

文章编号: 1006-9941(2007)05-0555-05

粉末药型罩材料及其工艺技术的研究进展

王毅, 姜炜, 刘宏英, 陈伟凡, 安崇伟, 宋小兰, 李凤生

(南京理工大学 国家特种超细粉体工程技术研究中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 粉末药型罩的选材和制造工艺已成为国际冲击工程界的研究热点。本文主要总结了国内外相关领域的研究现状。着重讨论了适当引入 W、Co、Ni、Bi、Ta 等金属材料对以 Cu 粉为主体的粉末药型罩密度、成型、能量及破甲性能的影响, 并且对比了相同材料、不同加工工艺对粉末药型罩微观结构和射流质量的影响。展望了粉末药型罩的发展方向和前景, 认为通过对传统药型罩材料和工艺技术的改进来制造含能药型罩是粉末药型罩发展的主要趋势。

关键词: 材料学; 粉末药型罩; 粉末冶金; 爆轰; 射流; 能量

中图分类号: TJ55; TF125

文献标识码: A

1 引言

随着对破甲弹、侵彻弹等武器和石油射孔弹等民品研究的深入, 聚能装药作用越来越受到国内外的重视。药型罩作为聚能装药的核心部件在爆轰产物的推动下形成射流最终对目标进行侵彻。所以药型罩的质量直接决定了爆破战斗部的侵彻和破甲性能。其中材料技术是保证药型罩质量最关键的因素, 国内外对此进行了大量^[1,2]研究。事实证明, 粉末药型罩具有工艺简单、成分配比灵活、生产效率高、成型性好等特点, 而且很大程度上避免了杵堵等现象。然而粉末药型罩从本质上来说属于多孔材料, 其与相应的密实材料冲击压缩特性有所不同, 所形成射流的破甲能力存在一定差距, 其中最主要的是相同装药条件下粉末罩形成射流的速度要低于相应的密实罩^[3]。而且由于各成分的密度、粒度差别较大, 在制造时容易发生偏聚, 导致药型罩质量降低。本文针对粉末药型罩的选材和制造工艺, 从不同方面综述了目前国内外的一些优秀研究成果, 并且进行了相应的讨论和分析。

2 粉末药型罩材料技术

2.1 主体粉末材料

在粉末药型罩中, 一般采用铜粉作为主体粉末材料, 所占质量比通常为 50% ~ 90%。铜粉具有密度较

大($8.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、熔点适中($1083 \text{ }^\circ\text{C}$)、声速较高($4.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)、塑性好、有一定的强度等特点, 易于形成延展性好、不易断裂、不易气化的金属射流, 而且价格便宜。国内的铜粉主要有电解法生产的枝形粉和气雾化法生产的球形粉两种^[4]。球形铜粉价格低、流动性好、保质期长、不易于形成杵堵, 但成型性差、压制的粉末罩结合强度低、易破碎。枝形粉的成型性好, 粉末罩结合强度高, 但流动性差, 易氧化, 且容易形成杵堵。因此在实际生产中需要合理地搭配使用。Adam Jackowski 等人^[5]最新报道了一种用纯铜粉来制造药型罩的方法, 并且研究了应力对这种药型罩所形成射流的影响。先用粉末冶金法制造出药型罩的初级胚体, 再用 300 MPa 的静冷压力压胚, 然后在无氧条件下 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理 1 h, 最后在 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 1 h。测得成品密度为 $8.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 硬度为 45 HV。

不同方法制造的铜粉末罩显微结构对比如图 1 所示, 从图 1 中可以看出 Adam Jackowski 等人^[5]制造的纯铜粉末罩较普通铜合金粉末罩的晶粒细小、质地均匀。图 2 为不同应力所形成射流的 X-ray 图像^[5]。其表明, 该药型罩所形成的射流为粒子流, 当 $\varepsilon = 6.6\%$ 时射流延展性最好, 射流粒子的大小均匀, 两端成圆锥型, 中部的柱体粗长, 而且在药型罩直径及炸高一定时, 其表现出了最佳的长径比。

2.2 密度增稠剂

在射流的侵彻过程中, 密度是衡量其破甲能力的主要参数, 因此在无特殊要求时应当首选高密度的重金属及其合金作为制造药型罩的材料^[6-8]。钨粉因具有高密度($19.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和高声速($5.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 是极有前景的新型药型罩材料。钨射流具有较高的头

