

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.14

船舶厚板缆式 36 丝埋弧焊接工艺研究

陈书锦¹, 王 壮¹, 蒋 浩¹, 杨晓杰², 李桂清³, 饶银辉⁴, 马金军⁴,
杨志东¹, 方臣富¹

1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003

2. 广东威尔泰克有限公司, 广东 中山 518026

3. 扬州龙和造船有限公司, 江苏 扬州 225200

4. 广船国际有限公司, 广东 广州 510000

摘 要: 针对船舶厚板焊接效率低、接头质量急需提升的问题, 提出并开发了一种缆式 36 丝埋弧焊接工艺。该工艺采用由 $\varnothing 1.0$ mm 中心丝与 35 根外围丝绞合而成的 $\varnothing 7.0$ mm 缆式焊丝, 在焊接过程中通过连续送丝使多丝同步熔化, 外围丝端部形成自主旋转的焊接电弧。基于模块化逆变焊机开展工艺试验, 并传统 $\varnothing 4.0$ mm 单丝埋弧焊进行对比分析。该工艺显著提升了焊接效率与接头质量。在熔敷速度方面提升约 60%, 同等焊丝消耗下焊接时间缩短 50%, 电能节约 20%; 焊缝接头平均抗拉强度达到 542 MPa, 延伸率为 25.02%, 显微组织主要由细晶粒铁素体和珠光体构成, 未出现魏氏组织等有害相, 其综合力学性能与焊缝质量均明显优于传统单丝埋弧焊接接头。

关键词: 船舶厚板; 缆式焊丝; 埋弧焊; 高效焊接; 焊接工艺性能

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)04-0112-07

Research on Cable Type 36-wire Submerged Arc Welding Process of Ship Thick Plate

CHEN Shujin¹, WANG Zhuang¹, JIANG Hao¹, YANG Xiaojie², LI Guiqing³, RAO Yinhui⁴, MA Jinjun⁴,
YANG Zhidong¹, FANG Chenfu¹

1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China

2. Guangdong Weltec Co., Ltd., Zhongshan 518026, China

3. Yangzhou Longhe Shipbuilding Co., Ltd., Yangzhou 225200, China

4. Guangchuan International Co., Ltd., Guangzhou 510000, China

Abstract: Aiming at the problem of low welding efficiency and urgent need to improve the joint quality of ship thick plate, a new process of cable-type 36-wire submerged arc welding is proposed and developed in this paper. The process uses $\varnothing 7.0$ mm cable-type wire, which is made up of $\varnothing 1.0$ mm central wire and 35 peripheral wires. During the welding process, multiple wires are melted synchronously by continuous wire feeding, and the end of the peripheral wire forms an autonomous rotating welding arc. Based on the modular inverter welding machine, the process test was carried out and compared with the traditional $\varnothing 4.0$ mm single wire submerged arc welding. This process significantly improves the welding efficiency and joint quality. The deposition speed is increased by about 60%, the welding time is shortened by 50% and the electric energy is saved by 20 % under the same wire consumption. The average tensile strength of the weld joint reaches 542 MPa, and the elongation is 25.02%. The microstructure is mainly composed of fine-grained ferrite and pearlite, and no harmful phases such as widmanstatten structure appear. The comprehensive mechanical properties and weld quality are significantly better than those of traditional single-wire submerged arc welded joints.

Keywords: thick plate of ship; cable-type wire; submerged arc welding; high-efficiency welding; welding technological properties

收稿日期: 2026-01-14 修回日期: 2026-02-26

作者简介: 陈书锦(1977—), 博士, 教授, 主要从事焊接过程控制与新型搅拌摩擦焊接技术的研究。E-mail: chenshujin7120@126.com。

引用格式:陈书锦,王壮,蒋浩,等. 船舶厚板缆式 36 丝埋弧焊接工艺研究[J]. 电焊机,2026,56(4):112–118.
Citation:CHEN Shujin, WANG Zhuang, JIANG Hao, et al. Research on Cable Type 36-wire Submerged Arc Welding Process of Ship Thick Plate [J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 112–118.

