

316L 型鐳線之矽含量對低入熱量 GTAW 填料鐳接的影響

*范志銘¹ 張家銘²

¹廣泰金屬工業股份有限公司 ²中興大學材料工程學系

本研究使用三組不同矽含量之 316L 型 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) 鐳線中採用氣體遮護鎢極電弧鐳(GTAW) 以平鐳方式、低入熱量之鐳接條件施鐳於 316 型沃斯田鐵不銹鋼母材上，再進行肥粒鐵含量、鐳道成型性與鐳接操作性的分析。實驗結果顯示，0.38 wt% 矽鐳線之鐳道低接觸角最低，潤溼性最佳。矽含量微量增加時，鐳道金屬之接觸角明顯增高，潤溼性變差。當鐳線矽含量增加時，鐳道金屬之肥粒鐵含量會微量增加，但變化不大。而三種鐳線的肥粒鐵含量都相當高，可有效降低鐳道龜裂的機率。三組不同矽含量的 GTAW 鐳線施鐳於 2mm 薄板上，發現 0.38 wt% 矽鐳線在低入熱量鐳接下都有良好的鐳道成型性與鐳接操作性，且無鐳道龜裂，適合作為低入熱量 GTAW 鐳接專用之填料鐳線。

關鍵詞：316L 型不銹鋼鐳線、鐳道成型性、潤溼性、肥粒鐵含量、鐳接操作性

一、前言

316 型不銹鋼是一種沃斯田鐵的鉻-鎳-鉬不銹鋼，加工硬化性好，無磁性。相對於 304 型不銹鋼而言，316 型不銹鋼中含有 Mo 元素約 2~3% 及較高含量的鎳，故能大幅的提升其耐蝕性和高溫強度，而 316L 的含碳量比 316 低，因此，抗晶間腐蝕性能會比 316 更為優良，可在較為嚴苛條件的環境下使用[1-5]，例如應用於海水中設備、沿海設施、化學、染料、造紙、草酸、肥料生產設備、食品工業、染整工業管路、法蘭及槽體等。

一般在鐳接組裝 316 型不銹鋼的薄板及薄管工件時，會採用低入熱量的施工方法，以防止鐳接工件的過度變形與燒穿缺陷。近年來也有許多雷射鐳接的研究指出，雷射鐳接可以提供低入熱量的無填料鐳接，且可大幅的降低鐳接變形。然而，無填料鐳接卻只適用於小尺寸與高精度之工件，針對較大尺寸之薄板及薄管工件時或接合面之精度不佳的工件，仍需要在鐳接過程中加入適量的填料來補充並獲得符合要求的鐳道尺寸。此外，由於昂貴的雷射設備與維護費用，致使大部分的廠商仍繼續採用傳統的 GTAW (TIG) 鐳接設備等來進行低入熱量的填料鐳接作業。

一般而言，低入熱量鐳接會採用較小的電壓

與電流，以減少鐳接工件的變形以及避免燒穿的鐳接缺陷，然而，進行低入熱量鐳接時常常發生鐳道成型性差與鐳接操作性差的現象。在 AWS A5.9 規範[6]中建議選用矽含量較高的鐳材來改善鐳道金屬的洗淨和溼潤行為。

在鐳接實務上，也常採用 ER316LSi 等低碳高矽裸鐳線來做填料鐳接，然而配合低入熱量鐳接時卻仍出現鐳道成型性差與鐳接操作性差的現象。文獻中也很少有提到鐳材矽含量對低入熱量 GTAW 鐳接之鐳道成型性與鐳接操作性的關係。因此，為了改善低入熱量 GTAW 鐳接之鐳道成型性與鐳接操作性，本研究採用不同矽含量的 316L 型沃斯田鐵不銹鋼鐳線來進行測試，並分析不同矽含量對於肥粒鐵含量、鐳道成型性與鐳接操作性的影響。

二、原理

2.1 矽對鋼材的影響

在煉鋼作業中，矽元素為廣泛被使用的良好脫氧劑。一般而言，矽可增加鋼材的強度、硬度及彈性限(Elastic limit)。當矽含量超過 0.50% 時，對硬度的影響更是顯著，依實際煉鋼場的經驗值，每 0.01% 矽含量的增加約可提高抗拉強度 250psi 左右。由於矽在形成夾雜物(Inclusion)時，將不利於鐳接及切削加工性(Machinability)，故一

