

文章编号: 0253-2239(2009)05-1296-05

# 激光熔覆中球形粒子对激光散射强度的研究

董 哲 杨洗陈

(天津工业大学激光加工中心, 天津 300160)

**摘要** 为了研究同轴激光熔覆过程中球形粉末粒子和激光的相互作用,为激光熔覆中激光器和粒子的选择提供一定的理论依据,在进行了一定假设的前提下,应用米氏(Mie)散射理论建立了激光被球形粉末粒子散射的物理模型,应用 Mathematica 数学软件绘制出了在不同粒子半径和不同激光波长情况下,激光被球形粉末粒子散射后的强度分布图,并对模拟结果进行了分析。研究结果显示:金属粉末粒子的半径和激光的波长是影响激光散射强度分布的重要因素。结果表明:当光学常数  $q \leq 30$  的时候,散射光强在偏离传播方向  $20^\circ$  以外还有一个次极大值,且次极大值占总散射光强比例较大,不利于熔池的形成;当光学常数  $q \geq 30$  的时候,散射后的光强主要集中在偏离传播方向  $5^\circ \sim 6^\circ$  的小范围内,且在此范围内的散射强度很高,有利于提高激光熔覆效率。

**关键词** 激光熔覆; 强度分布; 球形粉末; Mie 散射理论; 散射模型

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1296

## Research of Scattering Intensity with Spherical Particles in Laser Cladding

Dong Zhe Yang Xichen

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** In order to analyze the interaction of laser and spherical particles in coaxial laser cladding, the physical model of laser scattering by spherical particles is established by using Mie scattering theory in certain assumptions, which will help select the laser and the spherical powder. The distributions of laser intensity with radius of particles and wavelength of laser were drawn by Mathematica software. The simulated results were analyzed. The results show the particles radius and laser wavelength are important parameters affecting the distribution of scattering intensity. There is a secondary maximum with direction deviation beyond  $20^\circ$  as the optical factor is less than 30. It accounts for a higher proportion of scattered light intensity, and it is adverse to the formation of molten pool. The scattering intensity is concentrated in the range from  $5^\circ$  to  $6^\circ$  as the optical factor is more than 30, and the scattering intensity is very strong in this range, which will promote laser cladding.

**Key words** laser cladding; distribution of intensity; spherical powder; Mie scattering theory; model of scattering

## 1 引 言

激光熔覆技术已发展成为直接制造三维金属实体零件和高精度修复、再制造重大设备中贵重零件的有效手段<sup>[1]</sup>。在激光熔覆过程中,要高效地利用激光输出的能量就有必要研究激光与粉末粒子的相互作用,要研究激光与粒子的相互作用就要涉及激光被粉末粒子的散射问题,本文将应用普遍适用于

光学散射的 Mie 理论进行研究。

当电磁波入射到一球体上时,会产生散射,吸收和衍射现象,任何一个单散射物体被光照射后产生的散射光形态可以描述这个物体的物理特性。严格的光散射解是把光波看作是电磁波,当入射到球形粒子时,认为电磁波在球形粒子的边界上是连续的,从而对粒子的内部和外部区域的麦克斯韦方程组进

收稿日期: 2008-06-23; 收到修改稿日期: 2008-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(60478004)和天津市科技支持计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助项目。

作者简介: 董 哲(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆方面研究。E-mail:dongzhe210@126.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

