

铜柱测压在高能气体压裂技术中的应用

吴晋军 张新庆 蒋燕
(西安石油学院) (河南油田职工大学)

摘要 合理控制和设计峰值压力是高能气体压裂技术在油井使用的前提条件,准确地测试峰值压力是该技术研究的首要工作。铜柱测压不同于P-t测试仪,以结构简单、方便直观被广泛用于高能气体压裂中测定峰值压力。设计的新型铜柱测压器——超高压水油不浸入测压器,具有可靠的密封装置,保证铜柱的正规压缩,获得的测压值成功率高、准确度高,且成本低廉。对影响峰值压力的因素进行了分析,提出了对测压数值的处理方法及应注意的问题,以提高峰值压力的准确性,并对新型铜柱测压器应用结果进行了分析,其测压数值是可信的,为该技术的研提供了重要参数依据。

主题词 高能 气体压裂 压力 峰值记录 分析仪器 测试 应用

作者简介 吴晋军,1964年生。1987年毕业于西安石油学院石油机械工程系,现在高能气体压裂技术中心从事油田特种增产技术的开发研究与教学工作,获部级科研成果3项,局级成果奖5项,发表论文8篇,获集体专利5项,独立负责设计的“超高压水油不浸入测压器”1996年获陕西省专利成果一等奖,高级工程师。蒋燕,1987年毕业于西安石油学院,现为河南油田职工大学讲师。

铜柱测压是利用装在测压器内的测压铜柱的纵向塑性变形来测定膛压的,由于其结构简单,使用方便,又能满足精度要求,多用于军工部门测定火炮类的膛压。随着高能气体压裂技术的研究与应用,铜柱测压就成了测定峰值压力的主要手段之一,由于该测压技术在油井上使用必须满足2个前提条件:1. 确保套管无损,即峰值压力 $P_{\max} < P_s$ (套管屈服强度); 2. 燃气产生的峰值压力 $P_{\max} > P_p$ (地层破裂压力),才可望在地层产生裂缝。因此,准确测定峰值压力,并能研究控制其峰值压力是应用该技术的关键。尤其在工程应用方面为该技术应用效果的评价提供了重要参数依据,铜柱测压不同于储存式P-t仪^[1],直显式P-t仪^[2](注重压力随时间的变化过程测试,成本费用较高,施工复杂),它注重在工程应用时测定峰值压力,使用简单,方便直观。

一、新型铜柱测压器

我国高能气体压裂技术的研究与应用中,还未见到专门用于井下测定高能气体压裂峰值压力的装置,一般主要沿用传统的军工测压器,由于没有可靠的密封结构,使油水在还未产生高压时就进入铜柱测压腔,影响了测压铜柱的正规压缩,很难测到峰值压力,或测出的数值误差很大。为此,进行了多次试验和测试,研制成功一种新型的铜柱测压器——超高压水油不浸入测压器^[3]。它具有可靠的密封性,确保油水不进入测压腔,保证测压铜柱的正规压缩,测得的峰值压力准确性高,且成本只有原来的1/10左右。

1. 结构设计 确定测压器的规格,根据测压器与铜柱对应选择表^[4],选择欲测的膛压和

测压铜柱,确定活塞撞杆面积,这样测压器的规格就定了,设计的测压器结构见图1。

表1 测压器与铜柱对应选择表

测压器		欲测腔压 (MPa)	铜柱规格	
类型	活塞面积($\times 10^{-4} \text{m}^2$)		形状	尺寸(mm)
放入式 或旋转式	0.2	<30	圆锥形	$\varnothing 3 \times 4.9$
		25~80		$\varnothing 5 \times 8.1$
		80~180	圆柱形	$\varnothing 3 \times 4.9$
		180~350		$\varnothing 4 \times 6.9$
	350~420	$\varnothing 5 \times 8.1$		
	0.5	80~180	圆柱形	$\varnothing 5 \times 8.1$
		180~350		$\varnothing 6 \times 9.8$
	1.0	<100	圆锥形	$\varnothing 6 \times 9.8$
		<150		$\varnothing 8 \times 13$
		100~160	圆柱形	$\varnothing 6 \times 9.8$
160~400		$\varnothing 8 \times 13$		
340~410	$\varnothing 10 \times 15$			

