

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.01.009

油井高聚能压裂技术及其在煤层气开采中的应用^{*}

李建科^① 陈东明^① 邹 蓓^②

^①甘肃兰金民用爆炸高新技术公司(甘肃兰州,730000)

^②中国市政工程中南设计研究总院有限公司(湖北武汉,430000)

[摘 要] 为解决煤层气的增产改造难题,将油井工程中较成熟的高聚能压裂技术应用到煤层气开采中,并通过加入强支支撑剂、新型高聚能材料,改变点火孔数量及位置等方式对其进行改进,以提高煤层气井的采收率。为验证高聚能压裂技术在煤层气井中的应用效果,选择了部分井层开展了现场试验及应用效果评价。结果显示:煤层气井中实施高聚能压裂技术的工艺简单、成本较低、不污染地层,对煤层气井降压解析、提高产气量具有较好效果。

[关键词] 煤层气开采;高聚能压裂;产气量

[分类号] TJ410.4;TE357

High Energy Accumulation Fracturing Technology and Its Application in Coalbed Methane Exploitation

LI Jianke^①, CHEN Dongming^①, ZOU Bei^②

^① Gansu Jinmin Industrial Explosives High Technology Co., Ltd. (Gansu Lanzhou, 730000)

^② Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. (Hubei Wuhan, 430000)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of increasing production of coalbed methane (CBM), a high energy fracturing technology, which is a mature technology of oil well engineering, was applied in CBM extraction. A support agent and new polymer materials were added in high energy fracturing bombs. Location and number of the ignition holes in high energy fracturing bombs were changed. And then, recovery rate of CBM was improved fairly. Besides, field tests and application effects evaluation were carried out in some CBM wells to verify the application effect of high energy fracturing technology. Results show that the implementation of high energy fracturing in CBM extraction enables simple process, low cost and no pollution of coal seam, which presents a good effect on improving the gas production and decreasing pressure of CBM wells.

[KEYWORDS] coalbed methane extraction (CBM); high energy accumulation fracturing; gas production

引言

煤层气是一种较新的清洁能源产业,俗称瓦斯,与煤层伴生,主要成分为甲烷(CH₄),可与天然气混输混用,与天然气、天然气水合物并称为三大气体资源。我国煤层气资源较为丰富,分布相对集中,储量在世界上位于俄罗斯、加拿大之后,是第三储量大国^[1]。产业调研网发布的中国煤层气市场现状调研与发展前景分析报告(2016-2020年)^[2]认为,目前,我国埋深2 000 m以内的煤层气资源量超过30

万亿立方米,相当于450亿吨标煤,350亿吨标油,与陆上常规天然气资源相当^[3-4],适合开采的潜力巨大。

虽然我国煤层气资源储量丰富,但煤储层多为低渗透率、低储层压力、低含气饱和度,开发难度较大^[5]。目前,水力压裂成为一项比较成熟而完善的增产改造技术^[6-7],在煤层气开采中起着重要作用;但该技术设备投入多、费时费力,产生的裂缝易受地应力限制,加之压裂液对煤储层的伤害(例如吸附伤害、堵塞伤害、水化膨胀伤害、化学伤害等),对煤储层改造效果不尽人意,急需其他技术补充和完善。

^{*} 收稿日期:2017-06-20
基金项目:甘肃省科技支撑计划——社会发展类(1604FKCA124 高聚能脉冲压裂技术在煤层气开采中的应用)
作者简介:李建科(1975-),男,工程师,主要从事高能气体压裂方面的研究。E-mail: 1317114024@qq.com

在此背景条件下,王建中^[8]、李俊峰^[9]等通过应用高能气体压裂技术^[10]对煤层气开采进行试验研究,发现高能气体压裂可以有效地压开煤储层,说明高能气体压裂技术在煤层气开采中是可行的。并且,高能气体压裂技术因施工成本低、形成的裂缝适中、对储层几乎无污染等特点^[11],在国内外油气田开采领域得到广泛应用^[12-13],其技术施工工艺已基本成熟,在油气田开采方面具有独特的优势和良好的应用前景。

