

ICP 微等离子体射流在快速成形制造中的应用

张一川 杨宽 李唤 朱晓东

Application of inductively coupled microplasma jet on rapid manufacturing

Zhang Yi-Chuan Yang Kuan Li Huan Zhu Xiao-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 145201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.145201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.145201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于导模共振效应提高石墨烯表面等离子体的局域特性

Improvement of the local characteristics of graphene surface plasmon based on guided-mode resonance effect

物理学报.2016, 65(10): 105201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.105201>

太赫兹波段石墨烯等离子体的增益特性

Gain characteristics of grapheme plasmain terahertz range

物理学报.2016, 65(1): 015201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.015201>

高压空气环状感性耦合等离子体实验研究和参数诊断

Experimental investigation and parameter diagnosis of air high-pressure ring-shaped inductively coupled plasma

物理学报.2015, 64(17): 175201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.175201>

光抽运多层石墨烯太赫兹表面等离子体增益特性的研究

Study on the gain characteristics of terahertz surface plasma in optically pumped graphene multi-layer structures

物理学报.2014, 63(7): 075201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.075201>

N₂ 微空心阴极放电特性及其阴极溅射的 PIC/MC 模拟

Simulation of N₂ microhollow cathode discharge and cathode sputtering by using a PIC/MC model

物理学报.2013, 62(7): 075201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.075201>

ICP 微等离子体射流在快速成形制造中的应用*

张一川 杨宽 李唤 朱晓东†

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2016年3月20日收到; 2016年5月3日收到修改稿)

本文开展了大气压甚高频感应耦合 (ICP) 微等离子体射流的特性与应用研究. 在 150 MHz 甚高频, 功率为 90 W 条件下获得温度高达上千度的温热等离子体射流, 射流长度近 3 cm. 随着气流量的增加射流将呈现层流到湍流的转变, 长度先增后减; 而功率对于射流长度的影响存在着一个上限, 当等离子体吸收的能量与扩散损失的能量达到平衡时, 射流长度将达到最大. 利用这种 ICP 微等离子体射流进行了微尺寸金属铜的快速成形制造, 得到了球冠状和柱状铜金属件. 在扫描电子显微镜下观察到沉积物表面最小颗粒尺寸远小于铜粉颗粒; X 射线衍射结果显示沉积物表面存在弱氧化物峰, 这是沉积过程中空气被射流卷入所致.

关键词: 感应耦合微等离子体射流, 微尺寸, 金属快速成形**PACS:** 52.25.-b, 52.40.Hf, 52.50.Qt, 52.75.Hn**DOI:** 10.7498/aps.65.145201

1 引言

金属材料直接成形已成为国际上快速成形技术的研究热点, 目前主要有基于激光、电子束和等离子体的三种直接成形制造方法^[1-3]. 相对于利用激光和电子束作为直接成形的能量源, 等离子体束的尺寸和能量密度可变范围大, 这是因为等离子体特性依赖于放电模式和激发方式. 近年来发展起来的大气压微等离子体射流, 由于尺寸小、密度高、高压稳定性好等特性, 在微加工领域显现了自己独特的优势^[4-5]. 在微尺寸金属快速成形制造中, 能量源必须具有束流小、温度高、能量集中等特点, 微等离子体射流就是一个重要的候选能量源.

常见的大气压微等离子体, 大多采用低频介质阻挡 (DBD) 放电或直流放电等方式, 形成的射流温度往往较低, 通常在室温左右^[6,7]. 这些大气压冷等离子体射流难以满足高熔点材料的加工要求. 大气压高频感应耦合 (ICP) 微等离子体射流是一种在微尺寸区域内利用高频感性耦合放电形成的等离子体束流. 由于采用感性耦合和大气压条

件, 产生的微射流温度高, 而且结构简单, 这为高频 ICP 微等离子体射流应用于金属材料的直接成形制造提供了可能. 在金属部件快速成形技术中, 可以将沉积材料引入等离子体射流, 利用射流的高温特性将其加热到熔融状态, 熔融的金属液滴随射流喷射到基底表面, 经冷却后得到沉积层, 再往复进行, 并结合计算机辅助技术精确控制基底的移动, 实现所需结构金属件的快速成形. 这种基于等离子体的快速成形技术具有低成本、高精度和高效率等优点.

