

浅层稠油油藏地层破裂压力计算方法探讨

廖 广 志

(新疆石油管理局勘探开发研究院)

提 要

稠油油藏地层破裂压力计算对热采工艺实施具有重要的实用价值。本文针对浅层稠油油藏埋藏浅、岩性胶结疏松、欠压实等特征，以及地质构造应力等多种因素的影响，对其地层破裂压力计算进行了理论分析。并对地层破裂的形态进行了讨论，建立了现场计算地层破裂压力及其有关参数的方法。用此法对克拉玛依油田九区侏罗系齐古组稠油油藏进行地层破裂压力计算，结果表明该区油藏在目前的蒸汽注入压力下不仅存在水平裂缝，而且存在垂直裂缝。这是蒸汽窜流的重要原因。

主题词：稠油油藏 蒸汽驱动 地层破裂压力预测 注入压力

1 前 言

热力开采稠油油藏是一项行之有效的开采方法，但由于注汽压力过高，注汽速度过大，致使地层发生破裂，造成蒸汽窜流，井间干扰，大大降低了蒸汽的纵、横向波及系数及热效率。因此选择适当的注汽压力，使地层不致破裂（尤其是蒸汽驱开采方式中），成为热力采油的一个重要问题。这就要求首先必须准确地计算出地层破裂压力（梯度），以便为注汽压力的选择提供充分的依据。

2 理论分析

2.1 应力分布理论

设蒸汽的注入压力为 P_s 。地层孔隙压力为 P_p ，上覆岩层压力为 P_o 。图1为井筒周围应力分布关系。 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 τ 分别为水平面上X、Y方向应力及剪切应力。将图1中单元体移出，作出各应力分布关系（图2）。

根据弹性力学空间问题应力与应变普遍关系式^[1]，考虑到地层孔隙压力 P_p 的贡献值，则有应力一应变关系式

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_{xx})_e &= \sigma_{xx} + \alpha P_p = \frac{E}{1+\mu} \left(\varepsilon_{xx} + \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot e \right) \\ (\sigma_{yy})_e &= \sigma_{yy} + \alpha P_p = \frac{E}{1+\mu} \left(\varepsilon_{yy} + \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot e \right) \\ (\sigma_{zz})_e &= \sigma_{zz} + \alpha P_p = \frac{E}{1+\mu} \left(\varepsilon_{zz} + \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot e \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$e = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (2)$$

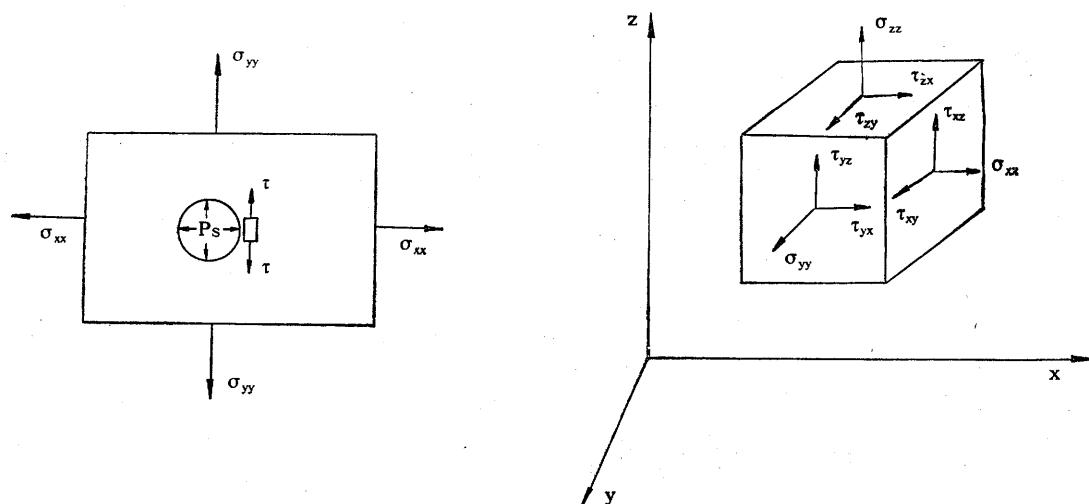


图1 地层应力分布图

Fig. 1 Diagram showing the distribution of the formation stress

图2 井筒附近单元体受力示意图

Fig. 2 A Scheme of formation stress on an elemental bodies near the wellbore

式中 $(\sigma_{xx})_e$ 、 $(\sigma_{yy})_e$ 、 $(\sigma_{zz})_e$ —有效应力； ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} —空间单元体在各方向的应变量； e —岩石体积应变量即体积膨胀系数； α —孔隙压力贡献系数，与岩石孔隙度有关； μ —泊松比； E —杨氏弹性模量

