

激光直接金属沉积中激光束衰减的模拟研究

张冬云^{1,2} 张晖峰^{1,2*} 董东东^{1,2} 刘臻^{1,2}

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

²北京市数字化医疗 3D 打印工程技术中心, 北京 100124

摘要 采用三维瞬态模型模拟了同轴激光直接金属沉积过程中激光束在基材附近穿过汇聚的钛金属粉末云时的衰减。采用射线追踪方法, 计算了激光束受粉末影响部分被吸收、部分被散射后在各个方向的光强分布。考虑了激光波长和粒子数对激光衰减过程的影响。结果表明, 具有均匀空间分布的 0.01 g/mL 钛粉末云对激光的吸收率为 5.47%, 激光束穿过粉末云时的衰减几乎不受波长影响, 但随粒子数的增加而增强。数值模拟解与实验测得的 1.06 μm 处的粒子悬浮液透射率曲线相吻合。

关键词 激光技术; 激光直接金属沉积; 三维瞬态模型; 激光与粉末相互作用; 射线追踪; 悬浮液

中图分类号 TG174.4; TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.081407

Numerical Simulation of Laser Attenuation in Laser Direct Metal Deposition

Zhang Dongyun^{1,2} Zhang Huifeng^{1,2} Dong Dongdong^{1,2} Liu Zhen^{1,2}

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

²Beijing Engineering Research Center of 3D Printing for Digital Medical Health, Beijing 100124, China

Abstract A comprehensive three-dimensional transient model is developed to analyze laser attenuation near substrate where the beam transmits through the converged titanium powder cloud. A ray tracing method is employed to calculate the intensity distribution in all the directions after the laser beam is partially absorbed and partially scattered by the powder cloud. The effect of laser wavelength and number of particles on the laser attenuation process is considered. The results show that the spatially uniformly distributed titanium powder cloud with a concentration of 0.01 g/mL exhibits an absorptivity of 5.47%. The laser attenuation process due to the powder cloud is barely influenced by wavelength and the attenuation increases as the number of particles increases. The simulated transmittance of power cloud at 1.06 μm fits the transmittance curve of particulate suspension.

Key words laser technique; laser direct metal deposition; three-dimensional transient model; laser-powder interaction; ray tracing; suspension

OCIS codes 140.3390; 240.6700; 350.3390

1 引言

激光直接金属沉积技术广泛应用于立体模型的建立, 可以实现材料的逐层沉积, 从而生产出具有任意形状的金属物件。该技术还可用于生产热屏障和在新部件上生成高质量表面层, 对部件进行抛光, 提升表面质量^[1-12]。在沉积过程中, 粉粒到达基材前被预加热, 激光束发生衰减, 强度减小, 分布改变^[13]。

Devesse 等^[12]使用射线追踪方法, 模拟了激光熔覆中激光束和粉末流的相互作用。粉粒的轨迹用蒙特卡罗方法模拟, 考虑了三种粒子尺寸。但模型只与其他文献结果进行比对, 缺少实验验证。Neto 等^[13]研究

收稿日期: 2016-02-29; **收到修改稿日期:** 2016-05-12; **网络出版日期:** 2016-07-21

基金项目: 北京市自然科学基金重点研究专题(Z140002)、北京市委科技任务(Z141100002814011)

作者简介: 张冬云(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光快速成型和激光焊接等方面的研究。

E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zhf2811918@foxmail.com

了激光束和同轴送粉喷嘴之间的相互作用,模型假设粉末具有单一粒径,但实际上粉末具有某种尺寸分布,例如 Rosin-Rammler 分布或高斯分布^[14-15]。Huang 等^[16]建立了一个三维分析模型,研究了异轴送粉下送粉率和送粉角等参数对激光光斑的光强分布和基材面上粒子温度分布的影响。但该模型没有考虑其他参数的影响,如激光波长,因而忽略了激光种类对激光直接金属沉积的影响。Huan 等^[7]和 Kovalev 等^[11]也只考虑了一种波长。Loh 等^[15]建立了三维瞬时模型,研究同轴送粉下激光束和粉末流的相互作用,假设粉粒为完美球形,但实际的金属粒子在显微镜下往往显示为准球形^[2,11,16]。Taberero 等^[17]模拟了同轴送粉下的粉末通量分布,离散相模拟使用 $k-\xi$ 湍流模型和欧拉-拉格朗日近似。理论上有许多方法可用于分析光在散射介质中的传播,例如蒙特卡罗模拟、多重散射理论、比尔-朗伯定律、射线传输理论、扩散近似理论、经典物理光学和几何光学等^[14-15,18-27]。Liu 等^[28]模拟了同轴送粉下粉末分布规律和汇聚情况,提出了同轴送粉式粉末分布理论模型,计算结果与实验测量结果比较吻合。

