

深层致密储层人工缝网复杂程度研究及 相关性分析

包小龙, 唐毅, 丁玲玲

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月5日

摘要

针对非常规储层的改造, 常常采用体积压裂工艺, 压裂后人工缝网的形态是体积压裂工艺是否成功的重要体现, 针对深部储层压裂后人工缝网复杂程度评价技术难度大、成本高的问题, 本文以大北区块30口井为研究对象, 对压裂施工曲线的停泵段进行G函数解释, 将人工缝形态总结为3种G函数图版, 并将G函数的特征值与压后产能进行相关性分析。结果表明: 大北区块的人工缝网形态可分为简单裂缝、少量沟通天然裂缝以及复杂缝网三类, G函数特征值与天然裂缝沟通程度呈现正相关关系。G函数特征值与压后产量相关性弱, 而与无阻流量相关性弱。基于现场压裂施工曲线的停泵段进行裂缝诊断, 结合文中所得出的图版, 为现场裂缝形态的诊断提供参考。

关键词

深层致密储层, 水力压裂, G函数

Complexity Study and Correlation Analysis of Artificial Fracture Networks in Deep Tight Reservoirs

Xiaolong Bao, Yi Tang, Lingling Ding

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: May 25th, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

For unconventional reservoir stimulation, volume fracturing technology is commonly used, and the morphology of the artificial fracture network after fracturing is a key indicator of the technique's

success. To tackle the challenges of high technical difficulty and cost associated with evaluating the complexity of hydraulic fractures in deep reservoirs, this study focuses on 30 wells in the Dabei Block. The shut-in segments of the fracturing treatment curves were analyzed using G -function analysis. The artificial fracture morphologies were classified into three G -function templates, and a correlation analysis was conducted between the characteristic values of the G -function and post-fracturing productivity. The results reveal that the artificial fracture networks in the Dabei Block can be categorized into three types: simple fractures, limited activation of natural fractures, and complex fracture networks. The characteristic values of the G -function show a positive correlation with the degree of natural fracture interaction. Furthermore, these values demonstrate a strong correlation with post-fracturing production but a weak correlation with open-flow potential. By diagnosing fracture morphology based on the shut-in segments of field fracturing curves and using the proposed templates, this study provides a practical reference for on-site fracture characterization.

Keywords

Deep Tight Reservoir, Hydraulic Fracturing, G -Function

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大北区块位于克深区带的克拉苏逆冲断裂下盘,与克拉苏背斜区带为断层上下盘关系,石油地质条件与克拉苏背斜带相似,目前已经发现大北 1、大北 3、大北 4 等多个局部构造,多为砂岩和碳酸盐岩储层。区块内大部分井深在 5000~7000 m 范围,最小水平主应力在 110~150 MPa 范围。使用微地震、地形变和示踪剂等测试方法进行体积压裂评价具有技术难度大和成本高的问题,因此,通过对停泵压降段进行分析,是一种简便且成本低的方式。

1979 年第五十四届美国石油工程师协会年会, Nolte 在会上首次提出压后裂缝闭合期的压力递减情况能够反映了裂缝及其周围地层的情况, Nolte 等所提出的压力分析模型,由于数学表达式简单、直接,对于现场数据分析来说具有很强的可操作性,目前已被广泛应用在小型压裂或压前诊断测试分析中[1]。

致密储层的压裂停泵后,可根据压力降落的规律可以评价储层物性参数。根据早期停泵压力降落规律(裂缝闭合前的分析)可以获得滤失系数、闭合应力(接近于地层最小主应力)、液体效率与多裂缝发育情况等;当关井时间足够长时(数天甚至数十天,裂缝发生闭合),地层出现拟径向流,还可以获取原始地层压力和有效渗透率等参数。

