

基于高速 CCD 摄像的短路过渡焊接熔滴检测与分析

朱志明, 吴文楷, 陈强

(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘要: 建立了基于高速 CCD 摄像的熔滴图像检测和焊接电流、电弧电压同步采集系统, 在给出短路过渡模式下的熔滴尺寸定义并简述基于 MATLAB 平台的熔滴尺寸与电弧信号分析系统的基础上, 对平特性电源短路过渡 CO_2 焊接熔滴尺寸变化特征及其与工艺性能间的关系进行了试验研究。结果表明, 熔滴尺寸呈分散性较大的正态分布 (1 ~ 2 倍焊丝直径), 过大或过小的熔滴尺寸均不利于短路过渡焊接过程的稳定性。根据熔滴的形成和过渡过程, 初步分析了影响熔滴尺寸的主要因素及控制熔滴尺寸的途径, 即短路过程结束后焊丝端部的残余液态金属量和燃弧能量的随机性导致了熔滴尺寸的不确定性, 对其进行有效控制将提高熔滴尺寸和短路过渡过程的一致性, 进而改善短路过渡 CO_2 焊接的工艺性能和焊接质量。

关键词: 高速 CCD; 熔滴尺寸; 短路过渡; 随机性

中图分类号: TG403 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)03-29-05



朱志明

0 序 言

数字化高速 CCD 摄像技术是研究熔化极气体保护电弧焊熔滴形成、熔滴尺寸变化规律直观而有效的手段。Rhee S 等采用高速摄像对不同过渡方式的熔滴过渡现象进行了试验研究^[1]。结果表明, 颗粒过渡不存在收缩失稳现象; 而对不同焊丝伸出长度和不同保护气体的熔滴直径和过渡频率检测表明, 在富 Ar 保护焊中, 随着 CO_2 含量的增加, 虽然颗粒过渡转变为喷射过渡的临界电流总体趋势增加, 但由于表面张力的减小, 最小临界电流出现在保护气体为 5% CO_2 + 95% Ar 的情况下。同时, 由于烟尘力的作用, 在高电流的情况下, 熔滴的长度随着 CO_2 含量的增加而变短, 并且在纯 CO_2 和 CO_2 含量高的混合气体保护焊中, 熔滴形状会产生扭曲。对于 CO_2 和 He 气保护, 随着焊接电流的增加, 熔滴过渡频率增加缓慢。Lin Q 等采用高速摄像对直径为 0.9 mm 和 1.2 mm 的两种焊丝从颗粒过渡向喷射过渡转变时的熔滴尺寸和速度进行了研究^[2]。结果表明, 在熔滴过渡模式转变的窄范围内, 熔滴尺寸并不是连续变化的, 而是存在一个熔滴尺寸带。

短路过渡 CO_2 焊接以其低成本、低热输入、高效率而获得越来越广泛的应用, 进一步降低飞溅、提

高焊接过程的稳定性、获得更优的焊缝成形成为广大焊接工作者追求的目标^[3~5]。而分析研究影响短路过渡 CO_2 焊接熔滴尺寸的因素及其变化规律有利于对熔滴尺寸及焊接工艺性能进行有效控制。

在建立基于高速 CCD 摄像的熔滴图像检测与焊接电流、电弧电压同步采集试验研究系统、给出熔滴尺寸定义、并简述基于 MATLAB 平台的熔滴尺寸与电弧信号分析系统的基础上, 结合平特性电源短路过渡 CO_2 焊接的熔滴尺寸变化特征, 分析了熔滴尺寸与焊接电弧工艺性能间的关系, 并根据熔滴的形成和过渡过程, 初步分析了造成熔滴尺寸强随机性的根源及实现熔滴尺寸控制的手段。

1 熔滴检测装置

短路过渡焊接熔滴检测系统见图 1。系统以单片机 MC68HC11A1 为控制核心, 包括熔滴高速 CCD 摄像、焊接电流 电弧电压同步采集、送丝及焊接小车驱动及焊接电源 4 部分。

单片机 MC68HC11A1 主要实现电弧电压 焊接电流信号采集板 AC1030 及熔滴图像采集板 PIX-CLID 32 的同步触发和焊接过程参数存储, 从硬件上确保熔滴图像拍摄系统与电弧信号采集系统同步工作。同步信号可以通过单片机软件定时产生, 也可以通过单片机内部计数器计算短路过渡周期产

