
摘要

针对 MAG 焊特点,设计改建了被动式熔池视觉传感系统,采集到了不同熔滴过渡下清晰的典型熔池图像,提取了熔池视觉图像几何、形态和浮渣特征,并采用伪彩色增强,灰度三维图等方法,进一步描述了熔池图像的灰度特点;通过同步实验方法,较系统地对典型焊接缺陷与熔池图像特征信息之间的关系进行了试验研究,得到了表面气孔、内部气孔(夹渣)、焊穿、未熔合等缺陷对应的熔池图像特征,并从灰度均值和标准差的角度研究了焊接缺陷产生过程中熔池图像的变化情况及奇异特征。试验表明,通过熔池视觉图像特征判断气孔等焊接缺陷,具有良好的可行性,为基于视觉传感的焊接缺陷自动识别提供了技术依据;试验与分析同时表明,一种图像特征可能预示有多种焊接缺陷产生的可能,一种焊接缺陷可能有多种图像特征显示。

关键词: MAG 焊 视觉传感 焊接缺陷 熔池特征 图像处理

ABSTRACT

In allusion to the characteristic of in MAG welding, a passive direct visual sensing system is designed and re-established. Typical and clear welding pool images can be shoot for different droplet transfers in MAG. The weld pool vision geometry, the shape and the dreg characteristic are gained and the gray characteristic is further described by using the false colored enhancement and 3-D gray image. With the synchronization experiments, connection between typical welding defects and the pool image characters has been systematically studied and the image characters have been gained corresponding to the weld defects such as surface pore, internal pore (dreg in weld) , weld burn through , weld crinkle and so on. Changes and the strange characters of weld pool images have been studied by the gray average value and the standard variance in the weld defect generating process. The experiments indicated that, it is feasible to judge pore and other weld defects from weld pool characters, which have provided the technical basis for weld defect automatic diagnosis which is based on visual sensing; The experiment and the analysis also indicated that, one kind of image character possibly indicated that many kinds of weld defect produce and one kind of weld defect possibly demonstrated many kinds of image characters.

Keywords: MAG welding vision sensing
 welding defects weld pool character
 image processing

1 绪论

在当前工业生产中焊接是非常重要的工艺方法,而在现代焊接生产中,熔化极气体保护焊具有熔敷速度快、易实现自动化、生产率高等特点,在造船、车辆、钢结构、机械、兵器、航空等行业得到广泛应用,尤其是熔化极富氩气体保护焊(MAG)焊,在一些军工产品、重型机械、轨道车辆等的焊接生产中占据着重要的地位。因此,研究探讨 MAG 焊的课题具有非常重要的理论意义和应用价值。

1.1 本课题研究意义

目前焊接自动化、智能化已成为焊接技术的主要发展方向。焊接智能化技术的核心是实现焊接过程和质量的实时检测与自动调整控制^[1]。为提高生产质量和降低焊后处理的成本,实现焊接过程质量的实时监测与“零缺陷”的管理目标,工业部门对于能够在线监测与控制焊接质量的工艺技术提出了迫切的要求^[2]。

随着焊接自动化,智能化技术的发展,基于熔池视觉传感的焊接质量控制已成为当今焊接界的一个研究热点^[3-5]。目前基于熔池视觉检测的熔化极气体保护焊质量控制的成果主要集中在熔宽^[6]和熔透控制方面,并且开始在实际生产中应用,但对基于熔池视觉传感的焊接缺陷控制技术的研究,本文作者尚未见相关文献资料报道,因此对这一技术的研究显得尤为紧迫,意义重大。

1.2 焊接中的熔池视觉传感

1.2.1 熔池视觉传感概述

对焊接过程进行传感是实现焊接过程质量控制的关键环节。目前,国内外研究人员对焊接过程熔池信息传感技术已经进行了大量的研究^[7-14]。声、力、电、热传感器在熔池信息传感过程中受到多种干扰的影响,特别是伴随电弧、工作环境等复杂的物理过程和随机过程产生的干扰以及传感器自身的一些缺点,较难在焊接过程质量控制中准确全面地采集传感熔池信息。而与其它传感方法相比,视觉传感器不与焊接回路相接触,信号检测不影响正常焊接过程。它能提供丰富的信息,如熔池特征、接头形状、电弧形态、焊丝位置及已凝固的焊道形状等,并能直接反映焊接过程熔化金属的动态行为,更适合于焊接过程质量控制中熔池信息的采集传感。因此,利用视觉传感器对熔池图像进行焊接质量检测和过程控制已成为焊接过程传感的一个重要研究方向。

目前,国内外针对 TIG 焊,脉冲 MIG 焊及 MAG 焊等熔池图像信息检测和处理进行了大量研究,并在焊接的熔池形貌检测与实时控制、焊缝跟踪等方面得到了成功应用^[15-21],例如,安徽省港航勘测设计院的王平对 PTIG 焊建立近红外 CCD 熔池动态信息的图像检测系统对熔池进行了检测,山东兖矿集团东华建设有限公司刘志永等人对连续电流对接 TIG 焊,利用视觉普通摄像机从试件正面检测出了熔池

形状参数等等。除了不锈钢和碳钢材料外,有人还对铝及其合金的熔池视觉图像传感进行了研究,获取得了比较清晰的图像,而且针对不同的焊接方法和工艺建立了熔池视觉检测系统^[22]等。

1.2.2 传感器发展现状

随着数码技术、半导体制造技术、网络以及多媒体系统的发展,可视信息日趋重要,视觉图像传感器成为人们关注的焦点。图像传感器是电子设备的图像接收器,它有线型和面型两种。目前流行的面阵图像传感器主要有面阵 CCD 和 CMOS 两种^[23-27]。其中 CCD 具有精度高、动态范围大、信噪比大的特点,通常用于传送优良图像质量的设备,但 CCD 是模拟器件,它的构成原理决定了 CCD 外围电路的复杂性,一般而言,CCD 控制电路的设计仍是相当复杂的,而且对电磁辐射比较敏感,数据输出的速度低。目前 CMOS 图像传感器具有单一工作电压、功耗低可对局部像素区域随机访问、直接输出彩色或灰度数字图像数据等优点,其最大优势在于它与 DSP 等其他器件的亲合性,这是 CCD 器件无法比拟的,而且其输出速度相对较高,如 LM 9630,其输出每帧图像的速度是 580 帧/s,另外 CMOS 器件不大受电磁辐射的影响,是比较理想的图像传感器,但就目前来说,CCD 技术较稳定,所以在很多领域包括焊接在内应用广泛^[28],而 CMOS 图像传感器一种新颖的图像传感器件,目前在焊接控制中使用得较少。

近年来,在焊接领域中,采用工业 CCD 摄像机的视觉传感方法不断涌现,取得了较好的效果^[29, 30],并且 CCD 传感器也不断得到改进,如天津大学的任永杰,杨学友等摆脱了传统的传感器加计算机的工作模式,通过 FPGA、DSP 技术与视觉传感器相结合,构建了高速智能化视觉传感器,提高了图像处理的速度,实现了传感器的高速智能化和仪器化,对视觉传感技术的发展与应用具有重要意义^[31]。

利用 CCD 作为光电传感器采集熔池图像,关键的一个问题是获取清晰的熔池图像,而让 CCD 的响应波长范围和选定的光谱窗口段相匹配是进行图像采集工作设计的前提。目前使用得较多的是不加任何辅助光源,直接利用弧光本身照明焊接区,此类方法通常使用减光片和滤光片,用于降低电弧光强度,去除弧光的干扰,但对于一些焊接方法,如 CO₂ 短路过渡焊等,普通摄像机固定工作时序与短路过渡发生的随机性之间存在矛盾,弧光在焊接过程不同时段强度差别很大,图像清晰度差别也很大。针对这一问题,清华大学曹一鹏等研制了一种基于普通工业 CCD 摄像机的专用传感器,设计了可消除 CCD 摄像机固定工作时序与 CO₂ 短路过渡发生的随机性之间的矛盾的同时检测熔池图像的控制时序,采用该图像传感器可以围绕焊枪轴线从不同角度快速、准确地获得清晰的熔池图像^[32]。

1.3 图像识别技术的发展和熔池质量信息检测

1.3.1 模式识别技术的发展

模式识别是一门技术科学,指用机器完成人类智能中通过视觉、触觉等感官去识别外界环境自然信息的一些工作,同时也是一门边缘技术科学,同多种相邻学科都有着比较密切的关系。基于模式识别技术,天津大学李午申等进行了焊接金相组织的自动识别和测量方面的研究并取得了相应的成果^[33-35]。模式识别技术在焊接智能化中的应用主要是在分析和处理那些直接或间接反映焊接质量的信号上。在智能化焊接中,需要将能够反映焊接质量的信号参量用于控制焊接参数以改善焊接过程中的缺陷。在无损检测关于射线检测结果的评定上,由于人工评定工作量大,效率低,此外受评定人员技术、经验及外界条件影响,评定结果也因人而异,通过计算机辅助,将底片图像转换成数字图像,经过去噪、平滑等处理措施,在设计的缺陷自动识别系统中,判别出缺陷的类型。该系统通过选择和提取缺陷模式的若干参数,建立相关缺陷的模式,然后用检测出的图像与缺陷模式进行匹配,从而自动识别出缺陷的种类^[36]。模式识别的另一个主要应用是在焊接熔池图像处理过程中,此外,在焊缝跟踪的检测中,也应用到了模式识别技术^[37, 38]。

1.3.2 图像处理技术

图像处理技术是一门针对性很强的技术,在实际应用中,应根据不同应用和不同要求采用不同的处理方法^[39]。经典的图像处理算法包括空域处理和频域处理两大类。另外一种就是形态图像处理方法,它已经成为数字图像处理和计算机视觉领域中的另一种有效方法。数学形态学方法比其他空域或频域图像处理和具有有一些明显的优势,主要是对图像边缘信息的提取和平滑噪声和边缘方面有优点^[40]。

图像处理的主要工作是对焊缝图像进行图像预处理、图像识别和图像理解。图像预处理包括图像变换、图像增强和图像恢复,目的是减小由于摄像中各种条件的限制而产生的不足和随机干扰噪声,使输出图像有较高的信噪比;图像识别技术根据从图像抽取的统计特性或结构信息,把图像分成预定的类别,借助快速傅立叶变换、小波变换、概率统计等数学工具进行图像分割和边缘提取,目的是突出并得到图像的边缘信息,增强图像中物体的轮廓特征,进而对图像进行分析、特征提取^[41, 42]。

在熔池图像中,由于干扰信号的作用,采集的图像要先进行噪声消除。消除噪声的方法有高斯滤波,中值滤波,平滑滤波等,还可以应用卡尔曼滤波器 KF (KalmanFilter)进行滤波^[43]等。其中中值滤波本质上为一种非线性滤波方法,它比局部平滑滤波产生的模糊少,对于干扰脉冲和点状噪声有良好的抑制作用,较适合点状噪声多的图像滤波^[44],图像预处理后进行图像识别,第一步就是要进行边缘提取,焊缝熔池图像的边缘点就是其灰度变化最大的边缘,主要存在于目标与目标、目标与背景、区域与区域(包括不同色彩)之间,边缘提取方法多种多样,可以应用形态

学的方法,先进行图像腐蚀,膨胀再进行边缘提取^[45],另外还有小波变换,快速傅立叶变换等边缘提取方法。目前基于小波变换的边缘检测,一般都是通过二进小波变换对图像进行分解并用 Mallat 的局部模极大值边缘检测理论来实现的^[46]。

1.3.3 熔池图像信息检测及特征提取方法

已有文献^[50]表明正面熔池的许多几何参数(如熔宽、熔池的半长、熔池面积、熔池后拖脚能够反映焊缝的熔透和成形情况,所以通过熔池图像的处理和几何参数的提取对焊接过程质量控制具有非常重要的意义^[47, 50]。不论是焊接接头熔透控制还是焊缝跟踪^[51-53],都需要对焊接熔池几何参数进行实时测定。进行焊接接头熔透控制时,如果采用神经网络建模方法,还需要对焊缝背面的主要几何参数——背面熔宽进行测量。熔池图像特征量的定义与提取对于焊接熔深的预测起着决定性的作用。

在熔池图像检测方面,山东兖矿集团东华建设有限公司刘志永等人利用普通CCD摄像机,拍摄出了分辨率较高的连续电流TIG对接焊熔池图像并得到了熔池实际的几何参数尺寸。

上海交通大学的陈善本等人对脉冲GTAW过程设计了熔池正反面同时同幅视觉传感系统,并获得了堆焊熔池正反面图像,对熔池图像二维特征尺寸的实时提取进行了较为系统的研究,为控制正反面熔宽提供了传感信息,而且还对脉冲GTAW对接填丝无间隙熔池图像的三维特征提取进行了研究,获得了填充焊丝焊接过程中熔池表面凸出和下榻,部分熔透和全熔透状态下的图像,采用灰度分布的反射图方程计算恢复熔池的三维尺寸信息取得了初步的成功,为基于单目图像传感控制焊缝的余高提供了预测传感信息^[54, 56]。哈尔滨工业大学地张广军对脉冲GTAW对接填丝变隙熔池图像特征提取进行了研究,获得了多方位同时同幅熔池图像,基于对熔池前端图像处理实时提取间隙变化,为解决工程应用中变间隙焊接焊缝成形控制提供了传感信息^[57],其熔池图像及表面形状如图1.1所示。

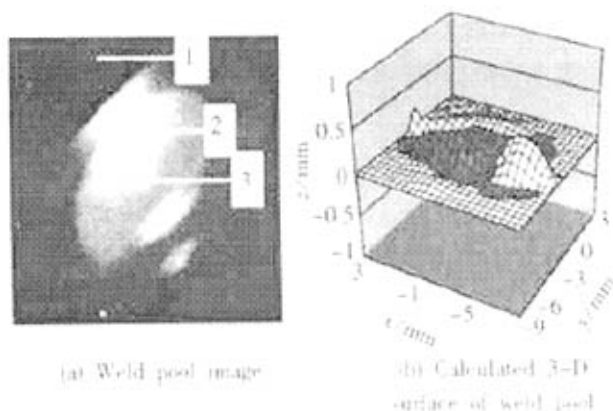


图 1.1 填丝脉冲 TIG 焊其熔池图像及表面形状

另外,值得一提的是,上海交通大学的葛景国等提出了一套获取焊接熔池正面几

何参数和焊缝背面熔宽的快速方法,它为建立全熔透情况下的焊缝熔透的人工神经网络预测模型奠定了基础^[58]。

1.4 焊接缺陷控制

1.4.1 焊接智能控制的发展

按照系统论的观点,将控制理论引入焊接过程,改变其焊接过程的开放特性,使系统能够适应工件自身变化与工作环境条件变化,通过对过程工作参数的调节保证焊接过程的稳定,无疑具有重要的意义。焊接过程是一个复杂的过程,焊接电弧是一个多输入多输出、强耦合、非线性时变的受控对象,电源—电弧系统具有时变、非线性及干扰因素多等特点,因而很难建立起精确的数学模型,使用经典控制理论和现代控制理论难以实现自动控制。而智能控制作为人工智能和控制系统相结合的产物,能够针对系统环境和任务的复杂性、模糊性和不确定性,有效的实现复杂的信息处理功能^[59]。

长久以来,人们已经将焊接动态过程智能控制技术进行了深入的研究,并取得了重要的成果^[60-63]。比如通过测量红外温度场监测熔透情况,利用超声波反射技术定位裂纹和测量熔深,采用视觉技术监测焊接过程等。控制理论的应用也取得了重要的进展^[64],例如模糊技术、神经网络理论^[65]、专家系统等在焊接过程控制中体现了优良的特性。

模糊控制吸取了人的思维具有模糊性这一特点,通过模糊数学中模糊关系、模糊推理和决策得出相应的控制规则表,由规则推理生成控制决策表,通过查询得到相应的控制动作,在解决焊接过程非线性系统和难以建立准确模型的工程问题中可发挥其独特的实用性能。遗传算法是一种全局优化搜索方法,具有简单通用、普遍性强,适合并行处理和应用范围广的优点^[66]。

神经网络则是利用了人脑的某些结构和机理以及人的知识和经验对系统控制,通过实时识别和分离出变化的模式以及从经验中学习模式的变化,做到在数据不完备的情况下也能对系统进行控制。此外,神经网络还结合专家系统用于焊接过程,与模糊推理结合用于过程控制^[67]。

专家系统是一种具有大量专门知识与经验的智能计算机系统,它把专门领域中人类专家的知识 and 思考解决问题的方法、经验和诀窍组织整理并存储在计算机中,不但能模拟领域专家的思维过程,还能让计算机如人类专家那样智能地解决实际问题。目前专家系统在焊接中的应用主要还是集中在工艺设计和工艺方法的选择^[68]、焊接缺陷的诊断^[69-70],即通过计算机来对焊接工艺和方法进行智能化选择以及通过图像对焊缝缺陷进行自动评判。

因此,模糊控制、神经网络和专家系统等智能控制方法在弧焊过程控制中的应用越来越广泛,在弧焊动态过程对熔宽、熔透与熔深等焊接质量参数的实时控制方

面取得很多研究成果,但对于基于熔池视觉的焊接缺陷控制研究极少。

1.4.2 焊接缺陷控制

目前国内外对基于熔池视觉传感的焊接缺陷在线检测识别研究本文作者尚未见相关文章,但对基于电弧信号的焊接缺陷在线控制研究已经有了较多的研究。

例如,国外 Quinn 等人在研究了基于焊接电流、电弧电压及其派生出来的 7 种参数在焊接缺陷存在情况下的表现后,提出了基于参数基值和阈值原理的缺陷识别方法^[71]。

华南理工大学李迪、宋永伦等人提出一种在 CO₂ 气体保护焊过程中对焊缝缺陷的自动监测方法^[72]。该方法基于对电弧传感信号特征的提取,通过采用自组织特征映射(SOM)神经网络对信号分类,在焊接过程中在线识别焊缝缺陷。该方法对机器人焊接生产的产品“零缺陷”质量控制具有重要的应用价值。

