

DE-GMAW 高速电弧焊工艺机理的研究 *

武传松 张明贤

(山东大学材料连接技术研究所, 济南 250061)

李克海 张裕明

(Center for Manufacturing, University of Kentucky, Lexington, KY 40506, USA)

摘 要 通过大量的工艺实验, 找出了 DE-GMAW 双焊枪组合的匹配参数, 测试了焊接电流波形, 拍摄了熔滴过渡图像, 并获得了无成型缺陷的焊缝照片。基于实验结果解释了高速焊接工艺的机理。建立了适用于 DE-GMAW 焊接工艺的有限元模型, 并对该工艺条件下的温度场、应力-应变场进行了数值模拟。结果表明: 计算出的 DE-GMAW 焊缝横断面形状尺寸与实验结果吻合良好; 在通过焊丝的总电流相同时, DE-GMAW 焊接时焊缝尺寸、热影响区宽度、应力、应变及变形均小于常规 GMAW 焊时的结果。这为 DE-GMAW 焊接工艺参数优化提供了基础数据。

关键词 高速电弧焊接, 工艺机理, DE-GMAW, 有限元分析

中图分类号 TG401

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)06-0663-05

STUDY ON THE PROCESS MECHANISM OF HIGH-SPEED ARC WELDING DE-GMAW

WU Chuansong, ZHANG Mingxian

Institute of Materials Joining, Shandong University, Jinan 250061

LI Kehai, ZHANG Yuming

Center for Manufacturing, University of Kentucky, Lexington, KY40506, USA

Correspondent: WU Chuansong, professor, Tel: (0531)88392711, Fax: (0531)88392711,

E-mail: wucs@sdu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50675119) and US NSF

(No.DMI-0355324)

Manuscript received 2006-12-08, in revised form 2007-03-20

ABSTRACT Through large amount of experiments, the geometrically matched parameters in torch-set up of DE-GMAW (double electrode-gas metal arc welding) were found, and the welding current waveforms, images of metal transfer, and photographs of weld without defects were obtained. Based on these test results, the reasons that DE-GMAW can realize high-speed welding were explained. A finite-element analysis model suitable to DE-GMAW process is developed to simulate the temperature field and stress-strain field. The predicted and measured weld dimensions at cross section matched well, and the weld dimension, heat-affected zone width, stress, strain and deformation in DE-GMAW are much lower than those in conventional GMAW under same welding condition. It provides the basic data for optimizing the process parameters in DE-GMAW.

KEY WORDS high speed arc welding, process mechanism, DE-GMAW, finite-element analysis

高效、优质、低耗是当前制造业对焊接技术提出的迫切要求^[1,2]。焊接作为一种重要的制造成形工艺, 其效率的提高对企业总的生产率的提高有着举足轻重的影响。现代制造业为了增强市场竞争能力, 对焊接生产加工的效率

提出了越来越高的要求^[3]。提高焊接生产率的主要途径之一是大幅度提高焊接速度。采用高能密度焊接工艺技术(激光焊, 电子束焊), 可以提高焊接速度和焊接生产率, 但其工艺复杂、设备投资成本高, 对工件的装配精度要求高, 适应性差, 难以大面积推广应用^[4]。另一方面, 当焊接速度提高到一定程度时, 不管是传统的焊接方法(钨极氩弧焊、熔化极气体保护电弧焊), 还是高能密度焊接技术(电子束焊和激光焊), 都会出现焊缝成形缺陷, 例如, 焊道咬边和驼峰焊道等, 这是高速焊接面临的共性问题^[5-8]。如果对现有的电弧焊接工艺方法进行高效化改进, 充分利

* 国家自然科学基金项目 50675119、美国国家科学基金会项目 DMI-0355324 和高等学校博士学科点专项科研基金项目 20050422027 资助

收到初稿日期: 2006-12-08, 收到修改稿日期: 2007-03-20

作者简介: 武传松, 男, 1959 年生, 教授, 博士

用其高适应性的特点,同时避免高速焊时焊缝成形缺陷的产生,实现制造业焊接生产加工的低成本和高速度,无疑具有广阔的应用前景.这对于增强制造业的市场竞争能力,具有重要的理论意义和工程实用价值.本文结合研发出的 DE-GMAW 高速焊接新工艺^[9],开展工艺实验和数值分析,研究 DE-GMAW 高速焊接方法的关键工艺理论问题,为其参数优化提供基础数据,为实现低成本、高质量的高速焊接奠定坚实基础.