唐莉[2]结合了 G 函数压力导数和叠加导数曲线特征,可准确地得出不同形态曲线下的裂缝闭合参数和裂缝延伸情况。陈勉等[3]在常规 G 函数分析上,根据对拟合压力重新定义,提出了一种适用于裂缝性地层的小型压裂压力递减分析的新方法。西南石油大学的郭建春、赵金洲[4]又在现有基础上,建立出了用于压力递减分析的三维裂缝模型,综合考虑了压后流体续流作用对水力裂缝继续延伸的影响,该方法用压力平方差计算拟合压力,用这个模型以及该拟合压力能有效地计算出压后裂缝长度和宽度、高度、停泵后裂缝延伸时间与延伸长度、闭合时间与施工结束时的压裂液效率、地层应力强度因子等多个参数。王玉普等[5]人针对裂缝性低渗储层的基质渗透率低、孔隙度小、天然微裂缝成为压裂液滤失的主要因素等特点,考虑了裂缝性地层的地质特点,在 Nolte G 函数压力降落曲线分析的基础上,提出了适合裂缝性油气藏的小型压裂压力递减分析模型。肖阳等[6]利用注入/压降试井理论对停泵后的压降数据进行解释,

对压后储层主控类型及裂缝形态几何尺寸等方面进行评价, 并综合 G 函数主缝、多缝特征识别综合完成裂缝复杂程度评价, 对比相关微地震测试成果验证方法的可靠性, 在此基础上形成一种快速评价缝网压裂裂缝复杂程度的方法, 为压后效果评估及产能预测提供相关基本的裂缝尺度参数。

本文将 G 函数压后解释方法运用于深部储层, 对大北区块 30 口井的施工压力曲线的停泵段进行分析, 总结为 3 种压裂后人工裂缝网络形态图版, 并选取 3 口典型井的施工压力曲线进行分析, 最后将 G 函数特征值与压后产能进行相关性分析。

2. 压降段人工缝网解释基本原理

根据裂缝内的质量守恒方程, 忽略泵入流体的可压缩性, 裂缝体积可由流体压裂液体积、滤失体积和初滤失体积组成[7]-[10]:

$$\int_0^t q(t) dt - 2 \int_0^t \int_0^A \frac{C(A, t)}{\left(t - \tau \left[\frac{A}{H_p L(t)} \right]^{\frac{1}{\alpha_r}} \right)^{\alpha_r}} dA dt - 2 S_p H_p L(t) = V_f(t) \quad (1)$$

式中: $q(t)$ 为流体泵入流量, m^3/min ; $V_f(t)$ 为裂缝体积, m^3 ; $\tau(A)$ 为裂缝滤失面积形成时间, s ; S_p 为初滤失系数, m^3/m^2 ; H_p 为流体在裂缝内的滤失高度, m ; $L(t)$ 为裂缝长度, m ; $A(t)$ 为裂缝单面滤失面积, m^2 ; $C(A, t)$ 为漏失系数。

停泵后压裂液的滤失量, 可由下式计算:

$$\Delta V_l(t) = 2 \int_{t_p}^t \int_0^A \frac{C(A, t)}{(t - \tau(A))^{\alpha_r}} dA dt \quad (2)$$

假设滤失系数仅是时间的函数, 对式(3)两边同时对时间 t 微分, 得到滤失速度:

$$\frac{d\Delta V_l}{dt} = 2C(t) \int_0^A \frac{1}{(t - \tau(A))^{\alpha_r}} dA = \frac{\pi}{2} C(t) A(t_p) \sqrt{t_p} \frac{d}{dt} G(\alpha_a, 0, \theta) \quad (3)$$

式(3)中, $G(\alpha_a, \alpha_{c_2}, \theta)$ 为 G 函数的一般形式, 其计算方式如下:

$$G(\alpha_a, \alpha_{c_2}, \theta) = \frac{4}{\pi} \int_1^\theta \xi^{\alpha_a + \alpha_{c_2} - 0.5} \int_0^{\xi - \alpha_a} \left(\frac{d\lambda}{\sqrt{1 - \lambda^{\frac{1}{\alpha_a}}}} \right) d\xi \quad (4)$$