山东工业大学武传松通过实时检测 GMAW 焊接过程中的电参数,研制了自组织特征映射神经网络(Kohonen 神经网络)。直接依据不同焊接工艺条件下焊接电压的概率密度分布曲线(PDD)以及短路过渡时间的频数分布曲线(CFD),能够对焊接过程的干扰信号进行自动识别^[73]。

另外曾安等人研究了基于多变量统计过程控制(MSPC)的 GMAW 在线监测^[74]。把多变量统计过程控制的应用结果应用于 GMAW 焊接过程在线质量监测。

上述这些基于电弧信号传感的研究取得了一定的成果,对于基于熔池视觉传感的焊接缺陷识别提供了有益启发,例如利用多个熔池图像特征参数作为输入,某一焊接缺陷类型作为输出,而不是简单的寻找焊接缺陷与熔池图像信息的映射关系。

1.5 本课题研究内容

本课题研究的主要内容是基于熔池视觉的 MAG 焊焊接缺陷特征研究及信息识别技术,该研究内容是焊接技术热点研究方向。其主要内容包括:

- 1) 低碳钢板 MAG 自动焊工艺试验及焊接缺陷产生的影响因素研究;
- 2) MAG 自动焊熔池视觉图像传感系统优化改造与图像传感采集试验研究;
- 3) “异常工艺”条件下的焊接工艺试验与熔池图像传感采集;
- 4) MAG 自动焊熔池图像特征分析研究;
- 5) “异常工艺”条件下熔池图像特征分析研究;
- 6) 焊接缺陷与视觉图像特征的关系研究。

本课题需突破的关键技术:

- 1) 基于特征的 MAG 自动焊熔池视觉计算机图像处理技术;
- 2) MAG 自动焊熔池图像特征定义及提取技术;
- 3) 焊接缺陷(气孔、夹渣)与熔池图像特征的关系建模。

2 MAG 焊熔池视觉质量信息传感

2.1 熔池视觉信息传感系统

2.1.1 焊接及熔池成像系统

本文采用的 MAG 焊及熔池图像采集系统图见图 2.1.1, 其中, 焊接电源是采用时代逆变 (TIME INVERTER) ZP7-500 型焊机 (配合 FD20-10 型送丝机构), 焊接操作台由 NLW-2 型自动等离子焊机控制箱和由三相异步 YS-7124 型电机两部分组成, 其中焊机控制箱是我试验中心自行研究设计的, 异步电机用于进行焊接行程控制。采集系统中采用台湾敏通 OS-45D 近红外 CCD 摄像机, 大恒 CG400 图像采集卡及相关连续采集软件, 滤光减光片组, 普通计算机等。CCD 摄像机用以获取模拟图像, 然后通过图像采集卡与计算机建立通讯, 获取数字图像。实物图如图 2.1.2 所示。

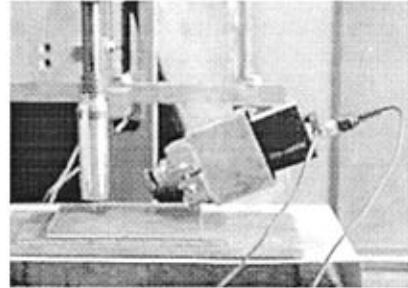
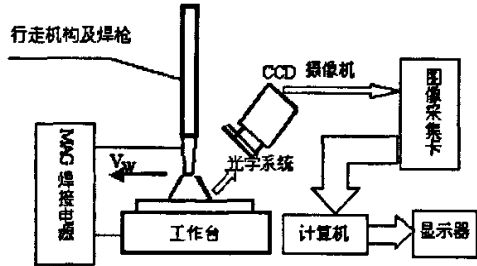


图 2.1.1 焊接及熔池图像采集系统

图 2.1.2 采集系统实物图

2.1.2 影响 MAG 焊熔池图像传感质量因素分析

为了采集到质量较高的熔池图像, 以确保采集的图像准确反映熔池的特征, 其中一个重要的因素是滤光片的选择。目前研究表明, 对于 MAG 焊, 充分利用熔池自身的辐射光, 在近红外区间选择拍摄窗口, 其波长的选择尽量接近 CCD 接收的上限 (1100nm), 可以获得比较理想的熔池图像^[8]。

为此, 本文采用的是 1064nm 的滤光片加 0.1% 的减光片组, 试验证明该滤光系统适应性强, 稳定性高, 采集的图像相对较清晰, 适合 MAG 焊短路、射流和射滴过渡形式。

另外一个影响图像质量的是 CCD 的焦距及其与工件的位置关系。本文摄像机采用的是 25mm 镜头, 而短路过渡和射滴射流过渡的熔池大小相差较远, 因此在调焦距时, 要根据不同情况将摄像机镜头焦距对准熔池和半凝固区, 使其调整到最清晰状态。

还需要注意的其它方面有: 用于挡滤光片的玻璃会时常受到大电流焊接时飞溅的影响, 因此需要经常更换, 保证采集的图像清晰; 滤光片和减光片和 CCD 镜头要平行放置, 不能有角度, 不能有其它漏光现象, 采集装置在焊接过程中要保持平

稳，否则会出现所谓的“重影”现象，如图 2.1.3。

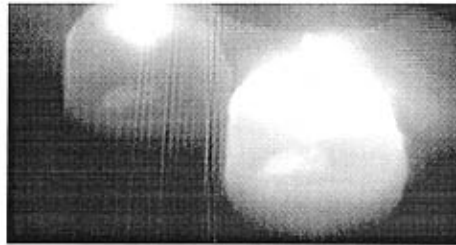


图 2.1.3 “重影”现象

本文利用改善后的采集装置不仅采集到了射滴和射流过渡时清晰的图像，还采集到短路过渡时的清晰图像。

2.2 熔池成像信息特征

2.2.1 熔池图像特点

2.2.1.1 正常工艺下的熔池图像特点

a 正常工艺规范

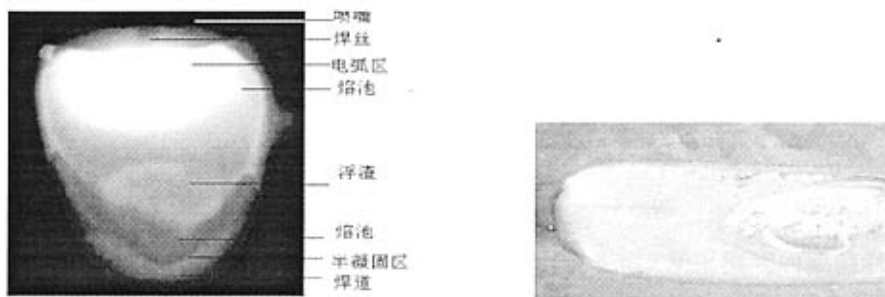
本文经过大量的焊接实验，在当前的焊接设备条件下找到了包括射流、射滴、短路过渡正常工艺规范，并得到了相应质量良好的焊缝，其工艺规范及质量状况如表 2.2.1。

表 2.2.1 MAG 自动焊工艺参数表

序号	母材条件	工艺参数	质量检测
1	8mm 板单边 45°V 型坡口	电流 230A, 电压 28V, 焊接速度 300mm/min	外观: 无焊瘤, 余高 1.2 mm, 表面平整, 无起皱。X-射线探伤: I 级片
2	6mm 板单边 45° V 型坡口	电流 150A, 电压 20V, 焊接速度 250mm/min	外观: 无焊瘤, 余高 1.3mm, 表面平整, 无起皱。 X-射线探伤: I 级片
3	8mm 板堆焊	电流 210A, 电压 28V, 焊接速度 300mm/min	外观: 无焊瘤, 余高 2.0mm, 表面较平整, 无起皱。 X-射线探伤: I 级片
4	8mm 板堆焊	电流 330A, 电压 30V, 焊接速度 300mm/min	外观: 无焊瘤, 余高 2.3mm, 仅在尾部有少量浮渣, 总体外观较好。 X-射线探伤: I 级片

b 熔池图像特点

焊接规范不同，熔池的形状大小也不同。图 2.2.1-2.2.4 分别是表 2.2.1 第一组到第四组焊接规范下对应的熔池图像及焊缝外观。这些熔池图像中包括喷嘴、焊丝、电弧、熔池、浮渣、半凝固区焊道，如图 2.2.1 (a) 所示。



(a) 熔池图像

(b) 外观图

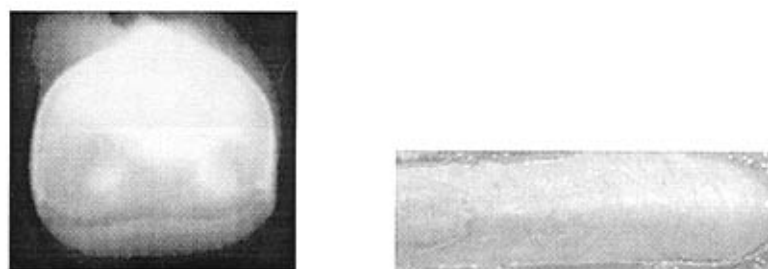
图 2.2.1 第一组熔池图像及焊缝外观



(a) 熔池图像

(b) 焊缝外观

图 2.2.2 第二组熔池图像及焊缝外观



(a) 熔池图像

(b) 焊缝外观图

图 2.2.3 第三组熔池图像及焊缝外观



(a) 熔池图像

(b) 焊缝外观图

图 2.2.4 第四组熔池图像及焊缝外观

上述图像的共同特征就是熔池边缘较平滑,没有明显的凹凸,浮渣轮廓也较圆润,而且一般只有一到两个。另外熔池图像左右对称性较好,熔池和浮渣轮廓都比较清晰。

2.2.1.2 短路过渡不同取像时刻的熔池图像对比

短路过程中,在一个过渡周期内焊接电流电压出现急剧变化,电弧弧光辐射强度也随着出现强弱的变化,熔池的形态和清晰程度也出现变化,从采集到的图像看,熔池图像也呈周期性的变化,讨论这种差别并分析其产生的原因对于如何清晰图像的选取和分析是很有必要的。图 2.2.5 是短路过渡一个过渡周期内的电流电压波形,在 t_a , t_b , t_c , t_d , t_e , t_f 时刻的熔池图像分别对应图 2.2.6a-f。

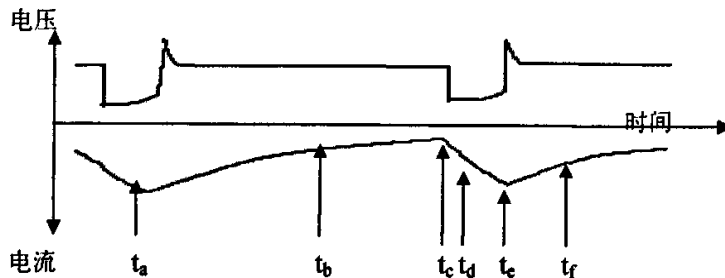


图 2.2.5 短路过渡电流电压波形

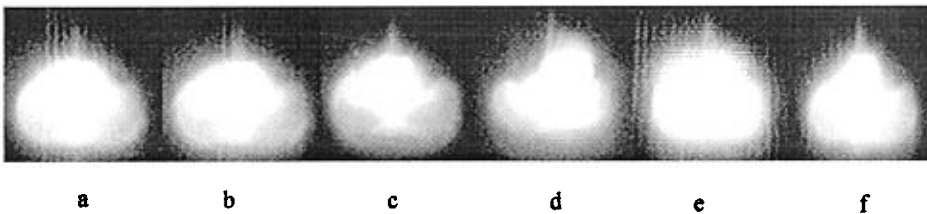


图 2.2.6 短路过渡不同时刻熔池图像对比

由以上不同时刻的波形和采样图像可以看出:

- (1) 在电流较大(图 2.2.6a 和 e)时,电弧光较强,所受的电磁干扰较大,从图像中可看出电弧烁亮区也较大,此时,图像模糊不利于对焊接熔池进行传感。
- (2) 当熔滴与熔池发生短路(t_c)瞬间,此时电弧熄灭,电压急剧下降,电流达到最小,此时电弧较小,熔池图像较清晰。
- (3) 在 t_d - t_f 时刻,由于电磁收缩力及表面张力的作用,连接焊丝与熔池金属液柱开始出现缩颈。当短路电流增加到一定数值时缩颈达到了临界尺寸,最后在各种力的作用下液态金属小桥被拉断,此时熔池图像中电弧顶部与焊丝也出现脱节的情况(图 2.2.6d);在拉断瞬间,电流到达最大,熔池图像的电弧区也变大,弧光变得更加强烈(图 2.2.6e),之后电弧重新引燃(图 2.2.6f),完

成了一次熔滴的过渡。

2.2.2 基于灰度的熔池图像特征

2.2.2.1 熔池图像二维灰度特征

由于采集软件设置的图像格式均为 Limited8Bit, 所以图像中各点的灰度值均处于 0-255 之间, 这从灰度直方图可以看出。

灰度直方图反映了熔池图像中所有像素的灰度值的分布状况, 图 2.2.7 是图 2.2.1 (a) 的灰度直方图, 从图 2.2.1 (a) 可以看出, 熔池图像大致有几个灰度差较大的区域, 包括背景区、熔池区、浮渣区和电弧区, 从图中的 4 个峰可以初步判断: 灰度值最大的波峰是电弧区; 分布在 50-100 的两个波峰分别是熔池和浮渣区; 灰度值在 50 以下的波峰是背景区, 但是各个区域的灰度分界线不够明显, 没有明显的波谷, 这正是图像处理的重点。

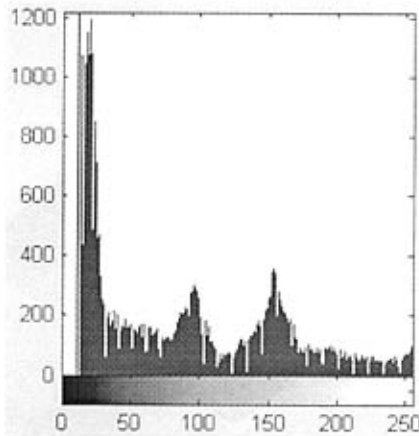


图 2.2.7 灰度直方图

2.2.2.2 熔池灰度三维图像

为了更直观地观察熔池的灰度分布特点, 本文将实验拍摄的熔池灰度图像转为灰度三维图像, 即用 x 和 y 轴坐标表示像素位置, 而 z 轴表示每一个像素的灰度, 那么原图像的灰度值就是 z 轴坐标值, 其范围在 0-255, 例如, 图 2.2.8 是一幅平板堆焊熔池灰度图像, 将其转为灰度三维图像后得到图 2.2.9。由图可见, 原熔池图像灰度值高的地方成了转换后灰度三维图像中的波峰, 而原来的背景区因灰度低而成了波谷。这样一来, 原始图像的熔池、背景、喷嘴等区域的分界处变得大大明显。尤其是灰度值大的电弧干扰在三维图中成了突兀的一个个波峰。另外, 图 2.2.9 中从电弧区到半凝固区高度缓慢下降, 代表灰度值缓慢下降。因此, 熔池灰度三维图是直观描述熔池特点的另一方式。

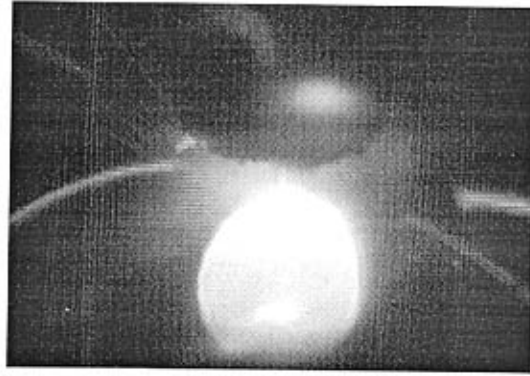


图 2.2.8 原始熔池图像

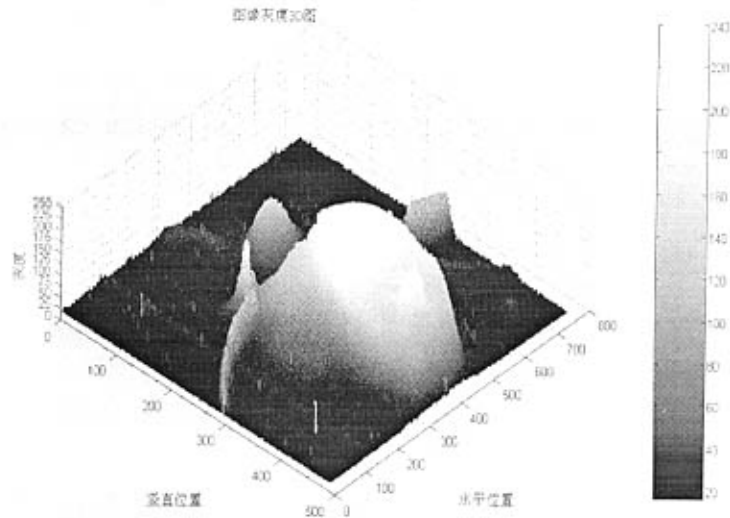


图 2.2.9 熔池图像灰度三维图

2.2.2.3 熔池图像灰度均值和灰度标准差

1) 熔池图像灰度均值与灰度方差概述与定义

熔池图像灰度均值是指熔池图像研究区域所有像素灰度的平均值，也就是图像的平均灰度。它表示的是各个区域总体灰度特征，在一定程度上反映的是熔池图像中所研究区域的平均热辐射量大小。例如，当外界光照、摄像机光圈大小等条件保持不变时，熔池热辐射量越大，其灰度均值也越大。灰度标准差是指熔池图像研究区域的各个像素灰度统计值的方差的平方根，即标准差，它表示的是研究区域中各个灰度的差距大小，对于熔池图像来说，它主要反映的是各局部区域热辐射的大小差。

本文采用两种方法计算熔池图像灰度均值和灰度标准差。方法 1：适用于计算

选定图像区域为矩形的情况，而方法 2 适用于各种对象，不仅适合矩形区域，也适合不规则形状区域，因此可以计算熔池图像各种区域（如电弧，浮渣，焊丝，熔池，背景区）的熔池图像灰度均值和灰度标准差。计算方法如下：

