

## 自动 TIG 堆焊熔敷铜熔池图像视觉检测试验

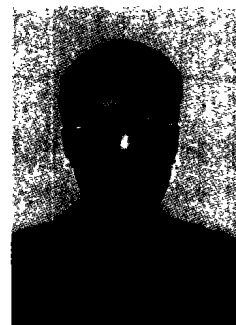
王克鸿, 熊亮同, 徐越兰, 余进

(南京理工大学材料科学与工程系, 南京 210094)

**摘要:** 提出了近红外波段取像的思路, 设计了基于不同取像机理的两种复合窄带滤光系统, 在脉冲 TIG 焊的电弧加热下, 采用普通 CCD 传感器从正面对重熔自动 TIG 堆焊铜熔池进行了传感采集, 对 1 064 nm、980 nm、520 nm 和 405 nm 滤光条件下的取像结果进行了比较分析, 找到了相对较好的取像窗口, 获得了清晰的铜熔池图像。由传感试验结果得出, 采用 TIG 弧热源, 近红外波段易于获得较清晰的熔池图像; 脉冲 TIG 弧基值期间利用四种滤光波段都可获得清晰的熔池图像。并对重熔自动 TIG 堆焊铜熔池的特征和熔深的控制进行了分析和试验研究。

**关键词:** TIG 自动堆焊; 铜熔池; 视觉检测; 无熔深; 控制

**中图分类号:** TG4101 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)04-27-04



王克鸿

## 0 序 言

在钢基体表面电弧熔敷有色金属合金层是改善工件的表面性能的有效手段<sup>[1]</sup>, 要想使堆敷过程稳定实现超薄熔深(无熔深)焊接, 就必须对堆敷过程进行检测和控制。熔池的几何参数包含着丰富的与熔深有关的信息, 因此检测出熔池的几何参数对于焊接过程控制具有非常重要的意义, 而获得清晰的熔池图像又是准确、快速地检测出熔池几何参数的必要前提<sup>[2,3]</sup>。

对于熔池图像的获取, 当前研究较多的是采用被动式视觉传感法, 但其遇到的最大问题是电弧光的强烈干扰。国内外对于 TIG 焊钢熔池的视觉检测做了大量的研究工作, 而对于铜熔池的视觉检测研究则很少<sup>[2-4]</sup>。

作者针对 TIG 焊和脉冲 TIG 焊在钢基体上重熔自动堆敷铜, 研究铜熔池视觉图像的传感采集方法, 设计了两类视觉传感波长滤波窗口, 对熔池图像进行了采集试验。

## 1 设计思路与试验装置

## 1.1 工艺设计思路与试验装置

无熔深重熔堆焊铜工艺的设计思想是, 将铜带(环)置于钢板(管)指定位置, 电弧产生于钨电极与

铜带(管)之间, 电弧熔化铜形成熔池, 进而在钢的表面形成铜熔敷层。无熔深重熔堆焊铜及视觉检测系统主要由焊机、变位机、机器人、摄像机、图像采集卡、滤光系统和计算机等组成, 总体设计思路如图 1 所示。

