

文章编号:1673-5005(2011)06-0081-07

水力喷砂射孔与起裂大型物理模拟试验

胡强法^{1,2}, 朱 峰², 李宪文³, 付钢旦³, 赵 文³, 吕维平²

(1. 中国石油大学 机械与储运工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油集团钻井工程技术研究院 江汉机械研究所, 湖北 荆州 434000; 3. 长庆油田分公司 油气工艺研究院, 陕西 西安 710021)

摘要:采用油田现场使用的施工参数、喷射工具和施工设备,用与长庆油田长 6 地层对应的露头岩样制作靶件,模拟水力喷砂射孔与起裂的过程,进行大型物理模拟试验,并用专用工具解剖试验靶件。结果表明:喷砂射孔的完整孔形呈泪滴形,分为套管穿孔段、入口反溅段、水泥环缩径段和主体段 4 部分;起裂后的孔道末端还有一狭长的剑形通道;试验条件下,射流速度超过一定限度后会导致靶件起裂,表明射流速度提高可使孔内局部增压显著;起裂后射流顺裂缝方向冲刷形成剑形通道,使喷砂射孔通道成倍增长,有利于改善穿透效果;多个喷嘴射出的孔道保持各自独立的孔形,起裂后的裂缝可连通各个孔道,在试验条件下多个射流通道共同作用可引导近井地带裂缝的形成与扩展。

关键词:射流;水力喷砂射孔;起裂;模拟试验;孔道形状

中图分类号:TE 357 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.06.013

Physical simulating experiments of hydrajert perforating and fracture initiation process

HU Qiang-fa^{1,2}, ZHU Feng², LI Xian-wen³, FU Gang-dan³, ZHAO Wen³, LÜ Wei-ping²

(1. Faculty of Mechanical and Oil-Gas Storage and Transportation Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Jiangnan Machinery Research Institute, Drilling Research Institute, CNPC, Jingzhou 434000, China;

3. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

Abstract: Experimental researches were introduced by selected samples from Chang 6 formation of Changqing Oilfield, and the process of hydrajert perforating and fracture initiation process was simulated by using field parameters, jetting tools and equipments. The tested samples were all cut by special tools. The experimental results show that the whole jetting hole is of tear-drop shape, and it includes four parts of casing perforation, entrance sputtering section, cement reduction and main section. When fracture initiated, a slim channel with gladiate shape is added in the end of the hole. The sample will fracture when jetting velocity is high enough in test condition, which indicates that the pressure in jetting hole increases obviously with the jetting velocity increase. The jetting flow erodes out a slim channel along crack propagate direction when fractures initiate, which makes the jetting hole length increase doubly, and is beneficial to enhance penetration efficiency. Individual channels are connected by crack when fractures initiate, which indicates that jetting hole can guide the fracture initiation and extension near the well bore in test condition.

Key words: jets; hydrajert perforating; fracture initiation; simulating experiment; cavity shape

水力喷射压裂技术是集水力喷砂射孔、压裂、隔离一体化的增产措施,可不使用封隔器或桥塞等隔离工具实现多段压裂。由于其良好的应用效果和前景,在国内外掀起一股研究和应用的热潮。20 世纪 90 年代以来,围绕水力喷砂射孔开展了大

量的试验研究,对射孔的穿透深度和孔形结构、各种参数对成孔的影响进行了较为系统的研究,为技术的发展奠定了良好的基础。但是,由于这些试验的试验条件相差较大,所得结果只可作为定性分析的参考^[1-7]。长庆油田较早地在低渗透储层

收稿日期:2011-04-25

作者简介:胡强法(1966-),男(汉族),湖北仙桃人,教授级高级工程师,博士研究生,主要从事石油工程与高压水射流技术的研究。

的开发中应用水力喷射压裂技术^[4],随着应用的深入,迫切需要为优化工艺参数提供定量分析的依据。笔者在全尺寸条件下模拟低渗透地层水力喷砂射孔的过程,研究射孔孔道的特点、多个孔道的相互关系及其对起裂过程的影响。

1 试验方法和过程

1.1 总体方案

为更好地研究低渗透地层水力喷射压裂的有关问题,提出了进行“全尺寸全真”大型物理模拟试验的构想。本次试验将使用与现场施工一致的井下工具、地面设备和作业参数;还将使用与主要作业地层对应的露头岩样制作靶件,靶件结构完全模拟实际井筒结构。试验不仅要考察单个喷砂射孔孔道的孔深孔形,还将研究多个喷砂射孔孔道的相互关系及其对近井起裂的影响。为得到尽可能真实的孔形结构,采用金刚石绳锯等专用切割工具对试验后的靶件进行解剖。

