

# 镍/铝活性体系药型罩配方设计及穿孔性能测试

李哲雨,李尚杰,李必红,魏领,王浩,苏红苹

西安物华巨能爆破器材有限责任公司 陕西西安 710061

通讯作者:Email:zbdx04081401@163.com

引用:李哲雨,李尚杰,李必红,等. 镍/铝活性体系药型罩配方设计及穿孔性能测试[J]. 油气井测试,2021,30(2):39-43.

Cite: Li Zheyu, Li Shangjie, Li Bihong, et al. Formulation design and perforation performance test of Ni/Al active system liner [J]. Well Testing, 2021, 30(2):39-43.

**摘要** 为实现油气井聚能射孔弹对砂岩靶穿孔性能和射孔孔道壁清洁效果的共同作用,设计了一种高密度镍/铝活性粉末药型罩。分别选用无活性材料的高钨粉药型罩与镍/铝活性粉末药型罩,旋压制成聚能射孔弹进行地面穿钢靶和穿柱状砂岩靶试验。结果显示,在地面穿钢靶条件下,镍/铝活性粉末药型罩较高钨粉药型罩穿孔孔径提高 16.6%,穿孔深度降低 22.2%;在地面模拟围压条件下,镍/铝活性粉末药型罩较高钨粉药型罩穿孔孔径提高 20.7%,穿孔深度降低 10%。镍/铝活性体系药型罩可明显增大穿孔孔径,清洁射孔孔道,有效提高射孔孔道导流能力。

**关键词** 镍/铝金属粉末;射孔弹;活性材料;射孔孔径;药型罩;穿孔深度;地面试验**中图分类号**:TE257 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.02.008

## Formulation design and perforation performance test of Ni/Al active system liner

Li Zheyu, Li Shangjie, Li Bihong, WEI Ling, WANG Hao, SU Hongbei

Xi'an Wuhua Juneng Blasting Equipment Co., Ltd., Xi'an, Shanxi 710061, China

**Abstract:** In order to realize the joint effect of shaped charge for oil and gas well on the perforation performance of sandstone target and the cleaning effect of perforation wall, a high-density Ni/Al reactive powder liner was designed. High tungsten powder liner without active material and Ni/Al active powder liner are selected to spin and make shaped charge for ground penetrating steel target and columnar sandstone target. The results show that the perforation diameter of Ni/Al active powder liner is increased by 16.6% and the perforation depth is decreased by 22.2% compared with high tungsten liner under the condition of ground penetrating steel target; the perforation diameter of Ni/Al active powder liner is increased by 20.7% and the perforation depth is decreased by 10% compared with high tungsten liner under the condition of ground simulated confining pressure. The results show that the Ni/Al active system liner can significantly increase the perforation diameter, clean the perforation channel and effectively improve the conductivity of the perforation channel.

**Keywords:** Ni/Al powder; perforating charge; active material; perforation aperture; liner; perforation depth; ground test

镍/铝粉末是近年来被广泛研究的活性金属体系,Naresh N. 等<sup>[1]</sup>系统地综述了镍/铝金属粉末的冲击化学反应(SICR)。张度宝等<sup>[2]</sup>研究了烧结温度对镍/铝金属粉末材料的力学性能和能量密度变化,结果显示镍/铝金属粉末在烧结过程中有一定的能量传递,可以一定程度提高材料的力学性能。Homan B. E. 等<sup>[3]</sup>研究了在镍/铝金属体系中添加适量的镁、钼和铜,可以改变镍/铝金属粉末的燃烧属性,结果显示,加入适量的铜粉可显著提高初始冲击化学反应温度和反应时间。Xiong W. 等<sup>[4]</sup>分析了铜/聚四氟乙烯(Cu/PTFE)对冲击化学

反应行为的影响,以及镍/铝复合材料的能量释放特性。经过实验和理论结果表明,在相同的冲击条件下,铜可以提高初始冲击化学反应的临界冲击压力,降低反应效率。

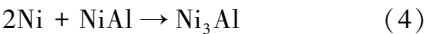
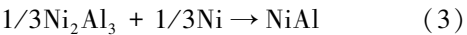
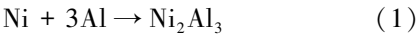
关于活性药型罩(RSCL)穿孔性能,国内、外学者已经进行了广泛研究。Walter W. 等<sup>[5]</sup>研究了Zr57Nb5Cu15.4Ni12.6Al10制备反应性药型罩,结果显示,一方面,与相同结构的铜板药型罩的相比,该反应型药型罩的穿孔深度较浅,但是它对目标靶具有更好的横向破损性能,另一方面,对镍/铝药型罩进行了能量释放分析。Church P. 等<sup>[6]</sup>设计了一