考虑到平面上岩石的应变受到严格限制则有

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0 \quad (3)$$

将(2)、(3)代入(1)中，整理得

$$(\sigma_{xx})_e = (\sigma_{yy})_e = -\frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_{zz})_e$$

由于垂向上 $\sigma_{zz} = -P_0$ 则有

$$(\sigma_{xx})_e = (\sigma_{yy})_e = -\frac{\mu}{1-\mu} (-P_0 + \alpha P_s) \quad (4)$$

对于浅层稠油油藏，存在这样两种情况：

(1) 空间单元体受三维应力将产生拉伸、压缩、剪切变形，岩石抗拉伸的能力最小^[2]，最易发生拉伸破坏，若假设水平面方向有最小应力 $(\sigma_{xx})_e$ ，地质构造应力 σ_T 及蒸汽注入压力 P_s ，则最小拉应力 S_{t1} 为

$$S_{t1} = (\sigma_{xx})_e - \sigma_T + P_s \quad (5)$$

(2) 考虑在地层岩石中钻井后，井筒周围将发生应力集中，其中以周向剪应力为最大^[2,3]，根据无限大平板上钻一孔眼的空间力学理论，在井壁上产生的最大切向应力 τ 与水平面方向应力 $(\sigma_{xx})_e$ 、 $(\sigma_{yy})_e$ 的关系

$$S_{t2} = \tau = 3 \cdot (\sigma_{xx})_e - (\sigma_{yy})_e \quad (6)$$

考虑地质构造应力 σ_T 及蒸汽注入压力 P_s 的影响，则有周向最大剪应力为

$$S_{t2} = \tau = 3(\sigma_{xx})_e - (\sigma_{yy})_e - \sigma_T + P_s \quad (7)$$

若假设 x 、 y 方向上 $(\sigma_{xx})_e = (\sigma_{yy})_e$, 则有

$$S_{t2} = \tau = 2(\sigma_{xx})_e - \sigma_T + P_s \quad (8)$$

2.2 岩石断裂标准

对第一种情况, 如果最小拉应力 S_{t1} 达到岩石的抗张强度 σ_t , 岩石即可发生破坏, 故断裂标准为

$$S_{t1} - \alpha P_p = \sigma_t \quad (9)$$

将 (4)、(5) 代入 (9) 中, 整理得

$$P_{F1} = P_s = \alpha P_p + \frac{\mu}{1-\mu} (P_o - \alpha P_p) + \sigma_T + \sigma \quad (10)$$

上式简化得

$$P_{F1} = P_s = \frac{\mu}{1-\mu} P_o + \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \alpha \cdot P_p + \sigma_T + \sigma_t \quad (10')$$

上式即为岩石发生破裂的最小注入蒸汽压力。

如果不考虑地质构造应力 σ_T , 岩石抗张强度 σ_t , 并令地层孔隙度校正系数 $\alpha=1$, 则 (10) 式变为

$$P_{F1} = P_p + \frac{\mu}{1-\mu} (P_o - P_p) \quad (11)$$

同除以深度, 即可得地层破裂压力梯度

$$G_{F1} = G_p + \frac{\mu}{1-\mu} (G_o - G_p) \quad (11')$$

式中 G_o 为上覆岩层压力梯度 (MPa/m), G_p 为地层孔隙压力梯度 (MPa/m)。

上式即为著名的计算地层破裂压力的伊顿公式^[4]。

对于第二种情况, 考虑到浅层稠油油藏胶结疏松, 无法承受在井壁上的切向应力, 则有岩石断裂标准为

$$S_{t2} - \alpha P_p = 0 \quad (12)$$

将 (4)、(8) 代入 (12) 中, 则有

$$P_{F2} = P_s = \alpha P_p + \frac{2\mu}{1-\mu} (P_o - \alpha P_p) + \sigma_T \quad (13)$$

