

# 关于高能气体压裂 技术

---

# 高能气体压裂的增产原理

- **2.1.1 高能气体压裂的概念**
- 高能气体压裂利用火药或火箭推进剂燃烧产生的高温、高压气体压出多条径向裂缝以取得增产效果的方法。
- 高能气体压裂工艺分为井内增压、造缝和裂缝延伸三个阶段。在井眼增压期间，井内发生弱性变形同时地层内的自然裂缝受到高压。推进剂产生的气体的简单作用就象在一个密闭腔内一样。此时压力随时间线性增加。

# 高能气体压裂的增产原理

- 一般来说，炸药爆轰的增产效果远小于火药燃烧。爆炸产生的尖压力脉冲的增产效果远小于平缓的压力脉冲，也就是说炸药爆轰的增产效果远小于火药燃烧。炸药的燃烧速度以 $\text{km/s}$ 计，点火后会形成爆轰波；火药的燃烧速度以 $\text{mm/s}$ 计，最大也不超过 $10\text{m/s}$ 。炸药的燃烧速度与环境条件无关，而火药的燃烧速度受环境温度和压力的影响。火箭燃料（推进剂）近似于火药。

# 高能气体压裂的增产原理

- 常用的火药是硝化棉和炮药。硝化棉由致密的硝化纤维。极少量残留溶剂和水组成。炮药也叫发射药是硝化纤维在不易挥发溶剂（一般是硝化甘油）中的固体溶液。炮药比硝化棉的能量高，一般含有降低燃烧温度的钝化剂及稳定剂。

# 高能气体压裂的增产原理

- 火药的燃烧速度虽然远较炸药慢，但火药燃烧造成的升压速率比水力压裂要快得多；水力压裂的升压时间以分计，而高能气体压裂的升压时间以毫秒计。随着井筒内升压速率的增高，在井附近不仅仅是在垂直最小地应力方向产生两条缝，而是产生多条径向缝，在离井筒较远处，这些径向缝仍按最大主应力方向延伸。裂缝条数主要取决于升压速率（峰值压力除以达到峰值压力所需的时间），升压速度太高易引起地层伤害，而太低则只能在水力压裂易于产生裂缝的方向形成裂缝。

# 高能气体压裂的增产原理

## ■ 2.1.2 高能气体压裂的作用

### ■ 1. 机械作用

- 火药或推进剂燃烧产生的高压气体，在超过岩石的破裂压力的条件下，在井附近产生多条径向裂缝。由于裂缝不都是在垂直于地层的最小主应力方向，裂缝面上的切应力不为零，一旦裂开就会错动而不会闭合。其次，压力超过一定限度后，岩石会产生塑性变形，所以当压力下降后仍有残余裂缝。

# 高能气体压裂的增产原理

## ■ 2. 水力振荡作用

- 火药压力发生器是在井中存在液柱条件下引燃的，随着高温、高压气体的产生将会推动井中液柱向上运动，而随着体积增大，气体压力又会下降，从而引起液柱向下运动。液柱向下运动压缩火药燃烧产生的气体，除部分流入地层外，会造成压力升高，又把液柱推上去，如此产生压力周期的衰减波动。这种压力周期波动有助于裂缝形成和清理储层堵塞。

# 高能气体压裂的增产原理

## ■ 3. 高温热作用

- 高能气体压裂施工后的井温测试表明，在火药弹点燃后的一段时间内，井温可升高到 $500\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，开始下降很快，以后在几个小时内变慢，足以熔化沉淀在油井附近的石蜡与沥青，同时降低油的粘度。

## ■ 4. 化学作用

- 火药燃烧后的产物主要是 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 和部分 $\text{HCl}$ ，这些气体在高压下都会溶于原油，从而起到降低原油粘度和表面张力的作用，达到增产效果

# 高能气体压裂的增产原理

- **2.1.3 高能气体压裂的优点**
- 1. 由于裂缝穿过伤害区域达到未伤害区域, 消除了近井地带伤害影响;
- 2. 供了连到整个待处理层的通道, 使地层适于注入增产液体 (如酸液等);
- 3. 对一个或多个薄层的局部进行选择性的增产作业而不压裂不希望作业的层位, 如含水水层;
- 4. 在水力压裂或注液体前使地层破裂, 用于常规破裂可能无效的井。

