

X2CrNi18-7不锈钢CMT焊接参数 对焊缝成形的影响

张亚¹, 林皓¹, 刘晨¹, 梁连杰¹, 王春明²

1. 中车南京浦镇车辆有限公司 江苏南京 210031

2. 华中科技大学 湖北武汉 430000

摘要: 以4mm厚X2CrNi18-7不锈钢CMT堆焊试验为对象, 探究焊接速度、送丝速度、弧长修正、焊接方向及气体流量对焊缝外观的影响, 并通过具体的单一变量试验来分析各个参数对焊接过程及焊缝成形的影响。

关键词: X2CrNi18-7不锈钢; CMT焊接; 焊接参数

Effect of CMT welding parameters on weld formation of X2CrNi18-7 stainless steel

ZHANG Ya¹, LIN Hao¹, LIU Chen¹, LIANG Lianjie¹, WANG Chunming²

1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, Jiangsu, China

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, Hubei, China

Abstract: 4mm thick X2CrNi18-7 stainless steel CMT weld overlay test as the object, to explore the welding speed, wire feeding speed, arc length correction, welding direction and gas flow on the appearance of the weld, and through a specific single-variable test discussion to analyze the impact of each parameter on the welding process and weld shaping.

Keywords: X2CrNi18-7 stainless steel; CMT welding; welding parameters

1 序言

近年来, 我国轨道交通发展迅速。早期制造轨道车辆车体所用材料大都为普通碳素钢, 现在已向多品种、多元化等方面迅速发展, 例如高强度、铝合金、不锈钢等材料品种。不锈钢车体与铝合金车体相比, 具有安全系数高、维修简便、成本较低等优点; 与普通碳素钢车体相比, 具有重量更小、服役时间更长、焊接工艺相对简单、不需要复杂涂装, 以及维护更简便等优点。因此, 不锈钢已成为轨道车辆车体材料的优选之一^[1-5]。

不锈钢轨道车辆车体主要采用的焊接工艺包

括MIG/MAG气体保护焊和电阻点焊, 以及一些近年来的新兴技术, 如搅拌摩擦焊、激光焊等焊接工艺。CMT技术是在MIG/MAG基础上发展起来的一种新型低飞溅、低热输入焊接方法。它改善了传统熔化焊飞溅大、形貌差的问题, 且具有良好的搭桥能力^[6, 7]。CMT焊具有电弧更稳定、引弧快速可靠、焊缝形貌均匀一致、质量重复精度高、热输入低及变形小等优点。CMT焊作为一种适合不锈钢薄板焊接的新技术, 具有焊接质量好, 成本适中等特点, 非常适合不锈钢车体中的手工焊, 并可以替代部分自动焊技术。

2 焊接材料及焊接设备

试验采用4mm厚奥氏体不锈钢为研究对象，其牌号为X2CrNiN18-7，供货状态为MT。焊接试板尺寸为300mm×300mm×4mm，选用直径为1.0mm

的308LSi不锈钢焊丝，保护气体为99.999%高纯氩气，气体流量为22~24L/min。堆焊试验所用设备为CMT-5000系列焊机，带有导航式RCU5000i手持式遥控器。试验材料和焊接材料的化学成分见表1。

表1 奥氏体不锈钢及其焊丝的化学成分（质量分数）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo
X2CrNiN18-7 (SUS301LN)	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.015	16.5~18.5	9.0~8.0	0.1~0.2	0.8~1.0
G19 9 L Si (308LSi)	≤0.03	0.65~1.2	1.0~2.5	≤0.03	≤0.03	19~21	9.0~11.0	—	≤0.5

3 焊接参数

3.1 焊接速度的影响

为了探究焊接速度对焊缝外观的影响，在干伸长、弧长修正、焊接电流及电弧电压不变的情况下改变焊接速度，由0.3m/min逐渐升高到1.2m/min。本次试验观察不同焊接速度对焊缝表面形貌和成形的影响，观察项目包括焊接过程、焊缝表面及截面形貌，具体焊接速度见表2。

