

高频脉冲大电流深熔MAG焊接工艺研究

张猛, 陈庆城, 徐晓萍, 冯文虎

广船国际有限公司 广东广州 511462

摘要: 将高频脉冲大电流深熔MAG焊接工艺应用在船舶中厚板角接坡口, 实现坡口背面不清根全焊透焊接。针对V形与K形坡口的横焊、平焊位置采用不同的焊接技术条件, 分析大电流深熔MAG焊的熔透性及力学性能。通过研究可知: 高频脉冲大电流双面深熔MAG焊接技术及V形坡口横焊位置大电流单面焊双面成形技术, 焊缝成形良好, 超声波检测、宏观金相、冲击性能及硬度均满足船级社的规范要求, 可减少焊缝根部的碳弧气刨及打磨量, 降低人工成本, 提高施工进度, 避免焊缝金属的多次加热, 提升焊缝接头的可靠性。单面焊双面成形技术应用在V形坡口平焊及K形坡口平焊、横焊均难以实现焊缝成形; 坡口背面粘贴陶瓷衬垫时, 焊缝中心易出现应力集中现象, 产生焊接裂纹。

关键词: 大电流; MAG焊; 深熔焊

Research on high-frequency pulse accompanied by large current deep penetration MAG welding technology

ZHANG Meng, CHEN Qingcheng, XU Xiaoping, FENG Wenhui

CSSC Guangzhou Shipyard International Co., Ltd., Guangzhou 511462, Guangdong, China

Abstract: The high frequency pulse accompanied by large current deep penetration MAG welding technology is applied to the angle bevel of the ship thick plates, which to achieve full penetration without back gouging. The penetration and mechanical properties of the technology are analyzed by using different welding conditions for transverse and horizontal welding positions of V-bevel and K-bevel. According to the research: two kinds of welding techniques proved effective. One is high-frequency pulse with large current double-side deep penetration MAG welding technology, another is V-bevel transverse welding position with high-current single-side welding double-side forming technology. Both of them could formed well, and the results of ultrasonic flaw detection, macro metallography, impact toughness, hardness values could be met the requirements of classification society. It not only reduce the amount of carbon arc gouging and grinding, reduce labor cost, improve construction schedule, but also avoid multiple heating of weld metal and improve the reliability of weld joint. However, high-current single-side welding double-side forming technology applied to V-bevel flat welding or K-bevel flat welding or K-bevel transverse welding, none of them could formed under the condition of ceramic backing pasted on the back of the bevel, the stress concentration is easy to occur in the center of the weld, resulting in welding cracks.

Keywords: large current; MAG welding; deep penetration welding

第一作者: 张猛, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为船舶与海洋工程制造技术, E-mail: 631780058@qq.com。

1 序言

在船舶生产制造过程中，全熔透角焊缝是指两种母材连接达到100%的熔透，这种焊缝大多要求UT检测，是一类极其重要的接头形式^[1, 2]。传统全熔透角焊缝的焊接方式主要分为两种，第一种是装配时无坡口间隙，单侧坡口焊接完成，另一侧碳弧气刨清根^[3-6]，此时焊缝表面产生碳化物，且被焊金属多次加热，不仅影响焊缝接头可靠性，还增加焊接材料消耗及焊接工时^[7, 8]。第二种是装配时预留坡口间隙，根部粘贴陶瓷衬垫，单侧坡口焊接完成，拆除衬垫，另一侧必要时填充盖面^[9-11]，可有效减少碳弧气刨清根和打磨量，但坡口根部打底焊的质量较难保证，同时预留坡口间隙增加了熔敷金属填充量，提高了焊接材料消耗和人工成本。

现阶段许多学者对坡口无间隙焊接、背面不清根全焊透技术进行研究，并取得了较好的效果，

但主要集中在薄板单丝埋弧焊和厚板双面成形FCB焊的平对接焊缝^[12-15]，对于全熔透角焊缝研究较少。因此，对角接坡口无间隙背面不清根全焊透焊接工艺进行研究，对提高焊缝接头可靠性，降低焊接成本等具有重要的意义。

