

稠油热采水平井温度测试及注汽剖面分析

张 丁 涌

(中国石化胜利油田分公司现河采油厂,山东东营 257068)

摘要:水平井配汽是解决非均质稠油水平井注汽中各段动用不均现象的常用办法,但缺乏有效的监控分析手段。采用连续钢铠电缆测温技术进行稠油水平井吸汽剖面测试分析。通过建立稠油水平井段蒸汽流动与换热数理模型,利用 Fluent 软件模拟湿蒸汽在水平井段分流的过程,得到湿蒸汽流经筛管分流时温度、压力出现陡降的变化规律。结果表明:蒸汽在水平段流经筛管分流进入地层时,流体温度、压力下降幅度与筛管分流量呈正比关系;实现了将在线测试温度作为吸汽剖面的评价分析因素,增加了解释模型的准确性。

关键词:稠油热采;水平井;在线测试;注汽剖面;模糊数学

中图分类号:TE 355 **文献标志码:**A

引用格式:张丁涌.稠油热采水平井温度测试及注汽剖面分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(2):124-131.

ZHANG Dingyong. Temperature test and injection profile analysis in heavy oil thermal recovery horizontal well[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(2):124-131.

Temperature test and injection profile analysis in heavy oil thermal recovery horizontal well

ZHANG Dingyong

(Xianhe Oil Production Plant in Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257068, China)

Abstract: Steam distribution of horizontal wells is a common method to solve the uneven use of each section, caused by the general steam injection of heterogeneous heavy oil, but it lacks the effective monitoring and analysis means. With the temperature measurement technology of continuous steel armored cables, the steam injection profile test of horizontal wells is performed in this paper. By building a steam flowing and heat transfer mathematical model of horizontal wells, the laws of steam floating in the sieve tube were given where the temperature and pressure of wet steam will drop when going through the sieve tube, by the simulation in use of the Fluent software. The results show that the fluid temperature and the falling amplitude of pressure are proportional to the fluid volume in the sieve tube, when the steam flows in the horizontal sieve and goes underground. The online temperature measurement is adopted as an assessment factor in analyzing the steam injection profile, which makes the model more accurate.

Keywords: heavy oil thermal recovery; horizontal well; on-line test; injection profile; fuzzy mathematics

稠油油藏在注蒸汽开发过程中,因为油藏的非均质特性导致蒸汽进入水平井段后出现局部突进现象,从而导致油层的不均衡动用,大幅降低蒸汽吞吐效果。为了提高吞吐效果,全面了解生产过程中各个层段的蒸汽剖面情况,国内外油田采用水平井在

线测试系统实现对注汽生产井的实时温度监控。在线测试系统对于水平井测试远比直井测试难度大,技术水平要求高。根据目前水平井测试过程中井下仪器的测试方法,温度测试技术可以划分为抽油杆水平井测试^[1]、连续钢铠电缆数控^[2]以及泵送仪器

法等水平井测试技术^[3]。综合考虑准确度、成本和适应范围,连续钢铠电缆数控测试具有较大的优势,一般情况下可以采用液压驱动方式将铠装的温度传感器测试电缆输送至预定位置。在测试数据处理上,美国 Schlumberger 公司和英国 Sensornet 公司通过数值模拟现场测试试验、软件编制,有效地处理、分析了试验数据,提高了稠油开采效果^[4]。中国现阶段仍然缺乏较为系统的处理方法。在新疆油田分别采用抽油杆水平井温度测试技术和连续钢铠电缆数控测温技术,对两口稠油热采水平井进行了测试,得到转抽阶段井温度变化曲线^[5-6],未进行测试解释。可见,目前对于温度测试数据的分析仍然停留在简单的以温度判断蒸汽剖面的情况,对于现场测试的数据应用较少,同时忽略了油藏的储层参数,缺乏理论支撑。笔者结合水平段测试温度和测井资料,建立稠油热采井吸汽剖面模糊综合评价模型,分析吸汽剖面,得到湿蒸汽流经筛管分流时温度、压力出现陡降的变化规律。