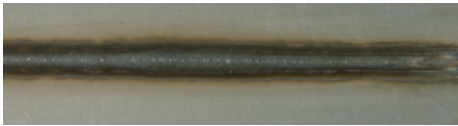
表2 焊接速度 (m/min)

编号	1	2	3	4	5	6	7
焊接速度	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2

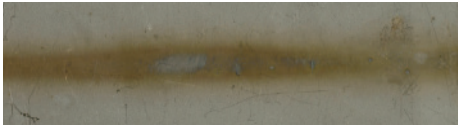
注：其他固定焊接参数为：送丝速度5m/min，焊接电流

146A，电弧电压12.1V，干伸长12mm、弧长修正0。

(1) 焊接速度对焊缝表面形貌的影响 不同焊接速度下焊缝的正背面形貌如图1所示。从图1可明显看出，当其他参数不变，焊接速度增大时，焊缝的正面宽度逐渐减小，且焊缝背面的焊痕呈宽度减小、颜色变浅的趋势。这是由于在送丝速度不变的情况下，随着焊接速度的增加，电弧在材料表面的移动速度增大，焊接热输入变小，焊丝和基板吸收的热量也随之减少；当送丝速度不变时，增加焊接速度，则单位焊缝长度上焊丝的熔敷量降低。此外，焊接速度在0.3~0.75m/min时，焊缝较直、表面平滑；而焊接速度在0.9~1.2m/min时，焊缝表面较为粗糙且有弯曲。因此可认为，焊接速度较低时，熔敷量较大，且电弧燃烧稳定，不发生摆动；焊接速度较大时，由于熔敷量较少，所以引起焊缝熔敷状况的差别，且电弧燃烧不稳定，极易发生摆动和断续焊缝，相对于较低速度焊接时容易发生电弧失稳现象。当焊接速度为1.2m/min时，起弧位置有熔滴未能铺展开来的现象，这是因为单位长度的



a) 0.3m/min (正面)



b) 0.3m/min (背面)



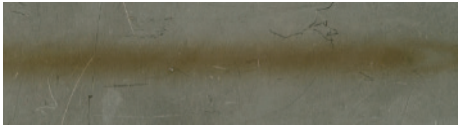
c) 0.75m/min (正面)



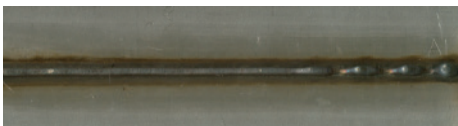
d) 0.75m/min (背面)



e) 0.9m/min (正面)



f) 0.9m/min (背面)



g) 1.2m/min (正面)



h) 1.2m/min (背面)

图1 不同焊接速度下焊缝的正背面形貌

焊缝焊丝填充量小和起弧位置温度较低。

(2) 焊接速度对焊缝成形的影响 不同焊接速度下焊缝的横截面如图2所示。由图2可知,从焊缝横截面宏观形貌定性来看,随着焊接速度的增加,焊缝横截面形貌由平滑的近似圆弧状逐渐变成高耸的近似矩形状,熔深由明显可见变为肉眼几乎不