本文采用 COMSOL 软件的射线追踪模块,将入射光束划分为许多光线,这些光线被粒子部分反射或吸收,模拟中考虑了激光波长和粒子数的影响。使用光谱仪测量粒子悬浮液的透射率光谱对模型进行验证。

2 原 理

2.1 模型的建立

在激光直接金属沉积过程中,由于粒子吸收能量使温度升高,因而必须考虑激光束和粉末粒子的相互作用,如图 1 所示。由于粒子到达熔池的路径不同,最终温度不同,可能影响熔池的温度分布,甚至影响加工过程中成型件内部温度场的积累。这类研究有助于优化工件内部的温度场^[1,13,16,25]。

Devesse 等^[12]和 Ma 等^[29]指出,粉末流在基材面附近汇聚,产生一个聚焦区域。该聚焦区域中心处的粉末云最为稠密,其中的粒子通量呈高斯分布。粉末流边缘的粒子在中心区域上方形成更为稀疏的粉末云,称为过渡区。过渡区浓度呈非均匀分布,如图 1 所示^[2,17]。高斯区域的半宽一般大于激光束的尺寸,即激光束照射高斯区域的中心,该中心处的粒子浓度几乎不变。同轴送粉产生的粒子浓度很小,约为 0.01 g/mL ^[30]。

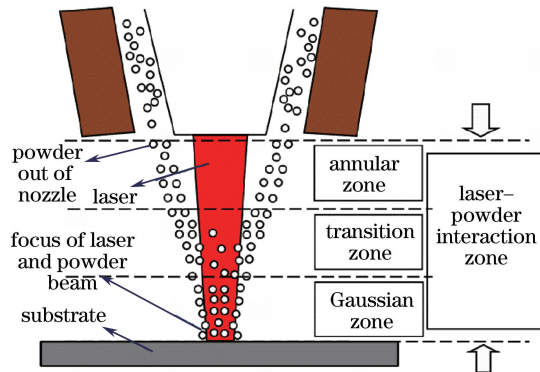


图 1 激光-粉末相互作用区域

Fig. 1 Laser and powder interaction zone

为建立粉末云的射线传输模型,提出以下假设:

- 1) 激光束无会聚或发散,呈圆柱体;
- 2) 仅考虑激光和粉末在高斯区域的相互作用,忽略过渡区域,因为后者比高斯区域更加稀疏^[17];
- 3) 粉末粒子尺寸呈高斯分布,范围为 $45 \sim 75 \mu\text{m}$,平均值为 $60 \mu\text{m}$ ^[2,17];
- 4) 不追踪由圆柱区域外粒子反射回区域内的光线。

用于激光熔覆的金属粒子由气雾化产生,在显微镜下呈准球形^[2,11,16],可得到散射光线在散射点处的切线和法线部分为

$$k_{t_x} = |\mathbf{k}_c| \times \sin \phi \times \sin \theta, \quad (1)$$

$$k_{t_y} = |\mathbf{k}_c| \times \cos \phi \times \sin \theta, \quad (2)$$

$$k_n = |\mathbf{k}_c| \times \cos \theta, \quad (3)$$

式中 k_c 为撞击粒子表面的射线波矢量, k_{i_x} 和 k_{i_y} 为两个切线方向的分量, k_n 为法线方向分量。考虑到真实粒子呈准球形, ϕ 和 θ 对作用区域内所有的散射光线而言是随机的。 ϕ 随机均匀分布于 $[0, \pi]$ 区间内。 θ 定义为

$$\theta = \arcsin \sqrt{1-g}, \quad (4)$$

式中 g 为 $0 \sim 1$ 之间的因子^[31]。

每次激光-粉粒相互作用后,部分激光能量被金属粒子吸收而发生衰减,由菲涅耳公式定义的吸收率为

$$\alpha = 1 - 0.5 \times \left\{ \left| \frac{[\lambda^2 \cos \theta - (\lambda^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}]}{[\lambda^2 \cos \theta + (\lambda^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}]} \right|^2 + \left| \frac{[\cos \theta - (\lambda^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}]}{[\cos \theta + (\lambda^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}]} \right|^2 \right\}, \quad (5)$$

式中 λ 为粒子材料的相对折射率。模型中的粉末为钛金属,具有良好的生物兼容性和完美的机械性能^[3]。钛的折射率在 $10.6 \mu\text{m}$ 处为 $8.5 - 19.9i$, 在 $1.06 \mu\text{m}$ 处为 $3.5 - 4.02i$ ^[25,31]。粒子周围的气体折射率设为 1。

