

# 高温高压井射孔工艺技术

侯明明, 黄刚, 张晓东

中国石油集团长城钻探工程有限公司测试公司 北京 100101

通讯作者: Email: houmingming@cnlc.cn

引用: 侯明明, 黄刚, 张晓东. 高温高压井射孔工艺技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(3): 14-20.

Cite: HOU Mingming, HUANG Gang, ZHANG Xiaodong. Perforation technology for high-temperature and high-pressure wells [J]. Well Testing, 2019, 28(3): 14-20.

**摘要** 高温高压井射孔作业风险远高于常规的射孔作业, 为保证射孔作业在复杂井筒和地层条件下一次性成功, 从射孔器材和火工品的选择, 减震器和筛管的选用, 射孔枪通过能力, 起爆方式和施工工艺方面进行探讨, 提出射孔器材选择时应考虑抗压强度, 密封件的密封性能, 射孔枪井筒通过能力; 火工品应考虑耐温性, 射孔弹还需考虑穿深和孔径, 确保地层和井底压差可控; 减震器应考虑减震效果, 抗拉强度和过流面积; 筛管应考虑抗拉强度和过流面积; 造负压适宜选择延时起爆方式; 起爆压力设置与负压值相近, 避免因补泄压时间过长导致造负压失败, 同时也便于监听仪监测射孔后效。经3口井现场应用, 综合考虑上述因素后, 射孔成功率100%。该方法对指导高温高压井现场射孔作业具有重要的参考价值。

**关键词** 高温高压井; 火工品; 射孔; 穿深; 负压差; 密封性; 射孔成功率

中图分类号: TE257 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.03.003

## Perforation technology for high-temperature and high-pressure wells

HOU Mingming, HUANG Gang, ZHANG Xiaodong

Well Test Company, CNPC Greatwall Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300452, China

**Abstract:** The risk of perforating operation in high-temperature and high-pressure wells is much higher than that in conventional wells. In order to ensure the success of perforating operations in complex wellbore and formation conditions, the selection of perforating equipment and initiating explosive device, the use of shock absorber and screen tube, the passing capacity of perforating gun, initiation mode and construction technology were all studied in this paper and the following conclusions have been obtained: the perforating equipment should be selected in consideration of compressive strength, sealing performance of the seal and passing capacity of perforating gun; temperature resistance should be considered for pyrotechnics while, penetration depth and aperture should be considered for perforating bullets to ensure that the pressure difference between formation and bottom-hole can be controlled; for shock absorbers, the shock absorption, tensile strength and flow area should be considered; for the screen tube the tensile strength and the flow area should be considered. In addition, it was suitable to select the delayed detonation method when creating negative pressure. The detonation pressure should be set close to the negative pressure value, so as to avoid the failure of the negative pressure caused by the excessive pressure relief time, and facilitate the monitor the perforation effect. After considering the above factors comprehensively, this perforating method was applied in 3 wells, and the success rate of perforation was 100%. This method has important reference value for guiding on-site perforating operation in high-temperature and high-pressure wells.

**Keywords:** high-temperature and high-pressure wells; pyrotechnics; perforation; penetration depth; negative pressure difference; sealing; perforation success rate

随着石油勘探开发的不断深入, 越来越深的油气藏被发现, 但其普遍具有高温高压的特点。对于高温高压井射孔作业, 即要保证射孔枪入井密封性和火工品的安全性<sup>[1-2]</sup>, 又要保证射孔枪能顺利的下到预定深度, 确保选择的操作压力和负压值在起爆时射孔枪承压强度满足要求, 射孔管柱上工具满足抗拉强度, 射孔枪和套管不被挤毁<sup>[3]</sup>, 而且不能

因重泥浆沉淀影响起爆精度、地层出砂造成射孔管柱无法起出等问题, 最后还需射孔弹的穿深<sup>[4]</sup>和孔径满足测试要求, 不应因射孔效果和管柱内节流影响测试质量。陈光智等<sup>[5]</sup>针对高温高压井的射孔作业问题, 仅仅从射孔器材和火工品方面予以考虑, 没有进行全面系统的分析和总结。杨子等<sup>[6]</sup>针对射孔负压差的问题, 采用经验公式计算方法, 得

