

離岸風電結構用金屬粉芯銲線的研製和應用

*張家銘¹、王志堅²

¹廣泰金屬工業股份有限公司 ²中國石油集團海洋工程公司

針對離岸風電專案採用船用 E 級板的銲接技術要求，通過對金屬粉芯銲線的合金成份和力學性能的設計，通過對銲線的抗氣孔性、低溫韌性、低煙塵和低飛濺性、電弧的穿透性及全位置銲接性等方面的優化設計，研製出了一款適合於半自動銲接用的金屬粉芯銲線，通過銲接程序評定試驗(Welding Procedure Specification, WPS)，這種銲線的低溫衝擊性能滿足離岸風電專案的建造要求，實現全位置單面銲雙面成型的要求，並成功用於離風電專案的建造，銲接效率和銲接品質有大幅提高。

關鍵詞：離岸風電、金屬粉芯銲線、全位置銲接、低溫韌性

一、前言

在低碳經濟呼聲高漲的今天，研究開發新能源已成為世界各國關注的焦點。風能因其易獲取、分佈地域廣等優勢而備受矚目，並且風力發電作為一種清潔可再生的能源技術脫穎而出。從理論研究的角度，風能在滿足世界能源供應、維護能源安全、保護生態環境、實現可持續發展等方面的重要作用已不言而喻，以經濟理論為支撐對風電產業進行分析評價有助於這一朝陽產業健康迅速的發展。

中國石油集團海洋工程有限公司承攬了一系列離岸風電項目，一個離岸風電專案一般包括幾十座 3-4MW 的風電機組和一座海上變電站，一般距離海岸在十幾公里左右的海域，離風電專案比陸上風電項目的風場強度更大，所以對結構的建造要求很高，建造要求不亞于海洋工程。中石油海洋工程公司承攬的是海上風電變電站的建造項目，海上變電站包括一座導管架(Jacket)和一座上部組塊，整個結構的重量在 3500-4500 噸左右。離岸風電專案的結構採用船用鋼板 GB712-2011 DH36.EH36、EN10025 S355ML 或 EN10210S355NLH 管，建造過程中主要包括導管架管的製造銲接和導管架及上部組塊的建造銲接，以往單面焊的打底銲採用實心銲線或銲條，實心銲線主要用於製管過程中的打底銲，銲條用於現場管對接的打底銲接，採用實心銲線的打底對實心銲線的化學成分要求高，碳鋼實心銲線的低溫衝擊性能較差，而銲條打底的銲接效率低，為了進一步提高離岸風電項目，提高銲接效率和銲道的品質，採用一種新型的金屬粉芯銲線來替代以往的實心銲線進行單面銲雙面成型的打底銲材，提高單面銲道的性能。

二、金屬粉芯銲線

2.1 概述

包藥銲線的研製始於 20 世紀 60 年代中期，以前困擾包藥銲線製造商的三大問題，氣孔(凹坑)、裂紋和送線性都得到明顯改善。而自保護包藥銲線已成功應用於西氣東輸二線的 X80 鋼管道銲接，達到世界先進水準。而金屬粉芯銲線的品質提升和推廣應用，是包藥銲線的一個重要發展方向[1]。金屬粉芯銲線與傳統金紅石型或中性及鹼性熔渣型包

藥銲線，具有熔填速度快、銲渣少、銲接煙塵少、擴散氫含量低、銲道成形好、熔敷金屬化學成分和力學性能容易調整等一系列優點[2]。日本開發的各類金屬粉芯銲線，偏重於提高熔填速度和效率，大都只能進行平銲和平角銲，少數品種可用於橫銲，但基本不能適用於全位置銲接。美國的金屬粉芯銲線注重提高銲道內在品質的同時，還注重改善銲接操作性能，提高熔填效率，一些品種可適用於全位置銲接[3]。

