

# 外加横向磁场对高速 GMAW 焊缝成形的影响

王林, 高进强, 杨丰兆

(山东大学 材料液固结构演变及加工教育部重点实验室, 济南 250061)

**摘要:** 对于高速熔化极气体保护焊接(GMAW)过程, 当焊接速度超过临界值后, 会出现驼峰焊道, 焊缝成形变差。研究证明, 熔池中动量很大的后向液体流是产生驼峰焊道的主要原因。研发了外加横向磁场发生装置, 通过产生的电磁力来抑制后向液体流的动量, 从而抑制驼峰焊道的形成。应用特斯拉计测试和考察了工件上磁感应强度大小及分布的影响因素。通过开展焊接工艺试验分析了不同强度的外加磁场作用下的焊缝成形规律。结果表明, 外加横向磁场能明显调控熔池流态, 有效抑制驼峰焊道和咬边等缺陷, 显著改善焊缝成形, 提高临界焊接速度。

**关键词:** 高速 GMAW; 外加磁场; 驼峰焊道; 后向液体流

中图分类号: TG 444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)10-0009-04

## 0 序 言

在金属结构制造业中, 熔化极气体保护电弧焊(GMAW)工艺因其具有成本低、适应性强、操作简单、易于实现自动化等优点而得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。当前, 装备制造业对焊接生产效率提出了更高的要求, 尤其是在薄板焊接时需要大幅提高焊接速度。但是, 对于熔化极气体保护焊来说, 当焊接速度超过某一临界值时, 焊缝成形变差, 会出现咬边和驼峰焊道等焊缝成形缺陷, 这严重制约了焊接生产效率的进一步提高<sup>[2-4]</sup>。国内外学者通过研究发现, 高速 GMAW 焊接时熔池中动量很大的后向液体流是驼峰焊道形成的主要原因<sup>[3,5,6]</sup>。因此, 若想抑制驼峰焊道, 就必须采取措施来减缓熔池中后向液体流的动量。而如何对熔池流场展开调控、减缓熔池中的后向液体流的动量来抑制驼峰焊道从而提高焊接速度, 是当今的研究热点之一。

目前, 国内外焊接学者提出很多技术措施来抑制驼峰焊道。如在 GMAW 焊接过程中采用特殊保护气体(如 TIME 焊接<sup>[3]</sup>), 改变熔池表面张力分布来减缓液体金属的堆积; 采用双丝焊或复合焊等<sup>[7-9]</sup>焊接工艺改变熔池的受力状态。这些方法均能在一定程度上提高焊接速度, 但也有各自的不足, 如焊接成本高、工艺设备复杂、操作难度大等。因此, 有必要研发低成本、易操作的高速 GMAW 新工

艺或新设备来提高临界焊接速度从而提高焊接生产率。焊接学者开展过外加磁场控制电弧形态、熔滴过渡和熔池稳定性的研究<sup>[10-12]</sup>, 但尚未有人研究运用外加磁场来抑制驼峰焊道缺陷。文中利用自主研发的低成本、易安装的磁发生装置, 向高速 GMAW 熔池内的液体金属施加电磁力, 改变熔池中后向液体金属流的速度和动量分布, 从而抑制或消除驼峰焊道缺陷, 提高临界焊接速度, 实现高速 GMAW 焊接。

## 1 外加磁场的高速 GMAW 试验装置

### 1.1 试验系统及试验方法

如图 1 所示, 高速 GMAW 试验系统由行走平台、GMAW 焊机、磁发生装置、图像采集子系统、电参数采集子系统、主控微机等构成。



图 1 外加磁场的高速 GMAW 试验系统示意图

Fig. 1 High speed GMAW system with external magnetic field

平台行走、起弧与熄弧、图像采集、电参数采集均由计算机控制。将磁发生装置安装在工件下面，在熔池中产生横向磁场。如图2所示，焊接过程中，电磁铁产生的外加横向磁场 $B$ 与熔池中竖直向下的电流分量 $I_{z-}$ 相互作用，产生指向熔池前方的电磁力 $F_E$ ，可以调控熔池内液态金属的流动。

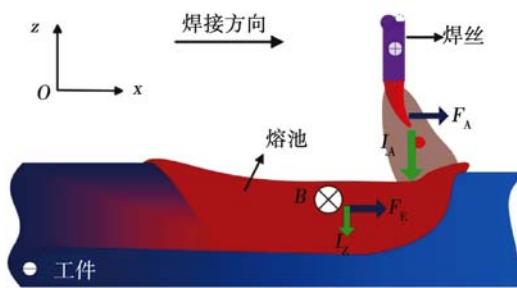


图2 外加电磁场的作用原理示意图

Fig. 2 Action principle of external electromagnetic field

试验材料为Q235B低碳钢板，尺寸规格为200 mm × 50 mm × 3 mm。焊丝型号为ER50-6，其直径为1.2 mm。所用保护气体成分为92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>，气体流量为20 L/min。焊接工艺参数如表1所示。

