DOI: 10.3901/JME.2020.14.073

立向高速 GMAW 驼峰焊缝的试验研究*

郭震^{1,2} 张理^{1,2} 周伟^{1,2} 毕贵军^{1,2} 韩冰^{1,2}

(1. 广东省智能制造研究所 广州 510070;

2. 广东省现代控制技术重点实验室 广州 510070)

摘要: 驼峰焊缝的产生严重制约了高速熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)在立向焊接上的应用,目前对该技术难点研究甚少,尚无简单有效的抑制措施提出。因此,通过梳理水平高速 GMAW 驼峰焊缝的形成机理,以此为基础,运用自主研发的爬壁机器人焊接试验平台对立向高速 GMAW 驼峰焊缝进行试验研究。研究发现:立向上焊时,高速 GMAW 会产生驼峰焊缝缺陷,熔池中由电弧压力、熔滴冲击力和重力作用下产生的动量很大的后向液体流是形成驼峰焊缝的主要原因。此外,焊接电流和焊接速度显著影响驼峰焊缝的形貌。立向下焊时,因焊接方向和焊枪倾斜位置发生改变,使熔池中由电弧压力和熔滴冲击力作用下产生的后向液体流流向与自身重力方向相反,可有效抑制驼峰焊缝的形成。通过利用金属液体流自身重力来抑制立向高速 GMAW 焊接过程中驼峰焊缝的形成,大大提高了焊接速度和焊接电流,具有较高应用价值。

关键词: 立向高速 GMAW; 爬壁机器人; 驼峰焊缝; 立向上焊; 立向下焊

中图分类号: TG444

Experimental Research on Humping Bead of Vertical High-speed GMAW

GUO Zhen^{1,2} ZHANG Li^{1,2} ZHOU Wei^{1,2} BI Guijun^{1,2} HAN Bing^{1,2}

(1. Guangdong Institute of Intelligent Manufacturing, Guangzhou 510070;

2. Guangdong Key Laboratory of Modern Control Technology, Guangzhou 510070)

Abstract: The production of humping bead has seriously restricted the application of gas metal arc welding (GMAW) in vertical welding. At present, a little researches on this technological difficulty have been done and no simple effective suppression measures have been put forward. Therefore the formation mechanism of humping bead in the horizontal high-speed GMAW is combed, and base on which experimental research on humping bead of the vertical high-speed GMAW is conducted by the independently developed wall-climbing robot. It is found that the humping bead will occur in the vertical high-speed GMAW when the upward welding is carried out. The main reason for the formation of humping bead is the backward liquid flow generated by arc pressure, droplet impact force and gravity. In addition, the welding current and welding speed significantly influence the morphology of humping bead. When the downward welding is carried out, the direction of the welding and the tilt position of the welding torch is changed, so that the flow direction of the backward liquid flow generated by the arc pressure and the droplet impact force in the molten pool is opposite to the direction of gravity, which can effectively suppresses the formation of the humping bead. To sum up, the gravity of metal liquid flow is used to suppress the formation of hump bead in the vertical high-speed GMAW, which greatly improves the welding speed and welding current and has great application value.

Key words: vertical high-speed GMAW; wall-climbing robot; humping bead; upward welding; downward welding

0 前言

随着社会经济的快速发展,制造业市场的竞争日趋激烈,人们不断要求在不牺牲产品质量的条件

下,应最大可能地提高生产效率。作为制造业中常见的焊接方法,熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)也向着高效的方向发展。实现高效 GMAW 的一个重要途径就是提高焊接速度,因此,高速 GMAW 成为近年来的研究热点^[1-3]。然而,焊接速度的提高会带来一些与常规速度焊接时不同的问题,如出现“驼峰焊缝”等焊缝成形缺陷^[4-6]。驼峰焊缝的产生严重制约了焊接生产效率的进一步

* 广东省科学院资助项目(2016GDASRC-0105, 16GDASRC-0106, 2017GDASRC-0115, 2018GDASRC-0115, 2020GDASYL-20200103125)。20190910 收到初稿, 20200331 收到修改稿

