

文章编号: 0258-7025(2009)12-3215-05

激光熔化沉积 TA12 钛合金的组织及性能

张永忠¹ 黄 灿¹ 吴复尧² 刘黎明²

(¹ 北京有色金属研究总院复合材料中心, 北京 100088
² 中国航天科工集团航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

摘要 在保护气氛下,通过激光熔化同轴输送的 TA12 钛合金粉末,在 TA15 钛合金基体上逐层沉积制备出 TA12 钛合金薄壁样,分析了所沉积材料的微观组织、相组成及力学性能。结果表明,激光熔化沉积的 TA12 钛合金的内部组织致密,沉积材料与基体为完全冶金结合;激光熔化沉积 TA12 钛合金为等轴晶组织,晶粒内部为不同取向的细小片层 α 相与少量 β 相组成的网篮状魏氏组织,随着激光功率的增加,原始 β -Ti 晶粒的尺寸稍许增大;沉积状态下沿激光扫描运动方向室温及 550 °C 高温下的拉伸强度均达到了退火棒材的要求。

关键词 激光技术;激光熔化沉积;TA12 钛合金;微观组织

中图分类号 TN249;TF124 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093612.3215

Microstructure and Properties of Laser Direct Deposited TA12 Titanium Alloy

Zhang Yongzhong¹ Huang Can¹ Wu Fuyao² Liu Liming²

(¹ Center for Composites, Beijing General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, China
² Research Institute of Aerospace Special Material and Technology, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract Thin wall samples from TA12 titanium alloy have been prepared on TA15 substrates by laser direct deposition of coaxially fed metallic powders under protective gas. The microstructure, phases and mechanical properties of the deposited materials were investigated. The results indicated that the deposited materials are fully dense, and metallurgically bonded with the substrate. The as-deposited TA12 titanium alloy tends to be equiaxed grains, within which is basketweave widmannstatten structure formed of many fine α lamella and small amount of β with different direction. And the size of the original β -Ti grains increases a little with increasing the laser power used for depositing. The tensile strength at room temperature and under 550 °C for the as-deposited materials along the scanning direction reaches the value for the annealed bar.

Key words laser technique; laser direct deposition; TA12 titanium alloy; microstructure

1 引 言

激光熔化沉积技术通过高功率激光熔化同步输送的合金粉末,在成形基板上逐层堆积材料,可以直接由 CAD 模型得到近终形零件,可用于小批量零件的直接成形、零件修复及梯度复合材料的制备^[1~3]。钛合金具有高比强度、高比刚度、高弹性模量、耐高温、耐腐蚀等优异性能,在军事、航空、航天、

汽车等工业领域有着广泛的发展前景。航空、航天用钛合金零件一般采用带筋加强的薄壁结构,以减轻重量、提高结构效率,非常适合采用激光熔化沉积方法成形,从而解决传统方法加工时材料利用率低、周期长、成本高等问题。近年来,研究人员围绕各种钛合金的激光熔化沉积成形展开了广泛的研究^[4~8],并开始将其用于飞机大型钛合金结构件的

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-11-05

基金项目: 国家 973 计划(2006CB605206-1)和国家自然科学基金(50871023)资助课题。

作者简介: 张永忠(1970—),男,教授级高工,博士,主要从事高性能金属零件及梯度复合材料的激光熔化沉积成形等方面的研究。E-mail: yzhang@grinnm.com

制造^[7,8]。本文针对 TA12 钛合金,着重研究其激光熔化沉积的工艺,分析沉积材料的组织及其室温和高温力学性能。

2 材料及试验过程

试验采用 TA12 雾化球形粉末,粉末粒度为 -60 目,TA12 钛合金粉末的名义成分(质量分数%)为:Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.2Si-1Nb。激光熔化沉积在配有 5 kW CO₂ 横流激光器的专用系统上进行,采用焦距为 350 mm 的铜反射聚焦镜对激光束进行聚焦,光斑直径约 3.0 mm,同轴方式送粉,送粉载气为氩气,载气流量 2.5 L/min。激光熔化沉积在保护气氛箱内进行,沉积前通过预抽真空、充氩气清洗将箱体内氧的体积分数降低至 20×10^{-6} 以下。沉积基板为 TA15 钛合金板,尺寸为 200 mm × 100 mm × 6 mm,表面经 400# 砂纸打磨后用乙醇擦拭干净。成形的基本工艺通过分析不同激光功率及扫描速度下所沉积材料的组织来大致确定,试验过程中送粉速率设定为 3.5 g/min。

