

# 气电横焊工艺技术改进

刘磊<sup>1,2</sup>, 巫瑞智<sup>1</sup>, 沐君飞<sup>2</sup>, 王欢<sup>2</sup>, 习猛<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001; 2. 沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

**摘要:** 为了解决船舶横位置对接焊缝中存在的焊接效率低、质量可靠性差等问题,开展了针对船舶对接焊缝的气电横焊技术研究。通过对水冷铜滑块、陶瓷衬垫等关键条件的设计优化,将气电焊技术扩展至船舶建造横位置对接焊缝的焊接。随后对坡口形式、焊枪位置、摆动幅度等关键焊接工艺参数进行了合理的设计,结合船舶结构特点及工艺覆盖的要求,进行了3组不同板厚的横位置对接焊试验,测量了不同板厚的抗拉强度、硬度及冲击吸收能量,以验证工艺的可行性。结果表明,由于焊缝表面采用水冷铜滑块强制成形及焊缝根部采用陶瓷衬垫成形的影响,得到的焊缝成形美观,避免了焊后打磨处理,大大减轻了劳动强度;各个板厚的抗拉强度、硬度及冲击吸收能量等试验数据均满足船级社规范要求,并具有一定的工艺裕量;热输入最高可达93 kJ/cm,焊接效率相较于常规FCAW横焊提高了8倍左右。

**创新点:** (1)对陶瓷衬垫以及水冷铜滑块设计优化,有效解决了船舶横位置对接焊缝中根部焊缝的熔合问题。

(2)将气电横焊技术用于船舶横位置对接焊缝的焊接,提高了横位置对接焊缝的焊接效率。

**关键词:** 气电横焊; 铜滑块; 衬垫; 焊接效率; 坡口填充

中图分类号: TG457.5 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220114002

## Improvement of gas-electric transverse welding process technology

Liu Lei<sup>1,2</sup>, Wu Ruizhi<sup>1</sup>, Mu Junfei<sup>2</sup>, Wang Huan<sup>2</sup>, Xi Meng<sup>2</sup>

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low welding efficiency and poor quality reliability in ship butt seam welding, this paper carries out research on gas-electric transverse welding technology for ship butt seams. By optimizing the design of key equipment such as water-cooled copper slider and ceramic liner, the gas-electric welding technology is extended to ship construction transverse position butt joints. Subsequently, the key welding parameters such as bevel form, torch position and swing amplitude were reasonably set, and three sets of cross-position butt welding tests with different plate thicknesses were conducted in combination with the structural characteristics of the ship and the requirements of process coverage, and the tensile strength, hardness and impact work of different plate thicknesses were measured to verify the feasibility of the process. The experimental results show that, due to the influence of water-cooled copper slider forced forming on the weld surface and ceramic liner forming at the root of the weld, the resulting weld is beautifully formed, avoiding post-weld grinding and greatly reducing labor intensity; the experimental data of tensile strength, hardness and impact work of each plate thickness meet the requirements of classification society specifications and have a large process margin; the maximum linear energy can reach 93 kJ/cm, welding efficiency can be increased by up to 8 times compared to conventional FCAW cross-welding.

**Highlights:** (1) Optimization of ceramic liner and water-cooled copper slider design, effectively solving the fusion problem of root welds in transverse position butt seam welding of ships.

(2) The use of gas-electric transverse welding technology for the welding of transverse posi. The use of gas-electric transverse welding technology for the welding of transverse position butt welds on ships has improved the welding efficiency of transverse position butt welds.

