

本文参考文献引用格式:邹国伟,马培锋,王伟波,等.双钨极堆焊技术在核反应堆压力容器制造中的应用与研究[J].电焊机,2019,49(04):168-172.

双钨极堆焊技术在核反应堆压力容器制造中的应用与研究

邹国伟¹,马培锋¹,王伟波¹,李志杰²,方迪生²

(1.中广核工程有限公司,广东深圳518124;2.中国第一重型机械股份公司,辽宁大连116113)

摘要:按照核反应堆压力容器不锈钢堆焊工艺评定,分别堆焊了单钨极与双钨极不锈钢堆焊层,通过对比分析两者的焊缝成形、金相组织、硬度分布、化学成分、冲击性能、晶间腐蚀等,说明双钨极与单钨极的主要区别。结果表明,双钨极与单钨极堆焊均能获得良好的焊缝成形,但双钨极焊接效率较单钨极有大幅提升。双钨极与单钨极焊缝其金相组织、硬度分布、冲击性能和晶间腐蚀性能等较为接近。该技术已开始应用于反应堆压力容器的制造。

关键词:反应堆压力容器;双钨极;不锈钢堆焊

中图分类号: TG455

文献标志码: A

文章编号: 1001-2303(2019)04-0168-05

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2019.04.31

Application and research of twin-electrode TIG cladding process on reactor pressure vessels manufacturing

ZOU Guowei¹, MA Peifeng¹, WANG Weibo¹, LI Zhijie², FANG Disheng²

(1.China Nuclear Power Engineering Co.,Ltd.,Shenzhen 518124,China;2.China First Heavy Machinery Co.,Ltd.,Dalian 116113,China)

Abstract: According to reactor pressure vessel stainless steel cladding qualification, this paper conducted stainless steel cladding by single TIG and twin-electrode TIG, respectively. The main difference between double tungsten and single tungsten is illustrated by investigating and comparing the weld formation, metallographic structure, hardness distribution, chemical composition, impact properties and intergranular corrosion. Results show that both twin-electrode TIG and single TIG can produce excellent weld bead formation, but the efficiency of twin-electrode TIG cladding is much higher. And the weld bead properties produced by the two methods are similar. Twin-electrode TIG cladding process has been applied to the manufacture of reactor pressure vessels.

Key words: reactor pressure vessel; twin-electrode TIG; stainless steel cladding

0 前言

双钨极焊接技术是近年在常规 TIG 焊基础上发展起来的一种高质量、高效率的新兴焊接技术^[1],由设置在同一个焊枪中的两个相互绝缘的钨极产生耦合电弧,具有电弧电压低、焊接熔深浅、母材稀释率低、焊接效率高等特点,在保留传统氩弧焊的良好焊接质量和坡口适应性的同时,显著提高生产

效率、降低制造成本,使 TIG 高效焊接成为可能,进一步拓展了 TIG 技术的应用空间^[2]。

反应堆压力容器(简称 RPV)被称为核电站的心脏,承受高温、高压及反应堆本体的强放射性,是核岛一回路压力边界,是防止放射性物质外逸的第二道屏障。其质量对核电站安全至关重要,关系着国家安全,其制造进度位于核电工程建设的关键路

收稿日期:2019-03-15;修回日期:2019-03-22

作者简介:邹国伟(1982—),男,学士,工程师,主要从事焊接技术及无损检测的研究工作。E-mail:zly20061026@163.com。

径,对核电站建设及运营产生直接经济影响。

RPV 主要包括顶盖组件、容器组件和紧固密封组件三大部件。目前我国最先进的“华龙一号”RPV 吸收了国际三代核电的先进设计理念并进行了系列改进,设计寿命由 40 年延长到 60 年,设计压力 17.23 MPa(水压试验压力 24.6 MPa),设计温度 343 °C,设备总高 12 580 mm,内径 4 340 mm(至母材),筒体最大壁厚 290 mm。RPV 有 3 组进、出口接管,接管大端面呈马鞍形,且存在凸台和圆角,不是单一的平面结构。施焊时,为保证焊枪和工件的相对位置,焊工或工装需进行多维度调整,焊接位置在平焊、横焊及其过渡位置多次变换,因此坡口适应性不强的焊接方法(如电渣、埋弧堆焊等)难以实施,

