

激光冲击波动态压实铜粉实验研究

倪鹏, 刘会霞*, 董振, 马友娟, 王霄

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 动态压实是一种有显著优势的制备粉末冶金零件压坯的压实方法。本团队提出了一种利用激光冲击实现的高应变率($10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$)加载的粉末动态压实方法,并系统研究了激光能量、粉末形态和冲击次数对铜粉压坯显微形貌、相对密度与显微硬度的影响。研究表明:随着激光能量增加,铜粉压坯内部孔隙逐渐减少,边缘成型质量趋于良好,相对密度逐渐提升至 91.35%。综合比较三种形态铜粉压坯的性能可知,球形铜粉压坯可达到的最大相对密度要高于不规则铜粉压坯,小粒径($0.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$)球形铜粉最终压坯的相对密度要高于大粒径($10 \sim 20 \mu\text{m}$)球形铜粉最终压坯的相对密度。分析压坯微观结构可以发现球形铜粉颗粒之间主要通过固态压焊机理进行连接,而不规则铜粉颗粒间则通过固态压焊和机械内锁机理进行连接,其中的机械内锁使得压坯的连接强度相对较高。第一次用较小能量冲击而第二次用大能量冲击可以减小材料硬化对压坯性能提升的影响。本团队采用 $360 \text{ mJ} + 1800 \text{ mJ}$ 二次激光能量冲击成功地将最终铜粉压坯的相对密度提升至 96.5%。

关键词 激光技术; 激光冲击; 动态压实; 铜粉; 显微硬度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2202012

1 引言

粉末冶金(PM)工艺具有高生产率、低材料损耗和近净成型等优点,已被广泛应用于航天、电子、机械、武器和医疗等领域^[1]。粉末冶金涉及的三个主要阶段为:1)混合粉末;2)将粉末在模具中压实或注入模具中;3)通过高温烧结实现高相对密度零件的成型。其中的粉末压实是粉末冶金生产过程中的重要步骤之一,制备密度高且分布均匀的粉末压坯是生产高质量粉末冶金产品的前提,同时也可以简化后续的烧结步骤^[2]。动态压实粉末工艺于 20 世纪 80 年代被提出,该工艺将传统的静态压力载荷改为动态压力载荷,并被应用于制备高密度粉末冶金零件^[3]。大量研究表明,动态压实技术通过在粉体中瞬间产生冲击波以及冲击波在粉体内传播制备出接近理论密度的高质量压坯。与传统粉末冶金工艺生产的坯料相比,这种方法制备的压坯的孔隙率更小、密度更均匀,因此力学性能更好^[4-7]。

虽然动态压实技术能够实现压坯在烧结前高密度成型,使得最终的粉末冶金零件性能显著提升^[8],但目前对粉末在微小零件尺度范围内动态压实成型的工艺研究相对缺乏。Vivek 等^[9]提出了汽化箔辅助剪切(VFA)的新技术,该技术采用高能电流使箔材瞬间汽化,通过剪切生成的冲击器超高速冲击粉末,成功地在 $\phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 范围内压实了纯钛粉末和 Ti-6Al-4V

合金粉末,两种粉末压坯的最大相对密度分别达到 97%和 93%。但是由于剪切生成的冲击器容易发生扭曲变形,导致最终压坯密度不均匀,且压坯形状较差。对相关动态压实技术回顾可以发现,现有的动态压实技术,如高速压实、磁脉冲压实(MPC)^[10]、气体轰击^[11]、分离式霍普金森杆^[12]等动态压实技术,不太适合微小尺度范围内零件坯的动态压实。因此,亟需发展新的成型微小尺度零件高质量压坯的新工艺。

激光冲击波具有高应变率($10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$)、能量可控且作用面积小的加载特征,研究人员充分利用激光冲击波的力效应,已将其应用于激光冲击强化^[13-14]、微冲孔^[15]、激光驱动飞片成型^[16]、冲击压印^[17]和冲击焊接^[18]等方面。其中,人们对激光冲击强化研究得最早也最为深入,该技术已在实际制造中得到广泛应用。本团队结合脉冲激光所具有的高应变率动态加载特性及其适合微成型的独特优势,提出了激光冲击波动态加载实现微零件粉末压坯动态压实的新方法,并将其应用于铜粉的高应变率动态压实,接着研究了激光能量、粉末形态和冲击次数对铜粉压坯相对密度与力学性能的影响。

2 实验

2.1 实验装置及实验原理

激光冲击粉末动态压实原理如图 1 所示。实验系统由激光器系统和模具组成。模具包括底座、微模具、

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51675243)