提高,须采取一定的技术手段来抑制或消除。

研究发现^[7-10],熔池中动量很大的后向液体流是高速 GMAW 驼峰焊缝形成的主要原因,焊接工作者可采取减缓熔池中后向液体流动量的技术措施来抑制驼峰焊缝产生。武传松等^[11]提出了双电弧焊(Double electrode-Gas metal arc welding, DE-GMAW)工艺,并将该工艺应用于高速 GMAW^[12],并在 1.6 m/min 焊速下获得了良好的焊缝。娄小飞等^[13]采用钨极惰性气体保护焊-熔化极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas arc welding-Metal inert gas welding, TIG-MIG)复合工艺实现了低碳钢 2.5 m/min 高速焊接。王林等^[1-2,14-15]通过外加横向磁场,利用熔池中竖直向下的电流分量与外加横向磁场相互作用,产生指向熔池前方的洛伦兹力,对熔池中后向液体流起到抑制作用,从而抑制驼峰焊缝的产生。

尽管科研工作者在抑制高速 GMAW 驼峰焊缝产生方面作了大量工作,但主要研究的是水平焊接过程,而对立向高速 GMAW 焊接过程的研究却鲜有报道。

因此,本文旨在梳理水平高速 GMAW 驼峰焊缝的形成机理,并以此为基础,再运用自主研发的爬壁机器人研究立向高速 GMAW 焊接过程中焊接电流和焊接速度对驼峰焊缝形貌的影响规律,并分析驼峰焊缝的形成机理,最后提出抑制驼峰焊缝形成的措施,并通过试验验证其可行性,以期在实际生产中立向高速 GMAW 提供技术参考。

1 试验平台与方法

1.1 试验平台

爬壁机器人焊接试验平台由本团队自主开发,由控制柜、爬壁机器人、GMAW 焊机、焊缝追踪系统和焊接平台组成,如图 1 所示。该平台能够获得不同焊接速度(0~12 m/min),可实现竖直平面上水平、垂直以及曲线焊接。

图 1 爬壁机器人焊接试验平台

1.2 试验方法

试验母材为 Q235B,厚度为 5 mm,其主要化学成分(质量分数)为 0.18%C, 1.27%Mn, 0.32%Si, 0.04%P, 0.04%S, 余量 Fe;焊材为 ER50-6,直径为 1.0 mm,其主要化学成分(质量分数)为 0.14%C, 1.65%Mn, 0.2%Cu, 0.87%Si, 0.02%P, 0.02%S, 余量 Fe。焊接方式采用堆焊,保护气为 82%Ar+18%CO₂。

试验分两阶段,第一阶段进行立向上焊(见示意图 2),第二阶段进行立向下焊(见示意图 3)。图中, v 为焊接速度、 H 为焊枪头到钢板距离、 θ 为焊丝与钢板法向的夹角。

图 2 立向上焊接示意图

图 3 立向下焊接示意图

在焊接试验过程中,利用加装滤光片的 CCD 摄像机对立向高速 GMAW 焊接过程进行视觉检测,实时获得不同时刻的熔池图像。

2 水平高速 GMAW 驼峰焊缝

驼峰焊缝,是指焊缝金属沿焊接方向呈现规则的、周期性的局部凸起(波峰)和凹陷(波谷)分布,如图 4 所示。

自驼峰焊缝发现以来,众多焊接工作者对驼峰焊缝的产生机理展开了研究,并提出了许多理论和模型来解释驼峰焊缝的形成过程^[16-24]。其中,熔池壁面流理论被认为是解释高速 GMAW 驼峰焊缝形成的最佳理论。

