

文章编号: 1003-1480(2024)02-0093-04

一种高温高压井用小直径切割器设计及性能研究

郭同政¹, 李凯², 高强², 朱建新¹, 舒通胜², 汪长栓²

(1. 中石化经纬有限公司胜利测井公司, 山东 东营, 257096; 2. 北方斯伦贝谢油田技术(西安)有限公司, 陕西 西安, 710065)

摘要: 针对高温高压小水眼油气井下管柱切割问题, 设计了一种外径为 $\Phi 36$ mm的小直径切割器, 首次采用切割器两端同时起爆方式对钻杆进行切割, 对其作用过程进行了仿真, 并通过地面试验和井下试验对切割器的切割效果进行了验证。结果表明: 该切割器能够在压力为95 MPa、温度为160 °C的井下进行切割作业, 实现对水眼大于等于 $\Phi 41$ mm的多种规格钻杆的切割, 且一次性切断钻杆, 切割后切割装置接头无粘连、翻边小。本研究可为工程测井和油气资源的深层勘探开发提供技术支持。

关键词: 小直径切割器; 高温高压; 小水眼油气井; 钻杆切割; 井下试验

中图分类号: TJ45⁺9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.016

Design and Performance Study of A Small Diameter Cutter for High-Temperature and High-pressure Wells

GUO Tong-zheng¹, LI Kai², GAO Qiang², ZHU Jian-xin¹, SHU Tong-sheng², WANG Chang-shuan²

(1. Shengli Logging Company, Sinopec Matrix Corporation, Dongying, 257096; 2. North Schlumberger Oilfield Technologies (Xi'an) Co. Ltd., Xi'an, 710065)

Abstract: In response to the problem of cutting down the pipe strings in high-temperature and high-pressure small water hole oil and gas wells, a small diameter cutter with an outer diameter of $\Phi 36$ mm was designed. For the first time, the drill pipe was cut by simultaneously detonating at both ends of the cutter, and its working process was simulated. The cutting effect of the cutter was verified through ground and underground tests. The results show that the cutter can perform cutting operations underground at a pressure of 95 MPa and a temperature of 160 °C, achieving the cutting of various specifications of drill pipes with water holes greater than or equal to $\Phi 41$ mm, and cutting the drill pipes in one go. After cutting, the cutting device joint has no adhesion and small flipping. This study can provide technical support for the engineering logging and development of deep exploration of oil and gas resources.

Key words: Small diameter cutter; High-temperature and high-pressure; Small water hole oil and gas well; Drill pipe cutting; Underground test

随着国内油气资源深层勘探开发力度的加大, 超高温高压、超深、小水眼油气井越来越多^[1-2], 钻遇复杂地层出现遇阻、遇卡的风险也逐年提高, 尤其在新疆西部地区及川渝地区, 超深井温度达到200 °C左右、压力达到140 MPa、水眼直径为52 mm左右, 常规爆炸切割技术的耐温、耐压及切割性能均无法满足

当前施工环境的需求^[3-5]。因此, 开展超高温高压小水眼井下切割技术研究对于工程测井和油气资源的深层勘探开发具有重要意义^[6-7]。

本文针对井下2-7/8 in钻杆, 设计了一种小直径切割器, 利用ANSYS/LS-DYNA软件对切割器两端同时起爆切割钻杆的过程进行了仿真, 并通过地面试

收稿日期: 2023-10-13

作者简介: 郭同政(1974-), 男, 高级工程师, 主要从事测井、射孔技术研究及生产管理。

通讯作者: 李凯(1989-), 男, 工程师, 主要从事爆破器材技术研究。

引用本文: 郭同政, 李凯, 高强, 等. 一种高温高压井用小直径切割器设计及性能研究[J]. 火工品, 2024(2): 93-96.

