

文章编号: 0258-7025(2005)04-0562-05

# 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用

席明哲<sup>1</sup>, 虞 钢<sup>1</sup>, 张永忠<sup>2</sup>, 石力开<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院力学研究所, 北京 100080  
<sup>2</sup>北京有色金属研究总院复合材料中心, 北京 100088)

**摘要** 详细介绍了同轴送粉激光成形过程中, 金属粉末与激光束相互作用时间的计算方法。在 ANSYS 软件平台上, 建立了金属粉末穿越激光束过程中粉末温度场的计算模型。系统计算了不同颗粒大小 316L 不锈钢粉末与不同功率激光束相互作用后的温度。在此基础上, 计算了金属粉末与激光束的能量交换及金属粉末落入激光熔池后与激光熔池的能量交换。计算结果表明, 在激光束直径为 3 mm 条件下, 316L 不锈钢粉末穿过功率大于 1000 W 的激光束后, 所有尺寸金属粉末均被熔化, 即金属粉末以液态进入激光熔池。通过金属粉末与激光束及激光熔池的能量交换计算, 可知在激光成形中, 约有 5% 的激光能量用于加热和熔化粉末, 而大约 95% 的激光能量用于激光熔池的形成及由于热传导造成的热量损失。

**关键词** 激光技术; 激光直接成形; 金属粉末; 能量交换; 有限元法; 温度场

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A

## Interaction of the Laser Beam and the Metal Powder Conveyed by Coaxial Powder Feeder

XI Ming-zhe<sup>1</sup>, YU Gang<sup>1</sup>, ZHANG Yong-zhong<sup>2</sup>, SHE Li-kai<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
<sup>2</sup> Research Center for Nonferrous Metals Composites, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

**Abstract** A method to calculate the interaction time between metal powder and laser beam during laser direct forming with the metal powder conveyed by coaxial powder feeder is introduced in detailed. A finite element method (FEM) model based on ANSYS software is established to calculate the temperature of the metal powder while it crosses through the laser beam. Under different laser power condition, after interaction with laser beam, the temperature of the 316L stainless steel (SS) powder of different size is calculated. Thus the laser energy absorbed from laser beam by metal powders is calculated. After 316L SS powders have entered laser molten pool, the energy exchange between laser molten pool and 316L SS powders is also calculated. The calculated results show that all 316L SS powders are melted after they have crossed through the laser beam with power larger than 1000 W. It is to say that the 316L stainless steel powders are turned from solid into liquid before they reach the surface of laser molten pool. The calculated results also show that during laser direct forming, approximately 5% of laser energy is used to heat and melt metal powders and 95% of laser energy is used to form laser molten pool and to compensate the heat loss due to thermal conduction.

**Key words** laser technique; laser direct forming; metal powder; energy exchange; finite element method; temperature field

## 1 引 言

激光直接成形金属零件已经成为智能制造技术的研究热点。美国 Sandia 国家实验室的自由成形

制造技术 LENS<sup>TM</sup>[1,2] 及 Los Alamos 实验室的 DLF<sup>[3]</sup> 技术, 都是采用激光熔化金属粉末, 以数字模型为蓝本, 逐点逐层制造金属零件。美国 Aeromet 公司开发制造钛合金的 Lasform 技术, 已通过美国

收稿日期: 2004-02-09; 收到修改稿日期: 2004-04-22

作者简介: 席明哲(1968—), 男, 河南人, 博士, 高级工程师, 主要从事激光直接成形金属零件的研究。

E-mail: ximingzhe@263.net

空军的认可。我国的北京有色金属研究总院<sup>[4]</sup>、清华大学<sup>[5]</sup>、北京航空航天大学也对该技术展开研究。在激光成形金属零件过程中,粉末由 Ar 气输送,通过与激光束同轴的送粉头送出。在落入激光熔池之前,粉末将穿越激光束并与之相互作用。本文将采用有限元法<sup>[6]</sup>(FEM)计算粉末与激光束相互作用过程中,粉末温度及粉末与激光束的能量交换。同时,也计算了粉末落入激光熔池后,粉末与激光熔池的能量交换。