1 高速电弧焊实验系统

已有研究结果证明^[10],如果在焊接速度提高时能够保持单位长度上熔敷的焊丝金属量不变(实际上相当于随着焊接速度的提高,要增大焊接电流以提高焊丝的熔化速度),同时要在焊丝和母材之间合理分配热量,保持母材熔深不变(即减少对母材的热输入),才能避免高速焊接焊缝成形缺陷的产生.这就是说,为了实现高速焊接,防止焊缝成形缺陷的产生,一方面要减小对母材的热输入,同时还要增大通过焊丝的焊接电流.这是一个矛盾.因为对于常规的熔化极气体保护电弧焊,通过焊丝的焊接电流就等于作用在母材上的焊接电流;如果要提高焊丝的熔化速度,就必然增加了对母材的热输入.因而无法解决这一矛盾,所以常规的熔化极气体保护电弧焊,焊接速度无法提高到高速焊的程度.

为了对常规的熔化极气体保护电弧焊进行高效化改进,提出一种新型的电弧焊工艺 DE-GMAW(double electrode-gas metal arc welding).如图 1 所示,DE-GMAW 焊接工艺方法将一个 GTAW 焊枪与一个 GMAW 焊枪相组合,GTAW 焊枪构成旁路(bypass),GMAW 焊枪与工件构成主路.流经焊丝的焊接电流 I ,在电弧弧柱区分为两部分,一是旁路电流 I_{bp} ,二是施加到母材的电流 I_{bm} .作用于焊丝上的电流数值较高,有利于提高焊丝的熔化速度,从而提高熔敷率.GTAW 焊枪构成的旁路,分流了一部分通过焊丝的焊接电流,在保证熔敷率的同时,减小了作用于母材的热输入,很好地解决了上述矛盾.工艺实验结果表明,DE-GMAW 可以

实现高速焊接(焊接速度在 1.2 m/min 以上).由于 DE-GMAW 本质上属于电弧焊的改型,所以,它是低成本的高效焊接方法.

通过焊丝的焊接电流 I (即总的焊接电流),是由送丝速度和焊接电压决定的,这如同常规 GMAW 焊接的情况.而通过控制旁路电流 I_{bp} 的大小,就可以调节作用于母材上的电流 I_{bm} .在图 1 所示的实验装置中,焊丝端部是主路电弧和旁路电弧的共同的阳极.电流传感器检测通过母材的电流.控制系统通过改变旁路电路的电阻值来调节旁路电流 I_{bp} 的大小,使得作用于母材上的电流 I_{bm} 处于理想的水平.如图 2 所示,有 4 个几何参数对 DE-GMAW 高速焊接过程有着重要的影响,即 GMAW 焊枪导电咀与工件之间的距离(d_1),旁路 GTAW 焊枪的钨极端部到工件的距离(d_2),钨极端部与焊丝端部之间的距离(d_3),两个焊枪之间的夹角(θ).通过大量的 DE-GMAW 高速焊接工艺实验,找出了这 4 个参数的合理匹配的数值.

2 实验方法

在图 2 所示的双焊枪组合中,两把焊枪安装固定在一起,同时相对于工件运动.相对于焊接方向来说,GTAW 焊枪在前,GMAW 焊枪在后.GTAW 焊枪采用直径 3.2 mm 的 2% 钍钨极、100%Ar 气保护.GMAW 焊枪的焊丝是直径 1.2 mm 的低碳钢焊丝(ER70S-6),采用 90%Ar+10%CO₂ 混合保护气体.试件为厚度 2.5 mm 的低碳钢板(长 120 mm,宽 50 mm).

