

钨铜 EFP 药型罩的制备及成形性能

张全孝, 姚 懂, 曹连忠, 贾万明, 马少华, 赵红梅

(中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 研究了 30W-Cu EFP 药型罩的制备及成形性能。采用普通钨粉、铜粉和超细钨铜复合粉制备两种不同的棒材, 然后测试棒材的锻造性能, 最后选用锻造性能好的材料制备 EFP 药型罩。研究表明: 采用普通钨粉、铜粉制备的材料具有较好的压力加工性能; 所制备的 30W-Cu EFP 药型罩材料的致密度达 98.2% 理论密度, 退火后材料的抗拉强度达到 315 MPa, 延伸率达 15.3%。

关键词: 钨铜合金; 爆炸成形弹丸; 药型罩; 锻造;

中图分类号: TG 146.4⁺11

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0527-05

爆炸成形弹(EFP)属于聚能装药。采用大于 120° 锥角的球缺罩或双曲形药型罩等聚能装药, 当装药爆炸后, 药型罩被爆炸载荷压垮, 经翻转和闭合后形成爆炸成形弹丸。与金属射流相比, 爆炸成形弹丸具有对炸高不敏感、反应装甲对其干扰小、侵彻后效大等特点。

影响爆炸成形弹丸侵彻威力的因素有很多种, 弹丸材料是重要影响因素之一。目前国外对爆炸成形弹药型罩材料进行了大量研究, 纯铁、铜、钨、贫铀、钨-铜合金等是良好的候选材料。纯铁和铜的塑性好, 但密度偏低, 使形成弹丸的动能减小, 从而降低了其对靶板的侵彻力。贫铀具有高的密度和良好塑性, 但有放射性, 对人体产生有害影响。钨具有高密度、高动态延伸率等优良综合性能。研究表明, 在相同质量、相同长径比条件下, 钨的侵彻性能较铜高 30%~35%。但缺点是钨价格昂贵, 成本高, 使用受到限制。W-Cu 材料具有较高的密度和强度, 目前国外主要用在聚能射流药型罩上。研究表明, 在 3 倍口径炸高条件下, 其破甲深度可比 Cu 药型罩材料提高 30% 左右。因此, W-Cu 复合材料在爆炸成形弹药型罩上也具有很大应用潜力^[1-5]。

本研究提出一种低成本的新的钨铜材料, 研究其烧结及锻造性能。试验采用普通钨铜粉末和超细钨铜复合粉末, 用常规的粉末冶金方法制备出钨铜材料, 然后对材料进行锻造变形。研究采用 30W-Cu 材料, 其理论密度为 10.68 g/cm³, 钨的质量分数为 30%。

1 实验方法

收稿日期: 2008-02-25

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 张全孝, 男, 1963 年生, 硕士, 研究员, 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103, 电话: 0574-87902104

1.1 普通钨铜粉末制备材料

采用粒度 < 48 μm 的铜粉和 74 μm 的钨粉。将钨粉和铜粉配好料后在混料机中混料, 混料后过筛, 经冷等静压制制成 Φ23 mm 的圆棒, 然后将 Φ23 mm 的圆棒在 H₂ 气氛下进行烧结, 烧结时间为 1 h, 烧结温度为 800~1150 °C。确定出最佳烧结工艺, 并且测定圆棒的密度。

1.2 超细钨铜复合粉制备材料

试验用超细钨铜复合粉末由喷雾热分解法制备。具体过程如下: 根据成分设计要求, 用偏钨酸铵和硝酸铜以一定比例溶解于蒸馏水中配制成混合溶液。采用 MDR-5 型离心压力喷雾干燥机来制备前驱体粉体, 然后将前驱体粉体在 DL-200 型推杆还原炉中进行焙烧, 焙烧温度为 600 °C, 焙烧时间为 1~3 h。焙烧后在 ND-7 型行星式球磨机中进行湿磨, 最后在 DL-200 型推杆还原炉中进行还原, 还原温度为 600~800 °C, 还原时间为 1~3 h, 氢气流量 1~5 m³/h。还原后经检测, 超细钨铜复合颗粒的大小在 100~300 nm 之间, 所制备的钨铜复合粉末满足成分设计要求。