0 前言

焊接生产约占船体建造总时间的 30%~40%^[1], 船体生产中有不少厚板焊接,因此采用高效优质焊接新工艺可以提高船舶厚板焊接效率与接头质量,能缩短造船周期,提高船舶航行可靠性^[2-4]。对于船舶工业生产而言,缆式焊丝埋弧焊是一种高效的焊接工艺方法。关于缆式焊丝的研究,国内刘亚龙、魏剑平^[5]等通过对 7 丝缆式焊丝埋弧焊与单丝埋弧焊进行分析处理,得出缆式焊丝埋弧焊效率相比单丝埋弧焊提升 44%,同时相同质量下缆式焊丝比单丝埋弧焊节能 45%。林皓^[6]等人在厚 30 mm 的 Q235 钢板上,利用缆式 H10Mn2 焊丝进行旋转电弧埋弧堆焊,探究焊接参数与焊缝熔深和熔宽之间的关系,研究了 Q235 钢旋转电弧埋弧焊成形及焊接接头微观组织。本文研发的缆式 36 丝埋弧焊接新工艺,采用 $\varnothing 1.0$ mm 中心丝与 35 根外围丝绞合而成的 $\varnothing 7.0$ mm 缆式焊丝^[7]。焊接时,送丝机连续送进的 36 根焊丝同步熔化,可显著提高熔敷速度;焊接过程中外围丝端部阳极区形成同步旋转,形成自主旋转焊接电弧,改善熔池的流动性,细化焊缝晶粒,提高焊接接头质量^[8-11]。通过与现有 $\varnothing 4.0$ mm 单丝埋弧焊的熔敷特性、能耗指标及接头性能进行系统对比,揭示缆式 36 丝的高效熔敷机理,可为缆式 36 丝埋弧焊接新工艺在船舶厚板焊接中的工程应用提供理论支撑与技术参考。

1 试验材料及方法

本文选用 DH36 钢作为母材,焊丝选用直径为 $\varnothing 4.0$ mm 实心单丝和 $\varnothing 7.0$ mm 实心 36 丝缆式焊丝,牌号为 H10Mn2,焊剂选用牌号为 CHF101。缆式埋弧焊丝结构如图 1 所示,母材和焊丝力学性能见表 1,对接试板尺寸为 450 mm $\times$ 330 mm $\times$ 50 mm,试板坡口加工装配如图 2 所示。

构建缆式 36 丝埋弧焊系统(见图 3),主要由模

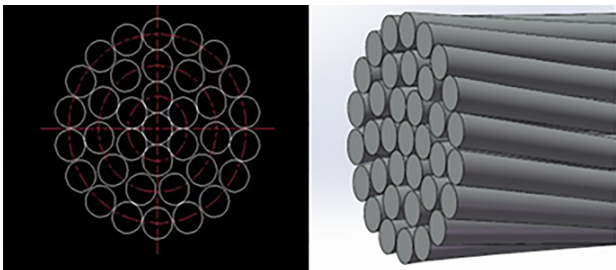


图 1 缆式 36 丝埋弧焊丝结构
Fig. 1 Structure diagram of cable-type 36-wire submerged arc welding wire

表 1 母材和焊丝的力学性能
Table 1 Mechanical properties of base metal and welding consumables

母材	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
DH36	370	550	21
缆式焊丝	420	600	22

块化逆变焊机、焊接小车、专用焊枪及送丝机构组成。焊接过程可实现 36 根焊丝同步熔化与焊接电弧自主旋转。试板采用 50°V 形坡口(宽度 55 mm),装配时添加引弧板/收弧板、马板,背面铺设陶瓷衬垫,层间温度控制在 250 °C 以下,防止热裂纹产生。采用两种焊丝分别进行对接焊接试验,优化焊接参数以保证焊缝外观合格,具体工艺参数如表 2 所示。焊接后对试板进行焊缝宏观金相观察、拉伸性能测试及显微组织分析,系统对比两种工艺的焊接效果。

表 2 $\varnothing 4.0$ mm 单丝和 $\varnothing 7.0$ mm 缆式 36 丝焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters of $\varnothing 4.0$ mm single wire and $\varnothing 7.0$ mm cable-type 36-wire

焊丝	打底焊	填充层	盖面层
$\varnothing 4.0$ mm 单丝	500 A, 32 V, 45 cm/min	700 A, 33 V, 50 cm/min	750 A, 34 V, 45 cm/min
$\varnothing 7.0$ mm 缆式 36 丝	810 A, 34 V, 55 cm/min	1000 A, 38 V, 55 cm/min	900 A, 38 V, 50 cm/min