个三轴加载系统来测定镍/铝金属粉体的冲击反应阈值,并且从目标靶中收集到了镍/铝反应后的产物。研究还表明,镍/铝反应性药型罩在形成过程中发生了反应过程。SUN M. 等<sup>[7]</sup>研究了镍/铝反应射流在钢靶中的反应情况及其穿透过程性能的变化。张子敏等<sup>[8]</sup>设计了一种铝/镍金属体系活性金属药型罩,旨在提高射孔弹穿孔孔径和后效作用能力,但未开展射流后效对岩石破坏程度的研究。朱建新<sup>[9]</sup>研究了反应性复合药型罩在钢靶砂岩靶上的穿孔情况,但未详细描述砂岩情况和破碎对比。李尚杰等<sup>[10]</sup>综述了活性材料药型罩的发展现状,并提出活性药型罩在油气开采的应用前景。

本文根据反应金属的冲击反应机理,设计了一种镍/铝/钨高密度活性药型罩配方。该配方突出优点之一为药型罩密度高,可形成高度射流,得到较好的穿深;优点二是利用反应金属在爆轰冲击下发生反应生产新的产物并伴随强烈的放热效应。同时通过无反应材料的高钨粉药型罩进行性能对比,突出活性药型罩在提高射孔孔道导流能力起到的作用,今后也可为同行业在开展相关研究提供支撑数据。

1 镍/铝反应机理

由热力学知识可知,在可能发生的自发反应中,可以通过反应式的吉布斯自由能变量  $\Delta G_T^\phi(T)$  值来判断温度  $T$  条件下自发反应的能力, $\Delta G_T^\phi(T)$  负值越大,自发反应能力越强。镍/铝固相反应系统中可能发生的反应为<sup>[11-13]</sup>:



上述反应式(1)~(4)在不同温度下的  $\Delta G_T^\phi(T)$  值见表 1。

表 1 不同温度下反应式的  $\Delta G_T^\phi(T)$  值  
Table 1 The values of  $\Delta G_T^\phi(T)$  in reaction equation at different temperatures

反应式	550 ℃	750 ℃	900 ℃	1 000 ℃
(1)	-144. 61	-138. 50	—	—
(2)	-126. 05	-123. 24	—	—
(3)	-22. 50	-21. 71	-20. 63	-20. 17
(4)	-33. 61	-32. 80	-31. 73	-31. 27

上述反应式的热力学数据  $\Delta G_T^\phi(T)$  均为负值,说明四个反应式都为放热反应,反应放热从高到低

依次为(1)、(2)、(4)、(3)。反应式(1)和(2)的放热量远大于(4)式和(3)式,而且上述四个反应均能自发进行。从热力学判据上分析,不同化合物的热力学稳定性,负值越大化合物越稳定。因此上述四个反应式最终产物为  $\text{Ni}_3\text{Al}$ 。

2 热破岩机理

岩石破碎方法种类繁多,常见方法有机械破岩和非机械破岩<sup>[14]</sup>。一般岩石呈液态流动的熔岩温度在 900~1 200 ℃。热破岩机理是利用持续高温热量作用于岩石表面,岩石表面温度突然升高,经碎裂、熔融和气化变为气液两相混合物,在岩石表面形成一种具有高孔隙的类似于陶瓷的熔化层,如遇高速气流,熔化层可通过高速气流被携带走。Heard H. C. 等<sup>[15]</sup>、Morrow C. 等<sup>[16]</sup>对加热的岩石的观察表明,热膨胀系数的增加伴随而来的是岩石新的微裂纹的增加,在特定的温度下,岩石周围裂纹孔隙度的增加可提高 2~5 倍的局部渗透率。Homand-Etienne F. 等<sup>[17]</sup>研究了致密花岗岩在热作用下,裂纹长度基本没有变化,裂纹宽度随着温度的提高而增加。Kemeny J. 等<sup>[18]</sup>对贝雷砂岩靶进行了试验,发现在 700~800 ℃时,岩石裂缝的密度和渗透性发生了很大的改变。赵阳升等<sup>[19]</sup>利用 600 ℃ 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机系统,研究了岩石在高温状态的热破裂规律与渗透率的相关特征。结果表明,花岗岩和砂岩受热作用,在加热过程中岩石的热破裂存在一个清晰的门槛值。