2.2 射线追踪

使用 COMSOL 软件中的射线追踪模块分析粒子系统出口面上的能量模式。

根据假设,激光束-粉末云相互作用区域的几何结构为圆柱体。粒子的三维坐标由 (x, y) 坐标和 z 坐标组合而成,前者在半径为 0.5 mm 的圆内均匀分布,随机产生,后者在 3 mm 的长度内均匀分布,随机产生^[17]。选取 5, 15, 50 三个粒子数用于研究粒子浓度对激光衰减的影响。如图 2 所示,50 个粒子随机分布在圆柱体内,对应浓度为 0.01 g/mL 的粉末云。

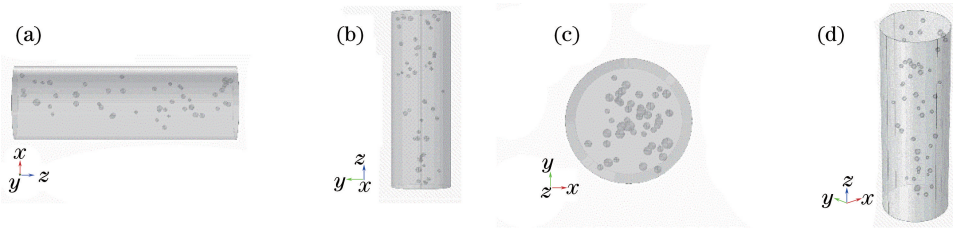


图 2 作用区域沿(a) y 轴、(b) x 轴、(c) z 轴和(d) 三维立体视角的展示

Fig. 2 Interaction zone along (a) y axis, (b) x axis, (c) z axis, and (d) from a 3D perspective

使用高斯光束,初始强度为

$$I_0(x, y) = P_0 / \pi R^2 \times \exp[-(x^2 + y^2) / R^2], \quad (6)$$

式中 P_0 为初始功率,设为 600 W , R 为激光束半径,为 0.5 mm ,如图 3 所示。设定激光为非偏振光,划分成 5×10^4 条光线,模拟光束均匀分布在入射口,光线以 $(0, 0, 1)$ 的运行矢量进入作用区域。

当光线碰撞粒子时,光线被随机散射,散射方向由(1)~(4)式给出,碰撞过程如图 4 所示。

被粒子散射的光线一般到达作用区域的侧面和入射面,很少到达出射面,将到达前两个面的光线冻结在原地,记录到达点处的光强和位置,如图 5 所示。

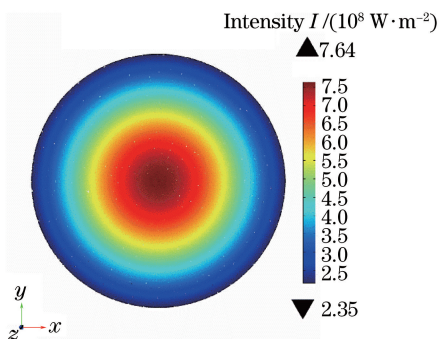


图 3 高斯光束被分成 5×10^4 条光线

Fig. 3 Gaussian beam is split to 5×10^4 rays

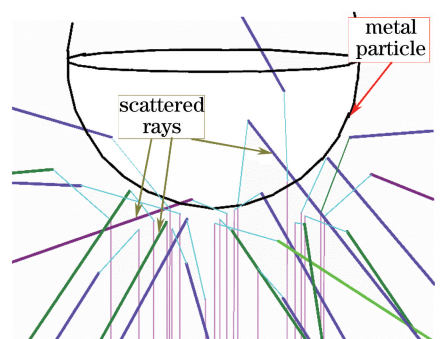


图 4 光线撞击金属粒子并被散射

Fig. 4 Rays hit a metal particle and are scattered

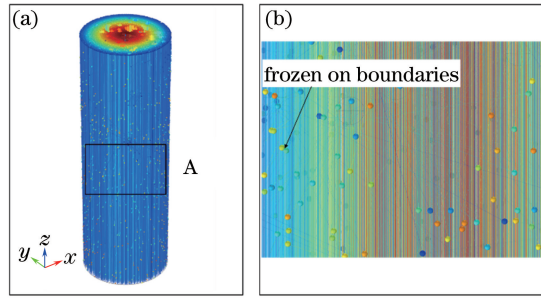


图 5 (a)到达边界的射线不再运行;(b)图 5(a)中区域 A 的放大

Fig. 5 (a) Rays arriving at boundaries stay there; (b) amplification of region A in Fig. 5(a)

3 实验

Devesse 等^[12]和 Medina 等^[30]研究了激光束与粉末粒子相互作用,但并未验证模拟结果。有学者进行了验证,结果非常复杂。例如,Tabernero 等^[2]测量激光直接金属沉积过程中粉末流导致的能量衰减,实验需要复杂的设备,不易操作。为简化本文的模拟和实验验证,使用钛粒子悬浮液模拟基材表面附近汇聚区域内的粉末云。使用光谱仪测量悬浮液透射率光谱随浓度的变化,分析波长和浓度等对光强衰减的影响。

