

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.13

薄壁容器焊接变形控制与接头强化关键技术研究

刘 阳¹, 盛雁龙², 夏玉光¹, 张 宇^{1*}, 李 煜¹, 韩伟韬¹

- 包头北方创业有限责任公司, 内蒙古 包头 014030
- 呼铁局包头车辆监造项目部, 内蒙古 包头 014030

摘要: 针对铁路车辆用5.5 mm厚Q345E薄壁容器罐板对接焊缝的特殊工艺要求, 对比分析了传统焊接方法与深熔氩弧焊(KTIG)、脉冲混合气体保护焊(脉冲MAG)、等离子焊(PAW)及等离子+氩弧焊(PAW+TIG)四种高效自动焊接技术的工艺特性。通过正交试验优化不同工况下的工艺参数组合, 实现了单面焊双面成形的高质量焊接。结果表明, 优化后的KTIG能实现450 mm/min的高速焊接, 热输入较传统TIG降低40%, 但焊接电流超480 A易引发熔池失稳; 脉冲MAG在涂有底漆的工况下, 热输入调整至8.5 kJ/cm后, 塑性显著提高, 气孔缺陷明显减少, 可用于底漆薄板焊接; PAW受底漆挥发影响, 易出现气孔与强度不合格; PAW+TIG综合性能最优, 焊接效率最高, 达500 mm/min, 抗拉强度为490~525 MPa, 低温韧性提高3倍以上, 综合焊接效率提升1.5倍, 但带底漆时韧性裕度不足。根据实际工况选择最优焊接方法及参数, 可以为薄壁容器的规模化生产提供可靠的技术保障。

关键词: 薄壁容器; 自动焊接; 热输入控制; 焊接变形; 底漆工况

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0114-08

Research on Key Technologies for Welding Deformation Control and Joint Reinforcement of Thin-Walled Containers

LIU Yang¹, SHENG Yanlong², XIA Yuguang¹, ZHANG Yu^{1*}, LI Yu¹, HAN Weitao¹

1. Baotou Beifang Chuangye Co., Ltd., Baotou 014030, China

2. Baotou Vehicle Supervision Project Department of Hohhot Railway Bureau, Baotou 014030, China

Abstract: In response to the special process requirements of butt welding of 5.5 mm thick Q345E thin-walled container tank plate for railway vehicles, a comparative analysis of the process characteristics of traditional welding methods and four high-efficiency automatic welding technologies, including deep melting argon arc welding (KTIG), pulsed mixed gas shielded welding (pulsed MAG), plasma welding (PAW), and plasma + argon arc welding (PAW+TIG), was conducted. Through orthogonal experimental optimization of process parameter combinations under different working conditions, high-quality welding with single-sided welding and double-sided forming was achieved. The results show that the optimized KTIG can achieve high-speed welding of 450 mm/min, reducing the heat input by 40% compared to traditional TIG, but the welding current exceeding 480 A is prone to causing pool instability. Under the condition of coated primer, after adjusting the heat input to 8.5 kJ/cm, the plasticity and toughness of pulsed MAG are significantly improved, and the porosity defects are significantly reduced, making it suitable for welding thin plates with primer. PAW is easily affected by primer volatilization, leading to porosity and insufficient strength. PAW+TIG has the best comprehensive performance, with the highest welding efficiency of 500 mm/min, tensile strength of 490~525 MPa, more than three times improvement in low-temperature toughness, and a 1.5 times increase in comprehensive welding efficiency. However, when primed, the toughness margin is insufficient. According to actual working conditions, the optimal welding method and parameters can be selected to provide reliable technical support for the large-scale production of thin-walled containers.

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 中国兵器工业集团科技研究开发计划课题(JM220624)

作者简介: 刘 阳(1996—), 男, 学士, 工程师, 主要从事焊接工艺研究。

通讯作者: 张 宇(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事焊接工艺研究。E-mail: zhangyu981206@sina.com。

Keywords: thin-walled container; automatic welding; heat input control; welding deformation; primer conditions

引用格式: 刘阳, 盛雁龙, 夏玉光, 等. 薄壁容器焊接变形控制与接头强化关键技术研究[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 114–121.

Citation: LIU Yang, SHENG Yanlong, XIA Yuguang, et al. Research on Key Technologies for Welding Deformation Control and Joint Reinforcement of Thin-Walled Containers[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 114–121.

