

文章编号: 0258-7025(2007)11-1562-05

# 黄铜-低碳钢异种金属激光深熔钎焊

皮友东, 董 鹏, 杨武雄, 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

**摘要** 采用 1 kW Nd:YAG 激光器焊接 2 mm 厚 H62 黄铜和 20<sup>#</sup> 钢管材。聚焦激光作用在接头黄铜一侧形成深熔焊接熔池, 熔化的黄铜浸润碳钢界面形成接头。因此, 在焊缝的黄铜一侧为深熔焊, 碳钢一侧为钎焊, 这一方法称为激光深熔钎焊 (LPB)。采用光学显微镜、扫描电镜 (SEM) 和 X 射线能谱分析 (EDS) 对焊缝成形和接头界面进行观察, 发现黄铜母材与焊缝界面是正常的激光深熔焊特征, 同时碳钢母材与焊缝的界面形成了良好的冶金结合, 相互作用区的宽度约为 3  $\mu\text{m}$ 。显微硬度结果表明焊缝硬度值高于黄铜母材。经爆破实验测试, 断裂发生在黄铜一侧, 表明 H62 黄铜-20<sup>#</sup> 钢激光深熔钎焊接头力学性能满足工业使用要求。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 激光深熔钎焊; 黄铜; 低碳钢

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A

## Laser Penetration Brazing of Brass and Low Carbon Steel

PI You-dong, DONG Peng, YANG Wu-xiong, XIAO Rong-shi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** A continuous wave (CW) Nd:YAG laser with a output power of 1 kW was used to join H62 brass and 20<sup>#</sup> low carbon steel with a thickness of 2 mm. The focused laser beam with a diameter of 0.3 mm was irradiated at the brass side of the butt joint. Thus the brass was penetratingly melted and interacted with the solid steel to form a brazing joint. The brass is penetratingly welded, and the low carbon steel is brazed. This process is called laser penetration brazing (LPB). The interfacial characterizations of the joint were investigated by metallographic microscope, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results show that the element diffusion and solution occur and metallurgical bonding is achieved between brass and steel. The width of the interaction layer is about 3  $\mu\text{m}$ . The brass weld is harder than that brass substrate and the failure occurs at the brass substrate but weld judged from the data of bursting test. The mechanic performance of H62 brass and 20<sup>#</sup> low carbon steel butt joint by laser penetration brazing can meet the demand of industrial application.

**Key words** laser technique; laser welding; laser penetration brazing; brass; low carbon steel

## 1 引 言

在航空航天、机械、化工、冶金、制冷等工业制造中, 大量应用到钢与铜合金所形成的异种金属复合零部件结构。这种结构不仅能用于制造合理的焊接结构, 而且能节约大量的有色金属。在零件结构连接的各种方法中焊接是主要加工方法之一。铜与铁高温时的原子半径、晶格类型、晶格常数等比较接近, 在液相中能无限固溶, 在固态下, 虽为有限固溶,

但不易形成脆性金属间化合物, 对焊接有利。但钢和铜合金两种材料物理性质(熔化温度、热导率、线膨胀系数、流动性等)存在较大差异, 增加了焊接的难度<sup>[1]</sup>。

气焊、埋弧焊、惰性气体保护焊等熔焊方法都可以用来焊接钢与铜合金异种接头。钨极惰性气体保护焊(TIG)适于焊接薄件, 但很难控制电弧热量对两种金属的分配。气焊时由于液态金属与钢的接触

收稿日期: 2007-01-18; 收到修改稿日期: 2007-04-19

基金项目: 国家教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0204)资助项目。

作者简介: 皮友东(1976—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail: youdongp@sina.com

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 目前从事激光技术与材料相互作用等方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn (通信作者)

时间长,近缝区渗透裂纹严重<sup>[2]</sup>。另外可以采用真空钎焊<sup>[3]</sup>和氧乙炔火焰钎焊<sup>[4]</sup>等钎焊方法来进行铜钢接头的连接,但接头容易出现气孔、夹渣、自裂等焊接缺陷,钎焊后对钎溶剂要进行严格清洗,否则制品容易腐蚀。

