

爆炸压涂钨铜覆层到铜表面的研究

陈翔, 李晓杰, 闫鸿浩, 王小红, 缪玉松

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用爆炸烧结将钨铜合金覆层烧结到纯铜表面的方法, 即将钨铜合金粉末预压到铜板的表面后, 进行通氢烧结, 然后通过爆炸压实将混合粉末进一步压在铜板表面, 最后扩散烧结成为钨铜复合材料。先采用 AUTODYN 软件模拟了爆炸压实过程中粉末与铜板中的压力分布, 确定了一套可以使覆层粉末中压力分布均匀, 有利于钨铜合金粉末均匀致密化的参数。而后进行爆炸压实试验, 制出的试样覆层密度达到了理论密度的 99.3%。对爆炸后的试件进行电子探针检测, 检测结果表明钨铜粉混合均匀, 钨颗粒的尺寸比铜颗粒要大的多。断口分析结果显示, 钨铜覆层的断口形貌不同于传统的断口形貌。钨铜结合面的形貌分析表明, 钨铜合金密实的烧结在了铜基体的表面。

关键词: 钨铜合金覆层; 爆炸压实; 断口分析

中图分类号: TG146.4⁺11

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)03-0968-04

钨铜复合材料是一种假合金, 它既综合了钨和铜各自的特性, 如高导电率、高导热率、高硬度, 耐高温性能、耐电弧侵蚀性能以及低的热膨胀系数等, 同时, 可以通过改变钨与铜的配比, 调控其各个相应的物理、机械性能。此外, 由于金属钨与金属铜物化性能相差较大, 这 2 种金属结合而形成的钨铜复合材料因综合了钨和铜的独特性能而具有优异的导电导热性、耐磨性、耐高温抗氧化性以及优异的力学性能等特点而广泛应用于航空航天、核电、汽车、化工、冶金和机械制造等行业^[1-3]。因此, 许多科研工作者都尝试着采用各种表面工程技术在铜基体材料表面制备钨及其合金涂层, 这样既最大限度的节约了资源又降低了成本。

目前, 铜及其合金表面制备钨或钨合金涂层的技术主要有电镀、等离子喷涂、物理和化学气相沉积、激光和电子束表面合金化等^[4-7]。电镀技术对环境有较大的污染, 涂层在外力作用下易发生脱落; 大气等离子喷涂工艺在制备钨涂层的过程中, 喷涂粒子在大气环境飞行过程中容易被氧化, 因而制备出的涂层中氧化杂质含量较多。真空等离子体喷涂可以避免粒子氧化的问题, 但由于操作过程需要在真空环境进行, 因而加工工件的尺寸受到限制; 气相沉积方法成本相对较高, 而且沉积效率不够高, 制备较厚涂层的难度较大; 激光和电子束表面合金化成本高且能量利用率低。

爆炸加工粉末涂层是一种新兴的爆炸加工技术, 文献[8]对纯铜表面爆炸涂覆纳米氧化铝强化覆层进行了研究, 取得了很好的强化效果。本研究采用粉末

冶金结合爆炸压涂的方法将钨铜合金粉压涂在铜的表面。电子探针检测结果显示钨铜混合均匀。断口分析结果显示, 钨铜覆层部分是脆性断裂。运用该方法制出的涂层与基体结合紧密, 涂层厚度可控, 为钨铜复合材料的制备及研究提供了新的方法。

1 覆层的制备

1.1 机械合金化

机械合金化方法是一种便捷的制备合金粉末的方法。许多学者^[9-11]对机械合金化制备钨铜合金粉末进行了深入的研究。本实验使用 75 μm 大小的钨粉和铜粉, 制成 85%W-15%Cu 的混合粉末, 球料比为 4:1, 在 300 r/min 的转速下机械球磨 50 h。图 1 为球磨粉末的 XRD 图谱。从图中可以看出, 钨和铜的衍射峰消失, 出现了钨铜合金的衍射峰, 这说明球磨过程中钨铜粉末间发生了挤压、焊合从而形成了钨铜合金粉末。图 2 为机械球磨后的粉末 SEM 照片。从图 2 中可以看出球磨后粉末颗粒的尺寸大部分在 0.5~5 μm 之间。这说明经过长时间的机械球磨, 高速运动的磨球对粉末颗粒进行反复的挤压、碰撞, 使颗粒发生变形、断裂, 从而细化了金属粉末颗粒。