1.2 岩样采集与参数测试

本次试验针对的目的层为盘古梁西吴420井区长6地层,通过实地考察和层位对比分析,结合鄂尔多斯盆地西倾单斜的构造背景,确定在绥德县城北四十里铺采集长6露头岩样。长6露头岩样物性参数为:孔隙度11.66%,渗透率 $0.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,视密度 2.29 g/cm^3 ,弹性模量15.3 GPa,泊松比0.31,抗压强度64.5 MPa。采用水力切割与爆破结合的方法采集原始样品8块,切边后制成 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 的岩样6件, $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 岩样2件(图1)。同时采集若干小样,用于岩样物性参数测试和水力喷射性能的试验。

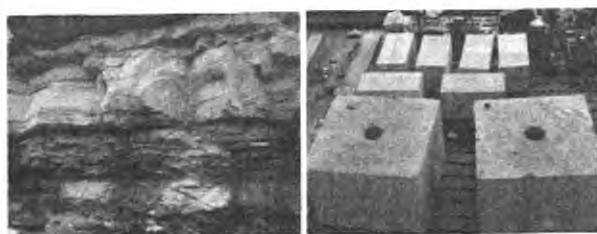


图1 采样现场与制作成型的长6露头岩样

Fig.1 Sampling location and completed rock sample of Chang 6 stratum

1.3 长6露头岩样与水泥靶试件喷射对比试验

前期的大量试验主要基于水泥靶开展,为更好地利用这些试验研究的成果,同时也为了方便试验节省成本,本次试验将按优选的配比制作部分水泥靶件,与岩样靶件一同进行后续的物理模拟试验。

制作的水泥靶试件主要用于水力喷砂射孔试验,并希望喷射试验的结果与采集岩样试验的结果具有可比性。从前人试验研究的结果来看,尽管已明确岩样性能对成孔参数有较大的影响,但至今没有得出一个定量的关系,也很难确定哪一个参数指标起决定作用。为获得对样品水力喷射性能更直观的认识,对不同样品在同等水力参数条件下进行喷射对比试验,筛选出成孔参数与长6样品最接近的水泥靶件,并由此确定实际靶件制作的配比。

将纯水泥试样、水泥与黄砂体积比为1:2、1:3、1:4的试样、长6露头等5种靶样,使用同种喷嘴在同等喷射压力、相同喷射时间、相同喷射距离的条件下进行对比试验。清水射流喷射对比试验:喷嘴压降30 MPa、喷距20 mm、淹没状态;喷砂射流喷射对比试验:喷嘴压降25 MPa、喷距28 mm、磨料体积分数11%~13%,试验结果见表1。

表1 清水射流和喷砂射流试验结果

Table 1 Experimental results of water jet and sand jet

样块 类型	清水射流成孔直径 d_w/mm		清水射流成孔深度 h_w/mm		喷砂射流成孔直径 d_s/mm		喷砂射流成孔深度 h_s/mm	
	$t=30 \text{ s}$	$t=60 \text{ s}$	$t=30 \text{ s}$	$t=60 \text{ s}$	$t=30 \text{ s}$	$t=60 \text{ s}$	$t=30 \text{ s}$	$t=60 \text{ s}$
岩样	25~26	25~26	19	25	12~13.5	12.5~13.5	73	136
纯水泥	24~26	24.5~32	8	15	≈ 7	≈ 12	≈ 70	≈ 100
$V_{\text{水泥}}:V_{\text{黄砂}}=1:2$	22~23	23~24	5	19	11~13	13~14	64	74
$V_{\text{水泥}}:V_{\text{黄砂}}=1:3$	23~28	23~28	30	45	11.5~14	12~19	94	103
$V_{\text{水泥}}:V_{\text{黄砂}}=1:4$	29~32	32~34	50	68	16~22	20~22	135	152

从试验结果看,清水射流长6露头岩样的喷射性能介于1:2和1:3的水泥靶之间,磨料射流长6露头岩样的喷射性能与1:3的水泥靶最接近。主要按1:3的配比制作水泥靶件。

1.4 试验设备与方法

1.4.1 试验设备

在井深1.0 km的专用试验井场上试验,参照现场施工进行井口安装、管汇连接和压裂车组布置

(图2)。主要设备包括井口1套,2000型压裂车3台,仪表车、管汇车、混砂车、运砂车各1台,40 m³压裂罐3具。另配罐车8台,过滤罐2具,400型水泥车1台,用于转运现场废液。

