

# 双波长激光束同轴复合焊接系统设计与实验研究

张健<sup>1,2</sup>, 张津超<sup>1</sup>, 张庆茂<sup>3</sup>, 潘晓铭<sup>1</sup>, 于艳玲<sup>4</sup>, 曹宇<sup>1</sup>, 冯爱新<sup>1</sup>, 唐霞辉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>温州大学浙江省激光加工机器人重点实验室, 浙江温州 325035;

<sup>2</sup>华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 湖北武汉 430074;

<sup>3</sup>华南师范大学信息光电子科技学院, 广东广州 510006;

<sup>4</sup>温州职业技术学院电气电子工程系, 浙江温州 325035

**摘要** 铜及其合金材料热导性良好、反射率高,采用单一激光焊接难度较大。提出绿-红外双波长脉冲激光同轴复合焊接方法,并研制了焊接系统。系统的绿激光脉冲能量为 255.4 mJ,功率稳定性为 $\pm 2\%$ ;消色差焊接头保证了 T2 紫铜的双波长激光同轴复合精密焊接。对焊缝进行显微组织及显微硬度测试,结果表明,焊缝光滑平整,无缺陷;焊缝正面高度与母材区的持平,宽度约为 0.5 mm,焊缝反面高度略低于母材区,宽度约为 0.4 mm;焊缝平均显微硬度为 134 HV,为母材的 64.8%,未出现严重的软化现象。

**关键词** 激光技术; 铜焊接; 双波长激光焊接; 显微组织; 显微硬度

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0602007

## Experimental Study and Design of Dual-Wavelength Coaxial Hybrid Laser Welding System

Zhang Jian<sup>1,2</sup>, Zhang Jinchao<sup>1</sup>, Zhang Qingmao<sup>3</sup>, Pan Xiaoming<sup>1</sup>,  
Yu Yanling<sup>4</sup>, Cao Yu<sup>1</sup>, Feng Aixin<sup>1</sup>, Tang Xiahui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Provincial Key Laboratory of Laser Processing Robot, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China;

<sup>2</sup>National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>3</sup>School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

<sup>4</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou Vocational and Technical College, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

**Abstract** Due to the good thermal conductivity and high reflectivity, copper and its alloys are difficult to be welded by the single laser. The method of green-infrared dual-wavelength pulsed laser coaxial hybrid welding is proposed, and the welding system is developed. In this system, the pulsed green laser is with the energy of 255.4 mJ and the power stability of  $\pm 2\%$ . The achromatic welding head ensures the coaxial hybrid precision welding of T2 red copper by a dual-wavelength laser. The microstructure and microhardness of welds are tested. The results show that the welds are smooth with no defects. The weld height of topside equals that of the base metal zone. The weld height of backside is slightly lower than that of the base metal zone. The weld widths of topside and backside are 0.5 mm and 0.4 mm, respectively. The average microhardness of welds is 134 HV, and 64.8% of that of the base metal zone. No serious softening problems occur.

**Key words** laser technique; copper welding; dual-wavelength laser welding; microstructure; microhardness

**OCIS codes** 140.3390; 140.3380; 140.3515

收稿日期: 2017-01-09; 收到修改稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(51605338,51375348)、浙江省博士后科研择优资助项目(156184)、浙江省教育厅资助项目(Y201533195)、温州市科技计划(G20150003,G20160016,G20140055)、温州市重点科技创新团队项目(C20150006)

作者简介: 张健(1982—),男,博士,讲师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: zhangjian200623@sina.com

# 1 引 言

激光焊接作为先进的材料连接技术,在国内外得到普及。由于铜及其合金的固有特性,采用单一波长的激光难以对其进行焊接,主要表现为:1)材料的高热导性使工件表面的激光耦合能量很快散失;2)材料对激光的吸收率低,熔池内有效激光能量少,导致焊接过程对工艺参量非常敏感。目前,用于铜材料激光焊接的光源主要为传统的红外和近红外激光,而铜对红外和近红外激光具有较高的反射率<sup>[1-3]</sup>,这使得焊接过程中,激光必须具有极高的峰值功率,以克服铜的不良吸收性能所带来的初始阻力。增加峰值功率虽然可以显著提高铜对激光的吸收率,但远超过材料蒸发阈值的激光功率密度容易引起低熔点合金元素的蒸发及熔池液滴的飞溅,进而导致在焊缝内部留下孔洞或在焊缝表面形成缺陷,降低了接头质量及焊件强度<sup>[4-5]</sup>。