# 高能气体压裂使用的设备

## ■ 2.2.1 火药压力发生器

- 目前使用的压力发生器有三种类型：有壳火药压力发生器、无壳火药压力发生器和液体火药。

### ■ 1. 有壳火药压力发生器

- 装置见图2—1。药柱外面有金属外壳保护，用电缆传输，磁定位确定点火位置，通过电缆地面点火。具有施工安全、成本低、周期短、易下井等优点。

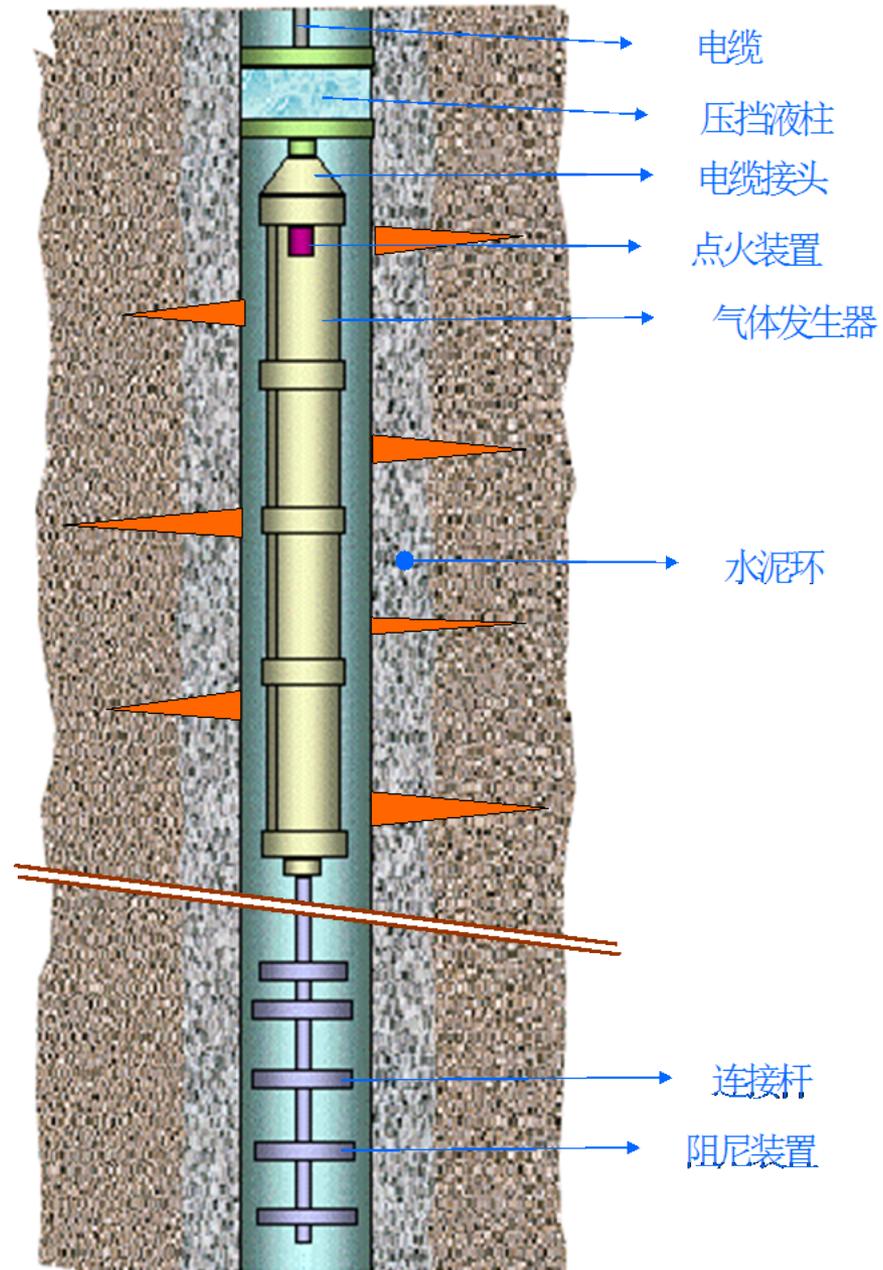


图2—1 有壳火药压力发生器示意图

# 高能气体压裂使用的设备

## ■ 2. 无壳火药压力发生器

■ 无壳火药压力发生器的典型结构如图2—2所示。

■ 全部表面都涂以防水层，外表覆以防磨损的保护层的药柱装在铝制中心管上，中心管的两端有螺纹可以通过短节将药柱连在一起，在最下部药柱的底部拧死堵头，电缆头内装点火盒，在中心管内装有点火药，点火盒点燃后，引燃点火药，加热中心管，再引燃药柱。由于中心管为铝质，导热性很好，各药柱几乎同时燃烧。