试验的基本过程:将靶件吊装在井口于试验架上固定后再进行有关连接,试验完成后将靶件吊走再安装下一个靶件。液体流动顺序:压裂车队→高压管汇→油管柱→喷射器→环空→井口四通→阀门→排出管线→过滤罐。

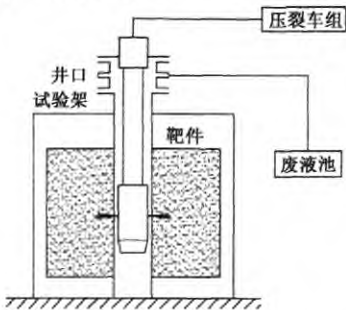


图2 试验设备组成简图

Fig.2 Sketch map of test equipment

试验用的喷嘴为流线型入口+直孔段的结构,主要使用出口直径6.4 mm的喷嘴。试验用的喷射工具有两种结构形式(图3),考察单个喷砂射孔通道使用对称双喷嘴喷射器进行喷砂射孔试验,考察多个喷砂射孔通道使用对称6喷嘴喷射器进行喷砂射孔起裂试验。

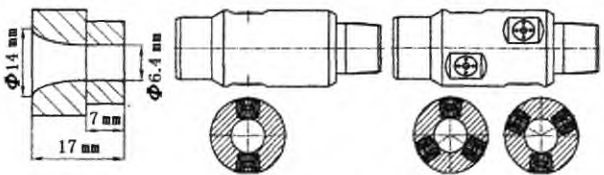


图3 喷嘴结构与两种喷射工具结构示意图

Fig.3 Sketch map of structure of nozzle and two kinds of jet tools

1.4.2 试验靶件准备

按两种试验方式预制了3种共9个靶件(图4):对称双喷嘴喷砂射孔试验,预制6个水泥靶件、2个岩样靶件;6喷嘴喷射器喷砂射孔起裂试验,预制1个大型岩样靶件。靶件中均使用139.7 mm外径壁厚7.72 mm的N80套管,水泥环厚度50 mm。

射孔模拟试验水泥靶(6件):靶筒直径426 mm,长度约2 m。套管横贯靶筒放置,自中心向两端依次为50 mm厚水泥环、约1.0 m厚水泥石,两端焊接环形封头限位。水泥石配比根据试验确定。

射孔模拟试验岩样靶(2件):靶件箱尺寸0.6 m×0.6 m×2.2 m,套管横贯靶件箱放置。两块0.5

m×0.5 m×1.0 m露头岩样距套管50 mm对称放在靶件箱内,注水泥成型。

射孔起裂模拟试验岩样靶(1件):靶件箱内腔尺寸1.6 m×1.6 m×1.8 m。上下为0.3~0.4 m厚的水泥挡板(与水泥环一样由固井水泥浆制作),中间为露头岩样,岩样尺寸为1.5 m×1.5 m×1.0 m,岩样中心取心后插入套管并预制水泥环。在岩样对应位置的四周箱板上钻孔,起裂后液体可顺孔排出,防止憋压。

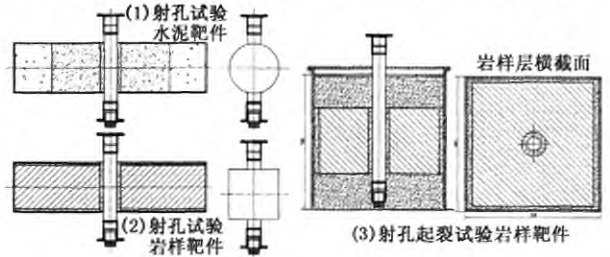


图4 靶件结构示意图

Fig.4 Sketch map of test assembly

1.5 试验过程简介

地面模拟试验严格按照现场施工的程序和步骤进行,2 d完成9个靶件的喷射试验。试验中使用的液体为胍胶压裂液基液,胍胶体积分数为0.4%;使用的磨料为0.425~0.85 mm的石英砂,砂质量浓度为150 kg/m³。

前8次使用对称双喷嘴进行喷砂射孔试验,分别按排量0.6 m³/min(射流速度158 m/s)和排量0.8 m³/min(射流速度210 m/s)进行。试验参数见表2。

