

四波长激光准六自由度激光增材制造异形永磁件

王涛^{1,3}, 朱惠芳^{1,3}, 张翠亭¹, 姚建铨^{2,3}, 马俊杰^{1,3}, 何晓阳^{1,3}, 吕雪亮¹, 牛世兴¹

¹河北工业大学机械学院, 天津 300130;

²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300130;

³南京津淞涵电力科技有限公司, 江苏 南京 211316

摘要 提出了四波长激光多管喷粉准六自由度数控运动的激光增材新结构方法,分析了整体系统结构的线性空间与李子群函数,建立了系统的线性空间数学模型。采用多管喷粉机构喷涂定量 Nd-Fe-B 稀土永磁体成分,并利用闭环反馈控制四个激光束的功率与角度,进行了选择性指向性激光辐照,实现了异形永磁件的激光增材成型,成型精度达 20 μm ,最小宽度低于 80 μm ,磁能积达 474 $\text{kJ}\cdot\text{m}^3$ 。

关键词 激光技术; 激光增材制造; 异形永磁件; 准六自由度成型; 钕铁硼永磁体材料; 四波长激光; 多管喷粉

中图分类号 TN248; TN29; TG498

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011414

Heterogeneous Permanent Magnetic Parts by Laser Additive Manufacturing with Four-Wavelength-Laser and Quasi-Six-Degree-of-Freedom

Wang Tao^{1,3}, Zhu Huifang^{1,3}, Zhang Cuiting¹, Yao Jianquan^{2,3},

Ma Junjie^{1,3}, He Xiaoyang^{1,3}, Lü Xueliang¹, Niu Shixing¹

¹ School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

² School of Precision Instrument and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300130, China;

³ Nanjing Jinsonghan Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211316, China

Abstract A new structural method of laser additive manufacturing (LAM) with four-wavelength laser, multi-tube dusting, and quasi-six-degree-of-freedom numerical control motion is proposed. The overall system architecture is analyzed in terms of linear space and Lie subgroup function. A linear and spatial mathematical model for this system is established. The components of Nd-Fe-B rare earth permanent magnets are sprayed quantitatively by using the multi-dusting mechanism. In addition, by the control of the powers and angles of four laser beams, the selective and directional laser irradiation is conducted, and the LAM of heterogeneous permanent magnetic parts is realized with forming accuracy of 20 μm , minimum width of less than 80 μm , and magnetic energy product of 474 $\text{kJ}\cdot\text{m}^3$.

Key words laser technique; laser additive manufacturing; heterogeneous permanent magnetic parts; quasi six degrees of freedom; Nd-Fe-B permanent magnet material; four wavelength laser; multi-tube dusting

OCIS codes 140.3298; 160.0160; 160.3380

1 引言

海浪发电所需的永磁体常采用钕铁硼永磁体的异形永磁件,并使用传统激光增材制造(LAM)方法^[1]制备,但该方法需要大型模具,且无法实现异形永磁件的结构和功能。随着海浪发电产品的发展,

迫切需要在无大型模具条件下,通过 LAM 工艺高精度、高速度地制造高密度钕铁硼永磁体异形件材料。其核心技术是钕铁硼永磁体材料的 LAM,实现钕铁硼永磁体制备的多样化与柔性化,并大幅度降低生产成本。

LAM 技术是一种以激光为能量源的增材制造

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-08-17

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划一般项目(14JCYBJC19600)

作者简介: 王涛(1963—),男,博士,教授,主要从事激光应用技术方面的研究。E-mail: wtiao_1@163.com

技术,激光具有能量密度高的特点,可实现难加工金属的制造^[2]。LAM技术按照其成型原理可分为以粉床铺粉为技术特征的激光选区熔化(SLM)技术和以同步送粉为技术特征的激光金属直接成型(LMDF)技术。激光增材制造钕铁硼永磁体材料属于LMDF技术。LMDF技术是在快速成型技术的基础上结合同步送粉和激光熔覆技术发展起来的一项LAM技术。LMDF技术起源于美国Sandai国家实验室的激光近净成型(LENS)技术^[3],该实验室针对镍基高温合金、不锈钢、钛合金等金属材料进行了大量的LMDF研究^[4]。随后Kurz等^[5]深入研究了激光快速成型工艺参数对成型过程的稳定性、成型零件的精度控制、材料的显微组织以及性能的影响。钟敏霖等^[6]在激光快速成型同轴送粉系统的研制、熔覆高度检测及控制方面取得了不错的进展。黄卫东等^[7]通过对单层涂覆的厚度、宽度、搭接率等主要参数进行精确控制,制造出了表面质量良好的成型件。张安峰等^[8]研究了激光金属直接成型合金零件过程中不同工艺参数的影响,实现了工艺的优化。

