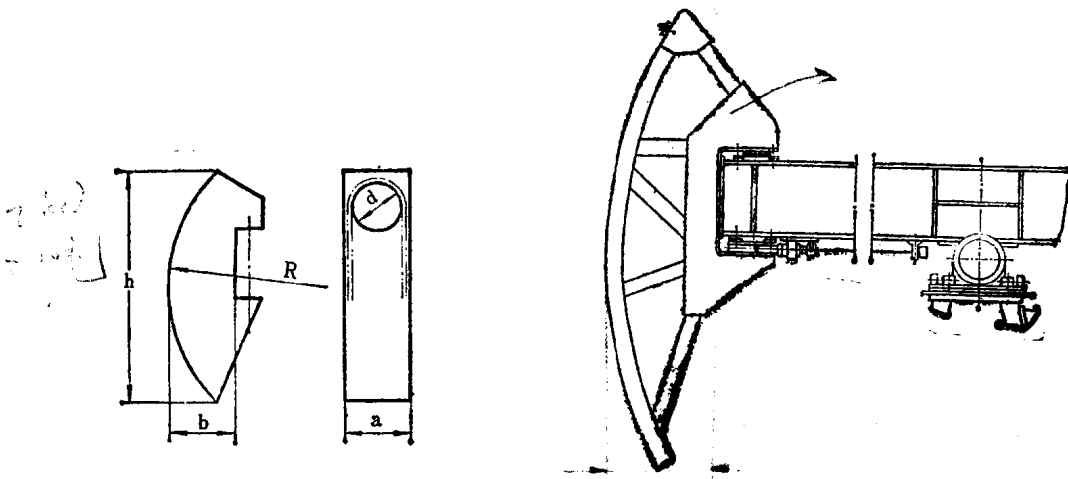


图 1-3 驴头尺寸

图 1-4 侧转式驴头

## 2. 游梁

游梁用型钢组合焊成，也有用普通工字钢制成。它用一个中间短轴和两个轴承支在抽油



机支架上。由于游梁负担抽油机的全部载荷，所以要有一定的强度和刚度。图1—5为不同结构的游梁。图a中为用工字钢制成的游梁，结构简单易制造，但材料利用不够合理。图中b为一个等强度断面的游梁，虽然材料利用合理，但制造较麻烦。图中c是用型钢焊制的。一般多采用图中d的结构，在工字钢上加两块加强板，制造不太复杂，断面近似等强度，金属使用较合理。在没有大型工字钢情况下，可采用图中c的复合结构。图e是一种将驴头焊在一起的桁架式结构，比一般游梁都轻些，但驴头是固定的，修井时不够方便，在制造和装配上也增加了一定困难，所以应用不广泛。

### 3. 横梁及连杆

横梁及连杆可分为两种结构：一种是将横梁及连杆制造在一起，如图1—6所示，其特点是连接件很少，结构很简单，用在小型抽油机中，它由改变后臂长度来调节冲程长度。另一种结构是单独横梁，如图1—7，用于一般大型抽油机中，它由改变曲柄和连杆的连接点位置来调节冲程长度。

横梁的制造方法有三种：一是用型钢直接制成，二是焊接，三是铸造。为了使横梁和连杆的连接点与横梁和游梁的连接点在同一水平线上，往往将横梁作成弓形，这样就增加了抽油机四连杆在工作中的刚性，改善了连杆与横梁连接销子的工作条件。