**Key words:** gas-electric transverse welding, copper slider, liner, welding efficiency, bevel filling

## 0 前言

船舶焊接的总工时和成本各占船体建造的总工时和成本的 30% ~ 40%, 因此发展先进的船舶焊接技术, 不仅能有效提高船舶的建造效率, 还能大大降低船舶建造成本, 提高船舶企业的经济效益<sup>[1]</sup>。发展高效率与高质量并驾齐驱的船舶焊接技术已经引起了国内外学者的广泛关注。从目前的现状来看, 在船舶建造过程中应用较为广泛的焊接方法主要有: 焊条电弧焊、埋弧焊、CO<sub>2</sub> 气体保护焊以及活性气体保护焊等<sup>[2]</sup>。

受焊缝位置的限制, 船舶建造过程中所选用的焊接方法及其焊接效率也有所差异。平位置对接焊缝依托焊剂铜衬垫 (Flux copper backing, FCB) 埋弧焊等高效自动焊技术的推广, 可完成 32 mm 厚度钢板的一次成形<sup>[3-4]</sup>, 焊接效率相比药芯焊丝保护焊 (Flux core arc welding, FCAW) 技术提高了 10 倍; 立位置对接焊缝依托双丝气电立焊等高效自动焊技术的研究推广, 可以完成 68 mm 厚度钢板的一次成形<sup>[5]</sup>, 焊接效率相比 FCAW 技术提高了 20 倍。埋弧横焊设备小型化<sup>[6]</sup> 的发展, 使埋弧横焊作为一种先进的横位置焊接技术, 在造船企业逐步推广应用<sup>[7]</sup>, 横位置对接焊缝的焊接效率提升了 1 倍, 但依然无法大幅度提升焊接效率, 无法真正突破其焊接效率瓶颈。FCAW 单面焊双面成形技术<sup>[8]</sup>, 横位置对接焊缝由于其位置的特殊性, 焊接热输入仅为 10 kJ/cm, 同时受焊工技能、焊接材料及性能等多种因素的影响, 存在着劳动强度大、耗费工时多、质量可靠性差等弊端。

文中通过深度分析气电立焊技术原理, 创新性的将气电焊技术扩展至船舶建造中的横位置对接焊缝的焊接。通过对根部陶瓷衬垫、表面水冷铜滑块形式的改进优化, 对焊接电流、电弧电压、坡口形式、焊枪位置、摆动幅度等关键参数的研究, 解决了根部焊缝下端未熔合缺陷难题, 气电横焊热输入最高可达 93 kJ/cm, 焊缝一次成形的坡口填充量高达 88%, 突破了横位置对接焊缝的焊接效率瓶颈。

## 1 关键技术

在熔化极气体保护焊 (Gas metal arc welding, GMAW) 和电渣焊的基础上, 人们发展了一种具有高效率、低成

本的电弧焊方法——气电立焊。在焊接过程中以 CO<sub>2</sub> 作为保护气, 通过水冷滑块挡住熔融的金属, 使其焊缝强迫一次成形, 省去了多道多层焊接的繁琐过程, 从而实现立向位置的高效焊接。在其提高焊接效率的同时也不可避免带来由于大热输入引起的晶粒粗大等问题, 因此需要通过合理地调控焊接工艺参数, 在保证焊接质量的前提下实现其高速焊接。利用类似于电渣焊所采用的水冷滑块挡住熔融的金属, 使之强迫成形, 以实现立向位置的焊接, 通常采用外加 CO<sub>2</sub> 为保护气体。气电立焊是目前船舶建造行业内焊接效率最高的焊接技术, 但只能进行立位置焊缝的焊接, 气电横焊技术的研究推广在国内尚属空白, 气电横焊关键技术的研究包含了设备、衬垫、滑块、焊接材料、焊接参数等多种因素。

气电立焊设备基本采用左侧轨道、右侧小车向上行走的工作模式, 无法满足轨道在上、小车行走的要求, 需将小车行走机构设置成反向行走。采用 611 所 CZH 型垂直气电焊控制系统进行工艺研究, 该设备具备以下功能: ①能够适应 280 ~ 350 A, 28 ~ 35 V 范围内电流和电压焊接; ②具有高效率的焊接性能; ③大热输入焊接保证根部焊全熔透; ④操作和使用简便。