验和井下试验对切割器的切割效果进行了验证。

1 切割器设计

1.1 结构设计

针对高温高压小水眼井下 2-7/8 in 钻杆，设计小直径切割器，其结构如图 1 所示。切割器由起爆接头、外壳体、线性聚能装药结构以及弹尾组成，外径为 $\Phi 36$ mm，总长为 500 mm。由于切割器直径过小，因此在线性聚能装药结构的两端同时起爆^[8-9]，使爆轰波在线性装药中心处叠加，从而大幅度提高其切割性能，实现小直径切割器切割大直径管柱的目的。

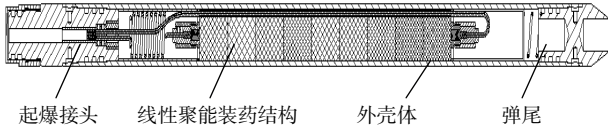


图 1 切割器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cutter structure

1.2 线性装药结构设计

线性聚能装药结构由上端、下端起爆单元、切割主装药及上端、下端固定座组成，如图 2 所示。上端、下端起爆单元均是从起爆接头内引出，相同长度，上端起爆单元缠绕成弹簧状结构延伸至切割主装药上端面，下端起爆单元沿切割主装药表面延伸至其尾部，通过上端、下端起爆单元同时起爆主装药，产生爆轰波叠加，从而切断钻杆。

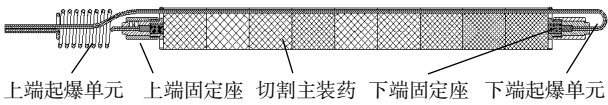


图 2 线性装药结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of linear charge structure

2 结构数值模拟仿真计算

2.1 数值模型

利用 ANSYS AUTODYN 软件对两端同时起爆方式下的爆轰波叠加过程进行仿真，其应力云图如图 3 所示。由图 3 可知，两端同时起爆后，爆轰波发生对碰，由原先的轴向传递转为径向传递，使爆轰波有效地向波阵面运动方向汇聚，在线性装药中心处叠加，爆轰能量达到最大，对此处的油田管柱进行切割。

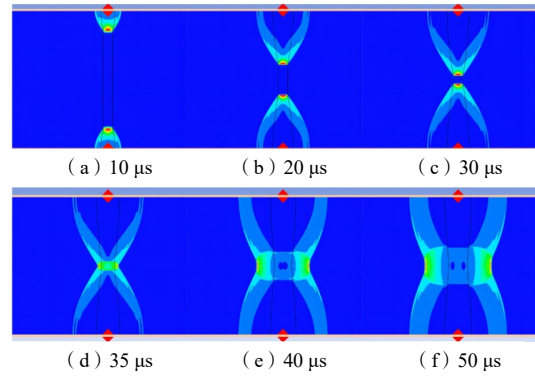


图 3 两端同时起爆方式下爆轰波叠加过程应力云图

Fig.3 Stress cloud diagram of detonation wave superposition process under simultaneous detonation at both ends

由于线性装药结构具有对称性，采用 ANSYS/AUTODYN-2d 二维 1/2 结构建立有限元仿真模型，如图 4 所示。对问题进行简化，初步计算时，忽略壳体的影响，仅考虑炸药、水及钻杆材料。其中，炸药采用多物质 Euler 算法，设置双同步起爆点，并为欧拉域设置非反射边界；水域边界采用 Flow-out，并设置固定压力为 105 MPa，网格大小为 0.5 mm；钻杆采用 Lagrange 算法，网格大小为 1 mm，钻杆材料设置侵蚀应变，防止拉格朗日网格畸变导致计算失败。

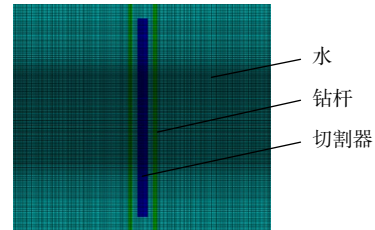


图 4 切割器井下切割钻杆仿真模型

Fig.4 Simulation model for cutting drill pipe by the cutter underground

2.2 材料模型及参数

装药选用 HMX 炸药，装药产生的爆轰产物采用 JWL 状态方程描述：

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{VR_1}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{VR_2}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式 (1) 中： P 为压力； E 为爆轰产物的内能； V 为爆轰产物的相对体积； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为实验拟合参数。炸药材料参数如表 1 所示。

表 1 炸药材料参数

Tab.1 Explosive material parameters

ρ (g·cm ⁻³)	p /kPa	D (m·s ⁻¹)	A /kPa	B /kPa	R_1	R_2	ω	E (kJ·m ⁻³)
1.891	2.15×10^7	7.03×10^3	7.7828×10^8	7.0714×10^6	4.2	1	0.3	1.05×10^7

钻杆材料选用优质碳素钢，其材料模型采用金属

材料的 Johnson-Cook 本构模型及 Shock 状态方程描述:

$$Y = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln \epsilon^*][1 - T^{*m}] \quad (2)$$