2 熔敷能耗试验结果分析

2.1 熔敷速度对比

采用直径 7.0 mm 的缆式 36 丝和直径 4.0 mm 的单丝进行焊接工艺对比试验,通过适当调节两种埋弧焊的焊接参数,在保证两种埋弧焊都能焊接出外

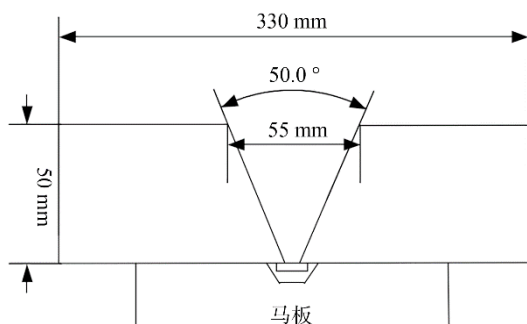


图2 对接试板装配图

Fig. 2 Assembly diagram of docking test plate

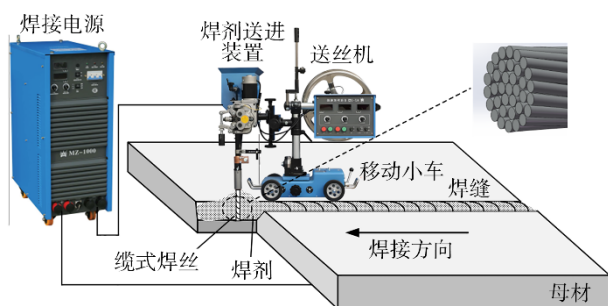


图3 缆式焊丝埋弧焊系统

Fig. 3 cable-type wire submerged arc welding system

观质量合格焊缝的前提下,研究了两种焊丝各自的熔敷系数,分析处理后的试验数据如表3所示。

表3 两种焊丝的熔敷系数对比

Table 3 Comparison of deposition coefficient of two kinds of welding wire

项目	焊接电流 /A	熔敷速度 /(g·min ⁻¹)	熔敷系数 /(g·A ⁻¹ ·h ⁻¹)
Ø4.0 mm 单丝	650	130	12.00
	700	145	12.42
	750	162	12.96
Ø7.0 mm 缆式36丝	1 000	216	12.96
	1 100	235	12.81
	1 200	254	12.70

由图4分析可知,在各自合适的焊接参数下,缆式36丝的熔化速度和熔敷速度较单丝提升约60%,因此在实际焊接过程,对于相同的焊接工作量,使用缆式36丝埋弧焊进行焊接时,焊接生产速度更快,能够有效提高焊接生产量。

2.2 能耗与焊剂消耗对比

本文通过试验分别计算比较两种焊丝在埋弧焊接生产过程中,相同重量的焊丝熔化时间、焊丝熔化用电量和焊丝熔化所用焊剂消耗量。在各自合适的焊接工艺参数下进行堆焊工艺试验,以缆式

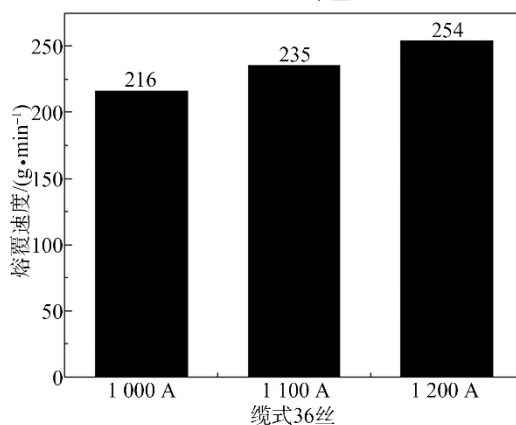
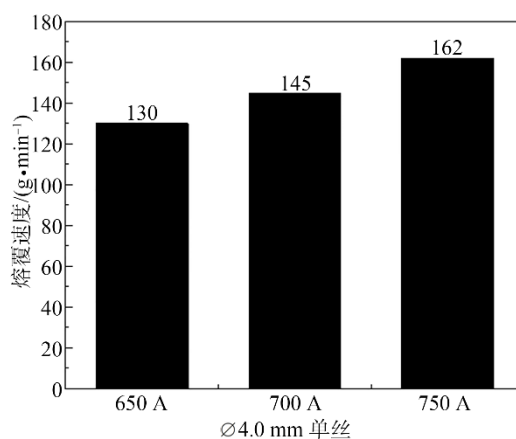