表2 设计的试验参数					
Table 2 Designed parameters of test					
靶件	试验序号	泵注排量 $Q/(m^3 \cdot min^{-1})$	射孔 时间 t/min	喷嘴 数量× 规格/mm	射流速度 理论值 $v_t/(m \cdot s^{-1})$ 工作压力 理论值 p_t/MPa
水泥靶	1	0.6	15	2×6.4	158 12.5
	2	0.6	20	2×6.4	158 12.5
	3	0.8	15	2×6.4	210 22.0
	4	0.8	20	2×6.4	210 22.0
	5	0.6	15	2×6.4	158 12.5
	6	0.6	15	2×4+2×3.5	225 25.4
长6	7	0.6	15	2×6.4	158 12.5
露头	8	0.8	20	2×6.4	210 22.0
岩样靶	9	2.2	20	6×6.4	200 20.0

根据这8次试验的情况和经验,在第9次试验中对参数和工艺进行了调整,使用6喷嘴喷射器,采用排量逐级增加的方式,直至排量达到2.34 m³/min后顺利完成喷砂射孔和起裂过程。

2 试验靶件的解剖与数据分析

通过试验,在9只靶件上共喷射24个孔眼,为

完整准确地得到孔眼的真实形状,在对靶件进行解剖测绘时应用了多种方法,包括使用可对大型靶件进行切割的金刚石绳锯机和对小靶件切割使用的圆盘锯,最终得到 24 个完整的孔眼形状。解剖结果表明,岩样靶与按筛选出的配方制作的水泥靶,其成孔形态与孔形参数非常接近,表明按试样的喷射性能选择水泥靶配方,是建立模拟试验条件的一种可行手段。

根据解剖的结果并结合试验的过程,将形成的孔眼分为 3 类:按施工设计完成试验的正常喷射孔;试验中靶件提前起裂的裂缝孔;按计划起裂的喷射起裂孔。

2.1 正常喷射孔的孔形特征

按施工设计完成试验的靶件共有 5 只,其中 4 只水泥靶、1 只岩样靶,这样得到 10 个正常喷射孔(图 5),其施工参数和孔形尺寸见表 3。

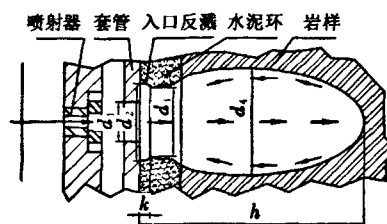


图 5 正常喷射孔的孔形特征

Fig. 5 Shape of normal cavity created with abrasive perforating at intending time

表 3 正常喷射孔的实际施工参数与孔形尺寸

Table 3 Field test parameters and measured data of normal cavities

靶号	喷距 L/mm	射孔时间 t/min	排量 $Q/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	最高泵压 p_p/MPa	孔的 方位	套管孔 尺寸/ mm	入口反溅 直径 d_2/mm	入口反溅 深度 k/mm	缩径直径 d_3/mm	最大直径 d_4/mm	孔深 h/mm	
水泥靶	1 [#]	21	15	0.6	19.22	东侧 西侧	11.7×23 23×23.5	70 55	7 5	46 36	54 55	103 105
	2 [#]	21	20	0.6	20.26	东侧 西侧	21×19 24×25.5	66 55	14 12.5	50 50	67 70	124 120
	3 [#]	21	16	0.72	31.54	A 侧 B 侧	22×29 22×27	95 78	5 9	82 65	87 81	160 164
	5 [#]	18	15	0.6	14.65	东侧 西侧	19×21 18.6×20.5	48 58	9 7	40 43	55 57	110 108
	7 [#]	21	15	0.3 ~ 0.6	17.75	A B	19.2×22 22.7×24	60 45	7 8	43 40	57 62	121 133
岩样靶												

这些孔均呈现共同的形状特点,孔形基本呈橄榄形(或称泪滴形),整个孔道可划分为 4 部分:①套管穿孔段,孔形截面略呈椭圆形,孔径约为喷嘴直径的 3.5 倍;②入口反溅段,水泥环入口的一小段倒喇叭形空腔,是射流打击水泥环反溅到套管外壁后再反射冲蚀形成的结果,多数靶件的宽度约为 10 mm,并有随喷射时间延长而加宽的趋势,其直径约为套管穿孔直径的 2~3 倍,并有随排量增大而增大的趋势;③水泥环缩径段,直径相对较小,弧度也较平,其直径较入口反溅段的直径要小 10~15 mm;④主体段,代表孔形的主体结构,呈橄榄形或称作泪滴形,其长度为 100~170 mm,最大直径约为套管穿孔直径的 2~3 倍,且有随排量增大而增大的趋势。

