

文章编号: 0258-7025(2009)05-1267-06

# 混合元素法激光立体成形过程粉末输送性研究

张凤英 陈 静 谭 华 林 鑫 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 混合元素法激光立体成形(LSF)过程中元素粉末的输送性对沉积试样的化学成分有重要影响,为实现混合元素法激光立体成形过程中各元素粉末的输送一致性,进而保证沉积试样的化学成分与目标成分一致,对混合元素法激光立体成形过程中的粉末输送性展开研究。结合喷嘴管道内外气-粉两相流分析,建立粉末颗粒在喷嘴管道内外的运动微分方程,揭示元素粉末特性对粉末输送性的影响规律。结果表明,送粉工艺一定的条件下,元素粉末的出口速度和加速度均随粉末密度和粒度的减小而增大。各元素粉末的输送一致性条件为在送粉工艺一定的情况下,各元素粉末流具有相同的出口速度。基于以上的粉末输送一致性条件,获得混合元素法激光立体成形过程中各元素粉末特性的匹配关系,进而保证了激光直接沉积试样的成分与预混合元素粉末成分的一致。

**关键词** 激光技术; 粉末输送性; 运动模型; 激光立体成形; 混合元素粉末

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1267

## Powder Delivery Behavior During Laser Solid Forming from Blended Elemental Powders

Zhang Fengying Chen Jing Tan Hua Lin Xin Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract** The delivery behavior of the elemental powder has important influence on the composition of as-deposited sample during laser solid forming (LSF) from blended elemental powders. In order to ensure the consistency of the elemental powders delivery processes, and further to realize the composition control, the delivery behavior of the elemental powder during LSF is investigated. Based on the analysis of gas-powder two-phase flow, a mathematical model is established to describe the motion of the powder particles inside and outside the nozzle, and the influence of the powder characteristics on the powder delivery behavior is investigated. It is found that both the powder particle exit velocity and the motion acceleration increase with the decrease of the powder particle size and density. The consistency condition for different elemental powders delivery process is obtained, which is the identity of the exit velocity of the elemental powders. Based on the consistency condition, the match relation among the elemental powder characteristics (including the particle size and density) can be obtained, which ensures the consistency in composition between the laser deposits and the premixed elemental powders during LSF from blended elemental powders.

**Key words** laser technique; powder delivery behavior; motion model; laser solid forming; blended elemental powders

## 1 引 言

激光立体成形(LSF)技术是 20 世纪 90 年代中期迅速发展起来的一项新的先进制造技术,能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速、近净成

形<sup>[1~4]</sup>。激光立体成形技术所采用的同步送粉方式赋予了这项技术实现成分柔性化设计的可能性,即将构成合金的各元素粉,或某些元素粉和中间合金粉混合送入激光熔池,在运动的激光熔池中进行合

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(50871089)、西北工业大学英才培养计划(05XE0131)、国家 973 计划(2007CB613805)和高等学校学科创新引智计划(08040)资助项目。

作者简介: 张凤英(1980—),女,博士研究生,主要从事激光立体成形技术方面的研究。E-mail: zfy327@126.com。

导师简介: 黄卫东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事凝固原理、高能束流加工及成形等方面的研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn。

金化,进而通过多层多道激光熔覆沉积,实现合金的整体均匀或梯度成形,这为进一步实现高性能复杂结构金属零件的材料设计-制备成形-组织性能一体化控制创造了条件<sup>[5]</sup>。另外,混合元素法激光立体成形技术的出现也为新型合金设计以及激光立体成形专用合金粉末设计提供了可行的技术途径。

