

技 術 資 料

ス テ ン レ ス 鋼 の 溶 接 (I)

鈴 木 春 義*

Welding of Stainless Steels — A Review —

Haruyoshi Suzuki

目 次

I. 緒 言	2. 被覆アーク溶接
II. 種 類	3. イナートガスアーク溶接
1. 概 説	4. サブマージドアーク溶接
2. マルテンサイト系	5. ガ ス 溶 接
3. フェライト系	VI. 溶接後の熱処理 (以下次号掲載)
4. オーステナイト系	VII. 溶接部の性質
5. そ の 他	1. 機械的性質
III. ステンレス鋼の性質	2. 耐 食 性
1. 物理的性質	VIII. 異 種 金 属 の 溶 接
2. 機械的性質	1. 概 説
3. 脆 化	2. 炭素の移動
4. 耐 食 性	3. 熱応力破壊
IV. 溶 接 性	IX. クラッド鋼の溶接
1. 溶接熱影響	1. 概 説
2. 溶 接 割 れ	2. クラッド鋼の性質
3. 溶着金属のシグマ相脆化	3. 溶 接
V. 溶接方法	4. 熱 脆 化
1. 概 説	5. ライニング

I. 緒 言

最近ステンレス鋼の需要が増加するにつれその溶接の問題が重要となつている。ステンレス鋼はその性質上耐食性を重視する用途に用いられ、かつ高温、高压あるいは低温で使用されることが多いので、その工作に溶接が大幅に採用されている。

ステンレス鋼の溶接では、各種各様の材質の接合が研究対象となり、かつ溶接方法、施工法、接合部の欠陥、機械的性質、耐食性、耐熱性、低温性能などあらゆる方面から検討すべきで、限られた紙面ではその全貌を解説することは到底不可能である。そこで今回はステンレス鋼の溶接について、基本的でかつ重要な事項のみを抜出して記述した。(最近の全般的な解説は、日刊工業新聞社発行の“ステンレス鋼便覧”(長谷川正義編)にまとめられている。また詳細は本文末の文献を参照されたい。)

II. 種 類

1. 概 説

ステンレス鋼は炭素鋼にくらべていちじるしく優れた耐食性と耐熱性をもち、かつ機械的性質と加工性がともに優秀な合金鋼である。ステンレス鋼は化学工業における硝酸、硫酸、アンモニア合成、尿素などの諸工業に広く利用されており、また化学繊維、製紙、食品、石油、染色などの各工業に不可欠な材料であるばかりでなく、建築ならびに家庭厨房用にも最近広く用いられるようになった。もちろん、タービン、電気関係、航空機ジェットエンジン、自動車、船舶、車輛関係にも多量に用いられている。

* 科学技術庁金属材料技術研究所 第6部長
理学博士

最近ステンレス鋼の使用が急激に増加しそれに伴ってその溶接技術が重要な問題となつている。ステンレス鋼は軟鋼にくらべてはるかに種類が多く、その溶接上の問題点もはなはだ複雑である。これまで溶接されたステンレス鋼が破壊した多くの例は、材料の選択上の誤り、溶接棒と施工法の選定不良などがその原因である。溶接に際しては材料の特性、とくに溶接に伴う変質に関する十分な知識とともに溶接棒の選定と施工法に関する一応の常識を備えておくことが肝要である。

現在のステンレス鋼には約 40 種におよぶ多数の種類があり、いずれも 11.5% 以上の Cr を含んだ低炭素の鉄合金である。低炭素鋼に Cr を添加すると鋼の耐食性と耐熱性がいちじるしく向上し、さび難いステンレス鋼の特性が得られる。Cr 鋼に Ni を加えるとこれらの性質がさらに改善され、また機械的性質とくに低温における靱性（切欠衝撃試験の破断までの吸収エネルギー）が増加する。このために液体空気の低温における容器には低温靱性に優れた Cr-Ni 鋼が適当となる。Cr-Ni ステンレス鋼はまた耐熱性が優れているので耐熱鋼としても種々の用途を誇つている。

Cr-Ni 鋼に Mo, Cu, Nb (米国ではこれを Cb という), Ta, Ti, およびその他の元素を少量加えると耐食性が一層向上するほか高温での性質が改善される。

現用ステンレス鋼の規格としては JIS G 4301 (SUS) および JIS G 4302 (SEH) があり、さらに 1959 年改正案として JIS G 4303~4309 がある。これよりも一層広範囲のものとしては米国の鉄鋼協会規格 (AISI) がある。両者はほぼ類似の種類を規定しているが現在わが国では AISI 規格のもので JIS にないステンレス鋼を多数使用しているので、ここでは AISI 規格を用いて説明する。

ステンレス鋼は 900~1100°C の高温からの焼入れ（急冷）熱処理に対する反応および顕微鏡組織によつて 3 種に大別される。すなわち焼入れ硬化するマルテンサイト系、および焼入れ硬化しないフェライト系とオーステナイト系とである。これらのおおよその区別は表 1 に示すごとくである。

2. マルテンサイト系

マルテンサイト系ステンレス鋼は焼入硬化性があり、最良の耐食性は焼入焼もどしの状態で得られる。この種の鋼は水、大気およびある種の薬品を含む軽度の腐食条件の下で使用に適当でありとくに高力、かたさ、耐摩耗性、耐侵食性を要求される用途に適している。マルテンサイト系ステンレス鋼の種類を表 2 に示す¹⁾。代表的なものとしては 12 Cr 鋼 (AISI 410 型, JIS SUS 21) や 13 Cr 鋼 (AISI 420 型, JIS SUS 23) などがある。

12 Cr 鋼に炭素を加えたステンレス鋼は刃物用によく用いられる。この鋼はオーステナイト領域内の温度に充分長時間加熱すれば、ステンレス鋼中の C が完全に組織中に固溶する。これを油中または空中で急冷すると硬くてもろいマルテンサイト組織になる。しかしマルテンサイト組織を変態温度（約 800~850°C）よりも低い温度（約 700~780°C）に焼もどしすれば炭化物が分離析出して硬さはある程度減少するが靱性を増してくる。JIS の市販品は特に指定のない限り 800~900°C より徐冷して焼なましを行ない、加工しやすい状態にしてある。

3. フェライト系

フェライト系ステンレス鋼は Cr を多量に（16%以上）含み、焼入れしても硬化しない性質がある。このフェライト系はオーステナイト系ステンレス鋼にくらべると、耐食性、耐熱性はやや劣るが、しかし値段の安い割には高性能なので広く用いられる。その種類を表 3 に示す^{1,2)}。代表的なものとしては 16 Cr 鋼 (AISI 430, SUS 24), 18 Cr 鋼, 27 Cr 鋼などがある。しかし高 Cr 鋼とくに Cr が 18% 以上のものは一般に室温で切欠靱性に乏しいので厚板の溶接の場合には溶接部が室温近くでとくに脆くなつて割れやすい欠点がある。また表 3 の AISI 405 のように 12 Cr 鋼に Al を少量添加して焼入硬化を防いだフェライト系ステンレス鋼もある。普通の 12 Cr 鋼は溶接前に母材を予熱して焼入硬化を減少しないと溶接部が割れやすいのに反して、12 Cr-Al 鋼は予熱しなくても割れる心配がないので作業上予熱が

表 1 ステンレス鋼の分類

分 類	概 略 成 分 (%)			焼 入 性	耐 食 性	加 工 性	溶 接 性	磁 性
	Cr	Ni	C					
マルテンサイト系	11~15	—	1.20以下	自硬化性	可	可	不 可	あ り
フェライト系	16~27	—	0.35以下	な い	良	や 良	や 可	あ
オーステナイト系	16以上	7以上	0.25以下	な い	優	優	優	な い

表2 マルテンサイト系ステンレス鋼とその被覆アーク溶接標準¹⁾

通 称	母 材		化 学 成 分 ^(イ) %			(ロ) 適当な溶接棒 AWS規格	(ハ) 予熱および 層間温度 °C	後熱処理 ^(ニ) 705~790°C に 厚さ 1 in 当り 1h
	AISI 規 格	JIS 相 当	C	Cr	そ の 他			
12 Cr	403	SUS22	0.15以下	11.5~13.0	タービン用 Si 0.50 以下	E 410	315~370	
12 Cr	410	SUS21	0.15以下	11.5~13.5		E 310, E 309 (E 308) E 410	205~315 (強く推奨) 315~370	推 奨 ^(ホ) 強く推奨
12 Cr 改	410	SUS21	0.08以下	11.5~13.5		E 310, E 309 E 410	150~260 (強く推奨) 150~260	推 奨 強く推奨
12 Cr- 2Ni	414		0.15以下	11.5~13.5	Ni 1.25 ~2.50	E 310, E 309 E 410	205~315 315~370	強く推奨 ^(ヘ) 〃
12 Cr- FM	416		0.15以下	12.0~14.0	P, S, Se 0.07以上 Zr, Mo 0.60以下	E 430, E 410 E 309, E 308	315~370 205~315	強く推奨 ^(ト) 推 奨 ^(ト)
13 Cr	420	SUS23	0.15以上	12.0~14.0		E 310, E 309 E 410, E 430	205~315 315~370	推 奨 強く推奨
16 Cr- 2Ni	431	SUS44	0.20以下	15.0~17.0	Ni 1.25 ~2.50	E 310, E 309 E 430	205~315 315~370	推 奨 強く推奨
17Cr-C	440-A 440-B 440-C		0.06~0.75 0.75~0.95 0.95~1.20	16.0~18.0 16.0~18.0 16.0~18.0	Mo 0.75以下 〃 〃	E 430, E 442 〃 〃	315~370 〃 〃	ぜひ必要 ^(チ) 〃 〃
12 Cr	(リ) ACI規格 CA-15		0.15以下	11.5~14.0	Mn, Ni 1 以下 Si 1.5 以下	E 310, E 309 E 430	205~315 強く推奨 315~370	推 奨 強く推奨
13 Cr	CA-40		0.20~0.40	11.5~14.0	Mn, Ni 1 以下 Si 1.5 以下	E 310, E 309 E 410, E 430	205~315 315~370	推 奨 強く推奨

註 (イ) 特記例を除き Mn と Si は 1.00% 以下, P は 0.040% 以下, S は 0.030% 以下。

(ロ) 溶接棒の特性は表 10, 12 を参照。

(イ) 薄板 (約 3mm 以下) では熱影響部の冷却が緩やかなので予熱は省略できる。

(ニ) 溶接後直ちにおこなう, 冷却は空气中放冷, 約 3mm 以下の薄板には後熱は省略できる。

(ホ) 予熱できない場合には小径棒を用いる。

(ヘ) 薄板には後熱は省略できる。

(ト) 快削鋼には溶接は推奨できない。

(チ) この鋼は割れを生じやすく溶接に適さないが溶接する際には予熱と後熱がぜひ必要である。

(リ) 鋳物規格。

困難な場合に好んで用いられる。

鉄—クロム合金系は Cr 13% 以下では高温でオーステナイト域があるが, Cr 量がそれ以上高いとフェライト組織になる。0.10% C 以下で 17~18% 以上の Cr 鋼はフェライト組織のみよりなる。フェライト系 Cr 鋼は変態しないから熱処理によりその顕微鏡組織を微細にすることができないので, 過熱により粗粒脆化した組織を改善するには機械的に塑性加工を加えてのち再結晶させる以外には方法がない。また Cr 20~70% の高クロ

ム鋼では冷却中にフェライトからシグマ相の析出する領域がある。このσ相はきわめて脆くてステンレス鋼の高温性能を損うものであることは衆知のごとくである。

4. オーステナイト系

オーステナイト系ステンレス鋼は一般のステンレス鋼容器の製作にきわめて重要な種類で, ステンレス鋼の中で最も耐食性と耐熱性と延性に優れ, また溶接性がとくに優秀である。表 4 はその主な種類 (ただし圧延材のみ, 鋳造材は省略) を示している^{1,2)}。この大部分は 18-

表3 フェライト系ステンレス鋼とその被覆アーク溶接標準^{1,2)}

母 材			化 学 成 分(イ) %			(ロ) 適当な溶接棒 AWS規格	(ハ) 予熱および 層間温度 °C	後熱処理(ニ) 705~790°C に厚さ1in当 り 1h
通 称	AISI 規 格	JIS 相 当	C	Cr	そ の 他			
12 Cr- A1	405	SUS38	0.08以下	11.5~13.5	Al 0.10~0.30	E 430 E 310, E 309 (E 308)	不 必 要 不 必 要	強く推奨 推 奨
12 Cr- 4 A1	406		0.15以下	12.0~14.0	Al 3.50~4.50	E 310		(ホ)
16 Cr	430	SUS24	0.12以下	14.0~18.0		E 430 E 310, E 309 (E 308)	不 必 要 不 必 要	強く推奨 推 奨
16 Cr- FM	430-F		0.12以下	14.0~18.0	P, S, Se 0.07以上 Zr, Mo 0.60以下	E 430 E 309, E 308		推 奨(ヘ) 推 奨(ヘ)
18 Cr	442		0.35以下	18.0~23.0		E 442, E 446 E 309, E 310 (E 308)	不必要, ただし 普通は 150~ 205°C を推奨 同 上	不 可 欠 強く推奨
27 Cr	446		0.35以下	23.0~27.0	N ₂ 0.25 以下	E 446 E 310, E 309 (E 308)	150~205 不 必 要	不 可 欠 不 必 要(ト)
20 Cr	(デ) ACI規格 C-B-30		0.30以下	18.0~22.0	Ni 2.0 以下	E 442 E 309, E 310 (E 308)	不必要, ただし 普通は 150~205 °C を推奨 同 上	不 可 欠 強く推奨
27 Cr	CC-50		0.50以下	26.0~30.0	Ni 4.0 以下	E 446 E 309, E 310 (E 308)	150~205 不 必 要	不 可 欠 不 必 要(ト)
27 Cr	HC		0.50以下	26.0~30.0	Si 2.0 以下 Ni 4.0 以下	E 446 E 309, E 310 (E 308)	150~205 不 必 要	不 可 欠 不 必 要(ト)

注 (イ) 特記例を除き Mn と Si は 1.00% 以下, P は 0.040% 以下, S は 0.030% 以下.

