

文章编号: 0258-7025(2010)08-2080-06

# 环形激光光内同轴送丝焊接试验研究

傅戈雁 石世宏 韩学磊

(苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

**摘要** 激光填丝焊是一种具有广泛应用领域的焊接工艺。针对现有旁送丝填焊工艺存在的不足,提出了光束中空、正向同轴送丝创新方案。利用所研制的光内同轴送丝焊接装置进行了焊接试验。结果表明,同轴送丝焊接具有光丝耦合姿态固定、热源对称、能量分布合理等突出优势。焊缝表面光滑平整,截面形状对称。焊缝质量各向同性,适用于一维和多维焊接。对变动激光功率、扫描速度和送丝速度进行了工艺试验,获得了一组优化的工艺参数。焊缝的扫描电镜(SEM)分析和拉伸试验表明,激光光内同轴送丝所获得的焊道组织致密、均匀,无气孔、夹渣等缺陷,是理想的激热激冷组织;焊缝与基材结合牢固,结合区无明显缺陷。

**关键词** 激光技术;激光填丝焊;环形激光;光内同轴送丝

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2080

## Test Research of Laser Welding Based on Coaxial Wire Feeding through an Annular Laser Beam

Fu Geyan Shi Shihong Han Xuelei

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China)

**Abstract** Laser welding with filler wire is a widely used welding technology. In view of the disadvantages of the welding technology with side wire feeding, a new method of coaxial wire-feeding is put forward based on an annular laser beam. The welding experiments have been done with the self-design internal coaxial wire feeding welding equipment. The results show that the coaxial wire feeding welding technology has prominent advantages on many aspects, such as stability of coupling between beam and wire, symmetry of heat resource, and optimization of energy distribution. The welding seam surfaces are smooth and flat and their cross sections are symmetrical. The property of isotropic quality is suitable for one-dimensional and multi-dimensional welding. Through altering of laser power, scanning speed, and wire feeding speed, a set of optimal process parameters have been obtained. The results of scanning electron microscope (SEM) analysis and tensile test show that the welding seam produced by this new method has excellent microstructure which is very dense without pores and impurities. Moreover, the metallurgical bonding between welding seam and substrate is very strong and has no obvious flaws.

**Key words** laser technique; laser welding with filler wire; annular laser beam; internal coaxial wire-feeding

## 1 引 言

激光填丝焊是在一般激光焊过程中,连续填送焊丝熔入熔池实现加入填充金属的焊接工艺。激光填丝焊由于能够提高接缝间隙的宽容度,改善焊接接头的组织和性能,增强焊接厚板和异种金属能力,用于材料表面堆焊和合金化等,极大地扩展了激光焊接的应用领域<sup>[1~4]</sup>。现有激光填丝焊工艺原理为:激光束垂直照射并在工件表面处聚焦。焊丝从侧向送入聚焦光斑内(旁送丝),被激光束加热熔化

后,填充焊缝间隙。在激光束的继续作用下,基体金属熔化,形成熔化小孔。小孔周围的金属能将入射的激光能量几乎全部吸收。当工件移动时,小孔移动并凝固而形成焊缝。现有激光填丝焊工艺尚存在以下突出问题:1) 由于光、丝不同轴,二者之间位置的微小波动都会直接影响其精确耦合,从而迅速影响焊道质量<sup>[5]</sup>。2) 焊丝仅受激光的单边照射,材料受热不均。为保证熔透,焊接时需要输入较高的功率。不仅消耗能源,高能输入还将导致熔池持续高

