

DP-TIG 焊接方法工艺研究

刘自刚 瞿怀宇 曹瑞昌 孙 薇
(唐山开元焊接自动化技术研究所, 河北 唐山 063000)

摘要 深熔氩弧焊接方法(DP-TIG, Deep Penetration Tungsten Inert Gas Welding)是通过钨极的高效冷却,压缩电弧,获得能量密度大、挺度高的电弧,可以实现穿孔形式的焊接,达到增大焊接熔深的目的。试验针对低碳钢和不锈钢两种焊接母材,通过调整相关的工艺参数,实现稳定的穿孔型焊接,最终实现低碳钢 10 mm 以下板厚,不开坡口平板对接焊的单面焊双面成形及不锈钢 12 mm 以下板厚,不开破口平板对接焊的单面焊双面成形焊接工艺,极大地提高 TIG 焊的焊接效率。

关键词: 深熔氩弧焊 工艺试验 低碳钢 不锈钢
中图分类号: TG401

0 序 言

钨极惰性气体保护焊(Tungsten Inert Gas Welding, 简称 TIG 焊)具有焊接过程稳定、焊缝成形质量优良等优点,属于一种高质量、高精度的焊接方法。但同时该方法存在电弧能量发散、钨极载流能力低、单道焊接熔深浅、焊接效率低下等不足^[1-7]。为了增大 TIG 焊的单道焊接熔深,提高焊接效率,文中提出了 DP-TIG 焊接方法(DP-TIG, Deep Penetration Tungsten Inert Gas Welding),该方法通过对钨极的高效冷却,实现压缩电弧,提高能量密度,增大焊接熔深的目的。该焊接方法由于电弧具有较大的能量密度和较高的电弧挺度,可以实现穿孔形式的焊接,获得稳定的单面焊双面成形焊接工艺,同时可以大大提高焊接速度。

试验针对不同的焊接母材、不同厚度的板材进行平板对接焊试验,研究该焊接方法在进行对接焊时,可以实现稳定的单面焊双面成形焊接工艺的参数范围,这对于促进该焊接方法的研究及在工业生产上的推广应用具有重要意义。

1 试验材料与方法

试验采用的母材为低碳钢 Q235 和 SUS304 不锈钢板材,对应两种母材使用的焊丝分别为神钢 MG-51T 和京雷 308LSi,焊丝直径均为 1.2 mm。焊前用角磨机打磨试板表面,去除表面的氧化皮、油污等,然后进行平板对接焊。试验使用自行设计的 DP-TIG 焊枪,如

图 1 所示。试验采用的通用参数见表 1,针对不同板厚、不同母材调整相关的焊接参数,直至实现稳定的穿孔形式的焊接,获得成形优良、射线探伤无缺陷的焊缝及参数范围。截取焊缝的横截面,然后研磨、抛光、腐蚀,进行宏观金相拍照,获得焊缝的宏观截面形貌。

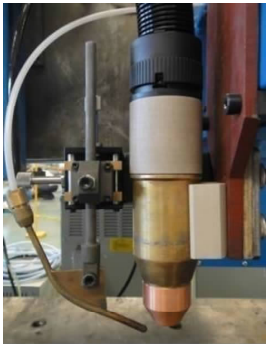


图 1 DP-TIG 焊枪

表 1 通用焊接参数

送丝速度 $v_1/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	保护气流量 $Q_1/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	弧长 l/mm
800	20	2