通信作者: *lhx@ujs.edu.cn

约束层、吸收层和压板。激光器产生的脉冲激光首先通过反射镜和聚焦透镜,接着穿过透明约束层照射到吸收层上。吸收层在短时间内吸收激光能量后被迅速电离

汽化成高压等离子体,等离子体在约束层和冲头组成的密闭空间内膨胀,最终产生动态冲击力,冲击力使上冲头高速向下冲击粉末,从而实现粉末的动态压实。

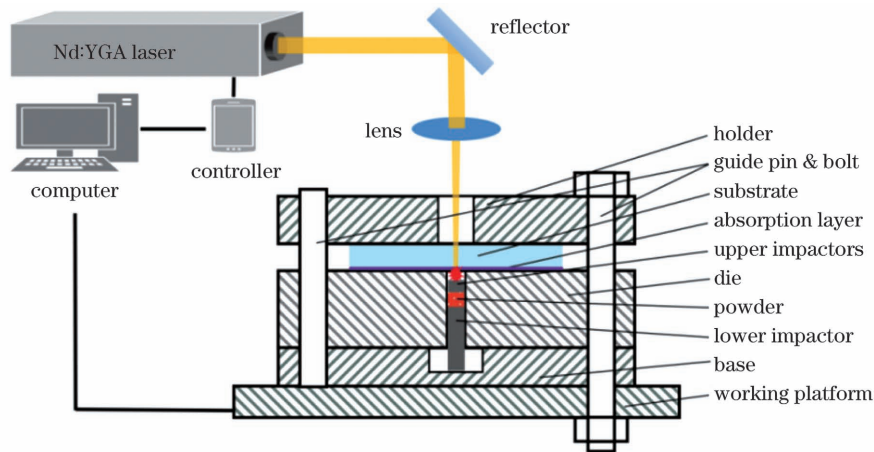


图 1 激光冲击动态压实示意图

Fig. 1 Schematic of laser shock dynamic compaction

2.2 实验材料、设备及方法

实验材料包括铜粉、约束层和吸收层。图 2 所示分别为实验中使用的形态不规则的铜粉和两种不同粒

径的球形铜粉,它们的基本参数如表 1 所示。本实验采用 $\phi 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 有机玻璃(PMMA)作为约束层,并在 PMMA 上喷涂 $10 \mu\text{m}$ 厚的黑漆作为吸收层。

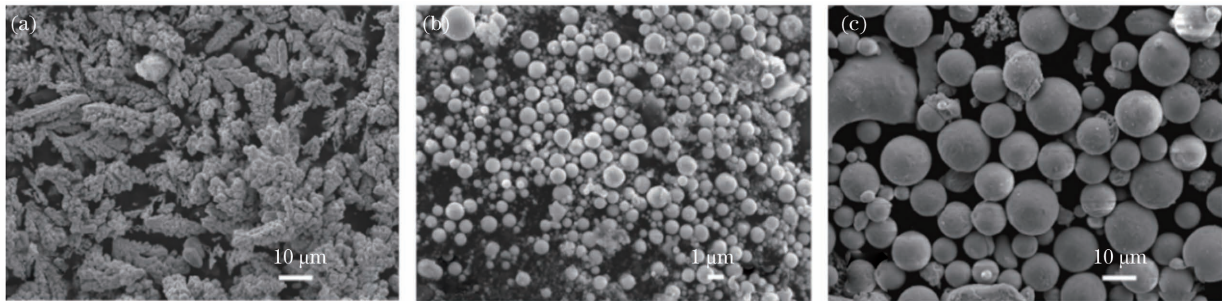


图 2 不同形态铜粉的扫描电镜(SEM)照片。(a)不规则铜粉;(b)(c)不同粒径的球形铜粉

Fig. 2 Scanning electron microscopy (SEM) images of different forms of copper powder. (a) Irregular copper powder; (b)(c) spherical copper powder with different diameters

表 1 铜粉参数

Table 1 Parameters of copper powder

Powder type	Diameter / μm	Purity grade
Irregular copper powder	15-20	3N
Spherical copper powder	0.5-2.0	3N
Spherical copper powder	10-20	3N

采用激光能量呈高斯分布的短脉冲 Nd:YAG 激光器(单脉冲持续时间为 7 ns,波长为 1064 nm,最大脉冲能量为 1800 mJ)进行实验,实验中使用的激光能量分别为 360、720、1080、1440、1800 mJ,光斑直径为 1 mm。实验中采用的模具是本团队自行设计的,该模具由底座、装填模具、上下冲头、压板和固定元件组成。装填模具的粉末型腔直径为 2.5 mm,冲头与装填模具设计为间隙配合,间隙约为 0.01 mm。实验前,将粉末置于真空干燥箱中,在 120 $^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥 4 h,以去除粉末中的水分,增加粉末的流动性。使用 JSM-7800 F 型扫描电镜(SEM)对铜粉进行形貌观察。将铜粉填入模具,模具中的铜粉厚度约为 400 μm ,然后使用深圳三思纵横科技

股份有限公司生产的 UTM 4104 数控压力机进行预压,压力为 60 MPa,保持 150 s。进行激光冲击动态压实实验时,将所有实验设备和材料按图 1 所示安装到位。获得尺寸为 $\phi 2.5 \text{ mm} \times (0.12 \sim 0.15) \text{ mm}$ 的铜粉压坯后,使用 VHX-1000C 光学显微镜观察铜粉压坯的形貌;然后,使用高精天平和千分尺测量压坯的质量和体积,估算最终铜粉压坯的密度。每种工艺参数下均取 3 次有效实验的平均值,以保证数据可靠。最后,将铜粉压坯固定,使用环氧树脂和氧化剂进行镶嵌,采用上海光密仪器有限公司生产的 HXD-1000 TMS/LCD 型显微硬度测试仪测试压坯截面上的显微硬度分布。

3 实验结果及分析

3.1 激光能量对相对密度的影响

图 3 所示为冲击压实前铜粉压坯和不同激光能量冲击压实后最终铜粉压坯的形貌。如图 3(a)所示,预处理至 50% 相对密度的不规则铜粉预压坯呈现出较好的形状性能,预压坯表面有大量孔隙存在。这是因