3 配方设计

高密度活性配方中主要原材料有:镍粉、铝粉、钨粉和铜粉。四种金属粉末的物理特性见表 2。各金属粉材的形貌和颗粒大小如图 1 所示。

表 2 活性药型罩用金属粉末物理特性  
Table 2 Physical properties of metal powder for active charge liner

材料	颗粒形貌	粒度/ $\mu\text{m}$	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
铜粉	树枝状	40~45	99. 2

依照陆必志等<sup>[11]</sup>研究的关于金属间化合物的研究成果,当 Ni/Al 原子配比为 1:1 时,在 660. 4 ℃ 附近已经反应完成生产稳定的 Ni/Al 金属产物,放

热量最大。本文通过前期理论计算和摸底试验,确定反应性配方 W/Ni/Al/Cu 按照质量比为 70/6.6/13.4/10 进行配制。为对比无活性药型罩与活性药型罩的效果,文中还选用了高钨药型罩作为对比,配方组分为钨粉/铜粉质量比 80/20。

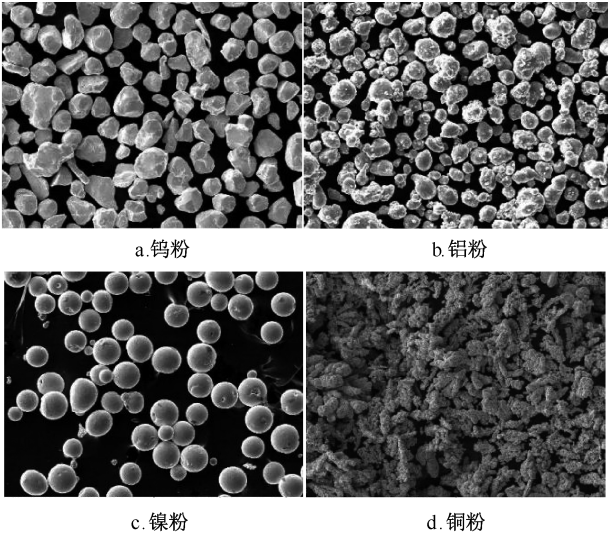


图 1 活性药型罩用金属粉末 SEM 图  
Fig.1 SEM picture of metal powder for active charge liner  
配方混合设备选用三维运动混合机,混合时间 2 h,旋压成型后的药型罩实物如图 2 所示。

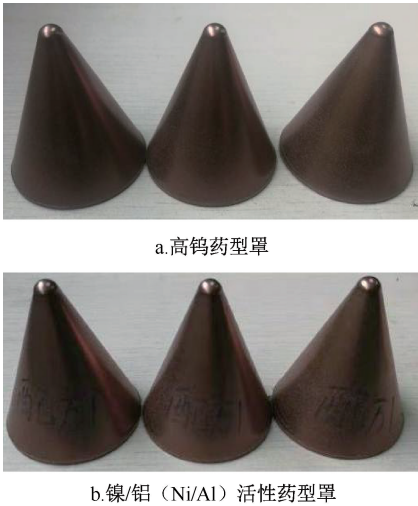


图 2 药型罩实物  
Fig.2 Real object of the liner  
从图 2 所示的高钨粉药型罩和活性药型罩实物图可以看出,药型罩整体成型性和压制性良好,无明显泛白色虚压带。

4 试验部分

选用 114 型 DP45RDX38-2 射孔弹,药型罩口部直径  $\varphi 45\text{ mm}$ ,装填常温药 RDX,药量 38 g。使用的

药型罩分别为高钨药型罩(无化学反应材料)和镍/铝活性药型罩。  
4.1 地面模拟装枪穿钢靶试验  
目标靶选用均质钢靶,测试方法:地面模拟装枪穿钢靶;模拟枪内炸高 26.8 mm;模拟枪套间隙炸高 18.0 mm。穿深和孔容测量结果见表 3。

表 3 地面模拟装枪穿钢靶试验结果

Table 3 Test results of loading gun through steel target in ground simulation

配方组分	穿深/mm	模拟套管孔径/mm	射流孔道容积/ml
高钨药型罩	322.0	11.5×12.3	11.4
	327.0	11.9×12.5	12.0
	320.0	12.0×12.4	12.3
平均值	323.0	12.1	11.9
活性药型罩	259.0	14.5×14.7	15.3
	266.0	14.2×14.4	15.5
	268.0	14.1×14.8	15.6
平均值	264.3	14.5	15.4

