

爆速对纳米铝粉爆炸烧结性能的影响*

桑圣军¹, 郭浩哲¹, 李 斌¹, 王永旭¹, 王志平², 解立峰¹

(1. 南京理工大学安全工程系, 江苏 南京 210094;

2. 四平市高斯达纳米材料设备有限公司, 吉林 四平 136001)

摘要: 为了掌握纳米金属粉烧结成型技术, 将纳米铝粉置于改良设计的可泄压式爆炸烧结装置中, 得到了密实度达 98% 以上的纳米铝棒。通过改变铵梯炸药和木粉的比例调节炸药的爆速, 研究了不同爆速下烧结铝棒的性能。利用金相显微镜观察烧结棒的微观结构, 并对烧结棒的密实度、硬度等性能进行测量。结果表明: 通过降低爆速可以减小马赫孔的产生, 但爆速过低, 会导致烧结棒的密实度和硬度等性能降低; 当采用爆速为 2 158 m/s 的炸药时, 可制得无马赫孔、高硬度、高密实度、晶粒细小的均质烧结棒。

关键词: 爆炸烧结; 纳米铝粉; 爆速; 马赫孔

中图分类号: O389; TG392

文献标识码: A

近年来关于纳米材料的研究表明, 相对于传统材料, 纳米材料具有很多优良的物理化学特性, 如较高的强度、硬度、磁学性能和耐腐蚀性等^[1-2]。爆炸烧结纳米金属粉末是利用炸药爆轰产生的激波作用于粉末颗粒, 使颗粒表面在极短时间内发生高温热熔和高压压实成型^[3]的一种新型纳米材料加工技术。与传统的热压烧结和热等静压烧结等方法相比, 爆炸烧结纳米金属粉具备独特的优点。(1) 具备高压性, 可以烧结出密实度较高的金属材料。目前国内外有关非晶钴基合金、微晶铝及其合金的烧结密度均已超过理论密度的 98%^[4-5]。(2) 具备快速升温、瞬间冷却的特性。李晓杰等^[6]研究表明, 由于激波加载的瞬时性, 爆炸烧结时颗粒从常温升至熔点温度所需的时间极短, 通常为微秒级, 使温升仅限于金属粉末颗粒表面, 而颗粒内部仍然保持温度相对较低的状态。爆炸烧结成型后颗粒内部的低温状态将对颗粒表面起冷却“淬火”作用, 可以防止晶粒“长大”, 使其微观结构维持在纳米级。因此, 爆炸烧结成型制备的纳米级金属棒材微观粒径达到纳米级, 仍可以保持其在纳米粉末状态下的优良特性。

目前, 爆炸烧结制备工艺上的主要难题在于如何排出粉末颗粒间存在的气体。气体受到挤压会形成高压气体, 使烧结的材料更容易出现马赫孔、不规则孔洞等, 从而对材料的性能产生极大的影响^[7]。传统的爆炸烧结工艺大多通过高温预热排出粉末颗粒间的气体, 减小气体对烧结性能的影响, 例如 Vesenjok 等^[8]在纳米 γ -Al₂O₃ 陶瓷粉末的预热爆炸压实实验中使用了这一方法。但是, 在预热过程中, 粉末颗粒可能发生团聚现象, 不易保持粉末颗粒的微观形态^[9-11]。为了解决该问题, 本研究使用了一种可泄压式爆炸烧结装置, 在爆炸烧结成型瞬间排出粉末中的气体。

铝及其合金材料由于密度小、导电性优良和表面氧化层耐腐蚀等优点被广泛应用于工业生产和日常生活中, 但传统铝材的硬度普遍较低, 使用寿命及安全性得不到有效保证, 因此, 本实验以纳米铝粉作为研究对象, 研究炸药爆速对爆炸烧结棒性能的影响。根据陈代贵等^[12]的工作, 通过调节木粉的比例控制炸药爆速, 以期制取无马赫孔、高硬度、高密实度和晶粒细小的均质烧结棒。

* 收稿日期: 2017-05-15; 修回日期: 2017-05-21

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFR0080); 江苏省科技支撑计划项目(BE2014735)

作者简介: 桑圣军(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程力学研究. E-mail: ssjiphx@sina.cn

通信作者: 解立峰(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸力学应用研究. E-mail: xielifeng319@sina.com