为在静态压力下颗粒发生重排后颗粒间存在大量孔隙,而且铜粉颗粒基本不发生塑性变形。对粉末进行预压方便后续动态压实实验时的装填步骤,同时能获得较好的颗粒堆叠结构,从而提高动态压实获得的压坯密度^[19]。以不同的激光能量进行激光冲击压实后,所有的铜粉压坯形状基本完整。在图 3(b)所示的放

大图中可以看出:在较小的激光能量下,压坯表面边缘区域易产生剥落现象;随着激光能量增加,压坯边缘区域成型质量趋于良好,无剥落、裂纹等缺陷。这是因为当冲击能量较小时,铜粉颗粒的塑性变形和颗粒间的连接强度不足,导致铜粉压实不充分,进而导致脱模时压坯与模具壁摩擦,产生剥落。

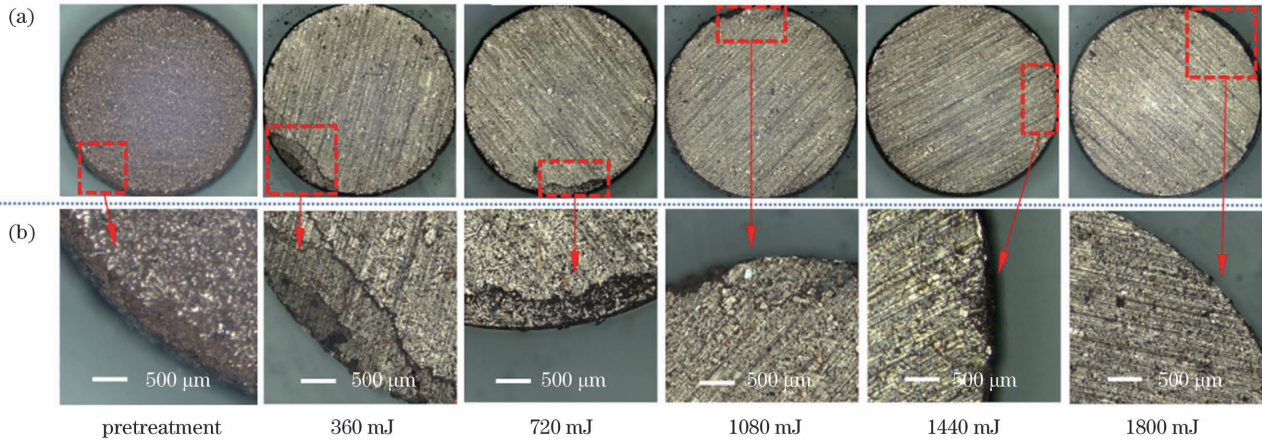


图 3 铜粉预压坯和最终的铜粉压坯图。(a)宏观形貌;(b)局部形貌

Fig. 3 Drawing of pretreated and final copper powder compacts. (a) Macro morphologies; (b) enlarged local morphologies

图 4 所示为 360、1080、1800 mJ 激光能量下制备的压坯边缘和中心区域的截面微观形貌,其中浅颜色部分为铜,深颜色部分为压坯中未愈合的孔隙。从图 4 中可以看出,随着激光能量增加,粉末颗粒发生了更

大的塑性变形,使得压坯的孔隙率明显降低,同时压坯边缘成型质量趋于良好。对比图 4(a)和图 4(b)可以发现压坯中心区域和边缘区域的孔隙大小及孔隙分布均匀性一致,这得益于冲击波在粉体中的传播。

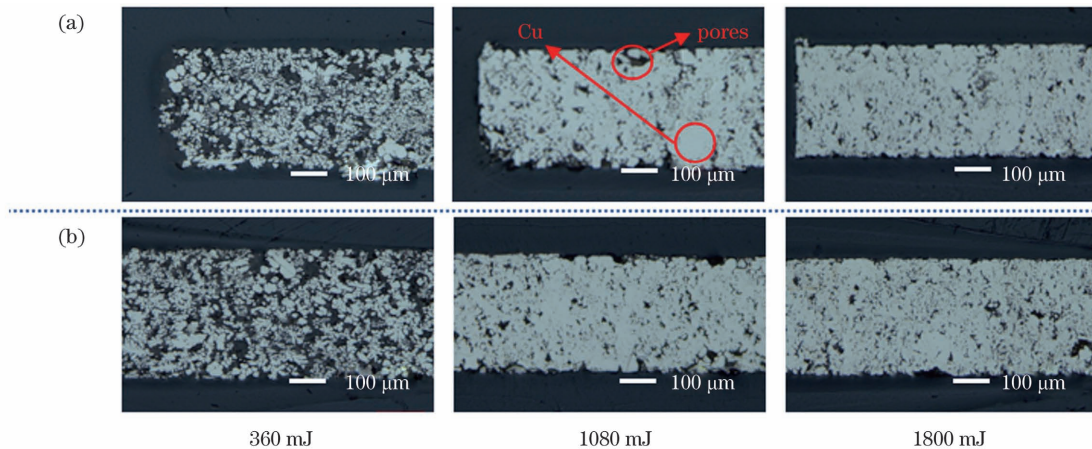


图 4 不同激光能量下铜粉压坯截面的微观形貌。(a)边缘区域;(b)中心区域

Fig. 4 Cross-section morphologies of copper powder compact under different laser energy values. (a) Edge area; (b) central area