沉积后沿平行于激光扫描方向切取样品,制成金相试样,采用 Axiovert 200 MAT 光学显微镜观察微观组织及界面结合情况,采用 D/max-2200 PC X 射线衍射(XRD)仪分析经加工的沉积材料表面。沿沉积薄壁的长度方向切取试样,加工成如图 1 所示的拉伸试样,在 Instron 拉伸试验机上进行室温及 550 °C 拉伸试验,加载速率 0.3 mm/min,用 S-4800 扫描电镜(SEM)观察断口形貌。按照 ASTM E1409-2005 标准测定所沉积钛合金的氧含量。

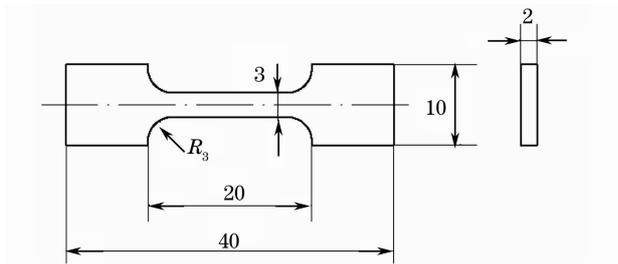


图 1 拉伸性能测试样尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawing of the sample for tensile testing

3 试验结果与分析

3.1 激光熔化沉积工艺

首先采用单道往复沉积方式和不同的工艺沉积制备出一定高度的薄壁,各沉积 30 层,薄壁长度 30 mm,在沉积过程中激光头的移动距离可以根据

实际沉积情况加以调整,然后根据沉积的总高度大致确定出不同沉积工艺下沉积层的高度。表 1 中给出了不同沉积工艺下的试验结果,可以看出,随着激光功率的增加及扫描速度的降低,每层沉积层的厚度增加。图 2 中示出了 4 号薄壁样的宏观形貌,所沉积薄壁具有光亮的表面,表明沉积时钛合金得到了有效的保护。

表 1 TA12 钛合金激光熔化沉积工艺试验结果

Table 1 Results for laser direct depositing of TA12 titanium alloy

Sample No.	Laser power/ kW	Scanning speed/ (mm/s)	Layer height/ mm
1	1.0	3.0	0.41
2	1.0	5.0	0.26
3	1.0	7.0	0.16
4	1.4	3.0	0.45
5	1.4	5.0	0.32
6	1.4	7.0	0.20
7	1.8	3.0	0.57
8	1.8	5.0	0.36
9	1.8	7.0	0.24
10	2.2	5.0	0.44
11	2.2	7.0	0.29

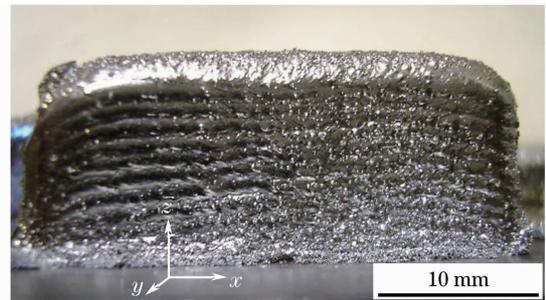


图 2 在 1.4 kW 激光功率和 3.0 mm/s 扫描速度下激光熔化沉积 TA12 薄壁的外观

Fig. 2 Appearance of laser direct deposited TA12 thin wall with laser power of 1.4 kW and scanning speed of 3.0 mm/s

图 3 为采用不同工艺参数下所沉积薄壁的内部组织及界面结合情况,内部组织对应的位置为薄壁 $x-z$ 截面(如图 2 所示)的中间部位。在 1.0 kW 激光功率及 3.0 mm/s 扫描速度的工艺条件下,沉积层与基体界面实现了良好的冶金结合,沉积材料内部组织致密[图 3(a)]。在较低激光功率(如 1.0 kW)下,提高扫描速度(如 5.0 mm/s 和 7.0 mm/s)将导致界面结合区宽度变窄,界面结合强度降低,所沉积的薄壁在外力作用下很容易从基体脱开。由图 3 可以看出,在不同工艺条件下,激光熔化沉积的 TA12 钛合金均