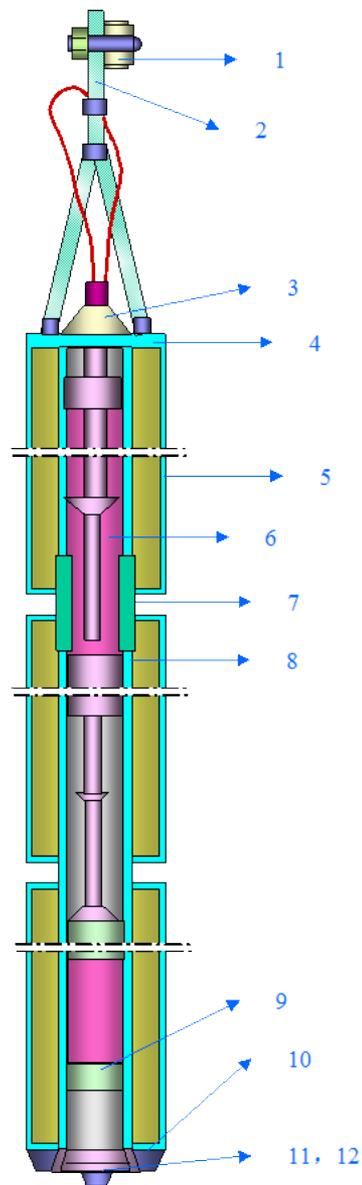


图2-2 无壳压力发生器（一）

1—测压蛋；2—电缆；3—电缆头；4—垫圈；  
5—药柱；6—点火药；7—短节；8—密封盒；  
9—丝堵；10—底盘；11—螺栓；12—螺帽

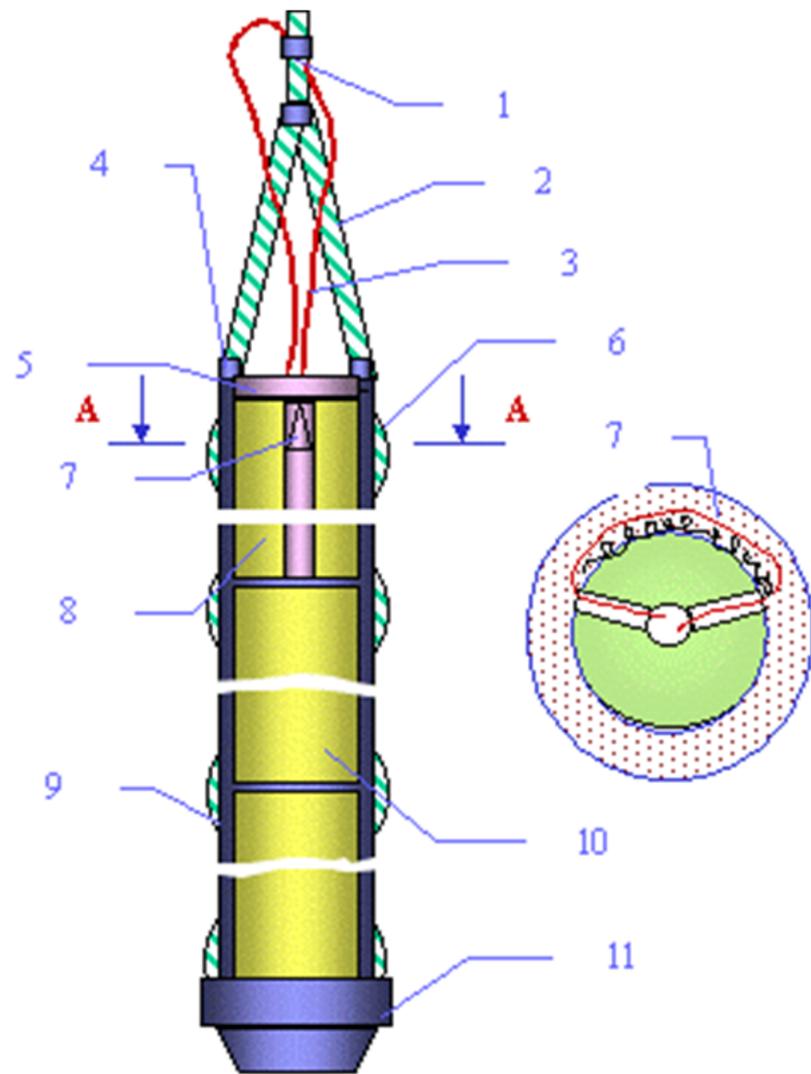


图2-3 无壳压力发生器（二）

1—绳卡；2—钢丝绳；3—导线；4—细丝；  
5—压盖；6—套箍；7—电热线圈；8—点火药柱  
9—套筒；10—药柱；11—底座

# 高能气体压裂使用的设备

- 如果用油管送弹，则用撞击点火器代替电缆头，用投棒点火代替电缆点火。
- 另一类型的无壳火药压力发生器如图2—3，没有密封外壳，靠药柱外表面轴向槽用钢丝绳连接，药柱下面有托盘托住，有的药柱有中心孔，有的无中心孔，二者都用密封的电阻丝加热点火，有中心孔的底部还装有点火器。药柱开始是端面燃烧，随后变成全面燃烧。这类火药压力发生器一次用药量比装有中心孔的无壳压力发生器高20~40%。

# 高能气体压裂使用的设备

## 3. 液体火药

由于受固体火药性质的限制装药量不能太大，其总的增产效果不及水力压裂，而液体火药压裂技术，与无壳火药压力发生器比具有成本低、能量高、燃烧时间长，压裂效果显著等优点。

液体火药是由氧化剂、燃烧剂和水按一定的比例配制而成。这种液体火药抗冲击、静电、摩擦及热稳定性非常强，通常条件下不会起爆，只有用点火弹才能引燃，施工时用泵车将配制好的液体火药注入井内。液体火药注入前后，需打入隔离液或下入隔离器，用电缆车通过磁定位把点火弹下到射孔段，地面控制电源点火。

