

引用格式:游利军,王阳,康毅力,等.含水致密砂岩储层热激增渗的物性条件[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):320-328.

YOU Lijun, WANG Yang, KANG Yili, et al. Physical properties of water-bearing tight sandstone reservoir for improving permeability by thermal stimulation[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 320-328.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.007

## 含水致密砂岩储层热激增渗的物性条件

游利军,王阳,康毅力,唐际锐,刘江,杨东升

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500)

**摘要:**致密砂岩储层基块孔喉细小,同时气藏开发全过程易产生水相圈闭损害,制约致密气开发进程。矿场试验与室内实验研究均已证明储层热处理技术可以解除储层水相圈闭损害并增加渗透率,但受限于其适应的储层物性条件不清而一直未推广应用。选取库车凹陷、惠民凹陷、冀东凹陷地区典型致密砂岩岩心,为模拟热处理压裂液滞留的裂缝面或生产过程水相聚集的近井带,利用3% KCL溶液完全饱和实验岩心,开展了升温速率为2℃/min的热激实验,测试了不同 $RQI$ (储层品质系数)的致密砂岩热激前后渗透率,分析了储层品质系数 $RQI$ 与增渗幅度之间关系。研究表明,致密砂岩岩样从室温加热至100℃,渗透率变化不明显,加热至200℃,渗透率略微降低,加热至300~400℃,部分岩样渗透率增幅达200%~500%,但也有部分岩样渗透率无明显变化,这与岩样的储层品质系数 $RQI$ 有关;适合热激增渗的含水致密砂岩储层品质系数临界值为0.25,当 $RQI$ 值小于0.25时,岩样热激增渗幅度与 $RQI$ 值呈单调递减的函数关系;在 $RQI$ 值一定且热激温度大于200℃的情况下,温度越高热激增渗效果越好。

**关键词:**致密砂岩;热激;水相圈闭损害;储层品质系数;压裂液

中图分类号:TE254.4

文献标识码:A

### Physical properties of water-bearing tight sandstone reservoir for improving permeability by thermal stimulation

YOU Lijun, WANG Yang, KANG Yili, TANG Jirui, LIU Jiang, YANG Dongsheng

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** The pore throat of tight sandstone reservoir block is narrow, and during the whole process of gas reservoir development, the water phase trapping damage is easy to prone, which restrict the development process of tight gas. The field test and laboratory experimental study have proved that the heat treatment technology for reservoirs can remove this damage and increase the permeability, but it has not been popularized and applied because of the unclear reservoir physical properties. Therefore, typical tight sandstone cores in Kuqa Depression, Huimin Depression and Jidong Depression are selected in order to simulate the fracture surface where heat treatment fracturing fluid stays or the near-wellbore zone where water phase gathers in the production process. A thermal shock experiment is carried out with 3% KCL solution completely saturated experimental cores, the permeability of tight sandstone with different reservoir quality coefficient  $RQI$  before and after thermal shock is tested, and the relationship between the reservoir quality coefficient  $RQI$  and the increasing permeability is analyzed. The researches show that the permeability of tight sandstone samples does not change obviously when heated from room temperature to 100℃, but decreases slightly when heated to 200℃, and increases by 200%~500% when heated to 300~400℃, but the permeability of some samples does not change obviously, which is related to the reservoir quality coefficient  $RQI$  of the samples. The critical value of quality coefficient of water-bearing tight sandstone reservoir suitable for thermal surge permeability is 0.25. When  $RQI$  value is less than 0.25, the thermal surge permeability amplitude of rock samples is monotonically decreasing with  $RQI$  value. When  $RQI$  value is constant and heat shock temperature is greater than 200℃, the higher the temperature, the better the effect of thermal surge infiltration.

**Keywords:** tight sandstone; thermal stimulation; water phase trapping damage; reservoir quality index; fracturing fluid

收稿日期:2021-11-24。

第一作者简介:游利军(1976—),男,教授,博士,主要从事储层保护、非常规油气、岩石物理方面的教学和科研工作。地址:四川省成都市新都区油气藏地质及开发工程国家重点实验室,邮政编码:610500。E-mail:youlj0379@126.com

基金项目:非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目“页岩气层氧化协同水力压裂减量增渗方法研究”(2021JDTD0017)。

中国目前已经迈入非常规油气时代,三大非常规天然气中就探明储量和实力而言,致密砂岩气藏是最具现实勘探开发意义的非常规天然气资源<sup>[1]</sup>。致密砂岩储层具有低孔低渗、丰富黏土矿物、强非均质、局部超低含水饱和度等特点,气井完井后无自然产能或产能低于工业气流下限。大型水力压裂后压裂液返排困难,返排率往往低于50%<sup>[2]</sup>。压裂液滞留储层裂缝产生水相圈闭损害,阻碍气相流向井筒<sup>[3]</sup>。