常用焊接方法为焊条电弧焊,但焊接效率非常低,且质量不稳定,目前较先进且成熟应用的焊接技术是自动热丝钨极氩弧焊(TIG)^[3],焊接质量好但效率不高,制约了生产进度。

1 双钨极焊接原理与试验过程

双钨极焊接系统由 2 台 TIG 焊接电源和 2 根钨极组成,每根钨极分别与母材独立产生电弧,当两个电弧距离相互靠近时,形成一个耦合电弧,如图 1 所示。与单钨极相比,双钨极电弧压力低,大电流高速焊时,仍可实现良好的焊缝成形;双钨极堆焊时,焊缝熔深浅、母材稀释率低,同时能有效提高焊接效率,因此双钨极焊接技术具有广阔的应用前景。

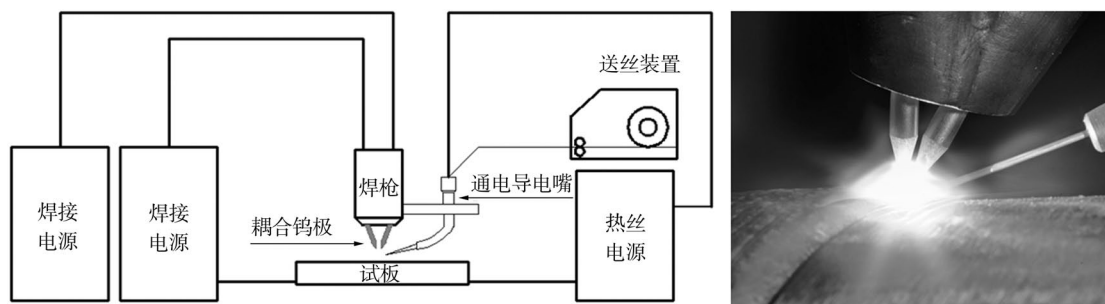


图 1 双钨极焊接工作原理示意^[4]

Fig.1 Schematic diagram of twin-electrode tungsten inert gas welding (TE-TIG)

试验设备与堆焊过程如图 2 所示。焊枪双钨极间夹角 60°,钨极尖端距离保持在约 2 mm。焊枪相对竖直方向倾斜 20°,侧方送丝,送丝方向与焊接方向相互垂直。根据核反应堆压力容器不锈钢堆焊工艺评定,分别采用双钨极和单钨极进行不锈钢堆焊,焊接参数如表 1 所示,堆焊过程参数始终保持不变。由表 1 可知,双钨极焊接速度为 270 mm/min,送丝速度为 4 m/min(最高送丝速度达 8 m/min)^[5],而单钨极焊接速度 150 mm/min,送丝速度 1.8 m/min,双钨极焊接效率较单钨极大幅提升。双钨极堆焊共分 3 层,第一层为低合金钢与不锈钢之间的异种金属焊接,焊前必须预热,其余层为不锈钢之间的焊接,不预热直接堆焊。单钨极堆焊共分 4 层,预热条件与双钨极堆焊相同。

试验母材为 SA-508 Gr.3,母材微观组织为粒状

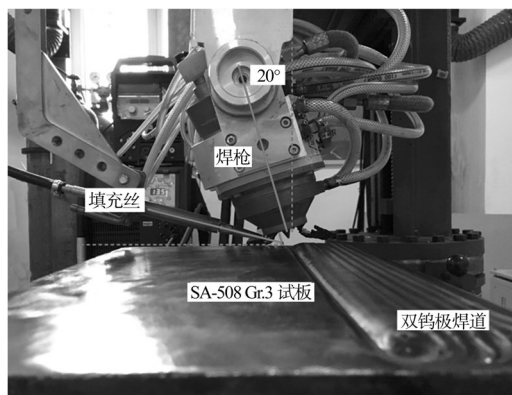


图 2 双钨极焊接设备及堆焊过程

Fig.2 TE-TIG welding equipment and cladding process

贝氏体组织,尺寸 300 mm×300 mm×50 mm。堆焊过渡层、耐蚀层焊丝直径均为 1.2 mm,牌号分别为 ASME SFA 5.9 ER309L(过渡层)和 ASME SFA 5.9 ER308L