本文通过将高频脉冲大电流深熔MAG焊接工艺应用到船舶中厚板全熔透角接或T形接头，研究带坡口无间隙、背面不清根焊缝全焊透焊接技术，达到提高焊缝接头质量、降低焊接成本、改善作业环境的目的。

2 焊接试验准备

2.1 试验材料

试验材料采用高强钢DH36，打底层焊接采用金属粉芯焊丝HM-50进行深熔MAG焊，填充、盖面焊接采用药芯焊丝YCJ501-1进行CO₂气体保护焊，相关材料化学成分和力学性能见表1。

表1 试验材料化学成分及力学性能

试验材料	焊接方法	规格/mm	化学成分（质量分数，%）						屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	保护气体
			C	Si	Mn	P	Cr	Ni			
DH36	—	600×150×30	0.16	0.26	1.35	0.018	0.04	0.01	362	500	—
HM-50	MAG	φ1.2	0.10	0.76	1.78	0.02	0.09	0.08	400	524	82%Ar+18%CO ₂
YCJ501-1	FCAW	φ1.2	0.048	0.40	1.35	0.03	0.06	0.04	375	520	≥99.8% CO ₂

2.2 试验设备

试验设备采用德国CLOOS公司生产的型号为PULSE 601 PRO的MAG焊接电源，焊接电源深熔焊模式是一种焊接电弧短、弧压大的射流过渡电弧，具有能量集中、熔敷率高、熔深大、热输入小及飞溅低等特点。

2.3 试验设计

火焰切割45°的V形和K形坡口，装配时均不预留坡口间隙及钝边，分为横焊、平焊两种焊接位置，如图1所示。根据不同的焊接工艺制定3种试验方案，见表2。

2.4 试验参数

试验研究坡口根部的熔透状态，对打底层的焊接参数进行记录，相应参数均进行多次验证，确保焊接过程顺利进行，填充、盖面焊接采用常规工艺进行半自动CO₂焊，其焊接电流为210~260A，电弧电压为26~30V，层间温度≤230℃。打底层焊接参数见表3。

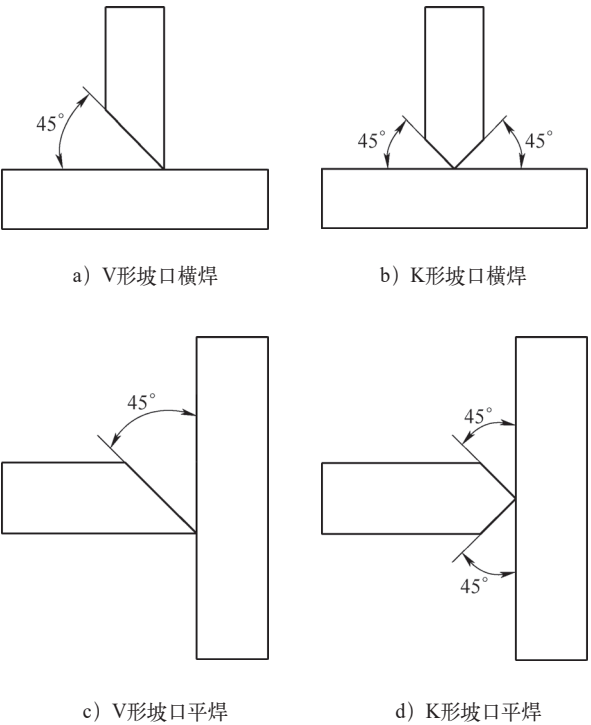


图1 焊接坡口装配

表2 焊接试验方案

试验方案编号	坡口形式	焊接位置	工艺要求
1	1-1	V 横焊	坡口背面粘贴 $\phi 6\text{mm}$ 圆棒陶瓷衬垫后焊接
	1-2	V 平焊	
	1-3	K 横焊	
	1-4	K 平焊	
2	2-1	V 横焊	直接进行大电流焊接, 实现单面焊双面成形
	2-2	V 平焊	
	2-3	K 横焊	
	2-4	K 平焊	
3	3-1	V 横焊	预先采用小电流在坡口内侧焊接, 坡口根部未被焊透, 背面采用大电流冲击未焊透的坡口根部实现全焊透
	3-2	V 平焊	
	3-3	K 横焊	
	3-4	K 平焊	