1 稠油水平井连续钢铠电缆测温技术

1.1 在线测试系统

国内应用的水平井不锈钢内嵌热电偶连续电缆测温技术主要由井下钢铠测试缆、井口防喷装置、数据采集系统构成。根据测井要求,在测试缆上安置温度传感器和具有绝缘层和不锈钢铠装管保护的的压力传感器,集压力传感器与温度传感器于一身,耐高温高压。测压范围为 0 ~ 50 MPa,精度为 0.005 MPa,测温范围为 0 ~ 1 500 ℃,测试精度为 0.25 ℃。在测试数据传输方面,为了确保测试数据的时效性和精度,测试电缆采用航天专用微弱信号采集与远传技术。

1.2 在线测试过程

在现场测试过程中,测试井次较多,以 C20 - P146 新投水平井为例说明测试过程。

(1) C20 - P146 新投水平井基本情况。C20 - P146 新投注汽,井深为 1 403 m,油层上界垂深为 1 128 m,油层下界垂深为 1 375 m。水平井段长 91.96 m,实射井段 1 210 ~ 1 349 m,1 370 ~ 1 382 m,造斜点 617.68 m;最大井斜深度为 1 376.46 m,方位为 34.81°,斜度为 90.6°。注汽筛管分别位于 1 370、1 310 和 1 250 m,设计注汽量为 2 000 t。

(2) 测试点位置选择及分布。水平井段长度测试电缆上共设 10 个温度测试点(图 1,其中的数字表示距离井口的距离,m),分别为 T1(井深 1 151

m),T2(井深 1 191 m),T3(1 211 m),T4(1 231 m),T5(1 251 m),T6(1 271 m),T7(1 291 m),T8(1 312 m),T9(1 332 m),T10(1 371.99 m)。

(3) 测试过程。根据目的井钻测数据、井眼轨迹及目前井况,对测试井段制定测试方案,布置测试点。对井口做好耐高温高压的双级密封处理,并根据设计要求下入测试电缆与预定位置,开启测试仪器,步长为 15 s 时间间隔,分别测试注汽前目的层温度、压力及注汽、焖井、防喷过程中的各个测试点温压变化,采集相关数据。

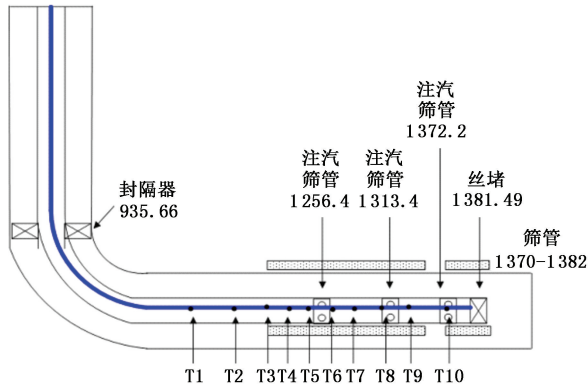


图 1 C20-P146 井温度测点布置

Fig. 1 Location of temperature test point in well C20-P146

2 水平段蒸汽流动与换热规律

在稠油水平井段在线测试数据分析处理方面,大都通过对生产过程中所测得的温度进行分析为主,方法简单,缺乏理论支撑,对其他测试段数据的应用较少,特别是注蒸汽阶段的测试数据。

2.1 水平井段湿蒸汽流动数学模型

吞吐注汽阶段进入目的层段的蒸汽一般为湿蒸汽。为了研究湿蒸汽在水平井段内的换热规律及其经过筛管分流过程中的流动,建立湿蒸汽流动与换热数学模型。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

式中, ρ 为汽液混合相密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_i ($i=1,2,3$) 为汽液混合相流速, m/s ; S_m 为分散相中加入到连续相的质量流量,也可以是任何的自定义源项^[7], $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

(2) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + (\tau_{ij})_{\text{eff}} u_j \right) + S_h. \quad (2)$$

其中

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}.$$

式中, k_{eff} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h 为流体的焓值, kJ/kg ; $J_{j'}$ 为 j 组分的扩散流量, kg/s ; S_h 为包括放(吸)热和其他形式的体积源项^[8]。

(3) 动量守恒方程: 在惯性(非加速)坐标系中 i 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i. \quad (3)$$

