

海上热采井完井管柱设计技术特点分析

盛磊祥, 许亮斌, 蒋世全, 李迅科, 曹砚锋

(中海油研究总院, 北京 100027)

摘要 稠油热采对完井设计提出了特殊的要求。结合渤海某稠油油田的实践经验, 指出了稠油热采完井设计的技术热点, 建立了热采井井筒温度剖面分析模型和生产管柱热载荷伸长量的计算方法。分析了不同注热温度和油管保温措施对注热效果的影响, 对注热造成的油管、筛管伸长进行了评估, 为完井管柱设计采取相关的技术措施提供定量参考。通过算例表明采用保温措施能大大改善注热效果, 尤其是在注热温度较高的情况下, 保温措施能显著降低沿程热量损失; 采用具有低传热保温效果的管柱, 可以缓解伸长量增加对井口预留空间的需求。

关键词 稠油热采; 完井设计; 防砂; 温度剖面; 热载荷

中图分类号 TE52 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2014)02-0111-05

Analysis on Critical Points of Completion Design of Thermal Recovery Well

SHENG Lei-xiang, XU Liang-bin, JIANG Shi-quan, LI Xun-ke, CAO Yan-feng

(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract Completion design for thermal recovery heavy oil well is different from that for normal well. According to experiences on development of heavy oil well in Bohai Bay, key technical points of completion design for thermal recovery heavy oil well are summarized, and analysis models of wellbore temperature profiles and working string thermal load are established. Effects of thermal injection and thermal extension of working string are evaluated, including sensitivity analysis on injection temperature and insulation measures. The results of an example shows that insulation measures can considerably lower the thermal loss along the path and the demand of reserved space in wellhead, especially at high injection temperature.

Key words thermal recovery of heavy oil; well completion design; sand control; temperature profile; thermal load

0 引言

稠油一般指在油层条件下原油黏度大于 50 mPa·s, 原油相对黏度大于 0.934 的原油。按照稠油的黏度和相对黏度又可分为稠油、特稠油和超稠油三种^[1]。我国海上稠油主要集中在渤海油田。稠油在孔隙介质中流动困难, 常规开发方式对稠油油藏的采收率有限。目前国内外对稠油开采一般采用热采方式, 热采技术的应用为稠油的高效开发提供了新的技术手段^[2-3]。渤海海上稠油油田也初步进行了稠油热采的现场试验, 取得了较好的开发效果^[4-5]。稠油热采需要向井筒内注入热流体, 对油层进行加热降黏, 因此对于完井工程设计提出了较

高的要求。本文主要探讨稠油热采对完井设计的影响, 为完井工程设计提供参考。

1 热采井对防砂的设计要求

稠油油藏一般埋深较浅, 上覆岩层压力的压实作用弱, 岩石单轴强度低, 容易出砂。渤海已发现的稠油油藏多集中在明化镇, 垂深范围 800~1 500 m, 地层孔隙度 30% 左右, 属于高孔隙度地层, 储层泥质含量较高, 出砂风险较高。热采井的储层加热过程中, 岩石的胶结强度发生变化, 另外一旦停止注热, 热载荷对地层的作用改变了地层应力状态, 形成反向压差, 在此压差形成的径向压力作用下, 可能导致岩石发生剪切破坏, 加剧地层出砂风险。

收稿日期: 2014-04-28

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05026-01)

作者简介: 盛磊祥(1981—), 男, 工程师, 主要从事海上油气田完井设计和深水钻完井技术方面的研究。

多轮次反复注热,对防砂的可靠性要求较高。根据渤海油田的作业经验,简易防砂方式的防砂效果在热采井中的应用较差^[2],推荐优先考虑砾石充填的完井防砂方式。为了保证充填质量,减少热采井注热和生产过程中压差对充填度的影响,可以考虑采用挤压充填的方式进行防砂作业。

2 热采井完井管柱设计

为了达到较好的开发效果,注热井要求井底温度达到 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。目前用于热采井的完井器材,包括防砂系统(盲管、优质筛管、顶部封隔器总成等器材)、井口和采油树、过电缆封隔器、井下安全阀等最高耐温都能够达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,电潜泵在静态下最高耐温 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、运转时最高耐温 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,使得注采一体化管柱(图1)的可靠性大大降低。保守的完井管柱设计是将注热完井管柱和生产完井管柱分两步实现,如图2所示。