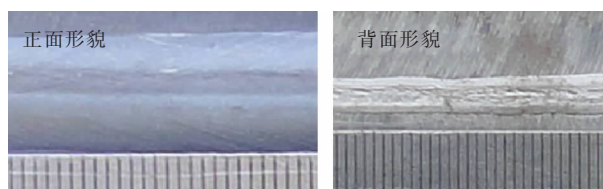
2 试验结果

2.1 低碳钢工艺试验

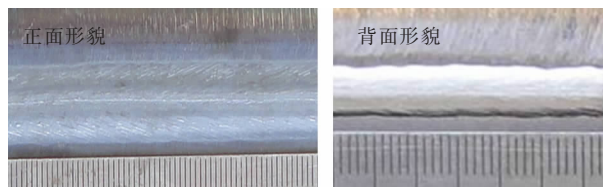
2.1.1 4 mm 厚低碳钢板工艺试验

采用的板材规格为 400 mm × 80 mm × 4 mm,通过调整焊接电流和焊接速度,实现单面焊双面成形焊接,获得的试验结果如图 2 所示。

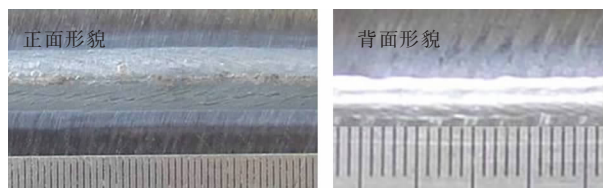
从试验结果可以看出 DP-TIG 焊接方法针对 4 mm



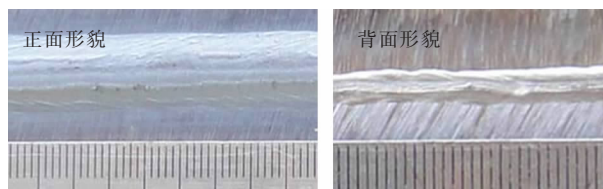
(a) 焊接电流 350 A, 焊接速度 420 mm/min



(b) 焊接电流 390 A, 焊接速度 420 mm/min



(c) 焊接电流 420 A, 焊接速度 500 mm/min



(d) 焊接电流 450 A, 焊接速度 600 mm/min

图2 4 mm 厚低碳钢板 DP-TIG 焊接形貌

厚的不锈钢板可以实现稳定的单面焊双面成形焊接工艺,并且焊接速度可以高达 600 mm/min。

2.1.2 6 mm 厚低碳钢板工艺试验

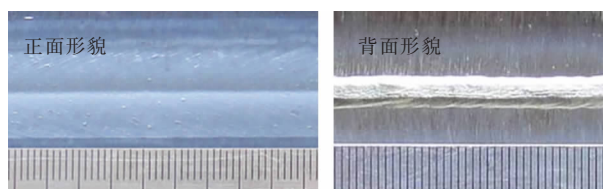
母材规格为 400 mm × 80 mm × 6 mm,通过调整焊接电流和焊接速度实现单面焊双面成形,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,对于 6 mm 厚的低碳钢板采用 DP-TIG 焊接方法可以实现稳定的单面焊双面成形焊接工艺,最高焊接速度可以达到 330 mm/min。

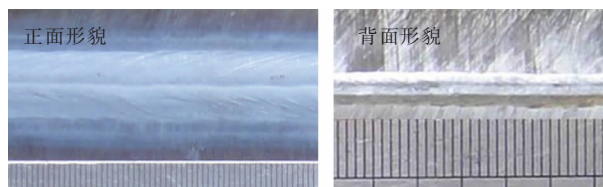
2.1.3 8 mm 厚低碳钢板工艺试验

采用 400 mm × 80 mm × 8 mm 的低碳钢板材,进行平板对接焊工艺试验,通过调整相关工艺参数实现稳定的单面焊双面成形工艺,结果如图 4 所示。

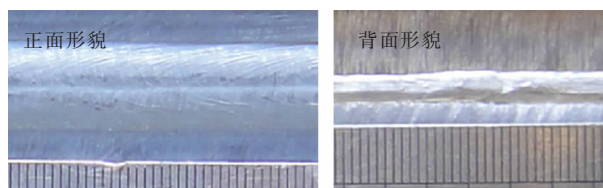
从图 4 可以看出,在四组参数下均可以实现 8 mm 厚低碳钢板对接焊的单面焊双面成形工艺,且最高焊接速度可以达到 280 mm/min。对比前两组后两组试验结果可以看出,前两组试样焊缝的正面和背面成形均较好,后两组试验正面成形均匀稳定,正面成形存在轻微咬边,这跟焊接速度较高有关。