銲接接頭低溫衝擊韌性是離岸風電項目的最重要的力學指標，這個指標如果達不到，風電結構可能會在低溫下發生脆斷，因此在打底線的研發中低溫衝擊韌性是一個重要指標。以往實心焊絲打底用的是 A5.18 ER70S-6 或 ER70S-G 的焊絲，低溫衝擊性能無法滿足 -40℃ 時衝擊功 34J 的要求，手工打底銲採用的是日本神鋼的 LB-52U 銲條打底，銲條的低溫衝擊功滿足 -40℃ 時衝擊功 34J 的要求，但銲條價格高，採購週期長，銲接效率低，因此開發一款全位置金屬粉芯銲線，滿足 -40℃ 時衝擊功 34J 的要求，保證離岸風電專案的銲接品質。

2.2 合金成份及力學性能設計

現代 X70 鋼尤其是 X80 鋼採用了 TMCP 技術，強度及韌性均較高，AKV(-20℃)達到 200J 以上。分析管線鋼材的成份、組織、性能的基礎上，結合管線施工過程中的銲接程序和銲道組織、性能特點[4]，利用合金元素的強強化機構，研究設計管線用金屬粉芯銲線的化學成分，銲線成份設計依低碳、微合金化的手段來達到以針狀肥粒鐵為主的銲道組織，以確保熔敷金屬獲得優良的強韌性。合金元素對低溫衝擊韌性的影響較為明顯。根據合金元素強強化機理以及在熔敷金屬中的作用，從熔敷金屬強度、韌性、與管線鋼匹配性以及成本等多方面綜合考慮，選擇 C、Si、Mn 作為銲線成份的基本強化元素，加入 Ti 與 B 等微合金元素提高針狀肥粒鐵比例，來確保熔敷金屬的強韌性。綜上所述，設計出管線鋼金屬粉芯銲線的基礎成份，根據試驗結果，確定了管線鋼採用 Ti-B 合金系和主要合金元素的含量範圍。

將所研製的金屬粉芯銲線(KMX-70M)進行熔

數金屬化學成份分析，如表 1 所示。E70C-6M 為美國 AWS A5.18 所規定的成份，KMX-70M 符合其規定標準。在此成分範圍內，為能達到最佳力學性能，其熔敷金屬成份需要控制在 C:0.03~0.06，Mn:1.3~1.5，Si: 0.35~0.45，Ti:0.03~0.06，B:0.02~0.04。

表 2 為 KMX-70M 的熔敷金屬力學性能，其可滿足美國 AWS A5.18 所規定之力學性能。由於低碳與微合金化設計理念使得熔敷金屬具有針狀肥粒組織，可達到最佳的低溫衝擊性能，在-40°C 的低溫環境下，仍可具有高衝擊功。

2.3 研製過程中的難點

2.3.1 抗氣孔性能

解決此問題的關鍵技術是降低金屬粉芯銲線水份與銲線表面油脂含量。針對於水份方面，在製作銲線前，預先對藥粉分類進行不同溫度的烘焙，以去除藥粉結晶水和吸附水，降低藥粉中的水含量。

在銲線表面油脂含量控制，則使用特殊潤滑粉與表面處理避免銲線表面油脂殘留，並利用特殊表面處理加強銲線耐銹性，避免了防銹油的使用。

2.3.2 低溫韌性控制

金屬粉芯銲線在研製中最大的關鍵技術是合金化和微合金化的均勻穩定。

(1)合金成份的選擇：選擇合理的合金配製採用 Ti-B、同時在藥芯粉料中適當調適 Mn 與 Si 元素之比例，使熔敷金屬達到提高強度與提高低溫衝擊韌性的目的。

(2)原材料的選擇：選擇成份穩定、純度高的原材料，優先選擇純金屬粉，如金屬錳等，所有粉料嚴格限制細微性範圍。

(3)所有原材料與鋼帶中的硫、磷等雜質需嚴格控制。

2.3.3 低煙塵、低飛濺的控制

配方中加入 K、Na 等易電離的物質，保證電弧穩定性。另外，加入低熔點的 Mg 可使熔滴細小、過渡均勻、低飛濺。適當調整配方中 Na 與 K 含量的比例來改善因穿透力強造成飛濺易產生的現象，根據經驗法則，Na 比例越多熔滴過渡快，電弧穿透力強，K 比例越多熔滴過渡慢，電弧穿透力弱。