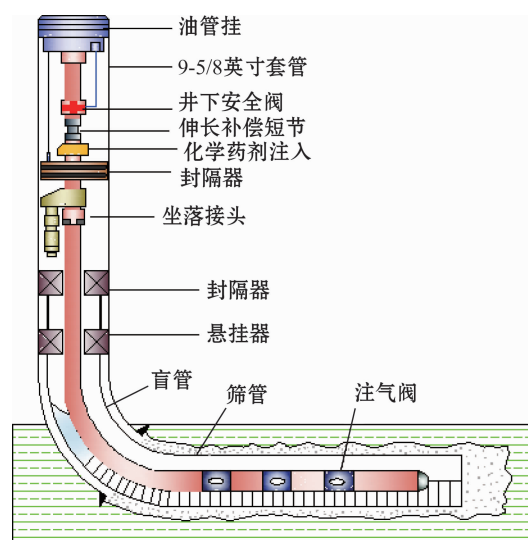


图1 注采一体化管柱示意图

Fig. 1 Injection and production string with one trip

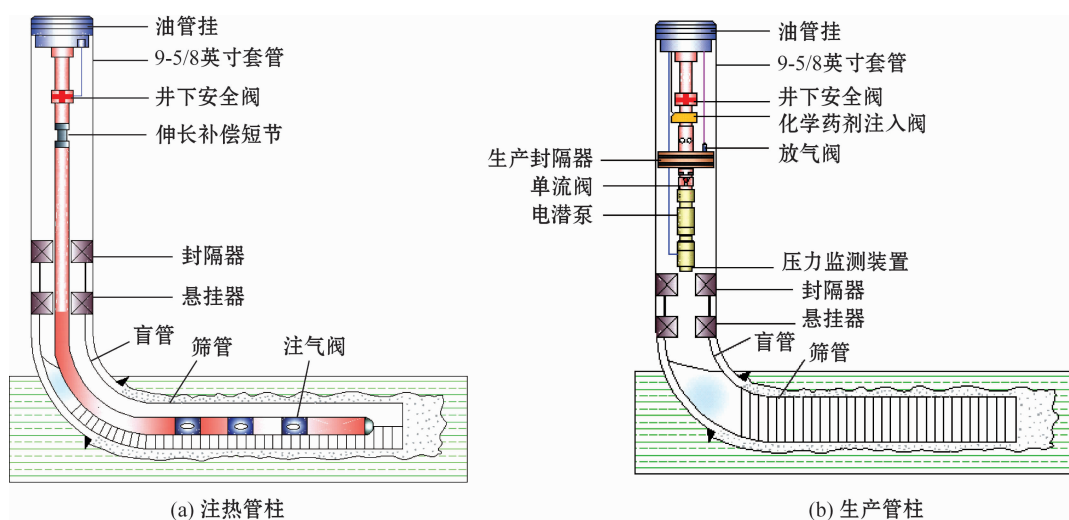


图2 注、采两步管柱示意图

Fig. 2 Injection and production string with separate trips

完井管柱在注热和生产过程中会产生轴向的伸长。为了减小轴向载荷对封隔器和悬挂装置的影响,在生产管柱和防砂管柱上应考虑设置专门的伸缩节,以补偿管柱的伸长量。注热井为了减少沿程的热量损失,通常采用双层真空管或者环空注氮的方式进行注热流体的保温。

3 热采井完井管柱伸长量设计要求

受到热流体持续加热的影响,井筒温度剖面发

生变化,完井管柱会产生轴向的变形。如果轴向热载荷无法释放,则可能造成封隔器、悬挂器、井口等固定装置发生变形,影响井筒的完整性,因此需要进行井筒温度剖面预测和完井管柱伸长量的计算,为完井管柱设计时考虑相关的技术措施提供定量依据。

3.1 井筒温度剖面计算模型

实际生产过程中难以用实测方法对井筒温度进

行连续测量,因此,建立适当的数学预测模型成为确定井筒温度剖面的主要途径。根据能量守恒原理,建立井筒温度剖面的预测模型,考虑了井筒径向(井筒流与外界)和纵向(流动方向)的热交换效应。