图4 两种焊丝的熔敷速度对比

Fig. 4 Comparison of deposition speed of two kinds of welding wires

36丝和单丝均熔化一公斤焊丝进行比较,绘制出两种焊丝焊接能耗数据对比图,如图5所示。

相同焊丝消耗量下,缆式36丝焊接用时比Ø4.0 mm单丝焊接用时更短,仅为单丝焊接用时的50%;分析焊接参数,缆式36丝焊接电流电压要比Ø4.0 mm单丝大,功率更大,用电量也相应会增加,但由于熔化速度快,单位质量焊丝耗电量反而节约20%;Ø7.0 mm的缆式36丝与焊剂的消耗比为0.8,而Ø4.0 mm单丝与焊剂的消耗比约为1.1,因此缆式36丝焊接时焊剂损耗更小。综上所述,缆式36丝焊接船舶厚板时,可以有效提高焊接效率和生产速度,缩短焊接工时,节约电能和焊剂。

3 缆式36丝焊接工艺与接头性能研究

3.1 焊缝成形与宏观质量

两种焊丝的对接焊道分布如图6所示,焊接后试板表面平整,焊缝成形良好。宏观金相分析显示

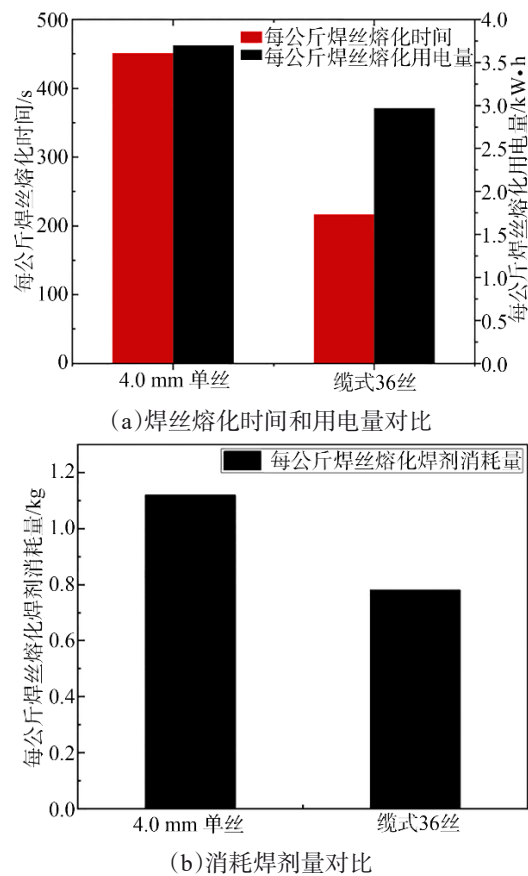


图 5 两种焊丝焊接能耗对比

Fig. 5 Comparison of welding energy consumption of two kinds of welding wires

(见图 7), 两种工艺的焊缝与母材、焊层间熔合良好, 无夹渣、气孔、未熔合、咬边等缺陷, 且通过固定加强板与马板的措施, 焊接变形得到有效控制。

3.2 拉伸性能

采用两块试板各取多根拉伸试样覆盖全焊缝, 取平均值如表 4 所示, $\varnothing 4.0$ mm 单丝和 $\varnothing 7.0$ mm 实心 36 丝缆式焊丝的焊接试板的拉伸试样均在母材断裂, 拉伸试样的平均抗拉强度为 536 MPa、平均延伸率为 22.73%、平均断面收缩率为 66.26%; 缆式 36 丝焊接的拉伸试样均在母材断裂, 拉伸试样的平均抗拉强度为 542 MPa、平均延伸率为 25.02%、平均断面收缩率 61.82%。