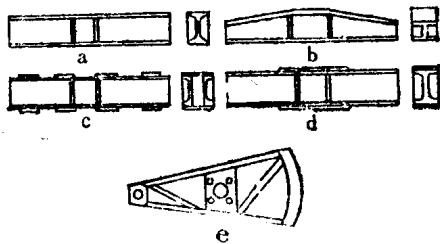


图 1—5 各种结构的游梁

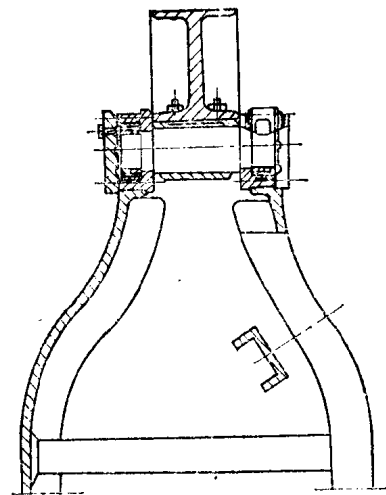


图 1—6 横梁和连杆的焊接结构

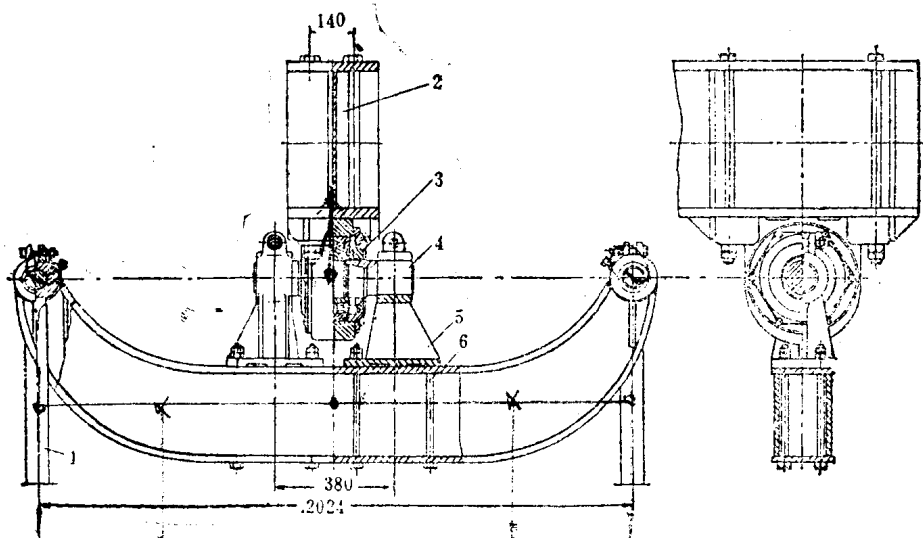


图 1—7 抽油机的横梁

1—连杆；2—游梁；3—密封环；4—横梁轴；5—轴承架；6—横梁

连杆结构如图1—8所示，一般都用无缝钢管制成，两端焊有连杆头。正常工作时，上端连杆头和横梁无转动，用销子相连。下端连杆头和曲柄用曲柄销子连接，在连杆销处安有滚动轴承。曲柄销子和曲柄间一般用圆锥面相连，在销子头上用一螺母固死销子和曲柄，在曲柄上有3~4个锥孔，用以改变冲程长度。

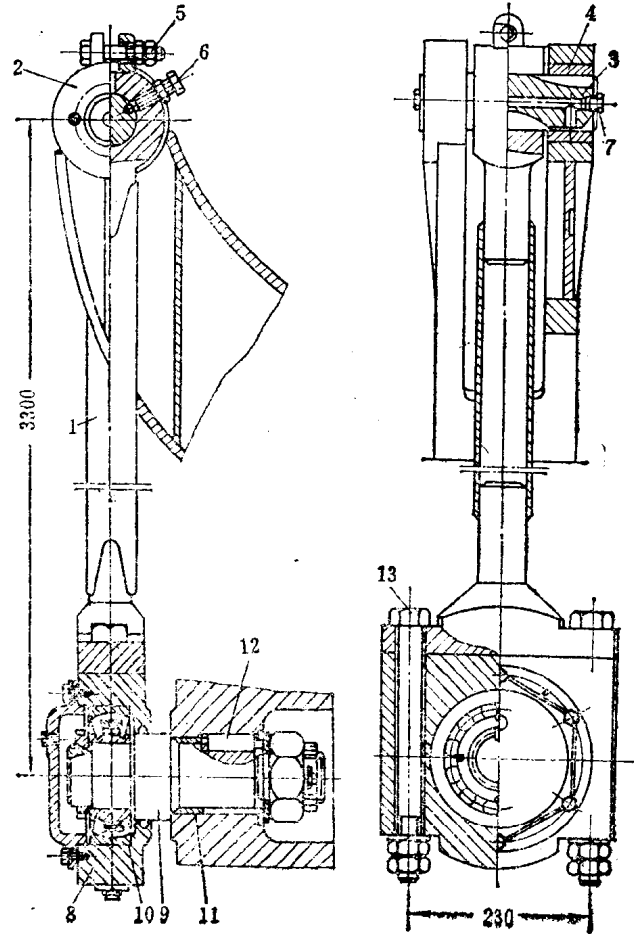


图 1—8 抽油机连杆

1—连杆体；2—连杆上头；3—销子；4—衬套；5—螺钉；6—止动螺钉；7—丝堵；8—连杆下头体部；9—曲柄销；10—轴承；11—曲柄销衬套；12—键；13—连杆螺钉

#### 4. 平衡重

由于游梁式抽油机上、下冲程的载荷很不均匀，上冲程时，驴头需提起抽油杆柱和油柱，而下冲程时，抽油杆依靠自重就可以下落，这样就使发动机做功极不均匀。为了使上、下冲程发动机做功均匀，采用了平衡重的结构。游梁式抽油机平衡重分两类：一类为游梁平衡重，装在游梁尾部，一般作成片状，在调整时，用人力抬到抽油机上或取下来；另一类为曲柄平衡重，装在曲柄上，类型较多，目前广泛使用的有两种，一种为一般偏心重结构，如图1—9所示；另一种为图1—10所示的扇形结构。偏心重结构制造容易，但调整较困难，而扇形结构调整较方便，当需将偏心块调到某位置时，可将圆曲柄旋转，使要调的位置在最下方，松开固紧螺钉后，扇形平衡重沿导轨自动落到要调的位置。为了调整方便