目前,激光熔覆与增材的方法有:激光沉积法和激光熔覆增材成型法。其中,激光沉积方法是传统方法之一,它又分为激光化学气相沉积(LCVD)法与激光诱导液相反应沉积法。LCVD法是利用激光束加热诱导化学反应,沉积出所需要形状^[9]。激光诱导液相反应沉积是由激光束直接辐照浸在液态化学介质中的基板,产生选择性指向性反应沉积,即直接诱导化学镀^[10],包括激光预置晶种的复合化学镀法、激光直接照射选区的复合化学镀法,进而层层成型。但激光沉积方法只能实现形状相对简单的材料的制备,对于复杂的异形永磁件的制备则难以实现。激光熔覆增材成型^[11]也是传统方法之一,它与LCVD法和激光诱导液相沉积法主要依赖于原子沉积过程不同,激光熔覆增材成型是将基材材料的固体粒子与粘结性树脂混合,并预置在基板上,激光加热后固态粒子沉积在基板上,可实现较快速度的沉积。这两种传统方法都基于激光头的X-Y轴二维移动与Z轴升降,激光头本体没有自由度,也就是激光束垂直不变,同时都配置单波长激光,其存在的问题是难以实现异形永磁件的成型以及多种元素的融合。

为了实现复杂三维形状的成型,采用四波长激光多管喷粉准六自由度数控运动的激光增材新结构^[12]。采用四波长激光扫描系统,针对Nd-Fe-B稀

土永磁体的Fe、Nd、B各个化学元素,调节其激光波长、脉宽与角度,实现Nd-Fe-B稀土永磁体的激光增材集成,其中Nd-Fe-B稀土永磁体中Fe、Nd、B的质量分数分别为63%、36%、1%;利用多管喷粉机将Nd-Fe-B稀土永磁体的Fe、Nd、B各个化学元素按比例喷出,集成增材,利用五自由度数控平台实现复杂异形的空间运动,配合四波长激光多管喷粉集成激光增材制备异形永磁件,该方法避免了激光对材料的过度损伤。同时,本文研究了LAM钕铁硼永磁体材料的工艺过程,实现了最小线宽和最大磁能积。

2 整体结构研制

2.1 总体结构

四波长激光多管喷粉准六自由度数控运动的激光增材新结构如图1所示,包括三个结构:四波长光纤激光扫描结构、多管喷粉的喷粉针管转换机构与两转动三移动的五自由度数控工作台结构,这三个结构构成了四波长光纤激光聚焦在异型永磁体制品上的激光增材空间结构。

2.2 四波长光纤激光扫描结构

四波长光纤激光扫描结构由四波长光纤激光器与4个光纤激光扫描器构成,其中四波长光纤激光器由465 nm光纤激光器I、532 nm光纤激光器II、1064 nm光纤激光器III与1500 nm光纤激光器IV组成^[13],四波长光纤激光器的4个波长输出端对应安装4个光纤激光扫描器,并在激光扫描器支座上安装红外探测器。

2.3 两转动三移动的五自由度数控工作台

五自由度工作台的两转动三移动是指绕X轴的旋转,绕Z轴的旋转以及X轴、Y轴、Z轴三个方向的水平移动。五自由度工作台可以实现空间任意位置的运动,在复杂异形永磁件的LAM中可以得到较好的应用。