Takeda T.等<sup>[6~8]</sup>分别使用混合元素法研究了激光熔覆 Fe-Cr-Ni 和激光表面处理 Fe-Co-Al 系合金,为混合元素法激光立体成形技术的发展奠定了基础。Banerjee 等<sup>[9~14]</sup>较为系统地开展了钛合金混合元素法激光立体成形技术研究,包括 Ti-xV、Ti-xMo 以及 Ti-8Al-xV(0≤x≤25)合金成分梯度试样在成形过程中的成分、组织及相分布特征,Ti-TiB、Ti-6Al-4V-TiB 复合材料中 TiB 沉淀相的结构特征,以及 Ti-Nb-Zr-Ta 系新型 β 医用植入体钛合金的成分-组织-性能的关系等。林鑫等<sup>[15~17]</sup>采用混合元素法研究了合金 Ti/Rene88DT, Ti-6Al-4V/Rene88DT 以及 Ti-Ni 激光立体成形功能梯度材料的组织演化及相转变。

然而,与采用预合金粉末为原料的激光立体成形技术不同,采用混合元素法激光立体成形试样时不可避免地遇到成形试样的成分可重复性差的难题。成形试样的成分往往随工艺条件的变化而产生较大波动。这是由于元素粉末特性对粉末的输送性(粉末运动速度、粉末流发散角等)有重要影响,当各元素粉末性质不匹配时,必然导致混合元素粉末流中各元素粉末的输送性不一致,进而引起送入熔池的元素粉末比例随工艺条件的变化而波动。为实现混合元素法激光立体成形的成分控制,即控制送入熔池的元素粉末比例与预混合元素粉末比例一致,本文针对混合元素法激光立体成形过程中元素粉末的输送性展开研究,通过建立粉末颗粒在送粉喷嘴管道内外的运动模型,获得粉末特性与粉末输送性的关系,并在此基础上获得粉末输送性一致的条件,从而保证沉积试样的成分与目标成分一致。

## 2 基本假设

激光立体成形过程中,粉末颗粒随载粉气流的输送可分为两个阶段:1)送粉喷嘴管道内的输送过程;2)粉末颗粒离开喷嘴后的输送过程,即由送粉喷嘴出口处至熔池表面的输送过程。

为计算简单,特对粉末颗粒在载粉气流中的输送做如下假设:

1) 金属粉末颗粒具有相同的尺寸,粉末颗粒直

径为  $d_p$ ,且均为球形;

2) 粉末颗粒只受到重力、气动阻力和摩擦力的作用。附加质量力、Basset 力、浮力、Magnus 力和 Saffman 力等忽略不计;

3) 喷嘴管道内的载粉气流为均匀气流,管道内的粉末颗粒具有相同的运动速度  $v_p$ ;

4) 由于气-粉两相流中粉末颗粒很少<sup>[18]</sup>,忽略粉末颗粒之间的碰撞。

## 3 粉末颗粒在喷嘴管道内的运动分析

假设气体-粉末颗粒两相混合物在倾斜角为  $\theta$ ,内径为  $d$ ,长度为  $S_n$  的直长管道内沿  $l$  方向流动。由于粉末颗粒在送粉喷嘴管道内具有相同的运动速度,为方便计算摩擦力,以粉末颗粒群为研究对象。如果已知气体的质量流量为  $q_{mg}$ ,颗粒的质量流量为  $q_{mp}$ ,气流速度为  $v_g$ ;取高  $\delta l$  的圆柱体(图 1 中虚线所示)内的粉末颗粒群为研究单元,则粉末颗粒群的运动微分方程为

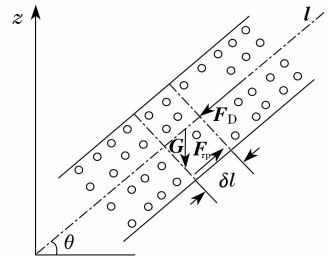


图 1 喷嘴管道内粉末颗粒群受力分析

Fig. 1 Force diagram of the powder particles group in nozzle

$$F_D + G \sin \theta - F_{fr} = q_{mp} \frac{\delta l}{v_p} \frac{dv_p}{dt}, \quad (1)$$