对两种焊丝焊接接头的拉伸试样进行断口扫描, 结果如图 8 所示。可以看出, 缆式 36 丝焊接试样的拉伸断口分布着大量尺寸较大、分布均匀的韧窝, 表现出典型的韧性断裂特征; 而 $\varnothing 4.0$ mm 单丝焊接试样的断口韧窝相对较小, 且分布不均, 局部

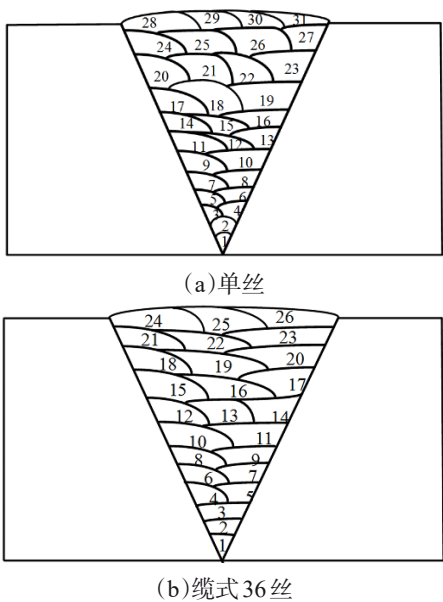


图 6 对接坡口焊道示意

Fig. 6 Butt joint groove bead schematic diagram

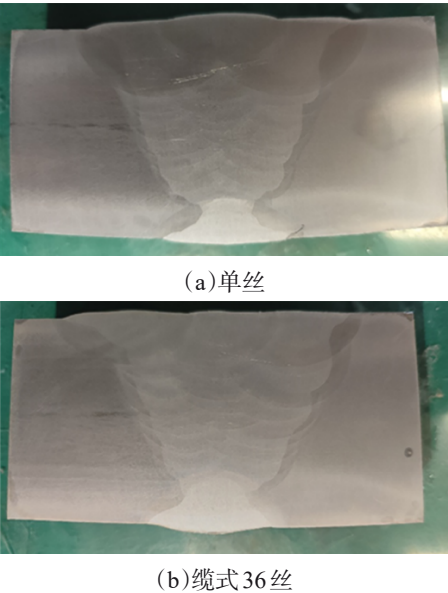


图 7 焊缝截面宏观金相

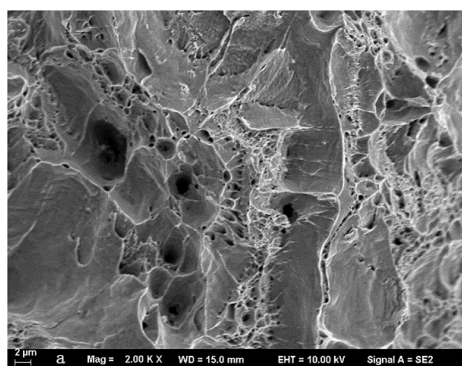
Fig. 7 Macro-metallography of weld cross section

表 4 拉伸数据对比

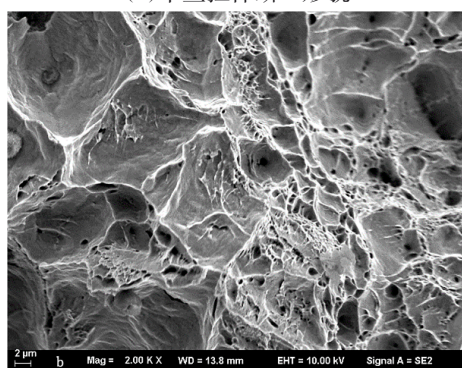
Table 4 Comparison of tensile data

焊材	平均抗拉强度/MPa	平均延伸率/%	平均断面收缩率/%	断裂位置
单丝	536	22.73	66.26	母材
缆式 36 丝	542	25.02	61.82	母材