1 实验方法

1.1 爆炸烧结过程分析

使用炸药爆炸产生的爆轰波将铝粉压实烧结成型,主要涉及4个过程:(1)炸药爆炸后产生爆轰波挤压打击管,使其被压缩、变形甚至断裂;(2)打击管在爆轰波加载的作用下打击包套,使包套产生压缩、变形,挤压铝粉;(3)当包套被压缩至相对静止状态后,沿着包套向内形成透射冲击波,使铝粉被瞬间压实到密实状态;(4)当冲击波传播到铝棒的中心区域时,若冲击波仍具有较高的能量,四周的冲击波会发生碰撞,形成反射冲击波,对铝棒的中心区域产生破坏,形成马赫孔^[13]。

由于打击管的强度相对于强爆轰波而言可以忽略,因此第1个过程可以简化成冲击波与自由面的相互作用。根据瞬时爆轰的CJ理论可知:在冲击波到达自由面时,波面压力立即下降为零,打击管开始膨胀并向前飞散,获得一个速度增量

$$u_1 = \frac{2D'}{k-1} \sqrt{\frac{k}{2(k+1)}} \quad (1)$$

式中: u_1 为打击管的运动速度, D' 为炸药爆轰波波速, k 为炸药的多方指数。第2个过程可以简化成两物体高速碰撞产生透射冲击波的过程。由于打击管和包套采用相同的材质,由“速度减半规则”可知

$$u_2 = u_1/2 \quad (2)$$

式中: u_2 为打击管和包套发生高速碰撞产生的透射冲击波的波速。根据(1)式和(2)式可知,由于透射冲击波的波速大小 u_2 正比于爆轰波波速 D_1 ,而冲击波波速与炸药的爆速正相关,因此,爆速对爆炸烧结效果的影响实际上是冲击波加载波速对粉末压实的影响。

第3个过程为冲击波在粉末介质中的传播过程,可以将粉末介质当作流体计算。由于冲击波在压实粉末过程中,波后会产生同向追赶的稀疏波,使冲击波发生衰减。根据冲击波衰减理论^[14]

$$D = c_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_1}{t_1} - c_0 \right) \left(\frac{t_1}{t} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: D 为冲击波传播过程中的波速, c_0 为粉末中的声速, x_1 为冲击波被稀疏波追赶上的交点位置, t_1 为稀疏波追赶上冲击波的时间, t 为到达所求位置时冲击波的传播时间。

第4个过程为冲击波加载到粉末中心后发生的反射过程,可以简化成冲击波的对撞过程。若前一过程中在冲击波到达铝棒中心前波速已降为零,则不存在第4个过程,这是由于冲击波到达中心区域前已完全耗散,中心区域的铝粉不会被压实。若冲击波传播至中心区域时,仍然具有较高的波速,此时会发生正规碰撞(碰撞冲击大小相等且方向相反)和非正规斜碰撞(碰撞冲击波呈一定角度斜碰撞,也称为马赫碰撞),马赫碰撞形成的斜激波会对已压实的铝棒造成毁伤,形成马赫孔^[15]。因此,可以通过调节爆速有效控制冲击波的波速,减小甚至消除马赫孔,从而制备出具有高硬度、高密实度的纳米铝棒。

1.2 爆炸烧结装置及参数

本实验采用改良的可泄压式爆炸烧结装置,如图1所示。该装置使用了打击管与包套的双层管设计,与单层打击管相比,爆轰波加载更为稳定,因此烧结出的金属材料性能更加优良。与传统烧结装置相比,该装置基座上开有尺寸为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 的柱状孔,柱状孔上装有薄铁片和开孔垫片,以达到泄压的目的。另外,打击管和包套的外径分别为45和30 mm,长度分别为160和140 mm,两者厚度均为2 mm。外层的装药厚度为13 mm。

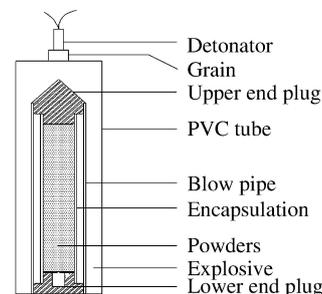


图1 爆炸烧结装置

Fig. 1 Device of explosive sintering

1.3 实验原料及方案设计

本实验研究的对象是纳米铝粉,由四平市高斯达纳米材料设备有限公司提供,纯度达99.9%。通

过 QUANTA 250 FEG 扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM) (FEI Ltd., America) 分析其微观形貌,如图 2 所示。可以看出,实验用的铝粉粒径基本均匀一致,达到了纳米级。