(1)式中左侧第一项  $F_D$  表示作用在粉末颗粒群上的气动阻力为,

$$F_D = N f_D = \frac{q_{mp} \delta l}{v_p} \frac{6}{\pi d_p^3 \rho_p} f_D, \quad (2)$$

式中  $N$  为研究单元内的粉末颗粒数,  $F_{fr}$  为摩擦力,  $\rho_p$  为粉末颗粒密度,  $f_D$  为单颗粉末所受到的气动阻力,其表达式为

$$f_D = \frac{\rho_g C_D (v_g - v_p)^2}{2} \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (3)$$

其中  $\rho_g$  为载粉气体密度,  $C_D$  为气动阻力系数。

气动阻力系数  $C_D$  的经验表达式很多,最常用的为 Klyachko 和 Putnam 提出的圆球阻力系数计算式<sup>[19]</sup>

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (Re < 800), \quad (4)$$

其中  $Re$  为雷诺数,可表达为

$$Re = \rho_g d_p |v_g - v_p| / \mu_g, \quad (5)$$

其中  $\mu_g$  为载粉气体粘度。

载粉气流速度  $v_g$  可表示为

$$v_g = \frac{Q_c}{\pi(d/2)^2}, \quad (6)$$

其中  $Q_c$  为载粉气体流量。

(1)式左侧第二项  $G$  表示粉末颗粒群受到的重力,可表示为

$$G = q_{mp} \frac{\delta l}{v_p} g. \quad (7)$$

(1)式左侧第三项  $F_{\tau p}$  表示粉末颗粒群与管壁之间的摩擦力。由于粉末颗粒群在喷嘴管道内的运动非常复杂,要确切地表示管壁对颗粒群的摩擦力几乎不可能。这里视颗粒群为伪流体,仿照管壁对气体的摩擦力,将管壁对粉末颗粒群的摩擦力写成<sup>[20]</sup>

$$F_{\tau p} = \lambda_p \frac{\delta l}{d} \frac{q_{mp}}{2}, \quad (8)$$

式中  $\lambda_p$  为颗粒群伪流体的沿程能量损失系数,可表达为<sup>[20]</sup>

$$\lambda_p = \frac{2.67(gd)^{5/6}}{v_p v_g^{2/3}} - \frac{2v_i gd}{v_p^2 v_g}, \quad (9)$$

其中  $v_i$  为粉末颗粒的自由沉降速度,可由下式求解

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p g}{6} = \frac{C_{Df} \rho_g (v_i)^2}{2} \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (10)$$

其中

$$C_{Df} = \frac{24}{Re_i} (1 + 0.15 Re_i^{0.687}) = \frac{24 \mu_g}{\rho_g d_p v_i} \left[ 1 + 0.15 \times \left( \frac{\rho_g d_p v_i}{\mu_g} \right)^{0.687} \right] \quad (11)$$

为粉末颗粒自由沉降时的气动阻力系数,  $Re_i$  为粉末颗粒自由沉降时的雷诺数。

将(2)式,(7)式,(8)式代入(1)式,可得粉末颗粒群在喷嘴管道内的运动微分方程式

$$\frac{3C_{Df} \rho_g (v_g - v_p)^2}{4\rho_p d_p} + g \sin \theta - \frac{\lambda_p v_p^2}{2d} = \frac{dv_p}{dt}. \quad (12)$$

粉末颗粒在喷嘴管道内的运动距离  $S_p$  可表示为

$$S_p = \int_0^t v_p dt. \quad (13)$$

将(12)式代入(13)式,假设粉末颗粒进入喷嘴管道的初速度为 0,则粉末颗粒的出口速度  $v_{pe}$  可由下式获得

$$S_n = \int_0^{v_{pe}} \frac{v_p dv_p}{\frac{3C_{Df} \rho_g (v_g - v_p)^2}{4\rho_p d_p} + g \sin \theta - \frac{\lambda_p v_p^2}{2d}}. \quad (14)$$

