

文章编号: 1001-4888(2012)05-0618-05

## 钨铜药型罩制备及其侵彻性能研究\*

刘迎彬<sup>1,2</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>, 刘天生<sup>2</sup>, 胡晓艳<sup>1</sup>, 孙素杰<sup>3</sup>

(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;  
3. 中国兵器工业集团第五二研究所烟台分所 冲击环境材料技术重点实验室, 山东烟台 264003)

**摘要:** 为了提高钨铜药型罩的侵彻性能和稳定性, 在传统钨铜制备方法的基础上, 采用机械合金化方法进行混粉, 利用旋模压制方法进行压制药型罩毛坯, 再在甲醇裂解气体的保护下进行烧结, 最终制备出钨铜药型罩。利用排水法测试了烧结前后钨铜药型罩的密度。并将制备出的钨铜药型罩与紫铜板药型罩进行侵彻性能的实验比较。实验结果表明: 钨铜药型罩烧结后的密度比烧结前的密度要低一些, 但其对 603 均质装甲钢的侵彻性能要优于紫铜板药型罩的侵彻性能, 与紫铜板药型罩相比, 其穿深可以提高 45%。

**关键词:** 钨铜药型罩; 聚能装药; 聚能粒子流

**中图分类号:** TJ55      **文献标识码:** A

### 0 引言

聚能装药已广泛应用于现代弹药和一些民用行业, 如石油射孔和煤矿开采等。在许多领域里, 人们希望聚能射流侵彻靶板的深度越深越好。为了提高聚能装药的穿深, 药型罩作为聚能装药的“心脏”, 越来越受到人们的重视和研究<sup>[1-4]</sup>。为了使药型罩形成具有尽可能长的高速射流参与侵彻目标, 则要求药型罩材料具有密度高、声速大和延展性好等特点<sup>[5-7]</sup>。由于钨粉具有较高的密度和较大的声速, 而铜粉具有较好的延展性, 因此, 钨铜粉末作为药型罩材料受到了人们的广泛关注<sup>[8-10]</sup>。钨铜药型罩形成的射流具有较高的头部速度和良好的延续性, 适合作为大穿深聚能装药所用的药型罩。

目前, 人们对钨铜药型罩的制备进行了深入研究, 提出了多种制备方法<sup>[11-16]</sup>。传统常用的制备方法<sup>[11]</sup>是将几种粉末混合后压制成型, 再进行烧结。张全孝等人<sup>[12]</sup>采用机械合金化方法制备钨铜药型罩, 通过 X 射线衍射(XRD)等手段检测了合金化的效果、钨颗粒尺寸及分布, 认为用此方法制作药型罩的具有可行性。陈峰等人<sup>[13]</sup>采用激光烧结成型结合熔渗方法来制备钨铜药型罩, 认为通过该方法可以制备接近全致密且密度分布均匀的钨铜药型罩。HE 等人<sup>[14]</sup>采用直接电沉积法来制备 Cu-Ni-W 合金药型罩, 研究了电极电流密度对 Cu-Ni-W 合金的微观形貌、微观结构和成份的影响。张全孝等人<sup>[15]</sup>利用先制备钨铜棒材, 然后再锻造出钨铜药型罩。王占磊等人<sup>[16]</sup>利用高能球磨制取 W-Cu 合金化粉末, 采用爆炸烧结的方法制取 W-Cu 合金药型罩材料, 其制备的钨铜药型罩与紫铜药型罩相比, 穿深提高了 31%。然而, 这些制备方法操作比较复杂, 费用较高, 制备出钨铜材料还需进一步加工才能制出钨铜药型罩, 而且其侵彻性能提高不多。因此, 制备出一种方法简单、费用低廉且具有高侵彻性能的钨铜药型罩具有非常重要的意义。

为了解决这些问题, 本文提出了一种新型的钨铜药型罩制备方法, 采用机械合金化方法进行混粉,

\* 收稿日期: 2011-12-10; 修订日期: 2012-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(11072222)(51174183)和(51134012)资助

