文章编号:1673-5005(2014)06-0085-05 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.013

围压下磨料射流喷射套管及灰岩实验研究

黄中伟[1], 李根生[1], 史怀忠[1], 牛继磊[2], 宋先知[1], 邵尚奇[1]

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580)

摘要:在设计可承受围压的磨料射流喷射实验装置基础上,选取低孔低渗的石灰岩及套管试件,改变喷射压力、围压、喷嘴直径、喷射距离等因素,分析磨料射流切割套管及岩心的特性。结果表明,喷射压力、喷嘴直径等是影响磨料射流喷射效果的主要控制因素,喷射压力及喷嘴直径越大,喷射效果越好,射孔深度越深;射穿套管的时间对喷距及围压较为敏感,但岩样中的射孔深度对二者变化时的响应较小。

关键词:磨料射流; 围压; 套管; 灰岩; 实验研究

中图分类号:TE 921.2 **文献标志码**:A

引用格式:黄中伟,李根生,史怀忠,等. 围压下磨料射流喷射套管及灰岩实验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):85-89.

HUANG Zhongwei, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Experimental study on abrasive water jet blasting casing and limestone under ambient pressures[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2014,38(6):85-89.

Experimental study on abrasive water jet blasting casing and limestone under ambient pressures

HUANG Zhongwei[1], LI Gensheng[1], SHI Huaizhong[1], NIU Jilei[2], SONG Xianzhi[1], SHAO Shangqi[1]

(1. *State Key Laboratory of Oil Gas Resources and Exploration in China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*; 2. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: On the basis of the experimental device design for the abrasive water jet under ambient pressures, the low porosity and permeability limestone and the casing were selected to investigate the characteristics of casing cutting with abrasive water jet and sample core by changing the parameters of nozzle pressure drop, ambient pressure, nozzle diameter, and stand-off distance, etc. The results show that the nozzle pressure drop and nozzle diameter are the critical factors affecting the perforation depth. The depth increases with the nozzle pressure drop and diameter going up. And the perforation time is more sensitive to the stand-off distance and ambient pressure. However, the perforation depth of the sample core has less response to the variation of the above two parameters.

Key words: abrasive water jet; ambient pressure; casing; limestone; experimental study

水力喷砂射孔是利用地面高压泵将混有一定体积分数石英砂的水砂浆加压,通过井下射孔工具的喷嘴喷射出高速射流射穿套管和近井地层,而常规聚能弹射孔产生的超高速金属流会在孔眼壁面形成损害区或压实带,导致岩石渗透率下降为原来地层渗透率的 10% ~35%[1]。相比之下,磨料射流射孔技术可有效地避免压实带引起的渗透率下降问题。近年来,随着水力喷射压裂技术[2-7]在油气藏,特别是在非常规页岩气藏的推广应用,该技术第一阶段必须实施的磨料射流射孔方法进一步受到重视,研究人员对磨料类型、颗粒尺寸、喷射压力、喷距等多种参数的影响规律进行了实验分析[8-12],由于磨料射流喷射时的围压调节较为困难,研究工作大多是在不加围压的条件下进行的[13-14]。廖华林等[15]采

收稿日期:2014-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51374220);教育部"新世纪优秀人才支持计划"项目(NCET-12-097);国家重大专项(011ZX05036-002)

作者简介:黄中伟(1972-),男,教授,研究方向为高压水射流在石油工程中的理论与应用。E-mail:huangzw@cup.edu.cn。

用人工水泥岩样实验研究了围压下磨料射流对喷射深度的影响规律。笔者设计研制可承受 20 MPa 围压的磨料射流喷射实验装置,采用套管切片及灰岩露头岩样,通过改变围压、喷嘴出口流速、喷距等参数,测试喷射套管开孔时间、灰岩岩样中的孔深等。

1 实 验

1.1 岩心/套管试件制备

选取的天然灰岩岩心属低孔低渗,平均孔隙度为 0.09% ~ 3.11%,平均渗透率为(0.017 7 ~ 0.277)×10^{-3} μm^2,孔喉结构以细孔中喉为主,黏土矿物主要类型有绿泥石、伊利石和高岭石。在壁厚 9.17 mm 的 5 1/2″套管上切下统一直径为 72 mm 的多组切片,见图 1。把切割成圆柱形的岩心放入 Φ114 mm×140 mm 岩心桶,端部放上套管切片,一起用水泥固结,以模拟地下实际状况,如图 2 所示。