收稿日期:2010-01-21; 收到修改稿日期:2010-01-29

基金项目:国家自然科学基金(50975187,10972150)和苏州市科技创新资金(SG0923)资助课题。

作者简介:傅戈雁(1959—),女,博士,教授,主要从事激光加工与材料强度方面的研究。E-mail:fugeyan@suda.edu.cn

温和慢冷却,使得熔覆组织常常不能出现期望的激冷相<sup>[6]</sup>。3) 非对称热造成焊缝质量不可避免地受到扫描方向性影响,不适合二维或三维焊接。

针对上述问题,本文提出了一种新的环形激光光内同轴送丝焊接方案<sup>[7]</sup>,并进行了光内送丝焊接试验研究,并初步探索了合适的工艺参数。

## 2 同轴送丝方案的实现

激光光内同轴送丝原理如图1所示。利用圆锥-圆环双反射镜技术,将入射的实心圆形激光束在喷头装置中进行扩束、聚合等光学变换,使投射至成形表面上的聚焦激光束内部形成一中空锥形的无光区<sup>[7]</sup>。单根送丝喷嘴即可布置在此无光区中,实现焊丝与聚焦激光束同轴正向送进。初步实验与分析可知<sup>[8]</sup>,光内同轴送丝与旁送丝技术比较有如下优点:1) 焊丝与光束同轴正向送进,送进角固定为 $90^\circ$ 。在成形加工时,送进方向、送进角及送进位置均不变,可消除扫描方向性影响;2) 易于实现光丝精确耦合,获得高质量平整焊缝;3) 丝材完全被光束包围且各向热源对称,熔化凝固速度加快,熔池对流传热传质更均匀,利于获得高性能焊缝。而且,丝材到达高密度光斑之前恰好要经过光束密度渐强的区域,具有熔化前预热作用,能有效利用激光能量,实现速熔速冷,获得激冷熔覆组织。

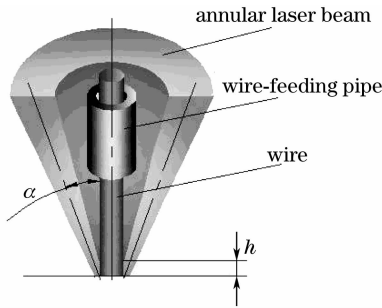


图1 同轴送丝方案

Fig.1 Coaxial wire feeding

显而易见,同轴送丝新工艺具有光丝耦合姿态固定,热源分布合理等突出优势,适合一维和多维焊接。

## 3 试验装置与材料

### 3.1 试验装置

设计了整套激光熔覆光内送丝系统,如图2所示。系统分为激光能量输出装置、CNC工作台、焊丝送进及控制装置几部分。其中焊丝送进及控制装置由送丝机、丝材运动参数控制柜以及与激光头集

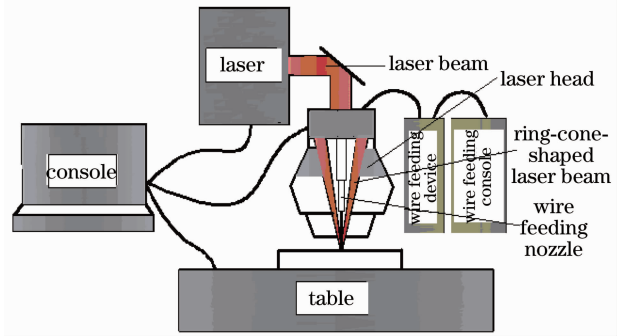


图2 激光光内同轴送丝焊接系统

Fig.2 Welding system of coaxial wire feeding

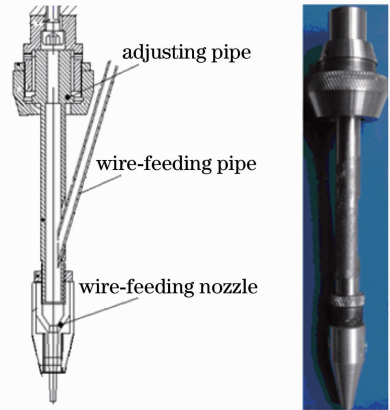


图3 送丝嘴结构和实物

Fig.3 Frame and parts of wire-feeding nozzle

成的送丝嘴组成。送丝嘴结构如图3所示。

### 3.2 试验材料

基材选用45#钢板,50 mm×60 mm×10 mm,开坡口。用砂纸打磨,并用乙醇清洗待加工表面,除去铁锈与污渍。焊丝采用RM-56 CO<sub>2</sub>激光专用焊丝,直径0.8 mm。制氮机从大气中制取氮气,纯度99.99%,用作焊接保护气。

## 4 扫描方向性试验

如图1所示,光内同轴送丝工艺中,焊丝送进角恒为 $90^\circ$ ,并在焦点附近一段距离 $h$ 受到环形激光束均匀照射。激光热源相对金属焊丝是完全对称的。因此,沿不同方向扫描时,焊丝与环形激光束作用的情形完全相同,原理上不存在扫描方向性问题。采用激光功率4.0 kW,光斑直径2 mm,送丝速度40 mm/s,扫描速度6 mm/s,作迷宫式路径扫描,得到相应熔道如图4所示。由图可见不同扫描方向上的熔道形貌与尺寸均匀一致,基本上不受扫描方向的影响。光内同轴送丝的这一特性在二维或三维焊接中意义尤其重要。



