

# 主动红外技术在实时在线焊缝检测系统中的应用

蒋金鹏 丁国清 颜国正 周 昀

(上海交通大学电子信息学院 820 所, 上海, 200030)

**摘要** 从焊缝的本质入手, 研究焊接过程中焊缝的显微组织和化学成分的变化, 进而探讨这些变化对主动红外反射图像的影响. 通过理论和实际的分析, 得出主动红外技术能很好地应用于工业焊缝的检测. 本文提出的检测方法主要是针对实际的工业应用场合, 具有快速、高精度的特点. 检测精度为 0.1mm. 在 PC-奔 700 的计算机上, 整个算法图像的分割速度为 0.02s.

**关键词** 焊缝检测, 主动红外技术, 图像处理, 实时检测.

## THE APPLICATION OF ACTIVE INFRARED TECHNOLOGY IN REAL-TIME AND ON-LINE WELD METAL DETECTION

JIANG Jin-Peng DING Guo-Qing YAN Guo-Zheng ZHOU Yun

(820, School of Electronics & Information Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** Starting with the nature of welding seams, the artical studiws Changes of the microstructures and chemical components of welding seams duning the process of welding, then discuss the effects of these changes on active infrared images of reflection. Through theoretical and experimental analyses, it is well known that active infrared technology can be applied in the investigation of industrial welding seams. The method put forth in the article mainly aims at the practical application of industries, and is characterized by rapid, of high precision, on-line in real time. The precision is up to 0.1mm. It takes only 0.02s to segment an active infrared image on a P-700 personal computer.

**Key words** detection of weld metal, active infrared technology, infrared image, real-time detection.

### 引言

近年来,随着冶金、机械、石化以及原子能、航天等现代化的高速发展,对焊接质量和焊接自动化程度的要求也越来越高. 焊接质量的检测主要包括焊缝的几何形状、焊缝的位置偏差以及焊缝缺陷的检测. 尤其是在汽车工业中,焊接件的比例很大,经常需要快速检测焊缝的各种特征,主要包括:焊缝的宽度、长度以及偏心距等特征,以便对焊缝的质量进行评价. 如何快速而且高质量对焊缝的特征进行检测是我们面临的一个问题.

目前解决这个问题的方法主要集中在对可见光下焊缝的彩色图像进行处理,以获取焊缝的参数. 该方法有一个致命的弱点. 在可见光下,图像的光照模型是不稳定的,是动态变化的,因此造成了焊缝的图像处理相对比较复杂,而且对焊缝图像的分割效

果很差,影响了对焊缝参数的提取. 如果采用智能学习的方法如神经网络、支持向量可能会达到一定的分割效果,但是速度慢,不适应实时检测. 图 1 为焊缝在普通光照下的图像. 从图上可以看出,焊缝不明显. 处理起来相对困难. 从红外物理研究的结果来看,不同显微组织和化学成分具有不同的红外反射率. 而在焊接的时候,焊缝与母质相交的地方(即熔合线),其显微组织和化学成分将发生变化. 而这些特征对红外光谱极为敏感. 利用该特征,我们将采用主动红外技术对焊缝进行检测.

本文以别克汽车副车架零件的焊缝为实验对象,首先研究了焊接过程对材质的显微组织结构和化学成分的影响,然后探讨了焊缝的红外光照射下的谱图特征以及红外反射图像. 最后采用一系列的图像处理方法对红外谱图进行处理,提取焊缝特征. 实验结果表明,该方法有很好的效果和实用价值.

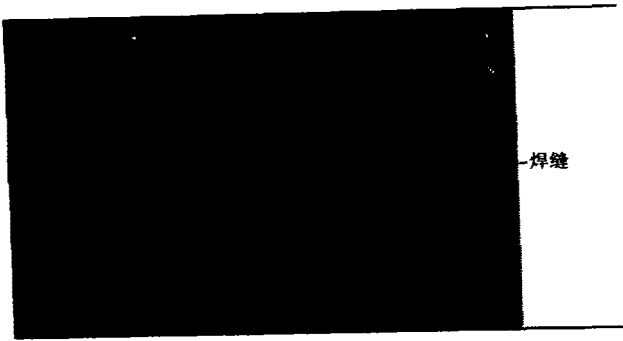


图1 焊缝在普通光照下图像  
Fig.1 The image acquired in visible light

### 1 焊缝对材质的影响

在熔焊时<sup>[1,2,5]</sup>,母材与填充金属同时被熔化,构成焊缝的熔化区.焊缝边界或溶合线,实际上是一个熔化不均匀的区域,即熔合区.