3.1 实验样品

配制钛粒子悬浮液时,用甘油作为稳定剂^[32]。将适量钛粉加入一定体积的甘油中,使用玻璃棒缓慢搅拌 3 min,以保证粒子均匀分布在甘油中,而且没有簇和气泡产生,配制质量浓度为 0.01~0.4997 g/mL 的钛-甘油悬浮液。忽略粉末粒子的体积。

3.2 实验设备

如图 6 所示,由卤素-氙灯产生的光束直径为 4.92 mm,波长为 200~1100 nm,该光束穿过装有悬浮液的比色皿(45 mm×10 mm×10 mm),使用基于光子计数的光谱仪收集透过悬浮液的光子数,在相同条件下测量光束透过甘油的光子数,透射率由前者除以后者得到。最后由连接光谱仪的 AvaSoft 软件呈现悬浮液的透射率光谱。

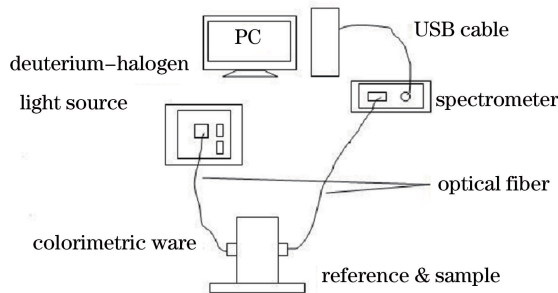


图 6 测量光学系统

Fig. 6 Optical system for measurement

4 结果与分析

4.1 数值模拟与分析

4.1.1 激光波长对衰减过程的影响

将几何结构网格设置为均匀分布,模拟解中的强度密度分布可以代表每个面上的能量模式,如图 7、8 所示,每个面上的光强累积通过强度密度分布在对对应面上的积分得到。图中的颜色代表强度的高低,其中蓝色区域代表低强度;亮的区域,比如橙色和红色区域,代表高强度,由蓝到红,强度逐渐增强。

5 个粒子的情况下,大部分入射光不与粒子发生相互作用,直达作用区域的出射面,使得出射面上的光强基本保持高斯分布,如图 7(a)和图 8(a)所示。直透光未衰减,并具有初始强度数量级,其中的弱光强区域

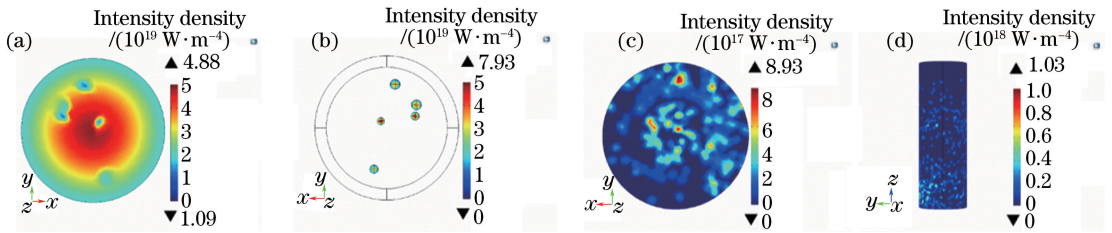


图 7 5 个粒子、波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时的光强密度分布。(a) 出射表面；(b) 粒子表面；(c) 入射表面；(d) 侧面

Fig. 7 Intensity density with 5 particles and wavelength of $1.06 \mu\text{m}$.

(a) Emergent surface; (b) particle surface; (c) incident surface; (d) side surface

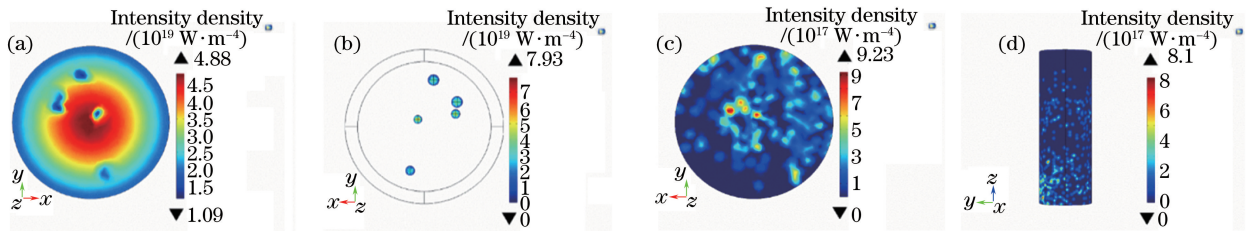


图 8 5 个粒子、波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时的光强密度分布。(a) 出射表面；(b) 粒子表面；(c) 入射表面；(d) 侧面

Fig. 8 Intensity density with 5 particles and wavelength of $10.6 \mu\text{m}$.