上式简化得

$$P_{F2} = P_s = \frac{2\mu}{1-\mu} \cdot P_o + \frac{1-3\mu}{1-\mu} \alpha P_p + \sigma_T \quad (13')$$

此即为另一地层破裂压力计算公式, 如果不考虑地质构造应力 σ_T , (13) 式简化为

$$P_F = P_s = \frac{2\mu}{1-\mu} P_o + \frac{1-3\mu}{1-\mu} \alpha \cdot P_p \quad (14)$$

上式两边同除以井深, 则地层破裂压力梯度为

$$GF_2 = \frac{2\mu}{1-\mu} G_o + \frac{1-3\mu}{1-\mu} \alpha G_p \quad (14')$$

上式即为计算地层破裂压力的安德森公式^[5]。

根据以上讨论，得出了计算地层破裂压力的公式(10')和(13')。

3 裂缝的形态和参数的确定

3.1 裂缝的形态

从理论上讲均质各向同性材料的岩石单体破裂时，裂缝方向总是垂直于最小主应力。由此可确定裂缝的形态（水平或垂直）（图3）。

如图3所示，当 $\sigma_z > \sigma_H$ 时（ σ_H 即为 σ_x 或 σ_y ），则出现垂直裂缝，此时若 $\sigma_x > \sigma_y$ ，则裂缝垂直于 σ_y 方向，平行于 σ_x 方向；反之则垂直于 σ_x 方向，平行于 σ_y 方向；当 $\sigma_z < \sigma_H$ 时，则出现水平裂缝。

比较(10')和(13')式可以看出，根据剪切力破坏准则求得的地层破裂压力值 P_{F2} ((13')式)将高于由抗张强度确定的地层破裂压力值 P_{F1} ((10')式)。这一点并非偶然，而是由于 P_{F1} 值反映了地层刚开始破裂时的压力，此时一般产生水平裂缝当注入压力达到 P_{F2} 值时，地层将产生垂直裂缝（同时，亦存在水平裂缝）。此时，岩石内裂缝林立，由于形成垂直裂缝，因而使得蒸汽沿此通道运移，形成汽窜。例如九浅3井(207m)的地应力测试值为 $\sigma_x = 4.5 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 3.5 \text{ MPa}$, $\sigma_z = 4.6 \text{ MPa}$ 测试结果表明当注入压力达到 $3.5 \sim 4.5 \text{ MPa}$ 时，地层将发生破裂，产生水平和垂直两种裂缝。在实际生产中注入压力一般都大于 4.5 MPa ，因而在九区地层中大都出现垂直与水平两种裂缝共存现象，这使得蒸汽的运动将更加复杂。

3.2 有关参数的确定

3.2.1 上覆岩层压力梯度的确定

上覆岩层压力系指岩石骨架重量和岩层孔隙中流体重量共同构成的压力，其计算式为

$$P_o = H[(1-\phi)\rho_{ma} + \phi\rho_t] \quad (15)$$

$$G_o = (1-\phi)\rho_{ma} + \phi\rho_t \quad (16)$$

$$P_f = (1-S_{oi})\rho_w + S_{oi}\rho_o \quad (17)$$

上式中 S_{oi} 为含油饱和度， ρ_w 、 ρ_o 为水、油密度，可由现场目的层参数提供。骨架密度 ρ_{ma} 是上覆岩层的平均值，根据有关资料^[2]，岩石骨架密度一般随深度增加而增加（图4）。对于克拉玛依油田侏罗系齐古组油藏，基岩平均密度 $\rho_{ma} = 2.0 \text{ g/cm}^3$ 。根据油藏实际资料计算 $P_f = 0.955 \text{ g/cm}^3$ ，孔隙度 $\phi = 0.2$ ，则有 $G_o = 0.0179 \text{ MPa/m}$ 。

3.2.2 地层压力梯度

地层压力是指作用于岩层孔隙空间内流体上的压力。由于稠油油藏很少进行试油，也无法进行复压测试，因此一般实测得地层压力，再求得地层压力梯度。例如克拉玛依油田九区齐古组油藏，实测地层压力 2.68 MPa (260m)则 $G_p = 0.01031 \text{ MPa/m}$

