- Austenitic Cr-Ni Steel Assessed by Weld Thermal Cycle Simulator, Feb. 1977, 大阪大学溶接工学研究所研究集資料.
- 9) B.A. Movchan; Grain Boundaries in Cast Metals and Alloys, Tiev., Tekhnika, 1970
- 10) 小林, 藤山, 新谷, 和田: ステンレス鋼の耐孔食性に関する研究,
- 日本ステンレス技報, 12 (1976), 55-79
- 11) A. Garner; The Effect of Autogenous Welding on Chloride Pitting Corrosion in Austenitic Stainless Steels, Corrosion, 35-3 (1979), 108-114
- 12) 日本ステンレス(株)社内報告, May, 1976

7. 高純度フェライト系ステンレス鋼の溶接—溶接性について*

吉村 亮** 広瀬 洋**

Welding of Low-Interstitial Ferritic Stainless Steels-Weldability*

by Ryoichi Yoshimura** and Yoichi Hirose**

7.1 緒 言

高純度フェライト系ステンレス鋼(以下, LIFSS***と略す)は VIM 法, VOD 法あるいは AOD 法などの精錬技術の進歩によって, C 及び N を始めとする不純物元素の低減が容易となり実用化された鋼種である。LIFSS は 16% 以上の Cr を含有し, 特に塩素イオンを含む環境での耐食性向上のため, ほとんどの場合 Mo を 1~2% 含有している。また, 残留している C, N の悪影響をより少なくするため, 微量の Nb や Ti を添加し, C, N をこれらの元素の炭窒化物として安定化した鋼種も多い。国内では 1980 年の JIS 改訂時に, Table 7.1 に示す 5 鋼種が新たに追加規定されている。

LIFSS はフェライト系であるため, オーステナイト系ステンレス鋼の最大の欠点とされている塩素イオンを含む環境での応力腐食割れに対して, 著しく優れた耐食性を有している。耐孔食性及び耐隙間腐食性は鋼種によって異なり, Cr 及び Mo 濃度の増加にともなって向上するが, 例えば 26Cr-1Mo 鋼 (SUSXM 27) では SUS 316 と同等以上に優れている。また, LIFSS は高純度化によって, 従来の代表的なフェライト系ステンレス鋼の SUS 430 と比べて靱性及び溶接性が改善されて

いる。

ところで, 一口に LIFSS と言っても Cr 濃度範囲は 16% から 30% と広く, 鋼種によって特性, 用途は異なり, また溶接方法も必ずしも同じではない。例えば, 18Cr-2Mo 鋼¹⁾ (SUS 444) は温水に対する優れた耐応力腐食割れ性及び耐孔食性から, 最近, 貯湯槽や太陽熱温水器の集熱板に広く利用されている。しかし, 同鋼種の化学プラントでの使用例は余り報告されていない。また, 同鋼種の TIG あるいは MIG 溶接には, 多くの場合溶加棒として Y 316 L などが用いられており²⁾ むしろオーステナイト系ステンレス鋼の溶接条件に近い方法で溶接されている。したがって, 本資料では 18Cr-2Mo 鋼などの Cr 濃度が比較的低い鋼種は対象外とし, LIFSS の中では最も早く開発された化学プラント用材料として主に米国でかなりの実績のある 26Cr-1Mo 鋼 (ASTMXM-27, SUSXM 27) と³⁾ 最近国内で普及し始めている 30Cr-2Mo 鋼⁴⁾ (SUS 447 J1) の比較的高い Cr 濃度の高い 2 鋼種を対象を絞ることにする。

なお, 他の LIFSS も含めて, 実際の溶接に当たっては, 材料メーカーの準備する技術資料も併せ参照願いたい。

7.2 TIG 溶 接

LIFSS の特長は C, N 及び O などの不純物元素を極めて低減することによって発揮されるため, 溶接施工も含めて母材並の高純度を保つ必要がある。そのための溶接方法としては, 共金を溶加棒とした TIG 溶接が最適である。なお, 溶接能率及び経済性を考慮して, 特に