出了理论上的最佳负压差,未考虑负压差与实际操作压力值之间的差值。姚志中等<sup>[7]</sup>针对高温高压井的射孔作业,采用的正压射孔,不具有普遍性。正压射孔会严重污染地层,射孔碎屑会残留在射孔孔道内,对孔道周围地层有压实作业,增大井筒周围油气的流动阻力。一般深井储层本身孔隙度不太高,选择正压射孔从射孔质量而言是不太合适的;同时针对地层出砂造成管柱砂埋的问题<sup>[8]</sup>,探井作业中未提及应急方案,如果砂埋造成射孔测试管柱无法起出,会危及井筒安全。本文结合前人的研究成果,采用理论和工艺相结合的方法,对高温高压井的射孔作业进行了系统的研究,从射孔影响因素和射孔质量方面等全面考虑,得出除了考虑火工品和射孔器材的选择外,射孔枪通过能力,减震器和筛管的选用、起爆方式和施工工艺等也应进行综合考虑,确保射孔作业的成功率和高质量。

## 1 理论设计

针对高温高压井射孔作业,理论研究主要包括射孔器材<sup>[9]</sup>和火工品选型,以及密封件的选择,射孔枪通过能力,筛管和减震器的选用,抗拉强度和井口操作压力的设计等。

### 1.1 射孔器材和火工品选型

高温高压井是指井底温度高于 149 °C,或地层压力达到 103.4 MPa,或井口压力达到 68.9 MPa 的井<sup>[10]</sup>。针对高温高压井,射孔器材和火工品的选型非常重要,选择的射孔枪和起爆器的额定承压值必须大于井筒最大压力值,选择的火工品的最大许可停留时间必须大于预估的井底停留时间。如图 1 所示,当井温超过 160 °C,射孔枪在井底停留需在 48 h 以上时,只能选择 HNS 型的火工品,其在井底停留时间能超过 200 h 以上;RDX 和 HMX 型火工品均不可用<sup>[11]</sup>。

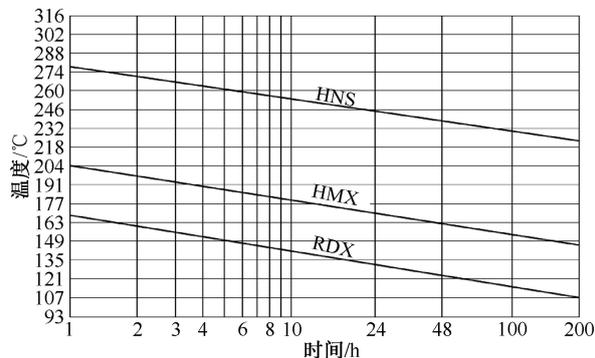


图 1 火工品耐温曲线

Fig.1 Temperature resistance curve of pyrotechnics

选定射孔枪的尺寸后,配备的射孔弹<sup>[12]</sup>越大越好,越大装药量越多,其穿深和弹孔越大。因为高密度压井液会使地层污染半径变大,穿深越大越容易穿透地层污染带,越利于地层流体进入井筒;射孔弹弹密高,流通通道多,过流面积更大,越利于地层流体进入井筒;同时,为保护地层不被二次污染,且防止地层出砂,高温高压井常采用负压射孔方式<sup>[13]</sup>,这些措施对测试资料的好坏也起着重要的作用。

### 1.2 密封件选择

与射孔有关的任何密封件耐温都应满足设计温度。例如密封脂,胶带和密封圈等。密封脂不能承受高温将无法起到密封和润滑的作用,可能会污染火工品,造成火工品失效<sup>[14]</sup>;缠绕固定导爆索的胶带无法耐高温,入井后将会熔化,堵塞枪接头的孔隙或侵入传爆管部位造成枪体内部憋压或者断爆,枪体内部憋压在起枪时会对人员造成高压伤害,严重时会使枪体变形导致射孔枪在井底遇卡;密封圈不耐高温,将无法承受高压,进而造成失封,导致射孔枪进水而受潮,使射孔枪无法起爆。不同材质的密封圈耐温和耐压强度见表 1。