及安全，在两种曲柄上都有导轨及挡块，固紧螺钉即使松开，也不会使偏心重落下。

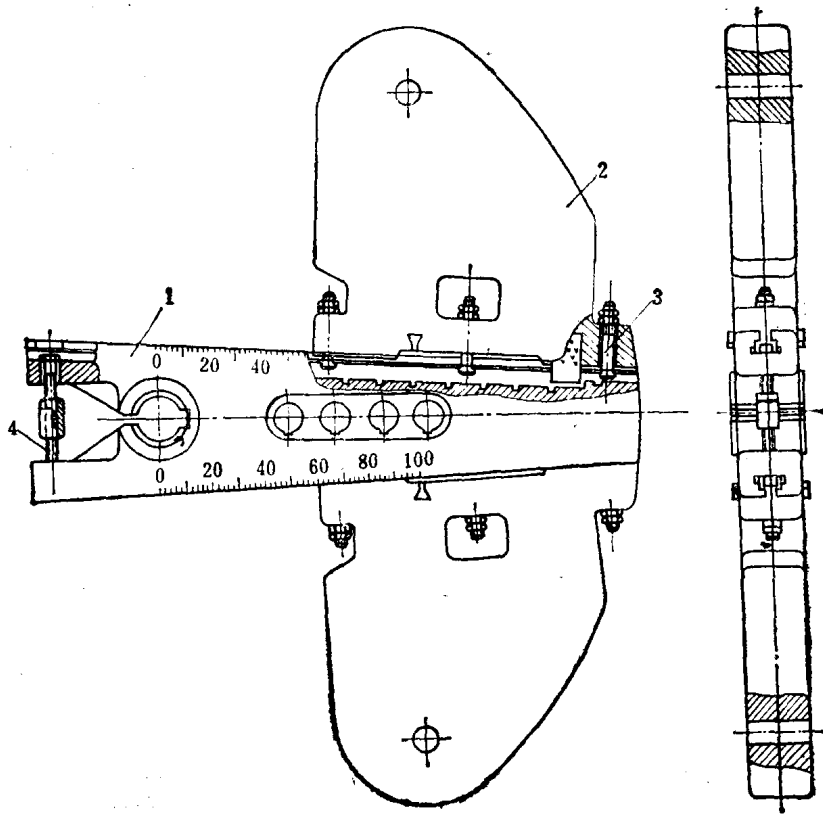


图 1—9 曲柄及曲柄平衡重的结构  
1—曲柄；2—平衡重块；3—连接螺钉；4—拉紧螺钉

### 5. 减速箱

一般使用的减速箱多为两级齿轮式，传动比  $i=25\sim40$  左右，在个别情况下也有使用一级齿轮减速箱或链轮减速箱。由于工作载荷大，一般小功率时采用斜齿，大功率时采用人字齿，并开始采用圆弧齿轮。减速箱采用圆弧齿轮后，其承载能力比渐开线齿轮提高0.5~1倍，因而比相同参数的渐开线齿轮减速箱体有所减小，这样也给抽油机其它部分尺寸的缩小创造了条件。图1—11为10型抽油机渐开线齿轮减速箱。

