

# 压裂管柱与压裂液多物理场分析

岳欠杯<sup>1</sup> 刘光贞<sup>2</sup> 刘志红<sup>3</sup> 刘巨保<sup>1</sup>

(东北石油大学机械科学与工程学院<sup>1</sup>,大庆 163318;

大庆油田钻井一公司市场开发中心<sup>2</sup>,大庆 163411;

吉林油田机械总厂配件分厂<sup>3</sup>,松原 138000)

**摘要** 压裂作业是改进油气层渗透率、提高油气井产量的有效途径之一。压裂管柱在压裂施工中,地层温度及压裂液温度随井深发生线性或非线性变化,压裂液压力也随井深发生非线性变化。本文选取管内流动的压裂液、管外环空静止井液和压裂管柱为研究对象,建立了温度场、流场和应力场耦合分析的多物理场模型。利用 ANSYS 软件,计算得到 1 000 m 压裂管柱以及压裂液在井口处的温度均为 20 ℃,管柱内外壁在井底处的温度分别为 36.99 ℃、50.55 ℃,压裂液在井底处温度达到 35.47 ℃。仍选取 1 000 m 压裂管柱模型,计算得出管柱在多物理场和应力场中,井口和井底处的等效应力相对误差分别为 3.73%、5.97%。可见,采用应力场对压裂管柱强度评价影响不大,但对管柱的轴向应力、环向应力有一定的影响。

**关键词** 压裂管柱 温度 多物理场 压裂液

中国法分类号 TE355.5j; 文献标志码 A

压裂作业是改进油气层渗透率、提高油气井产量的有效途径之一<sup>[1]</sup>。压裂管柱在压裂施工中,其内外壁受到管内外介质温度以及压裂液压力的影响。其中,压裂液温度及地层温度随井深发生线性或非线性变化,压裂液在压裂过程中由于流动产生压力降,因此压裂管柱内壁所承受的液体压力也随井深发生非线性变化。在以往的压裂管柱力学分析中<sup>[2,3]</sup>,将压裂液温度和地层温度处理成沿井深发生线性分布,将同一井深处的地层温度作为该井深处压裂管柱的温度,不考虑压裂液流动过程中产生的压力降。为了进一步的述压裂液温度、地层温度和压裂液压力分布对压裂管柱受力状态的影响。本文选取管内流动的压裂液、管外环空静止井液和压裂管柱为研究对象,采用有限元法对压裂管柱进行了多物理场分析,为研究压裂管柱的温度、压力分布以及压裂液压力分布提供理论依据。

## 1 多物理场计算模型

选取井口到井底整个压裂管柱、管内流动的压裂液和管外静止井液为研究对象,不考虑压裂管柱与套管柱的接触变形,建立了温度场、流场和应力场耦合分析的多物理场模型,见图 1。该模型既考虑了管外壁与管外静止井液温度发生对流以及管内壁与流动的压裂液温度产生对流对管柱温度分布的影响,又考虑了压裂管柱自身发生热传导对管柱温度的影响,同时还考虑由于压裂液流动产生的压力降对管柱压力分布的影响。压裂管柱在井口和井底处完全固定,压裂液在井口处的排量为压裂施工排量,将该排量作为压裂液井口边界条件,压裂液的出口边界为压裂液给定的相对压力。

## 2 多物理场耦合传热的数值解法

对于某些对流换热问题,热边界条件无法预先规定,而是受到流体与壁面之间相互作用的制约。这时无论界面上的温度还是热流密度都应看成是

计算结果的一部分,而不是已知条件。像这类边界条件是由热量交换过程动态地加以决定而不是预先规定的问题,称为耦合传热问题(conjugate heat transfer)<sup>[4]</sup>。大多数有实际意义的耦合问题都无法获得分析解,而要求采用数值解法。数值解法可分为分区求解、边界耦合的方法及整场求解法两大类<sup>[5]</sup>。

## 2.1 分区求解、边界耦合

分区计算、边界耦合方法的实施步骤是:

(1) 分别对各个区域中的物理问题建立控制方程。

(2) 列出每个区域的边界条件,其中耦合边界上的条件可以取下列三种表达式中的两个:

$$\text{① 耦合边界上的温度连续, } T_w|_I = T_w|_{II} \quad (1)$$

$$\text{② 耦合边界上的热流密度连续, } q_w|_I = q_w|_{II} \quad (2)$$

③ 耦合边界上的第三类条件,

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \Big|_I = h(T_w - T_f)|_{II} \quad (3)$$

对于第三种情形,这里假设区域Ⅱ为流体,至于区域Ⅰ可以为固体,亦可为流体(假定分解壁面很薄)。数值计算实践发现,采用式(3)的耦合条件有利于收敛,这里n为壁面的外法线。

(3) 假定耦合边界上的温度分布,对其中一个区域(例如Ⅰ)进行求解,得出耦合边界上的局部热流密度和温度梯度,然后应用式(2)或式(3)求解另一个区域(Ⅱ),以得出耦合边界上新的温度分布。再以此分布作为区域Ⅰ的输入,重复上述计算直到收敛。

当采用无量纲控制方程时,应注意在耦合边界上无量纲温度定义间的一致性,以利于信息的传递。

对这种计算方法,迭代过程收敛的快慢主要取决于耦合边界上信息的传递。用块结构化网格来处理时,块与块的界面是人为地划分的,物理过程本身是一个整体,但耦合问题中两区的界面是实际存在的,两个区域中所进行的是不同的过程。

## 2.2 整场离散、整场求解

求解耦合问题的有效方法是整场离散、整场求

解,这时把不同区域中的热传递过程组合起来作为一个统一的换热过程来求解,不同的区域采用通用控制方程,区别仅在广义扩散系数及广义源项的不同,耦合界面成了计算区域的内部。采用控制容积积分法来导出离散方程时,界面上的连续性条件原则上都能满足,这样就省去了不同区域之间的反复迭代过程,使计算时间显著缩短。因而整场离散、整场求解的方法是计算耦合问题的一种主导方法,尤其是预测电子器件的散热特性时几乎是唯一采用的方法。

## 3 压裂管柱与压裂液多物理场数值分析

### 3.1 基本参数

选取1 000 m长的压裂管柱和压裂液为研究对象,管内流体的物理属性和入口参数为:导热系数:0.6 W/(m·c)、密度:1 040 kg/m<sup>3</sup>、比热:4 183 J/(kg·c)、入口温度:20 °C、入口排量:3 m<sup>3</sup>/min、管内流体与管内壁对流系数:15 000 w/(m<sup>2</sup>·c),管柱的物理性质和几何参数为:导热系数:10 W/(m·c)、管外径:88.9 mm、壁厚:6.45 mm、长度:1 000 m,井口温度:20 °C、井底温度20 °C,井口和井底之间的温度沿井深呈线性分布,管外壁与管外流体的对流系数为10 000/(m<sup>2</sup>·c)。

### 3.2 计算结果与分析

根据上述参数建立1 000 m压裂管柱多物理场模型,管柱上下端均为固定位移边界,经数值计算得到压裂管柱与压裂液的主要结果见图1~图3所示。

由图1可得出压裂液压力值与井深呈线性变化,压力值随着井深的增加而逐渐降低,压裂液的井口压力为30.83 MPa,井底压力为30 MPa,即井深为1 000 m的压力降为0.83 MPa。由图2可得压裂液温度与井深呈非线性变化,随着井深的增加而增加,压裂液在井口的温度为20 °C,井底处压裂液温度达到最大值35.47 °C,这是由于地层和管柱外介质温度的升高,经管柱与介质对流和传导后所致。管柱内壁温度与井深呈非线性递增,内壁在井底处

的温度值为 36.99 ℃, 压裂管柱内壁既与压裂液温度发生对流, 又与外壁温度发生热传导。管外壁温度与井深呈线性增加, 在井底处其温度值达到最大值, 最高温度为 50.55 ℃。由图 2 综合可得压裂管柱外壁与内壁在井底处的温度差值为 13.56 ℃, 管柱内壁与压裂液的温度差值为 1.52 ℃。