(ロ) 溶接棒の特性は表 10, 12 を参照.

(ハ) 18 Cr 以上では室温で靱性に乏しいので予熱が必要.

(ニ) 熱影響部の脆化を改善する.

(ホ) 溶接は推奨されない. 補修溶接が必要なときは小径の E 310 棒を用いて小電流を使用.

(ヘ) 溶接は推奨されない.

(ト) 理想的には後熱処理が必要.

(チ) 鋳物規格

8 Cr-Ni 鉄合金を基に Cr, Ni, Mo, Nb (Cb), Ti などを添加して製造される. 代表的なものとして AISI 304 型 (19-9 または 18-8, JIS SUS27), 310 型 (25-20, JIS SEH 5), 316 型 (18-12 Mo, JIS SUS 32), 321 型 (18-10 Ti, JIS SUS29), 347 型 (18-10 Cb または 18-8 Cb と同じ) などがある. 321 と 347 型はそれぞれ Ti および Cb+Ta で炭化物を安定化することにより, 後で述べる炭化物の粒界析出を防いで耐

食性を向上させたものである. 347 型はとくに溶接棒の心線にもよく用いられ, Cb の添加によつて高温強度も優れている. しかし原子炉容器に 347 型を用いる場合には Ta が誘導放射能を帯びて危険なので最近ではその量を制限した新しい型 AISI 348 が表 4 に示すように規定されている.

18-8 Cr-Ni ステンレス鋼と炭素との状態図では低温になるにつれオーステナイトへの炭素の固溶度が減少し

表 4 オーステナイト系ステンレス鋼とその被覆アーク溶接標準^{1) 2)}

母 材			化 学 成 分(%)				適当な溶接棒(ハ) AWS 規格	予熱(ニ) と 後熱(ホ)
(イ) 通 称	AISI 規 格	JIS 相 当	C	Cr	Ni	そ の 他		
17-7 18-8 18-8 Si	301 302 302B	SUS39 SUS40	0.08~0.20 0.08~0.20 0.08~0.20	16.0~18.0 17.0~19.0 17.0~19.0	6.0~8.0 8.0~10.0 8.0~10.0	— — Si 2.0~3.0	E 308 E 308 E 308, E 309	
18-8 FM	303		0.15以下	17.0~19.0	8.0~10.0	P, S, Se 0.07以上 Zr, Mo 0.60以下	E 312, E 308(ハ)	
19-9 LC 19-9 ELC 18-10 20-10	304 304 L 305 308	SUS27 SUS28	0.08以下 0.03以下 0.12以下 0.08以下	18.0~20.0 18.0~20.0 17.0~19.0 19.0~21.0	8.0~11.0 8.0~11.0 10.0~13.0 10.0~12.0	— — — —	E 308 E 308 L, E 347 E 308 E 308	
24-12 24-12 LC 24-12 Cb	309 309 S 309 Cb	SUS41	0.20以下 0.08以下 0.20以下	22.0~24.0 22.0~24.0 22.0~24.0	12.0~15.0 12.0~15.0 12.0~15.0	— — Cb 10×C 以上	E 309 E 309 E 309 Cb	
25-20 25-20 LC 25-20 Cb 25-20 Mo 25-20 Si	310 310 S 310 Cb 310 Mo 314	SEH 5 SUS42	0.25以下 0.08以下 0.25以下 0.25以下 0.25以下	24.0~26.0 24.0~26.0 24.0~26.0 24.0~26.0 23.0~26.0	19.0~22.0 19.0~22.0 19.0~22.0 19.0~22.0 19.0~22.0	— — Cb 10×C 以上 Mo 2.0~3.0 Si 1.5~3.0	E 310 E 310 E 310 Cb E 310 Mo —	
18-12 Mo 18-12 Mo E L C	316 316 L	SUS32 SUS33	0.10以下 0.03以下	16.0~18.0 16.0~18.0	10.0~14.0 10.0~14.0	Mo 2.0~3.0 Mo 2.0~3.0	E 316, E 310 Mo(ト) E 316 L, E 318, E 310 Mo(ト)	
19-13 Mo 18-12 Mo Cb	317 318		0.10以下 0.10以下	18.0~20.0 18.0~20.0	11.0~14.0 10.0~14.0	Mo 3.0~4.0 Mo 2.0~3.0 Cb 10×C 以上	E 317, E 310 Mo(ト) E 318, E 310 Mo(ト)	
18-10 Ti 18-10 Cb -Ta 18-10 Cb	321 347 348	SUS29 SUS43	0.08以下 0.08以下 0.08以下	17.0~19.0 17.0~19.0 17.0~19.0	8.0~11.0 9.0~12.0 9.0~12.0	Ti 5×C 以上 Cb+Ta 10×C 以上 Cb 10×C 以上 Ta 0.1以下	E 347(チ) E 347 E 348	

注 (イ) 17-7, 18-10, 19-9, 19-12 はしばしば 18-8 と呼ばれる。

(ロ) 特記例を除き Mn は 2.00% 以下, Si は 1.00% 以下, P は 0.040% 以下, S は 0.030% 以下。

(ハ) 溶接棒の特性については表 10, 12 を参照。JIS Z 3221 では E の代りに D 記号をつけて表わす。

(ニ) 予熱は原則として行わない。

(ホ) 後熱については本文参照。

(イ) E 308 はライム型被覆のほうがよい。快削鋼の溶接金属は高温割れを生じやすいが E 312(29-9Cr-Ni) 溶着金属はデルタフェライトを多量に含むので高温割れを防ぐのに有効。

(ロ) 溶接のままの E 316, E 316 L, E 317, E 318 の溶着金属は往々にして耐食性が劣ることがあり、とくに高温の酸化性酸に弱い。この場合には C 0.12% 以下の E 310 Mo 溶着金属を使用するとよい。もし E 310 Mo が使えないときは次の熱処理をおこなえば耐食性が向上する。

i) 316, 317 母材には 1065~1120°C の完全焼入。

ii) 316, 317 L 母材には 870°C の応力除去焼なまし。

iii) 318 母材には 870~900°C の安定化処理。

(イ) Ti 入りの被覆アーク溶接棒を作っても Ti がアーク中で焼損するので実用化されていない。代りに Cb 入りの E 347 を用いる。(ただしイナートガスアーク溶接では Ti の焼損が少ないので Ti 入りの溶接棒が実用化されている。

ているので、普通のオーステナイト系ステンレス鋼は 1100°C 前後の高温に加熱して炭素をオーステナイト中に固溶(溶体化処理)させてのち、室温まで急冷してオーステナイト組織にしたものが最も耐食性があり、普通は

この焼入れを施した状態で市販されている。しかしこれを 650°C 前後の高温に加熱すると過飽和の炭化物が結晶粒界に析出して耐食性低下の原因を作る。これについては後で詳しく述べる。

表 5 その他のステンレス鋼または Cr 鋼とその溶接標準²⁻⁵⁾

母 材			化 学 成 分 (%)			
通 称	AISI 規 格	その他の名称	C	Mn	Si	Cr
5 Cr 7 Cr 9 Cr	501 502 A213—75 A213—T7 A213—T9	—	0.10以下 0.10以下 0.15以下 0.15以下 0.15以下	1.00以下 1.00以下 0.60以下 0.60以下 0.60以下	1.00以下 1.00以下 0.50~1.00 0.50~1.00 1.00以下	4.00~6.00 4.00~6.00 4.00~6.00 6.00~8.00 8.00~10.00
Cr-Ni-Mn		201	0.15以下	5.50~7.50	1.00以下	16.00~18.00
		202	0.15以下	7.50~10.00	1.00以下	17.00~19.00
17-4 PH	代表成分		0.04	0.60	0.40	17
	AMS 規格		0.07以下	1.00以下	1.00以下	15.50~17.50
17-7 PH	代表成分		0.07	0.60	0.40	17.0
	AMS 規格		0.09以下	1.00以下	1.00以下	16.00~18.00

母 材	化 学 成 分 %		適当な溶接棒 AWS	予熱および 層間温度 (°C)	後 熱 処 理 (°C)	備 考
通 称	Ni	そ の 他				
5 Cr 7 Cr 9 Cr	— — — —	— — Mo 0.45~0.65 Mo 0.45~0.65 Mo 0.90~1.10	共 金 E310, E309	250~350 約 150	直ちに 700~ 760×2h/lin 同 上	マルテン サイト系
Cr-Ni-Mn	3.50~5.50	N 0.25 以下	E308, E309, E347, E316	不 要	不 要	オーステナイ ト系 (薄板)
	4.00~6.00	N 0.25 以下	同 上	不 要	不 要	
17-4 PH	4 3.00~5.00	Cu 4, Cb 0.3 Cu 3.00~5.00 Cb+Ta 0.15~0.45	共 (ロ) 金	不 要	母材と同一熱 処理を推奨 ^(ハ)	マルテン サイト系
17-7 PH	7.0 6.50~7.75	Al 1.2 Al 0.75~1.50	17-4 PH被覆 棒 共金心線	不 要	母材と同一熱 処理を推奨 ^(ニ)	マルテン サイト系

備考 (イ) P 0.040% 以下, S 0.030% 以下.

(ロ) 17-4 PHはマルテンサイト中にフェライトを少し含む. 棒, 型材, 鋳造品として, 304 型と同程度に容易に溶接できる.

(ハ) 17-4 PH: 1038°C 焼入, 482~593°C 焼もどし析出硬化.

(ニ) 17-7 PH: 1066°C 焼入, 760°C 変態, 566~593°C 焼もどし析出硬化.

5. その他

ステンレス鋼またはそれに類するものとしてはさらに表 5 に示す種類がある²⁻⁵⁾. AISI 501 と 502 型は 4~6% Cr 鋼で米国ではステンレス鋼に入れているが耐食性はやや劣る. しかし高温強度が優れており, また AISI A213 規格の 5 Cr, 7 Cr, 9 Cr 鋼は Mo を 0.45~1.10% 含んでいて焼もどし脆性がなく, やはり高温強度が優れているので耐熱鋼とくに高温蒸気管としての用途が広い. これらの Cr 鋼はすべてマルテンサイト系である.

18-8 Cr-Ni ステンレス鋼の Ni を節約するためにマ

ンガンを数%加えたオーステナイト系ステンレス鋼として表 5 に示す 201, 202 型がある. これは大気中では 300 型 (表 4) にほぼ近い耐食性をもち, かつ溶接性も良好なので, 300 型の代用鋼として広く用いられ始めた. 現在は薄板が市販されている.

最近特殊の化学成分の Cr-Ni ステンレス鋼をまず 1000~1100°C の高温で焼入したのち 480~600°C に焼もどして析出硬化させることによって, 引張強さ 140 kg/mm² 程度の高力ステンレス鋼が造られており, その比強度 (強さと重量の比) の大きいことを利用してとくに超音速航空機, ミサイルなどに利用されつつある. 表 5

の 17-4PH, 17-7PH などがその例である。その代表的化学成分は表に示すごとくで、両者はいずれもマルテンサイト系であるが、炭素量がきわめて少いので硬さはさほど大でなくかつ溶接の冷間割れはほとんど心配いらない。またその耐食性は普通のオーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同程度に良好である。

III. ステンレス鋼の性質

1. 物理的性質

ステンレス鋼は構造用炭素鋼とかなり異なつた物理的性質を有しており、それが溶接性に直接、間接に大きく影響する。すなわち表6に示すごとく、ステンレス鋼のヤング率、密度、および比熱は軟鋼とほぼ同程度であるが、融点はやや低くまた熱伝導率はとくに小さく軟鋼の

おいてほぼ 20~30 kg/mm² であつて、引張強さにくらべるといちじるしく低い。このことはステンレス鋼が冷間加工の塑性変形によつて軟鋼よりも急速度で加工硬化することを示している。また伸びはオーステナイト系では 50~60% で軟鋼よりも大いに延性が優れているが、フェライト系やマルテンサイト系では伸びはオーステナイト系の約半分である。なお析出硬化性ステンレス鋼の強さは特に大きい。

オーステナイト系ステンレス鋼は液体空気の低温においても切欠靱性を失わないという優れた性質がある。これは他のフェライト系やマルテンサイト系に見られない有利さであるので、液体空気の低温で用いる容器の製作にはオーステナイト系ステンレス鋼の使用が必要となる。