## 2 不锈钢粉末与激光束相互作用时间

如图 1 所示,316L 不锈钢粉末由 Ar 气输送,通过与激光束同轴的环形圆锥,在空气中飞行一段距离后,进入激光束,在激光束中受到加热后,落入激光熔池。由于 316L 不锈钢粉末尺寸较小,平均粒径 $\sim 60 \mu\text{m}$ ,因此可以认为,粉末离开同轴送粉头的出口速度与粉末载气(Ar)的出口速度是相同的。根据粉末载气流量 $\eta$ ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )和同轴送粉头环形出口的面积 $S$ ( $\text{mm}^2$ ),按下式计算出金属粉末的出口速度 $V_0$ 。

$$V_0 = \eta/S = 111111/139 = 799 \text{ mm/s}, \quad (1)$$

$V_0$  与  $x$  轴的夹角为  $65^\circ$ ,  $V_0$  的水平速度分量  $V_{0h} = V_0 \times \cos(65^\circ) = 337 \text{ mm/s}$ ,  $V_0$  的垂直速度分量  $V_{0v} = V_0 \times \sin(65^\circ) = 724 \text{ mm/s}$ 。经实验测定,当激光束在基板表面的束斑直径为 3 mm 时,粉末出口与基板距离  $H$  为 25 mm。不考虑重力对粉末粒子运动的影响,316L 不锈钢粉末离开同轴送粉头后的运动轨迹如图 1 中虚线所示。根据同轴送粉头结构尺寸可确定,粉末进入激光束之前,在空气中的水平飞

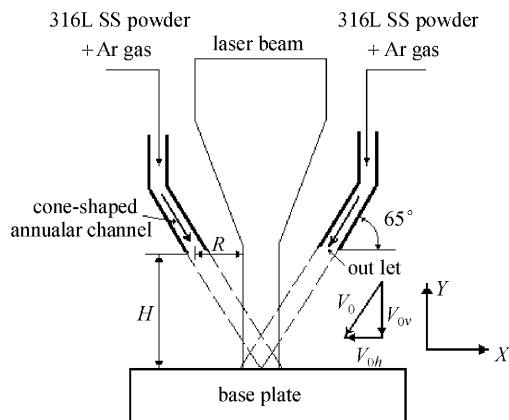


图 1 316L 不锈钢粉末与激光束相互作用示意图  
Fig. 1 The schematic of interaction of laser beam and 316L SS powders

行距离  $R$  为 8.25 mm。飞行时间为  $T_f = R/V_{0h} = 8.25/337 = 0.0245 \text{ s}$ ,粉末在空气中的垂直下降距离为  $H_d = V_{0v} \times T_f = 724 \times 0.0245 = 17.74 \text{ mm}$ ,粉末进入激光束后,受加热的垂直距离为  $H_t = H - H_d = 25 - 17.74 = 7.26 \text{ mm}$ ,因此,金属粉末在激光束中受加热的平均时间为  $T_t = H_t/V_{0v} = 7.26/724 = 0.01 \text{ s}$ 。

## 3 不锈钢粉末与激光束相互作用后的温度计算

316L 不锈钢粉末与激光束相互作用时间为 0.01 s。采用有限元法求解粉末与激光束相互作用后的温度。在计算中,假设金属粉末为球形,由于激光束能量密度小于  $10^5 \text{ W/cm}^2$ ,等离子体影响可以忽略,不考虑金属粉末对激光的反射、折射及粉末粒子间的相互加热和粉末粒子对激光束的遮蔽等影响。

计算不锈钢粉末粒子温度的三维有限元模型如图 2 所示,采用 ANSYS 中的 Solid 70 六面体八节点热单元进行自由网格划分。

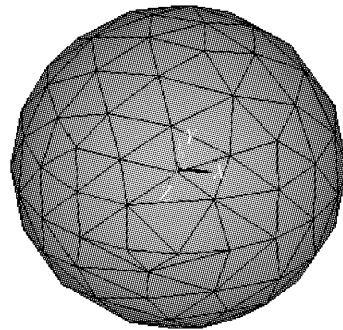


图 2 计算粉末穿越激光束时粉末温度的有限元模型

Fig. 2 FEM model to calculate temperature of the powders passing through laser beam

粉末粒子与激光束相互作用时的热边界条件如下:粉末粒子进入激光束后,粒子向光的半球面受激光加热,因此,在粉末粒子向光的半球面加载的热流密度 HFLUX 为

$$\text{HFLUX} = \eta \frac{Q}{\pi a^2}, \quad (2)$$

式中  $\eta$  为材料表面对激光的吸收率( $\eta = 0.35$ <sup>[6]</sup>); $Q$  为激光功率(W); $a$  为激光束在基板上的束斑半径(mm)。