表 1 给出的耐温和承压指标是常规情况下的数值<sup>[14]</sup>,不同厂家实际会有区别。因此,选择密封件时需要跟厂家详细核实密封件参数。对井温超过 165 °C,射孔枪在井底需停留 2~3 d 及以上的情况下,性价比和安全性最好的密封件是氟橡胶 (Viton),其耐温最高达到 204 °C,在使用支撑环<sup>[15]</sup>的情况下,承压能够达到 138 MPa。

表 1 密封件耐温耐压性能

Table 1 Temperature and pressure resistance of seals

名称	Nitrile	HNBR	Viton	Aflas
应用条件	耐温/°C			
最低温度	-40	-40	-23	38
最高温度(≤24 h)	204	204	260	260
最高温度(≤24~504 h)	177	177	204	204
所在温度/°C	无支撑环时的承压能力/MPa			
204	55	55	34	NA
176	69	69	48	NA
135	103	103	69	34
65	138	138	103	55
所在温度/°C	含 6.35 mm 厚支撑环时的承压能力/MPa			
260	NA	NA	69	69
232	NA	NA	124	124
204	138	138	138	138
176	138	138	138	138
135	138	138	138	138
65	138	138	138	138

### 1.3 射孔枪许可下入长度

如果是斜井,需要考虑狗腿度,确保设计长度的射孔枪串能够下入预定深度,而不会发生遇卡。由于射孔枪具有一定的柔性,用普通的刚性公式计算不一定准确。因此,对于重点井,建议先下入一趟测试射孔模拟管串,详细获取地层温度和通过性等信息,或者参考相关类似井作为参考。也可以根据刚性工具最大许可通过长度公式来预测,即

$$R_i = \frac{30 \times 180}{G_i \times \pi} \quad (1)$$

$$L = 2 \times \sqrt{(R + D/2)^2 - (R - D/2 + d)^2} \quad (2)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  段曲率半径, m;  $G_i$  为第  $i$  段全角变化率(狗腿度),  $(^\circ)/30$  m;  $R$  为井身曲率半径, m;  $D$  为曲率半径  $R$  处的套管内径, m;  $d$  为井下工具串最大刚性外径, m;  $L$  为井下工具串最大许可通过长度, m。

### 1.4 减震器

为防止射孔枪起爆瞬间震动太大造成封隔器解封和压力计损坏,可采用纵向减震器或延长封隔器下部油管来降低纵向震动。纵向减震器结构如图2所示。

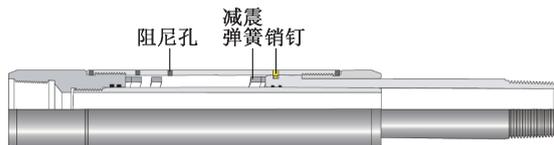


图2 纵向减震器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the longitudinal shock absorber

使用减震器时,一定要按照说明书操作,如川南的纵向减震器会有阻尼孔,如果射孔段长,阻尼孔必须打开的足够多;使用油管虽然能起到减震作用,但可能会影响管柱校深的精度和增加后期压井的难度。

### 1.5 筛管

对于高温高压井一般建议在起爆器上部使用筛管。使用筛管的目的有以下几点:(1)如果射孔前泥浆发生沉淀,可以采用循环的方式替泥浆,清洗点火头;(2)筛管的存在便于压井;(3)管柱便于下入,尤其是带封隔器的管柱还可减少抽汲。点火头上部筛管一般不建议使用割缝筛管,因为一旦发生泥浆沉淀,通道会被堵死,油气流无法进入井筒。如果考虑求产或者防砂,或者在封隔器以下其他部位再安装一个筛管。

不同尺寸的筛管,过流面积是不一样的,抗拉强度也不一样,需根据管柱设计来合理选择。表2列出了73 mm筛管不同壁厚和长度条件下的过流

面积和抗拉强度。

表2 73 mm普通筛管的性能参数

Table 2 Performance parameters of 73 mm ordinary sieve

壁厚/ mm	长度/ mm	开孔个数	开孔面积/ mm <sup>2</sup>	过流面积/ mm <sup>2</sup>	抗拉强度/ kN
5.51	500	8	2 510	3 017	501
	1 000	8	2 510		
	1 500	16	5 020		
	2 000	24	7 530		
7.01	3 000	40	12 560	2 732	620
	500	8	2 510		
	1 000	8	2 510		
	1 500	16	5 020		
	2 000	24	7 530		
	3 000	40	12 560		