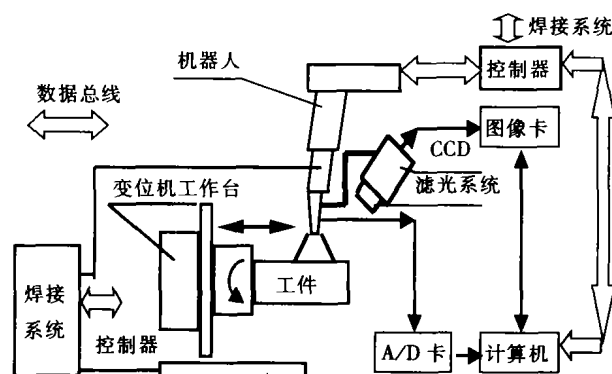


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Schematic frame of system

## 1.2 视觉传感与滤光设计思路

滤光系统安装在 CCD 摄像机正前方, 拍摄到的熔池图像经图像采集卡转换成数字图像送到计算机并存储。A/D 转换卡将焊接参数测试仪采集到的电流(压)信号转换成数字信号送到计算机, 当处于脉冲焊基值时控制图像采集卡采集图像, 从而减小电弧光的干扰。试验设计了两类视觉传感滤波波长窗口方案, 一类是采用中心波长为 980 nm、1 064 nm 近红外窄带滤光系统; 另一类是选择了中心波长为 405 nm、520 nm 可见光波段窄带滤光系统。所采用的 CCD 型号是 MTV-1881EX, 镜头焦距为 25 mm,

图像采集卡为 PCI-XR,减光和滤光参数见表 1。

表 1 复合滤光参数表  
Table 1 Parameters of composite filter

序号	中心波长 λ/nm	窄带滤光片半波 带宽 b/nm	峰值透 过率(%)	减光率 (%)
1	1064	10	37	0.5
2	980	10	25	0.5
3	520.1	11.7	61	0.5
4	405.7	8.9	42	0.5

## 2 熔池视觉图像传感采集

### 2.1 试验条件

试验用工件材质为低碳钢,板(壁)厚 12 mm,铜带(圈)尺寸为 50 mm 宽、4 mm 厚,材质为 T2 纯铜。采用直流或脉冲 TIG 焊,焊枪运动由机器人来实现,工件的运动由机器人和变位机来协调实现。焊接电流取 200~300 A,焊接速度取 15~50 cm/min。

### 2.2 试验图像

采用直流焊,摄像机到熔池直线距离 18 cm,摄像机与水平线成 40°,分别采用 1064 nm、980 nm、520 nm、405 nm 复合窄带滤光系统进行传感采集,并进行了拍摄参数优化配置试验,采集到的典型熔池图像见图 2。

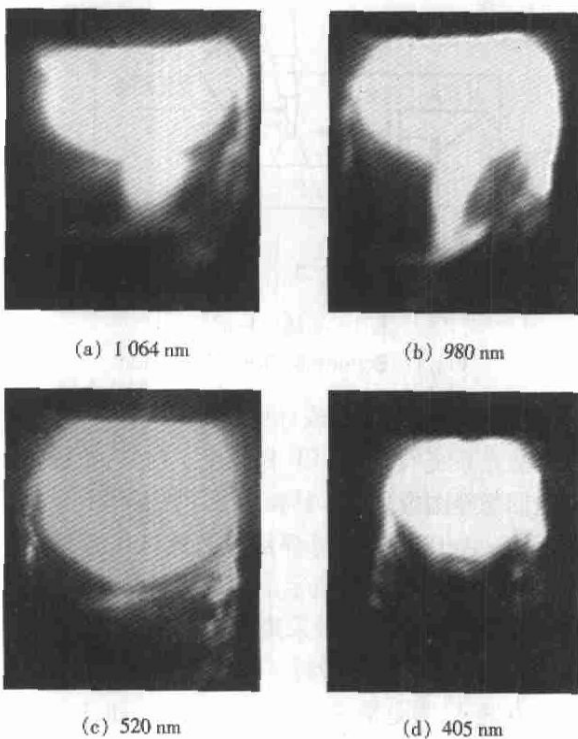


图 2 TIG 焊铜熔池图像

Fig. 2 Images of copper weld pool in TIG welding

在其它参数不变的情况下,采用脉冲焊,基值电流 100 A,脉冲频率 2 Hz,占空比 60%,采用 1064 nm、980 nm、520 nm、405 nm 复合窄带滤光系统在基值期间采集到的熔池图像见图 3。

