

引用格式: 卞正兰, 周望, 胡安铎, 等. 基于时空复合滤波技术的TIG焊成像质量增强[J]. 热加工工艺, 2026, 55(14): 132-139. BIAN Zhenglan, ZHOU Wang, HU Anduo, et al. Enhancement of TIG Welding Image Quality Based on Spatiotemporal Composite Filtering Technique [J]. Hot Working Technology, 2026, 55(14): 132-139.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20241685

基于时空复合滤波技术的 TIG 焊成像质量增强

卞正兰, 周望, 胡安铎, 曾俊冬, 初凤红, 何笑天

(上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 201306)

摘要:为解决钨极惰性气体保护焊(TIG)焊接过程中强弧光对焊接成像质量的干扰问题,提出了一种基于被动视觉技术的光学成像系统。该系统通过时空复合滤波技术,有效降低强弧光对焊接过程成像的负面影响,同时保留熔池边缘轮廓、焊缝纹理等关键焊接特征信息。设计了包括可调中性密度减光片、宽带通滤光片和特制高通空间滤波器在内的光学滤波系统。通过选择合适的成像波段,并在频域内滤除电弧光谱信息,最终弱化了成像区域的光强梯度,增强了焊接细节信息的成像质量。研究了该系统在窄间隙钢板 TIG 焊中的应用成像效果,显著提升了焊接成像的清晰度和信息特征的辨识度,为焊接质量的在线监测提供了有力支持。

关键词:焊接成像;光学成像系统;时空复合滤波;质量监测

中图分类号: TG409

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)14-0132-08

Enhancement of TIG Welding Image Quality Based on Spatiotemporal Composite Filtering Technique

BIAN Zhenglan, ZHOU Wang, HU Anduo, ZENG Jundong, CHU Fenghong, HE Xiaotian

(College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to address the problem of intense arc light interfering with welding imaging during the tungsten inert gas (TIG) welding process, an optical imaging system based on passive vision technology was proposed. The system effectively reduced the negative impact of strong arc light on the imaging of the welding process through spatiotemporal composite filtering technology, while retaining key welding feature information such as the edge contour of the weld pool and weld seam texture. The optical filtering system including an adjustable neutral density scrim, a wide bandpass filter, and a special high-pass spatial filter was designed. By selecting a suitable imaging band and filtering the arc light spectrum information in the frequency domain, the light intensity gradient in the imaging region was weakened to enhance the imaging quality of welding detail information. The imaging application effect of the system in TIG welding of narrow-gap steel plates was experimentally investigated, which significantly improved the clarity of welding imaging and the recognition of information features, and provided powerful support for online monitoring of welding quality.

Key words: welding imaging; optical imaging system; spatiotemporal composite filtering; quality monitoring

智能化焊接实时成像可以提升焊接效率、焊接质量与可靠性,是焊接技术的重要发展方向^[1-3]。钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas, TIG)焊接能够精确控制热输入、保证焊接过程的稳定性,在工业制造等多个领域中得到广泛应用^[4-6]。实现智能化 TIG 焊接,需要利用视觉成像系统监测熔池、焊缝和坡口等焊接特征信息的变化^[7-8],而焊接过程弧光对成像效

果有着很强干扰。因此,有效抑制强弧光来提升焊接过程成像质量对提升焊接智能化具有重要意义。

基于机器视觉的焊接成像技术主要有主动视觉和被动视觉两种类型^[9-11]。主动视觉系统一般需要外部激光光源辅助窄带滤光片来采集焊接图像。Zhang等^[12]搭建了辅助光源同轴在线监测系统,使用 532 nm 的激光为辅助光源,采集到了清晰的焊接图像。Lei等^[13]搭建了用于光纤激光焊的同轴视觉监测系统,相机使用 808 nm 激光器并装有 808 nm 窄带滤光片,从而获得了熔池图像。主动视觉方法能准确识别焊接信息的几何特征,但由于设备结构复杂、成本高,限制了其在工业生产中的广泛应用。

收稿日期: 2024-08-16 修回日期: 2025-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(62205195);上海市地方院校能力建设专项(20020500700)

作者简介: 卞正兰,女,副教授,博士,主要研究方向:激光稳频与锁相、光纤传感、光电检测与控制等;E-mail: bianzhenglan@163.com

被动视觉系统利用焊接热源作为相机的成像光源,不需要辅助光源。主要成像光信号来自电弧光、熔池自辐射光、熔池镜面反射和漫反射光 4 个部分。成像区域的光强梯度较大,常规相机动态范围不足以区分。而成像的主要照度是由弧光提供,但电弧光强度高,对熔池和焊缝的成像又有很大的影响。为了降低强弧光对成像的干扰,一些学者根据焊接电弧的光谱特征,采用滤光片抑制弧光辐射较强的波段来采集焊接图像^[4]。

