

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.009

活性粉末药型罩射孔弹穿孔性能试验研究^{*}

李必红 李哲雨 李尚杰 王 喜 杨翕智
西安物华巨能爆破器材有限责任公司(陕西西安,710061)

[摘 要] 为实现射孔弹对目标靶穿孔性能和孔道后效的共同作用,设计了一种高密度活性镍-铝金属体系药型罩。通过改变药型罩配方中钨粉、镍粉和铝粉的质量比,进行了相应地面穿目标靶对比试验,得到最佳效果的活性金属粉末药型罩配方。试验结果显示,当活性配方中钨粉、镍粉、铝粉的质量比为70.0:6.6:13.4时,地面钢靶穿孔孔道容积最大,穿孔效果最佳;地面模拟围压穿砂岩靶的穿孔孔道干净,射流后效作用能力显著。

[关键词] 反应材料;药型罩;镍-铝金属间化合物;射孔弹;性能

[分类号] TJ410.3+33

Penetrating Performance Test of Shaped Charge with Active Powder Liner

LI Bihong, LI Zheyu, LI Shangjie, WANG Xi, YANG Xizhi
Xi'an Wuhua Ju'neng Blasting Equipment Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] A high density active aluminum-nickel metal system liner was designed to ensure the joint effect of perforating charge on target in perforating performance and its aftermath. The optimized formulation of the active metal powder liner was obtained through a series of ground penetrating target contrast tests by alternating the mass ratio of tungsten powder, nickel powder and aluminum powder. The experimental results show that the steel target has the largest volume and the best perforation effect at the mass ratio of tungsten powder, nickel powder and aluminum powder of 70.0:6.6:13.4, and simulated confining pressure through sandstone target has the cleanest perforation channel and remarkable jet after effect.

[KEYWORDS] reactive material; liner; Ni-Al intermetallic compound; shaped charges; performance

引言

2012年,美国斯伦贝谢油服公司将铝热剂用于射孔弹用药型罩配方中^[1],通过射流后效,达到增加岩石微裂纹、降低破裂压力的目的;但由于添加铝热剂的药型罩密度较低,射孔弹穿孔深度受到限制。为了在满足后效作用要求的同时兼顾穿深性能,国内外在高密度含能反应材料(HDRM)制造射孔弹药型罩方面做了很多工作,文献[2-7]通过多元金属体系与黏结剂的配合,使得活性药型罩配方密度达到10.0 g/cm³,后效和穿孔能力得到很大提高。典型的组合有镍-铝、铝-钛、铝-锆等金属体系。张子敏等^[8]使用镍、铝、铜和聚四氟乙烯为主要成分的活性药型罩,研究了射孔弹活性配方中铜含量对钢靶开孔效果的影响,但对后效和穿深均未进行描述。

本文中,依据镍-铝金属间高温、高压条件下化

合放热过程的特点,研究了一种高密度含能药型罩配方,既可以利用药型罩的高密度优势获得较好的穿深效果,又可以利用镍-铝金属间在爆轰作用下反应释放出的大量热能增加射流后效作用,有效地提高射孔孔道导流能力,达到油气增产的目的。

1 活性药型罩配方设计

1.1 活性药型罩用金属粉末材料

高密度活性药型罩配方中使用的金属粉末材料主要有钨粉、镍粉、铝粉和铜粉。钨粉、铝粉和镍粉的形貌和粒度见图1;物理特性见表1。

1.2 配方设计

根据陆必志等^[9]关于镍-铝金属间化合物合成机理的研究,镍、铝原子数比为1:1时,在660.4℃附近已经反应完成,生成稳定的镍-铝金属产物,放热量最大。基于上述原理,在配方设计时以镍、铝原

^{*} 收稿日期:2019-10-12
第一作者:李必红(1978-),男,硕士,高工,主要从事石油射孔弹和非常规油气井射孔工艺开发。E-mail: forredlove@qq.com