激光焊接以其技术和经济上的优势,逐渐被应用到工业领域中。Lampa 等<sup>[5]</sup>采用 1300 W CO<sub>2</sub> 激光熔焊铜合金和不锈钢,在焊接过程中,液态铜向近缝区钢表层渗透,易出现渗透裂纹。T. A. Mai 等<sup>[6]</sup>采用 350 W 脉冲 Nd:YAG 激光器以热导焊接方式熔焊铜合金和工具钢精密薄件,发现当激光束作用在钢一侧 0.2 mm,且限制钢中铜质量分数小于 2% 时,熔合区无裂纹。近年来,国内外一些研究单位采用激光熔钎焊方法进行异种金属连接。德国布莱梅应用射线技术研究激光熔钎焊接方法,实现了铝合金-钛合金、铝合金-低碳钢薄板搭接接头的连接<sup>[7,8]</sup>。丁健君等<sup>[9]</sup>采用类似的方法也实现了 AA6056 铝合金与 XC18 低碳钢的连接。封小松等<sup>[10]</sup>采用激光熔钎焊方法,通过熔化填充钎料实现了 Al/Ti 薄板对接接头的连接。但焊接过程对工艺参数要求严格,接头厚度不同位置的截面金属间化合物的厚度和形态各不相同<sup>[10]</sup>。

空调制冷业中有一种结构对黄铜与低碳钢的连接提出了如下技术要求:玻璃观察窗烧结在低碳钢上,低碳钢与黄铜须焊接在一起,因此焊接过程中要求严格限制热输入。针对这种特殊的工业要求,本文选用高能激光焊接方法,提出一种激光深熔钎焊工艺来实现黄铜与低碳钢的连接。

## 2 实验条件及方法

实验采用德国 HASS 公司生产的 1006D 型 Nd:YAG 固体激光器,通过直径为 0.6 mm 的光纤传输,最大输出功率为 1000 W,聚焦镜焦距为 100 mm,聚焦光束束腰直径约 0.3 mm。

试样为 H62 黄铜管材和 20<sup>#</sup> 钢管材,外径为  $\phi 28$  mm,采用螺纹连接装配固定,焊接接头管壁厚度 2 mm。材料主要成分见表 1,主要物理性能见表 2。

表 1 实验材料的主要成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of materials  
(weight percent)

	Zn	Pb	C	Cu	Fe
Brass	40	2	—	Bal	—
Mild steel	—	—	0.17~0.24	—	Bal

表 2 材料的主要物理性能

Table 2 Physical properties of materials

	Melting point /°C	Specific heat /(J/(kg·K))	Heat conductivity /(W/(m·K))	Linear expansion coefficient /10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Brass	950	384	104.7	17.8
Mild steel	1460	490	47	11.16

焊接前先用丙酮擦洗待焊接部位,除去表面油污,然后用超声波清洗仪清洗工件,进一步去除残留在待焊表面和端面的污渍。考虑到低碳钢比黄铜更能有效地吸收激光,将聚焦激光作用在碳钢一侧,但

是,得到的焊缝结果并不理想,焊缝外观成型差(见图 1),焊缝中出现未熔合、裂纹、气孔等缺陷(见图 2)。因此,利用激光深熔焊及熔钎焊原理,提出激光深熔钎焊方法,原理如图 3 所示。聚焦激光束作用在