0 引言

随着我国铁路运输装备的快速发展,薄壁类压力容器在罐式集装箱、液化气体运输车等领域中的应用日益广泛^[1-2]。这类容器通常采用4~6 mm厚的低合金高强度钢制造,其对接焊缝不仅是关键承压部位,还长期暴露在户外复杂自然环境中,因此对焊接质量有着严苛的要求。传统的“氩弧焊打底+焊条电弧焊/埋弧焊盖面”工艺,平均焊接速度仅150~200 mm/min、热输入高达15~25 kJ/cm、棱角度达4~6 mm,存在焊接效率低、热输入大、焊接变形严重等问题,难以满足大批量生产的需求。

近年来,随着焊接自动化技术的进步,深熔氩弧焊、脉冲气体保护焊^[3]、等离子焊^[4-5]等高效焊接方法在薄板焊接领域展现出显著优势。Johnson等人^[6]通过优化电弧形态,有效提升了TIG焊的熔深能力。国内研究团队也相继开展了薄板自动焊接工艺研究,吴宪^[7-8]分别采用高频脉冲MAG焊的打底焊模式与电弧冷焊模式对板厚3 mm的Q345E薄板进行了3种工况的对接焊试验,研究了薄板打底焊与电弧冷焊的小变形对接焊工艺与焊接接头的力学性能。李泽宇^[9]针对板厚为3 mm的Q345E低合金高强度钢的低应力、小变形焊接工艺进行研究,采用打底焊模式的高频脉冲加短路熔滴过渡形式和电弧冷焊方法进行焊接,并利用有限元分析软件ABAQUS进行焊接变形仿真分析,仿真结果与实验结果一致。但薄板焊接质量不稳定是多因素交互作用形成的,具有多样性,因此薄板焊接质量控制具有复杂性 with 相互制约性。尤其在预处理底漆工况下,传统焊接工艺易因底漆成分挥发、熔池保护不足产生气孔、咬边等缺陷,焊接返修率高达20%~30%。

本文以壁厚5.5 mm的Q345E薄壁容器罐板为研究对象,采用脉冲MAG、KTIG、PAW、PAW+TIG四种焊接方法开展焊接试验。系统分析了传统焊

接方法及四种自动焊接技术的工艺特性,通过对比焊缝的力学性能及生产效率等核心指标,建立焊接热输入与焊缝成形的定量关系,开发了适用于不同工况的焊接工艺方案,选择匹配焊接材料,研究坡口形式、底漆状态及组对质量对焊接质量的影响,探索适用于薄壁容器罐板的单面焊双面成形的对接焊缝自动焊接技术,解决实际运用过程中遇到的焊接问题。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 化学成分与机械性能

试验母材为符合GB/T 1591标准的Q345E低合金高强度钢,其化学成分及机械性能如表1、表2所示。

表1 Q345E化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Q345E (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	V	Ti
0.16	0.32	1.42	0.018	0.012	0.12	0.25	0.035	0.065	0.015

表2 Q345E机械性能

Table 2 Mechanical properties of Q345E

屈服强度	抗拉强度	延伸率	冲击功/J	冷弯180°
/MPa	/MPa	/%	(-40 °C)	(d=2a)
≥345	470~630	≥21	≥34	完好

1.1.2 母材组织分析

Q345E母材的显微组织如图1所示,其主要由细晶铁素体与珠光体组成。在高倍图片中可观察到明显的带状组织,使Q345E高强钢的力学性能呈现明显的各向异性。

1.1.3 母材焊接性分析

根据国际焊接学会(IIW)标准:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} = 0.39(1)$$

Q345E钢的碳当量CE为0.39,焊接性被判定为I级(优良),因此无需预热和后热处理。

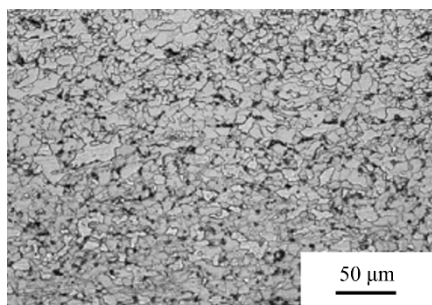


图1 母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of base metal

1.1.4 焊材选择

遵循等强匹配原则选择焊丝,同时兼顾焊接工艺性和低温冲击韧性需求。试验选用ER55-Ni1焊丝,直径1.2 mm,其化学成分符合NB/T 47018.3—2017标准要求, -45°C 低温冲击功 $\geq 54\text{ J}$ 。