#### 1.1 熔合区的形成

在焊接条件下,由于熔滴过渡和电弧吹力的作用不均匀,使得温度分布不均匀,加之母材晶粒相对最有利的导热方向取向有差异,从而造成不均匀的熔化现象.同时,又由于母材各点的溶质(即化学成分)并不均匀,其实际熔化温度与理论上的熔化温度有一定的差异,从而形成局部熔化和局部不熔化的固、液两相共存的区域即熔合区,熔合区的大小取决于实际温度梯度  $G$ ,  $G$  越大时,熔合区就越小.因此从母材到焊缝存在着过渡区.过渡区特殊的显微结构和化学成分是进行主动红外检测的理论基础.

#### 1.2 熔化区的最大的特征

熔化区的最大的特征是具有明显的化学不均匀性,从而引起组织的不均匀性.在热影响区,各层将具有不同的显微组织状态如图2所示.

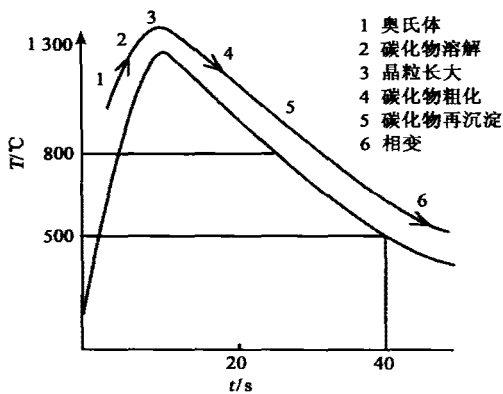


图2 热影响区中显微组织的变化  
Fig.2 The change of microstructure in fusion lines

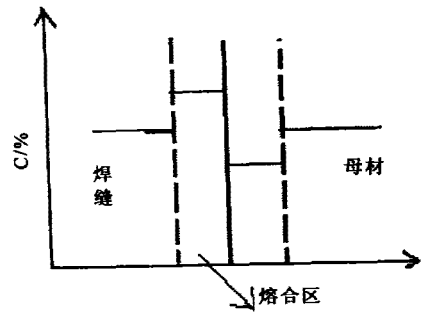


图3 碳迁移过渡层示意图  
Fig.3 The phenomenon of carbon migration

从图2我们可以看出,在焊接的过程中,热影响区的各层的显微组织结构有很大的不同.在结构钢热影响区中,显微组织发生7种变化:奥氏体化→碳化物溶解→晶粒长大→碳化物粗化→碳化物再沉淀→相变→马氏体形成.

#### 1.3 碳迁移过渡层

碳迁移过渡层是体心立方的珠光体类钢与面心立方的奥氏类钢焊接时出现的一种熔合区碳迁移现象,在母体一侧出现脱碳层,在焊缝一侧出现增碳层如图3所示.即使同类钢焊接,只要母材与焊缝的合金化程度不同,也将出现熔合区碳迁移现象.因此在熔合区,碳含量相对较高,两侧相对较低.

#### 1.4 熔合线化学成分扫描

图4为溶合线(母材与填充金属相接的区域)化学成分扫描.可见 Ni、Cr 在熔合线处浓度相对较低,而 Al 的过渡态不甚明显,这是由于高温烧损的缘故. Mn 的含量相对比较高,主要以氧化物的形式出现.

### 2 焊缝的红外反射图特征<sup>[3]</sup>

从上面的分析,可以看出焊缝的熔合线与焊缝本身和母体具有不同的显微组织结构和不同的化学成分.正是这些显微组织和化学成分的不同,引起了

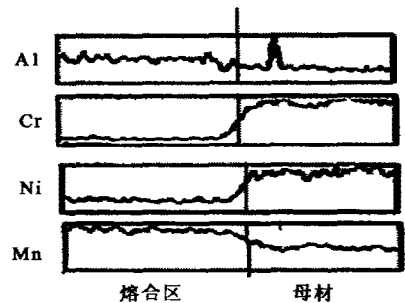


图4 熔合线化学成分扫描  
Fig.4 The chemical ingredients in fusion lines

红外反射图像的不同. 下面我们讨论这些特征对红外反射图像的影响.