图 4 驼峰焊缝宏观形貌

该理论认为, 在高速 GMAW 时, 大焊接电流导致的大电弧压力和熔滴冲击力会使电弧下方的熔池表面产生凹陷, 高速下落的熔滴撞击倾斜的熔池前壁反弹后会流向熔池后方, 并带动熔池内液态金属流经较窄的熔池壁面流通道到达熔池尾部。由于该壁面流动量很大, 能够克服尾部堆积的液态金属的静压力和表面张力, 在尾部熔池表面不断堆积, 形成一个凸起, 如图 5 所示。随着电弧向前移动, 熔池壁面流区域被拉长, 且该区域的液态金属层很薄, 脱离电弧热作用后率先凝固形成波谷, 并阻碍熔池尾部堆积的液态金属回流, 随后堆积的液态金属凝固形成驼峰。周而复始, 使驼峰焊缝呈周期性分布。

图 5 熔池壁面流理论示意图

图 6 为国外学者 NGUYEN 等^[23]采用高速摄像机拍摄的驼峰焊缝形成过程中的熔池图像。从图中可以看出, 电弧压力和熔滴冲击力使得电弧下方的熔池表面产生下凹变形, 出现弧坑(图 6a)。过渡到熔池的熔滴和熔化的母材形成动量很大的“后向液体流”, 朝熔池尾部流动, 并在熔池后部堆积, 出现“隆起”(图 6b)。由于“后向液体流”的动量很大, 使液态金属无法向前回流。同时, 电弧向前运动, 液体流通道被拉长并率先凝固, 形成驼峰焊缝的“谷底”(图 6c)。凝固的“谷底”阻止了液态金属继续向后流动, “隆起”部分开始凝固, 形成驼峰焊缝的“波峰”。刚凝固的“谷底”紧靠新的熔池尾部, 液态金属又在该处堆积, 因此, 呈周期性的驼峰焊缝形成(图 6d)。

国内学者胡志坤等^[25]同样通过试验证实了电弧压力和熔滴冲击力作用下产生的动量很大的后向液体流是形成驼峰焊缝的主要原因。

图 6 平向高速 GMAW 驼峰焊缝形成高速图像

3 立向高速 GMAW 驼峰焊缝

3.1 立向 GMAW 驼峰焊缝的形成

图 7 给出了立向上焊, 焊接电流为 100 A 时, 不同焊接速度对立向 GMAW 焊缝成形的影响。可以看出, 在焊接速度为 0.12~0.36 m/min 时, 焊缝成形良好(图 7a~7c); 在焊接速度为 0.48 m/min 时, 焊缝成形连续, 但开始出现形成驼峰焊缝的趋势(图 7d); 当焊接速度升高到 0.60 m/min 时, 形成驼峰焊缝(图 7e)。

图 7 不同焊接速度下的立向 GMAW 焊缝
(立向上焊, 焊接电流 100 A)

图 8 给出了立向上焊, 焊接电流为 100~150 A、焊接速度为 0.12~0.60 m/min 范围内的立向 GMAW 驼峰焊缝形成分布图。由图 8 可知, 焊接电流为 100 A、110 A、120 A、130 A 和 140 A 时, 形成驼峰焊缝的临界焊接速度分别为 0.60 m/min、0.48 m/min、0.36 m/min、0.36 m/min 和 0.24 m/min; 焊接速度为 0.12 m/min、0.24 m/min、0.36 m/min 和 0.48 m/min 时, 形成驼峰焊缝的临界焊接电流分别 150 A、140 A、120 A 和 110 A。因此, 在进行立向 GMAW 时, 随着焊接电流的增加, 形成驼峰

焊缝的临界焊接速度在不断减小; 同样, 随着焊接速度的增加, 形成驼峰焊缝的临界焊接电流也在不断减小。

图8 立向 GMAW 驼峰焊缝形成分布图
(立向上焊, 焊接速度: 0.12~0.60 m/min,
焊接电流: 100~150 A)

3.2 焊接参数对驼峰焊缝形貌的影响

图9给出了立向上焊, 焊接电流为200 A时, 不同焊接速度下立向 GMAW 驼峰焊缝外观图。经测量, 各焊缝的驼峰间距、驼峰高度及焊缝宽度数值如表1所示。

图9 不同焊接速度下立向 GMAW 驼峰焊缝
(立向上焊, 焊接电流 200 A)