可见平坦区域, 说明其塑性变形能力较弱。韧窝的尺寸、深度和均匀性通常与材料的塑性及断裂韧性相关, 上述形貌差异表明, 缆式 36 丝焊接接头在拉



(a) 单丝拉伸断口形貌



(b) 缆式36丝拉伸断口形貌

图8 拉伸断口形貌

Fig. 8 Tensile fracture morphology

伸过程中能承受更大的塑性变形,吸收更多能量,因此其抗拉强度优于 $\varnothing 4.0$ mm单丝焊接接头。

3.3 显微组织分析

观察缆式36丝焊接试板组织发现(见图9),焊缝区存在柱状先共析铁素体和珠光体,晶粒细小,热影响区主要为板条状铁素体和珠光体;图10是 $\varnothing 4.0$ mm单丝焊接试板金相显微组织,对比图9可以发现: $\varnothing 4.0$ mm单丝焊接的焊缝区的柱状晶铁素体要比缆式36丝焊接的数量多,晶粒尺寸更大,说明 $\varnothing 4.0$ mm单丝焊接焊缝冷却速度要比缆式36丝焊接的冷却速度要慢,熔池温度要高一些,从热影响区来看, $\varnothing 4.0$ mm单丝焊接的接头热影响区中珠光体数量要多,存在大量的魏氏组织,会影响焊缝的塑性、韧性,缆式36丝焊接热影响区更多是铁素体,因此综合性能要比单丝焊接好。

4 高效熔敷机理分析

通过对 $\varnothing 4.0$ mm的实心单丝和 $\varnothing 7.0$ mm的缆

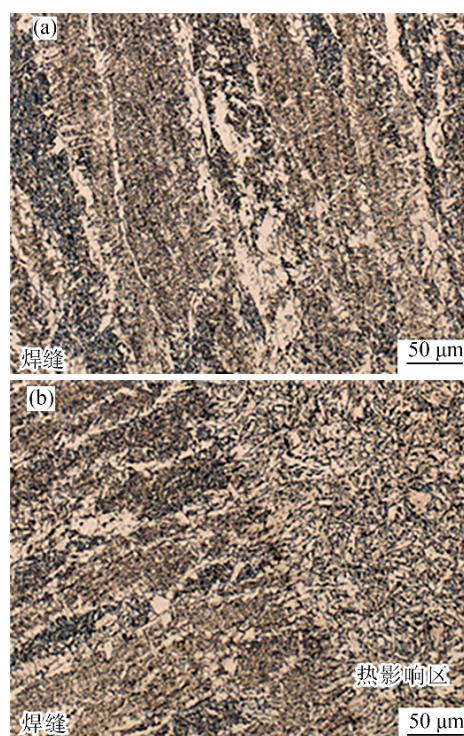
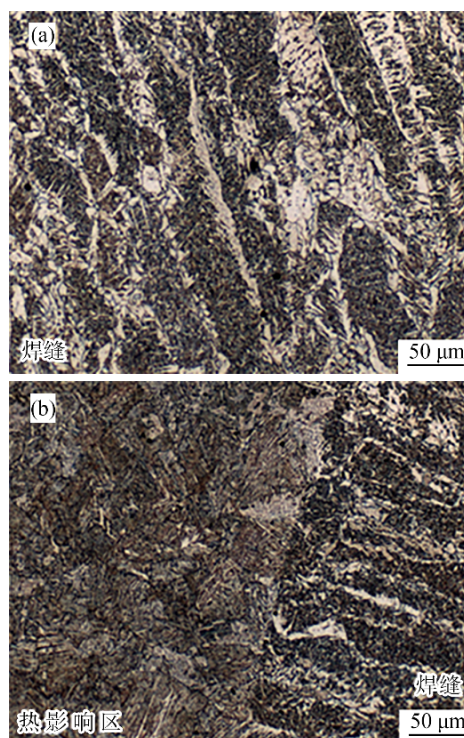


图9 缆式36丝焊接试板显微组织

Fig. 9 Microstructure of cable-type 36-wire welding test

图10 $\varnothing 4.0$ mm单丝焊接试板显微组织Fig. 10 Microstructure of $\varnothing 4.0$ mm single-wire welded test plate

式36丝的熔敷特性对比研究发现,缆式36丝的熔化速度和熔敷速度大大提高,下面分析缆式焊丝比

实心单丝高效熔敷的机理。

(1)干伸长效应。

Ø7.0 mm全实心缆式36丝的结构如图1所示,是由外围三层(18+11+6)加中心丝(1)共36根细焊丝以一定的角度绕中心丝捻合旋转形成的。外围丝绕中心丝旋转一周后,相应两点之间的距离被称为捻距,是缆式焊丝制备的重要参数。

