文章编号：1000-5773(2012)04-0469-06

铅对粉末药型罩性能的影响*

刘迎彬[1]，沈兆武[1]，刘天生[2]，胡晓艳[2]

（1.中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥　230027；
2.中北大学化工与环境学院，山西太原　030051）

摘要：为了研究铅粉对钨铜粉末药型罩性能的影响，在钨铜药型罩原配方的基础上，添加5%～20%的铅粉进行实验研究。实验结果表明：添加铅粉可以减少粉末药型罩的孔隙度；随着铅粉添加量的增加，射流的侵彻深度和入口孔径均增加，当铅含量为10%～15%时，侵彻深度和入口孔径达到最佳值，侵彻深度可以提高30%，再添加铅粉，侵彻深度和入口孔径均随之下降。从粉末药型罩成型以及射流的形成、拉伸及侵彻靶板等方面，对造成这种现象的原因进行了详细分析，获得了铅对粉末药型罩性能影响的一些机理认识。研究结果为铅粉代替铋粉添加到钨铜粉末药型罩以提高其侵彻性能提供了一定的理论依据。

关键词：粉末药型罩；聚能装药；铅；铋；侵彻深度；入口孔径
中图分类号：TJ410.333；O358　　**文献标识码**：A

1　引　言

石油射孔弹是一种小口径聚能装药，主要用在含油岩层中以形成孔道，使原油通过孔道流入油井[1]。由于该孔道必须是干净的，因此人们希望所使用的聚能药型罩不形成堵塞孔道的杵体或大的固体碎片。为了达到这个目的，大多数石油射孔弹都利用粉末冶金材料作为药型罩材料[2]。药型罩材料作为聚能效应能量载体，其性能直接影响着聚能射流的行为特征，如射流速度、射流密度以及连续射流长度等[3]。因此，对影响粉末药型罩性能的各种因素进行分析以提高侵彻性能一直是人们研究的热点。

粉末药型罩虽然具有无杵堵、延伸性好、密度较大且易于加工等特点[4]，但其影响因素也比较复杂，如药型罩的材料配比[5]、质量分布[6]、制备工艺[7]、烧结方法[8]等，如果不综合考虑这些因素，制备出的粉末药型罩性能就不能保证，也使人们得出不同的研究结论[9-10]。郭红军等人[11]研究认为，影响大孔径粉末药型罩性能的主要因素是基本结构、成分和颗粒级配以及药型罩成型工艺。向旭[12]和杜明章[13]等人的研究表明，球形钨粉和高纯度钨粉对射孔弹性能及生产更为有利。景青波等人[14]研究发现，射孔弹药型罩中铜粉的粒度对聚能射流性能有重要影响，合理的金属粒度级配及分布能提高射孔弹侵彻钢靶的能力。李如江等人[15]研究了药型罩初始孔隙度对聚能射流行为的影响，认为在一定的孔隙度范围内，射流的韧性随着孔隙度的增加而提高，射流直径随孔隙度的增加而变细。

目前，人们主要针对粉末材料的颗粒形状、粒度和孔隙度等对粉末药型罩性能的影响进行研究。粉末药型罩的一些固体润滑添加剂对其性能有较大影响，而人们对其关注程度却不高。郭圣延等人[16]在铜钨基药型罩配方的基础上，添加适量的铋，发现可以明显提高石油射孔弹的穿深和孔径，并能有效抑制孔道的不规则程度，提高产品的稳定性。但是，铋是一种稀有金属，其价格非常昂贵，用在石油射孔行业，必然会增加其经济成本，因此也降低了其应用价值。

* **收稿日期**：2011-01-16；**修回日期**：2011-03-15
基金项目：国家自然科学基金(11072222)
作者简介：刘迎彬(1985－)，男，博士研究生，主要从事爆炸力学与安全工程研究. E-mail：liuyb85@mail.ustc.edu.cn

铅是一种高密度(11.34 g/cm^3)、低熔点(327.5 ℃)、声速不高(1 190 m/s)的材料。从物理和化学性质来看,铅与铋具有很多相似之处(铋的密度为 9.8 g/cm^3,熔点为 271.4 ℃,声速为 1 771 m/s),而铅粉价格却只是铋粉价格的 1/10。因此,在保证射孔质量的前提下,如果能利用铅粉替代铋粉,就可以有效降低射孔弹成本,增加射孔弹效益。