焊接过程中,工件运动,焊枪固定,采用高速摄像机 Olympus i-speed 拍摄熔滴过渡过程.高速摄像机每秒拍摄 4000 幅,它本身的光圈和滤光片设计能有效减小电弧光的干扰,不需采用其它背光措施.为了研究旁路电弧对 DE-GMAW 焊接过程的影响,在一组实验中,常规 GMAW 焊接(即没有旁路电弧)10 s 之后,再引入旁路电弧构成 DE-GMAW 焊接.高速摄像机在引入旁路电弧时刻的前 2 s 和后 2 s 拍摄记录熔滴过渡过程.

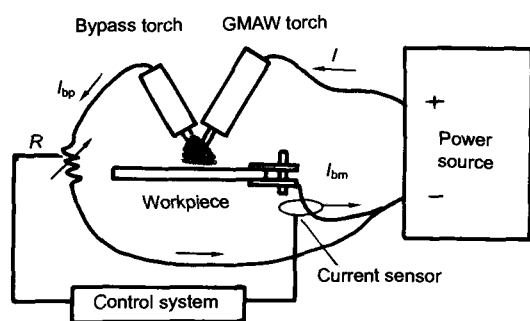


图 1 DE-GMAW 高速焊接工艺原理示意图

Fig.1 Schematic of DE-GMAW high-speed welding process

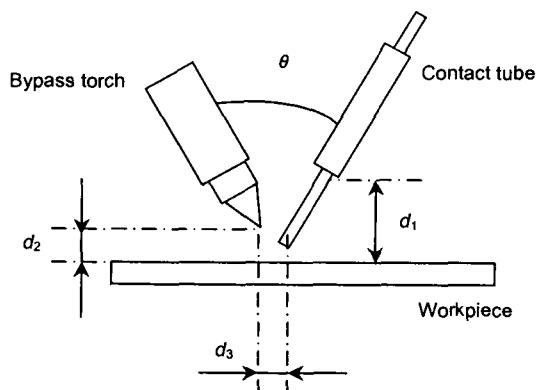


图 2 DE-GMAW 焊枪组合的几何参数

Fig.2 Geometrical parameters in torch-set up of DE-GMAW

3 实验结果

图 3 是拍摄的熔滴过渡图像. 其中, 图 3a 对应的情况是没有旁路电弧, 相当于常规 GMAW 焊接, 焊接电流是 214 A, 是滴状过渡. 而图 3b 是 DE-GMAW 焊接, 通过焊丝的焊接电流是 214 A, 其中旁路电流 72 A, 通过母材的电流是 142 A. 焊接电流的测量结果如图 4 所示, 10 s 之前, 旁路电流为 0, 是常规 GMAW 焊接; 10 s 之后, 是 DE-GMAW 焊接.

从图 4 可以看出, DE-GMAW 焊接过程中, 由于旁路电弧的存在, 降低了产生射流过渡的临界电流值. 对于常规 GMAW 焊接, 临界电流约为 240 A. 而对于 DE-GMAW 焊接过程, 通过焊丝的焊接电流为 214 A 时, 就出现射流过渡. 这是 DE-GMAW 焊接的一个优点. 另外, 无旁路电流时, 熔滴沿焊丝轴线 (与水平面呈 60° 角) 呈滴状过渡 (图 3a), 有旁路电流时, 熔滴过渡的路径被向后推离, 即稍微偏离焊丝轴线 (图 3b), 熔滴落在熔池稍靠后的位置, 而此处液态金属层较厚, 这使得熔滴冲击力偏离电弧压力的作用点, 因而有利于减小熔深, 适宜于薄板的高速焊接.

图 5 是 DE-GMAW 高速焊接的焊缝成形及横断面照片. 焊接工艺参数如下: 焊接速度 1.27 m/min, 焊接电压 32 V, 送丝速度 13.97 m/min, 通过焊丝的焊接电流是 330 A, 其中旁路电流 80 A, 通过母材的电流是 250 A. 可见, 一方面通过焊丝的焊接电流较高 (为 330 A), 保证了较大的焊丝熔敷率; 另一方面降低了作用在母材上的焊接电流 (为 250 A), 减小了对母材的热输入. 因此, 实现了 2.5 mm 厚低碳钢板的高速焊接, 焊接速度达到 1.27 m/min, 而没有出现咬边和驼峰等焊缝成形缺陷.