表3 打底层焊接参数

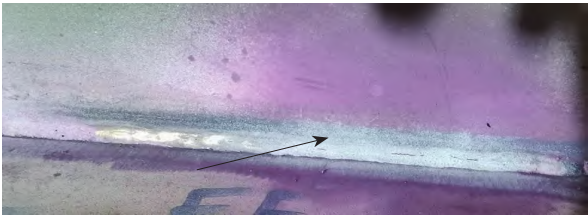
试验方案编号		焊接 电流 /A	电弧 电压 /V	脉冲 频率 /Hz	焊接速度 / (mm/min)	热输入量 / (kJ/cm)	
1	1-1	410	32.5	340	350	22.8	
	1-2	380	28.7	324	326	20.1	
	1-3	410	32.5	340	350	22.8	
	1-4	410	32.5	340	350	22.8	
2	2-1	410	32.5	340	324	24.7	
	2-2	380	28.7	324	346	18.9	
	2-3	410	32.5	340	324	24.7	
	2-4	410	32.5	340	324	24.7	
3	3-1	先焊侧	330	28.9	280	338	16.9
		后焊侧	400	32.0	340	325	23.6
	3-2	先焊侧	330	28.9	280	332	17.2
		后焊侧	380	28.7	324	332	19.7
	3-3	先焊侧	330	28.9	280	338	16.9
		后焊侧	400	32.0	340	325	23.6
	3-4	先焊侧	330	28.9	280	338	16.9
		后焊侧	400	32.0	340	325	23.6

3 试验结果及分析

3.1 坡口根部焊缝表面成形

1#方案坡口背面焊缝成形如图2所示。V形坡口横、平焊位置打底层焊缝冷却后进行渗透检测, 有连续性的裂纹产生, 长度在80~150mm (见图2a); K形坡口横焊、平焊位置熔穿流出的金属液反向附着在坡口表面, 形成未熔合缺陷 (见图2b)。

2#方案坡口根部焊缝成形如图3所示。V形横焊坡口根部被焊透, 焊缝表面未发现任何肉眼可见的不良焊接缺陷, 满足船级社焊缝表面质量要求 (见图3a)。V形、K形平焊坡口根部被电弧击穿, 金属液无法固定, 在电弧冲击力的作用下金属液从被击穿的孔洞中流出, 焊缝无法成形, 当电流减小



a) V形坡口横焊、平焊



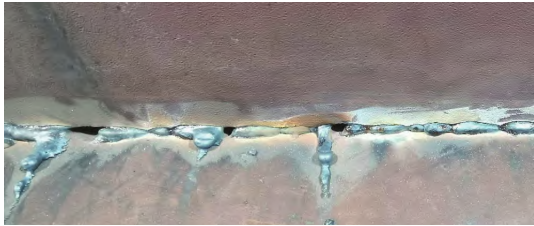
b) K形坡口横焊、平焊

图2 1#方案坡口背面焊缝成形 (背面粘贴陶瓷衬垫)

时, 电弧冲击力降低, 坡口根部无法被焊透 (见图3b)。K形横焊坡口根部被熔透, 背面形成大小不一的鼓包, 与坡口另一侧的母材熔合不良 (见图3c)。



a) V形坡口横焊



b) V形、K形坡口平焊



c) K形坡口横焊

图3 2#方案坡口背面焊缝成形 (背面未粘贴陶瓷衬垫)

