

# 激光增材制造技术常用金属材料激光吸收率测量<sup>\*</sup>

严深平,张安峰,梁少端,王 潭

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

**[摘要]** 应用反射率测量装置对几种激光金属增材制造技术常用金属粉末和金属板材的激光吸收率进行间接测量。对比不同粒度、球形度金属粉末激光吸收率的大小;测量金属粉末和金属板材分别对 1064nm 红外激光和 532nm 绿光激光的吸收率大小。测量结果表明,粉末的球形度越好、粒径越大,粉末对激光吸收率越高;金属粉末和金属板材对 1064nm 激光的吸收率小于 532nm 激光的吸收率。测量结果可为这些金属材料的激光增材制造提供试验数据基础。  
**关键词:** 激光吸收率;增材制造;金属材料;测量

## Measurement of Laser Light Absorptivity of Commonly Used Metals in Laser Additive Manufacturing Technique

YAN Shenping, ZHANG Anfeng, LIANG Shaoduan, WANG Tan

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[ABSTRACT]** Indirect measurement is conducted with a reflectivity measurement device to determine the laser light absorptivity of the commonly used metal powders and metals bulks in laser additive manufacturing technique. The effects of the size and the shape of metal powders on the laser light absorptivity are investigated, and the laser light absorptivity of metal powders and metal bulks to 1064nm laser light and 532nm laser light is measured respectively. The measurement results show that powders with better sphericity and bigger particle sizes exhibit higher laser light absorptivity, and the laser light absorptivity of metal powders and metal bulks to the 532nm laser light is greater than to the 1064nm laser light. The measurement results can provide basic experimental data for the laser additive manufacturing of these metals.

**Keywords:** Laser light absorptivity; Additive manufacturing; Metal material; Measurement

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.17.097

激光由于其方向性、相干性好和功率高的特点,自 20 世纪 90 年代以来被广泛应用于金属切割、焊接、打孔和增材制造等加工工艺中。金属对激光的吸收率决定金属材料在加工时对激光能量的利用率,直接影响激光成形的难易程度,对激光加工的工艺参数和工艺路线的选择有参考意义。金属对激光的吸收率除了与金属材料材料性质有关外,还取决于金属材料的温度、表面状况、表面的氧化程度、激光的偏振角、入射角和激光的波长<sup>[1-5]</sup>,而金属粉末对激光的吸收率还与粉末的形状、大小及粉末的松装比有关。对于激光而言,激光波长为 532nm 的绿光激光器的技术尚未成熟,现在工业领域使用较多的是波长为 1064nm 的红外激光。

金属的激光增材制造(Laser Additive Manufacturing, LAM)技术以激光为热源,通过激光的逐层烧结或熔

化金属来制造金属零件整体,主要包括选区激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术<sup>[6-7]</sup>、选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术<sup>[8-9]</sup>和激光近净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)技术<sup>[10]</sup>。LAM 自 20 世纪 80 年代初步发展以来,现已被应用于航空航天、生物和汽车制造等领域,具有广泛的应用前景。不锈钢、高温合金、钛合金是已知的较容易激光成形的金属材料,而导电能力较好的材料包括金、银、铜和铝,以及钨、钼等熔点较高的材料,随着激光器技术的发展也越来越多地应用于金属增材制造技术中<sup>[10-17]</sup>。

本文利用反射率测量装置对金属粉末和金属板材对 1064nm、532nm 激光的吸收率进行测量,对比金属粉末颗粒大小和形状对粉末激光吸收率的影响,测量这些常用激光金属直接成形材料的激光吸收率,对激光直接成形制造工艺研究有重要意义。

\* 基金项目:国家自然科学基金(51275392)。

## 1 测量

### 1.1 测量装置

对某种金属材料而言,其对激光的吸收率  $A$  可表示为:

$$A=1-T-R \quad (1)$$

式中,  $T$  为金属对激光的透射率,  $R$  为金属对激光的反射率。

对大多数金属而言,其透射率  $T=0$  ( $A=1-R$ ),因此,测得金属对激光的反射率,即可得出金属对激光的吸收率。

测量采用荷兰 Avantes 公司生产的反射率测量装置。如图 1 所示,装置由 1 台波长分析范围为 200~1100nm 的 AvaSpec-ULS2048(L) 光纤光谱仪,1 台型号为 AvaLight-HAL-S-BAL 能发射 200~2500nm 波长光谱的均衡型氙-卤钨灯光源,1 台电脑和 1 个 AvaSphere-30-REFL 型号反射型积分球及其配套光纤组成。反射率测量如式(2)所示,对于探测光纤的某个像素点  $n$  而言,测量时先使用漫反射参考白板作为参考,测得参考在该像素点测得的反射光强  $ref_n$ ,再通过测得样品 Sample 光照时在该像素点的反射光强  $sample_n$  和无光照时的反射光强  $dark_n$ ,通过公式(2)即可得到样品在该像素点  $n$  的反射率  $R_n$ 。通过装置自身配备的软件对探测光纤的每个像素点进行积分,并对测量次数取平均值,可得到样品随光谱波长变化的反射率值曲线。