图4 不同方向扫描熔道

Fig.4 Melting lines along different directions

## 5 工艺参数对焊缝成形质量的影响

### 5.1 激光功率的影响

激光功率的变化对同轴送丝工艺中焊缝宽度、高度皆产生影响,且对焊缝成形质量的影响非常明显。试验采用激光扫描速度 $5\text{ mm/s}$ ,送丝速度

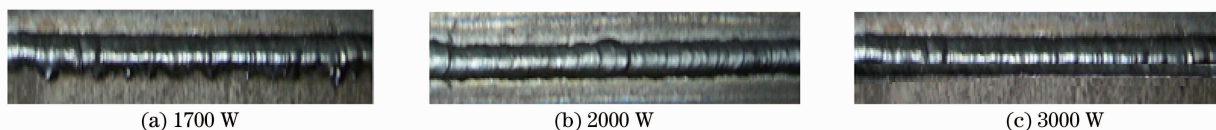


图5 不同激光功率下焊缝的表面形貌

Fig.5 Surface profiles of welding line in different laser powers

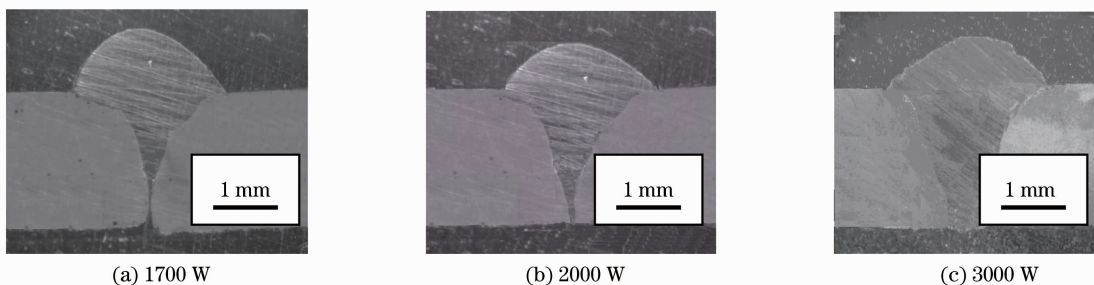


图6 不同激光功率下焊缝的截面形貌

Fig.6 Section profiles of welding line in different laser powers

### 5.2 扫描速度的影响

激光扫描速度对同轴送丝焊接的熔深、熔宽有显著的影响,随着激光扫描速度的提高,熔深和熔宽有减小的趋势,在一定的功率下,提高扫描速度,会使线能量(单位长度输入焊缝的能量)下降,熔深熔宽也随之下降。因而适当降低扫描速度可加大熔深。但是在试验过程中发现,过低的扫描速度容易出现焊穿、焊缝下凹等缺陷。这是因为低速下熔池较宽,熔池的流动性更好,再加上更多焊丝熔入熔池,此时的金属蒸气反作用力和熔池重力的合力远大于熔池的表面张力,在这3个力的合力作用下熔池下凹甚至滴落,焊后焊缝会出现下凹和焊穿现象。而当扫描速度过快时,工件不能焊透甚至影响焊接

过程,不能形成合格的焊缝。对于给定的功率条件,存在一个最低速度,在此最低焊接速度下的熔深为给定焊接条件的最大熔深。

激光扫描速度的变化直接导致了焊缝宽度和高度的变化。图7是激光功率为 $3000\text{ W}$ ,送丝速度为 $75\text{ mm/s}$ ,扫描速度分别为 $4\text{ mm/s}$ 和 $6\text{ mm/s}$ 的焊缝表面形貌图。当激光扫描速度较小时,单位扫描距离内进入熔池的金属焊丝变多,激光作用在堆焊面上的时间也增长,因此熔池宽度加大,同时有更多金属焊丝熔化后向填充堆焊层高度方向生长,从而填充堆焊层宽度和高度增大,这时熔化的焊丝材料可以填满焊缝,焊缝成形良好,板件被完全焊透,其截面形貌如图8(a)所示;随着扫描速度的增大,由