其中  $S_n$  为送粉喷嘴长度。

求解公式(14)即可获得送粉工艺一定的条件下,元素粉末出口速度与粉末特性(密度和粒度)之间的关系。

#### 4 粉末颗粒在喷嘴管道外的运动分析

离开送粉喷嘴后,载粉气流与周围的静止流体发生相互作用,射流边界逐渐向两侧扩展。由于载粉气流不再是均匀气流,送出喷嘴后,大部分粉末颗粒必然由于载粉气流所施加的气动阻力方向的改变而发生运动方向的改变。因而针对粉末颗粒离开送粉喷嘴的运动,需对单颗粉末的受力状态进行分析,粉末颗粒的受力分析如图 2 所示,送出喷嘴后粉末颗粒的运动微分方程为

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3C_{Df} \rho_g (v_p - v_g) |v_g - v_p|}{4\rho_p d_p} + \mathbf{g}, \quad (15)$$

送出喷嘴瞬间粉末颗粒沿  $-l$  方向的运动微分方程表达为

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3C_{Df} \rho_g (v_g - v_{pe})^2}{4\rho_p d_p}. \quad (16)$$

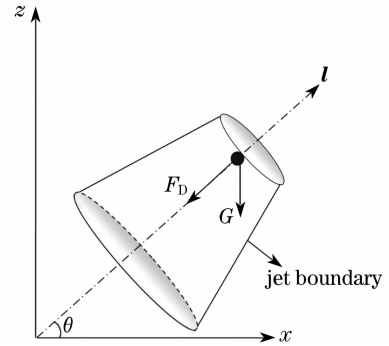


图 2 出口瞬间粉末颗粒的受力分析

Fig. 2 Force diagram of the powder particle at the nozzle exit

对(14)式,(16)式进行求解即可获得送粉工艺一定的条件下,元素粉末出口瞬间加速度与粉末特性(密度和粒度)之间的关系。

#### 5 送粉一致性条件的获得

为保证各元素粉末的输送一致性,需保证各元素粉末流离开送粉喷嘴后具有相同的发散角。以混合元素法激光立体成形 Ti-Al-V 系合金为例,计算四路同轴送粉条件下各元素粉末出口速度和加速度随粉末颗粒密度、粒度的变化,其中载粉气流为氩气。图 3 所示为 Ti, Al, V 粉末的出口速度随粉末颗粒直径的变化,图 4 所示为出口瞬间由气动阻力引起的加速度随粉末颗粒直径的变化,计算过程所

采用的参数值如表 1 所示<sup>[19,21]</sup>,其中  $\rho_{Ti}, \rho_{Al}, \rho_V$  分别表示 Ti, Al, V 粉末的密度。从图 3 和图 4 中可以看出,粉末颗粒的出口速度和加速度均随粉末密度和粒度的减小而增大。另外,对比图 3 和图 4 可以清晰地发现,在相同的气流场中,一旦元素粉末在出口处具有相同的速度值,则同时可获得几乎相等的加速度值,根据公式(15),(16)进一步分析可知,各元素粉末流在送出喷嘴后可具有相同的速度场,进而保证了各元素粉末流送出喷嘴后具有相同的发散角。

根据以上分析,各元素粉末流的输送一致性条件(即送出喷嘴后各元素粉末流具有相同的速度场和发散角的条件)为

$$v_{pe}(A) = v_{pe}(B) = v_{pe}(C) = \dots\dots\dots v_{pe}(X), \tag{17}$$

其中  $v_{pe}(X)$ 代表元素粉末 X 的出口速度。

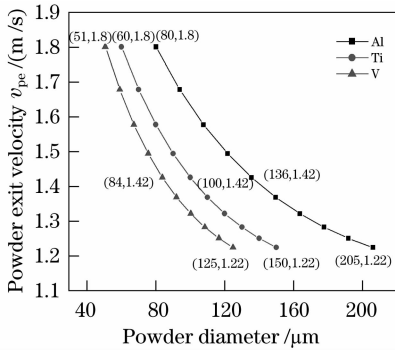


图 3 Ti, Al, V 粉末出口速度与粉末颗粒直径的关系  
Fig. 3 Exit velocities of Ti, Al, and V powders versus the powder particles diameters