3.2.3 泊松比的确定

泊松比是岩石的固有性质，其确定方法也很多，可用图解法^[2]（图5）或地球物理方

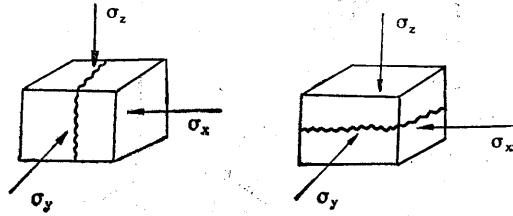


图3 裂缝面垂直于最小主应力方向示意图

Fig. 3 A scheme of the fracture faces perpendicular to the minimal principal stress orientation

法^[6]确定出泊松比的值。

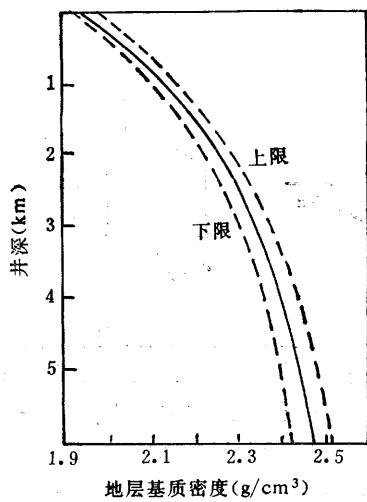


图4 基岩密度随井深关系

Fig. 4 Matrix density vs. well depth

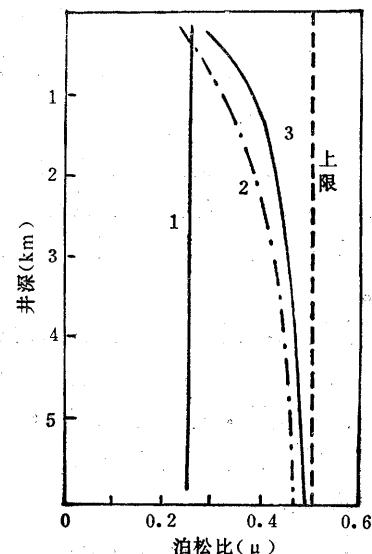


图5 泊松比与井深关系

Fig. 5 The relationship between poisson's ratio and well depth

考虑到岩层横波 Δt_s 与纵波即普通声波时差 Δt ，具有如下经验关系^[6]

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t}{\left[1 - 1.15 \times \frac{(1/\rho_b) + (1/\rho_b)^3}{e^{(1/\rho_b)}} \right]^{1.5}} \quad (18)$$

则泊松比 μ 可由下式计算出

$$\mu = \frac{0.5 \Delta t_s^2 - \Delta t^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t^2} \quad (19)$$

测井参数 ρ_b 、 Δt 的取值原则是：尽可能在泥岩段读取，井径扩大不超过10cm，各目的层间不能有不整合存在，读取的 Δt 、 ρ_b 值尚需进行深度、刻度校正。

3.2.4 孔隙校正系数 α 的确定

根据定义：

$$\alpha = 1 - \frac{C_r}{C_b} \quad (20a)$$

式中 C_r —岩石骨架压缩系数； C_b —岩石体积压缩系数。

一般选用如下经验公式进行计算

$$\alpha = 1 - (1 - \phi)^n \quad (20b)$$

在地层较深时，胶结致密，地层压力对有效应力的贡献基本不受岩石胶结的影响，孔隙压力的影响大大降低，此时 $n=1$ ， $\alpha=\phi$ ；当地层胶结疏松时，地层孔隙压力对有效应力的贡献明显受到岩石胶结程度的影响，增大了孔隙压力项的比重，此时 α 应趋近于1。一般而言，当井越浅时， n 值越大，对于克拉玛依油田九区齐古组油藏， n 的取值为3。

由于稠油油藏埋藏浅，欠压实，需进行欠压实校正，其校正关系式为^[7]

$$\phi = \phi_{\Delta t} \frac{1}{C_p} \quad (22)$$

$$C_p = \Delta t_{sh} / 300 \quad (23)$$

式中, Δt_{sh} —由目的层相邻稳定泥岩的声波曲线求出的平均时差 ($\mu s/m$) ; $\phi_{\Delta t}$ —威利公式求得的孔隙度值; 300—压实泥岩的时差 ($\mu s/m$)。

