

文章编号: 1673-5196(2023)01-0012-10

耐候钢 Q450NQR1 深熔 GMAW 电弧行为

张明华^{*1,2}, 张乾超¹, 黄秀培¹, 易冉³, 冯存义³, 洪波^{1,2}

(1. 湘潭大学 机械工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 焊接机器人及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411105; 3. 中车株洲车辆有限公司, 湖南 株洲 412003)

摘要: 分别采用深熔 GMAW 和脉冲 MAG 对耐候钢 Q450NQR1 进行了焊接试验, 焊接过程中采集电流、电压及其对应的电弧图像, 观察和分析了电弧形态和焊缝成型, 同时基于图像处理考察了深熔 GMAW 焊接电流和焊接速度对电弧行为、焊缝成型的影响。结果表明: 相比脉冲 MAG, 深熔 GMAW 电弧能量更集中, 热源位置下降, 焊缝熔深增加, 且焊缝几何对称性较好; 随着深熔 GMAW 焊接电流的增加和焊接速度的降低, 电弧面积减小, 边缘周长变短, 质心位置下降, 焊缝熔透深度增加; 焊接电流 315 A、焊接速度 650 mm/min 时焊接电弧最为稳定, 焊缝成型质量也最好。采用优化的焊接工艺完成了 12 mm 厚 Q450NQR1 钢板材的单面焊双面成型, 焊缝成型较好, 接头各区域无软化和脆化现象。

关键词: 深熔 GMAW; 高速摄像; 电弧形态; 图像处理; 焊缝成型

中图分类号: TG442 **文献标志码:** A

Arc behavior of deep penetration GMAW of weathering steel Q450NQR1

ZHANG Ming-hua^{1,2}, ZHANG Qian-chao¹, HUANG Xiu-pei¹, YI Ran³
FENG Cun-yi³, HONG Bo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Key Laboratory of Welding Robot and Application Technology of Hunan Province, Xiangtan 411105, China; 3. China Railway Rolling Stock Corporation Zhuzhou Co. Ltd., Zhuzhou 412003, China)

Abstract: The weathering steel Q450NQR1 was welded separately by using the deep penetration GMAW and pulse MAG. The welding current, voltage and the corresponding arc image during the welding was collected. The relationship between the dynamic behavior of the welding arc and the weld formation was analyzed by processing arc image. At the same time, the influence of the different welding current and welding speed under the deep penetration GMAW on the arc behavior and the weld formation was researched. The results showed that compared with pulsed MAG, deep penetration GMAW has more concentrated arc energy, lower heat source position, increased weld penetration, and good weld geometric symmetry; during deep penetration welding, as the welding current increases and the welding speed decreases, the arc area decreases, the arc edge perimeter becomes shorter, the arc centroid position drops, and the penetration depth of the weld increases; When the welding current is 315 A and welding speed is 650 mm/min, the welding arc is the most stable, and the weld seam forming quality is also the best. The single-side welding and double-side forming of Q450NQR1 steel sheet with 12 mm thickness is completed by the optimized welding process, the weld is well formed, and there is no softening and embrittlement in each area of the joints.

Key words: deep penetration GMAW; high speed camera; arc behavior; image processing; weld formation

收稿日期: 2022-05-11

通讯作者: 张明华(1978-), 女, 甘肃兰州人, 博士, 讲师, 硕士。

Email: mhzhang@xtu.edu.cn

Q450NQR1 钢是一种耐候钢, 具备耐大气腐蚀、强度高、成本低和使用寿命长等特性, 是铁路车辆的主要用钢^[1]。随着铁路车辆向高速、重载的发展需求, 车体所用板材厚度逐渐增加, 为了满足高效

率、高质量且成本低的焊接需求,目前对 Q450NQR1 中厚板焊接主要采用熔化极活性气体保护焊(metal active gas arc welding, MAG),但在实际生产过程中,焊缝中存在熔透不足、气孔和夹杂缺陷等.因此,迫切需要发展新型高效深熔焊方法来满足此类焊接需求.

深熔 GMAW 是在常规 GMAW 基础上通过提高电弧中等离子压力、增大母材熔透深度的一种深熔焊方法^[2-3].Jair Carlos Dutra 等^[2]采用 GMAW 进行深熔焊研究,认为深熔焊时熔池表面小坑的出现是由于电弧位置的下降导致的.吴向阳等^[4]对 SMA490BW 耐候钢进行了深熔焊,指出深熔焊接头组织相比 MAG 更为理想.杨宝林等^[5]对 P355NL1 钢深熔焊接头的力学性能进行了研究,提到深熔焊接头力学性能优于 MAG.兰志宇等^[6]进行了深熔 GMAW 在液压支架上应用的可行性研究,认为采用深熔焊能有效提高焊接效率.目前,深熔 GMAW 在中厚板的焊接应用中已取得了良好的表现,但对于其焊接物理过程的研究还比较少,鲜有对其焊接电弧行为的深入研究.高速摄像焊接电弧和电信号多信息同步采集结合 MATLAB 图像处理,有利于焊接电弧物理过程的研究^[7-8],李桓等^[7]建立了适合拍摄熔化极电弧焊熔滴过渡的高速摄像系统,对焊接过程电弧形态的高速摄像技术有较高的参考价值.杨运强等^[9]利用多路计算机数据采集方法配合相应传感器,同步采集了与电弧形态相关的焊接电流、电弧电压等信息.郭波等^[10]提出了 Canny 算子电弧特征提取的改进算法,有效地对焊接电弧进行边缘识别和特征提取.于英飞等^[11]选取传统电弧图像处理算法构建了具有良好抗干扰性的电弧图像批处理程序.电弧行为是所有电弧焊接的重要因素,增进对电弧类型和电弧固有特性的了解,能够帮助提高焊接预测和焊接质量,并降低焊接成本和生产时间^[12-13].

本文采用自行搭建的焊接电弧图像及电信号同步采集试验平台,通过图像处理程序对深熔 GMAW 电弧形态进行定性和定量表征,分析了电弧动态变化和焊缝成型的对应关系.

