

Q355C钢缆式焊丝埋弧焊能效分析

刘华欣

中国东方电气集团宏华海洋油气装备（江苏）有限公司 江苏南通 226259

摘要：缆式焊丝是一种创新型焊接材料，缆式焊丝埋弧焊具有高熔敷速度、节能等突出优点。对Q355C钢分别使用缆式焊丝和单丝在不同焊接电流、电弧电压下进行埋弧焊试验，对比不同焊丝的能效性能；从焊丝干伸长、焊丝电阻热、熔滴表面张力及焊丝电弧旋转力等方面，分析缆式焊丝熔敷率大、能耗低的优势，得出缆式埋弧焊丝比普通单丝埋弧焊焊丝综合耗电量低20%，从而为缆式焊丝埋弧焊在制造业推广应用奠定基础。

关键词：Q355C钢；缆式焊丝；埋弧焊；能效分析

Energy efficiency analysis of Q355C steel cable wire submerged arc welding

LIU Huaxin

Dongfang Electric Group Honghua Offshore Oil & Gas Equipment (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226259, Jiangsu, China

Abstract: Cable wire is an innovative welding material, cable wire submerged arc welding has the outstanding advantages of high deposition speed and energy saving. The submerged arc welding experiments were carried out on Q355C steel using cable wire and single wire under different currents and voltages, and the energy efficiency performance of different welding wires was compared, and the advantages of large deposition rate and low energy consumption of cable wire were analyzed from the dry elongation of the welding wire, the resistance heat of the welding wire, the surface tension of the molten droplet, and the rotation force of the welding wire. It is concluded that the comprehensive power consumption of cable wire is 20% lower than the single wire. So as to lay a foundation for the popularization and application of submerged arc welding of the cable welding wire in the manufacturing industry.

Keywords: Q355C; cable wire; SAW; energy efficiency analysis

1 序言

焊接作为一种重要的制造成形工艺，其效率的提高对企业的竞争力提升有着举足轻重的影响^[1]。我国焊接工作量已达到世界焊接大国的水平，但焊接工作效率却远远低于发达国家。高效、优质、低耗是当前制造业对焊接技术提出的迫切要求^[2]。随着现代科学技术的快速发展，制造业整体的竞争越来越激烈，为提升企业竞争力，陆续产生了各种高

效的电弧焊技术，主要有各类高效多丝埋弧焊等，这些电弧焊方法主要依靠增加焊丝数量，因此设备比较复杂，需要较高的成本。因此，开发简单易于操作、低成本、低能耗的高效电弧焊方法，对于提高企业竞争力具有重要意义。

2 缆式焊丝及其应用的研究现状

李峰^[3]对 $\phi 5.4\text{mm}$ 的49丝缆式焊丝埋弧焊焊缝宏

作者简介：刘华欣，硕士研究生，高级工程师，主要从事焊接技术研究和应用，E-mail: 13915301018@139.com。

观形貌、熔敷特性及能耗进行了分析研究，并进行了力学性能测试。研究表明，在相同焊接参数下，49丝埋弧焊的熔化速度和熔敷速度明显高于单丝埋弧焊。

杨志东^[4]对 $\phi 7.2\text{mm}$ 缆式焊丝埋弧焊的焊丝熔化、热平衡、焊缝形貌、温度场、残余应力及力学性能等进行了比较分析，构建了焊接热过程平衡方程；对缆式焊丝埋弧焊的温度场、应力应变场进行了模拟计算。研究表明，缆式焊丝埋弧焊在焊接22mm厚船用DH36钢板时，在合理的焊接参数下，熔敷速度比单丝埋弧焊提高了30%，这样可减少焊缝道数，提高焊接效率。

缆式焊丝现已研制成功并可大规模生产，经多家单位试用，证实其具有高效节能（熔敷速度高、焊接熔深大、节省电能）、焊接设备简单、操作方便和接头质量稳定可靠等突出优点，极具工业化推广应用价值^[5]。

3 试验前准备工作

试验使用的母材为低合金钢Q355C，其具有良好的冷加工性能、冲压性能、切削性能，以及焊接性能，被广泛应用于船舶建造、各种工业厂房及桥梁等领域。试验所用Q355C钢焊接试样尺寸为 $400\text{mm} \times 150\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，如图1所示。焊接坡口角度为 70° ，根部间隙 $0 \sim 1\text{mm}$ ，钝边 7mm ，如图2所示。Q355C钢的化学成分和力学性能分别见表1、表2。