### 1.6 抗拉强度

射孔时对管柱的冲击力会很大,尤其当储层厚、枪串长时,封隔器以下管柱受到的抗拉、抗压强度会很大<sup>[16]</sup>。因此,一定要确认好井下工具的强度,强度过低存在拉断的风险。当使用拉断式安全接头或丢枪装置<sup>[17]</sup>时,更需注意,确认销钉强度,以防疲劳断裂或中途剪断。图3为拉断式安全接头,通过销钉设置拉断值,通过中间接头传递扭矩,一旦射孔测试后,砂埋造成管柱遇卡,通过上提管柱至销钉剪切力拉断销钉。然后,从此处丢手即可起出上部管柱。图4为投球丢枪装置,一旦发生遇卡或需要丢枪时,通过投球打压剪断销钉即可实现丢手。

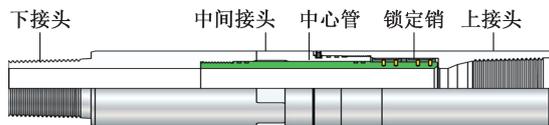


图3 拉断式安全接头结构示意图

Fig.3 Structure schematic diagram of pull-off safety joint

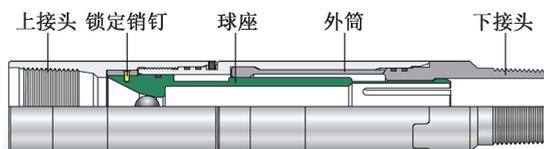


图4 投球丢枪装置结构示意图

Fig.4 Structure schematic diagram of injection ball and releasing gun

### 1.7 起爆压力

在设计起爆压力时,应考虑套管和井筒的承压能力,充分考虑测试液密度、井斜、泥浆沉淀,以及温度等的影响,井底最大压力值不能超过井筒自身的承压能力,测试液密度必须准确。上述参数存在

细微的差别产生的操作误差会达几兆帕。其中,泥浆不能发生沉淀,同时传压性能必须良好;由于井温高,且当温度超过 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后,销钉的剪切值随温度的衰减会很大,必须考虑温度对销钉值的影响。

起爆压力过低,存在下枪途中起爆的风险。起爆压力过高,可能泵车无法满足,或者超过井筒和地层承压能力,以及射孔枪的额定工作压力值。因此,起爆压力设计必须合理。

## 2 施工工艺风险分析

除了理论设计,还要对具体施工工艺进行规划和研究,防止因施工问题而造成射孔作业失败。

### 2.1 沉淀风险

由于是高温高压井,考虑出砂<sup>[18]</sup>和套损等因素,一般射孔时的泥浆比重都比较大。如果泥浆抗高温性能不好,并且在井筒停留时间过长,很容易产生泥浆沉淀,会造成传压性能降低或无法传压。同时,影响地层流体进入管柱。传压性能不好会导致射孔时需要起爆的井口压力远远大于设计压力,可能造成实际起爆压力远大于井筒或工具承压能力。因此,必须开展泥浆性能试验,使之符合作业要求。否则,只能在下入过程中不时的循环,避免沉淀堆积太多,或采用双延时压力点火头设计,设计近似的起爆压力,做到双保险。

### 2.2 井控风险

在起下射孔枪作业中,尤其含硫化氢的油气井,一旦发生井控事故,带来的危害不言而喻。提前准备好防喷单根,并将其放置在可以快速提上钻台的地方,防喷单根下端应可以直接连接射孔枪,上部可以直接连接油管或钻杆。加强泥浆罐观察,并连续灌液,确保井筒液位一直在井口。

### 2.3 射孔井口操作压力

考虑到延时火药的延时时间有限,地面打压、放压和倒阀门会耽误时间,如果不能在射孔枪起爆前将压力泄放或打压至设定压力,将无法精准造负压。因此,设计井口操作压力时,应尽量接近或等于所造负压时井口压力值<sup>[19]</sup>;同时,打压时应平稳快速,要求在起爆前完成加泄压等一切工作,便于射孔监测。