式中:

$$\theta = \frac{t}{t_p} \quad (5)$$

式(5)中: θ 为无因次时间, t_p 为泵入时间, s 。

根据质量守恒理论, 在裂缝闭合期间

$$V_f(t) = V_f(t_p) - \Delta V_{Ls}(t) \quad (6)$$

式(6)中: $V_f(t)$ 为时刻 t 的裂缝内体积, m^3 ; $V_f(t_p)$ 为停泵时的裂缝内体积, m^3 ; $\Delta V_{Ls}(t)$ 为停泵结束后压裂液在裂缝内的滤失体积, m^3 。

将式(4)~(8)左右两边同时除以 $V_f(t_p)$, 简化处理得:

$$-\frac{d}{dt}\left[\frac{V_f(t)}{V_f(t_p)}\right] = \frac{1-\eta_s}{2\eta_s\Phi} \frac{C(t)}{C(t_p)} \frac{d}{dt} G(\alpha_a, 0, \theta) \quad (7)$$

在裂缝闭合过程中假设裂缝柔度为定值，裂缝净压力与裂缝体积成比例，裂缝净压力与裂缝体积的关系可以表示为[41]：

$$\frac{\Delta p_f(t)}{\Delta p_f(t_p)} = \frac{V_f(t)}{V_f(t_p)} \quad (8)$$

将式(8)带入(7)得：

$$-\frac{d}{dt}\left[\frac{\Delta P_f(t)}{\Delta P_f(t_p)}\right] = \frac{1-\eta_s}{2\eta_s\Phi} \frac{C(t)}{C(t_p)} \frac{d}{dt} G(\alpha_a, 0, \theta) \quad (9)$$

整理式(9)得：

$$-\frac{dp(t)}{dG} = \Delta P_f(t_p) \frac{1-\eta_s}{2\eta_s\Phi} \frac{C(t)}{C(t_p)} \quad (10)$$

式(4)~(16)即为压降方程，也是 G 函数的导数。

令 $P = ISIP - P(t)$ ，代入(4)~(16)即可得到普遍适用的压降方程[42]：

$$\frac{dP}{dG} = \Delta P_f(t_p) \frac{1-\eta_s}{2\eta_s\Phi} \frac{C(t)}{C(t_p)} \quad (11)$$

两边同时乘以一个 G 函数得：

$$G \frac{dP}{dG} = \Delta P_f(t_p) \frac{1-\eta_s}{2\eta_s\Phi} \frac{C(t)}{C(t_p)} G(\alpha_a, 0, \theta) \quad (12)$$

每个时间点都对应着一个地面压力，并且通过一阶差分数值计算方法，就能够求出相应 G 函数以及对应的 dp/dG 。将 G 函数与求得的 dp/dG 进行乘积，便可以得到一个叠加的导函数 $G \cdot dp/dG$ 。之后，以 G 函数时间为坐标轴的横轴， $G \cdot dp/dG$ 为坐标轴的纵轴绘制压裂施工曲线图，由于不同裂缝类型，其压裂施工曲线也存在差异，因此，便可以识别裂缝类型。

3. 人工缝网复杂程度解释

通过对大北区块众多压裂井的压裂施工曲线的压降段进行分析，根据天然裂缝沟通情况，选取 3 口典型井为例，分析每口井的 G 函数特征。

W1 井的闭合压力为 76.94 MPa (图 1)， G 函数无明显凸起与凹陷处， GdP/dG 函数值峰值为 2.35， GdP/dG 曲线在闭合点后，曲线呈现出平稳的态势，这种类型的曲线代表着没有沟通天然裂缝，只形成了简单主裂缝。

W2 井第一层的闭合压力为 101.33 MPa (图 2)，液体效率为 0.0468， G 函数凸起处为 1 处，无凹陷处， GdP/dG 函数值峰值为 9.36， GdP/dG 函数曲线一过原点，便出现一个幅度较小的“上凸”曲线特征，表明该人工裂缝少量沟通了天然裂缝，形成了较复杂的人工裂缝。