(a) 焊接电流 400 A, 焊接速度 250 mm/min

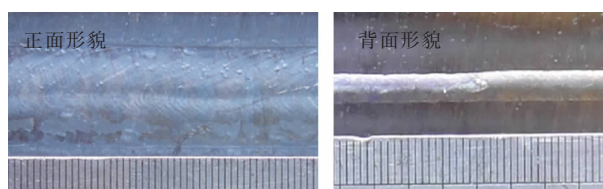


(b) 焊接电流 425 A, 焊接速度 300 mm/min

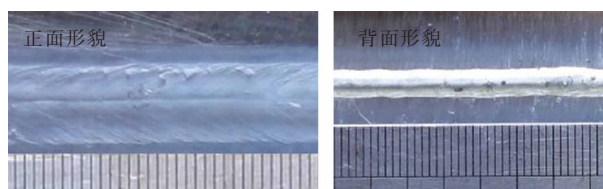


(c) 焊接电流 450 A, 焊接速度 330 mm/min

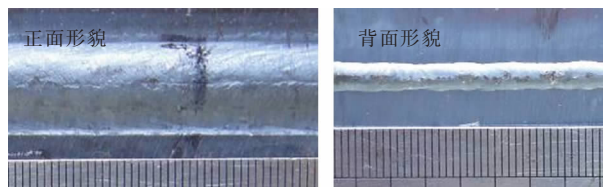
图3 6 mm 厚低碳钢板 DP-TIG 焊接形貌



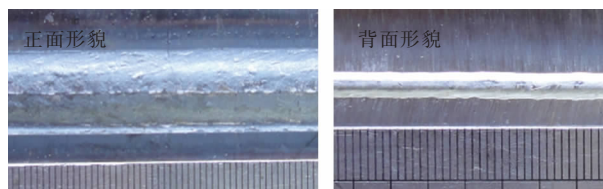
(a) 焊接电流 450 A, 焊接速度 180 mm/min



(b) 焊接电流 480 A, 焊接速度 200 mm/min



(c) 焊接电流 500 A, 焊接速度 230 mm/min

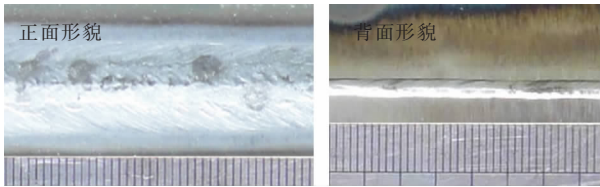


(d) 焊接电流 550 A, 焊接速度 280 mm/min

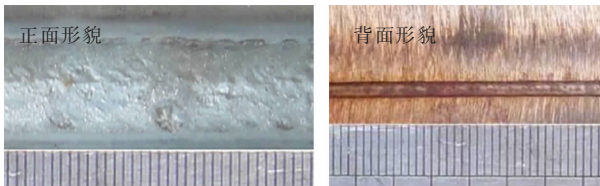
图4 8 mm 厚低碳钢板 DP-TIG 焊接形貌

2.1.4 10 mm 厚低碳钢板工艺试验

采用 400 mm × 80 mm × 10 mm 规格的低碳钢板材进行平板对接焊,实现单面焊双面成形焊接,试验结果如图 5 所示。



(a) 焊接电流 485 A, 焊接速度 180 mm/min



(b) 焊接电流 500 A, 焊接速度 180 mm/min

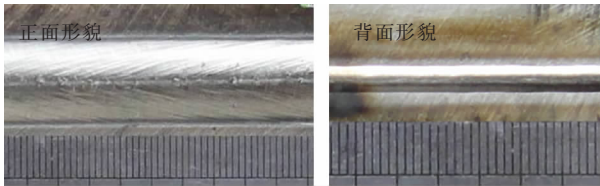
图 5 10 mm 厚低碳钢板 DP-TIG 焊接形貌

从图 5 所示的结果可知,DP-TIG 焊接方法可实现 10 mm 厚低碳钢板平板对接的单面焊双面成形工艺,且焊缝的正面成形和背面成形均较好。

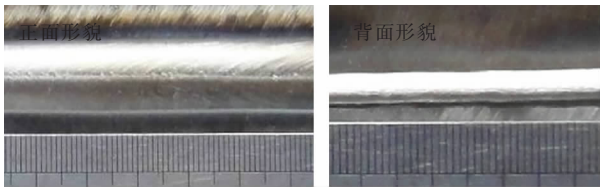
2.2 不锈钢工艺试验

2.2.1 6 mm 厚不锈钢板工艺试验

采用板厚为 6 mm 的 304 不锈钢板进行平板对接焊,实现单面焊双面成形焊接工艺,得到的试验结果如图 6 所示。



(a) 焊接电流 420 A, 焊接速度 300 mm/min



(b) 焊接电流 420 A, 焊接速度 340 mm/min

