

文章编号: 1001-1986(2009)02-0075-04

煤层气井有杆泵排采设备悬点静载荷计算方法

刘新福, 梁耀光, 刘春花

(中国石油大学机电工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 有杆泵排采设备悬点载荷是标志其工作能力的重要参数之一。悬点载荷中起主要作用的是静载荷。悬点静载荷是选择和正确使用排采设备的重要依据。在研究我国煤层气井开采实际的基础上, 分析了排采设备的悬点载荷, 给出计算悬点静载荷大小的方法及其变化规律, 最终利用现场实测的数据对算法进行了验证。验证结果表明, 悬点静载荷中起主要作用的是杆柱重和液柱重, 但管外液柱对柱塞压力的影响不可忽略; 上下冲程中静变形量相对较小。该计算方法步骤简单, 结果符合实际, 能够较好地满足煤层气井现场数据计算的需要。

关键词: 煤层气; 有杆泵排水采气; 排采设备; 悬点静载荷; 静力示功图

中图分类号: P634 文献标识码: A

Calculating method on static horsehead load of water drainage and gas production equipment about beam pump for CBM wells

LIU Xinfu, QI Yaoguang, LIU Chunhua

(College of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The horsehead load of water drainage and gas production equipment about beam pump is one of the important parameters which mark its work ability. Static horsehead load plays a major role in horsehead load. Static horsehead load is the important basis of selecting and using correctly the water drainage and gas production equipments. Based on studying actual mining in Chinese CBM wells, the horsehead load of water drainage and gas production equipment was analyzed, the calculating method of horsehead load and its variation were set up, and the algorithm was verified based on the data of field measurement. The verification results show that the weight of rod string and liquid column plays a major role in static horsehead load, but pressure on the piston imposed by liquid column in outside of tubing cannot be neglected. Static deformation in up and down stroke is relatively small. The calculating method has simple steps, its results conform to reality, and it can meet the need of statistical data calculation for CBM wells. This will help to lay a theoretical foundation of studying the horsehead load of water drainage and gas production equipment in CBM wells. Also it has important directive significance and application value for designing calculating and selecting water drainage and gas production equipment in CBM wells.

Key words: coalbed methane (CBM); beam pump; water drainage and gas production equipment; static horsehead load; static indicator diagram

煤层气井有杆泵排采设备由抽油机、抽油杆和抽油泵为主的有杆抽吸系统组成。目前国内外应用最为广泛的有杆泵排采设备是游梁式抽油机泵装置^[1], 其悬点载荷包括静载荷、动载荷和摩擦载荷。静载荷是指排采设备停机时悬点所受的载荷^[2], 与抽油杆的运动无关。它包括抽油杆自重、柱塞上部井液形成的液柱载荷和管外液柱对柱塞下端的压力3部分。静载荷多采用直接计算的方法。动载荷和摩擦载荷是指悬点运动时所受的载荷, 包括惯性载荷和振动载荷。该类载荷可以通过测取示功图的方

式获得。目前在我国, 应用排采设备进行煤层气的开采还处于起步阶段, 尚没有形成自己的体系^[3]。计算有杆泵排采设备的悬点载荷仍然采用的是油田上采油采气方面的技术和经验, 而针对我国煤层气井开采实际的悬点静载荷计算方法尚没有深入研究, 导致悬点载荷的计算结果与实际相差较大, 影响了排采设备的设计计算和型号选择。因此, 对煤层气井有杆泵排采设备悬点静载荷计算方法进行深入研究, 是煤层气井排采中亟待解决的课题。

笔者在借鉴石油天然气矿场常规抽油机悬点静

收稿日期: 2008-09-03

基金项目: 国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发项目(2008ZX0503805)

作者简介: 刘新福(1983—), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事煤层气排采工艺理论与方法的研究。

载荷计算方法^[4]的基础上, 以我国煤层气井开采实际为研究对象, 对有杆泵排采设备的悬点载荷进行分析, 给出计算悬点静载荷大小的方法, 并研究出其变化规律, 最终利用现场实例对算法进行了验证。