表 1 计算过程中采用的参数值

Table 1 Parameters used in the computation

| Parameter | $\rho_g /$<br>( $kg/m^3$ ) | $\mu_g /$<br>( $kg/s \cdot m$ ) | $g /$<br>( $m/s^2$ ) | $d / m$              | $\theta / (^\circ)$ | $Q_c /$<br>( $m^3/s$ ) | $S_n / m$ | $\rho_{Ti} /$<br>( $kg/m^3$ ) | $\rho_{Al} /$<br>( $kg/m^3$ ) | $\rho_V /$<br>( $kg/m^3$ ) |
|-----------|----------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Value     | 1.623                      | $2.294 \times 10^{-5}$          | 9.8                  | $2.5 \times 10^{-3}$ | 60                  | $5 \times 10^{-5}$     | 0.05      | 4510                          | 2696                          | 6110                       |

表 2 激光立体成形工艺参数

Table 2 Processing parameters of the LSF route

| Laser power /<br>W | Scanning velocity /<br>( $mm/min$ ) | Spot diameter /<br>mm | Nozzle inside<br>diameter /mm | Powder feeding<br>rate /( $g/min$ ) | Carrier gas flow /<br>( $L/h$ ) |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1250~2300          | 150~600                             | 3.0                   | 2.5                           | 4.5                                 | 180                             |

表 4 和图 5 所示为不同工艺条件下所获得的成形试样的成分以及成形试样中元素质量分数。从表 4 和图 5 中均可以看出,沉积试样的成分并没有随工艺条件的变化而产生大的波动,所获得沉积试样的化学成分均符合 GB/T 3620.1 中 Ti-6Al-4V 的

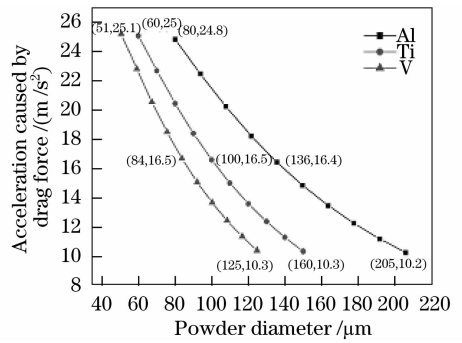


图 4 Ti, Al, V 粉末在出口瞬间由气动阻力引起的加速度与粉末颗粒直径的关系

Fig. 4 Accelerations caused by drag force of Ti, Al, and V powders at the nozzle exit versus the powder particles diameters

为进一步验证送粉一致性条件的准确性,结合计算结果调整 Ti, Al, V 元素粉末性质使之匹配,并以 Ti, Al, V 粉末为原材料进行激光立体成形工艺实验,实验所采用的激光立体成形工艺参数如表 2 所示,粉末材料特性以及本实验条件下元素粉末的理论计算出口速度如表 3 所示。将 Ti, Al, V 粉末按 Ti-6Al-4V 的成分比混合后,装入充干燥氩气的混料罐里,并在星型球磨机上机械混合 6 h 后装入送粉器。基材选用纯 Ti 板。实验过程中混合金属粉末由 GTV PF2/2 型送粉器送出经同轴送粉喷嘴送到激光熔池中。在不同工艺条件下制备 50 mm × 12 mm × 3 mm 的激光立体成形薄板试样,并利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定成形试样的成分。

成分标准。以上结果表明,根据混合元素法激光立体成形过程中的粉末输送一致性条件,调整元素粉末性质使之匹配,能够实现混合元素法激光立体成形试样的成分与预混合元素粉末成分的一致性。