W3 井的闭合压力为 70.296 MPa (图 3)，液体效率为 0.0956， G 函数凸起处为 1 处，无凹陷处， GdP/dG 函数值峰值为 7.23， GdP/dG 函数曲线一过原点，便出现一个幅度很大的“上凸”曲线特征，表明该井大量沟通了天然裂缝，形成了复杂的人工裂缝。

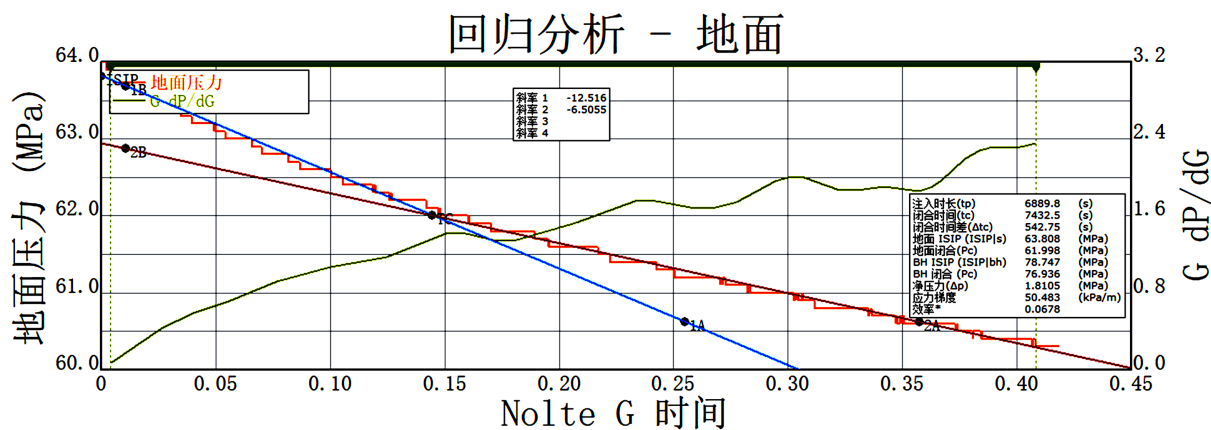


Figure 1. Post-Fracturing analysis of W1

图 1. W1 井压后解释

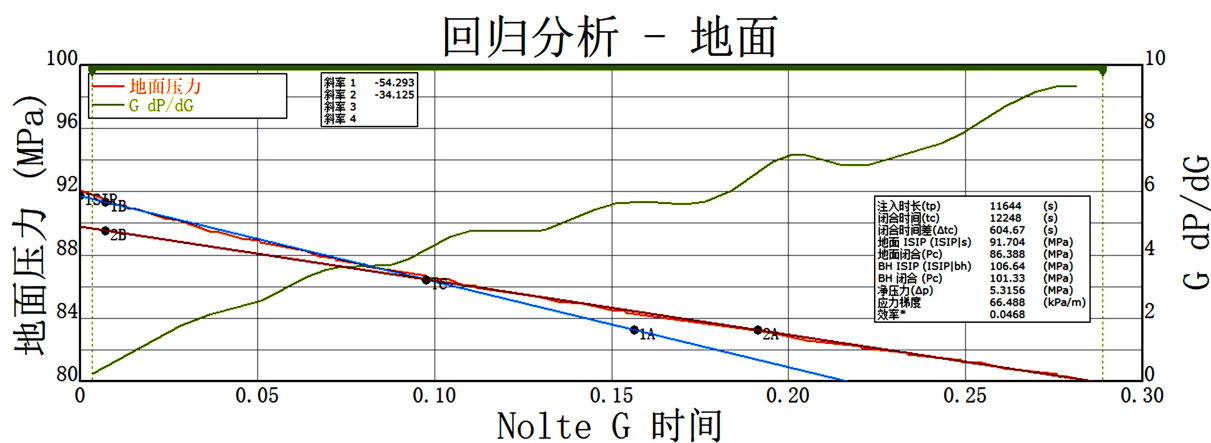


Figure 2. Post-Fracturing analysis of W2

图 2. W2 井压后解释

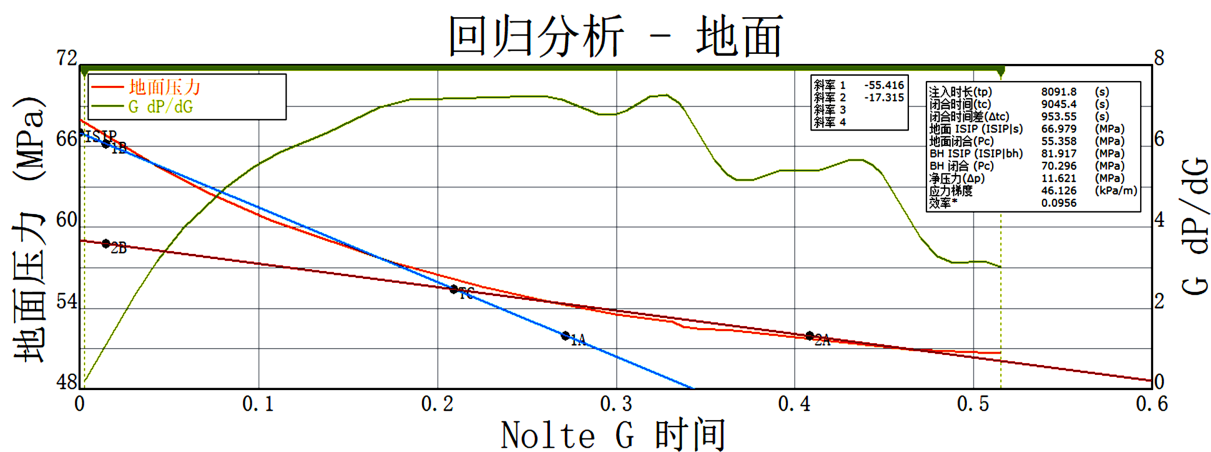


Figure 3. Post-Fracturing analysis of W3

图 3. W3 井压后解释

通过对大北区块 30 口井的压裂施工曲线的压降段进行分析, 归纳总结出 3 种曲线类型, 如图 4 所示, 并绘制相应图版, 结合特征参数解释。

- (1) 叠加导数 GdP/dG 开始时是一条过原点的直线，后期叠加导数逐渐变为平行于横坐标的水平直线，曲线无明显突起和凹陷处， G 函数特征值一般小于 3；该类型曲线的人工裂缝是单一裂缝类型。
- (2) 叠加导数 GdP/dG 开始时是一条过原点的略微突起曲线，后期叠加曲线上呈现凸起和凹陷处， G 函数特征值一般在 5~10 之间；该类型曲线的人工裂缝少量沟通了天然裂缝，是较为复杂裂缝类型。
- (3) 叠加导数 GdP/dG 开始时呈现出“四分之一圆”特征，后期叠加曲线呈现出波动段特征， G 函数特征值一般在 7~12 之间；该类型曲线的人工裂缝大量沟通了天然裂缝，是复杂裂缝类型。

