第33卷 第7期 焊 接 学 报 Vol. 33 No. 7
2012年7月 TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION July 2012

TIG-MIG 复合焊电弧特性机理分析

杨 涛[1]， 张生虎[1]， 高洪明[1]， 吴 林[1]， 许可望[2]， 刘永贞[2]
(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室，哈尔滨 150001；
2. 海洋石油工程股份有限公司，天津 300452)

摘 要：采用TIG-MIG复合焊电弧改善传统单一TIG及MIG焊的不足. 基于PID闭环控制，实现恒流恒压外特性输出，从而实现TIG-MIG电弧复合. 研究了复合电弧的电弧特性、熔滴过渡形式及不同极性接法对焊缝的影响. 结果表明，TIG焊电弧对MIG焊电弧具有良好的维弧作用. TIG-MIG焊电弧复合熔滴过渡过程，TIG焊电弧稳定燃烧，为了保持最小的能量消耗而作用于熔滴上，对熔滴具有加热作用. 直流反接具有良好的阴极雾化清理作用. TIG-MIG焊电弧复合能够有效降低焊接飞溅，促进焊缝铺展及成形，实现高效化、优质化的焊接.

关键词：电弧复合；熔滴过渡；焊缝成形；高效化焊接
中图分类号：TG434 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-360X(2012)07-0025-04

杨 涛

0 序 言

质量和效率是工业生产中十分重要的两个指标，对于焊接生产也是如此，如何高质高效的完成焊接任务一直是焊接科研工作者积极探索的问题[1]. 实现高效化焊接一种有效的途径就是采用复合热源提高焊接效率. 复合热源焊接是指将不同种类的电弧或热源相结合，在工件同侧或异侧进行焊接的方法，常用的复合热源通常是通过TIG和MIG焊电弧以及激光束、电子束、等离子束等高能束热源间的相互复合，如激光TIG复合焊、激光MIG复合焊等[2,3].

传统的MIG及TIG焊都存在其局限性，TIG焊电弧成形美观，电弧稳定，但焊接效率差，MIG焊电弧稳定性差，焊接飞溅大，成形难控制[4]. 作为评价的主要参数，正面熔宽、余高、焊缝熔深都是衡量焊缝的重要指标. TIG-MIG电弧复合焊作为一种复合热源焊接工艺，既满足了焊缝高质量焊接要求，又表现出高效率的生产特点[5,6]. 文中深入研究了TIG-MIG复合焊电弧的自起弧机制及复合弧下的熔滴过渡形式，复合电弧对母材及熔滴的作用机理. 试验表明，TIG-MIG复合焊电弧具有很强的实用性，在焊接过程中，TIG焊电弧一直存在，既能对MIG焊电弧起到有效的维弧作用，又能在焊接过程中起到预热工件及焊丝的效果. 该方法弥补了TIG焊效率差，解决了MIG焊电弧不稳定的问题，是一种应用广的高效化焊接工艺[7,8].

收稿日期：2011-05-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50974046；50904020)

1 试验方法

TIG-MIG复合焊电弧具备两种电弧共同的优势，但是两种电弧的复合因为其外特性存在差异而难于实现. 得到相匹配的电弧外特性是解决TIG-MIG电弧复合的关键环节. 基于PID的恒流、恒压闭环控制是传统的控制方法[9]，试验采用数值增量型PID算法，实现对TIG-MIG复合焊电源外特性的实时控制. 图1所示为TIG-MIG复合电弧控制系统，系统以嵌入式工控机作为控制核心，通过PID运算完成恒流、恒压闭环控制，实现TIG-MIG焊电弧复合，采用D/O输出控制送丝、送气及焊接时序.