储层高温热处理技术FHT在1950s提出,旨在利用高温蒸发储层中的水相以解除水相圈闭损害,同时高温还可以解除储层黏土矿物膨胀损害并提高储层渗透率,提高最终采收率<sup>[4-5]</sup>。ALBAUGH等<sup>[6]</sup>在美国加利福尼亚州的一个废弃油井中进行了高温热处理矿场试验,通过放置在井底的一个电加热装置加热近井带储层,使其温度达到375℃,并稳定6d后进行测试,结果表明储层高温热处理技术有效地减轻了近井带水相圈闭损害,并显著地增加了近井带的储层渗透率。游利军等<sup>[7]</sup>通过开展针对泥页岩、致密砂岩、致密碳酸盐岩室内实验,揭示了致密岩石孔隙度、渗透率等物性参数对不同高温的响应以及变化情况。陈明君等<sup>[8]</sup>明确了高温热处理室内实验评价方法,将致密型岩石加热致裂划分为孔缝水高温蒸发、矿物脱水、矿物热裂解、产生微裂缝4个阶段。WANG等<sup>[9]</sup>通过数值模拟加热致密砂岩储层,具体以井筒为圆心(热源)加热井筒周围储层,用时3d,最后结果表明,储层最高温度峰值点为853℃,并且解除了孔隙度在8%~20%范围内的水相圈闭损害。赵阳升等<sup>[10]</sup>在应力加载条件下进行了砂岩和花岗岩高温热处理实验,研究了轴压6MPa、围压5MPa下热处理过程中渗透率的变化。邵天琛等<sup>[11]</sup>认为在不同温度、不同加热时长、不同加热方式条件下,随着时间的增加,在1000℃以下,裂缝发育情况明显改善,并互相沟通形成渗流网络,在1200℃左右时,由于岩石发生釉化现象,导致岩石内部渗流情况变化不大,因此加热时可以控制温度在1000℃左右。游利军等<sup>[12]</sup>对岩石进行了重复升温热激实验。结果表明含水岩样热激更易创生裂缝,渗透率增幅更大,声波速率降幅更大;滞留压裂液在储层中有着降低致裂阈值温度的作用,使储层在较低温度下致裂增渗。

国内外众多学者在致密岩石高温热处理方面已经做了大量深入研究。然而,从FHT技术提出后至今,除21世纪有现场应用研究以外,最近二十年相关研究全都停留在实验室以及数值模拟上并无工业应用。其原因主要是不同储层之间物性条件差异太大,一项技术难以适应所有的储层;此外,目前也并无方法可以判断一个储层是否适用热激的方法(技术)进行改造。上述两点原因导致了部分现场使用热激改造后并无明显增产效果,进而影响该技术的进一步研究和推广。

针对目前储层热激方法(技术)难以推广应用的现状,以库车凹陷、惠民凹陷、冀东凹陷地区的不同物性致密砂岩为研究对象,考虑水力压裂技术以及压裂液返排情况,开展了基于不同物性岩样的高温室内实验。此外,在过往研究只考虑单一渗透率或者孔隙度的基础之上,首次将储层品质系数RQI引入作为储层的综合物性条件,并以此揭示了含水致密砂岩储层适用于热激方法进行改造的物性条件。

## 1 实验样品与方法

### 1.1 实验样品

为确保本实验的研究结论适用于广泛的致密砂岩储层,分别选用库车凹陷侏罗系、惠民凹陷三叠系、冀东凹陷三叠系典型致密砂岩储层的岩样,并测量其全部的孔隙度渗透率。测量选用HKS-II孔渗联测仪(图1),该仪器采用气测原理可以同时测量孔隙度渗透率,此外,测量时将围压设置为15MPa可以模拟岩样的原地应力状态。

测量完成后,从3个地区各选取8块岩样作为实验样品,共计24块。其中,冀东凹陷沙河街储层致密砂岩岩样的编号为JD-1至JD-8,塔里木盆地侏罗系

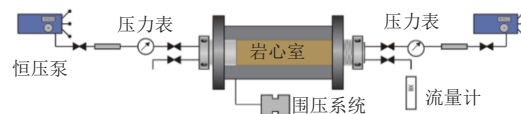


图1 实验用HKS-II孔渗测定仪原理示意图  
Fig. 1 HKS-II schematic diagram of principle of porosity and permeability measuring instrument

阿合组致密岩屑砂岩岩样的编号为DB-1至DB-8,惠民凹陷沙河街储层致密砂岩岩样的编号为HA-1至HA-8。实验岩样的渗透率范围为 $(0.020 \sim 0.899) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度范围为3.99%~17.99%(表1)。

## 1.2 实验方法

为模拟压裂液滞留储层,将实验岩心加压饱和3% KCL溶液72 h,然后开展高温热激实验。将岩样JD-1、JD-2、DB-1、DB-2、HA-1、HA-2从室温加热至100℃;将岩样JD-3、JD-4、DB-3、DB-4、HA-3、HA-4从室温加热至200℃;将岩样JD-5、JD-6、DB-5、DB-6、HA-5、HA-6从室温加热至300℃;将岩样JD-7、JD-8、DB-7、DB-8、HA-7、HA-8从室温加热至400℃。加热结束后保温2 h,加热采用控温

精度为 $\pm 1$ ℃的SK-G06123K型气氛管式电热炉(图2),升温速率为2℃/min。

热激实验具体步骤如下:①将岩心放入载物装置,然后放入加热炉的石英管中加热;②将石英管两端的阀门打开,向石英管内以3 L/min为流速通以95%纯度的氮气持续5 min排出管内的残余空气;③开启电热炉,并在操作界面设置热激相关参数,包括初始温度20℃、升温速率2℃/min、热激目标温度、保温时间2 h等;④开启加热程序,热激结束后,等待岩心冷却1 h后取出;⑤更换岩心,重复上述步骤①至④。