将所制备的超细钨铜复合粉体在冷等静压机上压制 Φ23 mm 的圆棒。然后将 Φ23 mm 的圆棒在 H₂ 气氛下进行烧结, 烧结时间为 1 h, 烧结温度为 800~1150 °C。确定出最佳烧结工艺, 并且测定圆棒的密度。

1.3 棒材的锻造变形

按照前述试验所确定的最佳工艺制备出两种材料的 Φ40 mm 圆棒, 然后进行锻造。锻造温度为 650~850 °C, 锻造后测定圆棒的密度, 选取锻造性能最佳

的材料。

确定好材料后,制备图 1a 所示的毛坯,将毛坯在 RX5-76-13 箱式电阻炉中加热,加热温度为 650~850 °C,加热时间 30 min,然后将其锻至图 1b 所示的 EFP 药型罩毛坯。

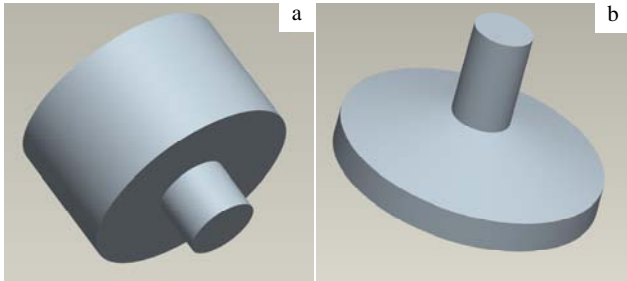


图 1 30W-Cu 锻造前后的毛坯形状

Fig.1 Specimen of 30W-Cu composites before and after forging: (a) sintering specimen and (b) EFP liner

锻造后,从毛坯上取样测定材料的密度、静态拉伸性能、布氏硬度及金相组织。

2 结果分析

2.1 钨铜棒材的烧结性能

图 2 为普通钨铜粉制备圆棒的相对密度与烧结温度的关系。从图 2 可以看出,随着烧结温度的升高,钨铜合金的密度也相应增加。圆棒在 1130 °C 烧结时,致密度达到了 91.3% 理论密度。当烧结温度达到 1150 °C 时,钨铜圆棒开始垮塌。

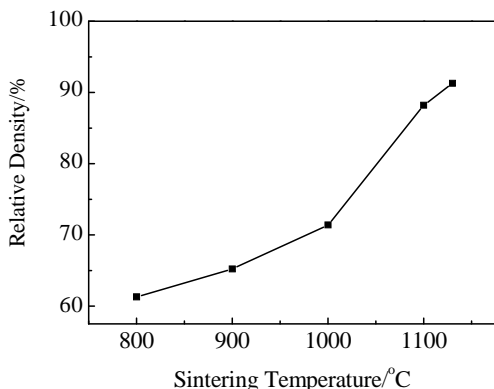


图 2 普通钨铜粉制备棒材的相对密度与烧结温度的关系

Fig.2 Effect of sintering temperature on relative density of the tungsten-copper bar

在固相烧结阶段,材料的致密主要依靠固相的迁移和扩散进行,由于扩散比较缓慢,在烧结时间不长的情况下,材料的致密度提高有限。在液相烧结阶段时,钨颗粒开始在液相铜中重排,并且液相铜开始大量填充空隙,材料的密度迅速提高。由于钨铜棒材的含钨量只有 30%,钨在棒材中的体积理论上也就占 16.6%,在烧结过程中并不足以形成钨骨架。因此当烧结温度过高,烧结时间过长时,棒材中出现大量液相,在重力作用下钨颗粒将在液相铜中聚集并形成偏析,最终导致钨铜棒材垮塌。

图 3 为钨铜圆棒经 1130 °C 烧结后的光学显微组织。基体为铜相,颗粒状组织为钨,黑色斑点为微孔和杂质。图 4 为钨铜圆棒的背散射电子形貌像。黑色的为铜基体,白色的为钨颗粒。