焊接速度对立向 GMAW 驼峰焊缝形貌的影响规律如图10所示。可以看出, 在焊接电流不变的情况下, 随焊接速度提高, 立向 GMAW 驼峰焊缝的驼峰间距和驼峰高度先稳定减小, 而后减小速率降低(图10a、图10b); 而焊缝宽度则平稳减小(图10c)。

此外, 在焊接速度较小时, 熔滴金属液出现下流现象。

表1 不同焊接速度下立向 GMAW 驼峰焊缝相关尺寸
(立向上焊, 焊接电流 200 A)

序号	焊接速度/ (m · min ⁻¹)	驼峰间距/ mm	驼峰高度/ mm	焊缝宽度/ mm
a	0.6	金属下流	金属下流	6.52
b	0.9	16.12	4.70	5.65
c	1.2	14.92	4.45	5.20
d	1.5	13.84	3.48	4.67
e	1.8	12.81	2.78	4.16
f	2.1	12.60	2.53	3.88

(a) 焊接速度对立向 GMAW 驼峰间距的影响规律

(b) 焊接速度对立向 GMAW 驼峰高度的影响规律

(c) 焊接速度对立向 GMAW 焊缝宽度的影响规律

图10 焊接速度对立向 GMAW 驼峰焊缝形貌的影响规律
(立向上焊, 焊接电流 200 A)

图11给出了立向上焊, 焊接速度为1.2 m/min时, 不同焊接电流下立向 GMAW 驼峰焊缝外观图。经测量, 各焊缝的驼峰间距、驼峰高度及焊缝宽度数值如表2所示。

图 11 不同焊接电流下立向 GMAW 驼峰焊缝
(立向上焊, 焊接速度 1.2 m/min)

表 2 不同焊接电流下立向 GMAW 驼峰焊缝相关尺寸
(立向上焊, 焊接速度 1.2 m/min)

序号	焊接电流/ A	驼峰间距/ mm	驼峰高度/ mm	焊缝宽度/ mm
a	150	11.27	2.48	3.93
b	175	12.28	2.91	4.17
c	200	14.92	4.45	5.20
d	225	14.67	4.45	6.27
e	250	金属下流	金属下流	7.10

焊接电流对立向 GMAW 驼峰焊缝形貌的影响规律如图 12 所示。可以看出, 在焊接速度不变的情况下, 随焊接电流增加, 立向 GMAW 驼峰焊缝的

(a) 焊接电流对立向 GMAW 驼峰间距的影响规律

(b) 焊接电流对立向 GMAW 驼峰高度的影响规律

(c) 焊接电流对立向 GMAW 焊缝宽度的影响规律

图 12 焊接电流对立向 GMAW 驼峰焊缝形貌的影响规律
(立向上焊, 焊接速度 1.2 m/min)

驼峰间距先增加后减小(图 12a), 驼峰高度则是先增加后不变(图 12b), 而焊缝宽度则稳定增加(图 12c)。此外, 在焊接电流较大时, 熔滴金属液出现下流现象。

对于焊缝宽度稳定的变化, 主要与焊接过程中电弧单位距离热输入有关。由文献[21]可知, 电弧单位距离热输入为

$$H = \eta EI / v \quad (1)$$

式中, η 为效率; E 为电源电压; I 为焊接电流; v 为焊接速度。

由式(1)可知, 随着焊接速度的稳定增加, 单位距离热输入稳定减小, 焊缝宽度则稳定减小; 相应地, 随着焊接电流的稳定增加, 单位距离热输入稳定增加, 焊缝宽度则稳定增加。

3.3 立向高速 GMAW 驼峰焊缝的形成机理

图 13 给出了立向上焊, 焊接速度为 1.2 m/min, 焊接电流为 200 A 时立向 GMAW 驼峰焊缝正视图 and 侧视图。可以看出, 立向 GMAW 驼峰焊缝与平向 GMAW 驼峰焊缝外观形貌基本一致, 即焊缝金属沿焊接方向呈现规则的、周期性的局部凸起和凹陷分布(图 13a)。但不同的是, 从侧面看过去, 立向 GMAW 驼峰焊缝的驼峰有向焊接反方向下坠的趋势, 如图 13b 所示。