1 试验方法

深熔 GMAW 焊接电源采用一元化控制的全数字化 EWM-ForceArc 超威弧焊机, MAG 焊使用 PanasonicYD-350GLW 型焊机.电弧图像拍摄使用德国 CP80-3-M-540 高速相机,镜头前端安装型号为 FS04-BP80820、中心波长为 460 nm 的滤波片,拍摄帧频为 10 kps(千帧/秒),曝光时间 30 μs.焊接

过程中霍尔传感器和电压收集器同时触发,将焊接电流、电弧电压数据传输到 NI 数据采集卡,采集频率为 50 kHz;同时采用自由触发模式同步拍摄电弧形态,实现高速电弧图像拍摄的过程中同步记录焊接电流、电压信号,试验系统如图 1 所示.

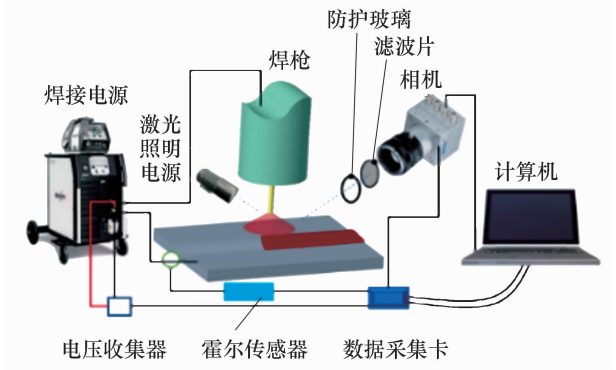


图 1 试验系统

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

母材为 12 mm 厚的 Q450NQR1 耐候钢,试板尺寸为 600 mm×150 mm×12 mm,填充材料为直径 1.2 mm 的 TH550-NQ-Ⅱ 焊丝,母材和焊丝的化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2.

表 1 母材和焊丝的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Q450NQR1 steel and TH550-NQ-Ⅱ welding wire

材料	C	Si	Mn	P	S
Q450NQR1	0.053	0.22	1.08	0.018	0.006
TH550-NQ-Ⅱ 焊丝	0.06	0.40	1.25	0.013	0.007
材料	Cu	Cr	Ni	Fe	
Q450NQR1	0.215	0.52	0.143	Bal.	
TH550-NQ-Ⅱ 焊丝	0.242	0.47	0.314	Bal.	

表 2 母材和焊丝熔敷金属的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of base metal and wire cladding metal

材料	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	冲击吸收功 $A_{kv}(-40\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
Q450NQR1	≥450	≥550	≥20	≥60
焊丝熔敷金属	520	625	26	80

深熔 GMAW 和脉冲 MAG 平板堆焊试验使用焊接工艺参数见表 3,对深熔 GMAW 采用控制变量法,变量为焊接电流和焊接速度,焊后采用 KEY-ENCE 超景深三维显微系统进行焊缝成型观察并测量焊缝成型参数,焊接采用工艺参数见表 4.

同时采用表 3 所列优化的深熔 GMAW 焊接工艺,进行 Q450NQR1 板材对接焊,焊后进行焊缝形貌观察,并采用 MICRO-586 型显微硬度计测量焊接接头各区域显微硬度,试验力 200 N,加载时间 10 s.

表 3 不同焊接模式的焊接工艺参数

Tab. 3 Welding parameters used in different welding modes

焊接方法	焊接电流		焊接电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	脉冲频率 f/Hz	保护气体类型	保护气体流量 $q_c/(L \cdot min^{-1})$
	基值 I_b/A	峰值 I_p/A					
脉冲 MAG	320	320	34	500	290	80%Ar+20%CO ₂	20
深熔 GMAW	320	320	33	500	400	80%Ar+20%CO ₂	20
深熔 GMAW(优化)	290	365	32	650	400	80%Ar+20%CO ₂	20

表 4 深熔 GMAW 控制变量法的焊接工艺参数

Tab. 4 Welding parameters used in the deep penetration GMAW controlled variable method

参数	数值
焊接电流(设定值)/A	285、295、305、315、325、335(焊接速度 500 mm/min)
焊接速度/(mm · min ⁻¹)	200、350、500、650、800、950(焊接电流 315 A)
保护气体类型	80%Ar+20%CO ₂
保护气体流量/(L · min ⁻¹)	20
脉冲占空比/%	20

为了定性和定量地表征电弧形态,所有的图像采用 MATLAB 软件处理,对原始图像进行二值变换(采用 im2bw() 功能)、降噪处理(采用 imdilate() 和 imerode())及边缘特征提取^[14] (采用 region

