水平井完井管柱力学—数学模型建立*

练章华[1]　林铁军[1]　刘 健[1]　乐 彬[1,2]　陈举芬[3]

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学　2.中国石油东方地球物理公司　3.中国石油西南油气田公司)

练章华等.水平井完井管柱力学—数学模型建立.天然气工业,2006,26(7):61-64.

摘　要　根据水平井井眼轨迹数据以及管柱上封隔器位置,建立了水平井完井管柱受力的力学模型,同时推导出了水平井完井管柱的有效轴向力的数学模型、管柱与井壁摩擦引起的附加力数学模型、流体摩阻引起的附加力的数学模型以及水平井造斜段曲率半径产生的轴向力的数学模型等。根据这些模型,文章开发了相应的水平井完井管柱强度设计的通用设计软件,建立了 API 油管和玻璃钢油管强度数据库。此力学—数学模型、油管强度数据库和所开发的软件在四川水平井气井中得到了应用,用开发的软件验证了 4 口井完井管柱强度设计。同时设计了两口水平井完井管柱的强度设计,证明了此力学—数学模型以及所开发的软件的实用性和可靠性。

主题词　水平井　完井管柱　封隔器　力学模型　数学模型　软件开发

据美国 HIS 能源集团统计,至 1999 年 5 月,世界水平井数量统计中,67 个国家总共有 20430 口水平井,其中美国占 8998 口,加拿大占 8221 口,其他国家和地区占 3211 口。截至 2002 年底,我国水平井共钻 570 口,其中中石油 209 口,中石化 325 口,中海洋 36 口。我国水平井技术还处于初级阶段,随着水平井钻井技术的发展,其配套技术——水平井完井管柱的强度设计、力学研究也必须相应地发展和完善。

目前我国的水平井完井管柱设计主要借鉴国外成功的经验[1],在水平井完井管柱力学研究方面的文献不多。水平井完井油管柱的受力环境比垂直井的完井管柱受力环境复杂得多,主要是在造斜段和水平段,油管柱在造斜段以下,将经受一些附加轴向力的作用,如:由井眼曲率半径引起的轴向附加力、油管柱自重在井眼轨迹法向分力所产生的摩擦力等。因此,要合理地对水平井油管柱进行强度设计,则必须建立正确的水平井完井管柱的力学模型和数学模型。不论是水平井油管柱还是直井油管柱的强度设计,其基本原则都是按抗拉强度、抗外挤强度和抗内压强度进行设计,其基本过程是根据油管柱在井筒中随井深变化,油管柱所经受的外挤压力曲线和内压力曲线进行抗外挤强度和抗内压强度设计,然后,根据油管柱在井筒中经受的轴向拉力曲线进行抗拉强度校核,为了更合理地优化设计,或优选油管柱,将对油管柱的内压曲线、外挤曲线以及轴向拉力曲线上的关键点进行三轴应力校核。或者对油管柱进行三轴应力设计,然后,进行抗拉、抗压和抗外挤强度校核。

一、水平井管柱有效拉力数学力学模型

轴向力是指油管沿轴向的拉力或压缩力,一般情况下,在井口油管柱是受拉力,在油管底部,由于液体浮力作用,油管将受压缩力,或者有封隔器作用时,封隔器处油管也可能受压缩力作用。油管柱有效轴向力主要是油管自重产生的拉力、浮力、摩擦力、摩阻力、弯矩和完井后井内温度、压力变化产生的附加轴向力以及封隔器引起的压缩力等的综合轴向力。本文将建立水平井油管柱的有效轴向力的数学模型。

图 1 所示为水平井井眼轨迹垂直剖面图。H_k 为造斜点深,H_v 为垂深,入靶点(D)处水平位移为 L_1,靶体 DE 段长度为 L_2,整个井眼斜深为 L。

$$W = Lq_s \tag{1}$$

*本文受到国家自然科学基金(编号:50074025)、国家教育部科学技术研究重点项目(编号:205135)和四川省杰出青年基金(编号:03ZQ026-044)资助。本文作者还有徐月霞,杨涛,张建设。