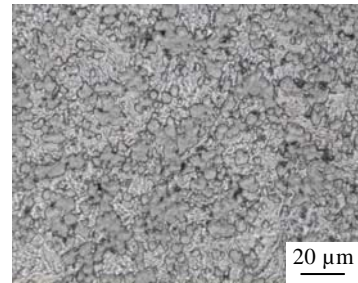


图 3 普通钨铜粉制备的圆棒烧结后的显微组织

Fig.3 Microstructure of the tungsten-copper bar after sintering

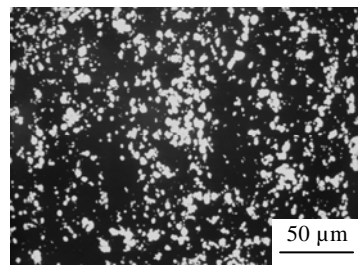


图 4 普通钨铜粉制备的圆棒烧结后的背散射电子形貌像

Fig.4 Back scattered electron image of SEM of the tungsten-copper bar after sintering

从图 3 和图 4 可以看出钨铜粉末机械混合均匀,烧结后钨颗粒与铜颗粒的分散性很好,没有出现钨颗粒明显偏聚的现象,并且烧结体中存在着微孔。

图 5 为超细钨铜复合粉制备的圆棒的相对密度与烧结温度关系。由图 5 可以看出,采用超细钨铜复合粉末制备的棒材的烧结温度与密度关系与普通钨铜粉末制备的棒材相同。但是在相同的烧结温度和烧结时

间条件下, 采用超细钨铜复合粉末制备的棒材比普通钨铜粉末制备的棒材致密。圆棒在 1130 °C 烧结时, 致密度达到 94% 的理论密度。

图 6 为超细钨铜复合粉制备的棒材经 1130 °C 烧结后的光学显微组织。浅色相为铜相, 深色相为钨和铜的复合相, 黑色为孔隙。

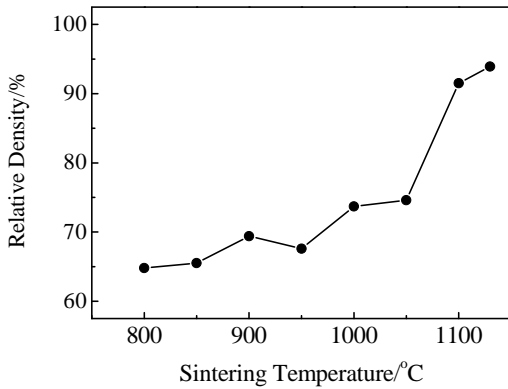


图 5 超细钨铜复合粉末制备棒材的相对密度与烧结温度的关系

Fig.5 Effect of sintering temperature on relative density of the tungsten-copper bar prepared by the ultrafine tungsten-copper composite powder

2.2 钨铜棒材的锻造性能

锻造最初采用自由锻造, 锻后两种棒材很容易出现纵向裂纹。钨铜圆棒的锻造过程是一个局部变形的过程, 最初圆棒与锤头及锤砧是线接触, 随着锻造的进行, 圆棒与锤头及锤砧的接触面积逐渐增大, 接触面所受的压应力也大, 接触面区域首先变形, 接触面附近的孔隙将逐渐变小, 接触面附近的基体密度逐渐增大。作用力在圆棒中沿高度方向分散分布, 上下两个接触面压应力较大, 变形主要集中在上下部分, 轴

心部分的金属变形较小, 因而变形金属沿横向流动, 对轴心部分金属产生了拉应力。随着锻造的进一步进行, 接触面积进一步增大, 圆棒与锤头及锤砧之间的摩擦增加, 而且温度降低较快, 变形抗力增加, 当增大锻造力后, 轴心部分的拉应力也增大到使轴心部分的孔隙和微裂纹扩展, 最终使圆棒出现纵向裂纹。

在型砧内进行锻造可以限制金属的横向流动, 防止内部纵向裂纹的产生。选取一系列型砧, 尺寸范围为 $\Phi 25\text{ mm} \sim 40\text{ mm}$ 。锻造结果见表 1。

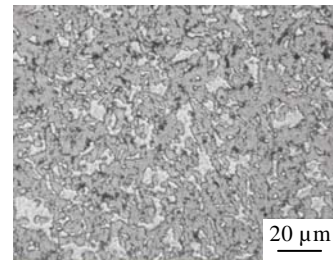


图 6 超细钨铜复合粉制备的棒材的显微组织

Fig.6 Microstructure of the tungsten-copper bar prepared by the ultrafine tungsten-copper composite powder

