

文章编号: 1001-1455(2006)04-0356-05

WC/Al₂O₃ 颗粒增强 Cu 基复合材料 爆炸粉末烧结实验研究*

李晓杰, 王占磊, 谢兴华, 赵 铮, 史兴治
(大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用爆炸粉末烧结工艺, 探索 WC / Al₂O₃ 同时作为增强基颗粒制取多种颗粒增强 Cu 基复合材料的可行性, 同时分析了工艺参数对压实坯致密度的影响。研究了复合材料的微观组织和致密度、韧性和硬度等性能, 爆炸粉末烧结法可以成功制出 WC/ Al₂O₃/Cu 多种颗粒增强金属基复合材料。

关键词: 爆炸力学; 金属基复合材料; 爆炸压实; WC/ Al₂O₃/Cu

中图分类号: O389

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引言

颗粒增强金属基复合材料(PMMC)不但具有金属韧性好的特点, 而且具有陶瓷颗粒硬度高、刚度大的优点, 从而显示出单一的金属基体或陶瓷颗粒所不可比拟的优异性能。颗粒增强金属基复合材料以其制备工艺简单、成本低廉、具有可加工性和各向同性等优点, 成为目前复合材料的开发热点之一^[1]。铜基颗粒增强材料(PMMC)是将氧化物、碳化物质点加入到塑性良好的铜中, 从而提高了基体的抗拉强度、弹性模量、硬度和耐磨性。这些质点不固溶于铜也不与铜合金化, 具有很高的热稳定性, 使上述性能的改善在高温下更加明显^[2]。

目前已见报导的有氧化物颗粒如 Al₂O₃、ThO₂、ZrO₂、SiO₂ 和碳化物如 WC、TiC、VC、NbC 等作为增强体研制颗粒增强基复合材料^[3~4]。其中以 WC/Cu 复合材料, 作为具有导电、导热率高、高温硬度好、抗磨损能力强的电极材料, 得到了广泛的开发及应用研究^[5~7]。同时 Al₂O₃ 颗粒增强铜基复合材料也是一种新型的优秀材料, 它可以同时具有高强度、高导热性, 以及优于其他任何一种铜合金的耐磨性, 是 IC 引线框架、电阻焊电极、连铸钢坯结晶器、氧枪喷头等要求高温下高强度、高导电及良好耐磨性的材质的最佳选择。

以前的研究都是用一种颗粒作为增强基。但是如果把两种颗粒同时作为增强基, 就可以实现他们之间的优势互补。比如说 WC 的密度较大, 而 Al₂O₃ 的密度非常小, WC 导电, 而 Al₂O₃ 不导电, 通过调节两者的比例, 可以适当地调节复合材料的密度以及导电率。

本文将 WC 粉末和 Al₂O₃ 粉末同时作为 Cu 增强基, 通过用爆炸加工中的爆炸粉末烧结技术, 尝试制备出一种实体材料。

爆炸粉末烧结^[8]工艺是利用炸药爆轰产生的能量, 以激波的形式作用于粉末, 在瞬态、高温、高压下发生烧结的一种材料加工或合成的新技术。早在 20 世纪 50 年代初, 人们就把爆炸压实引入到粉末冶金工艺中, 直到 70 年代末, 爆炸压实技术才真正引起材料科学工作者的兴趣。这种方法不需要太多设备投资, 并且制取的材料压实密度大。具有经济、设备简单、容易放大产量的特点, 并且便于实验样品的回收。因此, 已成为目前粉末冶金与爆炸力学的交叉科学技术研究的热点, 具有非常广阔的应用前景。

* 收稿日期: 2005-05-11; 修回日期: 2005-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(10172025)

作者简介: 李晓杰(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

2 实验方法

原料为纯度 99.9% 的雾化铜粉, 粒度为 -200 目, 理论密度为 8.92 g/cm³; 增强体为等积形状的 WC 颗粒, 尺寸为 1.33~3.50 μm, 理论密度为 15.50 g/cm³; α-Al₂O₃ 理论密度为 3.90 g/cm³。按体积分数 φ_{Cu} = 0.89, φ_{WC} = 0.08, φ_{Al₂O₃} = 0.03 的比例混合粉末, 理论密度为 9.30 g/cm³。取一定比例的大中小三种球, 在行星式球磨机上进行球磨。进行球磨时, 工艺参数取: 球磨机转速 300 r/min; 罐子及球为不锈钢材料, 球料比 4:1, 球磨时间分别为 25、50 h, 并在罐子内冲入 Ar 气对粉末进行保护。试验细节如表 1 所示。表中, d₁、d₂ 为管的内、外径, h_e 为炸药填充厚度, ρ_e 炸药填充密度, R 为炸药与粉末的质量比。