作者简介:练章华,1964 年生,教授,博士生导师;1994 年 6 月毕业于原西南石油学院机械系,获博士学位;从事 CAD/CAE/CFD、套管损坏机理、古构造应力、地应力及射孔完井等教学与科研。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83032210,13308072813。E-mail:cwctlzh@swpi.edu.cn

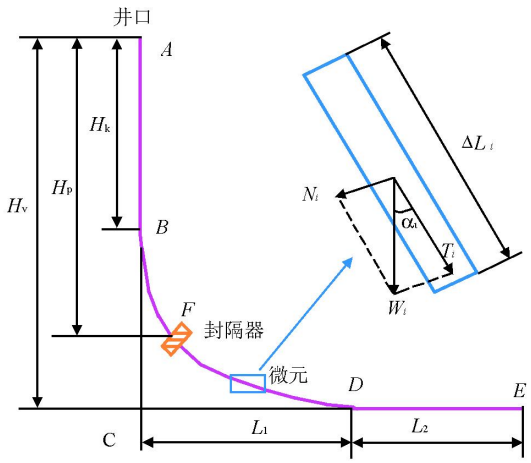

图1　水平井井眼轨迹垂直剖面图

$$T_h = W_s \tag{2}$$

式中：W_s 为整个油管在空气中的自重，N；T_h 为井口拉力，N；q_s 为油管段重，N/m。

如果按最大拉力计算，可用式(2)计算井口拉力，除以抗拉安全系数后，再选择满足抗拉强度要求的油管，这样设计过于偏保守。实际水平井中，油管在水平段产生的垂向拉力为零，造斜段产生的垂向拉力也小于造斜段油管的总重量。下面将详细推导，如图1中造斜段 BDE 曲线上任意取一微小段 ΔL_i，其重量为 W_i，则沿轨迹线的轴向拉力为 T_i，与井壁法向正压力为 N_i，井斜角为 α。图2是其力学模型，则其关系有：

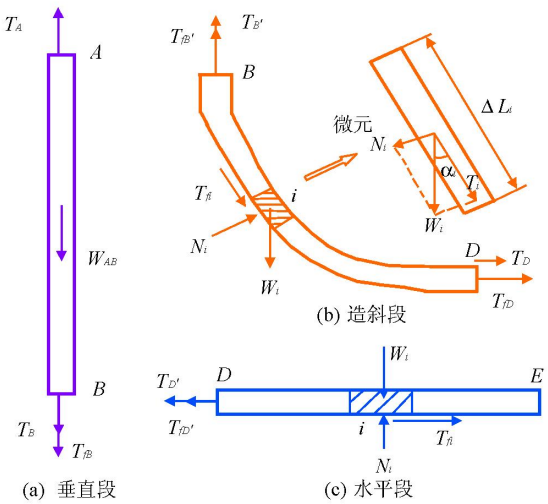

图2　水平井完井管柱力学模型图

$$T_i = W_i \cos\alpha_i \tag{3}$$

$$N_i = W_i \sin\alpha_i \tag{4}$$

则：

$$T_B = \sum_{i=1}^{n} W_i \cos\alpha_i = \int_{BDE} q_s \cos\alpha \, dl \tag{5}$$

$$T_A = q_s H_k + T_B = q_s \left(H_k + \int_{BDE} \cos\alpha \, dl \right) \tag{6}$$

式中：T_B 为 B 点油管的轴向拉力，N；T_A 为井口 A 点油管在空气中的实际拉力，N。

实际水平井油管柱抗拉强度设计，按式(6)设计比按式(2)设计更经济、更合理。如果井眼中流体不是空气，而是液体，这样式(6)中 T_A 还要扣除浮力，但为安全考虑，油管还是按空气重量设计。