2.4 多管喷粉的喷粉针管转换机构

多管喷粉的喷粉针管转换机构主要由换管机构与储存针管机构组成,设计有工作位与储存位,驱动电机驱动可存储多种粉料的喷粉针管,实现联动控制换粉与喷粉。

3 整机空间机构的自由度分析

四波长激光多管喷粉准六自由度数控运动的激光增材新结构,属于准线性空间闭环运动链,总体空间机构图如图2所示。通过中心控制器启动智能标

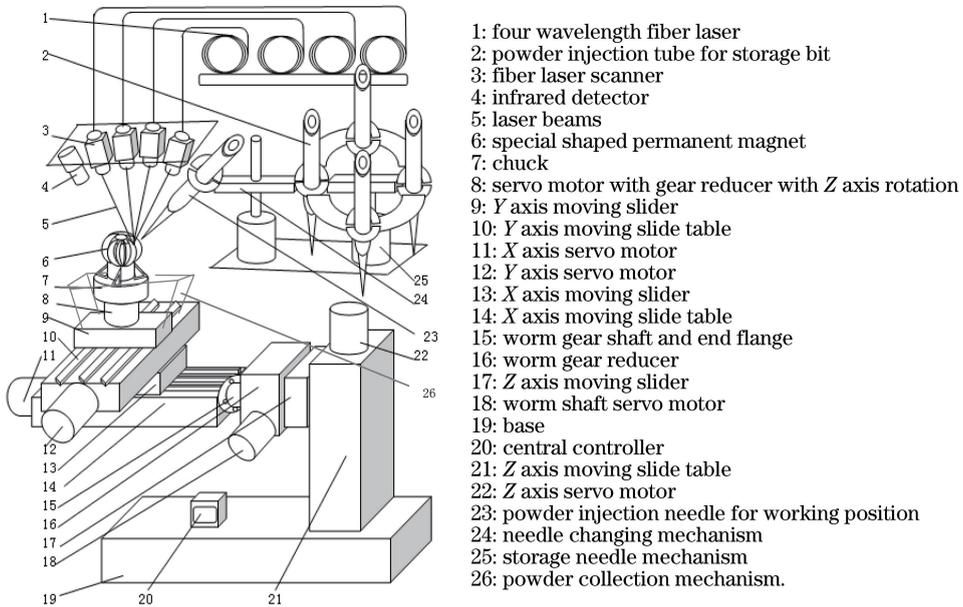


图 1 总体结构图

Fig. 1 Overall structural diagram

刻软件卡控制激光与扫描,联动五轴数控软件控制工件姿态,实现六自由度空间运动成型,并联动控制喷粉部分与气体保护、辅助部分,实现复杂的异形磁铁的LAM。

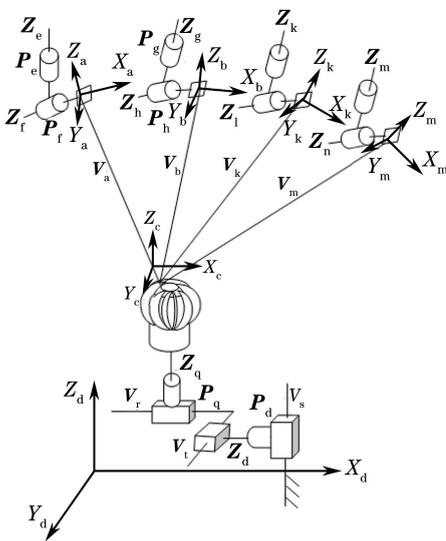


图 2 总体空间机构图

Fig. 2 Overall spatial mechanical diagram

单个波长的光纤激光扫描结构由两个转动副与一个移动副构成,系统并联安装了4个光纤激光扫描结构。光纤激光扫描结构的两个振镜为两个空间垂直的转动副,在线性空间中分别表示为 (P_e, Z_e) 与 (P_f, Z_f) 、 (P_g, Z_g) 与 (P_h, Z_h) 、 (P_k, Z_k) 与 (P_l, Z_l) 、 (P_m, Z_m) 与 (P_n, Z_n) ,其中 $P_e, P_f, P_g, P_h, P_k, P_l, P_m, P_n$ 为转动副向量, $Z_e, Z_f, Z_g, Z_h, Z_k, Z_l, Z_m, Z_n$ 为各自转动副向量的转动中心向量。激光束看作直线移动副,具有自适应功能,可以聚焦在加工点上,称为准直线移动副,在线性空间中分别表示为 (V_a, A) 、 (V_b, B) 、 (V_k, K) 、 (V_m, M) ,其中 V_a, V_b, V_k, V_m 为激光束的移动副向量, A, B, K, M 分别为4个不同激光束的空间方位向量。当加工件有陡壁凹坑时,需要工件的自身运动补偿,该系统可通过五自由度移动台的Z轴的插补对其进行补偿,即利用激光束准直线移动副的焦深段,设定激光束与Z轴的夹角变量为补偿因子,Z轴按补偿因子进行插补计算,可弥补激光束准直线移动副的不足。