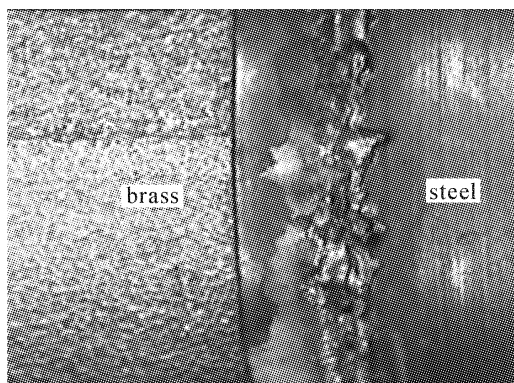


图 1 焊缝外观

Fig. 1 Appearance of weld seam

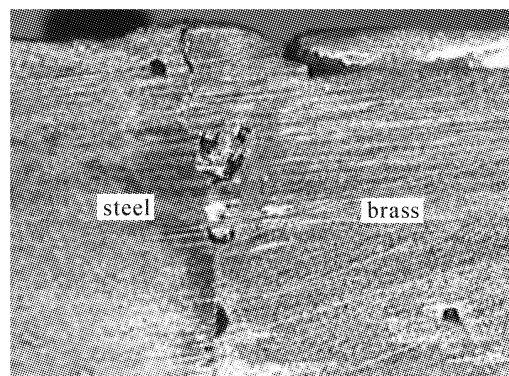


图 2 焊缝横截面

Fig. 2 Cross section of weld seam

H62 黄铜一侧,使其熔化,20# 钢保持原来的固态,利用熔化后的黄铜液态金属浸润碳钢界面形成钎焊接头。通过实验得到表 3 所示的优化工艺参数。

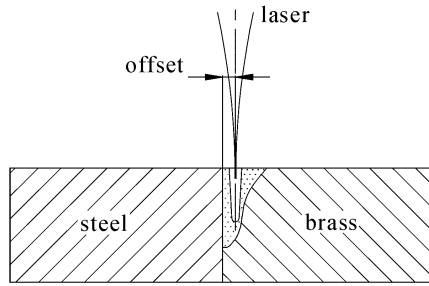


图 3 激光深熔钎焊原理示意图

Fig. 3 Experimental setup of laser penetration brazing

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters

Laser power /W	1000
Welding speed /(m/min)	1.0
Offset /mm	0.1~0.2
Focal position	Work face
Local protection gas /(L/min)	Ar 15

焊后对试样进行解剖、研磨和腐蚀,腐蚀液是质量分数为 36%的 HCl (50 mL)+质量分数为 65%的 HNO<sub>3</sub> (10 mL)+FeCl<sub>3</sub> (5 g)+Alcohol (100 mL),采用 Olympus 金相显微镜以及荷兰 FEI 公司的 Quanta 200 型扫描电子显微镜对焊缝进行观察,并使用 X 射线能谱仪对焊缝的成分进行分析。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 焊缝成形

图 4 所示为接头焊缝外观,表面成形均匀一致。图 5 所示为焊缝横截面宏观形貌,焊缝深宽比达 4:1 以上,碳钢一侧基本保持了原始对接界面的形态,没有发生明显熔化。由于激光作用在 H62 黄铜一侧,所以,焊缝金属由熔化的黄铜组成,焊缝表面存在下凹现象,下凹量平均值为 0.1 mm,这主要是由于焊接过程中 Zn 的蒸发与烧损造成的。

#### 3.2 焊接接头界面分析

对焊缝界面处的结合情况,采用高倍金相显微镜对焊缝钢侧的界面局部放大,分析激光作用于偏铜一侧 0.1~0.2 mm 时形成的熔钎形式的接头,表明这种深熔钎焊接头结构可分为焊缝区、黄铜母材与焊缝间的激光深熔界面区、碳钢母材与焊缝间的钎焊界面区三部分。图 6 为黄铜母材与焊缝间界面