激光冲击压实粉末时的冲击能量取决于激光能量,激光能量对最终压坯试样相对密度的影响如图 5 所示。随着激光能量从 360 mJ 增加至 1800 mJ,压坯的相对密度从 76.1% 增加至 91.3%。在 5 种激光能量冲击下,铜粉压坯的相对密度从预压坯的 50% 分别提升至 76.1%、81.1%、86.5%、89.6 和 91.3%。铜粉压坯的相对密度随着激光能量的增加而增大,但相对密度增大的幅度逐渐减小。这是因为在激光高应变率的冲击加载作用下,铜粉颗粒发生了较大的塑性变形,极易产生加工硬化,从而产生变形抗力;同时,随着激光能量增加,颗粒硬化增强使得产生的变形抗力也

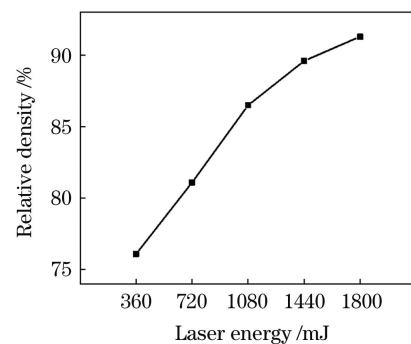


图 5 激光能量对铜粉压坯相对密度的影响

Fig. 5 Effect of laser energy on relative density of copper powder compact

逐渐增加,最终导致压坯相对密度的增长趋于缓慢。

3.2 铜粉形态对相对密度的影响

分析激光能量对压坯相对密度的影响可以发现,不规则形态铜粉在 1800 mJ 激光能量冲击下被高度压实。接下来,固定激光能量为 1800 mJ,分别对三种微观形态的铜粉进行动态压实实验。图 6 所示为不同形态铜粉最终压坯的宏观照片。从图 6(a)可以看出,形态不规则铜粉的压坯表面较为光滑,而且形状完整。图 6(b)是粒径为 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 的球形铜粉的最终压坯,可以看出压坯表面产生了明显的层裂现象。图 6(c)是粒径为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 的球形铜粉的最终压坯,其整体形状完整,但在边缘区域出现了剥落现象。为了揭示不同形态铜粉在压实过程中颗粒间的结合机理及其对相对密度的影响,本团队对压坯断面的微观组织进行了研究分析。现有研究表明,压实过程中,粉末颗粒间的 5 种结合机理为固体桥接机理(即固态压焊)、机械内锁机理、界面力机理、黏着力机理和静电力机理。图 7 为三种形态铜粉压坯断面的微观结构图。如图 7 所示,三种形态粉末压坯均被压实,其中不规则

铜粉压坯的孔隙略多于球形铜粉压坯。这是因为压实过程中不规则形态的铜粉颗粒间易出现较难闭合的孔隙。观察图 7(b)、(c)、(e)可以发现,在激光冲击下,球形铜粉压坯内部颗粒发生了明显的塑性变形,颗粒间产生了桥接现象。这是因为:1)在激光冲击波动态压实过程中,铜粉颗粒获得了很高的微动能,在适当的碰撞角度下高速碰撞后发生塑性变形,部分粒子出现了氧化膜破裂[如图 7(f)所示]、射流等现象;2)由于摩擦和接触瞬间产生了热量,随着热量累积,铜粉颗粒间出现结合现象,这些现象具有明显的固态压焊连接特征。由图 7(d)可以发现不规则铜粉压坯内部颗粒发生了明显的塑性变形,同时颗粒间相互结合形成了较大的金属块。产生这种现象的原因之一是颗粒间发生了固态压焊连接,此外还有铜粉颗粒变形导致颗粒间形成了类似于铆接的机械内锁力,这种力可以促进颗粒结合。综合上述对压坯微观结构的分析可得到如下结论:激光冲击动态压实铜粉时,球形铜粉颗粒间的连接机理主要为固态压焊,而形态不规则铜粉颗粒间的连接机理主要为固态压焊及机械内锁力。

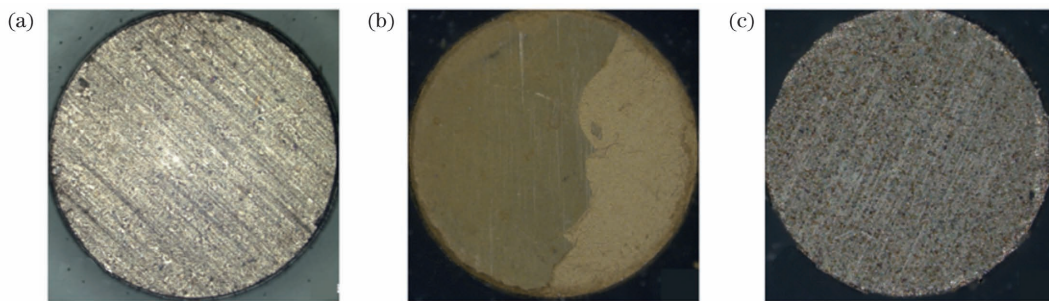


图 6 不同形态铜粉压坯的宏观形貌。(a)不规则铜粉;(b)小粒径球形铜粉;(c)大粒径球形铜粉

Fig. 6 Macro morphologies of compacts of copper powder with different forms . (a) Irregular copper powder; (b) small spherical copper powder; (c) large spherical copper powder