FCAW 焊横位置对接焊接时, 根部焊缝下端易出现未熔合缺陷, 摒弃传统气电焊立焊衬垫, 结合 CO<sub>2</sub> 气体保护焊陶瓷衬垫特点, 为增大坡口根部的热量输入, 达到熔透效果, 将气电立焊单面陶瓷衬垫下口进行开凹槽设计, 有效杜绝了根部焊缝未熔合焊接缺陷, 改进成单面锡纸粘贴进行固定方式优化, 便于操作 (图 1)。

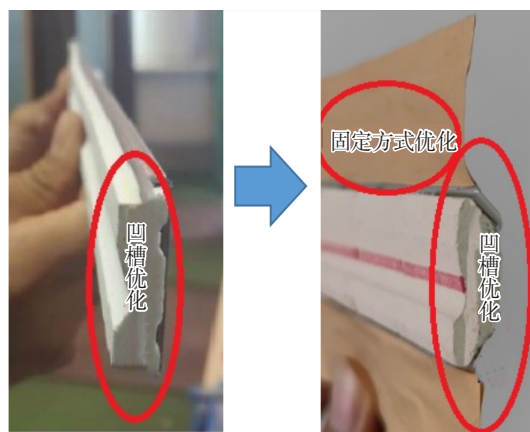


图 1 陶瓷衬垫形状

为了解决焊缝未熔合焊接缺陷,将气电立焊表面焊缝强制成型的水冷铜滑块下口进行开凹槽设计处理(图2),可有效杜绝表面焊缝未熔合焊接缺陷。铜滑块成形槽宽根据表面坡口宽度选择,原则上不超过坡口宽度6 mm,铜滑块行走过程中,凹槽的上口需贴近表面坡口的下边缘。



图2 水冷铜滑块设计优化

焊接坡口角度也是影响根部焊缝成形的重要因素,常规 FCAW 焊技术横位置坡口中下坡口角度为  $5^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ,气电横焊过程中熔池因重力作用集中在铜滑块一侧,坡口根部因得不到足够的热量而出现未熔合焊接缺陷。将下坡口由  $5^{\circ} \pm 5^{\circ}$  修改为  $0^{\circ}$ ,上坡口角度保持  $35^{\circ} \pm 5^{\circ}$  不变,修改后将大大增加熔池在坡口根部的停留时间,保证根部焊缝的成形质量,如图3所示。同时,在进行坡口加工时,可减少一侧坡口加工,不仅缩短加工工时,而且降低了因坡口加工而产生的变形影响。

在气电横焊过程中,将焊丝设置在距离坡口下端3 mm,并且距离坡口根部5~8 mm处,有利于焊丝熔化后在根部均匀铺展熔敷,实现焊缝根部成形,并向表面摆动6~10 mm,确保焊缝表面成形。当焊丝偏于坡口中心位置或距离坡口根部太远时,根部在靠近坡口

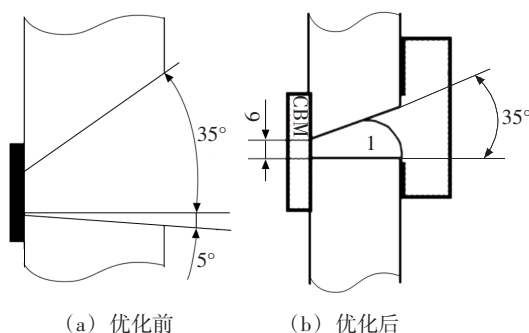


图3 坡口形式及角度设计优化

根部处的位置由于处在电弧边缘,温度较低、熔渣析出,填满根部间隙,阻碍焊缝根部成形,造成未熔合焊接缺陷;当焊丝距离下端太近或距离坡口根部太近时,一方面喷嘴可能与坡口发生导电,阻碍正常焊接,另一方面当喷嘴粘附熔渣时,可能因为间隙太小而阻碍行走机构向上行走。摆动距离不能太小,太小则表面坡口边缘处温度太低,析出熔渣阻碍焊缝与母材熔合;摆动距离太大,则表面焊丝与背面焊丝距离太远,板厚中心温度不够,同样会导致未熔合缺陷。为了保证坡口根部熔合良好,焊丝在摆动两端适当停留。