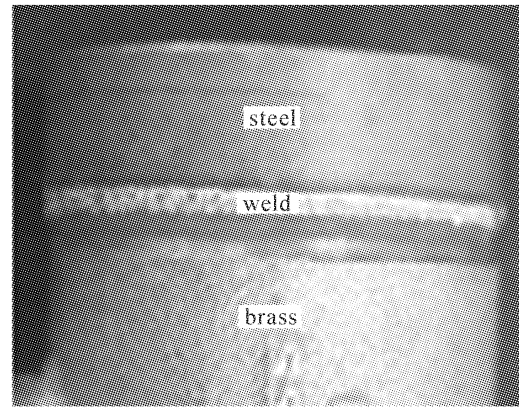


图 4 激光深熔钎焊焊缝外观

Fig. 4 Appearance of the weld seam of laser penetration brazing

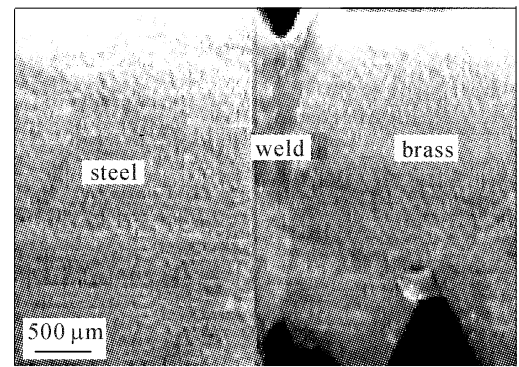


图 5 激光深熔钎焊焊缝横截面

Fig. 5 Cross section of the weld seam of laser penetration brazing

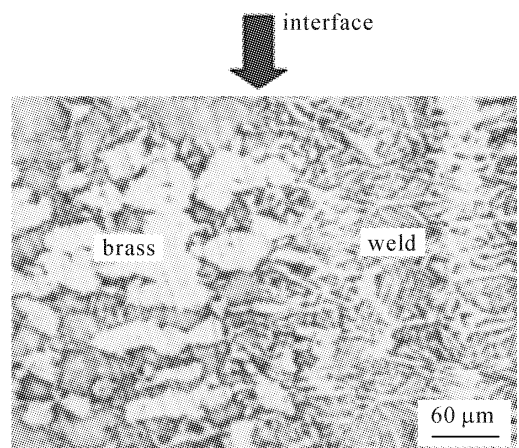


图 6 焊缝黄铜侧界面

Fig. 6 Interface between brass weld and brass

区,可以看出,在黄铜母材与焊缝界面区由母材侧较大晶粒和焊缝的细小晶粒交错形成,没有明显的分界线(图 6 箭头处),为正常的激光深熔焊特征。焊缝区为均匀的枝晶组织,其中浅色基体为 α 相,深色为 β 相(CuZn 基固溶体),在浅色基体上的深色点状物为铅。由于在焊接过程中激光作用在偏黄铜侧,热量直接作用在黄铜母材上,所以焊缝的组织主要

为黄铜的铸态组织。而激光焊接快速加热及冷却的特点,使得焊缝组织细小且均匀。

图 7 为焊缝碳钢侧的界面,可以看出钢与焊缝间有明显的分界线,且不存在明显的过渡层组织,具有明显的钎焊界面特征。分析认为,激光斑点作用在黄铜母材上,形成深熔小孔及由 Cu 合金液态金属组成的熔池,热量向熔池两侧快速传导,由于钢侧母材的热导率相对较低,将会在对接界面钢侧形成热量堆积,但因激光焊接速度较快,使得其界面处的温度始终处于液相线之下或接近液相线,从而导致钢侧母材基本不熔化,同时 Cu 合金液态熔池金属在熔池力及高温的作用下流动性及活性增大,在界面处产生合金元素的扩散。