3[#]方案坡口根部焊缝成形如图4所示。预先采用小电流在坡口一侧焊接，坡口根部未被焊透，背面采用大电流冲击未焊透的坡口根部，从而实现全焊透。焊缝冷却完成后，表面成形较好，未发现任何肉眼可见的不良焊接缺陷，无需碳弧气刨及打磨处理即可进行后续的填充、盖面焊接。



a) V形坡口横焊、平焊



b) K形坡口横焊、平焊

图4 3[#]方案坡口根部焊缝成形

3.2 超声波检测

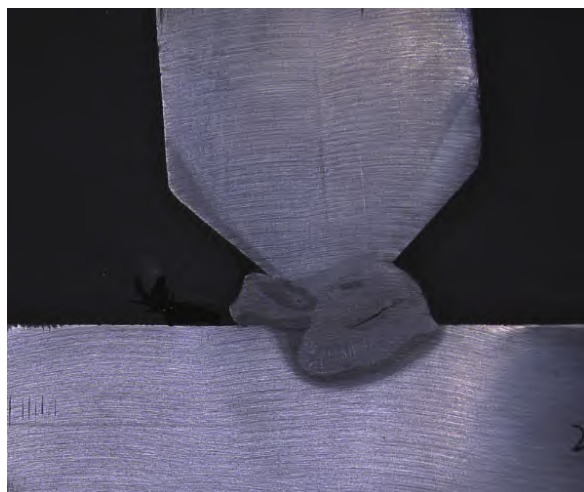
在打底层焊接过程中，1[#]方案均出现焊接缺陷，2[#]方案平焊位置焊缝未成形，故只将2[#]（2-1、2-3）、3[#]（3-1、3-2、3-3、3-4）试验板材进行填充、盖面焊接，24h后进行超声波检测。2[#]（2-3）焊缝出现整条深度在6~8mm的焊接缺陷，2[#]（2-1）和3[#]焊缝内部均无任何不良缺陷，检测结果合格。

3.3 宏观检测

宏观检测避开板材两端约50mm的焊接区，对未成形的焊缝不进行宏观取样。1[#]方案焊缝宏观截面如图5所示。V形和K形坡口打底层焊缝均有焊接裂纹产生，分析可知：采用大电流焊接，焊缝金属填充量增加，背面粘贴圆棒衬垫，过量的熔池金属堆积在坡口侧。熔池金属凝固过程中，衬垫具有一定的保温作用，背面焊缝的冷却速度慢，靠近两侧母材的金属冷却速度快。在焊缝收缩过程中，从两侧母材向熔池中心逐渐冷却收缩，焊接残余应力逐渐增加。坡口侧的填充金属较多，冷却后板材变形方向趋向于坡口侧，焊缝背面的残余应力进一步增加，直至应力过载，超过焊缝的承载能力，产生焊接裂纹。



a) V形坡口横焊、平焊



b) K形坡口横焊、平焊

图5 1[#]方案焊缝宏观截面

2[#]方案焊缝宏观截面如图6所示。2-2、2-4方案焊缝未成形，未进行宏观取样。V形坡口横焊位置焊缝成形较好，焊缝与母材熔合良好，无肉眼可见的不良缺陷。经分析可知，采用大电流焊接，坡口根部冲击出熔池通道，背面的熔池金属增加，焊缝散热速度均匀，应力较小，不会出现焊缝局部应力集中的现象，焊缝接头的可靠性提高（见图6a）。K形坡口横焊位置焊缝截面出现长度约3mm的根部裂纹，位于打底层焊道位置（见图6b）。

3[#]方案焊缝宏观截面如图7所示。焊缝与母材熔合良好，成形美观，无肉眼可见的不良缺陷。预先采用小电流在坡口侧进行焊接，打底层焊缝熔池温度低，填充金属量少，冷却后产生的应力和变形小。焊接完成后，在坡口背面采用大电流焊接，电弧冲击前期未熔透的坡口根部，实现全焊透。焊接