实验过程中,为了防止铝粉氧化和吸潮,将烧结装置与纳米铝粉一起放入充满氩气保护气氛的干燥密闭手套箱内。在包套内装入约 100 g 的纳米铝粉(约 50% 理论密度)并压实密封,从手套箱内取出烧结装置,在外套管和打击管之间加入炸药,用雷管引爆药柱起爆,获得烧结棒材,通过线切割机等加工设备切割打击管和包套,从而获得所需的纳米铝棒。

使用铵梯炸药作为烧结用药,通过改变铵梯炸药中的木粉比例调节炸药的爆速,研究爆速对烧结棒性能的影响。实验中共配置 6 组铵梯炸药,其木粉质量分数分别为 0%、5.0%、7.5%、10.0%、12.5% 和 15.0%,并通过 ZBS-10 型十段智能爆速仪测量 6 组炸药的爆速。查阅文献[14]可知,爆速与装药直径、密度、粒度、外界约束条件和起爆条件等因素有关,通常随着装药直径的增加而增大,直径增加爆速不再增加的最小装药直径称为极限直径(Limiting Diameter)。通过多次实验测得不同木粉比例条件下,铵梯炸药的极限直径均不超过 12 mm,而爆炸烧结装置的装药虽然不是实心圆柱体,但是药层厚度为 13 mm,通过取相同的截面积计算得出的当量直径达到了 40 mm,远超极限直径。因此,为了测量方便,本实验中均采用表 1 参数下的塑料管进行装药测量。爆速测试实验结果如表 1 所示,其中 L 为装药长度, d 为装药直径, w 为木粉质量分数。

表 1 爆速测试实验结果

Table 1 Experiment results of the detonation velocity

No.	L/mm	d/mm	$w/\%$	$D'/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	No.	L/mm	d/mm	$w/\%$	$D'/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	200	20	0	3015	4	200	20	10.0	2158
2	200	20	5.0	2460	5	200	20	12.5	2016
3	200	20	7.5	2278	6	200	20	15.0	1832

将配置好的炸药分别装入待烧结的装置中,由于木粉和铵梯炸药密度相近,压实后的炸药密度均约为 0.9 g/cm^3 ,不同木粉含量下的炸药质量均约为 400 g。装好药后将装置依次带入安全性较高的半封闭式泥土地面试验场地,如图 3 所示,在顶端连接好药柱和雷管,起爆雷管后即可得到烧结铝棒。由于炸药的起爆以及爆轰波的传播过程始终是自上而下沿轴向传播的,因此烧结棒在冲击载荷的作用下只会往泥土地面下深钻,而不会飞出,可以方便地找到烧结棒材。

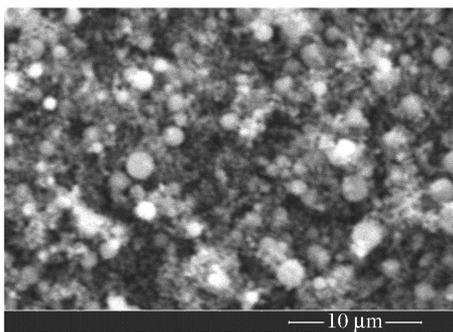


图 2 纳米铝粉扫描电镜图

Fig. 2 SEM image of nano aluminum powders



图 3 爆轰烧结实验场地

Fig. 3 Experiment field of explosive sintering

2 实验结果分析

图 4 为通过爆炸烧结所得不同爆速下烧结棒的初成品。由图 4 可知,当炸药爆速为 3015 m/s 时,炸药爆速过高,冲击波能量过大,对套管造成明显毁伤,基本无法得到完整的烧结棒。当炸药爆速降低至 2460 m/s 时,对套管的毁伤明显减小,棒材基本完整,但会有较少的包套碎片嵌在铝棒的边缘,表明