props() 算法) 等,图像处理过程如图 2 所示。

通过图 2 图像处理后能够获得电弧面积、电弧边缘周长和电弧质心坐标(x_c, y_c)等特征参数的像素值。

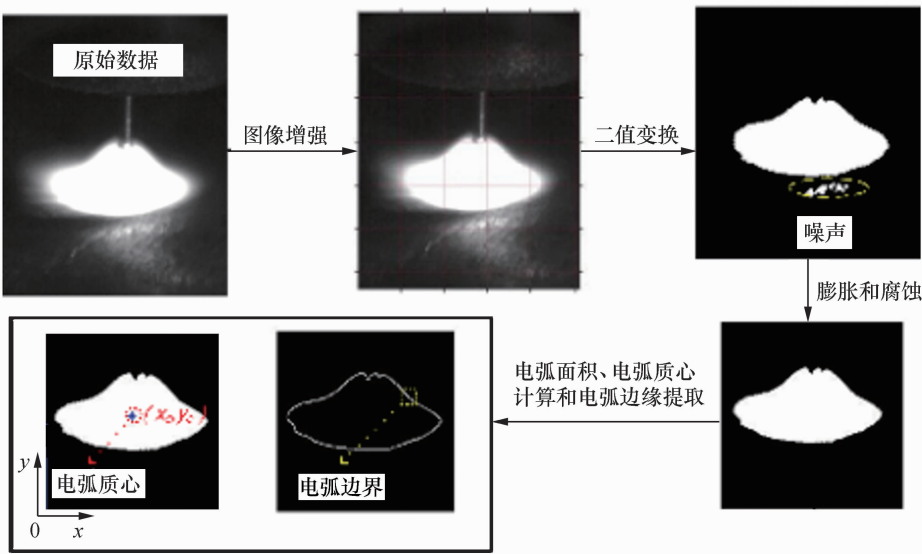


图 2 图像算法提取焊接电弧区域流程图

Fig. 2 Flow chart of the image algorithm to extract welding arc area

2 试验结果及讨论

2.1 不同焊接模式的电弧形态及焊缝成型

在相同的焊接工艺下,使用脉冲 MAG 和深熔 GMAW 进行焊接试验,电弧形态图像及电流电压波形如图 3 所示。

从图 3 可以看出,脉冲 MAG 在焊接电流峰值阶段,电弧燃烧呈“钟罩”形,在电流基值阶段电弧呈“圆柱”形,突变阶段电弧形态不规则,深熔 GMAW

电弧形态在整个焊接过程中呈“圆锥”形,相比脉冲 MAG 热源位置明显下降,产生“潜弧现象”。如图 3a 所示,脉冲 MAG 焊接过程中电流、电压曲线波动稳定,一个脉冲周期约为 3 500 μs,其中基值阶段约为 400 μs,大部分处于电流、电压突变阶段,不规则的电弧形态使熔滴过渡发生了偏离,因此产生了飞溅。从图 3b 可以看出,深熔 GMAW 焊接电流波形与脉冲 MAG 有较大差别,一个脉冲周期约为 2 500 μs,大部分时间处于焊接电流基值阶段,且基值阶段焊接电流较为稳定,焊接过程中也无飞溅产生。

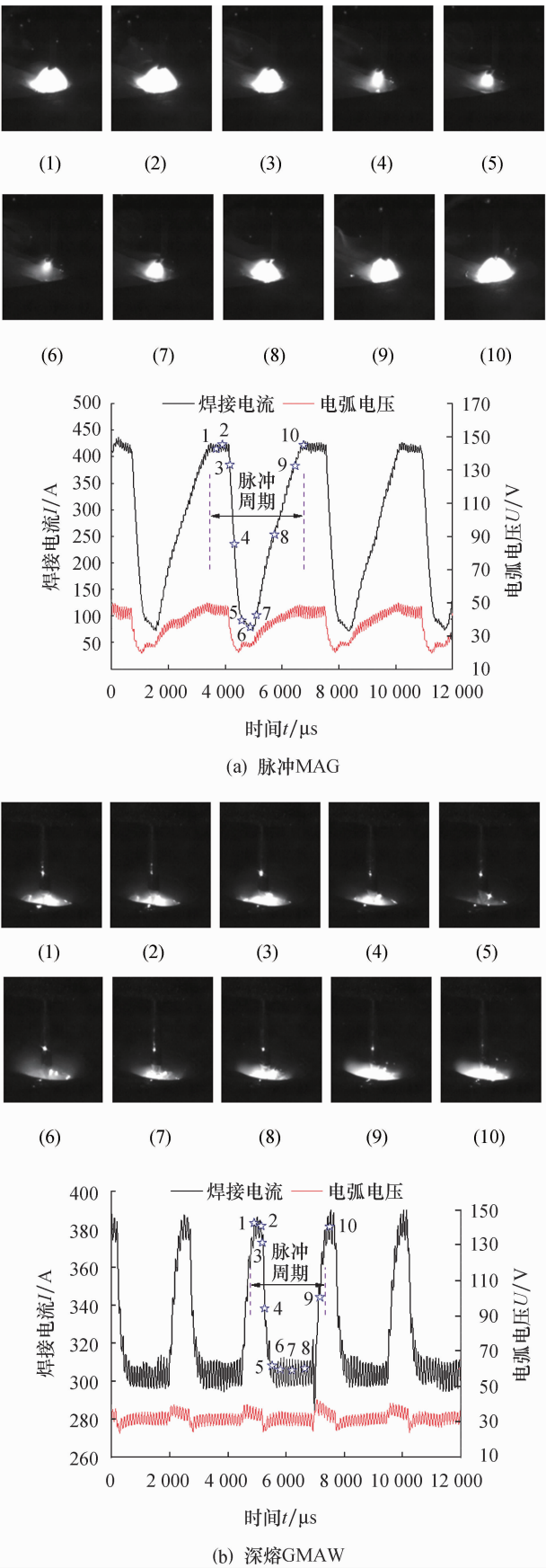


图 3 不同焊接模式的电弧形态及对应焊接电流电压波形
Fig. 3 Arc shape and corresponding welding current and welding voltage waveforms of different welding modes

图 4 为不同焊接模式的焊缝成型及参数测量,从图 4 可以看出,脉冲 MAG 焊缝出现了咬边和气孔,深熔 GMAW 焊缝熔合线平滑,焊缝几何对称,无明显缺陷,同时深熔 GMAW 焊缝熔深大于脉冲 MAG,焊缝余高小于脉冲 MAG.

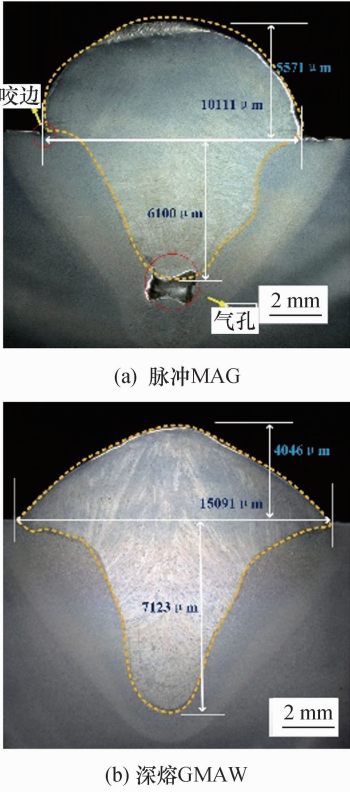


图 4 不同焊接模式的焊缝成型及参数测量
Fig. 4 Welding forming and parameter measurement of different welding modes

焊接电弧作为焊接过程的热源和力源,确定了作用在熔滴上的热和力.如图 5 所示为熔滴受力示意图,由图 5a 可知,焊丝端部熔化金属受力主要包括等离子流力 F_p 、熔化金属自重 G 、表面张力 F_s 、电弧电磁力 F_e ,还包含在电弧电磁力 F_e 的作用下产生垂直于焊丝方向的颈缩力^[15-17].焊接过程中,等离子流力 F_p 和重力 G 对熔滴过渡起促进作用,表