由于粉末粒子受激光加热后,存在与空气的对流换热,所以,在计算模型的外表面加上一层表面单元 SURF152,进行粉末粒子与周围空气的自然对流

换热计算。环境温度  $T_a$  为  $20^\circ\text{C}$ ，空气的自然对流换热系数为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。粒度为 200 目的 316L 不锈钢粉末的粒子粒径分布见表 1，316L 不锈钢的热物性参数见表 2<sup>[7]</sup> 和表 3<sup>[8]</sup>。

表 1 316L 不锈钢粉末的粒径分布

Table 1 Grain size distribution of 316L SS powder

Grain size / $\mu\text{m}$	35	55	75	85
Percent / %	9	40	30	21

表 2 316L 不锈钢的热物性参数

Table 2 Thermal physical properties of 316L SS

Density / $(\text{kg}/\text{m}^3)$	Latent heat of fusion / $(\text{J}/\text{m}^3)$	Temperature interval of phase change / $^\circ\text{C}$	Temperature of liquid line / $^\circ\text{C}$
8000	$2.94 \times 10^9$	1399~1434	1434

表 3 316L 不锈钢在各种温度下的导热系数和比热

Table 3 Coefficient of heat conductivity and specific heat of 316L SS at different temperature

Temperature / $^\circ\text{C}$	20	200	400	800	1200
Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	494	536	569	644	669
Coefficient of heat conductivity / $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	14.7	18	20.8	26.3	31.9

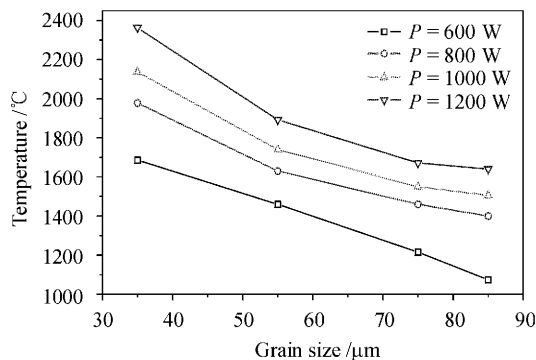


图 3 不同粒径的 316L 不锈钢粉末穿过功率不同的激光束后的温度

Fig. 3 After interaction of the powder and the laser beam of different power, the temperature of the 316L SS powder of different size

316L 不锈钢粉末粒子与激光束相互作用后的温度计算结果如图 3 所示。可以看出，在同一激光功率条件下，随粉末粒子直径增大，金属粉末粒子温度降低；在金属粉末粒子直径相同条件下，随激光功率升高，粉末粒子温度升高。316L 不锈钢的熔点温度为  $1434^\circ\text{C}$ ，粉末与功率为 1000 W，1200 W 的激

光束相互作用后，粉末粒子的温度均达到材料的熔点温度，即金属粉末是以液体状态落入激光熔池的。当金属粉末与功率为 600 W，800 W 的激光相互作用后，粒径为  $35 \mu\text{m}$ ， $55 \mu\text{m}$  的粉末发生熔化，而粒径较大的  $75 \mu\text{m}$ ， $85 \mu\text{m}$  的粉末没有熔化。

#### 4 粉末与激光束相互作用过程中吸收的激光能量

由于粉末粒子非常小，它们一进入激光束后，在极短时间内，粉末小球各部分温度就变为均匀温度，因此，单个粉末粒子与激光束的能量交换  $Q_{\text{absorb}}$  可计算

$$Q_{\text{absorb}} = \rho \cdot v \cdot c \cdot (T_1 - T_0), \quad (3)$$

式中  $\rho$  为 316L 不锈钢密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )； $v$  为单个粉末粒子体积 ( $\text{m}^3$ )； $c$  为 316L 不锈钢比热 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )； $T_0$  为不锈钢粉末初始温度  $\sim 20^\circ\text{C}$ ； $T_1$  为不锈钢粉末穿过激光束后的温度 ( $^\circ\text{C}$ )。

不同粒度的粉末与功率 1000 W 激光束相互作用后的温度见表 4。

根据式 (3)，不同粒径的单个不锈钢粉末穿过激光束后，所吸收的激光能量见表 5。

表 4 不同粒度的粉末穿过 1000 W 激光束后的温度

Table 4 After interaction of powders and laser beam with power of 1000 W, the temperature of 316L SS powder of different size

Grain size / $\mu\text{m}$	35	55	75	85
Temperature / $^\circ\text{C}$	2137	1790	1550	1506

表 5 单个粉末穿过激光束后所吸收的能量

Table 5 Amount of laser energy absorbed by single particle of different size during 316L SS powders passing through laser beam