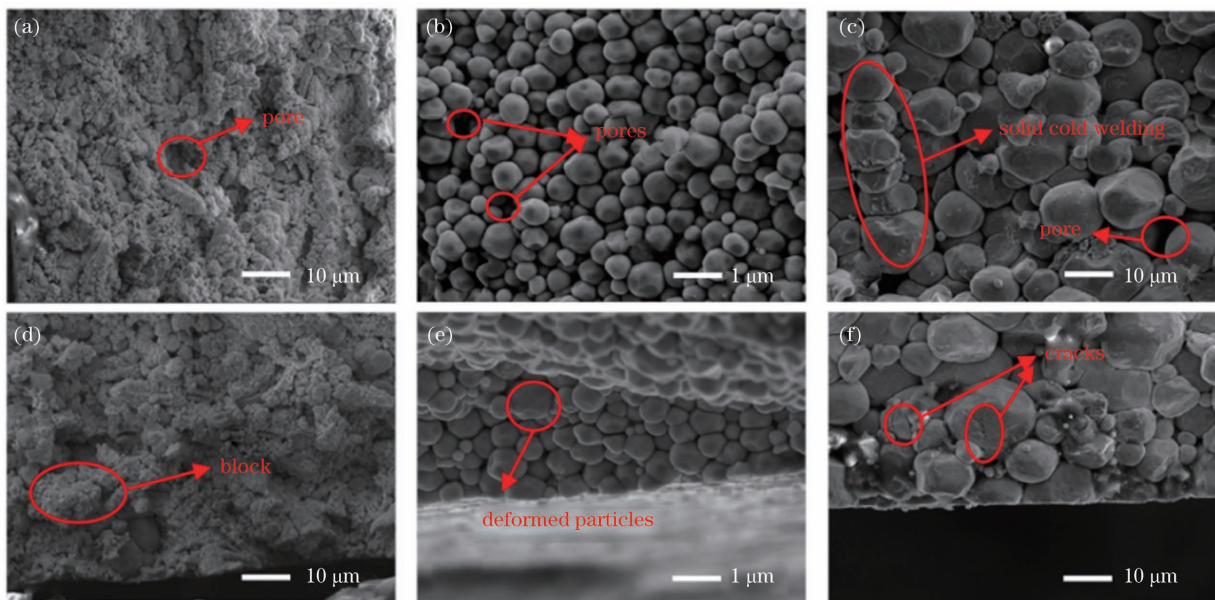


图 7 不同压坯断面的微观结构。(a)(d)不规则铜粉压坯;(b)(e)小粒径球形铜粉压坯;(c)(f)大粒径球形铜粉压坯

Fig. 7 Microstructures of cross-section of different compacts. (a)(d) Irregular copper powder compact; (b)(e) small spherical copper powder compact; (c)(f) large spherical copper powder compact

图 8 所示为 1800 mJ 激光能量动态冲击下不同形态铜粉最终压坯的相对密度,可见,形态不规则铜粉压坯、小粒径球形铜粉压坯和大粒径球形铜粉压坯的最大相对密度分别为 91.35%、94.35% 和 93.12%。形态不规则铜粉压坯相较于球形铜粉最终压坯的相对密度低,这是因为粉末的初始致密装填对最终压坯的相对密度有很大影响。观察图 7 可以发现,相较于球形铜粉压坯动态压实后的形态,不规则铜粉压坯中存在较多孔隙。这些孔隙可被认为是预压后颗粒间较难闭合的孔隙,需要使用更大的冲击力来实现孔隙闭合。球形铜粉由于预压后孔隙分布相对均匀且孔隙尺寸较小,而且随着粒径减小,孔隙尺寸相对减小,这就很好地解释了激光冲击小粒径(0.5~2.0 μm)球形铜粉压坯相对密度最高的原因。虽然球形铜粉能实现高密度压实成型,但由于压坯仅依靠固体桥接来实现颗粒间的连接,最终的压坯极易产生裂纹、层裂等缺陷。综合比较可知,不规则形态铜粉更适合用于微零件粉末压坯的激光冲击动态压实。

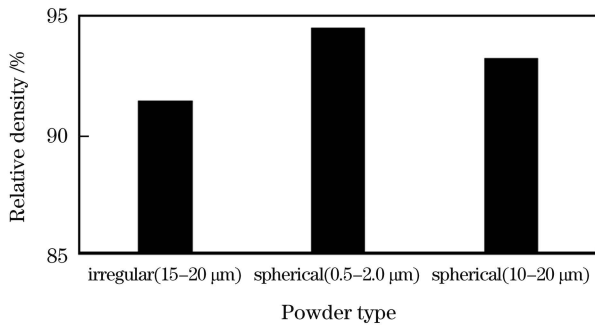


图 8 铜粉形态对压坯相对密度的影响

Fig. 8 Effect of copper powder form on relative density of compacts

3.3 激光能量对压坯显微硬度的影响

为了研究激光能量和最终压坯力学性能之间的关系,本团队分别测量了 360、1080、1800 mJ 激光能量下动态压实性能相对较好的不规则铜粉压坯的显微硬度,测量结果如图 9 所示。由图 9 可以发现,动态压实不规则铜粉压坯的平均显微硬度随着激光能量的增加而增大,360、1080、1800 mJ 激光能量下不规则铜粉压坯的显微硬度分别为 67.0、82.8、91.7 HV。这是因为铜粉颗粒在冲击波传播时发生了塑性变形,不仅填充了颗粒间的孔隙,还使颗粒变形区域发生了应变硬化现象。冲击波压力随着激光能量的增加而增大,从而使得压坯的应变硬化现象也随之增强。Dong 等^[20]在采用磁脉冲压实装置冲击金属粉末的研究中同样也发现了压坯内部显微硬度随着冲击能量提升而明显增强的现象。另外,从图 9 中也可以发现在 3 种激光能量下制备的铜粉压坯的显微硬度分布曲线在均值附近波动。这是由于不规则粉末颗粒间接触分布不均匀导致颗粒塑性变形不均匀,从而使得局部区域的显微硬度出现波动。在 Vivek 等^[9]和 Namazi 等^[7]的动态压