从表 1 可以看出, 通过锻造可以显著提高材料的致密度。普通钨铜粉制备的棒材的可锻性明显好于超细钨铜复合粉制备的棒材。采用超细钨铜复合粉末制备的棒材可锻性较差, 由于采用的钨铜复合粉末颗粒尺寸比较小, 尺寸在 100~300 nm 之间, 颗粒的表面活性非常大, 复合粉极易氧化及吸湿, 复合粉中杂质也较多, 烧结后材料也未进行真空处理, 因此材料中氢含量较高, 很容易造成氢脆。采取一些措施可以减小这些不利因素对材料性能的影响, 但最终制备的材料已经不能满足低成本的要求, 因此后续模锻试验采用普通钨铜粉制备的棒材。

表 1 两种材料的锻造结果

Table 1 Forging quality for two sorts of materials

Material	Density before forging/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Relative density/%)	Density after forging / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Relative density/%)	Diameter after forging/mm	Forging shrinkage/%
30W-Cu bar	9.75(91.3)	10.46(97.9)	26	57
30W-Cu bar prepared by the ultrafine tungsten-copper composite powder	10.03(93.9)	Rupture	—	—

图 7 为 30W-Cu EFP 药型罩毛坯的锻造过程示意图。锻前毛坯的密度为 $9.79\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 达 91.6% 理论密度, 延伸率为 5.5%, 材料呈脆性状态。变形量根据变形前后毛坯锥部厚度估算所得, 变形量达到 72%。

在毛坯的锻造过程中, 毛坯的变形经历了 3 个阶段: 第 1 个阶段是毛坯在阴模中的镦粗过程, 在此过程中毛坯的上部和下部首先变形, 在压应力的作用下上部和下部的微孔逐渐变少, 密度增大, 与阴模及冲

头的接触面积也增加，摩擦力增大，摩擦力产生了一个拉应力分量，在拉应力的作用下金属产生了横向流动，图 7b 所示。当金属流动至阴模壁时，这就达到了变形的第 2 个阶段，图 7c 所示。在第 2 个阶段，金属的横向流动受到阻碍，金属将沿着阴模底部的圆孔流动，在此过程中毛坯内的微孔进一步减少，密度继续变大。当流动至顶料杆时达到了变形的第 3 个阶段：

复压阶段，毛坯主要通过静水压力来消除微孔，要达到微孔的完全消除非常困难，因此在这阶段毛坯的密度提高有限，提高毛坯致密度的过程主要是第 1 和第 2 阶段，合理地设计药型罩毛坯形状，控制好毛坯的质量，使得毛坯在第 1 和第 2 阶段充分变形，最终可以提高毛坯锻造后的密度。

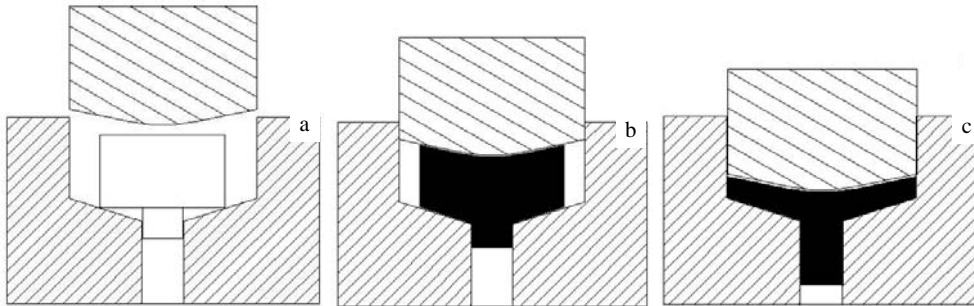


图 7 30W-Cu 毛坯锻造过程示意图

Fig.7 Forging process of the 30W-Cu specimen: (a) primary, (b) first step and (c) second step

表 2 为 30W-Cu EFP 药型罩毛坯锻造后经热处理后的力学性能。从表 2 可以看出，通过锻造后热处理可以显著提高钨铜材料的综合性能，密度从烧结态的 91.6% 理论密度提高到 98.2% 的理论密度，材料延伸率从 5.5% 提高到 15.3%，表现出一定的塑性。