(a) Emergent surface; (b) particle surface; (c) incident surface; (d) side surface

由粒子遮挡造成。因为激光能量聚焦在光束的中心，所以圆柱中央的粒子具有相对较大的光强数量级，如图 7(b) 和图 8(b) 所示。被粒子遮挡的光线发生散射，散射光到达入射面 [图 7(c) 和图 8(c)] 与侧面 [图 7(d) 和图 8(d)]，造成部分激光衰减。前者是在粉末研究中测量反射率的原因^[33]。从这两个边界的强度分布可以看出，强度不同的散射光呈均匀分布。因为散射方向具有随机性，在不同波长下散射光强度分布稍有不同。值得注意的是，(5) 式中粒子表面的吸收率是关于折射率和散射角的函数。散射角的随机性使得吸收率也具有随机性，与折射率和散射角无关，尽管折射率由波长决定。吸收光是另一个激光衰减因子。射线与粒子相互作用时部分被吸收。

4.1.2 粒子个数对衰减的影响

15 个粒子时，多数入射光线依旧直接通过粒子系统，不受粒子影响而衰减，如图 9(a) 所示。少数光线撞击粒子，部分被吸收 [图 9(b)]，部分被散射。强度不同的散射光在入射面 [图 9(c)] 和侧面 [图 9(d)] 上呈近似均匀分布。粒子数达到 50 时，强度不同的散射光在侧面和入射面不再均匀分布，如图 10(c)、(d) 所示，而且出射面上的光强分布也不再是高斯分布 [图 10(a)]，因为粒子遮挡比较严重，出射光的强度分布发生较大改变。

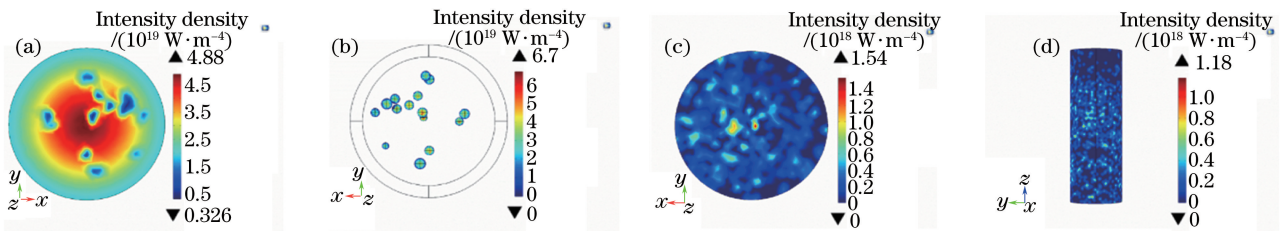


图 9 15 个粒子时的光强密度分布。(a) 出射表面；(b) 粒子表面；(c) 入射表面；(d) 侧面

Fig. 9 Intensity density with 15 particles. (a) Emergent surface; (b) particle surface; (c) incident surface; (d) side surface

高斯光束中衰减能量的分布如表 1 所示。其中 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 处透射率约为 95.50%，占主要部分；粒子吸收的光强约占 2.52%；散射光约占 1.98%。这三个比值与 Devesse 等^[12]的研究具有可比性，由于模型中使用的几何和粉末材料参数不同，因而难以进行详细对比。对于 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 的波长，透射率、吸收率和散射率变化不大，表明波长对作用区域内的激光衰减影响很弱。对比粒子数不同的情况，发现能量的衰减率在粒子个数为 5, 15, 50 时分别为 4.51%，12.13%，21.37%，表明能量衰减与出射面上的粒

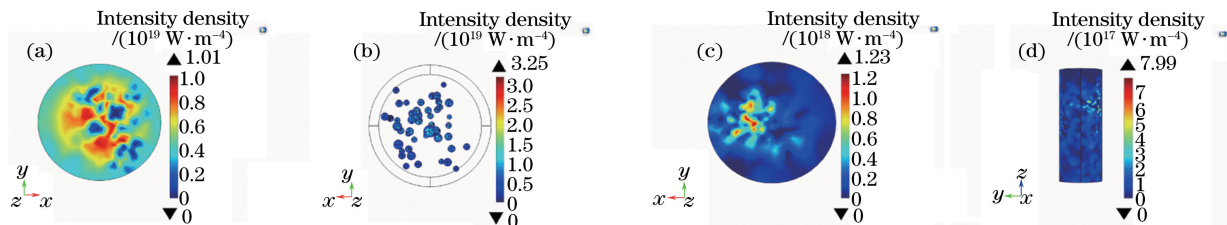


图 10 50 个粒子时的光强密度分布。(a)出射表面;(b)粒子表面;(c)入射表面;(d)侧表面

Fig. 10 Intensity density with 50 particles. (a) Emergent surface; (b) particle surface; (c) incident surface; (d) side surface