新型铜柱测压器由活塞撞杆、活塞套筒体、螺盖装配形成一个测压空腔,对应的测压铜柱就放置在这个测压腔内;在活塞撞杆上设置两道装“O”型密封圈的密封槽,保证测压腔的密封性,活塞撞杆的作用是在超高压的作用下沿套筒体内表面轴间滑动,压缩测压铜柱;套筒体一端装活塞撞杆,另一端装螺盖,形成测压空腔;螺盖与套筒体之间通过螺纹连接,并装置“O”型密封圈,保证测压空腔的密封性,并起阻挡铜柱作用,其上端面开有矩形槽,目的是为装配方便;扶正套保证铜柱居中,不倾斜或倒下;弹簧装在活塞撞杆上端,保证在压前活塞撞杆与铜柱能紧密接触。

由于油水井井下成分复杂,有一定的腐蚀性,地层温度较高,测压器要受到较大的冲击及瞬间的高温,考虑到其重复使用性,因此选用耐腐蚀和强度高的硬质合金材料较为理想。

2. 工作原理 该装置在油水井井下高能气体压裂作用时,活塞撞杆由于受到瞬间超高压的推动作用,而相对沿活塞套筒体轴向运动,从而压缩了放置在测压空腔中的测压铜柱,使铜柱产生纵向压缩变形。压裂后,取出铜柱用千分尺测量其纵向长度,对照该铜柱压力表或计算

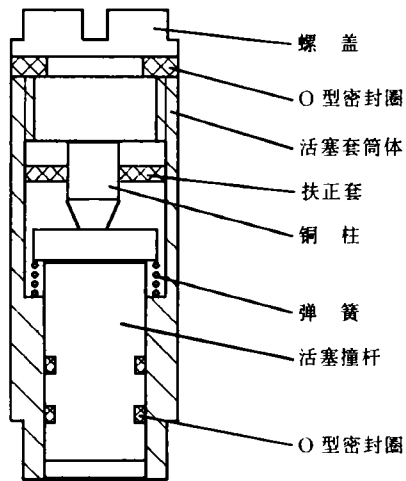


图1 新型铜柱测压器装置结构示意图

即可读出所测试的压力值。

3. 作用及特点 通过使用该测压器,能准确地测定油水井下高能气体压裂时的峰值压力。其特点是:测压器在超高压冲击作用下,水油不浸入测压空腔内,从而不影响测压铜柱的正常压缩,性能可靠。而且该测压器结构简单,装卸方便,有固定的弹架装置,一个弹架可同时装 2 个测压器,取其平均值,更趋于准确,符合一般测压常规。为研究高能气体压裂时压力梯度及其作用范围,可同时在电缆上串联数个测压器。在油管输送工艺中,也可灵活使用。

4. 弹架装置 该弹架为电缆施工工艺而设计,装置分为 2 个对称的结构,每半内装 1 个测压器,两半通过螺栓连接而紧紧固定夹在电缆上,弹架两端有一定锥度呈流线型,防止挂靠,减少阻力,夹在电缆上的 2 个半圆柱孔表面为无毛刺的锯齿状,安装固定好后不易松动,不易滑脱。

通过现场使用证明,该弹架结构简单,易于装配和固定,拆卸也方便,重复使用率高,且不易掉落。如采用油管输送工艺,只要在起爆器上设置测压器安装位置就可,或加接测压扶正短节。

二、高压试验

为进一步验证测压器密封可靠性,对其做高压试验,重点做了常温高压试验、高温高压试验,主要参数见表 2。

表 2 超高压水油不浸入测压器高压试验

测 压 器		试验压力 (MPa)	实测压力 (MPa)	相差 (%)	介质	温度 (℃)	备 注
类 型	铜柱规格(mm)						
放入式	∅8×13	100	110.9	10.9	水	常温	加压 10min 保压 30min 取出
放入式	∅8×13	120	181	50.8	水	175	加压 110min 保压 30min, 24h 后取出

注:相差=(实测压力-试验压力)/试验压力。

试验后认为:1. 测压器水油不浸入测压腔,无泄漏现象,密封可靠;2. 测压器无变形;3. 铜柱压缩形状规矩正常。

三、铜柱测压值的数据处理

1. 铜柱的选择 铜柱选用纯净的电解铜。合格的铜柱高度公差为±0.02mm,形状有圆柱形和圆锥形两类,试验证明,圆锥形铜柱在低压下,变形与压力有较好的线性关系,而圆柱形铜柱在压力较高时,变形与压力才有较好的线性关系,参看图 2。

静压可使铜柱充分变形,而铜柱测定高能气体压裂峰值压力,属于动压力,作用时间短,在 10~20ms 左右就达到最大压力,而且一现即逝,铜柱的变形跟不上压力的变化,活塞撞杆的惯性也增加了跟随误差,为减少误差应选择略小于欲测峰值值的预压铜柱,预压铜柱是指在测压前先使铜柱受一个静压力的作用,在高压作用下,铜柱只要产生一个较小的变形就可以了^[4]。一般高能气体压裂测试峰值压力时,多选用圆锥铜柱,预压铜柱值,根据需要选择。