五自由度工作台线性空间由三个直线移动副与两个转动副构成,Z轴移动滑台是一个直线移动副 (V_s, S) ,蜗轮蜗杆垂直安装在Z轴移动副上,是一个转动副 (P_d, Z_d) ,蜗轮轴端法兰盘安装在X轴移动滑台,是一个直线移动副 (V_t, T) ,Y轴移动滑台垂直安装在X轴移动滑台上,是一个直线移动副 (V_r, R) ,Y轴移动滑块上安装在Z轴转动伺服电机上,是一个转动副 (P_q, Z_q) 。其中 V_s, V_t, V_r 为三个水平方向的移动副向量, P_d, P_q 为两个旋转方向的转动副向量, Z_d, Z_q 为两个旋转轴的转动中心向量, T, R, S 分别为X、Y、Z三个水平轴的直线向量。

首先建立四波长光纤激光扫描结构的线性空间,可表示为式中 ξ_j 是线性空间总旋量^[14],亦称总自由度,下标 j 是指四波长光纤激光扫描结构的自由度。 \cap 是非机械并联的连接符,表示各个波长光纤激光扫描结构之间是控制连接的并联。

$$\xi_J = \text{span} \left\{ \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{P}_e \times \mathbf{Z}_e \\ \mathbf{Z}_e \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{P}_f \times \mathbf{Z}_f \\ \mathbf{Z}_f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} \right\rangle \cap \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{P}_g \times \mathbf{Z}_g \\ \mathbf{Z}_g \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{P}_h \times \mathbf{Z}_h \\ \mathbf{Z}_h \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_b \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \right\rangle \cap \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{P}_k \times \mathbf{Z}_k \\ \mathbf{Z}_k \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{P}_l \times \mathbf{Z}_l \\ \mathbf{Z}_l \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k \\ \mathbf{K} \end{bmatrix} \right\rangle \cap \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{P}_m \times \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_m \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{P}_n \times \mathbf{Z}_n \\ \mathbf{Z}_n \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_m \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} \right\rangle \right\}, \quad (1)$$

对 ξ_J 线性空间的运动链进行方程参数化, 得到 奇次矩阵:

$$U|\xi_J| = \left| \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_e \theta_a) & \mathbf{P}_e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cap \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_g \theta_b) & \mathbf{P}_g \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cap \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_k \theta_k) & \mathbf{P}_k \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cap \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_m \theta_m) & \mathbf{P}_m \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right|, \quad (2)$$

式中 $U|\xi_J|$ 是关于 ξ_J 的李群函数^[15] 数量值, 这个数量值为自由度数值的映射值, 即为自由度值; \mathbf{u}_e 、 \mathbf{u}_g 、 \mathbf{u}_k 、 \mathbf{u}_m 分别为各自线性空间的李子群运动的自由向量; θ_a 、 θ_g 、 θ_k 、 θ_m 分别为各自线性空间的李子群

运动的关节变量。

其次建立两转动三移动的五自由度数控工作台的线性空间, 可表示为

$$\xi_w = \text{span} \left\{ \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{P}_q \times \mathbf{Z}_q \\ \mathbf{Z}_q \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_t \\ \mathbf{T} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_r \\ \mathbf{R} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{P}_d \times \mathbf{Z}_d \\ \mathbf{Z}_d \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_s \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} \right\rangle \right\}, \quad (3)$$

式中 ξ_w 是线性空间总旋量, 亦称总自由度, 下标 w 为两转动三移动的五自由度数控工作台结构的自由度。“,”是机械并联的连接符, 表示各个结构之间是机械连接的串联。

利用机械串联连接的特点, 对 ξ_w 线性空间的运动链进行方程参数化, 得到奇次矩阵:

$$U|\xi_w| = \left| \left| \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_q \theta_q) & \mathbf{P}_q \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_t \theta_t) & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_r \theta_r) & \mathbf{R} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_d \theta_d) & \mathbf{P}_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \exp(\mathbf{u}_s \theta_s) & \mathbf{S} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right| \right|, \quad (4)$$