## 2 试验过程

《中国船级社 材料与焊接规范(2021版)》第3章焊接工艺对厚度的适用范围有下列规定:钢材厚度适用范围应符合表1中规定<sup>[9]</sup>。尽管横位置对接采用多层多道的混合焊工艺,但因气电横焊焊道在坡口表面和根部均有成形,因此该工艺的厚度适用范围按照从严的原则,板厚适用范围依照单面单道焊执行,参考注③对热输入超过50 kJ/cm的焊接方法,认可的厚度上限是1.0t(t为板厚)。结合船舶结构特点及工艺覆盖的要求,试验分A,B,C3组,分别对应板厚15 mm,

表1 钢材厚度的适用范围<sup>[9]</sup>

试板厚度 <sup>①</sup> t/mm	认可范围	
	单面单道焊或双面单道焊的对接接头和T形接头	多道焊的对接接头和T形接头以及填角焊接 <sup>②</sup>
$t \leq 3$	$(0.7 \sim 1.1)t$	$(1 \sim 2)t$
$3 < t \leq 12$	$(0.7 \sim 1.1)t$	3 mm ~ 2t
$12 < t \leq 100$	$(0.7 \sim 1.1)t$ <sup>③</sup>	$(0.5 \sim 2)t$ (最大150)
$t > 100$	不适用	50 mm ~ 2t

注:①对组合焊工艺,记录的每种方法所涉及厚度可作为确定各独立焊接方法厚度认可范围的基础。

②对填角焊缝,认可范围适用于两个母材金属的厚度。

③对热输入超过50 kJ/cm的焊接方法,认可的厚度上限是1.0t。

20 mm, 25 mm, 装配参数见表 2, 焊接工艺参数见表 3, 焊缝成形检测数据见表 4。根部间隙是保证背面焊缝成形的主要因素, 根部间隙太小, 容易导致未焊透, 根部间隙太大, 使得焊缝填充量增加, 意味着焊接热输入增加, 直接影响焊缝的力学性能, 根部间隙参考气电立焊技术标准设定为 8 mm。

表 2 装配参数

试验编号	板厚 D/mm	根部间隙 S/mm	表面坡口宽度 W/mm
A	15	8	14
B	20	8	18
C	25	8	20

表 3 焊接工艺参数

试板编号	板厚 D/mm	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	热输入 $Q/(kJ \cdot cm^{-1})$	摆动幅度 A/mm	停留时间 $t_1/s$
A	15	340	32	115	56.8	6	1.5
B	20	320	32	71	86.5	8	1.5
C	25	320	35	72	93.3	10	1.5

表 4 外观检测数据

试验编号	表面余高 $h_1/mm$	根部余高 $h_2/mm$	根部熔宽 $w/mm$
A	1.5	2	12
B	1.5	2	10
C	1.5	2	12

### 3 试验结果与分析

根部焊缝接头性能受热输入影响较大, 重点检验根部焊缝中心、熔合线、熔合线 + 2 mm、熔合线 + 5 mm 等位置的冲击性能(图 4), 图中 a, b, c, d 是指焊缝根部冲击试样缺口所处位置, 其中, a 为焊缝中心; b 为熔合线; c 为距熔合线 2 mm 的热影响区; d 为距熔合线 5 mm 的热影响区。