收稿日期: 2006-11-07; 修回日期: 2007-01-22

基金项目: 总装备部预研项目(41328030507); 国家自然科学基金资助项目(50306008)

作者简介: 王毅(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料方面的研究。e-mail: wangyi528528@tom.com

通讯联系人: 李凤生, 博导。

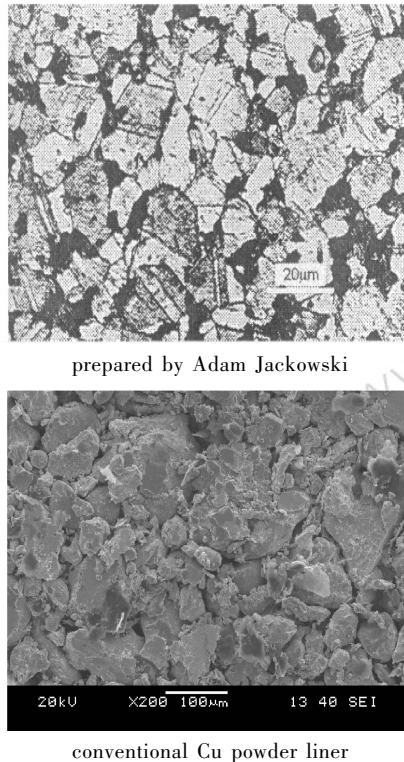
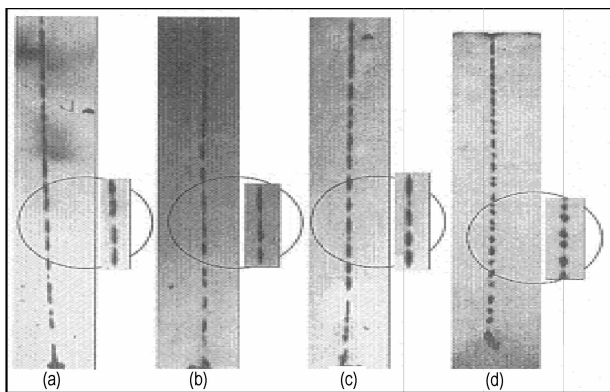


图1 不同方法制造的铜粉末罩显微结构对比
Fig.1 Comparison of structure of Cu powder liners
fabricated by different methods



(a) $\varepsilon = 0\%$, (b) $\varepsilon = 6.6\%$, (c) $\varepsilon = 14\%$, (d) $\varepsilon = 25.4\%$
图2 不同应力所形成射流的 X-ray 图像
Fig.2 X-ray photographs of the jets formed from liners
with different plastic strains

部速度,能有效地对抗反应装甲,缩短贯穿时间,尤其在掠飞攻顶侵彻情况下更希望有尽可能快的射流速度。铜中加入钨来提高铜合金的密度,可以提高铜药型罩的破甲威力。美国对 W-Cu 药型罩材料研究结果表明^[9],在3倍口径炸高条件下,其破甲深度可比纯铜药型罩提高30%左右。但 Cu-W 是一种具有正的混合热焓值的非互溶体系,用常规冶金方法是难以得到这

种体系的合金。张全孝等人^[10]采用机械合金化(MA)的技术,将铜、钨粉末在高能量磨球的撞击作用下,其粉末之间发生反复的破碎-冷焊-破碎的研磨,成为极细(纳米-微米级)的复合颗粒,发生固态合金化反应,形成 Cu-W 合金。若再加入微量 Co 元素,则可以扩大 W 在 Cu 中的固溶度,使 W 相形态改变近似球状,且均匀分布在 Cu 基上。同时,选择合适烧结温度,可提高 Cu-W 合金材料致密性。文献[11]表明,烧结温度为 850 °C 时,Cu-W 合金密度为 $8.016 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,孔隙率为 25%,当烧结温度为 1050 ~ 1070 °C 时,其密度为 $8.425 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,孔隙率下降为 21.1%。