2.3.4 電弧穿透性的控制

金屬粉芯銲線在打底銲接過程中實現單面銲雙面成型，主要是靠電弧的穿透力和溶池的表面張力。電弧穿透力強，才能保證熔透根部從而避免缺陷的產生，在全位置立向下銲時，尤其是仰銲的位置，減少根部塌陷，形成高品質的銲道接頭。金屬粉芯銲線是由薄鋼帶包裹粉劑組成，電流主要從鋼帶通過，其電流密度大，形成電磁收縮力，電流密

度的大小決定了電弧穿透力。選擇合適的鋼帶及鋼帶與藥粉比重可以提高電弧穿透力，填充率 12-17 %時電弧穿透力最大，滿足打底銲接的要求。銲接熔池冶金反應過程中表面活性元素可以顯著降低液態金屬的表面張力，影響銲接過程中熔滴的過渡形式，改變熔池鐵水的流動性，最終形成不同幾何形狀的銲道。

適當調整填充比，確保銲線截面電流密度，保證電弧吹力穿透力，使單面銲雙面成型的銲道形狀美觀。

2.3.5 全位置銲接操作性

矽鐵的不同添加量直接決定了液態熔滴中 Si 表面活性元素的含量，可起到降低液態金屬表面張力的作用，通過大量銲接測試對比試驗，當矽鐵含量為適當時，熔池鐵水流動性最佳，與母材具有良好的潤濕性。

三、金屬粉芯銲線銲接程序評定試驗

3.1 銲接方法設計

金屬粉芯銲線主要用於單面銲雙面成型的打底銲接，銲接位置可以實現全位置銲接。離岸風電專案主要為大型結構件的建造銲接，分為捲管的銲接和現場安裝銲接。在管徑小於 600 毫米和壁厚小於 20 毫米時銲接接頭為單面 V 型坡口，安裝銲接時有大量的單面 V 型坡口的全位置銲接，因此銲接程序評定設計 2 種銲接程序，一種用於單面潛弧銲的打底銲接，打底銲接採用金屬粉芯銲線銲接和熱銲採用包藥銲線，後續採用潛弧銲 (SAW) 進行填充和蓋面的銲接；另一種為全位置氣體保護包藥銲線的打底銲接，打底銲接採用金屬粉芯銲線銲接，採用氣體保護包藥銲線進行填充和蓋面。

銲接設備的選擇：金屬粉芯銲線與實心銲線打底銲接採用林肯公司的 STT 銲接模式進行銲接，FCAW 和 SAW 的銲接分別採用 CO2 銲機和潛弧銲機進行銲接。

3.2 銲接程序評定母材

離岸風電專案與海洋工程類似，主體材料為降伏強度為 355MPa 的材料，設計的銲接標準 AWS D1.1。進行銲接程序評定時選擇板材為 EN10025 S355ML，管材為 EN10210S355NLH。試驗用母材的化學成份見表 3，機械性能見表 4。

3.3 銲接程序參數

根據海上風電專案的設計溫度 -40 °C 的要求，使用碳鋼的包藥銲線、潛弧銲線和銲藥即可滿足要求。GMAW+FCAW+SAW 評定採用廣泰的金屬粉芯銲線 KMX-70M(A5.18 E70C-6M)、包藥銲線 KFX -719J (A5.20 E71T-9CJ) 和潛弧銲線 KW-1、銲藥為 KF-880(A5.17 F7A4-EH14)。GMAW + FCAW 評定採用廣泰的金屬粉芯銲線 KMX-70M (A5.18 E70C-6M) 包藥銲線 KFX-719J (A5.20

E71T-9CJ)，兩種程序均滿足-40℃低溫衝擊值不小於27J的要求。銲接程序評定要求見表5、6。

3.4 銲道機械性能試驗及結果分析

實際金屬粉芯銲線 KMX-70M 在管件中打底銲接狀況如圖1所示，KMX-70M 搭配 STT 模式銲接可達到全位置銲接。銲接程序評定的銲後機械性能試驗結果，如表7所示。