表1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

焊接电流 $I/A$	电弧电压 $U/V$	励磁电流 $i/A$	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$
270 ~ 310	29 ~ 35	0 ~ 10	2.01 ~ 2.37

## 1.2 磁发生装置的设计与安装

为了在熔池中产生横向磁场，采用了如图3所示的U型磁场发生装置。在两根竖直的铁芯Ⅰ、Ⅱ上缠绕线圈，横放的铁芯Ⅲ作为磁轭，当工件置于磁发生装置的开口端时，工件中便有了横向磁场。图3中竖直铁芯上部固定有铝制挡圈，下部固定有塑料挡圈，两者配合以实现线圈的紧密缠绕并保护线圈免受高温及部分机械摩擦损坏。线圈用直径为2.3 mm的耐高温漆包线紧密缠绕，每个磁极上各绕制三层共270匝，铁芯由直径20 mm DT4C电工纯铁棒制成，两根竖直铁芯中心距为38 mm，端部车有直径12 mm的螺纹，而横柱两端则加工有直径12 mm的螺纹孔，可实现可靠的螺栓连接。

首先尝试将磁发生装置安装于工件上方，轴线垂直于工件，横跨焊缝两侧，与焊枪采用同一套夹持机构，如图4a所示。试验表明，在此位置上，磁场对

电弧的影响很大，电弧极不稳定，甚至无法稳定燃弧；同时电弧热也会使磁发生装置温度升高，导致电磁铁芯导磁性能下降，且焊接过程中产生的飞溅也会对磁发生装置造成损伤。此外，由于同时固定焊枪和电磁铁，给夹持装置的结构强度和刚度提出了很高要求。因此，将磁发生装置调整至工件下表面，如图4b所示。在此条件下，电弧区的磁感应强度较低，焊接过程较为稳定。

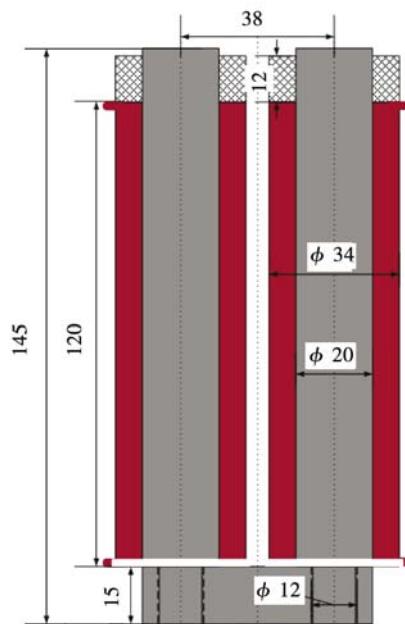
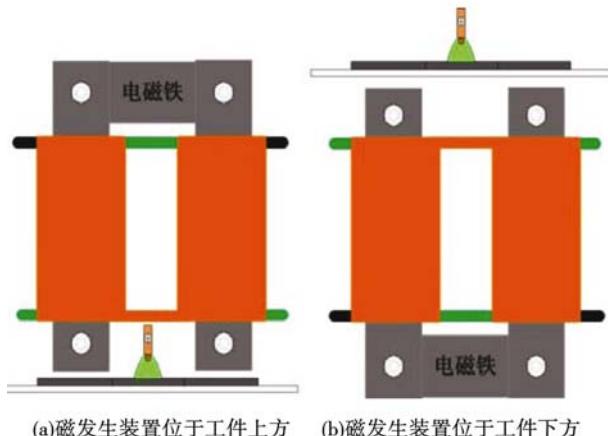


图3 电磁铁装置组成图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic field generator



(a) 磁发生装置位于工件上方 (b) 磁发生装置位于工件下方

(a) Installation location of magnet above the workpiece (b) Installation location of magnet below the workpiece

Fig. 4 Installation location diagram of magnet

## 2 磁感应强度的测量及其影响因素

### 2.1 空隙长度对磁场分布的影响

为研究气空隙度对磁感应强度大小和分布的影

响, 焊前用特斯拉计对工件中心线上的磁感应强度进行了测量, 如图 5 所示。测量时选用两块 200 mm  $\times$  30 mm  $\times$  3 mm 的钢板, 中间留 1.5 mm 的间隙, 使特斯拉计探头正好可以垂直插入间隙测量。

在工件两端及六等分点共七处进行测量。励磁电流  $i = 10$  A 时, 分别在磁极与工作台之间气隙  $h = 2$  mm 和  $h = 7$  mm 条件下对焊缝中心线上的磁感应强度进行了测量, 磁感应强度的分布规律如图 6 所示。