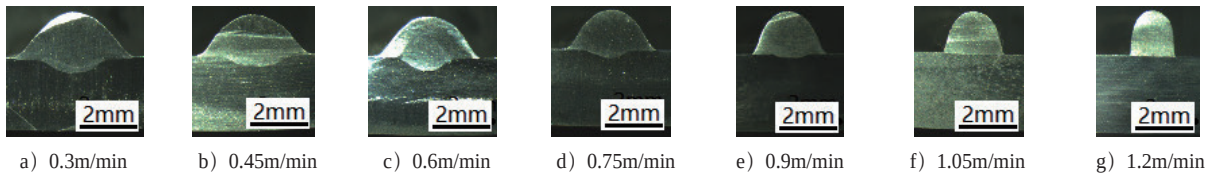
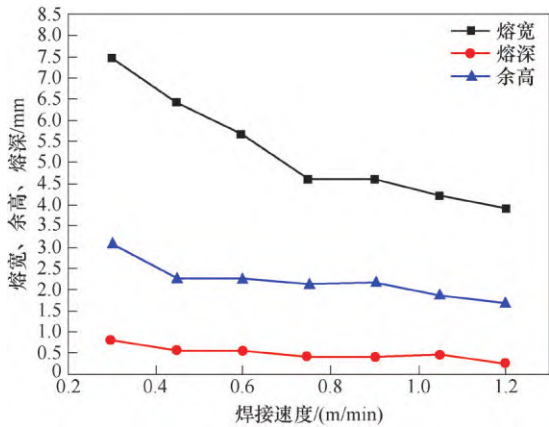
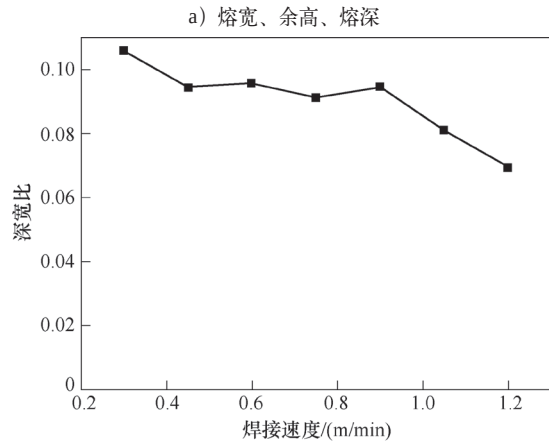


图2 不同焊接速度下焊缝的横截面

本试验将不同焊接速度下获得的截面尺寸数据进行对比,结果如图3所示。由图3可知,在送丝速度保持不变的情况下,随着焊接速度从低到高增大,焊缝熔深、熔宽、深宽比和余高等各项指标值持续下降。由于此种情况下热输入量呈减小的趋势,所以各个焊接速度所得到的深宽比均 ≤ 0.1 。造成这种现象有两个原因:一是CMT焊接技术热输入量很低,导致基板吸收的热量很少;二是基板厚度



b) 深宽比

图3 焊接速度对焊缝成形的影响

可见,熔宽、熔深逐渐减小。这是由于焊接速度越大、焊缝热输入量越低的原因。此外,还可看出焊丝熔化的润湿角从约 30° 增加到将近 90° ,这也是因为随着焊接速度的增加,焊丝对焊缝与基板的热输入量降低,对基板的预热减少,以及熔化的焊丝还来不及铺展开便凝固而导致的。

为4mm,散热较快。

3.2 送丝速度的影响

为了探究送丝速度对焊接过程及焊缝成形的影响,在其余参数不变的情况下,改变送丝速度(见表3)。本试验观察不同送丝速度下的焊接情况,观察内容包括焊接过程的变化、焊缝表面形态特征及横截面结构。

表3 送丝速度

编号	1	2	3	4	5	6	7
送丝速度 / (m/min)	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6
焊接电流 /A	107	120	133	144	151	159	167
电弧电压 /V	10.4	10.7	11.4	12	12.3	12.6	12.9

注:其他固定焊接参数为:焊接速度0.8m/min,干伸长12mm,弧长修正值0。

(1) 送丝速度对表面形貌的影响 不同送丝速度下焊缝的正背面形貌如图4所示。当焊接速度和其他参数一定的情况下,由于CMT焊接技术对焊接电流、电弧电压通过送丝速度进行一元化调节,送丝速度相当于常规MAG焊中的焊接电流、电弧电压。由图4可知,随着送丝速度的增大,焊缝的正面、背面的宽度呈增大的趋势,且焊缝背面颜色逐渐加深。当焊接速度不变时,随着送丝速度的增加,热输入增大,焊缝背面宽度增大、颜色加深,色差变得更加明显。当送丝速度为3m/min时,焊缝呈弯曲状,经分析是由于送丝速度较小时,焊接电流、电弧电压过低造成电弧不稳而发生摆动造成的;当送丝速度为6.6m/min时,焊缝成形不均匀、时粗时细,经分析是由于送丝速度将要达到焊机送丝速度