3.4.1 銲接接頭外觀

金屬粉芯銲線銲接的打底接頭背部成型完美，開槽兩邊熔合很好，經 X 射線探傷和磁粉探傷，未發現根部未熔合和表面缺陷，如圖2所示。

3.4.2 機械性能試驗結果

銲接程序評定的拉伸、彎曲和衝擊韌性均滿足專案的要求，低溫衝擊韌性的衝擊功可以滿足-40℃的低溫衝擊要求。

3.4.3 金相組織

由國際銲接協會(International Institute of Welding)提出使用光學顯微鏡將肥粒鐵在銲道金屬顯微組織組成份類指標[5]，可分為晶界型肥粒鐵、含二次相肥粒鐵及針狀肥粒鐵。從圖3(a)可看出金屬粉芯焊絲的組織由大部份的針狀肥粒鐵與晶界型肥粒鐵組織。圖3(b)為實心銲線銲道中的金相組織，大部份由晶界型肥粒鐵與含二次相肥粒鐵組成。H. K. D. H. Bhadeshia [6] 提出可在銲道金屬中添加合金元素來改變肥粒鐵的形態。Dolby [7]、Glover [8]、Onsoien[9]與 C.M. Chang[10]研究指出，細小的針狀肥粒鐵可提高低溫衝擊韌性。與實心銲線的銲道組織相比，金屬粉芯銲線的銲道組織較細小，而具有較多針狀肥粒鐵可提高銲道拉伸強度與低溫衝擊韌性。

3.5 金屬粉芯銲線銲接優勢分析

銲接接頭的外觀成型優良，特別是有良好的單面銲雙面成型效果。針對金屬粉芯銲線銲接優勢分析如下：

(1) 銲接效率

由於金屬粉芯銲線是由鋼帶包裹金屬粉後拉

伸形成的銲線，其電流密度大，熔化速度快。同時金屬粉芯銲線的藥粉有大量的鐵粉、鐵合金和金屬粉，非金屬礦物質含量較少，而熔化鐵粉、鐵合金和金屬粉的能量較實心銲線低，因此比實心銲線所需的銲接電流小。與實心銲線 STT 打底銲接電流比較，金屬粉芯銲線的銲接電流為：基值 51A，峰值 317A，實心銲線的銲接電流為：基值 60-65A，峰值 380-390A。金屬粉芯銲線在大電流、大電壓的情況下，其銲接時產生的煙塵、飛濺不大，而實心線銲若採用大的銲接參數時，其銲道的成型將急劇惡化，飛濺和煙塵量將大幅提高，從全位置銲接的圖片(圖1)可發現金屬粉芯銲線的銲接飛濺很小。

(2) 銲道成型

由於金屬粉芯銲線較實心銲線有良好的電弧特性及低煙塵和小的飛濺，在整個銲接過程中就可以避免出現夾渣等銲接缺陷，減少銲後銲道的清理。而且銲接操作可見度高，易於操作者更好控制熔池形狀，獲得更好的銲接效果。同時還可避免出現實心銲線銲接時的指狀熔深，如圖4所示。

(3) 銲道性能與材料成本

金屬粉芯銲線的銲道具有優秀的低溫韌性，可以通過改變金屬粉芯銲線的合金含量來提高銲道的低溫衝擊韌性，而實心銲線的性能是相對固定的，只有通過鋼廠在生產實心銲線的原料時改變銲線的成份，生產成本高。因此，金屬粉芯銲線具有成份可彈性調整、自由度高與開發成本較低的優勢。

四、結論

(1) 金屬粉芯線銲在打底銲時具有銲接入熱量低，銲接飛濺小，特別在高強鋼的銲接中具有銲接優勢。

(2) 金屬粉芯銲道的背部成型優良，可以推廣應用於管道的打底銲接，有利於減小管道的內部流體阻力，提高流體的流速。

(3) 金屬粉芯銲的銲接接頭較實心威線更容易滿足銲道的低溫衝擊韌性，通過改變金屬粉芯銲線的配方，可以滿足更低的低溫衝擊要求。

五、參考文獻

- [1] 喻萍、尹士科，「國外金屬粉型藥芯焊絲簡介」，焊接標準，第2期，第31-35頁，2010。
- [2] 李建海、陳邦固，「新型金屬芯藥芯焊絲的開發和應用」，焊接技術，第30卷，第3期，第47-50頁，2001。
- [3] 李連勝、樂敬岳、孫曉紅、方乃文，「我國焊接材料發展狀況淺析(下)」，電器工業，第2期，第10-21頁，2010。
- [4] 周瑰雲，「太鋼 X70 高級別管線鋼的開發」，鑄造設備及工藝，第6期，第22-24頁，2009。