1 悬点静载荷的计算

有杆泵排采设备工作时, 悬点上作用的静载荷 P_J 与抽油机的运动无关, 包括 3 项: 抽油杆柱自重, 用 P_Z 表示, 作用方向向下; 柱塞上部液柱形成的静液柱载荷, 用 P_L 表示, 作用方向向下; 管外气柱及液柱对柱塞下端的压力, 用 P_H 表示, 作用方向向上。

1.1 抽油杆柱重力

排采设备工作时, 抽油杆柱作往复运动, 杆柱重量始终作用在驴头上。上冲程中, 游动阀关闭, 杆柱不受管内液体的浮力作用^[5], 所以, 作用在悬点上的杆柱重力, 是它在空气中的自重。

$$P_Z = A \times \rho g L = q_Z \times g L, \quad (1)$$

式中 P_Z 为抽油杆柱的重力, N; g 为重力加速度, m/s^2 , 取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; A 为抽油杆横截面积, m^2 ; ρ 为抽油杆的材料密度, kg/m^3 , 取 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; L 为杆柱总长度, m; q_Z 为每 m 抽油杆柱的质量^[6], kg/m 。

下冲程中, 游动阀打开后, 油管中液体的浮力作用在抽油杆柱上, 所以, 作用在悬点上的杆柱重力, 是它在液体中的质量, 需减去液体的浮力。

$$P_Z' = A \cdot (\rho - \rho_w) g L = q_Z' \cdot g L, \quad (2)$$

式中 P_Z' 为下冲程中作用在悬点上的抽油杆柱载荷, N; ρ_w 为煤层气井液体的密度, kg/m^3 , 通常取 $\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$; q_Z' 为每 m 抽油杆柱在井液中的质量, kg/m 。

不同尺寸的抽油杆柱在空气及煤层气井液中的质量如表 1 所示。

表 1 抽油杆柱的计算数据

Table 1 The calculation data of rod string

抽油杆直径 d/mm	抽油杆截 面积 A/cm^2	每 m 杆柱 质量 $q_Z/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	井液中每 m 杆柱 质量 $q_Z'/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$
16	2.01	1.67	1.47
19	2.84	2.35	2.06
22	3.80	3.14	2.75
25	4.91	4.09	3.59
28	6.16	5.15	4.52

1.2 液柱载荷

在上冲程中, 游动阀关闭, 作用在柱塞上的液柱引起的悬点载荷作用方向是向下的, 即

$$P_L = (A_H - A) \rho_w g L, \quad (3)$$

式中 P_L 为作用在柱塞上的液体载荷, N; A_H 为柱塞截面积, m^2 。

下冲程中, 由于游动阀打开, 液柱载荷通过固定阀作用在油管上, 而不作用在悬点上。

1.3 管外液柱对柱塞下端的压力

上冲程中, 由于固定阀打开, 使油管外一定沉没度的液柱及动液面处的压力对柱塞下表面产生方向向上的压力 P_H 。在煤层气开采的各个过程中, 沉没压力 P_C 和动液面处的压力 P_G 有所不同。

1.3.1 单相水流动阶段

静载荷 P_C 和 P_G 对柱塞下端的作用, 如图 1 所示。

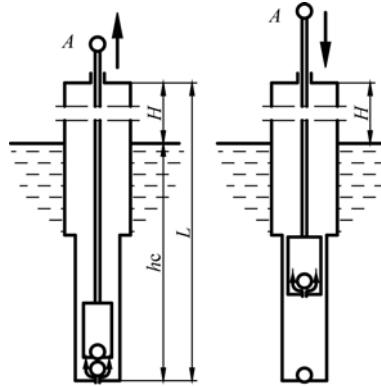


图 1 单相水流动阶段油管外液柱对柱塞下端作用示意图

Fig. 1 The sketch map of pressure on the piston imposed by liquid column on single-phase water stage

由图 1 可知, 动液面以上尚无气柱存在, 动液面处压力 $p_G = 0$ 。上冲程中, 油管外水柱对柱塞下端的压力 P_H 为

$$P_H = P_C = A_H \cdot \rho_w g h_C, \quad (4)$$

式中 ρ_w 为煤层水的密度, kg/m^3 ; h_C 为泵的沉没度(动液面至柱塞下端), m。

1.3.2 气水两相流动阶段

静载荷 P_C 和 P_G 对柱塞下端的作用, 与图 1 所示的情况相似, 只是动液面有所降低, 通常位于煤层以下。另外, 动液面以上有气柱存在, 动液面处压力为 p_G , 动液面以下的液柱为气水两相, 液柱密度随气水比的变化而变化。上冲程中, 油管外液柱对柱塞下端的压力 P_H 为

$$P_H = P_C + P_G = A_H (\rho_m g h_C + p_G), \quad (5)$$

式中 ρ_m 为油管外气水混合物密度, kg/m^3 ; p_G 为动液面处的压力, Pa。

1.3.3 单相气体流动阶段:

静载荷 P_C 和 P_G 对柱塞下端的作用, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 动液面进一步降低, 通常情况下可以认为 $h_C \approx 0 \text{ m}$ 。动液面以上有气柱存在, 动液面处压力为 p_G 。上冲程中, 油管外气柱对柱塞下端的压力 P_H 为

$$P_H = A_H (\rho_m g h_C + p_G) \approx A_H \cdot P_G. \quad (6)$$

在煤层气开采的各过程中, 下冲程时固定阀关闭, 油管外液柱对柱塞下端不产生作用力。

1.4 悬点静载荷的大小

综上所述, 上冲程时, 悬点静载荷 P_{JS} 的大小为

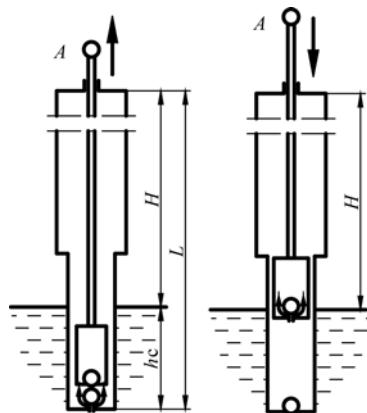


图2 单相气体流动阶段油管外液柱对柱塞下端作用示意图

Fig. 2 The sketch map of pressure on the piston imposed by liquid column on single-phase gas stage

$$P_{JS} = P_Z + P_L - P_H = q_Z g L + (A_H - A) \rho_w g L - A_H (\rho_m g h_c + P_G) ; \quad (7)$$

下冲程时, 悬点静载荷 P_{JX} 的大小为

$$P_{JX} = P_Z = q_Z g L , \quad (8)$$

式中 P_{JS} 和 P_{JX} 分别为上冲程和下冲程中悬点静载荷的大小, N。

2 悬点静载荷的变化规律

2.1 杆柱和油管柱的静变形

2.1.1 下死点处的静变形

下死点为排采设备工作循环时由下冲程至上冲程的转折点。在这一瞬间抽油杆柱的载荷发生了变化, 由下冲程的 P_{JX} 变为上冲程的 P_{JS} , 增加了一个载荷 ΔP , $\Delta P = P_{JS} - P_{JX}$, 从而使杆柱伸长, 直到变形完毕, 载荷 ΔP 才全部加到杆柱上。杆柱伸长的大小 λ_C 为

$$\lambda_C = \frac{\Delta P \cdot L}{EA} = \frac{(P_{JS} - P_{JX}) \cdot L}{EA} ,$$

式中 E 为杆柱材料的弹性模量, GPa, $E = 202 \times 10^9$ Pa; λ_C 为杆柱静变形中伸长的总长度, m。

同时, 在此瞬间, 作用在油管柱的载荷也发生了变化, 下冲程游动阀打开和固定阀关闭, 载荷 ΔP 作用在固定阀上, 而上冲程中游动阀关闭, 油管柱上就没有载荷 ΔP 的作用。卸去了一个载荷 ΔP , $\Delta P = P_{JS} - P_{JX}$, 从而使油管柱缩短, 直到变形完毕, 载荷 ΔP 才全部卸掉, 油管柱缩短的大小 λ_G 为

$$\lambda_G = \frac{\Delta P \cdot L}{EA_B} = \frac{(P_{JS} - P_{JX}) \cdot L}{EA_B} ,$$

式中 λ_G 为油管柱静变形中缩短的总长度, m; A_B 为油管管壁的横截面积, m^2 。

综上所述, 杆柱和油管柱静变形的存在, 使抽油泵柱塞的有效冲程长度 S_Y 要比 S 小, 有效冲程长度 $S_Y = S - \lambda$, 其中静变形 λ 的大小为

$$\lambda = \lambda_C + \lambda_G = \frac{\Delta P \cdot L}{EA} + \frac{\Delta P \cdot L}{EA_B} = \frac{(P_{JS} - P_{JX})L}{E} \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{A_B} \right) . \quad (9)$$