$75\text{ mm/s}$ ,光斑直径 $2\text{ mm}$ ,功率由 $1500\text{ W}$ 逐渐增大到 $4500\text{ W}$ 。得到焊缝的表面形貌如图5所示,截面形貌如图6所示。当激光功率约为 $1700\text{ W}$ 以下时,由于激光输入能量较低,金属焊丝熔化和熔池内熔体的流动都不充分,焊缝表面出现毛刺,填焊宽度较小,焊缝余高较大,不能焊透板件,如图5(a)和图6(a)所示。当激光功率达到 $2000\text{ W}$ 以上时,金属焊丝可以完全熔化,并且可以得到稳定的焊道。焊缝的余高开始变小,熔深和熔宽也随之增加,且焊缝深宽比迅速加大,如图5(b)和图6(b)所示。当激光功率在 $3000\sim 4000\text{ W}$ 时,受激光光斑大小的限制,焊缝的最大宽度已不再增加,而熔深继续增加,这时板件完全可以焊透,如图5(c)和图6(c)所示。激光功率继续增大到 $4500\text{ W}$ 左右,此时焊缝会因功率过大而出现烧损气化现象。

过程,不能形成合格的焊缝。对于给定的功率条件,存在一个最低速度,在此最低焊接速度下的熔深为给定焊接条件的最大熔深。

激光扫描速度的变化直接导致了焊缝宽度和高度的变化。图7是激光功率为 $3000\text{ W}$ ,送丝速度为 $75\text{ mm/s}$ ,扫描速度分别为 $4\text{ mm/s}$ 和 $6\text{ mm/s}$ 的焊缝表面形貌图。当激光扫描速度较小时,单位扫描距离内进入熔池的金属焊丝变多,激光作用在堆焊面上的时间也增长,因此熔池宽度加大,同时有更多金属焊丝熔化后向填充堆焊层高度方向生长,从而填充堆焊层宽度和高度增大,这时熔化的焊丝材料可以填满焊缝,焊缝成形良好,板件被完全焊透,其截面形貌如图8(a)所示;随着扫描速度的增大,由



于单位时间内向熔池供给的能量减少,填充堆焊层宽度和高度均减小。若激光扫描速度过大,单位扫描距离内进入熔池的金属丝材料减少,激光束作用在填充堆焊层表面的时间变短,形成熔池的变小,所以焊缝宽度和高度显著降低,导致熔化的金属焊丝不能填满焊缝,板件的背面没有焊透,其截面形貌如图 8(b)所示。



图 7 不同扫描速度下焊缝的表面形貌

Fig. 7 Surface profiles of welding line in different scan speeds

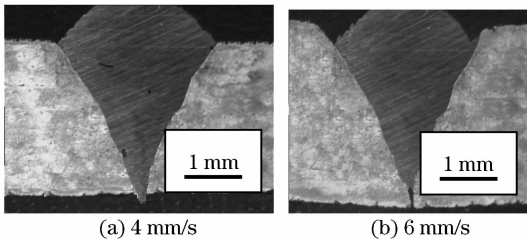


图 8 不同扫描速度下焊缝的截面形貌

Fig. 8 Section profiles of welding line in different scan speeds

因此可以根据焊缝间隙量的大小,利用改变激光扫描速度的方法来控制金属焊丝的填充量。但是当坡口间隙较小时,在送丝速度不变的条件下,由于填充坡口需要的金属量较小,对应的焊接速度较大,造成焊接线能量过分减小,不利于熔池的稳定建立,影响了焊缝成形。所以此时不宜用调整扫描速度的方法来控制金属填充量,而应在合适的扫描速度下,通过调整送丝速度来控制金属填充量。

### 5.3 送丝速度对焊缝成形质量的影响

送丝速度的快慢,将会影响金属焊丝填充量的多少,从而影响焊缝成形效果。合理选择送丝速度可以充分利用激光能量,提高生产效率。送丝速度应根据焊缝间隙量来确定,同时应该与激光扫描速度相匹配。激光焊接过程中焊丝几乎 100% 过渡到了焊接熔池中,因此,可根据焊接过程的物质平衡来计算送丝速度。截面的焊缝余高及接缝间隙由焊丝

填充,故存在关系式<sup>[1]</sup>

$$k \times b \times \delta \times u_0 = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times v_f, \quad (1)$$

式中  $b$  为拼缝间隙,  $\delta$  为工件厚度,  $u_0$  为激光扫描速度,  $d$  为焊丝直径,  $v_f$  为送丝速度,  $k$  为成形系数,成形系数由余高的要求确定,约为 1.1~1.2。