热激实验完成后,再次测量并记录所有实验岩心的孔隙度渗透率。

实验结果从以下2个方面进行评价分析:

1) 通过对比同一热激温度下岩样实验前平均渗透率以及实验后平均渗透率的变化评价增渗效果。

2) 以同一热激温度下热激前后的渗透率增加倍数 $I$ 评价增渗幅度:

$$I = \frac{K_2}{K_1} \quad (1)$$

式中: $I$ 为高温热激实验前后岩样气测渗透率增长倍数; $K_2$ 为高温热激实验后岩样气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $K_1$ 为高温热激实验前岩样气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 热激温度与岩样增渗效果

100℃热激前后岩样平均渗透率变化如图3所示。图3中JD-12渗透率为JD-1与JD-2渗透率的平

表1 实验样品初始物性参数  
Table 1 Initial physical parameters of experimental samples

岩心编号	长度 (cm)	直径 (cm)	渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	孔隙度 (%)
JD-1	5.692	2.535	0.038	16.79
JD-2	5.696	2.539	0.02	17.01
JD-3	5.756	2.530	0.042	17.99
JD-4	5.686	2.546	0.018	17.20
JD-5	5.530	2.550	0.021	17.21
JD-6	5.672	2.532	0.027	17.40
JD-7	5.792	2.540	0.033	17.35
JD-8	5.721	2.535	0.036	17.12
DB-1	5.577	2.489	0.099	6.35
DB-2	5.642	2.488	0.087	5.53
DB-3	5.662	2.490	0.069	4.71
DB-4	5.170	2.540	0.124	8.92
DB-5	5.692	2.488	0.041	4.01
DB-6	5.582	2.490	0.055	3.99
DB-7	5.676	2.488	0.122	7.84
DB-8	5.258	2.562	0.091	6.56
HA-1	6.176	2.509	0.699	7.76
HA-2	6.166	2.511	0.525	6.25
HA-3	6.196	2.523	0.256	4.36
HA-4	6.146	2.508	0.426	9.32
HA-5	6.118	2.510	0.399	9.82
HA-6	6.182	2.516	0.352	14.03
HA-7	6.158	2.514	0.899	8.25
HA-8	6.163	2.518	0.532	9.35

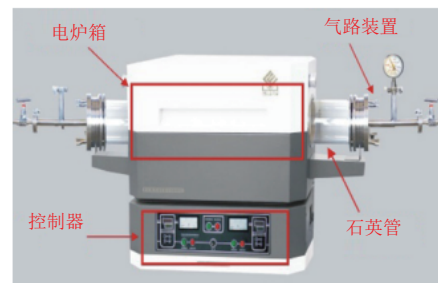


图2 实验用SK-G06123K型气氛管式电热炉  
Fig. 2 SK-G06123K atmosphere tube electric furnace

均值,同理DB-12与HA-12均为平均值。由图3可知,在100℃的热激温度下各地区岩样的渗透率变化不明显,仅是将岩样内部的水相蒸发,缓解了岩样的水相圈闭损害,并未引起岩石内部结构变化。

200℃热激前后岩样平均渗透率变化如图4所示。

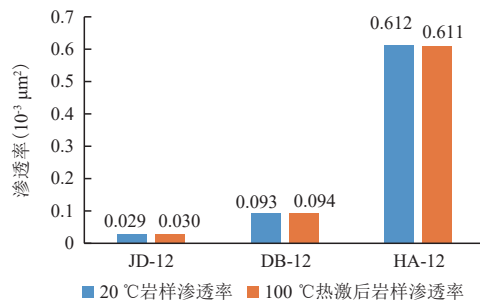


图3 100℃热激前后岩样平均渗透率对比  
Fig. 3 Comparison of average permeability of tight sandstone samples before and after thermal stimulation at 100 °C

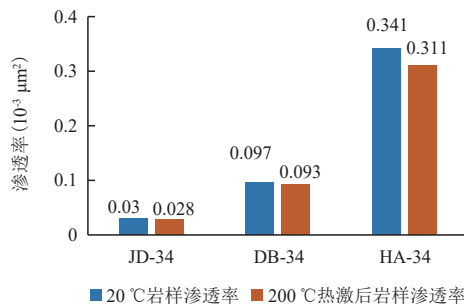


图4 200℃热激前后岩样平均渗透率对比  
Fig. 4 Comparison of average permeability of tight sandstone samples before and after thermal stimulation at 200 °C

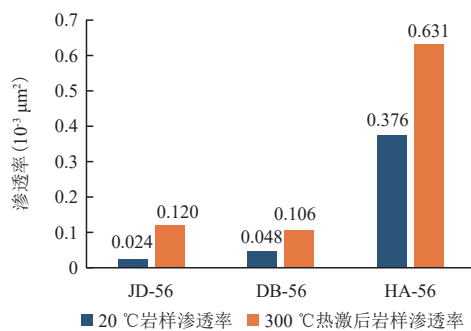


图5 300℃热激前后岩样平均渗透率对比  
Fig. 5 Comparison of average permeability of tight sandstone samples before and after thermal stimulation at 300 °C