上限,因送丝速度的波动而造成的焊缝成形不均。

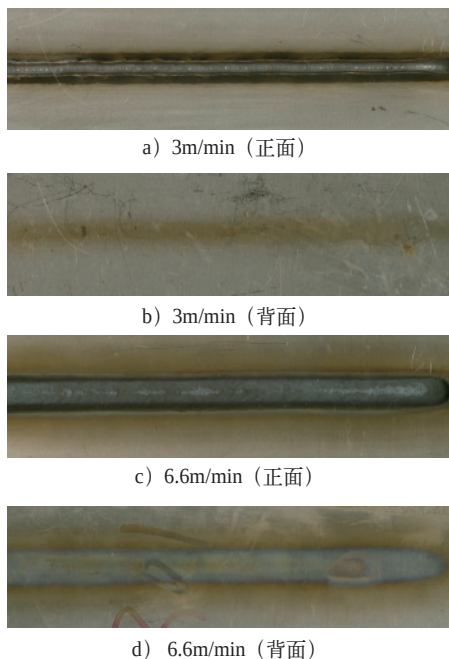


图4 不同送丝速度下焊缝的正背面形貌

(2) 送丝速度对焊缝成形的影响 与探究焊接速度对熔深、熔宽、深宽比和余高部分面积的影响时所采用方法一样,用线切割制出不同送丝速度下的焊接接头试样,观察其横截面形貌,如图5所示。

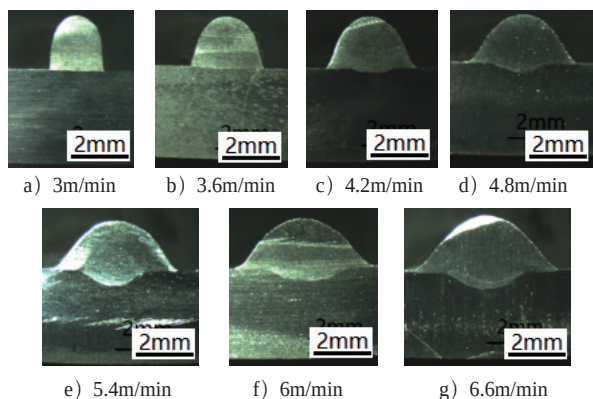
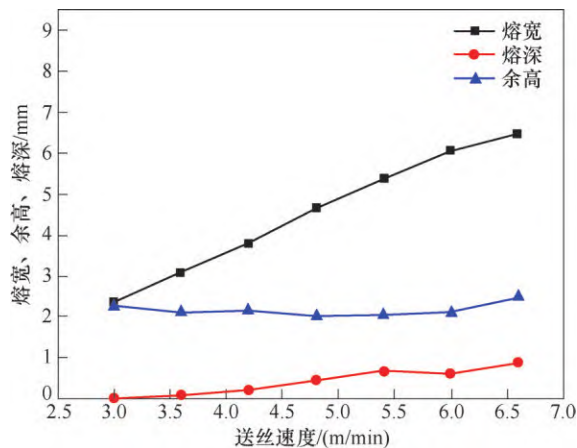


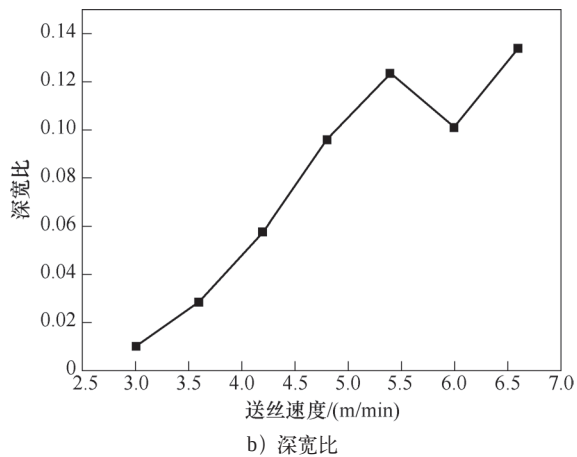
图5 不同送丝速度下焊缝的横截面形貌

由图5可知,从焊缝横截面宏观形貌来看,与不同焊接速度对比相反,随着送丝速度的增加,焊缝横截面形貌由高耸的近似矩形形状逐渐变成平滑的近似圆弧状,母材由较少的熔化变化到较多的熔化,熔宽、熔深逐渐增大。这是由于虽然焊接速度没有改变,但送丝速度增大,实际上焊缝所接收的热输入一直增大。此外,润湿角也与不同焊接速度对比组的趋势相反,焊丝熔化的润湿角从约 90° 减小到将近 30° ,说明较大的热输入量有利于焊缝熔合。