方法 1：假设通过图像截取获得的熔池区域图像为矩形区域（如图 2.2.1 (a)），设其灰度图像矩阵为 $I[W][H]$ ，其中 W 表示图像宽度， H 表示图像高度，那么灰度图像的平均灰度 $\bar{\mu}$ 和灰度标准差 $\bar{\sigma}$ 由下列公式得到：

$$\bar{\mu} = \frac{1}{WH} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} D[i][j] \quad \text{式 2.1}$$

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{WH} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} (D[i][j] - \bar{\mu})^2$$

方法 2：假设通过阈值分割后得到熔池图像中某个区域 A（如图 2.2.1 (a) 熔池区），假设区域 A 面积为 S ，则灰度图像的平均灰度 $\bar{\mu}$ 和灰度标准差 $\bar{\sigma}$ 由下列公式得到：

$$\bar{\mu} = \frac{1}{S} \sum_{(x,y \in A)} g(x,y) \quad \text{式 2.2}$$

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{S} \sum_{(x,y \in A)} [g(x,y) - \bar{\mu}]^2$$

由公式可以看出熔池图像灰度均值，而熔池图像灰度标准差表示熔池图像区域灰度的变化情况。

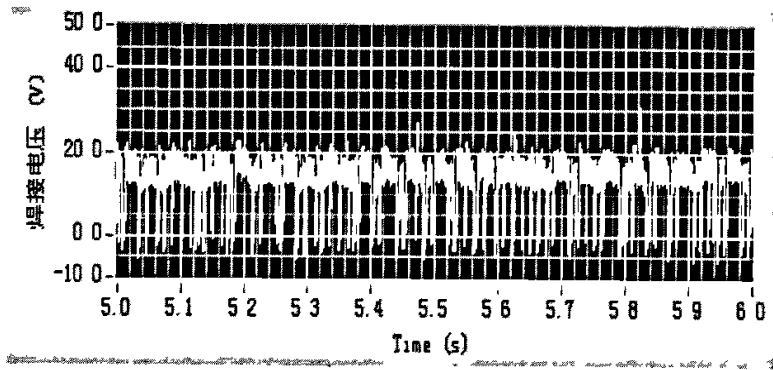
一般说来，在一幅熔池图像中，各个区域的灰度均值差别较大，如图 2.2.1 (a) 中电弧烁亮区灰度均值最大，达到饱和状态，达到 248，其次是浮渣，焊丝，熔池区和背景区，分别为 161，103，129，18。

由于熔池图像中除了电弧烁亮区（饱和）以外，各像素灰度值与该处的热辐射量有很大的关系，也就是跟该处的热量和温度有很大的关系，而影响熔池中各点温度的主要因素之一就是焊接过程热输入，所以熔池图像中各像素灰度值与焊接过程热输入存在间接的关系。在焊接工艺中，电流是影响热输入的主要因素，本文将对应熔池图像灰度均值和灰度标准差与焊接电流电压的对应关系作一些分析。

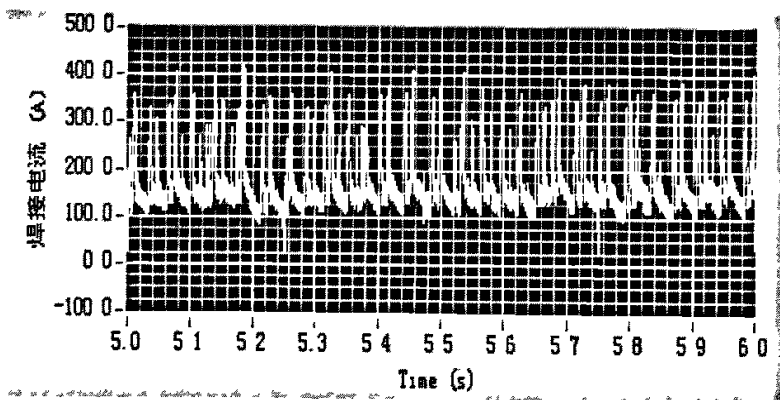
2) 正常工艺规范下短路过渡的熔池灰度均值和灰度标准差特点

图 2.2.10 (a) (b) 是正常规范下短路过渡的电流电压波形（焊接参数采集仪采样频率为 50KHz，采样点间隔 0.02ms），该图是焊接过程稳定后截取的其中一段电流电压波形（事实上，其它时间段电流电压波形也是如此），可以看出，电流和电压都相对稳定。图 2.2.10 (c) 是对应熔池整幅熔池图像灰度均值及标准差折线图，

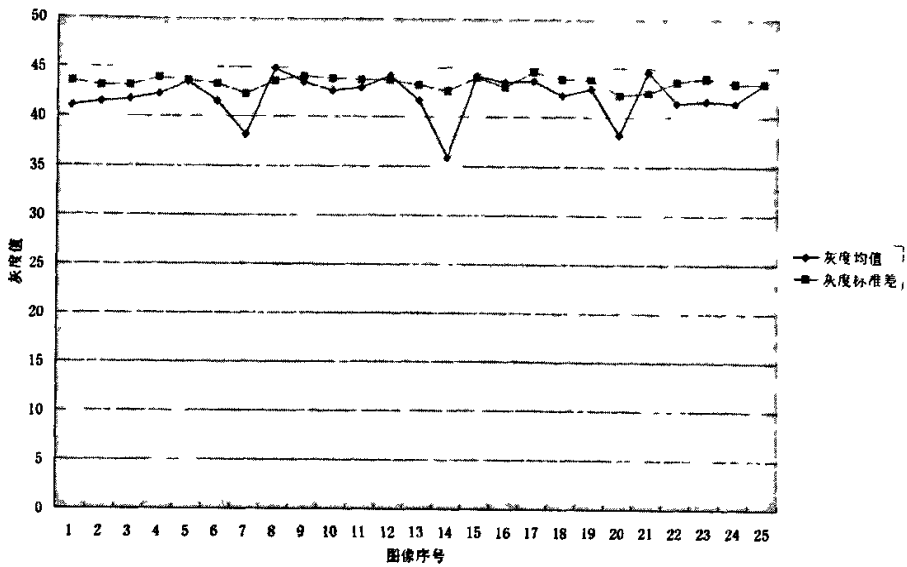
摄像机每隔 40ms 采一帧熔池图像, 即一秒采 25 帧图像。由图可看出, 这两条折线随着电流电压的变化也在呈有规律的变化, 在 5.2-5.3s 时出现了一个焊接电流的低谷, 此时的灰度均值和标准差突然也跟着下降。这应该是短路过渡造成的, 因为在短路过渡瞬间, 电流下降, 电弧熄灭, 所以灰度均值出现急剧下降, 方差也在下降。但是就整个焊接过程来说, 灰度均值和标准差波动幅度不大, 灰度均值除短路瞬间波动最大(为 9 个灰度值)外, 其它都在 5 个灰度级范围内波动。而标准差都在小范围波动(0-2.5 个灰度值), 这正与焊接过程电流电压的相对稳定性一致。这就说明熔池图像灰度均值和标准差与电流有一定的关系, 而且它们的波动大小能反映了焊接过程的稳定性。



(a)正常规范下的电压波形



(b)正常规范下的电流波形

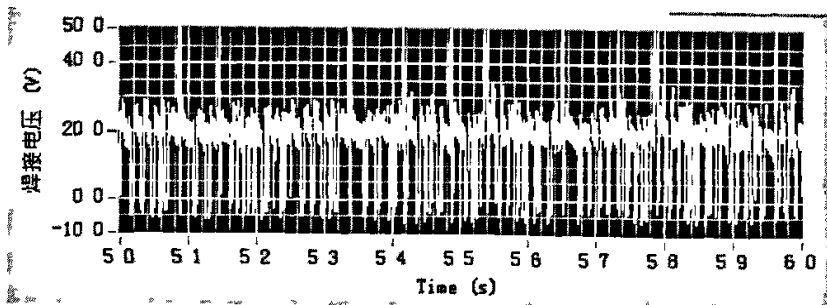


(c) 正常规范下的熔池图像灰度均值与标准差

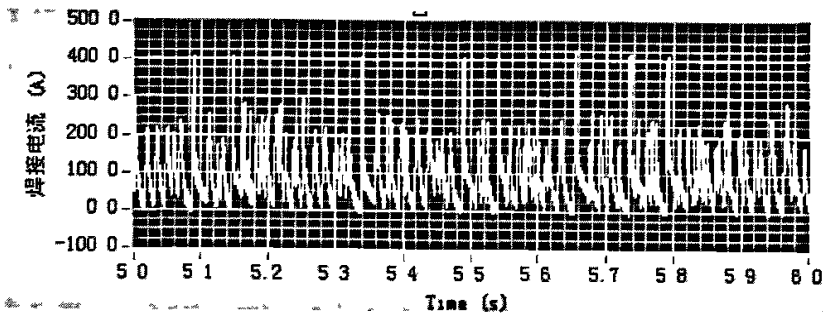
图 2.2.10 正常规范下灰度均值及标准差与电流电压的关系

3) 无保护气体时的熔池图像灰度均值和灰度标准差特点

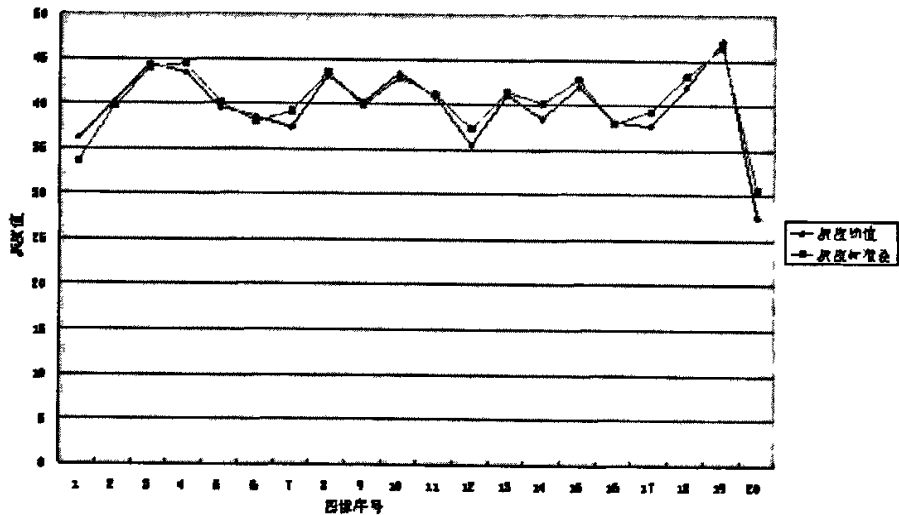
当焊接过程中停用保护气体时，采用参数采集仪测出开始到结束的电流电压，如图 2.2.11 (a) (b)，取其中一段时间的电流电压波形，对应的熔池图像灰度均值和灰度标准差折线图见图 2.2.11 (c) (为了观察整个过程的变化，这里采用 50ms 采一帧，每隔 10 帧的平均数作为一个采样点)，如图可见，这个过程电流和电压波动很大，灰度均值和灰度方差波动也很大（前者最大差达 20 个灰度值，后者最大差达 17 个灰度值），这可能是因为出现气孔过程中，焊接过程及其不稳定，电流电压不时在波动，带来了输入热的变化，造成熔池金属热辐射的变化，加上各种电磁干扰带来的噪声影响，使熔池图像的灰度值发生波动。但是，尽管如此，由图中也可看出，熔池图像的灰度均值和标准差基本在一条直线上下波动，这也与焊接过程的动态平衡相一致。



(a) 出现大量表面气孔电压波形



(b)出现大量表面气孔的电流波形



(c)出现大量表面气孔的熔池图像灰度均值与标准差

图 2.2.11 出现大量表面气孔时灰度均值及标准差与电流电压的关系

2.2.3 基于伪彩色增强的熔池图像特征

为了更清楚地识别熔池特征信息，本文在 MATLAB 平台上对熔池图像采用伪彩色增强的方法。伪彩色增强是一种将二维图像像素逐点映射到由三基色（红，黄，蓝）确定的三维色度空间的技术，利用人眼对色彩的敏感性，提高人对图像的分辨能力。下图就是将一幅熔池图像的灰度范围划分为若干个等级区间，每一区间映射为某一种颜色。其中，灰度值最高处映射为深红色，最低映射为蓝色。由图可以看出，电弧区，熔池区，半凝固区和焊道图像界限异常分明，其中，深红色是电弧区，次深红的是浮渣，如图，深蓝色是背景区。熔池图像的半凝固区的灰度分布在一定程度上反映了焊接温度场的大致分布（图 2.2.12），这是由于在取像时，对于同种金属温度的差异会导致其灰度的差异，通常温度高，灰度值高，反之灰度值愈低。

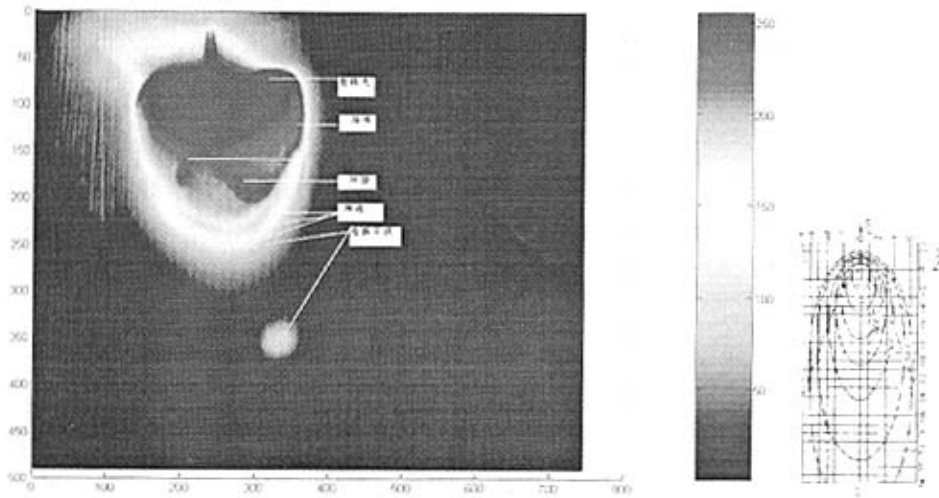


图 2.2.12 熔池伪彩色图像及温度场对照图

2.2.4 熔池外形几何特征

为了更好地对焊接质量（包括缺陷和熔透等）进行检测和识别，必须对所检测的熔池信息进行量化，这就需要提取熔池正面几何参数。

本文根据采集到的熔池图像特点，将熔池图像参照文献^[34]方法熔池图像几何外形进行定义，如图2.2.13所示。

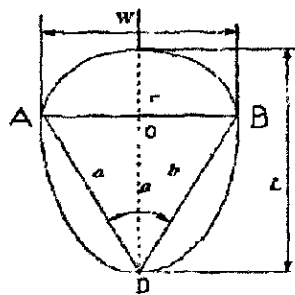


图 2.2.13 熔池几何外形参数

熔池的最大宽度定义为熔池图像水平方向的最大宽度所含的像素数目，将其值记为W，最大长度定义为熔池图像竖直方向的最大长度所含的像素数目，其值记为L，a为熔池后拖角，其中，可通过 $\tan a/2 = AO/OD$ 在MATLAB中计算出a的值。

通过计算，图2.2.1中射滴过渡正常规范下的熔池图像几何参数值分别为 $W_1=5.1$ ， $L_1=6.73$ ， $a_1=52.2^\circ$ ，图2.2.2中短路过渡正常规范下的熔池参数值分别为： $W_2=2.09$ ，

$L_2=3.1$, $\alpha_2=69.4^\circ$, 可见, 短路过渡最大长度和宽度都比射滴过渡小, 但是后拖角比较大。当焊接工艺异常(不当)时, 熔池外形会出现特征变异。

以上提取的几何尺寸都是图像平面坐标系中获得的, 如果要得到实际的最大熔宽、熔池长度、后拖角等就需要进行摄像机象平面坐标系和世界坐标系的转换。本章研究的重点在于图像处理, 所以省去了繁琐的坐标系转换。

需要强调的是, 为了提取焊接熔池的几何参数, 首先须对熔池图像进行预处理, 并经边缘轮廓勾勒, 提取出来后再计算熔池的几何形状, 这就需要一套专用的图像处理算法。本文将在后续的章节中陆续介绍出现焊接缺陷时的熔池图像处理及外形特征提取。

3 熔池图像特征与焊接缺陷关系试验研究

要对基于焊接缺陷的熔池视觉特征进行识别,其中最关键的一点就是要找出熔池图像特征与焊接缺陷的关系,这也是本文的难点。

3.1 实验总体方案

本文实验目的就是采用“异常工艺”规范进行人为造缺陷实验,并对焊缝进行X射线和宏、微观组织检测,与熔池图像进行对比,找出具体的焊接缺陷与熔池图像的一一对应关系。

3.1.1 实验方案的设计

本文研究的主要对象是MAG焊焊接过程中产生的主要缺陷,如气孔,未熔合,焊穿,焊偏等。主要任务是提取这些缺陷在熔池图像上的特征,从而找出焊接缺陷与熔池图像特征的关系。

本文试验路线如下:首先,找出各种过渡方式的最佳工艺规范,并获取其质量良好的焊缝及其熔池图像。其次,采用不恰当的工艺规范进行同步实验,找出焊缝缺陷与熔池图像的一一对应关系。最后,找出不同缺陷的熔池图像视觉特征。

3.1.2 采集试验说明

本文选用的保护气为80Ar%+20CO₂%;母材选用Q235低碳钢,主要采用6mm、8mm和10mm三种厚度;焊丝选用直径1.2mm的H08Mn2SiA,主要采用平板表面堆焊和V型坡口对接接头焊两种方式。

由于采用6mm和8mm对接板不宜采用大电流射流过渡形式,因此正常工艺下的焊接主要采用上述两种过渡形式。而对于射流过渡的规范,主要在堆焊和10mm板对接坡口中进行。

关于具体的焊接规范,根据不同的情况差异较大,这里仅对正常规范下的喷射过渡规范作大致的说明,即短路过渡电流电压分别采用150A,电压20V;射滴过渡采用210A-230A(其中堆焊采用210A,对接采用230A,28V,而射流过渡电流电压为330A,电压30V,三种过渡下的焊速都是分别250mm/min、300mm/min、300mm/min在实际实验中,如无说明,都是根据熔滴过渡形式采用相应的规范。