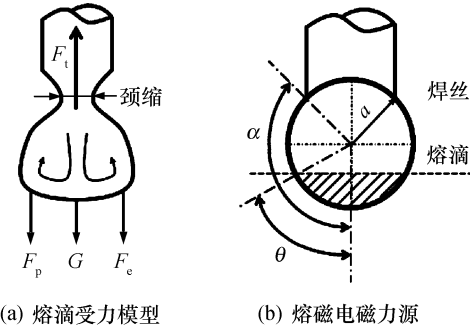


图 5 熔滴受力示意图
Fig. 5 Schematic diagram of droplet force

面张力 F_t 趋于将熔化金属吸附到焊丝端部,对熔滴过渡起阻碍作用,电弧电磁力 F_e 对熔滴过渡起促进或阻碍作用,取决于电弧弧根面积与最大熔滴横截面积的比值^[16]. 当比值大于 1 时,电弧电磁力 F_e 对熔滴过渡起促进作用;当比值小于 1 时,电弧电磁力 F_e 对熔滴过渡起阻碍作用. 熔滴受力可以表达为^[18]

$$F = G + F_e + F_p - F_t \tag{1}$$

熔滴所受重力 G 、等离子流力 F_p 和表面张力 F_t 可以分别表述为^[15, 18-19]

$$G = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g \tag{2}$$

$$F_p = \pi l v^2 a^2 \tag{3}$$

$$F_t = 2 \pi a \sigma \tag{4}$$

式中: a 为熔滴半径; ρ 为材料密度; g 为重力加速度; l 为保护气体流量; v 为气体流动速率; σ 为表面张力系数.

假定焊接电流从图 5b 所示阴影面积(有效面积)流向弧柱,作用于熔滴的电弧电磁力可以表述为^[20]

$$F_e = I^2 \left[\log \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i+2} \sin^{2i} \theta \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \tag{5}$$

其中: I 为焊接电流; i 取 1 到 n 的正整数; α 和 θ 如图 5b 所示的熔滴受力角.

从式(5)可以得出,电弧电磁力 F_e 和焊接电流 I 的平方成正比,采用大电流焊接时,电弧电磁力 F_e 为熔滴过渡的主要作用力. 焊接过程中熔滴过渡主要发生在焊接电流基值阶段,脉冲 MAG 焊时,电流基值阶段电弧形态为圆柱形,且焊接电弧在焊丝端部熔化金属下方燃烧,电弧电磁力 F_e 对熔滴过渡起阻碍作用,熔滴在电弧电磁力 F_e 和表面张力 F_t 的综合作用下不断长大,最终在焊接电流突变阶段,焊丝端部熔化金属产生颈缩,熔滴脱离焊丝,由于处于焊接电流突变阶段,电弧形态较为不规则,导致了焊接过程中飞溅的发生,同时熔化金属在焊缝表面堆积,增加了焊缝余高. 深熔 GMAW 焊时,电弧形态为“圆锥”形,电弧电磁力 F_e 对熔滴过渡起促进作用,熔滴过渡发生时焊丝端部成“铅笔尖”状,熔滴尺寸较小,高速熔滴冲击熔池底部获得良好的焊缝根部成型.