式中, p 为静压力, Pa ; τ_{ij} 为应力, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$; ρg_i 为 i 方向体积力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; F_i 为包含了多相流模型混合相中的源项^[9]。

(4) 混合相体积率间交换方程:

湿蒸汽混合相体积率间交换方程为

$$\frac{\partial (\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k^r). \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k}{\rho_m}, \quad \mathbf{u}_k^r = \mathbf{u}_k - \mathbf{u}_m.$$

式中, α_k 为 k 组分含量, %; ρ_k 为 k 组分的密度, kg/m^3 ; $\mathbf{u}_k$ 为 k 组分速度, m/s 。

(5) 湍流模型:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m, \quad (5)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \quad (6)$$

其中

$$C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S k / \varepsilon.$$

式中, Y_m 为可压缩湍膨胀对耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 和 C_2 为常数; σ_k 为湍动能普朗特数^[8]; G_k 、 G_b 分别为由平均速度梯度和浮力引起的湍动能; σ_ε 为湍动能耗散率的普朗特数, 其中 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ^[9]。

(6) 压力速度耦合算法: 通过 SMPLEC 算法进行

压力速度耦合计算, 在 N-S 方程求解中, 以压力为基本变量的原始变量法中的压力修正法对速度修正式进行了改进, 有效解决了速度修正不一致的问题, 从而其压力不再需要亚松弛^[10]。

2.2 水平段流动与换热物理模型

稠油热采过程中, 湿蒸汽流经水平段筛管是变质量汽液两相流动, 为了研究其分流流动特性及热交换规律, 进行数值建模。根据现场水平井段尺寸参数, 选用 11.43 cm 的筛管建立模型(图 2), 管内径为 100 mm; 由于管柱结构的对称性, 采用二维模型; 由于割缝筛管结构复杂, 开孔采用直径为 50 mm 的分支进行代替, 按照比例进行网格划分。在靠近管壁边界层以及筛管位置, 对网格进行局部加密。

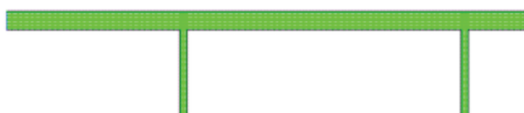


图 2 水平段蒸汽通过筛管流动模型

Fig. 2 Wet steam flow model in horizontal section

2.3 数值模拟

将建立的网格模型导入 Fluent 软件中, 对模拟过程中的初始参数进行设置。选用 $k-\varepsilon$ 模型模拟水平段两相混合流动。汽相和液相的流动速度不同, 滑移速度选用 Mixture 模型进行求解。各相关能耗散率均采用一阶迎风格式离散^[11], 压力采用标准离散格式。

模拟过程中假设水平段根部蒸汽入口干度为 0.5, 入口速度为 2 m/s, 自由出口边界条件, 筛管壁面温度设置为 267 °C。

为研究筛管配注比例对流动的影响, 模拟了不同配注体积流量下温度和压力变化关系, 见图 3、4。

对比图 3(a) 和图 3(b) 可知, 在筛管不同位置表现出的流量和温降具有一定的对应性, 分流量与温降呈正比关系, 前端筛管分流量增大, 其温降增大, 后端筛管分流量减小, 其温降也减小。对比图 4(a) 和图 4(b) 可以发现, 压力和温度的变化规律具有一致性。可见, 当蒸汽经过筛管配注分流时, 温度、压力会产生突降; 同时流量变化越大, 因流量变化而引起的温度、压力变化也越大。这种变化说明湿蒸汽在配注筛管位置蒸汽流量发生了较大改变, 为吸汽剖面判定提供了依据。