4 数值分析结果与讨论

具体结合 DE-GMAW 高速焊接的工艺特点, 对 SYSWELD 软件进行二次开发, 扩展了其功能, 建立了适合该新工艺的有限元数值分析模型. 计算了通过焊丝的总电流相同时 DE-GMAW 高速焊接与常规 GMAW 焊接时的温度场、焊缝断面形状以及应力变形.

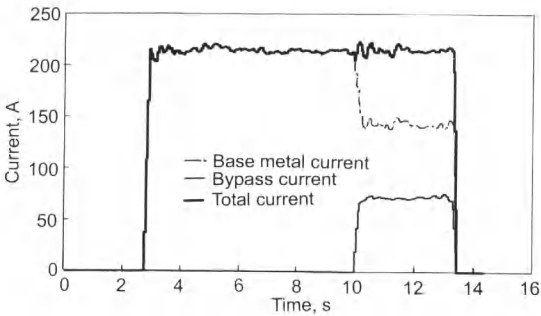


图 4 焊接电流的测试结果

Fig.4 The measured results of welding current (welding voltage 28 V, wire feed speed 6.4 m/min)

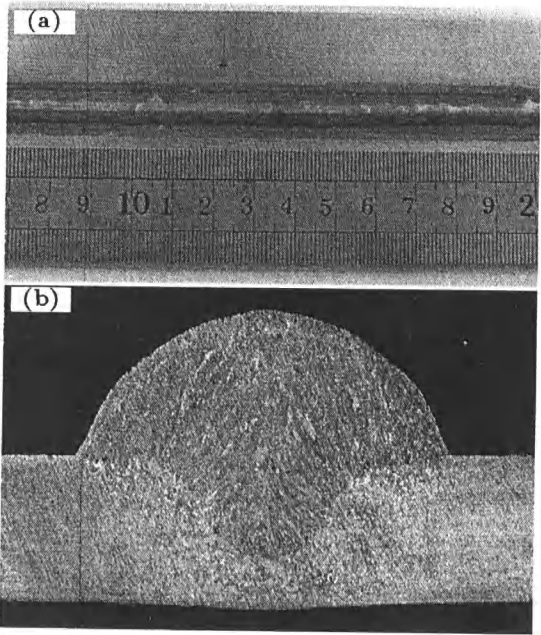


图 5 DE-GMAW 高速焊接的焊缝成形及焊缝横断面

Fig.5 The weld formation (a) and weld cross-section (b) in high-speed DE-GMAW

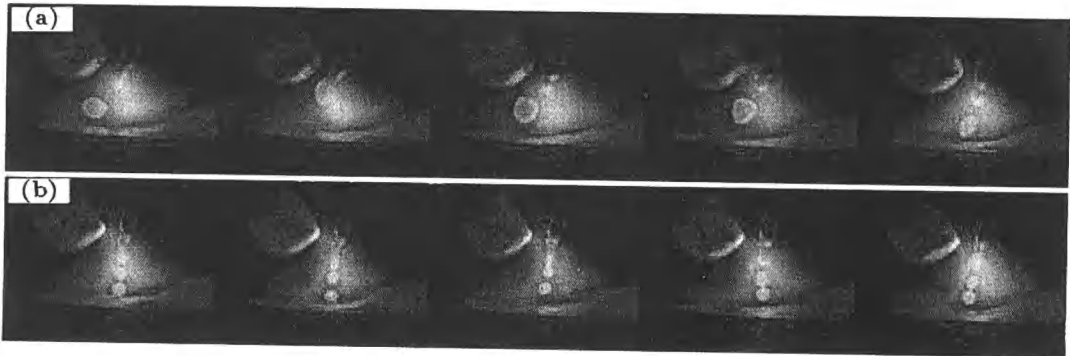


图 3 熔滴过渡的图像检测结果

Fig.3 The captured images of metal transfer at bypass current $I_{bp}=0$ A (a) and $I_{bp}=72$ A (b) (welding voltage 28 V, wire feed speed 6.4 m/min)