2.3 成型助剂

合金粉末药型罩在成型过程中往往会出现力学强度差、表面不光滑、偏聚等现象,因此要加入一些粉末材料来帮助其成型。在粉末药型罩的压制成型过程中,粉末在压模内受到的压制压力,一部分用来使粉末颗粒产生重排、位移、变形和克服粉末颗粒间的内摩擦力,另一部分用来克服粉末颗粒与模壁之间的外摩擦力。由于这两种摩擦的影响,压力不能均匀有效地传递,产生压力损失,从而产生上述有害现象,因此任何减小摩擦阻力的措施均有利于压坯密度的提高。常用的成型润滑剂有石墨、硬脂酸锌和硬脂酸镁等。最近,肖志瑜^[12]等人报道了一种聚合物润滑剂,在压制过程中,温压使得聚合物润滑剂发生融化,粘流动性增加,在压力作用下发生流动,同时由于聚合物润滑剂的摩擦因数较小,加上模壁润滑充分改善了粉末和模壁、粉末和粉末之间的润滑条件和效果,有效地降低了粉末在成型过程中的摩擦阻力,并使粉末颗粒间相互填充的阻力减小。另外,聚合物润滑剂在温压成形中阻碍了粉末之间过早的机械结合和微观冷焊,减小了压力损失,最终提高了粉末压坯的密度和强度。

现在国内外一个重要发展趋势是采用大变形强化技术^[13]。文献[14]报道,单纯的钨粉末罩采用传统的压制(200 MPa 等静压)、烧结(1500 °C)后,往往容易在较薄弱的钨-钨颗粒结合面产生断裂,材料微观结合强度较低,且烧结点太高,加入铁镍金属粉末后再进行锻造和液力挤压变形,钨颗粒被拉长拉细,呈纤维状,断裂的机制和扩展路径也发生了变化,断裂方式主要为沿钨颗粒内部的穿晶断裂,由于钨的强度很高,钨颗粒的断裂所需启裂能较大,宏观拉断时则呈现很高的拉伸强度,而且延伸率较高,这样就能够大幅度提高钨合金粉末药型罩的实用性。但当 Ni 含量偏多或烧结参数不当时会引起 Ni 元素的偏聚,严重破

坏罩体的成型度和均匀性。因此, Ni 在钨-镍合金粉末罩中的微观分布状态是主要受控项目, 需要依据具体要求填充到最佳的比例。也可以加入一些低熔点的金属粉末, 如铋、铅、锡等, 采用低温烧结的处理方法来增加金属颗粒间的接触面积, 从而提高药型罩的强度和密实度。根据 Alistar Doig^[15] 的报道, 添加适量的铋粉和铅粉后, 药型罩的密实度由原配方的 92.1% 上升至 96.5%, 有效减少了粉末药型罩的孔隙度。

2.4 射流改善剂

钨-铜-镍合金粉是广泛应用的一种用于制造粉末药型罩材料。该合金药型罩所形成的射流, 具有高能聚能装药射流的两种特性, 即高密度和在射流断裂前的高延伸性。王凤英等人^[16] 对钨-铜-镍合金粉末罩进行了详细的研究, 从实验中观测到, 金属射流各部分的速度是不同的, 头部速度高, 尾部速度低, 因此射流在向前运动过程中首先会被拉长, 延伸到相当程度后出现颈缩, 然后断裂成小段。在时间为 220 μs 左右时, 钨铜镍罩的射流还未开始断裂, 而紫铜罩的射流已全部断裂。紫铜罩所形成的射流快速断裂后, 各小段的长度不再变化, 继续运动时, 各段射流间的距离逐渐加大, 各段射流侵入时, 由于时间间隔长, 前一段射流侵入产生的应力状态消失了, 后继射流段侵入时要重新“开坑”, 因而要消耗额外的能量, 使侵入能力大为下降, 这是铜罩与钨铜镍罩显著的区别之一。而且从射流形态上看, 紫铜罩射流断裂颗粒呈蛋形, 而钨铜镍罩射流粗, 边缘不光滑, 呈现各种形状的颗粒, 但均未断开。从破甲穿深看, 钨-铜-镍合金粉末罩侵入钢板时, 开坑小, 孔中部的鼓起小, 孔形变化比较匀称, 侵入性能比紫铜罩提高 38%, 而且光滑无炸, 对于无隔板装药最大穿深可达到 8 倍以上装药直径。