国内外学者对此进行了研究。一种方法是在铜表面涂覆低反射率的涂层,以增加激光吸收率。Genc Oztoprak 等<sup>[6]</sup>在焊接过程中,利用旁轴送粉方式添加钨铬钴合金粉末,通过激光束与粉末的相互作用,将激光能量转移到铜片上来实现铜焊接;Chen 等<sup>[7]</sup>在铜表面喷射纳米复合涂层,结果表明,激光反射率降低了73%,焊接效率提高了50%。这些办法虽然提高了激光吸收率,但在熔池中引入了不必要的化学组分,对显微组织与接头性能造成一定影响。另一种方法是采用复合热源进行铜焊接,以提高热输入量。Zhang 等<sup>[8]</sup>研究了激光-熔化极稀有气体复合焊接,结果表明,相比于单一焊接,激光-熔化极稀有气体复合焊接获得的焊缝熔深和横截面面积远大于两者之和。Engler 等<sup>[9]</sup>针对铜焊接进行了绿激光和红外激光的对比实验,研究表明,绿激光的能量耦合效率比红外激光的高,但深熔焊接时,绿激光在能量耦合上的优势变小。Hess 等<sup>[10]</sup>提出了1030 nm 红外激光和515 nm 连续绿激光旁轴复合焊接铜合金的工艺方案,研究表明,绿激光和红外激光复合焊接可显著提高光的吸收率,同时,绿激光的预热效应能够极大地降低铜的深熔焊接阈值。因此,具有高反射系数、高导热系数的铜材料的双波长激光复合焊接新工艺,具有重要的研究价值和工程应用意义。

本文提出了一种针对铜的双波长激光同轴复合焊接方案,并自主设计了一种新型绿-红外双波长脉冲激光同轴复合联机联焊系统。进行了牌号为 T2 的紫铜的双波长激光复合精密焊接实验,并对焊缝显微组织及显微硬度进行了检测与分析。

# 2 双波长激光同轴复合焊接方案及原理

双波长激光同轴复合焊接系统由脉冲红外激光器、自主设计的脉冲绿光激光器、消色差激光同轴复合焊接头、复合焊接操作平台、传输光纤等组成,如图1所示。脉冲绿光激光器与消色差激光同轴复合焊接头是系统的核心部件,由绿光激光器发射的高能量脉冲激光可以满足铜等高反射材料的焊前预热及焊后保温需

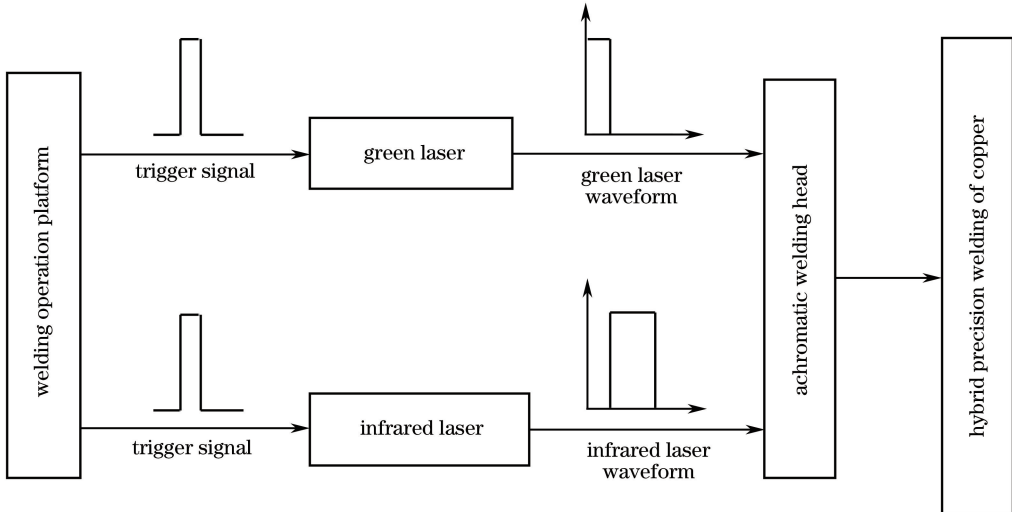


图1 双波长激光同轴复合焊接系统

Fig. 1 Dual-wavelength coaxial hybrid laser welding system

求;同轴复合焊接头可以实现双波长激光的同轴同焦点输出;通过复合焊接操作平台对激光输出波形与频率进行设置,可保证双波长激光同轴联机联焊工艺的顺利实施。在联机联焊过程中,通过设置异步同频率的绿激光、红外激光输出控制参数,焊接操作平台可同时触发绿激光焊接机与红外激光焊接机。两种激光经各自光纤传输耦合进入消色差激光同轴复合焊接头,经聚焦后,波形优先输出的绿激光首先到达工件表面并对其进行焊前预热,预热时间为毫秒量级(即脉冲优先输出时间),预热温度可达 500 °C 以上。红外激光通过复合焊接头聚焦到所述工件预热区域,实施同焦点复合焊接。