一般鋼材中矽含量不超過 0.60%，全靜鋼中以 0.15%~0.30%矽含量為最常見。另外，在含碳量較低的鋼種，矽尤不利於表面品質，且因矽可促進加工硬化速率(Rate of work hardening)。對低碳鋼而言，不利於加工性及冷打性質。另外，矽可降低鋼材的磁滯損失，為矽鋼片主要之合金元素[7]。

對鐸接線而言，氣體遮護鎢極電弧鐸鐸線的最大特點是矽與錳含量較高，因為矽、錳是強烈的脫氧劑，其含量低時，則脫氧能力差，熔池易飛濺，易產生氣孔。但是矽含量也不宜太高，太高會降低韌性和增加肥粒鐵含量[8,9]。

矽對低熔點相的形成，特別是對鐸道金屬中的熱裂紋也有重要影響。在 Si-Fe、Si-Ni 和 Si-Cr 二元合金系統中，所形成共晶的熔點要遠遠低於單個元素的熔點。在 Ni-Si 系統中，矽含量為 11.5%時，共晶點為 1152°C，矽含量為 29%時，共晶點為 960°C，因此可知矽會促進低熔點相的形成。Dahl、Duren 和 Musch[10]發現矽集中在那此被認為是熱裂紋起源的晶界處，這是形成矽、鎳和鈮含量高的液相的緣故。由於偏析現象，Ogawa 和 Tsunetomi[11]假定 NiSi (996°C)、NiSi-Ni₃Si₂ (964°C)和 Ni-NiSi (1152°C)這三種低熔點相金要在一次析出的沃斯田鐵晶粒晶界處析出，在鐸道金屬中，一次凝固形成 δ 肥粒鐵相時，矽的有害作用比一次凝固成 γ 相時更大。

2.2 鐸道成型性與鐸接操作性

B. J. Bradstreet[12]研究 GMAW 的表面張力與金屬流動對於鐸道形狀的影響，提出熔融鐸道金屬的溼潤性是跟其表面張力有關，而表面張力是對鐸道的形狀有著極大影響，而純液態金屬有最高的表面能比其他液體。熔融鐸道金屬存在著三種界面力平衡，力平衡的公式為：

$$\gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta = \gamma_S \quad (1)$$

式中 γ_{SL} 為固液界面張力， γ_L 為熔融金屬表面張力， γ_S 為固態金屬表面張力， θ 為接觸角。

當接觸角低時，即熔融金屬的潤溼性佳，而其 γ_{SL} 和 γ_L 會較低，而 γ_S 會較高。鐸道之潤溼

性對於鐸蝕(Undercutting)與鐸瘤(Humping)等缺陷的產生有很大的關聯，當潤溼性好時，鐸蝕與鐸瘤產生的機率就會減少。反之，當潤溼性差時，鐸蝕與鐸瘤產生的機率就會增加。

一般而言，GTAW 鐸接製程也分為人工鐸接法與自動鐸接法兩種，幾乎絕大部分的 GTAW 鐸接工程仍為人工鐸接法，以人手持鐸槍來熔融接合工件或另外插入適當之填料，以電弧熱來融化填料再過渡熔滴到工件之上。此外 GTAW 鐸接施工者也會移動鐸槍來控制熔融金屬的流動，以獲得適當的鐸道。

根據實務的經驗顯示，填料的良窳與鐸道成型性及鐸接操作性息息相關，使用到較差的鐸材往往表現較差的鐸道成型性與鐸接操作性，甚至產生龜裂等缺陷，而選用良好的填料鐸材可有效提高 GTAW 鐸接產能。

三、實驗方法

3.1 實驗材料及鐸接參數

本實驗使用 3 種不同矽含量的 316L 型 GTAW 鐸線以氣體遮護鎢極鐸方式，極性採用 DCEN，電弧較穩定。鐸線直徑 3.2、2.4 及 1.6mm，鐸接電流為 100 A，鐸接電壓為 15V，氣體流量 10 LPM，鐸接速率為 4 cm/min，鐸接於 316 型板材，其化學成份如表 1 所示。

表 1 母材成份(%)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.08	1.00	0.045	0.03	0.6	11.54	17.32	2.30