表 1 高斯光束中衰减能量的分布

Table 1 Distribution of attenuated energy for a Gaussian laser beam

Light type	Emergent light / %	Absorbed light / %	Scattered light / %
Wavelength of 1.06 μm	95.49	2.52	1.99
Wavelength of 10.6 μm	95.51	2.51	1.98
15 particles	87.87	6.84	5.29
50 particles	78.63	5.47	15.90

子有效遮挡面积呈正相关,符合米勒理论^[1-2,30]。增加粒子数,能量吸收率增大,主要原因是粒子数增加,粉末云中的多重散射增强。粒子吸收的光强在很大程度上抵消激光衰减的光强,这是因为大部分被粒子吸收的能量随着粒子进入熔池。尽管如此,能量衰减还是集中在光束中央。

4.2 实验测量结果与分析

4.2.1 透射率光谱随沉降时间的变化

为分析沉降对透射率的影响,分别对 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 g/mL 的悬浮液每隔 30 s 记录一次透射率光谱。

如图 11 所示,浓度为 0.02~0.05 g/mL 的钛-甘油悬浮液的透射率整体上随时间增加。在部分时间间隔内会有小波动。0.02~0.03 g/mL 范围内的透射率均呈上升趋势,在曲线的后半段近似重合。0.04~0.05 g/mL 范围内的透射率相对较小,二者的曲线基本平行,呈相似趋势。

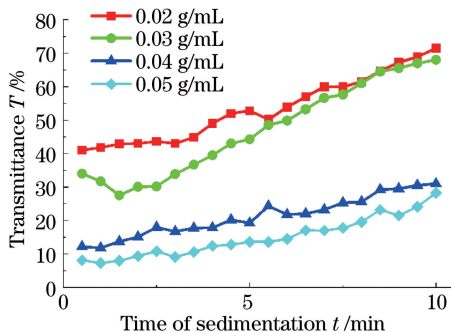


图 11 波长为 635 nm 时不同浓度悬浮液的透射率

Fig. 11 Transmittance of suspension with different concentrations at 635 nm

一个粒子在悬浮液中受到沉降力和沉降阻力。沉降力为

$$F_1 = \pi d^3 (\rho - \rho_0) g / 6, \quad (7)$$

式中 ρ_0 为悬浮液溶剂密度, ρ 为金属密度, d 为粒子的有效直径, g 为重力加速度。沉降阻力为

$$F_2 = 3\pi\mu d v_0, \quad (8)$$

式中 μ 为悬浮液溶剂的动力黏度, v_0 为沉降速度。当钛粒子达到稳定的悬浮或匀速沉降时,受力平衡,即 $F_1 = F_2$ 。结合(7)、(8)式,可以得到沉降速度为

$$v_0 = d^2 (\rho - \rho_0) g / 18\mu. \quad (9)$$

沉降速度 v_0 与相对密度和有效直径的平方成正比,与悬浮液溶剂的动力黏度成反比。对于钛-甘油悬浮液,相对密度和动力黏度保持恒定值(假设温度恒定),悬浮液中粉末粒子的沉降速度只与粒子尺寸有关,尺寸较

大的粒子沉降较快,尺寸较小的粒子则沉降较慢。为减小复杂沉降的影响,测量透射率光谱随浓度的变化规律时设置相同的透射率光谱时间记录点^[32]。

4.2.2 透射率光谱随质量浓度的变化

将悬浮液倒入比色皿 10 s 后开始记录透射率光谱随浓度的变化,使粒子沉降带来的影响最小化。0.01~0.4997 g/mL 范围内的透射率光谱如图 12 所示。

部分曲线在波长范围的两端波动剧烈。原因在于实验中使用的 AvaSoft 软件有一个“平滑化”程序,可对探测器阵列上许多像素的光谱数据求平均。靠近两端的像素邻近像素相对较少,对其求平均时,准确度降低。在分析中,200~400 nm 内的透射率光谱因波动剧烈而予以排除。

对每个不同的质量浓度,透射率基本随波长保持恒定,波动在 5% 以内。这种几乎平坦的变化趋势说明波长对光束在悬浮液中的衰减影响微弱,这与表 1 中的结果相同。对 400~1100 nm 内的波长而言,透射率随质量浓度的增加而减小,说明激光衰减呈递增趋势,符合关于激光衰减随浓度变化的常识性理论。用 1.06 μm 处部分透射率实验值与模拟值进行对比,结果如图 13 所示。模拟值取相同波长下粒子数分别为 5, 15, 50 时的透射率,与实验测得的透射率-浓度变化曲线相吻合。取波长为 1.06 μm 是因为近来大多数工业激光器的波长约为 1 μm ^[34]。