行展开求解,最终得到散射方程的严格解。

本文将在 Mie 散射理论严格解的基础上,建立激光被粒子散射的物理模型,模拟出激光被粉末颗粒的散射分布图,并对结果进行分析。

## 2 理论基础

### 2.1 Mie 理论

光波被均匀球状颗粒散射可由 Mie 散射理论给出,该理论的精确解可在球坐标下通过球谐函数展开得到。当一束光入射到球形粒子上,模型如图 1 所示。

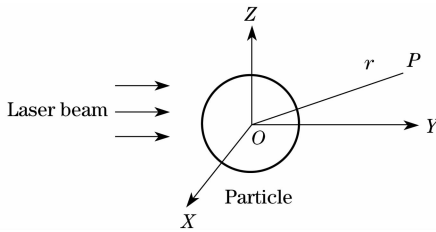


图 1 球形粒子的散射模型

Fig. 1 Scattering model of spherical particle

由麦克斯韦方程组和连续边界条件,可以得到 P 点散射电场的精确解<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} E_r^{(s)} = \frac{1}{k^{(1)2}} \frac{\cos \phi}{r^2}, \\ \sum_{l=1}^{\infty} l(l+1) {}^e B_l \zeta_l^{(1)} P_l^{(1)} \cos \theta, \\ E_{\theta}^{(s)} = -\frac{1}{k^{(1)2}} \frac{\cos \phi}{r} \times, \\ \sum_{l=1}^{\infty} \left[ {}^e B_l \zeta_l^{(1)} P_l^{(1)'} \cos \theta \sin \theta - i^m B_l \zeta_l^{(1)} \frac{P_l^{(1)} \cos \theta}{\sin \theta} \right], \\ E_{\phi}^{(s)} = -\frac{1}{k^{(1)2}} \frac{\sin \phi}{r} \times \\ \sum_{l=1}^{\infty} \left[ {}^e B_l \zeta_l^{(1)'} \frac{P_l^{(1)} \cos \theta}{\sin \theta} - i^m B_l \zeta_l^{(1)} P_l^{(1)'} \cos \theta \sin \theta \right] \end{cases}, \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} {}^e B_l = i^{l+1} \frac{2l+1}{l(l+1)} \times \\ \frac{n\psi_l'(q)\psi_l(nq) - \psi_l(q)\psi_l'(nq)}{n\zeta_l^{(1)'}(q)\psi_l(nq) - \zeta_l^{(1)}(q)\psi_l'(nq)}, \\ {}^m B_l = i^{l+1} \frac{2l+1}{l(l+1)} \\ \frac{n\psi_l(q)\psi_l'(nq) - \psi_l'(q)\psi_l(nq)}{n\zeta_l^{(1)}(q)\psi_l'(nq) - \zeta_l^{(1)'}(q)\psi_l(nq)} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\psi_l(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} J_{l+1/2}(x), \quad (3)$$

$$\zeta_l(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} H_{l+1/2}(x), \quad (4)$$

$J_{l+1/2}(x)$ 和  $H_{l+1/2}(x)$ 分别为贝塞尔函数和汉克尔函数, $n$ 为球形粒子与介质之间的相对折射率, $q$ 为光学常数,大小为  $\frac{2\pi a}{\lambda}$  ( $a$ 为粒子半径, $\lambda$ 为激光波长), $P_l^{(1)} \cos \theta$ 为一阶勒让德函数, $\zeta_l(x)$ , $\psi_l(x)$ 和  $P_l^{(1)} \cos \theta$ 函数上边各加一撇表示对各自的自变量进行微分。

### 2.2 Mie 散射理论中 l 的取值

德拜曾经推导了对于所有  $l$  都有效的近似公式,并且证明  $l+1/2$  一旦超过  $q$  时,分波的振幅迅速衰减到零,因此只考虑前  $q$  项,能够证明最终的结果和惠更斯-基尔霍夫衍射定理的结果基本相同<sup>[3]</sup>。

## 3 散射模拟及分析

### 3.1 散射模型

对于激光熔覆,可以认为粉末粒子近似为球形,并认为粉末粒子内部分布是均匀的<sup>[4~6]</sup>。所用熔覆粉末的半径为  $18 \sim 80 \mu\text{m}$  的球形粒子<sup>[7~8]</sup>,由于当粉末粒子半径  $a$  小于激光波长  $\lambda$  时,电场分布不集中,很大一部分光沿反方向射回,球体对光的散射能力很强;当粉末粒子半径  $a$  大于激光波长  $\lambda$  时,电场分布集中在散射角较小( $20^\circ$ 以内)的范围里,球体的散射能力不强<sup>[9~11]</sup>,因此可以认为当粉末半径大于激光波长时粉末粒子对激光的散射场可以代表熔覆过程中的激光散射场。进行散射模拟时所取的参数如下:球形粉末粒子半径为常用的  $18 \mu\text{m}$ ,  $33 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $80 \mu\text{m}$ ,球形粒子的折射率  $n=1.25+0.01i$ ,入射光波长为常用的  $0.8 \mu\text{m}$ ,  $1.06 \mu\text{m}$ ,  $5.4 \mu\text{m}$ ,  $10.6 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 不同粒子半径的散射模拟结果及分析

对于  $\text{CO}_2$  激光器(波长为  $10.6 \mu\text{m}$ ),应用数学软件绘制出激光经不同粒子半径散射后的归一化光强分布图如图 2,图 3 所示。

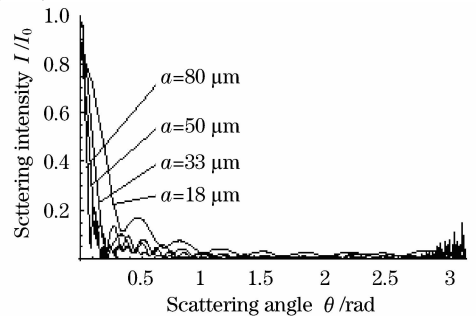


图 2 散射光强和前向散射角  $\theta$  之间的关系  
Fig. 2 Relation between scattering intensity and scattering angle  $\theta$