脉冲混合气体保护焊(脉冲MAG)采用80%Ar+20%CO₂的气体配比,加入20%的CO₂活性气体,既可增大焊接熔深,又可减少焊接飞溅;对于深熔氩弧焊(KTIG),按照其焊接原理,须采用高纯度惰性保护气体,考虑经济性,选择纯度不低于99.99%的纯氩气;对于等离子焊(PAW),利用氩气优异的电离特性,选择纯度 $\geq 99.99\%$ 的纯氩气,确保等离子弧稳定。

1.2 试验设备与方法

1.2.1 自动焊设备选择

试验采用PMT-400型自动焊接专机系统,如图2所示。系统主要配备:(1)高精度伺服控制系统,确保重复定位精度达到 $\pm 0.05\text{ mm}$;(2)琴键式压紧装置,压力调节范围0~5 kN,适配不同试板的固定需求;(3)红外测温系统,测温范围300~1 500 $^{\circ}\text{C}$;(4)多种焊机接口,通过更换专用焊机,可实现四种焊接方法的相关试验。

1.2.2 焊接方法

KTIG是在传统TIG焊基础上发展起来的新一代焊接工艺,焊接熔深大,可实现5.5 mm罐板单面焊双面成形,且电弧稳定、焊缝外观与内在质量优异,焊接效率高于传统TIG焊^[10]。

脉冲MAG可实现快速稳定的弧长调节,相同送丝速度下工作电压较传统MAG焊降低1~5 V,飞溅量少、焊缝成形均匀,背面熔透性好。

PAW通过焊枪特殊的压缩结构,形成稳定的等



图2 自动焊专机

Fig. 2 Automatic welding machine

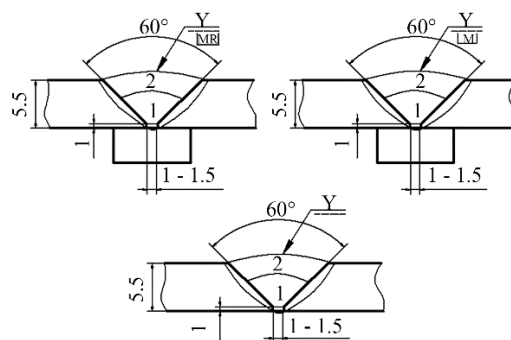
离子压缩电弧,穿透能力强,3~8 mm以下钢板不开坡口直接实现单面焊双面成形。电弧能量集中,热影响区窄,焊接变形小^[11]。

PAW+TIG复合工艺结合PAW的小孔穿透能力与TIG焊的电弧覆盖能力,在保证单面焊双面成形的同时,尽量提高焊接速度,达到正面成形美观的效果,其生产效率是单枪等离子焊接效率的1.3~1.5倍^[12]。

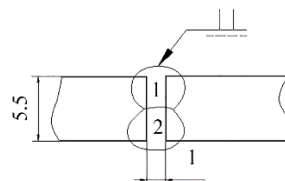
1.2.3 焊接接头方案

根据不同焊接方法的熔深差异,设计了两种焊接接头形式。脉冲MAG焊因熔深较小,需制备坡口,接头尺寸如图3a所示;KTIG、PAW、PAW+TIG焊的熔深较大,无需开坡口,接头形式如图3b所示。

根据标准ISO15614-1,每组试验均制备了多组尺寸为1 000 mm×200 mm×5.5 mm的试板。



(a) MAG焊接头形式



(b) 其他方法的焊接接头形式

图3 焊接接头形式

Fig. 3 Joint design

1.3 焊接工艺评定方案

采用正交试验设计,对多因素多水平的焊接工艺进行了系统评定,试验方案见表3。

表3 焊接评定试验
Table 3 Welding qualification test

试件 编号	焊接规范	预处理 底漆	成形方式	焊接方法
HP01	425 A, 430 mm/min	有	自由成形	KTIG
HP02	450 A, 450 mm/min	无	自由成形	KTIG
HP03	480 A, 450 mm/min	无	自由成形	KTIG
HP04	170 A, 350 mm/min	有	临时衬垫	脉冲 MAG
HP05	170 A, 360mm/min	有	永久衬垫	脉冲 MAG
HP06	120 A, 300mm/min	有	自由成形	脉冲 MAG
HP07	170 A, 350mm/min	无	自由成形	脉冲 MAG
HP08	210 A, 210mm/min	无	自由成形	PAW
HP09	210 A, 210mm/min	有	自由成形	PAW
HP10	190 A (PAW), 230 A (TIG), 400 mm/min	无	自由成形	PAW+TIG
HP11	190 A (PAW), 230 A (TIG), 400 mm/min	有	自由成形	PAW+TIG

2 焊接接头性能评价

2.1 深熔氩弧焊(KTIG)