2.2 焊接参数对深熔 GMAW 电弧形态的影响

2.2.1 焊接电流对深熔 GMAW 电弧形态的影响

图 6 为不同焊接电流的电弧形态图,从图 6 可以看出,深熔 GMAW 在焊接电流峰值阶段电弧燃

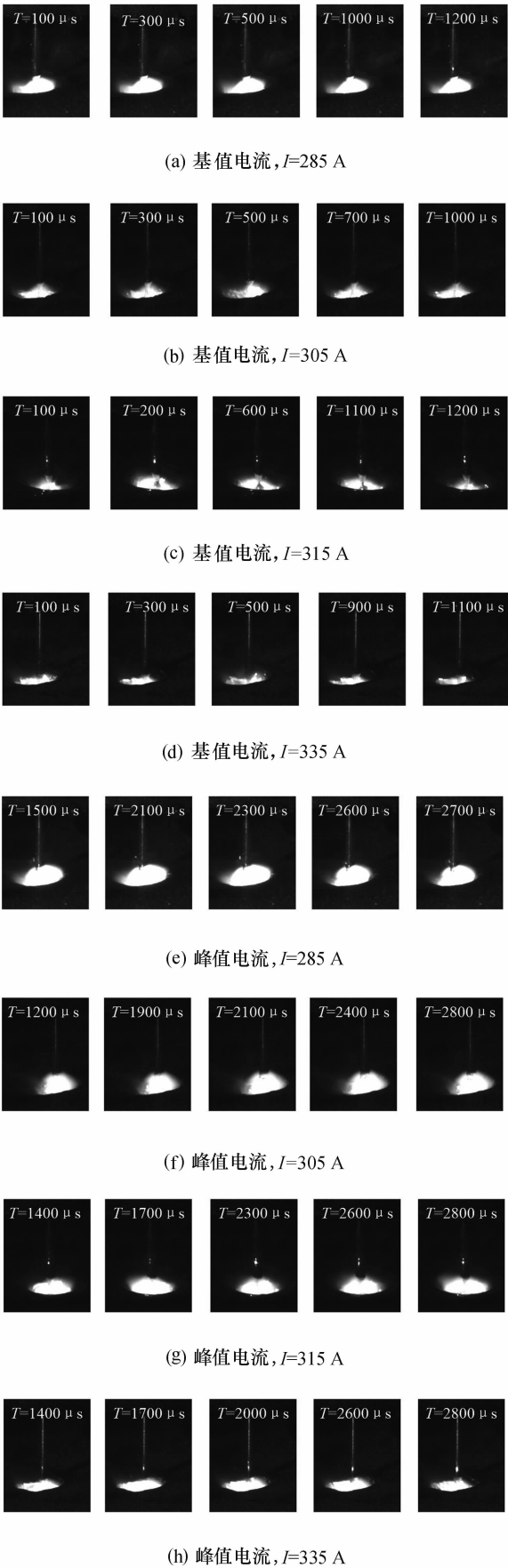


图 6 不同焊接电流的电弧形态
Fig. 6 Arc shape under the different welding currents

烧,在电流基值阶段电弧持续燃烧,但电弧面积明显减小,焊丝端部成“铅笔尖”状,焊丝熔化金属不断过渡到熔池。

MATLAB 图像处理的结果如图 7 所示,从图 7a、b 可以看出,焊接电流由 280 A 增大到 335 A 过程中,电弧面积从 35 mm² 减小到 5 mm²,电弧边缘周长从 27 mm 减小到 12 mm,同时可以看出,随着焊接电流的增加,电弧面积和电弧边缘周长的波动程度降低。焊接电流的增加产生的电弧面积及电弧边缘周长的减小,是由于电弧收缩程度增加的结果,同时焊接电弧的收缩增加了电弧的方向性和能量集中度,使焊接电弧稳定性增加,但当焊接电流增大到 315 A 后此效果降低,可见,由于电弧收缩存在一定限度,在合理的区间内增大焊接电流能够提高电弧的稳定性。从图 7c、d 可以看出,随着焊接电流的改变,电弧质心在 x 轴方向波动了 4.5 mm,在 y 轴方向波动了 2.5 mm。通过电弧形态参数曲线计算结果显示,焊接电流 285、305、315、335 A 在 11 ms 内的电弧面积的变异系数为 30%、24%、26%、23%,电弧质心 x 轴坐标的变异系数为 7%、3%、3%、4%,电弧质心 y 轴坐标的变异系数为 1.1%、0.5%、0.5%、0.5%,可以得出焊接电弧在焊接电流 315 A 时最为稳定,焊接过程中焊接电弧主要沿 x 轴方向(焊接方向)产生电弧偏离。由于焊接电弧受到电弧电磁力的作用,使电弧有向中心收缩的趋势,从而产生了电弧挺度,同时受到电弧等离子流力的作用产生了向下的电弧冲击力,因此焊接电弧在 y 轴方向(焊丝平行方向)电弧电磁力方向向下,受到焊丝端部和熔池表面约束的作用,电弧可波动的空间很小,而在 x 轴方向受到轻微的吸引,电弧发生波动,且可波动的空间较大。深熔 GMAW 焊时,随着焊接电流的增加,电弧电磁力增大,通过电弧挖掘作用,使得在熔池表面形成小坑,同时焊接热源位置的降低,使得电弧大部潜入熔池,电弧在 x 轴方向将受到熔池四壁的约束,从而提高了焊接电弧的稳定性。

2.2.2 焊接速度对深熔 GMAW 电弧形态的影响

图 8 为不同焊接速度的电弧形态图,从图 8 可以看出,焊接速度较小为 200 mm/min 时,在电流基值阶段,焊接电弧完全潜入熔池,在电流峰值阶段,电弧燃烧区域扩展,电弧呈“圆锥”形态。随着焊接电流的增加,热源位置逐渐抬升,焊接速度大于 500 mm/min 后,电弧在峰值阶段呈“钟罩”形态。电弧形态的改变是由于电弧的位置和收缩程度改变引起的,在低焊接速度时,弧长短,且熔池熔化金属

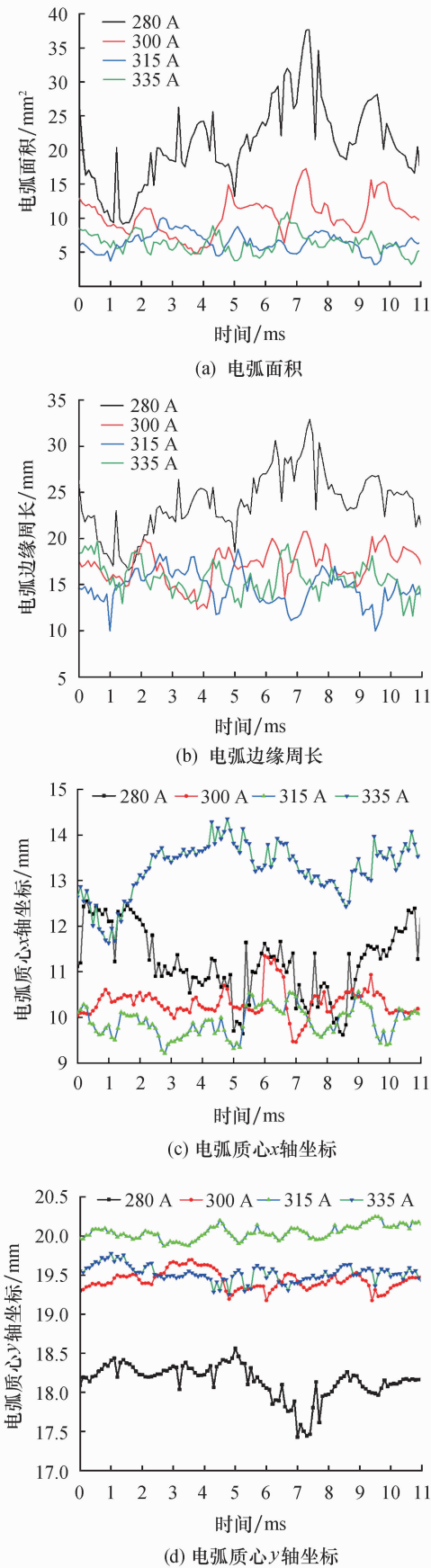


图 7 不同焊接电流的电弧形态参数
Fig. 7 Welding arc morphological parameters for different welding currents