图 3 所示,当粒子半径为  $18\ \mu\text{m}$ (此时  $q=10$ ) 的时候,散射光强主要集中在前向  $15^\circ\sim 20^\circ$  的范围内,在  $20^\circ$  以外的范围,散射光强存在一定的起伏;当粒子半径为  $33\ \mu\text{m}$ (此时  $q=20$ ) 的时候,散射光强主要集中在前向  $10^\circ$  左右,在  $10^\circ$  以外的范围,散射光强仍然存在一定的起伏,逐渐向无序过度;当粒子半径

为  $50\ \mu\text{m}$ (此时  $q=30$ ) 的时候,散射光强主要集中在前向  $5^\circ\sim 6^\circ$  的范围内,在此范围之外的散射光强起伏较小且杂乱无序;当粒子半径为  $80\ \mu\text{m}$ (此时  $q=47$ ) 的时候,散射光强也集中于  $3^\circ\sim 5^\circ$  的范围内,而且此范围内的散射光强占总散射光强的比例很高。

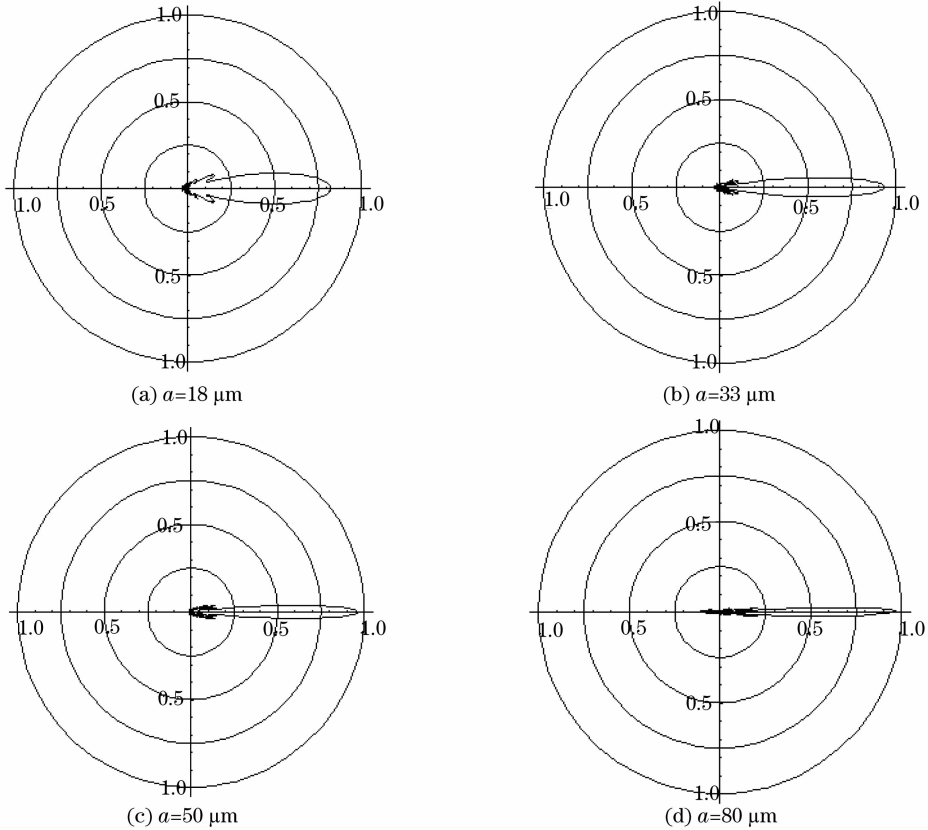


图 3 散射强度分布模拟

Fig. 3 Simulation of the scattering intensity distributions

对比激光被不同半径的粉末粒子散射后的强度图样,可以看出,当粒子半径为  $18\ \mu\text{m}$  的时候,散射光强主要集中在前向  $20^\circ$  内,且在前向  $30^\circ$  的方向有一个次极大值;当粒子半径为  $33\ \mu\text{m}$  的时候,散射光强主要集中在前向  $10^\circ$  内,在  $10^\circ$  以外的范围内出现多次次极大值,但次极大值占总散射光强的比例有所降低;当粒子半径为  $50\ \mu\text{m}$  的时候,光强主要集中在前向  $5^\circ\sim 6^\circ$  的范围内,前向  $5^\circ\sim 6^\circ$  的范围外出现很多次极大值,但次极大散射光强在总散射光强中所占的比例进一步减少;当粒子半径为  $80\ \mu\text{m}$  的时候,光强主要集中在  $3^\circ\sim 5^\circ$  的范围,在此范围之外的散射光强占总散射光强的比例很小。

