10.3969/j.issn.1673-3355.2016.01.013

双钨极 TIG 堆焊技术在压力容器制造中的应用

马驰原[1]，谷 文[2]，朱兴华[3]

摘要：使用双钨极 TIG 焊接方法，在 Q235 基材表面进行不锈钢堆焊试验，得出高速送丝下的最佳工艺参数，使焊缝成形良好的前提下，最高稳定送丝速度达到 7 000 mm/min。以 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢为基材，采用 7 000 mm/min 送丝速度在基材表面进行不锈钢堆焊试验，按照产品技术条件对试件进行无损检验和破坏性试验，结果表明，采用双钨极 TIG 堆焊技术获得的不锈钢堆焊层满足加氢反应器技术条件的要求。

关键词：双钨极 TIG；送丝速度；堆焊

中图分类号：TG444+.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1673-3355（2016）01-0013-06

Application of Twin-Electrode TIG Cladding Technique in Manufacture of Pressure Vessels

Ma Chiyuan, Gu Wen, Zhu Xinghua

Abstract: Stainless steel cladding trials were performed on Q235 steel with twin-electrode TIG cladding technique to obtain optimal welding parameters at high wire-feeding speed. Under the precondition of good weld formation, the highest wire-feeding speed reaches 7 000 mm/min. A trial stainless steel cladding was performed on the basic material of 2.25Cr-1 Mo-0.25V steel at 7 000 mm/min. the test pieces were subject to Non-destructive and destructive inspection in accordance with the technical specification. The results show that the quality of stainless steel layers made with twin-electrode TIG cladding technique can meet the technical requirement of hydro-processing reactors.

Key words: twin-electrode TIG; wire feeding speed; cladding

加氢反应器是石油炼制的主要设备，工作在高温、高压和临氢环境中，而腐蚀是压力容器在使用过程中面临的主要破坏因素，而当前主要的预防方法是在容器内壁堆焊奥氏体不锈钢，可采用的焊接方法有手工电弧焊（SMAW）、钨极氩弧焊（GTAW 或 TIG）、熔化极气体保护焊（FCAW）、电渣型带极堆焊（ESW）等，其中带极堆焊的熔敷效率最高，钨极氩弧焊的焊接质量最好[1-3]。但是普通单钨极氩弧焊熔敷效率低，极大地影响生产效率。近年来，热丝 TIG 焊、窄间隙 TIG 焊、双钨极 TIG 焊、小孔型 TIG 焊等新型 TIG 焊接技术接连出现，以及 TIG 焊接机器人的开发和应用，弥补了单极 TIG 焊接效率低、电弧能量分散的缺点，具有良好的应用前景[4-6]。双钨极 TIG 焊由日本科研人员在 1998 年首先提出，作为一种高效的焊接方法，具有熔敷速度高、坡口适应性强和焊缝表面成形好等优点[7-8]，并且双钨极 TIG 焊能够显著降低电弧压力，进一步推进钨极氩弧焊技术的发展。

本文首先在 Q235 钢上进行双钨极 TIG 工艺性试验，通过观察焊道的成形质量，探索高速送丝条件下的合理焊接工艺参数；然后应用得到的工艺参数在 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢上进行双钨极 TIG 堆焊试验并进行工艺评定，按照加氢产品的生产工程技术条件检验堆焊层各项理化性能，分析双钨极 TIG 堆焊技术在压力容器制造中的可行性。

1 试验装置与原理

本次试验使用双钨极热丝 TIG 自动焊接设备，主要有：控制柜、操作机、工作平台、焊接电源

1. 中国第一重型机械集团焊接研究所助理工程师，辽宁 大连 116113；2. 中国第一重型机械集团焊接研究所研究员级高级工程师；3. 中国第一重型机械集团焊接研究所工程师