一般高压起爆器会配备大小剪切销钉,目的就是减小操作误差。因此,大小销钉都必须使用,同时设计时应充分安全压力值,最小操作压力必须大于厂家要求的安全值。

### 2.4 误起爆风险

考虑套管和射孔枪抗压性能,射孔枪井口最小起爆压力都会不高,一般井口打压 $10\sim 15\text{ MPa}$ 就可能起爆射孔枪。因此,射孔前任何井口压力作业都必须被监控。下管柱期间严禁带压作业,封隔器试压应严格控制试压值,不能超过射孔枪最小起爆压力,检测管柱井口压力;同时,管柱设计要合理。管柱起爆部位形成圈闭压力,导致射孔枪误起爆<sup>[20]</sup>。

### 2.5 射孔监测

对于高温高压的深井和超深井,地面无法直观感受震动或声音,需借助射孔监测仪。如Owen公司生产的数字声波检测仪,其取样频率达到 $44.1\text{ kHz}$ ,即 $22\text{ }\mu\text{s}$ 监测一次,声幅频率范围在 $100\sim 18\text{ }000\text{ Hz}$ ,完全满足射孔监测要求,但其对安装位置有要求。通过现场试验对比,越靠近生产套管或与生产套管紧密连接的部位监测效果最好。如油管四通两端的节流管汇,而不是采油树本体,同时应在井口安装压力传感器,辅助检测射孔情况。

## 3 应用情况

以某口高温高压井S-11井为例,测试层段为灰岩储层,井身结构和测试射孔管柱如图5和图6所示。

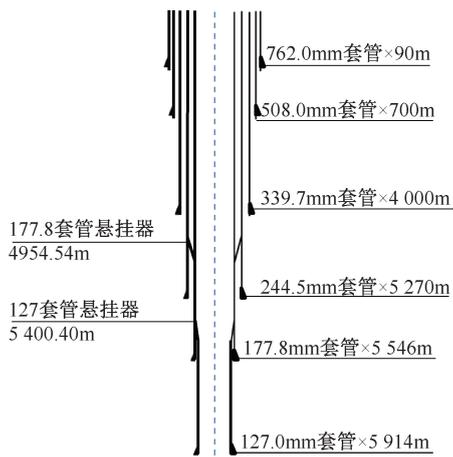


图5 井身结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the well structure

该井井温达 $169\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,井底压力 $110.78\text{ MPa}$ 。钻井时,泥浆比重 $2.19\text{ g/cm}^3$ ,射孔井段 $5\text{ }798.0\sim 5\text{ }824.0\text{ m}$ ,尾管外径 $127\text{ mm}$ 、内径 $101.6\text{ mm}$ ,抗内压 $138.1\text{ MPa}$ ,封隔器上部油管尺寸为 $89\text{ mm}$ 、下部 $73\text{ mm}$ ,测试液(泥浆)密度为 $1.76\text{ g/cm}^3$ ,地面泥浆性能试验不够良好,在高温下容易发生沉淀。