本研究在钨铜药型罩配方的基础上,通过添加不同质量分数的铅粉,研究铅对粉末药型罩的成型以及射流的形成、拉伸及侵彻性能的影响,根据相关理论,深入分析其原因,以期为铅粉代替铋粉添加到钨铜粉末药型罩,进而提高其侵彻性能提供一定的理论依据。

2 实 验

2.1 粉末药型罩的制备

在钨铜基药型罩配方的基础上,添加 5%~20%的铅粉。铅粉的化学成分如表 1 所示,其中 w_{Pb}、w_{Cu}、w_{Fe}、w_{Sb}、w_{As}、w_{Bi}分别为铅粉中 Pb、Cu、Fe、Sb、As、Bi 的质量分数。传统的模压成型方法主要用于制备大锥角、较大壁厚的聚能药型罩;而反向模压成型方法主要用于小锥角、薄壁厚的聚能药型罩,能够保证不同粉末及粉末混合物压制的药型罩的加工精度[4]。本研究采用反向模压成型方法压制粉末药型罩,成型压力为 10 MPa,保压时间为 10 s。粉末药型罩压制完成后,在甲烷裂解气体的保护下进行低温烧结,从而提高粉末药型罩的强度,最后进行整形加工。最终制备出的粉末药型罩的锥角为 57°,口径为 35 mm,如图 1 所示。

表 1 铅粉的主要成分及粒度

Table 1 Major components and grain size of the lead powder

w_{Pb}/(%)	w_{Cu}/(%)	w_{Fe}/(%)	w_{Sb}/(%)	w_{As}/(%)	w_{Bi}/(%)	grain size/(μm)
≥99.9	≤0.01	≤0.005	≤0.005	≤0.001	≤0.05	40~70

2.2 孔隙度测试

采用阿基米德原理,测出粉末药型罩的真实密度 ρ_0。每种配方的粉末药型罩测两个药型罩,每个药型罩测 4 个位置的密度,取平均值作为粉末药型罩的真实密度。根据混合理论,通过各成分的密度乘以其质量分数再相加得到粉末药型罩的理论密度 ρ_{th}。粉末药型罩孔隙度 φ 的计算公式为

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{th}} \tag{1}$$

2.3 侵彻性能测试

采用 8701 炸药,装药量为 40 g,外壳材料为钢,靶板材料为 603 钢。为了保证实验数据的准确性,每种配方的药型罩进行 3 发实验。图 2 为实验装置图。



图 1 粉末药型罩

Fig. 1 Powder shaped charge liner



图 2 实验装置图

Fig. 2 Diagram of experimental arrangement

3 结果与分析

3.1 实验结果

每种配方的粉末药型罩材料的孔隙度如表 2 所示,其中 $w_{\text{Pb-powder}}$ 为粉末药型罩中铅粉的质量分数,φ 为空隙度。从表 2 中可以看出,随着铅含量的增加,粉末药型罩的孔隙度不断减少。表 3 列出了侵彻实验结果,其中 $\overline{P}$ 为平均侵彻深度。图 3 为典型实验结果,图 4 给出了铅含量与钨铜药型罩侵彻深度的关系。从表 3 和图 4 中可以看出:添加铅的药型罩与原钨铜药型罩相比,侵彻深度和入孔孔径都有明显提高;侵彻深度随铅粉含量的增加而增加,当铅粉含量达到 10%~15%时,侵彻深度达到最佳值,随后侵彻深度随铅含量的增加不断下降。射流的入口孔径也有类似规律。此外,研究还发现:相比未添加铅粉的药型罩,添加铅粉的药型罩形成的孔道更干净,没有形成杵体或较大的固体碎片。

表 2 粉末药型罩的孔隙度

Table 2 Porosity of powder liner

Sample	$w_{\text{Pb-powder}}$ /(%)	φ /(%)
P_0	0	9.7
P_1	5	7.2
P_2	10	5.3
P_3	15	3.7
P_4	20	2.6

表 3 侵彻实验结果

Table 3 Results of penetration experiments

Sample	Penetration depth			$\overline{P}$ /(mm)	Entrance aperture /(mm×mm)
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3		
P_0	130	138	125	131	11.4×10.5
P_1	145	148	139	144	11.9×11.1
P_2	169	173	172	171	13.4×13.2
P_3	168	165	171	168	13.1×12.8
P_4	131	124	118	124	12.3×11.5