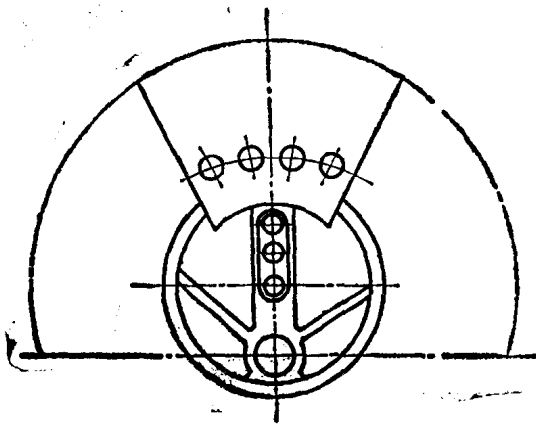


图 1—10 扇形结构曲柄及平衡重

### 6. 刹车机构

常用刹带型或闸瓦型。

### 7. 支架

常用型钢焊成，特轻型的可用一根圆管作支架，重型的可作成三腿或四腿的桁架。

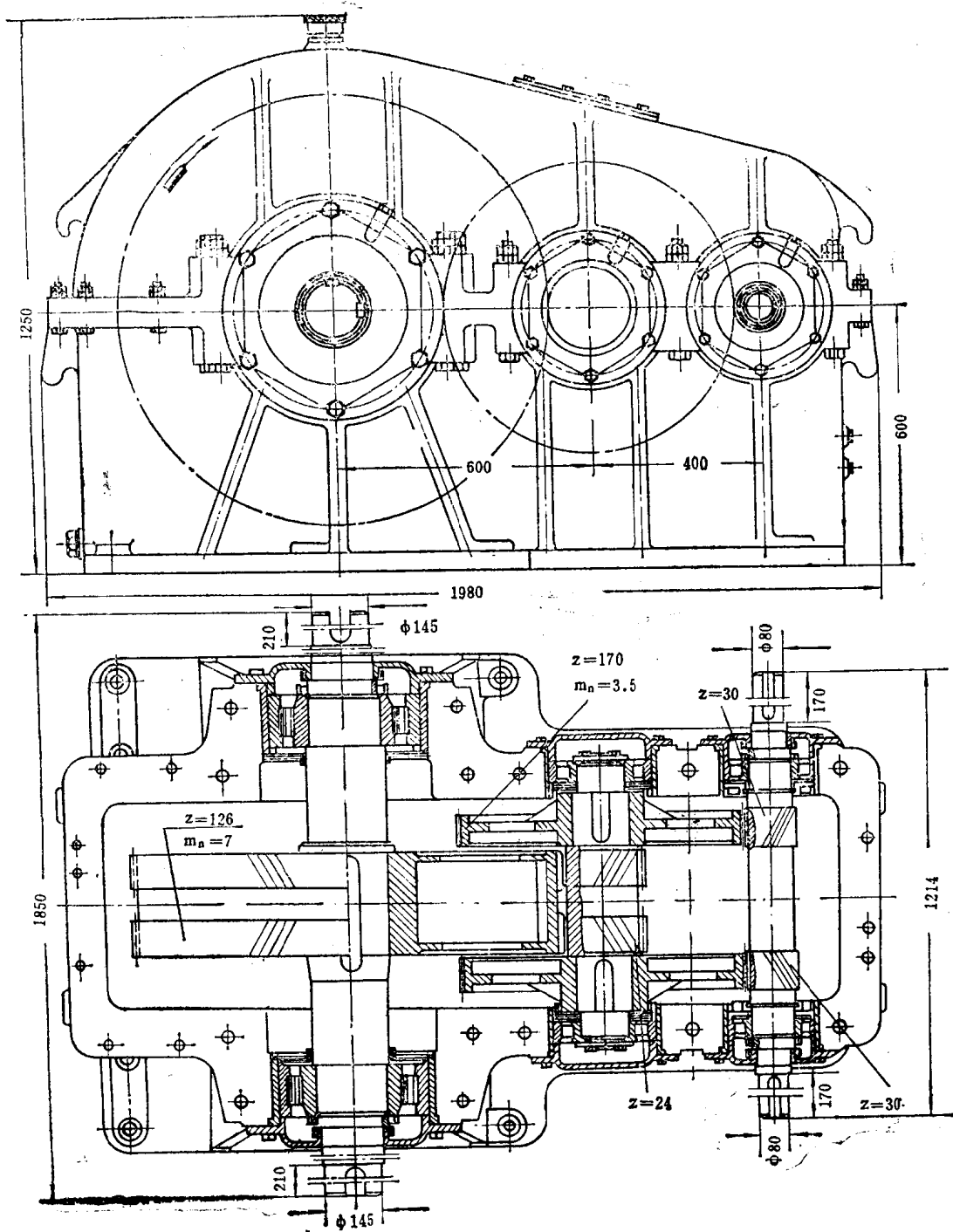


图 1—11 10型抽油机的减速箱

## 二、游梁式抽油机的基本参数和分类

抽油设备的功用就是从一定的井深处抽出一定数量的原油，所以，井深和产量就标志着抽油设备的工作范围。为了达到这两个指标，对游梁式抽油机的工作能力提出了四方面的要求，这就是游梁式抽油机的四个基本参数：

### 1. 驴头悬点（挂抽油杆处）的最大允许载荷

它主要取决于抽油杆柱和油柱的重量，实际上，它表明在一定的抽油杆和抽油泵泵径组合时的最大下泵深度（或井深）。目前，悬点的最大允许载荷 $P_{max}$ 从5~8kN到150~280kN。