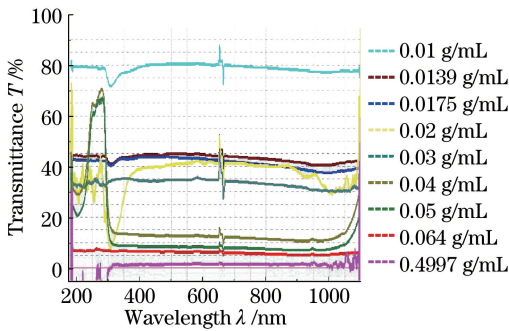


图 12 不同浓度悬浮液的透射率

Fig. 12 Transmittance of suspension with different concentrations

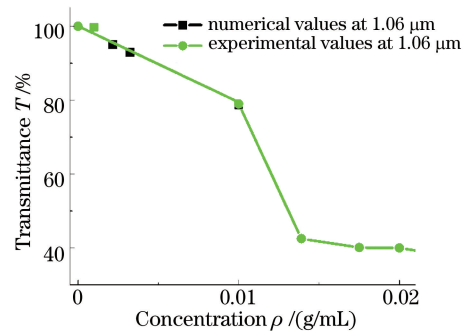


图 13 透射率实验值和模拟解的对比

Fig. 13 Comparison between transmittance data from experiment and simulation

5 结 论

模拟同轴激光直接金属沉积过程中激光穿过粉末云时的衰减,与实验结果进行了对比,得到如下结论。

1) 浓度为 0.01 g/mL 的钛粉末云对激光的吸收率为 5.47%,模型中用 50 个粒子来模拟 0.01 g/mL 的浓度,这对钛粉在激光立体成型技术中的应用具有指导意义。

2) 激光的衰减与粉末浓度成正比,受激光波长影响不大,符合激光衰减随浓度变化的常识性理论。

3) 波长为 1.06 μm 的光束在粉末云和粒子悬浮液中具有相似的传播规律,悬浮液可以当作激光-粉末相互作用区域的立体放大,将作用区域单独用于研究,提供了一种简单直接的方法来测量粉末云的光学性能,而不仅是在理论上建立模型进行分析。

直观地展示了激光直接金属沉积过程中激光束受到粉末云散射后在各个方向上的光强分布,并且得出粉末云的吸收率,有利于计算到达熔池时粉末携带的能量和成型件的温度积累,有助于优化工件内部的温度场。考虑到粉粒到达熔池前被预加热,所以计算到达熔池前粉末云的粒子温度分布是即将开展的工作。

参 考 文 献

- 1 Neto O O D, Vilar R. Physical-computational model to describe the interaction between a laser beam and a powder jet in laser surface processing[J]. Journal of Laser Application, 2002, 149(1): 46-51.
- 2 Tabernero I, Martínez S, Ukar E, *et al.* Modelling of energy attenuation due to powder flow-laser beam interaction during laser cladding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 516-522.
- 3 Chuan L T, Abidin M Y Z, Abdullah H Z, *et al.* Effect of applied voltage on surface properties of anodised titanium in