KTIG 焊接试件外观如图 4 所示。当焊接电流为 425~450 A (HP01、HP02 试件) 时,可实现 5.5 mm 厚罐板全熔透,此时热输入≤9.6 kJ/cm,较传统 TIG 焊接降低 40%。当电流提升至 480 A (HP03 试件) 时,焊缝表面出现晶界液化现象,具体表现为表面不规则凹陷(见图 4b),这会导致焊缝的冲击韧性显著下降,降幅可达 30%~50%,无法满足薄壁容器低温服役需求。

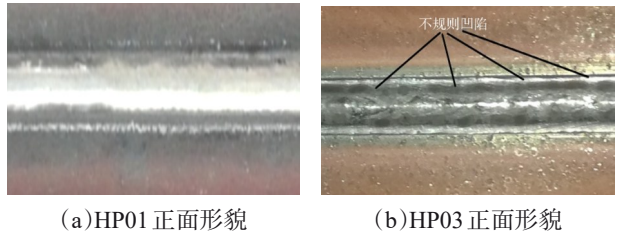
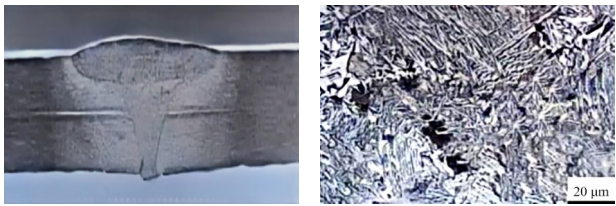


图 4 KTIG 焊接试件

Fig. 4 KTIG Welding test piece

HP01 试板接头宏观形貌及显微组织如图 5 所示,焊接接头宏观形貌未见未熔合、未焊透、裂纹及气孔缺陷(见图 5a)。图 5b 为低倍金相组织,其组成

主要为沿晶界向晶内平行生长的板条状铁素体,板条之间存在珠光体组织,这是由于 KTIG 焊热输入大,奥氏体晶粒迅速长大,晶界面积减少,晶界铁素体优先析出,继续增大热输入可能会诱发魏氏组织生成,进而降低焊缝低温韧性。



(a)HP01 宏观形貌 (b)HP01 显微组织

图 5 焊接接头金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of welded joints

由表 4 可知,KTIG 焊接接头抗拉强度为 499~515 MPa,处于 Q345E 碳钢母材抗拉强度区间(470~630 MPa)内,且断裂位置均在母材,实现与母材的等强匹配;焊接接头弯曲试验均未出现裂纹,试验合格,焊接接头均有较好的塑性。

表 4 KTIG 焊接评定试验结果

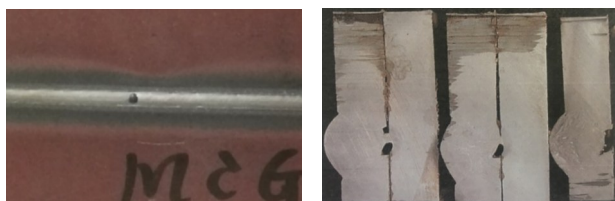
Table 4 Welding qualification test results by KTIG

焊评 编号	拉伸试验			弯曲试验	冲击试验 KV2(−40 ℃)/J	
	试样 编号	抗拉强度 /MPa	断裂 位置	两面弯 两背弯	焊缝	热影响区
HP01	1	508	母材	无裂纹	52/10/66	78/74/70
	2	499	母材			
HP02	1	503	母材	无裂纹	100/12/88	104/100/134
	2	514	母材			
HP03	1	506	母材	无裂纹	82/86/104	108/86/90
	2	506	母材			

焊接接头低温冲击韧性存在显著差异。HP02 焊缝(无底漆,450 A)的-40 °C 冲击功低于 34 J,这是因为电流增大导致热影响区(HAZ)高温停留时间变长,奥氏体晶粒粗化并形成魏氏组织,韧性脆化。HP01 焊缝(有底漆,425 A)也存在低温冲击韧性过低现象,该结果表明 KTIG 焊对预处理底漆极为敏感,预处理底漆的存在可能直接影响焊接质量。

2.2 脉冲气体保护焊(脉冲 MAG)

针对预处理底漆试板,首先采用带衬垫成形方案(HP04、HP05 试件),背面充保护气防氧化,结果如图 6 所示。试验结果表明,使用临时衬垫(HP04)时,底漆受热产生的大量气体自焊缝背面泄漏,形成显著的气孔。采用永久衬垫(HP05)进行焊接时,