图3为井筒能量守恒的数学模型。

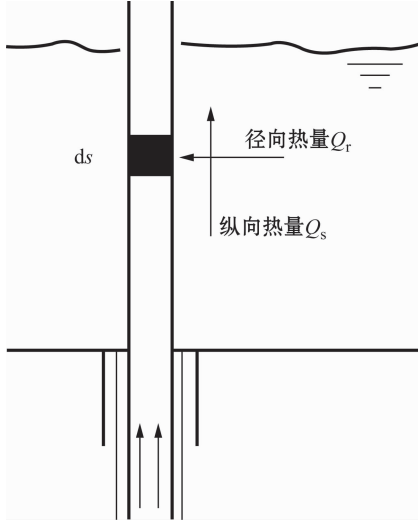


图3 井筒能量守恒物理模型

Fig. 3 Wellbore energy conservation model

取井筒任一井段长度为 ds 的微小单元体。 dt 时间内,纵向流入单元体的热量为

$$Q_s = A_a \times \rho_m \times v_a \times c_m \times ds \times dt, \quad (1)$$

dt 时间内,纵向流出单元体的热量为

$$Q_{s+ds} = Q_s + dQ_s = [A_a \times \rho_m \times v_a \times c_m + \frac{\partial(A_a \times \rho_m \times v_a \times c_m)}{\partial s}] \times ds \times dt. \quad (2)$$

dt 时间内,径向由地层或者海水单元体的热量为

$$Q_r = 2\pi r U (T_e - T_a) dt ds, \quad (3)$$

dt 时间内,单元体的热量变化为

$$dQ = \frac{\partial(m_a \times c_m \times T_a)}{\partial t} dt ds. \quad (4)$$

因此,根据出入单元体的热量变化,即式(1)~(4),得到井筒温度场方程:

$$\begin{aligned} Q_s - Q_{s+ds} + Q_r &= dQ \\ \Rightarrow 2\pi r U (T_e - T_a) dt ds - \frac{\partial(A_a \times \rho_m \times v_a \times c_m)}{\partial s} dt &= \frac{\partial(m_a \times c_m \times T_a)}{\partial t} dt ds, \end{aligned} \quad (5)$$

即:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(A_a \times \rho_m \times v_a \times c_m)}{\partial s} + \frac{\partial(m_a \times c_m \times T_a)}{\partial t} \\ = 2\pi r U (T_e - T_a). \end{aligned} \quad (6)$$

另外,井筒流与海水或者地层交界面上的热交换方程为

$$T_e - T_a = \frac{k_e}{U} \times \frac{\partial T_a}{\partial t} \Big|_{r=r_a}. \quad (7)$$

式(1)~(7)中: A_a 为井筒横截面面积(通流面积), m^2 ; c_m 为井筒流比热, $J/(kg \cdot K)$; ρ_m 为井筒流密度, kg/m^3 ; v_a 为流体流速, m/s ; k_f 为地层的导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; m_a 为井筒流质量流量, kg/s ; r_a 为井筒半径, m ; T_a 为井筒流温度, $^{\circ}C$; T_e 为地层或海水的温度, $^{\circ}C$; U 为井筒/油管的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

模型方程的定解条件如下。

假设井筒流入口流体的温度(T_{i0})是已知的,故有

$$T_a(s=0, t) = T_{i0}. \quad (8)$$

不考虑海水或者地层的径向温度梯度,在海水或地层与井筒流的交界面处,初始条件温度剖面可以看作不受井筒换热的影响,所以有

$$T_e(s, t=0) = T_e. \quad (9)$$

3.2 管柱伸长量的计算

利用井筒温度剖面的计算结果,对热载荷产生的管柱伸长进行计算。取井筒任一井段长度为 dL_i 的微小单元体,管柱伸长量按照线弹性模型计算,温度升高时,单元的伸长量为

$$\Delta L_i = \alpha \times (T_i - T_{i0}), \quad (10)$$

管柱总体伸长量哦

$$\Delta L = \int_0^L \alpha \times (T_i - T_{i0}) dL_i, \quad (11)$$

式中: L_i 为单元管柱的长度, m ; α 为管柱热膨胀系数, K^{-1} ; T_{i0} 为单元管柱初始温度, $^{\circ}C$; T_i 为单元管柱生产时的温度, $^{\circ}C$ 。