表 1 焊接试验参数

Table 1 Welding parameters

钨极	前钨极电流 /A	后钨极电流 /A	脉冲频率 /Hz	相位差	焊接速度 $v/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	填丝速度 $v/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
双钨极	210/170	210/170	5	0°	270	4.0
单钨极	260/160	—	5	—	150	1.8

表 2 母材及焊丝化学成分

Table 2 Chemical contents of the base metal and consumables

材料	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$
SA-508 Gr.3	≤ 0.25	≤ 0.4	0.5~1.0	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.25	0.4~1.0	0.45~0.60
ER309L	0.04	1.0	0.5~2.5	0.040	0.030	22.0~25.0	12.0~14.0	0.75
ER308L	0.04	1.0	0.5~2.5	0.040	0.030	18.0~21.0	9.0~11.0	0.75

(耐蚀层)。试板以及焊丝化学成分如表 2 所示。焊接保护气体为 99.999% 高纯氩气。

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝成形

双钨极与单钨极不锈钢堆焊焊缝表面成形如图 3 所示。两个堆焊层焊缝表面均呈现连续光滑, 无任何可见焊接缺陷, 焊接保护效果好, 焊缝成形良好。为了进行冲击性能试验, 双钨极与单钨极均额外堆焊一层, 使堆焊层厚度达到 10 mm。而为了考察单钨极与双钨极稀释率, 保留部分第一层表面未覆盖。根据试验结果, 发现单钨极与双钨极焊缝熔深分别为 0.76 mm 和 0.68 mm, 较为接近。但双钨极熔敷金属多, 因此双钨极稀释率小于单钨极。这可以从化学成分检测得到证明, 由于稀释率小, 双钨极熔敷金属化学成分中 Ni 和 Cr 含量要多