(a)HP04 气孔缺陷

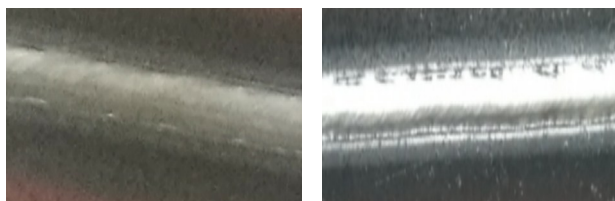
(b)HP05 未熔合缺陷

图6 带衬垫焊接试件

Fig. 6 Welding test piece with padding

焊缝背面出现未熔合缺陷。焊接质量均不能达到要求。

针对喷漆预处理板材易产生气体的问题,优化参数为:送丝速度 5~8 m/min,脉冲频率 50~100 Hz,同时控制焊接电流、电压和焊接速度。同时将背面成形方式改为自由成形方式(试件HP06、HP07),焊接结果如图7所示。焊缝光滑、焊缝表面没有棱角和气孔,质量较带衬垫方案明显提升。



(a)HP06 正面形貌

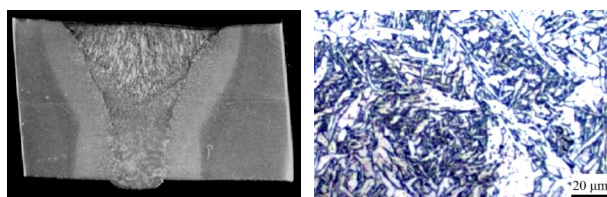
(b)HP07 正面形貌

图7 自由成形焊接试件

Fig. 7 Free form welding test piece

HP07 试板接头宏观形貌及显微组织如图8所示。图8a为焊接接头宏观形貌,未见未熔合、未焊透、裂纹及气孔缺陷。图8b为低倍金相组织,呈明显的柱状晶特征,主要包含先共析铁素体、侧板条铁素体、珠光体以及一定数量的贝氏体。此现象归因于焊接时的高热输入或过快速度,导致金属过度加热,使得难溶的碳化物与氮化物质点融入奥氏体,进而促使奥氏体晶粒显著增大,冷却固化后形成了粗大的铁素体、珠光体结构,即魏氏组织。

由表5可知,脉冲MAG焊接接头抗拉强度为



(a)HP07 宏观形貌

(b)HP07 显微组织

图8 焊接接头金相组织

Fig. 8 Metallographic structure of welded joints

497~520 MPa,断裂位置均在母材,焊接接头与母材实现等强匹配。焊接接头弯曲试验均未出现裂纹,试验合格,焊接接头均有较好的塑性。

表5 MAG焊接评定试验结果

Table 5 MAG Welding qualification test results

焊评 编号	试样 编号	拉伸试验		弯曲试验	冲击试验 KV2 (-40 °C)/J	
		抗拉强度 /MPa	断裂 位置	两面弯 两背弯	焊缝	热影响区
HP06	1	520	母材	无裂纹	82/90/90	96/92/84
	2	517	母材			
HP07	1	501	母材	无裂纹	54/96/15	96/98/110
	2	497	母材			

对于焊接接头韧性,HP06(有底漆,小工艺窗口)冲击试验合格,说明小焊接窗口的脉冲气体保护焊能很好地适应带有预处理底漆的薄板焊接;HP07焊缝(无底漆、大参数)的冲击功低于 34 J,这一结果证实了随焊接速度提升、焊接电流增大,导致焊缝热输入过高,诱发了魏氏组织的形成,从而降低了焊接接头在低温下的冲击韧性。

2.3 等离子焊接(PAW)

PAW的成形质量与底漆状态密切相关。采用PAW和自由成形的焊接方式,在电流 210 A、热输入 7.8 kJ/cm 的条件下,无底漆试板(HP08)可实现高效熔透,焊缝外观平整;而在有底漆试板(HP09)中,正面焊缝出现成形不良及焊缝咬边缺陷,如图9所示。



(a)HP08 正面形貌

(b)HP09 正面形貌

图9 等离子焊接试件

Fig. 9 PAW welding test piece

HP08 试板接头宏观形貌及显微组织见图10。图10a为焊接接头宏观形貌,未见未熔合、未焊透、裂纹及气孔等缺陷。图10b为低倍金相组织,其金相组织为粗大的板条状马氏体与铁素体,这是由于等离子弧焊所需转弧电流较大,焊缝在高温下停留的时间变长,焊缝中的奥氏体和铁素体快速粗化,一定程度上削弱了焊缝接头的强度和韧性。