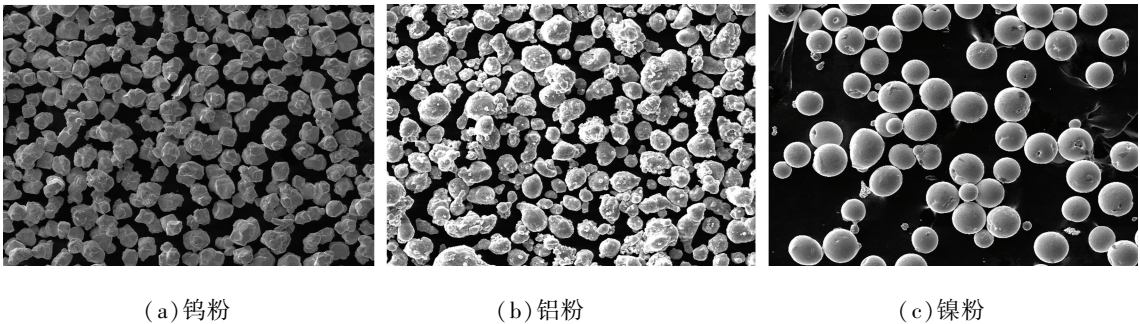


图 1 活性药型罩用金属粉末材料

Fig. 1 Metal powder materials used to prepare the reactive liner

表 1 活性药型罩用金属粉末的物理特性

Tab. 1 Physical properties of metal powder used to prepare the reactive liner

材料	颗粒形貌	粒度/ μm	纯度/%
钨粉	块状	20 ~ 25	99. 9
铝粉	类球形	6 ~ 15	99. 9
镍粉	球形	15 ~ 45	99. 5

子数比 1 : 1 为基础,铜粉的质量分数保持 10% 不变,通过改变配方中钨粉含量,观察活性药型罩的穿孔性能和射流后效作用能力。活性金属粉末配方如表 2 所示

表 2 活性粉末药型罩原材料配方及性能

Tab. 2 Raw material formulas and performances of active powder liner

配方	组分	质量比	理论密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	实际密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1 [#]		80.0 : 3.3 : 6. 7	13. 819	12. 713
2 [#]	W、Ni、Al	70.0 : 6. 6 : 13. 4	11. 503	10. 353
3 [#]		60.0 : 9. 9 : 20. 1	10. 310	9. 382

表 2 中,3 种配方通过三维运动混合机进行混制,利用金属粉末旋压成型技术完成药型罩的压制成型,见图 2。从图 2 可以看出,随着钨粉含量逐渐减少,药型罩颜色由暗黑变成暗红,药型罩整体成型性和可压制性良好,未出现混合不均匀的现象,药型罩整体密度分布较为均匀,降低了药型罩几何结构对试验过程中射流作用稳定性的影响。

2 试验部分

2. 1 射孔弹选择

选用 114 型 DP45RDX38-2 型射孔弹(由西安物华巨能爆破器材有限责任公司生产),配活性金属



图 2 活性金属粉末药型罩

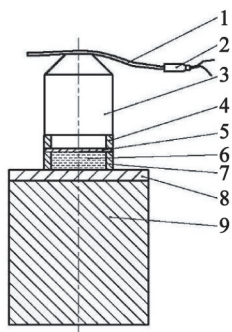
Fig. 2 Active metal powder liner

粉末药型罩。药型罩开口直径 45 mm,装药量 38 g,主装药为 RDX 常温炸药。

2. 2 地面模拟装枪穿钢靶试验

测试用目标靶为 45[#]均质钢靶,使用地面模拟装枪穿钢靶试验来测试活性金属粉末药型罩射孔弹的静破甲穿孔性能,能直观表达 3 种活性配方的穿孔深度情况,试验装配示意图见图 3。穿深和孔道容积测量结果见表 3。

从表 3 中可以得知,钢靶穿孔深度从大到小的配方顺序为:活性配方 1[#]、活性配方 2[#]、活性配方 3[#];模拟套管孔径从大到小的配方顺序为:活性配方 2[#]、活性配方 3[#]、活性配方 1[#]。这是由于活性配方 1[#]中钨粉质量分数达到 80%,活性药型罩密度较高,射流头部速度高,射流形成较稳定的速度梯度,导致模拟套管穿孔孔径较小,穿深效果突出,表现出超深穿透的特点,未能起到扩孔的作用。活性配方 2[#]较活性配方 3[#]钨粉的质量分数高 10%,活性配方