Zhao 等^[5]通过分析相机的量子曲线和电弧光谱,发现在 520 nm 附近的弧光辐射和相机的量子效率均较强,利用 520 nm 的带阻滤光片来抑制弧光获得清晰的熔池轮廓。Guo 等^[6]根据低碳钢 TIG 焊电弧光谱,选用中心波长为 610 nm 的窄带滤光片和中性密度减光片组成复合滤波系统,获得特征突出的熔孔图像。上述光学滤波技术虽然可以降低电弧光的干扰,但是也抑制了焊接作业区的成像照度。并且焊接成像颜色单一,大量的焊接特征信息被滤除,熔池、焊缝等关键区域的成像信噪比也降低。

本文基于被动视觉技术,建立了一种基于时空复合滤波技术的光学成像系统,以提升焊接过程监测的成像质量。该系统通过分析焊接质量监测所关注信息的光谱分布,选择更宽的电弧光光谱波段,拥有更多成像本底照度的同时保留更多的细节信息。结合焊接图像频谱和能量谱中强弧光信息的分布特点,使用空间滤波器在频域内滤除电弧光的频谱信息,有效抑制强弧光干扰。实现在降低光强梯度的同时,保留更多焊接细节信息,从而确保清晰、准确的监测到焊接成像中熔池形态和焊缝成型等关键信息。

1 焊接图像采集装置

1.1 实验平台

实验系统由焊接系统和焊接图像采集系统组成,TIG 焊接成像实验系统如图 1 所示。焊接系统包括 Aristo TIG 4000i 氩弧焊机、WF-007A 自动送丝机、移动式焊接平台。焊接实验材料采用 10 mm 厚的 V 型窄间隙钢板、ER316L 焊丝,保护气体为 99.99% 的氩气。焊接图像采集系统由 WN-L2111 摄像头模组(采集频率 30 fps)、25 mm 定焦微距镜头、可调中性密度减光片、宽带通滤光片和空间滤波器组成。

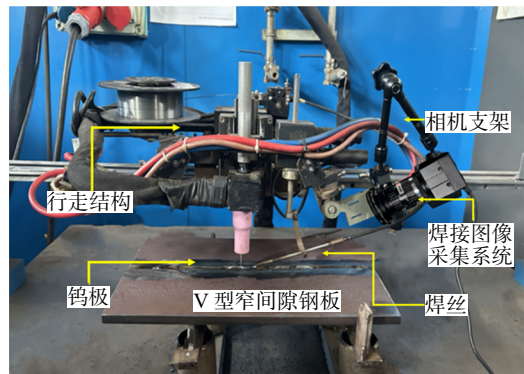


图 1 TIG 焊接成像实验系统
Fig.1 TIG welding imaging experiment system

1.2 实验参数

实验采用无摆动的脉冲直流 TIG 焊接方式,固定脉冲时间为 0.25 s。在焊接实验过程中,由于窄间隙坡口有一定深度,需要进行多层焊接,坡口多层焊接示意图如图 2 所示。

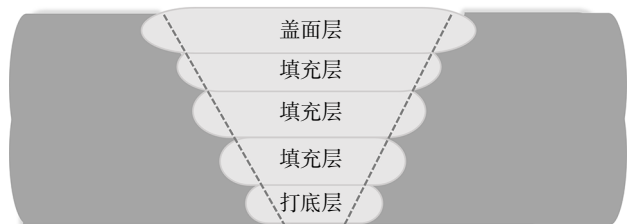


图 2 窄间隙坡口多层焊接
Fig.2 Narrow gap groove multilayer welding

由于坡口底部接口较薄,初始采用小电流进行打底焊。随着填充层数的增加,所需焊接电流逐步增加。为维持电弧的稳定性,保证焊接效果,焊接基值电流均设为峰值电流的 1/2,具体参数见表 1。

表 1 焊接参数
Tab.1 Welding parameters

焊接层	焊接电流 /A		焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)
	基值	峰值		
打底层	75	150	60	130
填充层	100	200	60	130
盖面层	130	260	60	130

2 TIG 焊接成像特点分析

在 TIG 焊接过程成像中,熔池几何形状形态的稳定性,焊缝纹理均匀及连续性,咬合纹理的直线性是观测焊接质量的关键信息。因此,TIG 焊接在线质量监测,主要观测的焊接特征信息包括熔池边缘轮廓形貌、焊缝纹理均匀度、坡口咬合度等。

在 TIG 焊接过程中,根据焊接层的不同将焊接电流调至对应焊接所需电流,通过 QE65 Pro 光谱仪测量对应峰值电流阶段(150、200、260 A)的电弧光光谱,电弧光光谱如图 3 所示。可以看出,虽然焊接电流的变化会影响各波段的强度,但对光谱的分布趋势影响不大。从电弧光光谱可以看出,在 700~870 nm,电弧光的辐射强度较高,且离散谱线较多。在选择成像波段时,应该尽量避免这个范围。此外,常规工业相机传感器的量子响应曲线响应度较高的波段多位于可见光波段区域,故可选择此波段作为成像波段来保证成像质量。