图 13 立向高速 GMAW 驼峰焊缝
(立向上焊, 焊接速度 1.2 m/min, 焊接电流 200 A)

由第 3.2 节可知, 熔池中由电弧压力和熔滴冲击力作用下产生的动量很大的后向液体流是平向高

速 GMAW 驼峰焊缝形成的主要原因。但在进行上行立向高速 GMAW 时,一方面,在大焊接电流导致的大电弧压力和熔滴冲击力作用下产生动量很大的后向液体流;另一方面,在重力作用下,后向液体流的动量进一步增大,如图 14 所示。因此,立向高速 GMAW 更容易产生驼峰焊缝,同时,驼峰会呈现向焊接反方向下坠现象。

图 14 立向高速 GMAW 驼峰焊缝形成示意图(立向上焊)

通过高速摄像机实时观测上行立向高速 GMAW 驼峰焊缝的形成过程,图 15 为开始焊接后 2.8 s、3.0 s、3.2 s、3.4 s 实时高速摄影图像。可以看出,立向高速 GMAW 驼峰焊缝形成过程与平向高速 GMAW 驼峰焊缝形成过程基本一致。但在重力作用下,加剧了立向高速 GMAW 驼峰形成趋势,并出现下坠现象,如图 15a 所示。

图 15 立向高速 GMAW 驼峰焊缝形成高速图像(立向上焊)

因此,在进行立向高速 GMAW 时,熔池中由电弧压力、熔滴冲击力和重力作用下产生的动量很大的后向液体流是形成驼峰焊缝的主要原因。

进一步分析,当焊接速度提高时,驼峰产生的频率变大、周期变短,驼峰间距与驼峰高度逐渐下降;随着焊接电流的增大,电弧压力和熔滴冲击力增大,产生的后向液体流动量增大,尾部金属液更易积聚,使驼峰产生的频率减小、周期变长,从而导致驼峰间距和驼峰高度不断增加,增加到一定程度后,在重力的作用下驼峰开始下坠,驼峰间距和驼峰高度相应下降,甚至出现金属液体下流现象。这与第 3.2 节焊接速度和焊接电流对立向高速 GMAW 驼峰焊缝的驼峰间距及驼峰高度的影响规律是完全一致的。

3.4 立向高速 GMAW 驼峰焊缝的抑制措施

熔池中由电弧压力、熔滴冲击力和重力作用下产生的动量很大的后向液体流是立向高速 GMAW 形成驼峰焊缝的主要原因。此时,重力方向与液体流流向是一致的,使液体流的动量进一步增大,从而加剧了驼峰焊缝的形成。若采用立向下焊,通过改变焊接方向和焊枪倾斜位置,使电弧压力和熔滴冲击力作用下产生的后向液体流流向与自身重力方向相反,阻止液体流向熔池尾部流去,从而抑制驼峰焊缝的形成,如图 16 所示。

图 16 抑制立向高速 GMAW 驼峰焊缝示意图(立向下焊)

图 17 给出了立向下焊,焊接速度为 1.2 m/min,焊接电流为 200 A 时立向高速 GMAW 驼峰焊缝。可以看出,此时焊缝成形良好,驼峰焊缝消失。因此,改变焊接方向和焊枪倾斜位置可有效抑制立向高速 GMAW 焊驼峰焊缝的产生。

图 18 给出了立向下焊,焊接电流为 100~150 A、焊接速度为 0.12~0.60 m/min 范围内的立向 GMAW 驼峰焊缝形成分布图。可以看出,在此

图 17 立向高速 GMAW 驼峰焊缝
(立向下焊, 焊接速度 1.2 m/min、焊接电流 200 A)