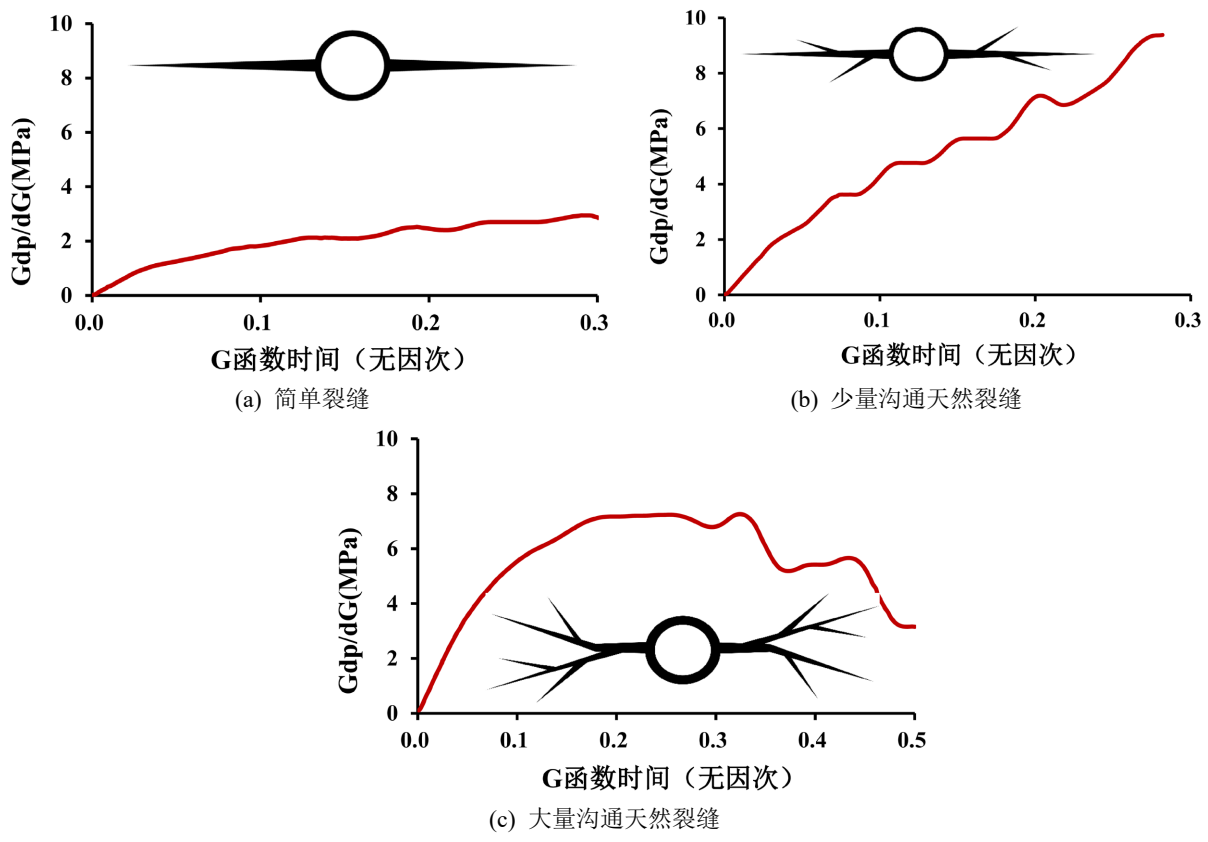


Figure 4. G -function characteristics and fracture interpretation diagnostic chart
图 4. G 函数特征与裂缝解释图版

Table 1. Post-fracturing hydraulic fracture characteristics
表 1. 压后人工裂缝特征

井号	特征值	裂缝类型
W1	2.45	单一裂缝
W2	9.36	少量沟通天然裂缝
W3	7.23	大量沟通天然裂缝

4. G 函数特征值与压后产能相关性分析

根据 3 口典型井的人工裂缝识别结果(表 1)，发现 G 函数特征值与人工裂缝形态之间存在一定的相关性。当 G 函数特征值很小时，人工裂缝没有沟通天然裂缝，只形成了简单的裂缝；而当人工裂缝沟通

天然裂缝后, G 函数特征值呈现出增大的趋势。因此, 通过将 G 函数特征值与油气井产能进行相关性分析, 判断二者之间的相关性。笔者采用皮尔逊相关系数对二者的相关性进行分析。皮尔逊相关系数, 适用于度量两组数据 X 、 Y 之间的线性相关性, 其值介于 -1 到 1 之间。越接近 1 , 其正向变化性越强, 越接近 -1 , 则反向相关性越强。其计算公式为:

$$p_{x,y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - (E(X))^2} \sqrt{E(Y^2) - (E(Y))^2}} \quad (13)$$

$$= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}}$$

式中: $\text{cov}(X,Y)$ 是 X 和 Y 的协方差; σ_X 、 σ_Y 分别是 X 和 Y 的标准差。 σ_X 、 σ_Y 的值越接近 1 , 表示 2 组数据的相关性越强。