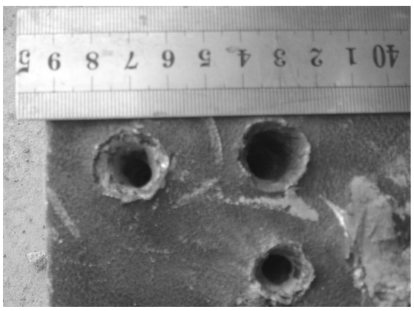


图 3 实验结果图

Fig. 3 Diagram of experimental result

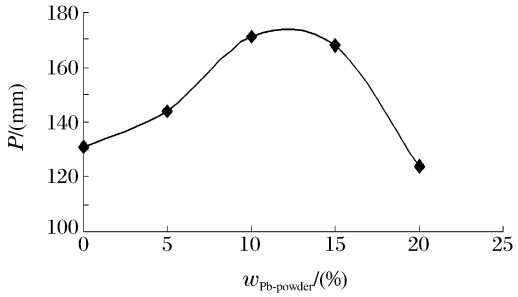


图 4 铅含量与侵彻深度的关系

Fig. 4 Penetration depth vs. content of lead

3.2 结果分析

从粉末药型罩制备成型以及射流的形成、拉伸及侵彻等方面,分析在钨铜药型罩中添加不同质量分数的铅粉后,粉末药型罩性能变化的原因。

(1) 粉末药型罩制备成型阶段

铅属于低熔点软金属,塑性变形能力较大,具有极高的柔度和延展性以及优异的自润滑性能。在药型罩压制过程中,铅作为一种固体润滑剂,可以有效减少钨铜颗粒之间的摩擦力,增加金属颗粒间的接触面积,从而提高粉末药型罩的密度,减少药型罩的孔隙度,有利于提高药型罩的侵彻性能[17]。低温烧结可以使金属颗粒间的接触点软化,增大接触面积,并提高粘结效果,从而提升粉末药型罩的强度。从表 2 中可以看出,随着铅粉含量的增加,药型罩的孔隙度不断下降,但没有完全压实。对药型罩的微观结构进行观察发现:在钨铜粉末中添加铅粉时,铅粉并不是与钨铜粉末均匀地分布,而是发生偏析,尤其是当铅粉质量分数超过 10%时,这种现象更加明显。这种分布不均直接影响着金属射流偏离轴心的程度,进而降低射流的侵彻能力。因此,虽然添加铅粉可以减少钨铜粉末药型罩的孔隙度,但同时也使其

更易于发生偏析。

(2) 射流形成与拉伸阶段

在炸药爆炸产生的爆轰波作用下,粉末金属药型罩内的孔隙发生绝热压缩,导致药型罩温度迅速上升,体积发生严重变形,从而造成药型罩体积失效。通过理论估算,其瞬时温度远高于铅的熔点。由于这是在瞬间完成的,所以此时铅并不能发生汽化[18]。随后,粉末金属颗粒在爆轰波的推动下,以较高的速度向药型罩轴线汇聚,在轴线上发生高速碰撞,这时的应力状态类似于爆炸压实,使粉末复合材料发生连续恢复并形成射流。这期间所产生的温度和持续时间完全可以使部分甚至全部铅熔融,并伴有少量的铅汽化。此时,铜和钨仍处于固体颗粒状态,熔融的铅将钨铜颗粒包覆起来。在射流的拉伸过程中,由于铅和钨铜具有不同的物理化学性质,粉末药型罩材料发生了第 2 次体积失效,熔融的铅可以填补孔隙所占的位置,使粉末药型罩形成的聚能射流处于不含孔隙的固液混合状态。这种混合状态有利于提高射流稳定性,使粉末聚能射流在飞行过程中被无限拉伸而不出现断裂。

当粉末金属颗粒汇聚于药型罩轴线时,金属颗粒发生高速碰撞,使铅发生汽化。随着铅含量的增加,发生汽化的铅随之增加。大量的铅汽化会使射流产生大量的气体孔隙,并释放出大量的热量,使射流发生不可逆的径向膨胀[19],射流密度随之降低,射流的稳定性也受到影响,侵彻性能下降。