### 3.3 不同激光波长的散射模拟结果及分析

对于半径为  $20\ \mu\text{m}$  的球形粒子,应用数学软件绘制不同激光波长经粉末粒子散射后的归一化光强分布图如图 4,图 5 所示。

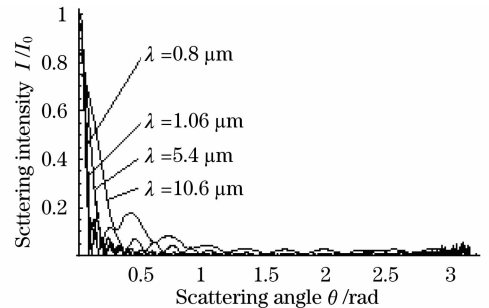


图 4 散射光强和前向散射角  $\theta$  之间的关系  
Fig. 4 Relation between the scattering intensity and the scattering angle  $\theta$

对于不同的激光波长,从图 5 可以看出,当使用  $\text{CO}_2$  激光器的时候,激光波长为  $10.6\ \mu\text{m}$ (此时  $q=11$ ),散射光强主要集中在前向  $15^\circ\sim 20^\circ$  的范围内,次极大值也很大;当使用  $\text{CO}$  激光器的时候,激光波长为  $5.4\ \mu\text{m}$ (此时  $q=22$ ),散射光强主要集中在前

向  $10^\circ$  以内,次极大值有所减小;当使用 YAG 激光器和光纤激光器的时候,激光波长分别为  $1.06 \mu\text{m}$  (此时  $q=106$ ) 和  $0.8 \mu\text{m}$  (此时  $q=141$ ),此时散射光强的曲线在  $3^\circ\sim 5^\circ$  的范围内近似重合,散射光强

主要集中在前向  $5^\circ$  以内,而且在此范围内的散射光强占到总散射光强的比例很高,可以知道当光学常数  $q\geq 100$  的时候,散射光强曲线变化不大。