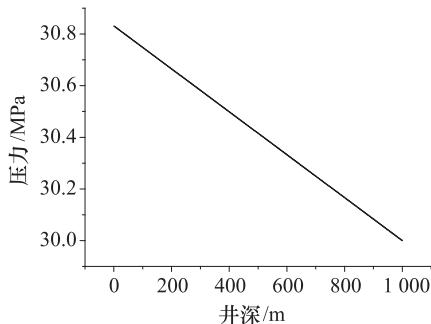


图 1 压裂液压力随井深变化曲线

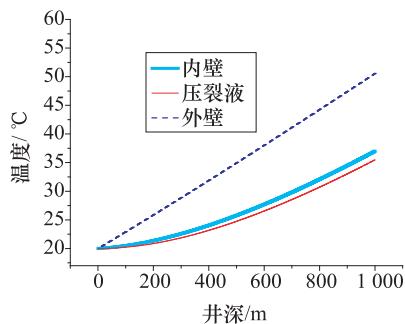


图 2 管柱内外壁及压裂液温度随井深变化曲线

由图 3 可知, 压裂管柱的轴向应力与井深呈非线性变化, 轴向应力值为负值, 说明管柱在温度、内外压差、沿程阻力综合作用下处于受压状态, 其数值大小随着井深的增加而增加, 且最大轴向应力为 -110.51 MPa, 发生在井底处。管柱的环向应力与井深呈线性变化, 其数值随着井深的增加而逐渐减小, 最大环向应力发生在井口处, 其数值为 154.56 MPa。其等效应力与井深呈非线性变化, 在 0.0 m—717.5 m 井段, 等效应力随着井深的增大其数值逐渐减小, 在 717.5 m—1 000 m 其数值随着井深的增加而增大, 在 717.5 m 处等效应力最小值为 145.87 MPa, 最大等效应力发生在井口处, 其值为 160.71 MPa, 小于其强度极限值(强度极限值为 785 MPa)。

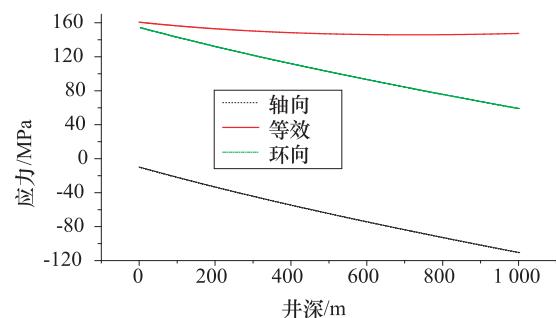


图 3 压裂管柱应力随井深变化曲线

为了进一步研究井深对多物理场分析结果的影响, 对压裂管柱井深为 1 000 m—3 500 m 进行计算, 得出管柱温度、轴向应力、环向应力以及压裂液压力降分布规律见图 4 和图 5。

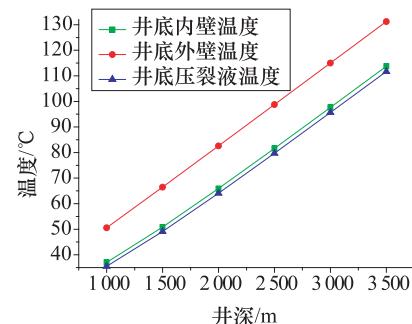


图 4 井底处管柱和压裂液温度随井深变化规律

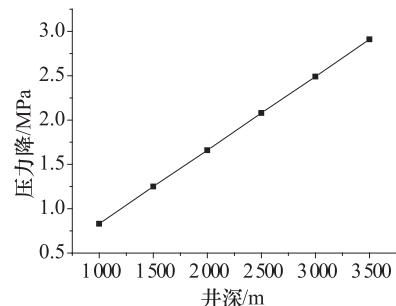


图 5 压裂液压力降随井深变化规律

由图 4 可得出, 随着井深的增加, 压裂管柱压裂液、内壁和外壁在井底处的温度与井深呈线性变化, 随着井深的增加其温度逐渐升高, 在井深为 3 500 m 时, 压裂液、管柱内外壁温度分别为 111.7 °C、113.73 °C、131.23 °C。由图 5 可得出压裂液的压力降也随着井深呈线性递增变化, 由井深 1 000 m