图 18 立向 GMAW 驼峰焊缝形成分布图
(立向下焊, 焊接速度 0.12~0.60 m/min,
焊接电流 100~150 A)

焊接参数范围内, 未形成驼峰焊缝。进一步增加焊接电流为 200~300 A, 焊接速度为 1.20~2.40 m/min, 仍未形成驼峰焊缝, 如图 19 所示。因此, 通过改变焊接方向和焊枪倾斜位置可有效抑制驼峰焊缝, 大大提高了立向高速 GMAW 焊无驼峰焊缝形成条件下的焊接速度和焊接电流。

图 19 立向 GMAW 驼峰焊缝形成分布图
(立向下焊, 焊接速度 1.20~2.40 m/min,
焊接电流 200~300 A)

4 结论

(1) 立向上焊时, 高速 GMAW 会产生驼峰焊缝缺陷, 且焊接速度和焊接电流显著影响驼峰焊缝形态。焊接电流不变, 随焊接速度提高, 驼峰焊缝的驼峰间距和驼峰高度先稳定减小, 后减小速率降低; 而焊缝宽度则稳定减小。焊接速度不变, 随焊接电流增加, 驼峰焊缝的驼峰间距先增加后减小, 驼峰高度则是先增加后不变; 而焊缝宽度则稳定增加。此外, 焊接速度过小或焊接电流过大均出现金属液下流现象。

(2) 熔池中由电弧压力、熔滴冲击力和重力作用下产生的动量很大的后向液体流是立向高速

GMAW 驼峰焊缝形成的主要原因。若采用立向下焊, 即改变焊接方向和焊枪倾斜位置, 使熔池中由电弧压力和熔滴冲击力作用下产生的后向液体流流向与自身重力方向相反, 可以有效地抑制立向高速 GMAW 驼峰焊缝的形成。在焊接电流为 200~300 A, 焊接速度为 1.20~2.40 m/min 的焊接参数范围内, 仍无驼峰焊缝形成。

参 考 文 献

- [1] 王林, 高进强, 杨丰兆. 外加横向磁场对高速 GMAW 焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 9-12.
WANG Lin, GAO Jinqiang, YANG Fengzhao. Effect of external transverse magnetic field on weld appearance[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 9-12.
- [2] WANG Lin, WU Chuansong, CHEN Ji, et al. Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 1282-1291.
- [3] 陈姬, 武传松. 高速 GMAW 驼峰焊缝形成过程的数值分析[J]. 金属学报, 2009, 45(9): 1070-1076.
CHEN Ji, WU Chuansong. Numerical simulation of forming process of humping bead in high speed GMAW[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(9): 1070-1076.
- [4] 王付鑫, 于治水, 石昆. 高速电弧焊中驼峰焊缝的形成机理及影响因素探[J]. 上海工程技术大学学报, 2008, 22(3): 248-253.
WANG Fuxin, YU Zhishui, SHI Kun. Discussion on mechanism and influential factors of humping weld in high-speed arc welding[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2008, 22(3): 248-253.
- [5] 武传松, 王林, 陈姬, 等. 高速 GMAW 驼峰焊缝的产生机理与抑制技术[J]. 焊接, 2016(7): 4-13.
WU Chuansong, WANG Lin, CHEN Ji, et al. Occurrence mechanism and suppression technology of humping bead in high-speed GMAW[J]. Welding & Joining, 2016(7): 4-13.
- [6] 吴东升, 华学明, 叶定剑, 等. 高速 GMAW 驼峰形成过程的数值分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 5-8.
WU Dongsheng, HUA Xueming, YE Dingjian, et al. Numerical analysis of humping formation in high speed GMAW process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 5-8.
- [7] 杨战利, 张善保, 杨永波, 等. 粗丝高速 MAG 焊驼峰