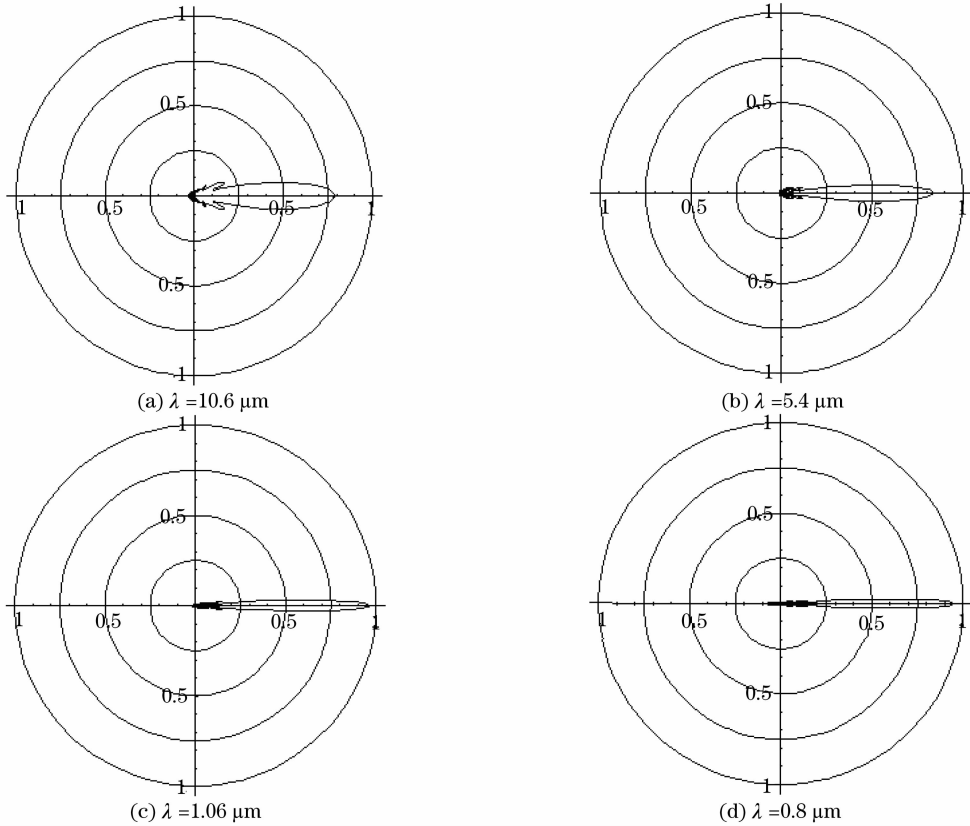


图 5 散射强度分布模拟

Fig. 5 Simulation of the scattering intensity distributions

对比不同激光波长被粉末粒子散射后的强度图样,可以看出,当激光波长为  $10.6 \mu\text{m}$  的时候,散射光强主要集中在前向  $20^\circ$  内,在此区域内的散射光强占总散射光强的比例接近  $80\%$ ,其他方向有较大起伏;当激光波长为  $5.4 \mu\text{m}$  的时候,散射光强主要集中在前向  $10^\circ$  内,在此范围内的散射光强占总散射光强的比例有所增大,接近  $90\%$ ;当激光波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的时候,激光的散射强度更加集中,此时前向  $3^\circ\sim 5^\circ$  范围内的散射光强大约占总散射光强比例接近  $95\%$ ,在此范围外的散射光次极大值很多但所占比例很小;当激光波长为  $0.8 \mu\text{m}$  的时候,激光的散射强度相比其他波长更加集中,此时前向  $3^\circ\sim 5^\circ$  范围内的散射光强大约占总散射光强比例达到  $95\%$ 。

## 4 结 论

在建立散射模型的基础上,模拟出了在熔覆过程中激光被粉末粒子散射的光强分布,并得出以下

结论:

- (1) 当光学常数  $q\geq 30$  的时候,散射光强主要集中在前向  $3^\circ\sim 5^\circ$  范围内,散射能量的集中将有利于熔覆中形成熔池,这将极大有利于提高加工效率。
- (2) 对于相同的激光波长,球形粉末的半径越大,散射光强就越向前向  $5^\circ\sim 6^\circ$  范围集中,聚光效果越好,对于激光的利用率越高。
- (3) 对于相同的半径的粒子,激光器输出波长越小,散射光强越向前向  $5^\circ\sim 6^\circ$  集中,且在此范围内的散射光强占总散射光强的比例越大,越有利于激光熔覆。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser cladding [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 993~997  
杨洗陈,雷剑波,刘运武等.激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J].中国激光,2006, **33**(7): 993~997
- 2 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006, 644~

- 645  
马科斯·玻恩,埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译,北京:电子工业出版社,2006,644~645
- 3 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun transl. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2006,648  
马科斯·玻恩,埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译,北京:电子工业出版社,2006,648
- 4 Ye Yunxia, Fan Dianyun. Theoretical analysis and numerical calculation of transmitted light intensity of light scattering from nano-particles random scatterers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):951~956  
叶云霞,范滇云. 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
- 5 Han Yiping, Du Yungang, Electromagnetic scattering for a nonspherical aerosols with arbitrary shaped beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006,**26**(4):630~633  
韩一平,杜云刚. 非球形大气粒子对任意波束的电磁散射特性[J]. 光学学报,2006,**26**(4):630~633
- 6 Kong Weijin, Yun Maojin, Cui Chunling *et al.* Diffraction property of multi-layer dielectric grating with trapezium groove [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,**28**(7):1415~1419  
孔伟金,云茂金,崔春玲等. 梯形介质膜光栅衍射特性分析[J]. 光学学报,2008, **28**(7):1415~1419
- 7 Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong *et al.*. Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4):562~566  
席明哲,虞钢,张永忠等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. 中国激光,2005,**32**(4):562~566
- 8 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on nth cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,**28**(3):593~598  
汪洪源,张伟,王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间可见光特性[J]. 光学学报,2008; **28**(3):593~598
- 9 Ren Zhibin, Lu Zhenwu, Zhu Haidong *et al.*. Study on microsphere light scattering [J], *Infrared and Laser Engineering*, 2004,**33**(4):401~404  
任智斌,卢振武,朱海东等. 微球体光散射的研究 [J]. 红外与激光工程,2004,**33**(4):401~404
- 10 Li Wei, Yang Kecheng, Xia Min *et al.*. Distribution characteristics of scattered light intensity on coated air bubble in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,**28**(4):799~803  
李微,杨克成,夏珉等. 光在水中吸附膜层气泡上的散射特性[J]. 光学学报,2008,**28**(4):799~803
- 11 Guo Lixin, Kim Cheyoung, Wu Zhensen. Light scattering from a spherical particle above a slightly rough surface and the calculation of the scattering cross section[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003,**23**(6):717~723  
郭立新,金彩英,吴振森. 微粗糙面上方球形粒子的光散射及其散射截面的计算[J]. 光学学报, 2003,**23**(6):717~723