此时爆速依然偏高,较高的冲击波能量使包套碎片嵌入铝棒边缘。此外,铝棒的中心区域会存在一个明显的小孔,这是因为冲击波加载到铝棒中心区域时,冲击波的能量过大,形成马赫反射,因此铝棒的中心部位存在马赫孔,且马赫孔从底部一直贯穿到顶部。当炸药爆速为 2 016~2 278 m/s 时,套管基本完整,从外观看,铝棒基本为规则的圆柱体。当爆速降低到 1 832 m/s 时,烧结后的套管完整,铝棒基本成型,但是底部会有大量的碎屑和较大的孔洞,如图 4(f)所示。这是因为炸药爆速过低,导致铝粉未被完全压实,而铝粉中的气体在泄压时会携带部分底部的铝粉飞洒出去,形成孔洞。由此可知,当炸药爆速超过 2 278 m/s 或低于 2 016 m/s 时,均不能得到成型较好的烧结铝棒。

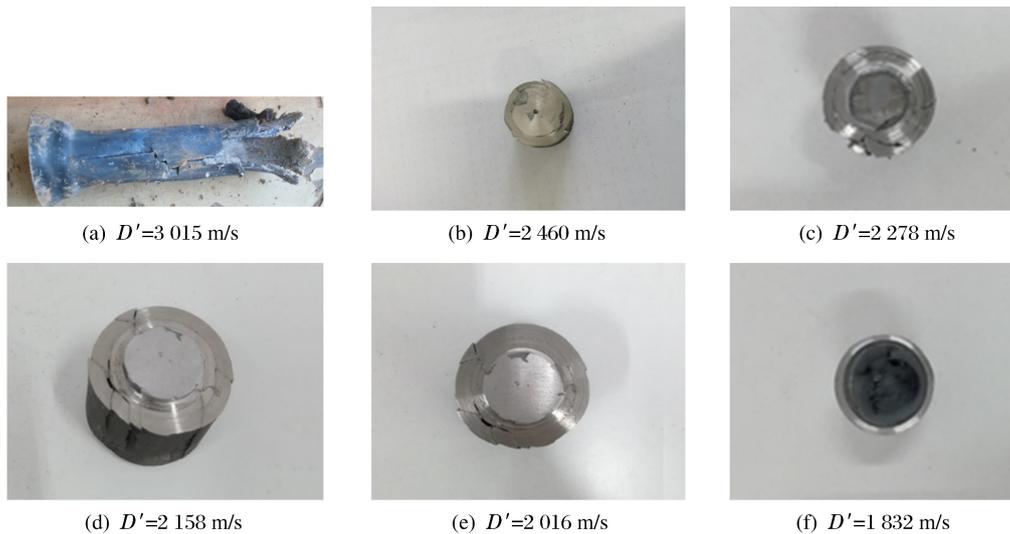


图 4 爆炸烧结铝棒初成品

Fig. 4 Initial aluminium bar of explosive sintering

对 2 278、2 158、2 016 m/s 3 种爆速下制得的烧结棒进行去皮、截面切割、打磨和抛光后,分别测得铝棒的密度,并计算其密实度,结果如表 2 所示。经过电解腐蚀后,使用蔡司材料显微镜中国总代理北京普瑞赛司仪器有限公司生产的 ZEISS Axio Vert. A1 型金相显微镜进行观察和分析,得到烧结棒截面的金相显微图,如图 5 所示。由图 5(a)可知,当爆速为 2 278 m/s 时,烧结出的铝棒中心存在明显的圆形结构缺陷以及少部分沿着中心发散的裂纹,表明此时炸药的爆速偏高。与图 4(b)中 2 460 m/s 爆速下烧结的铝棒相比,虽然中心区域没有形成肉眼可见的马赫孔,但冲击波的马赫反射依然较为明显,马赫反射使得中心区域产生了较明显的结构缺陷。当炸药爆速降为 2 158 m/s 时,由图 5(b)可知,中心区域的裂纹等结构缺陷基本消失,除极少部分颗粒发生团聚现象外,基本保持了铝棒的纳米级微观结构。当爆速为 2 016 m/s 时,图 5(c)中可以观察到少量的腐蚀坑,表明由于爆轰波能量偏低,铝棒内部存在少量未被完全压实的孔洞,导致烧结出的铝棒密实度较低,测得的密度也偏低。