表6 ステンレス鋼の物理的性質

AISI Type	磁性 (室温)	ヤング率 (kg/mm ²)	密 度 (g/cm ³)	電気比抵抗 (20°C) (μΩ-cm)	比 熱 (0~100°C) (cal/g°C)	熱伝導率 (100°C) (cal/cm ² s)	熱膨脹係数 (線) (1/°C) × 10 ⁻⁶		融解温度域 (°C)	大気中の 耐酸化耐 用温度 (°C)
							(0~ 100°C)	(0~ 1000°C)		
302	非	19,700	7.93	72	0.12	0.050	17.3	20.1	1,400~1,421	850
304	非	19,700	7.93	72	0.12	0.050	17.3	20.1	1,400~1,454	850
308	非	19,700	7.93	72	0.12	0.047	17.3	20.1	1,400~1,421	850
310	非	21,100	7.98	78	0.12	0.039	14.4	19.1	1,400~1,454	1,100
316	非	19,700	7.98	74	0.12	0.050	16.0	20.0	1,370~1,400	900
321	非	19,700	8.02	72	0.12	0.052	16.7	20.1	1,400~1,427	900
347	非	19,700	8.02	73	0.12	0.052	16.7	20.0	1,400~1,427	900
410	有	20,400	7.75	57	0.11	0.059	11.0	13.7	1,482~1,532	680
430	有	20,400	7.70	60	0.11	0.062	10.4	13.1	1,482~1,510	840
軟鋼	有	21,000	7.86	17	0.12	0.144	11.7	(0~600 °C) 14.8	1,492~1,520	550

約 1/3 程度である⁶⁾。さらに熱膨脹係数はオーステナイト系では軟鋼より約 50% 大きく、マルテンサイト系とフェライト系では軟鋼とほぼ同程度である。したがつて溶接度の冷却速度は軟鋼の場合よりもはるかに緩やかになり、またオーステナイト系では溶接による変形と歪(ヒズミ)が軟鋼の場合よりも一層大きくなりやすい。なお異種のステンレス鋼相互の溶接あるいは炭素鋼をオーステナイト系の溶接棒で接合した場合には、母材と溶接金属の熱膨脹係数の違いに起因する熱応力によつて溶接部が破壊しやすくなる。これについてはあとで述べる。

2. 機械的性質

ステンレス鋼の機械的性質は表7に示すように焼なまし軟化状態において引張強さが 50~70 kg/mm² 程度であるから、軟鋼 (41~49 kg/mm²) にくらべてかなり強い。一般に軟鋼のような明白な降伏点を示さないから、0.2% の永久歪(ヒズミ)を生ずる応力を降伏応力(耐力)として採用している。この値は焼なまし状態に

表7 ステンレス鋼の公称機械的性質 (室温)
(圧延材、焼なまし)

AISI Type	引張強さ (kg/mm ²)	0.2% 降伏応力 (耐力) (kg/mm ²)	伸 び (2'') (%)
302	63	25	60
304	(54)* 60	(26) 21	(55) 60
304 L	53	20	50
308	60	21	55
310	67	32	50
316	(56) 60	(30) 25	(50) 55
316 L	53	22	50
321	60	21	55
347	(54) 63	(27) 25	(39) 50
410	49	25	30
430	53	28	30
17-4PH**	140	126	12

備考 * ()内は鋳造品を焼入した場合

** 熱処理: 1,038°C 焼入, 482°C 析出硬化

ステンレス鋼は炭素鋼にくらべて高温の機械的性質ならびに耐酸化性が優れていて、耐熱鋼としても広い用途をもっている。図1はステンレス鋼の高温における引張強さを示す²⁾。約450°C以上の高温では長時間使用す

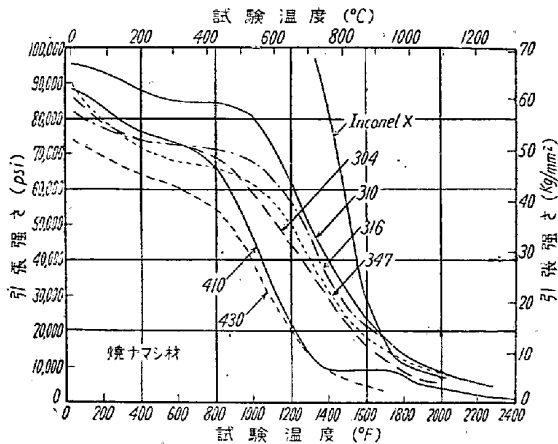


図1 焼なまししたステンレス鋼圧延材の高温引張強さ²⁾。

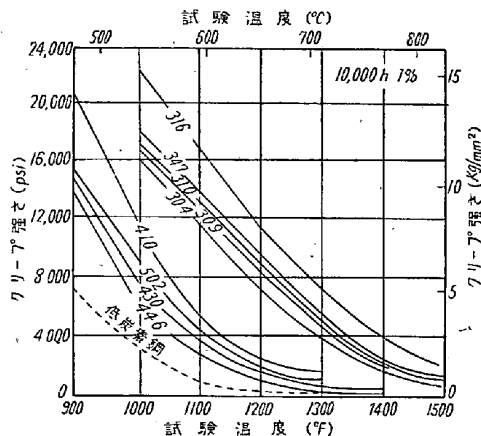


図2 焼なまししたステンレス鋼圧延材のクリープ強さ (10,000 h, 1%)²⁾

る合金に対してはクリープ強さが重要な意味をもつ。図2は主なステンレス鋼の焼入状態におけるクリープ強さ (ここでは10,000 hで1%のクリープを生ずる応力)

を試験温度に対して示したもので、また表8は10,000 h × 1% と 100,000 h (11.43年) × 1% に対するクリープ強さを示す²⁾ (ASME規定)。

3. 脆化

ステンレス鋼は比較的延性に富む材料であるが冷間加工、加熱および腐食によつて脆化しやすい欠点がある。とくに加熱による脆化の原因には、475°C脆性、炭化物の粒界析出、シグマ相あるいはカイ相の析出が重要である。

(1) 冷間加工： ステンレス鋼は冷間加工によつていちじるしく加工硬化されるが、その反面では延性が減少する。またオーステナイト鋼では冷間加工によつてそのオーステナイトが一部フェライトに変態する。また冷間加工されたオーステナイト鋼は高温使用中にシグマ相の形成が促進されて脆化を速める。

(2) 475°C脆化： 高クロム鋼 (Cr>16%) は400~600°Cに長時間加熱するか、またはこの温度域を徐冷するといちじるしく脆くなる。この脆化は475°C付近で最も急速に進行するので、これを475°C脆化という。その原因は未解決のまま残されているが、一度脆化したものは600°C以上に短時間再加熱して空冷すれば回復する。なおついでながら高Cr鋼は900°C以上の加熱によつて結晶が粗大化して室温できわめて脆くなる。溶接金属に隣接した熱影響部はこの粗粒化のため割れやすくなる。

(3) シグマ相： 炭化物の析出はオーステナイト系に、475°C脆化はフェライト系に限られているが、ここに述べるシグマ相による脆化は両系のステンレス鋼を高温に長時間加熱することにより発生し、ステンレス系耐熱鋼の延性と靱性をいちじるしく損うものである。シグマ相はFe-Cr化合物で、きわめて硬くまた脆い。

Cr系ステンレス鋼ではシグマ相はCr 14%程度の

表8 ステンレス鋼のクリープ強さ²⁾ (圧延材、焼入状態)

AISI Type	1000°F (538°C)		1100°F (593°C)		1200°F (649°C)		1300°F (704°C)		1500°F (816°C)	
	1% 100,000 h kg/mm ²	1% 10,000 h kg/mm ²	1% 100,000 h kg/mm ²	1% 10,000 h kg/mm ²	1% 100,000 h kg/mm ²	1% 10,000 h kg/mm ²	1% 100,000 h kg/mm ²	1% 10,000 h kg/mm ²	1% 100,000 h kg/mm ²	1% 10,000 h kg/mm ²
304	—	12.0	5.3	—	3.2	4.9	1.7	2.8	0.5	0.7
309	—	11.2	4.6	—	2.7	5.6	1.6	3.2	0.5	0.7
310	—	12.0	6.0	9.1	4.2	6.3	2.5	3.5	0.5	0.7
316	—	17.6	7.3	12.8	4.8	8.9	2.8	5.6	1.1	2.0
321	—	12.7	—	9.1	3.5	5.6	1.9	3.2	0.7	0.6
347	—	13.4	—	9.8	3.5	5.8	1.9	3.2	0.7	1.1
410	—	6.5	2.0	2.8	0.7	1.4	—	0.7	—	—
430	—	6.0	2.2	3.0	1.2	1.5	—	0.9	—	—

鋼でも高温加熱によつて発生しやすく、16 Cr (430型) には確実に発生し得るようで、また Cr 含有量の大きいほどシグマ相を形成しやすい。とくに 540~820°C に長時間加熱すれば最も形成されやすい。一度形成されたものは、930~980°C に加熱し急冷すれば消失する。

高クロム含有のオーステナイト系ステンレス鋼にもシグマ相が発生する。やはり 540~900°C に加熱すると形成され、もつとも急速に形成される温度は 304 型や 347 型では 594°C、316 型では 758°C、310 型では 815°C である。シグマ相は 18-8 の完全なオーステナイト結晶組織内では比較的形成され難いが、その中に混在するフェライトは高温加熱によりシグマ相にきわめて容易に変化する。また冷間加工や Cr 量の増加によつてシグマ相を形成しやすくなる。たとえば 310 型 (25-20) は 347 型 (18-8 Nb) にくらべてはるかにシグマ相を形成しやすい。しかし一度生じたシグマ相は高温で溶体化処理をすればオーステナイト地中に固溶して消失する。たとえば 25-20Cr-Ni 鋼では 1,025°C に 2 時間の加熱で消失する。

後に述べるようにオーステナイト系 Cr-Ni 鋼溶着金属の高温割れを防ぐために、オーステナイト組織内に 4~8% のフェライトを混在させるのが現在の慣例であるが、その溶着金属は溶接後溶体化処理によつてフェライトを消失させ完全オーステナイト組織にしない限り、高温使用中にフェライトが容易にシグマ相に変化して溶着金属がいちじるしく脆化する危険が大きい。またシグマ相の形成は Si, Al, Cb, Ti または Mo の添加によつて促進されやすい。

4. 耐食性

ステンレス鋼の特長はその優秀な耐食性である。ステンレス鋼はその表面が水分または液状媒質に触れて腐食されると、表面に薄いしかし強固で緻密な酸化被膜ができ、それが鋼を保護してそれ以上の腐食の進行を阻止する。したがって硝酸のような酸化性の酸には強いが、しかし非酸化性酸である塩酸や硫酸に弱いわけは上述の酸化皮膜保護作用を発揮できないからである。

ステンレス鋼の耐食性はその材質、腐食媒質の種類および腐食条件によつて異なるから、各場合にに応じて適当な鋼種を選択すべきである。

ステンレス鋼の腐食のうち特に注意を要するのはオーステナイト系の粒界腐食と応力腐食である。

(1) 粒界腐食：オーステナイト系ステンレス鋼 (300 系) がその最良の延性と耐食性を示すのは、これを 1,040°C 以上の高温に加熱して炭化物を完全にオーステ

ナイト地中に固溶させた後急冷 (焼入) した状態においてである。しかしこの焼入したものを 480~820°C の温度域に長時間保持するかまたは徐冷すれば、図 3 に示す例のようにいちじるしく腐食されやすくなる⁸⁾。

これはオーステナイト地中に固溶していた炭素が Cr 炭化物となつて図 4 (b) に示すように結晶粒界に網状に連続的に析出する結果粒界の両側に図 3 に示すような Cr 量の稀薄層を生じ、その部分の耐食性が低下し、いわゆる粒界腐食を起すからである。また炭化物の粒界析出の結果、析出物とオーステナイト地との間の電解腐食作

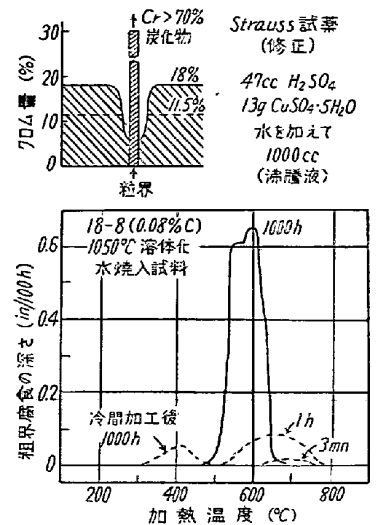
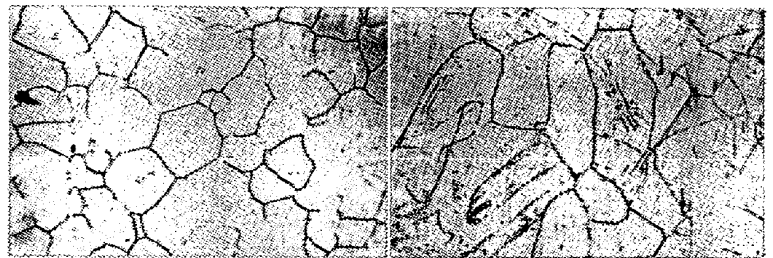


図 3 1050°C で溶体化後焼入した 0.08% C の 18-8 ステンレス鋼の再熱と粒界腐食⁸⁾。



(a) 1050°C より焼入れのまま (炭化物の粒界析出なし) (b) 焼入れ後 650°C×2h 加熱冷 (炭化物の粒界析出あり) ×500 (1/2)。

図 4 18-8 ステンレス鋼の顕微鏡組織 (日本金属工業)

用によつても粒界腐食が促進される。図 5 は粒界腐食を生じた 18-8 ステンレス鋼の顕微鏡組織である。この状態で荷重を受けると粒界がもろく破断してしまう。後に述べるように溶接熱影響部にも炭化物の粒界析出が起り、腐食媒質中ではいわゆる weld decay (溶接部腐