TIG-MIG复合焊电弧焊接系统采用厚度为6 mm的Q235低碳钢作为焊接工件，采用直径ϕ 1.2 mm的H08Mn2Si焊丝作为焊接材料，保护气体为纯氩气，如图2所示. 通过嵌入式工控机对两台焊机进行PID恒流及恒压闭环控制，得到相匹配的电源外特性，用以满足TIG-MIG焊电弧复合所需要的匹配参数. 通过PID恒压闭环控制得到MIG电源的恒压外特性输出，采用等速送丝，通过恒流PID闭环控制得到TIG电源的恒流外特性输出，有利于焊接电流的稳定，对复合电弧具有良好维弧作用. 试验采用了两种接法，其一，TIG电极与MIG电极同时接负，工件接正的直流正接. 其二，TIG电极与MIG电

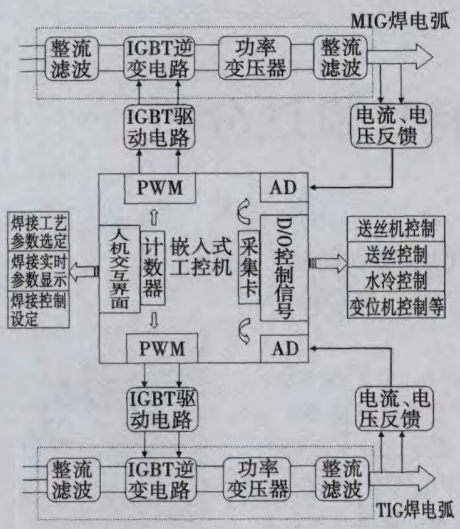


图 1 基于 PID 的 TIG-MIG 复合电弧实时控制系统

Fig. 1 PID-based realtime controlling system for TIG-MIG hybrid arc

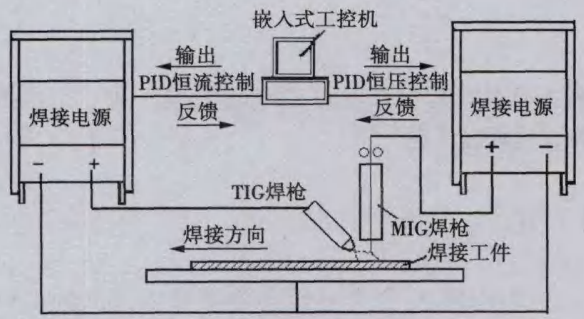


图 2 TIG-MIG 复合焊电弧试验系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of system for TIG-MIG hybrid arc

极同时接正，工件接负的直流反接.

2 复合电弧起弧机理及熔滴过渡形式

2.1 TIG-MIG 复合焊电弧起弧机理

常规 TIG 焊电弧主要依靠高频起弧，通过高频放电击穿间隙气体，使其电离，形成导通的电离环境，高频引弧瞬间，几千伏的高压会使控制设备发生损坏或者失灵，为了克服 TIG-MIG 复合焊电弧高频引弧的缺点，通过自引弧机制实现双弧的复合. 如图 3 所示，MIG 焊丝与工件发生短路产生 MIG 焊电弧，焊丝爆断的过程形成较大的 MIG 焊电弧，MIG 焊丝与工件之间形成以电弧存在形式的导电环境. 在 0.001 s 时，MIG 焊电弧能够在 TIG 焊钨极下方击穿 TIG 焊钨极与 MIG 焊电弧之间的空气形成导通空间，此时 TIG 焊钨极与工件通过 MIG 焊电弧导通环境进行引弧. TIG 焊电弧引燃后，对 MIG 焊电弧起到有效的维弧作用，TIG 焊电弧与 MIG 焊电弧对工件形成稳定的耦合电弧. 在 TIG 焊电弧一直存在的情况下，MIG 焊电弧稳定，焊接飞溅少.

2.2 复合电弧对熔滴的作用机理

熔滴的大小、尺寸、过渡频率、过渡形式决定电弧的稳定性，严重影响着焊接质量. TIG-MIG 复合焊电弧对熔滴的作用机制与传统的 MIG 焊存在着很大的差异，这主要是因为 TIG 焊电弧与 MIG 焊电弧建立复合后会按照电压最小原理[10]，保持 TIG 焊电弧最小的能量消耗. 图 4 为 TIG-MIG 复合焊电弧对熔滴的作用机理，TIG-MIG 焊电弧复合后，TIG 焊