*原稿受付 昭和55年12月29日

** 昭和電工(株)電炉製品事業本部電炉製品開発部 Product Development Department Electrothermal Products Division SHOWA DENKO K.K.

***Low-Interstitial Ferritic Stainless Steel の略。Superferritics あるいは High-Purity Ferritic Stainless Steel とも呼ばれるが侵入型元素の C と N が極めて低いことを最大の特長とするため LIFSS と呼ぶことにする。

Table 7.1 高純度フェライト系ステンレス鋼の化学成分 (JIS)

種類の記号	化 学 成 分 %								そ の 他
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	
SUS 430LX	≤0.030	≤0.75	≤1.00	≤0.040	≤0.030	16.00~19.00	—	—	Ti 又は Nb 0.10~1.00
SUS 436L	≤0.025	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	16.00~19.00	0.75~1.25	≤0.025	Ti, Nb, Zr 又はそれらの 組合せ 8×(C%+N%) ~0.80
SUS 444	≤0.025	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	17.00~20.00	1.75~2.50	≤0.025	Ti, Nb, Zr 又はそれらの 組合せ 8×(C%+N%) ~0.80
SUS 447J1	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	28.50~32.00	1.50~2.50	≤0.015	—
SUS XM27	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	25.00~27.50	0.75~1.50	≤0.015	—

備考 1. SUS 447J1 及び SUS XM27 以外は, Ni 0.60% 以下を含有しても差し支えない。

2. SUS 447J1 及び SUS XM27 は, Ni 0.50% 以下, Cu 0.20% 以下及び Ni+Cu 0.50% 以下を含有しても差し支えない。
また, 必要に応じて表記以外の合金元素を添加することができる。

26Cr-1Mo 鋼では MIG 溶接の採用例も報告されているが^{5,6)} TIG 溶接が溶接条件を考える上での基本になるため TIG 溶接についてより詳しく述べることにする。

7.2.1 溶接機

TIG 溶接は直流正極性とし, アーク発生開始時と終了時の急激な温度変化に起因する溶接欠陥の発生を防止するため, 電流を徐々に増加及び減少させる制御機構を有した溶接機の使用が望ましい⁵⁾。少なくとも, アーク終了時に一定時間, 低電流を流すいわゆるクレータファイラー機構を有した溶接機を使用する必要がある。

7.2.2 鋼板の切断・開先加工

鋼板の切断はシエア切断などの機械的な切断法あるいはプラズマ切断による。ただし, 後者の場合, 切断面から 1.5 mm 以上を切削あるいはグラインダにより除去する。開先加工は原則として機械加工による。

7.2.3 汚染防止

一般に, フェライト系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼に比べて C と N の固溶量は極めて少なく, これらの元素及び Cr の拡散も速いため, Cr 系の炭窒化物が析出し易く*, それにともなって耐食性, 延性, じん性などの諸特性が劣化する。一例として Fig. 7.1 に 30Cr-2Mo 鋼の溶接金属部の靱性に及ぼす C, N の影響を示す。また O の増加は鋼中の介在物の量を増し, 特に延性, じん性などの機械的性質を劣化させる。したがって, LIFSS の特長を十分に発揮させるためには, 汚染にともなう C, N, O の増加を極力防止し, 溶接部も母材並の高純度を保つ必要がある。

ところで, Cr は C, N, O との親和力が大きいので, 高クロム鋼の LIFSS は本質的にこれらの元素によって

*Nb, Ti を添加した鋼では, これらの元素の炭窒化物が Cr 系の炭窒化物に優先して析出する。

Fig. 7.1 溶接金属部のシャルピー衝撃特性に及ぼす C 及び N の影響

汚染され易い傾向にあり, その防止には細心の注意が必要とされる。一例として Fig. 7.2 に 26Cr-1Mo 鋼と 30Cr-2Mo 鋼について, アルゴンガス中に空気を混入したときの空気混入率と溶接金属中の N, O 濃度との関係を示す^{6,7)}。少量の空気の混入でも N, O 濃度はかなり増加することが知られる。なお, LIFSS は他のフェライト鋼と同様, H の吸収によってもぜい化するため, その防止にも十分な注意が必要である。

汚染によるこれらの元素の増加を防止するため, 次の点に留意して溶接を行なう。

- 1) 可能な限り無風状態の清潔な作業環境で溶接する。
- 2) 溶加棒と開先部の清浄を保つ。もし, 油, 水分その他の付着物に汚染された場合は有機溶剤を用いて十分除去する。