在试验靶件不破裂的条件下,水力喷砂射孔形成的孔形结构不是通常认为的完整流线型结构。其中最大的差异是在套管与水泥环之间存在入口反溅段,使整个孔形在套管穿孔段之后形成一个突变的大台阶。关于入口反溅段结构的描述此前未见文献报道,经对以往实验室条件下进行的小参数喷射试验靶件(2.5 mm 喷嘴,排量小于 80 L/min)的回溯

观察,发现该段普遍存在,只是由于小参数喷射下,该段的长度与直径均较小,容易被忽略。

图 6 为 5 号水泥靶和 7 号岩样靶的解剖图片。

2.2 提前起裂裂缝孔的孔形特征

按设计将试验排量提高,射流速度理论值超过 200 m/s 后,靶件在射孔 1 min 内起裂,起裂后立即停泵,基于现场安全考虑未按设计时间进行后续喷射。试验过程中环空压力与正常喷射孔靶件相差不大,因此分析起裂的原因主要是射流速度提高后导致孔内局部压力增大,导致起裂。

试验过程中因提前起裂而形成的裂缝孔共有 3 只靶 8 个孔(其中 1 靶 4 孔),这些孔的主体部分的特征均与正常喷射孔明显不同(图 7、表 4)。靶件起裂后,高速含砂射流沿裂缝喷射,冲刷形成狭长的剑形孔道,孔长明显大于正常喷射孔长度。孔道入口水泥环部分为柱形,无明显的缩径,主体部分为剑形扁孔,仍可观察到入口反溅段,但其宽度甚小。因射流喷射时间非常短,均在 1 min 左右,孔道未充分发育,8 个孔的差异较大,有的刚刚在靶件上形成不足 100 mm 浅槽,有的则顺着裂缝冲刷出 360 mm 的扁孔。

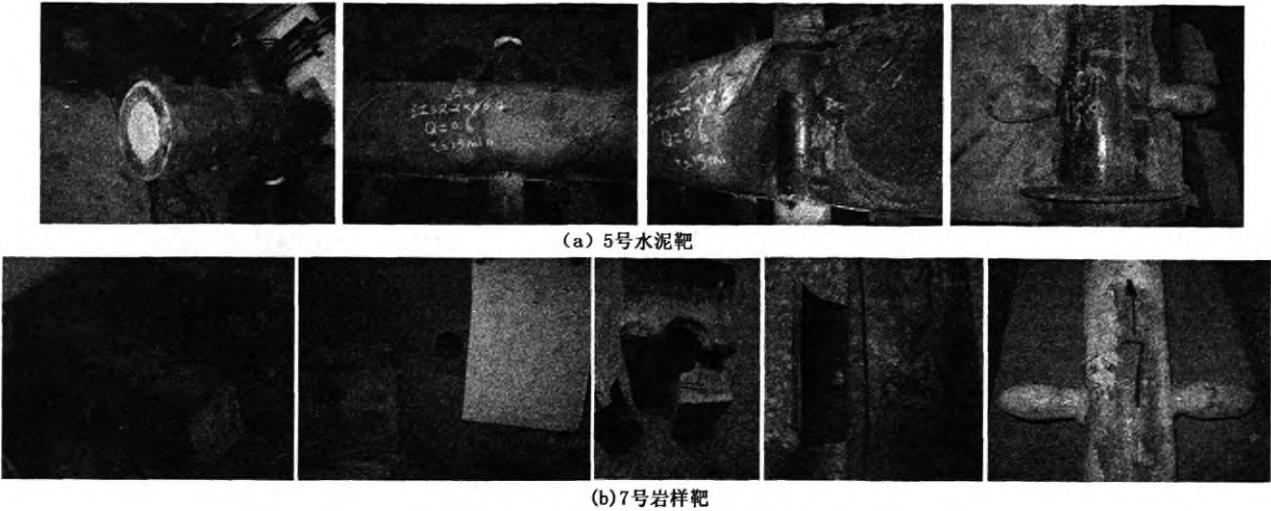


图 6 5 号水泥靶和 7 号岩样靶的解剖过程

Fig. 6 Dissected process of the No. 5 test assembly with cement and the No. 7 test assembly with rock sample

表 4 提前起裂裂缝孔的实际施工参数与孔形尺寸

Table 4 Field test parameters and measured data of cracked cavities created with abrasive perforating before intending time