根据悬点最大允许载荷 $P_{max}$ 的变化范围，可把抽油机分为下列几种：

轻型.....  $P_{max} \leq 30\text{kN}$

中型.....  $30\text{kN} < P_{max} \leq 100\text{kN}$

重型.....  $P_{max} > 100\text{kN}$

### 2. 悬点最大冲程长度 $S_{max}$

它主要决定抽油机的产量以及抽油机的基本尺寸和重量。石油矿场上，应用的悬点最大冲程长度 $S_{max}$ 从0.3到10m，而用得最广的在6m以下。

根据悬点最大冲程长度 $S_{max}$ 的变化范围，可把抽油机分为下列几种：

短冲程.....  $S_{max} \leq 1\text{m}$

中等冲程.....  $1\text{m} < S_{max} \leq 3\text{m}$

长冲程.....  $3\text{m} < S_{max} \leq 6\text{m}$

超长冲程.....  $S_{max} > 6\text{m}$

### 3. 悬点的最大冲程次数 $n_{max}$

它表明抽油机的抽汲工况。最大冲程次数 $n_{max}$ 和最大冲程长度 $S_{max}$ 一起，确定了抽油机的最大产量（当泵径一定时）。目前，实际应用的悬点最大冲程次数从2~4 $\text{min}^{-1}$ 到20 $\text{min}^{-1}$ 。因为抽油杆的折断次数和冲程次数成正比，所以限制了冲次的进一步提高。

根据悬点最大冲程次数 $n_{max}$ 的变化范围，可把抽油机分为下列几种：

低冲次.....  $n_{max} \leq 6\text{min}^{-1}$

中等冲次.....  $6\text{min}^{-1} < n_{max} \leq 15\text{min}^{-1}$

高冲次.....  $n_{max} > 15\text{min}^{-1}$

### 4. 减速箱曲柄轴最大允许扭矩 $M_{max}$

它和上述的三个基本参数间存在一定关系，特别是和悬点最大冲程长度 $S_{max}$ 成正比，即 $S_{max}$ 越大， $M_{max}$ 也越大。同时，曲柄轴的最大允许扭矩 $M_{max}$ 确定了减速箱的尺寸和重量。

根据减速箱曲柄轴最大允许扭矩 $M_{max}$ 的变化范围，可把抽油机分为下列几种：

小扭矩.....  $M_{max} \leq 10\text{kN}\cdot\text{m}$

中等扭矩.....  $10\text{kN}\cdot\text{m} < M_{max} \leq 30\text{kN}\cdot\text{m}$

大扭矩.....  $30\text{kN}\cdot\text{m} < M_{max} \leq 60\text{kN}\cdot\text{m}$

超大扭矩.....  $M_{max} > 60\text{kN}\cdot\text{m}$

如果将扭矩和冲程次数两个基本参数相乘，就得到抽油机单位时间（一分钟内）所需的功，就是抽油机的功率。所以，也可根据抽油机所需的最大功率 $N_{max}$ 把它分为下列几

种:

- 小功率..... $N_{max} \leq 5kW$
- 中等功率..... $5kW < N_{max} \leq 25kW$
- 大功率..... $25kW < N_{max} \leq 100kW$
- 超大功率..... $N_{max} > 100kW$

上面, 我们根据抽油机的四个基本参数( $P_{max}$ 、 $S_{max}$ 、 $n_{max}$ 、 $M_{max}$ )和最大功率 $N_{max}$ 对

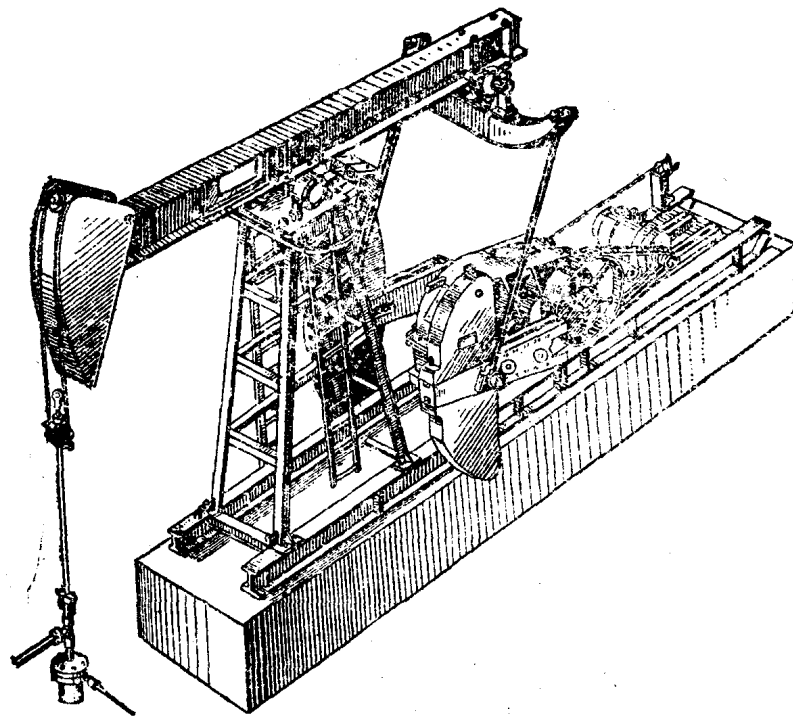


图 1—12 游梁式抽油机

它进行分类, 以便于抽油机设计计算时解决合理的选型问题。此外, 游梁式抽油机还可按其结构和平衡方式不同来进行分类。

目前, 用得最多的单独驱动游梁式抽油机, 按结构不同可分为基本型式(图1—12)和前置式(图1—13)。前置式由于改变了杆件的连接形式, 可使其悬点最大载荷降低10%, 而且还可减小冲击载荷和延长抽油杆使用寿命, 所以前置式多为重型长冲程抽油机。