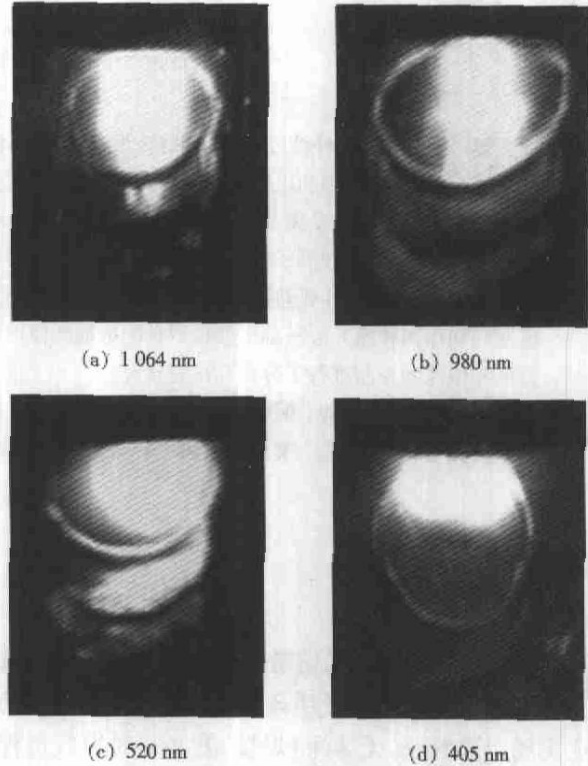


图 3 脉冲 TIG 焊铜熔池图像

Fig. 3 Images of copper weld pool in PTIG welding

由试验图像分析可得出,TIG 焊采用 1064 nm、980 nm 复合窄带滤光系统配合合适的镜头、拍摄角度、镜头到熔池的距离等,能够采集到比较清晰的熔池图像,采用 520 nm 复合窄带滤光系统拍摄的熔池图像边界不太清晰,采用 405 nm 复合窄带滤光系统拍摄的熔池图像无边界,完全被电弧光淹没。而在脉冲焊基值期间传感采集的熔池图像,采用四种复合窄带滤光系统都获得了相当清晰的铜熔池图像。

## 3 铜熔池图像传感采集方法探讨

由试验所得到的结果可以看出,在试验条件下,直流 TIG 焊时电流较大,弧光很强,所能拍摄到的熔池尾部较少,熔池边界极易被弧光淹没,图像不太清晰,而在脉冲焊基值期间,电弧光相对较弱,所拍摄的图像清晰度和层次感都明显好于直流焊时熔池的图像,同时基本拍摄到了熔池的前半部分。

采用被动式视觉检测熔池,主要是利用熔池自身辐射和电弧的反射光作为信号源进行成像,而直

接进入镜头的弧光对熔池成像起到背景干扰作用。获取清晰熔池图像的本质就是要调整它们之间的光强梯度,增大熔池图像的信噪比  $\eta$ 。熔池视觉信号包括,取像窗口内金属特征谱总和、取像窗口内熔池对电弧的反射光总和及取像窗口内熔池自身辐射光的总和;干扰信号包括,取像窗口内电弧氛围中保护气体的特征谱总和及取像窗口内电弧的连续谱总和。对直流 TIG 焊,在紫外光、可见光波段,取像窗口内电弧氛围中保护气体的特征谱及连续谱总和非常大,信噪比总体上难以提高。但进入红外波段,随波长增加,无论是保护气体的特征谱还是连续谱,其强度都呈快速下降趋势,而熔池自身辐射强度增加。至中远红外波段,熔池视觉信号与电弧的信噪比大,可取得清晰的图像,但中远红外传感系统价格极其昂贵,无法实用化。同时,在近红外波段,虽电弧对熔池的反射光下降,但保护气体的特征谱和连续谱已有较大幅度的下降,熔池自身辐射强度也有较大的上升,而且熔池视觉信息的信噪比仍有大幅度的上升。因而采用普通型 CCD 传感熔池图像,滤光波段选择接近 CCD 的上限波段应是合理的选择。试验选择了 1 064 nm 和 980 nm 的滤光波段(CCD 波长的上限 1 100 nm),该波段传感试验获得了成功。在 TIG 焊条件下,获得了较为清晰的图像,在脉冲 TIG 焊条件下获得了更为清晰的图像。增加信噪比的另一思路是,选择避开 Ar 的特征谱,锁定熔池金属特征谱,尽量使电弧连续谱强度降低。作者根据这一原则选取了 405 nm 和 520 nm 的窄带滤光系统,在 405 nm 波段内含有 Ar 的特征谱,而无 Cu 的特征谱。信噪比的增加较难,对于 520 nm 复合滤光系统,虽然避开了 Ar 的特征谱,又包含 Cu 的特征谱。但 Cu 的特征谱只有一条,且弧光连续谱仍然很强,信噪比  $\eta$  增加的幅度依然有限,不足以抑制电弧光的干扰。试验证明只在脉冲 TIG 焊获得了清晰的图像,TIG 焊则未获得清晰的图像。