Fig. 7.2 Ar ガス中の空気混入率と溶接金属部の N 及び O 濃度との関係

3) シールド用ガスとして高純度乾燥 Ar ガスを用い、トーチシールドの他に必ずバックシールドを実施する。さらにトーチシールドを補うためにアフターシールドの併用が望ましい。

これらのシールド用治具はチタンの TIG 溶接用のものを利用することができる。また、シールドガス流量もチタンの TIG 溶接に準じて、通常のステンレス鋼の溶接の場合よりも多くする。特に、トーチシールドの良 TIG し悪しは溶接金属部の N, O 濃度に大きく影響するため、ノズル内にガス流を層流にするためのスクリーン、いわゆるガスレンズを内蔵した比較的口径の大きなトーチノズルの使用が望ましい⁵⁾。

なお、溶接後の変色層の存在は使用環境によっては著しく耐食性を劣化させるため、酸洗あるいはステンレス製のワイヤブラシを用いて十分に除去する。

7.2.4 熱的要因

7.2.4.1 予熱・溶接後熱処理

LIFSS は融点以下すべての温度領域にわたってフェライト単相であり、マルテンサイト変態は起こり得ず、そのような変態による硬化及びぜい化の抑制を目的として、SUS 430 に適用される予熱は特に必要としない。ただし、寒冷時には約 50℃ を越えない範囲で予熱し、露点に達することによる水分からの水素吸収の防止をはかることができる。

また、生成したマルテンサイトの分解を目的として、SUS 430 に適用されている溶接後の熱処理、すなわち

700℃～800℃×2 hr・空冷

や、応力除去熱処理（特に溶接部だけの部分的な熱処理）すなわち、

600℃～650℃×1 hr 以上・徐冷

は後述するぜい化原因によってかえって LIFSS の特性を劣化させるため採用すべきでない。

7.2.4.2 入熱

フェライト系ステンレス鋼の C, N 固溶量は極めて少ないため、LIFSS 鋼といえどもその C, N 濃度は固容量を上まわっており、溶接時の熱影響によって炭窒化物が析出する。また、特に高クロム鋼ほど、400℃～500℃の温度範囲に加熱されることによりいわゆる“475℃ぜい性”によってぜい化が進む。これらのぜい化現象並びに結晶粒粗大化による特性の劣化を最少限に抑えるため、入熱は溶け込み不良を起こさない範囲で過大にならないよう注意する必要がある。また、多層盛の場合、同様な理由から層間温度は約 100℃ を越えないようにする。

7.2.5 欠陥防止

LIFSS は高純度化によって DBTT（延性ぜい性遷移温度）が低温側に移行しており、じん性はかなり改善されている。しかしながら、本質的に延性ぜい性遷移現象が消失している訳ではなく、特に板厚の厚いものでは DBTT は高温側に移行する⁴⁾。また切欠きの存在や溶接による残留応力も割れ感受性を高める。したがって、溶け込み不良、アンダーカット、ピンホール及び微細割れなどの欠陥の存在はオーステナイト系ステンレス鋼の場合におけるよりも有害であり、溶接に際しこれらの欠陥が生じないように十分な配慮が必要である。

特に、仮付け溶接部に割れを生じ易いため、十分に注意して溶接する必要がある。本溶接と同様に必ずバックシールドを実施する。また、スペーサ、固定具などを用いて、適正なルート間隔を維持し、段違いが生じないようにするとともに、強度をもたせて割れの発生を防止するため、ビードの長さ及びのど厚が過少とならないようにする⁵⁾。