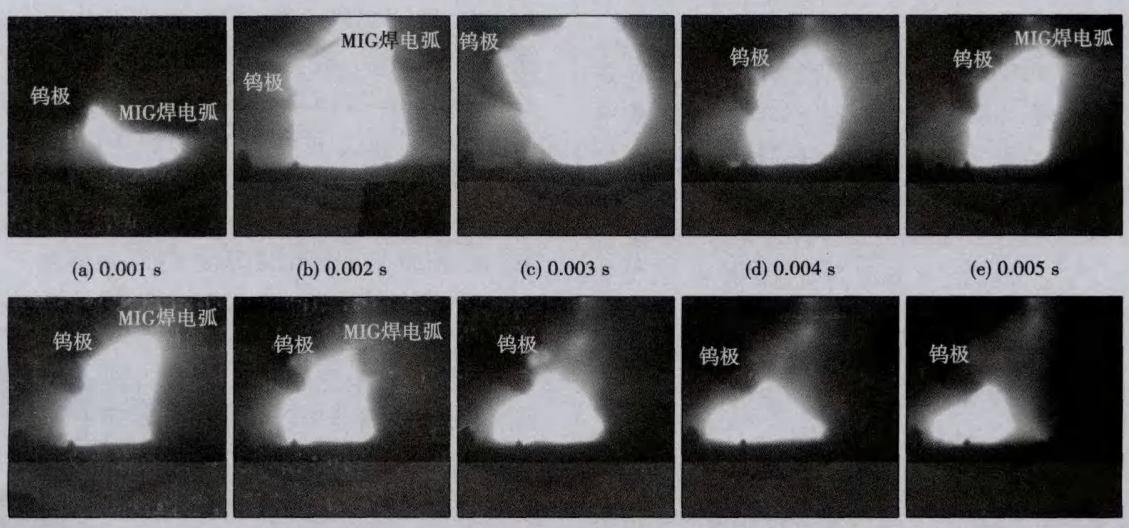


图 3 TIG-MIG 复合焊电弧的起弧过程及电弧形态

Fig. 3 Arc striking and arc shape of TIG-MIG hybrid arc

图 4　TIG-MIG 复合焊电弧对熔滴的作用机理

Fig. 4　Effcet mechanism of TIG-MIG hybrid arc on droplet

电弧与工件间建立导通,此时的 TIG 焊电弧作用为对工件进行预热. 而当焊丝熔化形成熔滴时,由于熔滴的介入使得复合焊电弧中的导电氛围发生改变,熔滴的形成增加了电弧中熔滴周围的金属蒸气,TIG 焊电弧与熔滴、工件间建立了最小电压的导通回路,TIG 焊电弧向熔滴吸引,通过熔滴再向工件导通. 此时 TIG 焊电弧的热输入量始终直接作用于熔滴,对熔滴起到了加热作用. 促进熔滴生长,熔滴在吸收了 TIG 焊电弧的热量后逐渐形成大滴,产生滴状过渡. 因此复合焊的 TIG 焊电弧对熔滴的作用改变了熔滴的过渡形式. 当熔滴脱离焊丝自由过渡的时候,TIG 焊电弧始终作用于熔滴上,此时电弧吹力为促进熔滴过渡的力. 由于复合焊 TIG 焊电弧对熔滴的作用,因此产生了新的焊接工艺特点.