但并非所有工艺条件下,都可采集到清晰的熔池图像,熔池材料和焊接规范的影响不可忽视。电弧中心区小,熔池尾部长,熔池较易于获得清晰的图像,反之不易。正如在脉冲 TIG 焊接时,基值期间电弧光强大大降低,此时取像较易取得清晰的熔池图像。

#### 4 铜熔池特征及与钢熔池比较

TIG 焊和脉冲 TIG 焊铜熔池典型图像见图 4。在类似工艺条件下获得的 TIG 焊钢熔池图像见图 5。由图 5a 可以看出,钢熔池图像非常清晰,层次

感很强。分析典型的铜熔池图像(图 4a)可知,铜熔池尾部比较短而呈圆弧形态,图像上方的弧形黑色边界是喷嘴侧面图像,熔池头部被电弧所覆盖,覆盖区域与电弧形态、规范大小、滤光效果、光圈大小及拍摄角度等因数有关。电弧图像两侧和电弧下方低灰度区为熔池,周围高灰度轮廓线为熔池边界。由于熔池受电弧力下凹,且液态熔池为镜面反射,导致熔池区比较暗,同时凝固区和未熔化区对弧光是漫反射。这样在液固两相交界面就会形成灰度突变,从而勾勒出熔池边界。熔池形态和焊接规范有很大关系,如当焊接速度增大时,熔池的后部逐渐变尖。

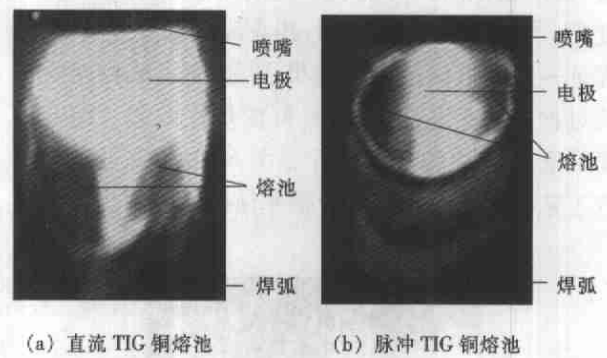


图 4 TIG 焊典型铜熔池图像

Fig. 4 Typical image of copper weld pool in TIG welding

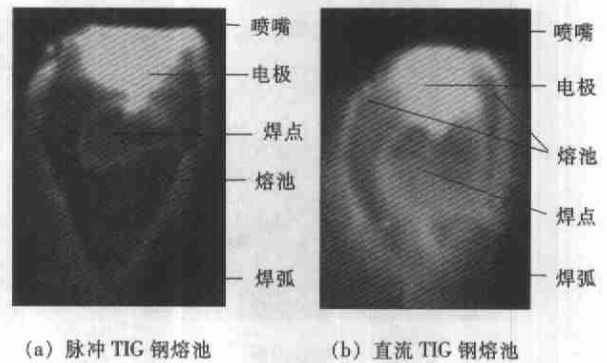


图 5 TIG 焊典型钢熔池图像

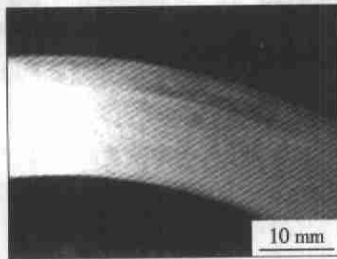
Fig. 5 Typical images of steel weld pool in TIG welding