1.2 还原预烧结

将粉末均匀的涂在铜板的表面, 在压力机上进行预压, 使粉末的密度达到理论密度的 50%~60%。金属粉末在球磨的过程中和球磨以后不可避免的会与空气接触, 这样就会使金属粉末的表面氧化, 从而影响压

收稿日期: 2017-03-20

作者简介: 陈翔, 男, 1990 年生, 博士生, 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024, E-mail: m18740280150@163.com

实的效果。本实验将粉末置于氢气的氛围中进行预烧结，从而将合金粉末中的氧化物还原。文献[9]的研究表明，在 830 °C 下通氢烧结 10 h，可以将钨铜表面的氧化物充分还原。由于本实验中钨铜覆层的厚度非常薄，易于还原，所以选择在 850 °C 下通氢预烧结 3 h。

2 爆炸压实

2.1 爆炸压实的数值计算

本实验的装药不同于平面粉末的压实或轴对称粉末的压实^[12]。参考相关的研究^[13,14]选择装药参数，取侧面装药厚度 30 mm，顶部装药厚度 50 mm。运用 AUTODYN 软件对爆炸压实的过程进行数值模拟，确定装药参数是否合理。炸药部分使用欧拉算法，金属部分使用拉格朗日算法。炸药的 JWL 状态方程根据实验使用的炸药参数拟合得出。钨铜合金使用多孔状态方程，铜材和钢材使用的是 Shock 状态方程。铜材和钢材使用 John-Cook 本构模型。在钨铜涂层表面每隔 4 mm 取 1 个观测点如图 3a 所示。图 3b 为压实过程中的应力云图分布。从中可以看出在压实过程中涂层上没有出现局部的应力集中。图 3c 中的曲线为各点处的压力时程曲线。从中可以看出压力峰值在涂层内部未有较大变化，保证了涂层各处受力的均匀性，避免局部应力集中从而影响涂层的致密化。

2.2 爆炸压实实验

图 4 为爆炸压实装置示意图。实验使用的是 ANFO 炸药，装药密度为 1.0 g/cm³，爆速约为 3500 m/s，爆压为 4 GPa。顶部装药厚度为 50 mm，四周装药厚度为 30 mm。用电雷管从顶部中心起爆以保证产生的爆轰波是对称的。爆轰波将钨铜合金粉末进一步压实，使粉末颗粒之间、粉末与铜表面之间紧密的结合在一起。将爆炸压实完之后的试样放入真空烧结炉中在 850 °C 下复烧 1 h，使钨铜粉末颗粒间进一步扩散烧结结合。

3 结果与讨论

爆炸压实烧结出的铜基钨铜覆层材料如图 5 所示，上层是 0.5 mm 的钨铜合金，下层是纯铜层，铜板厚度未发生变化为原始的 1 mm，整个试件为直径 40 mm 圆盘。用阿基米德排水法对剥离的钨铜覆层进行了密度测量。结果表明，钨铜覆层的密度为理论密度的 99.3%。

对试件进行显微金相分析，结果如下。图 6 为电子探针组织结构与 EDS 元素面分析结果，其中图 6a 为组织结构图，明亮部分为钨颗粒，钨颗粒之间灰暗的部分是铜颗粒，最右侧灰暗的大块区域为铜基底。图 6b 是铜元素的分布图。从中可以看出，钨铜粉末混合均匀，