(3) 射流侵彻阶段

在射流与靶板相互作用的过程中,在碰撞点形成高温、高压和高应变率的“三高区”。铅在该区域内易发生汽化。少量的铅汽化会产生高压气体,有利于扩大孔径;同时,高压气体膨胀所产生的应力波有利于后续射流破靶。在一定程度上,这种现象可以提高射流的延性,增加射流的扩孔孔径。但是,当药型罩中添加的铅粉过量时,大量的铅在“三高区”发生汽化,产生很多高温高压气体,对后面的射流形成干扰,降低射流的稳定性,使射流过早地结束侵彻,从而降低射流的侵彻深度和扩孔孔径。

因此,在钨铜粉末药型罩中添加适量的铅粉,有利于提高药型罩的密度,减小药型罩的孔隙度,提高射流的延展性和稳定性,增加射流的侵彻能力和扩孔孔径。而过量的铅粉会使药型罩的质量分布出现严重的不均匀,导致射流偏离其轴线;同时,大量铅粉汽化,使射流发生不可逆的径向膨胀,降低射流的延展性和稳定性,从而严重降低射流的侵彻深度和扩孔孔径。

4 结 论

实验研究了铅粉对钨铜粉末药型罩侵彻和扩孔性能的影响,通过分析实验结果,得出以下结论:

(1) 在钨铜粉末药型罩中添加适量的铅粉,可以提高药型罩密度,降低药型罩孔隙度,使射流处于固液混合状态,提高射流的稳定性和延展性,增加射流的侵彻能力和扩孔孔径;

(2) 如果添加的铅粉过量,就会发生严重的偏析现象,使形成的射流偏离其轴线,在射流形成、拉伸和侵彻过程中大量的铅粉发生汽化,使射流发生较大的不可逆的径向膨胀,降低射流的稳定性和延展性,进而降低射流的侵彻能力和扩孔能力;

(3) 在钨铜粉末药型罩中,应严格控制低熔点金属粉末的添加量,达到增加射流侵彻能力和扩孔能力的目的;

(4) 与钨铜药型罩相比,添加适量铅粉的钨铜粉末药型罩提升了射流的侵彻能力,侵彻深度最高可提高 30%,因此,可以利用廉价的铅粉代替昂贵的铋粉,以减少射孔弹成本,提高经济效益。

References:

[1] Bai X Z, Chang X. Oil and Gas Well Perforator and Its Application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992. (in Chinese)

白锡忠,常 熹. 油气井射孔弹及其应用 [M]. 北京:石油工业出版杜,1992.

[2] Zygmunt B, Wilk Z. The research of shaped charges with powder liners for geological borehole perforation [J]. Arch Min Sci, 2007, 52(1): 121-133.

[3] Han H Q, Jiang W, Zhang P, et al. Application of metal powders to shaped charge liner [J]. Powder Metallurgy Industry, 2004, 14(3): 1-4. (in Chinese)
韩欢庆,姜　伟,张　鹏,等. 金属粉末在药型罩中的应用 [J]. 粉末冶金工业, 2004, 14(3): 1-4.

[4] Zygmunt B, Wilk Z. Formation of jets by shaped charges with metal powder liners [J]. Propell Explos Pyrot, 2008, 33(6): 482-487.

[5] Zhao T, Luo H, Jia W M, et al. Influencing factors analysis of the application performance of shaped liner material [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(5): 82-86. (in Chinese)
赵　腾,罗　虹,贾万明,等. 影响药型罩材料使用性能的因素研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(5): 82-86.

[6] Shi H S. Influence of liner density distribution on the penetration performance of oil well jet perforator [J]. Explosive Materials, 1997, (4): 1-5. (in Chinese)
史慧生. 药型罩质量分布对射孔弹穿透性能的影响 [J]. 爆破器材, 1997, (4): 1-5.

[7] Liu Y B, Wang F Y, Liu T S. Orthogonal method application to powder shaped charge liner preparation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(6): 139-141. (in Chinese)
刘迎彬,王凤英,刘天生. 正交法在粉末药型罩制备工艺中的应用 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(6): 139-141.

[8] Liu J T, Shao Q, Guo J L. The sintering mechanism of copper alloy shaped charge liner [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, 24(2): 50-51. (in Chinese)
刘建韬,邵　琦,郭惊雷. 聚能射孔弹铜合金药型罩的烧结机理 [J]. 火炸药学报, 2001, 24(2): 50-51.