送丝速度对焊缝成形的影响如图6所示。由图6可知,与相同送丝速度、不同焊接速度对比组相反,随着送丝速度的增大,熔深、熔宽、深宽比、余高部分面积和熔合面积都增大,而余高几乎不变。在送丝速度为 $3\sim 5.4\text{m/min}$ 时,焊缝的深宽比由0.01增加到了0.13左右。当焊接速度一定时,随着送丝速度的增大,焊丝的熔敷量增大,电弧对焊缝的热输入量也增大,从而导致以上现象的产生。



a) 熔宽、余高、熔深



b) 深宽比

图6 送丝速度对焊缝成形的影响

3.3 弧长修正的影响

CMT焊机通过闭环控制电路可以控制焊丝进给和电弧引燃时机,从而修正电弧长度。为研究弧长修正对焊接过程和焊缝成形的影响,在其他参数不变的情况下,设置不同修正值($\pm 5\%\sim \pm 20\%$)观察焊接过程和焊缝横截面,了解其对焊缝形貌和成形的影响。弧长修正值变化见表4。

(1) 弧长修正对焊缝成形的影响 不同弧长修正参数下焊缝的横截面形貌如图7所示。保持其他参数不变时,随着弧长修正值从负向正变化,观察焊

表4 弧长修正值变化 (%)

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
弧长修正值	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20

注：其他固定参数为：焊接速度0.8m/min，送丝速度5m/min，干伸长12mm，弧长修正值0，焊接电流146A，电弧电压12.1V。

缝横截面的特征变化。由图7可知，从熔深看，随修正值增加，焊缝熔深逐渐减小，最后近乎为0；从形貌看，焊缝形态依次为高弧形、扁平形、高弧形。

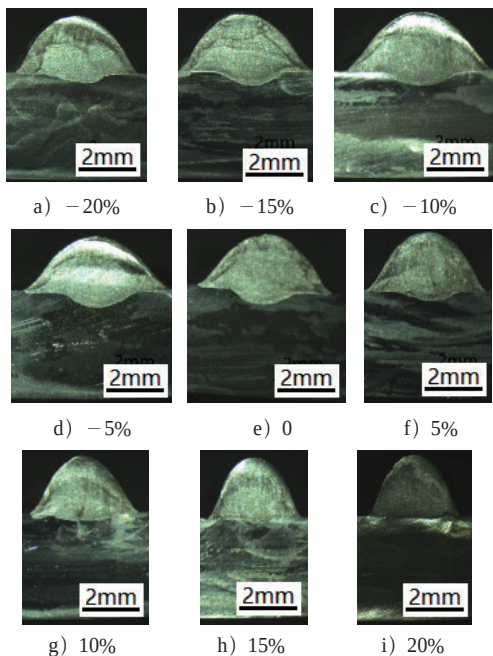
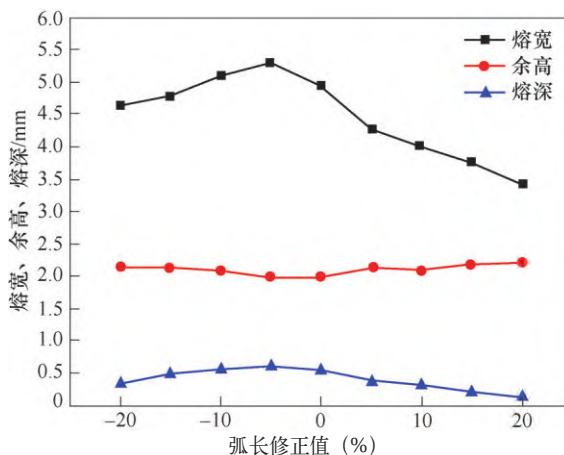