本文开展了大气压甚高频 ICP 微等离子体射流的产生和放电特性研究, 探索了利用等离子体微射流进行金属部件快速成形制造的可行性, 并结合扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 对金属部件进行了分析.

2 实验

实验装置如图 1 所示, 主要包括 ICP 微等离子体射流产生系统、供气供料系统和移动控制系统三部分. 其中射流产生系统包括一个 150 MHz 的射

* 国家自然科学基金 (批准号: 11375192) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xdzhu@ustc.edu.cn

频功率源及匹配网络、铜制感应线圈和石英玻璃管. 本实验选取的石英玻璃管内径为3 mm. 采用氩气为放电工作气体, 气体流量由浮子流量计控制. 沉积所需的金属粉材由气流带入等离子体. XYZ平台的三维移动由计算机软件控制, 以形成材料的成形路径.

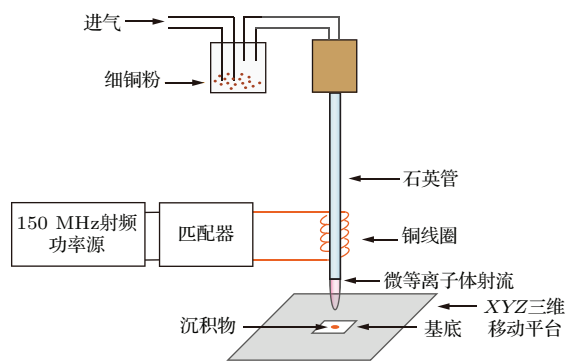


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic view of the mICP jet set-up.

放电采用了甚高频激励, 铜制感应线圈上的射频电流产生高频交变电磁场, 在线圈内的石英管空间形成和维持等离子体射流. 等离子体射流中的金属粉末被加热到熔融状态, 随射流喷射到基底表面, 经冷却后得到沉积层. 实验中采用的金属粉料为200目(74 μm)的铜粉, 沉积基底为氧化铝陶瓷片. 在实验起始阶段, 用3000 V高压脉冲点火装置击穿气体以产生更多的初始电子, 从而使放电更容易形成.

3 结果与讨论

图2所示为典型的ICP微等离子体射流, 气流量为200 sccm (1 sccm = 1 mL/min), 放电功率为90 W. 等离子体由高频电磁场在石英管内激发产生, 并充满整个石英管. 在石英管的开口端, 等离子体随气流喷出管口形成细长的射流, 在本实验中最长可达将近3 cm, 宽度略小于管内径.

微米尺寸的金属铜粉由气流带入等离子体区域, 与等离子体发生相互作用. 在实验中可以看见管内会不断闪烁细小的光点, 这是铜粉颗粒在经过十几厘米的等离子体区域时被熔融及发生相变的过程. 保持移动平台不动, 经过几秒的沉积时间, 即可在基底上堆积成球冠状样品, 如图3所示. 样品的横向尺寸约为2 mm, 接近于石英玻璃管内径, 高度约为500 μm. 球冠状样品周围分散着熔融的铜

颗粒, 是等离子体射流到达基底时弥散所致. 由于采用甚高频诱导放电, 常规的基于电信号的温度测量仪器将会受到空间高频电磁场的干扰, 无法得到准确的测量结果. 根据快速沉积的球冠状铜样品, 我们可以估计射流的核心区气体温度在1000 °C以上(纯铜熔点约为1083.4 °C).