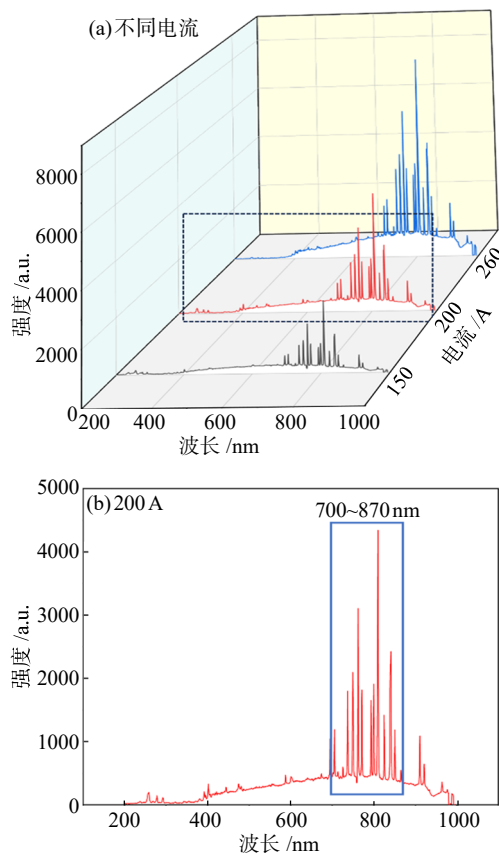


图 3 电弧光光谱
Fig.3 Welding arc spectrum

焊接成像区虽然弧光照度较强,但是强度变化幅度较小,在空间频谱信息中主要分布在低频区域,同时图像的主要能量聚集在低频区域。故可将弧光区域映射为光学傅里叶变换面上低频能量区域,而熔池边缘轮廓、焊缝纹理等细节信息照度较低,但变换幅度较大主要分布在高频能量区。

图 4 为焊接图像与其频谱。对焊接过程原始图像(图 4(a))进行傅里叶变换,得到频谱幅值图,频

谱中心为高幅值的低频分量,频谱边缘为高频分量(图 4(b))。利用数字滤波器对图像频谱进行分频,将图像分为高频和低频两部分。图 5 为焊接图像低频和高频部分。其中,图 5(a)展示了低频分量对应的信息,表现为弧光高亮的轮廓区域;图 5(b)展示了高频分量对应的信息,表现为熔池边缘、焊缝纹理等较暗的细节信息。

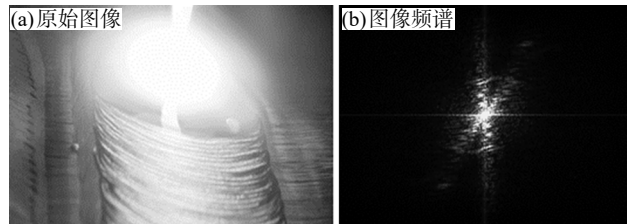


图 4 焊接图像与其频谱
Fig.4 Welding image and its frequency spectrum

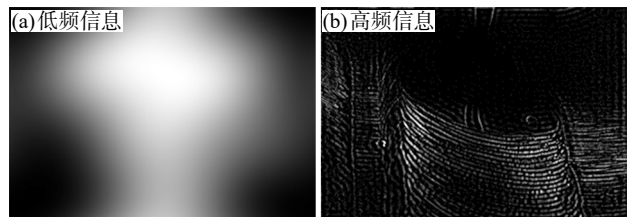


图 5 焊接图像低频和高频部分
Fig.5 Welding image in low and high frequency

故若在光学系统频谱面放置 1 块特制的高通空间滤波器,只滤除焊接图像频谱信息中弧光对应的频谱信息,保留焊接质量监测中的细节信息。则在最终的成像中能有效抑制弧光的干扰,弱化最终成像区域的光强梯度,提高焊接成像的质量。

3 光学滤波系统设计

3.1 系统结构

光学滤波系统包括可调中性密度减光片、宽带通滤光片、空间滤波器和镜头等。中性密度减光片均匀降低各波段的光照强度,采用可调设计以适应不同焊接电流下的弧光强度。宽带通滤光片(400~700nm)用于滤除弧光干扰较强波段,保留更多成像本底照度和焊接特征信息。而空间滤波器则插入在镜头前透镜组后面的光阑面上,用以在频域中滤除弧光对应的频率信息,进一步降低弧光对焊接成像的干扰,同时增强焊接成像特征信息对比度。光学滤波系统如图 6 所示。