示。图4中JD-34渗透率为JD-3与JD-4渗透率的平均值,同理DB-34与HA-34均为平均值。由图4可知,实验岩样在经过200℃的热激后其渗透率对比初始渗透率,不但没有升高反而有所降低。

300℃热激前后岩样平均渗透率变化如图5所示。图5中JD-56渗透率为JD-5与JD-6渗透率的平均值,同理DB-56与HA-56均为平均值。由图5可知,当热激温度来到300℃后,岩样的渗透率变化相较于热激温度为100℃时渗透率明显增大。

400℃热激前后岩样平均渗透率变化如图6所示。图6中JD-78渗透率为JD-7与JD-8渗透率的平均值,同理DB-78与HA-78均为平均值。由图6可知,400℃热激后的岩样平均渗透率增加幅度相比300℃更大,如JD-78、DB-78热激后的渗透率是原本渗透率的数倍,但是也出现了部分岩样的渗透率增幅不明显的现象如HA-78。

## 2.2 RQI值与岩样增渗幅度

单一渗透率或者孔隙度难以对储层的物性特征进行表征,其余可表征储层物性的参数不易获取。因此,综合考虑渗透率以及孔隙度,引入表征储层物性条件的储层品质系数RQI(式2)<sup>[13]</sup>,RQI值越大表明储层岩石孔隙结构越好;RQI值越小表明储层岩石孔隙结构越差,并以此结合岩样热激后渗透率变化来分析岩石是否适合热激增渗改造。

$$RQI = (K\varphi_e^{-1})^{0.5} \quad (2)$$

式中:K为渗透率,10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>;φ<sub>e</sub>为有效孔隙度。

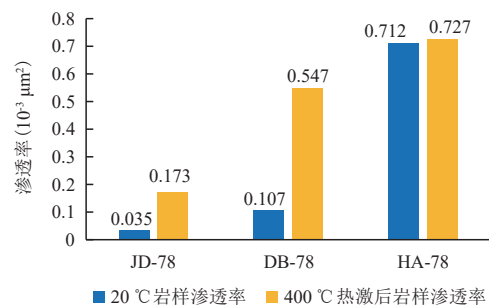


图6 400℃热激前后岩样平均渗透率对比  
Fig. 6 Comparison chart of average permeability of tight sandstone samples before and after thermal stimulation at 400 °C

100 °C与200 °C热激实验后岩样渗透率增大倍数 $I$ 与 $RQI$ 值的关系见图7,300 °C与400 °C热激实验后岩样渗透率增大倍数 $I$ 与 $RQI$ 值的关系见图8。由图7和图8可知,在同一热激温度下,岩样渗透率增大倍数 $I$ 与岩样 $RQI$ 值整体成反比关系,即在同一热激温度下 $RQI$ 值越小,岩样的渗透增大倍数越大,而且部分 $RQI$ 值小的岩样其热激增渗幅度大于 $RQI$ 值大的岩样在更高热激温度下的增渗幅度。

为准确地得出岩样适合热激增渗的 $RQI$ 阈值点,根据热激实验后岩样渗透率增大倍数 $I$ 与 $RQI$ 值的关系图(图7、图8)可知,当 $RQI$ 值大于0.25后,无论热激温度为多少,岩样均未出现有明显的渗透率增大,因此致密砂岩适合热激增渗的 $RQI$ 临界值为0.25。

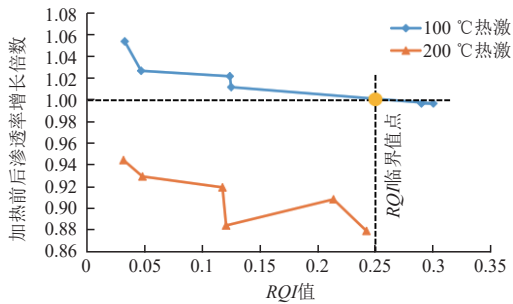


图7 100 °C与200 °C热激后岩样渗透率增大倍数与 $RQI$ 值的关系

Fig. 7 Relation between permeability increase multiple and  $RQI$  value of tight sandstone samples after thermal stimulation at 100 °C and 200 °C

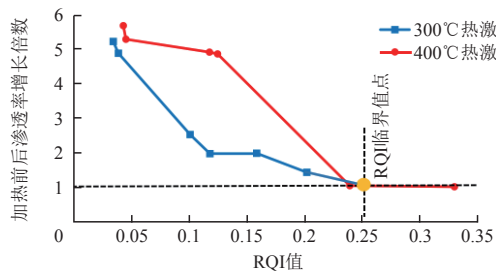


图8 300 °C与400 °C热激后岩样渗透率增大倍数与 $RQI$ 值的关系

Fig. 8 Relation between permeability increase multiple and  $RQI$  value of tight sandstone samples after thermal stimulation at 300 °C and 400 °C

## 3 结果与讨论

### 3.1 热激温度对增渗效果的影响

高温热激致密砂岩时,其内部矿物会发生一系列的物理或者化学变化,如黏土矿物的脱水、膨胀、分解,石英相变产生不同程度的剥落破碎<sup>[14]</sup>,表2根据文献收集归纳了一部分矿物在不同高温下会发生的反应。