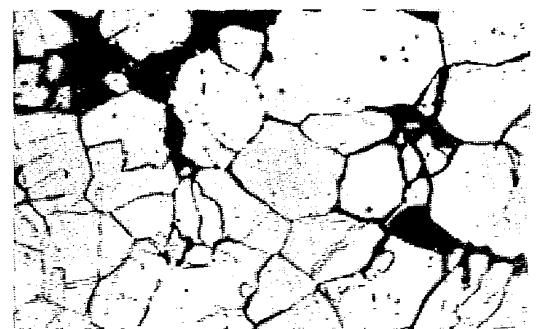


図 5 粒間腐蝕を生じた 18-8 ステンレス鋼の顕微鏡組織 ×200 (2/3)

食)を起す。もつとも、雰囲気腐食性がさほど強くなければ炭化物の粒界析出が起つてもステンレス鋼の延性や靱性の低下は比較的軽微である。炭化物の粒界析出を起す温度域に加熱することを感受処理 (sensitization) という。

炭化物の粒界析出は 18-8 Cr-Ni 鋼が最もいちじるしく、これに Cr の増加または Mo の添加を行うとそれが幾分軽減される (たとえば 25~20 または 18-12 Mo)。なお炭化物の粒界析出を防止、緩和または解消するにはつぎの方法がある。

- (イ) 含有炭素量の低下 (C 0.03% 以下または使用条件が緩やかならば 0.06% 以下)
- (ロ) 安定炭化物を作る特殊元素の添加 (Cb と Ta, または Ti)
- (ハ) フェライト組織を作る元素の添加 (Mo, Si, V など)
- (ニ) 溶体化処理温度 (1,040~1,120°C) よりの焼入 (析出物の解消)。
- (ホ) 不感受性熱処理 (820~850°C に加熱して析出炭化物の凝集と Cr の拡散, 網状析出物の寸断)

このうち、(ホ)は不完全であるが粒界腐食を軽減するにかなり役立つ。しかし炭化物析出温度域 (480~820°C) でしかも腐食性雰囲気中で使用するオーステナイト系ステンレス鋼としては、炭化物の粒界析出を防ぐために、

- (イ) 極低炭素 (C<0.03%, たとえば 304L, 316L, 310L など)
- (ロ) Cb+Ta 入り (347型), Cb 入り (348型), または Ti 入り (321型)

を選ぶ必要がある。

2. 応力腐食 : オーステナイト系ステンレス鋼はある媒質の下で応力を受けた状態でとくに腐食されやすくなる。これを応力腐食という。これはステンレス鋼内に冷間加工または溶接による残留引張応力がある場合、あ

るいは外的荷重によつて引張応力を受ける場合に、図 6 に示すような腐食割れを起す現象である。

応力腐食破壊では、割れが粒界を通る場合と粒内を通る場合およびそれらの合成の 3 種があるが、粒内を通る場合がもつとも多い。原因はよくわかっていないが、Na, Cl などを含む腐食性雰囲気中で、ある値以上の応力を受ける場合に起り易いといわれている。応力腐食の試験にはたとえば 154°C に沸騰中の 42% MgCl₂ 液中の浸漬試験がよく用いられる。板状の試験片を一定応力の下で曲げまたは引張つたまま液中に浸漬し、割れが発生するまでの時間 (数時間ないし数百時間) を測つて比較する。その結果によるとオーステナイト系 304 型 302 型は応力腐食破壊を生じやすく、316 型 (18-8 Mo), 347 型 (18-8 Cb) はやや抵抗力があるが、310 型 (25-20) はきわめて強い。また Ni を多量に含んだ 15 Cr-35 Ni あるいは高 Ni 合金なども強い。マルテンサイト系やフェライト系の Cr ステンレス鋼も応力腐食を起し難い。与えられた材料の応力腐食を防ぐには、応力とくに残留応力の値を小さくすることがいちじるしく有効で、このために冷間加工または溶接後の応力除去焼なましが必要になる。

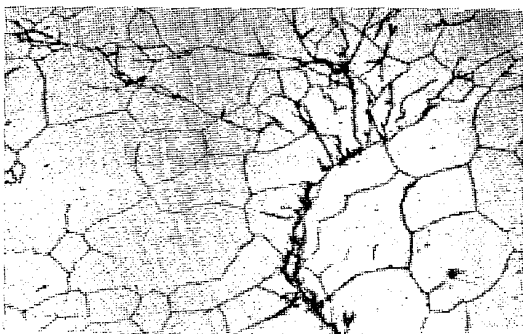
IV. 溶 接 性

ステンレス鋼の溶接性に関連しては、溶接熱影響、溶接金属と溶接欠陥、および溶接部の脆化についての予備知識が必要である。

1. 溶接熱影響

溶着金属に隣接するステンレス鋼の母材部分は溶接によつて熱影響を受けて、各種の脆化を起しやす。その脆化の程度は、マルテンサイト系、フェライト系およびオーステナイト系に応じてかなり差がある。

(1) マルテンサイト系 : マルテンサイト系ではその溶接熱影響部は焼入硬化して硬いマルテンサイト組織になる。とくに炭素含有量の多いものほど硬化が甚しく、残留応力が大となり、また冷えた後に割れやすい。たとえば 12 Cr 鋼 (410型) を共金 (母材と同成分の溶接棒) で溶接すると、溶着金属部も母材も同様に焼入硬化する。この硬化を軽減するには、表 2 に示すように (イ) 200~400°C の予熱ならびに層間温度の保持、(ロ) 溶接直後まだ冷却しないうちに 700~800°C に加熱保持した後空冷すれば延性ある溶接部が得られる。図 7 は後熱温度による溶着金属の軟化の傾向を示すもので安全な軟化は 700°C 以上の後熱によつてようやく達成される⁹⁾。このほか (ハ) アルミニウムを少量添加した非自硬性の 12



×200 (2/3)

図 6 18-8 ステンレス鋼の応力腐食割れ
(日本金属工業)

Cr 鋼たとえば 405 型 ($C=0.08\%$ 以下, $Al=0.10\sim0.30\%$, $Cr=11.5\sim13.5\%$) を用いることも硬化を防ぐのに有効である. 構造物の溶接前後における加熱が不可能なときは, この種の非硬化性ステンレス鋼を用いると便利である.

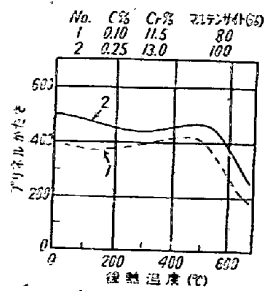


図7 マルテンサイト系溶着金属の後熱による軟化⁹⁾.

(2) フェライト系 : フェライト系では熱影響部はほとんど硬化しない. しかし溶着金属に隣接して融点近くまで加熱された領域はいちじるしく粗粒となり, 室温での延性も靱性もともに乏しくなる. また徐冷すると前述の 475°C 脆化を伴う. これに加えて, 16%以上の Cr 鋼では, 図8に示すよう

に室温での衝撃値がいちじるしく小さくて切欠靱性に乏しい欠点がある⁹⁾. したがって溶接部は比較的急速に室温まで冷却すると室温で割れる可能性が多いので, 少し母材を予熱 ($70\sim100^{\circ}\text{C}$) して切欠靱性に富む温度範囲

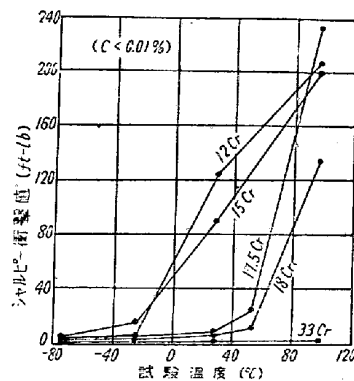
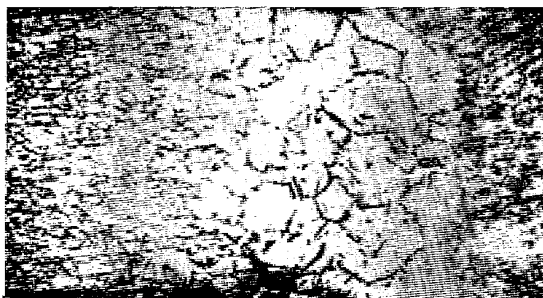


図8 クロム鋼の遷移曲線⁹⁾

まで徐冷するのがよい. しかし 475°C 脆化を避けるために予熱温度が 150°C をこえない方がよいとされている.

(3) オーステナイト系 : オーステナイト系 Cr-Ni ステンレス鋼は溶接熱により図9および図10に示すような変化を受ける. すなわち溶着金属に隣接して粗粒化されてはいるが, しかし溶体化処理温度以上に加熱された領域があり, その外側には $480\sim820^{\circ}\text{C}$ に加熱されてある程度に炭化物の粒界析出を起した部分がある. この



×50 (2/3)

図9 20%Cr-12%Ni ステンレス鋼の溶接断面組織 (右側は溶着金属, 中央は粗粒化部, 左は未影響部)

部分が腐食性雰囲気中で使用されると粒界腐食を生ずる. たとえば図10の斜線(c)の部分がとくに強く腐食されていわゆる weld decay を起す. この weld decay は $C=0.08\%$

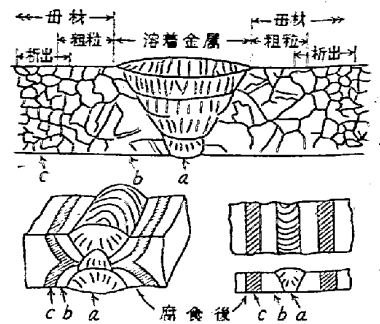


図10 18-8 Cr-Ni 鋼の溶接熱影響部(粗粒化と粒界析出)

(AISI 302 型) においていちじるしく, $C=0.08\%$ 以下の 304 型ではやや少い. もつとも溶接熱は比較的短時間で消えるので, 使用中の長時間加熱による場合に比べて炭化物の粒界析出ははるかに少い. したがって工作物の使用雰囲気が酪農機械, 台所, 建築装飾などの場合のように腐食性の弱い用途には, 302 型 ($C=0.08\sim0.20\%$) を溶接したままでも満足に使用できる. また雰囲気がわずかに腐食性をもつ場合には $C=0.08\%$ 以下の 304, 308, 309S, 310S 型とか, $C=0.10\%$ 以下の 316, 317 型 (20-13-3 Cr-Ni-Mo) などは溶接のままでも十分使用できる.

これらのステンレス鋼では, 熱影響部に炭化物の粒界析出が認められるようになるのは, 815°C から 480°C までの冷却時間が約 1 分をこえるような冷却を行なった場合であるので, ガス溶接ではとくにこの危険がある. したがって, 工作物の使用雰囲気が強い腐食性をもつ用途には溶接後の急冷が必要である. このために, オーステナイト系ステンレス鋼の溶接には予熱を用いないでかつ溶接入熱を小にして冷却を速めることが常識となつて

いる. 前述のように, 粒界腐食を防ぐには Nb または Ti の添加, あるいは極低炭素 ($C\leq 0.03\%$) のステンレス鋼を用いればよいことを述べたが, 図11は 304 型と極低炭素 304L 型ステンレス鋼の溶接部の腐食試験結果である.

304 型ではビード両側の熱影響部が黒い帯状に腐食されているのに対して極低炭素 ($C\leq 0.03\%$) の 304L は熱影響部がまったく腐食されていない. また 304 型でも溶接後溶体化処理温度から焼入したものは腐食されていない.

2. 溶接割れ

(1) シェフラの組織図 : ステンレス鋼の溶着金属の機械的性質と耐食性は, その化学成分と顕微鏡組織に大きく影響される. 図12はステンレス鋼溶接金属の溶接

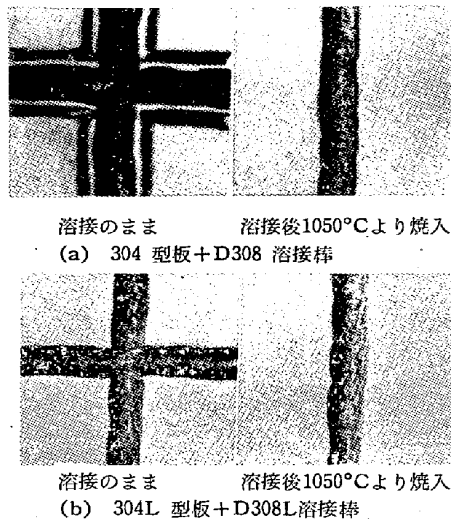


図11 304 型と 304L 型ステンレス鋼溶接熱影響部の粒界腐食の比較 (腐食液 10% HNO₃ + 3% HF)

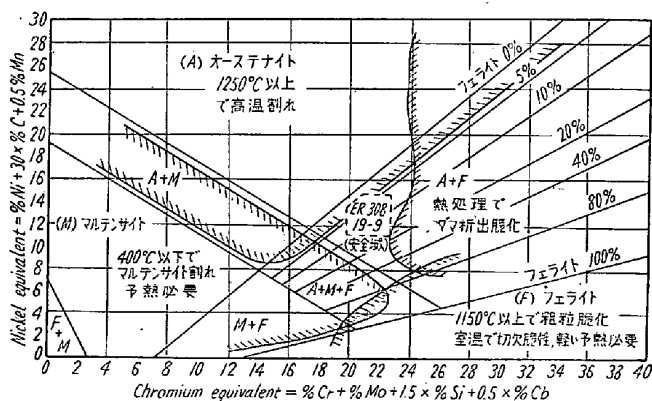
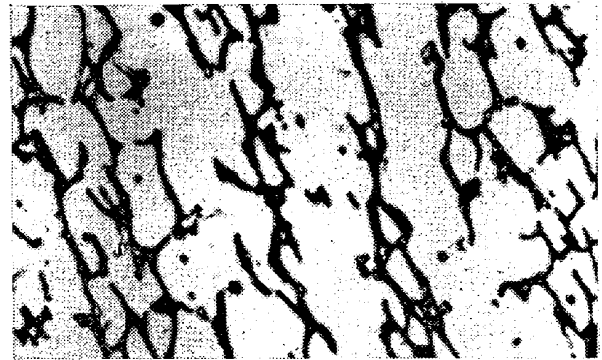