式中 $U|\xi_w|$ 是关于 ξ_w 的李群函数数量值, 这个数量值为自由度数值的映射值, 即为自由度值; \mathbf{u}_q 、 \mathbf{u}_t 、 \mathbf{u}_r 、 \mathbf{u}_d 、 \mathbf{u}_s 分别为各自线性空间的李子群运动的自由向量; θ_q 、 θ_t 、 θ_r 、 θ_d 、 θ_s 分别为各自线性空间的李子群运动的关节变量。

经奇次矩阵^[16] 联立(2)式和(4)式, 并代入参数数值, 计算得

$$U|\xi_{Jw}| = U|\xi_J| + |\xi_w|. \quad (5)$$

对(5)式进行数值化运算后, 得线性空间的李子群运动的自由向量的数值分量, 即系统结构的自由度数值为

$$U|\xi_{Jw}| = 5 + (2 + 1^a) \cap (2 + 1^a) \cap (2 + 1^a) \cap (2 + 1^a), \quad (6)$$

式中数值 5 为两转动三移动的五自由度数控工作台的自由度数值, 2 为扫描振镜的 X-Y 二维转动的自由度, 1^a 为激光束的准一维移动自由度。数控工作台的 X-Y 二维移动的自由度与扫描振镜的 X-Y 二维转动的自由度均属于机械并联结构, 机械并联结构的线性空间的自由度的数值合一; 数控工作台的 Z 轴一维升降移动的自由度与激光束的准一维移动自由度 1^a 属于准并联结构, 其并联结构的线性空间的自由度的数值合一, 即为 1^a 。因此, 整体系统结构为机械二维并联结构与激光束准一维并联结构结合的准六自由度空间结构, 该准六自由度并联空间结构可以完成异性永磁件的 LAM。

4 激光增材工艺过程与分析

采用闭环控制四波长激光系统的输出, 实现 465 nm 光纤激光器 I、532 nm 光纤激光器 II、1064 nm 光纤激光器 III 与 1500 nm 光纤激光器 IV 4 个激光器的切换式振荡。其中电气部分包括激光与扫描控制部分、喷粉控制部分、五轴工作台控制部分, 气体保护与辅助部分控制, 中心控制器部分。激光与扫描控制部分采用北京金橙子公司智能标刻软件卡, 五轴工作台控制部分采用通用五轴数控软件。关于检测原理过程算法, 系统中传感器只设置了熔化点的温度监测, 并将此温度信号经模数(A/D)转换后接入智能标刻软件卡上, 智能控制激光输出。

由于激光增材无切削力,故五轴工作台选用微米级超精密直线滑台与转台组合,技术参数:系统总功率为 6 kW;三轴超精密直线滑台行程为 100 cm×100 cm×150 cm,分辨率为 50 nm,重复性精度为 2 μm;精密转台行程为 360°,分辨率为 0.0001°,精度为 0.003°,跳动距离为 4 μm,中孔直径为 175 mm,重复性精度为 0.5 μm;选用进口系列高速扫描振镜,其入光孔径为 14 mm,动态特性跟踪误差为 0.30 mm,阶跃响应时间为 0.65~1.6 ms,定位速度为 7000 mm·s⁻¹,最大速度为 7000 mm·s⁻¹,定位精度为 6 μm,重复定位精度为 12 μm,最佳分辨率为 1 μm。三轴超精密直线滑台与扫描振镜的配合,使系统运动与工件的增材成型达到更高精度。

利用多管喷粉机构喷涂定量的激光增材成分, Nd-Fe-B 稀土永磁体属于三元稀土属间化合物^[17],它的稀土相组织为主相 Nd₂Fe₁₄B 和少量富 Nd 相、少量富 B 相。在异性永磁件 Fe 基材料上,由多管喷粉机构的喷粉针管喷涂定量的主相 Nd₂Fe₁₄B,再由换管机构换喷粉针管,喷涂定量的富 Nd 相,再换管喷涂定量定的富 B 相。其中粉末粒径尺寸为 43~100 μm。在氮气的条件下进行喷涂以抑制粉末氧化,采用局部加压的方法抑制汽化。