实验中,热激温度为100 °C时,岩样的渗透率并无明显变化,其主要原因是100 °C仅能将岩样中的孔隙水加热,黏土矿物等并未发生明显膨胀,岩样内部孔隙结构改变较小,因此,对储层增渗并无明显效果。

热激温度为200 °C时,岩样从20 °C到200 °C的过程经历了部分孔隙水蒸发到部分内部矿物脱水的过程,该过程使得流体通道变得通畅有利于岩石渗透率提升。但是,相关研究发现致密岩石在加热到180 °C后,岩石内部的黏土矿物将由“惰性”黏土矿物转变为“活跃性”黏土矿物,此时黏土矿物由于受热会发生局部膨胀或形变从而堵塞孔隙。例如,细长伊利石在此温度下易折断,导致对岩样中的有效孔隙结构产生了负面影响,使其有效孔隙结构变差导致岩样渗透率降低。所以,工程上对致密砂岩储层热激增渗时应避免储层处于180~200 °C区间范围。

热激温度为300 °C时,吸附水以及层间水已经蒸发脱出,“活跃性”黏土矿物局部膨胀对岩样渗透率的负面影响也随之消失,因为高温和热应力导致岩样内大部分黏土矿物完全脱水膨胀,脱羟基形成了

表2 部分矿物热激后发生的反应  
(数据引自参考文献[15])

Table 2 Reaction of some minerals after thermal stimulation (data quoted from reference[15])

温度(°C)	矿物类型	反应
20~200	钙蒙脱石	脱水
20~200	镁蒙脱石	脱水
300~600	镁伊利石	分解
350~650	高岭石	分解
573	石英	相变

新的矿物此时岩石的脆性程度变大,渗透率明显上升<sup>[16]</sup>。

当热激温度达到400 °C后,黏土矿物的膨胀变得更加彻底<sup>[15]</sup>,石英等矿物开始发生相变,由 $\alpha$ -石英向 $\beta$ -石英的转化,热能很快(约2~5 s)引起硅/氧原子重新排列形成 $\beta$ -石英,体积增大2.7%<sup>[5]</sup>,岩石脆性程度大幅度上升。

岩石内部各种黏土矿物由于各向异性以及热膨胀系数的不同,导致膨胀量以及膨胀方向各不同。此外,在温度达到400 °C后岩石中的部分矿物(如:伊利石以及高岭石)开始逐步分解形成新的矿物,这些新矿物比原有矿物更致密。加上晶格中的结构水也脱出并蒸发,这种各向异性的膨胀加上晶格水的脱出改变了岩石内部的孔隙结构特征,岩石的渗透率也随之发生改变。

综上,高温热激对致密砂岩的影响实质上是按照图9所示进行的。

### 3.2 RQI值对热激增渗幅度的影响

从整体上看岩样的增渗效果随着热激温度的升高而提升,但是不同岩样的增渗幅度在同一热激温度时也有较大的差异。此外,也出现了400 °C热激时部分实验岩样渗透率变化不明显,增渗幅度远小于300 °C热激岩样的现象。实验结果表明:实验岩样的增渗幅度和岩样本身的RQI值呈现很好的单调相关性,RQI越小的岩样在同一热激温度下其增渗幅度越

大,在一定热激温度范围内RQI值对岩样的增渗影响大于热激温度,因为RQI值表征了储层岩石结构性质,RQI值大表明岩石内部可能有两种情况,即孔隙半径相对较大、孔隙连通程度高,这两种情况使得孔隙结构性好,反之RQI值小则表示岩石的孔隙结构相对较差<sup>[13,17]</sup>。

分析认为,在热激温度从20 °C上升至400 °C的过程中(超过200 °C后)会发生较强的水热增压现象,水热增压和储层孤立程度、温度、储层整体孔隙结构三者相关<sup>[18-19]</sup>。一个孤立的系统增压幅度可以由克拉佩龙方程决定:

$$P_s = P_1 e^{cl \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (3)$$

式中: $P_s$ 为含水完全孤立系统加热后的压力,MPa; $P_1$ 为含水完全孤立系统初始压力,MPa; $cl$ 为克拉佩龙常数,此处可取4 760; $T_1$ 为初始温度,K; $T_s$ 为加热后温度,K。

郭志峰等<sup>[20]</sup>研究也表明砂岩孔隙流体的压力和温度具有非常高的相关性,封闭系统内砂岩孔隙流体的压力随温度升高以指数趋势增加<sup>[21-22]</sup>,所以当热激温度处于100~200 °C时结合岩石本身孤立程度低所以水热增压现象不明显,高于200 °C后(岩石内部仍有水)水热增压现象会逐渐增强,产生的高压对岩石内部的结构也会起到改变作用。致密储层经水力压裂改造后孤立程度明显降低,但通过克拉佩龙方程估算,加热至400 °C后水蒸气如果没有及时排出