(2 台)、热丝电源、冷却水循环装置、氩气以及双钨极焊枪等（见图 1）。

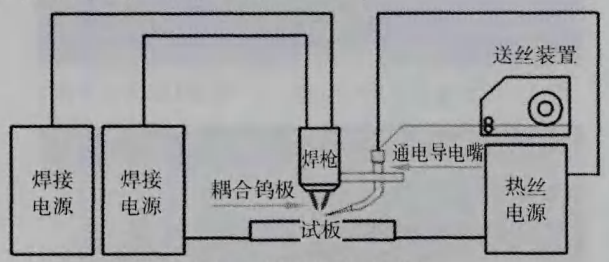
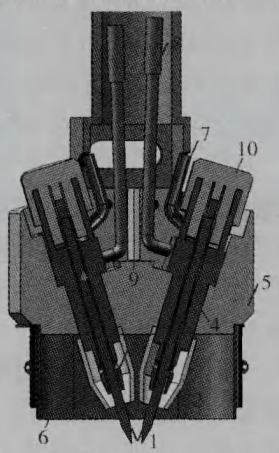


图 1 焊接设备原理图

双钨极 TIG 焊是在传统 TIG 焊接技术基础上发展而来，其特点是采用两根电极和各自独立的电源系统，将两根钨极共同安装在焊枪的喷嘴中，钨极端部加工成尖角，钨极之间相互绝缘，各自连接独立的电路（见图 2）。在相同的总电流下，双钨极耦合电弧电流密度的峰值小于单钨极氩弧焊，电弧压力显著下降。因此，在相同的电弧压力下，用双钨极法焊接时可以选择更大的电流，从而增加了焊接热输入，提高焊丝的熔敷效率[9-10]。



1—钨极；2—陶瓷护罩；3—钨极夹；4—导电体；5—外壳；6—保护气罩；7—进气口；8—水电接口；9—绝缘隔板；10—固定旋钮。

图 2 双钨极 TIG 焊枪

2 试验过程

2.1 双钨极 TIG 堆焊工艺性试验

(1) 材料

试验母材为 Q235 钢板，试验用焊接材料为 ER309L 和 ER347L 实芯焊丝，焊丝直径 Ø1.2 mm（见表 1）。

(2) 焊接

焊接前对试板表面进行打磨处理，去除表面的锈迹和油污，直至试板表面露出金属光泽。两钨极

表 1 焊丝化学成分 (wt%)

焊丝牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
ER309L	0.017	0.45	1.92	0.018	0.001	23.13	13.49
ER347L	0.020	0.41	1.75	0.012	0.004	19.09	10.60

干伸出 25~30 mm，钨极之间的间距 3~4 mm，钨极直径 Ø4 mm，氩气流量 15~20 l/min。焊接试板时，在保证焊缝成形质量的前提下，尽可能地提高送丝速度（见表 2）。

表 2 焊接工艺参数

序号	前钨极电流 (A)	后钨极电流 (A)	相位差 (°)	热丝电流 (A)	焊接速度 (mm/min)	送丝速度 (mm/min)
1	260/210	250/200	180	30	240	4 000
2	270/220	260/210	180	30	265	4 500
3	270/220	260/210	180	40	310	5 000
4	290/240	280/230	180	40	330	6 000
5	290/240	280/230	180	60	365	7 000
6	300/260	290/250	180	70	385	9 000

(3) 试验结果

从 6 组焊接工艺参数所得焊缝的成形照片中可以看出，双钨极 TIG 焊在较高的送丝速度和焊接速度下可以得到良好的焊缝形状（见图 3~图 8）。其中，当送丝速度 5 000 mm/min、焊接速度 310 mm/min 时得到的焊缝两侧比较平齐；而在送丝速度 7 000 mm/min、焊接速度 345 mm/min 时，焊缝两侧基本平齐，焊缝表面略有不规则的鱼鳞状条纹，笔者认为这是由于焊接速度过快导致耦合电弧不稳定造成的；送丝速度 9 000 mm/min、焊接速度 385 mm/min 时，焊缝表面成形稍差，局部出现堆积现象，对焊缝表面的平整度有很大影响。