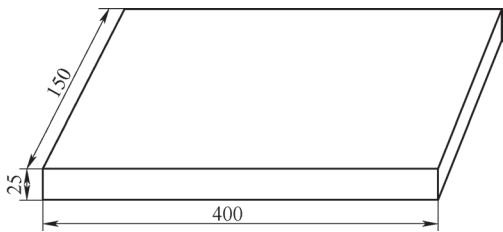


图1 焊接试样尺寸

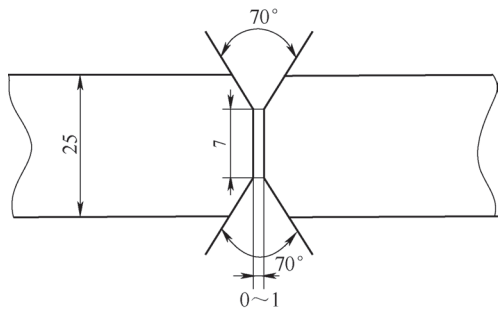


图2 焊接坡口形式

表1 Q355C钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
0.19	0.36	1.38	0.012	0.004	0.026	0.01	0.05	0.02

表2 Q355C钢力学性能

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	冲击吸收能量 (0℃) /J
408	562	28	68.7

试验使用的焊丝主要为 $\phi 5.0\text{mm}$ 的 CHW-S3单丝埋弧焊丝、 $\phi 6.0\text{mm}$ 的KWL-H10Mn2缆式焊丝，该缆式焊丝是由其中1根中心实心焊丝和其余6根外围实心焊丝围绕中心焊丝绞合捻制而成。根据材质证书可知两种焊丝主要化学成分，见表3。

表3 焊丝化学成分（质量分数）（%）

焊丝 牌号	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
CHW-S3	0.099	1.62	0.025	0.012	0.007	0.05	0.010	0.011
KWL-H10Mn2	0.077	1.78	0.026	0.006	0.005	0.008	0.006	0.012

本文试验选用焊剂型号为CHF101，焊剂的主要作用是保证电弧的稳定燃烧，保护熔池不受空气的侵害，改善焊缝的化学成分和组织，以及防止产生裂纹和其他缺陷，其主要组成成分见表4。

表4 CHF101焊剂组成成分（质量分数）（%）

CaF ₂	Al ₂ O ₃ +CaO+MgO	Al ₂ O ₃	S	P
16.04	55.45	23.54	0.019	0.026

4 能效试验对比

对 $\phi 5.0\text{mm}$ 的CHW-S3焊丝和 $\phi 6.0\text{mm}$ 的 KWL-H10Mn2缆式焊丝进行焊接高效节能对比试验。两种焊丝按相同的焊接参数进行焊接工艺对比试验，采用焊剂型号为CHF101，所选焊接参数及焊接结果见表5。由表5可知，在焊接电流550A、电弧电压30V、焊接速度27m/h条件下，每吨缆式焊丝用电量约2214kW·h，埋弧焊焊丝约3157kW·h，缆式焊丝比埋弧焊焊丝节约耗能29.9%。在焊接电流600A、电弧电压30V、焊接速度25m/h条件下，每吨缆式焊丝用电量约2520kW·h，埋弧焊焊丝约3218kW·h，缆式焊丝比埋弧焊焊丝节约耗能21.7%。

熔敷速度计算公式为

$$V = \frac{A}{t}$$
 (1)

式中 V——焊接熔敷速度（kg/h）；

表5 能耗对比试验结果

焊丝型号	焊丝规格 ϕ/mm	焊接电流/ A	电弧电压 /V	焊接速度 / (m/h)	焊接时间 /s	熔敷速度 / (kg/h)	消耗电量 /kW·h	每吨焊丝用电量 /kW·h
KWL-H10Mn2	6.0	600	30	25	140	11.49	1.4	2520
		550	30	27	143	10.85	0.9	2214
CHW-S3	5.0	600	30	25	149	10.01	1.5	3218
		550	30	27	152	8.29	0.9	3157

t ——焊接时间 (s) ;

A_1 ——熔敷金属量 (kg) 。

熔敷每吨金属耗电量计算公式为

$$\mu = \frac{P}{A_1} \tag{2}$$

式中 μ ——熔敷每吨金属耗电量 (kW·h) ;

P ——焊接耗电量 (kW·h) ;