图7 不同弧长修正参数下焊缝的横截面形貌

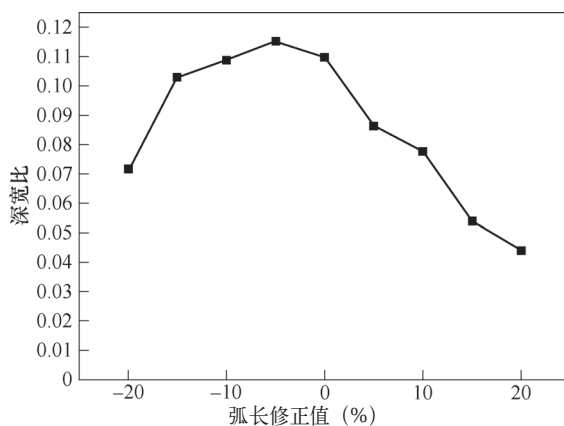
通过设置不同弧长修正值得到的焊缝，对焊缝的熔深、熔宽、余高及余高部分面积进行定量检测，并计算深宽比，如图8所示。

由图8可知，弧长修正值在-20%~20%区间时，伴随着弧长修正值的变大，焊缝熔宽、深度等指标先增后减，在弧长修正值为-5%时达最大值，余高基本不变。上述4个指标直接反映电弧对焊缝的热输入量，其趋势可概括为：-20%~-5%区间内逐渐增加；-5%~20%区间内逐渐减小。弧长修正值在-20%~-10%区间内，送丝量保持稳定；弧长修正值在-20%~-10%，随着引燃距离减小，送丝量和焊丝熔化量逐步减少。

(2) 弧长修正值对焊接过程的影响 使用高速摄像机以1703帧/s的速率拍摄焊接过程中的电弧和熔池，观察弧长修正值变化对焊接过程的影响。每



a) 熔宽、余高、熔深



b) 深宽比

图8 弧长修正值对焊缝成形的影响

组取20个周期图片，通过统计照片数量来估算各阶段过渡周期，统计结果如图9所示。

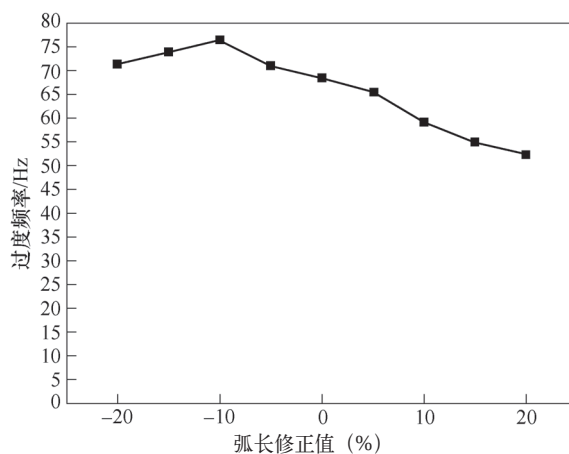


图9 弧长修正值对熔滴过渡频率的影响

由图9可知，随弧长修正值从负向正变化，熔滴过渡频率先升后降，极值分别为-10%下的77Hz和20%下的52Hz。由于弧长随修正值增长而加长，所以焊丝端与基板距离增大，在同样送丝条件下需要