3.1.3 熔池图像纵向确定

为了研究熔池图像与焊接缺陷的对应关系,首先要找出发生缺陷的焊缝位置所对应的熔池图像。这就需要通过定标找到图像与焊缝位置的一一对应关系。

在焊接过程中记录焊接速度,并记下每次焊接开始的焊丝位置,将开始起弧的图像作为第一幅图像(起弧图像可辨),由于图像是每隔一定的时间采集一幅,那么采集到第n幅图像所用的时间可知,通过焊接速度可计算此时焊丝的实际位置。因此,焊缝中任意一点的位置所对应的熔池图像便可知。

3.2 气孔与熔池图像特征信息的对应关系研究

气孔是常见的焊接缺陷,尤其在熔化极气体保护焊中,气孔是焊缝的主要缺陷之一,它会削弱焊缝金属机械强度,降低气密性、水密性等。因此,气孔的控制与防止显得相当重要。为了研究气孔对应的熔池图像特征,本文从气孔的成因着手,研究气孔与熔池图像特征的关系,为后续的检测和模式识别作准备。

针对产生气孔的影响因素,本文进行了较为系统的实验,包括保护气不足,保护气混有空气,通风,加锈加油,焊丝生锈,干伸长过长等情况,产生了相应的气孔缺陷,并采集到各种不同情况下的熔池图像,其中产生的气孔有表面气孔也有内部气孔,气孔有多也有少。通过大量的实验,发现在不同条件时气孔分布的数量和特征不同,但是在熔池图像上却呈现出几类大致相同的表现特征,尤其是表面气孔,在熔池图像不同部位呈现出相应的特征。

3.2.1 气孔种类及成因分析

气孔是一种不连续性缺陷,这些气孔可能分散在焊缝的一小段或沿整个焊缝长度分布,尤其留在焊缝里的蜂窝会削弱焊缝强度,而且气孔可能分布在焊缝内部,或分布在焊道表面,或二者都有。图3.2.1是气孔的示意图。

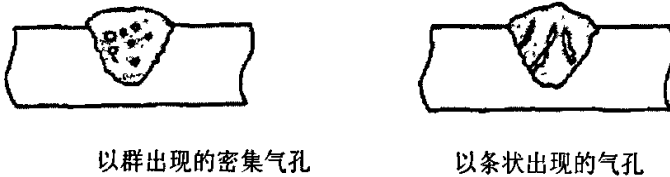


图 3.2.1 气孔示意图

3.2.1.2 气孔产生机理及成因分析

形成气孔的根本原因是焊接过程中存在的各种气体。当焊接热源使熔滴与熔池液体金属过热时,气体过饱和地溶解于熔池金属内,随着焊接热循环急速冷却,溶解度下降而析出,随同焊接冶金反应中产生的气体,在金属结晶过程中出现的非金属夹杂物的胚核诱发下产生气泡,这种气泡来不及从熔融金属中逸出即导致气孔。

气体形成气孔的过程大致有三个阶段:

首先是熔池吸收气体。当施行MAG焊时,来自周围空气、母材、焊丝等各种其他气体混入电弧气氛内,在电磁力、表面张力引起的对流搅拌下而使其混入熔池,并为熔池所吸收,通过很多有气孔的熔池图像可以发现,熔池区浮渣常常被打散得很混乱,图像灰度很不均匀,这可能是由于气孔随熔池的对流搅拌而引起的。

其次是液体金属中气泡的发生、排出和气孔的形成。当熔融金属温度下降时,由极端过饱和状态作为驱动力产生气泡,形成的气泡凭借本身的浮力或随同熔融金属的对流,部分向熔池外逸出。此阶段产生的气泡,在对流过程中通过扩散或相互

碰撞而易于在熔池金属凝固前所“捕捉”，此时，熔池图像中的气孔特征可能较易捕捉到。

最后一个阶段就是凝固前因气体浓化产生的气泡。在熔池金属凝固过程中，凝固前因气体成分浓化达到较易产生气泡的形态，固体结晶往往占先于气泡的扩散成长，因此生成的气孔尺寸不易长大。而且气泡一旦产生，凝固前气体浓化现象消失，然后再行凝固时又再次浓化，再次形成气泡，如此反复进行。

气孔的成因有很多，对于熔化极气体保护焊而言，焊接区内的气体主要来自所采用的保护气体及杂质（如氧、氮、水气等）；热源周围的空气也是一种难以避免的气源；焊丝表面和母材坡口附近的铁皮、铁锈、油污、油漆和吸附水等，在焊接时也可能析出气体；一般情况下，焊丝和母材中因为冶炼而残留的气体是很少的，对气相的成分影响不大。

总结熔化极气体保护焊气孔产生的各种因素主要有：

- (1) 焊接电流过大；
- (2) 焊接电压过高；
- (3) 电极伸长过长；
- (4) 保护气体流量不足，或者飞溅物堆积在喷嘴上时，引起保护气体堵塞；
- (5) 通风气流使保护气体保护效果变差；
- (6) 污染或潮湿的保护气体；
- (7) 过快的焊接速度，使得焊接熔池在气体能够逸出之前便冷凝；
- (8) 母材、焊丝或填充金属棒表面存在铁锈、润滑脂、油、湿气或污垢。

3.2.1.3 不同条件下MAG焊低碳钢的气孔试验

上一节的表面气孔成因主要是针对一般的熔化极气体保护焊，对于MAG焊低碳钢焊接而言，不同的焊接条件对气孔的产生及严重程度不同。

本文通过实验发现侧向风，保护气体成分及流量不足比较容易产生气孔。在保护气体不足时再增大电流，电压，干伸长或增加铁锈时，气孔会更严重。这里简要说明实验过程中保护气体流量等因素对气孔产生的影响。

采用正常工艺参数，即焊接电流为210A，电压28V，焊接速度为300mm/min进行焊接时，不同的保护气体对气孔数目、形态及熔池图像造成的影响不同。正常工艺下，把保护气体流量调到15L/min时，焊接质量良好，焊缝表面成形及熔池图像比较清晰，见图2.2.3(a)。而在相同的工艺规范下把保护气体流量分别调到12.5L/min、10L/min、7.5L/min、5L/min、2.5L/min、0进行试验时，随着气流量的减少，焊缝成形越来越差，且出现的气孔数目也随着增多。因此，保护气流量的大小对气孔的产生程度有很大影响。

另外，当保护气体不足时，焊接电流，电压的增大，也会导致气孔严重的程度

变大。例如对于保护气体流量采用 5L/min 的 8mm 板堆焊，采用电流 290A，电压 29V 时出现了气孔，而采用电流为 230A，电压为 28V 时未出现气孔，如图 3.2.2 和 3.2.3 是扫描后的焊缝 X 射线底片图。



图 3.2.2 出现内部气孔



图 3.2.3 出现内部气孔

同样，对于同样选用保护气体为 2L/min 的 8mm 堆焊，采用射流过渡比采用射滴过渡产生的气孔更严重。这就验证了电流电压增大可能会造成气孔的增多。

3.2.2 表面气孔及熔池图像特征

经过大量的实验，发现出现表面气孔焊缝对应的熔池视觉特征主要有：

- 1) 熔池边缘出现锯齿状图像特征；
- 2) 熔池图像尾部出现黑斑点；
- 3) 浮渣数目增多。

3.2.2.1 熔池边缘形态与表面气孔的关系

当保护气体混有空气、在通风环境下作业、保护气体气流量不足时易产生表面气孔，以保护气流量不足为例。采用电压 30V，电流 330A，焊接速度 300mm/min 的射流过渡规范，其中保护气体只有 2L/min，所得的焊缝外观如图 3.2.4。

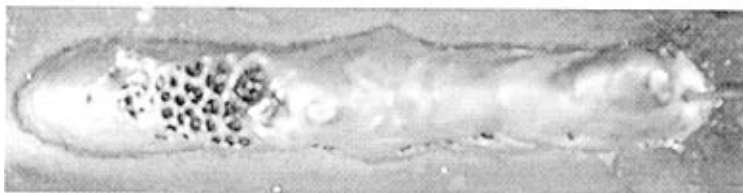


图 3.2.4 保护气 2L/min 时焊缝外观

由图可见，在焊接一段时间后，焊缝表面出现大量密集分布的气孔群，形状如蜂窝（图 3.2.5）。其中 3.2.5 中开始阶段未出现表面气孔时（如 1 处）对应熔池图像 3.2.6 (1)，图 3.2.5 的 2、3 处对应的熔池图像分别见图 3.2.6 (2)，(3)。

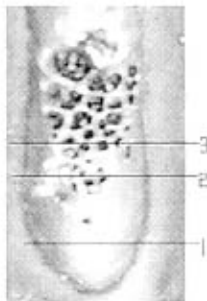


图 3.2.5 出现表面气孔群的焊缝外观

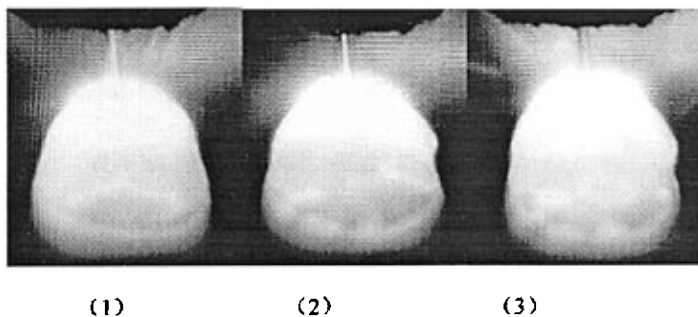


图 3.2.6 密集分布表面气孔熔池图像

可以明显看出，图 3.2.6 (1) 熔池边缘线平滑过渡，而 3.2.6 (2) 相应的边缘位置开始出现个别近似锯齿形状，3.2.6 (3) 整个边缘连续出现近似锯齿状。因此，可以说，造成熔池区边缘的这种形状和特点是由表面密集气孔群产生的。

由于半凝固区与液态熔池区在熔池图像中对电弧光表现出各自不同的反射机理（液态熔池属于镜面反射，而半凝固区接近于漫反射），因而在熔池图像上它们之间有较明显的分界线，随着空气的冷却液态金属逐渐凝固，半凝固区也随着形成，但与此同时，空气成分混入焊接区形成的部分气泡在上浮到熔池表面的瞬间，占据了原来的液态金属和半凝固金属的位置，打破了它们之间的平滑过渡的分界线，此时，在熔池图像边缘就出现了不规则的“锯齿”形态。

为了更清楚地看到熔池图像特征，将图 3.2.6 (3) 进行伪彩色增强后，如图 3.2.7 可以看到气孔特征较为明显。



图 3.2.7 密集分布表面气孔熔池图像

除上述例子外,本文还在其它实验条件进行焊接实验,如保护气体中混有空气,母材潮湿、生锈等,也获得了很多出现表面气孔的焊缝及其熔池图像,在这些条件下得到的结果如表 3.2.1。

表 3.2.1 表面气孔与熔池边缘特征实验统计表

采样序号	过渡方式	接头形式	风	保护气流量 (L/min)	单边坡口角度 (°)	其它条件	特征出现与否	有无表面气孔
1	射滴	堆焊	---	0	----	----	是	有
2	射滴	堆焊	---	2	----	----	是	有
3	射滴	堆焊	---	5	----	有铁锈	是	有
4	射滴	堆焊	---	7	----	有铁锈	是	有
5	射滴	堆焊	---	10	----	----	否	无
6	射滴	堆焊	---	12	----	----	否	无
7	射滴	堆焊	---	15	----	人罩铁锈	是	无
8	短路	堆焊	---	0	----	----	是	有
9	射流	堆焊	---	2	----	----	是	有
10	射滴	V形坡口	---	2	30	----	是	有
11	射流	堆焊	小	15	----	----	是	有
12	射流	堆焊	大	15	----	----	是	有
13	射滴	V形坡口	大	15	30	----	是	有
14	射滴	V形坡口	---	0	45	----	是	有
15	射滴	V形坡口	---	0-15	60	----	是	有
16	短路	V形坡口	---	0	30	焊丝生锈	是	有
17	射滴	V形坡口	---	15	45	母材潮湿	是	有
18	射滴	堆焊	---	无保护气	----	焊丝生锈	是	有

19	射滴	堆焊	---	15	-----	焊丝生锈	是	有
20	射流	堆焊	---	混有空气	-----	-----	是	有
21	射滴	堆焊	---	15	-----	油	否	无
22	射滴	堆焊	---	15	-----	油加锈	否	无
23	射滴	堆焊	---	15	-----	干伸长加长	否	无
24	射滴	堆焊	---	15	-----	焊速快	否	无
25	射滴	堆焊	---	15	-----	喷嘴堵塞	否	无

由表 3.2.1 的统计表可看出：

(1) 按照出现气孔的因素进行实验并不是都会出现气孔，也可能没有气孔。这与焊接具体的条件，如油、锈、干伸长伸长对产生气孔影响并不明显，这在 3.1.2.3 已经说明。

(2) 上图出现表面气孔共有 17 组，出现特征的共有 18 组，说明出现该特征的熔池图像对应的焊缝不一定都有表面气孔。第 7 组实验出现特征却无表面气孔的是在母材有大量铁锈时出现的，这可能是由不规则的表面熔渣造成的，但是此时出现不平滑的位置只是在熔池边缘的两侧。

因此，根据本实验结果可以看出，当熔池边缘出现类似“锯齿状”图像特征时焊缝可能出现两种情况：

- (1) 出现了表面气孔，也就是焊缝产生气孔缺陷
- (2) 表面浮渣大幅度增加，这预示着内部产生夹渣或气孔的可能性大幅增加

为了定性地对这种特征加以描述和识别，需要将上述特征提取出来，也就是将熔池边缘提取出来，这就需要对熔池图像进行一系列有效的处理，具体的处理方法将在下章详细论述。

3.2.2.2 熔池图像半凝固区特征与表面气孔

试验发现，表面气孔对熔池图像的影响并不只是表现熔池边缘的变化上，还会对半凝固区图像产生一定的影响。下面讨论表面气孔与熔池半凝固区图像特征的关系。

以其中一组实验为例。如图 3.2.8 是采用表 2.2.1 第三组工艺参数时保护气体从无到有的情况，在焊接开始阶段，焊缝中出现了很多表面小气孔，后来由于有足够的保护气体，表面气孔消失，如图 3.2.8 (a) 的 B 处。图 3.2.8 (b) 对应图 3.2.8 (a) 的 A 处，此处焊缝表面出现个别小的气孔。从图 3.2.8 (b) 看出，在熔池图像的半凝固区，此时出现了若干个较密集的小黑斑，而同样在后一段增加足够的保护气后半凝固区并没有相同特征出现。由于反射机理不同，熔池图像中的分界线下属于

半凝固区，此时气孔已经开始成形，理论上可以通过图像观察半凝固区，因此，黑斑可能就是气孔造成的，这是通过实验所证明的。事实上，在上一节的讨论中，在“锯齿”状边界的附近也出现了大的黑斑，这刚好与其表面出现的大气孔相对应。

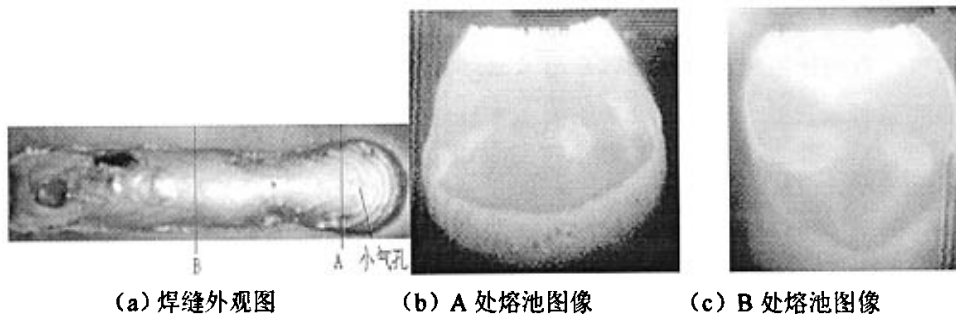


图 3.2.8 出现表面气孔的焊缝及对应熔池图像

本文同时在其它实验条件下进行焊接实验，统计黑斑特征及表面气孔出现的情况如表 3.2.2。

表 3.2.2 表面气孔与熔池半凝固区特征实验统计表

采样序号	过渡方式	接头形式	风	保护气体 (L/min)	坡口角 (°)	特征出现与否	有无表面气孔
1	射滴	堆焊	/	0	/	是	有
2	射滴	堆焊	/	2	/	是	有
3	射流	堆焊	大	15	/	是	有
4	射滴	V形坡口	大	15	60	是	有
5	射滴	V形坡口	/	0	90	是	有
6	射滴	V形坡口	/	0-15	120	是	内部气孔
7	射滴	堆焊	/	15	/	是	无,但此时干伸长加长
8	短路	堆焊	/	0	/	是	有大量表面气孔
9	射流	堆焊	/	2	/	是	有表面气孔群
10	射滴	V形坡口	/	5	60	是	内部气孔
11	射流	堆焊	/	2	/	是	有
12	射滴	V形坡口	/	2	60	是	有
13	射流	堆焊	小	15	/	是	密集小气孔
14	射流	堆焊	/	7	/	是	有
15	射滴	V形坡口	/	2	90	是	有

通过上述取样,发现12组试样有表面气孔,2组是内部气孔,1组没气孔,没出现气孔的那组实验干伸长加长了6mm,整个过程的其中几幅图像偶尔会出现一到两个小黑斑点,分析其原因可能是:在焊接过程中出现了气孔,因此能看到黑斑点的特征,但之后逸出了,因此,焊后检验没有表面气孔。

因此,根据本实验的结果,若熔池图像半凝固区附近出现黑斑点,可能出现两种可能:一是产生表面气孔,一是产生内部气孔,因此,通过此特征判断出现气孔的概率非常高。

3.2.3 内部气孔(夹渣)与熔池图像信息特征的关系

本文经过大量的实验,发现出现内部气孔(夹渣)焊缝对应的熔池视觉特征主要有:

- 1) 熔池图像尾部出现黑斑点;
- 2) 浮渣数目增多;
- 3) 灰度均值波动变大,标准差也在增大。

3.2.3.1 熔池图像中浮渣特征与内部气孔的关系

选用一块8mm板进行堆焊,刚开始参照射滴过渡良好的工艺规范进行焊接,熔池图像见图3.2.9(a)。在焊接过程中突然关闭保护气体,结果发现关闭保护气体后熔池区域出现很多小白点,如图3.2.9(b),而且熔池图像灰度方差变大(出现气孔前在45-47波动,出现气孔后在50.32-54.02间波动),通过连续多帧图像发现,白色的小白点是从中间的最大浮渣脱离出来的,而且呈不规则的流动状态。

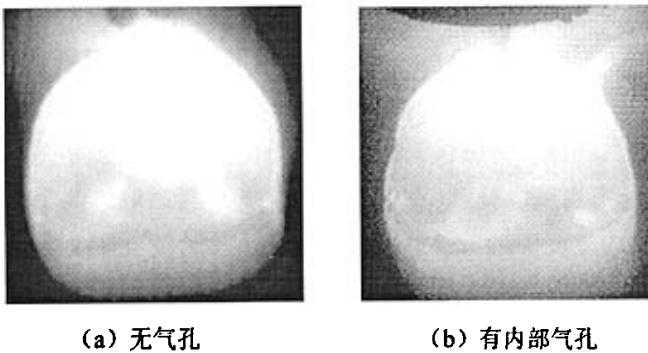
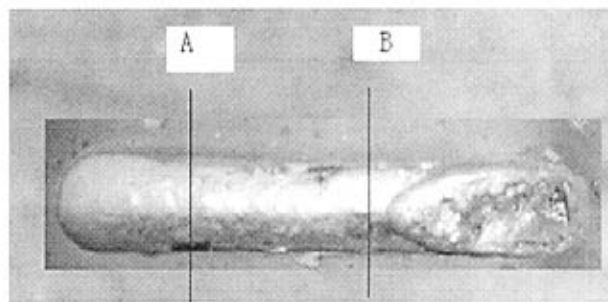
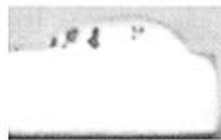


图 3.2.9 表面气孔从无到有的熔池浮渣变化图像



(a) 焊缝外观图



(b) 沿线 B 截面外观图

图 3.2.10 保护气体从有到无的焊缝外观及截面图

上述的这种现象可以从射滴过渡时熔渣的产生和流动过程来分析。实际上,在焊接过程中,熔池区域焊丝成分中的 Si, Mn 等合金元素将被从化合物中还原出来,同时液态金属也将溶解较多的气体(如 N_2 、 H_2 、 O_2 等),当熔池后部的温度逐渐下降, Si、Mn 等合金元素有一部分将被重新氧化,形成金属氧化物,浮游于熔池金属表层,这就是本文说的浮渣。根据文献^[75],在焊接熔池中存在有两个环流,一个在熔池的中部,另一个在熔池的尾部。在电弧中心线附近,液态金属向下流向熔池根部,熔池中部环流的形成主要与电磁力、熔滴冲击力的作用相关,而在电弧中心线 z 轴附近,电磁力、熔滴冲击力的作用方向垂直向下,对熔池根部产生很强的挖掘作用,同时推动高温的液态金属流向熔池底部,将作用于熔池表面的电弧热带入熔池根部。而熔池尾部的环流主要是由于熔池表面张力梯度引起的,由于表面张力温度系数通常为负值,所以越靠近电弧中心线的区域,液体金属温度越高,表面张力越低;而在熔池的边界附近,熔池液态金属的温度较低,则表面张力较高。因此熔池表面的液态金属就由靠近电弧中心线的区域向熔池边界流动,因此,在刚开始焊接稳定时,看到的是两片浮渣在流动。当保护气体关闭后,开始出现内部气孔,对于液态熔池来说,它会受到气孔上浮时力的作用,使得浮渣被打散,但是总体来说,此时在熔池中部的环流占主导地位,因此出现中间有一块较大的浮渣,而其两侧出现小的被打散的浮渣。

为了进一步检测浮渣的数目与形状与内部气孔的关系,本文采集了 20 组在熔池区域出现多个小白点的实验,结果发现有 15 组中出现内部气孔(夹渣),5 组出现表面气孔,图 3.2.11 列举了其中几组出现内部气孔(夹渣)的焊缝横向切割图,从实验结果发现出现该特征的焊缝 100%是出现了气孔(夹渣)。这表明通过熔池图

像中的多个小白点判断有气孔（夹渣）的概率是很高的。

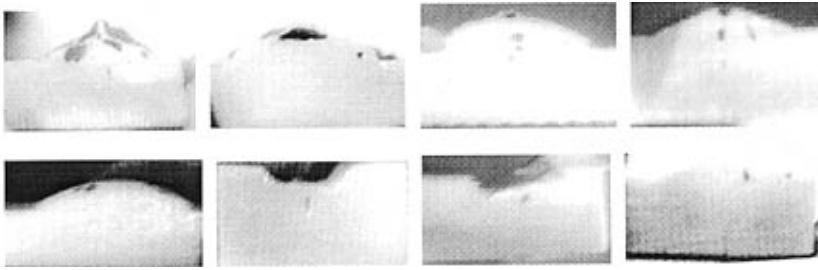


图 3.2.11 焊缝横向切割图

3.2.3.2 熔池图像灰度均值和标准差与内部气孔的关系

为了更好地找出熔池图像灰度均值和标准差与内部气孔的关系，本文研究内部气孔从无到有和整段焊缝出现内部气孔的情况，图 3.2.13 (a) 和 (b) 是其底片扫描图。

选用保护气体从有到无的情况，如图 3.2.12 是保护气体从有到无的焊接过程稳定后第 60-350 帧熔池图像的灰度均值和标准差(每隔 10 帧平均值作为一个采样点)，这里采用式 2.1 计算整幅图像的灰度均值及标准差。通过焊后检验发现，在开始阶段焊缝质量良好，在保护气体调整到 5L/min 后，开始出现内部气孔，随着焊接过程的进行及保护气的关闭，在焊缝的后段出现大量表面气孔。由图可发现，灰度均值在第 60-140 帧时熔池图像灰度均值曲线较平稳，尤其灰度方差基本呈一条水平直线，这可能是因为有保护气体时，熔滴过渡和焊接过程比较稳定，熔池比较“平静”，熔池和半凝固区对电弧光的反射比较稳定，表面成形较好，没有出现灰度的巨大波动，焊接质量较好。当保护气体减少到 5L/min 时，灰度均值在波动着上升，而方差在增大，此时焊缝开始出现内部气孔（第 140-260 帧，即图中横坐标从 8 到 20）焊接过程开始变得更不稳定，因此图像之间的平均灰度和灰度方差波动更大，此时的熔池就像沸腾的水一样，气体不时在上浮，熔池表面熔池在气体上浮时变得凹凸不平，熔池尤其是其半凝固区的不同部位对电弧光的反射出现变化，表现出熔池灰度的不均匀，此时灰度标准差就可能增大。由图也可以看出，灰度标准差在出现气孔后随着焊接过程的进行，也出现缓慢上升的趋势（直到最后熄弧时灰度才开始出现陡降），这也是可能出现气孔的特征之一。

保护气体从有到无的灰度均值及灰度标准差

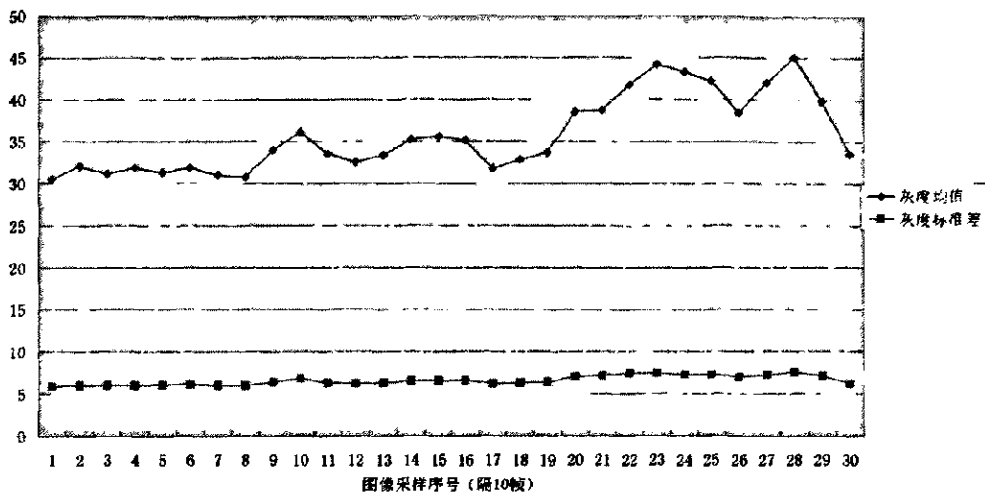
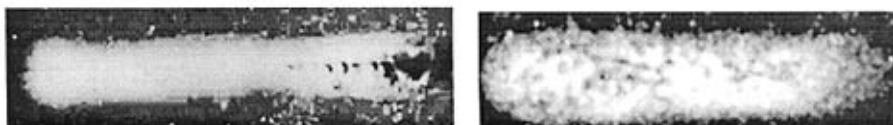


图 3.2.12 保护气体从有到无的灰度均值及灰度标准差



(a) 气孔从有到无

(b) 整段出现内部气孔

图 3.2.13 焊缝底片扫描图

此外，选用风力较大的焊接环境中进行焊接，整段焊缝出现气孔，焊后经射线检验发现整段都是密集分布的内部气孔。其整个过程的灰度均值及标准差变化过程如图 3.2.14。

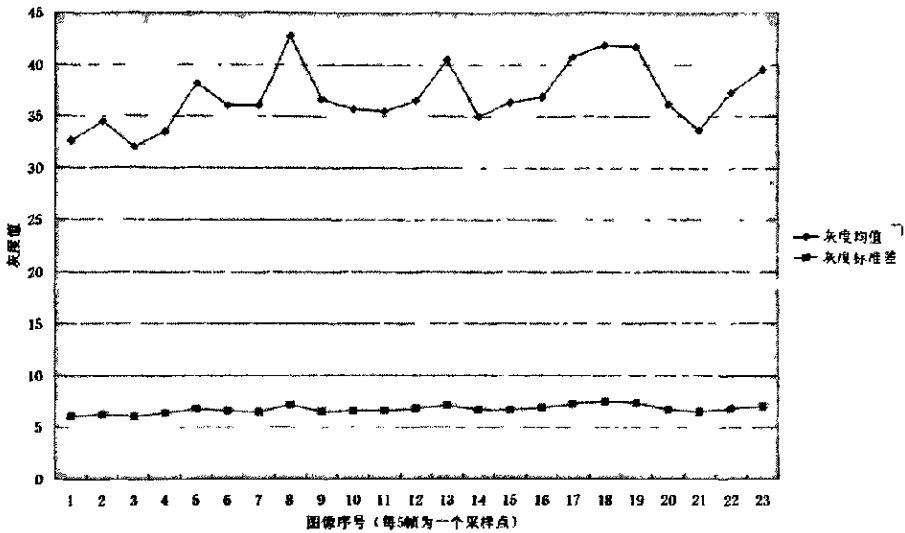


图 3.2.14 出现大量内部气孔焊缝对应的灰度均值及灰度标准差

通过图 3.2.14 可看出，出现内部气孔后灰度均值波动很大，而灰度标准差也是随着均值的增大而略有波动。这是因为出现气孔后焊接过程变得不稳定。

再进行其它四组出现内部气孔焊接实验，通过计算出熔池灰度均值和方差同样出现灰度均值起伏不定（例如图 3.2.15），而灰度均值也在略微波动的情况。由此可看出，当出现内部气孔时，熔池图像灰度均值波动较大而标准差也跟随着波动增大。

因此，熔池图像的灰度均值和标准差与内部气孔有一定的关系，出现内部气孔时灰度均值波动很大，但灰度标准差却变化不明显。

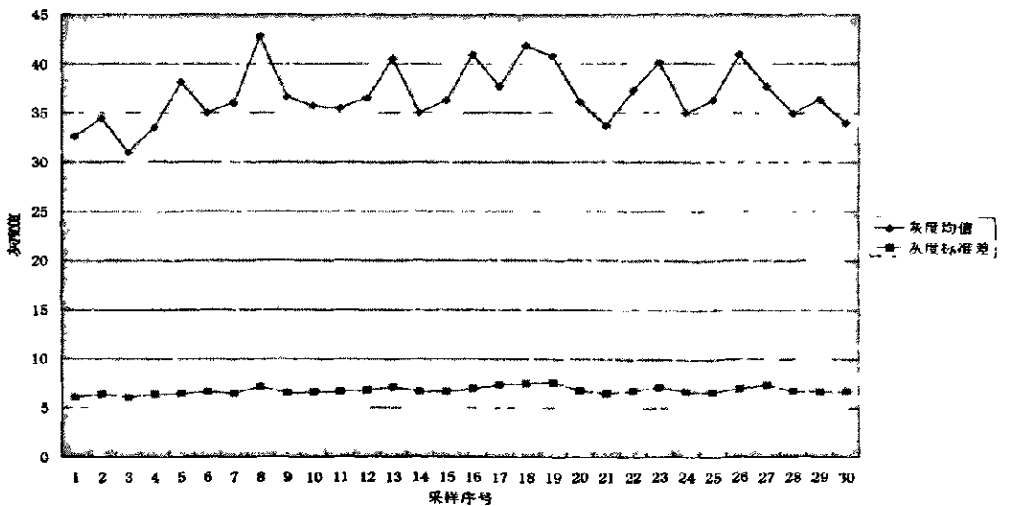


图 3.2.15 其它出现大量同样特征的灰度均值和标准差

3.3 焊穿及熔池图像特征

3.3.1 焊穿与熔池图像对应关系

当焊接电流，电压过大时，容易造成焊穿缺陷。本文通过一系列焊穿试验，发现焊穿时的熔池图像有较明显的特征，下面是其中四组比较典型的焊穿实例。这些图像是焊穿出现前后的连续图像。尽管这四个例子它们的图像形态各异，但却呈现出一些共同特征。其中每一组熔池图像的第一幅都是焊穿前的图像。第二幅是开始出现焊穿的图像。由图像可以看出，当开始焊穿时，熔池液体开始出现下塌，焊丝变长，熔池图像区域灰度都普遍下降，可能是电弧光区域，反射的熔池区域变少，随着焊丝继续往下送，开始出现熄弧（第三幅图像），原来电弧光所在区域变黑。这是因为熄弧造成的。由下面几组例子可以得出焊穿时有个共同的特征就是焊丝变长，电弧光区域变黑，可以将此作为识别焊穿的特征。



图 3.3.1 焊穿的焊缝外观图



图 3.3.1 第一组焊穿过程熔池图像



图 3.3.2 第二组焊穿过程熔池图像

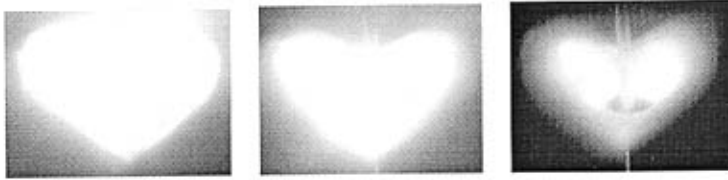


图 3.3.3 第三组焊穿过程熔池图像

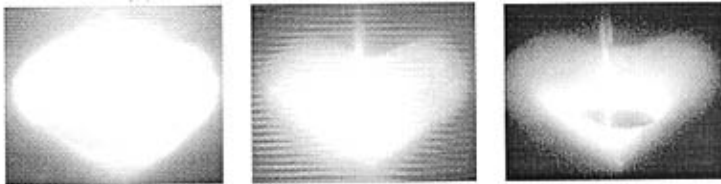


图 3.3.4 第四组焊穿过程熔池图像

可见当焊穿时，熔池图像都有一个共同特征，就是焊丝下方的电弧区域灰度急剧下降至接近背景。针对这种特征，若能先找到背景的灰度范围，对所有图像去除背景，由于目标区域的灰度值在 20 以下（此时瞬间已经熄弧），在直方图上若还能找到还能发现灰度值低于 20 的一个波峰，则可以判断是否烧穿。但出现该特征时电弧已经熄灭，烧穿现象已经到很严重的程度。因此，本文将继续通过求灰度均值和标准差的方法找出焊穿过程中的熔池灰度变化情况。

3.3.2 熔池图像灰度均值及灰度标准差与焊穿的关系

从图像上看，当出现焊穿时还有一个重要的特征就是熔池平均灰度在下降。利用 MATLAB 计算在焊穿前到焊穿后的灰度均值和灰度标准差，图 3.3.5 和 3.3.6 是示例 3.3.1 和 3.1.2 的情况。

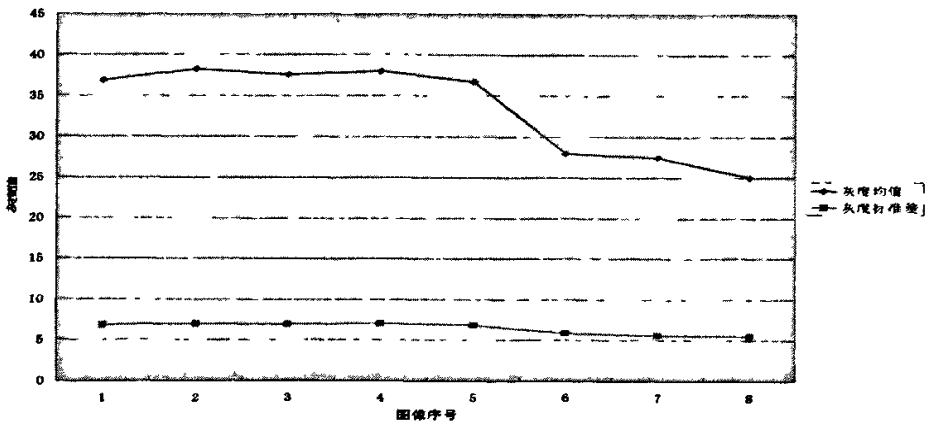


图 3.3.5 焊穿前后熔池图像灰度均值和标准差 (1)