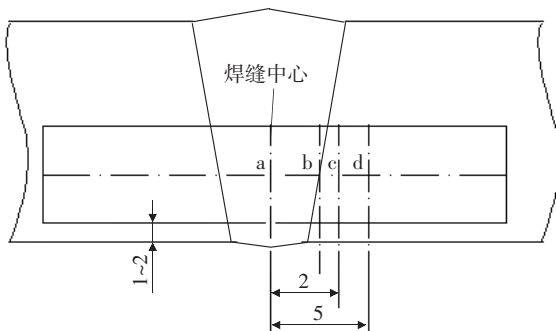
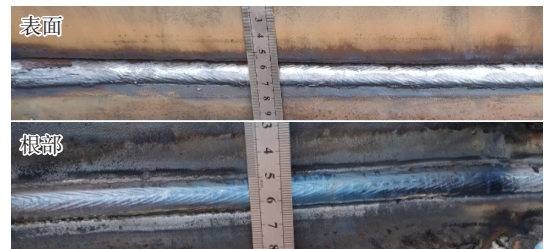
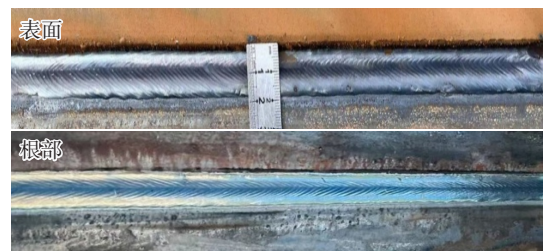


图 4 冲击试验取样位置示意图

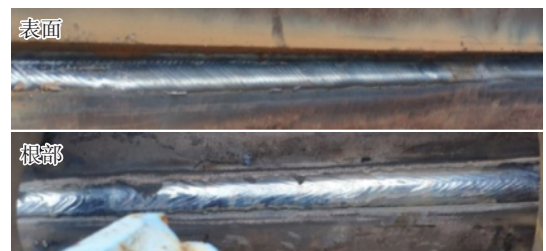
图 5 和图 6 为不同厚度试板焊缝的表面、根部形貌及宏观检测。A 组试验: 如图 5a、图 6a 所示, 15 mm 试板根部焊缝成形饱满均匀, 根部焊缝熔宽 12 mm, 余高 2 mm。横向气电焊热输入经计算为 57 kJ/cm, 达到



(a) 板厚 15 mm 表面、根部成形



(b) 板厚 20 mm 表面、根部成形



(c) 板厚 25 mm 表面、根部成形

图 5 不同厚度试板焊缝的形貌

了常规 FCAW 横焊的 5 倍, 一次成形填充量约占整个坡口的 82.5%; 抗拉强度值为 515 MPa, 510 MPa, 硬度试验最高值为 224 HV(图 7 和图 8), 出现在根部焊缝中心位置, 满足船级社规范要求; 冲击性能最低值为 88.1 J, 69.4 J, 90.0 J(表 5), 出现在根部焊缝熔合线。

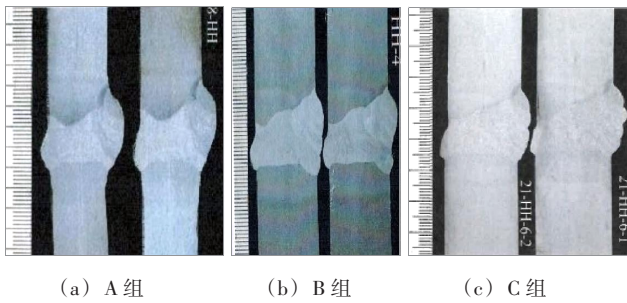


图6 宏观检测

B组试验:如图5b、图6b所示,20 mm 试板焊缝成形饱满均匀,根部焊缝熔宽10 mm,余高2 mm。横向气电焊热输入经计算为86 kJ/cm,达到了常规FCAW横焊的8倍,一次成形填充量约占整个坡口的83.1%。抗拉强度值为515 MPa,500 MPa,硬度试验最高值为197 HV,出现在根部焊缝中心位置,满足船级社规范要求;冲击性能最低值为42.1 J,114.1 J,75.6 J,出现在根部焊缝熔合线+2 mm。