再次对截面进行精细打磨和抛光后,使用上海恒惠仪器制造有限公司生产的 HVS-000Z 型显微硬度计测量其截面任意直径段上不同位置的维氏硬度(H_V)。实验参数为 HV0.5/10,设置金相显微镜的步距为 0.5 mm,共测量 31 个点,测量长度为 15 mm,最终得到爆炸烧结的铝棒硬度变化曲线,如图 6 所示。可以看出,爆炸烧结铝棒的维氏硬度达到 1.2 GPa,约为传统工业制造纯铝维氏硬度的 4 倍,表明爆炸烧结工艺可以制备出微观晶粒为纳米级的铝棒,具备纳米材料高硬度的特征。

表 2 不同爆速下爆炸烧结铝棒的密度和密实度

Table 2 Density and dense degree of sintered aluminum bar with different explosive velocities

$w/\%$	$D'/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	Dense degree/%	$w/\%$	$D'/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	Dense degree/%
7.5	2 278	2.671	98.9	12.5	2 016	2.652	98.2
10.0	2 158	2.692	99.7				

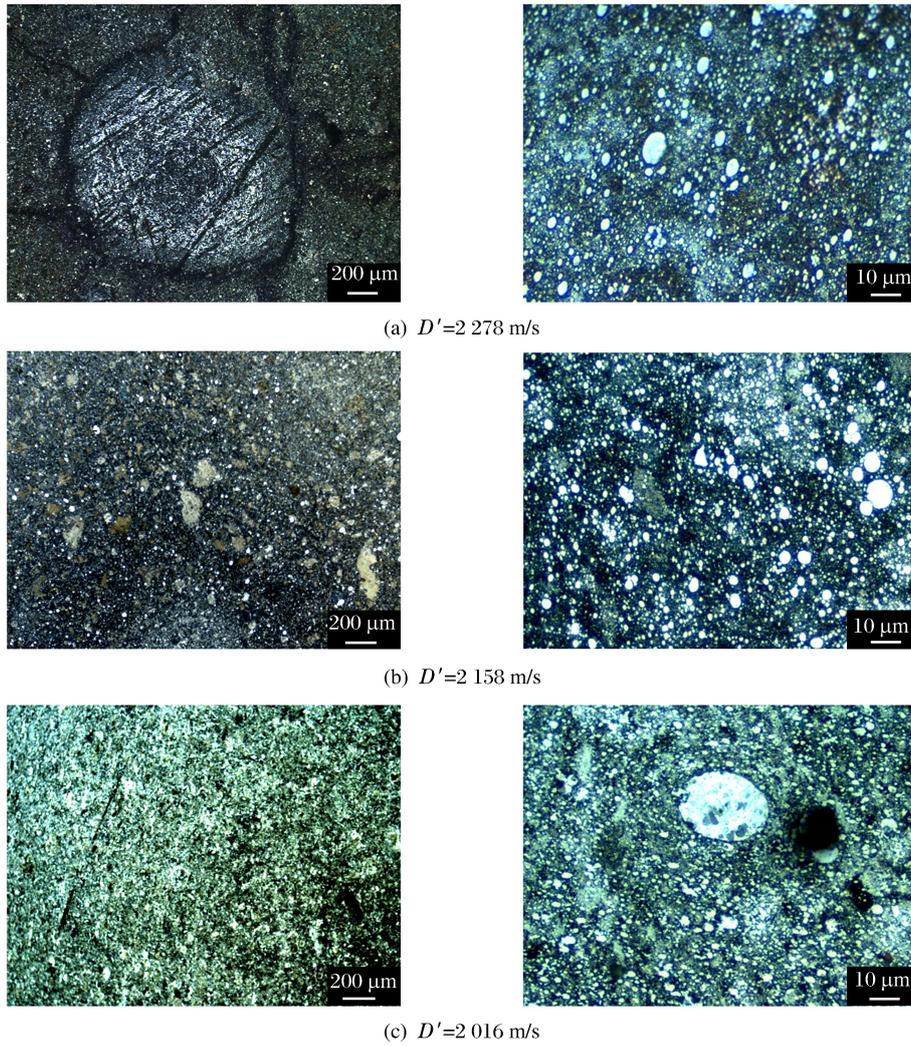


图 5 金相显微图

Fig. 5 Metallographic micrograph

通过对比不同爆速下爆炸烧结铝棒的微观硬度发现,当炸药爆速为 2 278 m/s 时,在铝棒圆心处及其附近 3 个测量点的硬度明显略低。结合图 5(a)的金相显微图分析可知,在此实验条件下,由于炸药爆速相对较高,在铝棒中心区域存在较强的马赫反射,容易形成结构缺陷,该结构缺陷对金相形貌和硬度等力学性能具有明显的影响。