### 3 双波长激光同轴复合焊接系统的设计

#### 3.1 绿光激光器设计

绿光激光器是实现绿-红外双波长激光复合焊接的关键器件,目前商品化的绿光激光器普遍采用 Q 开关,由于脉宽窄,单个脉冲峰值功率很高,不能提供足够的脉冲能量来实施焊接<sup>[11]</sup>。本设计采用脉冲 Nd:YAG 激光器腔内倍频方式,其结构如图 2 所示。

谐振腔采用平平腔结构,设计腔长 750 mm,其中腔镜 M<sub>1</sub> 镀 1064 nm 激光全反膜,腔镜 M<sub>2</sub> 镀 1064 nm 和 532 nm 激光全反膜;绿光耦合输出镜 M<sub>3</sub> 与腔镜 M<sub>2</sub> 成 45° 夹角放置于谐振腔内,前表面镀 1064 nm 激光增透膜,后表面镀 1064 nm 激光增透膜和 532 nm 激光全反膜;布儒斯特窗采用普通光玻璃;工作物质选取直径为 7 mm、长度为 140 mm 的 Nd:YAG 激光晶体,其掺杂的原子数分数为 1.0%,两个端面均镀 1064 nm 激光增透膜;为便于实用化和产品化,采用脉冲氙灯方式抽运;为确保基波光斑均匀,采用抽运均匀、热效应低的陶瓷聚光腔。

倍频晶体<sup>[12-13]</sup>选取二阶非线性系数大、化学稳定性好的非线性光学材料,对其进行第二类相位匹配切割,切割角度  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=23.5^\circ$ 。切割后晶体尺寸为 7 mm×7 mm×10 mm,通光面 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 均镀 1064 nm 和 532 nm 双色增透膜,为保持良好热接触,将晶体用铜片包裹,置于黄铜热沉中。为有效提高非线性晶体内的入射基波功率密度且不损伤晶体<sup>[14]</sup>,系统中设置倒置的伽利略望远镜,正、负透镜两面均镀 1064 nm 和 532 nm 双色增透膜。研究中发现,当采用倒置望远镜时,基波光束不仅能保持原方向传播,而且聚焦光斑可实现可选择的缩小,满足设计要求。

脉冲氙灯抽运 Nd:YAG 激光晶体,产生 1064 nm 基波,基波在全反腔镜 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 之间形成振荡。经布儒斯特窗起偏,腔内传播的基波以 p 偏振光为主,通过倒置望远镜,基波光斑缩小,发散角不变。当基波通过非线性晶体时,实现了第二类相位匹配<sup>[15]</sup>,激发 532 nm 二次谐波,未转化的基波和已产生的二次谐波到达腔镜 M<sub>2</sub> 时均发生反射,再次通过非线性晶体时,又有部分基波转换成二次谐波,实现双程倍频。在绿光耦合输出镜 M<sub>3</sub> 处,基波维持腔内振荡,二次谐波被高反输出。

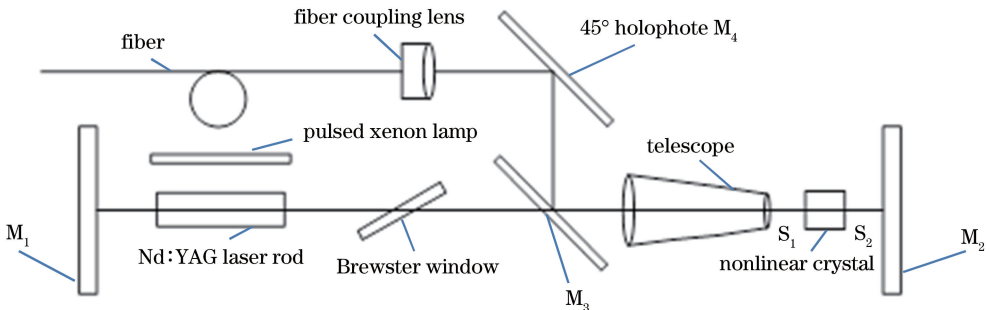


图 2 绿光激光器系统结构

Fig. 2 Structure of green laser system

设计的脉冲绿光激光器如图 3 所示,在输入电流 180 A、脉宽 2 ms 的条件下,激光器连续运行 1 h,采用激光能量计(Nova II, Ophir 公司,以色列)对绿光激光器的单脉冲能量、功率稳定性及倍频效率进行了测试。结果表明,不使用 Q 开关的情况下,可获得单脉冲能量为 255.4 mJ、功率稳定性为 ±2% 的绿激光输出,倍频效率为 5.78%,满足铜复合焊接要求。