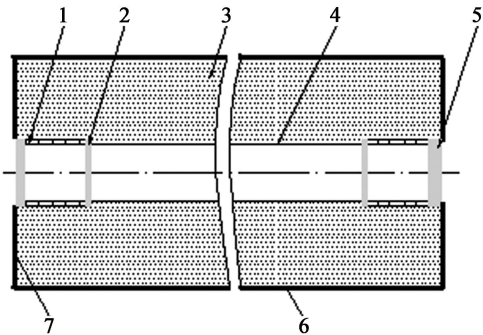
本文中,结合煤层气井的地质特点,对原有高能气体压裂弹弹体以及传火方式加以改良,增大煤层气井的产气量,生成多条径向裂缝,沟通天然裂缝,阻止裂缝愈合,提高渗透率,加快煤层解析速度,降低残余吸附量,从而实现增加采收率、降低开采成本以适应煤层气开采的要求。

1 高聚能压裂技术

高聚能压裂是一种新型的高能气体压裂技术,其传统工艺为高能气体压裂(high energy gas fracturing,简称 HEGF),是20世纪70年代兴起、80年代迅速发展起来的一种压裂增产技术。它是利用火药在井下迅速燃烧,产生大量高温、高压气体,在近井地带(井筒附近)形成能与天然裂缝沟通的径向多裂缝,提高地层的导通能力^[14-15];并且由于压裂过程中的热作用、化学作用、负压吞吐作用以及井筒内压档液柱上下运动所形成的水击作用和脉冲作用,清除近井地带的污染、堵塞,改善近井地带渗流环境,从而达到油气井增产、注水井增注的目的^[15-16]。高聚能压裂技术是将火药直接成型为一定长度和直径、带有中孔的圆柱状,中孔内装配起支撑、连接、密封作用的铝芯轴,形成内腔密封、具有点火和传火功能的压裂弹^[17]。

压裂弹的剖面结构如图1所示。

每节压裂弹为一单元,通过连接装置可将多个压裂弹单元相互连接,满足不同装药量的需求;压裂弹上部配以起爆装置,下部配以尾堵成为压裂弹总成。根据施工井现场具体情况选择油管传输或电缆传输,将压裂弹传输至煤层气措施层,通过地面投棒或通电点火起爆装置完成压裂施工。高聚能压裂弹是压裂的能量源,如何控制压裂弹燃烧速度,在对油井、煤层气井套管起到很好的保护作用的前提下,根据不同油井、煤层气井、油层、煤层特点,实现针对化、精细化的施工,取得较好的压裂效果,是压裂技术研究和应用的发展方向。



1 - 密封胶;2 - O 型圈;3 - 药柱;4 - 铝芯轴;
5 - 矩型圈;6 - 包覆层;7 - 胶皮。

图1 高聚能压裂弹剖面结构图
Fig.1 Section structure diagram of the
high energy fracturing bomb

2 高聚能压裂弹的改进

2.1 加入强行支撑剂

高压气体可以在近井地带形成能与天然裂缝沟通的径向多裂缝,提高地层的导通能力。但一般在高压状态消失后,一定量的裂缝回弹闭合,降低了压裂效果。为解决这个技术难题,在压裂弹浇筑初期加入强行支撑剂,该支撑剂为不规则颗粒(见表1),造缝后随着压裂气体进入地层裂缝,有效阻止裂缝愈合,增加孔隙度,改善煤层气体解析环境。

表1 强行支撑剂技术指标

Tab.1 Technical index of the forced propping agent	
外观	不规则颗粒
颗粒直径/mm	1~6
水溶性	非溶解
抗压强度/MPa	60
密度/(g·cm ⁻³)	2.0~2.5