当炸药爆速降为 2 158 m/s 时,烧结出的铝棒中心仍然存在 1 个硬度较低的测量点,与 2 278 m/s 爆速下烧结出的铝棒相比,中心点的硬度相对较高,且仅存在一个硬度较低的测量点,而在图 5(b)的金相显微图中,并未找到明显的结构缺陷,表明结构缺陷的范围极小,以至

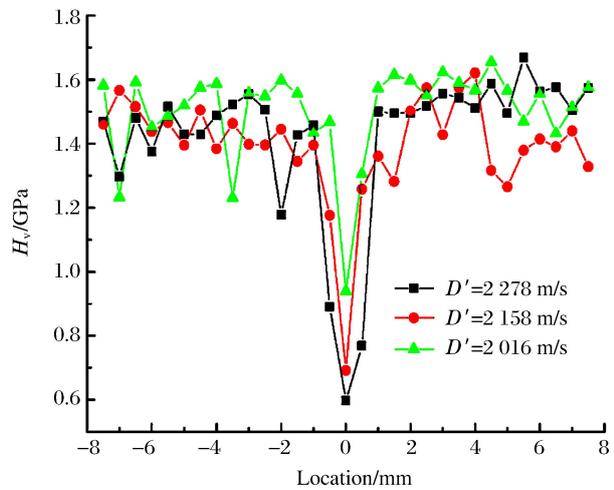


图 6 维氏硬度测量

Fig. 6 Measurements of Vickers hardness

于金相显微镜无法观测到,但中心的马赫反射还是存在的,对烧结棒中心点性能的不良影响也依然存在,但此条件下的整体性能基本达到最佳。

当炸药爆速达到 2016 m/s 时,烧结出的铝棒中也存在 1 个硬度较低的测量点,与 2158 m/s 的爆速相比,中心点的硬度更大,与周围材质的硬度更为接近。但在图 5(c)的金相显微图中,可以观测到存在少量的腐蚀坑,表明烧结的铝棒存在部分未被完全压实的细小孔洞,但测量硬度时,由于仅测量了任意一条直径上的维氏硬度,可能并未测量到未被压实区域孔洞所在位置的硬度值,而且与之前相比,中心区域硬度较低不是因为马赫反射,而主要由于冲击波压实不完全造成的。

3 结 论

(1) 通过调节爆炸烧结所用炸药的爆速,可以制备出密实度达 98%、微观粒径为纳米级且硬度为普通工业铝材 4 倍以上的纳米铝棒材料。

(2) 木粉比例对炸药爆速的调节具有明显作用,在炸药量、药粉比等参数不变的情况下,通过降低爆速可以减少甚至消除马赫孔的产生,但过低的爆速会使烧结出的铝棒材料中存在细小的孔洞,对密实度具有不良影响。

(3) 在本实验条件下,当炸药量为 400 g,爆速为 2158 m/s 时,可以制备出微观下晶粒分布均匀、无马赫孔、无结构缺陷且粒径达纳米级的铝棒,综合性能达到最优。

参考文献:

- [1] 张中太,林元华,唐子龙,等. 纳米材料及其技术的应用前景 [J]. 材料工程,2000(3):42-48.
ZHANG Z T, LIN Y H, TANG Z L, et al. Nanometer materials & nano technology and their application prospect [J]. Journal of Materials Engineering, 2003(3):42-48.
- [2] 陈海英,冯凤,张飞,等. 铜纳米材料的制备、应用及安全性研究进展 [J]. 化工新型材料,2016(10):11-13.
CHEN H Y, FENG F, ZHANG F, et al. Preparation, application, and safety of copper nanoparticle [J]. New Chemical Materials, 2016(10):11-13.
- [3] 李晓杰,赵铮,曲艳东,等. 爆炸烧结制备 CuCr 合金 [J]. 爆炸与冲击,2005,25(3):251-254.
LI X J, ZHAO Z, QU Y D, et al. Producing CuCr alloy by explosive sintering [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3):251-254.
- [4] HOKAMOTO K, SHIMOMIYA K, NISHI M, et al. Synthesis of unidirectional porous-structured aluminum through explosive compaction using cylindrical geometry [J]. Journal of the Japan Society for Technology Plasticity, 2017, 673(58):156-160.
- [5] VOROZHTSOV S, VOROZHTSOV A, KUDRYASHOVA O, et al. Structural and mechanical properties of aluminium-based composites processed by explosive compaction [J]. Powder Technology, 2017, 313(15):251-259.
- [6] 李晓杰,王金相,闫鸿浩. 爆炸粉末烧结机理的研究现状及其发展趋势 [J]. 稀有金属材料与工程,2004,33(6):566-570.
LI X J, WANG J X, YAN H H. The survey and development trend of the research for the mechanism of explosive consolidation of powders [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(6):566-570.
- [7] 刘麒峰,赵捍东,王金虎. W-Cu 复合药型罩 EFP 的形成及其聚能破甲效应研究 [J]. 兵器材料科学与工程,2015, 38(6):102-105.
LIU Q F, ZHAO H D, WANG J H. EFP formation of W-Cu double layered charge liners and its peed penetration effect [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(6):102-105.
- [8] VESENJAK M, HOKAMOTO K, MATSUMOTO S, et al. Uni-directional porous metal fabricated by rolling of copper sheet and explosive compaction [J]. Materials Letters, 2016, 170(1):39-43.
- [9] ZELEPUGIN S A, IVANOVA O V, YUNOSHEV A S, et al. Problems of solid-phase synthesis in cylindrical ampoules

- under explosive loading [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 127(1): 012057.
- [10] 王占磊, 王慧萍, 王岭渠, 等. 爆炸压实 W-Cu 粉末的数值模拟与实验验证 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(8): 1997-2001.
WANG Z L, WANG H P, WANG L Q, et al. Numerical simulation of explosive compaction of W-Cu powder and experiment validation [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 1997-2001.
- [11] 孟松鹤, 李金平, 韩杰才. 粉末的爆炸压实工艺 [J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(4): 404-407.
MENG S H, LI J P, HAN J C. Explosive compaction of powders [J]. Materials Science and Technology, 2006, 14(4): 404-407.
- [12] 陈代贵, 王成合. 木粉、硝酸铵的水分、细度对铵梯炸药的殉爆和爆速的影响 [J]. 宝鼎科技, 2003(3): 22-23.
CHEN D G, WANG C H. The effect of wood powder, moisture of ammonium nitrate and fineness to the sympathetic detonation and detonation velocity of the ammonium nitrate explosive [J]. BAODING Technology, 2003(3): 22-23.
- [13] 李晓杰, 王金相, 陈浩然, 等. 金属粉末爆炸烧结颗粒间结合细观机制研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 58-66.
LI X J, WANG J X, CHEN H R, et al. Research of microcosmic bonding mechanism of particles in explosive consolidation of metal powders [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(1): 58-66.
- [14] 李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 250-300.
LI W X. One-dimensional nonsteady flow and shock waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 250-300.
- [15] 王占磊. 爆炸压实 W-Cu 纳米合金及其聚能破甲应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 38-42.
WANG Z L. Research on explosive of W-Cu nanoalloy and the application to shaped charge liner [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 38-42.

Influence of Detonation Velocity on Sintering Performance of Nano-Aluminum Powders

SANG Shengjun¹, GUO Haozhe¹, LI Bin¹, WANG Yongxu¹,
WANG Zhiping², XIE Lifeng¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China;

2. Siping GaoSiDa Nanometer Materials Equipment Co. Ltd., Siping 136001, China)

Abstract: An aluminum bar with a dense degree of over 98% was fabricated using nano-aluminum powders in an improved sintering device capable of pressure relief to study the sintering molding of nanometer metal powders. First, the performance of the sintering aluminum bar at different detonation velocities were obtained by adjusting the ratio of the ammonium nitrate explosive to the wood powder. Then the microstructures of the aluminum bars were observed using metallurgical microscopy, and such mechanical properties as the density and hardness were measured. The results show that the Mach-hole can be reduced by reducing the detonation velocity. However, the excessively low detonation velocity decreases the mechanical properties such as the density and the hardness. Moreover, the sintering aluminum bar that is free from any Mach-hole, of higher hardness, higher dense degree and finer grain size can be fabricated from nano-aluminum powders whose detonation velocity reaches 2 158 m/s.

Keywords: explosive sintering; nano-aluminum powders; detonation velocity; Mach-hole