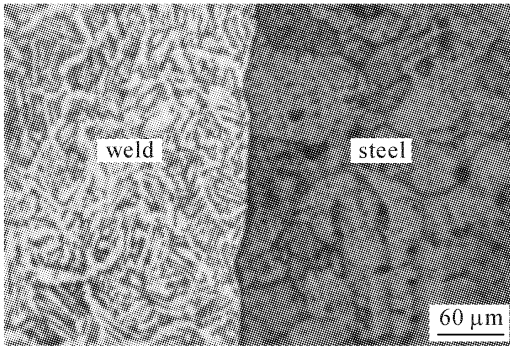


图 7 焊缝碳钢侧界面

Fig. 7 Interface between brass weld and steel

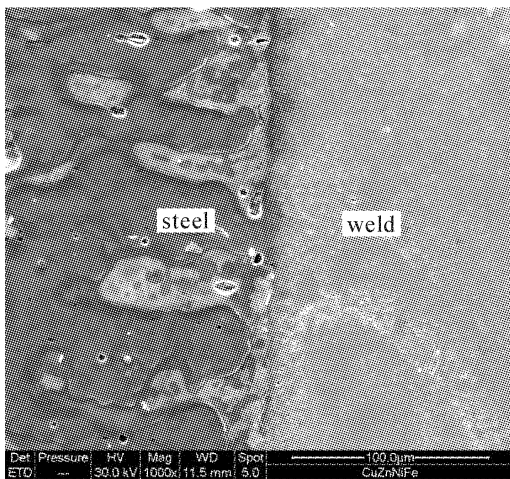


图 8 界面处扫描电子显微镜照片

Fig. 8 SEM picture of the interface

通过扫描电镜(SEM)观察焊缝靠近碳钢一侧界面情况,如图 8 所示,界面结合良好,未发现未熔合现象。为进一步了解界面处合金元素分布,采用了 X 射线能谱分析仪(EDS),测量了焊缝与钢界面处上下不同位置 Cu 和 Fe 元素的线分布情况。元素线分布的线的测量长度为 40 μm。图 9,图 10 箭头所示为 X 射线能谱分析仪测定元素线分布的位置

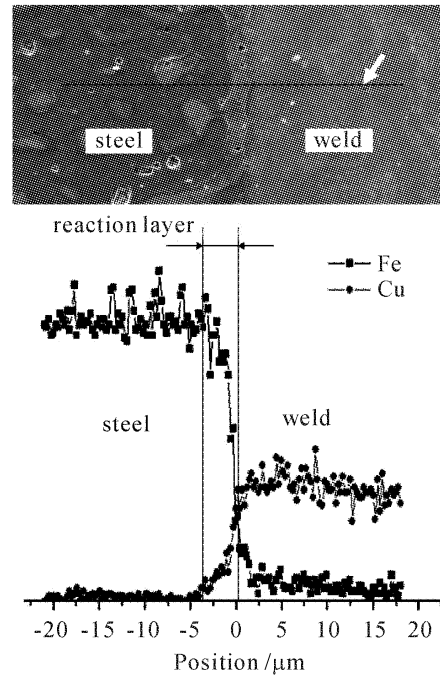


图 9 焊缝与钢界面上部处元素线分布

Fig. 9 Elements distribution on top of the interface between weld and steel

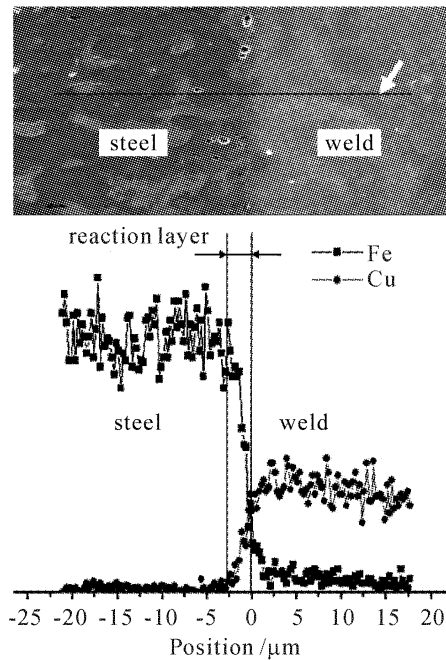


图 10 焊缝与钢界面下部处元素线分布

Fig. 10 Elements distribution below the interface between weld and steel

及焊缝与钢界面处两种元素的线分布测量结果。可见,在两种材料的界面处存在约 3 μm 宽度的扩散层,测量结果表明界面上部分的扩散层宽度略大于下部分扩散层宽度,这是由于上部分熔池温度高于下部分,从而界面处左右焊缝与钢两部分温度差较大,促进了元素的相互扩散与熔解。

根据扩散的热力学分析,扩散系数遵循阿赫纽

斯(Arrhenius)方程:  $D = D_0 \exp[-Q/(RT)]$ , 式中  $R$  为气体常数,  $Q$  为每摩尔原子的激活能,  $T$  为绝对温度。温度是影响扩散的最主要因素, 温度越高, 原子热激活能量越大, 越易发生迁移, 扩散系数就越大。与传统钎焊相比较, 激光深熔钎焊能量密度高, 熔池温度高, 较高的熔池温度提高了液态黄铜在碳钢界面一侧的铺展性, 有利于原子间的相互扩散与熔解, 从而可以在激光高速焊接条件下较短时间内形成钎焊接头。