2.2 增加聚能弹产气量

因加入强行支撑剂,使原压裂弹体积内总药量减少,致使产气量下降,峰值压力降低,脉冲波威力减小,造缝较浅。为了解决这一难题,对原压裂弹药柱配方加以调整,加入新型高聚能材料,增加了产气量,使峰值压力增加,有效压开地层。

2.3 控制压裂弹燃速

2.3.1 压裂弹结构

对原压裂弹铝芯轴的点火孔加以改动,改变单位长度内点火孔的数量与位置,来控制压裂弹的燃烧速度,形成一系列燃速不同的压裂弹,根据设计需要选配不同燃速压裂弹单元组成压裂弹总成,满足

不同井况和地质条件下的压力加载条件,以控制压力上升速度、压力作用时间和峰值压力参数,改善压裂效果,从而达到最佳的压裂效果^[18]。

压裂弹内部结构由点火药、铝芯轴、火药柱等组成。火药柱为中空圆筒状,铝芯轴设置于火药柱内部的空腔内,外周壁与火药柱内周壁贴合;铝芯轴呈中空筒状,内装有点火药;它还包括泄压部,泄压部对称置于火药柱的两端,外侧与火药柱的内周壁贴合,内侧与铝芯轴的外周壁贴合;铝芯轴侧壁设有至少 1 组点火孔,每组点火孔数量为 3~6 个,每组点火孔均布在垂直于中铝芯轴轴向的同一平面上。根据压裂弹所需燃速,确定点火孔的组数^[19];根据点火孔的组数,设置铝芯轴侧壁上点火孔的位置,一组点火孔等于一个点火点。经过试验,选取铝芯轴侧壁每米设 1~30 组点火孔,点火孔由 4 个组成一组,4 个点火孔在垂直于铝芯轴轴向方向的同一平面上均匀排列,相邻的两组点火孔之间相对于铝芯轴的轴线形成 90° 夹角。通过这样的构造,能够很好地控制点火点在各个方向上的燃速,从而更好地控制整个压裂弹的燃速。

图 2 是高聚能压裂弹 4 种不同点火孔数量和位置的结构示意图。通过这 4 种实施方式,能更好地说明每种方式中高聚能压裂弹燃烧速度的不同。

实施方式 1[#] 见图 2(a)。铝芯轴侧壁设有一组点火孔。该组点火孔位于铝芯轴的一端,通过点火装置点火,先引燃铝芯轴内部的点火药,点火药通过铝芯轴侧壁上的点火孔引燃火药柱。在这种情况下,由于位于火药柱一端的火药先被点燃,火药柱类似于端面燃烧,压裂弹的燃速最慢。

实施方式 2[#] 见图 2(b)。铝芯轴侧壁设有一组点火孔。该组点火孔位于铝芯轴的中部,通过点火

装置先引燃点火药,点火药通过点火孔引燃火药柱。在这种情况下,与方式 1[#] 的情况相比,整个压裂弹的燃速提高一倍。

当铝芯轴仅仅设置一组点火孔时,通过改变该点火孔在铝芯轴的轴向上的位置,压裂弹的燃速在上述两种燃速之间变化。

实施方式 3[#] 见图 2(c)。铝芯轴侧壁按照铝芯轴的长度每米设有 30 组点火孔,每组的点火孔之间的间隔相等,为 M 。点火药装满铝芯轴内腔,通过点火装置先引燃点火药,点火药通过点火孔引燃火药柱。在这种情况下,火药柱近似从内向外的层面燃烧,整个压裂弹的燃速是最快的,再增加点火孔的组数,燃速也不再增加。

实施方式 4[#] 见图 2(d)。铝芯轴侧壁设有 10 组点火孔,每组的点火孔之间的间隔不相等。点火药装满铝芯轴内腔,通过点火装置先引燃点火药,点火药通过点火孔引燃火药柱。通过此种方法布置点火孔,可以微调压裂弹的燃速。