通过表6可知,PAW焊力学性能存在显著短板:

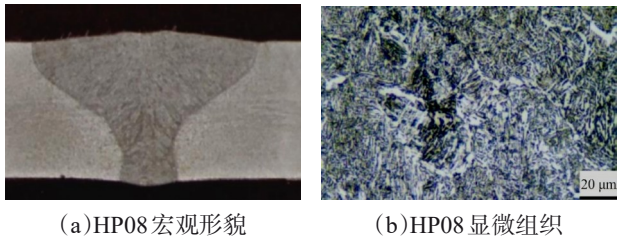


图 10 焊接接头金相组织

Fig. 10 Metallographic structure of welded joints

HP09 试件 1 处抗拉强度仅 467 MPa, 低于 Q345E 碳钢母材最低抗拉强度, 拉伸试验断裂位置 2 处为母材、2 处为焊缝, 且 2 件背弯均断裂; HP08 试件性能达标但需在无底漆工况下。整体表明, PAW 对油漆材料表现出高度的敏感性。

表 6 PAW 焊接评定试验结果

Table 6 PAW welding qualification test results

焊评 编号	拉伸试验		断裂 位置	弯曲试验 两面弯 两背弯	冲击试验 KV2 (-40 °C)/J	
	试样 编号	抗拉强度 /MPa			焊缝	热影响区
HP08	1	515	母材	无裂纹	62/94/88	128/90/100
	2	495				
HP09	1	467	焊缝 1 处	两面弯 无裂纹	82/72/78	80/86/110
	2	510	母材 1 处	两背弯 断裂		

2.4 等离子与氩弧复合焊接(PAW+TIG)

PAW+TIG 复合焊的关键参数为: 等离子枪领先 TIG 枪 12±2 mm, 两热源的间距 8~10 mm, 能量分配比例(PAW:TIG)为 6:4。试验结果如图 11 所示, 该工艺可实现优异的单面焊双面成形, 但有底漆工况下(HP11), 焊缝仍可能出现咬边缺陷。

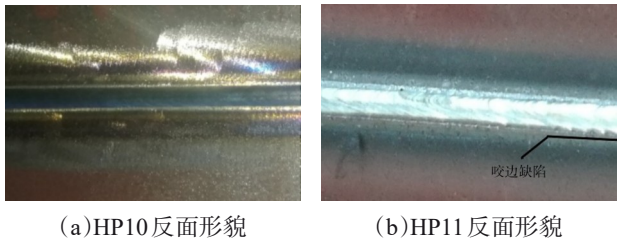


图 11 PAW+TIG 焊接试件

Fig. 11 PAW+TIG Welding test piece

HP10 试板接头宏观形貌及显微组织如图 12 所示。图 12a 为焊接接头宏观形貌, 未见未熔合、未焊透、裂纹及气孔缺陷。图 12b 为低倍金相组织, 其金相组织主要为珠光体、侧板条状铁素体与针状铁素

体, 针状铁素体的形成原因是焊接时填充金属的合金元素会分散到熔池下方, 填充金属中含有一定量的 Mn、Cr、V 等合金元素, 所以其对应的氧化物和硫化物都会促进针状铁素体的生成, 显著提升了焊缝的低温韧性。

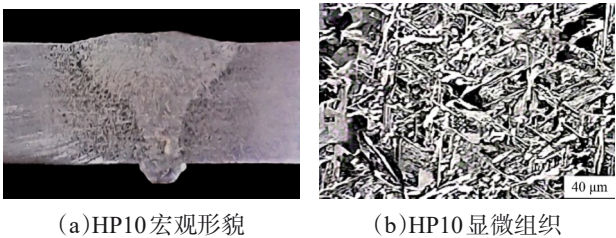


图 12 焊接接头金相组织

Fig. 12 Metallographic structure of welded joints

由表 7 可知, PAW+TIG 焊接接头抗拉强度为 500~524 MPa, 断裂位置均在母材, 实现与母材的等强匹配。弯曲试验均未出现裂纹, 焊接接头均有较好的塑性。

表 7 PAW+TIG 焊接评定试验结果

Table 7 PAW+TIG welding qualification test results

焊评 编号	拉伸试验		断裂 位置	弯曲试验 两面弯 两背弯	冲击试验 KV2 (-40 °C)/J	
	试样 编号	抗拉强度 /MPa			焊缝	热影响区
HP10	1	506	母材	无裂纹	98/80/86	98/90/142
	2	524	母材			
HP11	1	501	母材	无裂纹	38/8/94	100/92/90
	2	502	母材			