实研究中也出现了类似的显微硬度分布。

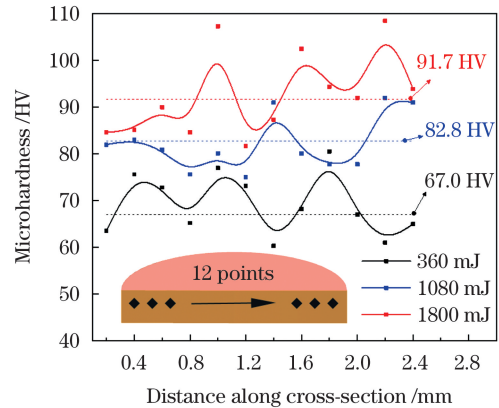


图 9 不同激光能量下不规则铜粉压坯的显微硬度分布
Fig. 9 Microhardness distribution of irregular copper powder compact under different laser energy values

3.4 冲击次数对相对密度的影响

在动态压实过程中,除了冲击能量以外,冲击次数同样影响着最终压坯的性能。考虑到粉末材料应变硬化的影响,优化冲击次数和冲击能量对于提高粉末压坯的相对密度具有重要意义。对预压至 50% 相对密度的不规则铜粉预压坯进行多次动态冲击压实实验,图 10 为多次冲击压实后铜粉压坯的最终相对密度。从图 10(a)可以看出,随着冲击次数增多,铜粉压坯的最终相对密度相应增加。经计算可知,在 5 种激光冲击能量下,前两次冲击对压坯最终相对密度提升的贡献分别为 3.03%、4.77%、3.23%、1.75% 和 1.29%,而第三次和第四次冲击对相对密度提升的贡献总和仅为 1.00%、0.93%、0.56%、0.55% 和 0.75%,最终在 1800 mJ 能量冲击下压出相对密度为 93.2% 的铜粉压坯。随着冲击次数增多,更多的冲击能量转化成粉末压坯致密所需要的塑性应变能,但当冲击次数达到一定值时,压坯的相对密度不再随冲击次数增加而明显增大。这是由于粉末材料的应变硬化增大导致变形抗力增大,使得压坯相对密度随着冲击次数增加难以继续增大。因此,在进行激光冲击动态压实时,选择两次冲击能很好地平衡加工效率和压坯质量。

考虑到应变硬化导致变形抗力增大以及多次冲击对最终相对密度的影响,分别固定第一次和第二次激光冲击能量进行二次冲击压实实验,实验结果如图 10(b)、(c)所示。从图 10(b)可以看出,将第一次冲击能量固定在 360 mJ,改变第二次冲击能量,最终压坯的相对密度从 78.5% 提升至 96.5%。这一结果表明,第二次冲击的激光能量决定了压坯能达到的最大相对密度。此外,第一次冲击时粉末材料的硬化也会导致变形抗力相应增大。从图 10(c)可以看出,随着第一次冲击能量增加,最终压坯的相对密度降低明显。这一实验结果与文献[21]所述结论相左。可能的原因是激光冲击动态压实过程中的高速率变形使材料的位错密度显著增加,从而使得材料变形产生的变形抗力

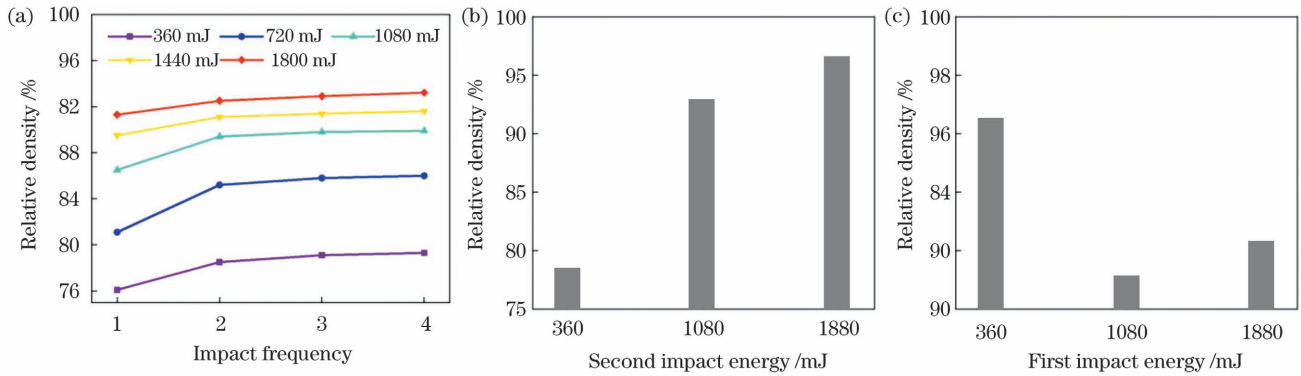


图 10 多次冲击对铜粉压坯的影响。(a)冲击次数对相对密度的影响;(b)第二次冲击能量对相对密度的影响(固定第一次冲击能量为 360 mJ);(c)第一次冲击能量对相对密度的影响(固定第二次冲击能量为 1800 mJ)