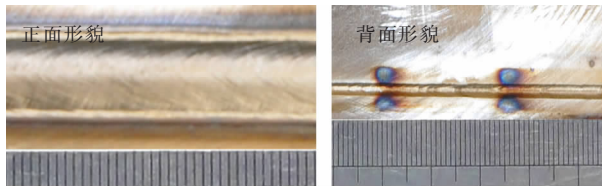
图 6 6 mm 厚不锈钢板 DP-TIG 焊接形貌

从图 6 所示的试验结果可以看出,利用 DP-TIG 焊接方法可以很好地实现 6 mm 不锈钢平板对接焊的单面焊双面成形焊接工艺,焊缝的正面成形及背面成形均较好,最高焊接速度可达 340 mm/min。

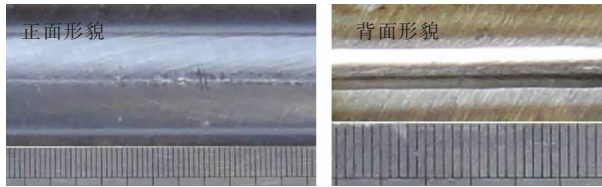
2.2.2 10 mm 厚不锈钢板工艺试验

母材为 10 mm 厚的 304 不锈钢板材,不开坡口,进行平板对接焊,通过调整焊接参数,一道完成焊接,实现单面焊双面成形焊接工艺,如图 7 所示为得到的焊缝正面和背面形貌。

从图 7 所示的结果可以看出,对于 10 mm 厚的不锈钢板的平板对接焊,利用 DP-TIG 焊接方法可以实现单面焊双面成形焊接,且焊缝的正面成形和背面成形均较好,焊接速度可以达到 230 mm/min,相对于常规 TIG 焊可以大大提高焊接效率。



(a) 焊接电流 485 A, 焊接速度 200 mm/min

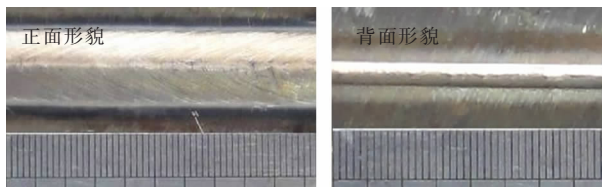


(b) 焊接电流 520 A, 焊接速度 230 mm/min

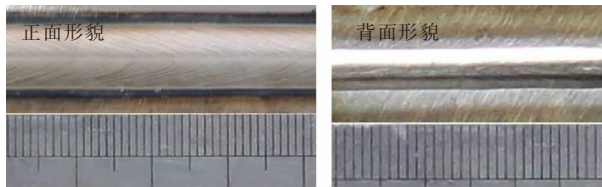
图 7 10 mm 厚不锈钢板 DP-TIG 焊接形貌

2.2.3 12 mm 厚不锈钢板工艺试验

试验采用 12 mm 厚的 304 不锈钢板材为母材,进行 I 形坡口平板对接焊试验,焊接前平板组对的错边和间隙大小为 0 mm,然后调整相关的工艺参数实现穿孔形式的焊接,获得成形优良的焊缝。得到的试验结果如图 8 所示。



(a) 焊接电流 500 A, 焊接速度 180 mm/min



(b) 焊接电流 590 A, 焊接速度 230 mm/min

图 8 12 mm 厚不锈钢板 DP-TIG 焊接形貌

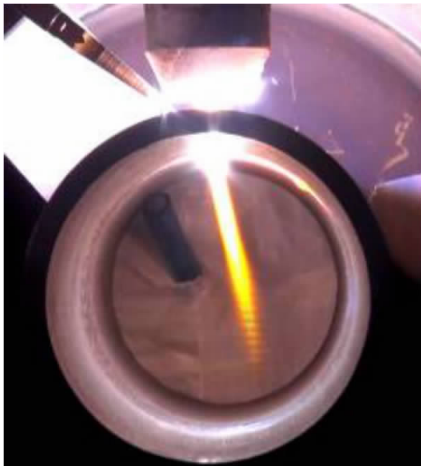
从图 8 所示的试验结果可以看出,在合适的工艺参数条件下,可以实现 12 mm 厚不锈钢板平板对接焊的单面焊双面成形焊接工艺,焊接过程稳定,焊缝正面成形和背面成形均较好,焊接速度可以在 180 ~ 230 mm/min 范围内变动。