图 1 套管切片及固结好的岩样

Fig. 1 Casing samples and cemented stone samples

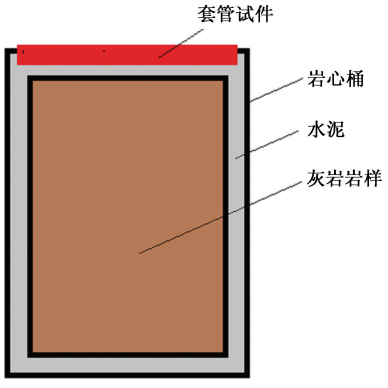


图 2 岩样/套管片结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of completed sample

1.2 实验装置

主要实验设备包括:电机驱动的高压泵、喷嘴、磨料添加装置、围压实验装置、岩样夹持装置等。高压泵工作压力为 50 MPa,排量为 63 ~400 L/min;围压实验装置的最高工作压力为 20 MPa,内孔径 220 mm,内孔长度 400 mm,可把制作完毕的岩样置入其中(图 3、4)。需要说明的是,由于围压罐不透明,难以准确判断喷射穿透套管的时间,为此,把喷嘴在围压罐的端面偏心布置,同时,岩心桶可以手动旋转,这样在一个岩心桶上可以多个位置不停泵连续喷射,记录在每个位置的喷射时间,完成后打开围压罐,刚好穿透的孔眼所对应的时间即认为是射穿时间。围压调节方法也是需要解决的关键问题之一,由于返出流体同样含有磨料及岩屑,对阀门的冲蚀磨损非常严重,通过设计两路出口解决这一问题:一路在管汇中间安装耐磨蚀的调节阀,另一路在管汇出口安装比实验喷嘴直径较小的喷嘴,由此减轻对调节阀的冲蚀、控制围压罐中的压力,如图 3 中的上部结构。在喷嘴入口管汇安装有压力表,该表与出口压力表的读数差值即为喷嘴的压降。

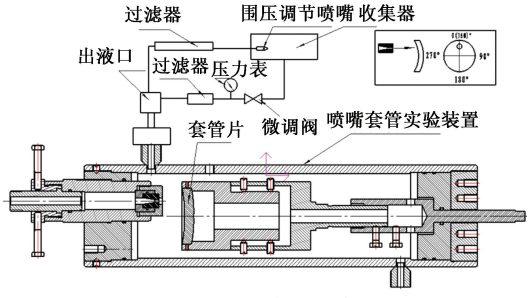


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment setup



图 4 围压罐实物图

Fig. 4 Photo of autoclave

1.3 实验参数

喷嘴直径:3.0、3.5、4.0 mm;喷嘴安装数量:1 只;喷嘴内流道结构:普通锥形;喷嘴压降:23 ~ 33 MPa,围压最高:20 MPa,喷射距离:10 ~ 25 mm;磨料参数:石英砂,20 ~ 40 目;砂含量:6%(体积比)。

2 结果分析

由于实验采用的岩样为低渗灰岩,其强度较高,结果射孔深度均在 100 mm 以内。每个套管试件转动 5 次,实验后的岩样及套管试件如图 5 所示。由喷嘴



图 5 喷射后的岩心和套管片

Fig. 5 Blasted cores and casing samples

压降、喷嘴直径、围压、喷距等对射穿套管时间及岩样中射孔深度这两个关键参数的影响规律进行分析。

2.1　喷嘴压降

喷嘴直径为 3.5 mm、喷射距离保持在 15 mm,设定围压 10 MPa,喷射岩样的喷嘴最高压降 33 MPa,喷射最长时间 20 min。图 6、7 分别为射穿套管时间和岩心中射孔深度随喷嘴压降的变化曲线。从图 6 看出,在其他条件一定时,穿透套管试件的时间随着喷嘴压降的增加近似呈线性下降,当喷嘴压降达到 33 MPa 时,仅用时 20 s 即可射穿套管。喷嘴压降对喷射深度有较大影响,从图 7 看出,在相同时间内,喷嘴压降越大,在岩石上形成的孔眼越深;在相同的喷嘴压降条件下,随着喷射时间的延长,射孔深度加大,但超过一定的喷射时间(720 s)后,射孔深度的增加随时间变化放缓。在现场施工中,可在完井管柱承压范围内适当增大喷嘴压降、控制喷射时间 12 min,以获得较好的施工效果、减少地面高压泵工作时间。