1 - 导爆索;2 - 电雷管;3 - 射孔弹;4 - 模拟枪内炸高环;
5 - 模拟枪身盲孔厚度;6 - 清水;7 - 模拟枪外炸高环;
8 - 模拟套管;9 - 钢靶。

图3 地面穿钢靶试验装配示意图

Fig.3 Schematic diagrams of penetrating
steel target on ground

表3 地面模拟装枪穿钢靶试验结果

Tab.3 Test result of penetrating steel target
of ground charging simulation

序号	穿深/ mm	模拟套管孔径/ mm	射流孔道容积/ mL
配方 1 [#]	300.0	10.1 × 10.6	11.7
	285.0	11.2 × 11.3	11.0
	295.0	10.9 × 11.5	11.3
配方 2 [#]	279.0	13.5 × 14.7	15.0
	260.0	14.2 × 14.4	14.5
	263.0	13.6 × 13.8	14.6
配方 3 [#]	224.0	12.3 × 13.2	7.6
	240.0	13.6 × 13.8	8.3
	213.0	13.1 × 14.7	7.0

2[#]穿深较活性配方 3[#]提高18.3%,两种活性配方的模拟套管孔径相差较小;活性配方 2[#]表现出更好的穿孔和扩孔效果。但地面模拟装枪穿钢靶不能直观反映活性药型罩的后效作用,因此,提出了地面模拟地层围压条件下穿砂岩的试验方法。

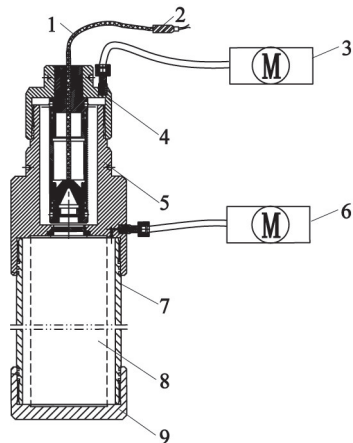
2.3 地面模拟地层围压条件下穿砂岩靶试验

地面模拟地层围压条件下穿砂岩靶试验中,首

选高强度的致密砂岩作为目标靶,其抗压强度 UCS (unconfined compressive strength) 大于 80 MPa。设定模拟井筒压力 30 MPa、模拟地层围压 45 MPa 条件,进行模拟装枪性能测试,分析活性药型罩射流的穿孔和后效。测试装置结构示意图见图 4。选用的目标靶部分参数见表 4。

目标靶射流孔道效果图见图 5。对 3 种活性配方的测试结果见表 5。

由表5可知,砂岩靶穿深从大到小的配方顺序为:活性配方 1[#]、活性配方 2[#]、活性配方 3[#];模拟套管孔径从大到小的配方顺序为:活性配方 2[#]、活性配方 3[#]、活性配方 1[#]。这与地面穿钢靶的测试结果一致,说明活性配方中钨粉含量对穿孔性能的影响较大,钨粉含量越多,穿深越高,这与射流穿深的半



1 - 导爆索;2 - 雷管;3,6 - 电压打压泵;
4 - 枪头;5 - 接头;7 - 罐体;8 - 砂岩靶;9 - 底座。

图4 测试装置结构示意图

Fig.4 Structure diagram of test device

表4 砂岩靶部分性能参数

Tab.4 Performance parameters of sandstone target

参数	孔隙度/ %	密度/ (g · cm ⁻³)	抗压强度/ MPa
测量值	11.3 ~ 12.4	2.30 ~ 2.35	101.2 ~ 112.8
平均值	11.8	2.33	107.6



(a) 活性配方 1[#] (b) 活性配方 2[#] (c) 活性配方 3[#]

图5 射流孔道后效效果图

Fig.5 Effect chart of jet channel

表 5 地面模拟地层围压穿砂岩靶试验结果

Tab. 5 Test results of penetrating sandstone target simulation on ground

配方	穿深/mm	模拟套管孔径/mm	射流孔道后效效果
1 [#]	330	10.4 × 10.9	有白色压实带,孔道有杵体残留
2 [#]	300	13.2 × 13.7	无压实带,孔道干净,射流尾部有二次反应痕迹
3 [#]	255	12.8 × 13.3	无压实带,孔道内有金属熔渣残留物