钽粉具有较高的密度 ($16.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 和良好的动态特性, 用高纯钽粉制造的钽药型罩晶粒细小, 显微组织均匀, 有一定的织构, 这样就大大提高了射流的稳定性, 进而改善了射流的侵入性能^[17-19]。文献[20]报道, 钽粉铜药型破甲深度比铜粉药型罩提高 27% ~ 30%, 现已作为一种新型药型罩材料用来制造爆炸成型弹的药型罩。在恒定的撞击能量 (2 MJ) 时, 对均质装甲钢板的最大侵入深度在最佳侵入速度范围内, 钽罩弹 (长径比 $L/D = 3 \sim 4$) 在最大侵入深度时的侵入速度为 $1.8 \sim 2.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而铜罩弹 (长径比 $L/D = 5 \sim 6$) 的则要高出 $0.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而且, 在 $2.15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 撞击速度上, 长径比 $L/D = 3$ 的钽罩弹的侵入深度与长径比 $L/D = 6$ 的铜罩弹的相同, 约为 144 mm。

铋是一种声速不高 ($1.771 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 密度较大 ($9.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 的低熔点材料 ($271.4 \text{ }^\circ\text{C}$)。根据郭圣延等人^[21] 的报道, 在粉末药型罩传统配方的基础上, 添加适量的铋, 明显提高了射流的穿深、增大孔径, 还能有效地抑制孔道的不规则程度, 提高射流的稳定性。据分析, 在射流的形成和拉伸阶段, 在冲击波作用下, 药型罩内的空穴进行绝热压缩, 理论估算其瞬时温度远高于铋的熔点, 但这一时间极短, 尚不足以使铋大量气化, 但可以使其全部或大部分处于熔融状态, 因而可以假设含有铋的粉末药型罩所形成的射流处于固液混合态, 而不是传统观点所认为的纯粹金属粒子流。铜钨射流在形成后, 会迅速弥散, 形成较差的疏散性射流, 这对于破甲是非常有害的。当在粉末药型罩材料中添加适量的铋后, 由于射流处于固液混合态, 其中的液体部分可以利用表面张力约束射流, 保持射流的表面光滑和轴对称性, 推迟射流断裂的时间。在射流穿靶阶段, 铋在三高区内极易气化, 从而产生大量的高压气体, 有利于扩大孔径, 同时, 高压气体膨胀所产生的应力波, 有利于后续射流的持续破靶。

2.5 能量添加剂

目前, 破甲弹在侵入目标后表现出后效不足, 不能对敌目标进行足够有效地打击, 是制约破甲弹发展的“瓶颈”, 在这些方面国内外都作了大量的研究实验。根据 E. L. Baker 和 A. S. Daniels 等人^[22] 的报道, 美国军方研究模拟了一种名叫“Barnie”的含能药型罩, 该药型罩材料中添加了一些钝感的含能物质, 所形成的射流在侵入目标的过程中会发生剧烈的化学反应, 生成大量的热和气体, 产生二次爆炸效应, 并且已经成功地应用于石质和混凝土靶材 (见图 3)。