C组试验:如图5c、图6c所示,25 mm 试板根部焊缝成形饱满均匀,熔宽12 mm,余高2 mm。横向气电焊热输入经计算为93 kJ/cm,达到了常规FCAW横焊的9倍,一次成形填充量约占整个坡口的75%。抗拉强度值为545 MPa,550 MPa,硬度试验最高值为224 HV,出现在根部焊缝中心位置,满足船级社规范要求;冲击性能最低值为106.4 J,87.8 J,97.0 J,出现在根部焊缝熔合线。

3组冲击性能试验结果相比船级社规范规定的39 J,都具有较大的工艺裕量,焊接工艺优良。

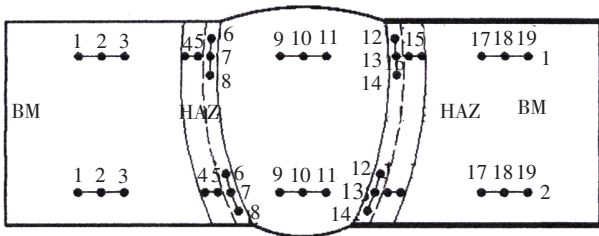
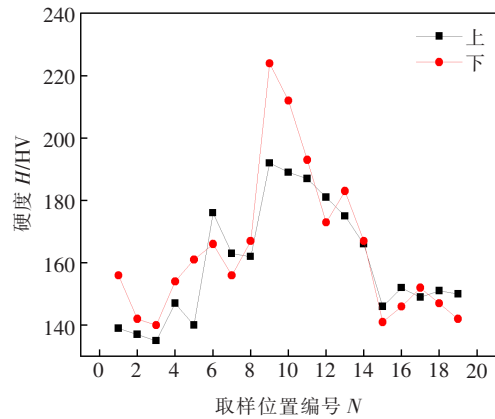
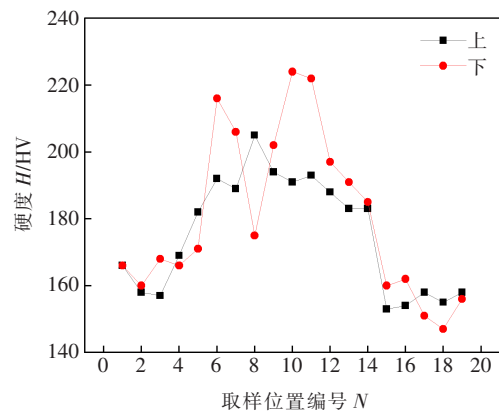


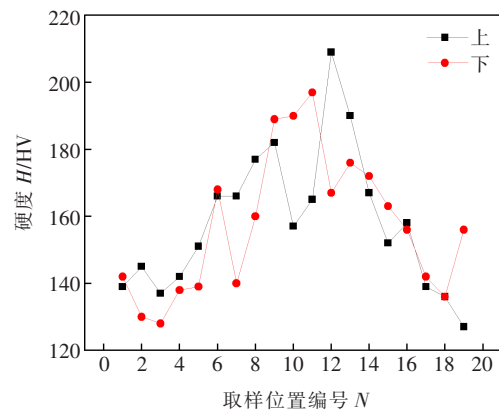
图7 硬度试验取样位置



(a) A组



(b) B组



(c) C组

图8 硬度测试结果

表5 冲击性能试验数据

试验编号	冲击吸收能量 $A_{KV}/J$			
	根部焊缝(WM)	根部焊缝(FL)	根部焊缝(FL2)	根部焊缝(FL5)
A(0 °C)	107.6,102.6,92.9	88.1,69.4,90.0	194.1,184.0,235.7	206.7,245.7,223.1
B(0 °C)	103.4,100.7,106.8	81.6,70.4,98.5	42.1,114.1,75.6	167.7,171.8,176.3
C(-20 °C)	106.4,87.8,97.0	82.7,200.0,133.8	245.7,297.3,282.6	257.7,268.1,268.4