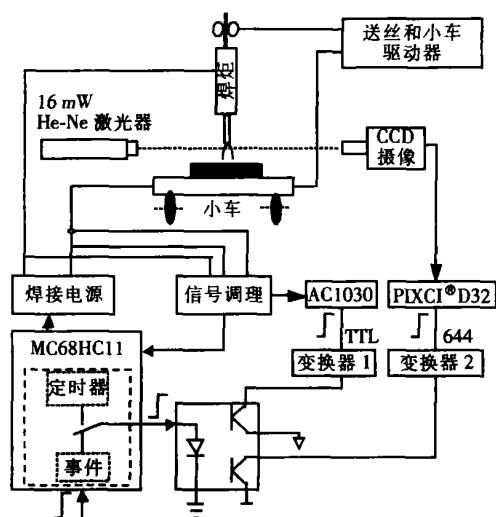


图 1 熔滴检测及焊接电流 电弧电压同步采集系统

Fig. 1 Experimental system for detecting of molten droplet and recording of welding current and arc voltage in phase

生,还能够通过捕捉焊接电弧状态的变化而产生,从而使熔滴图像拍摄与电弧信号检测具有良好的柔性和可控性。焊接过程参数存储通过检测焊接电弧状态,在线存储焊接过程中的短路时间、燃弧时间、短路过渡周期等特征量。

高速 CCD 摄像系统见图 2。由于电弧弧光强度大、频带宽,为获取清晰的熔滴图像,系统采用了背光照明,背光源为波长 632.8 nm、功率 16 mW 的 He-Ne 激光器,光束直径为 $\phi 0.8$ mm。光束经凸透镜(20×)聚焦后通过孔径为 $\phi 0.015$ mm 的光阑形成“点”光源,再经过扩束透镜组将光束扩至直径为 $\phi 10$ mm 的平行光,使其投射到熔滴及焊丝上,然后经过物镜使焊丝和熔滴的轮廓成像到像屏上。为

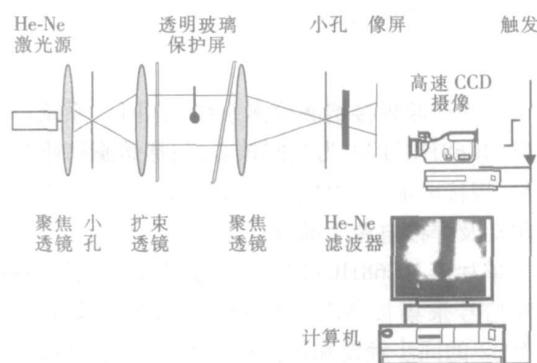


图 2 熔滴高速摄像系统

Fig. 2 High speed camera and relative laser optics system

进一步避免弧光干扰,像屏前安置了孔径为 $\phi 1$ mm 的光阑及中心波长为 632.8 nm、半宽度为 10 nm 的 He-Ne 滤光片。高速摄像机采用 PIXCL®D32, 最高摄像速度为 955 帧/s 可动态连续存储 8 000 帧图像,并通过捕捉同步信号上升沿触发工作。由于正常的短路过渡周期一般在 10 ms 以上,在 955 帧/s 的拍摄速度下,每个过渡周期有 10 幅以上图像,基本能够反映熔滴的动态变化过程。

由信号调理单元和高速 A/D 板 AC1030 组成的电弧信号采集系统记录存储焊接过程中的动态焊接电流、电弧电压。AC1030 为双通道存储式 A/D 板,可脱机采样,数据存储在 A/D 板上,不占用 PC 内存;其采样频率可通过软件设定: 30M μ sⁱ、20M μ sⁱ、2M μ sⁱ、200 k μ sⁱ ($i=0, 1, 2, 3$); 分辨率: 30MHz 为 ± 1.5 LSB, 20MHz 以下为 ± 1 LSB; 在焊接过程中,可以根据需要选择较低的采集频率记录电弧信号的宏观长时变化过程,或选择较高的采集频率记录电弧信号的瞬态突变过程。