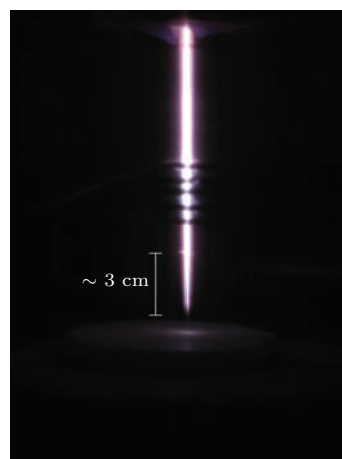


图2 (网刊彩色) ICP微等离子体射流实验照片

Fig. 2. (color online) Typical discharge image of the mICP jet.

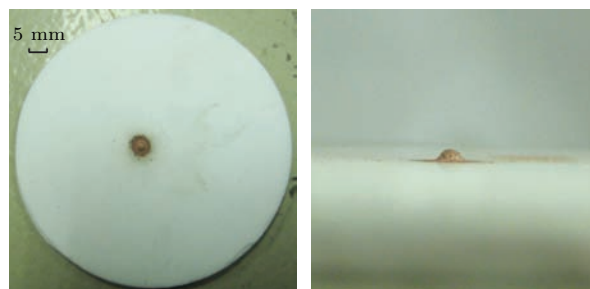


图3 (网刊彩色) 球冠状铜金属沉积物

Fig. 3. (color online) Spherical-cap-like copper deposition.

大尺寸的ICP等离子体炬, 通常工作在局域热力学平衡状态下, 在等离子体射流中可形成上万度的核心区. ICP微等离子体射流与ICP等离子体炬的工作原理是一致的. 然而, 由于尺寸的缩小, ICP微等离子体被限制在很小的空间内, 导致了面容比的增加和电极间距的减小. 面容比的增加使得等离子体内的能量平衡发生变化, 并在一定的参数范围内影响等离子体的稳定性. 电极间距的减小则形成了更大的空间电场梯度, 从而对等离子体内部的电荷分布和电中性产生影响^[8,9]. 这些变化, 打破了等离子体中带电粒子和中性原子之间的转换平衡, 使得等离子体偏离热平衡状态, 最终导致ICP微等

离子体射流产生不同于常规ICP等离子体射流的物理特性. 其中一个重要的区别就是同等功率密度下微等离子体中性气体温度的降低^[10]. 中性气体温度 T_g 与等离子体某一维度的尺寸 D 存在着如下关系^[8]:

$$D^2 \propto \frac{T_g^{3/2}}{p \epsilon n_e K_e},$$

式中 p 为气体压强, ϵ 为电子平均能量, n_e 为电子密度, K_e 为电子碰撞速率. 在其他参数不变的情况下, 微等离子体射流的温度往往要低于常规尺寸的ICP炬. 但由于在实验中使用了甚高频激发, 且等离子体工作在大气压条件下, 放电区域内粒子间的碰撞更加频繁, 使得电子的能量能更有效地传递给离子和中性粒子. 因而, 相对于低气压或者低频放电形成的等离子体, ICP微等离子体射流系统能产生气体温度更高的温热等离子体.

图4给出了扫描电镜下沉积物的表面形貌, 图4(a)为未处理样品, 图4(b)经过砂纸粗略打磨. 可以看到, 未经处理的原始样品表面较为粗糙, 小的颗粒在几个微米尺度, 远小于铜粉颗粒的大小, 这也间接证明了沉积过程中铜粉的物态变化, 表明铜粉被等离子体熔融成小液滴. 对样品的表层经过