3.2 光谱滤波

时域中光谱滤波是根据入射光的光谱分布,设

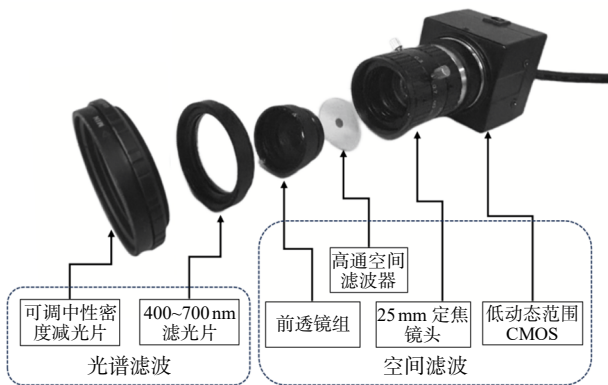


图6 光学滤波系统

Fig.6 Optical filtering system

计特定波段的滤光片对入射光线进行滤波,得到合适成像波段的光谱。为了进一步评估在不同波段下的成像效果,使用不同带宽的滤光片,覆盖可见光和红外波段。本文选择了5种不同带宽的滤光片,其中窄带通滤光片的参数见表2,宽带通滤光片的参数见表3。

表2 窄带通滤光片参数

Tab.2 Parameters of narrow band-pass filter

中心波长 /nm	486	532	687
半带宽 /nm	10	3	12
透过率(%)	85	85	85

表3 宽带通滤光片参数

Tab.3 Parameters of wide band-pass filter

带宽 /nm	400~700	990~1200
透过率(%)	90	90

实验首先采用可调中性密度减光片进行全局均匀减光,再使用不同波段的滤光片进行滤光,不同波段带通滤光片成像效果如图7所示。从图中可知,使用486、532和687 nm的窄带通滤光片拍摄的图像对于焊缝内的细节和边缘信息成像较差,且成像颜色过于单一、清晰度低,不利于观察焊接情况。使用990~1200 nm红外带通滤光片拍摄的图像清晰度低,虽然弧光被抑制了更多,但普通工业相机对于此

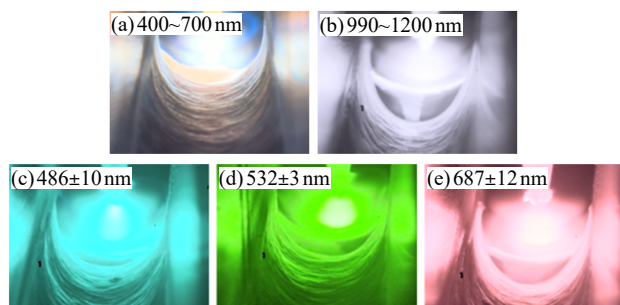


图7 不同波段带通滤光片成像效果

Fig.7 Imaging effect with different bandpass filter

波段的响应度较低,会导致成像模糊。使用400~700 nm带通滤光片拍摄到的图像清晰度高,且熔池和焊缝区域细节信息更为清晰。

可见光波段的电弧光强度仍较强,若此时降低中性密度减光片的透光率,则焊缝和熔池区域的光强也被抑制,造成该区域的成像不清晰。因此,需要在抑制电弧光的同时尽可能减少对熔池和焊缝区域的影响。

3.3 空间滤波

空间滤波是指在光学成像系统的空间频谱面上放置滤波器,从而滤除或改变频谱中特定区间的频率(振幅减小或相位改变),以此来调整最终的成像效果^[17-19]。在成像过程中,物体发出的光经过光学系统后发生光学傅里叶变换,在光学系统的频谱面上放置空间滤波器,可以改变频谱面上的频谱信息,最终被改变的频谱信息傅里叶逆变换在像面上呈现。从空间滤波的角度,成像具体过程如图8所示。

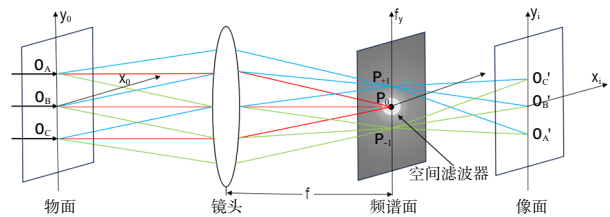


图8 空间滤波示意图

Fig.8 Schematic diagram of spatial filtering

当物平面上的一点发出的光波 $u(x_0, y_0)$ 经过透镜后,在其后焦平面上产生夫琅禾费衍射,形成不同频率成分的衍射斑 p_{+1}, p_0, p_{-1} , 得到第一次衍射像^[20]。其光场复振幅分布为 $U(f_x, f_y)$, f_x, f_y 为空间频率,表达式为

$$U(f_x, f_y) = \iint U(x_0, y_0) \exp[-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] dx dy \quad (1)$$

式中: x_0, y_0 为物平面坐标。

若在频谱面放置1块特制的空间滤波器,并设其复振幅透射率函数为 $W(f_x, f_y)$, 则透过空间滤波器的光场复振幅分布 $U_p(f_x, f_y)$ 为

$$U_p(f_x, f_y) = U(f_x, f_y) W(f_x, f_y) \quad (2)$$

在像面上得到的经过空间滤波器调制过的输出图像 $u_{out}'(x_i, y_i)$ 为

$$\begin{aligned} u_{out}'(x_i, y_i) &= \iint U_p(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] df_x df_y \\ &= \iint U(f_x, f_y) W(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] df_x df_y \\ &= \iint u(-x_i, -y_i) \cdot F^{-1}\{W(f_x, f_y)\} \end{aligned} \quad (3)$$