靶号	射孔时间 t/min	流量 $Q/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	最高泵压 p_p/MPa	孔的 方位	套管壁 孔形/mm	入口反溅 直径 d_2/mm	入口反溅 深度 k/mm	入口直径 d_3/mm	最大直径 d_4/mm	孔深 h/mm	备注
4 [#]	1	0.8	31.61	东侧	14.7×17.4	35	2	20	35	360	沿孔眼轴线裂开,大量刺水,剑形孔
				西侧	14.3×17.4	40	5	32	47	90.5	沿孔眼径向顺水泥环外结合面起裂渗水
6 [#]	—	0.6	29.52	西 1	5×7.5			15.3	15.3	32	没有射穿水泥环,孔较小
				西 2	7×9			18.3	20	32	
				东 3	6×7.5			17	17	20	沿孔眼轴线裂开,大量刺水,剑形孔
				东 4	7×9			17	17	125	
8 [#]	0.5	0.8	30.09	东侧	20×16	59	4	45	45	104	沿孔眼径向起裂、轴向未裂透,萝卜形孔
				西侧	20×17	38	4	33	33	160	沿孔眼轴线裂开,大量刺水,剑形孔

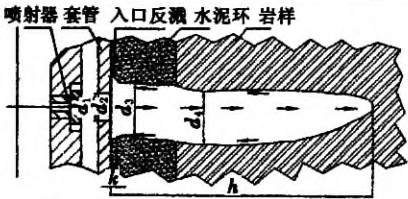


图 7 提前起裂裂缝孔的孔形特征

Fig. 7 Shape of cracked cavity created with abrasive perforating before intending time

图 8 为 4 号水泥靶和 8 号岩样靶的解剖图片。

2.3 喷射起裂孔孔形特征

在最终的 6 喷嘴喷射试验中,排量由 1.5 m³/min 逐级增加到 2.34 m³/min,靶件在最高泵压 32 MPa 时起裂,起裂后立即停泵,共喷射 20 min,形成

6 个喷射起裂孔(图 9、表 5)。

喷射起裂孔的射孔孔道兼有正常喷射孔和裂缝孔孔道的特点。在靶件起裂前,射流与回流综合作用形成橄榄形喷孔,但靶件一旦压裂,高速流体沿着裂缝喷射,在橄榄形孔道之后沿裂缝形成狭长扁孔道。故孔形可划分为 5 部分:①套管穿孔;②入口反溅段;③水泥环缩径段;④橄榄形孔道主体段;⑤剑形孔道。其中前 4 部分的形状和尺寸范围均与正常喷射孔十分接近,而剑形孔道的长度大部分介于 250 ~ 300 mm,最短孔 180 mm,最长孔达 350 mm。