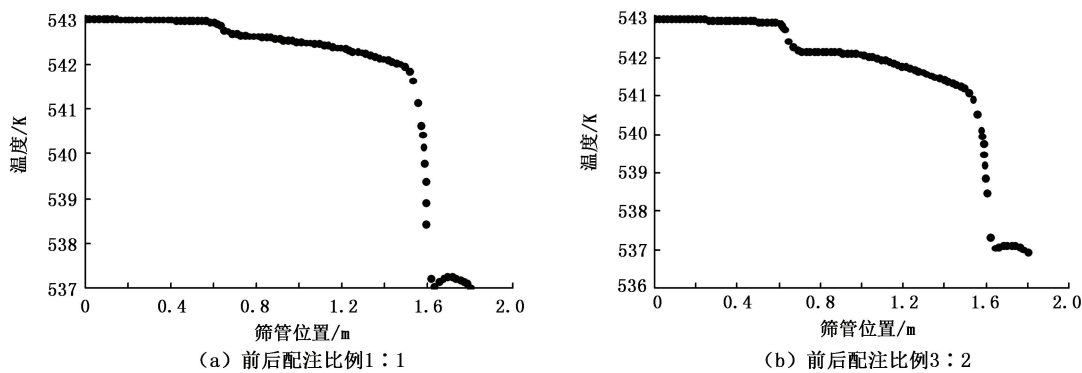


图 3 不同配注比下水平段温度变化

Fig. 3 Tube temperature change of different injection allocation ratio

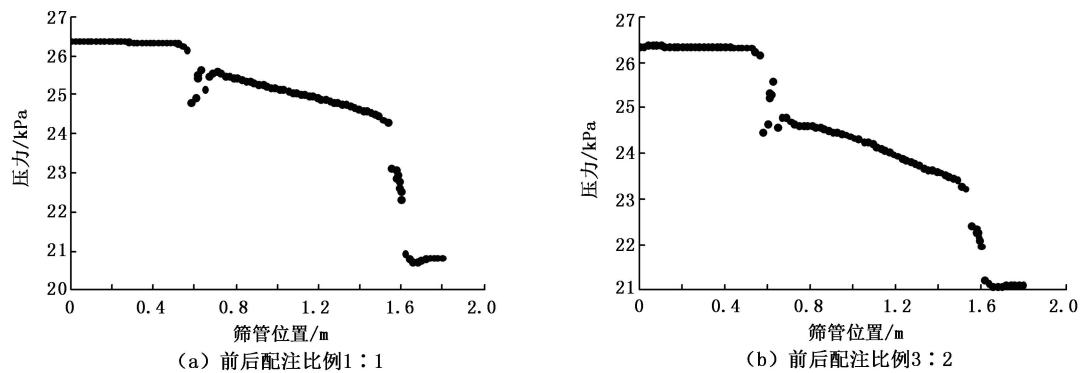


图 4 不同配注比下水平段压力变化

Fig. 4 Tube pressure change of different injection allocation ratio

3 稠油热采水平井测试数据模糊评价分析

在稠油注蒸汽过程中,储层特点、流体特性、井深轨迹以及动态开发参数等均会影响水平井段的吸汽剖面。在常规热采吸汽剖面分析过程中,一般是利用水平井抽油末期的温度测试曲线直接判断井段的吸汽效果,缺乏理论基础。采用模糊数学方法^[12]建立综合模糊评判模型,对稠油热采井的吸汽剖面进行分析。

3.1 测井数据分析

为了增加解释模型的准确性,在模型建立时将测井资料纳入评价因素,包括对储集层储油性、岩性、含油性等的综合评价。

(1)储集层岩性评价。储集层岩性评价是针对储集层所含岩石类别,根据泥质含量及其分布形式以及矿物黏土组分等进行计算实现的。由于泥质含量在岩石中分布具有非单一性,地质情况不同呈现状态也不同。泥质含量高的部分含油量相对较低,

在蒸汽吞吐过程中,其注汽效果也差,同时若泥质含量高,在注汽过程中因为其热力学作用导致黏土矿物膨胀造成孔道堵塞,从而致使注汽压力高、干度低,从而导致生产状况变差,注汽效果恶化。在分析水平段吸气剖面时,应剔除水平段泥质含量较高部分。