设捻距为 d (此时中心丝长度为 d),则外围单根丝的长度 S 可表示为:

$$S = \sqrt{(2\pi r)^2 + d^2} \quad (1)$$

在实际焊接过程中,当缆式焊丝中心丝干伸长为 L_0 时,外围丝的实际长度是 L_1 :

$$L_1 = \frac{S}{d} L_0 \quad (2)$$

将其带入式(2)可得到

$$L_1 = \frac{\sqrt{(2\pi r)^2 + d^2}}{d} L_0 \quad (3)$$

由上述公式可知,外围单丝的干伸长要比中心单丝的干伸长长,在同直径下,缆式焊丝的实际干伸长要比单丝的干伸长大。此外,焊丝熔化速度与焊丝干伸长成正比,干伸长越长,焊丝熔化速度越快,所以缆式36丝的焊丝熔化速度快,焊接用时短。

(2)电阻热强化。

焊接过程中,电流经过伸出导电嘴的焊丝时,焊丝会产生电阻热,起到预热作用。焊丝的干伸长电阻为:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4)$$

式中 ρ 为焊丝的电阻率; L 为焊丝干伸长; S 为焊丝横截面积。

焊丝干伸长产生的电阻热 Q 主要由两部分产生,一部分是由焊接等效电压与通过焊丝的焊接电流共同作用产生热量 Q_1 ,在焊接参数相同、焊丝材质相同时,这部分产热 Q_1 相同;相同直径下缆式焊丝的干伸长要比单丝大,横截面积要小,电流密度高于实心单丝,因此这部分产生的电阻热 Q_2 更大,缆式焊丝总体电阻热 Q 要比实心单丝的大,所以缆式焊丝熔化速度和熔敷速度更大,焊接效率高。

(3)表面张力优化。

在焊接过程中,焊丝端头的熔滴会受到表面张

力 F 的作用,如图11所示。熔滴表面张力 F 作用于熔滴表面,与熔滴中心到焊丝末端的直线相切。可以将张力 F 分解为径向分力 F_y 和轴向分力 F_x ,其中径向分力 F_y 阻碍熔滴过渡到焊丝末端的趋势,而轴向分力 F_x 则加剧熔滴过渡过程中的颈缩效果,有助于熔滴的过渡。

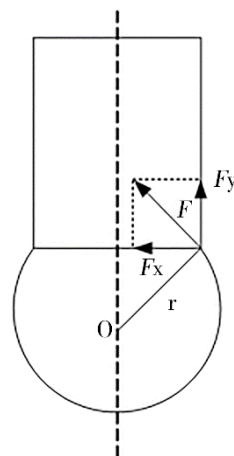


图11 焊丝表面张力

Fig. 11 Surface tension of welding wire

熔滴表面张力可以表示为:

$$F = 2\pi R\sigma \quad (5)$$

式中 R 为焊丝半径; σ 为表面张力系数。

在材料和焊接参数都相同的情况下的,表面张力系数 σ 相同,此时熔滴受到的表面张力仅取决于焊丝的粗细,本文所用缆式焊丝是由36根细焊丝捻合旋转而成,由其结构可知,每根细丝的直径仅为1.0 mm,要比单丝直径小得多,因此表面张力也比单丝要小很多,表面张力变小,熔滴过渡到熔池中更容易,熔滴更易脱离焊丝,因此缆式焊丝的熔化速度要比实心单丝快。

(4)电弧旋转力驱动。

实心单丝焊接过程中熔滴会受到自身重力、表面张力、斑点力、电磁收缩力等各种作用力的影响,从而影响过渡过程,缆式焊丝由于焊接过程中外围焊丝散开进行电弧旋转,因此还会生电弧旋转力 F_r 。

捻角(A)是缆丝焊丝外围细丝与中心丝之间的夹角,记为A,设焊接时缆式焊丝的送丝速度为 V ,外围丝的相对旋转速度为 V_1 ,二者关系为:

$$V_1 = V \cdot \tan A \quad (6)$$

则此过程中的电弧旋转力 F_r 表示为:

$$F_s = \frac{m \tan A}{d} V \quad (7)$$

式中 m 为熔滴质量; d 为外围细丝直径。

缆式焊丝熔滴过渡过程中, 熔滴在电弧旋转力的帮助下从焊丝端头甩出, 加快了熔滴过渡到熔池中的速度, 熔滴脱落比实心单丝要快, 因此缆式焊丝的熔化速度和熔敷速度快, 焊接更高效。