图像若经过不同空间滤波器滤波后,最终呈现出不同的滤波效果,增强图像特征或者去除图像噪声。通过分析焊接图像中电弧光、熔池等信息的频率分布区间,设计合适的空间滤波器对特定区间的频率进行过滤,在抑制弧光同时减轻对熔池和焊缝区域成像的干扰。

3.4 空间滤波器设计

设计特制的空间滤波器插入在光学频谱面来调整焊接图像的空间域信息,可以去除图像中的干扰信息,进一步增强图像的细节和特征。选择合适的空间滤波器对于获得清晰、高质量的图像至关重要。滤波器的尺寸越大,可处理的空间信息就越多,但也可能导致图像过度平滑或失真;尺寸过小会导致滤波效果不足,图像变化不明显。因此,需要根据实际的焊接场景考虑空间滤波器的类型和尺寸,以实现最佳的成像效果。

在光学系统的空间频谱面上,低频成分信息集中于频谱面光轴附近,而高频成分信息则分布在远离光轴的位置。因此,通过在光学系统的频谱面上使用高通空间滤波器来滤除部分低频分量,可以抑制弧光的影响,减少对焊缝、熔池区域成像的干扰,同时增强图像整体的对比度。综上所述,本文采用振幅型高通滤波器去除频谱中的低频部分,以增强图像的边缘或实现衬度反转。

3.4.1 空间滤波器参数设计

在焊接过程中随着焊接层的变化,焊接电流也会随之改变,因此电弧的低频分量宽度也会不同,故设计合适尺寸的高通空间滤波器,兼容不同焊接层状态下对电弧的滤波效果。图像中的大部分能量通常集中在低频区域,因为这些区域对应图像中的基础结构或大尺度特征,比如背景的广泛区域、物体的轮廓以及渐变的阴影等。这些特征所包含的像素数量往往比细节要多,因此能量谱图中的能量主要集中在低频区域。焊接图像能量谱如图9所示。其中红色尖峰代表能量高的低频成分,而蓝绿色平缓区域则对应中高频区域。采用图像中能量区域表征的频率成分作为设计高通滤波器的高频和低频分量的分界线。具体高通滤波器 $H(u, \nu)$ 计算过程为

$$H(u, \nu) = \begin{cases} \alpha_0 & R \leq D \\ TD & R \leq \min\{M, N\} \end{cases} \quad (4)$$

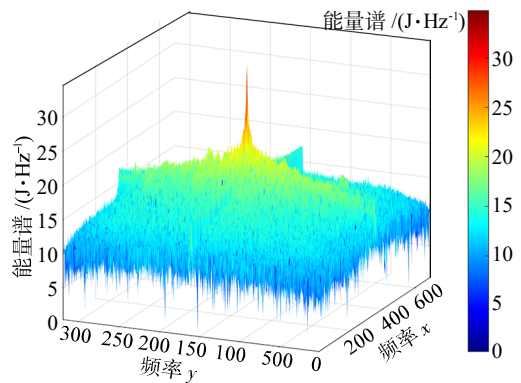


图9 焊接图像能量谱
Fig.9 Energy spectrum of welding image

$$D = \sqrt{\left(u - \frac{M}{2}\right)^2 + \left(\nu - \frac{N}{2}\right)^2} \quad 0 < \sum \|F(u, \nu)\|^2 < kE \quad (5)$$

式中: R 为像素点到能量谱中心的距离; D 为低频区域截止半径; M 、 N 为图像长和宽; α_0 为低频区域吸收系数; T 为高频区域透过率; $\sum \|F(u, \nu)\|^2$ 为以能量谱中心为圆心的圆域能量和; E 为总能量; k 为能量占比系数; u 、 ν 为任意像素点的横、纵坐标。

以能量谱中心为圆心,焊接图像频谱能量的85%的圆域作为最小低频区域,向外以5%的能量区间增加低频范围,低频能量圆域范围如图10所示。并设计相应尺寸的高通滤波器滤除原始焊接灰度图像,不同能量区域高通滤波效果如图11所示。高通滤波器低频截止区域随着低频能量区的增大,图像中弧光区域信息被抑制的更多,但是整体焊接图像呈现变暗趋势,熔池、坡口边缘等细节信息均被滤除。故在实际的焊接场景选择合适大小的高通滤波器对低频区域进行滤波具有重要的意义。