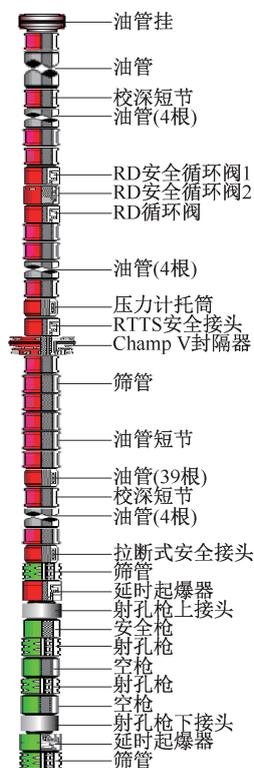


图6 测试射孔管柱结构示意图

Fig. 6 Structure schematic diagram of test perforating string

射孔作业前井筒清水试压 69 MPa 合格,射孔负压差要求 9.72 MPa。考虑延时火药的延时时间,如需放压,在延时时间内井口压力难以精准放压

到设计造负压的井口压力值。如果起爆瞬间还在放压,产生的噪音会影响射孔监测仪的监听,数采监测系统也无法通过压力变化判断是否起爆。

经理论设计,该井最终选择 HNS 火工品,弹密 20 孔/m 的射孔弹,其弹孔 8.5 mm,穿深 35 cm;选择承压能力 144 MPa 的 79 mm 射孔枪;选择耐温 188 ℃ 的进口密封脂;选择耐高温胶带来固定导爆索;选择耐温 203 ℃,承压超过 117 MPa 的 Viton-90 型密封圈;采用射孔枪上下双延时点火头设计,该井射孔枪串达 40 m。为了验证射孔枪通过能力,先下入一趟模拟管柱,验证通过能力、起爆压力可靠性和射孔枪的密封性能,最终均符合设计要求。由于该井是射孔在 127 mm 尾管上,封隔器坐封在 177.8 mm 套管上,射孔枪与封隔器距离超过 400 m,102 mm 减震器无法通过 127 mm 尾管,最终没有下入。为了保证筛管过流面积大于油管内径(73 mm 内部截面积为 3 018.0 mm<sup>2</sup>),最终选择 2 m 长、孔径为 2 cm 的 73 mm 筛管,其过流面积为 7 530.0 mm<sup>2</sup>,同时其抗拉强度达到 50 t,满足设计要求。为了便于检测射孔后效和射孔作业安全,将起爆器最小起爆压力值设计在安全值 14 MPa 以上,井口实际操作值选择和井口负压设计值一致,省去了打压后的加泄压作业。射孔期间套管和射孔枪承受的最大压力见表 3。可见,其承受的最大压力均小于其最大承压能力;射孔操作压力和负压井口稳压值一致(表 4)。

表3 S-11 井射孔作业井口操作压力计算表

Table 3 Operating pressure calculation table of wellhead during perforating operation for Well S-11

井口操作压力/ MPa		测井 井温/ ℃	销钉数量		最小起 爆压力/ MPa	测试液 密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	起爆器 深度/ m	静液柱 压力/ MPa	最大井 底压力/ MPa	射孔枪 承压/ MPa	套管 类型/ mm	清水 试压/ MPa	承压余量/MPa	
点火头 理论值	实际 操作值		大销钉	小销钉									套管	射孔枪
25.17	28.5	168.4	12	4	16.3	1.20	5 785.76	68.11	96.61	144.79	127	125.70	29.09	48.18
25.79		169.2	12	4	16.8	1.20	5 844.36	68.80	97.30	144.79		126.27	28.97	47.49

表4 S-11 井射孔作业参数控制表

Table 4 Control table of perforation operating parameters for Well S-11

井号	点火方式	射孔操作压力/ MPa	设计射孔负 压差/MPa	最大许可负压 差/MPa	射孔时井口最小 许可压力/MPa	最大实现诱喷压 差/MPa	射孔时井口压力 设计值/MPa
S-11	内加压延时起爆	28.54	9.72	21.36	16.90	38.26	28.54

打压延时 330 s 后,井口压力由 28.5 MPa 骤降为 13.5 MPa,说明射孔成功。表 5 是 3 口井的射孔效果评价。图 7 给出了射孔瞬间压降显示。S-11 井由于受尾管尺寸、地层污染和井温的限制,无法选择穿深效果更好、装药量大的射孔弹。选择穿深效果一般、

装药量小的 HNS 型耐高温射孔弹,造成射孔效果不佳,射孔后压力恢复慢。S-13 井和 S-18 井由于在 177.8 mm 套管射孔,井温只有 150 ℃ 多,选择穿深效果相对好、装药量大的 HMX 射孔弹和 114 射孔枪,最终射孔效果良好,井口恢复压力和预测压力一致。