的 0.83 MPa 变为井深 3 500 m 的 2.91 MPa。

为了分析压裂液黏度对多物理场分析结果的影响,对井深 1 000 m 压裂管柱在不同黏度进行计算,得出管柱内外壁温度、轴向应力、环向应力以及压裂液温度和压力降的分布规律,其结果见图 6 和图 7。

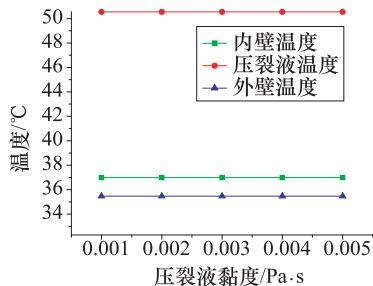


图 6 不同黏度下井底管柱温度变化规律

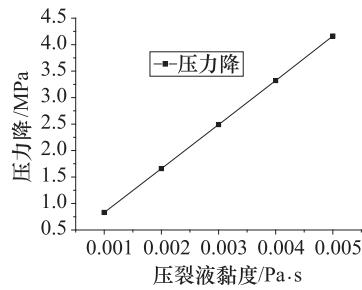


图 7 不同黏度下压裂液压力降变化规律

由图 6 可得出压裂液温度、管柱内外壁温度不随压裂液黏度发生变化,其数值分别为 35.47 °C、36.99 °C、50.55 °C。由图 7 可知压裂液的压力降随着黏度的增大呈线性递增趋势变化,其数值由黏度为 0.001 Pa·s 的 0.83 MPa 变为黏度为 0.005 Pa·s 的 4.16 MPa。

为了研究多物理场模型和应力场模型对管柱受力分析结果的影响,仍取 1 000 m 压裂管柱为研究对象,多物理场模型管柱应力计算结果见图 3。对于应力场模型,其管柱结构和位移边界同多物理场模型,只是管柱温度由管内外介质的平均温度直接给定,即井口管柱为 20 °C,井底管柱为 50 °C;管柱压力由管内介质压力降直接给定。显然,应力场模型只研究压裂管柱在给定载荷和边界下的变形和应力,不涉及流体特性和传热分析。为了便于对

比分析,将两种模型管柱的结果列入表 1。

表 1 压裂管柱多物理场和应力场计算结果

结果类型 模型	约束反力/kN		轴向应力/MPa	
	井口	井底	井口	井底
多物理场	144.14	-202.57	-9.99	-110.51
应力场	162.04	-220.48	-20.70	-95.80
绝对误差/%	12.42	8.84	107.21	13.31
相对误差/%	12.42	8.84	107.21	-13.31
结果类型 模型	约束反力/kN		轴向应力/MPa	
	井口	井底	井口	井底
多物理场	160.71	147.50	154.56	59.10
应力场	166.71	156.30	154.56	84.51
绝对误差/%	3.73	5.97	0.00	42.99
相对误差/%	3.73	5.97	0.00	42.99

由表 1 可知,多物理场和应力场在井口和井底处的约束反力、轴向应力、等效应力、环向应力有一定的差值,轴向应力值的误差最大。井口处和井底处轴向应力的绝对误差分别为 107.21%、13.31%;井底处的环向应力差值比较大,其绝对误差为 42.99%;等效应力和约束反力误差比较小,等效应力井口和井底处的绝对误差分别为 3.73%、5.97%;约束反力井口和井底处的绝对误差分别为 12.42%、8.84%。由此可见,在压裂管柱力学分析中,不考虑管柱内压裂液、管柱外井液介质温度和流动的耦合分析,直接采用外载荷方式进行管柱应力场计算对管柱的轴向应力、环向应力有一定的影响,但对等效应力的影响比较小,因此对管柱强度的评价影响不大。