3.2.5 构造地应力 σ_T 的确定

构造地应力 σ_T 一般与有效垂直应力 $(\sigma_{zz})_e$ 成比例关系, 即 $\frac{\sigma_T}{(\sigma_{zz})_e} = \beta$ (24)

考虑到 (1) 式, 则有

$$\sigma_T = \beta (-P_o + \alpha P_p) \quad (25)$$

式中 β 为应力比, 各地区该值变化不大。正常情况下 $\beta = 0.2$, 当然, 若能进行实测构造应力 σ_T 就更好了。

4 应用实例

克拉玛依油田九区侏罗系齐古组稠油油藏热采已进行了五年多, 目前生产效果受到影响多与汽窜有关, 尤为重要的是这将对下一阶段蒸汽驱造成严重影响。为此应用本文的方法对该区进行地层破裂压力计算。

4.1 泊松比 μ 的计算结果

对96195井实例计算, 结果如表1所示。

表 1 96195井松泊比计算值
Table 1 The calculated poisson's ratio in well 96195

井段 (m)	声波时差 Δt ($\mu s/m$)	横波时差 Δt_s ($\mu s/m$)	测井密度 ρ_b (g/cm^3)	波松比 μ	压实校正系数 C_p
162	425	814	2.55	0.3125	1.288
165	410	796	2.5	0.3197	1.242
168	410	774	2.6	0.3054	1.242
172	400	731	2.73	0.2876	1.212
175	380	714	2.62	0.3025	1.152
178	405	811	2.4	0.3341	1.227
182	390	706	2.77	0.2809	1.182
平均	403	761	2.6	0.3054	1.221

4.2 孔隙校正系数 α 的计算结果

对于96195井, 油藏的平均声波时差 $443 \mu s/m$, 密度 $\rho_b = 2.51 g/cm^3$, 计算得 $\phi_{\Delta t} = 0.36$, $\phi = 0.295$ 则有 $\alpha = 0.657$ 。

4.3 地层破裂压力计算结果

该区油藏上覆岩层压力梯度 $G_o = 0.0179 MPa/m$ 。地层压力梯度 $G_p = 0.0103 MPa/m$, 根据

(10') 可知 (暂设 $\sigma_t=0$)

$$\begin{aligned} G_{F1} &= \alpha G_p + \left[\beta + \frac{\mu}{1-\mu} \right] (G_0 - \alpha \cdot G_p) \\ &= 0.657 \times 0.0103 + \left(0.2 + \frac{0.3054}{1-0.3054} \right) (0.0179 - 0.657 \times 0.0103) \\ &= 0.0139 \text{ MPa/m} \end{aligned}$$

故地层破裂压力 P_{F1} 为

$$P_{F1} = 0.0139 \times 260 = 3.61 \text{ MPa}$$

根据 (13') 式, 则有

$$\begin{aligned} G_{F2} &= \alpha \cdot G_p + \left(\frac{2\mu}{1-\mu} + \beta \right) (G_0 - \alpha G_p) \\ &= 0.657 \times 0.0103 + \left(\frac{2 \times 0.3054}{1-0.3054} + 0.2 \right) (0.0179 - 0.657 \times 0.0103) \\ &= 0.0187 \text{ MPa/m} \end{aligned}$$

故有地层破裂压力 P_{F2}

$$P_{F2} = 0.0187 \times 260 = 4.86 \text{ MPa}$$

计算结果与有关测试结果对比见表2

表 2 九区稠油油藏破裂压力对比表

Table 2 A Comparison of the fracturing pressure of heavy oil reservoir

项 目	测试值 (MPa)			计算值 (MPa)	
	P_{Fx}	P_{Fy}	P_{Fz}	P_{F1}	P_{F2}
取 值	4.5	3.5	4.6	3.61	4.86
备 注	九浅3井测试值 (1987年)			96195井计算值	