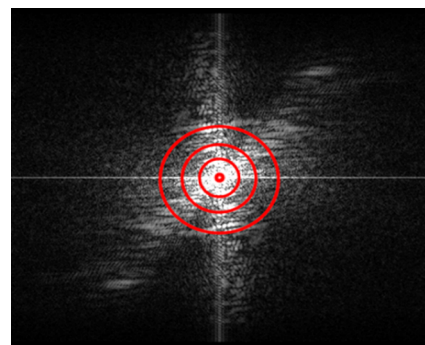


图10 低频能量圆域范围
Fig.10 Range of low-frequency energy circular domain

基于上述分析,本文设计了一种在耐高温石英玻璃的基底上镀铬膜的高通空间滤波器。石英玻璃具有透过率高、折射率低、杂质含量低的特点,用它

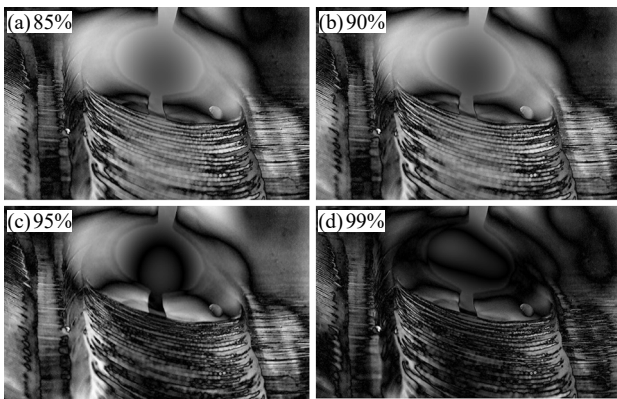


图 11 不同能量区域高通滤波效果

Fig.11 Effect of high-pass filtering in different energy regions

作为基底材料对整个光学成像系统的影响较小^[21-22],实验使用石英玻璃基底透过率为 93%。铬膜镀在石英玻璃中心位置,吸收频谱中心对应的低频弧光信息,金属铬膜具有良好的耐热性能和光学性能,对于光的吸收能力随着厚度的增加而增强^[23]。

为测试实际焊接过程中的滤波效果,在不同焊接参数下参考频谱能量的高频区域和低频区域的分界阈值。根据镜头聚焦后调节光圈使进光量为最大的范围设计了不同规格的圆形镀铬高通空间滤波器,圆形镀铬高通空间滤波器如图 12 所示。其中,高通空间滤波器参数见表 4。

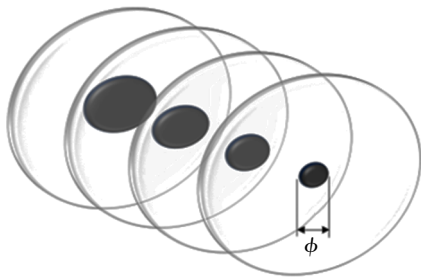


图 12 圆形镀铬高通空间滤波器

Fig.12 Circular chrome-plated high-pass spatial filter

表 4 高通空间滤波器参数

Tab.4 Parameters of high-pass spatial filter

编号	镀铬直径 /mm	镀铬层厚度 /nm	基底直径 /mm
1	2	100	17.8
2	3	100	17.8
3	4	100	17.8
4	5	100	17.8

4 实验结果分析

4.1 焊接图像评价指标

为量化实验结果,引入细节能量(detail energy,

DE)作为空间滤波效果的评价指标,细节能量从图像频率域的高频分量的角度来描述图像的细节形状特征,同时从图像的局部来评价图像的质量,细节能量的计算方法为

$$DE = \frac{1}{n} \sum \delta^2(x, y)$$

$$\delta^2(x, y) = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [I(x+i, y+j) - \mu(x, y)]^2 \quad (6)$$

$$\mu(x, y) = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I(x+i, y+j)$$

式中: $\mu(x, y)$ 为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 区域内灰度值的平均值; $\delta^2(x, y)$ 为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 区域内灰度值的方差总和的平均值; i, j 为窗口内横向、纵向偏移量; $I(x+i, y+j)$ 为偏移后灰度值。DE 反映了图像中细节信息的丰富度。其值越大说明图像的纹理越细,提供的信息越丰富,图像越清晰。

4.2 实验结果及评价

实验通过 400~700nm 的带通滤光片提供成像波段,并采用可调中性密度减光片来调整透光率。在镜头光阑面位置插入了高通空间滤波器,并针对不同焊接层(a为打底层、b为填充层、c为盖面层)进行了实验,使用不同尺寸规格的高通空间滤波器。为有效分辨滤波的强弱,体现滤波的效果,实验均选取峰值电流阶段的成像结果,不同空间滤波器的成像效果如图 13 所示。从图中可以观察到,选择合适尺寸的空间滤波器能够有效抑制电弧光的干扰,并使焊缝和熔池区域成像清晰。这使得监测者能够清晰地识别熔池边缘、焊缝形态和坡口的咬合情况,为后续的信息识别和提取提供了清晰的图像。然而,过小尺寸的空间滤波器由于光阑固定,进光量较大,滤除低频区域较少,无法有效抑制强弧光的干扰,如图 13 中 2、3mm 所示。相反,当空间滤波器尺寸过大时,光阑面进光量减少,不仅图像中的低频成分被滤除,部分高频细节也被消除,导致整体画面变暗,清晰度降低,且焊接细节信息丢失,如图 13 中 5mm 所示。选择合适尺寸的空间滤波器可以有效抑制焊接弧光的干扰,降低人眼观测的强光刺激,同时提高细节信息的成像质量,使熔池、焊缝、钨极和坡口等监测信息能够清晰地辨别出来,如图 13 中 4mm 所示。