3.3 注热井井筒温度预测及注热管柱伸长量计算

以渤海某油田稠油热采注热井为例。该油田海域水深 24 m,井口温度 250 $^{\circ}C$,地层温度梯度 3.7 $^{\circ}C/100 m$,注热流速为 180 t/d,井口注入压强为 15 MPa。涉及的导热系数如表 1 所示。

表 1 完井管柱传热系数

Table 1 Thermal coefficients of completion string

W · m ⁻¹ · K ⁻¹	
参数名称	取 值
套管导热系数	50
真空隔热套管导热系数	0.02
环空氮气导热系数	0.04

3.3.1 井筒温度预测

注热管柱示意图如图 2(a)所示,按照普通油管、真空隔热油管、真空隔热油管+油管环空注氮三种状态进行分析。图 4 给出了井筒温度剖面的计算结果。普通油管在注热过程中沿程热损失较大,采取保温隔热措施能够显著降低热损失,提高注热效率。算例中,三种状态下流体到达注热目标井段后温度分别比注入温度降低了 35%、27%、11%。

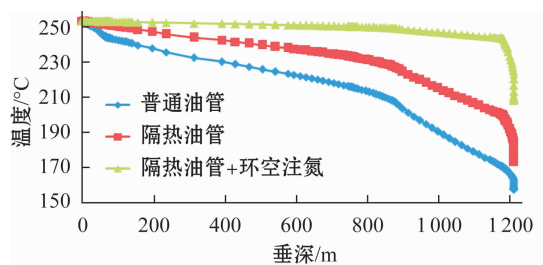


图 4 注热流体温度剖面

Fig. 4 Temperature profile of injection fluid

为了进行敏感性分析,假设注热温度为 100、150、200、250、300、350 °C,分析不同的油管和环空状态以及注热温度对井底产层热流体温度的影响。

如图 5 所示,随着井口注热温度的升高,井底热

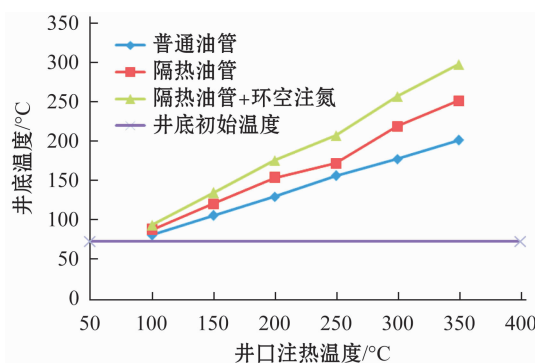


图 5 井下温度预测的分析结果

Fig. 5 Prediction result of downhole temperature profile

流体的温度升高在相同条件下采取保温(真空隔热油管、环空注氮)措施能够显著提高井底温度,提高注热效率。在注入流体温度比较高时,保温效果更明显,因为当注热温度比较低时,地层温度能够起到一定的补偿作用,注热温度较高时,不同的保温措施差异明显,保温措施至关重要。

3.3.2 管柱伸长量

管柱受热会引起轴向的伸长。由于油管通过油管挂坐在井口内,如果伸长量比较大,油管伸长可能引起井口采油树的升高,因此对于注热井井口需要在井口预留一定的空间允许油管膨胀载荷的释放,避免对井口稳定性产生影响。如图 6 所示,随着注热温度的升高,油管伸长量增加较快,而对于采取了保温措施的油管,伸长量增加的趋势明显放缓。