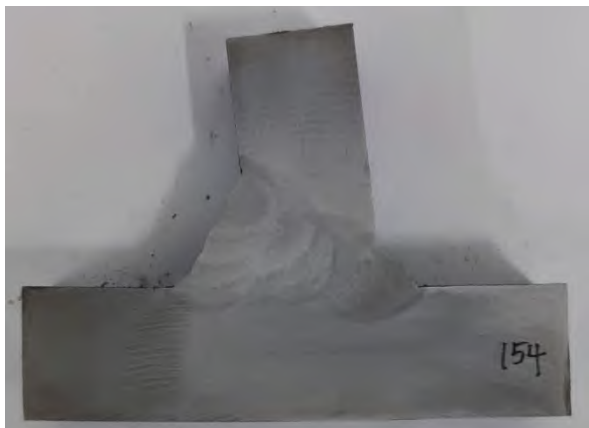


a) V形坡口横焊



b) K形坡口横焊

图6 2#方案焊缝宏观截面



a) V形坡口横焊、平焊



b) K形坡口横焊、平焊

图7 3#方案焊缝宏观截面

熔池从坡口根部垂直于熔池表面方向逐渐冷却，焊缝最大应力垂直于填角焊缝的中心线，但焊缝在此位置的抗负载能力强，应力远小于焊缝的抗负载能力，焊缝接头的可靠性提高。

3.4 力学性能检测

根据超声波检测及焊缝截面宏观检测结果，对符合船级社焊缝成形管理要求的典型焊接坡口方案进行的力学性能检测，即对2-1、3-1、3-4的典型焊接坡口方案进行后续的冲击性能及硬度检测。

(1) 冲击性能检测 根据中国船级社《材料与焊接规范要求》开展0℃低温夏比冲击试验，试样尺寸均为10mm×10mm×55mm，冲击开槽V型缺口，取样开槽位置如图8所示。

多次进行焊缝及热影响区冲击性能试验，所有方案冲击吸收能量值均在100J以上，在相同位置，

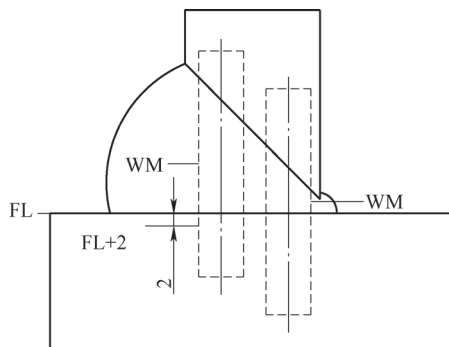


图8 冲击试验开槽取样位置

冲击吸收能量分布均匀，其平均值与试验值的离散程度低，接头冲击性能稳定，焊接可靠性高，满足船级社规范中对冲击性能的要求，其中船级社要求的最小冲击吸收能量值为47J，冲击性能检测结果如图9所示。

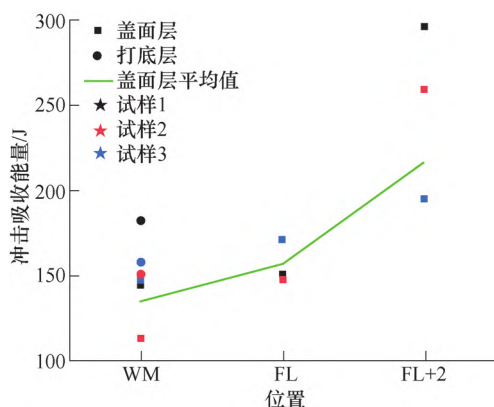
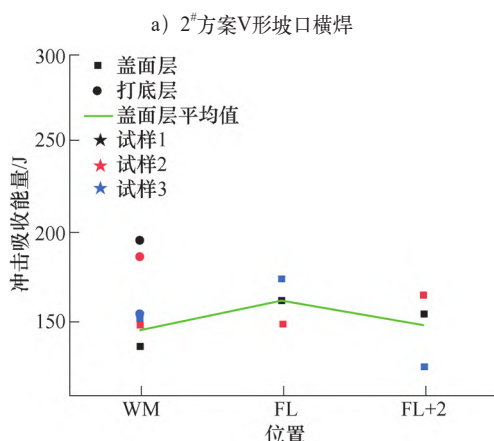
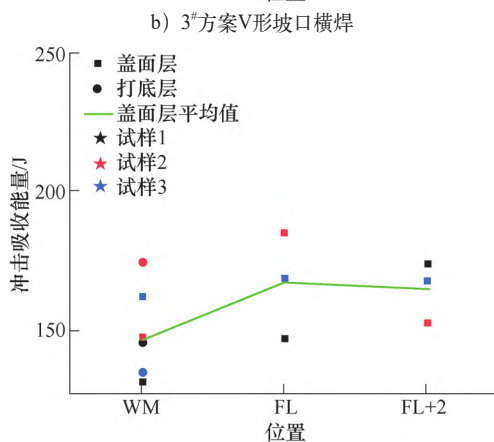