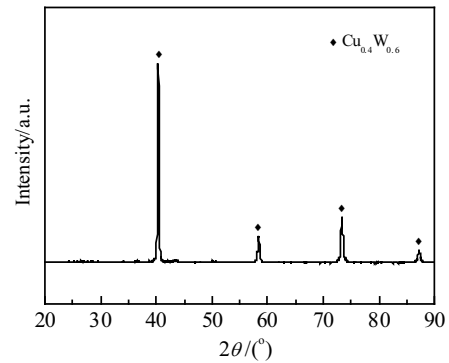


图 1 钨铜合金的 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of W-Cu alloy

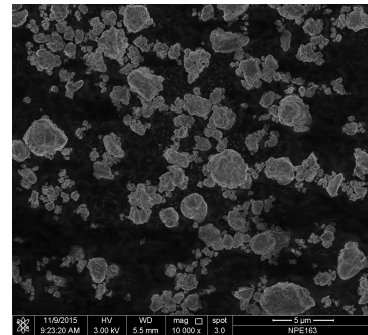


图 2 钨铜合金粉末的 SEM 照片

Fig.2 SEM image of W-Cu alloy powder

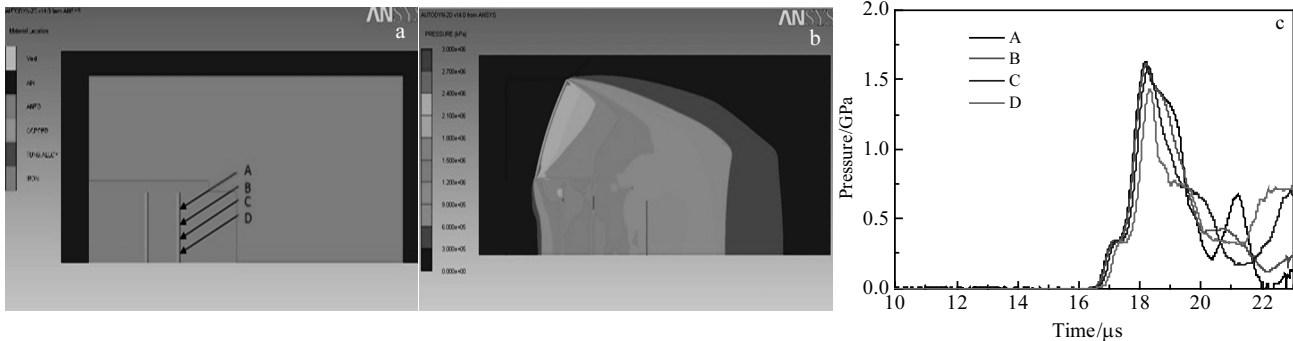


图 3 爆炸压实模拟

Fig.3 Numerical simulation of explosive compaction: (a) observation points, (b) stress distribution, and (c) pressure-time curves

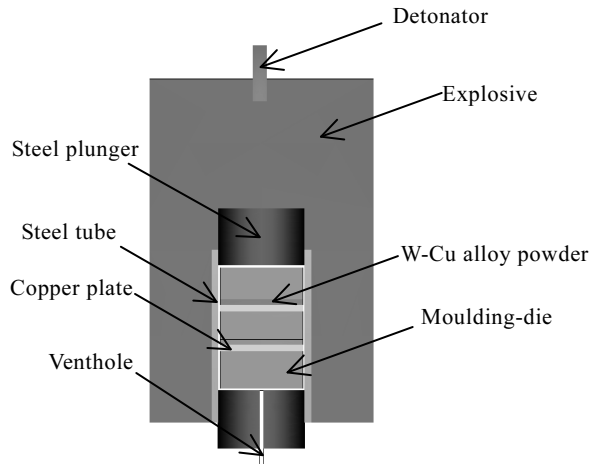


图 4 实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of experimental set-up

对材料进行拉伸断口分析，铜基体的断裂方式符合铜的断裂特点^[15,16]。图 7 为钨铜覆层的拉伸断口形貌，该断口形貌不同于以往传统的断口形貌。由于钨铜覆层是由金属粉末挤压而成的，这些颗粒靠分散在钨颗粒之间的铜互相结合在一起。在拉伸力的作用下，粘在钨颗粒表面的铜被拉断，在这些有铜的部位发生的是韧性断裂。铜颗粒被拉开，使钨颗粒裸露出来，形成了类似混凝土的断口形貌，断口整体呈现出脆性断裂的特征。从图中可以看出钨颗粒呈片状，这是由于在球磨过程中钢球的碰撞挤压造成。试件经过大的弯曲变形，表面的钨铜覆层脱落。图 8 为铜与钨铜覆层结合界面的微观形貌。从图中可以看出钨铜合金紧密的结合在铜基体的表面，说明钨铜合金烧结在了铜的表面且有着很高的结合强度。