3　试验结果及分析

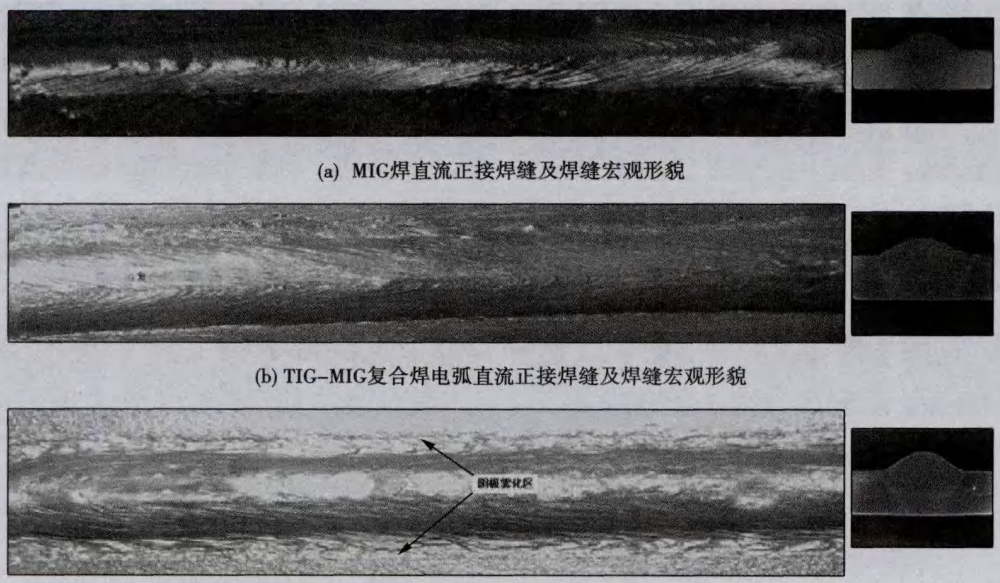
3.1　复合焊电弧对焊缝的影响

采用表 1 焊接参数,图 5a 为 MIG 焊直流正接,工件接正极,MIG 焊枪接负极. 焊接过程中,电弧不稳定,焊接过程为短路过渡,飞溅大,焊缝成形难于控制,存在严重咬边等现象. 相同的熔覆率的情况下,TIG-MIG 复合焊电弧对工件及熔滴的预热效果显著,并且 TIG 焊电弧在焊接过程中一直存在,能起到良好的维弧、稳弧作用,能够有效降低焊接飞溅,复合焊电弧对熔滴及工件的预热效果,能够使焊丝在母材上形成良好的铺展,增大了焊缝的熔宽. 在相同的 MIG 焊电压下,熔滴过渡方式由短路过渡转变为大滴过渡,复合焊电弧降低了熔滴过渡的电流及电压值,使熔滴过渡形式更趋于滴状过渡和射流过渡. 因此焊缝成形好、熔宽大、铺展好. 图 5b 为 TIG 焊钨极与 MIG 焊枪同时接负、工件接正的直流正接情况,TIG 焊钨极作为负极,电弧的主要热量都集中在阳极工件上,与图 5c TIG 焊钨极与 MIG 焊枪同接负、工件接负的直流反接相比,复合焊电弧对阳极工件的产热量大,焊缝熔深深. TIG 焊钨极与 MIG 焊枪同接正、工件接负的直流反接情况下,由于复合焊电弧中的TIG焊枪与MIG焊枪作为阳极对母材表面的氧化膜具有良好的清理作用,如图 5c 所示,复合后的 TIG-MIG 复合焊电弧能在焊缝周围形成阴极雾化区,对母材的氧化膜具有良好的清理作用.

表 1　TIG-MIG 复合焊电弧焊接参数

Table 1　Welding parameters for TIG-MIG hybrid arc

焊接方式	TIG 焊电流 I_{TIG}/A	MIG 焊电流 I_{MIG}/A	MIG 焊电压 U_{MIG}/V	送丝电压 U_f/V	焊丝直径 D/mm	焊接速度 v_w/(m·min^{-1})	熔滴过渡形式
MIG 焊直流正接	0	142	25	6	1.2	1.2	短路过渡
TIG-MIG 焊直流正接	60	138	25	6	1.2	1.2	滴状过渡
TIG-MIG 焊直流反接	60	135	25	6	1.2	1.2	滴状过渡



(a) MIG焊直流正接焊缝及焊缝宏观形貌

(b) TIG-MIG复合焊电弧直流正接焊缝及焊缝宏观形貌

(c) TIG-MIG复合焊电弧直流反接焊缝及焊缝宏观形貌

图 5 电弧对焊缝成形的影响

Fig. 5 Effect of arc behavior on weld formation

3.2 复合焊电弧对过渡形式的影响

与传统 MIG 焊相比，TIG-MIG 复合焊电弧对熔滴过渡形式的影响效果显著. TIG 焊电弧对熔滴的预热作用使熔滴渐渐长大，熔滴具有了足够的长大空间，当熔滴吸收足够热量长大到重力大于表面张力时，形成滴状过渡，因此复合焊电弧能够实现 MIG 焊低电压低电流下的滴状过渡. 如图 6 所示，由于复合焊电弧的相互作用，MIG 焊电流降低，短路过渡转变为滴状过渡的 MIG 焊电压及电流值明显低于单一 MIG 焊，TIG-MIG 复合焊电弧的焊接工艺能够有效的改变熔滴过渡的转变区间值，降低熔滴过渡形式转变的 MIG 焊电流及电压值，实现 MIG 焊低电压、低电流下的滴状过渡.