经验计算公式是一致的。活性配方中,铝粉和镍粉属于低密度金属粉末,随着镍-铝含量的增加,药型罩密度降低,射流头部速度和射流拉伸速率降低,改变了射流的形态,导致射流孔道变粗、模拟套管孔径变大,改善了孔道导流能力,可以有效地降低压裂施工压力。

由图 5 可知,活性配方 1[#]药型罩由于配方中钨粉含量较多,在砂岩靶射流孔道中残留少量钨粉熔融杵体,导致堵塞孔道,同时孔道周围有明显的白色压实带,压实带厚度为 5 ~ 10 mm,不利于后期增产压裂作业,活性配方 1[#]药型罩的后效较差。活性配方 3[#]药型罩由于镍-铝含量最多,镍-铝金属间化合物反应后产生的熔融物不参与射流的开坑作用,大量附着在孔道内壁,影响了压裂液的入流面积和速率;但从活性配方 3[#]效果图中可以看到,射流孔道周围未见明显压裂带,射流末端孔道有大量微裂纹,有明显的镍-铝金属间反应的后效作用。活性配方 2[#]药型罩射流孔道收缩率降低,射流孔道容积增大,提高了储层岩石的吸液能力,有利于压裂施工时提高排量;砂岩靶沿孔道末端存在明显二次反应产生的扇形后效作用,射流孔道壁产生破碎带,存在大量微裂纹。导致上述现象的主要原因是镍-铝金属间作用后产生强烈的放热反应,热量释放瞬间将孔道理想化成定容环境,释放的能量使孔道附近压力瞬间增加,对射流孔道进行了预压裂,在孔道壁上形成了大量的初始横向微裂纹,同时大量的热量产生向孔道内的涌流,将碎屑从整个孔道内清除,最终达到孔道干净、改善裂缝导流能力的目的。

3 结论

- 1)镍-铝金属间化合物反应放出的大量热量使射流在目标靶上有一定的后效作用。
- 2)活性配方 2[#]药型罩在目标靶产生的孔径最

大、射流形态最好、穿深适中、射流后效最佳。

3)为保证活性药型罩的高密度,活性配方中铝的质量分数不应超过 10%。

参 考 文 献

[1] HUANG H, GROVE B M, KNEISL P. Shaped charge;US 8167044 B2[P]. 2012-05-01.

[2] FLYNN, DENNIS, JOSEPH, et. al. Reactive materials; WO 120605 A1[P]. 2016-08-04.

[3] GLENN C S. Shaped charge liner comprised of reactive materials; US 2012/0234194 A1[P]. 2012-09-20.

[4] LANGAN T, BUCHTA W M, RILEY M A. Reactive materials and thermal spray methods of making same; US 9499895 B2[P]. 2016-11-22.

[5] FLYNN D J, KENNETT E J. Reactive materials; US 0355647 A1[P]. 2017-12-14.

[6] LOEHKEN J O. Shaped charge liner, method of making same, and shaped charge incorporating same; US 9862027 B1[P]. 2018-01-09.

[7] 李尚杰,王峰,王喜,等. 射孔弹用活性药型罩技术发展现状[J]. 广州化工,2019,47(7):34-37.

[7] LI S J, WANG F, WANG X, et al. Development and current situation of reactive liner of shaped charge[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019,47(7):34-37.

[8] 张子敏,许碧英,阎峰,等. 活性金属药型罩射孔弹破甲试验研究[J]. 爆破器材,2013,42(4):53-56.

[8] ZHANG Z M, XU B Y, YAN F, et al. Penetrating test of active metal charge liner perforating bullet[J]. Explosive Materials, 2013,42(4):53-56.

[9] 陆必志,龙坚战. Ni-Al 金属间化合物合成机理的研究[J]. 硬质合金,2011,28(5):276-282.

[9] LU B Z, LONG J Z. Study on the synthesis mechanism of Ni-Al intermetallic compound[J]. Cemented Carbide, 2011,28(5):276-282.