3.2 鐸線成份分析

將本實驗所採用之 3 組不同矽含量的 316L 型 GTAW 鐸線，切削製作成細粉狀，再以 X 光螢光分析儀分析其成份。

3.3 鐸道潤溼性量測

將 3 組不同矽含量的 316L 型 GTAW 鐸線在 10mm 厚板上，以低入熱量之鐸接條件進行填料

銲接，銲接後之試片取橫截面，進行研磨拋光腐蝕，再以光學顯微鏡觀察及量測其接觸角，圖 1 為所量測接觸角示意圖。

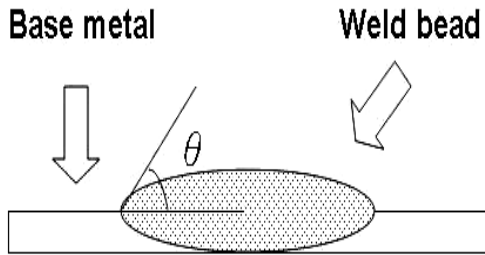


圖 1 接觸角示意圖

3.4 肥粒鐵含量計算

將 3 組不同矽含量的 316L 型 GTAW 銲線進行成份分析後，以所得成份結果與 Schaeffler diagram 與 WRC-1992 diagram[13]比照，再進行肥粒鐵含量計算。鉻當量與鎳當量的計算公式如下：

Schaeffler :

$$Cr_{eq} = \% Cr + \% Mo + 1.5 \times \% Si + 0.5 \times \% Nb$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 30 \times \% C + 0.5 \times \% Mn$$

WRC-1992 :

$$Cr_{eq} = \% Cr + \% Mo + 0.7 \times \% Nb$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 35 \times \% C + 20 \times \% N + 0.25 \times \% Cu$$

2.5 銲接操作性

本研究分別針對 3 組不同矽含量的 316L 型抽製線徑 3.2、2.4 與 1.6 mm 的 GTAW 裸銲線，供專業的銲接代工廠進行 2mm 薄板試銲，以佳、普通與劣三級辨別銲道成型性與銲接操作性，而銲接示意圖如圖 4 所示。廠商評估的標準包括銲道形狀之銲高/銲寬比、表面波紋、銲道邊緣之潤溼角及銲道底部母材之平整度。銲高/銲寬比與潤溼角越小，表面波紋越平滑，銲道底部母材之平整度越平順者，可判定銲道成型性與銲接操作性為佳。