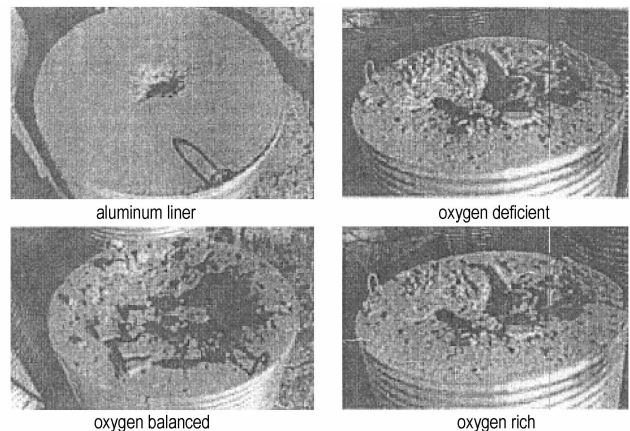


图3 混凝土靶材爆轰实验结果

Fig. 3 Experimental results of concrete attack test

从图3中可以看出,在药型罩直径、炸高及装药量一定时,普通的铝药型罩用于混凝土靶材时只有穿孔现象,而没有爆轰效果,但含能药型罩却表现出了穿孔与爆轰双重功效,并且在氧平衡时的爆轰效果最好,在靶材中留下了大、小直径分别为114 cm和97 cm,深度为19 cm的喇叭状弹坑。韩欢庆等人^[23]在钨合金粉末药型罩材料基础上增加Zr、Re等,可达到破甲和燃烧双功能效果。Re燃烧热值仅次于Ti和Zr,生产安全性较好,使用时不易形成致密氧化膜,价格便宜。我国包头稀土资源非常丰富,加Re作燃烧剂组分既符合我国国情又有广阔发展前景。烧结Zr-W-Re粉末合金时,要防止Re相呈较大的条块状分布或形成孔洞,因为这会使材质变脆,综合力学性能下降,降低对靶板的侵彻能力。贫铀是一种重要的金属元素,贫铀及其贫铀合金的密度高达 $18.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,接近钨的密度,文献^[24]报道,将其制成药型罩在装药爆炸时,贫铀药型罩能形成1 m长、密度大、稳定性和连续性好的射流,能穿透600 mm的装甲,并且其射流不会被主动装甲驱散,破甲能力比同口径紫铜药型罩高出60%,可达到药型罩最大直径的9~10倍。同时,贫铀有很好的后效作用,射流侵彻装甲时所产生的高温会使射流自行燃烧,发生如下化学反应: $3\text{U}^{238} + 4\text{O}_2 = \text{U}_3\text{O}_8 + 3402.72 \text{ kJ}$ 。放出高达3402.72 kJ的热量,如此高的放热量完全可以有效地烧毁内部设备,同时还可以造成很强的辐射危害。

3 发展方向和应用前景

聚能装药的研究已经走过了近80年的历史,随着石油开采技术和现代军工技术的发展,作业要求及其各类反应装甲防护技术得到进一步提高,如20世纪90年代出现的主动反应装甲和陶瓷增韧装甲^[25],由于其作用毁伤原理的改进,对目前传统意义上药型罩的选材和制造工艺提出了严峻的考验。因此,对粉末药型罩材料技术的发展提出了几点展望:

(1) 提高药型罩的后效性能,如将含能物质与传统药型罩材料优化结合,在保证射流正常侵彻的同时,充分利用含能材料的放热、爆轰等性能,来提高聚能战斗部的性能。

(2) 充分利用新工艺,如爆炸成型法、粉末超细化、机械合金化等来增大药型罩的直径、强度及密实度,以提高药型罩的质量。

(3) 合理选择和搭配各种不同性质的材料来增加粉末药型罩射流的延展性、提高射流的速度,以扩展粉

末药型罩的应用范围。

(4) 实践探索新材料,在满足粉末药型罩制造的基本要求的同时,进一步改善药型罩的质量,从而在现有的基础上提高药型罩的成型性能,简化药型罩的制造工艺,增强药型罩所形成的射流在破甲过程中的侵彻能力。

参考文献:

- [1] YU Chuan, TONG Yan-jing, YAN Cheng-li, et al. Applied research of shaped charge technology [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 23: 981-988.
- [2] 梁争峰, 胡焕性. 爆炸成型弹丸技术现状与发展[J]. *火炸药学报*, 2004, 27(4): 21-25.
LIANG Zheng-feng, HU Huan-xing. The current situation and future development direction of explosively formed projectile technology [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(4): 21-25.
- [3] 刘建韬, 邵琦, 郭惊雷. 聚能射孔弹合金药型罩的烧结机理[J]. *火炸药学报*, 2001, (2): 50-52.
LIU Jian-tao, SHAO Qi, GUO Jing-lei. Mechanism of sinter about explosive-loading alloy liners [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, (2): 50-52.
- [4] 胡忠武, 李中奎, 张廷杰, 等. 药型罩材料的发展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(10): 1009-1012.
HU Zhong-wu, LI Zhong-kui, ZHANG Ting-jie, et al. Advanced progress in materials for shaped charge and explosively formed penetrator liners [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(10): 1009-1012.
- [5] Adam Jackowski, Edward Wlodarczyk. The influence of repressing liners made from sintered copper on jet formation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 171: 21-26.
- [6] Fedorov S V. Magnetic-field amplification in metal shaped-charge jets during their inertial elongation [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, 41(1): 106-113.
- [7] Yin Z X, Ma C M, Li S X, et al. Perforation of an ultra-high strength steel penetrated by shaped charge jet [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, 379: 443-447.
- [8] 王铁福, 王雷, 阮文俊, 等. 药型罩材料的晶粒度对射流性能的影响[J]. *高压物理学报*, 1996, 10(4): 291-298.
WANG Tie-fu, WANG Lei, RUAN Wen-jun, et al. The effects of the grain size of a liner on the performance of shaped charge jets [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, 10(4): 291-298.
- [9] Huerta M, Vigil M G. Design, analyses, and field test of a 0.7 m conical shaped charge [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32: 1201-1213.
- [10] 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 Materials Science and Engineering*, 2000, 23(3): 44-50.
- [11] Wang Tie-fu. Copper-tungsten shaped charge liners and its perform-