呈现等轴晶形貌,只有少数样品的底部出现了沿沉积高度方向拉长的晶粒[如图 3(g)所示],没有呈现激光熔化沉积 TC4 钛合金时出现的粗大柱状晶组织^[5],这可能与扫描长度的不同导致沉积区不同的温度梯度和凝固速度有关。在往复扫描较短的薄壁时,同一沉积层不同部位的温度差别较小,熔池顶部及侧边的对流散热和通过已沉积材料的传热共同分担熔池凝

固时的热量散失,从而形成了等轴晶组织。在图 3(h)中能依稀看到平行于基板的白色条带区域,这是上层沉积时对下层组织的热影响所致。TA12 合金为近 α 型钛合金,熔化沉积凝固过程中先形成等轴状初生 β -Ti 晶粒,随后发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变,形成细小的片层状 α 相。随着激光功率增加,熔池温度升高,冷却速率下降,初生 β 晶粒变大。

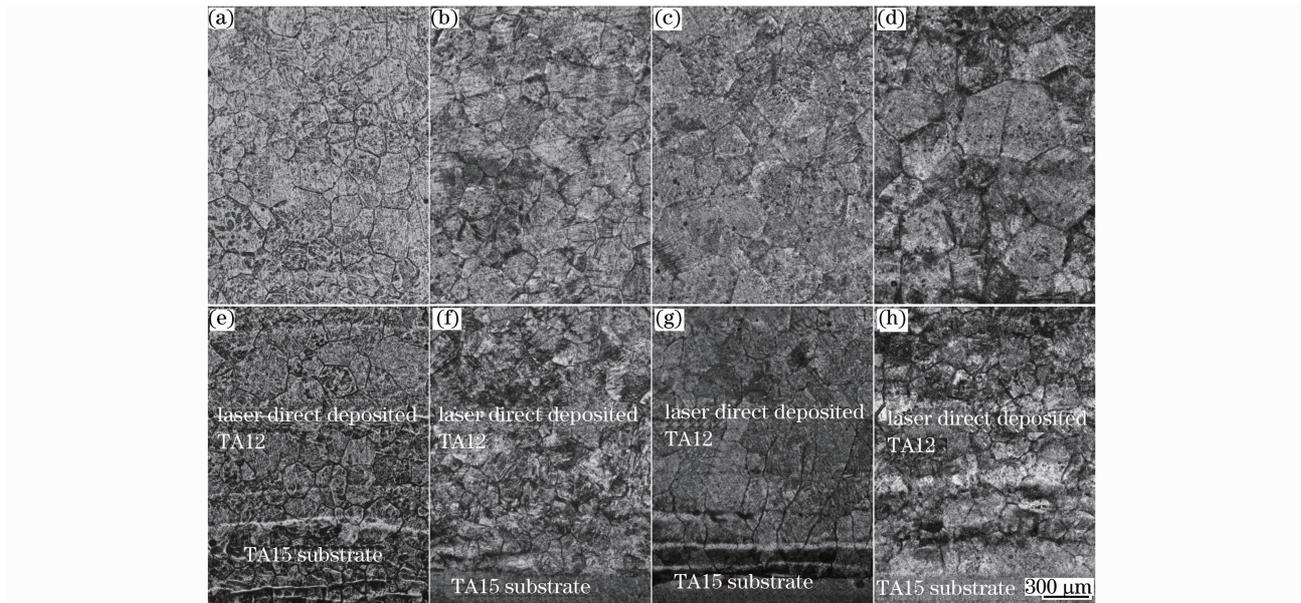


图 3 不同激光功率和扫描速度下激光熔化沉积 TA12 钛合金薄壁截面的内部组织[(a)~(d)]和界面情况[(e)~(h)]。

(a), (e) 1.0 kW, 3.0 mm/s; (b), (f) 1.4 kW, 5.0 mm/s; (c), (g) 1.8 kW, 5.0 mm/s; (d), (h) 2.2 kW, 5.0 mm/s