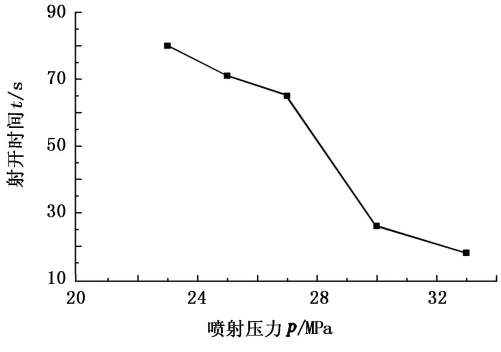


图 6　喷嘴压降对射穿套管时间的影响曲线

Fig. 6　Effect of casing penetrated time on nozzle pressure difference

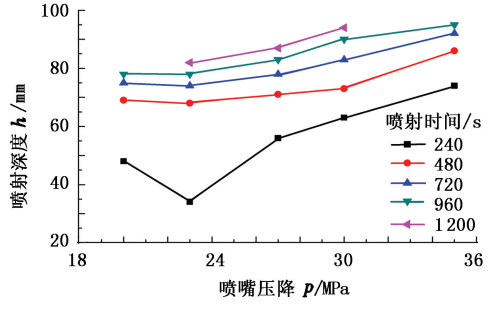


图 7　喷嘴压降对喷射深度的影响

Fig. 7　Effect of nozzle pressure on hole depth

2.2　喷嘴直径

实验参数为:固定喷嘴压降为 30 MPa,喷射距离 15 mm,围压调节到 10 MPa,安装的喷嘴出口直径分别为 3.0、3.5 和 4.0 mm。图 8、9 分别为不同喷嘴直径下射穿套管时间及射孔深度的变化曲线。从图 8 看出,在其他条件一定时,喷嘴直径对射穿套管的时间影响非常明显,随着喷嘴直径的增加,该时间急剧下降,喷嘴直径由 3.0 mm 增加到 4 mm 时,射穿套管的时间由 85 s 下降到了 55 s。图 9 表明,射孔深度随着喷嘴直径增加而增加。同时可以看出,喷嘴直径从 3.0 mm 增加到 3.5 mm 时孔深增加较快,喷射 6 min 时,二者对应的孔深分别为 32 和 55 mm,增加了 69%,但当喷嘴直径从 3.5 mm 增加到 4.0 mm 时,孔深提高幅度仅为 10%。由此可知,扩大喷嘴直径可以有效地缩短穿透套管壁面的时间,相应地也可增加套管上的孔径,但对提高射孔深度的作用并不突出,因此,如果现场对套管壁面是的孔径要求不高,可适当缩小喷嘴直径,以降低施工排量,从而节约高压泵能耗。需要注意的是,为避免磨料颗粒堵塞喷嘴出口,现场经验是喷嘴出口直径至少为磨料颗粒最大直径的 3 ~5 倍,本文中采用的磨料颗粒最大 0.83 mm,则喷嘴直径至少要设计为 3.0 mm 以上才可保证磨料颗粒不会堵塞出口。