在焊缝的熔合线处, 金属如镍、铬相对含量较低, 而碳的含量相对较高. 从表 1 可以看出, 不同的金属, 其光谱反射系数有很大的不同. 因此在焊缝的熔合线处的红外反射系数将比母体和焊缝本身要低, 反映在红外反射图像中, 其亮度将相对其它部分要暗, 如图 10 所示.

在熔合线处由于结晶较差, 因此其红外反射系数也将比母体和焊缝本身要低, 导致其亮度将相对要暗.

表 2 为实测的焊缝、母材和熔合线的光谱反射系数(抛光后实测). 从图上可以看出, 由于成分和显微组织的综合影响, 导致这三者之间有明显的光谱反射系数差异.

如果将图像的亮度作为比较指标, 将其分为 256 个等级, 熔合线处其亮度值要比母体和焊缝差 30~40 个等级左右.

因此利用焊缝的这一特征, 将可以很好地对焊缝进行分割. 以便提取焊缝的各种特征.

### 3 检测系统结构及工作原理

整个主动红外检测系统的结构如图 5 所示. 在本实验系统中, 我们采取的是主动红外技术, 有以下几个好处:

- 1) 周围物体的红外辐射相对红外光源可以忽略不计;
- 2) 减少了自身辐射的影响;

表 1 金属的光谱反射系数

Table 1 Reflectance of metal in infrared light

金属	波 长		
	0.76um	0.94um	2.0um
镍	0.68	0.725	0.835
铬	0.56	0.57	0.63
钢	0.57	0.63	0.77
石墨	0.02(0.8um)		

表 2 实测焊缝、母材和熔合线的光谱反射系数

Table 2 Reflectance of welding seam, mother material, and fusion line in infrared light (practical measurement value)

材质	波 长	
	0.76um	0.94um
焊缝	0.60	0.65
母材	0.61	0.65
熔合线	0.50	0.54

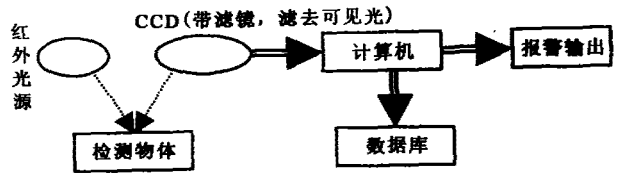


图 5 主动红外检测系统的结构图

Fig. 5 The structure of active infrared detection system

3) 红外图像的光照模型相对比较稳定.

在红外反射图像中, 既有反射红外光, 也有物体自身辐射的红外光谱. 但自身辐射的红外光的亮度要低于红外光源的反射红外光几个数量级. 因此可以忽略自身辐射的红外光的影响.

红外光源采用一组 GaAs 红外发光二极管. 用它作为主动红外成像的光源有许多优点: 发光效率高, 成像清晰, 近红外输出, 不需要加滤光片等. GaAs 红外发光二极管工作电压为 3V, 工作电流为 10μA, 光线峰值波长 940nm, 光束角度为 34°. 图 6 为 GaAs 红外发光二极管的光谱特性曲线.

CCD 作为获取主动红外图像的检测器. 该 CCD 带红外 CCD 专用滤光镜. 图 7 为红外滤光片的特性曲线. 可以滤去可见光对谱图的影响. 红外光源和 CCD 可装在机器人上. 工作原理如下:

将 GaAs 红外发光二极管阵列照射的被测物体(即焊缝)的表面, CCD 获取焊缝的近红外反射图像. 计算机获取 CCD 的视频输入, 然后对视频进行分析处理, 将分析结果存入数据库, 最后对整个焊缝质量进行统计分析, 对不符合要求的焊缝进行报警, 并形成报表.