2.3.2 燃烧速度的试验

效果试验:点火孔的数量和位置变化时,单位时间内的火药柱燃烧量不同,从而压裂弹的燃速也不相同。

试验取材:每节压裂弹外径 75 mm,内径 20 mm,长度 1 000 mm,质量 6.5 kg。

试验 1[#]:压裂弹包括两组点火孔。两组点火孔都位于铝芯轴的一端时,两组点火孔之间的间距 M 等于 5 mm,且位于端部的那组点火孔到铝芯轴的近端泄压部距离 T 与点火孔间距相等。压裂弹的燃烧时间为 114.31 s,燃速为 0.06 kg/s。

试验 2[#]:压裂弹包括两组点火孔。两组点火孔位于铝芯轴的轴向均匀分布,且两组点火孔之间的

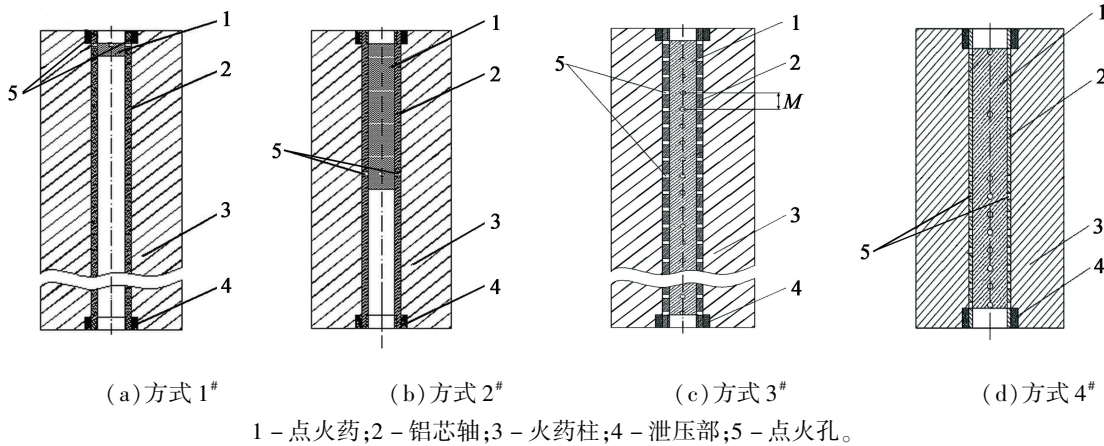


图 2 高聚能压裂弹实施方式结构示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of different high energy fracturing bombs

距离是位于端部的那组点火孔到中心管的近端泄压部距离的 2 倍时,压裂弹的燃烧时间为 26.31 s,燃速为 0.25 kg/s;当该两组点火孔的位置沿着铝芯轴的轴向变化时,压裂弹的燃速在 0.06 ~ 0.25 kg/s 之间变化。

试验 3[#]:压裂弹包括 3 组点火孔。当 3 组点火孔位于铝芯轴的一端时,点火孔之间的间距等于 5 mm,且位于端部的那组点火孔到铝芯轴的近端泄压部距离与点火孔间距相等,且压裂弹的燃烧时间为 72.07 s,燃速为 0.09 kg/s。

试验 4[#]:压裂弹包括 3 组点火孔。当该 3 组点火孔在铝芯轴上均匀分布,且每组点火孔之间的距离是端部点火孔到铝芯轴的近端泄压部距离的 2 倍时,压裂弹的燃烧时间为 17.97 s,燃速为 0.37 kg/s;当该 3 组点火孔的位置沿着铝芯轴的轴向变化时,压裂弹的燃速在 0.09 ~ 0.37 kg/s 之间变化。