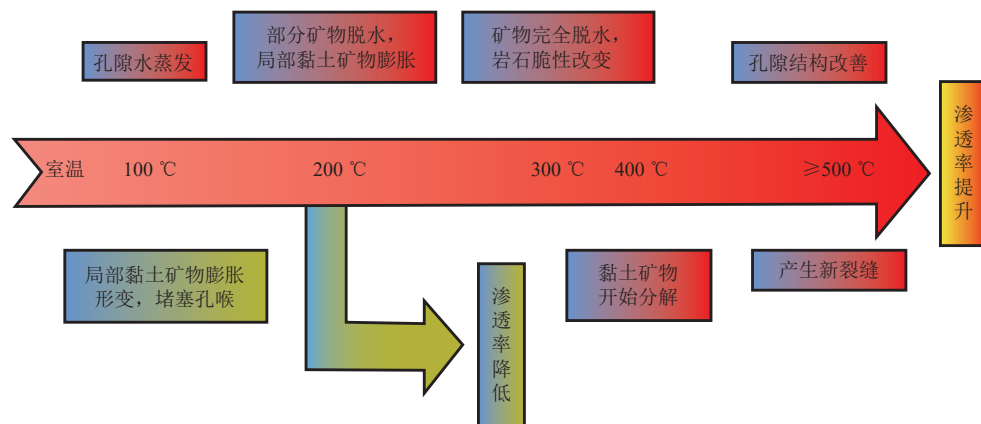


图9 含水致密砂岩高温热激改造过程

Fig. 9 High-temperature thermal stimulation transformation process of tight water-bearing sandstone

任会导致岩石孔隙内部压力上升;此外,致密砂岩储层孔隙水蒸发的过程中水受热增压现象明显高于其他非致密储层,而且水受热增压现象随着岩石的致密性增大而更加显著<sup>[23]</sup>(图10)。结合RQI值分析,RQI值较小的岩石孔隙结构差其孤立程度要大于RQI值较大的岩石,发生水热增压后孔隙连通较差的部分会被压力拓宽孔隙结构得到明显改善;而在RQI较大的岩石中其孔隙结构较好相互之间连接通畅在发生水热增压后易于水蒸气及时排出所以对孔隙结构改善不明显(图11、图12)。

此外,高温还会使得砂岩内部黏土矿物发生各向异性的膨胀和相变,增大岩石脆性,最后产生裂缝增大岩石的渗透率<sup>[24-27]</sup>,若岩样的RQI值很小岩样内部的黏土矿物膨胀和相变很容易改变孔隙结构,拓宽其孔喉半径或者提升连通性孔隙连通性,反映到实验上就是渗透率增加幅度较大,相反如果岩样的RQI值大,孔隙结构性较好那么其热激增渗的可改造性就要弱于RQI值小的岩石。

张龙海等<sup>[10]</sup>研究也表明,RQI值与孔隙结构之间呈单调函数关系,当孔隙结构由于孔隙曲折度增大导致连通性变差或孔喉半径减小而变差时RQI值随之减小;反之RQI值增大。所以,在工程上对致密砂岩储层进行热激解水增渗改造时,首先应当明确储层品质系数RQI。以此对储层进行分选,判断其可改造性的强弱,当RQI值偏大可以通过提升热激温度来达到相应的工程目标。

#### 4 结论

以致密砂岩储层水力压裂增产改造为工程背景,结合储层热处理技术难以推广应用的现状。选取库车凹陷、惠民凹陷、冀东凹陷地区不同物性的致密砂岩岩样进行饱和水热激实验。在考虑渗透率、孔隙度二者综合因素的基础上,首次采用储层品质系数RQI作为表征储层的物性条件,以此判断含水致密砂岩储层是否适用于热处理技术,并对工程上采用储层热处理技术提供指导性建议。最后得出以下结论。

1) 当热激温度为100℃时,仅能缓解水相圈闭

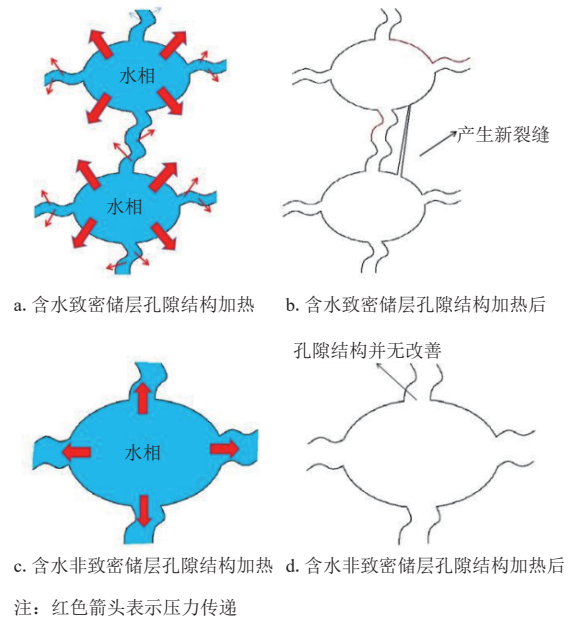


图10 含水致密储层与含水非致密储层孔隙结构热激前后对比

Fig. 10 Comparison of pore structure between water-bearing tight reservoir and water-bearing non-tight reservoir before and after thermal stimulation

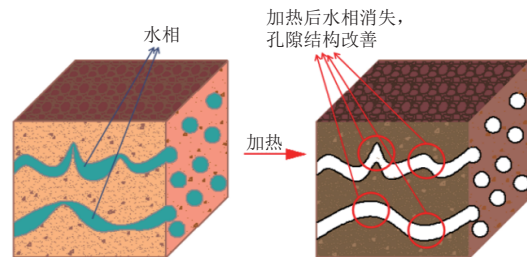


图11 RQI值较小的含水岩样热激前后对比

Fig. 11 Comparison of water-bearing rock samples with small RQI value before and after thermal stimulation