### 4 红外图像的处理及算法

图 9 为主动红外检测系统的图像处理过程. 主要步骤如下:

图像去噪: 主要采取中值滤波, 消除一些异样点对整个分析处理的影响, 同时不破坏焊缝的边缘;

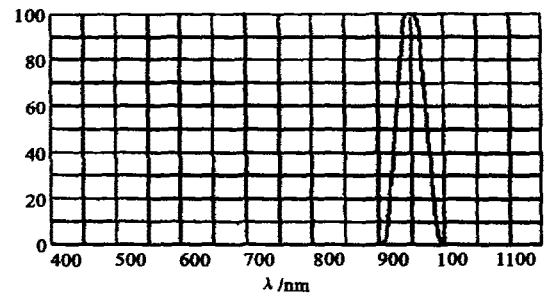


图 6 GaAs 红外发光二极管的光谱特性曲线

Fig. 6 The infrared spectrum curve of GaAs

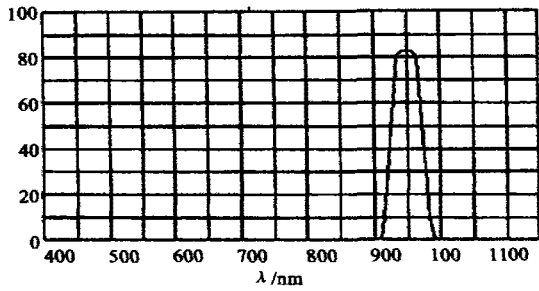


图7 红外滤光片的特性曲线  
Fig.7 The infrared spectrum curve of infrared filter

图像分割:主要是对红外图像进行分割,采用迭代法求最佳分割阈值的算法<sup>[4]</sup>;

图像匹配;利用已知模型来匹配,找出焊缝;

图像定标;主要是找出图像大小与实际的大小之间的关系;

提取焊缝的特征:焊缝参数主要包括(如图8),焊缝的宽度(H)、焊缝的长度(L)、焊缝的偏心距(P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>)等。

由于我们在获取图像时已经减少了各种因素的干扰,因此在图像分割时,可以采取简单而又快速的算法来进行,便于在实际工业中采用。图像分割的算法主要是采用迭代法求最佳分割阈值的算法。

1) 求出图像中的最小和最大灰度值 Z<sub>1</sub> 和 Z<sub>2</sub>, 令 T<sub>0</sub> = (Z<sub>1</sub> + Z<sub>2</sub>)/2;

2) 根据阈值 T<sup>K</sup> 将图象分成目标和背景, 求出二部分的平均灰度值 Z<sub>0</sub> 和 Z<sub>B</sub>;

$$z_0 = \frac{\sum_{z(i,j) < T^k} z(i,j) \cdot N(i,j)}{\sum_{z(i,j) < T^k} N(i,j)},$$

$$z_B = \frac{\sum_{z(i,j) > T^k} z(i,j) \cdot N(i,j)}{\sum_{z(i,j) > T^k} N(i,j)},$$

其中 N(i,j) 为权系数。

3) 求出新的阈值 T<sup>K+1</sup>;

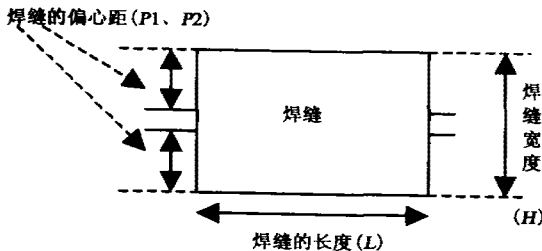


图8 焊缝主要参数  
Fig.8 The main parameter of welding seams

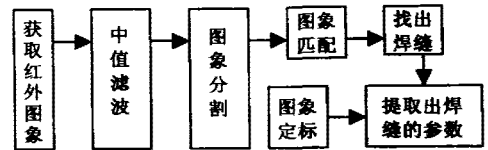


图9 主动红外检测系统的图像处理过程  
Fig.9 The image processing in detection

$$T^{K+1} = (Z_0 + Z_B) / 2.$$

4) 如果 T<sup>K</sup> = T<sup>K+1</sup>, 则结束, 否则 K ← K + 1, 转步骤2。

### 5 实验结果

利用上面介绍的方法,我们进行了实验研究。实验结果如图10~图12所示。图10为焊缝红外图,从图上可以看出焊缝非常明显。图11为焊缝红外图像分割图,焊缝非常明显地从周围的母质中分离出来。图12为经过匹配提取的焊缝红外图。提取出焊缝后,通过标定,可以对焊缝的各种参数进行分析和提取。本实验中焊缝的宽度 H 为 1.86cm、焊缝的长度 L 为 9.78cm、焊缝的偏心距 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 各为 0.85cm。