# 高能气体压裂使用的设备

## 2.2.2 高能气体压裂动态测试仪器

### 1. 井下存储式 $p\sim t$ 测试仪

测试仪由地面仪器和井下仪器两部分组成。地面仪器包括一台微型计算机和一个专门接口，主要实现数据的回收和处理任务；井下仪器则由撞击导电机构、电子线路、电池组、点火系统、压力传感器和机械外壳等组成。高能气体压裂下弹过程结束后，给井下仪器通电，仪器控制模块使点火头与点火电源相连，引爆压裂弹，同时启动采集与记录模块，将火药点燃后造成的井筒内压力变化过程记录下来。压裂结束后，将测试仪器提出井筒，与地面仪器专用接口相连接，读出并处理电子记录模块中的 $p\sim t$ 过程数据。

# 高能气体压裂使用的设备

- **2. 地面直录式 $p\sim t$ 测试仪。**
- 该仪器分为井下数据采集部分与地面记录部分。井下数据采集部分包括压力传感器、压力变送器及其附属电路；地面记录部分包括输入阻抗放大器、转换器、89C51单片机、打印机与点火直流高压发生器等。当压裂弹及 $p\sim t$ 测试仪下到目的层位后按下点火系统，同时
- 启动89C51单片机控制系统开始数据采集工作

# 高能气体压裂的适用范围

## 2.3.1 高能气体压裂适用岩性

- 1. 高能气体压裂由于加载速率较高，从而决定了其适用的岩层是脆性地层，对于塑性地层则不甚适用，而对泥岩地层，反而可能产生“压实效应”。
- 2. 适用于高能气体压裂技术的岩性有石灰岩、白云岩和泥质含量较低（小于10%）的砂岩。高能气体压裂技术不适用于的岩层有泥岩、泥质含量较高（大于20%）的泥灰岩和砂质泥岩等。此外，胶结疏松的砂岩地层，压后可能引起严重的出砂问题，应慎重对待。