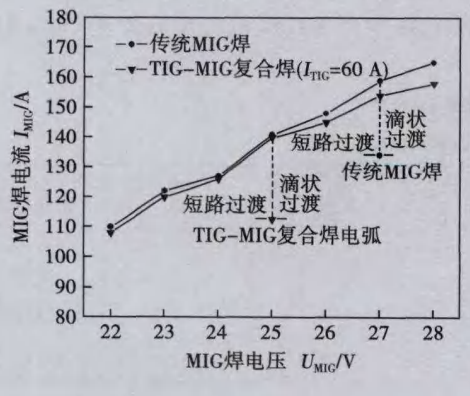


图 6 TIG 焊电弧对熔滴过渡电流及电压的影响

Fig. 6 Effect of TIG arc on voltage and current of droplet transfer

4 结 论

(1) 研究的 TIG-MIG 复合焊自起弧机制，试验表明 TIG 焊电弧具有良好的维弧作用，能够减少焊接飞溅.

(2) TIG-MIG 复合焊电弧的熔滴过渡过程中，TIG 焊电弧稳定燃烧，为了保持最小的能量消耗而作用于熔滴上，对熔滴具有加热作用.

(3) TIG-MIG 复合焊电弧具有更好的高速焊接效果，焊接过程能够增加焊缝的熔宽，改变熔滴过渡的区间值，降低熔滴过渡形式转变的 MIG 焊电流及电压值. 直流正接能增加焊缝的熔深，直流反接能够对表面氧化膜起到有效的清理作用.

参考文献：

[1] 崔旭明，李刘合，张彦华. 高效焊接工艺研究现状[J]. 新技术新工艺，2004(7)：32－34.
Cui Xuming, Li Liuhe, Zhang Yanhua. Research situation of high efficiency welding process[J]. New Technology & New Process, 2004(7): 32－34.

[2] 殷树言. 高效弧焊技术研究进展[J]. 焊接，2006(10)：7－14.
Yin Shuyan. Research of high efficiency arc welding process[J]. Welding & Joining, 2006(10): 7－14.

[3] 冯东旭. 激光-TIG 双面焊接电弧特性及组织性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.

[下转第 60 页]

3 结 论

(1) Q390 钢在冷却速度≤0.1 ℃/s 时得到组织为 F + P + $B_{粒}$,冷却速度在 0.5 ~ 20 ℃/s 得到 B + M + A_R生成,冷却速度≥25 ℃/s 得到 M + A_R.

(2) Q390 钢在冷却速度≤0.1 ℃/s 时,随着冷却速度增加,粒状贝氏体的含量不断增加;在 0.5 ~ 20 ℃/s 范围冷却时,随着冷却速度的增加,得到的贝氏体量不断减少,马氏体量不断增加;当冷却速度≥25 ℃/s 时,得到全部的 M + A_R组织.

(3) Q390 钢的 SH-CCT 曲线有铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体 4 个相转变区.

参考文献:

[1] 张英乔, 张汉谦, 赵四新, 等. 铌对高强结构钢大热输入焊接热影响区组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2008,9(29): 96 - 100.
Zhang Yingqiao, Zhang Hanqian, Zhao Sixin, *et al*. Effects of Nb on microstructure and toughness of high strength structural steels heat affected zone at high heat input[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 9(29): 96 - 100.

[2] 李 友, 杨成刚, 李 强, 等. P460NL1 钢 SH-CCT 图的测定[J]. 机械设计与制造, 2001(6): 74 - 75.
Li You, Yang Chenggang, Li Qiang, *et al*. The CCT curves determination of P460NL1 steel[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2001(6): 74 - 75.