二、动态附加力数学模型

1.由管柱与井壁摩擦力引起的附加力

水平井油管在井眼中活动时，将产生动态附加拉力，当油管中不存在流体时，动态附加拉力由造斜段和水平段油管与井壁间的法向力产生的摩擦力构成[2]，其摩擦系数用 f_k 表示，则任意段(图2所示)所产生的摩擦力方向为油管轴向方向，其大小为：

$$T_{fi} = N_i f_k = f_k W_i \sin\alpha_i \tag{7}$$

当油管上提或下放时，最大累计摩擦力发生在图1或图2中 B 点，即造斜点附近，其计算式为：

$$T_{fB} = \sum_{i=1}^{n} T_{fi} = \sum_{i=1}^{n} N_i W_i \sin\alpha_i \tag{8}$$

即

$$T_{fB} = f_k q_s \int_{BDE} \sin\alpha \, dl \tag{9}$$

式(9)为油管上提或下放时的附加动态拉力，当油管上提时，T_{fB} 对油管是拉伸力(+T_{fB})，与图2(a)中 T_{fB} 的方向一致。当油管下放时，T_{fB} 对油管是压缩力(−T_{fB})，与图2(a)中 T_{fB} 的方向相反。因此井口的动态拉力为：

$$T_{A动} = T_A \pm T_{fB} \tag{10}$$

以上各式中：f_k 为油管与井筒之间的摩擦系数；W_i 为第 i 段微元油管重量，N；T_i 为第 i 段微元 ΔL_i 油管上沿轨迹线的轴向拉力，N；N_i 为第 i 段微元 ΔL_i 油管外壁与井壁法向正力，N；α 为第 i 段微元 ΔL_i 油管井斜角，弧度；$T_{A动}$ 为由于油管上提或下放时在井口引起的总的拉力，N。

2.由注入(压裂、酸化)或采出引起的附加力

当油管柱中注入或采出流体时，如压裂、酸化作业或采出等，流体在管柱内流动过程中，将在油管内壁产生摩擦阻力，在注入或采出时，摩阻力的方向刚好相反，由于石油井筒流体的流变性主要符合通用宾汉流体的流变性公式[3]，其雷诺数(ReB)的计算式为：

$$Re\mathrm{B} = \frac{D v \rho}{\eta_p + \frac{\tau_0 D}{6v}} \tag{11}$$

式中：如果管柱中注入高密度的钻井液，或者注入水泥，则静切应力 $\tau_0 \neq 0$（如图 3 所示）；如果注入压裂、酸化等低密度或盐水流体，则静切应力 $\tau_0 = 0$。此时式(3)变为牛顿流体的计算公式，即：

$$ReB = \frac{D\upsilon\rho}{\eta_p}$$

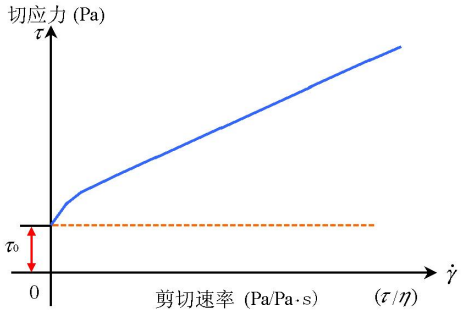

图 3　流体流变曲线关系图

当 $ReB < 2000$ 时，流体流动属于层流，则水头损失 h_f 为：

$$h_f = \lambda \frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} = \frac{64}{ReB}\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \tag{12}$$

当 $ReB > 2000$ 时，流体流动属于紊流，则水头损失 h_f 为：

$$h_f = \frac{0.125}{6\sqrt{ReB}}\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \tag{13}$$