根据(1)式,在焊接过程中根据坡口间隙的大小可以利用两种方法来控制金属填充量:一是固定激光扫描速度,坡口间隙发生变化时,通过改变送丝速度控制金属填充量来保证焊缝成形;二是固定送丝速度,坡口间隙发生变化时,通过改变激光扫描速度控制金属填充量来保证焊缝成形。当坡口间隙较大时,若激光扫描速度不变,由于填充坡口需要的金属量较大,对应的送丝速度也较大。当送丝速度太大,焊丝对激光反射过大,会使焊接过程稳定性下降。所以,此时不宜用提高送丝速度的方法来控制金属填充量,而应在合适的送丝速度下,通过激光调整扫描速度来控制金属填充量。

图 9 是激光功率为 3000 W,激光扫描速度为 5 mm/s,送丝速度分别为 40,60 和 80 mm/s 的成形焊缝表面形貌图。试验过程中发现,随着送丝速度的增大,金属焊丝对激光束的反射率增加,吸收率减小,单位扫描距离内进入焊缝的填充材料增加,热影响区的熔宽略有加大,而焊缝的余高明显增高。当送丝速度为 40 mm/s 时,由于送丝速度过小,可以形成稳定的熔池,焊缝成形表面形貌也较好,板件能被焊透,但是由于送丝量较少,焊缝余高较小,填充的焊丝不足以填满焊缝,如图 10(a)所示;当送丝速度提高为 60 mm/s 时,焊缝成形表面形貌很好,由于送丝量的增大,可以填满焊缝,完全可以焊透板件,如图 10(b)所示;当送丝速度达到 80 mm/s 时,激光利用率下降,单位扫描距离内进入熔池的金属焊丝增多,熔池不稳定,焊丝熔化不充分。焊缝表面粗糙,板件背面没有焊透,如图 10(c)所示。

由图 5~10 可以看出,激光光内同轴送丝焊接工艺是完全可行的。只要工艺参数在合理范围内,即可获得表面平整、均匀,截面形貌对称、余高小、熔深大、焊透成形的焊缝。

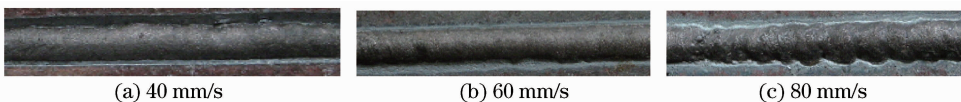


图 9 不同送丝速度下的焊缝表面形貌

Fig. 9 Surface profiles of welding line in different wire-feeding speeds

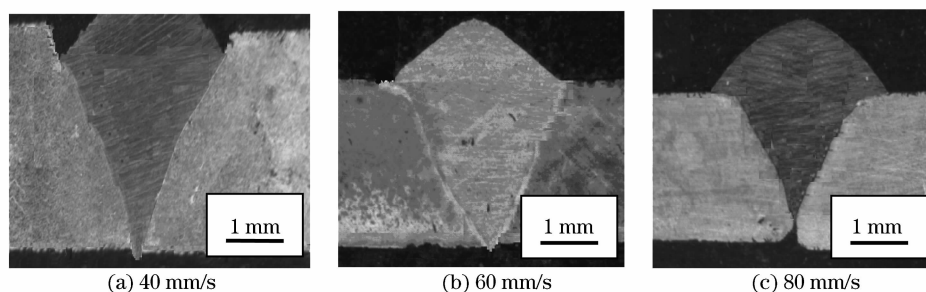


图 10 不同送丝速度下的焊缝截面形貌

Fig. 10 Section profiles of welding line in different wire-feeding speeds

## 6 焊缝性能分析

焊缝组织的扫描电镜(SEM)分析图片如图 11 所示。由图 11(a)可知,激光光内同轴送丝所获得的焊道组织致密、均匀,无气孔、夹渣等缺陷,是理想的激热激冷组织。由图 11(b)可知,焊缝与基材结合区狭窄,热影响和稀释影响小,焊缝与基材结合紧密,无明显缺陷。

焊缝强度拉伸试验如图 12 所示。图 12(a)为

根据力学性能试验标准 GB2651-1989《焊接接头拉伸试验方法》制成的焊接接头拉伸试样;图 12(b)为在拉伸夹持力 5 MPa,拉伸速度 0.5 mm/s 下拉伸断口外貌。拉伸断口位置大多在焊缝中部,平均抗拉强度为 328 MPa,约为 45# 钢材拉伸强度 394 MPa 的 95%。表明光内同轴送丝焊接的焊缝与基材结合良好,焊缝接头的力学性能取决于焊丝材料。