笔者从试验中发现，影响熔敷效率的主要原因是在高速送丝前提下出现了诸如驼峰[8]、咬边以及未熔合等缺陷，而焊接速度与送丝速度不匹配是引起上述缺陷的主要原因。从焊接试验的结果可以看出，本次试验所采用的工艺参数匹配较为合理，施焊后均能获得较为理想的焊缝外观，考虑到熔敷效率和质量的稳定性，选用了表 2 中第 5 组参数进行后续试验。

2.2 双钨极 TIG 堆焊工艺评定

(1) 材料

试验用母材为 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢锻件（见表 3），规格为 70 mm（厚）×300 mm（宽）×500 mm（长）。试验使用 ER309L 和 ER347L 实芯焊

图 3 送丝速度 4 000 mm/min 焊速 240 mm/min

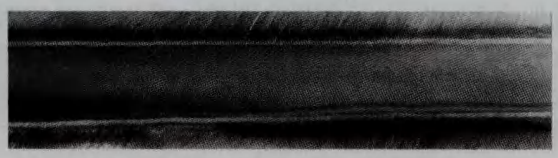


图 5 送丝速度 5 000 mm/min 焊速 310 mm/min

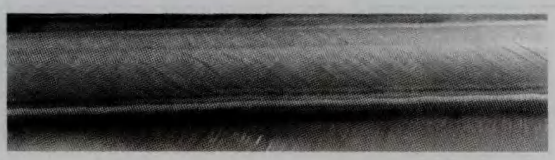


图 7 送丝速度 7 000 mm/min 焊速 345 mm/min

表 3 母材主要化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	Cr
0.10-0.17	≤0.10	0.27-0.63	1.95-2.6
Mo	V	Ni	P/S
0.87-1.13	0.25-0.35	≤0.25	≤0.008

丝，焊丝直径为 Ø1.2 mm。

(2) 焊接及热处理

采用表 2 中第 5 组堆焊工艺参数进行堆焊，第一层为 309L 过渡层，第二层及以上为 347L 耐蚀层，堆焊层总厚度约 7 mm（见图 9，图 10）。检测结果未发现裂纹、未焊透及未熔合缺陷。打磨堆焊层，按照 JB/T 4730.5 和 JB/T 4730.3 标准对堆焊层进行液体渗透检测和超声波探伤检测。液体渗透检测结果显示堆焊层表面没有出现任何微小裂纹或氧