为有效控制焊接参数,获得重复性好、可靠性高的试验结果,送丝与焊接小车驱动采用工作频率为 40 kHz 静动态品质优良的脉宽调制 (PWM) 式 BUCK 变换器,转速控制采用电枢电压负反馈和电流补偿方式,以使电机具有平硬的机械特性。送丝速度可调范围为 1.5~16 m/min,在电网电压波动 $\pm 15\%$ 和额定转矩范围内,同一给定值下送丝速度的变化不超过 1.5%。焊接小车速度在 0.15~3.1 m/min 范围内连续可调。

2 熔滴尺寸定义及其动态分析系统

在非短路过渡方式下,熔滴尺寸为焊丝端部熔化的液态金属脱离焊丝端部后,在弧柱中自由飞落的液态熔滴直径。而在短路过渡焊接中,熔滴不出现在弧柱中自由飞落的状态,并且焊丝端部的液态金属体积不断动态变化,目前文献中尚未给出熔滴尺寸的确切定义。然而,在短路过渡焊接的每个过渡周期中,与熔池短路接触瞬间的熔滴尺寸和形状无疑是最重要的,它承上反映了燃弧阶段焊丝熔化及形成熔滴的大小,启下又是实现正常短路过渡至关重要的条件,因此,约定与熔池短路接触瞬间的熔滴径向最大直径 D 为熔滴尺寸(图 3)。实际处理时,以焊丝直径为参照源,分别测量 D_0 和 d_0 对应的点阵数以确定熔滴的实际尺寸。对 $\phi 1.2$ mm 焊丝, $D=1.2D_0 H_0$ mm。同时,为描述熔滴轮廓形状,定义熔滴的形状系数 $Q=D_0 H_0$ 。

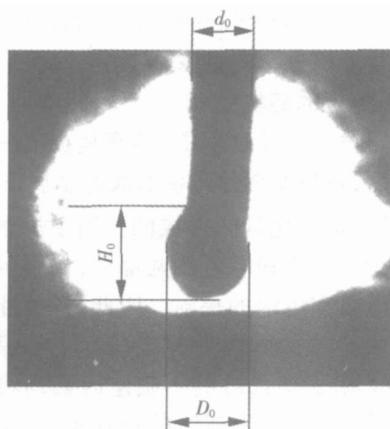


图3 熔滴尺寸定义示意图

Fig. 3 Definition of droplet size

在 MATLAB 平台上建立了熔滴尺寸与相应电弧信号动态变化过程的数据处理及分析系统,包括时间序列分析和统计分析。时间序列分析主要分析熔滴尺寸及相关电弧信号随时间的变化过程,了解单个熔滴尺寸与短路时间、燃弧时间、过渡周期、电弧电压、焊接电流等在时域上的对应关系。统计分析主要分析所采集数据的统计特征。

3 短路过渡 CO_2 焊接的熔滴特征

图4为采用恒压特性电源在 160 A /22 V 焊接

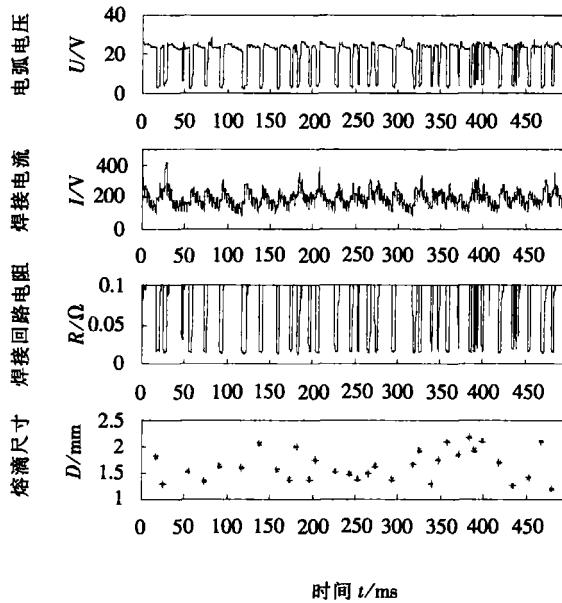


图4 电弧电压、焊接电流波形及相应的熔滴尺寸

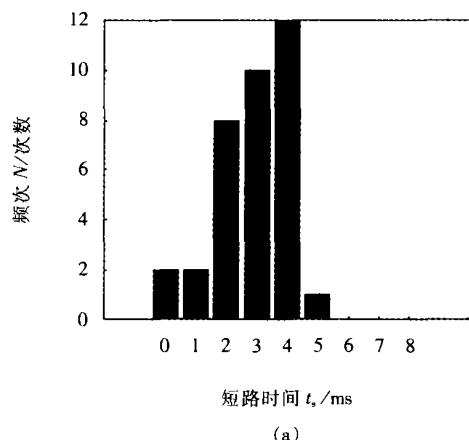
Fig. 4 Waveform of arc voltage, welding current