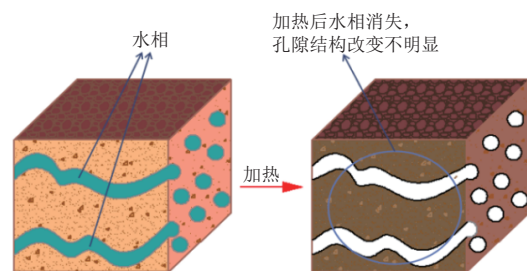


图12 RQI值较大的含水岩样热激前后对比

Fig. 12 Comparison of water-bearing rock samples with large RQI value before and after thermal stimulation

损害,含水致密砂岩储层热激增渗温度须大于250℃。

2) 热激温度大于200℃后,对于储层品质系数相同的含水致密储层热激增渗幅度与热激温度呈单调递增函数关系。

3) 适合热激增渗的含水致密砂岩储层品质系数应小于0.25,在相同的热激温度下岩样增渗幅度与RQI值呈单调递减的函数关系。

#### 参考文献

- [1] 康毅力,罗平亚.中国致密砂岩气藏勘探开发关键工程技术现状与展望[J].石油勘探与开发,2007,34(2):239-245.  
KANG Yili, LUO Pingya. Current status and prospect of key techniques for exploration and production of tight sandstone gas reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 239-245.
- [2] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenge and prospects ( II ) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43 (2): 166-178.
- [3] 游利军,谢本彬,杨建,等.页岩气井压裂液返排对储层裂缝的损害机理[J].天然气工业,2018,38(12):61-69.  
YOU Lijun, XIE Benbin, YANG Jian, et al. Mechanism of fracture damage induced by fracturing fluid flowback in shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3):61-69.
- [4] JAMALUDDIN A K M, HAMELIN M, HARKE K, et al. Field testing of the formation heat treatment process[C]// Paper PETSOC-96-88 presented at the Annual Technical Meeting, Calgary, Alberta, Canada, June 1996.
- [5] JAMALUDDIN A K M, VANDAMME L M, NAZARKOT W, et al. Heat treatment for clay-related near wellbore formation damage[J]. Canadian Petroleum Technology, 1998, 37 (1): 43-62.
- [6] 康毅力,杨东升,游利军,等.富有机质页岩高温热激增渗效果实验评价方法[J].天然气地球科学,2021,32(1):86-97.  
KANG Yili, YANG Dongsheng, YOU Lijun, et al. Experimental evaluation method for permeability changes of organic-rich shales by high-temperature thermal stimulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 86-97.
- [7] 游利军,康毅力.热处理对致密岩石物理性质的影响[J].地球物理学进展,2009,24(5):1850-1854.  
YOU Lijun, KANG Yili. Effects of thermal treatment on physical property of tight rocks[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1850-1854.
- [8] 陈明君,康毅力,游利军.利用高温热处理提高致密储层渗透性[J].天然气地球科学,2013,24(6):1226-1231.  
CHEN Mingjun, KANG Yili, YOU Lijun. Advantages in formation heat treatment to enhance permeability in tight reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1226-1231.
- [9] WANG H C, REZAEI R, SAEEDI A, et al. Numerical modelling of microwave heating treatment for tight gas sand reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 152: 495-504.
- [10] 赵阳升,万志军,张渊,等.岩石热破裂与渗透性相关规律的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1970-1976.  
ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, ZHANG Yuan, et al. Experimental study of related laws of rock thermal cracking and permeability[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1970-1976.
- [11] 邵天琛.高温电加热致密砂岩致裂机理研究[D].成都:西南石油大学,2019.  
SHAO Tianchen. Study on cracking mechanism of dense sandstone by high-temperature electric heating[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [12] 游利军,李鑫磊,康毅力,等.含水富有机质页岩重复升温热激增渗实验[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(1):120-132.  
YOU Lijun, LI Xinlei, KANG Yili, et al. An experimental study on cyclical thermal stimulation to enhance permeability of water-bearing organic-rich shale[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43 (1):120-132.
- [13] 张龙海,刘忠华,周灿灿,等.低孔低渗储集层岩石物理分类方法的讨论[J].石油勘探与开发,2008,35(6):763-768.  
ZHANG Longhai, LIU Zhonghua, ZHOU Cancan, et al. A method for petrophysical classification of low porosity and low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 763-768.
- [14] KEANEY M G, JONES C, MEREDITH P, et al. Thermal damage and the evolution of crack connectivity and permeability in ultra-low permeability rocks[C]// Paper ARMA-04-537 presented at the Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS), Houston, Texas, America, June 2004.
- [15] BARSHAD I. Temperature and heat of reaction calibration of the thermal apparatus[J]. American Mineralogist 1952, 37(2): 667-694.
- [16] ROSS C M, RANGEL E R, CASTANIER L M, et al. A laboratory investigation of temperature-induced sand consolidation[J]. SPE Journal, 2006, 11(2): 206-215.
- [17] CHOPRA A K, STEIN M H, ADER J C. Development of reservoir descriptions to aid in design of EOR projects[J]. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(2): 143-150.
- [18] 刘震,曾宪斌,张万选.沉积盆地地温与地层压力关系研究[J].地质学报,1997,71(2):180-185.  
LIU Zhen, ZENG Xianbin, ZHANG Wanxuan. Study on the relationship between geothermal and formation pressure in