油管中流体沿程压降损失 Δp 为[3]：

$$\Delta p = \gamma h_f = \rho g h_f \tag{14}$$

管壁上的切应力 τ_w（见图 4）为：

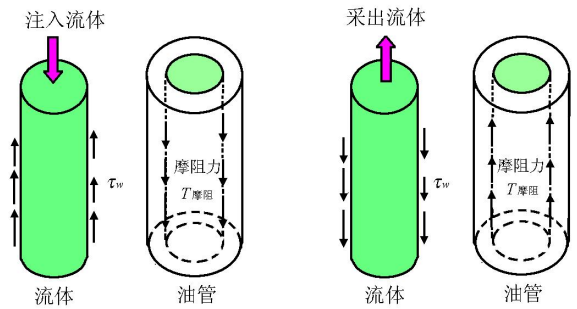

图 4　注入和采出时油管壁面上摩阻力的力学模型图

$$\tau_w = \frac{\Delta p D}{4L} \tag{15}$$

$$T_{摩阻} = \tau_w (L\pi D) = \frac{\pi D^2 \Delta p}{4} \tag{16}$$

$$T_{A动} = T_A \pm T_{摩阻} \tag{17}$$

式(17)中，注入流体时取“+”号，其摩阻力 $T_{摩阻}$ 的方向与图 4(a)中油管上 $T_{摩阻}$ 的方向一致。采出时取“−”号，其摩阻力 $T_{摩阻}$ 的方向与图 4(b)中油管上 $T_{摩阻}$ 的方向一致，正好与注入时相反。当无流体注入时，$T_{摩阻} = 0$，即无摩阻力。因此，在考虑附加动态力时，油管柱抗拉强度设计应按式(10)、(17)进行设计，最恶劣情况考虑两者动态附加拉力同时存在进行设计。

以上各式中，Δp 为油管中流体沿程压降损失，Pa；$T_{摩阻}$ 为整个油管内由流体产生的附加动态摩阻力，N；$T_{A动}$ 为井口的动态拉力，N；τ_w 为管壁上的切应力，Pa；h_f 为水头损失，m；D 为油管内径，mm；υ 为流体流速，m/s；τ_0 为静切应力，Pa；η_p 为粘度，Pa·s；ρ 为流体密度，kg/m^3；ReB 为雷诺数，无量纲。

3.由曲率半径产生的轴向附加力

根据材料力学可知，由曲率半径(R)引起的弯曲应力(σ_T)为：

$$\sigma_T = \frac{D_o E_s}{2R} \tag{18}$$

则由弯曲应力所产生的附加拉力 F_T 为：

$$R_T = A_s \sigma_T = \frac{D_o E_s A_s}{2R} \tag{19}$$

式中：A_s 为油管横截面积，m^2；D_o 为油管外径，m；E_s 为油管材料弹性模量，2.07×10^5 MPa；R 为曲率半径，m。

三、带有封隔器的水平井管柱力学数学模型

1.封隔器在直井段

水平井中典型的酸化和采出管柱的结构示意图见图 5 所示。图 5(b)、(c)是在封隔器下面将结构分割开，则造斜段和水平段在封隔器下面 E 点产生的综合轴向拉力为 T_1，只要能正确计算图5(c)中的综

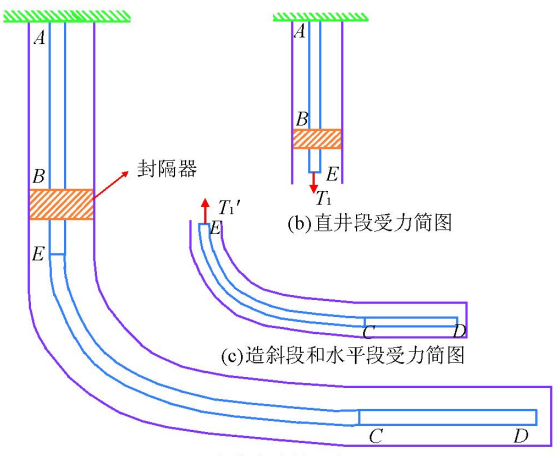

图 5　水平井管柱与封隔器位置示意图

合轴向拉力 T_1（T_1 和图5(b)中的 T_1'是一对作用力和反作用力），那么图5(b)油管的基本效应计算就可以按垂直井油管基本效应的计算方法进行，只是最后在封隔器处 E 点补加由综合轴向力 T_1 对油管在封隔器处产生的轴向变形 ΔL_{T_1}，这个综合力主要包括造斜段和水平段管柱引起的轴向拉力、提升管柱产生的轴向摩擦力、注入流体所产生的流体摩阻力以及曲率半径产生的弯曲拉力。即：

$$T_1 = T_B \pm T_{fB} \pm T_{摩阻} + F_T \qquad (20)$$

式(20)中，T_B、T_{fB}、$T_{摩阻}$和 F_T 的数学模型分别见式(5)、(9)、(16)以及式(19)，这些数学模型都是通过水平井眼轨迹参数建立的。