and corresponding droplet size

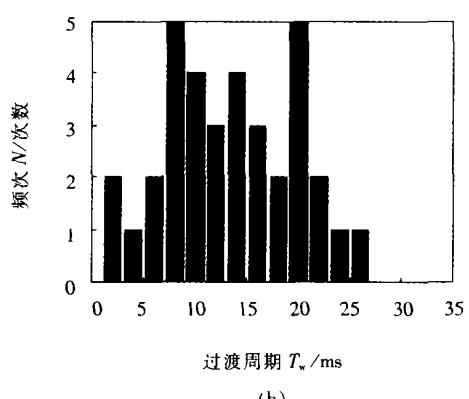
(焊接电流 160 A, 电弧电压 22 V, 送丝速度 3 m /m in)

焊接速度 0.3 m /m in)

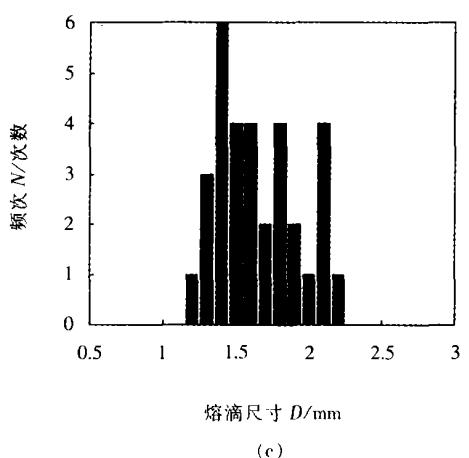
时的电压、电流波形和同步拍摄的熔滴尺寸随时间的变化过程。由图可以看出,短路时间、过渡周期、熔滴尺寸无明显确定的变化规律,它们的未来不能由过去的观测值准确地预测。图5为对应图4的0.5 s焊接时间的统计结果,可以看出,短路时间、过渡周期、熔滴尺寸总体上呈正态分布特征。并且熔



(a)



(b)



(c)

图5 短路时间、过渡周期、熔滴尺寸统计分析

Fig. 5 Statistic analysis of short circuit time, transfer period and droplet size

(焊接电流 160 A, 电弧电压 22 V, 送丝速度 3 m /m in, 焊接速度 0.3 m /m in)

滴尺寸的分布范围较大, 小的仅相当于焊丝直径, 大的则接近于两倍的焊丝直径。

姑且不论熔滴尺寸随机性对熔池冶金、焊缝微观组织的影响, 仅从熔滴图像上能够直观反映的电弧工艺性能看, 熔滴尺寸的随机性对电弧工艺性能具有明显的影响。大部分尺寸适中的熔滴, 短路过程柔顺, 短路过渡周期及短路持续时间相对合理 (t_s 2~5 ms), 短路过渡期间也无明显的焊接飞溅, 但是在过大或过小的熔滴出现时, 焊接电弧的工艺性能均明显恶化 (图 6)。

图 6a 为一个尺寸偏大的熔滴的完整短路过渡过程, 不仅短路过渡持续时间长, 焊丝伸出长度部分在短路电流产生的大量电阻热作用下局部熔化, 而且短路液桥在较大的短路电流下爆断, 产生明显的大颗粒焊接飞溅。图 6b 为一个尺寸偏小的熔滴的完整短路过渡过程。偏小的熔滴与熔池短路接触后不易形成正常的短路过渡, 需要较大的电流和较长的短路时间。由于熔滴过渡金属量少, 在短路结束后, 熔滴长大的电弧空间小, 电弧电压低, 焊丝在较大的燃弧电流下快速熔化, 极易形成不利于过渡的扁平状熔滴。