表 5 射孔效果对比表  
Table 5 Comparisons of perforation effects

井号	射孔弹类型	穿深/ cm	套管 尺寸/ mm	井口操 作压力/ MPa	射孔后井口 恢复压力/ MPa	预测井口 压力/ MPa	一次性 起爆	效果评价
S-11	SDP-3125-511NT4	50	127.0	28.5	8.2	38.2	是	该井地层污染严重,同时套管尺寸较小,导致无法选用大的射孔弹,造成无法完全解除井筒周围的污染,造成射孔效果不佳
S-13	TAG-4500-411	100	177.8	27.4	33.5	33.61	是	预测压力和实际恢复压力相近,说明井筒周围的污染几乎全部解除,射孔效果良好
S-18	TAG-4500-411	100	177.8	26.7	33.0	33.02	是	预测压力和实际恢复压力相近,说明井筒周围的污染几乎全部解除,射孔效果良好

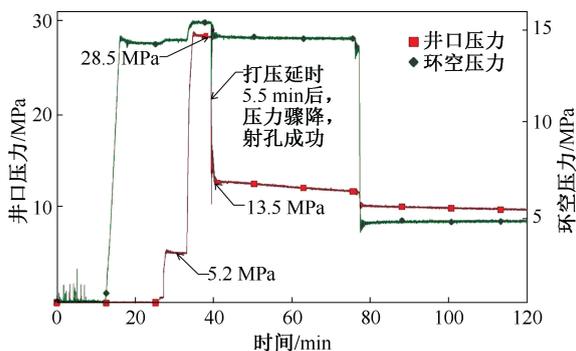


图 7 射孔瞬间压降显示图

Fig.7 Pressure drop display at the moment of perforation

## 4 结论

(1) 高温高压井射孔作业不仅要考虑火工品和射孔器材的选择,还应考虑射孔枪通过能力,合理选择减震器和筛管、起爆方式的设计,施工工艺的便利性和安全性等。

(2) 对于狗腿度大的斜井,必须考虑射孔枪的最大许可长度,否则可能射孔枪无法下到预定深度,如果不能确定是否能通过,建议最好下入一趟模拟管柱。

(3) 起爆压力的设计应考虑泥浆沉淀、激动压力、井斜、井筒和射孔枪的承压能力,以及射孔负压差,确保射孔时压力传导正常,精确起爆,地层不会严重出砂;对于可能出砂的储层,设计时应考虑采用丢枪装置,防止管柱出现砂埋。

(4) 从工艺技术方面对可能影响高温高压井射孔作业的各个影响因素进行定性分析,并提出解决方案,适用于指导现场的射孔作业,具有重要的参考价值。

致谢:在论文撰写过程中,单位领导和同事对论文内容提出了建设性意见,并提供相关现场资料,在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] 李明飞, 窦益华, 曹银萍, 等. 重复射孔套管抗外挤强度分析[J]. 测井技术, 2018, 42(5): 587-592.  
LI Mingfei, DOU Yihua, CAO Yiping, et al. Collapse resistance analysis on repeated perforation casing [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 587-592.
- [2] 戚斌, 龙岗, 熊昕东. 高温高压气井完井技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 78-90
- [3] 李明飞, 徐绯, 窦益华. 再生老井二次射孔和三次射孔套管强度安全性评价[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 453-459.  
LI Mingfei, XU Fei, DOU Yihua. Safety evaluation on the casing strength of reactivated old wells after secondary and tertiary perforation [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(4): 453-459.
- [4] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 83-98
- [5] 陈光智, 贺秋云, 赵益秋. 高温高压高产气井测试技术在双探 1 井的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 31-33.  
CHEN Guangzhi, HE Qiuyun, ZHAO Yiqiu. Application of HTHP and high production test technology in Shuangtan Well 1 [J]. Drilling and Production Technology, 2016, 39(3): 31-33.
- [6] 杨子, 陈光峰, 盛廷强, 等. 负压射孔方式在海上油田探井测试中的应用与改进[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 109-112.  
YANG Zi, CHEN Guangfeng, SHENG Tingqiang, et al. Application and improvement of negative pressure perforation method in exploratory well of offshore oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 109-112.
- [7] 姚志中, 赵开良, 焦建国, 等. 高温高压井射孔工艺技术在元坝×井的应用[J]. 测井技术, 2013, 37(1): 114-117.  
YAO Zhizhong, ZHAO Kai liang, JIAO Jianguo, et al. Application of perforating technique for high temperature and pressure well to Yuanba × Well [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(1): 114-117.
- [8] 黄显辉, 窦益华, 许爱荣, 等. 高温高压深井射孔卡枪原

