

文章编号: 0258-7025(2009)06-1575-06

高功率连续 CO₂ 激光器脉冲调制特性及特殊熔覆应用

柳娟 唐霞辉 彭浩 秦应雄

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 针对直升飞机发动机涡轮叶片采用连续激光熔覆出现裂纹及叶片变形的问题,在 5 kW 连续横流 CO₂ 激光器上,采用新的电源控制方案,通过软件及相关控制,实现了脉冲激光功率输出。克服了采用高功率开关电源带来的成本和稳定性问题,且脉冲调制频率可达到 5 Hz,调制占空比可达到 5%~100%。当采用 4 kW 峰值功率,4 Hz 脉冲重复频率,占空比为 20%时,在发动机叶片 K403 合金表面进行合金粉末 Stellite X-40 的熔覆实验。结果表明,熔覆后热影响区比连续激光减少 50%,硬度提高 5%,界面结合性能与母材相当,无熔覆裂纹及叶片变形。

关键词 激光器; CO₂ 激光器; 脉冲激光调制; 涡轮机叶片熔覆

中图分类号 TN248.2⁺2; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1575

Pulse Modulation Characteristic of High Power Continuous CO₂ Laser and its Application in Special Cladding

Liu Juan Tang Xiahui Peng Hao Qin Yingxiong

(School of Optoelectronics Science and Engineer, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract For cracks and deformations appeared in continuous laser cladding in aircraft engine turbine blade, we propose a new method on power supply control based on the 5-kW continuous transverse flow CO₂ laser. Pulse laser power can be obtained by the control of software and interrelated components. The method can overcome the problem of high costs and instability by using high power switch source supply. The pulse modulation frequency can reach 10 Hz and the duty cycle can be modulated between 5% and 100%. K403 alloy of the turbine blade is cladded with Stellite X-40 alloy powder in the surface using this kind of pulse laser power whose maximum laser power is 4 kW, and the repetitive frequency is 5 Hz with the duty cycle of 20%. The result shows that, compared with that using the continuous laser power, the heat affected zone is reduced 50%, and the microhardness is improved 5%. So the binding performance of the interface is as good as the base metal, and the cladding cracks and blade deformations disappear.

Key words lasers; CO₂ laser; pulse laser modulation; turbine blade cladding

1 引 言

K403 合金是一种镍基铸造高温合金,采用多种金属元素综合强化,具有较高的中、高温强度,长期使用过程中组织稳定,多用于制造航空喷气发动机的一些零部件,如涡轮叶片等。发动机涡轮叶片是发动机的关键部件,在使用过程中,由于强大的高速热气流作用,叶冠相互撞击、震动,产生严重的冲击

和磨损,需要在阻尼面上熔覆一层厚度约为 0.3~0.5 mm 的 CoCrW 高温耐磨合金涂层^[1]。

YAG 激光可以用于各种表面熔覆,但聚焦后光点小,不宜用于大面积熔覆,不适合作为发动机涡轮叶片表面熔覆的光源。高功率连续横流 CO₂ 激光器可实现万瓦连续激光输出,广泛用于激光焊接、表面熔覆、激光淬火等工业激光加工领域,是飞机发动

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-10-23

作者简介: 柳娟(1978-),女,讲师,博士研究生,主要从事高功率气体激光器及其应用方面的研究。

E-mail: cecyliu@yeah.net

导师简介: 唐霞辉(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事新型高功率气体激光器及其加工系统集成方面的研究。

E-mail: txh1116@mail.hust.edu.cn

机涡轮机叶片表面熔覆的理想功率源。但实验表明,涡轮叶片采用连续激光熔覆容易出现裂纹及叶片变形的问题,采用脉冲激光熔覆则可以解决这一问题^[2,3]。

对于高功率横流 CO₂ 激光器,采用高功率开关电源供电,虽然可实现脉冲激光输出,但成本太高,将使其失去价格优势^[4,5]。本文采用一种新的电源控制方案,通过软件及相关控制,在原有高功率横流激光器直流电源的基础上,实现了脉冲激光功率输出,且脉冲频率与占空比可在一定范围内任意调节。根据设定的脉冲频率和占空比的大小,程序自动选择采用开环或闭环控制方案,既实现了频率和占空比较大的调节范围,又最大程度地保证了脉冲出光期间功率的相对稳定。将该脉冲激光应用于飞机发动机涡轮叶片的表面熔覆,熔覆后热影响区比连续激光减少 50%,硬度提高 5%,解决了连续激光焊接出现裂纹的问题,大大提高了发动机涡轮叶片的抗冲击性和耐磨性。