因此, 控制燃弧过程形成均匀合理的熔滴尺寸是改善短路过渡焊接电弧工艺性能的合理途径。

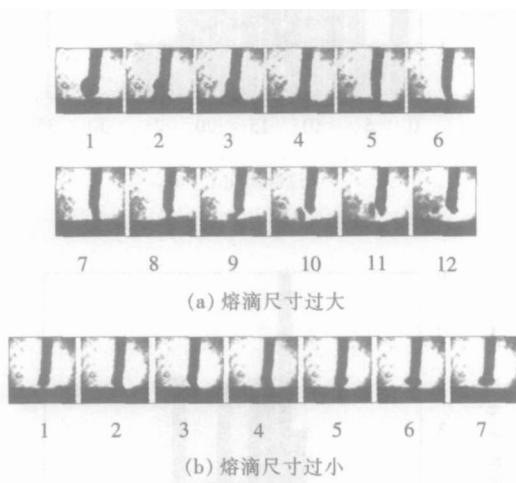


图 6 过大或过小熔滴的短路过渡过程 (时间间隔 1.05 ms)

Fig. 6 Short circuit transfer procedure of molten droplet with excessive large or small size

(时间间隔 1.05 ms)

4 熔滴尺寸随机特征的根源

分析不同的熔滴图像发现, 有些熔滴的轮廓体积接近, 但熔滴尺寸 D 却相差较大, 而只有在形状

系数 θ 相同时, 熔滴尺寸与体积才具有较好的对应关系。下面分析不同熔滴的形成过程以初步认识造成熔滴尺寸随机分布的根源。

4.1 燃弧能量的随机性

在短路过渡焊接过程中, 熔滴是在上一个过渡周期结束后, 在焊丝端部残余的液态金属 V'_{j-1} 基础上, 由燃弧能量熔化焊丝形成的。用于焊丝熔化的热量主要为阳极热和电阻热两部分, 仅极少一部分热量来自电弧和熔池的辐射。因此, 燃弧能量主要决定于燃弧过程中的焊丝伸出长度 l 与焊接电流 $i(t)$, 所有影响 l 及 $i(t)$ 的不确定因素均将导致燃弧能量的随机性。而燃弧能量的不确定性必然导致熔滴尺寸的随机性。

首先, 采用恒压特性电源进行短路过渡焊接时, 由于燃弧过程的 $i(t)$ 与上一个过渡周期中的短路过渡过程密切相关, 短路持续时间越长, 短路结束瞬间电流越大, 再燃弧时刻的电流及电感储能也越大。因而短路过渡焊接过程中短路过程的不确定性, 以及燃弧能量与短路过渡过程的关联性, 决定了燃弧能量具有较强的随机特征。

其次, 由于燃弧过程受环境、温度、保护气体、电源输出纹波等较多随机因素的影响, 特别是燃弧过程中电弧弧长的随机波动均将造成焊接电流 $i(t)$ 及焊丝伸出长度的大幅度变化, 从而引起燃弧能量的随机改变。

4.2 V'_{j-1} 的随机性

V'_{j-1} 是熔滴体积的初始值, 是前一个熔滴短路过渡结束后的结果, 因此它必定与短路前的熔滴与短路过渡过程有关。分析发现, 影响 V'_{j-1} 的因素主要有三个: 短路前的熔滴体积、熔滴形状以及熔滴的短路历程。短路前熔滴体积对 V'_{j-1} 的影响主要是在熔滴体积过小时较为明显, 如前所述; 相比而言, 短路前的熔滴形状系数及熔滴的短路历程对 V'_{j-1} 的影响更为突出。从体积接近的熔滴的短路过渡过程看, 短路前的熔滴形状系数、熔滴的短路历程不同, V'_{j-1} 差异很大。

根据磁流体失稳理论, 流体的宽高比越大, 越不易于失去平衡状态, 因而, 相对于细长形状的熔滴而言, 扁平形状显然不利于熔滴的过渡。图 7 为扁平状熔滴自与熔池短路接触开始的一个完整过渡周期内熔滴图像的连续变化过程。可以看出, 扁平状熔滴的短路过渡不仅持续时间相对较长 (≥ 9 ms), 而且焊丝伸出长度部分出现大段表面熔化的迹象, 熔化的液态金属集聚在焊丝端头, 直接影响 V'_{j-1} 的大小。