- 焊缝形成机理分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 61-64.
- YANG Zhanli, ZHANG Shanbao, YANG Yongbo, et al. Study on humping bead formation mechanism in thick-wire high-speed MAG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 61-64.
- [8] 方吉米, 王克鸿, 黄勇. 高速 GMAW 驼峰焊道形成过程熔池图像识别[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 42-46.
- FANG Jimi, WANG Kehong, HUANG Yong. Weld pool image recognition of humping formation process in high speed GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 42-46.
- [9] XU Guoxiang, CAO Qingnan, HU Qingxian, et al. Modelling of bead hump formation in high speed gas metal arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(8): 700-710.
- [10] WU Dongsheng, HUA Xueming, YE Dingjian, et al. Understanding of humping formation and suppression mechanisms using the numerical simulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 634-643.
- [11] 武传松, 张明贤. DE-GMAW 高速电弧焊工艺机理的研究[J]. 金属学报, 2007, 43(6): 663-667.
- WU Chuansong, ZHANG Mingxian. Study on the process mechanism of high-speed arc welding DE-GMAW[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(6): 663-667.
- [12] WU C S, HU Z H, ZHONG L M. Prevention of humping bead associated with high welding speed by double-electrode gas metal arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(5-8): 573-581.
- [13] 娄小飞, 陈茂爱, 武传松, 等. 高速 TIG-MIG 复合焊焊缝驼峰及咬边消除机理[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 87-90.
- LOU Xiaofei, CHEN Maoai, WU Chuansong, et al. Humping and undercutting suppression mechanism for high speed TIG-MIG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 87-90.
- [14] 王林, 武传松, 杨丰兆, 等. 外加磁场对高速 GMAW 电弧和熔池行为的主动调控效应[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 1-6.
- WANG Lin, WU Chuansong, YANG Fengzhao, et al. Proactive control effect of arc and weld pool behaviors by an external magnetic field in high speed GMAW[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 1-6.
- [15] 王林, 高进强, 李琰. 抑制高速 GMAW 驼峰焊道的外加磁场数值分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 109-112.
- WANG Lin, GAO Jinqiang, LI Yan. Numerical simulation of external magnetic field for suppressing humping bead in high speed GMAW process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 109-112.
- [16] BRADSTREET B. Effect of surface tension and metal flow on weld bead formation[J]. Welding Journal, 1968, 47(7): 314-322.
- [17] PATON E O, MANDEL S L, SIDORENKO B G. Certain special features of the formation of welds made at high speeds[J]. Autom Weld, 1971, 24(8): 1-6.
- [18] YAMAMOTO T, SHIMADA W. A study on bead formation in high speed TIG arc welding at low gas pressure[C]// Proceedings of the Advanced Welding Technology. The Second International Symposium of the Japan Welding Society on Advanced Welding Technology, Japan. Osaka: Japan Welding Society, 1975: 321-326.
- [19] LIN M L, EAGAR T W. Pressures produced by gas tungsten arcs[J]. Metallurgical Transactions B, 1986, 17(3): 601-607.
- [20] MILLS K C, KEENE B J. Factors affecting variable weld penetration[J]. International Materials Reviews, 1990, 35(1): 185-216.
- [21] GRATZKE U, KAPADIA P D, DOWDEN J, et al. Theoretical approach to the humping phenomenon in welding processes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1992, 25(11): 640-1647.
- [22] MENDEZ P F, EAGAR T W. Penetration and defect formation in high-current arc welding[J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 296-306.
- [23] NGUYEN T C, WECHMAN D C, JOHNSON D A, et al. The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 447-459.
- [24] NGUYEN T C, WECHMAN D C, JOHNSON D A, et al. High speed fusion weld bead defects[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(6): 618-633.
- [25] 胡志坤, 武传松. 高速 MAG 电弧焊驼峰焊缝产生过程的实验研究[J]. 金属学报, 2008, 44(12): 1445-1449.
- HU Zhikun, WU Chuansong. Experimental investigation on forming process of humping bead in high speed MAG arc welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(12): 1445-1449.

作者简介: 郭震, 男, 1991 年出生。主要研究方向为激增材制造技术和先进焊接技术。

E-mail: gz910301@163.com