利用四波长激光束选择辐照,在喷涂过程中适时发射适当波长的激光束,进行激光增材固化。在激光增材过程中,将 Nd、Fe、B 钕铁硼材料粉料与粘结性树脂混合后喷涂在 Fe 基钕铁硼永磁体原始坯料上,利用四波长激光束选择辐照,使钕铁硼材料按比例还原。固态粘结性树脂受到激光作用后,不会燃烧或汽化,若控制不好会有气孔产生,可以通过在氮气环境下操作并加压解决。

由五自由度数控运动配合激光束扫描,实现准六自由度并联空间结构运转,实现异形永磁件的空间成型和钕铁硼异性永磁件的 LAM。系统还进一步对激光增材工艺过程进行了优化,以达到更好的永磁铁激光增材效果。LAM 所得的异形永磁件的化学成分 Fe、Nd、B 的质量分数分别为 63%、36%、1%,该永磁铁的熔点为 1170 °C,密度为 7.4 g·cm⁻³,硬度为 600,最大磁能积为 199~389 kJ·m³。

通过四波长激光束选择辐照控制参数,防止激光损伤激光增材的表面组织。具体制备工艺、控制环节如下。预热机体到 1000~2000 °C,增材室预抽真空后充氮气,压强保持在 0.2~0.4 MPa,预制各种填料粉末加入喷粉管,预制的基底件置入夹具上,

预置激光功率为 1000 W,实际激光功率为 700~1100 W,光斑直径为 0.1~2.0 mm,送粉速率为 5~90 g·min⁻¹,同步送粉,同时氩气保护,氩气流量为 100~350 L·min⁻¹,LAM 工艺温度高于熔点(1170 °C)的 5%~15%,异性永磁体的激光增材速度达 2.5 mm·s⁻¹,成型宽度的精度达 20 μm,最小宽度低于 80 μm。通过控制梯度选择激光波长与功率参数,实施钕铁硼材料粉料合理分解,速度小于等于 5 mm·s⁻¹,温度保持在 850 °C,保温约 10 min,获得了线宽为 3~20 mm、线间距为 6~50 mm 的永磁体磁条,居里温度为 310 K,使用温度为 100 °C,最大成型速度为 100 mm·s⁻¹,形成了光亮异形永磁体,永磁体增材层厚度精度可达 30 μm,磁能积为 474 kJ·m³,剩磁强度为 1.36 T,矫顽力为 1029.6 A·m⁻¹。采用自动送粉 LAM 成型,成型气氛为氮气,每层厚度为 37~108 μm,这使得永磁体各项性能指标均得到提高^[11],LAM 技术可以在无大型模具条件下柔性制备线宽很窄的钕铁硼永磁体,且对环境损害极小^[18]。

利用异形永磁件的四激光多管喷粉准六自由度的激光增材新结构成型的实物图如图 3 和图 4 所示,其中 LAM 的永磁体表面经过了一般的抛光处理。图 4 中黑色部分为激光增材磁芯,亮色部分为非导磁芯棒,最小线间距为 20 μm,最小线宽为 80 μm。与传统工艺所制备的永磁体相比,该方法制备的永磁体与基板结合力强,磁性更优^[13],但最小线条宽度更窄。

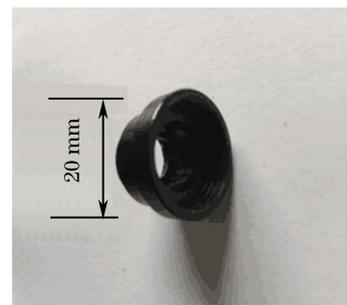


图 3 LAM 的钕铁硼永磁体磁环
Fig. 3 Magnetic ring of Nd-Fe-B permanent magnet of LAM

5 结 论

采用四波长激光多管喷粉六自由度数控运动的激光增材新结构,实现了整体结构为机械两轴并联结构与激光束准一维并联结构结合的准六自由度空间结构。利用该准六自由度并联空间结构可以很好地

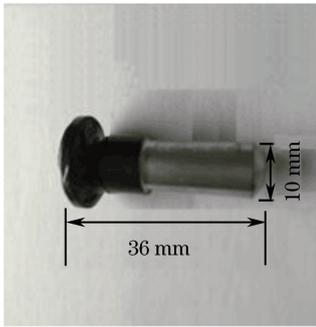


图4 LAM的磁芯

Fig. 4 Magnetic core of LAM

完成异性永磁件的空间成型,制件的永磁体成型精度可达 $20\ \mu\text{m}$,最小宽度低于 $80\ \mu\text{m}$,成型速度为 $100\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,磁能积为 $474\ \text{kJ}\cdot\text{m}^3$,剩磁强度为 $1.36\ \text{T}$,矫顽力为 $1029.6\ \text{A}\cdot\text{m}^{-1}$,永磁体性能指标均有所提高,具有磁能积高、组织致密、线宽窄等优点。利用该激光增材新结构,无需特殊模具,即可制备对称与非对称的线式、螺旋式、片式等各种钕铁硼异形永磁体,实现大规模钕铁硼异形永磁体材料的LAM。