考虑到每次短路前熔滴的温度、表面张力系数、

粘滞系数可能存在差异,熔池的温度、形状以及振荡情况也不尽相同,这些因素均可能导致熔滴短路历程不同。因此,即便是尺寸及形状系数接近的熔滴,由于熔滴的短路历程不同, V'_{j-1} 的差异也很大,见图 8。短路持续时间短(≤ 2 ms),短路阶段只产生少量的金属过渡,焊丝端部残余液态金属量 V'_{j-1} 较大。

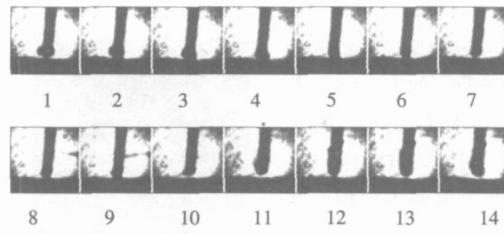


图 7 扁平状熔滴的短路过渡过程

Fig. 7 Short circuit transfer procedure of molten droplet with flat shape
(时间间隔 1.05 ms)

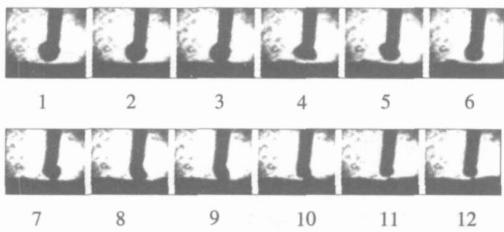


图 8 短路历程对 V'_{j-1} 的影响

Fig. 8 Influence of short circuit transfer procedure on V'_{j-1}
(时间间隔 1.05 ms)

由上述分析可知,燃弧能量及焊丝端部残余液态金属量 V'_{j-1} 是影响熔滴尺寸的主要因素,要控制熔滴尺寸,必须分别控制燃弧能量及 V'_{j-1} 的大小。

5 结 论

(1) 建立了基于高速CCD摄像的熔滴图像和

焊接电流 电弧电压信号同步采集系统,为分析短路过渡 CO₂ 焊接熔滴尺寸的影响因素、比较熔滴尺寸与各变量的相互关系提供了直观而有力的手段。

(2) 给出了熔滴尺寸的定义,试验研究了恒压特性电源短路过渡 CO₂ 焊接熔滴尺寸、对应的电弧电压 电流信号的特征。结果表明,熔滴尺寸呈分散性较大的正态随机分布。

(3) 通过比较和分析不同熔滴的形成过程,指出短路过渡周期结束后焊丝端部的残余液态金属量 V'_{j-1} 及燃弧能量的随机性是熔滴尺寸随机分布的重要原因。

参考文献:

- [1] Rhee S, Kannatey-Asibu E. Observation of metal transfer during gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1992, 71(10): 381s-386s
- [2] Lin Q, Li X, Simpson S W. Metal transfer measurements in gas metal arc welding[J]. Journal of Physics (D: Applied Physics), 2001, 4(3): 347-353
- [3] Haidar J, John J, Lowke J J, et al. Effect of CO₂ shielding gas on metal droplet formation in arc welding[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(5): 931-936
- [4] Hemmans M J M, Den Ouden G. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1999, 78(4): 137s-141s
- [5] Adolfsson S, Bahrami A, Bohm G, et al. On-line quality monitoring in short circuit gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1999, 78(2): 59s-73s

作者简介: 朱志明,男,1964年5月出生,博士,副教授,清华大学焊接技术研究中心副主任,中国焊接学会计算机应用技术专业委员会副主任等;主要从事焊接工艺过程控制及自动化、人工智能与计算机辅助焊接加工技术、现代功率电子技术与电能变换方面的研究和开发工作。发表学术论文80余篇。曾获国家教委科技进步二、三等奖。

E-mail: zzndm@tsinghua.edu.cn

versity Jinan 250061 China). p17 - 20 28

Abstract It has been found that when the Gaussian or Double elliptic mode of heat flux distribution was employed in numerical simulation of GTAW (gas tungsten arc welding) welding pool behaviors there was marked difference between the predicted and practical pool geometry at the rear of weld pool. The reason why such difference exists was analyzed and three principles guiding how to determine the calculating zone of heat source on the work piece were put forward in designing the numerical simulation program. Through appropriate selecting the calculating zone radius of welding arc on the work piece and making it matched with the distribution parameters of Double elliptic mode of heat flux the trailing problem of weld pool rear in previous models had been successfully solved and the numerical simulation precision had been greatly improved for GTAW weld pool geometry.