$$R_n = 100 \times \left( \frac{sample_n - dark_n}{ref_n - dark_n} \right) \quad (2)$$

### 1.2 测量方法

测量时,将器皿盛放的金属粉末或者是金属板材放在 AvaSphere-30-REFL 型号反射型积分球底部的样品口下,金属粉末或金属块与积分球下表面直接接触。测量原理如图 2 所示,光通过照射口进入积分球,在样品

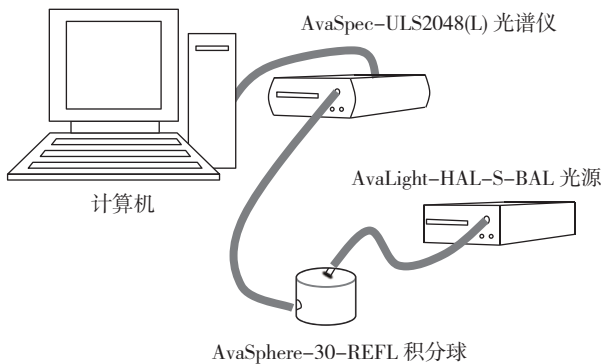


图1 反射率测量装置

Fig.1 Schematic diagram of the laser light reflectivity measurement device

表面首先发生第一次反射,反射光在积分球内表面经过多次均匀漫反射后非常均匀地散射在积分球内部。探测光纤通过接头与积分球侧面的接口相连,该接口内部有一个挡光板,光纤只能测量到挡光板上的光,这样就不受从照射口进入光的角度影响,从而避免了第一次反射光直接进入光纤。对每个像素点的反射光强进行积分,并对测量次数取平均值,即可得到样品随光谱波长变化的反射率值曲线。

### 1.3 测量材料

试验测量了 Fe314、Fe901、DZ125、GH4169、H73、Cu、Al、W 以及 Ti6Al4V 粉末, Fe314、DZ125、GH4169、H73、Al、Cu、W 以及 Ti6Al4V 金属板对激光的吸收率。

Fe314、Fe901、DZ125、GH4169、H73、Al、Ti6Al4V 粉末均为球形粉末,通过气雾法制备, W 粉末为近球形粉末,通过机械球磨法制备。此外,对不同粒度大小的 GH4169 粉末,不同球形度的 Cu 粉的激光吸收率进行了测量。表 1 列出了各种粉末材料的纯度和粒度大小值。表 2 为各金属板材的材料纯度大小值,金属板材都经过 240# 砂纸打磨并用无水酒精清洗表面的污渍,处理过后表面具备一定的粗糙度。对于形状不同的铜粉,图 3(a)、3(b)分别为球形铜粉、近球形铜粉的扫描电子显微镜照片,其中,近球形铜粉的粉末球形度较差。

## 2 结果与讨论

表 3、4 分别为各粉末、金属板材对 1064nm、532nm 激光吸收率的测量值。可以看出,无论是粉末材料还是金属板材,对 532nm 激光的吸收率均大于 1064nm 激光的吸收率。球形铜粉的粉末对 1064nm 和 532nm 激光的吸收率比近球形铜粉的分别高 12% 和 4%,说明金属

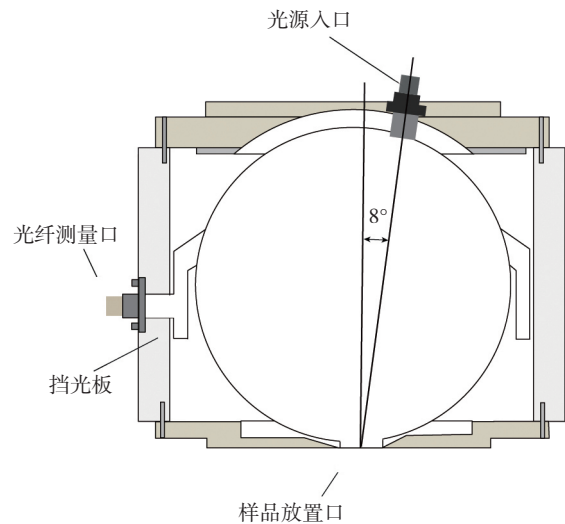


图2 积分球原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of integrating sphere