(2)储油物性评价。储油物性用孔隙性和渗透性来表示,根据测井资料可以对储集层岩石的储油物性进行评价。在现场应用过程中,难以实现对孔隙进行标准划分,只能分辨该储集层的泥质含量或是否含泥质。对测试层进行评价测试时,将泥质含量较高井段的泥质孔隙视为无效孔隙。进行吸汽剖面分析一般针对去除较高泥质含量的井段,对于实际测试中,储油物性评价一般选择绝对渗透率这一参数指标,并且其值越大蒸汽的渗透速度也越大,注入的蒸汽更易于扩散,岩层相对的吸热效率较高。

(3)含油性评价。含油性用来衡量储集层含油气量多少,在实际测井数据中用饱和度这一指标来评价储集层岩石的含油性。在相同条件下水的黏度

一般小于原油黏度,在蒸汽吞吐过程中,对于水平段的同一个岩层,在孔隙度差异不太明显前提下,蒸汽更容易进入高饱和度部分。

3.2 吸汽量模糊评价

为实现水平井段注汽剖面解释的准确性,将注汽阶段在线测试的温度所反映的井段吸汽情况和油层地质参数对油层注汽情况的影响相结合,通过相对偏差模糊矩阵法评价油层吸汽量。

首先,优选方案。将水平段测试位置的每一个测试点作为一个待评价方案,然后再根据测井数据剔除测试水平段中泥质含量较高的井段,建立方案评价集合 U ,针对每一个测试点进行分析,从而获得整个井段的剖面吸汽图。

其次,明确待评价方案中的主体评价因素。根据前期数据分析方法,其中渗透率、孔隙度、含泥质含量和含水饱和度对蒸汽吞吐注汽效果有较大影响,因为当湿热蒸汽进入到目的层系后,其流动状态发生变化,注汽效果的影响因素将更为复杂。通过湿热蒸汽在流经水平段时的换热规律可以发现,当湿蒸汽经过筛管进行配注分流变化时,湿蒸汽的温度和压力将会发生突降,其幅度与流量成正比。基于这一变化,为了更加准确地评价,在评价因素中将温降也考虑在内。重新得到评价因素的集合 V 为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}. \tag{7}$$

式中, v_1 为孔隙度,%; v_2 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; v_3 为含水饱和度,%; v_4 为湿蒸汽做水平段流动时的温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$; v_5 为储层的泥质含量,%。

通过式(7)建立的 5 个主要评价因素集评估每个具体的评价方案,进一步得到观测矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n} \\ a_{41} & a_{42} & \cdots & a_{4n} \\ a_{51} & a_{52} & \cdots & a_{5n} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

(1) 测井数据处理。

因现场实际钻测过程中,测井数据的记录步长为 0.125 m,相对水平井而言其步长较小,记录的数据量较大;另外,基于现场测试误差的存在和测试点注汽量不稳定状态考虑,在数据选择上,油层参数选取测试点附近区域油层参数的平均值。经处理的 C20-P146 测井数据见表 1。

由测井数据可得该井 1 332 ~ 1 370 m 井段泥质含量较高,且该处未布置筛管,根据前期剖面吸汽图

时分析的数据处理原则,该井段不进行分析。

表 1 经处理后的 C20-P146 井测井数据

井深/ m	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	含水饱和 度/%	泥质含 量/%
1 212.00	18.01	51.87	41.87	3.68
1 212.12	17.98	88.12	41.03	3.81
1 212.25	18.97	122.25	39.24	3.90
...	...	...	...	...
1 381.50	17.48	45.46	41.62	10.45
1 381.62	16.89	26.38	42.89	9.98
1 381.75	16.93	37.97	40.17	10.35
1 381.87	20.79	90.11	32.14	10.49

(2) 现场测试温度处理。

对 C20-P146 井注汽阶段的水平段温度进行了测试,注汽稳定阶段的温度如表 2 所示。由于 T1 和 T2 位置没有筛管,温度几乎无变化,忽略这两个点数据。

表 2 C20-P146 井测点温度

测温点	井段/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	测温点	井段/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$
T3	1 211	328.31	T7	1 291	321.65
T4	1 231	328.02	T8	1 312	317.79
T5	1 251	325.32	T9	1 332	316.78
T6	1 271	323.33	T10	1 372	315.67