还可以观察出钨颗粒的形貌和尺寸，存在少量的大块钨颗粒，尺寸在 20~40 μm 之间，较原始 75 μm 降低 50%左右，大部分颗粒尺寸在 5 μm 以下。图 6c 是钨元素的面分布图。从中可以看出，铜颗粒被粉碎的十分均匀，颗粒尺寸在 5 μm 以下。图 6d 为氧元素的面分布。从图中可以看出，在铜基体上的氧元素含量比钨铜合金覆层的高，有少量点状的氧元素聚集，可能是在磨抛制样时引入的。实际上由钨铜覆层的密度达到理论密度的 99.3%可以判断，通氢还原效果较好，也说明氧元素聚集应是在磨抛制样过程中引入的。

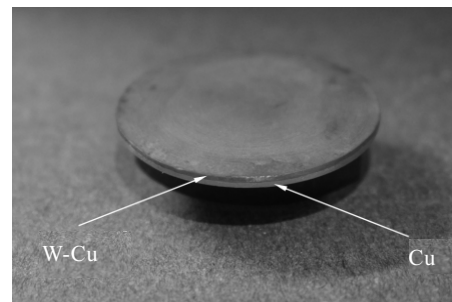


图 5 制备的试样

Fig.5 Prepared sample

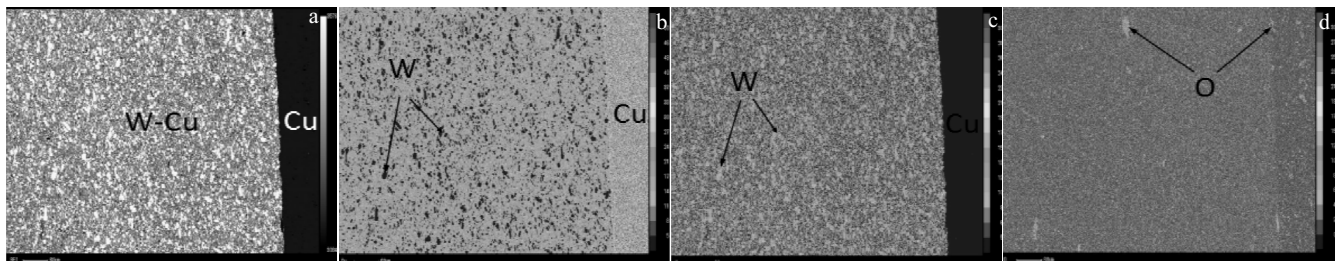


图 6 覆层与基体交界处组织结构背散射电子像与 EDS 元素面分布

Fig.6 Back scattering image (a) and EDS element distributions (b, c, d) of coating and substrate junction: (b) Cu, (c) W, and (d) O

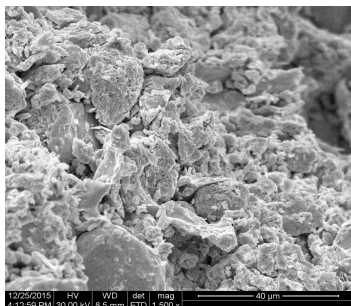


图 7 钨铜覆层断口的 SEM 照片

Fig.7 SEM image of coating fracture

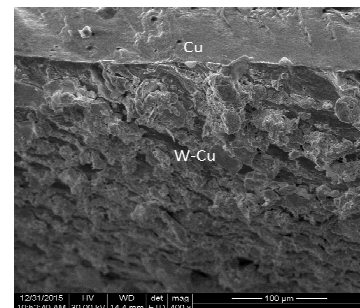


图 8 铜与钨铜覆层交界面的 SEM 照片

Fig.8 SEM image of coating and substrate junction

4 结论

1) 采用粉末冶金结合爆炸压涂方法,将钨铜合金涂覆到铜基体上。通过机械球磨将钨粉和铜粉制成钨铜合金粉末,颗粒的尺寸得到细化,使大部分的颗粒尺寸达到 5 μm 以下,少量在 20~40 μm 之间。