A_1 ——熔敷金属量 (kg) 。

对试验后数据进行熔敷速度和耗电量的计算, 得出图3所示的不同焊丝在不同焊接电流下熔敷速度和耗电量的柱状图。当焊接电流增加时, 无论是 $\phi 5.0\text{mm}$ 单丝埋弧焊还是 $\phi 6.0\text{mm}$ 的KWL-H10Mn2缆式焊丝埋弧焊, 由于焊接电流的增加导致焊接热输入增加, 其熔敷速度均增加, 从而单位时间内的焊丝和母材熔化量增加; 而且在相同焊接电流的情况下, $\phi 6.0\text{mm}$ 的KWL-H10Mn2缆式焊丝埋弧焊的熔

敷速度大于 $\phi 5.0\text{mm}$ 焊丝埋弧焊的熔敷速度 (见图3a) 。

埋弧焊的耗电量与焊接电流成正相关, 焊接电流越大, 耗电量也增加 (见图3b) 。但是, 在焊接电流相同的情况下, $\phi 6.0\text{mm}$ 的KWL-H10Mn2缆式焊丝的耗电量小于 $\phi 5.0\text{mm}$ 焊丝埋弧焊, 表现出较好的节能效果。

当前, 缆式焊丝尚未大批量生产, 生产成本较高, 一般情況下同吨位缆式焊丝价格比埋弧焊单丝贵约10%。综合焊接过程及制备过程, 缆式焊丝埋弧焊比普通单焊丝埋弧焊综合耗电量降低20%以上, 综合工时降低15%。

5 缆式焊丝特性对能耗的影响比较

5.1 缆式焊丝干伸长分析

焊丝从导电嘴中的伸出长度即焊丝干伸长。缆式焊丝是由6根外围丝和一根中心丝绞合捻制而成, 外围丝是按照一定的螺旋升角围绕中心丝进行绞合, 外围丝的实际长度要比普通单根焊丝长, 如图4所示。

当缆式焊丝伸出长度等于捻距 T 时, 计算外围丝实际长度的公式为

$$L = \sqrt{(\pi d)^2 + T^2} \tag{3}$$

式中 L ——外围丝的实际长度 (mm) ;

d ——构成缆式焊丝的细丝直径 (mm) ;

T ——缆式焊丝伸出长度 (mm) 。

当干伸长是 L_s 时, 外围丝的实际长度是 L_{s1} , 即

$$L_{s1} = \frac{L}{T} L_s \tag{4}$$

将式 (3) 带入式 (4) , 即

$$L_{s1} = \frac{\sqrt{(\pi d)^2 + T^2}}{T} L_s \tag{5}$$

由式 (5) 可知, 在相同的干伸长下, 缆式焊丝外围丝 L_{s1} 的实际长度要大于 L_s 。

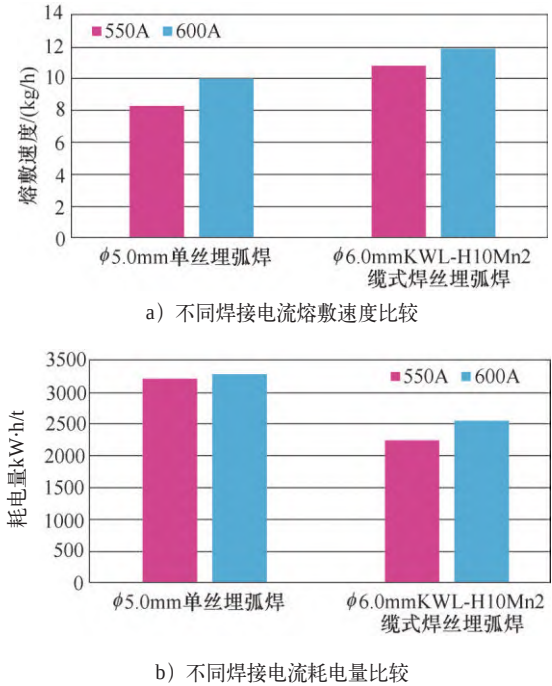
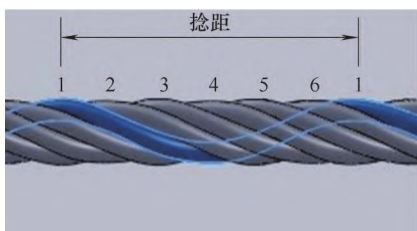
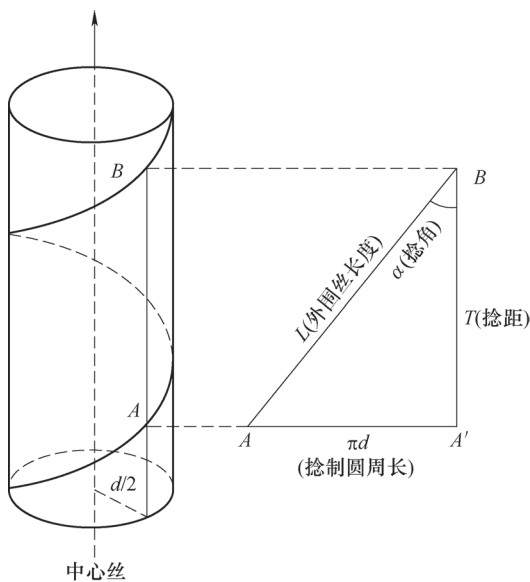