表 3 Ti, Al, V 元素粉末性质及理论计算出口速度

Table 3 Characteristics and calculated exit velocities of Ti, Al, and V powders

| Powder material | Powder morphology | Equivalent diameter / $\mu\text{m}$ | Calculated exit velocity / (m/s) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Ti              | Spherical         | 65.40                               | 1.73                             |
| Al              | Spherical-like    | 83.55                               | 1.77                             |
| V               | Irregular         | 56.81                               | 1.71                             |

表 4 混合元素粉末及激光立体成形试样的化学成分

Table 4 Chemical compositions of the premixed powders and as-deposited samples

| Composition of the premixed powder | Compositions of deposits (mass fraction, %) |           |           |
|------------------------------------|---|-----------|-----------|
|                                    | Ti  | Al        | V         |
| 90%Ti + 6%Al + 4%V                 | 89.72~90.63                                 | 5.78~6.12 | 3.62~4.14 |

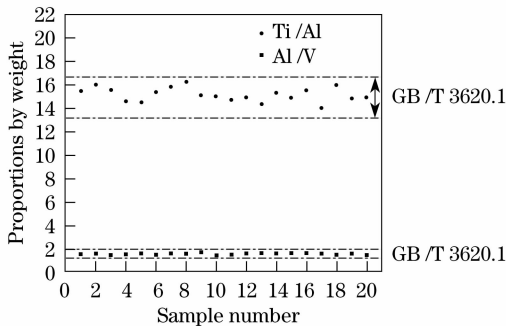


图 5 不同工艺条件下成形试样的 Ti/Al, Al/V 元素含量之比

Fig. 5 Proportions by weight of Ti to Al and Al to V of the deposits obtained at various processing parameters

## 6 结 论

结合气体-粉末颗粒两相流分析,建立了粉末颗粒在送粉喷嘴管道内外的运动模型;

获得了粉末颗粒特性对粉末输送性的影响,粉末颗粒在出口瞬间的速度和加速度均随粉末密度和粒度的减小而增大;

获得了混合元素法激光立体成形过程中元素粉末流的输送一致性条件,即各元素粉末流具有相同的出口速度。基于粉末输送一致性条件,可获得各元素粉末性质的匹配关系,进而保证了混合元素法激光立体成形试样成分与预混合元素粉末成分一致。

## 参 考 文 献

1 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/ stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1308~1312  
贾文鹏, 林 鑫, 陈 静 等. 空心叶片激光快速成形过程的温