# 高能气体压裂的适用范围

- 3. 由于高能气体压裂只能降低渗流阻力，所以只适用于地层压力高、含油饱和度高的油层。
- 4. 由于注水井井底经常处于高压状况，高能气体压裂增注效果优于油井增产效果。

# 高能气体压裂的适用范围

## ■ 2.3.2 高能气体压裂选井选层

### ■ 1. 探井试油

■ 探井在钻井过程中如果由于钻井液或完井造成油层污染，此时高能气体压裂比水力压裂和酸化都方便、便宜。国内外实践证明，不论探井钻遇的岩性、油层物性好与坏，都可运用高能气体压裂技术。

### ■ 2. 产井

■ 特别适用于处理地层能量高、含油饱和度高、井底附近被伤害的油气层。也适用于物性差的低产层，甚至停产层。

# 高能气体压裂的适用范围

## ■ 3. 水井

- 利用高能气体压裂，一方面可解除近井地带的污染堵塞，另一方面，产生的径向多裂缝体系改善了注水驱替前沿，调节由层间差异造成的不合理注水剖面，从而增强油藏整体开发及注水效果。

## ■ 4. 天然裂缝较发育油气层改造

- 高能气体压裂产生的径向多裂缝体系，增加了与天然裂隙沟通的机会，从而可以利用地层的天然裂隙，获得较好的增产效果。

# 高能气体压裂的适用范围

- 5. 水敏、酸敏油气层改造
- 由于地层岩性的特征，决定了此种油气层不适合于进行水力压裂和酸化处理。而高能气体压裂对地层几乎没有伤害，不会产生这种负作用。
- 6. 戈壁、沙漠、海滩等区域油气井增产
- 在这些地区，道路、井场、水源等施工条件比较受限制，不适合工艺复杂、施工规模很大的增产措施。而高能气体压裂工艺简单，施工方便，设备要求少，便于在这些地区发挥作用。

# 高能气体压裂的适用范围

- **7. 地层破裂压力异常高地区的水力压裂和酸化预压裂**
- 高能气体压裂由于其产生的最高压力远高于地层破裂压力，且升压速率高，极易在这些地层中造成多条径向裂缝，降低破裂压力，从而提高水力压裂和酸化的成功率和施工效果。高能气体压裂和水力压裂、酸化相结合的施工已在多个油田取得成功

# 高能气体压裂的适用范围

## ■ 2.3.3 高能气体压裂效果影响因素

- 1. 裂缝长度与封闭压力成反比，与岩石的杨氏模数成正比。
- 2. 降低套管伤害主要靠增加射孔孔径，增加射孔数量也可实现其目的。
- 3. 无论井内有无液体，其裂缝的几何形状都相同。

# 高能气体压裂设计

- 形成不闭合残留垂直裂缝的条件是：
- $(P - P_f) / \sigma_h = E_2 / (E_2 - E_1)$
- 式中  $P$ ——药柱燃烧产生的压力；
- $P_f$ ——地层压力；
- $\sigma_h$ ——水平地应力；
- $E_1$ ——岩石加载弹性模量；
- $E_2$ ——岩石卸载弹性模量。

# 高能气体压裂设计

- 一般 $E2/E1=3\sim 10$ ，只要药柱燃烧产生的压力等于岩石压力就可以压开地层。但要形成残余缝还必须要有足够的流体进入裂缝，压力升高时间尽量长才行。
- 施工设计的基本参数是：最大压力、压裂弹燃烧时间、进入裂缝的流体、气体数量。在井底附近形成不闭合裂缝的条件是火药燃烧产生的压力应不小于岩石压力，同时应保证这个压力小于套管的抗内压强度。

# 高能气体压裂设计

- 高能气体压裂设计的根本任务是在不破坏套管的情况下，尽量提高装药量以压出长裂缝、解除污染、提高产量。

- 药量与火药燃烧产生的最大压力及挤入地层的流体体积的关系，必须用火药燃烧规律方程、考虑了压缩性和水力阻力的井内流体运动方程、孔眼节流方程、驱替液体进入地层和火药气流入随之形成并延伸的裂缝的方程等组成的微分方程组来模拟。模拟火药弹的工作过程，可获得不同地质条件、不同药量产生的最大压力所压出的裂缝长度和宽度随时间变化的规律