2 高功率连续 CO₂ 激光器电源系统构成

2.1 电源系统的电路构成

整个电源系统由电源开关、主变压器、副变

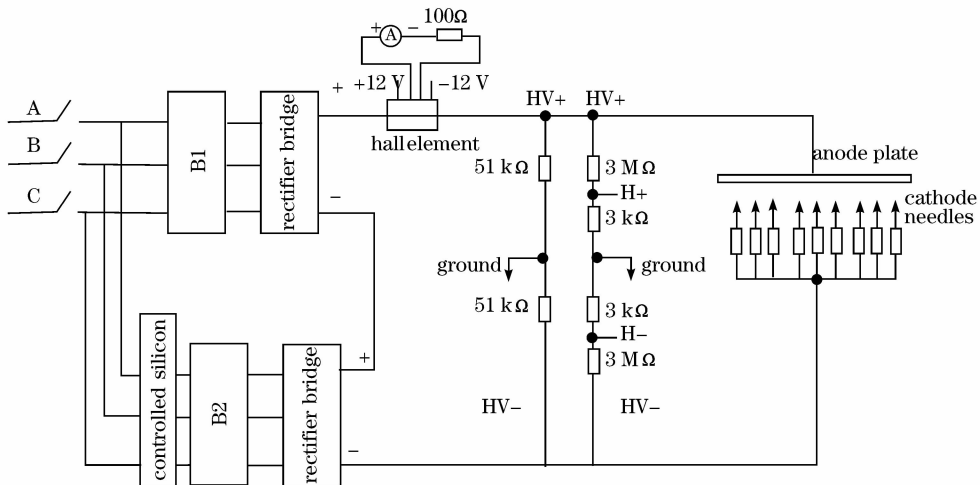


图 1 高功率横流 CO₂ 激光器电源结构原理图

Fig. 1 Principle diagram of the power supply of the high power transverse CO₂ laser

为了维持放电电流与激光器输出功率的稳定,激光器在连续工作时采用功率-电流双闭环控制方案^[7,8],其原理如图 2 所示。功率给定具有数字给定与模拟量给定两种方式,数字给定方式时直接在操作面板上输入所需的功率值;模拟功率调节装置为一个安装在操作面板上的可调电位器,该电位器输

器、可控硅模块、高压整流硅堆、平衡电路与高压检测控制电路构成。其电路原理如图 1 所示^[6]。电源经高压硅堆三相桥式整流之后可产生 3000~4000 V 的直流高压。其中,主变压器 B1 输入端为恒定的三相 380 V 工频交流电压,因此在其输出端将产生稳定的高压输出,电压大小经整流后约为 3000 V。此高压大小可使得激光腔内的工作气体产生有效的预电离,而放电电流与激光输出功率接近于零。副变压器 B2 输入端的电压大小可以通过改变可控硅控制端电压。调节可控硅模块的导通角从 0~380 V 任意改变,可以改变高压变压器 B2 的输出端电压从零到最大值变化,进而改变主副变压器整流之后的叠加电压。即 HV₊ 与 HV₋ 之间的直流高压,也就是激光器阳极板与阴极针之间的高压,达到有效控制激光器放电电流与输出激光功率大小的目的。

2.2 电源系统的测控实现

横流激光器电源控制系统采用可编程逻辑控制器(PLC)为核心控制部件,高压电压和电流取样信号经隔离滤波之后,可直接送入 PLC 模拟模块的输入端,模拟模块内部具有 A/D 转换功能,PLC 的 CPU 可以读取该模拟量并通过一定算法计算出高压电压和放电电流的实际大小。

出一个 0~5 V 的电压,作为激光器的模拟给定功率。输出激光功率与激光器放电电流作为双闭环控制的外环与内环反馈,控制系统实时检测反馈功率与给定功率以及反馈电流与给定电流之间的误差。根据该误差的大小,控制软件通过两个比例积分微分控制器(PID)控制程序计算输出到可控硅控制端

的 0~10 V 电压大小。当控制端控制电压从 0~10 V 变化时,可控硅导通角从 0°~180°变化,副变压器输入端电压从 0~380 V 线性变化,激光器高压电压、放电电流与输出激光功率也将相应变化。当输出激光功率与给定激光功率的误差为零时,可控硅