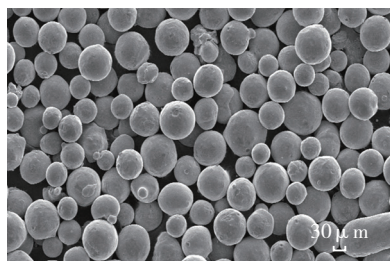
粉末的球形度较好时,粉末对激光的吸收率更高。这可能是由于当粉末的球形度较好时,粉末颗粒排列比较规则、颗粒之间的空隙较多,激光照射在粉末上发生重复反射的几率较大,次数较多,因此吸收率也较大。铜、铝对 1064nm 激光的吸收率比较低,这是由材料性质决定

表1 粉末的纯度和粒度值

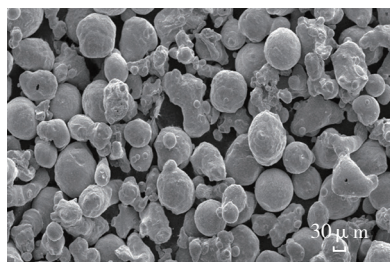
粉末	纯度 /%	粒度 / $\mu\text{m}$
Fe314	$\geq 99$	$\leq 100$
Fe901	$\geq 99$	$\leq 100$
DZ125	$\geq 99$	$\leq 100$
GH4169	$\geq 99$	$\leq 100$
H73	$\geq 99$	$\leq 100$
Cu	$\geq 99$	$\leq 100$
Al	$\geq 99$	$\leq 100$
W	$\geq 99$	$\leq 100$
Ti6Al4V	$\geq 99$	$\leq 100$

表2 金属块材料的纯度值

金属板	纯度 /%
Fe314	$\geq 99$
DZ125	$\geq 99$
GH4169	$\geq 99$
H73	$\geq 99$
Cu	$\geq 99$
Al	$\geq 99$
W	$\geq 99$
Ti6Al4V	$\geq 99$



(a) 球形铜粉



(b) 近球形铜粉

图3 不同球形度铜粉形状

Fig.3 Copper powders of different sphericity

的。材料的导电性能越好,其表面的自由电子数越多,对激光的反射率也就越高,因为只有激光频率比较接近自由电子的固有频率时激光才能很好地被吸收,而红外激光和  $\text{CO}_2$  激光的激光频率与自由电子的固有频率相差较远,所以导电性能较好的材料对激光的吸收率也较差。

图4所示为 0~25  $\mu\text{m}$ 、51~61  $\mu\text{m}$  和 88~100  $\mu\text{m}$  的 GH4169 粉末对 1064nm 激光的吸收率。可以看出,粉末的粒度越大,其对激光的吸收率也越大。这是由于粉

表3 不同粉末对激光的吸收率测量值 %

粉末	1064nm 激光吸收率	532nm 激光吸收率
Fe314	67	76
Fe901	66	78
DZ125	69	83
GH4169	68	76
H73	48	71
球形 Cu 粉	44	87
近球形 Cu 粉	32	83
Al	61	73
W	79	86
Ti6Al4V	71	78

表4 不同金属板材对激光的吸收率测量值 %

金属板	1064nm 激光吸收率	532nm 激光吸收率
Fe314	42	53
DZ125	40	59
GH4169	39	48
H73	9	32
Cu	4	48
Al	20	35
W	47	59
Ti6Al4V	45	54