于单钨极。

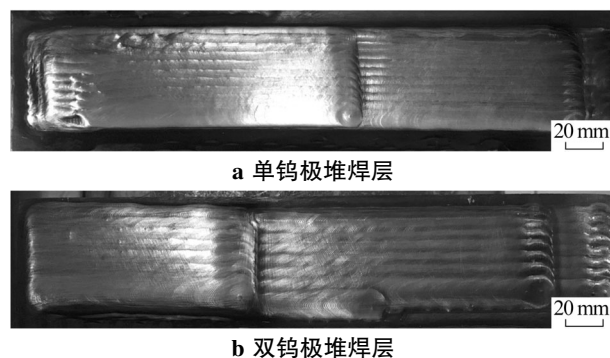


图 3 不锈钢堆焊层表面成形

Fig.3 Surface forming of the stainless steel surfacing layer

2.2 微观组织

单钨极与双钨极不锈钢堆焊层微观组织如图 4 所示。图 4a、图 4c 为热影响区组织, 二者组织均是由经过奥氏体化后, 冷却形成的片状铁素体和渗碳

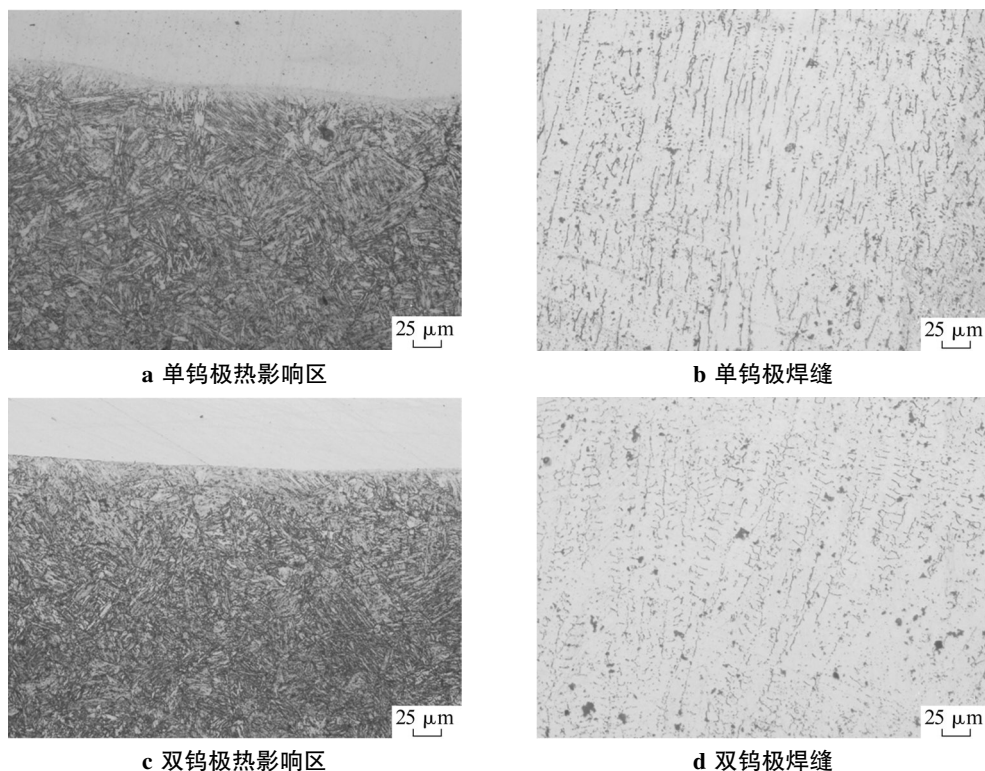
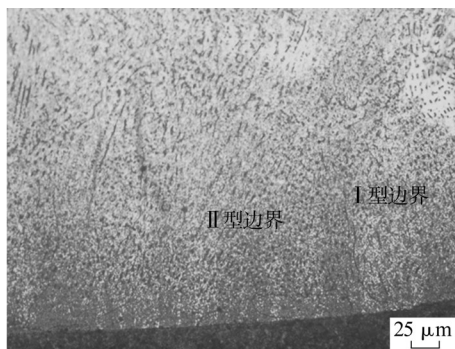


图 4 不锈钢堆焊层微观组织

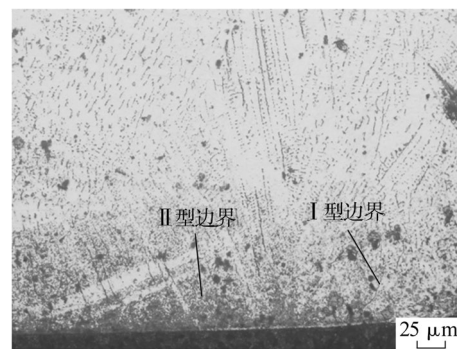
Fig.4 Microstructure of the stainless steel cladding

体组成,即为贝氏体组织。还可以看到部分奥氏体化晶粒晶界,二者区别不大,说明两组焊缝组织焊接热循环相差不大,这还可以由二者硬度分布非常接近来证明,硬度分布可参考本文后续。

图 4b、图 4d 分别为单钨极和双钨极焊缝熔敷金属微观组织。二者焊缝组织均由柱状奥氏体和铁素体组成,为典型奥氏体焊缝组织,具有良好的机械和耐腐蚀性能。但双钨极奥氏体柱状晶较单钨极奥氏体柱状晶粗大,说明双钨极焊缝冷却时间较单



a 单钨极



b 双钨极

图 5 不锈钢堆焊层晶界情况

Fig.5 Grain boundaries of the stainless steel cladding layer

2.3 焊缝性能

(1)UT 探伤。双钨极不锈钢堆焊层表面经打磨平整后进行 UT 探伤,探伤过程执行民用核设备探伤标准,探伤范围为双钨极不锈钢堆焊层以及层下 4 mm。探伤结果为:合格,无缺陷记录,满足产品使用需求。这说明焊接过程中未产生裂纹、夹渣、气孔、未熔合等缺陷,且堆焊层焊道间熔合情况良好。