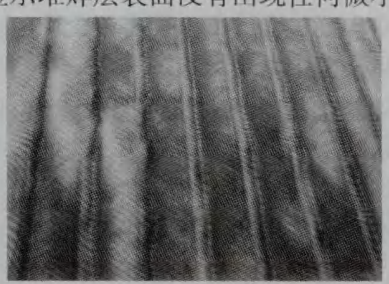


图 9 整体堆焊焊缝成形

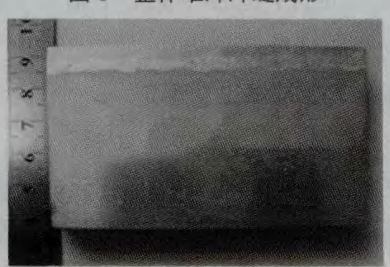


图 10 不锈钢堆焊层低倍照片

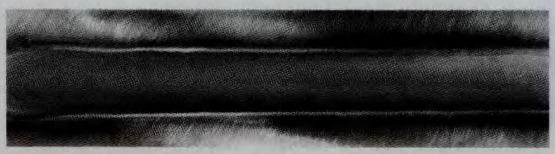


图 4 送丝速度 4 500 mm/min 焊速 265 mm/min

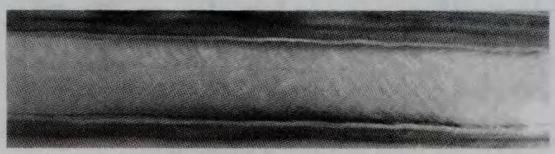


图 6 送丝速度 6 000 mm/min 焊速 330 mm/min

图 8 送丝速度 9 000 mm/min 焊速 385 mm/min

化物，表面焊接质量优良；超声波探伤结果显示堆焊层内不存在裂纹、未熔合以及条状夹渣等缺陷。

无损检测后，将试板分割成两部分，一部分入炉进行 705 ℃±14 ℃×32 h+1 h 的最大热处理，另一部分进行 705 ℃±14 ℃×8 h+1 h 的最小热处理。随后，按照标准要求对试板进行热处理和理化性能测试，涉及到的评定项目有侧弯（热处理态）、硬度（热处理态）、化学成分（焊态）、宏观金相（热处理态）、微观金相（热处理态）以及晶间腐蚀（热处理态）。本次试验按照 JB 4708 试验标准对堆焊层性能进行评定试验，并对试验结果进行讨论。

(3) 试验结果

弯曲试验 按照 GB/T 2653 对堆焊层及部分母材进行弯曲试验，试样包含堆焊层、热影响区和部分母材。试样分别取自垂直和平行于焊接方向，共计 2 件，试样尺寸为 10 mm×30 mm×200 mm，试验条件为 4a、180°。试验结果，在弯曲部分的外侧未出现裂纹，堆焊层没有出现分层现象，拉伸面上的堆焊层也没有出现裂纹和未熔合缺陷（见图 11）。

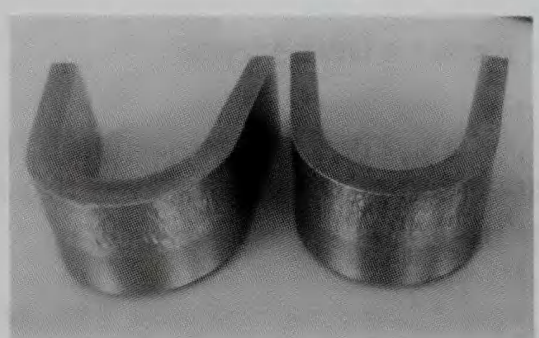


图 11 弯曲后试样

硬度测试　分别从最大热处理和最小热处理试验件上切取三块作为硬度试样，试样尺寸为 20 mm×30 mm×100 mm。按照 GB/T 4340.1 规定在堆焊层表面和试样横截面的各区及熔合线上进行硬度试验。堆焊层表面测 4 点 HB 硬度；横截面上从表面开始向下每隔 1.0 mm 打 1 点，共 23 点，横截面上母材、熔合线、309L 层、347 层各测 5 点 Hv10 硬度，点间距 1.0 mm；热区测 10 点 Hv10 硬度，点间距 1.0 mm（见图 12）。从图中可以看出，最小热处理硬度试样的热影响区有五点硬度数值超过 248Hv10，初步分析是由于双钨极焊接热输入量大，导致焊接过程中形成的碳化物达到过饱和状态，在热处理时碳化物析出，致使热区硬度升高。

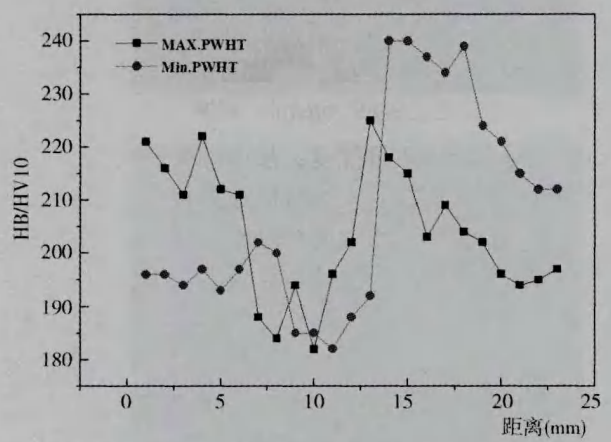


图 12　试样截面不同部位硬度值

化学成分及铁素体　从堆焊层表面逐层切取试样，检测 C、Si、Mn、Cr、Ni、Mo、N 元素含量（见表 4）。按照标准 GB/T 223 要求，在堆焊层表面及以下 3 mm 深度以内熔敷金属的主要元素的含量应符合验收值，从表 4 中可知主要元素的含量均满足产品技术条件的要求。