试验 5[#]:压裂弹包括 10 组点火孔。该 10 组点火孔在铝芯轴的轴向上以等间隔排列。此时压裂弹的燃烧时间为 4.59 s,燃速为 1.44 kg/s。

试验 6[#]:压裂弹包括 20 组点火孔。该 20 组点火孔在铝芯轴的轴向上以等间隔排列。此时压裂弹的燃烧时间为 3.72 s,燃速为 1.78 kg/s。

试验 7[#]:压裂弹包括 30 组点火孔。该 30 组点火孔在铝芯轴的轴向上以等间隔排列。此时压裂弹的燃烧时间为 3.69 s,燃速为 1.80 kg/s。

图 3 为通过以上试验测得压裂弹燃烧速度及点火点数量的关系。当达到点火孔数量按照中心管的长度为每米 30 组以上时,压裂弹燃烧速度不再增加,保持恒定。

通过工艺改良后,高聚能压裂弹性能指标必须满足表 2 各指标。高聚能压裂弹与传统压裂弹性能

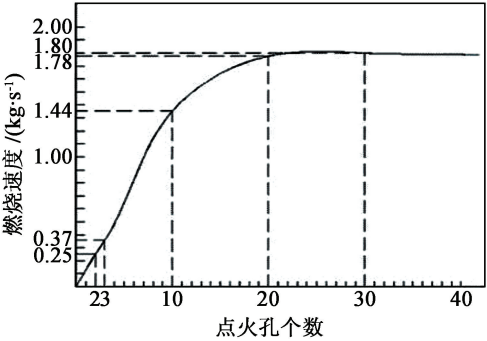


图 3 压裂弹燃速与点火孔数量的关系
Fig.3 Relationship between burning rate of the fracturing bomb and number of ignition holes

表 2 高聚能压裂弹性能参数指标
Tab.2 Performance parameters index of the high energy fracturing bomb

项 目	性能指标
(150 ± 2)℃, 48 h 的耐温性能	不燃不爆
抗拉强度/(N · mm ⁻²)	≥4 900
50 MPa , 48 h 的耐压性能	无破损, 铝芯内无液体渗入
1 m 的跌落性能	不燃不爆, 无破损

比较如表 3 所示。

3 现场应用效果评价

依据高聚能压裂技术原理和设计工艺要求,结合煤层气井的地质结构特点,2015 年,在中石油华北油田某煤层气区块选择了部分井进行了探索性试验及应用^[20],该煤层气区块基本地质特征见表 4。

该煤层埋藏较浅,渗透率较低,含气量较高,经水力加砂压裂后能获得较好产气量。但部分井生产

表 3 高聚能压裂弹与传统压裂弹性能对比

Tab.3 Performance comparison between the high energy fracturing bomb and traditional fracturing bomb					
	燃速	压力上升速度	压力作用时间	峰值压力	安全性能
传统压裂弹	固定,不可控	快,不可控	短,不可控	高,不可控	易造成井筒伤害
高聚能压裂弹	根据需要选用不同燃速组合,可控	快、慢都可控	作用时间长、短均可控	可控	安全可靠不损伤井筒

表 4 某煤层气区块基本地质特性

Tab.4 Basic geological characteristics of a coal seam block					
煤层编号	埋深/m	厚度/m	渗透率 × 10 ³ /μm ²	解吸压力/MPa	含气量/(m ³ · t ⁻¹)
HBMCQ-1 [#]	360.0 ~ 810.0	3.0	0.10 ~ 1.30	1.36	10.86
HBMCQ-3 [#]	390.0 ~ 900.0	2.5	0.10 ~ 1.30	1.48	10.75
HBMCQ-5 [#]	420.0 ~ 1 030.0	6.0	0.10 ~ 1.30	2.50	10.87

一段周期后产量下降较快,判断地层污染堵塞情况严重,采用二次水力压裂效果不佳。为了正确评价高聚能脉冲压裂技术效果,分别筛选了部分产量下降的井开展施工作业,通过观察该井排采统计表的变化来评价作业效果^[20]。表 5 提供了部分煤层气井高聚能压裂装药量的数据;其中,套管的规格为 139.7/7.72/N80,固井质量全为合格。表 6 是煤层气井施工后连续排采一个月后的效果统计表。