铜的导热性是钢的 8~9 倍,流动性约是钢的 1.5 倍,铜的比热容也比钢大。所有这些铜和钢之间的物理性差别,使得在同样的焊接条件下,铜熔池比钢熔池难于形成,且更容易凝固,铜熔池宽度要窄,尾部也比较短,很容易被电弧所淹没。铜的熔点要比钢的熔点低约 400℃ 左右,因此铜熔池的自身辐射要比钢熔池的低,同时试验是在钢表面重熔堆焊铜。铜的总量相对电弧输入热量较少,铜熔池与已凝固铜金属的温度梯度较小,TIG 焊铜熔池边界

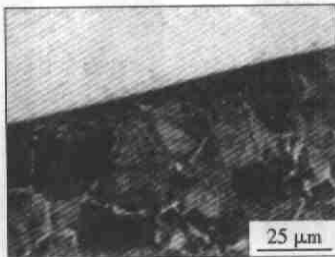
与铁熔池相比要模糊得多。

## 5 无熔深重熔自动堆焊铜过程控制

无熔深堆焊熔池视觉检测的最终目的是为了进行质量控制,既保证铜环(带)能全部熔化,又要保证钢基体不发生熔化,确保实现无熔深焊接。熔深的直接检测很困难,但熔池正面几何信息特征与参数和熔深存在一定的对应关系,针对特定工件的无熔深堆焊铜,根据这一关系,设计了模糊控制器对焊接过程进行控制。对采集到的熔池图像进行图像处理,提取出正面几何参数,判断熔深大小并做模糊化处理。根据模糊控制规则,相应改变电流大小,从而保证一定的熔深。试验结果表明,加了该控制后焊接过程比较稳定,取得了良好的焊接效果。结合界面的宏观照片和金相照片见图 6,由图中可以看出该工艺实现了铜熔敷层与钢基体的无熔深焊接。



(a) 宏观组织



(b) 微观组织

图 6 自动 TIG 堆敷焊接接头组织

Fig. 6 Microstructure of surfacing weld

## 6 结 论

(1) 针对铜熔池,设计出了一套成本低、实用可行的熔池视觉传感系统。利用所设计的窄带复合滤光和系统,TIG 焊时近红外波段获得的熔池图像优于可见光波段的图像,而在脉冲 TIG 焊基值期间两者都获得了清晰的熔池图像,相对而言 TIG 焊时不易获得清晰的熔池图像。

(2) 对于铜熔池信号近红外波段采集,在确保 CCD 灵敏度的前提下,波长选择应接近 CCD 的上限波长 1100 nm,如 980 nm;对于铜熔池信号可见光波段采集,波长选择应尽量避免保护气体的特征谱,锁定铜的特征谱,减少保护气体的连续谱,如 520 nm。

### 参考文献:

- [1] Wang K, Xu Y, Yu J, *et al.* Weld method of deposit copper without penetration on the surface of steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(6): 69-72.  
王克鸿,徐越兰,余进,等.无熔深熔覆铜工艺[J].焊接学报,2001,22(6):69-72.
- [2] 王克鸿,尹何迟,徐越兰,等.铜钢熔敷熔池信息检测和图像处理方法研究[A].第十次全国焊接会议论文集[C].哈尔滨:黑龙江人民出版社,2001.200-203.
- [3] Wu C S, Gao J Q, Liu X F, *et al.* Vision-based measurement of weld pool geometry in constant-current gas tungsten arc welding [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(6): 879-882.
- [4] Suga Y, Shimamura T, Usui S, *et al.* Measurement of molten pool shape and penetration control applying Neural Network in TIG welding of thin steel plates [J]. ISIJ International, 1999, 39(10): 1075-1080.

**作者简介:**王克鸿,男,1963年2月出生,工学博士,教授。主要从事焊接过程自动控制、弧焊机器人智能化应用技术和机电一体化设备等方面的研究工作。获国防科工委和江苏省科技成果二、三等奖2项,发表论文40余篇。

Email: wangkh@163.com