对于浅层稠油油藏, 岩石的垂向抗张强度很小, 可忽略不计, 而水平抗张强度则较高, 如粗砂岩、中砂岩、细砂岩的水平抗张强度分别为 5.14 MPa 、 5.2 MPa 、 7.95 MPa ^[2]。由此可见, 对于由 (10') 计算得的破裂压力值 P_{F1} , 当蒸汽注入压力达此值时, 岩石沿与最小主应力方向垂直的方向面 (即与垂向抗张强度方向相垂直) 发生破裂, 产生水平裂缝。这就是浅地层一般产生水平裂缝, 深地层一般产生垂直裂缝的原因; 当注汽压力达到 P_{F2} 值时, 则必产生垂直裂缝。由于九区目前的蒸汽注入压力一般都在 4.5 MPa 以上, 因此, 发生地层破裂是毫无疑问的, 而且垂直裂缝与水平裂缝并存, 尤以垂直裂缝危害极大, 这是造成九区蒸汽窜进的重要原因。因此, 为防止蒸汽窜进井间干扰, 尤其是进行蒸汽驱的油藏, 控制好注汽压力在 P_{F1} 以下 (对九区注汽压力要控制在 3.6 MPa 以下) 是热采尤其是蒸汽驱取得成功的关键; 同时, 在今后的稠油油藏开发设计及实施中, 一定要准确掌握 P_{F1} 值, 确保热采顺利进行。

5 结 论

1. 应用弹性力学的空间理论, 在前人工作的基础上, 进行求解稠油油藏地层破裂压力的有关推导及实际计算, 并取得了较为满意的结果。

2. 根据本文所建立的方法表明, 当蒸汽注入压力 $P_s > P_{F1}$ 时, 地层破裂产生水平裂缝; 当 $P_s > P_{F2}$ 时, 地层破裂产生垂直裂缝(水平裂缝亦存在)。这是注蒸汽热采汽窜的重要原因。

3. 对克拉玛依油田九区侏罗系齐古组油藏的实例计算表明, 该区目前的大于4.5MPa的注汽压力值得商榷, 应用本文推荐的 $P_{F1}=3.6$ MPa值, 可防止地层破裂, 因此在今后的类似油藏方案设计及实施中, 一定要掌握好 P_{F1} 值, 以便为选取蒸汽注入压力提供依据。

致谢 李庆昌高级工程师、孙川生高级工程师、刘振武博士给予本文的指导, 表示衷心感谢。

(本文收到日期1991年12月29日)

(编辑 徐和坤)

参 考 文 献

- (1) 徐芝伦编著. 弹性力学简明教程. 高等教育出版社, 1986.
- (2) 刘希圣等编. 钻井工艺原理. 石油工业出版社, 1981.
- (3) 王鸿勋编著. 水力压裂原理. 石油工业出版社, 1987.
- (4) 沈忠厚编著. 油井设计基础和计算. 石油工业出版社, 1988.
- (5) A.蒂穆尔等主编, 章兆淇等译. 声波测井. 石油工业出版社, 1985.
- (6) 陈新、李庆昌. 应用地球物理方法预测地层破裂压力初探. 新疆石油地质, 1989.
- (7) 雍世和等编. 测井资料综合解释与数字处理. 石油工业出版社, 1984.

A DISCUSSION OF THE DETERMINATION OF THE FRACTURING PRESSURE IN A SHALLOW HEAVY OIL RESERVOIR

Liao Guangzhi

(Research Institute of petroleum Exploration and Development, Xinjiang
Petroleum Administration)

Abstract

The determination of the fracturing pressure of a heavy oil reservoir is of great value to the implementation of thermal recovery process. In view of such characteristics as low depth of burial, poor cementation and under-compaction, as well as the effects of many factors, such as tectonic stress etc. this paper analyzes, theoretically, the determination of the fracturing pressure of a formation and discusses the fracturing regimes, and then a method for the fracturing pressure and relevant parameter determination is established. This method is applied to determine the fracturing pressure of heavy oil reservoir in Qigu Formation (Jurassic) in District 9 of Karamay fields. The result shows that both horizontal fractures and vertical fractures are present at present steam injection pressure, which mainly account

for steam channeling. It will also be helpful to the development of similar reservoirs in the future.

作 者 简 介

廖广志，1965年生。1985年毕业于西南石油学院钻井专业，1988年在本校油气田开发专业获硕士学位。现任新疆石油管理局勘探开发研究院稠油开发室副主任，油藏工程师。通讯地址同上，邮政编码834000。