按平衡方式不同, 游梁式抽油机又分为机械平衡和气动平衡两种。机械平衡有游梁平衡、曲柄平衡和复合平衡三种: 游梁平衡用于轻型抽油机; 曲柄平衡用于重型抽油机; 而复合平衡用于中型抽油机。机械平衡需要金属多, 调整不方便, 但结构很简单, 是目前应用最多的一种。气动平衡重量轻,

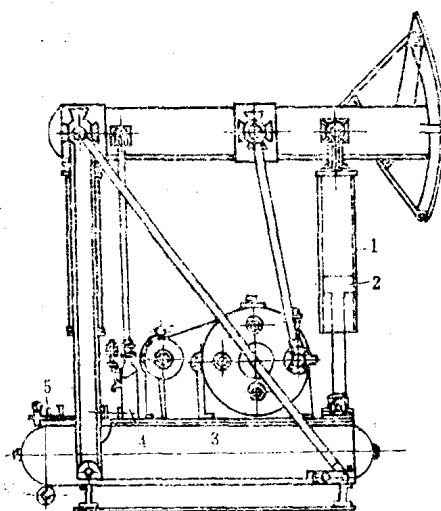


图 1—13 前置式游梁式抽油机  
1—平衡气缸; 2—平衡活塞; 3—空气包;  
4—辅助压气机; 5—压力调节器

调整方便，但结构较复杂，多用于重型长冲程的抽油机。

为了能对游梁式抽油机正确地进行设计计算和选择使用，首先必须研究上述四个基本参数（悬点载荷、冲程长度、冲程次数和曲柄轴扭矩）的大小和变化规律；其次讨论影响抽油机结构和使用特点的重要问题——平衡问题和确定抽油机所需功率；最后，根据油田生产实际给定的条件对抽油机进行设计计算和合理选择。

### 三、游梁式抽油机驴头悬点载荷的确定

游梁式抽油机驴头悬点载荷是标志抽油机工作能力的重要参数之一，也是抽油机设计计算和选择使用的主要根据。

当抽油泵工作时，抽油机的驴头悬点上作用有下列六项载荷：

(1) 抽油杆柱自重，用 $P_{杆}$ 表示（它在油中时的重量用 $P'_{杆}$ 表示），作用方向向下。

(2) 油管内、柱塞上的油柱重（即柱塞面积减去抽油杆面积上的油柱重），用 $P_{油}$ 表示，作用方向也向下。

(3) 油管外油柱对柱塞下端的压力，用 $P_{压}$ 表示， $P_{压}$ 的大小取决于泵的沉没度，作用方向向上。

(4) 抽油杆柱和油柱运动所产生的惯性载荷，相应地用 $P_{杆惯}$ 和 $P_{油惯}$ 表示。它们的大小与悬点的加速度成正比，而作用方向与加速度方向相反。

(5) 抽油杆柱和油柱运动所产生的振动载荷，用 $P_{振}$ 表示， $P_{振}$ 的大小和方向都是变化的。

(6) 柱塞和泵筒间、抽油杆（接箍）和油管间的半干摩擦力，用 $P_{摩干}$ 表示。还有抽油杆和油柱间、油柱和油管间以及油流通过抽油泵游动阀（排出阀）的液体摩擦力，用 $P_{摩液}$ 表示。 $P_{摩干}$ 和 $P_{摩液}$ 的作用方向和抽油杆的运动方向相反。其中游动阀的液体摩擦力只在泵下冲程、游动阀打开时产生的，所以它的作用方向只向上。

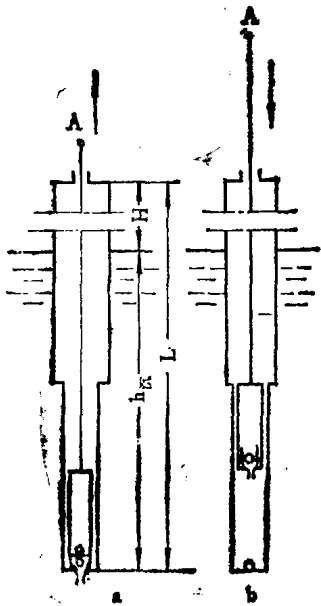


图 1—14 悬点静载荷作用图  
a—上冲程；b—下冲程

上述 (1)、(2)、(3) 三项载荷和抽油杆的运动无关，称为静载荷。(4)、(5) 两项载荷和抽油杆的运动有关，称为动载荷。(6) 项载荷也和抽油杆的运动有关，但是在直井、油管结蜡少和原油粘度不高情况下，它们在总作用载荷中占的比重很小，约占 2~5% 左右，一般可略去不计。由于我国油田上粘油的开采问题相当突出，第 (6) 项的液体摩擦力对悬点载荷的影响很显著，有时不能略去。这里为了叙述方便起见，先讨论静载荷的大小和变化规律，再讨论动载荷的大小和变化规律，在此基础上推荐几个用来确定悬点最大载荷和最小载荷的计算公式，最后定性分析第 (6) 项的摩擦力对悬点载荷的影响问题。