- sedimentary basins[J]. *Journal of Geology*, 1997, 71 (2): 180-185
- [19] 刘震,孙迪,李淮莲,等.沉积盆地地层孔隙动力学研究进展[J].石油学报,2016,37(10):1193-1215.  
LIU Zhen, SUN Di, LI Weilian, et al. Advances in research on stratigraphic porodynamics of sedimentary basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1193-1215.
- [20] 郭志峰,刘震,刘鹏,等.高温水热增压实验研究及地质启示[J].石油实验地质,2016,38(6):836-841.  
GUO Zhifeng, LIU Zhen, LIU Peng, et al. Experimental analysis of aquathermal pressuring under high temperature conditions and its geological implications[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(6): 836-841.
- [21] 夏新宇,宋岩.沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响[J].石油勘探与开发,2001,28(3):8-11.  
XIA Xinyu, SONG Yan. Temperature effects on geopressure during deposition and erosion[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(3): 8-11.
- [22] 赵国欣.烃源岩层中异常高压研究:以渤海湾盆地东营凹陷古近系为例[J].石油实验地质,2008,30(4):340-344.  
ZHAO Guoxin. Study of the abnormal high-pressure in hydrocarbon source rocks-taking Paleogene in the Dongying sag, the Bohai bay basin as an example[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(4): 340-344.
- [23] KENNEDY G C, HOLSER W T. Pressure-volume-temperature and phase relations of water and carbon dioxide[M]// GSA Memoirs, 1966, 97: 371-383.
- [24] 孟巧荣,康志勤,赵阳升,等.油页岩热破裂及起裂机制试验[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):89-92.  
MENG Qiaorong, KANG Zhiqin, ZHAO Yangsheng, et al. Experiment of thermal cracking and crack initiation mechanism of oil shale[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(4): 89-92.
- [25] 陈颀,吴晓东,张福勤.岩石热开裂的实验研究[J].科学通报,1999,4(8):880-883.  
CHEN Yu, WU Xiaodong, ZHANG Fuqin. Experimental study on rock thermal cracking[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 4(8): 880-883.
- [26] 郑见超,李斌,刘羿伶,等.塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组烃源岩热演化模拟分析[J].油气藏评价与开发,2018,8(6):7-12.  
ZHENG Jianchao, LI Bin, LIU Liling, et al. Study on thermal evolution modeling of lower Cambrian Yuertusi source rock, Tarim Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2018, 8(6): 7-12.
- [27] 左建平,谢和平,周宏伟,等.不同温度作用下砂岩热开裂的实验研究[J].地球物理学学报,2007,50(4):1150-1155.  
ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei, et al. Experimental research on thermal cracking of sandstone under different temperature[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(4): 1150-1155.

(编辑 徐佩)

(上接第319页)

- formation prediction with a steady azimuth AVO gradient unconstrained inversion method[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014, 53(6): 683-691.
- [26] 朱兆林,赵爱国.裂缝介质的纵波方位 AVO 反演研究[J].石油物探,2005,44(5):499-503.  
ZHU Zhaolin, ZHAO Aiguo. Research on P-wave azimuth AVO inversion of fracture characterization[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2005, 44(5): 499-503.
- [27] 肖鹏飞,王世星,曲寿利,等.倾角对裂缝密度反演的影响分析[J].石油物探,2009,48(6):544-551.  
XIAO Pengfei, WANG Shixing, QU Shouli, et al. Analysis of the influence of dip angle on inversion of fracture density[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2009, 48(6): 544-551.
- [28] 陈怀震.基于岩石物理的裂缝型储层叠前地震反演方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.  
CHEN Huaizhen. Study on methodology of pre-stack seismic inversion for fractured reservoirs based on rock physics[D]. Qingdao: China university of petroleum, 2015.
- [29] 撒利明,姚逢昌,狄帮让,等.缝洞型储层地震识别理论与方法[M].北京:石油工业出版社,2010.  
SA Liming, YAO Fengchang, DI Bangrang, et al. Theory and method of seismic identification of fracture-cavity reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [30] 张广智,杜炳毅,李海山,等.页岩气储层纵横波叠前联合反演方法[J].地球物理学报,2014,57(12):4141-4149.  
ZHANG Guangzhi, DU Bingyi, LI Haishan, et al. The method of joint pre-stack inversion of PP and P-SV waves in shale gas reservoirs[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 4141-4149.
- [31] TSVANKIN I, GRECHKA V. Seismology of azimuthally anisotropic media and seismic fracture characterization[M]. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2011.
- [32] FATTI J L, VAIL P, SMITH G C, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. *Geophysics*, 1994, 59(9): 1362-1376.
- [33] SCHOENBERG M, PROTAZIO J. 'Zoeppritz' rationalized and generalized to anisotropy[J]. *Seismic Exploration*, 1992, 1: 125-144.

(编辑 徐佩)