# 高能气体压裂现场施工工艺

- **2.5.1 钢丝绳送入，水泥塞封堵，地面引燃施工工艺**
- 这种工艺见图2—4，它是用钢丝绳把气体发生器和引燃导线送入设计的施工井段，在气体发生器以上3~5m打水泥塞封堵。若施工段以下口袋较长时，就要在气体发生器下入之前先打一个水泥塞。

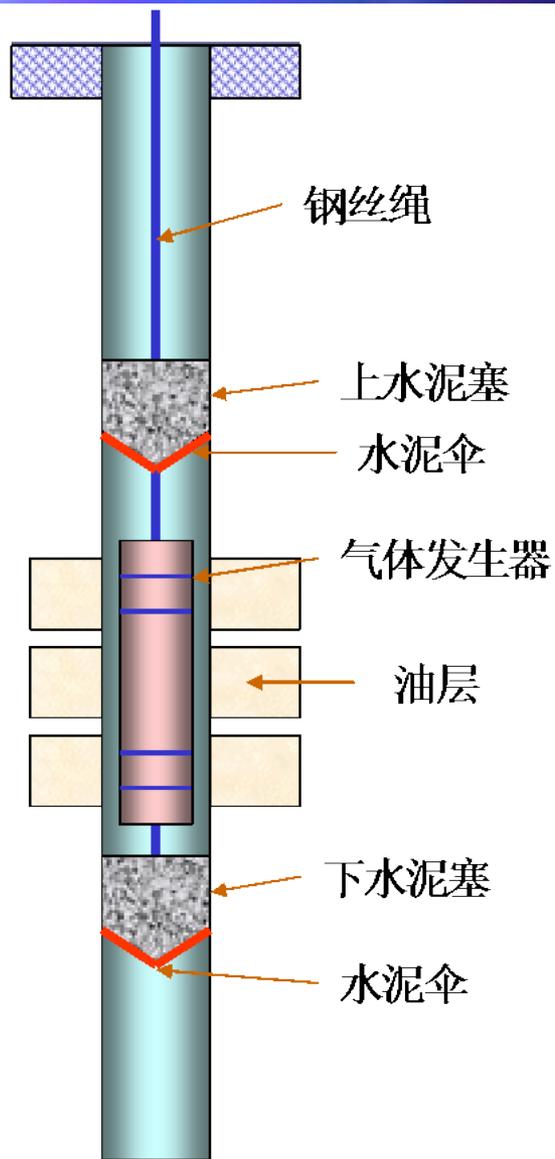


图2—4 钢丝绳起下，水泥塞封堵，地面引燃施工工艺示意图

# 高能气体压裂现场施工工艺

■ 水泥塞高度计算公式如下：

■  $H = K_s PD / 4C$

■  $H = 139G^{1/3}$

■ 式中H——水泥塞高度， cm； $K_s$ ——抗滑安全系数，取 $K_s = 3 \sim 4$ ；p——最高燃气压力， MPa；  
D——井径， cm；C——抗剪切强度， MPa；  
G——火药用量， kg。