- ance [A]. The Proceedings of 13th International Symposium on Ballistics [C], Stockholm, June, 1992, WM - 10/3.
- [12] 肖志瑜,李元元,倪东惠. 粉末冶金温压的致密化机理 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2006, 11 (2): 85 - 90.
XIAO Zhi-yu, LI Yuan-yuan, NI Dong-hui. Densification mechanism of warm compaction in powder metallurgy [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2006, 11 (2): 85 - 90.
- [13] German R M. Powder metallurgy science [M]. Metal Powder Industries Federation, New York, 1994.
- [14] Manfred Held. Liners for shaped charge [J]. *Journal of Battlefield Technology*, 2001, 4 (3): 2 - 11.
- [15] Alistar Doig. Some metallurgical aspects of shaped charge liners [J]. *Journal of Battlefield Technology*, 1998, 1 (1): 1 - 9.
- [16] 王凤英,刘天生,苟瑞君,等. 钨铜镍合金罩研究 [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 Armamentarii*, 2001, 22 (1): 112 - 114.
- [17] McWilliams S T. High spin armor piercing warheads development with Mo and Ta lines [A]. 2002 International Infantry and Small Arms [C], USA, NJ, 2002.
- [18] Kumar P. Recent advances in P/M-tantalum products [A]. Proceedings of the 15th International Plansee Seminar [C], Austria, Reutte, 2001. 449.
- [19] Lim J W. Improvement of Ta barrier film properties in Cu interconnection by using a non-mass separated iron beam deposition method [J]. *Materials Transaction*, 2002, 43 (3): 478.
- [20] Weimann K, Cauret M, Rondot F, et al. Terminal ballistics of EFPs with high L/D-ratio [A]. Proc 17th Int Symp on Ballistics [C], 1998. 215 - 224.
- [21] 郭圣延,曾新吾. 铋在石油射孔弹中的作用 [J]. 测井技术, 2002, 26 (4): 338 - 340.
GUO Sheng-yan, ZENG Xin-wu. Effect of bismuth on metal powder liner of petrol shaped charge [J]. *WLT*, 2002, 26 (4): 338 - 340.
- [22] Baker E L, Daniels A S, Ng K W, et al. Barnie: A unitary demolition warhead [A]. 19th International Symposium of Ballistics [C], Interlaken, Switzerland, 2001. 569 - 574.
- [23] 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.
HAN Huan-qing, JIANG Wei, ZHANG Peng, et al. Application of metal powders to shaped charge liner [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2004, 14 (3): 1 - 4.
- [24] SONG Shun-cheng, GAO Ping, CAI Hong-nian. Numerical simulation for formed projectile of depleted uranium alloy [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 24 (9): 1075 - 1080.
- [25] Hornemann U, Holzwarth A. Shaped charge penetration in alumina targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 20: 375 - 386.

Progress in Materials and Processing Technology of Powder Liners

WANG Yi, JIANG Wei, LIU Hong-ying, CHEN Wei-fan, AN Chong-wei, SONG Xiao-lan, LI Feng-sheng

(National Special Superfine Powder Engineering Research Center, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Investigation of materials and processing technology of powder liners have become a focus in the field of international impact engineering. The effects of metal materials such as W, Co, Ni, Bi, Ta, etc on the density, molding, energy, and penetration performance of Cu powder liners were emphatically discussed. The jet quality and microstructure of powder liners fabricated by difference technology with same materials were compared. Finally, the developmental trend and application prospects were put forward. It indicates that the manufacture and application energetic powder liners are the leading trend.

Key words: materials science; powder liner; powder-metallurgy; detonation; jet; energy