控制端电压保持不变;当出现反馈功率大于或小于给定功率的偏差时,程序将实时调节可控硅控制端的电压大小,使得输出激光功率稳定在给定功率,同时保持放电电流的相对稳定。

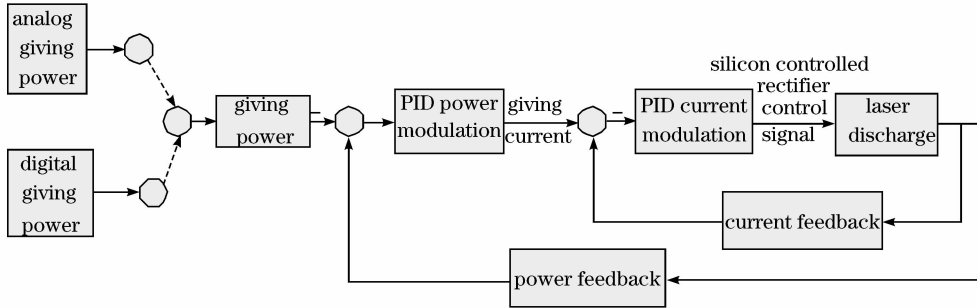


图 2 双闭环功率控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of the double close loop power control

其中,功率和电流的 PID 调节过程由比例、积分、微分三部分构成,每部分的调节量均由软件控制,其传递函数为

$$M_n = K_C \times e_n + K_I \times e_n + M + K_D \times (e_n - e_{n-1}), \quad (1)$$

其中, M_n 为 PID 输出值, K_C 为比例系数, e_n 为第 n 时刻的误差值, e_{n-1} 为第 $n-1$ 时刻的误差值, K_I 为积分系数, M 为积分项前值, K_D 为微分系数。实际运算过程中,两组 PID 调节的比例系数和微分系数相同,比例系数 K_C 均为 0.5,微分系数 K_D 均为无穷大,但由于功率探头的响应时间较长,所以功率调节的积分系数 K_I 为 20,而电流调节的积分系数为 10。

3 脉冲光束控制

要实现脉冲激光输出,可采用给定脉冲电流与控制机械光闸脉冲动作两种方案。但机械光闸动作执行时间较长,可行的脉冲动作频率极低,因此,本文采用给定脉冲电流的控制方案,不但可以保证较大的频率与占空比调节范围,而且大部分工作由软件实现,电路成本增加较少。

3.1 脉冲电流控制方案

3.1.1 开环电流控制方案

从高功率连续横流 CO₂ 激光器的电源结构和控制方案可以看出,当可控硅控制端电压为 0 时,副变压器不工作,激光器处于预电离状态,放电电流和激光输出功率为零。当可控硅控制端电压保持在 0~10 V 的某一固定值时,激光器放电电流

和输出激光功率基本恒定。这样,可以在可控硅控制端给定一脉冲控制电压,在脉冲控制电压的高电平期间,激光器输出与控制电压大小对应的激光功率;在脉冲控制电压低电平期间,副变压器不工作,输出激光功率为零。脉冲频率和占空比可由程序直接给定,激光器平均输出功率为高电平期间输出激光功率与占空比的乘积。这样,通过程序直接控制可控硅控制端的脉冲电压大小、频率和占空比,可以实现脉冲频率、占空比、输出激光功率任意可调的脉冲激光。

在该方案中,高电平期间激光功率的给定方式和连续工作时相同,可以由面板上的功率调节电位器调节,也可由操作界面直接输入。而脉冲频率和占空比的大小则由用户在操作界面直接输入。

3.1.2 闭环电流控制方案

闭环控制方案是一种维持激光器放电电流与输出功率相对稳定的有效方案。当采用脉冲激光输出时,如果脉冲频率不高,也可以采用闭环电流控制方案,以维持脉冲高电平期间输出激光功率的相对稳定。但在脉冲工作方式下采用闭环控制方案,必须要求所有检测部件及 PID 程序调节的响应时间远小于脉冲周期。在功率-电流双闭环控制系统中,由于功率探头采用的是热电探头,探头的响应时间相对较长,远大于霍尔元件与 PID 程序调节的响应时间,所以,在脉冲闭环控制方案中,不宜采用功率-电流双闭环控制,但可以去掉功率外环,仅用内环的电流闭环控制方案。这样即可以保证足够的响应时