表 5 部分煤层气井高聚能压裂工艺参数

Tab.5 High energy fracturing process parameters of part of CBM wells

序号	人工井底 /m	压裂井段 /m	装药量 /kg	压裂弹弹 顶深度/m
HBMCQ1002	436.0	425.5 ~ 430.0	21.8	425.5 ± 0.5
HBMCQ1003	454.5	445.0 ~ 447.5	16.0	445.0 ± 0.5
HBMCQ1007	720.0	619.0 ~ 622.5	17.8	619.0 ± 0.5

表 6 煤层气井高聚能压裂后排采统计表

Tab.6 Statistics of production and discharge of CBM wells after high energy accumulation fracturing

序号	压裂前 出水量	压裂前 产气量	压裂后 出水量	压裂后 产气量
HBMCQ1002	200	250	50	400
HBMCQ1003	500	300	100	500
HBMCQ1007	300	500	30	1 500

结果显示,施工后 HBMCQ1002 井、HBMCQ-1003 井恢复并增加了产量;HBMCQ1007 井产量从 500 m³/d 提高到 1 500 m³/d,产能增加 3 倍。随后,又在中石油长庆油田陕北某煤层气区块进行了多次现场应用推广,均取得了不错的增产效果。

4 结论与建议

通过对煤层气井实施高聚能压裂改造增产措施,得到了以下结论:

- 1)在压裂弹浇筑初期加入强行支撑剂,能有效地阻止裂缝愈合,增加孔隙度,改善煤层气体的解析环境。
- 2)加入新型高聚能材料,对原压裂弹药柱配方进行调整,能有效增加峰值压力,从而加大产气量。
- 3)改变压裂弹铝芯轴内点火孔的数量与位置,

能有效控制弹体的燃烧速度,得到最优的压裂效果。

4)在现场探索性试验中,高聚能压裂技术对煤层气井降压解析、解除煤层气井近井地带污染及堵塞取得了良好的压裂效果,增加了产能。

5)高聚能压裂措施对储层处理范围有限,建议水力压裂和高聚能压裂技术联合使用,先进行水力压裂措施,紧接着进行高聚能压裂,这样能更好地使两种压裂技术相结合,发挥各自的技术优势,对开采工艺进行补充和完善,对探索适合我国煤层气有效开发具有重要的经济意义。

参 考 文 献

[1] 赵庆波. 煤层气地质与勘探技术[M]. 北京:石油工业出版社,1999.

[2] 中国产业调研网. 中国煤层气市场现状调研与发展前景分析报告(2016-2020 年):1659957[R/OL]. http://www.cir.cn/R_NengYuanKuangChan/57/MeiCengQiShi-ChangQianJingFenXiYuCe.html

[3] 苗晋平,史原萍. 基于 CDM 的我国煤层气项目开发[J]. 煤炭经济研究,2009(6):11-13.

[4] 周亚东,贾志刚. 催化氧化技术在风排瓦斯处理应用进展[J]. 石油化工设备,2011,40(4):45-48.
ZHOU Y D, JIA Z G. Application of catalytic oxidation technology to abatement of ventilation air methane[J]. Petro-Chemical Equipment,2011,40(4):45-48.

[5] 刘新龙. 煤层气高能气体压裂开发技术[J]. 中国化工贸易,2011(5):1,43.

[6] 尹锦涛,田杰苗,孙建博,等. 煤层气水力压裂增产机理及效果评价方法研究[J]. 非常规油气,2015,2(5):72-76.
YIN J T, TIAN J M, SUN J B, et al. Principle of water fracturing stimulation for CBM and its effect evaluation methods[J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2(5):72-76.

[7] 鲜保安,高德利,陈彩红,等. 煤层气高效开发技术研究[C]//中国石油学会. 第一届全国特种油气藏技术研讨会论文集. 北京,2004:204-208.