Fig. 10 Effect of multiple impact on copper powder compact. (a) Effect of impact frequency on relative density; (b) effect of the second impact energy on relative density (keep the first impact energy at 360 mJ); (c) effect of the first impact energy on relative density (keep the second impact energy at 1800 mJ)

显著增大。因此,为减小材料硬化对压坯性能提升的影响,应先以较小的激光能量进行冲击,然后再以高能量进行冲击。本团队采用 360 mJ+1800 mJ 的激光能量制备了相对密度高达 96.5% 的铜粉压坯。

4 结 论

本团队将激光冲击工艺应用于铜粉的动态压实成型,系统地研究了激光能量、粉末形态和冲击次数对铜粉压坯显微形貌、相对密度与显微硬度的影响。本文通过初步实验研究,得出了如下结论:

1)随着激光能量增加,压坯内部孔隙逐渐减少,且边缘形状趋于良好,铜粉压坯的相对密度逐渐提升,但由于变形抗力的产生,相对密度的提升速率相对减缓。

2)球形铜粉可达到的最大相对密度要高于不规则铜粉,小粒径($0.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$)球形铜粉压坯的相对密度要高于大粒径($10 \sim 20 \mu\text{m}$)球形铜粉压坯。不规则铜粉颗粒间的连接机理为固态压焊和机械内锁,而球形铜粉颗粒间的连接机理主要为固态压焊。不规则铜粉压坯不易产生裂纹、层裂等缺陷,适合用于微零件压坯的制造。

3)多次冲击(两次及以上)能有效提升压坯的相对密度,而且相对密度的提升主要由前两次冲击贡献;相对密度提升值和变形抗力均随着激光能量的增加而增加,相应地,压坯的显微硬度随着激光能量的增加而增大。

参 考 文 献

- [1] 吴明明, 李来平, 高选乔, 等. 粉末冶金技术制备钼基复合材料研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(5): 462-470.
Wu M M, Li L P, Gao X Q, et al. Research progress of molybdenum-based composites prepared by powder metallurgy technology[J]. Powder Metallurgy Technology, 2021, 39(5): 462-470.
- [2] An X Z, Xing Z T, Jia C C. Cold compaction of copper powders under mechanical vibration and uniaxial compression [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(4): 2171-2179.
- [3] 陈振华. 金属粉末动压成型的理论研究[J]. 中南矿业学院学报, 1983, 14(1): 117-125.
Chen Z H. A theoretical study on dynamic compaction of metal powders[J]. Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy, 1983, 14(1): 117-125.
- [4] Wang J Z, Qu X H, Yin H Q, et al. High velocity compaction of ferrous powder[J]. Powder Technology, 2009, 192(1): 131-136.
- [5] Wang J Z, Yin H Q, Qu X H, et al. Effect of multiple impacts on high velocity pressed iron powder[J]. Powder Technology, 2009, 195(3): 184-189.
- [6] Cui J J, Huang X S, Dong D Y, et al. Effect of discharge energy of magnetic pulse compaction on the powder compaction characteristics and spring back behavior of copper compacts[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(9): 3385-3397.
- [7] Namazi N, Alitavoli M, Babaei H. Effects of loading rate range on mechanical and microstructural properties of dynamically compacted iron powder[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(10): 4097-4109.
- [8] Yan Z Q, Chen F, Cai Y X, et al. Influence of particle size on property of Ti-6Al-4V alloy prepared by high-velocity compaction[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 361-365.
- [9] Vivek A, DeFouw J D, Daehn G S. Dynamic compaction of titanium powder by vaporizing foil actuator assisted shearing[J]. Powder Technology, 2014, 254: 181-186.
- [10] 黄尚宇, 常志华, 田贞武, 等. 粉末低电压电磁压制实验研究[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(3): 10-13.
Huang S Y, Chang Z H, Tian Z W, et al. Experimental research on low-voltage electromagnetic compaction of powder materials [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, 8(3): 10-13.
- [11] Babaei H, Mostofi T M, Namdari-Khalilabad M, et al. Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: experimental investigation and empirical modeling[J]. Powder Technology, 2017, 315: 171-181.
- [12] Gu Y B, Ravichandran G. Dynamic behavior of selected ceramic powders[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(11): 1768-1785.
- [13] 黄宇, 周建忠, 李京, 等. 深冷激光喷丸对 TC6 钛合金阻尼特性及振动疲劳寿命的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402011.
Huang Y, Zhou J Z, Li J, et al. Effects of cryogenic laser peening on damping characteristics and vibration fatigue life of TC6 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402011.
- [14] Pu T Y, Liu W W, Wang Y L, et al. A novel laser shock post-

- processing technique on the laser-induced damage resistance of 1ω $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021(2): 127-134.
- [15] Zheng C, Ji Z, Song L B, et al. Variation of fracture mode in micro-scale laser shock punching [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 25-32.
- [16] Wang X, Yuan Y Q, Shen Z B, et al. Investigation of the forming pressure and formability of metal foil by laser-driven multi-layered flyer[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 151-160.
- [17] 杨海峰, 满家祥, 熊飞, 等. 铝箔的激光温冲击压印工艺及机理研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602118.
Yang H F, Man J X, Xiong F, et al. Technology and mechanism on warm laser shock imprinting of aluminum foils [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602118.
- [18] Wang X, Gu C X, Zheng Y Y, et al. Laser shock welding of aluminum/aluminum and aluminum/copper plates[J]. Materials & Design, 2014, 56: 26-30.
- [19] Voorhees T J, Steiner J W, Kennedy G B, et al. The effect of initial pressed density on the dynamic densification behavior of brittle granular materials [C]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2272(1): 110014.
- [20] Dong D Y, Huang X S, Li G Y, et al. Study on mechanical characteristics, microstructure and equation of copper powder compaction based on electromagnetic compaction [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 253: 123449.
- [21] Park H Y, Kilicaslan M F, Hong S J. Effect of multiple pressures by magnetic pulsed compaction (MPC) on the density of gas-atomized Al-20Si powder[J]. Powder Technology, 2012, 224: 360-364.