间,又可以维持脉冲高电平期间放电电流与输出激光功率的相对稳定。

实验证明,当脉冲频率小于 1 Hz,脉冲占空比大于 50%时,脉冲高电平时间远大于霍尔元件对电流的响应时间。此时,程序需对连续方式的电流 PID 比例、积分参数进行适当的调整,主要是调整积分时间。实验表明将 K_i 调整为 0.8, K_f 调整为 2, 可以使得 PID 程序的响应时间较短,远小于脉冲周期。在脉冲高电平期间,输出激光功率的稳定性要优于开环电流控制方案。但采用闭环电流控制方案时,脉冲频率不能太高,否则由于霍尔元件的响应时间或 PID 调节的响应时间跟不上,反而会引起脉冲高电平期间功率的频繁波动,不利于功率的稳定。所以当脉冲频率高于 1 Hz,或占空比小于 50%时,仍采用开环控制方案。

3.2 脉冲电流软件控制

由于采用哪种控制方案,可以由程序自行选择,所以,在该脉冲控制系统中,同时引入两种控制方案。控制程序流程图如图 3 所示。

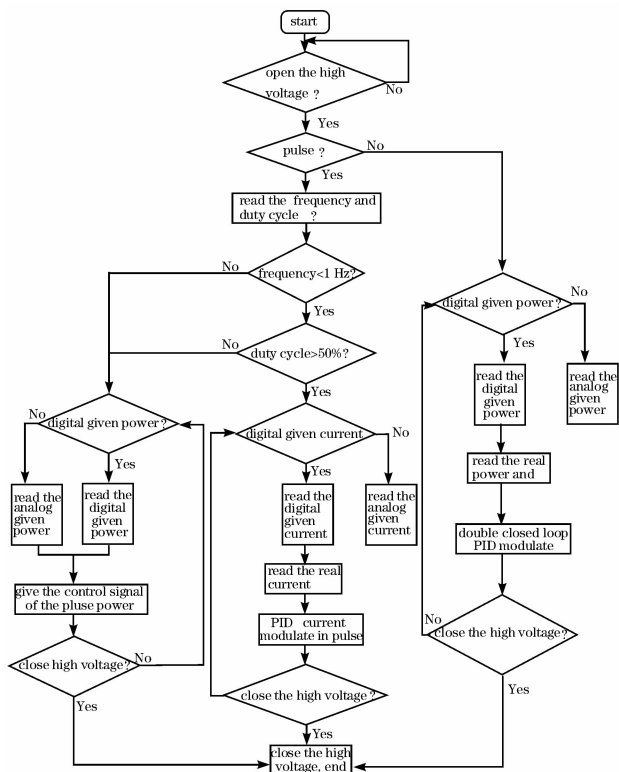


图 3 脉冲激光控制方案程序流程图

Fig. 3 Flow chart of pulse laser control scheme

该系统不仅兼容了连续激光系统的所有功能,可以灵活地实现脉冲与连续方式的转换,而且根据具体设定的脉冲频率和占空比,系统将自动选择性

能最佳的开环或闭环控制方式。大部分工作由软件实现,附加硬件成本极低。

4 脉冲调制特性及其在航空领域的熔覆应用

4.1 连续 CO₂ 激光熔覆 K403 合金材料

飞机发动机涡轮机叶片激光熔覆合金粉末为 Stellite X-40, K403 材料有很强的热敏感性,其连续激光熔覆性能较差,熔覆时容易产生裂纹。图 4 所示为连续 CO₂ 激光熔覆时产生的典型裂纹^[9,10]。

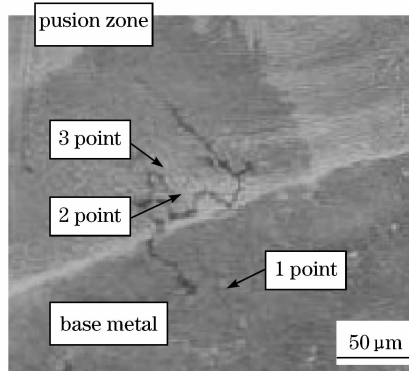


图 4 熔覆层中的典型裂纹

Fig. 4 Typical cracks of the cladding layer

4.2 裂纹的解决方法

基材中存在明显的晶界粗化,大量碳化物聚集于晶界,加剧了基材产生热裂纹的倾向;熔覆时基材的熔化使得基材物质进入熔合区和熔覆层区,导致大量 TiC 和 WC 碳化物脆性相沿某些晶界聚积,使得基材中的裂纹在熔合区和熔覆层区中沿晶界扩展^[11,12]。