- 因分析及对策[J]. 石油机械, 2008, 36(9): 182-184.
- HUANG Xianhui, DOU Yihua, XU Airong, et al. Reason analysis and measures of perforation gun sticking in ultra deep, high temperature and high pressure well [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(9): 182-184.
- [9] 王赞. 射孔器材检验理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 37-104
- [10] 陈建波, 唐凯, 陈华彬, 等. 高温高压井射孔自动进液管柱及现场实践[J]. 测井技术, 2017, 41(2): 247-252.
- CHEN Jianbo, TANG Kai, CHEN Huabin, et al. HTHP perforation auto-liquid inlet tubular column and field practice [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(2): 247-252.
- [11] 李艳飞, 葛俊瑞, 李三喜, 等. 海上超深大位移大斜度井射孔技术研究与应用[J]. 海洋石油, 2018, 38(2): 72-76.
- LI Yanfei, GE Junrui, LI Sanxi, et al. Study and application on perforation technology for extended-reach and high-inclination well in offshore field [J]. Offshore Oil, 2018, 38(2): 72-76.
- [12] 王喜, 李尚杰, 马英文, 等. 不同强度致密砂岩对射孔弹穿深的影响[J]. 测井技术, 2018, 42(5): 602-606.
- WANG Xi, LI Shangjie, MA Yingwen, et al. Influence of tight sandstone with different strength on the performance depth of perforating bullet [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 602-606.
- [13] 何汉平, 吴俊霞, 黄健林, 等. 伊朗雅达油田完井工艺[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(4): 26-30.
- HE Hanping, WU Junxia, Huang Jianlin, et al. Well completion technique in Yada field in IRAN [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(4): 26-30.
- [14] 王树申. 射孔—测试联作施工射孔关键质量控制节点分析[J]. 油气井测试, 2016, 25(5): 52-54.
- WANG Shushen. Key perforating quality control node analysis in TCP-DST operation [J]. Well Testing, 2016, 25(5): 52-54.
- [15] 陈华彬, 杨向同, 陈建波, 等. 多重叠套管射孔性能试验与现场应用[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(4): 64-67.
- CHEN Huabin, YANG Xiangtong, CHEN Jianbo, et al. Experiment and field application of multi-layer casing perforation performance [J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(4): 64-67
- [16] 于秋来. 基于哈根-泊肃叶流的 TCP 管柱下放压力场分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 7-12.
- YU Qiulai. Pressure field analysis of setting downing the TCP string based on Hagen Poiseuille flow [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 7-12.
- [17] 赵金龙. 油管输送射孔井下封井技术研究[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 46-51.
- ZHAO Jinlong. Research on well sealing technology of tubing conveyed perforating [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 46-51.
- [18] 王润涛. 防砂增产射孔在大庆外围稠油油藏的设计与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 46-48.
- WANG Runtao. Design and application of the anti-sand production perforation in the thick oil reservoir outside Daqing [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 46-48.
- [19] 邱金平, 张明友, 才博, 等. 超深高温高压含硫化氢气藏高效试油技术新进展[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 49-50, 94.
- QIU Jinping, ZHANG Mingyou, CAI Bo, et al. Efficient testing technology progress of ultra deep, high temperature and high pressure gas reservoir with hydrogen sulfide gas [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(2): 49-50, 94.
- [20] 韩耀图, 李君宝, 张磊, 等. 渤海油田 A15 井误射孔影响因素分析[J]. 非常规油气, 2018, 5(5): 91-95, 86.
- HAN Yaotu, LI Junbao, ZHANG Lei, et al. Analysis of the perforation complicated situation for A15 Well in Bohai Oilfield [J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(5): 91-95, 86.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 侯明明, 男, 1986 年出生, 工程师, 2009 年毕业于长江大学石油工程专业, 现主要从事 TCP 射孔作业和完井作业技术研究和现场作业。电话: 010-59285615, 18971703713; Email: houmingming@cnlc.cn。通信地址: 北京市朝阳区安立路 101 号名人大厦 1721 室, 邮政编码: 100101。