5 结论

(1) 本文研发的缆式 36 丝埋弧焊工艺, 采用 $\varnothing 1.0$ mm 中心丝与 35 根外围丝绞合的 $\varnothing 7.0$ mm 缆式焊丝, 焊接电弧可自主旋转。

(2) 相比 $\varnothing 4.0$ mm 单丝埋弧焊, 缆式 36 丝熔敷速度提升约 60%, 相同焊丝消耗量下焊接用时缩短 50%, 电能节约 20%, 焊剂消耗比降低 27%, 显著提升焊接效率与经济性。

(3) 缆式 36 丝焊接接头的平均抗拉强度达到 542 MPa, 延伸率 25.02%, 显微组织晶粒细小、无有害相, 综合力学性能与焊缝质量优于单丝焊接。

(4) 高效熔敷机理源于干伸长效应、电阻热强化、表面张力优化及电弧旋转力驱动的协同作用。

参考文献:

- [1] 方臣富, 李晓泉, 陶永宏. 船舶焊接设备的应用现状及发展[J]. 焊接技术, 2006(06): 43-46.
FANG C F, LI X Q, TAO Y H. The application status and development of ship welding equipment[J]. Welding Technology, 2006(06): 43-46.
- [2] 徐佳宾. 中国船舶工业发展的战略思考[J]. 中国工业经济, 2002(12): 48-56.
XU J B. Strategic Thinking on Development of Chinese Shipbuilding Industry[J]. China Industrial Economics, 2002(12): 48-56.
- [3] 陈家本. 船舶焊接技术现状与展望[J]. 电焊机, 2004, 34(02): 1-4.
CHEN J B. Actuality and prospect of welding technology in shipping industry[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(02): 1-4.
- [4] 罗滨, 尤栋, 闫大海. 船舶焊接技术向自动化、高效化、绿色化和数字化飞速发展[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(09): 14-16+76.
LUO B, YOU D, YAN D H. Ship welding technology is rapidly advancing towards automation, efficiency, environmental friendliness, and digitalization[J]. China Water Transport, 2015, 15(09): 14-16+76.
- [5] 刘亚龙, 魏剑平, 张建晓, 等. 缆式焊丝埋弧焊在加氢反应器凸台堆焊中的应用[J]. 焊接技术, 2019, 48(05): 71-73.
LIU Y L, WEI J P, ZHANG J X, et al. Application of cable wire arc welding for the welded boss of hydro equipment[J]. Welding Technology, 2019, 48(05): 71-73.
- [6] 林皓, 李晓泉, 郝本行, 等. Q235 钢旋转电弧埋弧焊成形及组织[J]. 热加工工艺, 2019, 48(07): 77-80.
LIN H, LI X Q, HAO B X, et al. Forming and Microstructure of Submerged Rotating Arc Welding of Q235 Steel[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(07): 77-80.
- [7] 方臣富, 杨志东, 陈勇, 等. 缆式焊丝埋弧焊残余应力有限元分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 1-6+129.
FANG C F, YANG Z D, CHEN Y, et al. Finite element analysis of residual stress of submerged arc welded joint using cable-type wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 1-6+129.
- [8] 杨志东. 新型粗丝埋弧焊工艺研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2013.
YANG Z D. Research on the New Type of Thick Wire Submerged Arc Welding Process[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2013.
- [9] 方臣富, 王海松, 刘川, 等. 缆式焊丝 CO_2 气体保护焊接接头残余应力高效数值计算和试验[J]. 焊接学报, 2012, 33(05): 17-20+114.
FANG C F, WANG H S, LIU C, et al. Efficient numerical simulation and experimental study on residual stress induced by GMAW with cable-type wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(05): 17-20+114.
- [10] Fang C F, He B, Zhao Z C, et al. Comparative study on the processing property between cable-type welding wire CO_2 gas shielded welding and SAW[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 20(4): 84-89.
- [11] Yang Z D, Fang C F, Chen Y, et al. Arc behavior and droplet transfer of CWW CO_2 welding[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2016, 23(8): 808-814.