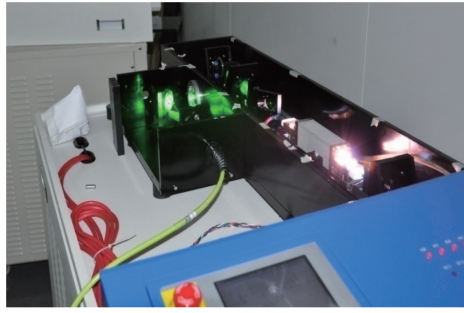


图 3 脉冲绿光激光器

Fig. 3 Pulsed green laser

### 3.2 消色差同轴复合焊接头设计

采用双光束同轴复合焊接,能够提高双光束联焊自由度,符合设备的整体性要求。由于绿激光与红外激光在准直聚焦系统中的折射率不同,聚焦光斑位置不一致,存在色差问题<sup>[16]</sup>。为确保同轴复合焊接顺利实施,进行了消色差激光同轴焊接头的光路设计和机加装配。

消色差激光焊接头光路设计如图 4(a)所示,主要由红外激光准直镜、绿激光准直镜、45°红外激光全反镜、45°绿激光全反镜、双光束聚焦镜及架体组成。耦合光纤采用直径为 0.6 mm 的阶跃型传输光纤;激光准直镜和双光束聚焦镜均采用平凸球面透镜,材料为 BK7 玻璃,焦距分别为 120 mm 和 80 mm,其中双光束聚焦镜双面镀有 532 nm 和 1064 nm 双色增透膜。45°红外激光全反镜与 45°绿激光全反镜均采用平面玻璃,前者镀有 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜,以增强 1064 nm 激光的反射;后者一面镀有 SiO<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 多层膜,以增强 1064 nm 激光的透射,另一面镀有 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜和 SiO<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 多层膜,以增强 532 nm 激光的反射与 1064 nm 激光的透射。

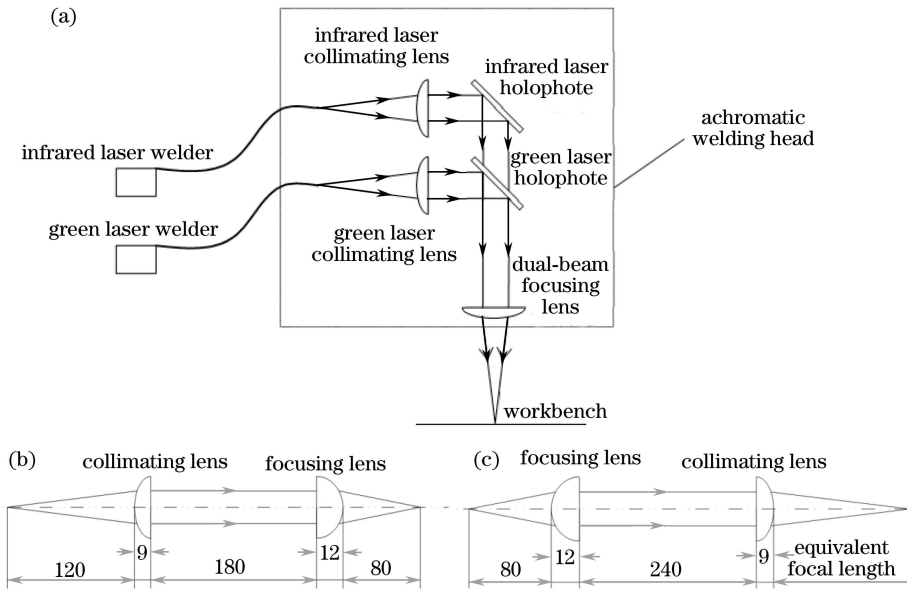


图 4 消色差激光焊接头示意图。(a)光路;(b)绿激光等价光路;(c)红外激光等价光路

Fig. 4 Schematic diagram of achromatic welding head. (a) Optical path; (b) equivalent optical path of green laser; (c) equivalent optical path of infrared laser