表 1 爆炸粉末压实的实验参数表

Table 1 Experimental parameters of explosive powder compaction

编号	d ₁ /mm	d ₂ /mm	h _e /mm	ρ _e /(g/cm ³)	R
1	20	24	10	0.8	0.55
2	20	24	20	0.8	1.45
3	20	24	10	1.0	0.68
4	20	24	20	1.0	1.80

爆炸压实装置(见图 1)非常简单, 混合粉末放在带有端塞的低碳钢中。试验中将两个球磨时间的粉末装在一个管中, 分为上下两层, 中间用隔块分开, 这样上下两层不同球磨时间的粉末在爆炸压实过程中所受作用力完全相同, 然后对装填粉末的低碳钢管进行抽真空处理后密封。管外覆盖一层用量适当的炸药, 炸药的厚度和密度要均匀。雷管起爆后, 引爆炸药产生以高速沿管壁前进的爆轰, 爆轰波沿管壳轴向传播, 管壁在爆轰波波阵面后的高压作用下将管内粉末压实。炸药采用 RDX 与密度调节剂调整, 爆速在 3~5 km/s 范围内。

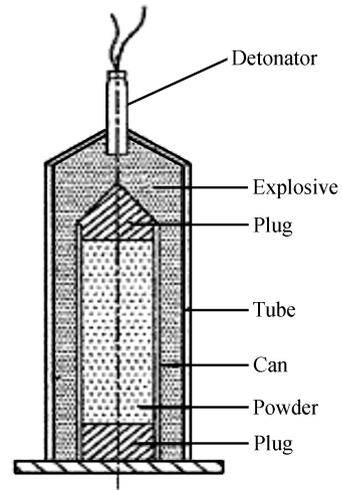


图 1 用于粉末材料的直接爆炸压实装置
Fig. 1 Geometry of the explosive powder compaction system

3 实验结果及分析

爆炸压实后, 取出样品用阿基米德法测量压实坯致密度, 再在真空炉内 850 °C 烧结 2 h。用 H·HAUSER 半自动维氏硬度计测定试样硬度, 用电子探针观察微观组织, 断口扫描用 JSM-5600LV 式扫描电镜。

3.1 球磨时间对粉末混合均匀程度的影响

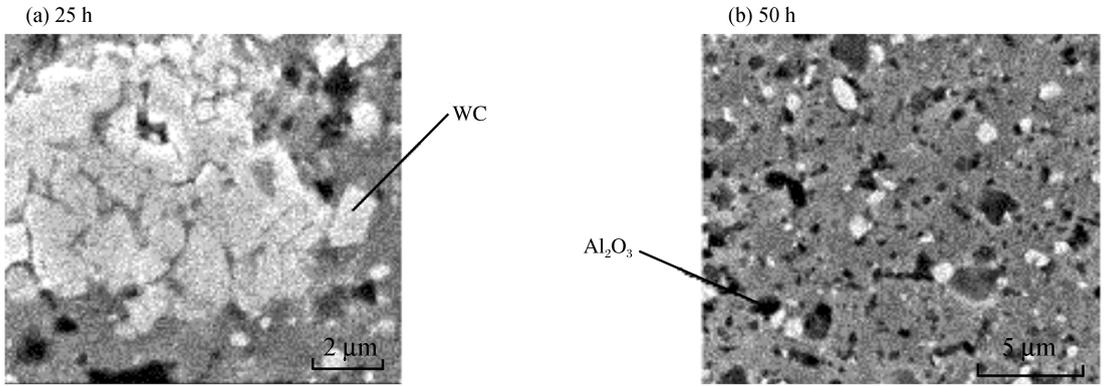
从图 2 中可以看出, 颗粒之间没有发生相变, 并且随着球磨时间的增加, 粉末分布逐渐趋于均匀化。当球磨时间为 25 h 时, 由粒子分布可以看出其局部粒子仍然处于聚集状态, 还没有完全分散开来; 当球磨时间为 50 h 时, 则不存在这种现象, WC 和 Al₂O₃ 颗粒分布已经比较均匀了。

3.2 对压实坯致密度的分析

爆炸时粉末所受到的爆炸压力为^[9]

$$p = \frac{\rho_0 v_d^2}{K+1} \approx \rho_0 \frac{v_d^2}{4}$$

式中: ρ₀ 为结晶炸药的密度; v_d 为炸药爆速。

图2 WC/Al₂O₃/Cu 复合材料 EPMA 图片Fig. 2 EPMA photograph of WC/Al₂O₃/Cu composites

在爆炸压实的试验中,随着装药密度和爆速的增加,爆炸压力单调增加。在本实验中,选用了两种填充密度的炸药。粉末压实后的压实坯致密度如表 2 所示。

从表 2 可以看出,3、4 号炸药填充密度 $\rho_e = 1.0 \text{ g/cm}^3$,其爆炸压实后得到的样品,相比 1、2 号炸药填充密度 $\rho_e = 0.8 \text{ g/cm}^3$ 压实后的样品,致密度有下降的趋势。这种特点表明了压制过度的后果:过大的装药密度导致较高的爆速,当很强的冲击波通过粉末时,此时反射的稀疏波也较强烈,以致由压缩波形成的颗粒间的结合受到破坏。这就使材料发生局部不粘结的现象,因而压实的密度较小。