#### 1. 悬点静载荷的大小和变化规律

分别对上冲程、下冲程、下死点和上死点四种情况进行分析（图 1—14）。

##### (1) 上冲程

当悬点从下死点往上移动时，如图 1—14a 所示，游动阀在柱塞上部油柱压力作用下关闭，而固定阀在柱塞下面泵筒

内、外压力差作用下打开。由于游动阀关闭，使悬点承受抽油杆柱自重  $P_{杆}$  和柱塞上油柱重  $P_{油}$ ，这两个载荷的作用方向都是向下的。同时，由于固定阀打开，使油管外一定沉没度的油柱对柱塞下表面产生方向向上的压力  $P_{压}$ 。因此，上冲程时，悬点的静载荷  $P_{静上}$  等于

$$\begin{aligned} P_{静上} &= P_{杆} + P_{油} - P_{压} = \gamma_{杆} f_{杆} L + \gamma_{油} (F - f_{杆}) L - \gamma_{油} h_{沉} F \\ &= f_{杆} L (\gamma_{杆} - \gamma_{油}) + F (L - h_{沉}) \gamma_{油} = P'_{杆} + P'_{油} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中  $\gamma_{杆}$ ——抽油杆材料的重度<sup>①</sup>，N/m<sup>3</sup>；

$\gamma_{油}$ ——原油的重度<sup>①</sup>，N/m<sup>3</sup>；

$f_{杆}$ ——抽油杆截面积，m<sup>2</sup>；

$F$ ——泵柱塞截面积，m<sup>2</sup>；

$L$ ——抽油杆长度或下泵深度，m；

$h_{沉}$ ——泵的沉没度，m，有时可认为  $h_{沉} \approx 0$ ；

$P'_{油}$ ——油井中动液面以上（即  $L - h_{沉}$ ），断面积等于柱塞面积的油柱重，N。

### (2) 下冲程

当悬点从上死点往下移动时，如图1-14b所示，游动阀由于柱塞上、下压力差打开，而固定阀在泵筒内、外压力差作用下关闭。游动阀打开，使悬点只承受抽油杆柱在油中重量  $P'_{杆}$ 。而固定阀关闭，使油柱重量移到固定阀和油管上。这样一来，下冲程时悬点的静载荷  $P_{静下}$  等于

$$P_{静下} = P'_{杆} \quad (1-2)$$

### (3) 下死点（从下冲程到上冲程的转折点）

这时，对抽油杆柱或油管柱来说，载荷都发生了变化：

1) 对抽油杆柱来说，在这一瞬间，悬点载荷发生了变化，由下冲程的  $P_{静下}$  变到上冲程的  $P_{静上}$ ，增加了一个载荷  $\Delta P = P_{静上} - P_{静下} = P'_{油}$ （油柱重），载荷增加就使抽油杆伸长，伸长的大小  $\lambda_{杆}$  等于

$$\lambda_{杆} = \frac{\Delta P L}{E f_{杆}} = \frac{P'_{油} L}{E f_{杆}}$$

式中  $E$ ——钢材的弹性模数，它等于  $2.1 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>（或Pa）。

在伸长变形完毕以后，载荷  $\Delta P$  才全部加到抽油杆或悬点上。实际上，在抽油杆柱受载伸长的过程中，驴头已开始上冲程。当悬点往上走了一个距离  $\lambda_{杆}$  时，由于同时产生的抽油杆柱伸长的结果，使柱塞还停留在原来位置，即柱塞对泵筒没有相对运动，因而不抽油，如图1-15c所示。

2) 对油管柱来说，下冲程时，由于游动阀打开和固定阀关闭，油柱重  $P'_{油}$  压在固定阀上，也就是压在泵筒和油管的下部。而当转到上冲程时，游动阀关闭，整个油柱重量都由柱塞和抽油杆柱承担，而油管柱上就没有这个载荷作用。因此，在抽油杆柱加载的同时，油管柱却卸载。卸载引起油管长度的缩短，直到缩短变形完毕以后，油管柱的载荷才全部卸掉。油管柱的缩短的大小  $\lambda_{管}$  等于