图 6 比较了 DE-GMAW 高速焊接与常规 GMAW 焊接时的焊缝断面形状和温度场计算结果. 焊接工艺条件与图 5 相同. 可以看出, 在其它焊接条件 (焊接速度、送丝速度、通过焊丝的焊接电流、焊接电压、工件尺寸) 相同的情况下: (1) GMAW 焊时, 作用于工件上的焊接电流为 330 A, 热输入较高, 工件已经熔透; 而 DE-GMAW 焊时, 作用于工件上的焊接电流为 250 A, 热输入有所减小, 工件并未熔透. (2) GMAW 焊时, 热影响区正面和背面的宽度分别比 DE-GMAW 焊时大得多. (3) GMAW 焊时, 熔池长度明显比 DE-GMAW 焊时长. 图 7 为 DE-GMAW 高速焊时工件断面焊缝尺寸有限元计算结果与实验结果之间的比较. 可以看出, 两者吻合较好.

为了更直观地反映焊后变形情况, 计算了焊后 120 s 时 DE-GMAW 与 GMAW 工件横断面及上表面的变形

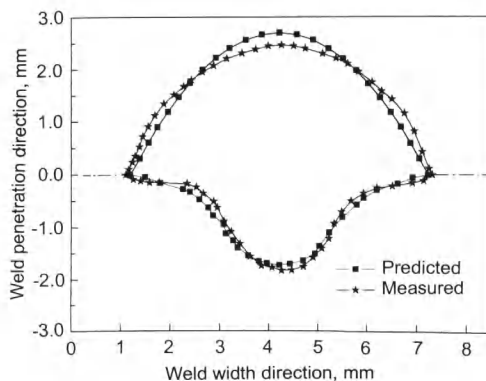


图 7 DE-GMAW 焊缝横截面的计算与实验结果

Fig.7 The predicted and measured weld cross sections in DE-GMAW

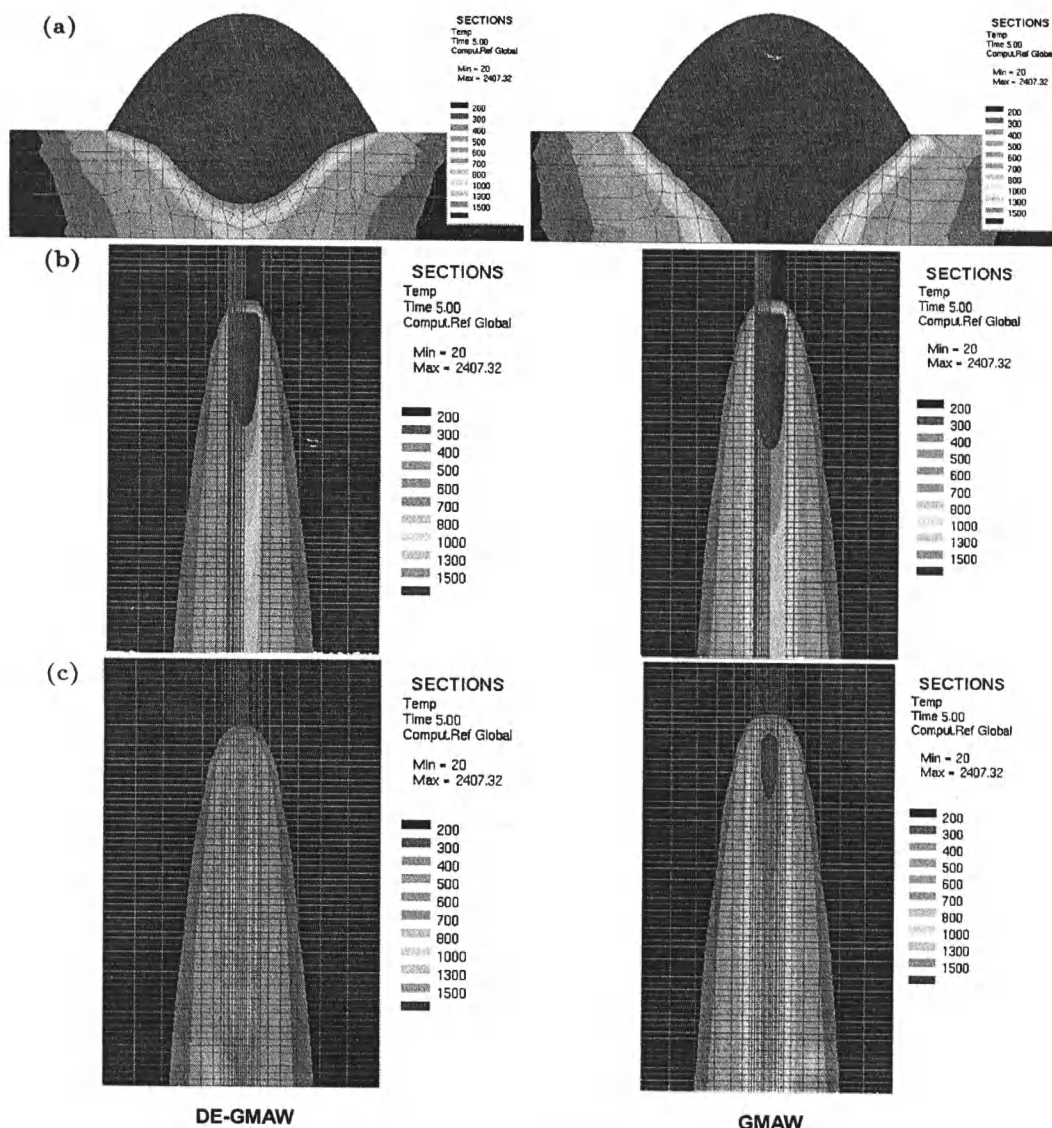


图 6 DE-GMAW 与 GMAW 焊接热过程计算结果的比较

Fig.6 Comparison of the calculated temperature fields in DE-GMAW and GMAW

(a) cross section (b) top surface (c) bottom surface

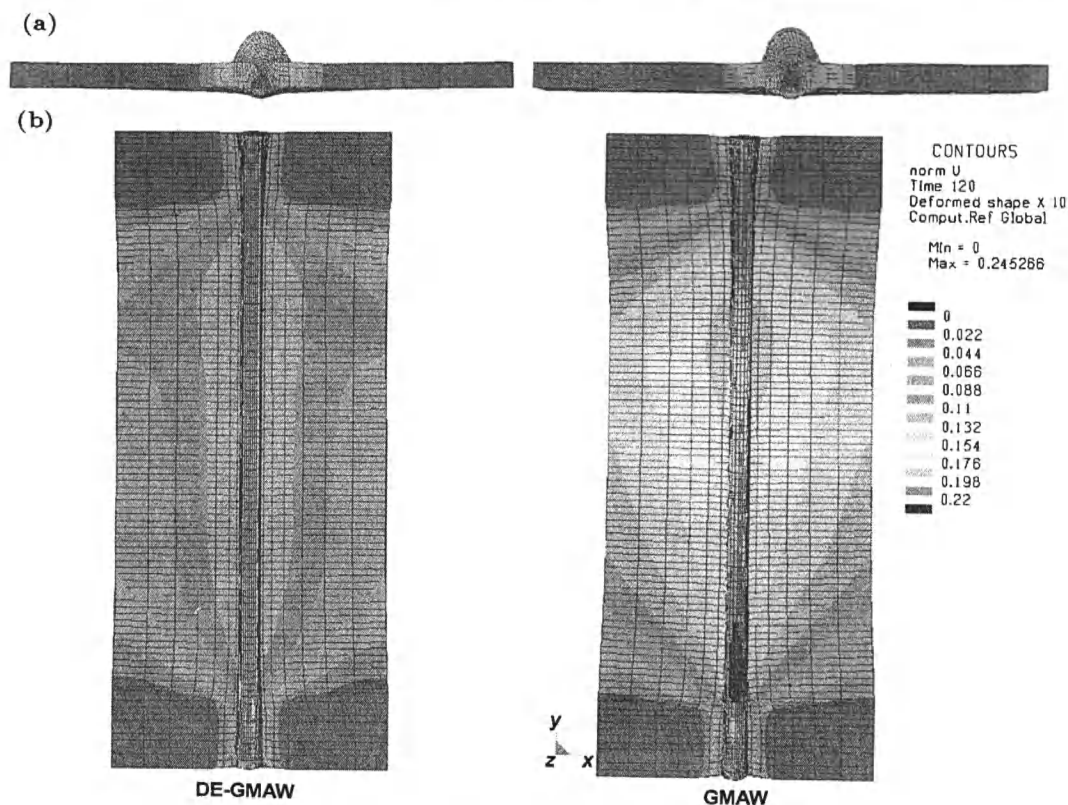


图 8 DE-GMAW 与 GMAW 焊接时工件变形情况