Key words weld pool geometry rear trailing of weld pool distribution mode of heat source numerical simulation gas tungsten arc welding

Technology characteristics of stainless steel plasma arc gas tungsten arc double sided arc welding process DONG Hong gang^{1,2}, GAO Hong ming², WU Lin², LIU Liming¹ (1. Laboratory of Special Process of Raw Material Department of Materials Engineering Dalian University of Technology Dalian 116024 China 2. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China). p21 - 24

Abstract This paper analyzes the technology characteristics of stainless steel plasma arc gas tungsten arc double sided arc welding process which could increase penetration and reduce distortion then this process is applicable to weld the thick plate. After the keyhole was established the arcs during the double - sided arc welding are apparently constricted to some extent and the arc voltage between the two welding torches descends which can economize on energy. Because the arc heats the workpiece within the weld pool after penetrating the arc thermal efficiency was improved. The surface tension arc blow force and electromagnetic force work positive to improve the penetration and the buoyancy can increase the width in the middle of weld pool.

Key words double sided arc welding keyhole plasma arc

Configuration optimization of a high velocity arc spraying gun

CHEN Yong xiong ZHU Zixin LIU Yan XU Bin shi (National Key Laboratory for Remanufacturing Academy of Armored Forces Engineering Beijing 100072 China). p25 - 28

Abstract The configuration of high velocity arc spraying (HVAS) gun was optimized the atomized particle velocity of the HVAS gun was measured by the Spraywatch 2 monitor system. A comparative study was carried out to investigate the microstructure and properties of the coatings produced by the original gun and the modified gun using

3mm diameter Al and 3Cr13 wires. The results indicated that angle and the distance from the nozzle to the meeting point of the two wires may have a strong influence on the characteristics of the in flight droplets and the coatings and the existing of wires and wire guides existed in the material jets also affected the distribution of the air flow field. Using the optimized gun the atomized particle velocity is increased remarkably and the coating microstructure and properties are improved relatively. The adhesion strength of the Al and 3Cr13 coatings deposited by the modified gun increased 55% and 39% respectively and the hardness increased 26% and 9% respectively. The microstructure of the coatings was more dense and homogenous and the porosity also decreased a little. When spraying 3Cr13 the highest particle velocity is about 210 m/s in the range of 170 - 270 mm from the nozzle to the meeting point of the two wires.

Key words high velocity arc spraying gun configuration optimization coating property

Detect and analysis of molten droplet in short circuit arc welding based on high speed charge coupled device camera ZHU Zhiming WU Wen kai CHEN Qiang (Tsinghua University Beijing 100084 China). p29 - 33

Abstract An experimental system to photograph molten droplet images by using a high speed charge coupled device camera and to record welding current and arc voltage in phase was established. After the definition of molten droplet size in short circuit transfer mode was given and the analysis system for molten droplet size and arc signals based on MATLAB platform was introduced the characteristic of molten droplet size in short circuit CO₂ arc welding using the power supply with constant voltage output the relationship between the molten droplet size and the welding process behavior were investigated. The experimental results show that the molten droplet size presents normal distribution between 1 and 2 times of wire electrode diameter. The excessive large or small size in molten droplet are all unfavorable to the stability of welding process in short circuit transfer mode. According to the formation and transfer course of molten droplet the main influence factors to the molten droplet size are analyzed and the approaches to control the droplet size are proposed. Namely the random characteristic of the residual liquid metal quantity at the end of wire electrode after the completion of short circuit transfer and the arc energy induces the uncertainty of molten droplet size (making effective control on them will increase the accordance of molten droplet size and short circuit transfer procedure and improve the process behavior and welding quality of short circuit CO₂ arc welding further).

Key words high speed charge coupled device camera droplet size short circuit transfer random characteristic

Fatigue design curve of tubular joints treated by ultrasonic peening WANG Dong po WANG Ting HUO Li xing ZHANG Yu feng (College of Material Science and Engineering, Tianjin University Tianjin 300072