<sup>①</sup> 本教材仍采用现场工程技术人员所熟悉的重度  $\gamma$  的概念，单位为 N/m<sup>3</sup>。 $\gamma = \rho g$ ，式中  $\rho$ —密度，kg/m<sup>3</sup>； $g$ —重力加速度，m/s<sup>2</sup>。



$$\lambda_{\text{管}} = \frac{P'_{\text{抽}} L}{E f_{\text{管}}}$$

式中  $f_{\text{管}}$ ——油管管壁的断面积。

这样一来，虽然悬点带着柱塞一起往上移动，但是由于油管柱的缩短，使油管柱的下端也跟着柱塞往上移动，柱塞对泵筒还是没有相对运动，即还不能抽油(如图1-15d所示)。一直到悬点经过一段距离等于 $\lambda_{\text{管}}$ 以后，柱塞才开始抽油。

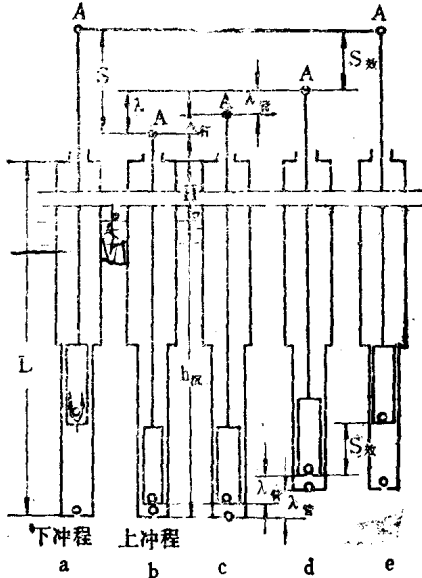


图 1-15 抽油杆柱和油管柱变形过程图解

上面所进行的分析表明：悬点从下死点到上死点虽然走了冲程长度 $S$ ，但是由于抽油杆柱和油管柱的静变形结果，使抽油泵柱塞的有效冲程长度 $S_{\text{效}}$ 要比 $S$ 小。所以

$$S_{\text{效}} = S - \lambda \quad (1-3)$$

而静变形 $\lambda$ 的大小等于

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_{\text{杆}} + \lambda_{\text{管}} = \frac{P'_{\text{抽}} L}{E f_{\text{杆}}} + \frac{P'_{\text{抽}} L}{E f_{\text{管}}} = \frac{P'_{\text{抽}} L}{E f_{\text{杆}}} \left( 1 + \frac{f_{\text{杆}}}{f_{\text{管}}} \right) \\ &= \frac{\lambda_{\text{杆}}}{\psi} \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中  $\psi = \frac{1}{1 + \frac{f_{\text{杆}}}{f_{\text{管}}}}$  称为变形分配系数，一般可取

0.6~0.9。

#### (4) 上死点(从上冲程到下冲程的转折点)

它和下死点情况恰恰相反。这时，对抽油杆柱来说，静载荷由上冲程的 $P_{\text{抽上}}$ 变到下冲程的 $P_{\text{抽下}}$ ，减少了油柱重 $P'_{\text{抽}}$ ，抽油杆因而缩短 $\lambda_{\text{杆}}$ 。因此，当悬点往下走了 $\lambda_{\text{杆}}$ 时，由于抽油杆柱的缩短，柱塞在井下原地不动，它对泵筒不产生相对运动，因而不能排油。而对油管柱来说，因为加载 $P'_{\text{抽}}$ 而伸长了 $\lambda_{\text{管}}$ ，油管(或泵筒)好象跟着柱塞往下走。所以，在悬点再走完 $\lambda_{\text{管}}$ 以前，柱塞和泵筒还不能产生相对运动，也不会排油。因此，在排油过程中，柱塞的有效冲程长度 $S_{\text{效}}$ 比悬点冲程长度 $S$ 减少了一个同样的静变形 $\lambda$ 值。

现在把上、下冲程中悬点静载荷随它的位移变化规律利用图形来表示，如图1-16，这种图形称为静力示功图。图中AB斜线表示悬点上冲程开始时载荷由柱塞传递到悬点的过程。EB线相当于柱塞和泵筒没有发生相对运动时悬点上行时的距离，即 $EB = \lambda$ 。当全部载荷都作用到悬点以后，静载荷就不再变化而成水平线BC，到达上死点C为止。CD线表示抽油杆柱的卸载过程。卸载完毕后，悬点又以一个不变的静载荷向下运动，成为水平线DA而回到下死点A。这种静力示功图，只有在浅井，而且抽油机的冲数较低时才能用动力仪测得。

图1-16表明，在上、下冲程内，悬点静载荷随悬点位移的变化规律是一个平行四边形ABCD。

#### 2. 悬点动载荷的大小和变化规律

在井较深、抽油机冲程次数较大的情况下，必须考虑动载荷的影响。动载荷是由惯性载荷和振动载荷两部分组成。现在先讨论惯性载荷，再讨论振动载荷。