図12 ステンレス鋼溶着金属のシェフラー組織図¹⁰⁾

のままの組織と化学成分 (等価 Ni と等価 Cr 量) との関係を示すシェフラー (Schaeffler) の組織図¹⁰⁾である。図に記入されたように、マルテンサイト系、フェライト系および純オーステナイト系はそれぞれの脆化や割れを起す欠点がある。中央付近に示された E R 308 型はイナートガス・アーク溶接用の裸溶接棒 19-9 の溶着組織であるが、この領域は比較的安全域である。とくに 347 型 (18-10Cb) 溶接棒では溶着金属が完全オーステナイト組織になると高温割れを生じやすい欠点があるが、これに対してオーステナイト地中に図13に示すような細長いデルタフェライト相が4%以上含まれると割れがいちじるしく減少することが知られている。したがって溶接棒の規格にもこの点を考慮してその全溶着金属の化学成分が規定されている。

溶着金属に関するシェフラーの組織図はきわめて重要なもので、これによつて異種金属の場合の溶着金属の組織が推定できるので便利である。これについては後に述べる。

(2) オーステナイト系ステンレス鋼の高温割れ：



×1500 (1/1)

図13 347 型ステンレス溶着鋼中のフェライト

オーステナイト系ステンレス鋼の厚板の溶接または強い拘束溶接においては、溶接中もしくは溶接後の熱処理中に溶接割れを発生しやすいのでその防止対策がいろいろ研究されている。

オーステナイト系ステンレス鋼の高温割れには図14に示すようにいろいろの種類がある¹¹⁾。ビード中央に走る大きい縦割れを初めとして、クレータ割れ、ホシ割れ、マイクロ割れ (microfissure, microcrack)、融合部割れ、ルートクラックなどの溶着金属内の割れのほかに、母材の熱影響部に発生する母材割れもある。このほか溶接後の熱処理によつて、または長時間の高温使用後に発

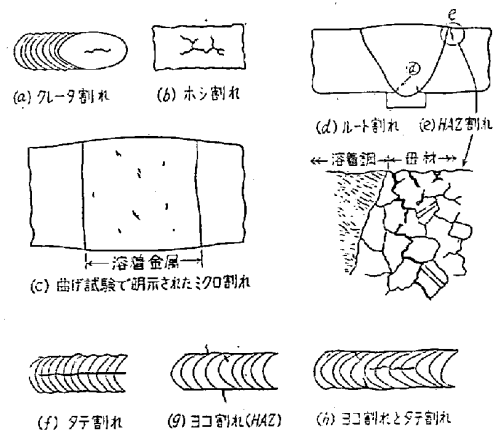


図14 347 型ステンレス鋼溶着部に生ずる各種の割れ¹¹⁾

生ずる割れがある。図15は厚さ 40mm のステンレス鋼の開先面に 25-20 溶接棒で肉盛 (いわゆる バタリグ) したビードに生じた高温割れ (図の左中央部) と熱処理中の熱応力によつて生じたトウクラック (図の左上) を示す¹²⁾。

オーステナイト系ステンレス鋼溶着金属の割れに影響する因子としては、(i)組織、(ii)棒と母材の化学成分、(iii)溶接技法、(iv)被覆剤、(v)継手形状および、(vi)拘束があげられる。合金元素のうち Mo, Mn, Ni, C は割れの減少に有効で、これに対して Cb と Si および P, S は

有害である。また過度の Ni も割れを助長しやすい。なお $C=0.07\sim0.11\%$, $Mn=1\sim5\%$ の範囲の米国の実験結果¹³⁾では C あるいは Mn の増加とともに割れが顕著に減少し、かつ $P=0.02\sim0.05\%$, $S=0.01\sim0.05\%$ の範囲内でも P, S の増加とともに割れが増大することが示されている。また C 0.1% 以上あるいは C/Si 0.5~0.6 以上でも割れがほとんど防げることが示されている¹⁴⁾。

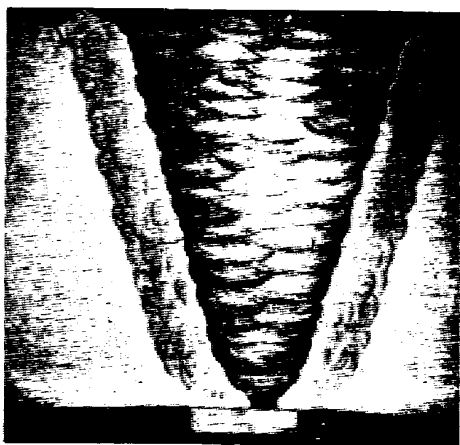


図15 25-20 溶接棒でバタリングした層内にボンド(溶融境界)に直角に生じた高温割れと熱処理後生じた母材のトゥクラック(左上方)¹²⁾

割れの原因については目下盛んに研究されつつあるが、有力な原因の一つとしては、オーステナイト結晶粒界に存在する低融点の不純物の影響が挙げられている。ステンレス鋼はかなり広い凝固温度域を有しているので結晶粒界には低融点の不純物が液状のまま集り、これが冷却中の収縮応力の下で開口して高温割れの原因となると考えられている。実際には低融点の不純物を極度に減少させる製鋼法を用いて、ドイツの Kauhausen たちは、完全オーステナイト組織でありながらも割れないという溶接棒(19-13-5Cr-Ni-Mn)の製作に成功している¹⁵⁾(マンガン を 5% 程度加えると割れが防止できる)。また米国パブコック社では Croloy 16 Cr-8 Ni-2Mo 溶接棒が 347 型溶接棒にくらべてはるかに割れ難い優秀な溶接棒成分であることを見出してすでに実用化している^{12,16)}。また高温高压の火力発電用の過熱管用として同じ 347 型ではあるがその成分に特殊の制限を加えて割れ難く、かつ高温の使用性能の優れた溶接棒を得ている。これについてはあとで述べる。

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接割れは高温における延性の低下に密接な関連があることが最近米国で指摘されている^{16~18)}。とくに火力発電の高温蒸気用の 347 厚板の溶接部には、普通の溶着金属内の割れのほかに図14(e)に示すような母材熱影響部の割れが度々発生した。この部分はかつて溶接中に融点近い高温に急熱され冷却中に収縮引張応力を受けて割れやすい部分であるので、米国の RPI (レンスラー工業大学) のニッペス(Nippes) 教授たち¹⁷⁾は特殊の方法を用いて丸棒試験片

に大電流を流して溶接熱サイクルを再現し、途中の高温において急速に引張破断させてその材料の高温延性を表わす断面縮小率(絞り)を測定したところ、たとえば図16の結果が得られた¹⁶⁾。

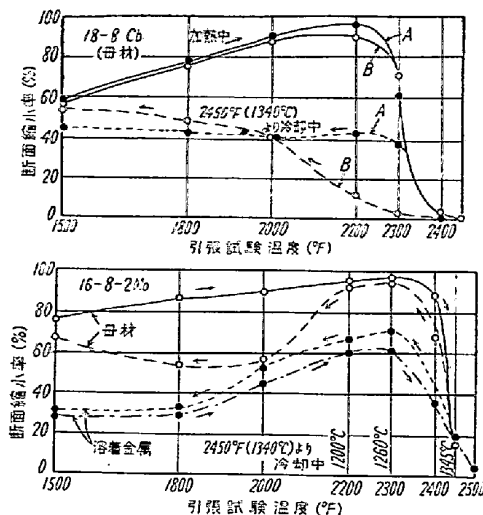


図16 18-8 Cb 母材と、16Cr-8Ni-2Mo 母材および溶着金属の RPI 高温延性の比較¹⁶⁾

すなわち、2つの 347 型(18-8 Cb) 母材(A, B)では、加熱途中の高温延性にほとんど差がなかったが、2450°F (1,340°C) よりの冷却途中の 2,200~2,300°F (1,200~1,260°C) における延性にいちじるしい差が認められた。これに対して同図の 16-8-2(Cr-Ni-Mo) 母材と溶着金属については、1,340°C よりの冷却中に高温延性の低下が認められなかった。すなわち 16-8-2 は 347 型に比べて優れた高温延性を有し、また実際にこの母材と溶接棒を用いると厚物の拘束溶接中の割れに悩まされることはほとんどなかった由である¹⁶⁾。図17は、種々のオーステナイト系ステンレス鋼圧延材に対する上述の RPI 高温延性(hot ductility)の試験結果で、鋼の種類によつていちじるしい差があることがわかる。

RPI hot ductility (溶接高温延性)

試験材	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
AI SI 304										
309										
316										
316Cb 鋳物										
* 321										
347										
* 16-8-2 溶着金属										
* 16-8-2										
15-15 Ni										

試験材は2例を除いてすべて正延材(1320°C加熱, 1260°C引張)
 * 1340°Cより冷却, また1320°Cより冷却すれば絞り(絞り)はもう少し大きい

図17 種々のステンレス鋼圧延材の RPI 高温延性の比較(急熱2400°Fより冷却途中の2300°F (1260°C)における延性)¹⁶⁾

347 型 (18-10Cb) の中には延性の優れたものと劣るものとのバラツキ範囲が広がった。実際の火力発電所に用いられた 347 型ステンレス鋼のパイプ、バルブその他の鍛造品 6 種について調査の結果では、溶接割れもしくは使用中の割れを経験した 3 種については高温延性がきわめて乏しく、他方欠点のない 3 種では高温延性のはるかに大きかった。これらの結果から、Soldan たち¹⁶⁾は 347 材の購入規格試験の一部に RPI の高温延性試験を採用すべきことを提案している。この種の実験はわが国では金属材料技術研究所で筆者らも多数の試験片につき行なった¹⁹⁾。

3. 溶着金属のシグマ相脆化

347 型溶着金属のフェライト量は高温使用中のシグマ相の析出に大きい影響がある。たとえばフェライトを 5～10% 含む 347 型溶着金属を各温度に長時間加熱した場合のシグマ相の析出による室温衝撃値の低下は図 18 の

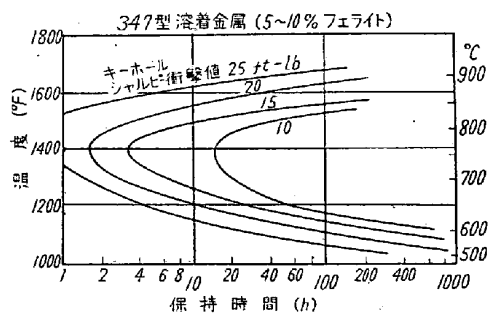
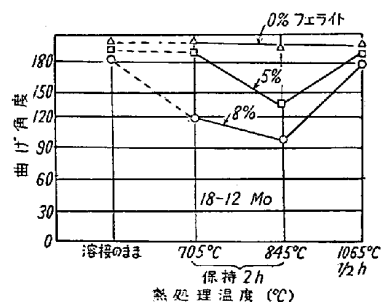


図 18 347 型溶着金属の高温加熱によるシグマ相脆化の影響²⁰⁾。

ようである²⁰⁾。また図 19 に示すように 316 型 (18-12 Mo) 溶着金属ではフェライト量の増加とともに 700～840°C におけるシグマ相の析出



による脆化がいちじるしくなる¹⁰⁾。前述のようにオーステナイト中のフェライトは高温加熱中にシグマ相に容易に変化し易いので、溶接後溶体化処理を行なつてフェライトを減少させることはシグマ相脆化の軽減に有効である。米国 Curran たちは種々の研究の結果²⁰⁾、347 型溶着金属内にやや低目の 2.5% フェライトを得るよう工夫し、かつ 1,925°F (1,050°C) の熱処理を行なえば 1,200°F (650°C) における長時間加熱によつても図 20 に示すように脆化しないことを示している。

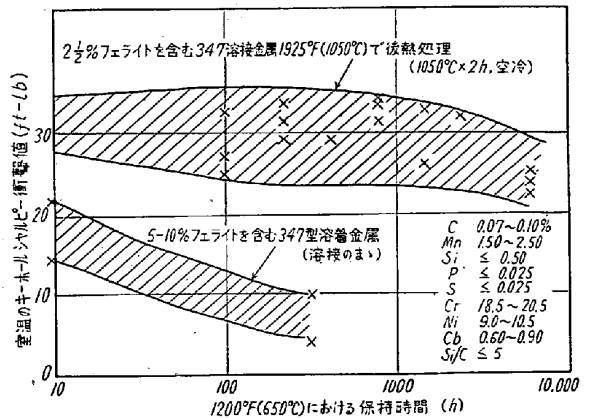


図 20 347 型溶着金属のシグマ相脆化におよぼすフェライト量と溶体化熱処理の影響 (1200°F で長時間加熱)²⁰⁾

なお、彼らは溶接割れを防ぐために溶着金属の化学成分 (%) をつぎのように制限している。

C	Mn	Si	P
0.07~0.10	1.50~2.50	0.50 以下	0.025 以下
S	Cr	Ni	Cb
0.025 以下	18.5~20.5	9.0~10.5	0.60~0.90
Si/C			
5 以下			

シエフラ組織によると、これは 1～4% のフェライトを含むことになる。なお Si/C の比が小さいほど高温割れを生じ難いので、その比を 5 以下に制限したのはフェライトの減少に反比例的に増加する高温割れを減少させる目的である。なおこの溶接棒で溶接した厚板溶接部の後熱処理はつぎのように行なえばよいことを示している。