我们还对该方法的检测精度进行了测定。测定的方法是:用该方法对已知宽度(范围在 10~30mm)的标准焊缝进行检测,得到的焊缝宽度值与已知值进行比较,按照公式(1)计算检测精度。通过计算,本方法的检测精度为 0.1mm。

$$d = |H_c - H_b| \tag{1}$$

式(1)中 H<sub>c</sub> 为利用本方法获取的焊缝宽度值(mm);H<sub>b</sub> 为焊缝的已知宽度值(mm);d 为本方法的检测精度(mm)。

在 PC-奔 700 的计算机上,整个算法中图像的分割速度为 0.02s。而在基于神经网络或



图10 焊缝红外图  
Fig.10 The infrared image of welding seams

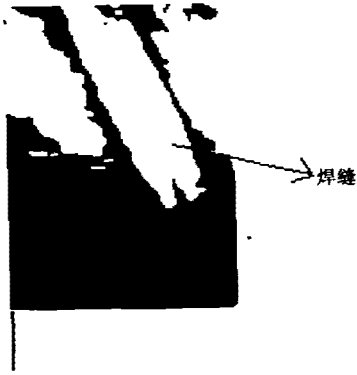


图 11 焊缝红外图像分割图

Fig. 11 The result of the segment image

向量学习机的彩色图像分割需要耗时至少在数秒以上. 因此该方法完全可以应用于实时工业场合.

## 6 结语

本文研究主要是针对实际的工业应用场合. 从焊缝的本质人手, 研究焊接过程中, 焊缝的显微组织结构和化学成分的变化, 进而探讨这些变化对主动红外图像的影响. 通过理论和实际的分析, 得出主动红外技术能很好地应用于工业焊缝的检测. 该检测方法具有快速、高精度的特点. 检测精度为 0.1mm. 在 PC-奔 700 的计算机上, 整个算法中图像的分割速度为 0.02s. 因此该方法完全可以应用于实时工业场合.

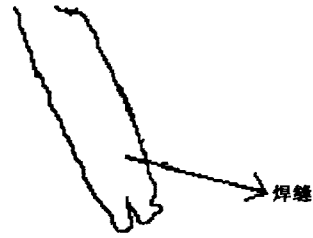


图 12 提取的焊缝红外图

Fig. 12 The welding seams sperated from mother material

## REFERENCES

- [1] GUO Da-Zhan, LI Fen-Lan, ZHU Rui-Hua. Microstructural analysis of the weld joints in 9Cr 1Mo V Nb steel. *Journal of Xi'An Jiao Tong University* (郭大展, 李汾兰, 朱蕊花, 等. 9Cr-1Mo-V-Nb 耐热钢焊接接头组织分析. *西安交通大学学报*), 1998, 32(2): 66—70
- [2] WANG Juan, LI Ya-Jiang. Microimages analyse of structure of welding areas of HQ130 steel. *Welding Technology* (王娟, 李亚江. HQ130 钢焊接区组织的显微图像分析. *焊接技术*), 2000, 29(2): 3—4
- [3] SHEN Guo-Tu, Guo Xiang-Yi, HU Ding-Song. A preliminary study of infrared image simulation. *Journal of East China Normal University*, (沈国土, 郭祥义, 胡定松. 红外图像理论建模初探. *华东师范大学学报(自然科学版)*), 1995, 2: 36—42
- [4] Pal N R. A review on image segmentation techniques. [*J*] *Patt Recog.* 1993, 26(9): 1277—1294
- [5] WEI Xing, LIU De-Zhen. Analysis of microscopic structure and scanning electron micrograph of austenite steel welded Joint. *Journal of Shandong University of Technology* (魏星, 刘德镇. 奥氏体钢焊接区域的金相组织及扫描电镜分析. *山东工业大学学报*). 1999, 29(2): 183—187