钻杆材料断裂应变为:

$$\epsilon = (D_1 + D_2 \cdot e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \cdot \ln \epsilon^*)(1 + D_5 \cdot T^*) \quad (3)$$

式(2)~(3)中: ϵ 为材料断裂应变; A 、 B 、 C 、 $D_1 \sim D_5$ 为与材料有关的常数; ϵ^* 为有效塑性应变率; T^* 为相对温度: $T^* = (T - T_m)/(T_{melt} - T_{room})$; σ^* 为压应力与有效应力之比, $\sigma^* = p/\sigma$; n 为应变率强化参数; m 为热软化强化参数。钻杆材料参数如表 2 所示。

表 2 钻杆材料参数

Tab.2 Drill pipe material parameters						
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	A/kPa	B/kPa	C/kPa	n	m	T_m/K
7.89	3.5×10^5	2.75×10^5	0.36	0.022	1.0	1 811

2.3 仿真结果

对 $\Phi 36$ mm 切割器两端同时起爆切割 2-7/8 in 钻杆的过程进行仿真,起爆过程的应力云图如图 5 所示,钻杆断裂时的应力云图如图 6 所示。

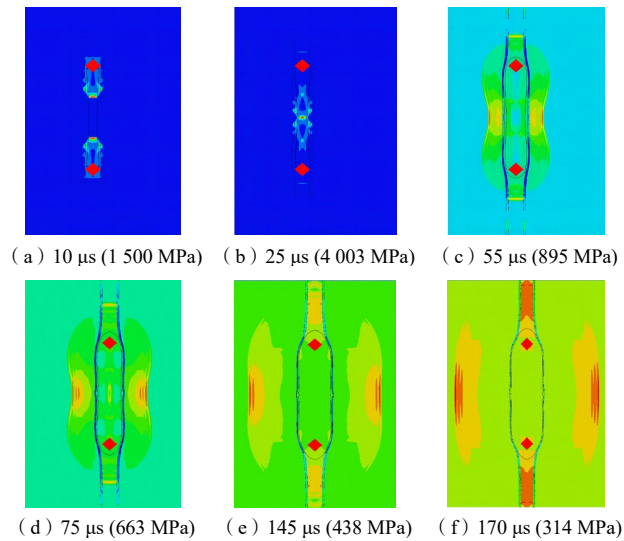


图 5 两端起爆过程应力云图

Fig.5 Stress cloud diagram of the detonation process at both ends

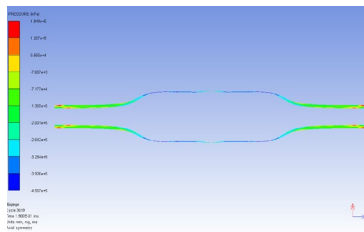


图 6 钻杆断裂时的应力云图

Fig.6 Stress cloud diagram during drill pipe fracture

由图 5~6 可知,两端同时起爆时,爆轰波在 25 μs

时发生对碰,叠加爆轰波峰的最大应力达到 4 003 MPa,此后,爆轰波由轴向传递转为径向传递,爆轰波应力开始下降,持续至 170 μs 时,爆轰波应力降至 314 MPa。钻杆在爆轰波持续叠加作用下,从中心处开始断裂。

3 试验验证

通过地面试验和井下试验对所设计的 $\Phi 36$ mm 切割器的切割效果进行验证。

3.1 地面试验

由于井下液柱压力是制约切割性能的最关键因素,因此进行地面试验时,将 $\Phi 36$ mm 切割器上端连接密封结构的点火总成,一并放入打压容器内,打压 30 MPa,以模拟井下压力环境,并将起爆脚线引出,在 30 MPa 条件下进行起爆,验证其切割性能,试验装置示意图如图 7 所示,切割效果如图 8 所示。由图 8 可见,在 30 MPa 压力条件下,所设计的切割器能够完全切断 2-7/8 in 钻杆。

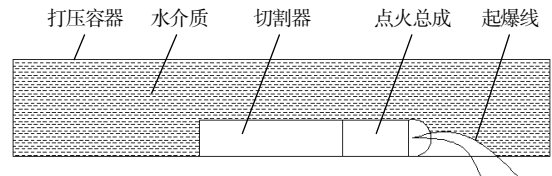


图 7 地面试验装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of ground testing equipment