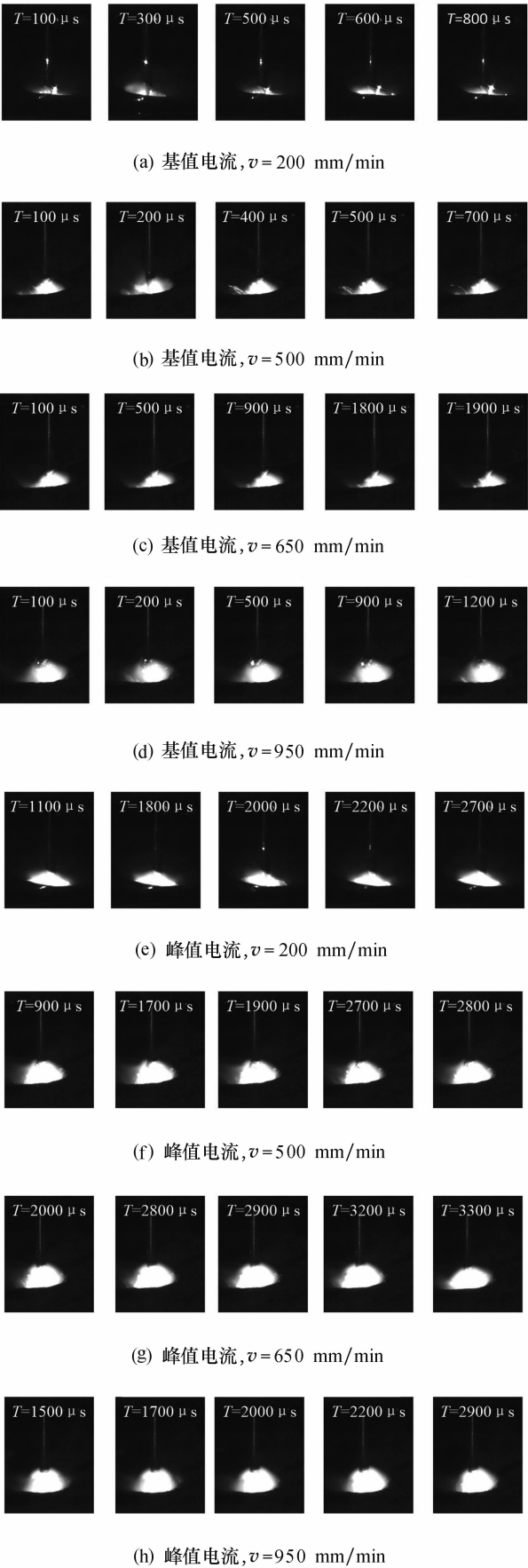


图 8 不同焊接速度的电弧形态

Fig. 8 Arc shape under the different welding speeds

较多,电弧在熔池下方燃烧,表面露出部分电弧形似“圆锥”形态,在大焊接速度时熔池熔化金属量较少,电弧在熔池上部燃烧,呈现“钟罩”形态。

MATLAB 计算不同焊接速度下的电弧形态参数结果如图 9 所示,从图 9a、b 可以得出,焊接电弧的电弧面积、电弧边缘周长随着焊接速度的增加而增大,焊接速度从 200 mm/min 增大到 950 mm/min 的过程中,电弧面积从 5 mm² 逐渐增大到了 27 mm²,电弧边缘周长从 3 mm 增大到了 23 mm,是由于焊接速度增大伴随着焊接电弧收缩程度的降低所致,焊接速度变化,焊接电弧同样存在收缩限度,在焊接速度增大到 500 mm/min 后电弧收缩的降低程度开始减小。从图 9c、d 可以看出,电弧质心 x 轴坐标的离散程度明显大于电弧质心 y 轴坐标,随焊接速度变化波动量分别为 3、2 mm,以及根据电弧 y 轴质心坐标变化,可得出热源位置在焊接速度增大的过程中上升了 2 mm。通过对电弧形态参数曲线进行数据统计得出,焊接速度 200、500、650、950 mm/min 时,在 11 ms 内焊接电弧的电弧面积变异系数分别为 23%、30%、20.1%、24%,电弧质心 x 轴坐标的变异系数分别为 6.8%、5.3%、2.3%、2.5%,电弧质心 y 轴坐标的变异系数分别为 0.9%、0.5%、1.3%、0.7%,可以得出在焊接电流 650 mm/min 时焊接电弧最为稳定。

2.3 焊接参数对深熔 GMAW 焊缝成型的影响

2.3.1 焊接电流对深熔 GMAW 焊缝成型的影响

图 10 为不同焊接电流的焊缝成型图,从图 10 可以看出,随着电流的增加,熔深增加,在焊接电流 315 A 时增速最大,焊接电弧随着焊接电流增加,发生电弧面积、电弧边缘周长减小、热源位置下降的变化,说明随着电流增大,电弧收缩,且电弧质心位置下降。焊接过程中,在表面张力的作用下熔化金属向熔池后方移动。由于熔池前端处于电弧正下方,热量输入较大,温度较高,熔池后方金属已经经过冷却温度较前方低,Q450NQR1 钢的表面张力与温度呈负相关,所以熔池后方表面张力大,牵引熔化金属流向后方。深熔 GMAW 焊时,增大焊接电流,增强的电弧挖掘作用使熔池表面产生凹坑,热源位置降低使得电弧潜入熔池,熔池四壁将对焊接电弧产生约束作用,在约束力和电弧力等综合作用下使电弧产生旋转,在旋转电弧的驱动下熔池熔化金属也发生旋转^[21],产生向外的离心力,在离心的作用下熔池熔化金属加速流向四周,露出固态金属,从而增加了焊缝熔深。离心作用和电弧挖掘作用平衡了重力及表面张力,在焊接过程中使小坑能够维持,焊丝端部熔