采用表面下 3.0 mm 各元素含量的数据，按照 WRC-1992 图数字化程序计算得到的铁素体数为 5.69，满足产品技术条件的要求。由于 Cr 元素在焊接过程中烧损严重，以 Ni 元素含量的变化计算母材的稀释率，由表 4 可知，母材中的 Ni 含量为 0.16，表面下 5.0mm 处的 Ni 含量为 10.43，由表 1 可知，ER309L 焊丝中 Ni 含量为 13.49，经计算母材的稀释率为 16.6%。

晶间腐蚀　从经过最大热处理的堆焊层表面切取晶间腐蚀试样，试样尺寸为 3 mm×20 mm×80 mm，按照标准 GB/T 4334 方法 E 对试样进行晶间腐蚀测试，均未发现晶间腐蚀裂纹。

金相组织　按照标准 GB/T 13298 对堆焊层及母材进行金相观察，在经过最大热处理和最小热处理后试件的横向处取 20 mm×20 mm×20 mm 试样，

表 4　主要元素成分　(wt%)

检测位置	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
	≤0.03	≤1.00	1.0~2.5	18.0~21.0	9.0~11.0	≤0.20	≤0.06
表面下 0.5 mm	0.02	0.53	1.58	19.36	10.84	0.06	0.058 5
表面下 1.0 mm	0.02	0.53	1.58	19.14	10.75	0.06	0.057 9
表面下 1.5 mm	0.02	0.53	1.59	19.27	10.82	0.06	0.057 5
表面下 2.0 mm	0.02	0.54	1.58	19.21	10.70	0.07	0.057 5
表面下 2.5 mm	0.02	0.53	1.58	19.27	10.74	0.07	0.058 2
表面下 3.0 mm	0.02	0.53	1.59	19.38	10.73	0.07	0.048 0
表面下 3.5 mm	0.02	0.54	1.58	19.10	10.67	0.08	0.057 8
表面下 4.0 mm	0.02	0.52	1.56	19.14	10.65	0.08	0.056 7
表面下 4.5 mm	0.02	0.50	1.54	18.82	10.56	0.13	0.056 4
表面下 5.0 mm	0.02	0.46	1.49	18.79	10.43	0.20	0.057 4
表面下 5.5 mm	0.02	0.44	1.47	18.58	10.33	0.24	0.059 3
表面下 6.0 mm	0.03	0.43	1.44	18.31	10.15	0.27	0.060 0
表面下 6.5 mm	0.03	0.43	1.44	18.16	10.08	0.28	0.058 9
表面下 7.0 mm	0.03	0.42	1.41	17.66	9.80	0.29	0.058 3
表面下 7.5 mm	0.04	0.39	1.28	15.54	8.39	0.40	0.054 5
母材	0.13	0.11	0.52	2.20	0.16	1.02	0.005 1

放大 200 倍后观察母材、热影响区、309 堆焊层以及 347 堆焊层。结果表明母材和热影响区主要是贝氏体回火组织，堆焊首层和面层主要是奥氏体、铁素体和碳化物，并且无焊接缺陷产生（见图 13、图 14）。

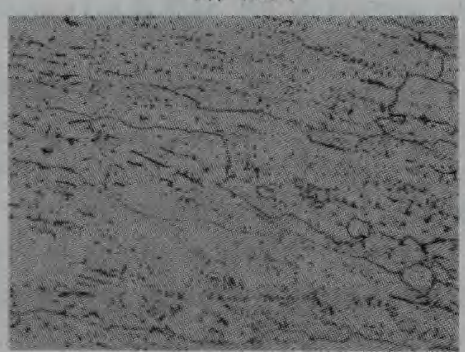
3 应用分析

3.1 单钨极与双钨极 TIG 堆焊效率比较

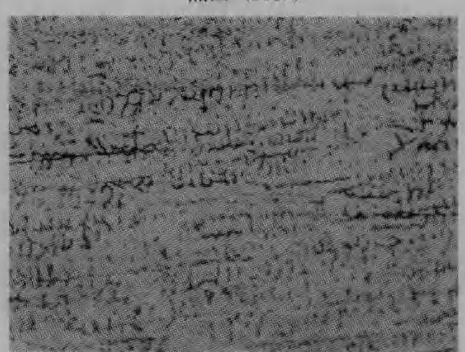
用传统单钨极 TIG 堆焊时，Ø1.2 mm 焊丝的最高送丝速度可达到 1 600 mm/min，熔敷效率为 0.9