图3 不同焊接电流熔敷速度和耗电量



a) 缆式焊丝三维图

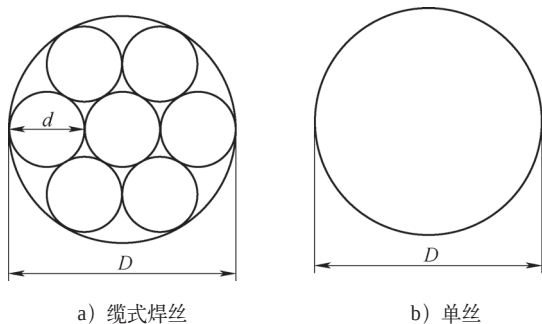


b) 干伸长示意

图4 缆式焊丝干伸长示意

5.2 缆式焊丝横截面分析

综上所述, 缆式焊丝是由外围丝围绕中心丝进行绞合捻制而成, 其截面与普通单根焊丝不同, 如图5所示。



a) 缆式焊丝

b) 单丝

图5 缆式焊丝和单丝截面示意

由图5可知, 缆式焊丝截面积 S_1 、单丝截面积 S_2 计算公式为

$$S_1 = 7\pi(d/2)^2 \quad (6)$$

$$S_2 = \pi(D/2)^2 \quad (7)$$

式中 D ——缆式焊丝外径、普通单根焊丝外径 (mm) ;

d ——构成缆式焊丝的细丝直径 (mm) ;

S_1 ——缆式焊丝横截面积 (mm^2) ;

S_2 ——单根普通焊丝横截面积 (mm^2) 。

由图5可知, $D=3d$, 则

$$S_1 = \frac{7}{9} S_2 \quad (8)$$

从式 (8) 可得出, 缆式焊丝实际截面积比普通单根焊丝小, 是单根普通焊丝的7/9。

5.3 缆式焊丝电阻热分析

从焊丝与导电嘴的接触点到电弧端头的一段焊丝上, 当有焊接电流流过时, 将产生电阻热, 对焊丝起预热作用, 可提高焊丝熔化速度。

电阻热的计算公式为

$$P_R = I^2 R_s \quad (9)$$

式中 P_R ——电阻热 ($^\circ\text{C}/\text{W}$) ;

R_s ——焊丝 L_s 段的电阻值 (Ω) ;

I ——焊接电流 (A) 。

焊丝 L_s 段的电阻值 R_s 为

$$R_s = \rho \frac{L_s}{S} \quad (10)$$

式中 S ——焊丝横截面积。

用于加热和熔化焊丝的总热量主要由两部分组成, 即

$$P_m = I(U_m + IR) \quad (11)$$

式中 U_m ——等效电压 (V) ;

R ——焊丝电阻 (Ω) 。

从式 (11) 可得出, 在等效电压 U_m 相同的情况下, 普通单根焊丝和缆式焊丝熔化焊丝的热量主要取决于焊丝伸出长度的电阻热, 即取决于焊丝伸出长度的电阻值。由于缆式焊丝比普通单根焊丝实际干伸长大, 而实际截面积小, 所以焊丝产生的电阻热比普通单根焊丝大。

5.4 缆式焊丝熔滴表面张力分析

表面张力主要起到保持焊丝头部熔滴的作用, 熔滴和焊丝之间的表面张力垂直作用于焊丝末端与熔滴相交的圆周线上, 且和熔滴表面相切。表明张力可以分解为径向分力和轴向分力, 径向分力使熔滴在焊丝末端产生缩颈, 轴向分力则使熔滴保持在焊丝末端, 阻碍熔滴过渡。