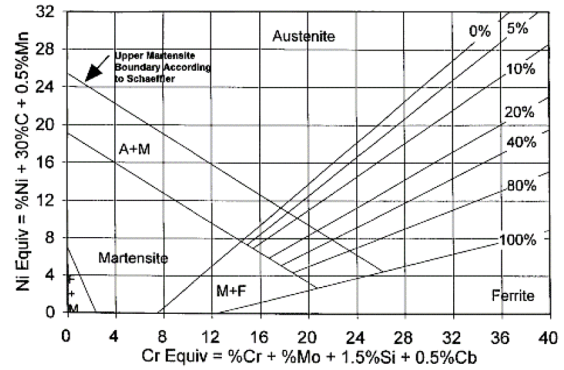


圖 2 Schaeffler diagram

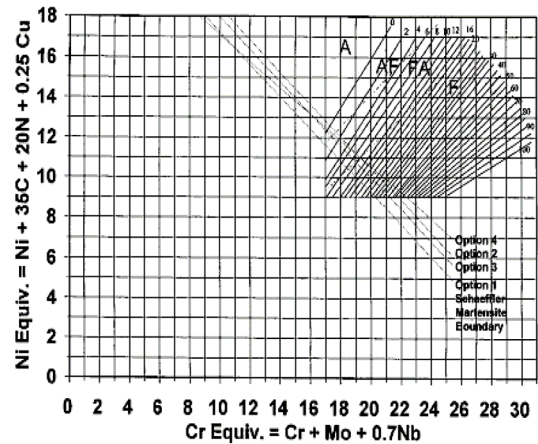


圖 3 WRC-1992 diagram

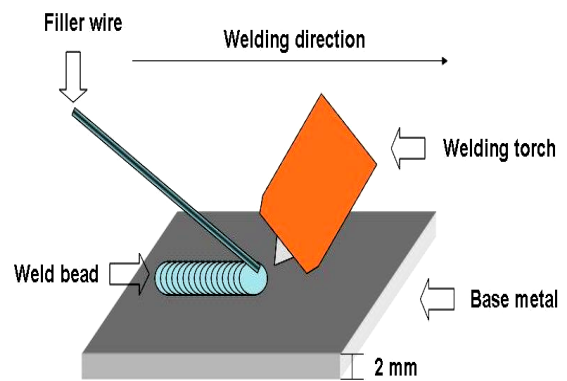


圖 4 銲接示意圖

四、結果與討論

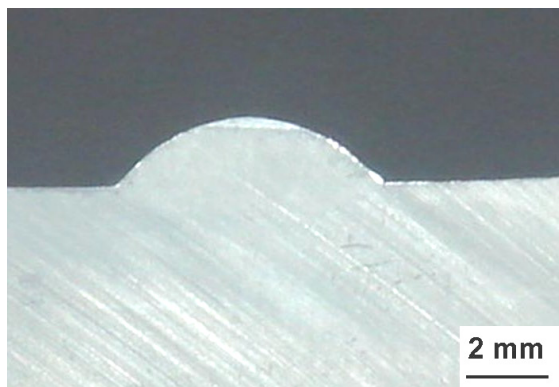
4.1 銲線成份

3 組不同矽含量的 316L 型 GTAW 銲線，316L-LSi、316L-MSi 與 316L-HSi，以 X 光螢光

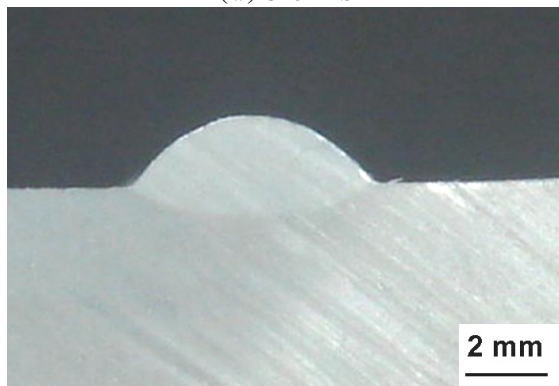
分析儀分析其矽含量。分析結果顯示 316L-LSi 的鐸線矽含量為 0.38 wt%，316L-MSi 鐸線為 0.58 wt%，316L-HSi 鐸線為 0.83 wt%。

4.2 鐸道金屬潤溼性

將 3 組不同矽含量的 316L 型 GTAW 鐸線在 10mm 厚板上填料鐸接後之試片取橫截面，如圖 5 所示。由圖中可發現 316L-LSi 鐸道潤溼性最佳，316-MSi 鐸道潤溼性次之，316L-HSi 鐸道潤溼性最差。



(a) 316L-LSi



(b) 316L-MSi



(c) 316L-HSi

圖 5 不同矽含量 316L 型鐸線之鐸道潤溼性

再對其鐸道橫截面量測其接觸角，其結果如表 2 與圖 6 所示。從表中與圖中可知，當矽含量由 0.38 wt% 增加至 0.83 wt% 時，其接觸角從 42° 增加至 52°。0.38 wt% 矽鐸線之鐸道低接觸角最低，潤溼性最佳。當矽含量微量增加時，鐸道金屬之接觸角亦明顯增高，潤溼性變差。因此，當矽含量增加時，則接觸角會增加，造成潤溼性變差。

表 2 鐸道金屬接觸角

Grade	接觸角(°)
316L-LSi	42
316L-MSi	46
316L-HSi	52

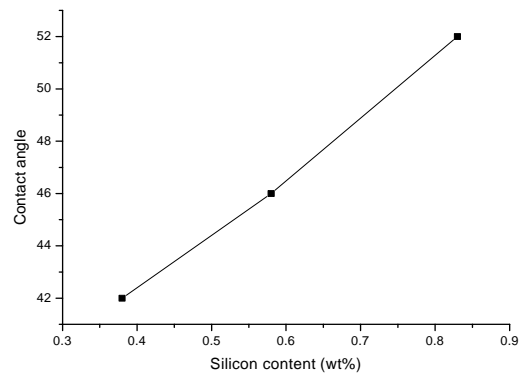


圖 6 不同矽含量 316L 型鐸線之接觸角

4.3 鐸道金屬肥粒鐵含量

以 3 組不同矽含量的 316L 型 GTAW 鐸線進行成份分析後，以所得之成份結果經過計算分別與 Schaeffler diagram 與 WRC-1992 diagram 比照獲得該圖表之肥粒鐵含量，其結果如表 3 所示。由表中可知，當矽含量從 0.38 wt% 增加至 0.83 wt% 時，Schaeffler 所計算之肥粒鐵含量從 8% 增加至 9%，由 WRC-1992 所計算之肥粒鐵含量從 10.5% 增加至 11%。這個原因是因為 Kubaschewski [9] 提出矽嚴重縮小 γ 相區並促進 δ 相肥粒鐵生成，應該當矽含量愈大時，其鐸道金屬中肥粒鐵