母材（200×）

热区（200×）

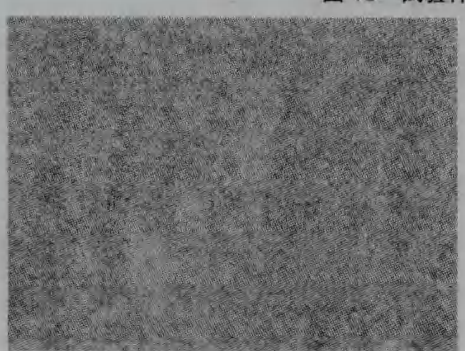


堆焊首层（200×）



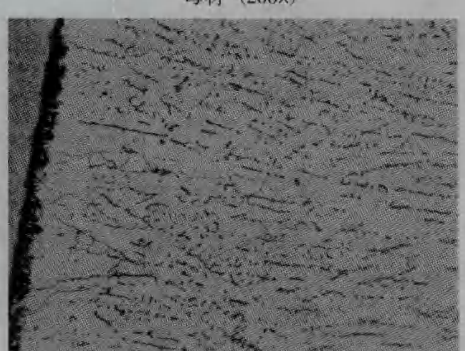
堆焊面层（200×）

图 13 试验件截面最大热处理态金相图

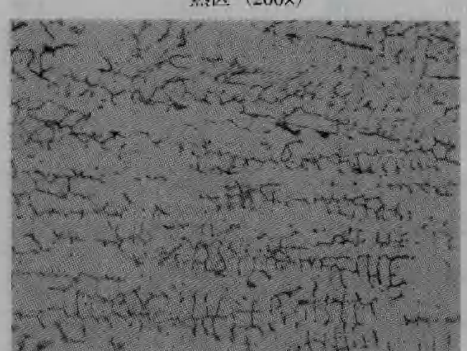


母材（200×）

热区（200×）



堆焊首层（200×）



堆焊面层（200×）

图14 试验件截面最小热处理态金相图

kg/h；而双钨极 TIG 堆焊，送丝速度为 7 000 mm/min，熔敷效率为 3.78 kg/h（见表 5）。

表 5 单/双钨极氩弧焊堆焊效率

焊接方法	送丝速度 (mm/min)	熔敷量 (kg/h)	效率比 (双：单)
单钨极焊枪	1 300~1 600	0.702~0.864	3.84~4.37
双钨极焊枪	5 000~7 000	2.7~3.78	3.84~4.37

通过比较可以得出，双钨极 TIG 堆焊每小时金属熔敷率是目前单钨极 TIG 堆焊的 3~4 倍，堆焊效率明显提高。如果堆焊相同重量的 309L（16.67 kg）和 347L（19.09 kg）焊材，单钨极总共需 51 h，而双钨极 TIG 堆焊仅需要 13 h 就能完成，焊接效率大幅度提高（见图 15）。