通讯作者: 刘迎彬(1985-), 男, 在读博士。主要从事爆炸力学和安全工程防护研究。E-mail: liuyb85@mail.ustc.edu.cn

利用旋模压制方法进行压制药型罩毛坯, 再在甲醇裂解气体的保护下进行烧结。将所制备的钨铜药型罩与紫铜药型罩进行了对比试验。

## 1 钨铜药型罩的制备

采用粉末冶金成型工艺来制备钨铜药型罩, 一般包括: 混粉、压制、烧结和性能检测等过程, 其制备的流程图如图1所示。



图1 钨铜药型罩制备流程图

Fig. 1 The preparation flowsheet of W-Cu shaped charge liner

### 1.1 混合粉末的制备

选用的1000目的钨粉和1000目的铜粉作为原料粉末, 钨铜质量比为3:1, 钨粉和铜粉的物理化学成分如表1和表2所示。将两种粉末以及润滑剂和粘结剂与钢球一起放入容积为2000ml的不锈钢罐中, 球料比为8:1, 在QM-1型振动高能球磨机内进行球磨, 球磨时间为3小时, 利用氩气进行保护, 从而获得均匀的钨铜混合粉末。

表1 钨粉的化学成分

Tab. 1 The chemical composition of tungsten powder

元素	W	Fe	Mo	Si	Ni	Ca	其他
含量	≥99.98	≤0.005	≤0.005	≤0.002	≤0.003	≤0.002	≤0.003

表2 铜粉的化学成分

Tab. 2 The chemical composition of copper powder

元素	Cu	Fe	Pb	Sb	O	S	其他
含量	≥99.85	≤0.02	≤0.05	≤0.01	≤0.02	≤0.01	≤0.04

### 1.2 钨铜药型罩的压制

为了使所压制的钨铜粉末药型罩具有均匀的密度分布和稳定的性能, 选用旋压机进行旋模压制, 旋压机压力为50MPa, 保压时间为5s。

### 1.3 钨铜药型罩的烧结

为了提高钨铜药型罩的强度和性能, 在甲醇裂解气体的保护下, 对压制成型的钨铜药型罩进行烧结, 以10°C/min的速度进行升温, 升至1100°C时保温1h, 然后以5°C/min的速度进行降温, 降至350°C时保温1h, 再随炉降至室温。最终制备出的钨铜药型罩如图2所示。

### 1.4 钨铜药型罩的密度测试

在精度为 $10^{-4}$ g的光学分析天平上, 利用排水法测量烧结前后钨铜药型罩的密度。采用石蜡封孔来防止孔隙对结果的影响。钨铜药型罩的密度是对3个样品测量后取平均值得到的。

## 2 侵彻性能试验

聚能装药采用8701炸药, 装药量35g, 钨铜药型罩的锥角为60°, 其重量为20g, 口径为33mm。由8号电雷管引爆, 在一倍口径炸高下进行静破甲实验, 靶板为603装甲钢, 共进行5发实验。在其他条件相同的情况下, 选择相同尺寸、相同重量的紫铜板药型罩进行对比试验。试验装置如图3所示。



图2 钨铜药型罩

Fig. 2 W-Cu shaped charge jet



图3 实验装置图

Fig.3 Experimental apparatus

### 3 结果与分析

#### 3.1 钨铜药型罩的密度

钨铜药型罩的理论密度计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$\rho_{\text{理}} = \left( \frac{\omega_{\text{W}}}{\rho_{\text{W}}} + \frac{\omega_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Cu}}} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{理}}$ 为钨铜药型罩的理论密度; $\omega_{\text{W}}$ 和 $\omega_{\text{Cu}}$ 分别为钨和铜所占的质量分数; $\rho_{\text{W}}$ 和 $\rho_{\text{Cu}}$ 分别为钨和铜的密度。

钨铜药型罩的真实密度计算公式<sup>[18]</sup>为:

$$\rho_{\text{真}} = \rho_{\text{水}} \times \frac{m_0}{m_1 - m_2} \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{真}}$ 为钨铜药型罩的真实密度; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度; $m_0$ 为药型罩在浸蜡前的质量; $m_1$ 为药型罩在浸蜡后的质量; $m_2$ 为浸蜡药型罩在水中的质量。

粉末药型罩的孔隙度可用下式计算:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{\text{真}}}{\rho_{\text{理}}} \quad (3)$$

通过计算可以得出钨铜药型罩的理论密度为 $14.9\text{g}/\text{cm}^3$ ,压制未烧结钨铜药型罩的密度为 $13.4\text{g}/\text{cm}^3$ ,其孔隙度为 $10\%$ ,烧结后钨铜药型罩的密度为 $12.9\text{g}/\text{cm}^3$ ,其孔隙度为 $13.5\%$ 。烧结后密度没有增加反而减少。一方面,为了提高钨铜药型罩的成型效果,在混合粉中加入的润滑剂和粘结剂等助剂在高温烧结阶段,进行挥发和分解,在颗粒之间形成孔隙。另一方面,甲醇裂解气体在烧结开始就进行保护,这些气体在铜颗粒还没有开始熔化的时候,通过颗粒之间的缝隙进入孔洞,这增大了液态铜对钨颗粒进行浸润与堵塞的阻力。这些孔隙在铜熔化并封闭材料表面后形成内孔隙,从而降低了烧结后钨铜药型罩的密度。