另外还可以发现,2 号的炸药填充厚度 20 mm 比 1 号填充厚度 10 mm 的爆炸压实坯致密度要稍微大一些。这主要是由于当炸药填充厚度增大时,药粉比 R 增大,对粉末作用时间越长,可以更好地压实粉末。但是 3、4 号恰好相反,由于爆速较大,而炸药量又过多,在压坯中心会合产生马赫反射^[10],引起了中心孔洞和裂纹,导致致密度下降。

从表 2 中可以看到,球磨时间长的较球磨时间短的致密度要高一些。这是因为随球磨时间的延长,几种粉末分布逐渐均匀,相均匀混合对爆炸烧结对有利。

从试验结果来看,压实样品的致密度大部分都保持在 96% 以上,这说明 WC 和 Al₂O₃ 两种粉末同时作为增强基,仍然可以压实出有很高致密度的实体材料。

压实坯还必须经过退火热处理,使粉末颗粒在爆炸压实过程中形成的结合,在高温下通过形成烧颈而转变为晶体结合。对于退火温度的控制,虽然复合材料是两种颗粒增强体,但由于 WC 和 Al₂O₃ 两种物质都比较稳定,因此不必考虑在高温下他们之间会发生化学反应或分解。

在 850 °C 温度下退火烧结 2 h 后,对试样再次进行了致密度的测量,发现致密度下降了 2% 左右,这说明在退火烧结的过程中,样品发生了膨胀行为。

在本实验中,铜是塑性材料,在爆炸烧结的过程中颗粒间发生相互碰撞、孔隙塌缩,从而颗粒表面发生焊接。但是对于管内的粉末体系来说,在实验的抽真空过程中形成了低压,但还有少量的气体存在,在爆炸烧结的过程中,不能够脱离出粉末体系,就会在冲击波作用下作为高压气体存留在爆炸烧结后的压实坯中。那么压实坯内存在的空隙就有少量的气体存在,在退火过程中,这些气体在高温下受热膨胀,在内部无法弥散出压实坯的情况下,就会挤压周围介质,形成鼓泡,导致压实坯致密度下降。

所以对于爆炸粉末烧结实验,抽真空条件很重要。如果在预装的粉末体系内存在较多的气体,那么爆炸烧结后在退火等热处理的过程中就会对压实坯产生较大的影响。

表 2 爆炸压实坯的致密度

Table 2 The density of compacts %

编号	25 h	50 h
1	96.81	96.92
2	97.25	97.31
3	96.23	96.16
4	96.14	96.03

3.3 性能分析

对拉伸断口进行扫描电镜试验,观察显微组织(见图3)。可以看到其拉伸断口上分布着大小不等的韧窝,所以复合材料具有一定的韧性。在先前的研究中,WC/Cu 和 WC/Al₂O₃ 两种复合材料都是韧性材料,两种颗粒同时作为增强基并没有改变这种性能。

对材料进行硬度测试,其硬度值为 HV200 左右,比纯铜的硬度要高出许多,这说明 Cu 基体中细小的 WC、Al₂O₃ 颗粒起到了弥散强化的作用。而相同条件下 $\varphi_{WC}=0.08$ 或 $\varphi_{Al_2O_3}=0.03$ 两种 Cu 基复合材料的硬度都保持在 HV150 以下,这说明两种颗粒都同时起到了弥散强化增强硬度的效果。

用两种颗粒同时作为增强基进行试验,从爆炸压实坯的各种性能分析可以得出:两种颗粒同时作为增强基,仍然可以得到较高致密度的压实坯,并且保持了单种颗粒作为增强基时材料所具有的韧性性能,另外两种颗粒能够同时起到弥散强化的作用,复合材料硬度的提高是两种颗粒同时作用的结果。

若用同样比例的单种颗粒作为增强基,用 Al₂O₃ 作为增强基能得到较轻质的复合材料;由于 Al₂O₃ 不导电而 WC 导电,所以用 WC 作为增强基能得到导电率较高的复合材料。用两种颗粒同时作为增强基制取复合材料,就可以兼顾两者。这也提供了一个启示,当用单种颗粒作为增强基无法得到具有优异的综合性能的复合材料时,可以根据需要添加适当比例的其他增强基颗粒,以实现他们之间性能的优势互补。