2.3 焊接电弧观察

针对不锈钢平板对接焊和不锈钢管环缝对接焊进行了 DP-TIG 穿孔焊接电弧形态和穿孔焊接效应观察,结果如图 9 所示。从图所示的试验结果可以看出,焊接时电弧穿透母材,在母材的背面形成一个细长的尾弧,实现穿孔形式的焊接。



(a) 平板对接焊



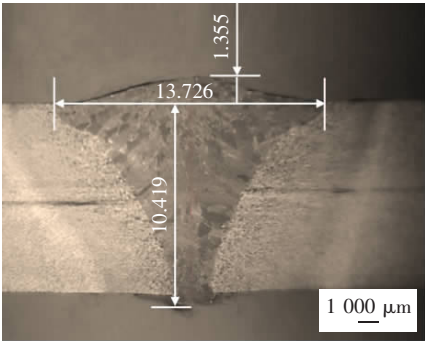
(b) 环缝对接焊

图 9 DP-TIG 穿孔焊接电弧

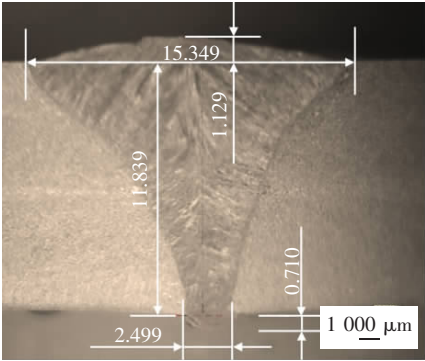
2.4 焊缝截面形貌

针对图 5a 和图 8a 所示的接头表面形貌截取了接头的横截面以观察焊缝截面形貌,结果如图 10a, 10b 所示,图 10c 为采用与图 10a 相同焊接参数进行的常规 TIG 焊,得到的焊缝截面形貌。由图 10 所示的结果可

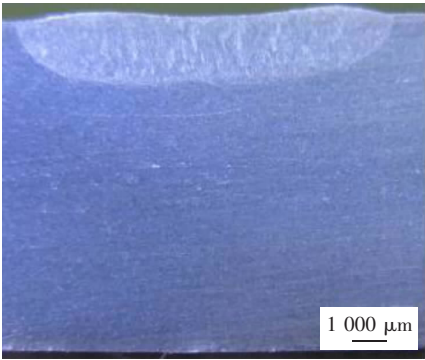
以看出,焊缝截面形貌成漏斗状,实现了 I 形坡口的良好连接。对比图 10a 和图 10c 可以发现采用相同的焊接参数,DP-TIG 焊接方法相对常规 TIG 焊可以极大提高焊接熔深。



(a) 10 mm 厚低碳钢



(b) 12 mm 厚不锈钢



(c) 常规 TIG 焊

图 9 DP-TIG 焊接焊缝截面形貌

3 分析与讨论

DP-TIG 焊接方法通过穿孔形式的焊接形成较大的焊接熔深,获得类似激光焊和电子束焊接的效果。决定能否形成稳定的穿孔焊的主要因素有:焊接电流、材料密度、材料热导率和熔池的表面张力。焊接过程要形成稳定的小孔焊接,熔池所受的重力 G 、表面张力 σ 、

电弧的静压力 F_a 、等离子流力 F_b 必须达到一种动态平衡^[8-11], 即

$$\vec{G} + \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{\sigma} = \vec{0} \quad (1)$$