图 8 地面试验中钻杆切割效果

Fig.8 Cutting effect of the drill pipe in ground tests

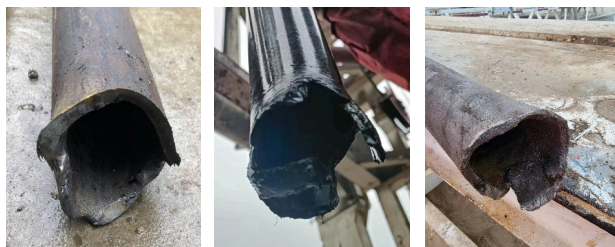
3.2 井下试验

井下试验时,与常规切割作业方法一样,将 $\Phi 36$ mm 切割器下至切割位置,采用电缆传输电能,引爆切割器,实现对目标管柱的切割。分别对 3 口井下 3 种尺寸的管柱进行切割试验,试验结果如表 3 和图 9 所示。由表 3 和图 9 可见,该切割器能够在压力为 95 MPa、温度为 160 °C 的井下进行切割作业,实现对 2-7/8, 3-1/2, 4-1/2 in 的多种规格钻杆的切割,且一次性切断钻杆,切割后切割装置接头无粘连、翻边小。

表3 井下试验条件及结果

Tab.3 Underground test conditions and results

序号	切割管柱 尺寸/in	切割 深度/m	切割位置 压力/MPa	切割位置 温度/°C	管柱最小 通径/mm	应用结果
1	2-7/8	3 800	60	120	Φ50	切割成功
2	3-1/2	4 060	46	130	Φ47	切割成功
3	4-1/2	7 500	95	160	Φ41	切割成功



(a) 2-7/8 in 钻杆 (b) 3-1/2 in 钻杆 (c) 4-1/2 in 钻杆

图9 井下试验中钻杆切割效果

Fig.9 The cutting effect of drill pipe in underground testing

4 结论

针对井下 2-7/8 in 钻杆,设计了一种外径为 $\Phi 36$ mm 的小直径切割器,在国内油井钻杆切割领域,首次采用两端同时起爆方式进行钻杆切割。仿真及试验结果表明该切割器能够在压力为 95 MPa、温度为 160 °C 的井下进行切割作业,实现对水眼大于等于 $\Phi 41$ mm

的多种规格钻杆的切割,且一次性切断钻杆,切割后切割装置接头无粘连、翻边小。本研究可为工程测井和油气资源的深层勘探开发提供技术支持。

参考文献:

- [1] 刘四海,蔡利山.深井超深井钻探工艺技术[J].钻井液与完井液,2002(06):121-126,163.
- [2] 王劲松,李冬梅.小井眼卡钻事故预防、处理与探讨[J].内蒙古石油化工,2011,37(19):79-80.
- [3] 肖汉甫,吴立,陈刚.实用爆破技术[M].北京:中国地质大学出版社,2009.
- [4] 徐永胜.油气井中的切割器研制[D].南京:南京理工大学,2003.
- [5] 费鸿禄,付天光,李德志,等.线性聚能切割器及其应用[J].爆破,2003(S1):114-116.
- [6] 祝逢春,邓振礼,胡瑜.线性聚能切割器的设计计算[J].火工品,2000(1):20-23,34.
- [7] 罗勇,沈兆武,崔晓荣,等.多点聚能切割爆破新技术[J].工程爆破,2006(02):1-4.

更正说明

2024年第一期文章《一种新型抗冲击曳光管设计与验证》更正说明如下:

原作者及单位为:

王伟杰,王刚,伍思荣,秦江超

(宜春先锋军工机械有限公司,江西宜春 336000)

WANG Wei-jie, WANG Gang, WU Si-rong, QING Jiang-chao

(Yichun Pioneer Military Machinery Co., Ltd., Yichun, 336000)

更正为:

王伟杰¹, 胥珪², 王刚¹, 时属龙², 王东², 伍思荣¹

(1. 宜春先锋军工机械有限公司, 江西宜春 336000; 2. 四川华川工业股份有限公司, 四川成都 610105)

WANG Wei-jie¹, XU Yao², WANG Gang¹, SHI Shu-long², WANG Dong², WU Si-rong¹

(1. Yichun Pioneer Military Machinery Co., Ltd., Yichun, 336000; 2. Sichuan Huachuan Industries Co., Ltd., Chengdu, 610105)

特此通知!

《火工品》编辑部