- [5] IIW, "Guidelines for the classification of ferrite steel weld metal microstructural constituents using the light microscope," Welding in the World, Vol. 24, pp. 144-148, 1986.
- [6] H.K.D.H. Bhadeshia, L.E. Svensson, "Mathematical modelling of weld phenomena," Institute of Materials, London, UK, 1993.
- [7] R.E. Dolby, Research Report No. 14/1976/M, Welding Institute, Cambridge, UK, 1976.
- [8] A.G. Glover, J.T. McGrath, N.F. Eaton, "Toughness characterization and specifications for HSLA and structural steels," Metallurgical

- Society of AIME, New York, US, 1979.
- [9] C.B. Dallam, S. Liu, D.L. Olson, "Flux composition dependence of microstructure and toughness of submerged arc HSLA weldments," Welding Journal, Vol. 64, pp. 140s-151s, 1985.

- [10] C.M. Chang, S.H. Wu, C. Fan, C.M. Fan, W. Wu, "Effect of carbonate in electrode coating on the microstructure and mechanical properties of weld," Materials Chemistry and Physics, Vol. 112, pp. 783-788, 2008.

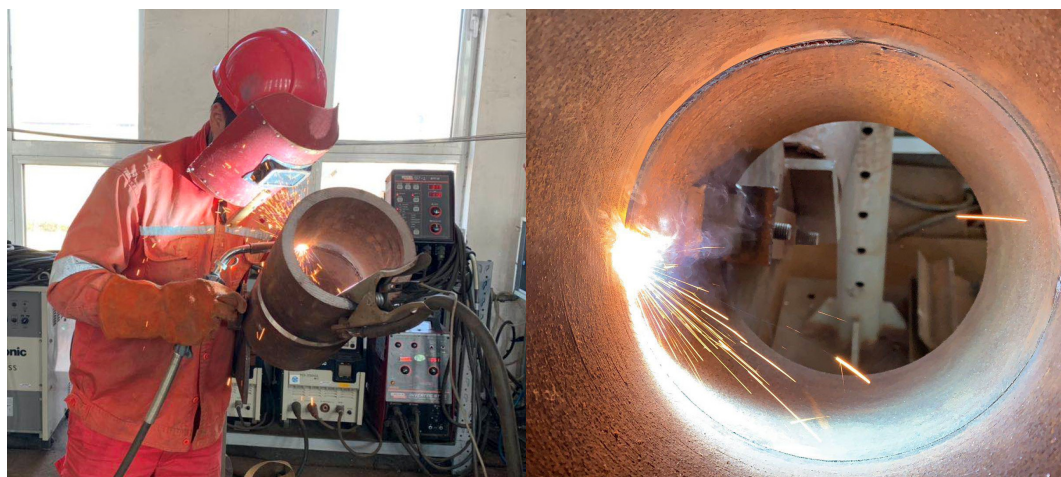


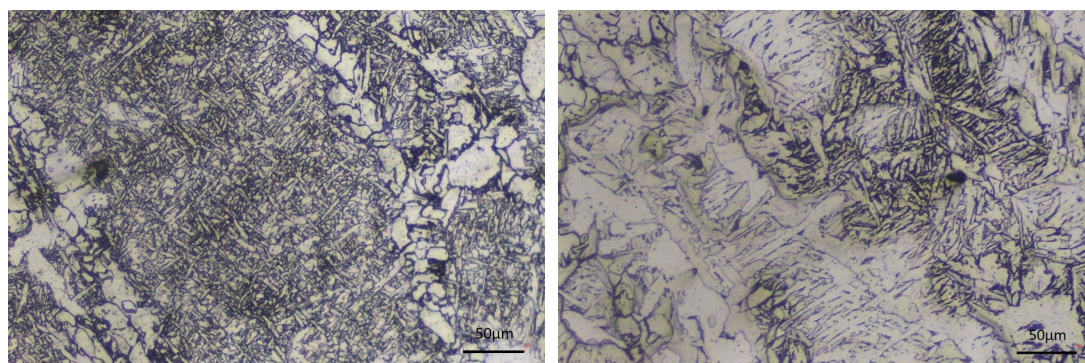
圖 1 金屬粉芯銲線 STT 全位置銲接



(a) 打底銲道背部

(b) 開槽內銲道成型

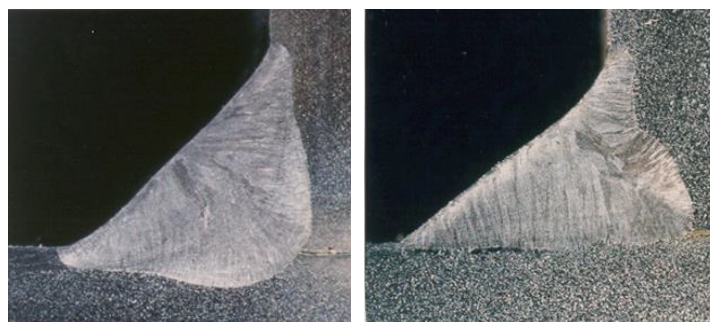
圖 2 金屬粉芯銲線背部/開槽內銲道成型



(a) 金屬粉芯銲線

(b) 實心銲線

圖 3 金屬粉芯銲線與實心銲線的銲道金相組織



(a) 金屬粉芯銲線 (b) 實心銲線

圖 4 金屬粉芯銲線與實心銲線的銲道熔深狀況