解决 K403 材料激光熔覆容易产生裂纹的问题,必须采用合理的激光熔覆工艺,降低热影响区温度,缩小基材的热影响区,减小基材产生热裂纹的可能性;提高熔覆层合金液体的过热度,使熔覆层合金液体在大的表面张力作用下,与基体合金液体在熔合区能够充分混合,降低基体的脆性,阻止裂纹的产生;提高冷却速度,加快熔覆层的凝固,减少碳化物脆性相的偏析程度,增加裂纹扩展的阻力。

4.3 脉冲熔覆

采用可存储数字示波器测量高压电压与激光器放电电流的波形可以看出,当程序控制可控硅控制端输入脉冲控制信号时,激光器电流波形为脉冲状态,且脉冲频率与占空比可在一定范围内任意调节,放电电流大小则随着控制脉冲高电平电压大小线性

变化。用功率计测量实际输出功率也发现,平均输出激光功率大小等于脉冲高电平电压大小对应的连续激光功率值与占空比的乘积。即

$$P_{out} = P_{max} \times D, \quad (2)$$

其中, P_{out} 为激光平均输出功率, P_{max} 为激光峰值功率, D 为占空比。

可见,采用这种脉冲功率控制方式,可以输出脉冲激光,同时在脉冲高电平时激光器的的工作状态与对应的连续工作状态一致。因此,可以在有效频率范围内输出稳定可控的脉冲激光。本文对激光器在不同频率和占空比时的放电电流波形及涡轮机叶片激光熔覆结果进行了研究比较,如图 5 所示。

通过对放电电流及输出激光功率进行实时监测,并分析脉冲激光加工工样品质量发现,当要求的

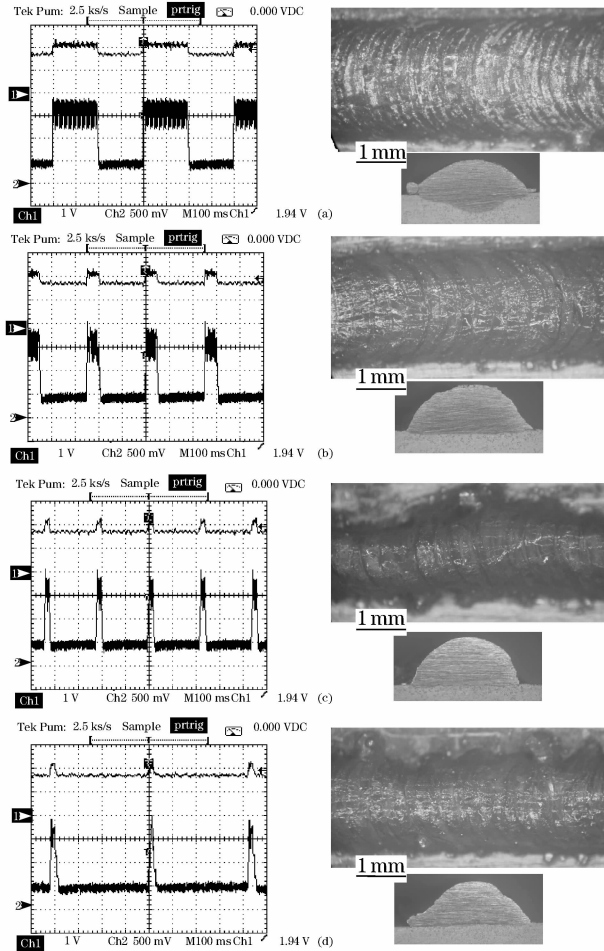


图 5 不同脉冲频率及占空比下的熔覆层形貌

Fig. 5 Cladding morphology with different pulse frequencies and duty cycles. (a) $f = 2.5$ Hz, duty cycle: 50%; (b) $f = 4$ Hz, duty cycle: 20%; (c) $f = 5$ Hz, duty cycle: 10%; (d) $f = 5$ Hz, duty cycle: 5%