Fig. 3 Cross-sectional microstructures [(a)~(d)] and the interface bonding [(e)~(h)] of laser direct deposited thin walls with

laser power and scanning speed of (a), (e) 1.0 kW, 3.0 mm/s, (b), (f) 1.4 kW, 5.0 mm/s, (c), (g) 1.8 kW, 5.0 mm/s, (d), (h) 2.2 kW, 5.0 mm/s

3.2 组织性能分析

基于上述分析,选用优化后的工艺直接沉积制备出 TA12 钛合金薄壁样品(尺寸为 45 mm × 75 mm × 3.0 mm),沉积工艺为:激光功率 2.0 kW,扫描速度 6.0 mm/s,层高 0.25 mm,共沉积 300 层,沉积结束后将样品进行 550 °C × 2 h 的退火处理,

随炉冷却。

图 4 为激光熔化沉积 TA12 钛合金的微观组织,可以看出,沉积态 TA12 钛合金为典型的网篮状魏氏组织,基体上分布着大量富含 Nb 的稀土复合物^[6][图 4(a)中箭头所指的细小颗粒及图 4(b)中深色圆形颗粒],初生 β 晶粒内不同取向的 α/β 片层组织交织

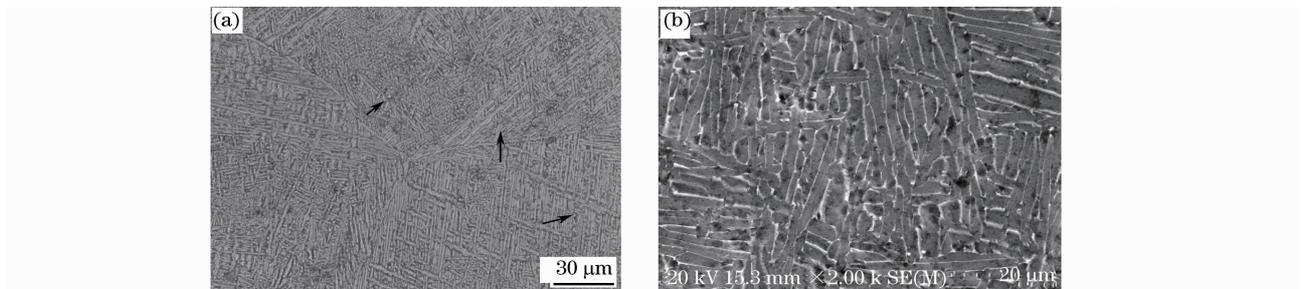


图 4 在 2.0 kW 激光功率和 6.0 mm/s 扫描速度下激光熔化沉积 TA12 钛合金薄壁的微观组织

(a)金相显微镜照片;(b)扫描电镜照片

Fig. 4 Microstructures of laser direct deposited TA12 titanium alloy thin wall with laser power of 2.0 kW and scanning speed of 6.0 mm/s. (a) Optical metallography; (b) scanning electron microscopy

在一起,颜色较深的为 α 相,颜色较浅的为少量的 β 相, α 片层的厚度在 $2\ \mu\text{m}$ 左右[图4(b)]。图5为激光熔化沉积TA12钛合金的XRD分析结果,所有的衍射峰均与 α -Ti能很好地对应。说明激光熔化沉积过程较快的冷却速率并没有导致高温 β 相的大量存在,所沉积的材料具有很好的组织稳定性。

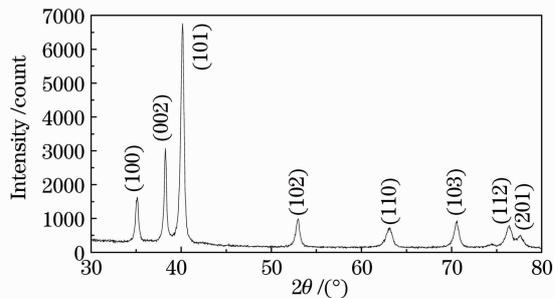


图5 在2.0 kW激光功率和6.0 mm/s扫描速度下激光熔化沉积TA12钛合金的XRD分析结果

Fig. 5 XRD spectrum of laser direct deposited TA12 titanium alloy with laser power of 2.0 kW and scanning speed of 6.0 mm/s