焊接电弧可以看成是有许多平行的电流线组成的导体, 这些电流线由于电流方向相同, 在电磁力的作用下会相互吸引, 使导体的断面产生收缩的趋势。焊接电弧可以近似看成圆柱形导体, 电流线在导体中的分布可以看做是均匀的, 则导体内任意半径处的径向压力为

$$P_r = K(I^2/\pi R^4)(R^2 - r^2) \quad (2)$$

式中, R 为导体半径; I 为总电流; K 为系数; $K = \mu/4\pi$; μ 为介质的磁导率。由式(2)可知随着焊接电流的增大, 电弧的径向压力越大, 所以电弧收缩越严重, 同时由于 DP-TIG 焊枪内部对钨极的高效冷却作用, 削弱了电弧沿着钨极向上攀爬的趋势, 将电弧牢牢压缩在钨极的最尖端处, 从而获得高能量密度的电弧。

实际上焊接电弧并不是圆柱体, 而是近似圆锥状的气体导体, 由式(2)可知, 直径不同将引起压力差, 从而产生由电弧指向母材的静压力 F_a , 即

$$F_a = K I^2 \lg(R_a/R_b) \quad (3)$$

式中, R_b 为锥形弧柱的下底面半径; R_a 为锥形弧柱的上底面半径。由于电弧中弧柱中心的电流密度高于周边区域, 由式(3)可知 F_a 的分布是由电弧的中心轴向周围降低。电弧的等离子流力与等离子气流速度和焊接电流有关, 随着电流密度的增大和焊接电流的增大, 电弧中心的等离子流力增大。在电弧的静压力和等离子流力的作用下, 促使熔池中心的液态金属向下流动, 而周边的液态金属流向熔池的中心, 从而将更多的热量传导至熔池底部, 最终使焊接电弧穿透工件, 实现小孔焊接^[12-14]。另外熔化的液态金属在自身的重力、表面张力以及受到的电弧静压力和等离子流力的作用下, 随着焊接电弧的移动达到一个动态的平衡, 就可以实现稳定的穿孔型焊接, 极大提高焊接效率。

4 结 论

(1) DP-TIG 焊接方法可以实现 10 mm 以下板厚的低碳钢板材不开坡口对接, 12 mm 以下板厚的不锈钢板材不开坡口对接的单面焊双面成形焊接工艺, 且焊接速度较高, 焊缝成形优良。

(2) DP-TIG 焊接方法相对于常规 TIG 焊可以极大

提高焊接效率, 为一种新型高效 TIG 焊接方法。

参 考 文 献

- [1] 杨春利, 牛尾诚夫, 田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(3) [J]. 焊接, 2000(6): 11-15.
- [2] 杨春利, 牛尾诚夫, 田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(1) [J]. 焊接, 2000(4): 16-18.
- [3] 樊 丁, 刘自刚, 黄 勇, 等. 电弧辅助活性 TIG 焊缝组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 1-5.
- [4] 黄 勇, 樊 丁, 林 涛, 等. 不锈钢电弧辅助活性 TIG 焊[J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 1-4.
- [5] 武传松, 王 林, 陈 姬, 等. 电弧焊接工艺高效化改型的研发进展 [J]. 焊接, 2013(8): 1-10.
- [6] 杨 磊, 樊 丁, 黄 勇, 等. 耦合电弧 AA-TIG 高速焊工艺[J]. 电焊机, 2011, 41(5): 57-61.
- [7] 陆善平, 董文超, 李殿中, 等. 不锈钢材料的高效率焊接新工艺[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1347-1364.
- [8] Feng Yueqiao, Luo Zhen, Liu Zuming, et al. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel[J]. Materials and Design, 2015(85): 24-31.
- [9] Lohse M, Füssel U, Schuster H, et al. Keyhole welding with CF-TIG (cathode focused GTA) [J]. Weld World, 2013(57): 735-741.
- [10] Rosellini C, Jarvis L. The keyhole TIG welding process: a valid alternative for valuable metal joints [J]. Welding International, 2009, 23(8): 616-621.
- [11] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 299(1): 81-93.
- [12] 樊 丁, 康再祥, 黄 勇, 等. AA-TIG 焊表面氧化层成分及形成过程分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 5-9.
- [13] 王宗杰. 熔焊方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [14] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

作者简介: 刘自刚, 1985 年出生, 硕士, 工程师。主要从事新型高效焊接方法及设备的研究, 已发表论文 4 篇。