4 结 论

采用机械合金化法制粉,用爆炸粉末烧结法制取的 WC、Al₂O₃ 颗粒同时增强 Cu 基复合材料进行了探索性的研究。爆炸烧结得到了致密度 96% 以上的压实坯,并在此基础上细致地分析了压实坯致密度的影响因素。对复合材料进行了定性的性能分析,结果表明用这种方法可以制取质点均匀、硬度较高的铜基复合材料,其平均硬度为 HV200 左右,是两种颗粒同时起弥散强化作用的结果。并且在成功制取多种颗粒增强金属基复合材料的同时,实现两者性能的优势互补的基础上,材料保持了原有单种颗粒作为增强基时所具有的韧性。

参考文献:

- [1] Kiyoshi Ichikawa, Masakazu Achikita. Electric conductivity and mechanical properties of carbide dispersion-strengthened copper prepared by compocasting[J]. Materials transactions, JIM, 1993,34(8):718-724.
- [2] 于琨,李成功. 金属基复合材料的现状与发展[J]. 材料科学与工程,1989,7(1):6-12.
YU Kun, LI Cheng-gong. The present condition and the development of metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering, 1989,7(1):6-12.
- [3] Honda Giken Kogyo. Moulded ceramic reinforced copper article for spot welding electrode[Z]. Mzz GB 2243-160-A, 1991.
- [4] Belk J A, Edwards M R. Deformation behavior of tungsten-copper composites[J]. Power Metal, 1993,36(4):293.
- [5] 王耐艳,涂江平,杨友志,等. 原位反应纳米 TiB₂/Cu 复合材料的制备和微结构[J]. 中国有色金属学报,2002,12(1):151-154.
WANG Nai-yan, TU Jiang-ping, YANG You-zhi, et al. Preparation and microstructure of nanoscale TiB₂/Cu in-situ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002,12(1):151-154.
- [6] 胡锐. 高强高导 Cu 基合金复合材料的新型制造技术[J]. 兵器材料科学与工程,1998,21(6):39-43.

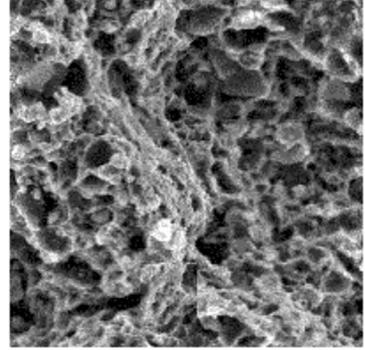


图3 WC/Cu 拉伸断口的 SEM 形貌
Fig. 3 SEM fractograph of WC/Cu composites

- HU Rui. New production techniques of high strength and high conduct electricity copper matrix composites[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1998,21(6):39-43.
- [7] 郑冀,赵乃勤,李宝银,等. 内氧化 Al_2O_3 基复合材料工程性能的研究[J]. 材料热处理学报,2001,22(4):48-51.
ZHENG Ji, ZHAO Nai-qin, LI Bao-yin, et al. Study on the properties and technologies of inner-oxidation Cu-Cr- Al_2O_3 composite material[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2001,22(4):48-51.
- [8] 董明. 粉末材料的爆炸烧结[J]. 材料开发与应用,1995,10(3):29-33.
DONG Ming. Explosive sintering of powder material[J]. Development and Application of Materials, 1995,10(3):29-33.
- [9] Hoening C L, Yust C S. Explosive compaction of ALN, amorphous Si_3N_4 , boron and Al_2O_3 ceramics[J]. Ceramic Bulletin, 1981,60(11):1175-1224.
- [10] Peng T C, Sastry S M L, O'Neal J E, et al. Explosive consolidation of rapidified aluminum alloy powders[J]. Metallurgical Transactions A, 1985,16(8):1445-1455.

Experimental study on explosive compaction of WC/ Al_2O_3 /Cu powders

LI Xiao-jie, WANG Zhan-lei*, XIE Xing-hua, ZHAO Zheng, SHI Xing-zhi
(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: By explosive powder compaction technics, the WC/ Al_2O_3 /Cu particle reinforced metal-matrix composites produced are studied, and the effects of process parameters on density of compacts are analyzed. After investigating the microstructure, densification, tenacity and rigidity properties of composites, it is confirmed that WC/ Al_2O_3 /Cu composites can be compacted successfully by explosive compaction.

Key words: mechanics of explosion; metal-matrix composites; explosive compaction; WC/ Al_2O_3 /Cu

* Corresponding author: WANG Zhan-lei
E-mail address: wzldlut@sina.com
Telephone: 0411-84708307