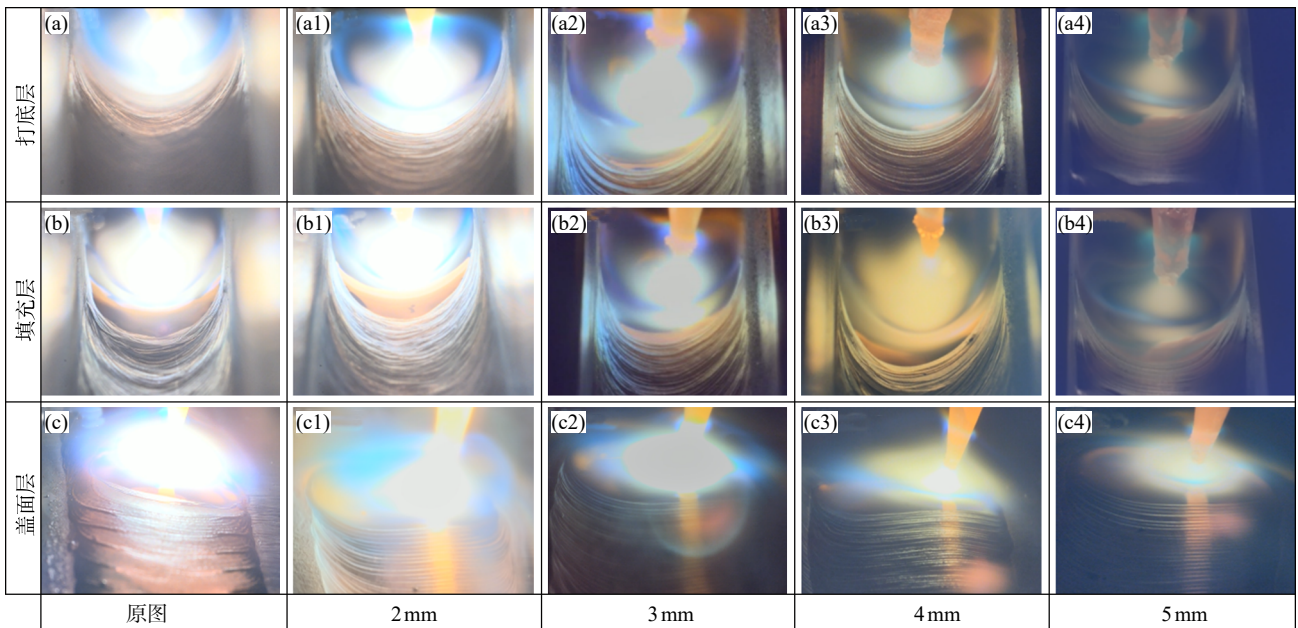


图 13 不同空间滤波器的成像效果对比

Fig.13 Comparison of imaging effects of different size of spatial filters

图 14 为不同空间滤波器滤波后焊接层细节能量对比。在各个焊接阶段使用不同尺寸的空间滤波器时,对细节图像能量进行统计。在打底层焊接阶段,2mm 的空间滤波器表现出了较佳的性能,细节能量最高,为 50.181。这是因为在打底层焊接过程中,由于焊接电流较低,焊接弧光的面积相对较小,因此滤除的低频成分也较少。然而,随着空间滤波器尺寸的增加,不仅滤除的低频部分增多,高频的细节信息也被削弱,导致整体图像变暗,焊接细节信息丢失。相比之下,在填充层和盖面层焊接中,由于所需电流增加,弧光在图像中的展宽面积也增大,低频信息的比例随之增加。因此,适当增大空间滤波器的尺

寸有助于滤除增加的低频成分,从而提升经过滤波处理后的高频细节信息在频谱中的占比。综合考虑,在窄间隙 TIG 焊中,采用 4mm 的空间滤波器能有效抑制焊接过程中的强烈弧光,在填充层和盖面层细节能量分别为 30.908、20.862,均保留更多的监测细节信息,显著提升整体焊接成像质量。

5 结论

(1) 基于光谱滤波和空间滤波技术,分析了焊接电弧光谱特征和电弧频谱信息分布特点,提出了一种通过光学时空复合滤波来提高 TIG 焊监测成像质量的方法。选择了 400~700nm 宽带通滤光片对电弧进行光谱滤波,克服了使用窄带通滤光片成像颜色单一且清晰度低的缺点。