2. 铜柱测压值的数据处理

(1)影响测压值的因素。影响铜柱测压值的因素很多,如铜柱规格,铜柱是否有裂纹、锈迹、脱皮等。其重要影响因素是井下环境温度,由于井下温度一般不超过 100℃,但在深井有时达到 150℃以上,铜柱塑性变形增加,所测压力值有时偏大,参看表 2,对此在分析时应予考虑。

(2)数据处理。一般为保证铜柱测压值的可靠性和准确性,同时使用2个测压器,取2个测压器的平均值作为测定峰值压力,即 $P_{max}=(P_1+P_2)/2$, P_1 、 P_2 分别为2个测压器测试的峰值压力(MPa); P_{max} 为峰值压力(MPa);若2个测压器测得的结果 $P_{大}$ 和 $P_{小}$ 两值相差超过4%时,应与其它测得值比较,取其正常值作为测量结果

$$x = \frac{P_{大} - P_{小}}{P_{小}} \times 100\%$$

如考虑温度对铜柱的影响时,要根据铜柱温度修正系数进行计算,从计算的峰值压力 P_{max} 中减去,就是实际峰值

压力,现铜柱温度修正系数只有 $+15\sim+50^{\circ}\text{C}$ 和 $+15\sim-40^{\circ}\text{C}$,对超过 50°C 时,还没有一个标准的修正系数,而目前使用大多超过 50°C ,对此一般比照估算,为提高峰值压力的准确性,还需进一步研究解决。

铜柱压力比真实的膛底最大压力低4%~20%,因此,在高压气体压裂时测定峰值压力,比实际峰值压力要低,为研究需要,应适当考虑峰值压力的增加值,有条件的也可比照实测的 $P-t$ 压力曲线,确定峰值压力。

(3)提高峰值压力准确性的途径。超高压水油不浸入测压器,其测压值的准确性已有很大提高,基本满足了研究工作的需要,为进一步提高测压值的准确性,在使用时应注意:

- ①选择合适的测压器和对应的铜柱或预压铜柱。
- ②装配时要严格按操作规程进行,使用时要认真检查,用后要清洗干净,妥善保管。
- ③在温度较高的井中使用时,尽量减少测压器在井下停留时间。
- ④由于高压气体压裂时,产生较高的温度,因此,测压器应安装在压裂作用范围内的适当地方,一般距弹顶位置5~10m。

四、应用及分析

该测压器经在中原、辽河、塔里木等油田的应用,取得了显著的效果,测试成功率在90%以上,未出现测压腔泄漏进水现象,铜柱压缩规矩正常,数值准确性高,该测压器可重复使用,实用性强,使用方便,表3是部分井应用实测数据。

从表3看,部分井实测数值与理论值是很接近的,误差不超过允许范围,但也有部分井实测值比理论值高,或相差比较大,出现这种情况的原因主要是:1. 高压气体压裂峰值压力计算还没有一套公认的成熟方法,适合不同井况压裂的峰值压力计算,所用的HEGF理论计算办法,只限适合某些局部井的情况,实测值与理论值不能作完全客观的比较,特别是对中深井、超深井等的HEGF的压力理论计算方法还处于探索阶段。2. 油井井下情况复杂,有许多如地层构造、射孔情况等复杂因素的影响及装药结构的不同等都可能对峰值压力的测定有一定的影响,所以测压值出现异常还需进一步的分析研究。

实测值的准确性主要是与测压器本身结构有关系,因实测压力值对高压气体压裂的计算方法起到直接的验证作用。该测压器与其它测试方法如 $P-t$ 测试仪等对比,实测压力值基本准确,能满足研究工作的需要。