含量會增加。此三種鐳線的肥粒鐵含量相當高，都可有效降低鐳道龜裂的機率。

表 3 鐳道金屬肥粒鐵含量

Grade	肥粒鐵(%)	
	Schaeffler	WRC-1992
316L-LSi	8	10.5
316L-MSi	8.5	10.5
316L-HSi	9	11

4.4 鐳接操作性

專業的鐳接代工廠使用本研究不同矽含量與不同線徑的 GTAW 鐳線以低入熱量鐳接方式施鐳於 2mm 之 316 薄板上，所得到之結果為以佳、普通與劣三級辨別鐳道成型性與鐳接操作性。

表 4 顯示三種線徑之 316L-LSi 鐳線施鐳於 2mm 之 316 薄板上時，在低入熱量鐳接下都有良好的鐳道成型性與鐳接操作性。但隨鐳線之矽含量微量增加，鐳接操作性開始變差，也因變差之鐳接操作性導致熔池不易擴展，鐳道變窄，鐳道凹陷與 316 薄板之鐳道背部不規則突起缺陷等，並不適用於低入熱量薄板之填料鐳接。

表 4 鐳道成型性與鐳接操作性

	3.2mm	2.4mm	1.6mm
316L-LSi	佳	佳	佳
316L-MSi	差	差	普通
316L-HSi	差	差	差

五、結 論

本研究使用三組不同矽含量之 316L 型 GTAW 鐳線，採用氣體遮護鎢極電弧鐳以平鐳方式、低入熱量之鐳接條件施鐳於 316 型沃斯田鐵不銹鋼母材上，進行肥粒鐵含量、鐳道成型性與鐳接操作性的分析。由以上之實驗結果可歸納以

下幾點結論：

- 1.0.38 wt% 矽鐳線之鐳道低接觸角最低，潤濕性最佳。矽含量微量增加時，鐳道金屬之接觸角明顯增高，潤溼性變差。
- 2.當鐳線矽含量增加時，鐳道金屬之肥粒鐵含量會微量增加，變化不大。三種鐳線的肥粒鐵含量相當高，可有效降低鐳道龜裂的機率。
- 3.0.38 wt% 矽鐳線在低入熱量鐳接下都有良好的鐳道成型性與鐳接操作性，且無鐳道龜裂，適合作為低入熱量 GTAW 鐳接專用之填料鐳線。

六、參考文獻

- 1.J. M. Vitek and S.K. David, *Weld. J.*, **65**(4), 106s-111s, 1986.
- 2.Z. P. Si and W.Y. Chen, *Petrochemical Corrosion and Protection Quarterly*, **17**(4), 29-33, 2000.
- 3.Y. H Wei, *Gansu Science and Technology*, **22**(3), 46-48, 2006.
- 4.L. Gao, Y. Y. Zhang, Y. H. Zhao, L. W. Zou, and X. F. Ma, *CPVT*, **23**(1), 43-45, 2006.
- 5.M. Wang, G. Michel, and J. F. Jullien, **35**(3), 424-426, 2001.
- 6.AWS A5.9, *American welding society*, 2004.
- 7.T. Takemoto, Y. Murata, and T. Tanata, *ISIJ International*, **30**(8), 608-614, 1990.
- 8.Q. Ding, *CPM*, **28**(9), 20-22, 2000.
- 9.O. Kubaschewski, *Springer-Verlag Stahleisen*, New York, 1982.
- 10.W. Dahl, C. Duren, and H. Musch, *Stahl u. Eisen*, **93**, 813-822, 1973.
- 11.T. Ogawa and E. Tsunetomi, *Weld. J.*, **61**, 82s-93s, 1982.
- 12.B. J. Bradstreet, *Weld. J.*, **47**(7), 314s-322s, 1968.
- 13.D. J. Kotecki, *Weld. J.*, **78**(5), 180s-192s, 1999.