纤维状组织，这与试验观察不符。因此，钨铜毛坯的变形方式属于第一种方式，金相中没有观察到钨颗粒的流线分布是在锻造过程中金属在纵向和圆周方向都发生了流动的缘故。

表 2 毛坯模锻后的力学性能

Table 2 Mechanical property of the specimen after forging

Density /g.cm ³	Relative density/%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	<i>A</i>	HB/MPa
10.49	98.2	315	270	15.3%	980

钨铜毛坯的锻造过程中，基体材料的变形存在两种方式。第一种是仅有铜基体变形，钨颗粒不发生变形，并且钨颗粒沿着基体变形方向流动，最后在基体中呈流线形分布。第二种方式是铜基体和钨颗粒都发生变形，变形后铜和钨都呈纤维状。对锻造后的毛坯进行退火然后观察其金相组织，退火温度为 500 °C，时间 2 h。图 8 为 30W-Cu EFP 药型罩毛坯锻造后经 500 °C，2 h 退火的金相组织。颗粒状的组织为钨相，基体为铜相。

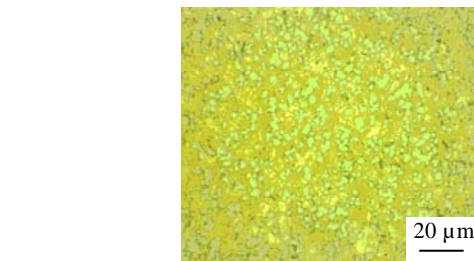


图 8 30W-Cu EFP 药型罩毛坯退火的显微组织

Fig.8 Microstructure of the 30W-Cu EFP liner after annealing

由图 8 可以看出，铜基体发生了再结晶，形成均匀的细晶组织，钨颗粒基本上没发生长大及偏析。钨在锻造中并没有发生变形，因为热处理的温度较低，而且钨的再结晶温度远高于此退火温度，如果钨颗粒发生变形，则在此温度退火后钨颗粒将保持变形时的

3 结 论

1)在相同烧结条件下，超细钨铜复合粉制备的材料致密度要优于采用普通粉制备的材料，但普通粉制备的材料具有更好的压力加工性能。

2)通过锻造可以显著地提高钨铜烧结材料的密度，锻后经退火 30W-Cu EFP 药型罩材料的致密度达 98.2% 理论密度。热处理后材料的抗拉强度达到 315 MPa，延伸率达 15.3%。

参考文献 References

- [1] Jia Wanming(贾万明), Shi Honggang(史洪刚), Zhang Quanxiao(张全孝) *et al. Ordnance Material Science & Engineering* (兵器材料科学与工程)[J], 2006, 29(1): 33
- [2] Jia Wanming(贾万明), Zhang Quanxiao(张全孝), Bai Zhiguo(白志国) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2007, 36(9): 1511
- [3] Zhao Teng(赵腾), Luo Hong(罗虹), Jia Wanming(贾万明) *et al. Ordnance Material Science & Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2007, 30(5): 78
- [4] Held M. *20th Int Symp on Ballistics*[C], Orlando: FL, 2002: 425
- [5] Seong Lee, Eun Pyo Kim, Youngmoo Kim *et al. 22nd Int Symp on Ballistics*[C], Canada: International Ballistics Committee, 2005

Preparation and Formability of Tungsten-Copper EFP Liner

Zhang Quanxiao, Yao Dong, Cao Lianzhong, Jia Wanming, Ma Shaohua, Zhao Hongmei
(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

Abstract: The preparation and formability of 30W-Cu EFP(explosively formed projectile) liner were studied. At first the two different 30W-Cu materials were prepared by tungsten powder, copper powder and ultrafine tungsten-copper composite powder, and then the two materials' formability were tested. Finally the material which had good formability was used to prepare EFP liner. It was found that the 30W-Cu material prepared by common tungsten powder and copper powder had a good formability. 98.2% of the theoretical density of the density of the 30W-Cu EFP liner material was obtained. After annealing, the tensile strength of the material reached 315 MPa and elongation reached 15.3%.

Key words: tungsten-copper ally; EFP; liner; forging

Biography: Zhang Quanxiao, Master, Professor, Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, P. R. China, Tel: 0086-574-87902104