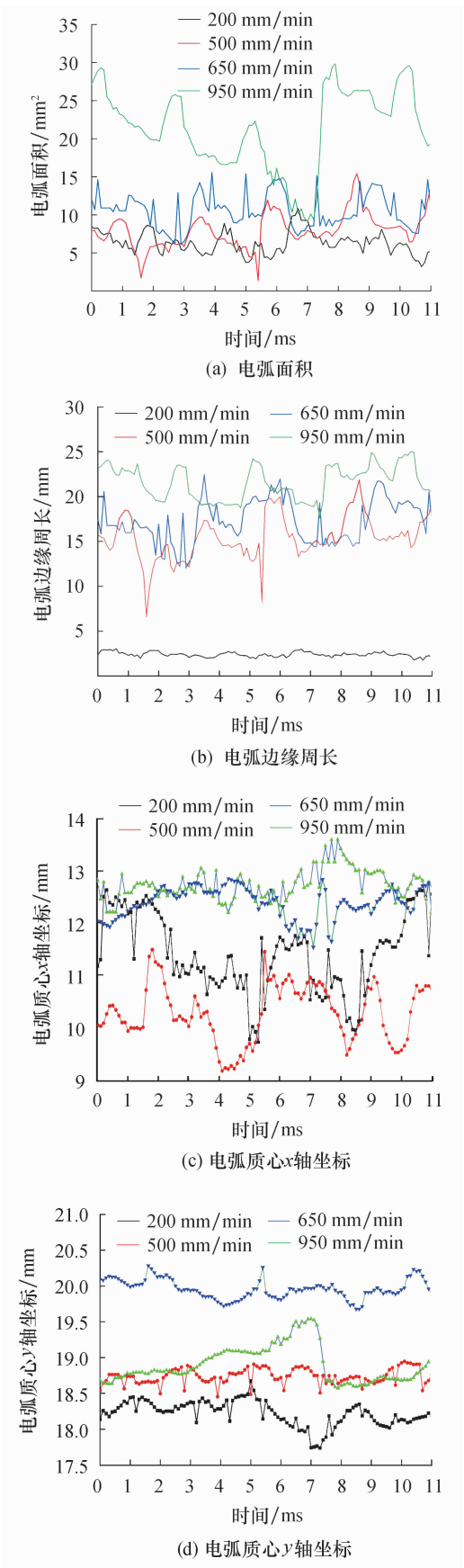


图 9 不同焊接速度电弧形态参数

Fig. 9 Welding arc morphological parameters for different welding speeds

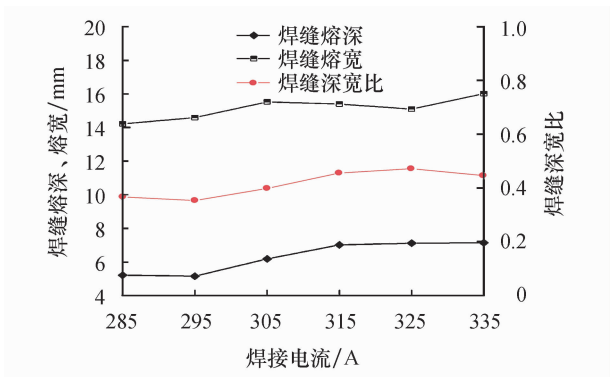


图 10 不同焊接电流的焊缝成型

Fig. 10 Welding forming under the different welding currents

化金属以稳定的射流方式过渡到熔池. 但在焊接电流逐渐增大到大于 315 A 后此效果减弱, 是由于焊接电弧收缩达到较大程度, 热源位置也降低到了较低位置, 在此基础上增大焊接电流, 产生熔深增加的效果较小.

图 11 为深熔 GMAW 不同焊接电流下的接头截面形貌图, 从图 11 焊缝横截面形貌可以看出, 焊接电流在 295 A 以后焊缝几何对称性较高, 但是电流增加到较大程度时 (≥ 325 A), 熔合线平滑程度降低, 是由于电流增加, 电弧波动加剧偏离熔池中心, 熔池四壁受到电弧冲击, 同时产生的金属蒸汽反冲压力造成保护气体紊乱, 焊缝由此产生了气孔, 在焊接电流 315 A 时焊缝成型最好.

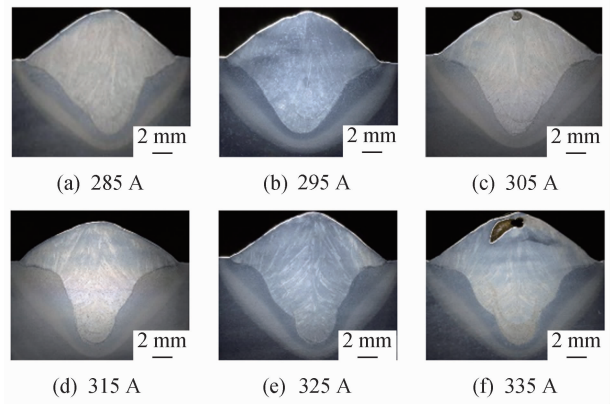


图 11 深熔 GMAW 不同焊接电流下的接头截面形貌

Fig. 11 The cross-sectional morphology of deep penetration GMAW joints at different welding currents

2.3.2 焊接速度对深熔 GMAW 焊缝成型的影响

图 12 为不同焊接速度的焊缝成型图, 从图 12 可以看出, 深熔 GMAW 焊接速度对焊缝熔深、熔宽都有较大影响, 深宽比的变化不大, 说明随着焊接速度的增加, 单位面积的热输入保持恒定, 随着焊接速度的增加, 焊缝熔深、熔宽减小, 在 500 mm/min 后下降速度增势明显.

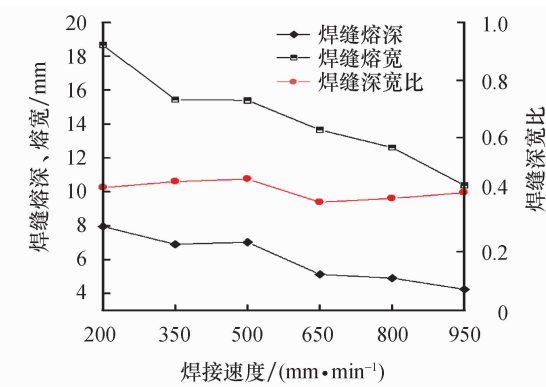


图 12 不同焊接速度的焊缝成型

Fig. 12 Welding forming at different welding speeds

图 13 为深熔 GMAW 不同焊接速度下的接头截面形貌图,从图 13 可以看出,在焊接速度 350、500 mm/min 时,明显观察到焊缝横截面有气孔产生,在焊接速度大于 800 mm/min 时,可以看出熔合线的平滑程度和焊缝左右的对称性降低.这是由于在焊接速度较低时大量金属蒸汽产生,金属蒸汽反冲压力使焊丝熔化金属在焊丝端部堆积产生大滴过渡,且造成保护气体流动紊乱,导致电弧形态较为不规则,焊接过程中有飞溅和气孔等缺陷产生.焊接速度过大时,电弧挺度难以控制电弧在固定位置加热母材,电弧位置发生波动,冲击熔池四壁,造成焊缝几何对称性下降和熔合线平滑程度降低.在焊接速度 650 mm/min 时焊缝成型质量最好.