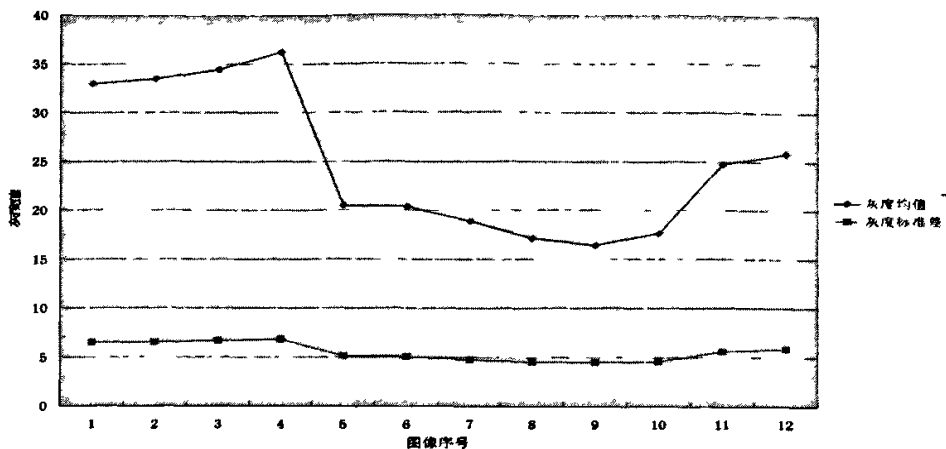


图 3.3.6 焊穿前后熔池图像灰度均值和标准差 (2)

由图可看出，当出现焊穿时灰度均值先出现了陡降，而后继续下降，而图 3.3.6 在出现下降后开始上升是因为在焊穿熄弧后，焊丝又开始重新引燃，于是灰度均值又上升。而灰度标准差在焊穿前基本保持不变，出现焊穿后立即下降，在焊穿时变化不大，随后开始引燃时又缓慢上升，另外两例的灰度均值和标准差的变化情况与此相类似。

由此可以看出，在刚出现焊穿时，熔池图像灰度均值和灰度标准差出现陡降的现象。这种特征与电弧熄弧过程相类似，可作为判别出现焊穿的依据之一。

3.4 焊偏及熔池图像特征

当喷嘴与工件坡口不对中时，可能会出现焊偏，焊偏现象的发生很有可能导致一边未焊透或未熔合，尤其是偏离坡口中心严重的时候。本文就低碳钢对接进行了射滴和短路过渡焊偏实验，其中包括左偏和右偏（即焊丝偏向坡口中心的左边和右边），逐渐焊偏等情况。

图 3.4.1 是射滴过渡出现左偏的熔池图像及焊缝外观，3.4.2 是出现右偏的熔池图像及焊缝外观，而正常情况熔池图像及焊缝外观如图 2.2.1。

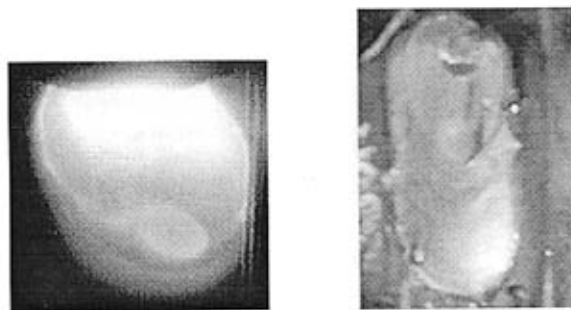


图 3.4.1 射滴过渡左偏的熔池图像及外观

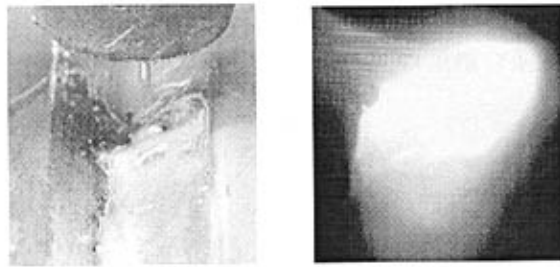


图 3.4.2 射滴过渡右偏的熔池图像及焊缝外观

另外，短路过渡正常条件下的熔池图像如 2.2.2，图 3.4.3 是短路过渡出现焊偏（左偏）的熔池图像及外观。

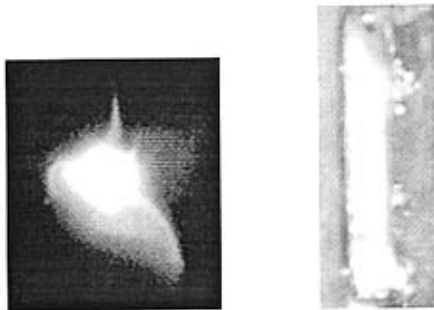


图 3.4.3 短路过渡焊偏的熔池图像及焊缝外观

由以上的图像中可看出，无论是左偏，还是右偏，射滴或者短路，焊偏的共同点都是电弧的偏移以及熔池区左右分布不均，本文将在第五章通过求熔池整个边界的重心及偏心角等方法找它们与焊偏的关系。

3.5 未熔合

未熔合是焊缝金属和母材之间或焊道金属与焊道金属之间未完全熔化结合部分。焊接金属和母材之间的未熔合通常是由于接头未焊透产生的，尽管所有的焊接工艺都可能发生这一现象，但它通常是熔滴过渡短路焊接过程的主要问题，本文研究未熔合也以短路过渡为主。

3.5.1 未熔合产生的原因分析

当焊接金属不完全与母材或相邻的焊缝熔合时，就会产生未熔合缺陷。这种缺陷可能发生在焊接（或熔敷）金属和母材之间或多道焊缝之间。图 3.5.1 是典型对接接头未熔合的示意图。它相当于一道裂纹，当构件受到外力作用的时候可能扩展成更大的裂缝，甚至导致构件的断裂，使构件破坏。

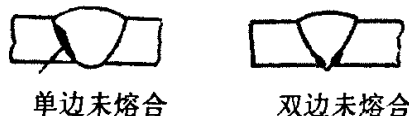


图 3.5.1 未熔合示意图

未熔合的影响因素甚多,其中最为严重的是单位基体金属的焊接输入热。由于短路过渡采用的工艺规范相对较小,热输入较小,所以未熔合通常是短路过渡尤其是GMAW焊接过程的主要问题。

产生未熔合的主要原因包括:

- (1) 过快的焊接速度;
- (2) 焊接电流过小;
- (3) 坡口角度和间隙过小;
- (4) 焊接接头表面有油污、漆、铁锈等

3.5.2 未熔合与熔池图像的关系

本文根据上述未熔合产生的因素,进行了相应的实验,获得了大量未熔合焊缝的熔池图像,主要在10mm的对接焊中进行,下列以其中一例说明熔池图像与未熔合之间的关系。

当采用焊接电流180A,焊接25V,焊接速度350mm/min的60°坡口对接焊时,经切割发现左半部分未熔合,如图3.5.2(a),其熔池图像如图3.5.2(b),由图可见,熔池图像的左边界变得不光滑,并且出现断续的亮线,而右边没有出现。出现未熔合的原因可能是因为液态金属碰到坡口的污垢处,没与母材金属完全润湿,导致不光滑,并出现断续的亮线。未与坡口完全接合的缘故,另外熔宽变窄,这是由于焊缝金属未和母材金属熔合在一起,液态金属只流动到坡口边界。另外左边界的领域灰度差异较大,而熔合良好时差异较小。

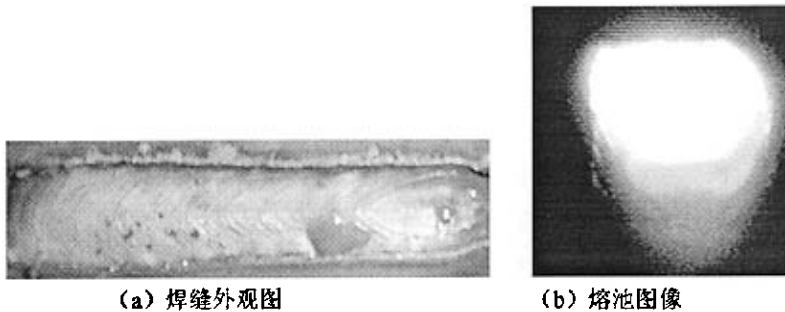


图 3.5.2 未熔合熔池图像及外观

4 典型焊接缺陷对应的熔池图像处理技术

由于在成像过程中诸多因素的变化(如噪声等),会对熔池的灰度造成很大影响,因此,为了更方便地获取焊接缺陷的熔池图像特征,必须有针对性地对所获得的熔池图像进行有效的处理,通过较可靠的图像处理算法对熔池特征信息进行分析,提取,进而为后续的熔池图像特征识别作准备。本文的图像处理主要是在基于MATLAB7.0.1平台中进行的。

4.1 熔池图像处理基本流程

介于不同的焊接缺陷所要提取的熔池图像特征目标有所差异,因此,在进行图像处理过程中,实际的算法可能差别较大,但是,图像处理流程大体上是相同的。本文根据采集系统所拍摄的熔池图像的特点,对于不同的缺陷特征提取设计了一套图像处理算法,在每一个处理关键步骤针对缺陷特点通过比较选择了较好的处理算法,从而确定出最适合的方案。图像处理的基本流程如图4.1。

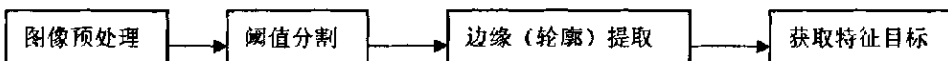


图4.1 焊接缺陷图像处理基本流程

图像处理的第一步是图像预处理。由于图像采集卡拍摄所得到的熔池图像受到电磁干扰,网压波动、周围环境等其它因素的影响,会引起所谓的“噪声”。图像的噪声对后期识别中形态、灰度特征的提取有重大影响,直接关系到识别结果的准确度,因此合理的消除噪声的方法在图像进行后续的特征提取和比较中显得非常必要。

一般消除噪声的方法有两类:一类是不考虑噪声的原因,只将图像中感兴趣的特征有选择的突出,而衰减其次要的信息;另一类是针对图像出现噪声的原因,设法补偿相关因素,从而使改善后的图像尽可能的逼近原始图像。如对图像进行均值滤波,图像平滑等属于第一类方法,这类方法可以滤掉一定的噪声,但是需要有合适的算法,否则图像反而会模糊化。第二类方法有逆滤波器、最小二乘约束复原等方法,这类方法有些情况下可获得较好的效果,但是算法比较复杂。

鉴于熔池质量信息和图像处理算法本身的特点,选择第一类方法来尽量抑制图像中的噪声。为了能够在消除噪声的同时又能大量的保护图像中的边缘信息,这里采用 3×3 邻域的中值滤波方法。

滤波后需要进行图像增强,增强的目的就是突出目标,针对不同的目标,其增强的算法也会有所区别,目前较常用的图像增强方法有线性和非线性增强,根据不同的目标提取本文采用不同的增强算法,具体算法将在本章下一节中阐述。

图像增强后要对熔池图像阈值处理,最后不同的目标灰度特征进行边缘(轮廓)

提取。

4.2 具体缺陷特征提取及算法改进

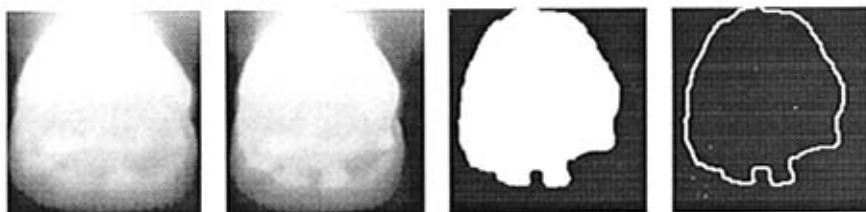
根据第三章描述的焊接缺陷对应的熔池图像特征，需要进行三种图像特征目标的提取，一是熔池边缘的提取，二是半凝固区黑斑的提取，三是熔池区浮渣的提取。由于提取的对象不同，所用到的图像处理算法也有不同。

4.2.1 熔池边缘的提取

首先将图 3.2.6 (3) 的图像进行去噪，采用 3×3 邻域的中值滤波后得到图 4.2.1 (1)，

图像增强一般有线性增强和非线性增强。为了突出分界线的灰度，这里采用分段线性法进行图像增强，对于线性增强来说，不同的增强公式对目标提取效果影响不同，如图 4.2.2 是采用不合适的线性增强公式得到的“伪分界线”，而 4.2.1 (2) 得到了实际的分界线，增强的公式如式 4.1，可见，处理后分界线附近的图像对比度大大增强。

$$f(x) = \begin{cases} 0.6x, & x < 165; \\ 20x, & 165 \leq x \leq 170; \\ 0.56x, & 170 \leq x \leq 255. \end{cases} \quad \text{式 4.1}$$



(1) 中值滤波 (2) 分段线性增强 (3) 最大方差取阈法 (4) 边缘提取

图 4.2.1 熔池-半凝固区分界线提取

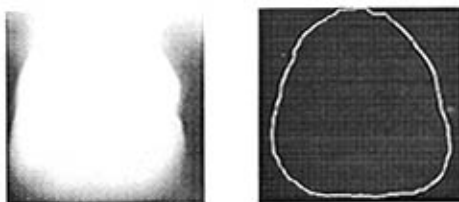


图 4.2.2 伪分界线

图 4.2.3 图 3.2.1 (a) 熔池边缘提取

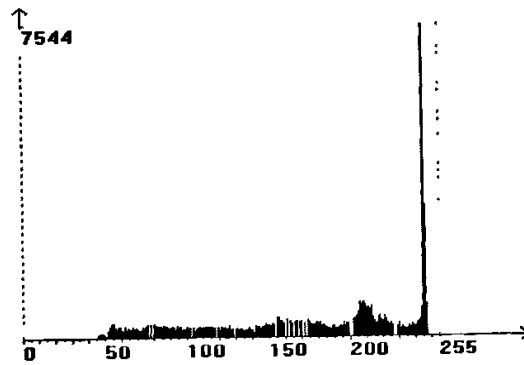


图 4.2.4 图像增强后的灰度直方图

图像增强后进行阈值分割,从图 4.2.4 的灰度直方图可以看出,除了电弧区(灰度值在 245 左右)外,直方图中还存在着两个较高的波峰,分别代表熔池区和背景区,它们之间没有明显的低谷。为了更准确地找出阈值,通过比较发现,采用最大方差自动取阈法将图 4.2.1(b)的两个主要区域提取出来的效果较好,如图 4.2.1(c),这里简单介绍一下最大方差取阈法。

图 4.2.1 (2) 中主要有两类大的区域,即熔池及熔池外的区域,假设 t 为分离这两区域的阈值。原理如下:

由直方图统计可得被 t 分离后的区域 1、区域 2 占整图像的面积比以及整幅图像、区域 1、区域 2 的灰度均值分别为

$$\left. \begin{aligned} \text{区域 1 面积比} \quad q_1 &= \sum_{i=0}^t \frac{n_i}{n} \\ \text{区域 2 面积比} \quad q_2 &= \sum_{i=t+1}^{G-1} \frac{n_i}{n} \end{aligned} \right\} \text{式 4.2}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{整图像的平均灰度} \quad \mu &= \sum_{i=0}^{G-1} (f_i \times \frac{n_i}{n}) \\ \text{区域 1 的平均灰度} \quad \mu_1 &= \frac{1}{q_1} \sum_{i=0}^t (f_i \times \frac{n_i}{n}) \\ \text{区域 2 的平均灰度} \quad \mu_2 &= \frac{1}{q_2} \sum_{i=t+1}^{G-1} (f_i \times \frac{n_i}{n}) \end{aligned} \right\} \text{式 4.3}$$

式中, n 表示整幅图像的像素个数总和,即整幅图像面积, n_i, n_j 分别表示区域 1, 区域 2 的区域内像素和,即 G 为灰度级数,对于本文采集的熔池灰度图像, G 取 256,

整图像平均灰度与区域 1、区域 2 平均灰度值之间的关系为

$$\mu = \mu_1 q_1 + \mu_2 q_2 \quad \text{式 4.4}$$

同一区域常常出现灰度值相近的特性（即灰度相似特性），而不同区域之间则表现为明显的灰度差异，当被阈值 t 分离的两个区域间灰度差较大时，两个区域的平均灰度之间则表现为明显的灰度差异，当被阈值 t 分离的两个区域间灰度差较大时，两个区域的平均灰度 μ_1 ， μ_2 与整图像平均灰度 μ 之差也较大，区域间的方差就是描述这种差异的有效参数，其表达式为

$$\sigma_B^2 = q_1(t)[\mu_1 - \mu]^2 + q_2(t)[\mu_2 - \mu]^2 \quad \text{式 4.5}$$

式中， σ_B^2 表示了图像被阈值 t 分割后两个区域之间的方差。显然，不同的 t 值，就会得到不同的区域间方差，也就是说，区域间方差、区域 1 均值、区域 2 均值、区域 1 面积比、区域 2 面积比都是阈值 t 的函数，因此，将式 4.5 整理后可写成：

$$\sigma_B^2 = q_1(t)q_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2 \quad \text{式 4.6}$$

被分割的两区域间方差达最大时，被认为是两区域的最佳分离状态，因此确定阈值

$$T = \max[\sigma_B^2(t)] \quad \text{式 4.7}$$

在 MATLAB 中通过程序运算，得到阈值为 124，将小于它的灰度置为 0，大于它的灰度置为 255，得到图 4.2.1 (3)。

进行阈值分割后再进行边缘提取，这里采用 Robert 算子，最后得到图 4.2.1 (4)。图 4.2.3 是正常规范下采用相同的图像处理方法提取出的边缘。

4.2.2 浮渣的提取

将熔池图像经过图像平滑和中值滤波后，下一步就是图像增强，采用一般的线性增强后对浮渣提取时进行容易受到熔池边缘线的影响，尤其在最后的轮廓提取中很容易把边界轮廓一并提取出来了，这并不是本文希望得到的结果。由于浮渣的灰度值比起熔池边缘的灰度值有较大的差异（浮渣灰度较大），因此这里采用抑制低灰度，增强高灰度的非线性在图像增强方法，增强曲线如图 4.2.5 (1)，其中， x ， y 分别表示增强前后的灰度值。