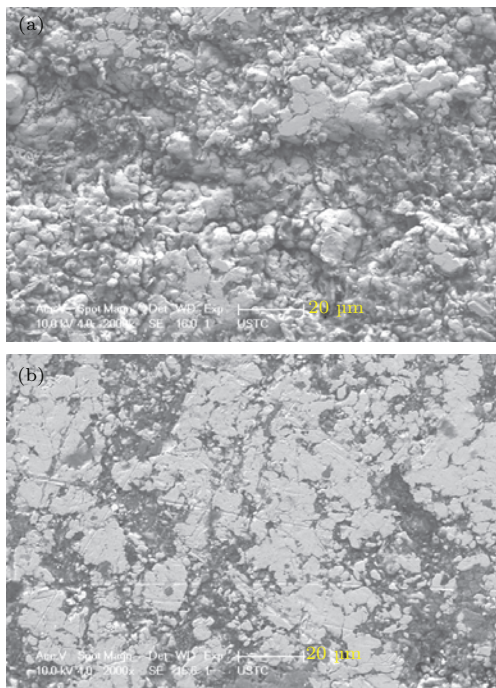


图4 SEM下沉积物表明形貌 (a) 未经处理; (b) 经过打磨处理

Fig. 4. SEM image of the deposition surface: (a) Preliminary sample; (b) polished sample.

打磨处理后, 样品表面变得较为平整、光滑, 在宏观上能观察到金属光泽.

图5为沉积物的XRD谱. 除了 Al_2O_3 陶瓷衬底和金属铜的特征峰外, 还可以观察到较弱的 $Cu_{2+1}O$ 峰, 这是由于沉积过程中周围空气的卷入导致沉积物出现微弱氧化.

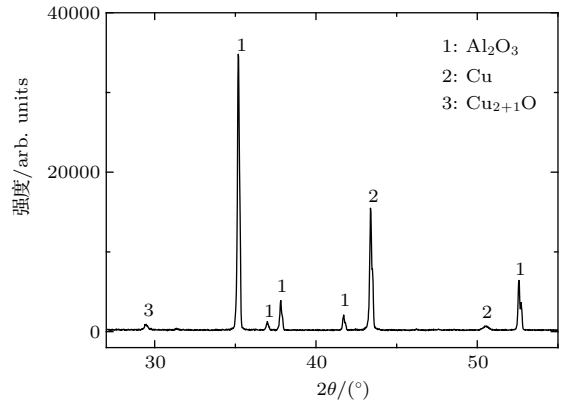


图5 沉积物的XRD谱

Fig. 5. XRD pattern of the deposition.

除了射流温度, 等离子体射流长度也是一个重要参量, 在很大程度上决定着应用的空间尺度. 从微观上看, 射流长度的增加其实是放电气体通道在环境气体中的延伸, 在放电通道内存在着一个电离前端, 使等离子体不断往前扩散传播^[11]. 因此, 等离子体射流的长度主要取决于两个主要参数: 气流量和输入功率. 前者影响着放电气体通道的形成和扩展, 后者决定了通道前端的电离程度和传播程度.

图6(a)为固定输入功率为90 W时射流长度随气流量的变化图. 我们可以看到, 随着气流量的增大, 射流长度呈现先增后减的趋势. 这反映了射流状态随气流量增加而发生层流态-过渡流态-湍流态的变化过程: 在气流量较小时, 射流处于较稳定的层流态, 气体通道能有效避免周围气体的卷入, 增大气流量会导致射流变长. 当气流量达到200 sccm时, 射流长度也达到最长, 射流开始转入过渡态. 继续增加气流量, 射流变得不稳定, 大量周围气体被卷入, 导致气体通道被破坏, 射流长度变短, 出现湍流状态.

图6(b)给出了流量为100 sccm时射流长度随输入功率的变化曲线. 可以看到射流长度随着功率的上升迅速增加, 最后趋于稳定. 在等离子体射流伸长的过程中, 放电通道前端的各种带电粒子或者

激发态粒子将和环境气体分子产生碰撞^[12], 导致电荷和能量的转移, 形成新的电离、复合等过程. 对于大多数电驱动的等离子体而言, 增加输入功率, 等离子体所吸收的功率也在增加, 这加剧了放电通道内的电离过程, 使得电离前端向前扩散, 导致等离子体的膨胀. 随着射流的伸长, 放电通道与周围环境气体接触面变大, 增加了活性粒子与环境气体分子的碰撞概率. 最终, 当等离子体中的化学反应速率和等离子体扩散速率达到平衡, 也就是馈入等离子体的能量与等离子体扩散损失的能量达到平衡时, 射流长度将达到最大.