Grain size / $\mu\text{m}$	35	55	75	85
Energy of absorption / J	$2.3 \times 10^{-4}$	$7.4 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$

表 6 不同粒径的粉末粒子每秒钟穿过激光束的数量

Table 6 Numbers of 316L SS powder of different size pass through laser beam per second

Grain size / $\mu\text{m}$	35	55	75	85
Numbers	19509	22388	6470	3188

对于平均粒径  $\sim 60 \mu\text{m}$  的 316L 不锈钢粉末，在载气流量为  $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$  条件下，送粉速率为  $0.075 \text{ g/}$

s。经实验测定,粉末利用率,即穿过激光束受到加热的粉末重量约占送粉器所送金属粉末总重量的 50%,根据不锈钢粉末粒径和密度(7.7 g/cm<sup>3</sup>),计算出各种粒径单个粉末重量,然后结合粒径分布(表 1)及粉末利用率,计算出连续送粉条件下,不同粒径的粉末粒子每秒钟穿过激光束的数量,如表 6 所示。

因此,根据式(3)和表 6,可以计算出不锈钢粉末穿过激光束所吸收的激光能量  $Q_{ab}$

$$Q_{ab} = 43 \text{ J}.$$

由于激光器每秒所输出的能量为 1000 J,因此,不锈钢粉末与激光束相互作用所吸收的激光能量占激光器输出能量的百分比为:  $\varphi = Q_{ab}/1000 = 4.3\%$ 。

## 5 受热不锈钢粉末与激光熔池的能量交换计算

与激光束相互作用后的不锈钢粉末落入激光熔池后,在激光连续作用下,粉末与熔池内的熔体进行热量交换,最终成为熔池的一部分。在不考虑熔池流动的条件下,粉末总是不断落在熔池表面,因此,取熔池的表面平均温度作为粉末落入熔池后的温度。由于粉末粒子非常小,在极短时间内,粉末粒子小球的温度就达到均匀,因此,可以求出金属粉末与熔池所进行的能量交换量  $J_{\text{exchange}}$

$$J_{\text{exchange}} = \rho \cdot v \cdot c \cdot (T_1 - T_0). \quad (4)$$

采用 ANSYS 有限元软件计算激光熔池温度场,其有限元模型如图 4 所示。计算模型尺寸为 20 mm×10 mm×10 mm,材料为 45# 钢。熔池温度场的偏微分方程、热边界条件确定及求解见文献[9]。

熔池表面平均温度为

$$T = \frac{\sum_i^N t_i}{N}, \quad (5)$$

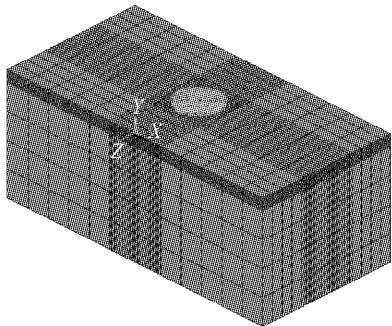


图 4 计算激光熔池温度场的有限元模型

Fig. 4 FEM model to calculate the temperature field of laser molten pool

式中  $t_i$  为熔池表面内有限元节点温度(°C);  $N$  为熔池表面内有限元节点个数。

在激光功率为 1000 W,激光光斑直径为 3 mm,激光作用时间为 1 s 的条件下,根据(5)式,熔池表面的平均温度计算结果为 2036°C。

根据表 4,式(4)及式(5),则各种粒径的不锈钢粉末与熔池交换的能量见表 7。

表 7 不同粒径的单个粉末粒子与激光熔池交换的能量

Table 7 Energy exchange between single particle of different size and laser molten pool

Grain size / $\mu\text{m}$	35	55	75	85
Energy exchange /J	-0.06	2.4	2.7	2.1

表 8 不同激光功率下,粉末吸收的激光能量占激光输出能量的百分比

Table 8 Percentage of laser energy absorbed by 316L SS powders in laser output energy under different laser power conditions