■ 水泥塞封堵方式安全可靠，但对深井及套管完成的井难度较大，而且施工麻烦，周期较长。因此，这项工艺仅适用于产能低的中深井。

# 高能气体压裂现场施工工艺

## ■ 2.5.2 电缆送入，液柱压挡，地面引燃施工工艺

- 这项工艺是用射孔电缆车把气体发生器送至目的层段，采用液柱（水、油或压井液）压挡，地面通电引燃。如图2—5、图2—6所示。

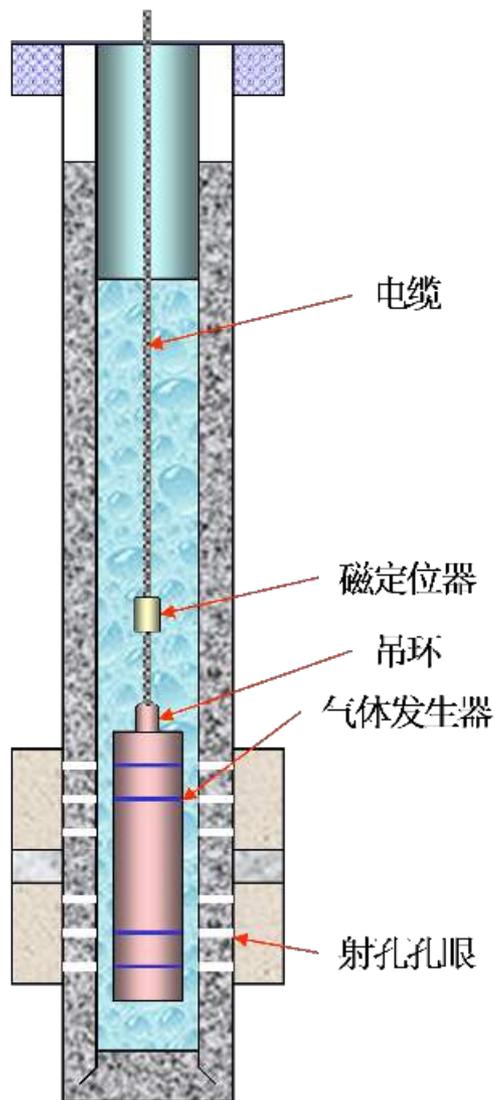


图2-5 电缆起下，液柱压档，地面引燃施工工艺示意图（玻璃钢外壳）

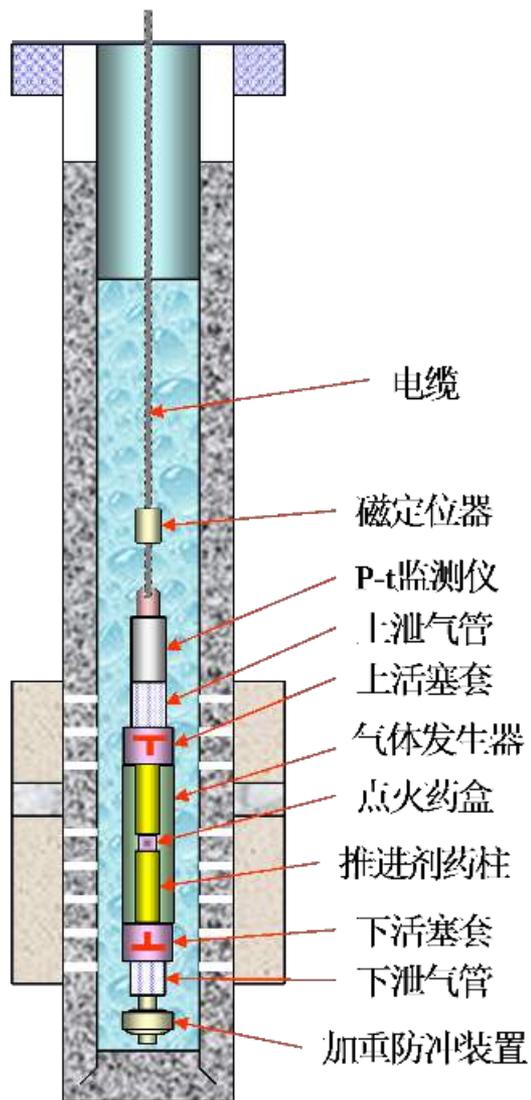


图2-6 电缆起下，液柱压档，地面引燃施工工艺示意图（金属外壳）

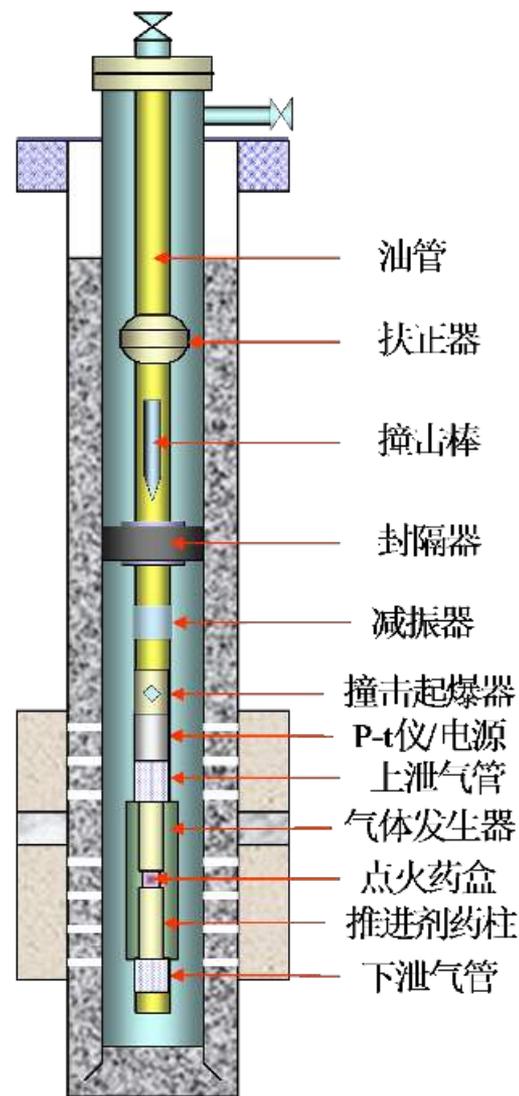


图2-7 油管输送，封隔器加液柱复合压档，撞击引燃施工工艺示意图

# 高能气体压裂现场施工工艺

- 通过压档液柱高度对火药燃气的峰值压力、各特征时间、造缝长度、液柱举升位移等影响的理论分析认为：压档液柱的高度不得小于500m，同时考虑到气体发生器外壳承压及密封等问题，压档液柱高度不应大于1500m，实际施工建议保持在1000m左右。此项工艺适用于中深裸眼井及套管完成井的解堵。它具有动用设备少、施工时间短，安全可靠等优点，是目前国内外采用最多的一种方法。其缺点是部分火药燃气能量消耗在使压档液柱运动上。

# 高能气体压裂现场施工工艺

## ■ 2.5.3 油管输送、封隔器加液柱复合压档，撞击引燃施工工艺

- 这种工艺见图2—7。此项工艺是用油管把气体发生器、监测仪、撞击起爆器及封隔器等输送到设计井段。首先坐封封隔器，之后在油套环空加10~20MPa的平衡压力，最后在井口向油管内投棒，撞击引燃气体发生器。此工艺适合于各类生产井、水井和气井。它还易于进行分层及多层压裂。施工简便，撞击引燃技术可靠安全。