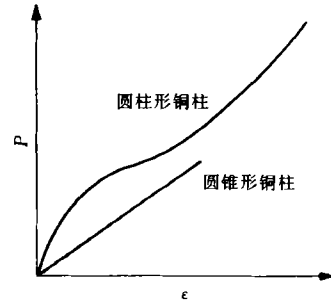


图2 铜柱压力变形曲线示意图

表3 (HEGF)超高压水油不浸入测压器实测压力与计算压力一览表

井号	井段 (m)	铜柱规格 (mm)	实测压力 (MPa)	计算压力 (MPa)	装药量 (kg)	距弹顶位置 (m)
卫302-1	3041.0~3045.0	∅8×13 ∅6×9.8	130.4	137.74	46.2	5
卫302	3039.3~3048.0	∅8×13→67.4 ∅6×9.8→68.1	67.4 68.1	78.58	36.6	8
P113	3464.0~3467.8	∅6×9.8	93.2	91.87	34.8	8
TZ411	3703~3715	∅8×13	132	125.3	49	5.7
TZ422	3234.5~3226.5	∅8×13	62.2	71.91	22	4.8
TZ422	3537~3554	∅8×13	123.1	127.3	51	5.75
TZ422	3235~3241	∅8×13	85.5	94.03	44	5.2
TZ421	3478~3494.5	∅8×13	111.8	126.9	56	6.1
TZ101	3726~3733	∅8×13	126.0	122.3	40	6
YM202	5937~5963	∅8×13	138.5	130	45	6

五、结论

1. 新型测压器较好地解决了在高能气体压裂时水油不浸入测压腔,保证了测压铜柱的正常压缩,测试峰值准确性高,成功率高,且结构简单、安装方便、成本低廉,可重复使用。

2. 该测压器在电缆施工工艺中有固定的弹架装置,保证了测压器使用的可靠性,在油管传输工艺中,也可方便灵活地使用。

3. 该测压器测试的峰值压力,经必要的修正后,可信度高,对高能气体压裂技术的开发研究、软件设计、尤其是工程应用方面有重要的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- 1 周静,付鑫生等.高能气体压裂测试方法研究.SPE 22 434 高能气体压裂机理研究
- 2 Gao Li, et al. A P-t Instrument Hoisted by Cable for Deflagration Fracturing of Oil Well 1995 International Symposium on Test and Measurement
- 3 吴晋军,王安仕,秦发动等.超高压水油不浸入测压器.专利号 ZL:93243631.5,1996 年获陕西省专利成果一等奖
- 4 第五机械工业部第二〇二研究所.火炮射击参数的常规测试(上册).1980—12

(收稿日期 1998—03—16)

(修改稿收到日期 1998—09—07)

[编辑 姚晓喻]

were further defined.

Subject heading log data rock mechanics parameter correlation stress sidewall stability

IMPROVEMENT OF MIXED TUBING — CASING FRACTURING TECHNOLOGY

by Zhang Zhaoxiang, Huang Kailin, Wang Yi

Abstract When conducting mixed tubing — casing fracturing, the fracturing fluid flow simultaneously through the tubing and the annulus into the formation. Because the flowing resistance in the tubing is different from that in the annulus, the flow rate and flow velocity also vary. This paper analyzes in detail the effect of flow velocity variance on the mixed tubing — casing fracturing; the designed sand — adding procedure changed, made the designed sand (with high sand fluid ratio) following the fracturing fluid lose its proper efficacy, and the displacing liquid volume designed with conventional method was not suitable to the mixed tubing — casing fracturing mode. After pointing out the problems resulted from the mixed tubing — casing fracturing, this paper presents three kinds of improvement methods: sand settling in rat hole, nozzle adjustment, and time closing of valve.

Subject heading tubing casing flow control fracturing fracturing fluid mobility ratio influence technical reform

APPLICATION OF COPPER COLUMN MEASURING PRESSURE DEVICE IN FORMATION FRACTURING WITH HIGH ENERGY GAS

by Wu Jinjun, Zhang Xinqing, Jiang Yan

Abstract The prerequisite of fracturing formation with high energy gas is to reasonably design and control the peak pressure. Different from P—t testing instrument, the copper column measuring pressure device, with the characteristics of simple, visual and so on, is used extensively to measure the peak pressure when fracturing formation with high energy gas. The newly designed copper column measuring pressure device is sealed reliably, and thus ensures the proper compressing of the copper column. Therefore, by means of it, peak pressure can be measured more successfully and accurately. This paper analyzes the factors influencing the peak pressure, presents the disposal method to the measured pressure and the problems need to note. This paper also analyzes the application result of the new type copper column measuring pressure device, and concludes that the measured pressure is believable.

Subject heading high energy gas fracturing pressure spike record analyzer testing application

RESEARCH OF INTEGRAL BLOCK PROFILE CONTROL SCREENING TECHNIQUE

by Bai Baojun, Li Yuxiang, Liu Xiang'e

Abstract The integral block profile control technique is one of the important measures for inhibiting the integrate water cut increasing and enhancing the stage recovery percent in a block. This paper presents a set of screening method suitable to the integral block profile control. By using the method, proper wells, layers and agents can be selected, consuming amount of profile control agent can be optimized, and effect prediction and economic evaluation can be conducted simply, rapidly and accurately. The method can meet the demands of integral block profile control screening.

Subject heading fault block profile control screening effect prediction economic evaluation