## 4 结论

(1) 在井深为 1 000 m 的压裂管柱中,管柱内外介质及管柱在井口处温度为 20 °C,管外介质在井底处为 50 °C,经多物理场耦合分析,管柱内外壁随着井深的增加出现差值,外壁与内壁在井底处的温度差值为 13.56 °C,井底处管柱内壁温度为 36.99 °C,管柱内壁与压裂液在井底处温度差值为 1.52 °C。

(2) 在压裂管柱多物理场分析中,随着井深的

增加,压裂管柱压裂液、内壁和外壁在井底处的温度随着井深的增加其温度逐渐升高。井底处压裂液温度由井深1 000 m的35.47 ℃增加到井深为3 500 m的111.7 ℃,内壁在井底处的温度由井深为1 000 m的36.99 ℃增加到井深为3 500 m的113.73 ℃,外壁在井底处的温度由井深为1 000 m的50.55 ℃增加到井深为3 500 m的131.23 ℃。

(3)在压裂管柱多物理场分析中,随着黏度的增加,压裂液压力降随着黏度的增加逐渐增大,其数值由黏度为0.001 Pa·s的0.83 MPa变为黏度为0.005 Pa·s的4.16 MPa。

(4)在压裂管柱力学分析中,不考虑管柱内压裂液、管柱外井液介质温度和流动的耦合分析,直接采用外载荷方式进行管柱应力场计算对管柱的

轴向应力、环向应力有一定的影响,但对等效应力的影响比较小,因此对管柱强度的评价影响不大。

## 参 考 文 献

- 1 黄云,刘清友,莫丽.注水管柱温度场数值计算模型研究.钻采工艺,2008;31(5):44—46
- 2 Camacho R. Pressure transient and decline curve behaviors in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs SPE77689,2002
- 3 何祖清,朱晓荣,刘清友,等.注水管柱温度场计算模型研究.长江大学学报,2007;4(2):255—256
- 4 苗和平,王鸿勋.水平井压裂施工中温度场的计算方法.石油钻采工艺,1994;16(3):45—49
- 5 陶文铨.数值传热学(第二版).西安:西安交通大学出版社,2001;484—487

## The Multi-physics Filed Analysis about the Fracturing String and the Fracturing Fluid

YUE Qian-bei<sup>1</sup>, LIU Guang-zhen<sup>2</sup>, LIU Zhi-hong<sup>3</sup>, LIU Ju-bao<sup>1</sup>

(College Mechanical Science Engineering Northeast Petroleum<sup>1</sup>, Daqing 163318, P. R. China;

Market Development Center of Daging No. 1 Drilling Company.<sup>2</sup>, Daqing 163318, P. R. China;

Jilin Oilfield Machinery Factory<sup>3</sup>, Songyuan 138000, P. R. China)

**[Abstract]** The fracturing job was one of the effective way to improve hydrocarbon reservoir's permeability and raise oil and gas well's production. In the fracturing operation, the formation and fracturing fluid temperature were coming linear or non-linear changes with the well depth. The fracturing fluid pressure was also coming non-linear changes with the well depth. The flow fracturing fluid, the static fluid outside the tubular and the fracturing string was selected as objects. The coupling analysis model of the physical field with the temperature field, flow field and stress field was set up. The 1 000 m model result of the fracturing string was obtained by adopting ANSYS software. The wellhead temperature about the fracturing string and fluid was 20 ℃. The inner wall temperature was 36.99 ℃. Its outer wall temperature was 50.55 ℃. The fracturing string temperature was 35.47 ℃ in the bottom of the well. The string model with 1 000 m was also selected as research objects. The result in the multi-physic and stress field is obtained. The fractional error in the well of head and bottom is respective 3.73% and 5.97%. Wherefore, it has little impact by using stress field to evaluate the casing strength. Bur it has a certain impact on the axial stress and the hoop stress.

**[Key words]** the fracturing string      temperature      the multi-physics filed      the fracturing fluid