#### 3.2 钨铜药型罩的侵彻性能

钨铜药型罩与紫铜板药型罩所形成的射流侵彻603装甲钢试验结果如表3所示。从表3中可以看出,钨铜药型罩所形成的射流与紫铜板药型罩所形成的射流都具有稳定的侵彻性能。其穿深比紫铜板药型罩所形成的射流穿深要提高 $45\%$ 。

根据聚能射流侵彻的流体动力学理论,聚能射流对靶板的穿深 $P$ 可以表示为:

$$P = L(\rho_j/\rho_t) \quad (4)$$

式中: $L$ 为射流长度; $\rho_j$ 为射流的密度; $\rho_t$ 为靶板的密度。

由公式(4)可以得出所制备的钨铜药型罩对603钢靶板的穿深是紫铜板药型罩对603钢靶板穿深的1.2倍,而从表3中可以看出测试出的结果是1.45倍,超过预期结果。

由冲击波与粉末药型罩作用的波系图<sup>[18]</sup>和粉末材料的状态方程<sup>[19]</sup>可知,增加粉末药型罩的孔隙度,可以增加冲击波过后钨铜药型罩的冲击温升,使射流温度得到提高,这样有利于提高射流的韧性和延迟射流的断裂时间。从而提高了聚能粒子流对靶板的穿深。

### 4 结论

1) 采用机械合金化方法进行混粉,利用旋模压制方法进行压制药型罩毛坯,再在甲醇裂解气体的保护下进行烧结,可以制备出性能较优的钨铜药型罩。

2) 由于润滑剂和粘结剂的挥发分解以及保护气体进入孔隙,熔化的铜在药型罩表面将这些孔隙封

表3 试验结果

Tab.3 Experimental result

序号	穿深(mm)	
	紫铜药型罩	钨铜药型罩
1	99	147
2	101	145
3	103	142
4	97	144
5	99	147
平均	100	145

闭,使钨铜药型罩烧结后的密度低于烧结前的密度。

3) 与紫铜药型罩侵彻性能相比,钨铜药型罩具有更优的侵彻性能,对于侵彻 603 装甲钢,其穿深比紫铜药型罩穿深提高 45%。这说明钨铜药型罩具有更好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 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, 130(5): 82-86 (ZHAO Teng, LUO Hong, JIA Wan-ming, et al. Influencing factors analysis of the application performance of shaped liner material [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 130(5): 82-86(in Chinese))
- [2] 赵云涛, 徐文新, 周翌等. 药型罩对射孔弹射孔性能的影响[J]. 测井技术, 2005(S1): 37-39+84 (ZHAO Yuntao, XU Wen-xin, ZHOU Zhao, et al. The effect of liner on performance of perforating charge [J]. Welllogging Technology, 2005(S1): 37-39+84(in Chinese))
- [3] 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(04): 445-448 (LI Ru-Jian, SHEN Zhao-Wu, WANG Feng-Yin. Initial Porosity Effect on the Jet Behavior of Shaped Charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2008, 22(04): 445-448(in Chinese))
- [4] 孙建, 袁宝慧, 王利侠等. 紧凑型聚能装药的数值模拟及实验研究[J]. 火炸药学报, 2009(05): 46-49 (SUN Jian, YUAN Bao-hui, WANG Li-xia, et al. Numerical simulation and experimental research on compact shaped charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009(05): 46-49(in Chinese))
- [5] 李国宾. 复合药型罩的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 1995, 18(1): 63-67 (LI Guo-bin. Research development of composite liners of shaped charge [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1995, 18(1): 63-67(in Chinese))
- [6] 贾万明, 张全孝, 白志国等. 药型罩制造技术的发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(09): 1511-1516 (JIA Wan-ming, ZHANG Quan-xiao, BAI Zhi-guo, et al. Progression manufacturiug techniques of shaped charge liners [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(09): 1511-1516(in Chinese))
- [7] 王铁福, 朱鹤荣, 周箭隆等. Copper-tungsten shaped charge liners and their performance [J]. 弹道学报, 1992(2): 78-82 (WANG Tie-fu, ZHU He-rong, ZHOU Jian-long, et al. Copper-tungsten shaped charge liners and their performance [J]. Journal of Ballistics, 1992(2): 78-82(in Chinese))
- [8] 王凤英, 刘天生, 苟瑞君等. 钨铜镍合金药型罩的研究[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 112-114 (WANG Feng-ying, LIU Tian-sheng, GOU Rui-jun, et al. A study on tungsten-copper nickel alloy as shaped charge liner [J]. Acta Arma-mentarii, 2001, 22(1): 112-114(in Chinese))
- [9] 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(06): 139-141 (LIU Yingbin, WANG Fengying, LIU Tiansheng. Orthogonal Method Application to Powder Shaped Charge Liner Preparation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(06): 139-141 (in Chinese))
- [10] 李如江, 沈兆武, 刘天生. 多孔药型罩聚能射流低炸高大穿深机理研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 424-427 (LI Ru-jiang, SHEN Zhao-wu, LIU Tian-sheng. Deep penetration mechanism of jet produced by shaped charge with porous liner at low stand of distance [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(4): 424-427(in Chinese))
- [11] Chawla M S. United States patent, No. 5792977, 1998.
- [12] 张全孝, 高云, 贾万明等. 机械合金化铜-钨药型罩材料的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(3): 44-50 (ZHANG Quan-xiao, GAO Yun, JIA Wan-ming, et al. Study of mechanically alloyed Cu-W shaped charge liner materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2000, 23(3): 44-50(in Chinese))
- [13] 陈锋, 姜德义, 谢湛等. 激光烧结成形结合熔渗制备钨铜射孔弹药型罩[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2010, 25(03): 258-264 (CHEN Feng, JIANG De-yi, XIE Zan, et al. High-performance shaped charge liner of W-Cu perferative bond manufactured by laser sintering of W-Cu powder infiltrating [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2010, 25(03): 258-264(in Chinese))
- [14] He Hanwei, Jia Shouya. Direct Electrodeposition of Cu-Ni-W Alloys for the Liners for Shaped Charges [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2010, 26(5): 429-432.
- [15] 张全孝, 姚懂, 曹连忠等. 钨铜 EFP 药型罩的制备及成形性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(03): 527-