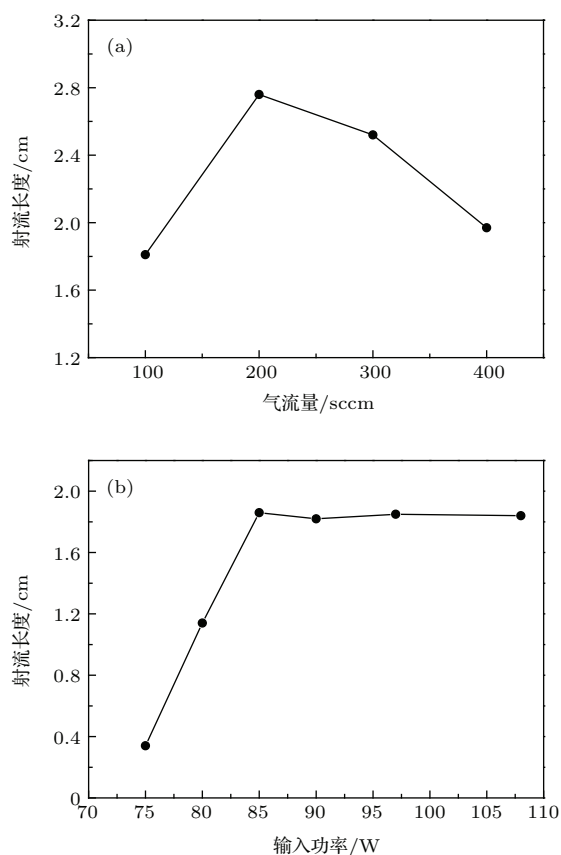


图6 射流长度随参数变化 (a) 气流量; (b) 输入功率
Fig. 6. Jet lengths versus: (a) Flow rate; (b) applied power.

在沉积过程中, 调节移动平台, 我们尝试了柱状铜部件的成形制造. 随着沉积进行, 连续降低移动平台, 获得柱状沉积物的制备, 如图7所示. 柱状铜样品高度约为1 cm, 表明了ICP微等离子体射流可以用于金属铜部件的成形制造. 柱状物的表层可以看到黑色氧化物, 这主要是因为平台下降时沉积层远离射流区, 惰性放电气体的保护作用被削弱, 沉积物外表被空气氧化所致. 此外, 柱状物沿长度

方向不均匀是由于移动过程中移动速度与沉积速度匹配不好导致, 进一步深入的工作正在开展中.

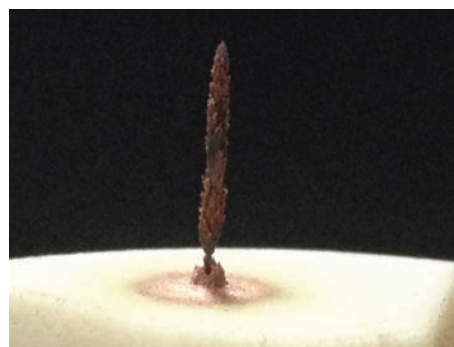


图7 (网刊彩色) 表面略带氧化的柱状铜样品
Fig. 7. (color online) Copper column with weak oxidized surface.