Laser power /W	800	1000	1200
Percentage /%	5.6	5.0	4.6

由表 7 可知,当粉末进入激光熔池前的温度高于熔池熔体温度时,粉末会放出能量给熔池;当粉末进入熔池前的温度低于熔池熔体温度时,粉末从熔池吸收能量。粉末与激光熔池所交换的能量总和  $U = 7.14 \text{ J}$ ,  $U$  即为粉末进入熔池后所吸收的激光能量。在 1 s 内功率 1000 W 的激光器输出的能量为 1000 J,粉末与激光束相互作用所吸收能量为 43 J,加上粉末进入熔池所吸收的激光能量 7.14 J,那么用来熔化粉末的激光能量为 50.14 J,其所占激光器输出能量的百分比  $\zeta$  为

$$\zeta = 50.14/1000 = 5\%.$$

由此可见,在送粉条件下,约 95% 的激光能量用来形成激光熔池。所以约有 5% 的能量用来熔化粉末。

表 8 给出了激光光斑直径 3 mm,激光作用时间 1 s,不同激光功率条件下,用来熔化金属粉末所需的激光能量。

## 6 结 论

确定了在本成形系统条件下,粉末穿越光束直径 3 mm 激光束的时间为 0.01 s。采用有限元方法,计算了不同尺寸的 316L 不锈钢粉末穿越不同

功率激光束后的温度,计算中考虑了粉末与空气的对流换热及粉末材料相变时的吸热。计算结果表明,粉末穿过功率大于1000 W的激光束后,所有粉末均被熔化。通过对316L不锈钢粉末与激光束以及粉末落入激光熔池后与激光熔池的能量交换计算,可知约有5%的激光能量用来加热和熔化粉末,而大约95%的激光能量用于形成激光熔池和由于热传导造成的热量损失。

### 参 考 文 献

- 1 R. Banerjee, C. A. Brice, S. Banerjee *et al.*. Microstructural evolution in laser deposited Ni-25at.-% Mo alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, **A347**(4):1~4
- 2 R. Banerjee, P. C. Collins, D. Bhattacharyya *et al.*. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded  $\alpha/\beta$  titanium-vanadium alloys [J]. *Acta Materialia*, 2003, **51**(6):3277~3292
- 3 J. O. Milewski, G. K. Lewis, D. J. Thoma *et al.*. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **75**(3):165~172
- 4 Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin *et al.*. Fundamental aspects on laser rapid & flexible manufacturing of metallic components [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(suppl.):30~33
- 5 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of 316L SS fabricated by laser direct deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1045~1048
- 6 Zhu Yanjie, Dong Xiaopeng, Yang Xiaoli *et al.*. Application and improvement of finite-difference time-domain algorithm in the analysis of optical waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 565~571
- 7 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling of in-situ monitoring curves during development of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1146~1150
- 8 William Hofmeister, Michelle Griffith, Mark Ensz *et al.*. Solidification in direct metal deposition by LENS processing [J]. *J. Metals*, 2001, **53**(9): 30~34
- 9 Wang Zhengqiao, Wu Youlin. Stainless Steel [M]. Beijing: China Chemical Industry Press, 1991. 138~139
- 10 Chen Haitao, Li Huaji, Cao Yang. Numerical Simulation on Solidification Process of Foundry Goods [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991. 210~211
- 11 Xi Mingzhe. Research on metallic parts fabricated by laser direct forming [D]. *Beijing University of Science and Technology*, 2002, **10**:59~64

*Lasers*, 2002, **A29**(11):1045~1048

席明哲,张永忠,章萍芝等. 工艺参数对激光快速成型316L不锈钢组织性能的影响[J]. 中国激光, 2002, **A29**(11): 1045~1048

6 Zhu Yanjie, Dong Xiaopeng, Yang Xiaoli *et al.*. Application and improvement of finite-difference time-domain algorithm in the analysis of optical waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 565~571

朱燕杰,董小鹏,杨晓理等. 时域有限差分法在光波导分析中的应用及改进[J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 565~571

7 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling of in-situ monitoring curves during development of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1146~1150

赵劲松,李立峰,吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1146~1150

8 William Hofmeister, Michelle Griffith, Mark Ensz *et al.*. Solidification in direct metal deposition by LENS processing [J]. *J. Metals*, 2001, **53**(9): 30~34

9 Wang Zhengqiao, Wu Youlin. Stainless Steel [M]. Beijing: China Chemical Industry Press, 1991. 138~139

王正樵,吴幼林. 不锈钢[M]. 北京:化工工业出版社,1991. 138~139

10 Chen Haitao, Li Huaji, Cao Yang. Numerical Simulation on Solidification Process of Foundry Goods [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991. 210~211

陈海涛,李华基,曹阳. 铸件凝固过程数值模拟[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991. 210~211

11 Xi Mingzhe. Research on metallic parts fabricated by laser direct forming [D]. *Beijing University of Science and Technology*, 2002, **10**:59~64

席明哲. 金属零件激光成型技术的研究[D]. 北京科技大学博士论文, 2002, **10**:59~64