脉冲频率低于 5 Hz, 占空比大于 5% 时,可采用该方案实现脉冲激光输出。此时,熔覆层与基体的界面结合完整、无缺陷,熔覆层宽度、熔化层的宽度保持相等。当占空比小于 15% 时,外观粗糙、宽度不均匀;当占空比大于 15% 时,外观平整光滑;且当脉冲频率为 4 Hz, 占空比为 20% 时,熔覆层与基体的结合界面为“平底”形貌,获得的熔覆质量最佳。

4.4 脉冲/连续激光熔覆实验结果比较和讨论

从大量实验发现,脉冲激光熔覆工艺范围较宽,熔覆层稀释率比连续激光熔覆层的稀释率低 20%。在相同线能量时,脉冲激光熔覆层硬度比连续激光熔覆层硬度高大约 5%。实验结果如图 6 所示。

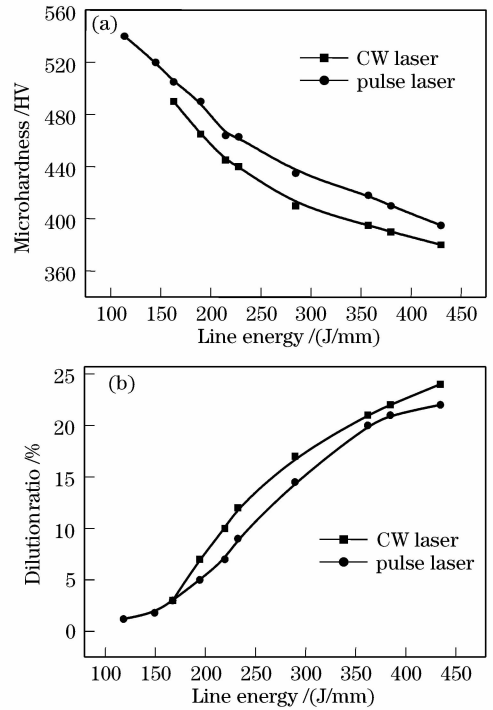


图 6 线能量对稀释率(a)及熔覆层硬度(b)的影响

Fig. 6 Influence of the line energy on the dilution ratio (a) and microhardness (b)

连续/脉冲激光熔覆热影响区对比如图 7 所示,扫描速度 2 mm/s,激光平均功率 570 W,测量结果表明脉冲激光熔覆热影响区与熔合区体积之比为 2.5,连续激光熔覆热影响区与熔合区之比为 3.8,可见脉冲激光熔覆热影响区比连续激光熔覆热影响区小 50%。

脉冲激光可采用更高的峰值功率、加热速度和冷却速度,能够提高熔覆层合金液体的过热度、温度梯度并加快熔覆层的凝固。因此缩小了熔合区和基材的热影响区,提高了熔覆层硬度和表面光洁度,并在

大的表面张力作用下使熔覆层合金液体和基体合金液体在熔合区能够充分混合,提高了熔合层的性能。

高功率脉冲 CO₂ 激光用于 K403 材料的熔覆是

一种好的选择。激光熔覆的纵截面图如图 8 所示,熔覆层与基材熔合界面平整、完好、结合紧密、没有裂纹。

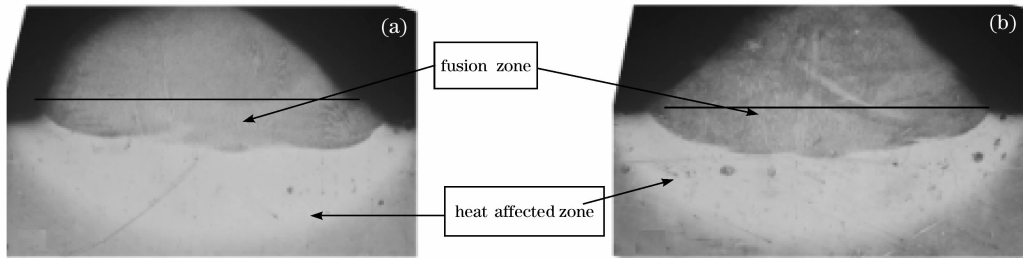


图 7 连续(a)和脉冲(b)激光熔覆热影响区对比

Fig. 7 Compare of the heat affection zone of continuous (a) and pulse (b) laser cladding