- 1) 1,100°F (590°C) まで加熱、300°F/h (167°C/h) 以下の徐熱
- 2) 1,100°F に 2 時間保持 (温度の均一化と大きい残留応力の軽減)
- 3) 1,100°F から 1,925°F (1,050°C) まで加熱、600°F/h (334°C/h) 以下で徐熱
- 4) 1,925°F に 2 時間保持し、完全に応力除去、フェライトをオーステナイト中に固溶または球状化)
- 5) その後空冷

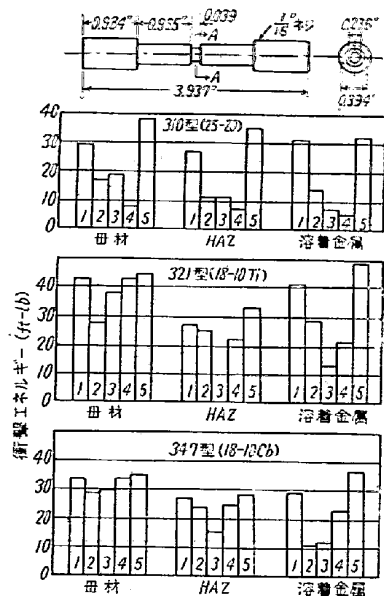
シグマ相の析出は材質によつて趣を異にする。たとえば図 21 は 310, 321 および 347 型母材、溶接熱影響部 (HAZ) および溶着金属を 1,200～1,550°F (650～840°C) で 1,500 h 以上加熱してシグマ相を析出させた後、室温で切欠つき丸棒試験片の衝撃引張試験を行なつた結果²¹⁾であるが、310 型は 347 や 321 型に比べて脆化がとくにいちじるしかった。しかし脆化はいずれも

1,065°C × 1/2 h の溶体化処理と焼入によつて回復した。

V. 溶接方法

1. 概説

現在ステンレス鋼に使用されつつあるアーク溶接方法としては被覆金属アーク溶接、TIG 溶接(タングステン・イナートガス・アーク)、MIG 溶接(メタル・イナートガス・アーク)が主要なものでこのほかに場合によつては原子水素アーク溶接やサブマージドアーク溶接も用いられる。また酸素アセチレンを用いるガス溶接や、ガス圧接も用いられており、さらにスポット、シーム、火花突合せ(フラッシュバット)などの抵抗溶接のほかに、ろう付も広く用いられている。これらの溶接方法に対する各種ステンレス鋼の溶接難易の比較を表9に示す。



- 1 焼入れ: 1850°F(1010°C) × 1/2h 炉内急冷
- 2 1200°F(650°C) × 1512h 時効
- 3 1350°F(730°C) × 2120h 時効
- 4 1550°F(840°C) × 1500h 時効
- 5 1550°F 時効のち 1950°F(1065°C) × 1/2h 溶体化処理

図21 310, 321, 347 の母材、熱影響部(HAZ)および溶着金属のシグマ相脆化の比較²¹⁾

ステンレス鋼の溶接上注意すべきことは、まず溶融金属の酸化防止、とくに耐火性のクロム酸化物($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ クロマイト、融点 1,900~2,180°C)の発生を防止または除去する必要がある。したがってイナートガス、非酸化性ガス、あるいはフラックスなどで溶融金属を保護しなければならない。しかし抵抗溶接では加熱がきわめて短時間なので保護の必要がない。また Cr が炭素と結合して耐食性を低下しやすいので、炭素の吸収をできるだけ阻止しなければならない。このために炭素の発生源、フラックス中の有機物、溶接物表面の油やグリースなどを除いて溶接することが必要で、またアセチレン過剰炎などは注意して避けなければならない。

2. 被覆アーク溶接

(1) 概説: 被覆アーク溶接法はステンレス鋼の溶接にもつとも広く利用されている。アークは熱の集中がよく、ガス溶接にくらべてはるかに高速度で溶接ができるので、溶接後の歪(ひずみ)が少い利点があるが、板厚 1 mm 以下の薄板では溶落ちの危険があるので普通は用いられない。

溶接機としては、交流と直流の何れでも用い得るが、アークの安定性の点では直流逆極性(溶接棒が正極)が望ましい。とくに薄板には、このことが不可欠である。交流の場合には、高周波重畳の溶接機を用いるとアークの安定性が増す。

(2) 溶接棒: 溶接棒としては、ステンレス鋼の心線に、フラックスを被覆した棒が用いられる。溶着金属の化学成分は原則として、母材の組成になるべく近いも

表9 ステンレス鋼の溶接難易比較表

区 分	溶 接 方 法	マルテンサイト系	フェライト系	オーステナイト系	析出硬化系	概略適用板厚
		Cr 鋼	高 Cr 鋼	Cr-Ni 鋼	Cr-Ni 鋼	(mm)
溶 融	被 覆 ア ー ク TIGイナートガスアーク MIGイナートガスアーク	B~C B B	B B B	A~B A A	A~C A~C A~C	t > 0.8 0.5~3 t > 3
	サブマージドアーク 原子水素アーク ガス	B B C	B B C	B A~B B	B~C A~C B~C	t > 6 0.3~3 t < 1
ろ う 付 け		C	C	B	B	t < 6
抵 抗	ス ポ ッ ト シ ー ム フ ラ ッ シ ュ	B C A	A B A	A A A	A~B A~B A~B	0.15~3 0.15~3 0.25~15
ガ ス 圧 接		B~C	B~C	B	B~C	—

備考 A…最速…比較的容易にすぐれた溶接部が得られ、広く実用化されている。
 B…やや適…幾分困難であるが注意して実用化されている。
 C…難…特殊な注意を必要とし、まれにのみ使用される。

のが望ましい。しかし溶接割れ、耐食性、熱処理の要否高温使用条件などの観点から、たとえば表2に示したように異種材料が選ばれることもある。標準としては、すでに表2, 3 および4に示した組合せが望ましい。なおTi入りの被覆アーク溶接棒では、アーク中でTiが焼損するので実用化できないから、321型(18-8 Ti)母材の溶接にはCb入りの347型被覆アーク溶接棒を用いる。純Cr系溶接棒の多くは、その溶着金属が溶接のままでは硬くて脆いので溶接前の予熱と後熱が望ましい。もし溶接後の後熱が行なえないときは代りに延性の優れたCr-Ni系オーステナイト溶接棒を用いる。

わが国では1959年現在ではオーステナイト系ステンレス鋼被覆アーク溶接棒のみが、JIS Z 3221に規定されている。これは米国AWS規格E308, E347……に相当して、D308, D347……と規定されている。棒径は1.6~6mmで、その溶着金属の化学成分と機械的性質は表10のようである。この規格では全溶着金属の化学分析試験、引張試験および硝酸と硫酸に対する腐食試験のほか突合せ継手の型曲げ試験とT型すみ肉溶接試験(断面試験)が規定されている。また棒の呼び方は、棒の種類、種別(被覆の種類)、棒径および長さにより

D316—15—3.2φ×350
種類 種別 棒径 長さ

のごとくあらわす。このうち種別としては、

15……DC逆極性用・全姿勢用としては棒径4mm以下、被覆はカルシウムまたは他のアルカリ土金属の化合

物を多量に含むいわゆるライム型(lime type)である。

16……AC用であるがDCにも使用できる。全姿勢用としては棒径4mm以下が使用される。被覆はライム型またはチタニヤ型(titania type)。特にAC溶接のアーク安定化のためにカリウムのようなイオン化しやすい物質を含む。

25……DCの下向用で水平すみ肉溶接にも用いられる。被覆は鉍物質を含み多量のTiO₂からなるチタニヤ型が大部分である。

26……ACの下向用であるがDCにも用いられる。被覆材はTiO₂が多い。

溶接棒は使用前にオーステナイト系では150~200°C、純Cr系では300~350°Cに1時間乾燥して用いる。

(3) 継手の準備 : 被覆アーク溶接に対する継手の標準開先形状を図22に示す²²⁾。板厚約5mmまでは板端を直角に切断した

I型開先を、それ以上の厚みにはV型、U型、X型、H型などの開先を用いる。

普通はセン断、または切削によつて開先加工を行なう。ルート間隔は狭過ぎると溶込み不良を招き、広過ぎるとビードの肉

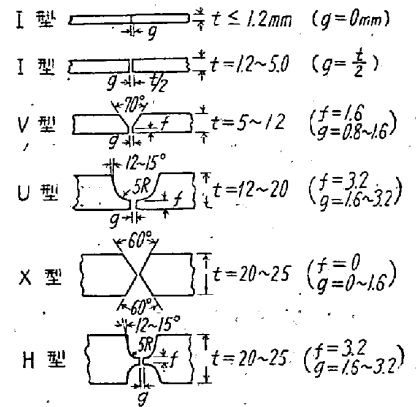


図22 ステンレス鋼の被覆アーク突合せ溶接継手形状²²⁾

表10 オーステナイト系ステンレス鋼被覆アーク溶接棒規格 (JIS Z3221-1957)

種類	溶着金属の化学成分(%)										引張試験	
	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Cb+Ta	Mn	Si	P	S	引張強さ kg/mm ²	伸び(%) (2')
D308	0.08以下	18.00 ~21.00	9.00 ~11.00	—	—	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	56	35
D308 L	0.04以下	18.00 ~21.00	9.00 ~12.00	—	—	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	52	35
D309	0.15以下	22.00 ~25.00	12.00 ~14.00	—	—	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	56	35
D310	0.20以下	25.00 ~28.00	20.00 ~22.00	—	—	—	2.50 以下	0.75 以下	0.030 以下	0.030 以下	56	30
D316	0.08以下	17.00 ~20.00	11.00 ~14.00	2.00 ~2.75	—	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	56	30
D316 L	0.04以下	17.00 ~20.00	11.00 ~16.00	2.00 ~2.75	—	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	52	35
D316 Cu	0.08以下	17.00 ~20.00	11.00 ~14.00	1.20 ~2.75	1.00 ~2.50	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	56	30
D316 Cu L	0.04以下	17.00 ~20.00	11.00 ~16.00	1.20 ~2.75	1.00 ~2.50	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	52	35
D317	0.08以下	18.00 ~21.00	12.00 ~14.00	3.00 ~4.00	—	—	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	56	30
D347	0.08以下	18.00 ~21.00	9.00 ~11.00	—	—	8×C% ~1.00	2.50 以下	0.90 以下	0.040 以下	0.030 以下	56	30

厚が小となつて割れやすかつ溶け落ちやすくなる。

溶着金属の耐食性を損じないためにはその中に炭素の吸収あるいは不純物の含有を避ける必要上、継手付近はきれいに脱脂しなければならない。それにはトリクロルエチレン、ガソリン、ベンジン、中性石鹼あるいはその他の化学薬品を用いて洗い、または油気のないステンレス鋼製の細毛ワイヤーブラシで表面をクリーニングすることが重要である。

(4) 治具と固定

具：ステンレス鋼の溶接部には図23に示すような厚さ約12mmの銅製の裏あて金（中央に浅い溝つき）を密着させるこ

とが望ましい。また治具や固定具を使用して被溶接物を強く拘束したままで溶接すれば歪が少くなる。もし固定具が用いられないときは、継手の仮付けを行なう。その間隔は厚さ5mmの板には150~200mm毎に、また薄板には19~25mm間隔にとる。仮付は本溶接のビード中によく溶込むことが必要であるが、これは中々困難なので重要な継手では本溶接前に仮付けを少しずつ除いて溶接した方がよい。なるべく開先面には仮付しないでストロングバックその他の固定具で左右の開先部材を位置ぎめする方がよい。

(5) 溶接条件：オーステナイト系ステンレス鋼の突合せ溶接条件を表11(a, b)に示す^{22,23)}。直径5mm以上の溶接棒では溶着金属にマイクロ割れといちじるしい気孔とを生じやすいので、普通は用いない。オーステナ

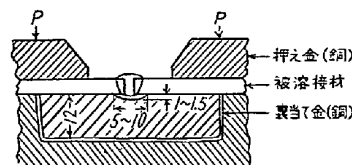


図23 裏あて金の利用
(特に薄板用)

イト系溶接棒では一般に過大なアーク電流やウィーピング操作を用いると溶接割れを起しやすいので、比較的小電流で速めの溶接を行なうのが常識であるが、あまり小電流あるいは高速になるとビード断面形状が細くなつてかえつて割れやすい。溶接中は前層のスラグをよく除き、またV, U, X, H型開先の裏溶接では、第1層を裏はつりしたのち溶接する必要がある。またアークの長さはなるべく短く保つ方がよい。

オーステナイト系ステンレス鋼の多層盛では溶接金属の結晶粒が連続的に成長して大きい柱状晶になる。この状態では溶接金属の延性が低下し、かつ高温マイクロ割れを生じやすいので、各層母にビード表面をピーニングして塑性変形させると、結晶粒が微細化されて、粗大化が防げ、かつマイクロ割れの防止に好都合である。溶接完了後は残留スラグおよびスパッタを完全に除去しなければならない。普通は可搬式グラインダを用いて、表面小孔(ピット)や粗いビード表面を除去する。もし光沢面が欲しいときはバフ研磨する。またビードの全盛を除去するには廻転式グラインダを使用する。