图9 冲击性能试验结果

(2) 硬度检测 根据中国船级社《材料与焊接规范要求》进行宏观截面硬度测试，如图10所示，其中A线为CO₂焊缝区，B线为CO₂焊缝与MAG焊缝的交界区，C线为MAG焊缝区。

焊缝的硬度数据如图11所示。所有方案硬度检测最大值均在240HV10以下，相同区域焊缝硬度值分布均匀，未发现硬度值离散程度较大的情况，焊缝刚性低、塑性好、抗裂性能好，接头可靠性提高，满足船级社规范的硬度检测要求。

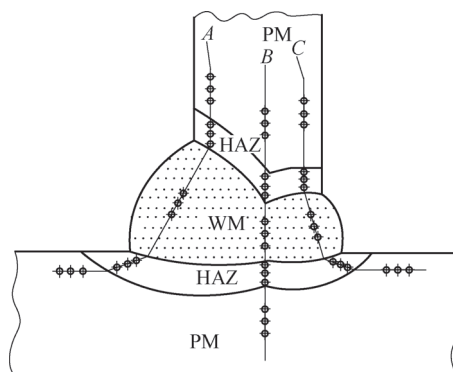


图10 硬度检测位置

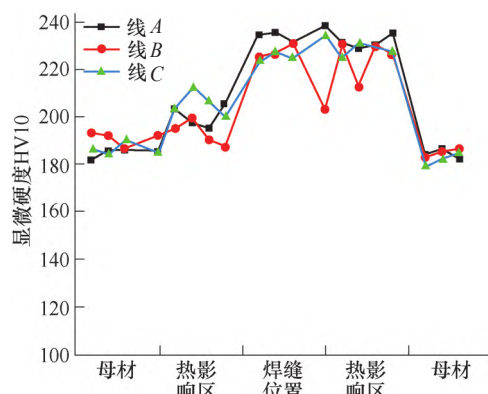


图11 (a) 2#方案V形坡口横焊

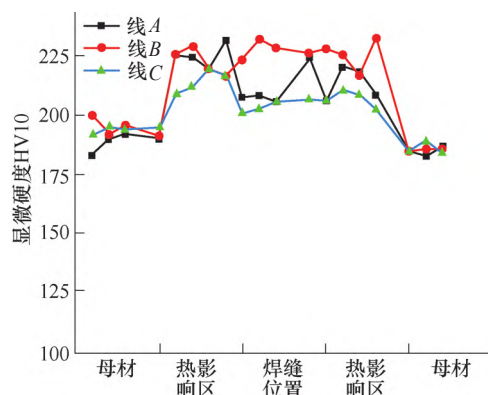


图11 (b) 3#方案V形坡口横焊

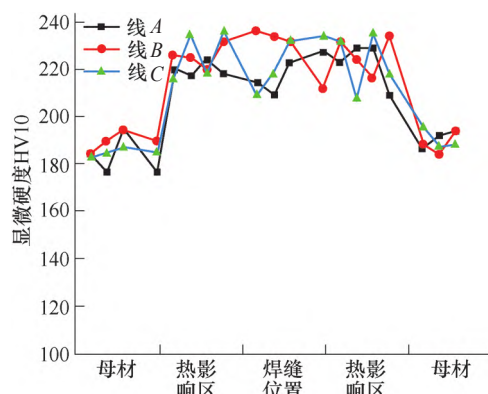


图11 (c) 3#方案K形坡口平焊

图11 硬度检测结果

4 结束语

本文通过高频脉冲大电流深熔MAG焊接工艺在船舶中厚板全焊透角接或T形接头的焊接试验及分析研究,可以实现单面焊双面成形、坡口背面不清根功能。通过对比V形和K形坡口不同的焊接方式,分析大电流深熔MAG焊的熔透性及力学性能,得出以下结论。