焊丝与熔滴之间的表面张力为

$$F_\delta = 2\pi D\sigma \quad (12)$$

式中 D ——焊丝直径 (mm) ;

σ ——表面张力系数。

由式(12)可知,焊丝直径越小,熔滴表面张力越小,在平焊过程中对熔滴过渡的阻碍越小,熔滴能更容易脱离焊丝。缆式焊丝是由7根细丝构成,焊接时,熔滴必然先由细丝熔化而成,细丝直径是普通单根焊丝直径的1/3,小熔滴的表面张力远小于普通单根焊丝,更容易脱离焊丝,这也是缆式焊丝埋弧焊高效节能的一个原因。

5.5 缆式焊丝电弧旋转力分析

熔化的母材金属熔滴受到包括重力、表面张力、电磁力、斑点压力及等离子力等多种力的综合作用。与普通单根焊丝埋弧焊不同,缆式焊丝埋弧在焊接过程中,随着焊丝端部不断熔化,焊丝相对发生旋转,产生电弧旋转力 F_r 。

缆式焊丝焊接时的送丝速度是 V ,则外围丝的相对旋转速度是 V_1 ,即

$$V_1 = V \tan \alpha \quad (13)$$

式中 α ——缆式焊丝捻角($^\circ$)。

产生的电弧旋转力 F_r 为

$$F_r = \frac{m(V \tan \alpha)^2}{d} \quad (14)$$

式中 m ——熔滴质量(g);

d ——构成缆式焊丝的细丝直径(mm)。

电弧旋转力 F_r 的存在使熔滴产生离心力,将熔滴甩离焊丝,增大了金属熔滴的过渡速度,减少了金属熔滴在焊丝端部停留的时间,这也是缆式焊丝高效节能的一个原因。

综合缆式焊丝的特性(缆式焊丝干伸长、焊丝电阻热、熔滴表面张力及焊丝电弧旋转力),使得缆式焊丝埋弧焊相对于单丝焊丝埋弧焊具有熔敷率大、降低能耗的优势。

6 结束语

缆式埋弧焊丝与普通单焊丝埋弧焊相比,综合耗电量降低约20%,缆式焊丝埋弧焊高效节能特性使其优势显著,具有极大的推广意义。2016—2022年的近7年时间,我国焊丝埋弧焊的年消耗量从44.8万t上升到73.7万t,若用缆式焊丝代替普通单根焊丝进行埋弧焊接,按每吨缆式焊丝用电量约2520kW·h计算,每年可为我国节约5亿kW·h,创造巨大的经济效益,而且对于环境保护等方面也具有重要的长远意义。

参考文献:

- [1] 潘际奎. 展望21世纪焊接科研[J]. 中国机械工程, 2000, 11(2): 21-25.
- [2] 林尚杨. 我国焊接生产现状与焊接技术的发展[J]. 船舶工程, 2005, 27(S1): 15-24.
- [3] 李峰. 49丝埋弧焊焊接方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [4] 杨志东. 新型粗丝埋弧焊工艺研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [5] 王允. 缆式焊丝堆焊稀释率及堆焊层性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.

MW 20240621

(上接第40页)

A283GRC steel and 5052 aluminum alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 106975-106984.

- [6] 谭钦文. 镁/钛异种材料电阻点焊接头形成机理[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [7] 肖逸锋, 张楠鑫, 吴靓, 等. 钎焊间隙对钎焊接头残余应力的影响[J]. 焊接, 2023(12): 17-22.
- [8] 吴方亮. 激光调控含能材料高速冲击焊接研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [9] 冯亮, 范艳柳. 复合钢板Q235B/SUS304L的焊接[J]. 金属加工(热加工), 2011(24): 46-47.
- [10] 李成祥, 许晨楠, 周言, 等. 铜-铝电磁脉冲焊接界

面形成过程的原子扩散行为[J]. 焊接学报, 2024, 45(3): 22-31.

- [11] ANUMPA V, STEAVEN H, BERT L, et al. Vaporizing foil actuator: A tool for collision welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2304-2311.
- [12] CHEN SH H, HUO X CH, GUO CH X, et al. Interfacial characteristics of Ti/Al joint by vaporizing foil actuator welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 263: 73-81.

MW 20240525