参 考 文 献

- [1] Huang Q S, Li L Q, Gao B B. Development of metalworking material for foreign metal parts [J]. *Defense Manufacturing Technology*, 2012(5): 28-31. 黄秋实, 李良琦, 高彬彬. 国外金属零部件增材制造技术发展概述[J]. *国防制造技术*, 2012(5): 28-31.
- [2] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2015, 45(9): 1111-1126. 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [3] Griffith M L, Keicher D M, Atwood C L, *et al.* Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS) [C]. *Austin: Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1996.
- [4] Griffith M L, Schliengera M E, Harwella L D, *et al.* Understanding thermal behavior in the LENS process [J]. *Materials & Design*, 1999, 20(2/3): 107-113.
- [5] Gaumann M, Henry S, Cleton F, *et al.* Epitaxial laser metal forming: Analysis of microstructure formation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 271(1/2): 232-241.
- [6] Ning G Q, Zhong M L, Yang L, *et al.* Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components [J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 172-176. 宁国庆, 钟敏霖, 杨林, 等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究 [J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 172-176.
- [7] Huang W D, Li Y M, Feng L P, *et al.* Laser solid forming of metal powder materials [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002, 3(10): 40-43. 黄卫东, 李延民, 冯莉萍, 等. 金属材料激光立体成形技术 [J]. *材料工程*, 2002, 3(10): 40-43.
- [8] Ge J B, Zhang A F, Li D C, *et al.* Process research on DZ125L super alloy parts by laser metal direct forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0703004. 葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0703004.
- [9] Zhang A F, Li D C, Liang S D, *et al.* Research progress of high-performance metal parts laser gain manufacturing technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(22): 16-22. 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2016(22): 16-22.
- [10] Choi S, Bieler T R, Lucas J P, *et al.* Characterization of the growth of intermetallic interfacial layers of Sn-Ag and Sn-Pb eutectic solders and their composite solders on Cu substrate during isothermal long-term aging [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, 28(11): 1209-1215.
- [11] Kestenbaum A, Serafino A J. Electrical conductor deposition method: US5064685A [P]. 1991-11-12.
- [12] Amey D I, Horowitz S J. Materials performance at frequencies up to 20 GHz [C]. *Tokyo: International Electronic Manufacturing Symposium and the International Microelectronics Conference*, 1998: 331-336.
- [13] Wang T, Li Y X, Yao J Q, *et al.* The double-ended 750 nm and 532 nm laser output from PPLN-FWM [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(6): 064203.
- [14] Deng Z Q. Design of interdisciplinary institutions [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013. 邓宗全. 间折展机构设计 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
- [15] Lu F X, Rao X L, Li G. Application and development of bonded NdFeB permanent magnets [J]. *Rare Earth Information*, 2013, 346(1): 19-21. 卢冯昕, 饶晓雷, 李纲. 粘结钕铁硼永磁体的应用和发展 [J]. *稀土信息*, 2013, 346(1): 19-21.
- [16] Qin L L, Chen C J, Zhang M, *et al.* Effect of Zr on

microstructure and properties of magnesium alloy prepared by laser [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(4): 391-396.

秦兰兰, 陈长军, 张敏, 等. Zr 对激光增材制备镁合金组织及性能的影响 [J]. *应用激光*, 2016, 36(4): 391-396.

- [17] Li J Q. Preparation and properties of high temperature sintered NdFeB magnet [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012: 121-124.

李建奇. 高温烧结钕铁硼磁体的制备及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 121-124.

- [18] Wang X, Wang D S, Gao X S, *et al.* Research status and development in laser additive manufacturing of light alloy components [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(4): 478-483.

王霄, 王东生, 高雪松, 等. 轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展 [J]. *应用激光*, 2016, 36(4): 478-483.