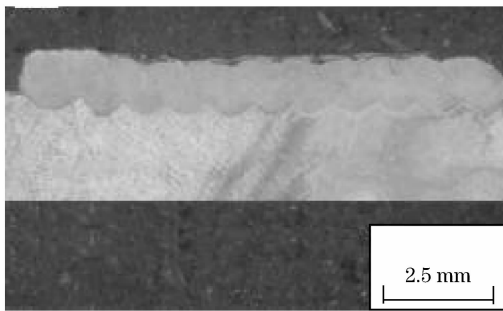


图 8 脉冲激光熔覆纵截面

Fig. 8 Vertical section of pulse laser cladding

5 结 论

采用脉冲放电电流控制方案实现脉冲激光输出,大部分工作由软件实现,脉冲频率与占空比在一定范围内可任意调节,且根据设定的脉冲频率与占空比大小,由程序自动控制采用开环或闭环控制方案。实验证明,当要求的脉冲频率低于 5 Hz,占空比大于 5% 时,可采用该方案实现脉冲激光输出。将该脉冲激光应用于飞机发动机涡轮叶片的表面熔覆,熔覆后热影响区比连续激光减少 50%,硬度提高 5%,界面结合性能与母材相当,解决了连续激光焊接出现裂纹及叶片变形的问题,大大提高了发动机涡轮叶片的抗冲击性和耐磨性。

参 考 文 献

- 1 Q. L. Deng, A. N. Xie, Z. J. Ge *et al.*. Influence of rare-earth La203 on the properties of laser cladding on 316L stainless steel coatings [J]. *Proc. ICSFT*, 2006, **21**(9):651~653
- 2 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Cao Xiansuo *et al.*. Analysis of silicon surface profile of pulsed laser bending processing [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(11):1589~1593

- 吴东江, 马广义, 曹先锁 等. 脉冲激光弯曲成形技术中硅片表面的形貌分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1589~1593
- 3 Xu Bing, Song Renguo, Tang Puhong *et al.*. Preparation of silver nanoparticles colloid by pulsed laser ablation [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(11):1582~1588
- 徐 兵, 宋仁国, 唐普洪 等. 脉冲激光烧蚀法制备 Ag 纳米粒子胶体[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1582~1588
- 4 Robert C. Kocher. Power-supply designs improve as components get better [J]. *Laser Focus World*, 1991, **4**(3):378~383
- 5 Peng Xiaoyuan, Li Shimin, Han Yansheng. A novel resonant switching mode power supply for high-power lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A25**(2):131~134
- 彭晓原, 李适民, 韩晏生. 高功率激光器新型谐振变换型开关电源[J]. *中国激光*, 1999, **A25**(2):131~134
- 6 Peng Hao, Tang Xiahui, Liu Juan *et al.*. Characteristics of CW/pulse discharge for high power transverse flow CO₂ laser and its application [C]. *SPIE*, 2007, 6825/8
- 7 Liu Juan, Tang Xiahui. Integrated control system of transverse flow CO₂ laser and its application [C]. *SPIE*, 2007, 6825/i
- 8 Liu Juan, Peng Hao, Li Jiarong. Study on distributed control system for the high power transverse-flow CO₂ laser [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(6):32~33
- 柳 娟, 彭 浩, 李家熔. 高功率横流 CO₂ 激光器集散控制系统的研究[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(6):32~33
- 9 Li Mingxi, Zhao Qiangyu, He Yizhu. Effect of V-N alloy on microstructure and wear resistance of co-based alloy laser coating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1260~1264
- 李明喜, 赵庆宇, 何宜柱. 钒氮合金对激光熔覆钴基金属涂层组织和耐磨性的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1260~1264
- 10 Liu Rongxiang, Ji Zesheng. Microscopic morphology and microstructure of phases between dilution zone and clad zone in laser remelting NiCrBSi/TiN layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1292~1296
- 刘荣祥, 吉泽升. 激光重熔层稀释区与熔覆区界面区域的组织结构[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1292~1296
- 11 Zhong Rutao. Study on beam characteristics of high power transverse flow CO₂ laser and its influence on processing quality [D]. Ph. D. Thesis Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 2008
- 钟如涛. 高功率横流 CO₂ 激光光束特性及其加工质量影响的研究[D]. 博士论文 华中科技大学, 武汉, 2008
- 12 J. Mazumder, P. S. Mohanty, A. Kar. Mathematical modelling of laser materials processing [J]. *Int. J. of Materials and Product Technology*, 1996, **11**(3/4):193~194