对于焊接接头韧性, HP11 试件(有底漆)焊缝冲击试验值低于 34 J, 表明底漆仍会影响韧性, 但 HP10 试件(无底漆)冲击功显著高于标准要求, 证实其强韧匹配优势。

2.5 综合性能对比

四组试样的测试结果对比如图 13 所示。

(1) 抗拉强度对比。图 13a 显示, 仅 HP09 试样(PAW, 有底漆)抗拉强度为 467 MPa, 不满足 Q345E 等强匹配要求; KTIG、脉冲 MAG、PAW+TIG 三种方法的接头抗拉强度均处于 497~524 MPa 区间, 断裂位置均在母材, 实现等强匹配, 其中脉冲 MAG 在有底漆工况下强度稳定性最优。

(2) 低温冲击韧性对比。图 13b 显示, HP01(KTIG)、HP02(KTIG)、HP07(脉冲 MAG)及 HP11(PAW+TIG)韧性不达标, 均存在“大电流”或“有底

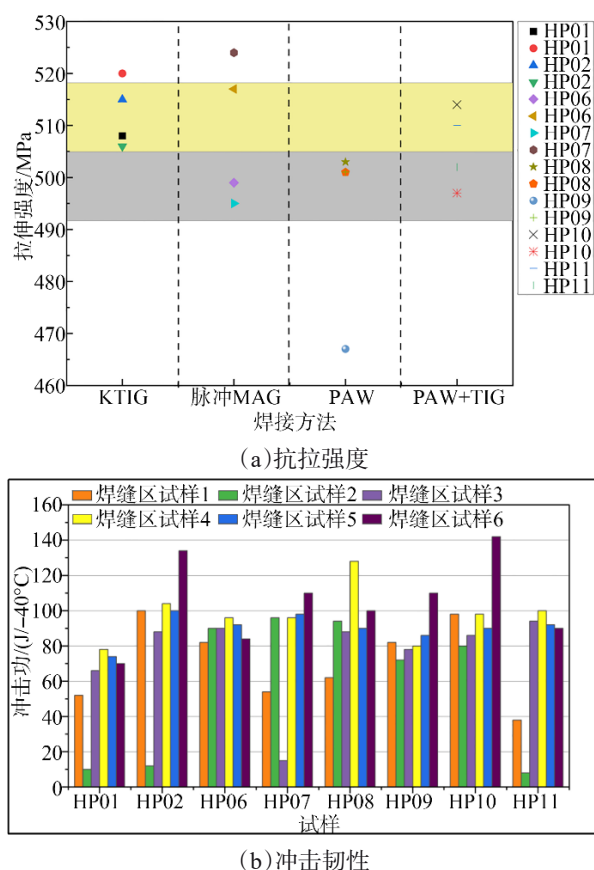


图13 力学性能对比

Fig. 13 Comparison of mechanical properties

漆”诱因。无底漆工况下,PAW+TIG的焊缝冲击功最优(远超34 J),脉冲MAG次之,KTIG对电流波动最敏感,韧性起伏最大。

(3)工况适配性。无底漆工况下,PAW+TIG综合性能最优,强韧匹配佳;KTIG需严格控制电流,避免晶界液化;有底漆工况,脉冲MAG稳定性最好,通过自由成形与小工艺窗口可实现质量达标;PAW完全不适用,PAW+TIG与KTIG需进一步优化底漆处理工艺。

3 结论

以5.5 mm厚Q345E薄壁容器罐板为对象,通过试验与性能测试,探究四种自动焊接技术的工艺特性与适用场景,明确焊接参数、工况对焊缝质量的影响,结论如下:

(1)优化后的深熔氩弧焊实现了450 mm/min的高速焊接,显著提高了焊接效率,但焊接工艺参数

超过480 A、450 mm/min阈值后会因熔池失稳而降低工艺可靠性。低热输入脉冲MAG焊工艺可解决带底漆板材的气孔难题,焊缝光滑、表面无棱角和气孔,低温冲击韧性符合标准,但需严格限制热输入,避免大规范焊接形成焊接缺陷。等离子焊受底漆影响大,无论规范如何调整均导致气孔超标、抗拉强度不合格,因此该方法不适用于带底漆薄板焊接。等离子+氩弧复合焊接技术在薄壁容器罐板焊接中性能优异,焊接效率达500 mm/min,无底漆时-40 °C冲击功达142 J,但焊接带底漆试板时同样出现韧性裕度不足现象,仍待通过激光摆动、保护气体优化或底漆改性来突破。