# 高能气体压裂现场施工工艺

- 2.5.4 三种高能气体压裂解堵施工工艺的综合对比
- 施工工艺
- 钢丝绳起下，水泥塞封档，地面引燃施工工艺
- 电缆起下，液体压挡，地面引燃施工工艺
- 油管输送，封隔器加环压复合压挡，撞击引燃施工工艺

# 高能气体压裂现场施工

## ■ 2.6.1 施工准备

- 1. 根据压裂设计要求进行通井、洗井、冲砂、替换压井液，降液面作业；
- 2. 井筒内压井液柱高度及性能满足设计要求；
- 3. 根据井眼及地层情况选择压裂弹体型号、规格、弹体组成、装药量、承压、峰值压力等，并做好高能气体压裂设计。

# 高能气体压裂现场施工

## ■ 2.6.2 施工工序

- 1. 起出原井内的生产管柱；
- 2. 用小于套管内径（2~4mm）的通畅规通至人工井底，通畅规大端长度不小于1.5m，壁厚3~4mm；
- 3. 洗井、测井；
- 4. 下高能气体压裂管柱，引爆；
- 5. 起出高能气体压裂管柱；
- 6. 下生产管柱试生产；

# 高能气体压裂现场施工

## ■ 2.6.3 注意事项

- 1. 为了避免液体喷出井口，施工时井内液面离井口50~60m为宜。
- 2. 操作人员应经高能气体压裂技术培训，身着防静电衣服及鞋。
- 3. 现场施工时操作人员不超过3名，轻拿轻放，不碰撞或敲打铁器。施工时井场不许有烟火，同时井场内应有相应的防火设施。
- 4. 装配时应严格检查压裂弹及其配件质量，不符合施工要求的坚决不用。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/745310122011011132>