(2)硬度分布。采用维氏硬度仪,由熔合线下方 5 mm 开始,至熔合线上方 6 mm 止,每隔 0.5 mm 进行硬度测试。试验力 98 N,保持时间 12 s,测试结果如图 6 所示。可以看出,单钨极和双钨极焊缝均是熔敷金属硬度最低,但单钨极硬度大于双钨极,这是因为单钨极熔敷金属铁素体含量高于双钨极熔敷金属;单钨极和双钨极母材热影响区渗碳体析出较多,硬度最高,由于二者金相组织形貌较为接近,硬度分布差别不大;母材硬度居中。

(3)化学成分。采用 HS-136 直读光谱仪以及 HS-132 氧氮氢分析仪,根据 GB/T 223 对堆焊层内距离母材熔合线 0.5~2 mm 范围内进行化学检测。光谱仪采用块状试样,氧氮氢分析采用屑状试样。化学检测结果如表 3 所示。双钨极焊缝 Ni 与 Cr 含量大于单钨极,说明双钨极焊缝稀释率更低。

钨极长,促使晶粒长大。

无论是单钨极焊缝还是双钨极焊缝,在低合金钢和不锈钢异种金属焊缝熔合线附近,均可观察到 I 型和 II 型迁移晶界(见图 5),说明二者熔合线附近微观组织较为接近。其中 I 型晶界大致垂直于熔合线,II 型边界平行于迁移晶界。II 型边界常常是堆焊层中不希望出现的现象,因为堆焊层剥离容易沿着 II 型边界产生,是接头的薄弱环节,但目前尚无法完全避免。

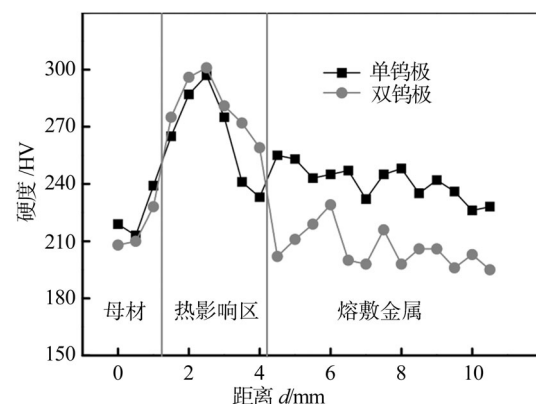


图 6 堆焊层硬度分布

Fig.6 Hardness distribution of the cladding layer

表 3 不锈钢堆焊层化学成分

Table 3 Chemical contents of the stainless steel cladding layer %

钨极	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(Cr)
单钨极	0.018	0.51	2.30	20.17
双钨极	0.022	0.47	2.16	20.47
钨极	w(Ni)	w(V)	w(N)	w(Mo)
单钨极	10.49	0.03	0.031 1	0.01
双钨极	11.23	0.04	0.032 7	0.02

根据测试结果采用德朗法计算 Cr 当量与 Ni

当量,计算公式如式(1)、式(2)所示。根据 Cr 当量与 Ni 当量查阅德朗图获得铁素体含量如表 4 所示,单钨极与双钨极铁素体含量分别为 9.5% 和 7.7%,单钨极大于双钨极。

$$C_{req} = w(\text{Cr}) + w(\text{Mo}) + 1.5 \cdot w(\text{Si}) + 0.5 \cdot w(\text{Nb}) \quad (1)$$

$$N_{ieq} = w(\text{Ni}) + 30 \cdot w(\text{C}) + 30 \cdot w(\text{N}) + 0.5 \cdot w(\text{Mn}) \quad (2)$$

表 4 德朗图法铁素体含量

Table 4 Ferrite contents by Delong diagram %			
钨极	C_{req}	N_{ieq}	铁素体含量
单钨极	20.95	13.11	9.5
双钨极	21.20	13.95	7.7

(4)冲击性能。冲击性能试验根据 GB/T 2650-2008 执行,试验设备为 HS-113 摆锤冲击试验机,试样尺寸 10 mm×10 mm×55 mm。试验在常温下进行,试验结果如表 5 所示。单钨极与双钨极平均冲击吸收功分别为 158 J 和 157.3 J,差别不大。