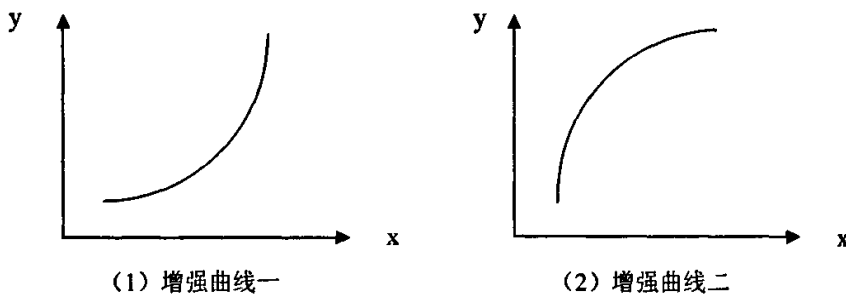


图 4.2.5 非线性增强

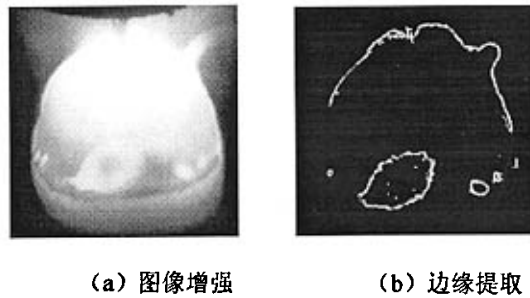


图 4.2.6 浮渣提取过程

增强后进行边缘检测和提取，得到图 4.2.6 (b)。但是，这个图像除了有浮渣轮廓外还有熔池轮廓的非封闭部分的干扰，这是因为这两个位置在图像增强前的灰度很接近，因此很难去掉。由于本文的目的是提取浮渣的个数，需要计算封闭的区域，这里采用连接成分标记法可以直接计算封闭的区域，因此这里可以不用考虑这些曲线段的影响。

连接成分标记就是对属于同一个 1 像素连接成分的所有像素分配相同的编号，不同的连接成分分配不同的编号的处理。它给每个边界标志一个唯一的数字(整数)，而最大的整数标号通常也就给出了图像中区域的数目。

在 MATLAB 中，可以通过函数 `bwlabel` 可以实现连接成分标记，其最大返回值就是图像中区域的数目计算，图 4.2.6 (b) 中计算出的值为 4 即为浮渣的个数。

同理对于半凝固区黑斑的提取与浮渣的提取方法类似，不同之处在于进行图像增强的时候采用图 4.2.5 (2) 的增强方法，增强后如图 4.2.7 (a)，经过边缘提取后得到 4.2.7 (b)，同样采用连接成分标记法可以计算出图中封闭小圆点的数目。

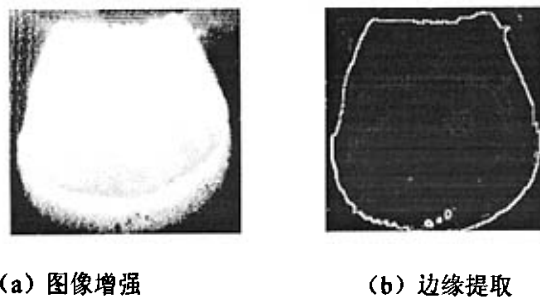


图 4.2.7 黑斑的提取

对于焊偏特征的提取主要是熔池外形轮廓的提取，这里采用高斯滤波、图像平滑、线性增强，形态腐蚀和膨胀，边缘提取等处理算法将其特征提取出即可。例如，图 3.4.1 中的熔池图像外形提取结果如下图 4.2.8。

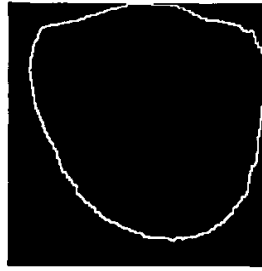


图 4.2.8 焊偏熔池图像的边缘提取

5 熔池图像缺陷特征的形态描述与识别

基于熔池视觉的焊接缺陷自动识别最终是要通过计算机进行判断和识别,因此,当提取特征后需要用相应的方法对目标进行特征描述,特征计算,并选择适合区别这些缺陷的主要的特征参数,找出识别特征的模式。

5.1 图像特征描述

特征描述是在提取图像中的目标后对其进行表示与描述,为后续的图像识别和理解奠定基础。

图像处理中常用的特征有灰度特征、几何特征、形状特征等。对于前面章节讲到的这些缺陷,有些特征可能仅仅用灰度特征、几何特征、形状特征等中的一方面特征可以加以识别,但是为了能够对焊接缺陷目标进行充分的认识,也可能要综合几种特征,我们需要对其熔池图像特征进行尽可能多的描述,而且特征之间最好是相互独立,互不依赖,使得它们能够反映目标不同方面的特点,以便计算机识别。

5.1.1 几何特征

(1) 面积 周长与面积是描述图形大小的最基本特征。面积是物体的总尺寸的一个方便的度量。面积只与该物体的边界有关,而与其内部灰度级的变化无关。

一个形状简单的物体可用相对较短的周长来包围它所拥有的面积。最简单的面积计算方法是统计边界内部(也包括边界上)的像素的数目。如图 5.1.1 第一幅图像。在这个定义下面积的计算非常简单,求出域边界内像素点的总和即可,计算公式如下:

$$A = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad \text{式 5.1}$$

对二值图像而言,若用 1 表示物体,用 0 表示背景,其面积就是统计 $f(x, y)=1$ 的个数。

另外一种由各种封闭边界区域的描述来计算面积也很方便,这种面积计算方法采用边界坐标来计算面积,如图 5.1.1 第二幅图像,由定理可知,在 x - y 平面中的一个封闭曲线包围的面积是用其轮廓积分给定的,即:

$$A = \frac{1}{2} \oint (x dy - y dx) \quad \text{式 5.2}$$

其中,积分沿着该闭合曲线进行。将其离散化后则变成

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_1} [x_i(y_{i+1} - y_i) - y_i(x_{i+1} - x_i)] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_1} [x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i] \end{aligned} \quad \text{式 5.3}$$

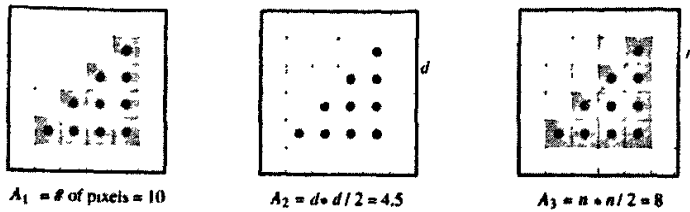


图 5.1.1 三种面积计算方法

第三种是计算边界的像素个数作为面积值，如图 5.1.1 第三幅图像。

$$A = \sum_{(x,y) \in R} 1 \quad \text{式 5.4}$$

其中，第二种方法更贴近真实的图形面积计算方法，但是对于不规则的区域而言，计算起来比较复杂。

(2) 周长

区域的周长即区域的边界长度。一个形状简单的物体用相对较短的周长来包围它所占有面积内的像素，周长就是围绕所有这些像素的外边界的长度。通常，测量这个长度时包含了许多 90° 的转弯，从而夸大了周长值。区域的周长在区别具有简单或复杂形状物体时特别有用。由于周长的表示方法不同，因而计算方法也不同。其中常用的一种方法是将周长用边界的像素总和来表示。例如，图 5.1.1 采用此方法计算的周长为 9。

另一种计算周长的方法是将周长用区域边缘间距离之和来表示。采用不同的距离公式，周长会有不同的值。若采用 8 邻点距离的 d^8 ，两个倾斜方向上的相邻像素间的距离为 $\sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}$ ，图 5.1.1 采用这种方法计算出的周长为 12.24。

5.1.2 形状特征

(1) 区域重心：描述区域像素分布的重心，也称质心。

对于灰度图像，其计算方法如下：

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} x \cdot g(x,y) \quad \text{式 5.5}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} y \cdot g(x,y)$$

其中，A 表示区域的面积大小， $g(x,y)$ 表示像素点 (x,y) 的灰度值。

对于二值图像而言，区域重心计算方法如下：

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} x \quad \text{式 5.6}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} y$$

(2) 凹性率

凹凸是图形的基本特征之一。可以通过以下方法对图形凹凸进行判别，如果图形内任意两像素间的连线穿过图形外的像素，则此图形为凹图形。也就是说图形中任意两个值为1的像素间，只要出现0-像素，即为凹图形，如图 5.1.2 (1)，反之，图形内任意两像素间的连线不穿过图形外的像素，则称为凸图形，如图 5.1.2 (2)。

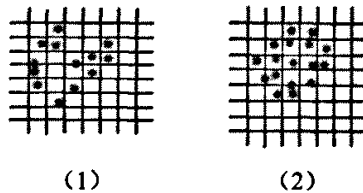


图 5.1.2 图形的凹凸性

为了进一步描述图形的凹凸程度，定义包含任一凹图形的最小凸图形称为该凹图形的凸封闭包，采用凹性率 A 表示图形的凹特性：

$$C = S_a / S \tag{式 5.7}$$

其中， S_a 为凹形面积，可将凸封闭包减去凹图形得到， S 为图形面积。

(3) 形状复杂性

形状复杂性常采用离散指数 e 表示，其计算公式为 式 5.8

$$e = L^2 / S$$

即用单位面积图形的周长大小表示形状复杂程度， e 值越大，表面单位面积的周长越大，即图形离散，则为复杂图形，反之，则为简单图形。 e 值最小的图形为圆形。若以连续的圆形、正方形、正三角形为例，计算它们的形状复杂度 e 分别为：圆形为 12.6，正方形为 16，正三角形为 20.8。

(4) 偏心角 θ ，定义如下：在通过图形重心的轴线中，最长的轴线被称为熔池区域的倾斜线。倾斜线与图像纵坐标轴（这里写为 j 轴）的夹角称为偏心角 θ ，通过下式可计算熔池区域偏心角

$$\cot^2 \theta + \{[m(2,0) - m(0,2)] / m(1,1)\} \cot \theta = 1 \tag{式 5.9}$$

即求出熔池区域的三个二阶矩 $m(2, 0)$ ， $m(0, 2)$ ， $m(1, 1)$ 后再计算出 θ ，这里采用熔池的二值图像对矩进行计算，即

$$m(p, q) = \sum_{(i, j) \in R} i^p j^q \tag{式 5.10}$$

这里 R 指图像的区域， i, j 为熔池二值图像内像素的坐标值。

(5) 链码与形状特征 对于离散的数字图像，区域的边界由像素点之间的单元连线逐段相连而成。对于图形中的像点而言，他必定会有 8 个方向的领域：正东、

东北、正北、西北、正西、西南、正南、东南，如图 5.1.3 所示。对于每一个方向赋以一种码表示，如上面 8 个方向分别对应 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7，这称为方向码。假设从某个起点开始，将区域边界的走向按上面的编码方式记录下来，可形成如下的序列 a_1, a_2, \dots, a_n ，其值为 0、1、2、 \dots 、7，这一序列称为链码的方向码。由此可知，偶数链码段为垂直或水平方向的方向码；奇数为对角线方向码。

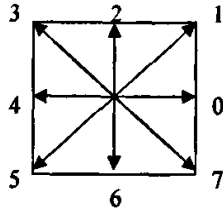


图 5.1.3 8 链码原理图

以上主要介绍了图像的一些基本几何特征与形状特征的描述方法，也是本文进行熔池特征计算所要采用的特征参数，至于灰度特征的描述方法，有第二章介绍的灰度直方图，灰度均值和灰度方差等，灰度特征描述参数很多，这里就不再一一列举。

5.2 具体特征目标的形态分析和特征参数计算

由第三章焊接缺陷特征分析中可知，不同类型的焊接缺陷特征各有其形状、灰度的差别，利用这些不同的差别，可以对某些焊接缺陷特征进行识别和分类。除了 5.1 中介绍的特征参数外，本文根据不同的缺陷特征也做其它的特征描述，以便更加充分认识焊接缺陷对应的熔池图像。

5.2.1 气孔熔池图像特征描述与计算

由第三章可知气孔与熔池边缘和浮渣的数量、灰度均值和标准差等有关。对于浮渣的数量已经通过连接成分标记的方法获取、而灰度均值和标准差与气孔的关系也在前面论述。下面主要针对熔池边缘的形态进行多种参数的特征描述，希望尽可能的从各种角度来描述熔池图像特征，以便找出更加适合缺陷识别的特征参数。



(1) 良好焊缝对应的熔池边缘

(2) 出现表面气孔焊缝对应的熔池边缘

图 5.2.1 熔池边缘图像

通过第四章的图像处理, 已将熔池边缘线提取出来, 如图 5.2.1, 其中 (1) 是良好焊缝对应的熔池边缘, 而 (2) 是出现表面气孔时焊缝对应的熔池边缘。从图中可看出前者的边缘比较光滑, 没有大的转折, 而后者边缘有很多凹凸起伏, 非常不平滑, 下面通过几个参数对此形状进行描述:

(1) 熔池边缘轮廓的凹性率计算

图 5.2.1 中的熔池边缘分别是凹图形和凸图形。因此, 可以通过计算凹性率表示熔池边缘的形态。首先求出熔池边缘的凸封闭包, 根据其定义, 图 5.2.1 (b) 的凸封闭包如图 5.2.2, 通过计算其凹性率为 0.24, 而图 5.2.1 (a) 的凹性率约等于 0。

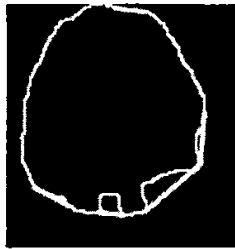


图 5.2.2 熔池轮廓的凸封闭包

(2) 熔池边缘形状复杂度 e 的计算

计算熔池边缘的周长 L 和面积 S , 然后用周长的平方除以面积, 即 L^2/S 得到 e 。这里采用边界链码长度 (水平和竖直方向为 1, 其它方向为 $\sqrt{2}$) 来计算熔池边缘的周长。首先进行熔池轮廓跟踪, 假设方向码为 0, 1, 2, ..., 7 的链码个数分别是 $A(0), A(1) \dots A(7)$, 则边界周长

$$L = [A(0) + A(2) + A(4) + A(6)] + \sqrt{2} [A(1) + A(3) + A(5) + A(7)]$$

面积的计算采用 5.1.1 中的第二种算法。计算 5.2.1 (1) 和 (2) 的 e_1 和 e_2 , 结果分别为 31.51 和 47.75, 表明后者的形状复杂度较大。

5.2.2 焊偏与熔池图像特征描述及特征参数

从焊偏的熔池图像可以看出, 焊偏时熔池的左右两部分很不对称。这里从熔池轮廓重心和偏心角 θ 的定义和计算出发, 对焊偏时的熔池图像特征进行研究。首先将经过图像处理的熔池图像进行二值化, 得到图 5.2.3。



图 5.2.3 焊偏时的熔池二值图像

定义二值化后熔池图像的重心为熔池区域的重心，采用的计算公式如式 5.11，

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \sum_{(x,j) \in R} x$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \sum_{(x,j) \in R} y$$

式 5.11

其中，A 指熔池区域的面积大小，R 指图像区域。

为了进一步探索重心及偏心角与焊偏对应熔池图像的关系，本文进行了一组实验，就是使焊偏从有到无的情况。这里采用从焊偏 0mm 到 3mm（即焊丝偏离坡口中心水平距离为 0-3mm）线性渐变的左偏的方式。图 5.2.4 是从未焊偏到焊偏时每隔 15 帧的一系列图像。

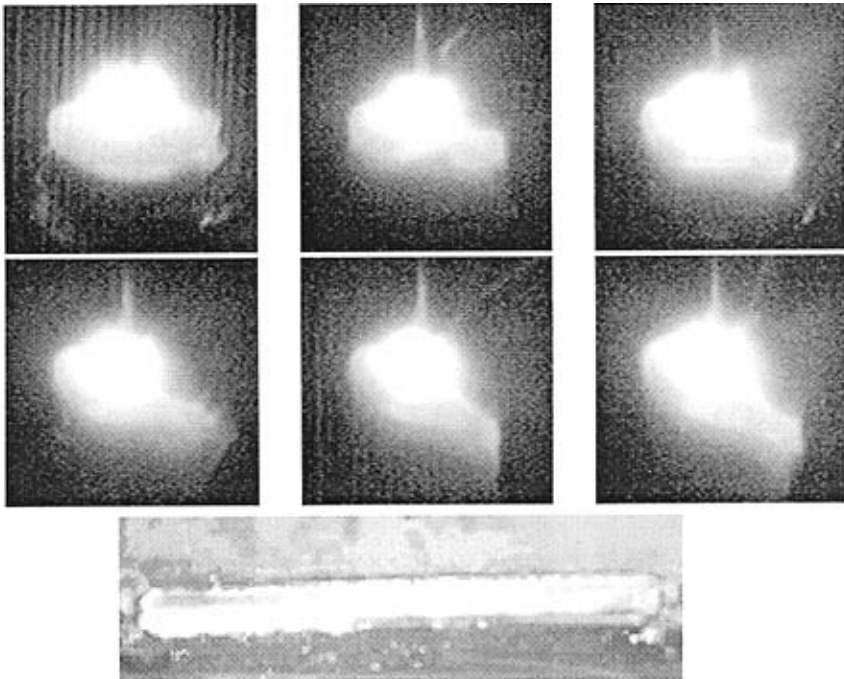


图 5.2.4 逐渐焊偏的焊缝对应的熔池图像

将上述图像经过边缘提取轮廓后，再求各幅熔池图像的重心以及偏心角如下，结果如表 5.2.1：

表 5.2.1 部分焊接缺陷实验计算结果

特征参数	1	2	3	4	5	6
熔池重心	[72.5000 72.0000]	[73.2000 72.2400]	[73.9600 72.3200]	[74.5100 72.5500]	[75.1200 72.5100]	[75.8700 72.7000]
偏心角	0.124	10.645	17.987	26.320	34.550	44.348