1) 高频脉冲大电流双面深熔MAG焊接技术以及V形坡口横焊位置大电流单面焊双面成形技术,焊缝成形良好,超声波检测、宏观金相、冲击性能、硬度检测均满足船级社的规范要求,可减少焊缝根部的碳弧气刨及打磨量,降低人工成本,提高施工进度,避免焊缝金属的多次加热,提升焊缝接头的可靠性。

2) 大电流深熔MAG焊背面粘贴陶瓷衬垫,焊缝易出现应力集中现象,产生焊接裂纹。

3) 大电流深熔MAG焊单面焊双面成形,K形、V形坡口的平焊位置电弧容易击穿,难以实现焊缝成形,K形坡口的横焊位置坡口难以焊透,且焊缝根部容易产生焊接打底裂纹。

参考文献:

[1] 贺继有,孙博,刘宏亮,等.中厚板K形坡口焊缝全熔透焊接工艺研究[J].内蒙古石油化工,2013,39(17):28-30.

[2] 刘志新,刘斌,乔春江.利用深熔焊机焊接熔透焊缝技术研究[J].金属加工(热加工),2019(4):11-13.

[3] 毛静丽,王虎,刘智,等.碳弧气刨对管线管焊接接头性能影响分析[J].金属加工(热加工),2015(22):53-56.

[4] 周波,易伟,倪川皓,等.碳弧气刨对700 MPa级低

合金钢焊接接头组织与性能的影响[J].焊接技术,2018,47(5):24-25.

[5] 唐锋,黄爱龙.T型接头全焊透角焊缝自动焊接工艺研究及应用[J].中国修船,2021,34(S1):36-40.

[6] 杨家雷.CO₂气体保护焊单面焊双面成形焊接技术研究[J].工程建设与设计,2020(1):254-256.

[7] 徐丹,李朝兵,邱明辉,等.中厚板全熔透T型接头背面不清根工艺研究[J].上海建设科技,2014(6):47-49.

[8] 徐丹,常永强,王春林,等.中厚板全熔透焊缝背面不清根工艺研究[J].江苏建筑,2014(5):70-72.

[9] 李书超,姜胜臻.CO₂气体保护焊全熔透角焊缝焊接质量控制[J].金属加工(热加工),2011(14):49,65.

[10] 杨九九,余彪,林伟.船舶结构全焊透角焊缝设计改进[J].船舶标准化与质量,2018(4):31-33.

[11] 辛庆彬.中厚板T型接头全熔透焊接工艺研究[D].青岛:青岛理工大学,2014.

[12] 孙科,朱庆祥,胡相伟,等.厚板不清根焊接工艺的研究及应用[J].金属加工(热加工),2017(S1):34-36.

[13] 毛良涛,陈华周,于海辉,等.厚板组合焊缝埋弧焊全熔透不清根技术的研究与应用[Z].广东:中建钢构有限公司,2017-10-01.

[14] 张旭平,于民华,顾芝敏,等.埋弧焊免清根焊接工艺在锅壳锅炉上的应用[J].焊接技术,2017,46(2):40-42.

[15] 徐雁飞.船用EH36薄钢板FCB法双丝、三丝焊接工艺认可试验[J].焊接技术,2020,49(2):55-59.

MW 20240524

《金属加工(热加工)》2024年第8期广告目次

单位名称	查询编号	位置	单位名称	查询编号	位置
伊达新技术电源(昆山)有限公司	1925	封面	应达工业(上海)有限公司(熔炼)	1262	前彩1
昆山京群焊材科技有限公司	5123	封二	北京中孚悦达真空科技有限公司	5378	前彩2
湖北天舒感应科技股份有限公司	1947	封三	公益广告	8000	V
北京金威焊材有限公司	1161	封底			