[3] 赵 敏, 孙长伟, 杜则裕, 等. 焊接热模拟技术及其应用[J]. 焊接技术专题综述, 1999(4): 41 - 42.
Zhao Min, Sun Changwei, Du Zeyu, *et al*. The thermal simulation technology and application of welding[J]. Welding Technology Seminar Overview, 1999(4): 41 - 42.

[4] 王艳杰, 何长红, 彭 云, 等. 控轧控冷与热轧耐候钢焊接 CCT 曲线测定及热影响区的组织特征[J]. 焊接 - 生产应用, 2007(110): 45 - 48.
Wang Yanjie, He Changhong, Peng Yun, *et al*. SH-CCT curves determination and HAZ microstructure characteristics of controlled rolling and controlled cooling steel or hot rolled steel corrosion-resistant steel [J] . Weld-Production Application, 2007 (110): 45 - 48.

[5] 吕德林, 李砚珠, 谭长瑛, 等. 焊接热影响区连续冷却相变过程的研究—焊接 CCT 图[J]. 焊接学报, 1982, 3(3): 99 - 114.
LÜ Deling, Li Yanzhu, Tan Changying, *et al*. The research of HAZ phase transformations process in continuous cooling course-SH-CCT[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1982, 3(3): 99 - 114.

[6] 刘宗昌. 材料组织结构转变原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

[7] Liu Wenyan, Wang Lai, Liu Jibin, *et al*. Microstructures and properties in simulated heat-affected zones of 685 MPa grade copper-bearing steel[J]. Proceeding of Sino-Swedish Structural Materials Symposium, 2007(1): 220 - 226.

[8] 张国福, 宋天民, 尹成江, 等. 机械振动焊接对焊缝及热影响区金相组织的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 85 - 88.
Zhang Guofu, Song Tianmin, Yin Chengjiang, *et al*. Effect of mechanical vibration welding on the microstructure of welding joint and HAZ[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 85 - 88.

[9] 刘宗昌, 计云萍, 任慧平, 等. 过冷奥氏体整合系统和转变贯序[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(3): 14 - 21.
Liu Zongchang, Ji Yunping, Ren Huiping, *et al*. The Integration system and transformation sequence of supercooled austenite[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(3): 14 - 21.

[10] Ghosh A, Das S, Chatterjee S, *et al*. Effect of cooling rate on structure and properties of an ultra-low carbon HSLA-100 grade steel[J]. Materials Characterization, 2006, 56: 59 - 65.

作者简介: 赵勇桃,女,1974 年出生,博士研究生,副教授. 主要研究方向为金属材料组织转变及热加工工艺研究. 发表论文 10 余篇. Email: zyt0011@126.com

[上接第 28 页]

[4] 冯 雷, 陈树君, 殷树言. 高速焊接时焊缝咬边的形成机理[J]. 焊接学报, 1999, 20(1): 16 - 20.
Feng Lei, Chen Shujun, Yin Shuyan. Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(1): 16 - 20.

[5] 王 军, 冯吉才, 何 鹏, 等. TIG-MIG 间接弧焊接工艺[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 145 - 148.
Wang Jun, Feng Jicai, He Peng, *et al*. TIG-MIG indirect arc welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 145 - 148.

[6] 石 玗, 汪海涛, 薛 诚. 旁路耦合电弧 MIG 焊熔池视觉实时检测工艺[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 29 - 32.
Shi Yu, Wang Haitao, Xue Cheng. Real-time visual detection of welding pool in double-electrode MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 29 - 32.

[7] Gene Mathers. The welding of aluminium and its alloys[M]. England: Woodhead Publishing Limited, 2002.

[8] Essers W G. Method of device for arc welding: U. S patent, 4039800[P]. 1977 - 08 - 02.

[9] 王 飞. 基于嵌入式的数字化 MIG 焊机[D]. 济南: 山东大学, 2008.

[10] 杨春利, 林三宝. 电弧焊技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

作者简介: 杨 涛,男,1982 年出生,博士研究生. 主要从事机器人智能焊接及高效焊接方法的研究. 发表论文 8 篇. Email: 889268@qq.com