表 5 不锈钢堆焊层冲击性能

Table 5 Impact performance of the stainless steel cladding layer

钨极	试样序号	冲击吸收功 A_k/J	剪切断面率 /%	侧膨胀值 /mm
双钨极	1	153	100	1.76
	2	160	100	2.03
	3	159	100	1.75
单钨极	1	161	100	1.93
	2	154	100	1.94
	3	159	100	1.94

(5)晶间腐蚀性能。晶间腐蚀按照 GB/T 4334-2008 E 法执行,试样状态为焊态,试样尺寸为 3 mm×10 mm×70 mm。试样经腐蚀后,采用 HS-1 拉伸弯曲试验机进行弯曲,然后放大 10 倍观察。结果表明,二者均未发现晶间腐蚀裂纹及倾向,说明双钨极与单钨极晶间腐蚀性能相当。

3 应用成果

双钨极堆焊已在“华龙一号”RPV 接管大端的马鞍面堆焊中得到应用,成形美观、质量优秀,相同部件的堆焊工期由 10 天缩短至 5 天,效率优势显著。

4 结论

(1)焊接效率大幅提升。双钨极堆焊获得了良好的焊缝成形,焊接速度与送丝速度是单钨极氩弧焊的 1.8 倍和 2.2 倍。

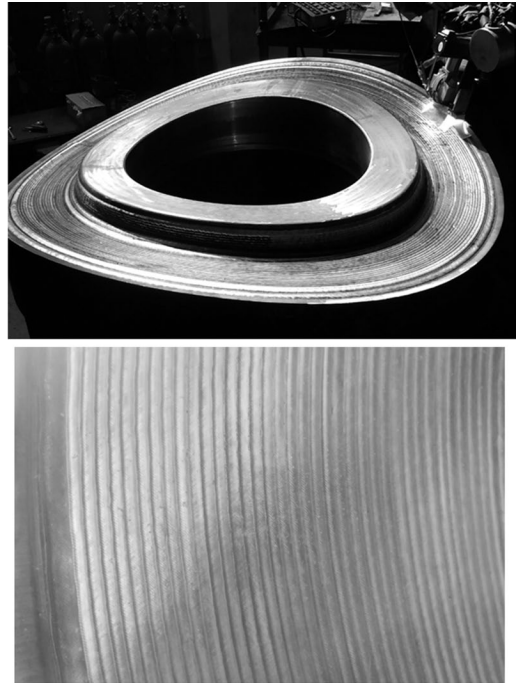


图 7 双钨极堆焊层表面成形

Fig.7 Weld bead surface forming of the TE-TIG cladding

(2)理化性能机械性能良好。双钨极与单钨极焊缝均为由柱状奥氏体与铁素体组成的典型奥氏体焊缝组织,但双钨极焊缝奥氏体晶粒尺寸大于单钨极晶粒尺寸,二者焊缝热影响组织以及合金钢与不锈钢异种金属接头处组织接近。单钨极与双钨极堆焊层硬度分布、冲击性能、晶间腐蚀、化学成分等性能接近,相差不大。

(3)应用前景广阔。双钨极堆焊技术刚刚应用于核电设备的制造,在保证质量的前提下大幅降低制造成本、缩短制造工期,随着焊接技术、工艺、设备的逐步成熟,可推广应用于各种核电堆型、多种核电设备的堆焊工作。

参考文献:

- [1] 王树保. 双钨极氩弧焊物理特性及工艺研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [2] 王树保, 张海宽, 冷雪松. 双钨极氩弧焊工艺及焊缝成形机理分析[J]. 一重技术, 2016(1): 58-63.
- [3] 李汉红. 马鞍形端面、立面热丝 TIG 堆焊机[J]. 电焊机, 2010, 40(8): 90-92.
- [4] 马驰原, 谷文, 朱兴华. 双钨极 TIG 堆焊技术在压力容器制造中的应用[J]. 一重技术, 2016(1): 58-63.
- [5] 王红海, 张仁军, 吴海涛. 14Cr9Mo1.5Co1.2VNbNB 双钨极氩弧焊堆焊接头成分与性能[J]. 电焊机, 2017, 47(6): 63-68.