2.**封隔器在造斜段和水平段**

封隔器在造斜段和水平段时（水平段为造斜段的特殊情况），见图1所示，封隔器（F）在造斜点。

$$T_F = \sum_{i=1}^{n} W_i \cos\alpha_i = \int_{FDE} q_s \cos\alpha_i \mathrm{d}l \qquad (21)$$

式中：T_F 为图1封隔器处，油管的轴向拉力。井口 A 点油管在空气中的实际拉力为：

$$T_A = q_s H_k + \int_{BF} q_s \cos\alpha_i \mathrm{d}l + \int_{FDE} q_s \cos\alpha_i \mathrm{d}l \qquad (22)$$

在造斜段和水平段封隔器处油管内的液柱压力和油管外的液柱压力用封隔器处垂深来计算，而不能用斜深。而附加摩擦力、摩阻力以及弯曲附加同样用前面的公式(9)、(16)和式(19)。

四、水平井油管柱强度设计软件开发

1.**API 油管柱、套管柱强度数据库建立**

在本文软件开发中，根据现有 API 油管、API 套管强度规范数据，建立了完整的 API 油管规范数据库和 API 套管规范数据库，数据库中包含了目前所有的 API 油管和套管强度数据，可以非常方便地查询和调用。

2.**玻璃钢油管、套管及筛管规范数据库建立**

根据 Ameron 公司生产的非 API 玻璃钢井下油管、套管和筛管强度和基本参数手册，建立了该公司生产的非 API 玻璃钢油管、套管及筛管规范的强度数据库，该数据库中可以任意增补新的非 API 玻璃钢油管数据，该数据库可以非常方便地供设计人员选用和查询，如果有其他公司生产的非 API 油管，也可以方便地增补到数据库中供设计选用。

3.**软件开发**

根据本文所推导和建立的水平井油管柱强度设计的力学模型及数学模型以及 API 油管、非 API 油管套管强度数据库。用 Visual Basis 6.0 开发了水平井油管柱强度设计的应用软件，该软件采用友好界面的菜单形式，使设计者可以轻松、愉快地对管柱复杂耦合问题进行快捷、准确地设计和校核。该软件用了大量的标准设计考题进行验证，具有很高的设计可靠性，设计结果全部输入 Word 文件或 Excel 文件形成设计报告，对此报告稍加整理，即可形成完整的正式报告供油田使用。用本文开发的软件验证了四川油气田4口老井水平井油管柱强度设计以及1口直井油管柱变形计算，证明该软件具有一定的可靠性。同时设计了2口新井水平井油管柱强度设计，供四川油气田参考应用。

五、结　论

(1)根据水平井井眼轨迹，建立了正确的水平井完井管柱受力的力学模型。

(2)根据建立的水平井完井管柱的力学模型，推导出了完井管柱受力的各种数学模型，这些数学模型主要包括：有效轴向拉力、管柱与井壁摩擦力引起的附加力、注入或采出引起的摩阻附加力、造斜段曲率半径产生的轴向附加力以及由封隔器引起的附加力。

(3)推导出了封隔器在直井段、造斜段以及水平段的力学计算数学模型。

(4)建立了 API 油管、套管强度规范数据库，以及非 API 玻璃钢油管强度数据库，这些数据库可以任意增补新的油管强度数据库，该数据库可以非常方便地供设计人员选用和查询。

(5)根据本文所建立的水平井油管柱力学——数学模型，再结合油管柱强度设计准则以及安全系数选择准则，开发了水平井油管柱强度设计的应用软件，为水平井油管柱强度设计提供了实用性的手段。

参　考　文　献

[1]徐克彬，尹爱春，顾维军.水平井选择性完井工艺[J].石油钻采工艺，1998，20(4)：1-8.

[2]许福东，张晓东，吕苗荣，等.大位移井完井管柱摩阻计算模型与仿真器[J].石油矿场机械，2001，30(增刊)：21-24.

[3]黄逸仁.非牛顿流体流动及流量测量[M].成都：原成都科技大学出版社，1993.

(收稿日期　2006-03-07　编辑　**钟水清**)