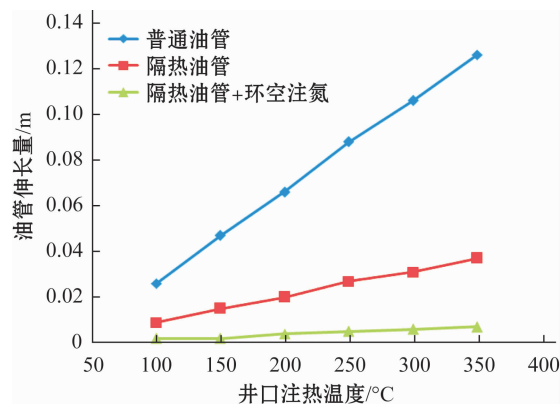


图 6 油管伸长量的分析结果

Fig. 6 Prediction result of pipe extension

注热过程中,筛管在高温影响下发生轴向拉升,如果不及时释放,将导致筛管变形,还可能影响砾石填充的效果,因此热采井推荐在筛管上安装热力补偿器。目前热力补偿器短节的允许伸长量一般为 0.3 m,热力补偿器个数(取整)如表 2 所示。

表 2 不同油管对应的筛管所需热力补偿器个数

Table 2 Numbers of thermal compensators needed for different pipes

井口注热温度/°C	100	150	200	250	300	350
普通油管	1	1	2	3	3	4
隔热油管	1	1	3	4	4	5
隔热油管+环空注氮	1	2	3	4	5	7

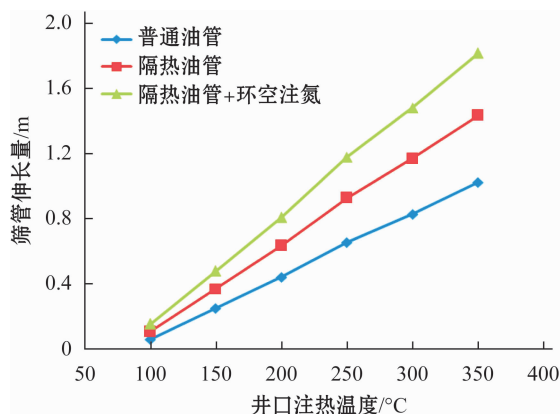


图7 筛管伸长量的分析结果

Fig. 7 Prediction result of screen pipe extension

4 结 论

稠油井由于本身的油藏地质条件,加之注热过程中产生的附加载荷对岩石强度的影响,出砂风险较高,并且对防砂效果的质量要求较高。受限于电潜泵的耐温能力和海上作业的安全要求,海上稠油

热采宜采用注采两步管柱分别实现注热和生产的作业。在相同条件下,对于注热井采取保温措施能够减少沿程热量损失,显著提高井底温度,提高注热效率。尤其在注入流体温度比较高时,保温效果更为明显。注热管柱受热会引起轴向伸长,因此井口需要预留一定的空间释放轴向变形载荷,采用具有保温效果的管柱,可以缓解伸长量增加对井口预留空间的需求。注热过程中,筛管会在高温条件下发生轴向拉升,因此热采井推荐在筛管上安装热力补偿器,避免筛管变形影响砾石填充的防砂效果。

参 考 文 献

- [1] 叶翠,江厚顺,幸明刚. 稠油热采技术研究[J]. 长江大学学报, 2012, 9(7): 99.
- [2] 范海军,姚军,成志军. 计算稠油油藏蒸汽吞吐加热半径的新方法[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 109.
- [3] 陈捷. 浅析稠油热采水平井有效完井方式[J]. 石油工业技术监督, 2013(4): 54.
- [4] 黄颖辉,刘东,罗义科. 海上多元热流体吞吐先导试验井生产规律研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(2): 84.
- [5] 唐晓旭,马跃,孙永涛. 海上稠油多元热流体吞吐工艺研究及现场试验[J]. 中国海上油气, 2011, 23(3): 185.

• 书 讯 •

《海洋工程结构设计》简介

周 晖 编

上海交通大学出版社出版

定价:35.00 元

内容提要:

本书为学习海洋工程提供一本理论研究和结构形式的书籍,全书分为8章,对常见的海洋平台的结构组成、设计原则、结构特点等作了介绍。内容全面系统、条理清晰,并配有大量图片,可作教材使用。

目 录

- 第1章 海洋工程结构设计绪论
- 第2章 海洋平台的受力与结构特点
- 第3章 海洋平台各系统和功能
- 第4章 浮式结构强度设计和分析
- 第5章 导管架平台结构设计和荷载模拟

- 第6章 平台结构分析软件及有限元导论
- 第7章 ANSYS 对平台结构分析应用举例
- 第8章 平台检验

上海市“085工程”资助出版精品教材

海洋工程结构设计