[8] 王建中. 高能气体压裂技术在云南恩洪盆地煤层气开发中的试验应用[J]. 中国煤层气,2010,7(5):14-17.
WANG J Z. The application of high-energy gas fracture technique in the development of CBM in Enhong Basin of Yunnan Province[J]. China Coalbed Methane, 2010,7(5):14-17.

[9] 李俊峰. 高能气体压裂对煤层气井增产改造作用[J]. 能源与节能,2012(10):22-23,59.
LI J F. The application of high energy gas fracturing as

- stimulation operation in CBM production[J]. Energy and Energy Conservation, 2012 (10): 22-23,59.
- [10] 赵宝友, 王海东. 我国低透气性本煤层增透技术现状及气爆增透防突新技术[J]. 爆破, 2014, 31(3): 32-41.
- ZHAO B Y, WANG H D. Different technologies of permeability enhancement of single coal seam in China and new technique of high pressure gas shock[J]. Blasting, 2014, 31(3): 32-41.
- [11] 蒋林宏, 王敕邦, 张梅. 国内外高能气体压裂技术的运用概况及独特优势[J]. 石油化工应用, 2016, 35(3): 6-9, 25.
- JIANG L H, WANG M B, ZHANG M. Application and advantages of high energy gas fracturing at home and abroad[J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(3): 6-9, 25.
- [12] 王化伟. 高能气体压裂技术在宝浪油田的应用[J]. 石油仪器, 2014, 28(4): 65-67.
- WANG H W. Application of high energy gas fracturing technology in Baolang Oilfield [J]. Petroleum Instruments, 2014, 28(4): 65-67.
- [13] 尚养兵, 石磊, 李垚, 等. 高能气体压裂技术在油田增产增注中的应用效果评价[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(3): 110-112.
- [14] 费鸿禄, 洪陈超. 应力波和爆生气体共同作用下裂隙区范围研究[J]. 爆破, 2017, 34(1): 33-36, 107.
- FEI H L, HONG C C. Study on crushed and fracture zone range under combined action of stress and detonation gas [J]. Blasting, 2017, 34(1): 33-36, 107.
- [15] 安恩向, 陆学斌. 无壳弹高能气体压裂技术改进及应用[J]. 爆破, 2008, 25(3): 87-89, 95.
- AN E X, LU X B. Improvement and application of caseless high energy gas fracture technology [J]. Blasting, 2008, 25(3): 87-89, 95.
- [16] 张强德, 赵万祥, 王法轩. 高能气体压裂技术[J]. 断块油气田, 1994, 1(3): 50-60.
- ZHANG Q D, ZHAO W X, WANG F X. The high energy gas fracturing technology [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1994, 1(3): 50-60.
- [17] 陈伟, 马宏昊, 沈兆武, 等. 壳体环向聚能致裂器的作用原理与应用研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(3): 27-30.
- CHEN W, MA H H, SHEN Z W, et al. Mechanism and application study of the shell annular cumulative cracking device [J]. Explosive Materials, 2015, 44(3): 27-30.
- [18] 杨仁树, 丁晨曦, 杨立云, 等. 动态爆生裂纹相互影响的试验研究[J]. 爆破, 2016, 33(2): 1-5, 73.
- YANG R S, DING C X, YANG L Y, et al. Experimental study on interaction effect of dynamic cracks induced by blast[J]. Blasting, 2016, 33(2): 1-5, 73.
- [19] 赵云涛, 周明, 徐文新, 等. 药型罩轴向密实度分布对射孔弹性能的影响研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(3): 55-59.
- ZHAO Y T, ZHOU M, XU W X, et al. Effect of the axial compactness distribution of liner on performance of perforating charge [J]. Explosive Materials, 2015, 44(3): 55-59.
- [20] 汪长栓, 姚文元, 冯国富, 等. 脉冲爆燃压裂技术在煤层气井中的应用[J]. 钻采技术, 2013, 36(2): 128-130.