#### 4 结论

(1) 针对船舶中的横位置对接焊缝的工艺特点,文中对陶瓷衬垫及水冷铜衬垫滑块关键条件进行了设计优化。焊缝表面采用水冷铜滑块强制成形,焊缝根部采用陶瓷衬垫成形原理,焊缝成形均匀、统一、饱满,避免了焊后打磨处理,大大减轻了劳动强度。

(2) 通过开展 15 mm, 20 mm, 25 mm 的 3 组工艺试验对上述研究进行了验证,各项试验数据均满足要求,并具有较大的工艺裕量,确保了技术的可推广性。

(3) 气电横焊技术的研发及在 LNG 及大型集装箱上的推广应用,突破了横位置对接焊缝的效率瓶颈,热输入高达 93 kJ/cm,焊接效率最高可提高 8 倍左右。

#### 参考文献

[1] 黄永锡. 上海船舶工业展望与船舶焊接应用[J]. 电焊机, 2007, 37(6): 1-3.  
 [2] Yoshihino S, Hohsuke H, Hisaya K. Welding heat-input limit of rolled steels for building structures based on simulated HAZ tests[J]. Transactions of JWRI, 2001, 30(1): 127-134.

[3] 武会宾, 梁国俐, 唐荻. 大热输入焊接 EH36 船板钢接头力学性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 57-60.  
 [4] 刘洪波, 李建新, 齐章国, 等. 大热输入焊接用 EH40 船板钢焊接热影响区组织转变与力学性能[J]. 焊接, 2020(11): 21-27, 62.  
 [5] 石少坚, 王欢, 张剑波, 等. 双丝气电立焊工艺焊缝成型研究[J]. 金属加工, 2016(2): 73-75.  
 [6] 许立新, 张翼飞, 王钱浦, 等. 自动横向埋弧焊的探索和研究[J]. 金属加工, 2018(3): 41-43.  
 [7] 尹基勇, 黄逸怡. 23000TEU 船埋弧横焊技术的研究与应用[J]. 中外船舶科技, 2021(1): 19-23.  
 [8] 周永强, 肖健, 尚朝阳. 无缝药芯焊丝在船舶焊接中的研究与应用[J]. 焊接, 2017(12): 52-55.  
 [9] 中国船级社. 材料与焊接规范[S]. 北京: 中国船级社, 2020.

第一作者: 刘磊, 博士研究生, 高级工程师; 主要从事船舶建造领域高效自动焊接技术及材料研究; 13774437589@163.com。

(编辑: 曲畅)

## 欢迎订阅

焊接杂志社



《焊接学报》(月刊)

邮发代号 14-17

美国《工程索引》(Ei) 美国《化学文摘》(CA)  
中国精品科技期刊 RCCSE中国权威学术期刊



《焊接》(月刊)

邮发代号 14-45

创刊早(1957)、发行量大、影响面广的技术类期刊  
中文核心期刊 中国科技核心期刊



《CHINA WELDING》(季刊)

邮发代号 14-325

美国《化学文摘》(CA) 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)  
荷兰文摘与引文数据库 Scopus  
日本科学技术振兴机构中国文献数据库 JST



《机械制造文摘—焊接分册》(双月刊)

邮发代号 14-192

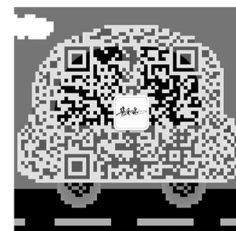
国家级技术类期刊  
中国核心期刊(遴选)数据库 中国学术期刊网络出版总库  
中文科技期刊数据库



1 邮局订阅

2 杂志社订阅  
0451-86325919  
hwihjzsf@163.com

3 微信订阅



广告