- 531 (Zhang Quanzhao, Yao Dong, Cao Lianzhong, et al. Preparation and Formability of Tungsten-Copper EFP Liner [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3):527-531(in Chinese))
- [16] 王占磊, 李晓杰, 张程娇 等. 爆炸烧结 W-Cu 合金药型罩材料及其性能[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3):332-336 (WANG Zhan-lei, LI Xiao-jie, ZHANG Cheng-jiao, et al. Explosive consolidation of W-Cu alloy as liner materials and its performance[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(3):332-336(in Chinese))
- [17] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社, 1997 (HUANG Pei-yun. Powder Metallurgy Science [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1997(in Chinese))
- [18] Trebinski R, Jackaski A. Influence of Shock Wave Heating during Porous Liners Launching on the Behavior of Jets[C]//17th International Symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998:235-242.
- [19] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京:科学出版社, 1999 (JING Fu-qian. Introduction of experimental equation of states[M]. Beijing: Science Press, 1999(in Chinese))

## On the Preparation and Penetration Performance of Tungsten-Copper Shaped Charge Liner

LIU Ying-bin<sup>1,2</sup>, SHEN Zhao-wu<sup>1</sup>, LIU Tian-sheng<sup>2</sup>, HU Xiao-yan<sup>1</sup>, SUN Su-jie<sup>3</sup>

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. School of Chemistry and Environment Engineering North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Science and Technology on Materials in Impact Environment Laboratory Yantai Sub-institute of China Ordnance Industries Group Corporation, Yantai 264003, China)

**Abstract:** In order to improve the penetration performance and stability of tungsten-copper shaped charge liner, a new W-Cu shaped charge liner was prepared. Based on the traditional tungsten-copper preparation method, a series of new technology was adopted including using mechanical alloying method to mix powder, using spin-mode suppression method to press the blank of shaped charge liner then sintered under the protection of methanol cracking gas. Density of W-Cu shaped charge liner before and after sintering was tested by drainage method. The penetration performance was compared experimentally between the W-Cu shaped charge liner and the copper plate shaped charge liner. Results show that the density of W-Cu shaped charge liner after sintering is lower than the density before sintering; for 603 homogeneous armor steel plate, the penetration performance of W-Cu shaped charge liner is superior to copper shaped charge liner, and the penetration depth increases up to 45% compared with copper plate shaped charge liner.

**Keywords:** W-Cu shaped charge liner; shaped charge; shaped charge granular jet