从表 3 中可以得知,高钨药型罩主要表现出超深穿透的射孔能力,在射流孔容方面表现一般;活性药型罩表现出良好的穿孔性能和横向扩孔效果,由于地面模拟装枪穿钢靶不能直观反映活性药型罩的横向热冲击破岩作用,引入了地面模拟地层围压条件下穿砂岩的试验方法。

4.2 地面模拟地层围压条件下穿砂岩靶试验  
选用单轴抗压强度大于 80 MPa 的致密砂岩作为目标靶,模拟井筒压力和地层围压分别为 30 MPa 和 45 MPa(要求地层围压略高于井筒压力)。试验后剖开目标靶,观察并分析射流穿孔情况及射流对砂岩的后效作用。测试装置结构如图 3 所示。选用的目标靶部分物性参数见表 4。

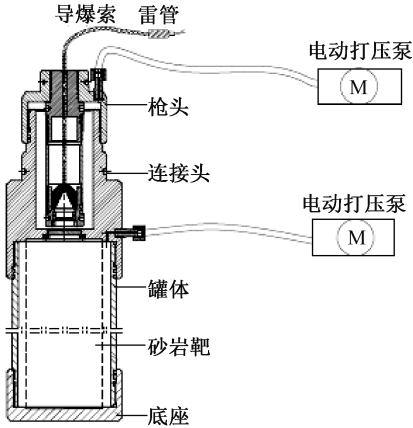


图 3 测试装置结构示意图  
Fig.3 Structure diagram of test device



表 4 砂岩靶部分性能参数

Table 4 Performance parameters of sandstone target			
性能	孔隙度/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	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

表 5 两种药型罩的地面模拟地层围压穿砂岩靶试验结果

Table 5 Test results of two kinds of liner penetrating sandstone target under the condition of ground simulated formation confining pressure			
类型	穿深/mm	模拟套管孔径/mm	射流孔道后效效果
高钨粉药型罩	330	10.4×10.9	有白色压实带,孔道有杵体残留
活性药型罩	300	13.2×13.7	无压实带,孔道干净,射流尾部有二次反应痕迹



图 4 高钨粉药型罩穿砂岩靶孔道效果图  
Fig. 4 Design sketch of high tungsten powder liner penetrating sandstone target channel



图 5 活性药型罩穿砂岩靶孔道效果图  
Fig. 5 Design sketch of active charge liner through sandstone target channel

由表 3 和表 5 可知,高钨药型罩在均质钢靶和致密砂岩靶上的穿孔能力较镍/铝药型罩穿孔能力高,特别是钢靶穿深差异较明显,高钨药型罩穿深较活性药型罩高 18.2%。主要由于高钨药型罩密度远大于活性材料药型罩,形成高密度射流可以在目标靶上表现出较好的穿孔能力。

由图 4 可知,高钨药型罩由于钨粉含量较高,在砂岩靶上孔道中残留较多的杵体导致孔道堵塞。从图中可以观察到射流孔道周围存在白色压实带,高钨药型罩对砂岩靶基本未表现出热冲击的后效作用。

由图 5 可知,砂岩靶延孔道末端存在明显射流末端反应产生的“扇形”痕迹,同时射流孔道壁形成破碎带,无白色压实带。导致上述现象的主要原因

选用无化学反应的高钨粉药型罩和具有化学反应的活性药型罩进行对比测试。

4.3 试验结果

对比测试结果见表 5。目标靶射流孔道效果如图 4 和图 5 所示。

是镍/铝金属间受炸药爆轰冲击发生反应,产生强烈的放热效应,相对独立的孔道空间瞬间形成高温高压环境,随着温度升高,岩石强度发生变化,导致岩石抗拉和抗压强度均有所降低<sup>[20]</sup>,形成对射流孔道壁进行预压裂的作用,在孔道壁上形成了大量的横向微裂纹,增加局部渗透率,最终实现改善导流能力的目的。

5 结论

(1)无活性材料的高钨粉药型罩在目标靶上的穿孔效果仅表现在穿深上具有一定优势,孔道壁的横向热破效应不明显。

(2)镍/铝活性药型罩能够在射流形成过程中反应放出的大量热量,对通过反应的延迟性和高热量在砂岩靶的射流孔道壁形成明显的横向热破效应。

(3)由于岩石的破损受多种因素的影响,文中仅限于对孔隙度 11.8%和抗压强度为 107.6 MPa 的砂岩进行了镍/铝活性药型罩的射孔效果测试,对不同岩石材料的射孔效果测试仍有待研究。