由此可以看出,随着焊偏程度的增大,熔池重心逐渐向右下移,而偏心角也在逐渐增大。同理,当右偏时重心向左下方向移动,可以将此作为焊偏的一个重要特征。

5.3 典型焊接缺陷特征识别模式的初步建立

选取 30 组实验中的缺陷作为样本,在当前实验条件下,以射滴过渡对接接头为例,对典型焊接缺陷的部分特征参数进行比较,用于找出不同缺陷下特征参数的规律,有利于建立识别模式。采用前面章节所述的特征向量分别进行计算,结果如表 5.3.1。

表 5.3.1 部分焊接缺陷实验计算结果

缺陷程度	偏心角	凹性率	灰度标准差	浮渣数目
质量良好	0-0.2	0.004	6.165	1-2
焊偏	2.112-41.534	不关联	5.621	不关联
表面气孔	不关联	0.2592	7.654	4.3
焊穿	不关联	0.5121	4.5201	不关联
内部气孔	不关联	不关联	6.652	5.3

由上表可见:

(1) 当熔池区域图像重心向左或右偏移时,尤其是偏移量大时,表明可能出现焊偏,此时焊偏的概率很大。同样,偏心角越大,焊偏的程度也越大。

(2) 当凹性率大时,表明熔池边缘凹凸起伏较大,此时出现表面气孔和焊穿的概率很高。

(3) 对于同个实验条件,有些焊接缺陷的灰度标准差差异不是很大,不过,可以通过不同缺陷在整个焊接表现出来的灰度标准差的变化来寻找判别的依据,例如前面章节所讲的灰度均值和标准差与缺陷的关系。

另外,浮渣数目一般情况下只有 1 个或两个,但是出现气孔时,出现 3 个以上的浮渣。因此,通过浮渣的个数判断气孔的可能性也很大。

通过进一步的分析,可以将焊接缺陷按照各自的特征分类,分别将其列为 A, B, C, ... 类缺陷,其模式识别软件基本流程如图 5.3.1。

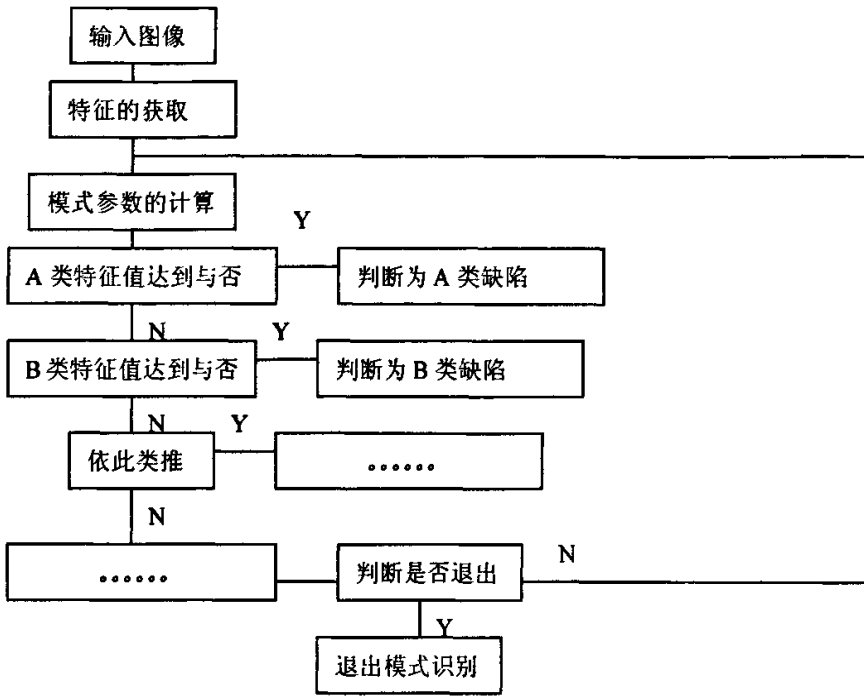


图 5.3.1 缺陷模式识别软件基本流程

结 论

1. 针对 MAG 焊的特点, 利用被动式直接视觉传感系统, 拍摄到了不同过渡形式下的典型熔池图像, 提取了熔池视觉几何、形态特征, 并采用伪彩色增强, 灰度三维图等方法, 进一步描述了熔池图像的灰度特点;
2. 较系统地对熔池图像特征信息与典型焊接缺陷之间关系进行了试验研究, 得到了表面气孔、内部气孔(夹渣)、焊穿、未熔合等缺陷对应的熔池图像特征;
3. 从灰度均值和标准差的角度研究了焊接缺陷产生过程中熔池图像的变化情况, 找到了焊穿等缺陷熔池图像灰度均值和标准差的奇异特征, 为基于熔池视觉的焊缝缺陷在线检测和焊后预测提供了技术依据;
4. 从气孔形成的机理角度分析了表面气孔的产生特点及在熔池图像中的特征, 经本文实验发现, 通过这些特征判断出现表面气孔的成功率相当高;
5. 通过多种特征量的计算, 找出了典型焊接缺陷与对应的熔池图像特征关系, 从而获得了对焊接缺陷进行自动识别的技术依据;
6. 一种图像特征可能预示有多种焊接缺陷产生的可能, 一种焊接缺陷可能有多种图像特征显示。

致谢

首先感谢我的导师王克鸿教授，课题的进展离不开王老师的悉心指导和鼎力支持；此外，王老师渊博的学识、严谨的治学态度和认真负责的工作作风让我终身受益，在此对两年来导师在生活方面的关心帮助和学习上的督促指导表示深深的谢意！

非常感谢实验期间顾民乐技师和刘永讲师给与的热心指导与帮助！

感谢两年来教研室徐越兰教授、余进副教授和张德库老师给与的指导和帮助。

实验期间得到了师妹沈莹吉的积极配合和嵇大园、朱武营等同学的热心帮助，在此一并表示感谢！

最后，再次感谢所有支持和帮助过我的人！

参考文献

1. 潘际奎. 现代弧焊控制. 北京: 机械工业出版社, 2000.
2. 叶峰, 宋永伦, 李迪, 等. 基于统计决策的GMAW焊穿缺陷在线检测. 仪器仪表与检测, 2001, (12): 37-39
3. 陈强, 孙建国. 计算机视觉传感技术在焊接中的应用[J]. 2001, 22 (1): 83-90
4. 张广军, 陈善本, 刘晓东. 脉冲GTAW焊接区视觉图像传感系统. 焊管, 2001(7): 23-25
5. 汤新臣, 郭国林, 虞剑, 等. 光学传感技术在熔池信息检测中的应用. 机械制造与自动化, 2003 (6): 62-65
6. 张甲英, 蒋力培, 张相洪. MIG焊熔宽模糊控制系统. 焊接学报, 1999, 20(1): 61-67
7. 王克鸿, 汤新臣, 刘永, 等. 射流过渡熔池视觉检测与轮廓提取. 焊接学报. 2004, 25 (2): 66-68, 72
8. 王克鸿, 汤新臣, 刘永, 等. 富氩气体保护焊熔池视觉信息传感试验研究. 机械工程学报, 2004, 40 (6): 161-164, 178
9. Balfour C, Smith JS. Feature correlation for weld image - processing applications[J]. International Journal of Production Research, 2003, 42 (5) : 975-995
10. Wang Jianjun, Yang Xueqin, Lin Tao. Patter recoynition of topside pool image in aluminium alloy TIG welding[J]. Transactionsof the China Welding Instituton , 2002, 23 (5) : 73-76
11. 王建军, 林涛, 陈善本. 铝合金TIG焊熔池图像的获取与处理[J]. 机械工程学报, 2003, 39 (5):125-129
12. Y. Sugitani, Y. Nishi and T. Sato, Intelligent Robot Controls Penetration and Bead Height, Welding Journal, Vol. 69, no. 12, pp. 31-38, Dec. 1990
13. Beardsley, H., Zhang, Y. M. and Kovacevic, R. 1994. Infrared sensing of welding parameters for weld penetration control. International Journal of Machine Tool and Manufacturing 34(8): 1079-1090
14. Kovacevic R, Zhang YM. Real-time image processing for monitoring of free weld pool surface [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119: 161-169
15. 陈念, 孙振国, 陈强. 基于视觉图像传感的精密脉冲TIG焊焊缝跟踪[J]. 焊接学报, 2001, 22 (4): 17-20
16. 任永杰, 杨学友, 闫洁. 一种新型高速智能视觉传感器的设计与实现. 2003:19-20, 28
17. 曹一鹏, 陈强, 孙振国. 短路过渡焊接熔池图像传感器. 焊接学报, 2004, 25 (2): 1-4
18. 闫志鸿, 张广军, 邱美珍, 等. 脉冲熔化极气体保护焊熔池图像的检测与处理. 焊接学报, 2005, 26 (2): 37-40

19. Y. M. Zhang, R. Kovacevic, L. Li. Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1996, 36 (7) : 799-816
20. 吕学勤, 张轲, 吴毅雄. 焊缝自动跟踪的发展现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2003, 39 (12) : 80-85
21. 王克争, 陈新征, 贾高峰. 线阵 CCD 视觉传感器埋弧焊自动跟踪系统[J]. *清华大学学报*, 2003, 43 (5) : 597-600
22. 刘志永, 赵而团, 王海涛, 等. 连续电流 TIG 对接焊熔池形状参数的视觉检测. *焊接技术*, 2005, 34 (1): 17-19
23. Eric R Fossum. CMOS Image Sensor Electronic Camera On A Chip [J]. *IEEE Transactions on electron devices*, 1997, 44(10):1689-1696
24. 朱苏磊, 韩焱. CMOS 图像传感器的消噪技术[J]. *华北工学院测试技术学报*, 2000, 14(2) :87-92
25. 胡铁军. 线阵 CCD 焊缝跟踪系统的改进和生产应用:[学位论文]. 北京: 清华大学机械工程系, 2001
26. 李东宏. 传感器应用领域不断拓展图像传感器成为新亮点. *世界电子元器件*. 2004, 10
27. 谢维达, 邵德荣, 王春辉. 基于面阵图像传感器的二维相关测速研究. *光电子技术*, 2003, 23 (4): 224-228
28. 陈善本, 吴林. 焊接智能化技术现状与发展[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, (1) :84-96
29. Chen S B, Lou YJ, Wu L D, et al. Intelligent methodology for measuring, modeling, control of dynamic process during pulsed GTAW part I based on welding [J]. *Welding Journal*, 2000, 79(6) : 151-163
30. 张广军. 视觉传感的变间隙填丝脉冲 GTAW 对接焊缝成形智能控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002
31. 王建军, 林涛, 陈善本等. 铝合金交流钨极氩弧焊熔池图像传感方法. *上海交通大学学报*, 2002, 36(1):5-8
32. 胡晓冬, 赵万华, 许超, 等. 基于 CCD 的金属直接成型过程监控系统. *光子学报*, 2003, 32 (3): 375-377
33. 李午申, 梁艳红. 焊接金相组织图像识别技术的研究. *机械工程学报*. 1996, 32(5) :94-98
34. 李午申, 陈煜. 焊接金相组织参数自动测量软件系统的研究. *中国机械工程*. 1998, 9(2) :37-39
35. 李午申, 周念国. 焊接金相组织自动定量识别软件系统. *焊接学报*. 1998, 19(1):60-65
36. 周正干, 腾升华, 江巍等. 焊缝 X 射线检测及其结果的评判方法综述. *焊接学报*. 2002,

- 23(3):85-88
37. 黄石生, 钱迎雪. 基于 ART 人工神经网络的焊缝跟踪检测算法. 机械工程学报. 1994, 30 (2):93-98
38. 张华, 陈强, 金建敏等. 基于焊缝 CCD 图像模式特征的焊缝轨迹识别. 机械工程学报. 1996, 32(6):31-36
39. 谷春艳, 张立斌, 胡宝坚, 等. 图像处理技术在 CO₂ 焊自动跟踪中的应用. 焊接学报, 2004, 25 (8): 70-73
40. 李克海等. 脉冲 TIG 焊熔池几何参数的计算机视觉监测[J]. 焊管, 2000 (11): 29-32
41. 石王于, 吴巍, 樊丁, 陈剑虹. 铝合金 MIG 焊正面熔池图像视觉传感与处理. 中国机械工程, 2005, 16 (2): 177-179
42. Balfour C, Smith J.S. Feature Correlation for Weld Image-processing Applications. International Journal of Production Research, 2003, 42(5): 975~995
43. 邵奇可, 陈国定, 方勇. 形态学在熔池图像处理中的应用研究. 机械科学与技术. 2003, 22 (1): 42-43
44. 葛景国, 朱政强, 饶德林. 陈立功电弧焊焊接过程数据快速提取方法. 中国机械工程. 2004, 15 (3) : 264-267
45. 陈彦宾, 李刚群, 陈凤东, 等. 图像处理在自动焊接中的应用和展望. 材料科学与工艺 2003, 11 (1): 106-112
46. 高向东, 罗锡柱. 一种基于图像质心的焊缝跟踪新方法. 焊接学报. 2003, 24 (6): 15-18
47. 王庆香, 孙炳达, 李迪. 焊缝位置识别的图像处理方法设计. 焊接学报. 2005, 26 (2): 59-63
48. GU Chun-yan, HU Bao-jian, HUANG Wei, etc. Molten pool image processing of CO₂ arc welding auto seam tracking system based on LED light. 肇庆学院学报. 2004, 25(5):21-24
49. 薛家祥, 贾林, 李海宝. 基于 M 带小波变换的焊接熔池图像边缘检测. 中国机械工程, 2004, 15 (13): 1144-1146
50. 高进强. 恒流 TIG 焊接熔池形状参数的视觉检测及智能控制[D]. 山东济南: 山东大学, 2000.
51. 张义顺, 刘娜, 邵成吉, 等. 基于 CCD 视觉传感的焊缝自动跟踪程控系统研究. 飞机设计, 2003 (2): 67-70
52. Cervera E, Berry F, Martinet P. Image2based stereo visual servoing 2D vs 3D features [A]. 15th triennial world congress[C]. Barcelona, Spain, IFAC, 2002
53. 朱若磊, 黄石生, 张红兵, 等. 基于分形理论的焊缝信息提取. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32 (6): 1-4
54. Chen SB, Lou YJ, Wu LD, et al. Intelligent methodology for measuring, modeling, control of dynamic process during pulsed GTAW—part I based on welding [J]. Welding

- Journal, 2000, 79(6) : 151-163
55. Chen SB, Zhao DB, Wu L, et al. Intelligent methodology for measuring, modeling, control of dynamic process during pulsed GTAW—part II butt welding [J]. Welding Journal, 2000, 79(6) :164-174
56. Zhao DB, Chen SB, Wu L, et al. Intelligent control for the double sided shape of the weld pool in pulsed GTAW with wire filler [J]. Welding Journal, 2001, 80 (11) : 253-260
57. 张广军. 视觉传感的变间隙填丝脉冲 GTAW 对接焊缝成形智能控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002
58. 葛景国, 朱政强, 饶德林, 等. 电弧焊接过程数据快速提取方法. 中国机械工程. 2004, 15 (3): 264-267
59. 邓永翔, 黄石生等. 焊接过程智能控制技术的研究现状与展望. 沈阳工业大学学报, 2001, 23(4): 18-21
60. 陈善本, 林涛, 陈文杰, 等. 智能化焊接制造工程的概念与技术. 焊接学报. 2004, 25 (6): 124-128
61. 赵冬斌. 基于三维视觉传感的填丝脉冲 GTAW 熔池现状态智能控制[D]. 黑龙江 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000
62. HOLBERT R K, RICHARDSON R W, FARSON D F, Albright, CE. Image - based penetration monitoring of CO2 laser beam welding. Welding Journal (USA), 2000, vol. 79 (4) :89-96
63. KANNATEY Asibu, et al. Modeling of conduction mode laser welding process for feedback control[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering (USA), 122 (3): 420-328
64. Chen SB, Zhao DB, Wu L, et al. Intelligent methodology for sensing, modeling and control of pulsed GEAW part22butt joint welding[J]. Welding Journal, 2000, 79 (6) :164-173
65. 彭松, 方祖祥. BP 神经网络学习算法的联合优化[J]. 电路与系统学报, 2000, 5 (3): 26-30
66. 雷玉成, 张成, 程晓衣, 等. 基于遗传算法的模糊神经网络控制器在 GTAW 中的应用. 焊接学报, 2003, 23 (4)
67. 陈善本, 姜亚军, 赵冬斌等. 脉冲 GTAW 熔池动态过程模糊神经网络建模与控制. 自动化学报, 2002, 28(1):1-9
68. 刘莹, 张建勋, 陈小艺. 基于人工智能的焊接工艺评定专家系统. 焊接技术, 2003, 32(2):47-49
69. 张晓光, 林家骏. 基于模糊推理的射线底片焊缝缺陷识别专家系统. 矿山机械, 2003, 31(1):55-56

70. 张晓光, 刘金德, 等. 射线焊缝缺陷识别的专家系统. 煤矿机械, 2002 (11):22-24
71. Quinn TP, Smith C, Mccowan CN, et al. Arc sensing for defects in constant-voltage gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1999, 78 (9): 322-328.
72. 李迪, 宋永伦, 叶峰等. 基于电弧传感的GMAW过程焊缝缺陷识别方法. 焊接学报, 2000, 21 (1): 30-33
73. 武传松, polte T, Rehfeldt D. GMAW焊接过程监测 Kohonen神经网络系统. 机械工程学报, 2002, 38(1): 131-134
74. 曾安, 李迪, 潘丹等. 基于MSPC方法的GMAW在线监测. 焊接学报, 2003, 24 (1): 5-9
75. 孙俊生, 武传松, 高进强. 熔滴热焓量分布模式对熔池流场的影响. 金属学报. 1999(35):964-970