表2 在2.0 kW激光功率和6.0 mm/s扫描速度下激光熔化沉积TA12钛合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of laser direct deposited TA12 titanium alloy with laser power of 2.0 kW and scanning speed of 6.0 mm/s

Sample	Test condition	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Remark
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	
Laser direct deposited	Room temperature	1065	980	7.0	Tensile direction parallel to the substrate
	550 °C	740	475	7.2	
Annealed bar	Room temperature	≥ 980	≥ 900	≥ 10	Data from standard
	550 °C	≥ 610	—	≥ 12	of XL/BS 5161-1995

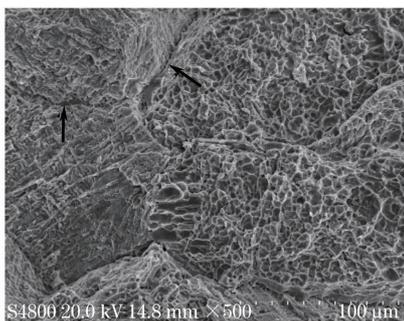


图6 拉伸断口的SEM形貌

Fig. 6 SEM morphology of tensile fracture surface

4 结 论

激光熔化沉积的TA12钛合金为等轴状魏氏组织,晶粒内不同取向的 α/β 片层相互交织, α 片层的厚度约 $2\ \mu\text{m}$,随激光功率增加,晶粒尺寸稍许增大。

激光熔化沉积TA12钛合金的室温及550 °C高

表2中给出了激光熔化沉积TA12钛合金在室温及550 °C下的拉伸力学性能,同时给出了锻造退火棒材的标准性能要求。可以看出,激光熔化沉积TA12钛合金的室温及高温下的拉伸强度均达到了锻件水平,而拉伸塑性稍低。经测试,激光熔化沉积TA12钛合金的氧体积分数为0.18%,稍高于标准所要求的体积分数0.15%,这可能是导致所沉积材料塑性稍低的主要原因。为保证激光熔化沉积钛合金具有良好的综合性能,需要对原料粉末及沉积环境气氛中的氧含量加以严格控制,另外,激光熔化沉积过程中通常采用氩气作为载气来输送粉末,采用高纯氩气可有效控制沉积材料的氧含量。

图6为所沉积材料室温拉伸断口的SEM照片。可以清晰分辨出原始 β 晶粒的晶界(图中箭头所指),表现出一定程度的沿晶脆性断裂特征,而在等轴晶内部呈现出明显的塑性韧窝特征,可以推断出晶界的塑性不如晶内,从而表现出塑性与脆性的混合断裂特征。

温下的拉伸强度达到了锻造退火棒材的要求,塑性略低,室温下断裂为塑性与韧性的混合断裂。

参 考 文 献

- 1 L. Costa, R. Vilar. Laser powder deposition [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, **15**(4): 264~279
- 2 Xue Lei, Chen Jing, Zhang Fengying *et al.*. Laser rapid repair of the aircraft components of titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, **35**(11): 1817~1821
- 薛 蕾, 陈 静, 张凤英等. 飞机用钛合金零件的激光快速修复 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, **35**(11): 1817~1821
- 3 Y. Z. Zhang, Z. M. Wei, L. K. Shi *et al.*. Characterization of laser powder deposited Ti-TiC composites and functional gradient materials [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2008, **206**(1-3): 438~444
- 4 X. Wu, R. Sharman, J. Mei *et al.*. Microstructure and properties of a laser fabricated burn-resistant Ti alloy [J]. *Materials & Design*, 2004, **25**: 103~109
- 5 S. M. Kelly, X. L. Kampe. Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds: Part I. Microstructural characterization [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, **35**(6): 1861~1867
- 6 Wang Bin, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Rapidly solidified

microstructure of Ti60 alloy produced by laser rapid forming process [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(6): 86~92

王 彬, 张述泉, 王华明. 激光熔化沉积高温钛合金 Ti60 快速凝固组织 [J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(6): 86~92

7 王华明, 张述泉, 汤海波 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展 [J]. *航空精密制造技术*, 2008, 44(6): 28~30