由于起裂后马上就停泵降压,剑形孔未能进一步发展与延伸。可以预见,如果起裂后继续喷射一段时间,剑形孔将进一步延伸直至靶件边缘。

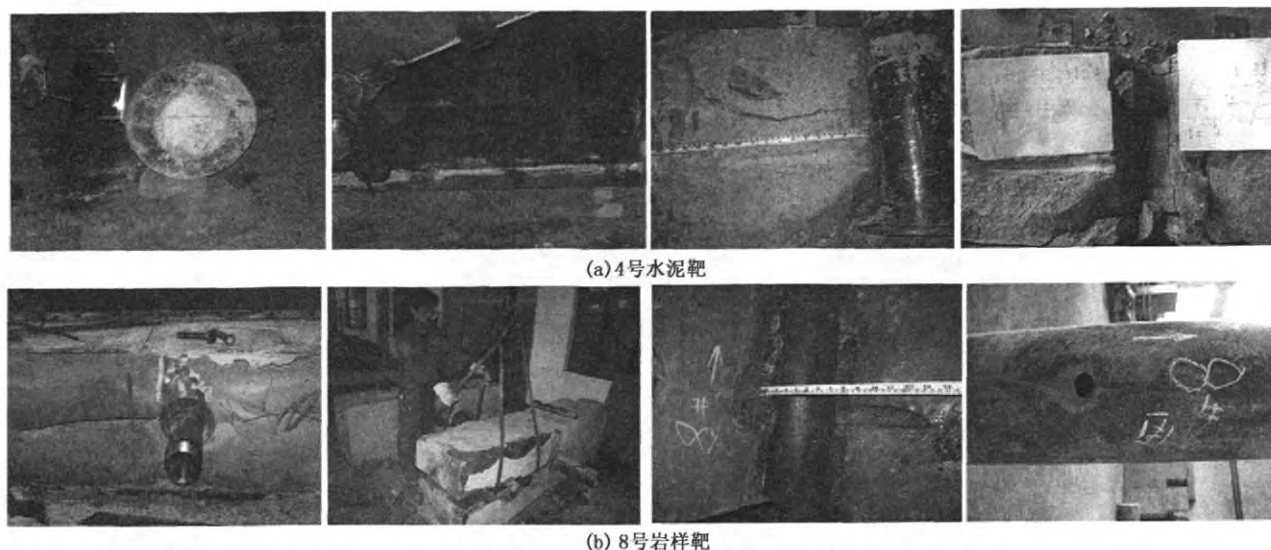


图 8 4 号水泥靶与 8 号岩样靶的解剖过程

Fig. 8 Dissected process of the No. 4 test assembly with cement and the No. 8 test assembly with rock sample

表 5 喷射起裂孔的实际施工参数与孔形尺寸

Table 5 Field test parameters and measured data of fractured cavities created with hydrajet-assisted fracturing

靶号	射孔时间 t/min	排量 Q / $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	最高泵压 p_p/MPa	孔的 方位	套管壁 孔形/mm	入口反溅 直径 d_2/mm	入口反溅 深度 k/mm	入口直径 d_3/mm	最大直径 d_4/mm	孔深 h/mm
9 [#]	20	1.5 ~ 2.4	32.1	N	24×27.8	53	9	44	60	181
				NW	21.5×27.5	42	6	35	50	354
				SW	22.5×25	48	6	43	48	268
				S	23×28	68	5	49	53	279
				SE	20×27	56	8	44	51	290
				NE	23×29	59	9	40	43	230



图 9 喷射起裂孔的孔形特征

Fig. 9 Shape of fractured cavity created with hydrajet-assisted fracturing

6 个喷嘴射出的孔道保持着各自独立的孔形(图 10),起裂后沿各自的孔道继续向外扩展。虽然 6 个孔道不在同一高度(其中 4 孔与另 2 孔高度差 50 mm),但起裂后的横向通缝连贯通了 6 个孔道,形成贯通大裂缝,将靶件上下分开。这表明在近井地带,相距较近的多个喷砂射孔射流通道可在受压后共同作用,引导裂缝的形成与扩展。由于本试验是在无围压、无三轴应力的条件下进行的,在应力环境下多个喷砂射孔通道对近井裂缝起裂的作用需通过进一步试验确认。

图 11 为 9 号大岩样靶的解剖图片。

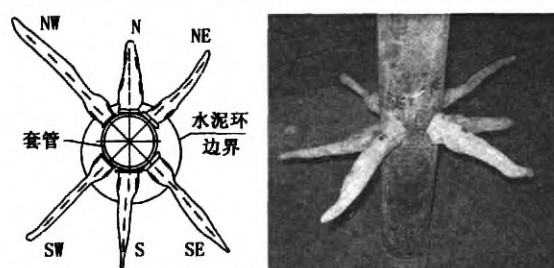


图 10 多个喷射起裂孔的分布

Fig. 10 Distribution of fractured cavities created with hydrajet-assisted fracturing

2.4 关于射孔深度的分析

根据试验结果,在本试验条件下,正常射孔深度为 100 ~ 170 mm,裂缝孔和喷射起裂孔约 300 mm。这与相关文献^[5-7]介绍的水力喷砂射孔模拟试验的射孔深度相比明显偏低,主要原因为:

(1) 试验条件的差异,主要是岩样的差异对深度的影响较大。本试验所用的低渗透岩样致密且硬度高,更难穿透,导致喷砂射孔的深度较浅。

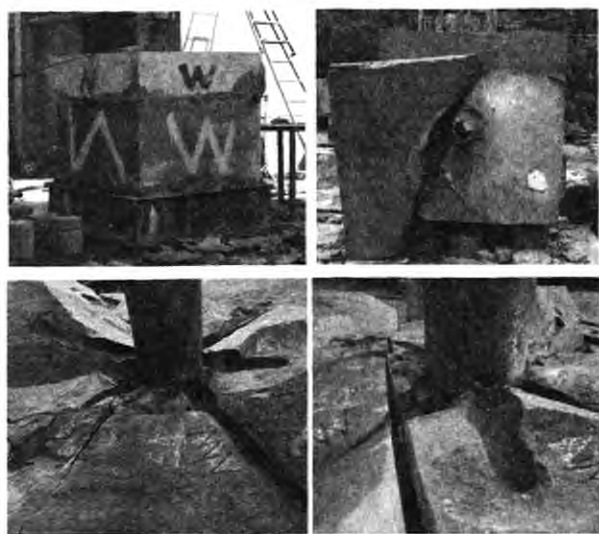


图11 9号大岩样靶的解剖过程

Fig. 11 Dissected process of the No. 9 test assembly with rock sample

(2) 试验方法上的差异。本试验主要关注喷砂射孔起裂前的孔深孔形,重点研究喷射过程中靶件未起裂破碎的情况。试验中发现起裂时立即停泵,有意限制了射孔通道沿裂缝面的冲刷延伸。相关文献介绍的试验采用的是按事先设计的时间完成喷射试验的方式,在靶件破裂后还会继续喷射一段时间,射孔通道沿裂缝面的冲刷延伸会大大加长。

(3) 统计和测量方法的差异。本试验的穿透深度均是从套管外缘计算,且均未计算裂缝的长度。相关文献则不同,如文献[7]介绍的 Oklahoma 大学的试验其射孔深度为 685 mm,自套管中心开始测量,并包含了起裂裂缝的长度。

根据有关围压对喷砂射孔性能影响的研究^[8-9],在井下条件下喷砂射孔的穿透深度将比地面试验的深度更小,在低渗透地层应用时应充分考虑这些因素。

3 结 论

(1) 在地面试验条件下,提高射流速度后靶件易起裂,随着射流速度提高,孔内局部增压显著。

(2) 首次提出孔眼结构中包含入口反溅段的概念,即在套管与水泥环之间存在一个大台阶,不同于通常认为的完整流线型结构。

(3) 喷射起裂孔的射孔孔道兼有正常喷射孔和裂缝孔的特点,即在正常喷射孔靶件孔道的基础上,增加了孔底起裂后形成的扁平剑形孔道。6 喷嘴喷射器形成的 6 个孔道保持着各自独立的孔形,起裂后沿各自的孔道继续向外扩展而没有相互冲蚀;起

裂后的横向通缝连通 6 个孔道形成贯通的大裂缝。在本试验条件下,多个射流通道共同作用可引导近井地带裂缝的形成与扩展。

参考文献:

- [1] COBBETT James S, CONSULTANT. Sand jet perforating revisited [R]. SPE 39597, 1998.
- [2] SURJAATMADJA J B, GRUNDMANN S R, MCDANIEL B, et al. Hydrajet fracturing: an effective method for placing many fractures in openhole horizontal wells [R]. SPE 48856, 1998.
- [3] LOYD East, RON Willett, JIM Surjaatmadja, et al. Application of new fracturing technique improves stimulation success for openhole horizontal completions [R]. SPE 86480, 2004.
- [4] 李宪文, 赵文珍. 水力射孔射流压裂工艺在长庆油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 67-70.
LI Xian-wen, ZHAO Wen-zhen. Application of hydraulic perforation jet fracturing technology in Changqing Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 67-70.
- [5] 李根生, 牛继磊, 刘泽凯, 等. 水力喷砂射孔机理实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(2): 31-34.
LI Gen-sheng, NIU Ji-lei, LIU Ze-kai, et al. Experimental study on mechanisms of sand jet perforating [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(2): 31-34.
- [6] 刘亚明, 袁新生, 艾力. 水力喷砂射孔技术试验分析[J]. 新疆石油科技, 2005, 15(2): 7-9.
LIU Ya-ming, YUAN Xin-sheng, AI Li. Experimental analysis on technology of sand jet perforating [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2005, 15(2): 7-9.
- [7] NAKHWA A D, LOVING S W, FERGUSON A, et al. Oriented perforating using abrasive fluids through coiled tubing [R]. SPE 107061, 2007.
- [8] 牛继磊, 李根生, 宋剑, 等. 水力喷砂射孔参数实验研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(2): 14-16.
NIU Ji-lei, LI Gen-sheng, SONG Jian, et al. An experimental study on abrasive water jet perforation parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(2): 14-16.
- [9] 廖华林, 李根生, 易灿, 等. 围压对水射流破岩特性影响的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 46-48.
LIAO Hua-lin, LI Gen-sheng, YI Can, et al. An experimental study the impact of ambient pressure on rock breaking by water jet [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 46-48.

(编辑 李志芬)