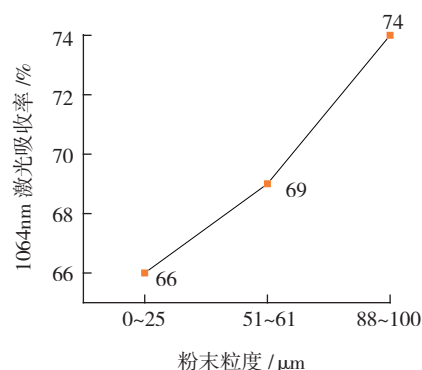


图4 GH4169粉末粒度对1064nm激光吸收率的影响

Fig.4 Influence of GH4169 powders diameter on 1064nm laser light absorptivity

末的粒度越大,粉末之间的空隙也越多,激光就越有可能穿过表层粉末颗粒进入至里层,从而激光发生多次反射的次数也越多,因此对激光的吸收率也越高。

### 3 结论

(1) 金属粉末粒度在 0~100 μm 时,粉末粒度越大,球形度越好,激光在粉末表面发生多次反射的可行性就比较大,粉末对激光的吸收率也越好。

(2) 金属粉末和金属板材对 532nm 绿光激光的吸收率高于对 1064nm 红外激光的吸收率,尤其对铜、铝等高导电率材料而言,差异尤为明显。绿光激光器的技术发展成熟后,应用较高功率 532nm 绿光激光增材制造铜、铝或这些材料的合金的难度将大大减小。

### 参考文献

[1] UJIHARA K. Reflectivity of metals at high temperatures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(5): 2376–2383.

[2] BERGSTRÖM D, POWELL J, KAPLAN A F H. A ray-tracing analysis of the absorption of light by smooth and rough metal surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(11): 202–212.

[3] BERGSTRÖM D, POWELL J, KAPLAN A F H. The absorption of light by rough metal surfaces—A three-dimensional ray-tracing analysis[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(10): 323–334.

[4] URSU I, APOSTOL I, CRACIUN D, et al. On the influence of surface condition on air plasma formation near metals irradiated by microsecond TEA CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1984, 17(4): 709–720.

[5] BERGSTRÖM D, KAPLAN A. Mathematical modelling of laser absorption mechanisms in metals: a review[C]// *Proceedings of the 16th meeting on mathematical modelling of materials processing with lasers*. Sweden: Luleå University of Technology, 2003.

[6] AGARWALA M. Direct selective laser sintering of metals[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 1(1): 26–36.

[7] WANG X, LAOUI T, FROYEN L, et al. Lasers and materials in selective laser sintering[J]. *Assembly Automation*, 2003, 23(4): 357–371.

[8] PHAM D T, GAULT R S. A comparison of rapid prototyping technologies[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1998, 38(10–11): 1257–1287.

[9] 杨永强,王迪,吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 54–64.

YANG Yongqiang, WANG Di, WU Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 54–64.

[10] BADROSSAMAY M, CHILDS T H C. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(5): 779–784.

[11] 闫世兴,董世运,徐滨士,等. Fe314 合金粉末激光快速成形组织与力学性能分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 3074–3078.

YAN Shixing, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Analysis of mechanical properties and microstructures of laser rapid forming components with Fe314 alloy powders[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 3074–3078.

[12] WU X H, LIANG J, MEI J. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V[J]. *Materials & Design*, 2004, 25(2): 137–144.

[13] KHAN M. Selective laser melting (SLM) of gold (Au)[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 18(1): 81–94.

[14] POGSON S R. The production of copper parts using DMLR[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2003, 9(5): 334–343.

[15] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUM H, HEIDRICH S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 271–278.

[16] ZHOU X, LIU X, ZHANG D, et al. Balling phenomena in selective laser melted tungsten[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 222: 33–42.

[17] SING S L, YEONG W Y, WIRIA F E. Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 660: 461–470.

通讯作者: 张安峰, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为高性能金属零件增材制造技术、高温合金超细定向晶增材制造技术、激光增材制造(3D打印)技术及其装备、激光熔覆修复柱晶和单晶高温合金叶片, E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn.

(责编 古东)

(上接第96页)

assemblies using finite element methods[J]. *Plos One*, 2005, 7(8): e43387.

[6] CAMELIO J, HU S J, CEGLAREK D. Modeling variation propagation of multistation assembly system with compliant parts[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2003, 125: 673–681.

[7] HU J, CAMELIO J. Modeling and control of compliant assembly systems [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2006, 55(1): 19–22.

[8] CAMELIO J A, HU S J, MARIN S P. Compliant assembly variation analysis using component geometric covariance[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2004, 126(2): 355–360.

[9] LIN J, JIN S, ZHENG C, et al. Compliant assembly variation analysis of aeronautical panels using unified substructures with consideration of identical parts[J]. *Computer-Aided Design*, 2014, 57(57): 29–40.

[10] DONG C, KANG L. Deformation and stress of a composite-metal assembly[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(9): 1035–1042.

[11] CAI W, HU S J, YUAN J X. Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms, and simulations[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1996, 118(3): 318–324.

通讯作者: 张婷玉, 博士、工程师, 研究方向为大尺寸柔性结构装配, E-mail: tingyubeijing@163.com.

(责编 大漠)