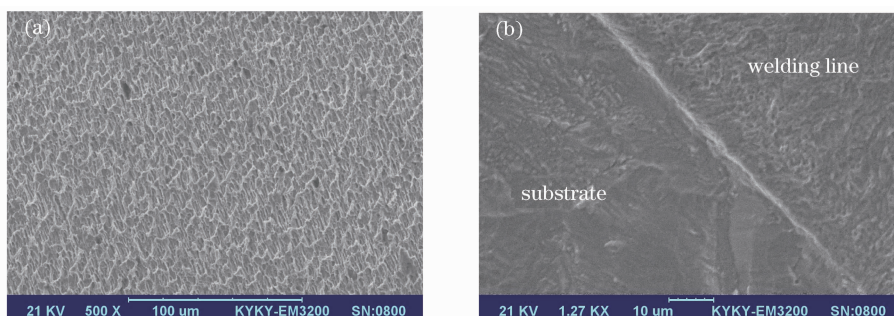


图 11 焊缝组织 SEM 分析。(a) 焊缝组织;(b) 焊缝与基材结合处组织

Fig. 11 SEM analyze of welding line. (a) structure of welding line; (b) structure of combining zone of welding line and substrate

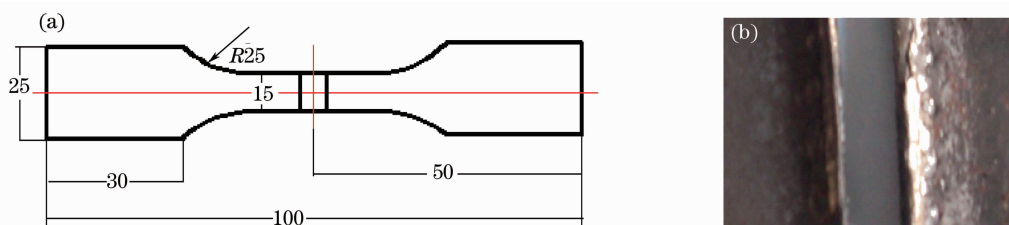


图 12 焊缝强度拉伸试验。(a) 拉伸试样;(b) 焊缝中部拉伸断样品

Fig. 12 Tensile test of welding line intensity. (a) sample of tensile test; (b) sample ruptured from the middle of welding line

## 7 结 论

1) 利用圆锥-圆环双反射镜技术,可获得中空聚焦激光束,进而实现光内同轴送丝焊接。焊丝送进角恒为  $90^\circ$ ,光丝耦合姿态固定,焊接热源对称,

能量分布合理。沿各个扫描方向的焊道形貌、宽窄均匀一致,适用于一维和多维焊接。

2) 光内同轴送丝焊接能获得质量稳定的焊缝。对于 45# 钢材, RM-56  $\text{CO}_2$  激光专用焊丝,光斑

直径2 mm,合理的焊接成形参数范围为:激光功率2500~4000 W;扫描速度4 mm/s左右;送丝速度60 mm/s左右。

3) 光内同轴送丝焊缝对称,组织细小均匀,为期望的激冷相。焊缝与基材结合良好,焊缝接头的力学性能取决于焊丝材料。

### 参 考 文 献

- 1 Du Hanbin, Hu Lunji, Hu Xiyuan. Technology of laser filler wire welding [J]. *Aviation Manufacture Technology*, 2002, **11**: 60~63  
杜汉斌,胡伦骥,胡席远. 激光填丝焊技术[J]. 航空制造技术, 2002, **11**:60~63
- 2 Liu Bili, Xie Songjing, Yao Jianhua. Application and development trend of laser welding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9):43~47  
刘必利,谢颂京,姚建华. 激光焊接技术应用及其发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(9):43~47
- 3 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1783~1788  
李俐群,陈彦宾,陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1783~1788
- 4 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1680~1685  
肖荣诗,吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1680~1685
- 5 Waheed Ui Haq Syed, Lin Li. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **248**(1-4):518~524
- 6 Fude Wang, J. Mei, Xinhua Wu. Microstructure study of direct laser fabricated Ti alloy using powder and wire [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **253**(3):1424~1430
- 7 Fu Geyan, Shi Shihong, Hu Jin *et al.*. A method of wire feeding in laser beam and a set of internal-coaxial wire feeding; China, 200710046020.2 [P]. 2009-03-18  
傅戈雁,石世宏,胡进等. 激光光内送丝熔覆方法与光内送丝装置;中国,200710046020.2[P]. 2009-03-18
- 8 Shi Shihong, Fu Geyan, Li Long *et al.*. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):266~270  
石世宏,傅戈雁,李龙等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(1):266~270