3. イナートガスアーク溶接

(1) 概説：イナートガスアーク溶接法(TIGとMIG)は何れもステンレス鋼の溶接に広く利用されている。イナートガスによるアークの保護は、被覆アーク溶接の場合よりもいちじるしく良好で、このためにチタン入りの321型溶接棒の使用が可能になる。溶接棒としては裸のロッド(rod)をTIG用に、ワイヤ(wire)をMIG用使用する。その種類は全溶着金属の化学成分によつて規定されており、母材の種類に対する組合せはほぼ被覆アーク溶接棒の場合(表2~4)に等しい。

表 11(a) オーステナイト系ステンレス鋼の被覆アーク突合せ溶接条件 (その1)²²⁾

板 厚 (mm)	層 数	溶接棒径 (mm)		棒 径 (mm)	棒消費量 (kg/m)	溶 接 電 流 (A)		アーク電圧 (V)
		第1層	次層以下			下向と水平	立向と上向	
0.40	1	1.2	—	0.8	0.07	8~15	8~15	17~19
0.56	1	1.2	—	1.2	0.09	15~35	15~25	18~21
0.80	1	1.2	—	1.6	0.15	30~60	25~40	20~23
1.6	1	1.6	—	2.4	0.27	50~100	45~65	22~25
2.1	1	2.4	—	3.2	0.45	70~130	70~95	23~26
3.2	1	3.2	—	4.0	0.74	100~170	100~125	24~27
	2	2.4	2.4	4.8	1.12	150~200	130~145	24~28
4.8	1	4.0	—	6.4	1.78	200~290	不 可	26~30
	2	3.2	3.2	7.9	2.23	250~400	不 可	28~32
6.4	2	4.0	4.0					
9.5	2	4.0	4.8					
	3以上	4.0	4.0					
12.7	3	4.0	6.4					
	4以上	4.0	4.0					
15.9	4	4.0	7.9					
	5以上	4.0	4.0					

表 11(b) オーステナイト系ステンレス鋼の被覆アーク突合せ溶接条件 (その2) ²³⁾

板厚 (mm)	開先形状	姿勢 [*] 勢	層数	開先寸法		溶接		溶接棒		備考
				すきま C mm	肩 f mm	電流 A	速度 mm/mn	径 mm	消費量 g/m	
6		F V	3	0~2	0~2	110~140 80~100	120~180 60~80	4 3*2	300~400 400~500	裏はつり
12		F V	5 (4:1) 4 (3:1)	0~2	0~2	110~140 80~100	100~200 40~80	4 3*2~4	1500~1600 1600~1700	裏はつり
22		F V	13 (9:4) 10 (6:4)	0~2	—	110~140 80~110	100~200 40~80	4 3*2~4	3600~3800 3800~4000	裏はつり
6		F V	1 1	0~1 0~1	1~1.5 1~1.5	110~140 80~100	100~150 40~80	4 3*2~4	300~400 400~500	第1層 TIG 溶接 アルゴン 裏当て
6		F V	3 3	4~6	—	110~140 80~110	100~150 40~80	4 3*2~4	400~500 500~600	裏当て金
12		F V	10 6	4~6	—	110~140 80~110	60~150 40~80	4 3*2~4	1600~1700 1800~1900	裏当て金

(註) * 溶接姿勢 F は下向, V は立向.

表12に示す米国 AWS 規格では, R を付して例えば, ER 308, ER 347 と呼び, それぞれ被覆アーク棒の E 308, E347...に相当させている.

(2) TIG 溶接: ステンレス鋼の TIG 溶接には直流正極性(電極が負)が最善である. 逆極性では電子衝撃によりタングステン電極棒が過熱され, タングステン粉末が溶接金属内に混入してタングステン巻き込みを生ずるので耐食性が見地から好ましくない. これに対して, 正極性では電極の過熱が少なく, 母材が速やかに加熱され, ビード巾も小さいので, 溶接金属はその赤熱脆性域を急冷される結果高温割れを生じ難い.

TIG 溶接の電極としては純タングステン棒のほかに Th 入り W (thoriated tungsten 俗称トリタン, 1~2% の ThO₂ 入り) が用いられる. トリタンは電極の

温度が比較的低くても電子放射能が優れていて, アークの安定とアークの発生がより安易にでき, また電極棒の消耗も少い. 12~15A の小電流においてもアークが安定なので薄板の溶接に適している. ステンレス鋼の TIG 溶接用の突合せ継手形状を図24に示す²²⁾. I 型開先は板厚 5mm 以下に用いられる. また薄板用には図25の裏あて金を用いられる. 薄板の場合には, 開先の正確な密着が必要で例えば厚さ 0.35mm の板では 0.75mm 以上の隙間があると溶落を生ずるので, 板端を曲げて拝み合せにしたフランジ継手が用いられる. ステンレス鋼の TIG 溶接では, 第1層の裏面を美しく保つには裏当金やイナートガスで裏面をシールドする必要がある. 裏当金は薄板の溶落を防ぐ目的にも適している. 直流 TIG 溶接に用いる治具や固定具にはアークブロー (磁気吹

表12 イナートガスアーク溶接用ステンレス鋼裸溶接棒 (AWS A5・9)

AWS-ASTM 種 類	化 学 成 分 (%)						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cb+Ta
ER 308	0.08以下	1.0~2.5	0.60以下	19.5~22.0*	9.0~11.0	—	—
ER 308 L	0.03以下	〃	〃	19.5~22.0*	9.0~11.0	—	—
ER 309	0.12以下	〃	〃	23.0~25.0	12.0~14.0	—	—
ER 310	0.08~0.15	〃	〃	25.0以上	20.0以上	—	—
ER 316	0.08以下	〃	〃	18.0~20.0	12.0~14.0	2.0~2.5	—
ER 316 L	0.03以下	〃	〃	18.0~20.0	12.0~14.0	2.0~2.5	—
ER 317	0.08以下	〃	〃	18.5~20.5	13.0~15.0	3.25~4.0	—
ER 330	0.15~0.25	〃	〃	15.0~17.0	34.0以上	—	—
ER 347	0.08以下	〃	〃	18.5~21.0	8.5~10.5	—	10×C以上 1.00以下
ER 410	0.07~0.12	0.6 以下	0.50以下	12.0~14.0	0.6 以下	0.6 以下	—
ER 420	0.25~0.40	〃	〃	12.0~14.0	0.6 以下	—	—
ER 430	0.10以下	〃	〃	15.5~17.0	0.6 以下	〃	—
ER 502	0.10以下	〃	〃	4.5~6.0	0.4 以下	0.45~0.65	—

注) (イ) P, Sは何れも 0.03 以下.

(ロ) *.....Cr は Ni×1.9 以上.

(ハ) 化学分析は上表の元素につき行う. もし他の元素が混入している形跡があれば, これら他の不純物の合計量が 0.70% 以下であること.

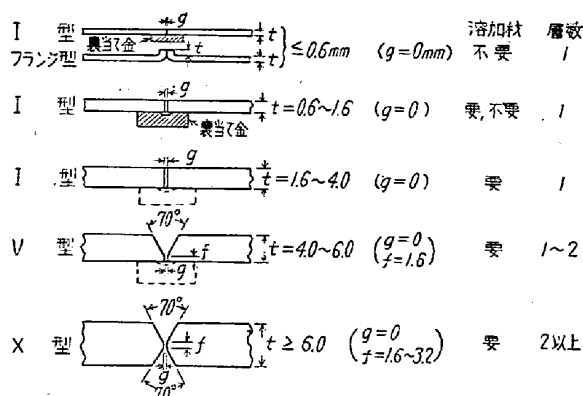
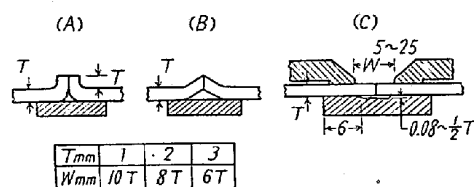
図24 オーステナイト系ステンレス鋼の TIG 突合せ溶接継手形状²²⁾.

図25 ステンレス鋼薄板用 TIG 継手と裏あて

き)を防ぐために非磁性材(一般に銅合金)を用いる方がよい. 磁性ある Cr 鋼を溶接する場合には継手の両端に同質の付足片(ほぼ同じ厚さで広さ100×50mm程度)をつけると磁気吹きが防げる.

TIG 手溶接条件の1例として, オーステナイト系ス

表 13(a) オーステナイト系ステンレス鋼の手動 TIG 溶接標準条件 (その1)²²⁾

板 厚 (mm)	タングステン 電 極 径 (in)	溶接棒直径 (mm)	シールドガス消費量 (f³/h)		溶 接 電 流 (A)		アーク電圧 (V)	溶 接 速 度 (in/mn)	
			ヘリウム	アルゴン	ヘリウム	アルゴン		ヘリウム	アルゴン
0.5	1/16, 3/32	—	15~20†	8~15	15~30	20~40	15	4~15	5~15
0.8	3/32	1.6*	15~20†	8~15	40~50	50~80	15	15~20	5~15
1.6	3/32, 1/8	1.6	15~20	8~15	80~100	90~170	13~15	20~25	5~20
2.4	1/8, 3/16	1.6	20~25	10~20	120~140	150~250	13~15	10~25	5~20
3.2	1/8, 3/16	1.6, 2.4	20~25	10~20	150~180	175~350	10~12	8~20	8~15
4.0	5/32	2.4	25~30	10~20	180~200	225~400	10~12	6~15	6~12
4.8	3/16	2.4	25~30	15~20	200~225	250~450	10	6~15	5~12
5.6	3/16	3.2	25~30	15~25	—	250~500	—	—	5~10
6.4	3/16	3.2	25~30	15~25	—	300~500	—	—	4~10
7.9	3/16	3.2	25~30	15~25	—	325~500	—	—	3~8
9.5	3/16	4.8	25~30	15~25	—	350~550	—	—	3~8
12.7	3/16	4.8	25~30	15~25	—	375~600	—	—	3~6

* 普通溶接棒を用いない. † アルゴンの方が望ましい.

表 13(b) オーステナイト系ステンレス鋼の手動 TIG 溶接標準条件 (その2) ²³⁾

板厚 mm	開先形状	溶接 姿勢	層数	開先寸法		電極径 mm in	溶接 電流 A	溶接 速度 mm/min	溶加棒		アルゴン		備考
				スキ マ c mm	肩 f mm				径 mm	消費量 g/m	流量 l/min	口径 mm	
6		F	3 (2:1)	0~2	0~2	2.4 ~3.2	150~200	100~150	3.2~4	300~350	6~10	11	裏はつり
		V	2 (1:1)				150~200	80~120	3.2~4	300~350	6~10	11	
6		F	2 (1:1)	0~2	0~2	2.4 ~3.2	180~230	100~150	3.2~4	300~350	6~10	11	裏当て金
		V	2 (1:1)				150~200	100~150	3.2~4	300~350	6~10	11	
12		F	6 (5:1)	0~2	0~2	2.4 ~3.2	150~200	150~200	3.2~4	1400 ~1600	6~10	11	裏はつり
		V	8 (7:1)				150~200	150~200	3.2~4	1500 ~1700	6~10	11	
12		F	6	0~2	0~2	2.4 ~3.2	200~250	100~200	3.2~4	1400 ~1600	6~10	11~13	裏当て金
		V	8				200~250	100~200	3.2~4	1500 ~1700	6~10	11~13	
12		F	10 (6:4)	0~1	—	2.4 ~3.2	200~250	100~200	3.2~4	2500 ~2800	6~10	11~13	裏はつり
		V	12 (8:4)				200~250	100~200	3.2~4	2600 ~2900	6~10	11~13	
6		F	3	0	2	2.4 ~3.2	140~160	120~160	—	—	6~10	11	ガスバッキング
		V	3				150~200	120~150	3.2~4	300~350	6~10	11	
6		F	3	—	—	1.6 2.4 ~3.2	110~140	110~140	2.6	—	16	6~8	インサート溶接
		V	3				200~250	80~150	3.2~4	—	6~10	11	
6		F	3	3~5	—	2.4 ~3.2	180~220	80~150	3.2~4	400~500	6~10	11	裏当て金
		V	3				150~200	80~150	3.2~4	400~500	6~10	11	
12		F	6	3~5	—	2.4 ~3.2	180~220	50~120	3.2~4	1600 ~1800	6~10	11	裏当て金
		V	8				150~200	50~120	3.2~4	1600 1800	6~10	11	

ステンレス鋼に対するものを表 13 (a, b) に示す^{22,23)}。

TIG 溶接の溶込みは溶接入熱〔(電圧×電流)/(速度)〕とともにほぼ直線的に増加する。

TIG 溶接の重要な応用として、ステンレス鋼パイプまたは圧力容器の突合せ第一層の溶接がある。小径管では裏側から溶接できないので、表側から溶接したとき裏波が内面に美しくあらわれなければならない。従来は図 26(a) に示すような共金の裏あてリング(backing ring)を使用してこれを一部溶着していたが、リングとパイプの間に腐食性物質が侵入して、すきま腐食を促進したり、またルート割れを起しやすい欠点があった²³⁾。そこ

で裏あてリングを除く工夫として、図 26(b) のような密着 U 型開先を TIG トーチで溶接棒なしに溶接する方法²⁴⁾、または(c)のようにルート間隙に細いインサートリング(insert ring)を挿入してこれを完全に溶着する方法²⁵⁾、または(d)図のように特殊の開先を利用して TIG トーチで溶接する方式²⁶⁾などがある。これらの TIG 第 1 層溶接に際しては、パイプの内面にもアルゴンガスを満して裏波を保護する必要がある。

(3) MIG 溶接 : MIG 溶接は普通は 1.6mm または 2.4mm の電極線を用いて板厚約 3mm 以上の厚板に好んで用いられる。最近では直径 0.4mm 程度の細