Experimental Study on Dynamic Compaction of Copper Powder by Laser Shock Wave

Ni Peng, Liu Huixia*, Dong Zhen, Ma Youjuan, Wang Xiao

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China

Abstract

Objective Dynamic compaction (DC) technology generates a shock wave in the powder, allowing the final compact to achieve theoretical density in a very short time. The compacts formed by DC technology have smaller porosity, more even density, and better mechanical properties than those formed by conventional powder metallurgy (PM) process. However, the study on dynamic compaction of micro-scale parts is relatively absent, and the current dynamic compaction technologies are unsuitable for the dynamic compaction on a micro-scale. The laser shock wave has the loading characteristics of high strain rate (10^6 – 10^7 s^{-1}), controlled energy, and a small affected area. In this study, a novel approach for compacting powder on a micro-scale by laser shock wave is presented, which integrates the unique advantages of pulse laser with a high strain rate and is appropriate for micro-forming.

Methods In the experiment, Nd:YAG laser with the Gaussian distribution beam was employed to accomplish the dynamic compaction research on the self-designed experimental platform. The density, surface morphology, microstructure, and mechanical properties of the finished compact were investigated using an optical microscope, scanning electron microscope, and Vickers hardness tester. The effect of laser energy, powder morphology, and impact frequency on the copper compact's density was examined.

Results and Discussions Copper powder is compacted under different laser energies and the copper powder compact samples are $\phi 2.5$ mm \times (0.2–0.15) mm in size. Figure 3 demonstrates that all blanks are complete and regular in shape with no evident crack defects and there is no flaking at the blank's edge. With the laser energy increase, this phenomenon gradually reduces, and a compact with the best forming quality is generated at 1800 mJ laser energy. Figure 4 indicates that the pore in the compact also increases with the increase of laser energy, and it can be discovered that the pore size and distribution uniformity in the compact's center and edge areas are accordant. Figure 5 reveals that with the increase of laser energy from 360 mJ to 1800 mJ, the compact's relative density increases from 76.1% to 91.3%, and the trend of relative density increase slows down. The effect of three kinds of copper powder morphologies on the density of copper compacts is explained. Irregular copper compacts have good surface quality under 1800 mJ laser energy impact, whereas spherical powder compacts show an evident flaking phenomenon. According to the microstructure investigation of the cross-section of three various morphologies of copper compacts in Figure 7, there is an obvious plastic deformation of the copper particles and solid bridging between the particles in the spherical powder compacts. In addition to the pressure welding mechanism, there is an additional mechanical interlocking force between irregular copper particles. The maximum relative density of the irregular copper powder (15–20 μm) compact, spherical copper powder (0.5–2.0 μm) compact, and spherical copper powder (10–20 μm) compact is 91.35%, 94.35%, and 93.12%, respectively. Comparing the relative density and forming quality of copper compact, irregular copper powder is suitable for fabrication on a micro-scale part. The compact's mechanical properties were examined. The finding shows that the average microhardness of the final copper compact increases to 67.0 HV, 82.8 HV, and 91.7 HV, respectively, with the increase of laser energy.

This is because the powder material undergoes plastic deformation during shock wave propagation, which fills the inter-particle pore and causes strain hardening in the particles' deformation area. The shock wave pressure increases with the increase of laser energy, increasing the compact's strain hardening. The impact frequency also influences the final copper compacts' relative density. Figure 10 reveals that the relative density of compacts increases with the impact frequency increases. The contribution of the first and the second impact to the relative density increase under the five laser energies are 3.03%, 4.77%, 3.23%, 1.75%, and 1.29% while the total contribution of the third and fourth impact is only 1.00%, 0.93%, 0.56%, 0.55%, and 0.75%, respectively. The best performance of the final compact can be generated under the double impact. Double impact of 360 mJ + 1800 mJ laser energy was adopted to reduce the negative influence of strain hardening effect on the performance improvement of compact, and the relative density of the compact reaches 96.5%.

Conclusions This study systematically examines the influence of process parameters, including laser energy, powder morphology, and impact frequency on relative density and mechanical properties of final compacts dynamically compacted using laser shock waves. With the increase of laser energy, the forming ability of copper compact gradually enhanced. The increase speed of relative density slows down due to the deformation resistance's production. The compact's microstructure investigation shows that the connection mechanism between irregular particles is solid pressure welding and mechanical internal locking, while the connection mechanism between spherical particles is only solid-state pressure welding. Thus, the irregular copper powder compact has relatively high connection strength and is not easy to generate defects, including crack and peeling, which is appropriate for the production of micro-scale parts. Multiple impacts (two or more impact times) can efficiently improve the densification of compacts, and the increase in densification is primarily contributed by the first two impacts. Double impact with first low laser energy and then high laser energy can reduce the influence of strain hardening on the improvement of compact properties.

Key words laser technique; laser shock; dynamic compaction; copper powder; microhardness