为确定红外激光光纤耦合头与红外激光准直镜前焦点之间的调整距离与机械尺寸,以绿激光传输光学参数为依据,计算红外激光的折射率。光学玻璃的色散与输入波长的关系可用柯西色散公式近似:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (1)$$

式中  $n$  为折射率; $\lambda$  为波长; $A$ 、 $B$ 、 $C$  为色散系数,其中系数  $C$  在可见光范围内很小,可忽略不计,只保留前两

项。将(1)式代入阿贝数计算公式,即  $V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ ,得

$$B = \frac{(n_D - 1)\lambda_C^2 \lambda_F^2}{V(\lambda_C^2 - \lambda_F^2)}, \quad (2)$$

$$A = n_D - \frac{B}{\lambda_D^2}, \quad (3)$$

式中  $V$  为阿贝数;  $n_D$ 、 $n_F$ 、 $n_C$  分别为 D、F、C 光的折射率;  $\lambda_C$ 、 $\lambda_F$ 、 $\lambda_D$  分别为 C、F、D 光的波长。针对 BK7 玻璃,查表可得  $n_D = 1.51680$ ,  $V = 64.17$ , 代入(2)、(3)式得  $A = 1.5045838 \text{ nm}^2$ 、 $B = 4.2173773 \times 10^3 \text{ nm}^2$ , 将系数  $A$ 、 $B$  及相应计算波长代入(1)式,计算得到 532 nm 绿激光与 1064 nm 红外激光的折射率分别为  $n(532 \text{ nm}) = 1.51948$ ,  $n(1064 \text{ nm}) = 1.50831$ 。

激光在消色差激光焊接头中的等效传输光路如图 4(b)、(c)所示,采用近轴光线追踪法可得,聚焦后的绿激光焦斑直径为 0.368 mm;相同情况下,红外激光焦斑直径为 0.403 mm。需对红外激光光纤耦合头与红外激光准直镜前焦点间的距离进行反向调整,调整尺寸为 6.541612 mm。兼顾加工与装配精度,进行机械设计时,红外激光光纤耦合头与其准直镜前焦点之间应留有 5~8 mm 的反向调整余量。制造完成的复合焊接头如图 5 所示。

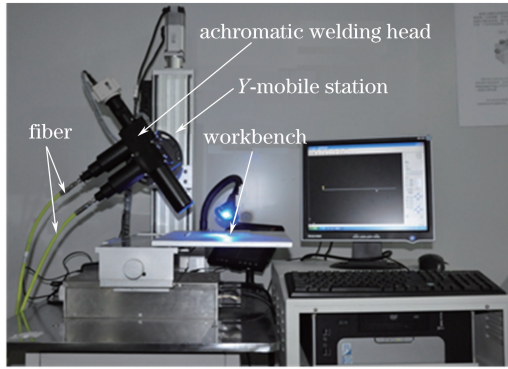


图 5 消色差同轴复合焊接头

Fig. 5 Achromatic coaxial hybrid welding head

### 3.3 双波长激光联机联焊设计

双激光束的联机联焊,指的是焊接操作平台对红外激光焊接机和绿激光焊接机的实时控制与同轴输出。设计中两激光器采用同系列控制主板,将焊接平台的光触发信号分别连接红外激光焊接机和绿光焊接机主板控制端口,以实现焊接平台对两激光器输出的实时控制与分时控制。例如,当绿激光焊接电流为 150 A、脉宽为 2 ms,且红外激光焊接峰值功率为 6 kW、脉宽 1 ms 时,两束激光脉冲延时为 2 ms,只需按图 6 所示设置输出波形。另外,为了能够复合输出,两束激光的频率应一致。