4 结 论

本文开展了大气压甚高频ICP微等离子体射流的产生、特性与金属快速成形应用研究. 在功率为90 W的条件下得到了长度近3 cm的温热等离子体射流. 微射流的温度介于常规ICP炬和大气压冷等离子体射流之间, 估计在1000 °C以上. 研究了射流长度随气流量和输入功率的变化, 发现随着气流量的增加射流将呈现从层流到湍流的转变, 长度先增后减, 而功率对于射流长度的影响存在着一个上限, 馈入等离子体的能量与等离子体扩散损失的能量达到平衡. 研究了ICP微等离子体射流在微尺寸铜金属快速成形技术中的初步应用, 得到了球冠状和柱状铜金属件. 在SEM下观察到沉积物表面颗粒尺寸远小于铜粉颗粒. XRD结果显示沉积物表面存在较弱的Cu₂₊₁O峰, 这是由于沉积过程中周围空气的卷入导致沉积物出现微弱氧化.

参考文献

- [1] Levy G N, Schindel R, Kruth J P 2003 *CIRP Ann. Manuf. Tech.* **52** 589
- [2] Biamino S, Penna A, Ackelid U, Sabbadini S, Tassa O, Fino P, Pavese M, Gennaro P, Badini C 2011 *Intermetallics* **19** 776
- [3] Martina F, Mehnen J, Williams S W, Colegrove P, Wang F 2012 *J. Mater. Process. Technol.* **212** 1377
- [4] Kikuchi T, Hasegawa Y, Shirai H 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1537
- [5] Benedikt J, Focke K, Yanguas-Gil A, von Keudell A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 251504

- [6] Shashurin A, Keidar M, Bronnikov S, Jurjus R A, Stepp M A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 181501
- [7] Ni T L, Ding F, Zhu X D, Wen X H, Zhou H Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241503
- [8] Mariotti D, Sankaran R M 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 323001
- [9] Iza F, Lee J K, Kong M G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 075004
- [10] Nam S K, Economou D J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2272
- [11] Mericam-Bourdet N, Laroussi M, Begum A, Karakas E 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 055207
- [12] Xiong Q, Lu X, Ostrikov K, Xiong Z, Xian Y, Zhou F, Zou C, Hu J, Gong W, Jiang Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 043505

Application of inductively coupled microplasma jet on rapid manufacturing*

Zhang Yi-Chuan Yang Kuan Li Huan Zhu Xiao-Dong[†]

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 20 March 2016; revised manuscript received 3 May 2016)

Abstract

Metal rapid manufacture has received great attention in recent decades. Energy source with high power density is requisite for the metal deposition. Atmospheric pressure inductively coupled microplasma jet is commonly characterized by high temperatures, which is one of excellent candidates for metal rapid manufacture on a micro scale.

In this paper, we investigate the microplasma jet driven by a 150 MHz very-high-frequency power supply at atmospheric pressure. A microplasma of 3 cm in length and about 3 mm in diameter can be produced at 90 W power applied, with gas temperatures above one thousand degree centigrade. The jet length rises first, and then decreases by increasing gas flow rate, showing a transition from laminar flow to turbulence. The jet length also increases by enhancing applied power, but then keeps a maximum value with further increasing power, which is attributed to the attainment of equilibrium between the energy absorption and losses in the transport process in plasma.

Copper powders are carried by the argon flowing into plasma, and melted fast by the microjet. An alumina ceramic plate is used as a substrate, which is set on the substrate holder with a precisely controlled X-Y-Z manipulator. A copper spherical cap with 2 mm in diameter and a column with 1 cm in height are fabricated in a few seconds, respectively, on the alumina ceramic substrate. The Cu spherical cap is characterized by scanning electron microscopy. Particles obtained on the sample surface are far smaller than the source powders, indicating a melting process of copper powders in plasma, as well as high gas temperature exceeding the melting point of copper. The weak peak of Cu₂+1O is present besides strong copper diffraction lines in X-ray diffraction pattern, suggesting that the weak oxidation happens during rapid fabrication.

Keywords: inductively coupled microplasma jet, micro-size, rapid manufacturing

PACS: 52.25.-b, 52.40.Hf, 52.50.Qt, 52.75.Hn

DOI: 10.7498/aps.65.145201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11375192).

[†] Corresponding author. E-mail: xdzhu@ustc.edu.cn