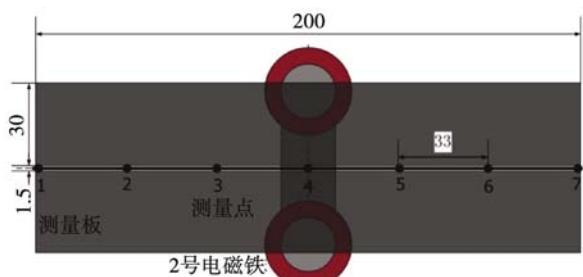


图 5 电磁铁磁感应强度测量图 (mm)

Fig. 5 Measurement schematic of magnetic flux density

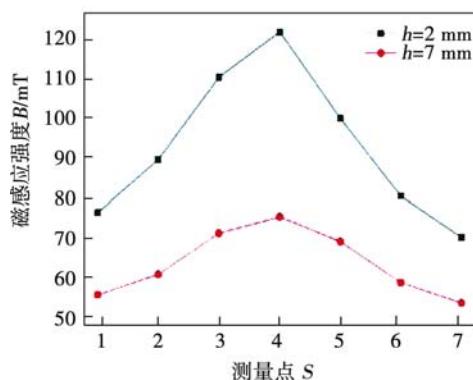


图 6 气隙长度  $h$  对磁感应强度分布的影响

Fig. 6 Effect of air-gap distance  $h$  on magnetic flux density distribution

从图 6 中可以看出, 磁极中心处磁感应强度值最大, 距离磁极中心越远, 磁感应强度衰减越严重。 $h = 2$  mm 时, 各测量点的磁感应强度值明显大于  $h = 7$  mm 时的磁感应强度值, 所测磁感应强度平均值分别为 93 和 65 mT。因此, 气隙长度对磁感应强度值有显著影响, 为使磁场能够有效影响熔池流场, 在保证磁发生装置不与工作台接触的前提下, 应尽可能减小磁极与工作台之间的气隙。试验中气隙长度约为 2~3 mm, 工件与磁极之间距离约为 5~6 mm。

## 2.2 励磁电流对磁场分布的影响

为考察励磁电流对磁场分布的影响, 应用特斯拉计对磁发生装置进行磁场测量, 励磁电流与焊缝中心线上各测量点的磁感应强度值的关系曲线如图 7 所示。可以看出, 不同励磁电流下磁感应强度的衰减规律大致相同, 磁极中心处磁感应强度值最大, 两侧各测量点依次衰减, 距离磁极中心 5 cm 处磁感应强度衰减为峰值的 75% 左右。励磁电流每增大 1 A, 磁感应强度平均值大约增大 13 mT。

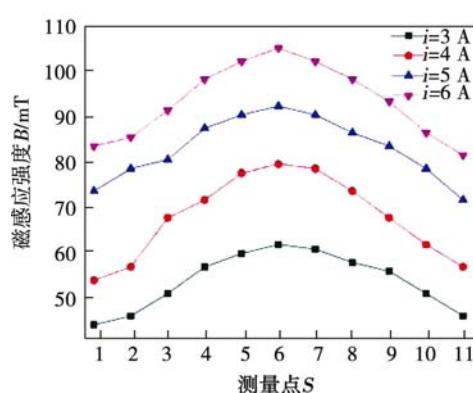


图 7 励磁电流对磁感应强度分布的影响

Fig. 7 Effect of excitation current on magnetic flux density distribution

## 3 外加磁场对焊道成形的影响

在一组试验条件下(焊接电流 290 A, 焊接速度 2.01 m/min), 开展了高速 GMAW 焊接工艺试验。当没有施加磁场作用时, 焊缝形貌呈现为规则的驼峰焊道和严重的咬边, 如图 8a 所示。而施加磁场后, 可以看出, 焊缝成形明显改善。焊道周期性的起伏消失, 除部分焊道局部位置出现咬边外, 焊道整体较为平滑, 且焊趾部分填充良好。比较不同磁感应强度下的焊缝成形可以看出, 在励磁电流  $i = 1.83$  A 时, 焊缝平滑均匀飞溅较少, 焊缝质量好。而当励磁电流  $i < 1.83$  A 时, 局部仍有咬边发生, 如图 8b 所示; 而当励磁电流  $i > 1.83$  A 时, 焊缝宽度变得不均匀, 熔深变浅, 局部位置存在咬边, 大颗粒飞溅明显增多, 且一些位置存在熔池金属的溢出, 如图 8c 所示。结果表明, 在特定的焊接试验条件下, 存在一个最佳的外加磁感应强度值或励磁电流值以获取高质量无驼峰飞溅少的焊缝。在该组试验条件下,  $i = 1.83$  A 即为最佳励磁电流值。