8 F. G. Arcella, F. H. Froes. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming [J]. *JOM*, 2000, 52(5): 28~30

1000 W 全光纤激光器

由于具有效率高、稳定性好、光束质量好、结构紧凑、免维护等特点,光纤激光器在工业加工、医疗和国防等领域得到了广泛应用。随着双包层光纤的出现以及二极管抽运技术的不断成熟,光纤激光器的输出功率不断取得新的成绩,国外数家公司已经实现千瓦级光纤激光器的商品化,今年6月,IPG Photonics 报道成功研制出万瓦级光纤激光器。近年来,我国的光纤激光器研究也取得了较快的发展,但许多研究都是使用"块状"镜通过空间耦合的方式实现对增益光纤的抽运和谐振腔的反馈。使用这种技术的光纤激光器不能充分体现光纤激光器的诸多优势,因此必须开展基于全光纤技术的光纤激光器研究工作。全光纤激光器的研究在我国也受到高度的重视,但输出功率一直停留在数百瓦的水平。

近年来,中国科学院西安光学精密机械研究所在国家 863 计划的资助下,在大功率光纤激光的研究方面取得了较大的发展,2008 年 11 月,光子晶体光纤激光器实现了 552 W

功率输出,之后,我们把全光纤技术作为基本技术路线,开展基于全光纤技术的大功率激光技术及其光束合成的研究工作。今年6月,采用一种新型注入锁定技术实现了两光纤激光器的相位锁定,获得 407 W 合成功率输出。近日,在全光纤激光器的研究方面取得重要阶段性进展,全光纤激光器输出功率突破 1000 W。

整个全光纤激光系统结构为如图 1 所示的 MOPA 结构,共分为三个部分:种子源和两级放大。a~r 为 18 台波长为 976 nm 尾纤输出的抽运源,通过 A~D 四个泵浦耦合器实现对 f1~f3 三段增益光纤的抽运,实验所使用的增益光纤为大模场掺 Yb 光纤,包层直径为 400 μm,纤芯直径为 20 μm,数值孔径 NA=0.06。种子源利用两个光纤光栅 g1 和 g2 实现对谐振腔的反馈,g1 对 1080 nm 激光的反射率为 99.9%,g2 对 1080 nm 激光的反射率为 10%。

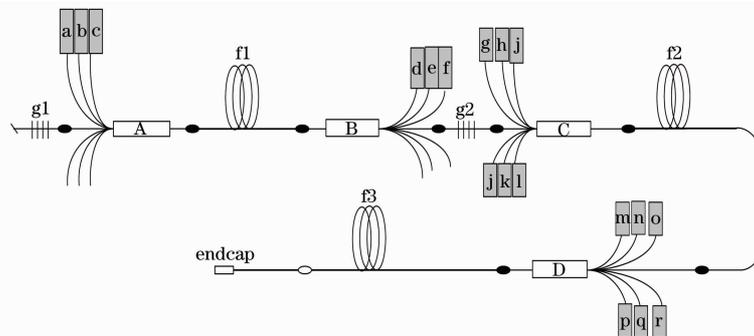


图 1 全光纤激光器结构原理示意图

Fig.1 Schematic setup of the all-fiber laser

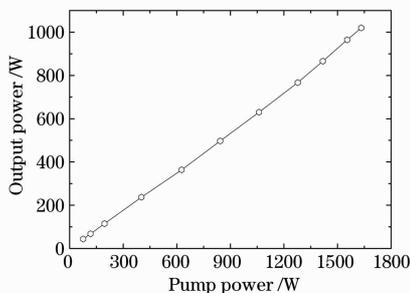


图 2 全光纤激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig.2 Fiber laser output power versus pump power

为保证光纤激光器能实现高功率输出,在系统的组建过程中,除做好光纤的切割和熔接等技术工作外,还要做好对抽运耦合器和光纤光栅等器件的冷却。使用主动冷却的办法,使各个光纤器件在高功率状态下正常运转。实验中,激光器运行平稳,激光输出超过 1000 W,光-光效率为 62%,激光输出功率随抽运功率的变化曲线如图 2 所示。

段开棕¹ 赵保银^{1,2} 赵 卫¹

王屹山¹ 周 良^{1,2}

¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所
瞬态光学和光子学国家重点实验室, 陕西 西安 710119
² 中国科学院研究生院, 北京 100049

收稿日期: 2009-10-27; 收到修改稿日期: 2009-11-10