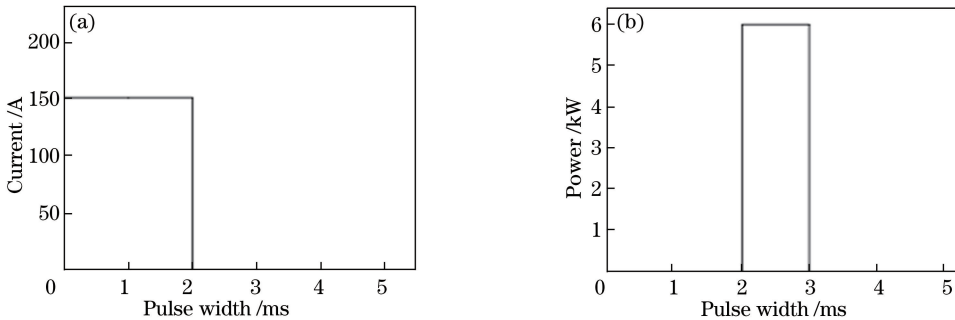


图 6 激光输出波形。(a)绿激光;(b)红外激光

Fig. 6 Laser output waveforms. (a) Green laser; (b) infrared laser

## 4 T2 紫铜双波长激光同轴焊接实验

### 4.1 实验材料及方案

实验材料为 T2 紫铜, 尺寸为 40 mm×20 mm×0.2 mm。焊前, 采用金相砂纸对其表面进行打磨, 去除氧化膜, 然后使用丙酮清洗, 去除油污, 烘干保存。

采用对焊的方式。为更好地观察每个焊点表面形貌, 采用 30%~40% 的搭接率, 故设定激光输出频率为 20 Hz, 加工速度为 6 mm/s。优化后的工艺参数如下: 绿激光器抽运电流为 180 A, 脉宽为 2 ms; 红外激光器峰值功率为 6 kW, 脉宽为 1 ms。焊后, 利用三维激光扫描显微镜(VK9700, Keyence 公司, 日本)与金相显微镜(4XC 型, 上海点应光学仪器有限公司, 中国)分别观察接头处的三维形貌及显微组织; 利用显微硬度计(HV-1000 型, 上海研润光机科技有限公司, 中国)分别测量距接头横截面 0.05, 0.10, 0.15 mm 处的横向硬度分布情况, 具体测量参数如下: 加载载荷 0.2 kg, 加载时间 20 s, 每隔 0.05 mm 打点一次, 测量三次取平均值。

### 4.2 结果与分析

图 7 为采用双波长激光焊接的紫铜焊缝正、反面形貌。由图 7(a)、(c)可知, 焊缝正、反面光滑, 无宏观裂纹、小孔及未熔合等缺陷; 焊点规整, 大小、深浅均匀一致。焊缝三维形貌如图 7(b)、(d)所示, 可推断出焊缝与母材没有明显的过渡区, 结合较为紧密; 焊缝正面高度基本和母材区的持平, 无塌陷, 宽度约为 0.5 mm, 焊缝反面高度略低于母材区的, 宽度约为 0.4 mm。以上结果表明, 在合适的工艺参数下, 焊接过程稳定, 焊缝成形良好。

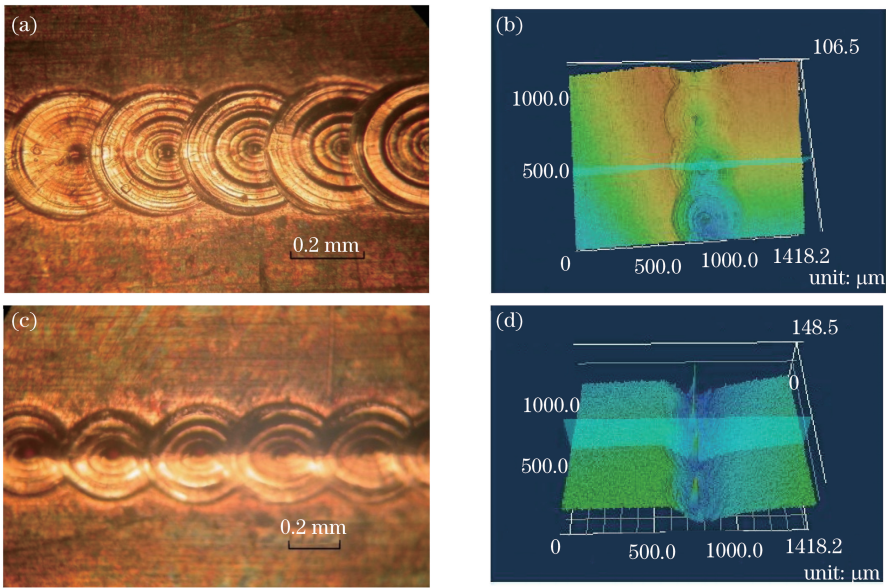


图 7 绿-红外激光焊缝形貌。(a)正面二维形貌;(b)正面三维形貌;(c)反面二维形貌;(d)反面三维形貌

Fig. 7 Green-infrared laser weld appearance. (a) Two-dimensional appearance of topside; (b) three-dimensional appearance of topside; (c) two-dimensional appearance of backside; (d) three-dimensional appearance of backside