更长时间,从而出现上述变化规律。

3.4 焊接方向及气体流量对焊缝成型的影响

为了探究焊接方向、保护气体流量对焊缝成型的影响,设置了以下改变焊接方向和保护气体流量的试验组,其中,焊接方向定义如图10所示。

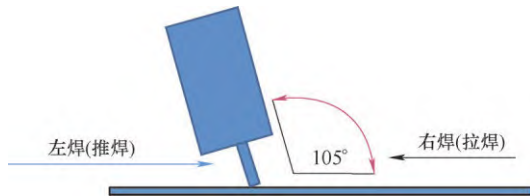


图10 焊接方向定义

为了探究焊接方向及保护气体流量对焊缝成型的影响,此处固定其他参数,改变焊接方向及保护气体流量(15L/min、19L/min、23L/min、27L/min、31L/min)进行试验。结果表明,不同焊接方向对焊缝表面保护情况影响很大,左焊的焊缝表面保护情况明显优于右焊。这是因为右焊时电弧会对已经生成的焊缝进行持续加热,导致右焊比左焊时焊缝需要更长的冷却时间。经过观察还能发现,左焊的焊缝熔宽要大于右焊,为验证上述结论,使用测量软件对不同条件下焊缝横截面的熔宽进行量化,结果如图11所示。

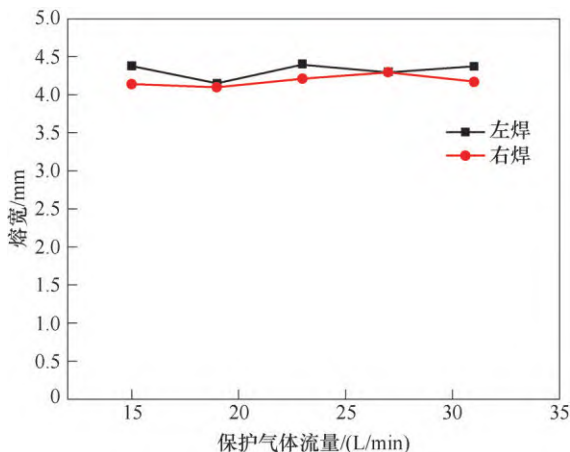


图11 焊接方向及气体流量对焊缝熔宽的影响

从图11可看出,左焊的焊缝熔宽大于右焊的焊缝熔宽。且无论保护气体流量大小,左焊焊缝的润湿角总是小于右焊焊缝的润湿角,这是因为左焊焊接时电弧先加热熔池未到达的地方,对母材有预热作用,熔池到达之后熔池内熔化的焊丝能更好地流动铺展开来,而右焊没有这个效果。

4 结束语

本文通过具体的单一变量试验,分析各个参数对焊接过程及焊缝成型的影响,得出以下结论。

1) 送丝速度保持恒定不变,随着焊接速度的增加,焊缝的熔深、熔宽、深宽比、余高,以及余高部分面积和熔合面积均明显减小,当焊接速度 $>1.2\text{m/min}$ 时,焊缝成形变差,焊接过程不稳定。

2) 随着送丝速度的增大,熔深、熔宽、深宽比,以及余高部分面积和熔合面积均增大,而余高几乎不变。

3) 在弧长修正值范围内($-20\%\sim 20\%$),随修正值从负向正变化,焊缝熔宽、熔深、深宽比,以及余高部分面积及熔合面积先增后减,弧长修正值为 -5% 处达到峰值,余高基本不变。

4) 不同焊接方向对焊缝表面保护情况影响很大,左焊的焊缝表面保护情况明显优于右焊。

参考文献:

- [1] 孟庆亮. 不锈钢薄板冷金属过渡焊接(CMT)工艺研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- [2] 张博文, 张来启. 交流冷金属过渡(Advanced CMT)技术的研究进展及其在增材制造中的应用[J]. 新型工业化, 2017, 7(11): 82-88.
- [3] 穆森, 刘丽敏, 张瑞英, 等. AZ31B镁合金薄板交流CMT焊能量分配与接头力学性能[J]. 焊接技术, 2014, 43(11): 20-23.
- [4] 李刚卿, 韩晓辉. 不锈钢车体的焊接工艺及发展[J]. 机车车辆工艺, 2004(1): 1-4.
- [5] SIEWERT T, MCCOWAN C, OLSON D. Ferrite number prediction to 100FN in stainless steel weld metal[J]. Welding Journal, 1988, 67(12): 289-298.
- [6] 张汉谦. 钢熔焊接接头金属学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 唐舵, 王春明, 田曼, 等. SUS301L-HT 不锈钢激光焊接与MIG焊接对比试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 98-105.

MW 20240423