### 3.3 显微硬度及爆破实验

图 11 是 H62 黄铜与 20# 钢激光深熔钎焊对接接头的显微硬度测试结果。可以看出, 黄铜焊缝的硬度(HV<sub>0.1</sub> 约为 140)比 H62 母材的硬度值(HV<sub>0.1</sub> 约为 120)高, 这主要是由于激光焊接快速加热及冷却的特点, 使得焊缝的显微组织得到细化, 从而使其硬度值提高。

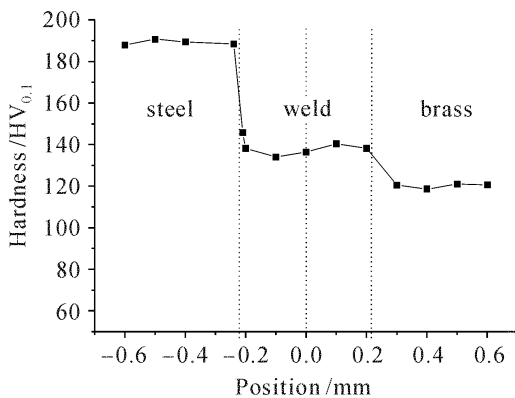


图 11 接头显微硬度

Fig. 11 Hardness distribution curve across the joint

焊态下的焊接试样经过  $2.4 \times 10^7$  Pa 水压爆破实验, 发现断口位于距焊缝边缘 5 mm 处的黄铜母材一侧, 而焊缝处未发生开裂, 表明 20# 钢和黄铜管材的激光深熔钎焊对接接头力学性能可以满足工业使用要求。

## 4 结 论

采用激光深熔钎焊工艺, 把激光作用在黄铜与

低碳钢的对接接头的一侧, 使黄铜熔化直接作为钎料与低碳钢进行钎接是可行的。黄铜深熔焊缝的深宽比达到 4:1, 黄铜焊缝与碳钢界面之间的相互作用区约  $3 \mu\text{m}$ 。黄铜与低碳钢激光深熔钎焊接头具有良好的力学性能。

## 参 考 文 献

- Zhou Zhenfeng, Zhang Wenyue. Welding Metallurgy and Metal Weldability[M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 144~147  
周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 144~147
- Zhou Zhenfeng. Metal Fusion Welding Principle and Technology (volume2) [M]. Beijing: China Machine Press, 1984. 235~237  
周振丰. 金属熔焊原理及工艺(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984. 235~237
- Guo Hong. Vacuum brazing of copper and stainless steel [D]. Dissertation for the Degree of Master, Wuhan University of Technology, 2003  
郭红. 铜与不锈钢的真空钎焊[D]. 武汉理工大学, 硕士学位论文, 2003
- Jiang Yong. Welding technique of compressive conduit on brass, brass-carbon steel and brass-stainless steel [J]. *Welding Technique*, 1996, (1):24~25  
江勇. 黄铜及黄铜与碳钢、不锈钢受压管道的焊接技术[J]. 焊接技术, 1996, (1):24~25
- Conny Lampa, John Powell, Claes Magnusson. Laser welding of copper to stainless steel [C]. *Proceedings of the 1997 Laser Materials Processing Conference*, 1997, **83**(2):171~180
- T. A. Mai, A. C. Spowage. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, **374**(1-2):224~233
- F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer *et al.*. Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials [C]. *Proceedings of the 1st International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2001*, 651~661
- E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2001, **115**(1):2~8
- Jianjun Ding, Feiqun Li, Feng Qu *et al.*. Investigation on laser brazing AA6056 Al alloy to XC18 low-carbon steel [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):31~34
- Feng Xiaosong, Li Liqun, Zhu Baohua *et al.*. Laser welding-brazing of Al/Ti joint [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (Suppl.):302~305  
封小松, 李俐群, 朱宝华等. 铝-钛异种合金的激光熔钎焊[J]. 中国激光, 2007, **34**(增刊):302~305