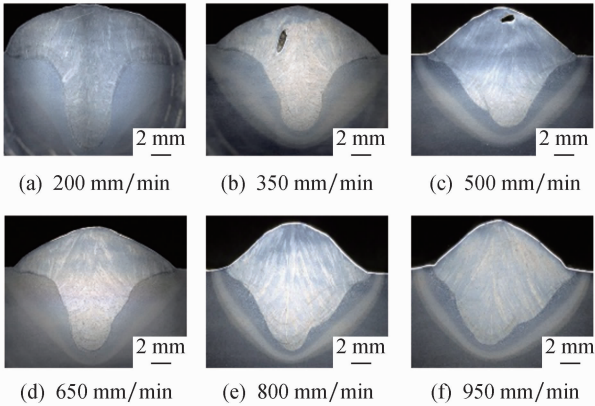


图 13 深熔 GMAW 不同焊接速度下的接头截面形貌

Fig. 13 The cross-sectional morphology of deep penetration GMAW joints at different welding speeds

上述方法优化了深熔 GMAW 焊接工艺,采用优化的工艺对 12 mm 厚 Q450NQR1 板材进行平板对接焊,开 V 形坡口,坡口角度为 60°,钝边厚度 3 mm,根部间隙 1 mm,两道焊成.焊接接头各区域显微硬度如图 14 所示,从图中可以看出,深熔 GMAW 对接焊接头焊缝成型质量较好,焊缝平均

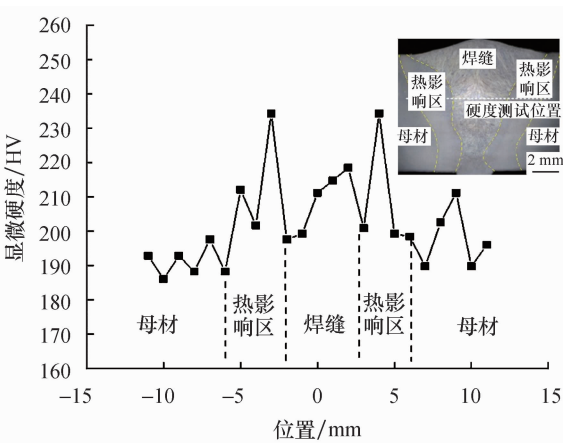


图 14 深熔 GMAW 焊接接头的显微硬度

Fig. 14 Microhardness of deep penetration GMAW welded joints

硬度 207 HV,热影响区平均硬度约为 214 HV,较母材 188 HV 有所提高,焊缝及热影响区未出现软化及脆化现象.

3 结论

1) 深熔 GMAW 较脉冲 MAG 电弧形态存在较大差别,其“圆锥”形电弧收缩程度高,能量集中,且热源位置低,发生“潜弧现象”,同时焊缝熔深增加,焊缝成型得到改善.

2) 随着焊接电流增加,深熔 GMAW 焊接电弧面积减小,边缘周长变短,质心位置下降,适当增大焊接电流能够提高焊接电弧的稳定性,在焊接电流 315 A 时,焊接电弧稳定性最好;随着焊接速度增加,深熔 GMAW 焊接电弧面积增加,边缘周长变长,质心位置上升,焊接速度 650 mm/min 时,焊接电弧最为稳定.

3) 深熔 GMAW 焊缝成型和焊接电弧形态存在对应关系,焊接电弧随焊接参数变化.焊接电流提高,电弧收缩程度增加,焊缝熔深增加,焊接电弧波动程度较大时,焊缝中存在气孔,且对称性下降.在焊接电流 315 A,焊接速度 650 mm/min 时,焊接电弧最为稳定,对应的焊缝成型质量也最好.

4) 采用优化的深熔 GMAW 焊接工艺,可以完成 Q450NQR1 板材的单面焊双面成型,且焊缝成型较好.

参考文献:

[1] ZHANG M, WU S, ZHANG Q, et al. Corrosion behavior of weathering steel Q450NQR1 and welded metal using flux-cored wire in 0.01 mol/L NaHSO₃ solution [J]. Int J Electrochem Sci, 2020, 15: 8156-8170.

[2] DUTRA J C, GONCALVES E, SILVA R H, et al. High-per-

formance GMAW process for deep penetration applications [J]. *Welding in the World*, 2020, 64(6): 999-1009.

[3] KAH P, SUORANTA R, MARTIKAINEN J. Advanced gas metal arc welding processes [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67 (1/2/3/4): 655-674.

[4] 吴向阳, 田仁勇, 张志毅, 等. SMA490BW 耐候钢深熔焊工艺及接头的组织和性能 [J]. *电焊机*, 2020, 50(10): 65-69.

[5] 杨宝林, 方孝钟, 王 鑫, 等. P355NL1 钢深熔焊与 MAG 焊接头力学性能对比研究 [J]. *焊接技术*, 2019, 48(5): 27-30.

[6] 兰志宇, 李臣阳, 赵 旭, 等. 深熔焊技术在液压支架上的应用 [J]. *煤矿机械*, 2020, 41(9): 95-97.

[7] 李 桓, 李国华, 李俊岳, 等. 熔化极电弧焊熔滴过渡过程的高速摄影 [J]. *中国机械工程*, 2002, 13(11): 12-16.

[8] LIU Y P, SUN X, WEN Z H. The application of MATLAB in welding image processing [C] // *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2012, 201: 300-303.

[9] 杨运强, 李 桓, 李俊岳, 等. 熔化极电弧焊多信息同步高速摄影 [J]. *焊接学报*, 2002(6): 29-32.

[10] 郭 波, 石永华, 易耀勇. 基于电弧形态的熔滴过渡形式识别 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(11): 27-31.

[11] 于英飞, 朱志明, 孙博文, 等. 焊接电弧图像的边缘检测及其批处理算法 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(11): 17-21.

[12] SHIGETA M, IKEDA T, TANAKA M, *et al.* Qualitative and quantitative analyses of arc characteristics in SMAW [J]. *Welding in the World*, 2016, 60(2): 355-361.

[13] KAH P, LATIFI H, SUORANTA R, *et al.* Usability of arc types in industrial welding [J]. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2014, 9(1): 1-12.

[14] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986(6): 679-698.

[15] AMSON J C. Lorentz force in the molten tip of an arc electrode [J]. *British Journal of Applied Physics*, 1965, 16(8): 1169-1179.

[16] 刘西洋, 杨森森, 徐 锴, 等. 激光介入不锈钢自保护药芯焊丝 MAG 电弧堆焊熔滴受力分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(9): 65-70.

[17] 樊 丁, 马 欣, 武利建, 等. 外加轴向磁场对短路过渡的影响 [J]. *兰州理工大学学报*, 2021, 47(1): 22-27.

[18] 李士凯, 陈茂爱, 武传松. 脉冲 GMAW 熔滴过渡动态过程的解析模型 [J]. *焊接学报*, 2004, 25(2): 47-51.

[19] ZHAO Y, SHI X, YAN K, *et al.* Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 262: 382-391.

[20] 安藤宏平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象 [M]. 施雨湘, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[21] WU C S, YANG F, GAO J. Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230(1): 188-193.