径線を用いる MIG 豆トーチが厚さ 1 mm の薄板に利用されている。

MIG 溶接は熱の集中が特に良好で溶接速度がきわめて大きいので、304 型ステンレス鋼(C 0.08%以下)の熱影響部では炭化物の粒界析出は、ほとんど認められないが、302 型 (C=0.08~0.20%) では幾分

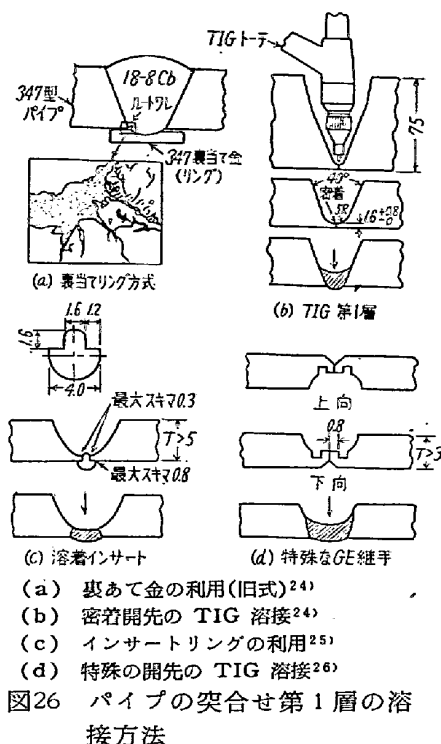


図26 パイプの突合せ第1層の溶接方法

析出が起る。MIG 溶接の大きい利点は、電極線の化学成分が、ほとんどそのまま (98%) 以上溶着されることである。これは耐食性を重視するステンレス鋼には特に重要である。ただし Ti と Al の移行率はやや低下し、Ti では 60~85% である。なお普通の被覆アーク溶接では Ti はほとんど焼損して移行しない。

ステンレス鋼の MIG 溶接ではシールドガスとして純アルゴンを用いるよりも、2~5%の酸素をアルゴン中に添加したものではアークの安定性はるかによい。この酸素をリンデ社ではシグマ級 (sigma grade) という。

MIG 溶接の突合せ継手形状は板厚 5mm までは I 型密着開先で、それ以上の板厚にはルート面 0 で内角 60° の V 型開先あるいは U 型開先が用いられる。MIG 溶接条件はたとえば表 14 (a, b) のようである。手溶接では右手にトーチを持ち先端を約 10 度先行させつつ左進溶接することが推奨されている。厚さ 6mm 以上の場合は、トーチを溶接線に平行に前後に動かしつつ溶接

する方がよい。ノズル先端と母材との間隔は約 12mm 程度としアークの長さは 6 mm ぐらいが適当である。向上や水平溶接では溶融池をコントロールするためにアークが短くなり勝ちであるが、その結果溶接金属内に気泡が発生しやすくなる。

(4) アークスポット溶接 : TIG 溶接の一つの変型としての図 27 に示すような重ね継手のアークスポット溶接法がステンレス鋼にも応用できる。これは片側からタングステントーチで押えつけてアークを発生し

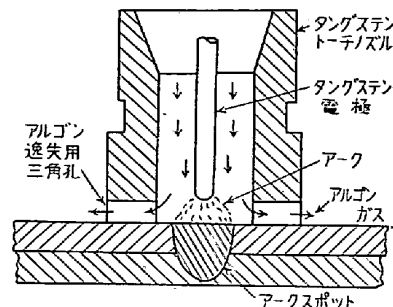


図27 TIG アークスポット溶接²⁷⁾。

1 例として板厚 2

mm の 18-8 Cr-Ni 鋼板に対しては、アーク時間 2~3 秒、アーク電流 250A が用いられ、1 点のせん断強さは 450~1350 kg ぐらいになり、抵抗溶接したものと同程度の強さである。電極には Th 入り W が適当である。

4. サブマージドアーク溶接

この方法は普通は中厚以上の厚板に応用されるが、ときには 1.6mm の薄板にも用いられる。車両用の外板には厚さ約 2mm の薄板にこれが有効に利用されている。オーステナイト系ステンレス鋼のうち Cb や Ti で安定化した AISI 347 型や 321 型のサブマージドアーク溶接ではビードにも割れを生じやすいのであまり用いられない。しかしマルテンサイト系ステンレス鋼には溶接入熱が大きいので予熱温度が低くてすむ (約 150°C) 利点がある。

フラックス (コンポジション) としては、Mn と Si の含有量が少く、Cr と Ni の成分が適当に高いものが用いられる。心線の Cr は 10~15% 焼損するので、これを補うようにフラックスの成分が工夫されている。普

表14(a) オーステナイト系ステンレス鋼板の突合せ MIG 溶接標準条件 (その 1)²²⁾

板 厚 (mm)	溶 接 姿 勢	電極線直径		シールドガス		アーク電流 (A)	アーク電圧 (V)	送線速度* (in/mn)	溶接速度 (in/mn)	溶着速度 (lb/h)
		(in)	(mm)	種 類	流 量 (f³/h)					
3.2~6.4	全	1/32	0.79	ヘリウム	20~30	110~150	—	220~310	—	3.7~5.2
6.4~25.4	立, 上	1/32	0.79	アルゴン	20~30	110~140	—	220~260	—	3.7~4.3
12.7~25.4	立, 上	3/64	1.19	〃	〃	140~180	—	150~200	—	4.1~5.3
4.8~9.5	下, 水平	3/64	1.19	〃	30~40	190~310	—	210~440	—	5.7~11.3
6.4	下, 水平	1/16	1.59	〃	〃	280~350	25~27	240~330	11~13	12.6~17.3

* 酸素入りアルゴンを使用すれば速度は約 25~50% 増加。

表 14(b) オーステナイト系ステンレス鋼の MIG 溶接標準条件 (その 2)²³⁾

板厚 (mm)	開先形状	溶接 姿勢	層数	開先寸法		溶電 A	溶接 電圧 V	溶接 速度 mm/mn	ワイヤ 径 mm	送り速度 mm/mn	アルゴン流量		備 考
				スキ マ mm	肩 f mm						l/mn	cfh	
6		F	2 (1:1)	0~2	—	220~260	23~26	300~450	1.6	4,000 ~5,000	14~18	30~40	裏はつり
		F	2	0~2	—	220~260	23~26	300~450	1.6	4,000 ~5,000	14~18	30~40	裏当て金
		F	2 (1:1)	0~2	0~2	220~260	23~26	300~450	1.6	4,000 ~5,000	14~18	30~40	裏はつり
		F	2	0~2	0~2	220~260	23~26	300~450	1.6	4,000 ~5,000	14~18	30~40	裏当て金
12		F	5 (4:1)	0~2	0~2	240~280	24~27	200~350	1.6	4,500 ~6,500	14~18	30~40	裏はつり
		F	4	0~2	0~2	240~280	24~27	200~350	1.6	4,500 ~6,500	14~18	30~40	裏当て金
22		F	11 (7:4)	0~1	—	240~280	24~27	200~400	1.6	4,500 ~6,500	14~18	30~40	裏はつり
6		F	2	—	—	220~260	23~26	300~450	1.6	4,000 ~5,000	14~18	30~40	ガスバック ンゲインサ ート (TIG溶接)
		F	2	3~5	—	220~260	23~26	300~450	1.6	4,000 ~5,000	14~18	30~40	裏当て金
12		F	4	3~5	—	240~280	24~27	200~350	1.6	4,500 ~6,500	14~18	30~40	裏当て金

表 15 オーステナイト系ステンレス鋼のサブマージドアーク溶接標準条件²³⁾

板 厚		開先形状	開先寸法 mm				溶着 順序	電流 A	電圧 V	速 度 mm/mn	心線径 mm
mm	in		A	B	N	θ					
6.4	1/4		—	—	3.2	60	—	725	30	700~750	4.8
9.5	3/8		1.6	1.6	6.3	90	1 2	525 575	30 30	510 460	4.8 4.8
12.7	1/2		3.2	3.2	6.3	90	1 2	700 900	33 35	460 460	4.8 4.8
15.9	5/8		4.8	4.8	6.3	90	1 2	700 900	33 35	410 310	4.8 6.4
19.1	3/4		6.4	6.4	6.3	90	1 2	700 950	33 35	380 310	6.4 6.4
22.2	7/8		7.9	6.4	7.9	90	1 2	715 1025	33 35	380 310	6.4 6.4

通はコンポジション、グレード 80、粒度 20×Dを用いる。最近ではステンレス鋼用に新しい種類のボンドフラ

ックス (bonded flux) が成功を収めつつある。これを用いると、剝離性のよいスラグができ、溶接金属の性質

もよいといわれている。

サブマージドアーク溶接では溶込みが深いので、被覆アーク溶接の場合よりもグループは小さくてよい。ルート間隔は溶落を防ぐために一般に0にとる。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接条件と開先形状を表15に示す。開先形状は炭素鋼の場合と同一でよく、溶接電流は約20%少くする。板厚12mmまでは1層ですむが、できれば2層に分けた方が割れの危険が少ない。なお溶接用心線についてはイナートガスアーク溶接と類似のものが用いられる。軟鋼や低合金高張力鋼の耐食性を増すためその表面にステンレス鋼の肉盛(surfacing)を行なうには2本の電極間にアークを発生させるシリーズアーク法(series arc welding)がよく用いられる。この方法では溶込みが10~15%の僅かですみ高能率の肉盛が可能となり、原子炉や化学工業の圧力容器内面のライニングに用いられる。

5. ガス溶接

酸素アセチレンガス溶接は普通は板厚約1mm以下の薄板に用いられる。もちろんこれ以上の厚さの板にも利用できるが、被覆アーク溶接やイナートガスアーク溶接に比べると、はるかに利用率が少ない。ステンレス鋼のガス溶接では裸の溶接棒とフラックスを用いる。棒の化学成分には母材よりもクロムが1~1.5%多目のものを選び、ガス炎としては中性あるいは僅かに還元性の炎を用いる。酸化炎はCrを酸化し溶接金属中の気孔の発生原因となるから避ける方がよい。中性炎からでも溶着金属中に0.02%程度の炭素の吸収が生ずるからいちじるしい還元炎では炭化物の粒界析出を助長する結果となり、耐食性が低下する。とくにガス溶接では冷却速度が遅いので炭化物の粒界析出が多くなりやすい。ガス溶接後は残留フラックスやスパッタを直ちに除去するためのクリーニングが必要で、例えば溶接直後温石鹼水で洗いさらに清水で洗滌するか、またはその他の清浄方法を用いる。ガス溶接の継手形状としては、図28を用いる²²⁾。溶接条件の一例として表16を示す²²⁾。薄板のガス溶接ではひずみがいちじるしいので治具や固定具で確実に母材を押える必要がある。また仮付けの間隔を小(板厚1mm以下では約20mmごと)にする。

ガス溶接では左進(前進)溶接がよい。この方法ではトーチを右手に左向に進行するから、母材を予熱しつつ溶接することになって溶融が容易になると同時に溶接金属の冷却が後退溶接の場合よりも速くなる。溶接棒は母材

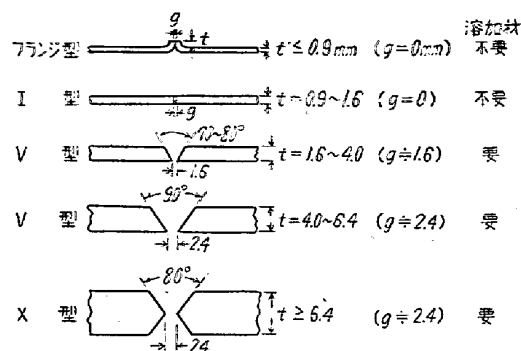


図28 オーステナイト系ステンレス鋼のガス溶接継手形状²²⁾。

表 16 オーステナイト系ステンレス鋼の酸素アセチレン溶接条件²²⁾

板 厚 (mm)	溶接棒 直 径 (mm)	火口径 (mm)	ガス消費量 f³/h		溶接速度 (m/h)
			酸 素	アセチ レ ン	
0.4	0.8	0.57	1.0 ~2.0	0.93 ~1.87	9.2
0.6	"	0.71	2.5 ~4.5	2.34 ~4.20	8.2
0.8	"	0.89	3.5 ~5.5	3.3 ~5.1	7.6
1.6	1.2	1.02	5.0 ~8.5	4.7 ~7.9	5.8
2.4	1.6	1.18	7.0 ~11.0	6.5 ~10.0	4.9
3.2	2.4	1.51	9.0 ~14.0	8.4 ~13.1	3.7
4.8	3.2	1.78	13.0 ~18.0	12.1 ~16.8	2.1
6.4	4.0	2.06	20.0 ~30.0	19.2 ~28.8	1.5

面から30~45°上方に傾け、ガス炎は溶接棒に直角にあてる。トーチはジグザグまたは回転運動を与えつつ溶接するが、溶接棒は真直ぐに送って溶かす。この際棒の先端を溶融面にくっつけてはいけぬ。ガス炎の白心の先端と母材との距離は1.6mm以上にとる。フラックスは普通はシリカ(SiO₂)系の粉末状であるから、水にといて、母材の接合面と溶接棒の表面にブラシで薄く塗布する。347型の溶接棒を用いるときは、とくに難溶性の酸化物を生ずるから市販のフラックスに20~25%の氷晶石をまぜて水でペースト状にしてこの中に溶接棒を侵して用いるとよい。

ステンレス鋼はガス圧接(gas pressure welding)できるが、予め接合面のクリーニングを行うことが重要で、かつ接着面の精度は軽く接触させたとき0.025mm以下の隙間がないようにする。(続く)