[9] Wang F Y, Liu T S, Gou R J, et al. A study on tungsten-copper-nickel alloy as shaped charge liner [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(1): 112-114. (in Chinese)
王凤英,刘天生,苟瑞君,等. 钨铜镍合金药型罩研究 [J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 112-114.

[10] Guo H J, Shi J, Wang C S, et al. Experimental study on the powder liner [J]. Well Logging Technology, 2005, 29(Supplement): 71-73. (in Chinese)
郭红军,石　健,汪长栓,等. 粉末药型罩的试验研究 [J]. 测井技术, 2005, 29(增): 71-73.

[11] Guo H J, Shi J, Wang B X, et al. Disscussion on major factors affecting performances of big-hole powder liner [J]. Explosive Materials, 2010, 39(2): 35-37. (in Chinese)
郭红军,石　健,王宝兴,等. 影响大孔径粉末药型罩性能的几个主要因素 [J]. 爆破器材, 2010, 39(2): 35-37.

[12] Xiang X, Zhao S H, Xie Z. Influence of SEM, EDS of tungsten on the performance and production of perforating charge [J]. Explosive Materials, 2008, 37(5): 36-39. (in Chinese)
向　旭,赵世华,谢　湛. 钨的 SEM、EDS 特性对射孔弹性能及生产的影响 [J]. 爆破器材, 2008, 37(5): 36-39.

[13] Du M Z, Xie Z, Fu D X, et al. Influence of tungsten powder shape on penetration depth of perforator [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5): 483-486. (in Chinese)
杜明章,谢　湛,付代轩,等. 钨粉形貌对石油射孔弹穿深性能的影响 [J]. 测井技术, 2008, 32(5): 483-486.

[14] Jing Q B, Jing Z Y, Shi J. The influence of metal particles arrangement of powder shaped charge liner and its thermal treatment on performance of jet [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(1): 42-44. (in Chinese)
景青波,景振禹,石　健. 粉末药型罩金属粒度级配及热处理对聚能射流性能的影响 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 42-44.

[15] Li R J, Shen Z W, Wang F Y. Initial porosity effect on the shaped charge jet behavior [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(4): 445-448. (in Chinese)
李如江,沈兆武,王凤英. 药型罩初始孔隙度对聚能射流行为的影响 [J]. 高压物理学报, 2008, 22(4): 445-448.

[16] Guo S Y, Zeng X W. Effect of bismuth on metal-powder-liner of petrol shaped-charge [J]. Well Logging Technology, 2002, 26(4): 338-340. (in Chinese)
郭圣延,曾新吾. 铋在石油射孔弹药型罩中的作用 [J]. 测井技术, 2002, 26(4): 338-340.

[17] Babkin A V, Ladov S V, Fedorov S V. Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped charge jet free flight behavior and its penetration capacity [A]//The 25th International Symposium on Ballistics [C].

Beijing,2010:638-646.

[18] Holle G W V,Trimble J J. Shaped charge temperature measurement [A]//Proceedings of the Sixth Symposium on Detonation [C]. Coronado,California,1976.

[19] Hirsch E,Mayseless M. Penetration of porous jets [J]. J Appl Mech,2010,77(5):051803.

Influence of Lead on the Performance of Powder Shaped Charge Liner

LIU Ying-Bin[1],SHEN Zhao-Wu[1],LIU Tian-Sheng[2],HU Xiao-Yan[2]

(1. *Department of Modern Mechanics,University of Science and Technology of China,Hefei* 230027,*China*;
2. *School of Chemical Engineering and Environment, North University of China,Taiyuan* 030051,*China*)

Abstract: In order to study the influence of lead powder on the properties of the copper-tungsten shaped charge liner,the experiments are carried out by adding 5%-20% of the lead powder to the original copper-tungsten liner. The results show that the addition of lead can reduce the porosity of liner; and with the increase of the amount of lead powder,both the penetration depth and the entrance aperture increase firstly and then decrease after reaching the maximum values when the lead content is 10%-15%. The reasons for this phenomenon are analyzed in detail from the liner molding,jet formation,stretching and penetration. Consequently,a reasonable explanation for the influence of lead powder on the properties of the copper-tungsten powder shaped charge liner is presented. The results provide a theoretical basis for making use of lead powder instead of bismuth powder to improve the penetration performance of copper-tungsten powder liner.

Key words: powder liner; shaped charge; lead; bismuth; penetration depth; entrance aperture