度/应力场数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1308~1312  
2 Han Yanfeng, Gao Bo, Hu Jiang *et al.*. Titanium coping fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese Journal of lasers*, 2007, **34**(6):876~880  
韩彦峰, 高 勃, 胡 江 等. 激光快速成形技术制作纯钛基底冠 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):876~880  
3 Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018.  
于 君, 陈 静, 谭 华 等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1014~1018  
4 Zhu Juanfang, Gao Bo, Wang Zhongyi *et al.*. Properties of pure titanium for dental implants fabricated by rapid laser forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):588~592  
朱娟芳, 高 勃, 王忠义 等. 用于牙科植入体的激光快速成形纯钛性能研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):588~592  
5 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming Technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 1~20, 340  
黄卫东, 林 鑫, 陈 静 等. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 1~20, 340  
6 Takeda T., Steen W. M., West D. R. F.. Laser cladding with mixed powder feed [C]. Proc. ICALEO 1984. Boston, USA: Laser Institute of America. 1984, **44**:151  
7 Steen W. M., Vilar R. M., Watkins K. G. *et al.*. Alloy system analysis by laser cladding [C]. Proc. ICALEO '92. Orlando: Laser Institute of America. 1992, **52**: 278~287  
8 Watkins K. G.. Achieving the potential of direct fabrication with lasers [C]. Proc. Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering, LANE 2001. Erlangen (Germany). 2001. 25~38  
9 Banerjee R., Collins P. C., Bhattacharyya D. *et al.*. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded  $\alpha/\beta$  titanium-vanadium alloys [J]. *Acta Materialia*, 2003, **51**: 3277~3292  
10 Collins P. C., Banerjee R., Banerjee S. *et al.*. Laser deposition of compositionally graded titanium-vanadium and titanium-molybdenum alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **352**: 118~128  
11 Banerjee R., Bhattacharyya D., Collins P. C. *et al.*. Precipitation of grain boundary  $\alpha$  in a laser deposited compositionally graded Ti-8Al-xV alloy-an orientation microscopy study [J]. *Acta Materialia*, 2004, **52**: 377~385  
12 Banerjee R., Collins P. C., Genc A. *et al.*. Direct laser deposition of in situ Ti-6Al-4V-TiB composites [J]. *Material Science and Engineering A*, 2003, **358**: 343~349  
13 Banerjee R., Genc A., Hill D *et al.*. Nanoscale TiB precipitates in laser deposited Ti-matrix composites [J]. *Scripta Materialia*, 2005, **53**: 1433~1437  
14 Nag S, Banerjee R, Fraser H L. A novel combinatorial approach for understanding microstructural evolution and its relationship to mechanical properties in metallic biomaterials [J]. *Acta Biomaterialia*, 2007, **3**: 369~376  
15 X. Lin, T. M. Yue, H. O. Yang *et al.*. Solidification behavior and the evolution of phase in laser rapid forming of graded Ti6Al4V-Rene88DT alloy [J]. *Metall Mater Trans A*, 2007, **38A**: 127~137  
16 Xin Lin, Haiou Yang, Jing Chen *et al.*. Microstructural evolution in laser rapid forming of a graded titanium-nickel alloy [C]. ICALEO 2007 Congress Proceedings, 197~199  
17 X. Lin, T. M. Yue, H. O. Yang *et al.*. Microstructure and phase evolution in laser rapid forming of a functionally graded Ti-Rene88DT alloy [J]. *Acta Mater*, 2006, **54**: 1901~1915  
18 Jing Chen, Haiou Yang, Xin Lin *et al.*. Influences of powder specifications and powder delivery on laser and powder particles interaction during the LRF process [C]. *SPIE*, 2005, **5629**: 103~113

- 19 Jehnming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31: 565~570
- 20 Kong Long. Two-Phase Fluid Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. 118~119
- 孔 珑. 两相流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 118

~119

- 21 Ma Qingfang, Fang Rongsheng. Practical Handbook of Physical Properties[M]. Agricultural Machinery Press of China, 1986. 69~76
- 马庆芳, 方荣生. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986; 69~76

## 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>板条 1342 nm 激光器

1.3  $\mu\text{m}$  全固态激光器在激光雷达、光纤通信、激光医疗等军事和民用领域有着广泛的应用,同时其经过频率变换所获得的红蓝光也是激光彩色显示中的重要光源,因此对 1.3  $\mu\text{m}$  激光器的研究具有很大的现实意义。但是,相对于 1.06  $\mu\text{m}$  的情况,激光增益介质在 1.3  $\mu\text{m}$  的热效应更明显,激光器的效率、输出功率也较低。2003 年, A. Minassian 等利用掠入射 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器结构获得了 10 W 基模 1342 nm 激光输出,并通过振荡放大系统将输出功率提高到 20 W;2005 年,中国科学院物理研究所 Yao 等利用激光二极管(LD)抽运棒状 Nd:YVO<sub>4</sub> 获得 11 W 的激光输出;2008 年,清华大学 Lu 等采用双端面抽运两块棒状 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,获得 16.4 W 的 1342 nm 激光输出。

部分端面抽运板条固体激光器(InnoSlab)是由德国夫琅未费激光技术研究所于 1998 年提出的,其主要特点是采用板条晶体和混合腔结构,输出光在板条的宽度方向近似为平行光,在厚度方向为基模输出,是获得高功率高光束质量激光输出的有效途径之一。本文介绍实验室采用部分端面