(2)深熔氩弧焊优化后形成细铁素体-珠光体,然而该工艺存在晶界液化现象的风险较高。脉冲MAG焊通过降低热输入来抑制魏氏组织的形成,但在高速焊接条件下容易引起柱状晶粒的粗化。等离子焊能量高度集中,易形成马氏体组织,组织稳定性较差;PAW+TIG复合焊通过双重热源的协同作用细化了针状铁素体,显著增强了材料的韧性,但该工艺对焊接参数及底漆的敏感性较高。

(3)深熔氩弧焊适用于无底漆、高效率批量生产;脉冲MAG焊带底漆工况稳定,成本低,适合标准化生产;等离子焊仅推荐无底漆小批量焊接;PAW+TIG适用于无底漆、高韧性要求的容器,且双枪结构可灵活切换,降低设备成本。

参考文献:

- [1] 李军,薄柯,黄强华,等. 高压氢气储运移动式压力容器发展趋势与挑战[J]. 太阳能学报,2022,43(03): 20-26.
LI J, BO K, HUANG Q H, et al. Development trends and challenges of mobile pressure vessels for high-pressure hydrogen storage and transportation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(03): 20-22.
- [2] 孙直,任明法,陈浩然. 含金属内衬的复合材料缠绕薄壁容器自紧设计的工程方法[J]. 复合材料学报, 2011, 28(02): 217-221.
SUN Z, REN M F, CHEN H R. Engineering method for autofrettage design of composite wound thin-walled vessels with metal liners [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2011, 28(02): 217-221.
- [3] 刘静,隋国欣,王明山,等. 机车车体Q345E钢Ar+

- CO₂+O₂三元混合保护气体MAG焊接头的组织和性能[J]. 电焊机, 2017, 47(05): 104-108.
- LIU J, SUI G X, WANG M S, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of MAG welding with Ar+CO₂+O₂ ternary mixed shielding gas of steel Q345E for locomotive and rolling stock body[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(05): 104-108.
- [4] 董文宁, 陈国余. 高效等离子焊接技术及其应用[J]. 电焊机, 2007, 37(09): 8-16.
- DONG W N, CHEN G Y. High-efficiency plasma arc welding technology and its application [J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(09): 8-16.
- [5] 唐纯鑫. 等离子自动焊在压力容器上的应用[J]. 中国设备工程, 2020(07): 207-208.
- TANG C X. Application of plasma automatic welding in pressure vessels [J]. China Plant Engineering, 2020 (07): 207-208.
- [6] Johnson K E. Advanced TIG welding for thin-section steels[J]. Welding Journal, 2018, 97(5): 165-176.
- [7] 吴宪. Q345E薄板小变形MAG焊接工艺[D]. 辽宁: 大连交通大学, 2021.
- WU X. Low-deformation MAG welding process for Q345E thin plate[D]. Dalian Jiaotong University, 2021.
- [8] 吴宪, 丁成钢. Q345E钢薄板小变形焊接工艺[J]. 电焊机, 2021, 51(09): 50-54.
- WU X, DING C G. Small-deformation welding process for Q345E steel thin plates [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(09): 50-54.
- [9] 李泽宇, 安哲, 王文超, 等. Q345E薄板高频脉冲MAG对接焊工艺及数值模拟[J]. 焊接技术, 2024, 53(02): 78-82.
- LI Z Y, AN Z, WANG W C, et al. High-frequency pulse MAG butt welding process and numerical simulation of Q345E thin plate [J]. Welding Technology, 2024, 53(02): 78-82.
- [10] 黄江中, 张良锋, 李黎霞, 等. 碳钢K-TIG深熔氩弧焊工艺探究[J]. 焊接技术, 2025, 54(03): 58-61.
- HUANG J Z, ZHANG L F, LI L X, et al. Investigation on deep-penetration argon arc welding (K-TIG) process for carbon steel [J]. Welding Technology, 2025, 54 (03): 58-61.
- [11] 鲍文, 杨蕾, 刘红兵, 等. 等离子弧焊的数值模拟研究现状[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(05): 913-919.
- BAO W, YANG L, LIU H B, et al. Research status of numerical simulation of plasma arc welding [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(05): 913-919.
- [12] 李建平, 周正亮, 崇凤娇, 等. 等离子弧焊与自动氩弧焊组合焊接工艺分析[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(07): 147-148+157.
- LI J P, ZHOU Z L, CHONG F J, et al. Analysis on combined welding process of plasma arc welding and automatic argon arc welding [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(07): 147-148+157.