2.1.2 上死点处的静变形

上死点处的静变形情况和下死点的情况正好相反。在上冲程至下冲程的转折点瞬间抽油杆柱的载荷, 由上冲程的 P_{JS} 变为下冲程的 P_{JX} , 减小了一个载荷 ΔP , $\Delta P = P_{JS} - P_{JX}$, 从而使杆柱缩短, 直到变形完毕, 载荷 ΔP 才全部卸掉。杆柱缩短的大小也为 λ_C 。此过程中柱塞在井下原地不动, 对泵筒不产生相对运动, 不进行排液。在上死点瞬间, 作用在油管柱的载荷由于加载了 ΔP 而使油管柱伸长, 直到变形完毕, 载荷 ΔP 才全部加到油管柱上。油管柱缩短的大小也为 λ_G 。油管柱和柱塞一起向下运动, 二者不产生相对运动, 也不进行排液。

由此, 柱塞有效冲程长度 S_Y 比悬点冲程长度 S 减少了一个同样大小的静变形 λ 。

2.2 煤层气井的静力示功图

悬点静载荷大小和静变形量的计算可通过以上步骤求出, 现将悬点静载荷在工作循环中随悬点位移的变化规律用图形, 即静力示功图^[7]直观表现出来, 如图3所示。

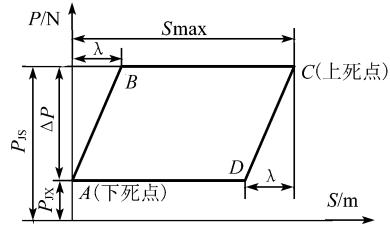


图3 静力示功图
Fig. 3 Static indicator diagram

图中斜线 AB 表示悬点上冲程开始时载荷由柱塞全部传递到悬点的过程, λ 表示柱塞和泵筒没有发生相对运动时悬点上行的距离; 当全部载荷都加载到悬点上以后, 静载荷 P_{JS} 就不再变化, 直到上死点 C 为止。斜线 CD 表示抽油杆柱卸载, 油管柱加载的过程, λ 表示柱塞和泵筒没有发生相对运动时悬点下行的距离; 当载荷卸载完毕以后, 悬点又以不变的静载荷 P_{JX} 向下运动, 直到下死点 A 为止。

对于较浅的煤层气井, 且有杆泵排采设备冲数较低时可用动力仪测得静力示功图。

3 实例计算与分析

铁法煤田大兴区 DT3 井在稳定生产阶段积累了丰富的基础资料, 其生产数据具体如下。现以该煤层气井为例, 运用上述的计算方法计算该井排采设备的悬点静载荷。

a. 基础数据 该煤层气井的基础数据如表2所示。

b. 现场测试数据 由于排采时煤层气井各参数

值是变化的,有的甚至出现突变,计算时采用相对稳定段的测试数据为依据(表 3)。

c. 计算结果 利用上述方法进行相关计算,得

到的计算结果见表 4 所示。

d. 示功图 利用上述计算结果得到该煤层气井的静力示功图,如图 4 所示。

表 2 煤层气井基础数据
Table 2 The basic data of the CBM well

抽油杆直径 <i>d</i> /mm	杆截面积 <i>A</i> /cm ²	泵径 <i>D_H</i> /mm	活塞截面积 <i>A_H</i> /cm ²	油管直径 <i>D</i> /mm	管壁壁厚 <i>D_B</i> /mm	杆柱总长 <i>L</i> /m	杆弹性模量 <i>E</i> /GPa
22	3.8	70	38.48	75.9	5.51	435	202

表 3 煤层气井各参数值数据表
Table 3 The data table of parameters values of the CBM well

动液面 <i>H</i> /m	动液面处压力 <i>p_G</i> /MPa	管内井液密度 <i>ρ_w</i> /kg·m ⁻³	管外井液密度 <i>ρ_m</i> /kg·m ⁻³	井液粘度 <i>μ_w</i> /mPa·s
423	1.962	1016	425	0.79