さらに、アークの始点と終点は一般に割れやピンホールなどの欠陥が生じ易いため、

1) エンドタブを取り付けアークの終点をタブ上に置く。

2) 特に仮付け溶接および初層溶接の場合、アークの終始点をルート部からはずし、開先の傾斜面に位置するよう工夫する⁵⁾。

3) アークの終点はクレータフィラを十分に効かす。などの方法により、欠陥の発生防止に努める。

また、溶接終了後はすべての溶接ビードについて目視検査と染色浸透液検査を行ない、さらに必要に応じて X 線、水圧、気密試験を行ない、溶接部の健全性を確認する。

7.2.6 溶接条件

電流、速度、シールドガス流量などの溶接条件は作業者の経験、習慣、シールド治具の種類性能によって異なるため、一概に決めることはできないが、参考のため、

Table 7.2 溶接条件の代表例

鋼板厚さ		2 mm	4 mm	6 mm
溶接条件				
溶 加 棒 直 径		2.0φ	2.0φ, 2.4φ	2.0φ, 2.4φ
タングステン電極		2%ThO ₂ 入り, 1.6φ	2%ThO ₂ 入り, 2.4φ	2%ThO ₂ 入り, 2.4φ
電 流		70~100A	100~140A	140~180A
溶 接 速 度		100~150 mm/min	100~150 mm/min	100~150 mm/min
シールドガス流量	トーチバック	8~16l/min	10~20l/min	10~20l/min
	アフター	約 10l/min 20~30l/min	約 10l/min 20~30l/min	約 10l/min 20~40l/min
トーチノズル径		16φ	19φ	19φ
開 先 形 状		I 開先	60°V 開先	60°V 開先, 60°X 開先
層 数		1 層	2 層	3~4 層

Table 7.3 48% MgCl₂ 沸騰溶液中における応力腐食割れ試験の結果 (試験片: U曲げ)

材 料	破断までの時間
26Cr-1Mo 鋼・母材	1200hr—破断せず試験中断
26Cr-1Mo 鋼・溶接継手	200hr—破断せず試験中断
Type 304・母材	2hr—破断
Type 316・母材	4hr—破断

Table 7.2 に突合せ溶接の場合について代表例を示す。

7.2.7 溶接継手の耐食性

以上述べてきたような方法にしたがって溶接することにより、母材とそん色のない耐食性を有した溶接継手を得ることができる。例えば、Table 7.3 に示すように 26Cr-1Mo 鋼の溶接継手の耐応力腐食割れ性はオーステナイト系ステンレス鋼に比べて著しく優れている⁶⁾。

7.3 MIG 溶 接

MIG 溶接の場合、アークの安定のために、0.5~2% の O₂ を混入したアルゴンガスを用いる必要がある。そのため、溶接金属中の O 濃度は TIG 溶接の場合よりも増加する。例えば、26Cr-1Mo 鋼では TIG 溶接の溶接金属部の O 濃度が 80~100 ppm であるのに対し、MIG 溶接の溶接金属部の O 濃度は 500~800 ppm とかなり増し、それにとまって DBTT も TIG 溶接の場合に比べて約 100°F (56℃) 高くなる⁵⁾。MIG 溶接の採用に当ってはその点に留意する必要がある。その他、汚染防止のための注意事項などは TIG 溶接に準じ実施することができる。

7.4 あ と が き

LIFSS は従来のオーステナイト系ステンレス鋼の最大の欠点とされている応力腐食割れに対して著しく優れた耐食性を有すると同時に、耐孔食性も優れている。また、特に26%以上の Cr を含有する LIFSS では、Fig. 7.3, Fig. 7.4 に示すように、その優れた耐食性から、

Fig. 7.3 カ性ソーダ製造プラント濃縮工程用の 30Cr-2Mo 鋼製熱交換器。同鋼種のカ性ソーダに対する優れた耐食性と耐エロージョン性から従来材の純ニッケルに替って採用される。

Fig. 7.4 30Cr-2Mo 鋼製の酢酸製造プラント用精留塔。同鋼種の有機酸に対する優れた耐食性から従来材のチタン及び SUS316L に替って採用される。

従来材の純ニッケルやチタンに置き替わって採用される場合さえある。このような優れた特長を生かして、今後、化学プラント用材料として LIFSS を普及させるためには、鋼板、鋼管などの製品形状の拡大とともに、

ユーザー、エンジニアリング会社ファブリケーター及び材料メーカーの四者が協力して、用途の拡大及び経済的な溶接方法の確立など、利用技術面で一層の進展をはかる必要がある。