为对比分析单波长激光与双波长激光的焊接差异性, 将红外脉冲激光峰值功率增加至 6.3 kW, 此时, 红外脉冲激光的输出能量与绿-红外激光的接近一致, 其他参数不变。单一红外激光的焊缝形貌如图 8 所示, 可知焊缝表面粗糙, 周围有飞溅; 焊点大小、深浅不一, 形状不规则; 个别焊点被烧穿。以上结果表明单波长激光焊接过程不稳定。

图 9 为采用双波长激光焊接的紫铜焊缝显微组织, 其中 a 为母材区, b 为热影响区, c 为溶合线, d 为焊缝区。从图中可看出, 接头三区域(焊缝、熔合线、热影响区)的分布特征明显。因为激光焊接过程快热快冷, 且铜的导热性好, 所以熔合线边缘半熔化的母材区温度梯度大, 结晶速度相对较快, 晶粒细化; 焊缝区散热慢, 冷却速度较熔合线及母材区的慢, 晶粒尺寸最大, 呈柱状, 由熔合线向焊缝中心方向生长; 熔合线晶粒尺寸介于焊缝的和母材的之间。晶粒的粗大会使材料硬度、强度和塑性下降。

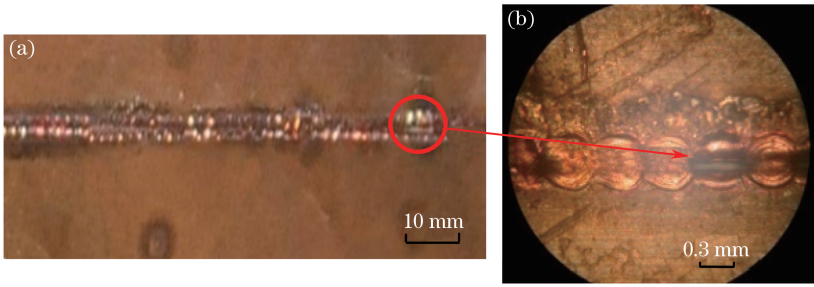


图 8 红外激光焊缝形貌。(a)焊缝形貌;(b)局部放大的焊缝形貌

Fig. 8 Infrared laser weld appearance. (a) Weld appearance; (b) locally enlarged weld appearance

图 10 为采用双波长激光焊接的紫铜焊缝横截面显微硬度分布。由图可知,在纵向上,焊缝表面至底部的显微硬度变化不大;在横向上,由母材区经热影响区到焊缝区,显微硬度呈梯度减弱趋势,且左右对称。母材平均显微硬度约为 206.8 HV,焊缝平均显微硬度约为 134 HV,为母材的 64.8%,未出现严重的接头软化现象。这是因为焊缝晶粒组织较为粗大,力学性能较差;热影响区组织晶粒较焊缝区的小,但又不及母材的细小,所以硬度介于焊缝的和母材的之间。这与金相组织分析结果一致。

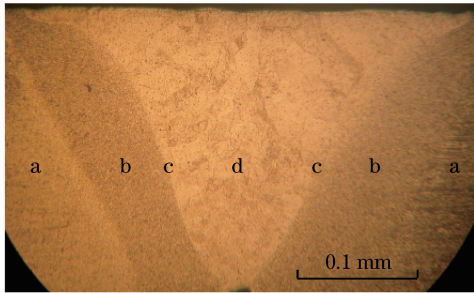


图 9 焊缝显微组织

Fig. 9 Weld microstructure

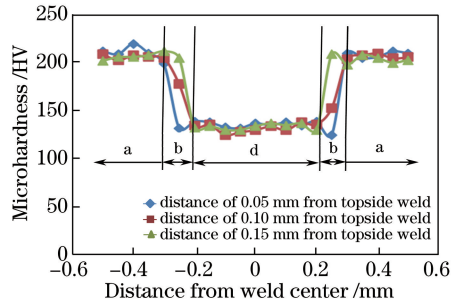


图 10 焊缝横截面显微硬度分布

Fig. 10 Cross-section microhardness of welds

## 5 结 论

针对高热导性、高反射率的铜及其合金,设计了绿-红外双波长激光同轴复合焊接系统。系统采用脉冲 Nd:YAG 激光器腔内倍频方式输出绿激光,其单脉冲能量为 255.4 mJ,功率稳定度为  $\pm 2\%$ ,系统倍频效率为 5.78%;设计并制造了消色差同轴复合焊接头,通过调整红外激光耦合头与其准直镜前焦点之间的距离,使红外激光与绿激光焦点重合。该系统解决了目前双波长激光焊接同步不同轴问题,提高了焊接的灵活性。对 0.2 mm 厚的 T2 紫铜进行焊接实验,焊缝光滑平整,无明显缺陷;焊缝正面高度基本上和母材区的持平,宽度约为 0.5 mm;焊缝背面略低于母材区的,宽度约为 0.4 mm;焊缝的平均显微硬度为 134 HV,为母材的 64.8%,未出现严重的软化现象。与单波长激光焊接相比,焊接过程更稳定,焊缝成形良好。