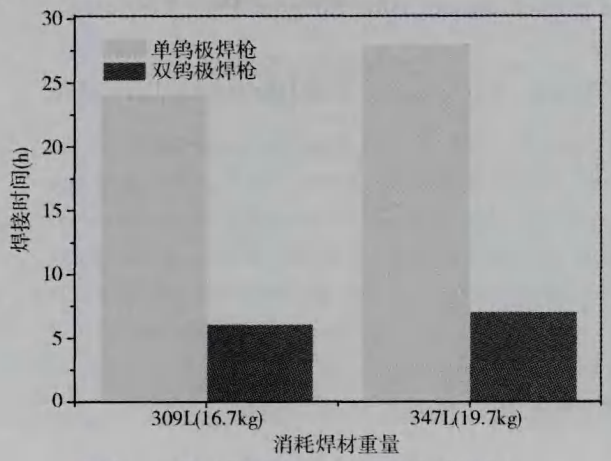


图 15 熔敷相同金属单/双钨极花费时间

3.2 应用前景

双钨极 TIG 焊接技术不仅熔敷效率高、焊接质量好，同时设备使用更加便捷、操作更加灵活，可以用于全位置焊接，典型的应用场合有：

（1）较小尺寸管状工件的堆焊。加氢反应器的卸料管、冷氢管、热偶管、弯管等工件由于旋转方便，目前多采用药芯焊丝气体保护焊、普通 TIG 焊和手工电弧焊焊接。用双钨极 TIG 焊替代这些焊接方法时可通过固定双钨极 TIG 焊枪，借助工艺装备旋转工件，在平焊位进行堆焊，焊接效率能提高 4 倍。

（2）较大尺寸的管板堆焊。此类工件也便于旋转，应用双钨极 TIG 焊时固定双钨极 TIG 焊枪，旋转工件，在平焊位堆焊。特别是在管板上堆焊镍基耐蚀层的场合，双钨极 TIG 焊的焊接质量比带极堆焊要好许多。

（3）尺寸较大，形状复杂工件的堆焊。如：核反应堆压力容器的进、出口接管等，此类工件堆焊部位多，焊接线路包括不规则的椭圆形和马鞍形。目前多采用带极堆焊、普通 TIG 焊和手工电弧焊。而用双钨极 TIG 替代时可令焊枪沿着设定好的轨迹运动施焊，能够有效减少工件装配和翻转次数，提高生产效率。

总之，除特殊结构外，双钨极 TIG 能够代替绝大多数平焊位、横焊位的普通 TIG 焊、气体保护焊或手工电弧焊，能够在保证焊接质量的同时，提高焊接效率。

4 结 语

（1）本文通过大量的工艺试验，得出双钨极 TIG 不锈钢堆焊的最佳工艺参数。使用 Ø1.2 mm 焊丝，焊接稳定状态下送丝速度可达到 7 000 mm/min，焊缝成形好，搭接处平滑过渡，熔敷效率为 3.78 kg/h，是单钨极 TIG 堆焊的 4 倍。

（2）通过对双钨极试验件进行无损检验和理化性能试验，堆焊层各项性能指标满足加氢反应器产品技术条件的要求。

（3）试验证明，用双钨极 TIG 堆焊技术代替普通钨极氩弧焊，可在保证焊接质量的同时，提高生产效率。

参考文献

[1] 董苏中译. 用高强度 Cr-Mo 钢制造石油精炼高压容器 [J]. 大型铸锻件，1992，55 (1)：57-59.

[2] 仇恩沧. 国产 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢加氢反应器的开发 [J]. 石油化工设备技术，2000，21 (4)：36-44.

[3] 张颖，段莉蕾. 加氢反应器不锈钢单层堆焊剥离试验研究 [J]. 一重技术，2015 (2)：41~45.

[4] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊 [M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，1988.

[5] 周矿先，徐绪炯，吴青松. 自动热丝 TIG 焊工艺简介 [J]. 焊管，1997，20 (5)：68-69.

[6] 杨春利，林三宝. 电弧焊基础 [M]. 哈尔滨工业大学出版社，2003：26-30，85-113.

[7] 林三宝，范成磊，杨春利. 高效焊接方法 [M]. 北京：机械工业出版社，2011：173-177.

[8] 殷树言，卢振洋，黄鹏飞，陈树君. 高效化焊接原理与特征. 2002：12-18.

[9] Kobayashi,Yamada.Development of high efficiency twin -arc TIG welding methed [R] -1669-01.

[10] 崔旭明，李刘合，张彦华. 高效焊接工艺研究现状 [J]. 热加工技术，2004,7：32-35.

收稿日期：2016-02-15