2) 运用数值模拟检验了设计的装药参数。得出压实过程中钨铜覆层内的压力分布均匀,有利于形成致密的覆层。运用该参数制备出的钨铜覆层密度达到理论密度的 99.3%。制备出的钨铜覆层中钨铜混合均匀,覆层与铜基体结合紧密。覆层断口呈现出局部的韧性断裂和整体的脆性断裂的特点。

参考文献 References

- [1] Selvakumar N, Vettivel S C. *Materials & Design*[J], 2013, 46(4): 16
- [2] Chen P G, Shen Q, Luo G Q *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2013, 36: 220
- [3] Echlin M L P, Mottura A, Wang M *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 64: 307
- [4] Nitta K, Nohira T, Hagiwara R *et al. Journal of Applied Electrochemistry*[J], 2010, 40(8): 1443
- [5] Pintsuk G, Smid I, Döring J E *et al. Journal of Materials Science*[J], 2007, 42(1): 30
- [6] Song J, Yu Y, Zhuang Z *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 442(1): S208
- [7] Auciello O, Chevacharoenkul S, Ameen M S *et al. Journal of Vacuum Science & Technology A*[J], 1991, 9(3): 625
- [8] Sun W, Li X, Hokamoto K. *Ceramics International*[J], 2013, 39(4): 3939
- [9] Wang Z, Li X, Zhu J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(21): 6098
- [10] Ryu S S, Kim Y D, Moon I H. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2002, 335(1): 233
- [11] Kim J C, Moon I H. *Nanostructured Materials*[J], 1998, 10(2): 283
- [12] Orlenko L P. Translated by Sun Chengwei(孙承纬). *Explosion Physics (爆炸物理学)*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1271
- [13] Prümmer R. *Materialwissenschaft and Werkstofftechnik*[J], 1989, 20(12): 410
- [14] Hokamoto K, Tanaka S, Fujita M. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2000, 24(6): 631
- [15] Ebrahimi F, Zhai Q, Kong D. *Scripta Materialia*[J], 1998, 39(3): 315
- [16] Srivatsan T S, Narendra N, Troxell J D. *Materials & Design*[J], 2000, 21(3): 191

Explosive Compact-coating Tungsten Copper Alloy to Copper Surface

Chen Xiang, Li Xiaojie, Yan Honghao, Wang Xiaohong, Miao Yusong

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: This paper proposed a new method to sinter tungsten-copper alloy onto copper plate surface by explosive-compact-coating. Its steps included pre-compacting tungsten-copper alloy powder onto copper plate surface, sintering in the hydrogen, then compacting the powder by detonation pressure to ensure the strong bonding between the coating and substrate, and finally diffusion sintering. We simulated the compressing process of explosive compaction by the commercially available package AUTODYN and determined the processing parameters which could cause uniform distribution of pressures in the coating powder and uniform densification of alloy powder. Then we conducted the explosive-compacting experiments. Results show that the density of the coating layer reaches up to 99.3% of the theoretical value using the parameters in simulation. Microstructure characteristics indicate that tungsten-copper alloy powder mix well. The tungsten particles are much larger than copper particles. The SEM fracture morphology of the tungsten-copper coating layer is different from traditional fracture. The joint surface of tungsten-copper and copper demonstrates that tungsten-copper alloy is compactly sintered on the surface of the copper.

Key words: tungsten-copper alloy; explosive compaction; fracture surface analysis

Corresponding author: Li Xiaojie, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, E-mail: dalian03@qq.com