根据稠油热采测点位置和在线测试数据求取水平井段的温度梯度,如表 3 所示。

将经过处理后的测井数据和注汽稳定阶段的温度梯度代入评价集合,得到评价油层吸汽量的观测矩阵为

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 17.74 & 18.93 & 19.76 & \cdots & 17.67 & 21.10 \\ 52.82 & 87.64 & 121.60 & \cdots & 38.82 & 89.60 \\ 42.72 & 40.38 & 38.87 & \cdots & 39.32 & 31.77 \\ 3.72 & 3.77 & 3.80 & \cdots & 40.47 & 10.35 \\ 0.015 & 0.015 & 0.015 & \cdots & 0.115 & 0.115 \end{bmatrix}. \tag{9}$$

表 3 C20-P146 井水平段的温度梯度

井段/m	测温点	温度梯度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1})$
1 211 ~ 1 231	T3 ~ T4	0.014
1 231 ~ 1 251	T4 ~ T5	0.134
1 251 ~ 1 271	T5 ~ T6	0.090
1 271 ~ 1 291	T6 ~ T7	0.078
1 291 ~ 1 312	T7 ~ T8	0.194
1 312 ~ 1 332	T8 ~ T9	0.049
1 333 ~ 1 373(无筛管)	—	—
1 372 ~ 1 382	T9 ~ T10	0.114

(3) 评价理想方案建立。

综合考虑孔渗饱和泥质含量等评价因素对水平

井段吸汽量的影响可知,其注汽效果与四因素的指标关系密切,孔隙度、渗透率和含水饱和度与其成正比,而泥质含量成反比。从水平井段温度梯度评价影响因素分析,认为水平井段横向温度梯度与对应井段的筛管分流量成正比,即单位长度温降越大说明该井段吸汽效果越好。在评价水平段吸汽量时,将温度梯度、孔隙度、渗透率和含水饱和度作为收益型指标,泥质含量作为成本型指标进行考虑。进而优选并建立观测矩阵的理想方案^[13] W 为

$$W=\{0.124 \quad 0.315 \quad 0.185 \quad 0.100 \quad 0.227\}.$$

(10)

(4) 根据观测矩阵 $\bar{A}$ 和理想方案 W 建立模糊偏差矩阵 R 。

$$R=\begin{bmatrix} 0.707 & 0.811 & 0.883 & \cdots & 0.701 & 1 \\ 0.325 & 0.549 & 0.767 & \cdots & 0.235 & 0.561 \\ 0.327 & 0.257 & 0.212 & \cdots & 0.226 & 0 \\ 0.896 & 0.893 & 0.891 & \cdots & 0.447 & 0.484 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.556 & 0.556 \end{bmatrix},$$

(11)

其中

$$r_{ij}=\frac{|a_{ij}-w_i|}{\max\{a_{ij}\}-\min\{a_{ij}\}}.$$

(5) 评价指标的权重求解。

利用客观赋权法中的变异系数法进行求解。

$$\text{由 } \bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij} \text{ 得,}$$

$$\bar{X}=\{0.5736 \quad 0.2789 \quad 0.3513 \quad 0.7805 \quad 0.4624\}.$$

(12)

$$\text{由 } s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{ij} - \bar{x}_i)^2 \text{ 得,}$$

$$\bar{S}=\{0.1728 \quad 0.2143 \quad 0.1582 \quad 0.1909 \quad 0.3121\}.$$

(13)

$$\text{由 } v_i = \frac{s_i}{\bar{x}_i} \text{ 得,}$$

$$\bar{V}=\{0.301291 \quad 0.768286 \quad 0.450276 \quad 0.244571 \quad 0.312088\}.$$

(14)

对 $\bar{V}$ 归一化,由 $\omega_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^m v_i}$ 得各指标的权重集为

$$W=\{0.124 \quad 0.315 \quad 0.185 \quad 0.100 \quad 0.227\}.$$

(15)

(6) 建立综合评价模型,确定测点位置相对吸汽量。建立相对吸汽量综合评价模型, $F_j = \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ij} (i=1,2,3,4,5; j=1,2,\cdots,n)$, 经计算 $F_j = \{0.340 \quad 0.410 \quad 0.479 \quad \cdots \quad 0.404 \quad 0.503\}$.