抽运板条激光技术对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 谱线的研究,获得输出功率为 18 W 的近衍射极限激光输出,斜效率为 23.3%,光-光转换效率为 17.3%。

图 1 为实验装置示意图。抽运源为 4 个巴条组成的 LD 阵列,输出中心波长为 808 nm,每个巴条都带微透镜准直。耦合系统将 LD 发出的抽运光整形为一条水平方向光强近似均匀分布的矩形抽运线(晶体截面尺寸约为 0.4 mm $\times$ 12 mm)入射到激光晶体端面。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为 1 mm $\times$ 12 mm $\times$ 10 mm,掺杂原子数分数为 0.3%。M1, M2 为谐振腔镜,其中 M1 为球面镜(半径为 415 mm),并镀有对 808 nm 高透,1342 nm 高反的介质膜, M2 为柱面镜(半径为 365 mm),镀有对 1342 nm 的高反膜(同时对 1064 nm 透过率大于 80%),激光沿 M2 的一边输出。M1 和 M2 构成稳定-非稳混合腔结构,即在水平方向构成离轴正支共焦非稳腔,放大率  $M=415/365=1.14$ ,相当于输出透过率  $T=12\%$ 。在竖直方向构成平-凹稳定腔,腔长约为 30 mm。

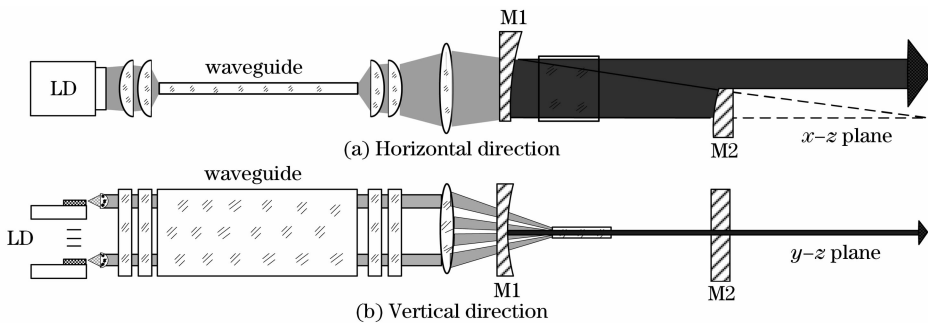


图 1 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser

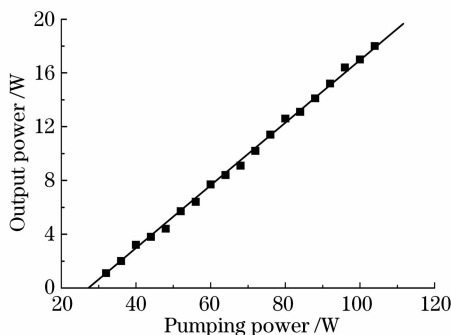


图 2 功率输入输出特性

Fig. 2 Output power as a function of incident pump power

图 2 为部分端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条固体激光器的输入输出特性。抽运功率为 104 W 时,激光器输出功率为 18 W,斜效率为 23.3%,光-光转换效率为 17.3%,激光器阈值为 24 W。输出功率为 15 W 时,稳腔方向光束质量  $M^2$  因子为 2.3,非稳方向为 1.2。

张恒利<sup>1</sup> 闫莹<sup>1</sup> 刘洋<sup>1</sup> 沙鹏飞<sup>1</sup> 李静<sup>1</sup>  
邢冀川<sup>1</sup> 辛建国<sup>1</sup> 张怀金<sup>2</sup> 何京良<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京理工大学光电学院,北京 100081  
<sup>2</sup>山东大学晶体材料研究所,山东 济南 250000)

收稿日期: 2009-02-18; 收到修改稿日期: 2009-02-27