参考文献

- 1) B. Steigerwald: 18Cr-2Mo Ferritic Stainless Steel, Climax Molybdenum Co., (1973).
- 2) ステンレス協会規格 ステンレス鋼溶接施工基準(附属書) 高純度

- フェライト系ステンレス鋼の溶接施工要領, ステンレス協会(1981) 改定版発行予定
- 3) E-Brite 26-1, Performance report, Aico Vacuum Metals, (1974)
 - 4) 吉村, 広瀬: 高純度フェライト系ステンレス鋼の精錬技術の進歩と SHOMAC RIVER 26-1 および SHOMAC 30-2 について, ステンレス, 22-10 (1978) 2-9
 - 5) Welding of E-Brite 26-1, Aico Vacuum Metals, (1973)
 - 6) K.E. Dorsch: Weldability of new Ferritic Stainless Steel, Weld. J., 50-9 (1971), 410S-418S
 - 7) 井川, 中尾, 西本, 寺島: 高純度 30Cr-2Mo 鋼の溶接部のぜい化, 本誌, 48-12 (1979) 40-45

8. 高純度フェライト系ステンレス鋼の溶接 —溶接部の靱性について*

中 尾 嘉 邦**

Welding of High Purity Ferritic Stainless Steels— Toughness of Weld Zone*

by Yoshikuni Nakao**

高純度フェライト系ステンレス鋼には種々のタイプがあるが、ここでは 18Cr 系鋼, 26Cr 系鋼, 30Cr 系鋼に大別し、その各々の溶接部の靱性について述べることにする。

まず 18Cr 系鋼についてであるが、図 8.1 に示すように、(C+N) 量を減少させることにより 17% Cr 鋼の TIG 溶接金属部の靱性が改善されることが報告されている¹⁾。18% Cr 鋼の TIG 溶接金属部についても C 含有量を 0.01% から 0.003% に低減することにより遷移温度の大幅な低下が示されている²⁾。C, N と親和力の大きい Ti, Nb, Zr などの安定化元素を適正量添加すると、溶接部の靱性を確保する上で有効であることが指摘されている¹⁻³⁾。例えば (C+N) 量がほぼ 200 ppm の 17% Cr 鋼では、0.1% 程度の Ti 添加で、また 0.01~0.02% C を含む 18% Cr 鋼については、 $[Ti] = \{Ti - (4C + 24/7 N)\}$ なるパラメータを採用した場合、 $[Ti]$ が 0.1~0.2% で TIG 溶接金属部の靱性が最良となることが示されている²⁾。その他 17Cr-1Mo 鋼^{6,7)}、18Cr-2Mo 鋼^{8,9)}、19Cr-2Mo 鋼¹⁰⁾についても同様な指摘がな

されている。しかし、安定化元素の過剰添加はかえって溶接部の靱性を低下させることも報告されている^{2,3,10)}。安定化元素の適正配合量としては、例えば 18Cr-2Mo 鋼については (C+N) 量の 8~10 倍の Nb の添加が良いとされている⁹⁾。安定化元素を過剰に添加した場合、Ti に関しては金属間化合物¹¹⁾あるいは Ti-rich 相⁸⁾の析出にともなうぜい化、Nb についてはレーベス相の生成にともなうぜい化¹⁰⁾が指摘されているが、その機構の確立に向けては今後の研究が必要であろう。最近、19Cr-2Mo-0.3Nb 鋼の溶接金属部の靱性改善には、図 8.2 に示すように、REM の添加が有効であることが見出されている¹²⁾。本鋼の溶接金属部のぜい化の主原因は溶接雰囲気中から混入する窒素、酸素があげられる(図 8.3)。N によるぜい化は Cr の窒化物の析出に、また O によるぜい化は 1μ 以上の酸化物介在物の増加によるものと考えられる。REM を添加すると、19Cr-2Mo-0.3Nb 鋼の溶接金属中の N 及び O 含有量は図 8.4 に示すように低下し、そのため靱性が改善される。その他 18Cr-2Mo 鋼について Al の微量添加が溶接金属部の靱性向上に有効であることが示されている⁹⁾。18Cr 系鋼の HAZ の靱性については主に 19Cr-2Mo 鋼を用いて検討されてい

*原稿受付 昭和55年12月20日

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Eng.,
Osaka University