致谢:感谢西安物华巨能爆破器材有限责任公司同意本文公开发表;感谢物华巨能公司研发中心对本文撰写提供的帮助和支持。

参考文献

[1] NARESH N, THADHANI. Shock-induced chemical reactions and synthesis of materials [J]. Progress in Materials Science, 1993,37(2):117-226.  
[2] 张度宝,汪涛,鱼银虎,等. Ni-Al 含能结构材料冲击释能行为研究[J]. 稀有金属,2017,41(1):40-44.  
ZHANG Dubao, WANG Tao, YU Yinhu, et al. Impact energy release behaviors of Ni-Al energetic structural material [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017,41(1):40-44.  
[3] HOMAN B E,MCNESBY K L,RITTER J, et al. Investiga-

- tions of the energy release mechanisms of Aluminum-Nickel reactive material system [C]//In Proceedings of the 26<sup>th</sup> army science conference, Orlando, FL, USA, 1-8 December, 2008.
- [4] XIONG W, ZHANG X, TAN M, et al. The energy release characteristics of shock-induced chemical reaction of Al/Ni composites [J]. *Chemicals & Chemistry*, 2016, 120: 24551-24559.
- [5] WALTER W P, KECSKES L J, PRITCHETT J E. Investigation of a bulk metallic glass s a shaped charge liner material [C]//In proceedings of the 23<sup>rd</sup> international symposium on ballistics, Tarragona, Spain, 16-20 April 2007:269-274.
- [6] CHURCH P, CLARIDGE R, OTTLEY P, et al. Investigation of a Nickel-Aluminum reactive shaped charge liner [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2013, 80(3):1701-1725.
- [7] SUN Miao, LI Chao, ZHANG Xuguang, et al. Reactivity and penetration performance Ni-Al and Cu-Ni-Al mixtures as shaped charge liner materials [J]. *Materials*, 2018, 11(11): 2267-2278.
- [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.
- ZHANG Zimin, XU Biying, YAN Feng, et al. Penetrating test of active metal charge liner perforating bullet [J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(4):53-56.
- [9] 朱建新. 新型自清洁射孔弹实验研究[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(2):144-148.
- ZHU Jianxin. Experimental study on new self-cleaning perforator [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2015, 36(2):144-148.
- [10] 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.
- LI Shangjie, WANG Feng, WANG Xi, et al. Development and current situation of reactive liner of shaped charge [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(7):34-37.
- [11] 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.
- LU Bizhi, LONG Jianzhan. Study on the synthesis mechanism of Ni-Al intermetallic compound [J]. *Cemented Carbide*, 2011, 28(5):276-282.
- [12] DONG H X, JIANG Y, HE Y H, et al. Formation of porous Ni-Al intermetallics through pressureless reaction synthesis [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2009, 484(1-2):907-913.
- [13] HOSSEIN A, CECILIA K, ANDREW B, et al. Nickel-Aluminum diffusion: A study of evolution of microstructure and phase [J]. *Materials Characterization*, 2017, 130(39):105-112.
- [14] 刘柏禄, 潘建忠, 谢世勇. 岩石破碎方法的研究现状及展望[J]. *中国钨业*, 2011, 26(1):15-19.
- LIU Bailu, PAN Jianzhong, XIE Shiyong. On the research development of rock fragmentation and its prospect [J]. *China Tungsten Industry*, 2011, 26(1):15-19.
- [15] HEARD H C. Thermal expansion and inferred permeability of climax quartz monzonite to 300 °C and 27.6 MPa [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(5):289-296.
- [16] MORROW C, LOCKNER D, MOORE D, et al. Permeability of granite in a temperature gradient [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(B4):3002-3008.
- [17] HOMAND-ETIENNE F, HOUPERT R. Thermally induced microcracking in granites: Characterization and analysis [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(2):125-134.
- [18] KEMENY J, ZOMENI Z. A comparison of eight methods for measuring grain and boundary cracking in heated quartzite samples [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 35(4):506-507.
- [19] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 岩石热破裂与渗透性相关规律的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10):1970-1976.
- ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, ZHANG Yuan, et al. Experimental study of related laws of rock thermal cracking and permeability [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10):1970-1976.
- [20] 辛朋辉. 激光破岩机理研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2017.
- XIN Penghui. Research on laser rock breaking mechanism [D]. DaQing: Northeast Petroleum University, 2017.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**李哲雨,男,1976年出生,硕士,高级工程师,2007年毕业于中北大学安全工程专业,现主要从事油气藏射孔工艺研究和射孔器研制工作。电话:029-85353453, 18189181624;Email: tyuan1983@126.com。通信地址:陕西省西安市朱雀大街213号兵器第二一三研究所,邮政编码:710061。