表 4 煤层气井悬点静载荷计算结果列表
Table 4 The calculated results of static horsehead load in CBM well

杆柱重 <i>P_Z</i> /kN	液柱重 <i>P_L</i> /kN	管外液柱对柱塞压力 <i>P_H</i> /kN	悬点静载荷 <i>P_{JS}</i> /kN	杆柱重 <i>P'_Z</i> /kN	悬点静载荷 <i>P_{JX}</i> /kN	静变形量 <i>λ</i> /cm
13.66	15.33	7.75	21.24	12.0	12.0	7.0

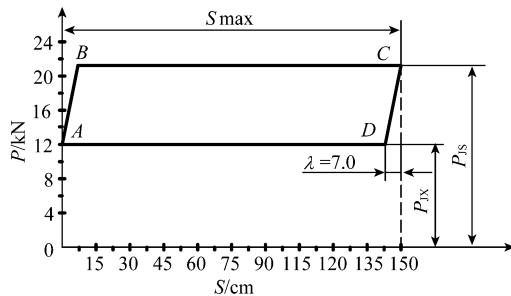


图 4 该煤层气井的静力示功图

Fig. 4 The static indicator diagram of the CBM well

从表 4 可以看出,上冲程中,对悬点静载荷起主要作用的是抽油杆柱重和液柱重,但是管外液柱作用在柱塞上的压力 P_H 对悬点静载荷的影响不可忽略, $P_H/P_{JS} = 36.5\%$ 。在计算悬点静载荷时,应根据不同开采阶段的特点,采用相应方法计算 P_H 值。

从表 4 可知,静变形量较小, $\lambda/S=4.7\%$,其原因是煤层气井较浅,悬点静载荷值相对较小。

通过现场对该井所测取的示功图可知,悬点最大载荷 P_{max} 为 27.5 kN, $P_{JS}/P_{max} = 78.5\%$ 。由此分析出,对煤层气井悬点载荷起主要作用的仍是静载荷,其所占比重大于油气井中静载荷所占的比重。这主要是由于煤层气井有杆泵排采设备的冲程较小、冲次较低,一般其加速度较小,惯性载荷和振动载荷的影响就较小;另外由于井液成分主要是水,同时含有煤屑等细颗粒,可以起到较好的润滑作用,因此摩擦载荷的影响也较小。

4 结 论

a. 煤层气井悬点载荷中起主要作用的是静载荷。由于我国煤层气井较浅(通常小于 1 000 m)和煤粉本身的润滑作用,加上排采设备冲程小,冲次低

的特点,使得静载荷在悬点载荷中所占比重明显要大于在油气井中所占比重。

b. 通过对煤层气井不同开采阶段悬点静载荷大小的研究可知,对悬点静载荷起主要作用的是杆柱重和液柱重。但是在采油机械设计中通常忽略的管外液柱对柱塞压力,在煤层气井有杆泵排采设备的设计计算中不可忽略。

c. 通过对煤层气井悬点静载荷变化规律的研究可知,上下冲程中的静变形量较小,静变形量与冲程的比值明显小于油气井中二者的比值。

d. 计算实例结果显示,上述煤层气井悬点静载荷的计算方法步骤简单,结果符合实际,能够较好地满足煤层气井现场数据计算的需要,为有杆泵排采设备悬点载荷的研究打下理论基础,对煤层气井排采设备的设计计算和型号选择具有重要的指导意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] 孙茂远,黄盛初. 煤层气开发利用手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1998: 237-241.
- [2] 王一平,王海文,张超,等. 利用漏失曲线计算抽油机井悬点静载荷[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(2): 58-60.
- [3] 刘景涛,梁立移,孙顺东. 游梁式抽油机在煤层气开采中的应用与改进[J]. 中国煤层气, 2007, 4(1): 37-39.
- [4] 万邦烈. 采油机械的设计计算[M]. 北京:石油工业出版社, 1994: 10-12.
- [5] 赵庆波. 煤层气地质与勘探技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1999: 157-159.
- [6] 陈宪侃,叶利平,谷玉洪. 抽油机采油技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2004: 123-125.
- [7] 张建军,李向齐,石惠宁. 游梁式抽油机设计计算[M]. 北京:石油工业出版社, 2005: 20-22.