(16)

(7) 通过评价点得到的相对吸汽量曲线,可以得到水平井段相对吸汽量,由此可得水平井 C20-P146 的相对吸汽量(图 5)。

由图 5 可以得出,该井相对吸汽量的评价对象仅为单个测试点,为了更好地比较每个井段的吸汽量差异性,对该数据进一步处理,可得到各水平段的吸汽百分比 P_i 为

$$P_i = \frac{S_i}{T} \quad (i=1,2,\cdots,6,7).$$

(17)

其中

$$T = \sum_{j=1}^n F_j (j=1,2,\cdots,n).$$

式中, S_i 为各井段所对应的测试点 F_j 的和。

通过数据处理后,可得到 C20-P146 井各水平井段吸汽率。1 291 ~ 1 312 m 井段吸汽率为 21.1%,其他井段(除无筛管段)吸汽率皆在 10% 左右。

将 C20-P146 井水平井段的吸汽量与含油饱和度对比分析来评价该井水平段的吸汽质量,由于测井数据中含油饱和度的数据波动范围较大,通过回归方法对含油饱和度的曲线进行处理,得到该井注汽质量评价图(图 6)。

由图 6 可见,含油饱和度与水平井段吸汽量的变化趋势具有一致性。从评价图中可以看出,在含油饱和度较高的井段,吸汽状况也相对较好。在含油饱和度较高的 1 370 ~ 1 382 m 井段,根据综合模糊评价结果,该井段的吸汽效果不够理想,对于此井段,在下步注汽方案设计中须强化其注汽效果,可采用分段封隔和添加堵剂,或者调节注汽副管位置等方法对其进行注汽剖面改善,最终提高采收率。