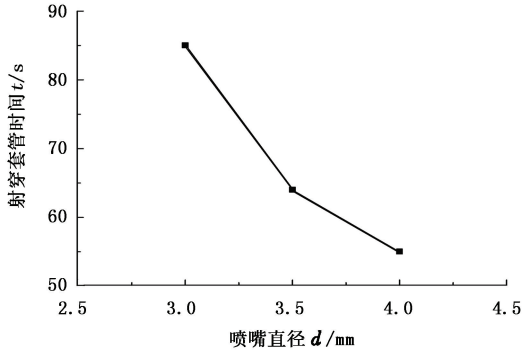


图 8　不同喷嘴直径下射穿套管时间

Fig. 8　Casing penetrated time with different nozzle diameters

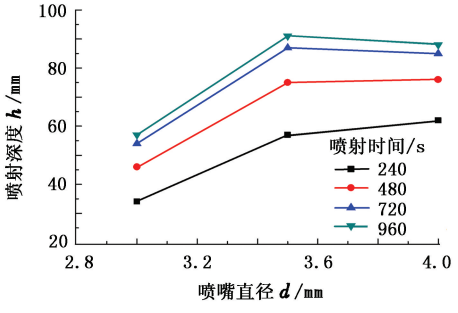


图 9　喷嘴直径对喷射深度的影响

Fig. 9　Effect of nozzle diameters on hole depth

2.3　喷射距离

实验参数设定为:喷嘴压降 30 MPa、围压 19 MPa,喷嘴直径 3.5 mm。在实验喷射距离对穿透套

管试件时,发现在 5 mm 喷距条件下磨料射流返溅过于强烈、对喷嘴及中心管磨蚀损坏严重,因此,该部分实验分开进行:喷射套管试件时从 10 mm 喷距开始测试,再增加到 15 和 20 mm;不加套管试件、仅喷射灰岩岩样时,喷距从 5 mm 开始测试,实验了 4 种喷距下的射孔效果。图 10 和 11 为喷射距离对射穿套管时间及射孔深度的影响曲线。从图 10 看出,在其他条件一定时,射穿套管的时间随着喷距的增加而延长。喷距从 10 mm 提高到 20 mm 时射穿套管的时间由 28 s 增加到了 75 s。在实验的 4 种喷距条件下,喷射深度随喷射距离的增加呈下降趋势(图 11),因此实际施工时,在井下工具的喷嘴周围加强防护前提下,如果地层出砂不严重,可适当增加工具外径、减小喷距,以提高在地层中的射孔深度;对于目的层上部存在套管变形的特殊井,将不得不减小工具外径以通过该变形段。从图 10 和 11 看出,即使喷距增加到 20 mm,75 s 也可射穿套管,在喷射 12 min 时岩样中的孔眼深度仅比 5 mm 喷距降低了约 11.7%,因此,在套管缩径的井中设计加工较小直径的喷射工具仍可实施磨料射流射孔技术。

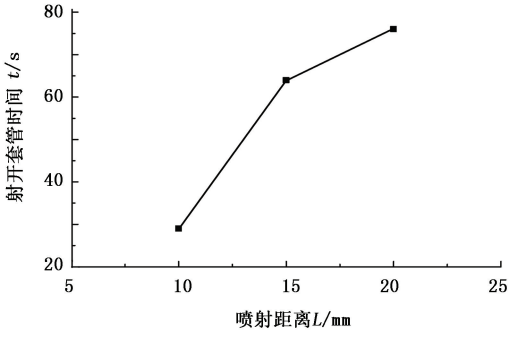


图 10 不同喷射距离下射穿套管时间

Fig. 10 Casing penetrated time with different stand-off distance

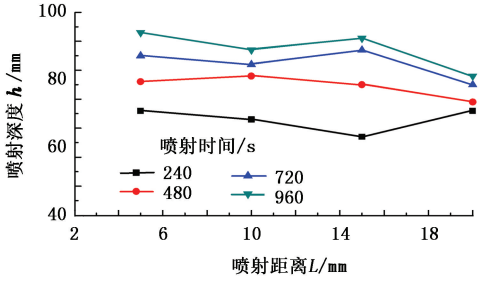


图 11 不同喷射距离下的喷射深度

Fig. 11 Hole depth with different stand-off distance

2.4 围压

固定喷嘴压降为 30 MPa,安装的喷嘴出口直径为 3.5 mm、喷射距离 15 mm,围压分别调节到 10、15 和 19 MPa。图 12 为不同围压下射穿套管的时间。可以看出,在其他条件一定时,射穿套管的时间随着围压的增加而增加,但围压即使增加到 19 MPa,射穿套管时间也只有 70 s,根据实验结果,12 min 的喷射时间足够把套管射穿。从围压对岩心射孔深度的影响(图 13)发现,射孔深度随着围压(井深)的增加总体略呈下降趋势,但不如文献[11]报道的趋势明显。分析原因,笔者认为,文献[11]中采用的人造水泥岩样、胶结强度远不如天然灰岩岩样,射孔深度对射流参数的变化比较敏感,本文中射孔深度整体较浅,在实验的围压范围内趋势并不明显。