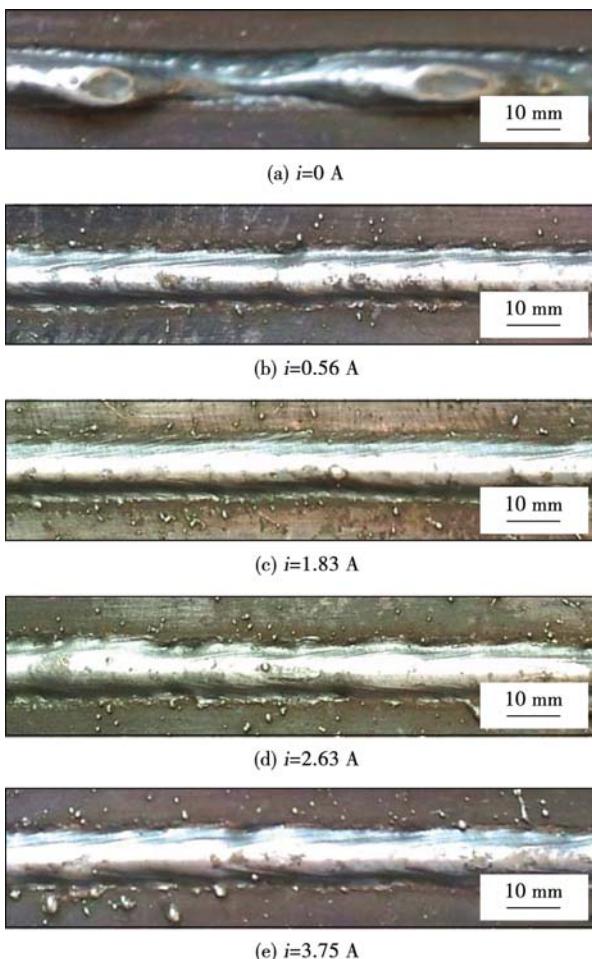


图8 外加磁场对焊道成形的影响

Fig. 8 Effect of external magnetic field on weld bead shape

## 4 结 论

(1) 研发了外加磁场的高速 GMAW 焊接系统,设计并确定了适合高速焊的磁发生装置及其安装位置。研究了不同条件下工件上磁感应强度分布规律,分析了气隙长度、励磁电流对磁感应强度的影响规律。

(2) 开展了磁控高速焊试验,结果表明,选择合适的励磁电流可以有效抑制驼峰焊道的产生,大幅提高临界焊接速度。且对于在特定的焊接试验参数,存在一个最佳的励磁电流范围以获取高质量无驼峰的焊缝。

## 参考文献:

- [1] Naidu D S, Ozcelik S, Moore K L. Modeling, sensing and control of gas metal arc welding [M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2003.
- [2] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A, et al. High speed fusion weld bead defects [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2006, 11(6): 618–633.
- [3] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A, et al. The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(4): 447–459.
- [4] 胡志坤, 武传松. 高速 MAG 电弧焊驼峰焊道产生过程的试验研究 [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.
- [5] 陈 姬, 武传松. 高速 GMAW 驼峰焊道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.
- [6] Wu C S, Zhong L M, Gao J Q. Visualization of hump formation in high-speed gas metal arc welding [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11): 115700.
- [7] Michie K, Blackman S, Ogunbiyi T E B. Twin-wire GMAW: process characteristics and applications [J]. Welding Journal, 1999, 78(5): 31–34.
- [8] Li K H, Chen J S, Zhang Y M. Double-electrode GMAW process and control [J]. Welding Journal-New York, 2007, 86(8): 231–237.
- [9] Choi H W, Farson D F, Cho M H. Using a hybrid laser plus GMAW process for controlling the bead humping defect [J]. Welding Journal, 2006, 85(8): 174–179.
- [10] 朱 胜, 王启伟, 殷凤良, 等. 交变纵向磁场作用下 MIG 焊电弧行为研究 [J]. 材料热处理学报, 2012, 32(11): 23–27.  
Zhu Sheng, Wang Qiwei, Yin Fengliang, et al. Study on behavior of MIG welding arc under alternating longitudinal magnetic field [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 2012, 32(11): 23–27.
- [11] 陈树君, 王 军, 王会霞, 等. 纵向磁场作用下的旋转射流过渡的机理 [J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 45–49.  
Chen Shujun, Wang Jun, Wang Huixia, et al. Mechanism of rotating spray transfer mode under the longitudinal magnetic field [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(3): 45–49.
- [12] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 309–321.

**作者简介:** 王 林,男,1990年出生,博士研究生。主要从事高速 GMAW 焊接工艺的研究,发表论文 3 篇。Email: sduwanglin@163.com

**通讯作者:** 高进强,男,教授。Email: jgq@sdu.edu.cn