## 参 考 文 献

[1] Gong Wenbiao, Mao Yafen, Zhang Qiuzheng, *et al.* Microstructure and property of H62 brass joints obtained by friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(2): 83-86.  
 宫文彪, 毛亚芬, 张秋征, 等. H62 黄铜搅拌摩擦焊接接头微观结构及性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(2): 83-86.

[2] Wang Di, Yang Yongqiang, Shi Wenqing. Investigation on laser welding process and structure characteristics of H62 copper[J]. Applied Laser, 2009, 29(3): 203-206.  
 王 迪, 杨永强, 师文庆. H62 黄铜激光焊接工艺与组织特征研究[J]. 应用激光, 2009, 29(3): 203-206.

[3] Jiao Junke, Wang Feiya, Sun Jiaqiang, *et al.* Study on copper surface pre-treating and welding with fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031409.  
 焦俊科, 王飞亚, 孙加强, 等. 紫铜表面预处理及激光焊接工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031409.

- [4] Shi Wenqing, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.* Study on pulse laser welding of H62 brass[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 101-104.  
师文庆, 杨永强, 王 迪, 等. 脉冲激光焊接 H62 黄铜[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 101-104.
- [5] Khodaverdizadeh H, Mahmoudi A, Heidarzadeh A, *et al.* Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints[J]. Materials and Design, 2012, 35: 330-334.
- [6] Genc Oztoprak B, Akman E, Hanon M M, *et al.* Laser welding of copper with stellite 6 powder and investigation using LIBS technique[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 748-755.
- [7] Chen H C, Bi G J, Sharon M L, *et al.* Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 287-293.
- [8] Zhang L J, Ning J, Zhang X J, *et al.* Single pass hybrid laser-MIG welding of 4 mm thick copper without preheating [J]. Materials and Design, 2015, 74: 1-18.
- [9] Engler S, Ramsayer R, Poprawe R. Process studies on laser welding of copper with brilliant green and infrared lasers [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 339-346.
- [10] Hess A, Schuster R, Heider A, *et al.* Continuous wave laser welding of copper with combined beams at wavelengths of 1030 nm and of 515 nm[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 88-94.
- [11] Gui Shixin, Chang Jianhua, Yan Na, *et al.* A compact and highly efficient intracavity frequency-doubled green laser based on periodically poled lithium niobate[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1102002.  
桂诗信, 常建华, 严 娜, 等. 一种基于铌酸锂晶体的高效紧凑腔内倍频绿光激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1102002.
- [12] Yang Jianming, Tan Huiming, Tian Yubing, *et al.* All-solid-state doubly resonant intracavity sum-frequency 578 nm yellow laser with KTP type II phase matching[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1001010.  
杨建明, 檀慧明, 田玉冰, 等. 全固态双共振 KTP II 类相位匹配腔内和频 578 nm 黄激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001010.
- [13] Xu Xiafei, Lu Yanhua, Zhang Lei, *et al.* Technical study of 8.7 W continuous wave single frequency green laser based on extra-cavity frequency doubling[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1101010.  
许夏飞, 鲁燕华, 张 雷, 等. 外腔谐振倍频 8.7 W 连续单频绿光技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101010.
- [14] Zhang Junxuan, Li Feng, Bi Decang, *et al.* Tunable single longitudinal mode Nd:YAG green laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902009.  
张俊旋, 李 峰, 毕德仓, 等. 可调谐单纵模绿光 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902009.
- [15] Li Long, Liu Xiaojian, Nie Jianping, *et al.* Thermal effect of intra-cavity frequency doubling KTP crystal in all-solid-state multi-mode green laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 830-834.  
李 隆, 刘小建, 聂建萍, 等. 全固态多模绿光激光器腔内倍频 KTP 晶体热效应[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 830-834.
- [16] Li Xijie, Liu Jun, Chen Yang. Design of dual-band, high zoom ratio and continuous co-focal optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(10): 1022003.  
李西杰, 刘 钧, 陈 阳. 双波段大变倍比连续共变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 1022003.