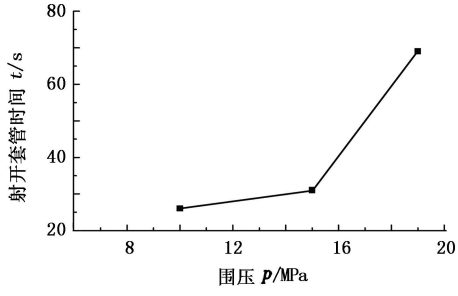


图 12 围压对射开套管时间的影响

Fig. 12 Effect of ambient pressure on casing penetrated time

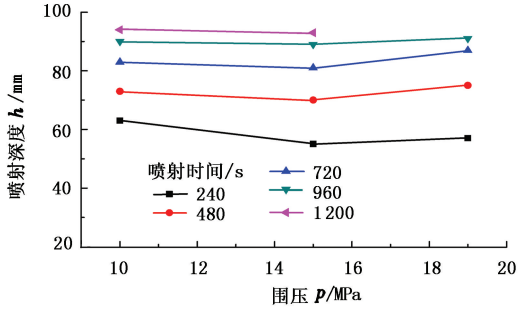


图 13 围压对岩心射孔深度的影响

Fig. 13 Effect of ambient pressure on hole depth

3 结论与建议

(1)设计研制用于不同围压下磨料射流喷射实验的实验装置,其围压调节方法可为解决磨料射流冲蚀调节阀的难题提供借鉴。

(2)在灰岩地层实施该技术时,应适当提高喷嘴出口射流的水功率及喷射时间,而井深(围压)、喷距等对灰岩地层中的射孔深度影响相对较小。

(3)套管密度和强度虽然高于灰岩岩样,但实验中发现磨料射流对前者的冲蚀速度远高于后者,据此分析,磨料射流对钢材(延展性材料)的切割破

碎能力要高于岩石等脆性材料。

(4)随着油田生产进入中后期,套管变形/缩径井逐渐增多,实验结果证实下入较小直径(较大喷距)的喷射工具通过变形段后,仍能射穿套管和地层,为灰岩地层套变井的射孔及定点喷射酸压提供了一条技术途径。

参考文献:

[1] 李东传,唐国海,孙新波,等. 射孔压实带研究[J]. 石油勘探与开发,2000,27(5):112-117.
LI Dongchuan, TANG Guohai, SUN Xinbo, et al. A study on perforation crushed zone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,27(5):112-117.

[2] MOHSEN A,ALI M A, SAMIEE R A, et al. Implementation of pinpoint fracturing technique in the western Egypt desert[R]. SPE 133864, 2010.

[3] RHODES D, ORSKI K,GOUMA C N. Hydrajet fracture stimulation technique used to rejuvenate three wells in mature offshore oilfield Congo-case history [R]. SPE 144117, 2011.

[4] CALLAROTTI G F, MILLICAN S F. Open hole multistage hydraulic fracturing systems expand the potentiao of the giddings Austin chalk field[R]. SPE 152402, 2012.

[5] DIVESH C, NURATAS G, COLT A. Pinpoint-fracturing technology improves efficiencies while solving issues with conventional hydraulic-fracturing processes [R]. SPE 151559, 2012.

[6] LI Gensheng, HUANG Zhongwei, IAN Shouceng, et al. Investigation and application of hydrajet fracturing in oil and gas stimulation in China[R]. SPE 131152, 2010.

[7] 黄中伟,李根生,汪勇章,等. 水力喷射压裂技术在三层套管井中应用研究[J]. 石油钻采工艺,2012,34(5):122-124.
HUANG Zhongwei, LI Gensheng, WANG Yongzhang, et al. Hydra-jet fracturing applied in a well with three-layer casings [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(5):122-124.

[8] HUANG Zhongwei, NIU Jilei, LI Gensheng,et al. Surface experiment of abrasive water jet perforation[J]. Petroleum Science and Technology, 2008,26(6):726-733.

[9] 卢义玉,沈晓莹,杨晓峰,等. 新型磨料水射流钻头岩石钻进过程关键水力学参数研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2012,20(5):837-845.
LU Yiyu, SHEN Xiaoying, YANG Xiaofeng, et al. Investigations on main hydraulic parameters of a new abrasive water jets assisted bit for rock drilling[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012,20(5):837-845.

[10] 胡强法,朱峰,李宪文,等. 水力喷砂射孔与起裂大型物理模拟试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(6):81-87.
HU Qiangfa, ZHU Feng, LI Xianwen, et al. Physical simulating experiments of hydrajet perforating and fracture initiation process[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(6):81-87.

[11] 李根生,牛继磊,刘泽凯,等. 水力喷砂射孔机理试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2002,26(2):31-34.
LI Gensheng, NIU Jilei, LIU Zekai, et al. Experimental study on mechanisms of hydraulic sand blasting perforation for improvement of oil production [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2002,26(2):31-34.

[12] 李根生, 沈忠厚. 高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J]. 石油勘探与开发,2005,32(1):96-99.
LI Gensheng, SHEN Zhonghou. Advances in researches and applications of water jet theory in petroleum engineering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(1):96-99.

[13] JIM B S, KLAAS V G. Recent advancements in hydrajet perforating and stimulation provide better penetration and improved stimulation[R]. SPE 144121, 2011.

[14] OZCELIK Y, ENGIN I C. Development of cuttability chart in abrasive water jet cutting[C]//ISRM International. Rock Engineering and Technology for Sustainable Underground Construction, May 28-30, 2012, Stockholm, Sweden.

[15] 廖华林,李根生,易灿,等. 围压对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 Hualin, LI Gensheng, YI Can, et al. Experimental study the impacts of ambient pressure on rock breaking by water jet [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(5):46-48.

(编辑　刘为清)