编制程序软件处理水平井在线测试的温度与测井数据,可得到其他测试井次的稠油水平井注汽剖面,根据吸汽剖面分析结果,为下一步方案调整提供技术指导。

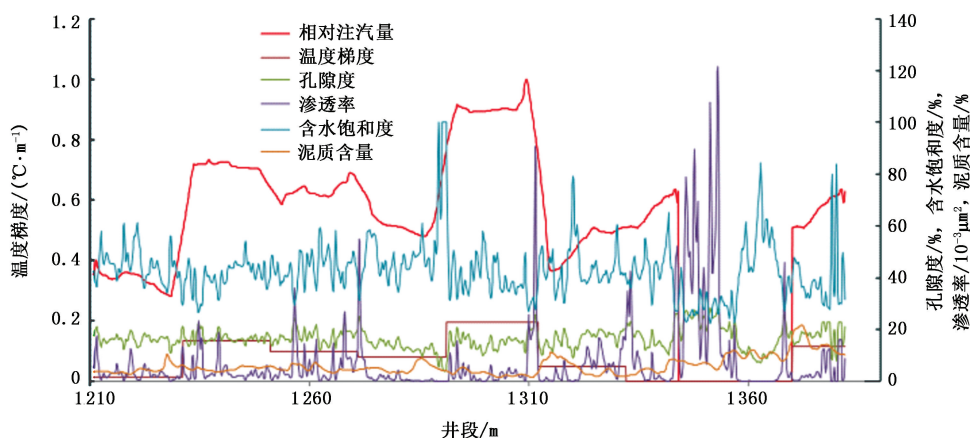


图 5 C20-P146 水平井相对吸汽量

Fig. 5 Relative steam suction of well C20-P146

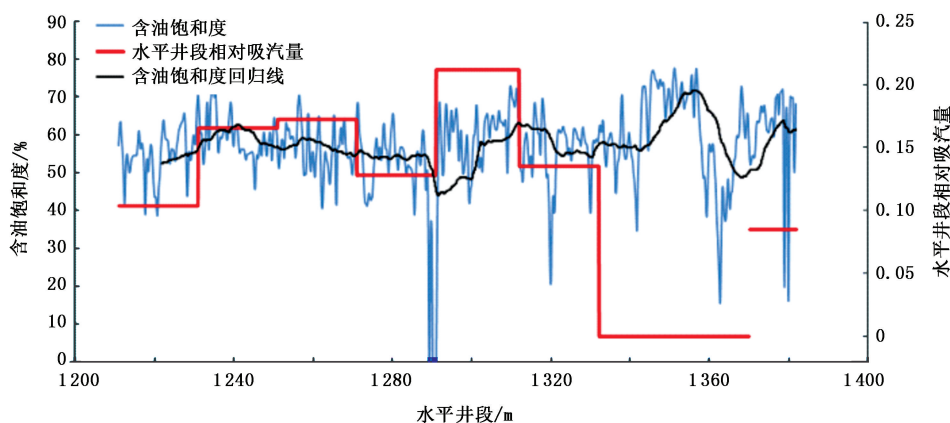


图 6 C20-P146 水平井注汽质量评价图

Fig. 6 Horizontal well steam injection quality evaluation of C20-P146

4 结 论

(1) 蒸汽在水平段流经筛管分流进入地层时, 流体温度、压力下降幅度与筛管分流量成正比, 并得到了油层吸汽量与温降对应关系。

(2) 建立的基于模糊综合评价的稠油热采井吸汽剖面解释模型实现了将在线测试温度作为吸汽剖面评价分析因素, 增加了解释模型的准确性, 得到了更为合理的吸汽剖面。

参考文献:

[1] 刘富, 谢嘉析, 樊玉新. 稠油热采水平井生产测试技术[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(2): 17-21.
LIU Fu, XIE Jiayi, FAN Yuxin. The production testing technology in horizontal wells with thermal recovery of shallow heavy oil [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(2): 17-21.

[2] 阮林华, 王连生, 吴军, 等. 稠油热采水平井测试技术的研究与应用[J]. 石油科技论坛, 2009, 28(6): 43-46.

RUAN Linhua, WANG Liansheng, WU Jun, et al. Research and application of horizontal well online test in thermal recovery [J]. Oil Forum, 2009, 28(6): 43-46.

[3] 马鸿, 杨柳, 杨智, 等. 浅层稠油油藏水平井动用程度分析及措施效果评价[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(12): 179-182.

MA Hong, YANG Liu, YANG Zhi, et al. Producing degree analysis and stimulation effect evaluation of horizontal wells in shallow heavy oil reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(12): 179-182.

[4] 王卓飞, 魏新春, 江莉, 等. 浅层稠油热采水平井测试技术研究及应用[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(6): 112-113.

WANG Zhuofei, WEI Xinchun, JIANG Li, et al. The research and application of shallow horizontal well online test in thermal recovery [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(6): 112-113.

[5] 赵丽莎, 吴小川, 易晨曦, 等. 稠油开采技术现状及展望[J]. 辽宁化工, 2013, 42(4): 363-368.

ZHAO Lisha, WU Xiaochuan, YI Chenxi, et al. Status

- and development trend of heavy oil recovery techniques [J]. Liaoning Chemical Industry, 2013, 42 (4): 363-368.
- [6] 杨德伟,王新伟,肖淑明,等. 稠油水平井注汽剖面分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38 (5): 155-159.
- YANG Dewei, WANG Xinwei, XIAO Shuming, et al. Analysis of steam injection profile in horizontal well for heavy oil recovery [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38 (5): 155-159.
- [7] 林日亿,李兆敏,李松岩,等. 泡沫流体管流流动与数值换热模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(6): 91-94.
- LIN Riyi, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. Flow and heat transfer numerical simulation of foam fluid in pipes [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6): 91-94.
- [8] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [9] 张凯,王瑞金,王刚. Fluent 基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [10] 王为术,徐维晖,翟肇江,等. PISO 算法的实现及与 SMPLE, SMPLE, SMPLEC 算法收敛性的比较[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(4): 33-36.
- WANG Weishu, XU Weihui, ZHAI Zhaojiang, et al. Realization of PISO algorithm and comparison convergence characteristic with SMPLE series algorithms [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(4): 33-36.
- [11] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011.
- [12] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 4 版. 武汉:华中科技大学出版社, 2012.
- [13] 李柏年. 模糊数学及其应用[M]. 合肥:合肥工业大学出版社, 2007.

(编辑 沈玉英)