Fig.8 The deformation of workpiece in DE-GMAW and GMAW
(a) cross section (b) top surface

情况。图 8 分别为两种情况下放大 10 倍的有限元计算结果云图。可以看出,在焊接条件(焊接速度、送丝速度、通过焊丝的焊接电流、焊接电压、工件尺寸)和夹持条件等均相同的情况下,因为 DE-GMAW 高速焊接工艺中旁路电流的存在减小了焊接过程中对母材的热输入,DE-GMAW 焊接时工件挠曲变形、横向收缩情况均比 GMAW 焊时要小得多。

5 结论

(1) DE-GMAW 焊接工艺通过 GTAW 焊枪构成的旁路,分流了一部分通过焊丝的焊接电流,在保证熔敷率的同时,减小了作用于母材的热输入,较好地解决了高速焊接面临的既要减小对母材的热输入、同时还要增大通过焊丝的焊接电流的矛盾。

(2) DE-GMAW 焊接工艺降低了出现射流过渡的临界电流值,在保证焊缝成形良好的条件下实现了高速焊接(焊接速度在 1.2 m/min 以上)。由于 DE-GMAW 本质上属于电弧焊的改型,所以,它是低成本的高效焊接方法。

(3) 建立了 DE-GMAW 高速焊接热场与应力变形的有限元分析模型,计算出的 DE-GMAW 焊缝断面形状尺寸与实验结果吻合良好。对于相同的工艺条件,DE-GMAW 焊缝熔深适当;而 GMAW 焊接时工件已经熔透,背面熔宽达到了 2.20 mm,工件的正面热影响区宽度

比 DE-GMAW 焊时大 107%。

(4) 对 DE-GMAW 和 GMAW 焊接两种情况下的应力和变形进了有限元计算,在焊接条件和夹持条件均相同的情况下,DE-GMAW 焊接时的工件挠曲变形、横向收缩情况均比 GMAW 焊接时要小得多。

参考文献

- [1] Guan Q, Lin S Y. *Proc New Fusion Weld Technol Appl*, Beijing: China Welding Society, 2003: 11
(关 桥, 林尚扬. 熔焊新技术及应用研讨会论文集, 北京: 中国焊接学会, 2003: 11)
- [2] Harwig D, Gordon R. *Proc 6th Int Conf Trends in Welding Research*, Materials Park, OH: ASM International, 2003: 995
- [3] American Welding Society. *Vision for Welding Industry*, 2002
- [4] Zhang Y M, Zhang S B, Jiang M. *Weld J*, 2002; 81: 248s
- [5] Savage F, Nipples E F, Agusa K. *Weld J*, 1979; 58: 212s
- [6] Olsson R. *Weld Rev Int*, 1995; 14: 128
- [7] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A, Kerr H W. *Sci Technol Weld Join*, 2005; 10: 447
- [8] Tusek J. *Weld Rev Int*, 1996; 15(8): 102
- [9] Wu C S, Xu G X, Li K H, Zhang Y M. *7th Int Conf Trends in Welding Research*, Materials Park, OH: ASM International, 2006: 814
- [10] Feng L. *PhD Dissertation*, Beijing University of Technology, 2000
(冯 雷. 北京工业大学博士学位论文, 2000)