通过绘制 G 函数特征值、油折气总产量、初始产气量、初始产油量、无阻流量与米无阻流量之间的相关性热图, 进行 G 函数特征值与压后产能之间的相关性分析, 结果如图 5 所示:

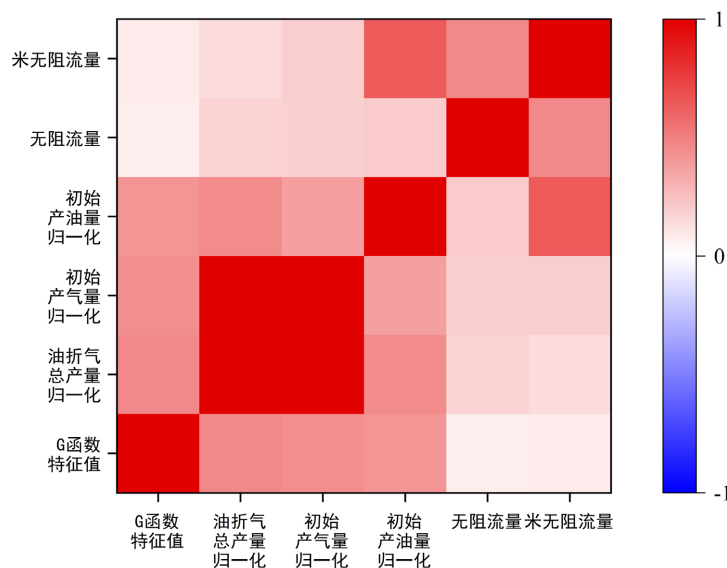


Figure 5. Correlation analysis between G -function character and production
图 5. G 函数特征值与产能相关性分析热图

根据相关性分析热图可知, 各变量之间的相关性不同, G 函数特征值与压后的初始产量相关性强, 而对压后无阻流量的相关性较低。 G 函数特征值越高, 沟通的天然裂缝网络越多, 储层改造效果越好, 因此初始产量也越高。

5. 结论

(1) 通过对压裂施工停泵段进行分析, 将大北区块的人工缝网分为 3 种类型: 简单裂缝、少量沟通天然裂缝和大量沟通天然裂缝, 人工裂缝沟通天然裂缝的程度越高, G 函数的特征值越高。

(2) 建立 G 函数特征值与压后产能相关性分析模型, 分析后发现, G 函数特征值与初始产量相关性, 与无阻流量相关性弱。

参考文献

- [1] Nolte, K.G. and Smith, M.B. (1981) Interpretation of Fracturing Pressures. *Journal of Petroleum Technology*, **33**, 1767-1775. <https://doi.org/10.2118/8297-pa>
- [2] 唐莉. 压裂井裂缝闭合前 G 函数分析方法研究[J]. 中国石油和化工, 2016(S1): 245-246.
- [3] 张旭东, 陈勉, 张国强, 等. 小型压裂压降分析新方法及其应用[J]. 江汉石油学院学报, 2002(4): 90-91+1.
- [4] 郭建春, 赵金洲, 敖西川. 压裂压力递减分析三维模型与应用[J]. 天然气工业, 2003(2): 72-74+5.
- [5] 王玉普, 孙丽, 张士诚, 等. 裂缝性地层压降曲线分析方法及其应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004(1): 55-57+140-141.
- [6] 肖阳, 刘守昱, 何永志, 等. 致密砂岩裂缝性气藏缝网压裂裂缝复杂程度评价方法[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2): 157-163.
- [7] 崔光锋, 杨永超, 邢永明. Nolte 基本分析方法及讨论[J]. 断块油气田, 2003(4): 40-43+91.
- [8] 曾博, 王莉, 张晓伟. 小型压裂测试分析方法在页岩气开发中的应用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 151-155.
- [9] 路峥. 基于储层特征分析的雁 63 区块压裂工艺设计优化与后评估研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.
- [10] 黄琼冰, 鹿天柱, 寇永强, 等. 小型压裂技术的应用 [J]. 油气井测试, 1998(2): 59-63+78.