(2) 通过分析焊接图像中电弧频谱分布特点,研究了不同高通空间滤波器低频分量截止宽度的影响情况。并基于实际工业镜头光阑面尺寸,设计了不同镀铬直径的高通空间滤波器。在窄间隙钢板 TIG 焊场景中,得到了使用 4mm 镀铬直径的空间滤波器在不同焊接层成像中均有效抑制强弧光干扰且成像更清晰的结果。

(3) 本时空复合滤波系统有效解决了常规工业相机拍摄焊接过程中,因为弧焊区辐射梯度大而无法观测可用信息的问题;同时熔池边缘轮廓、焊缝纹理和坡口咬合等焊接特征信息更为凸显。

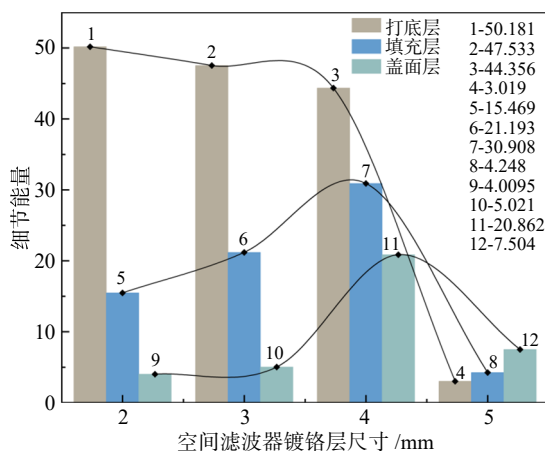


图 14 不同空间滤波器滤波后焊接层细节能量对比

Fig.14 Comparison of detail energy of weld layers imaged after different spatial filtering

参考文献:

- [1] Liu J C, Fan Z, Olsen S I, et al. Boosting active contours for weld pool visual tracking in automatic arc welding [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14 (2): 1096-1108.
- [2] Ryoichi T. Development of automation and artificial intelligence technology for welding and inspection process in aircraft industry [J]. Welding in the World, 2022, 66(1): 105-116.
- [3] Wang B C, Hu S J, Sun L, et al. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56: 373-391.
- [4] Juang S C, Tarn Y S. Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(1): 33-37.
- [5] Tarn Y S, Tsai H L, Yeh S S. Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(9): 1427-1438.
- [6] 刘自刚, 梅亚泽, 张建峰, 等. 深熔 TIG 焊研究现状与展望 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(1): 6-11.
- [7] Fan X A, Gao X D, Liu G Q, et al. Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(11): 3365-3391.
- [8] Wang Q, Cheng Y, Jiao W, et al. Virtual reality human-robot collaborative welding: A case study of weaving gas tungsten arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 48: 210-217.
- [9] Bentley A E, Marburger S J. Arc welding penetration control using quantitative feedback theory [J]. Welding Journal, 1992, 71(11): 397-405.
- [10] Lei T, Rong Y, Wang H, et al. A review of vision-aided robotic welding [J]. Computers in Industry, 2020, 123: 103326.
- [11] Tsai, Fuu R, Kannatey-Asibu, et al. Modeling of conduction mode laser welding process for feedback control [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(3): 420-428.
- [12] Zhang Y, Zhang C L, Tan L P, et al. Coaxial monitoring of the fibre laser lap welding of Zn-coated steel sheets using an auxiliary illuminant [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50: 167-175.
- [13] Lei Z L, Shen J X, Wang Q, et al. Real-time weld geometry prediction based on multi-information using neural network optimized by PCA and GA during thin-plate laser welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 207-217.
- [14] 宋永伦, 李俊岳, 吴仁育, 等. 弧焊区图像信息的光谱传感技术 [J]. 焊接学报, 1992(2): 127-132.
- [15] Zhao Z, Sun B, Zhang Y, et al. Weld pool image acquisition and contour extraction based on arc spectrum and camera quantum efficiency [J]. Optik, 2020, 202: 163719.
- [16] Guo Y J, Gao J Q, Wu C S, et al. Correlation between fusion hole morphology and weld penetration in TIG welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(9): 2991-3000.
- [17] Köhler H. On Abbe's theory of image formation in the microscope [J]. Optica Acta, 1981, 28(12): 1691-1701.
- [18] Wesemann L, Panchenko E, Singh K, et al. Selective near-perfect absorbing mirror as a spatial frequency filter for optical image processing [J]. School of Physics, 2019, 4(10): 100801.
- [19] Stankovic L, Stankovic S. Space/spatial-frequency analysis based filtering [J]. Signal Processing, 2000, 48(8): 2343-2352.
- [20] 张朝晖, 刘国超. 阿贝成像原理和空间滤波实验 [J]. 物理实验, 2017, 37(9): 23-29.
- [21] 葛世名. 光学石英玻璃简介 [J]. 光学技术, 1980 (6): 5-7.
- [22] 杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 等. 高纯石英的研究进展及发展趋势 [J]. 地学前缘, 2022, 29(1): 231-244.
- [23] 张伟. 金属薄膜透射率的近似计算及其分析 [J]. 应用光学, 1988(6): 49-54. 