- mixture of β -glycero phosphate (β -GP) and calcium acetate (CA) [C]. Proceedings of the 23rd Scientific Conference of Microscopy Society, Malaysia, 2015, 1669: 020054.
- 4 Wen S Y, Shin Y C. Modeling of transport phenomena during the coaxial laser direct deposition process[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(4): 044908.
 - 5 Kong F R, Kovacevic R. Modeling of heat transfer and fluid flow in the laser multilayered cladding process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41(6): 1310-1320.
 - 6 Bamberger M, Kaplan W D, Medres B, *et al.* Calculation of process parameters for laser alloying and cladding [J]. Journal of Laser Application, 1998, 10(1): 29-33.
 - 7 Huan Q, Mazumder J, Green L, *et al.* Laser beam analysis in direct metal deposition process [J]. Journal of Laser Application, 2005, 17(3): 136-143.
 - 8 Kumar A, Roy S. Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding [J]. Computational Materials Science, 2009, 46(2): 495-506.
 - 9 de Oliveira U, Ocelik V, de Hosson J T M. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 197(2): 127-136.
 - 10 Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: Effects of laser pulse shaping on the process [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(6): 849-867.
 - 11 Kovalev O B, Zaitsev A V, Novichenko D, *et al.* Theoretical and experimental investigation of gas flows, powder transport and heating in coaxial laser direct metal deposition (DMD) process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 465-478.
 - 12 Devesse W, Baere D D, Guillaume P. Modeling of laser beam and powder flow interaction in laser cladding using ray-tracing [J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(s2): s29208.
 - 13 Neto O O D, Alcalde A M, Vilar R. Interaction of a focused laser beam and a coaxial powder jet in laser surface processing [J]. Journal of Laser Application, 2007, 19(2): 84-88.
 - 14 Huan Q, Mazumder J, Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 024903.
 - 15 Loh L E, Chua C K, Yeong W, *et al.* Numerical investigation and an effective modelling on the selective laser melting (SLM) process with aluminium alloy 6061 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 288-300.
 - 16 Huang Y L, Liu J, Ma N H, *et al.* Three-dimensional analytical model on laser-powder interaction during laser cladding [J]. Journal of Laser Application, 2006, 18(1): 42-46.
 - 17 Taberner I, Lamikiz A, Ukur E, *et al.* Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2125-2134.
 - 18 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Calculation and analysis of intensity of transmitted light by random scatters with nanoparticles [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 951-956.
叶云霞, 范滇元. 光通过纳米颗粒随机散射体透射光强的计算及分析 [J]. 光学学报, 2007, 27(5): 951-956.
 - 19 Newhauser W D, Rechner L, Mirkovic D, *et al.* Benchmark measurements and simulations of dose perturbations due to metallic spheres in proton beams [J]. Radiation Measurement, 2013, 58: 37-44.
 - 20 Wang L H, Jacques S L, Zheng L Q. MCML - Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, 47(2): 131-146.
 - 21 Zurk L M, Tsang L, Ding K H, *et al.* Monte Carlo simulations of the extinction rate of densely packed spheres with clustered and non-clustered geometries [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(8): 1772-1781.
 - 22 Pan T, Dali S S, Sevik-Muraca E M. Evaluation of photon migration using a two speed model for characterization of packed powder beds and dense particulate suspensions [J]. Optics Express, 2005, 13(10): 3600-3618.
 - 23 Taroni P, Tarvainen T, Kolehmäinen V, *et al.* Utilising the coupled radiative transfer-diffusion model in diffuse optical tomography [C]. SPIE, 2013, 8799: 879907.
 - 24 Ntziachristos V, Tarvainen T, Pulkkinen A, *et al.* Image reconstruction in quantitative photoacoustic tomography using the radiative transfer equation and the diffusion approximation [C]. SPIE, 2013, 8800: 880006.
 - 25 Boley C D, Khairallah S A, Rubenchik A M. Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing [J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 2477-2482.

- 26 Zhou X B, Li S S, Stamnes K. Geometrical-optics code for computing the optical properties of large dielectric spheres[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(21): 4295-4306.
- 27 Shen J Q, Wang H R. Calculation of Debye series expansion of light scattering[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(13): 2422-2428.
- 28 Liu Lifeng, Dong Liying, Dong Ling, *et al.* Research of coaxial powder stream field in laser manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 081405.
刘立峰, 董丽莹, 董玲, 等. 激光制造中同轴粉末流场分析与检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 081405.
- 29 Ma Guangyi, Wang Jiangtian, Niu Fangyong, *et al.* Influence of powder distribution on the Al_2O_3 thin-wall ceramic formed by laser engineered net shaping[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0103006.
马广义, 王江田, 牛方勇, 等. 粉末分布对激光近净成形 Al_2O_3 陶瓷薄壁件表面形貌的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0103006.
- 30 Medina J I, Pinkerton A J. A CFD model of the laser, coaxial powder stream and substrate interaction in laser cladding[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 337-346.
- 31 Dingle K, Lamb J S W, Lázaro-Camí J A. Knudsen's law and random billiards in irrational triangles[J]. *Nonlinearity*, 2012, 26(2): 369-388.
- 32 Wang Buxuan, Li Chunhui, Peng Xiaofeng. Stability analysis of nanoparticle suspension[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(2): 167-173.
王补宣, 李春辉, 彭晓峰. 纳米颗粒悬浮液稳定性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 167-173.
- 33 Burger T, Ploss H J, Kuhn J, *et al.* Diffuse reflectance and transmittance spectroscopy for the quantitative determination of scattering and absorption coefficients in quantitative powder analysis[J]. *Applied Spectroscopy*, 1997, 51(9): 1323-1329.
- 34 Xia Changming, Tian Hongchun, Hou Zhiyun, *et al.* Laser performance of Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber using the powder sinter direction drawn rod technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0205001.
夏长明, 田洪春, 侯峙云, 等. 基于掺杂粉末直拉棒工艺掺镱光子晶体光纤激光特性[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0205001.