表 1、KMx-70M 的熔敷金屬化學成份 (%)

	C	Mn	Si	S	P	Ti	B
E70C-6M	≤0.12	≤1.75	≤0.90	≤0.030	≤0.030	-	-
KMX-70M	0.04	1.4	0.41	0.008	0.011	0.04	0.03

表 2、KMx-70M 的熔敷金屬力學性能

	抗拉強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	延伸率 (%)	衝擊功(-30°C) (J)	衝擊功(-40°C) (J)
E70C-6M	≥480	≥400	≥22	≥27	-
KMX-70M	595	548	28	91/87/80	69/71/75

表 3 試驗母材化學成份(%)

鋼種	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al	Cb	N	C _E
S355ML	0.09	1.5	0.014	0.018	0.25	0.01	0.01	0.02	0.005	0.004	0.036	0.033	0.037	0.36
S355 NLH	0.16	1.28	0.008	0.01	0.38	0.04	0.05	0.10	0.01	0.002	0.025	0.04	0.05	0.41

表 4 試母材的力學性能

鋼種	降伏強度 (MPa)	抗拉強度 (MPa)	延伸率 (%)	衝擊功 J (-50°C)
S355ML	463	567	24.5	75/93/96
S355NLH	458	583	26	196/167/188

表 5 銲接程序評定設計

試件厚度/mm	開槽型式	銲接方法	銲接材料	保護氣體	熱處理
12	V 型	GMAW/FCAW/SAW	E70C-6M/E71T-9CJ/EH14	100%CO ₂	銲態
19.1	V 型	GMAW/FCAW	E70C-6M/E71T-9CJ	100%CO ₂	銲態

表 6 銲接程序參數

銲道	銲接方法	銲接材料	線徑/mm	極性	電流/A	電壓/V	速度/(mm/min)	氣體流量/(L·min ⁻¹)
打底	GMAW	E70C-6M	1.2	DCEP	51/317	19~20	100	22~25
熱銲	FCAW	E71T-9CJ	1.2	DCEP	160~180	22~23	148	20~25
填充、蓋面	SAW	EH14	4.0	DCEP	410~500	28~33	340~400	-
打底	GMAW	E70C-6M	1.2	DCEP	51/317	19~20	106	22~25
熱銲	FCAW	E71T-9CJ	1.2	DCEP	172	20	126	22~25
填充、蓋面	FCAW	E71T-9J	1.2	DCEP	190~210	22~24	100~220	22~25

STT 電流：STT 銲接為脈衝模式，基值電流：51A，峰值電流：317A