

討27

二相ステンレス鋼電縫溶接管の製造と品質特性

新日鐵(株)光技術研究部 ○小野山征生 渡部義広 志谷健才
光製鐵所 藤川琢磨 柏村英樹

1. 緒 言

二相ステンレス鋼は、高強度・高靱性を有し耐食性にすぐれた鋼管材料として、近年ラインパイプ分野での使用が増えつゝある。現在のところ、継目無鋼管およびアーク溶接鋼管が使用されているが、電縫溶接鋼管が製造できれば生産性が高く製造コストが安い点で有利である。さらに、溶接部組織が比較的容易に母材なみに近づけうることから、品質特性の点でもアーク溶接鋼管より優位になるとみられる。しかし、最大の技術課題として、溶接欠陥の耐食性への有害性を把握し、有害であればこれを防止することが必要である。この観点から、電縫溶接法により製造した二相ステンレス鋼の品質特性¹⁾、とくに海中ラインパイプを想定しての品質特性を調査し、特徴と技術課題をまとめた。

2. 実験方法

2.1 供試材の製造方法

供試素材は、電気炉・AOD・連続鑄造・熱間圧延工程により製造した22Crおよび25Cr二相ステンレス鋼6mm厚ホットコイルを用いた。その化学成分を表1に示す。電縫溶接には実機溶接造管機（サーマツール式高周波電縫溶接造管機）および実験室電縫溶接機を用い、表2に示す溶接条件で行った。実機では主としてOD 10 $\frac{3}{4}$ "×WT

Table 1. Chemical compositions of tested material

(wt.%)

No.	Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
1	22Cr steel	0.018	0.49	1.77	0.019	0.001	5.85	22.40	3.05	0.143
2	25Cr steel	0.038	0.60	0.61	0.015	0.001	7.09	24.50	2.93	0.160

Table 2. Electro-resistance welding conditions

Item	Condition
1) Strip thickness	6.0 mm
2) Welding speed	20 m/min
3) Heat in-put	2nd weld phenomena
4) Apex angle	2.5~7°
5) Upset length	1.2~4.5 mm
6) Shielding gas	Ar gas
7) Coolant for roll	N ₂ gas

0.250"管を、また実験室では6.0t×60W×4000 ℓ mm平板を得た。溶接条件については、衝合部の酸化物欠陥を抑制する目的から、溶接雰囲気、アプセット代および開先形状を変化させて実験し、材質の点からこれらの因子が許容される限界条件を求めた。溶接速度、入熱条件など上記以外の溶接条件は一定にした。

溶接後のすべての供試材は、1040~1080℃に加熱し水冷する溶体化処理を行い、ソルト処理と硝酸+弗化水素酸々洗によるデスケールを行った。このあと材質評価用に試験片を切出し、耐食性試験片は全面をエメリ紙#500研磨した。

2.2 材質評価方法

1) 電縫溶接部の性状調査；溶接部の管軸横断面において、フェライト(α)相およびオーステナイト(γ)相の面積率、相形状、組成等を測定するとともに、溶接欠陥の面積率、形状分布、組成を衝撃試験破面において測定した。組成分析は、EPMA・EDAX分析および電解抽出残渣のX線解析により行った。

2) 機械試験；常温における引張試験、硬度試験および低温シャルピー衝撃試験を行った。シャルピー試験では、5mmサブサイズの2mmVノッチ試験片を用いた。

3) 耐食性試験；ラインパイプ外面のもっとも苛酷な腐食環境を海水とみなし、塩化物溶液中の耐孔食性を、3.5% NaCl孔食電位試験（J I S G0577）および10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 孔食試験（A S T M G48A準拠）にて評価した。また、ラインパイプ内面の腐食環境のうち苛酷な条件は H_2S ガスを含むブラインとみなして3.5~20% NaCl+0.01~1.0atm H_2S 溶液中の孔食電位試験、応力腐食割れ試験を行った。このほか、耐粒界腐食性の評価として、シュトラウス試験およびヒューイ試験（A S T M E262）を行った。

3. 実験結果および考察

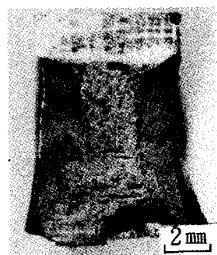
3.1 電縫溶接部の性状

1) 金属組織；溶体化处理後の母材部および衝合部の金属組織を写真1に示す。衝合部表面層のメタルフローが母材部とほぼ直角になっているものの、 α 相地に島状の r 相が分散する形態は母材と同じである。 α 相の量は、母材部45%に対し衝合部49%であり同レベルといえる。 α 相の主要元素をE P M Aにより分析したところ、22Cr鋼においても25Cr鋼においても母材部と衝合部は同成分であり、かつ相境界等での析出物もみとめられない。

2) 溶接欠陥；ある種の条件で溶接した場合には衝合部に溶接欠陥があらわれる。衝合部に2mm Vノッチを付けたシャルピー試験片を100℃で衝撃し、破面にあらわれる溶接欠陥について組成、形状分布を測定した。

溶接欠陥の形状は、写真2に一例を示すように、肉厚方向にのびた板状、棒状もしくは紡錘状のものが多く、E D A Xによる組成分析によれば、Cr, Si, Mn酸化物を主体とした酸化介在物である。

1) Weld defect



2) EDAX-profile

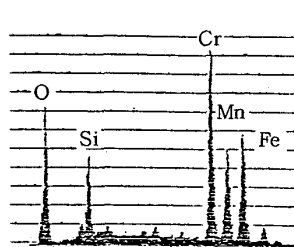


Photo-2. Weld defect of 22Cr duplex steel ER weldment

溶接欠陥の存在位置は肉厚中心部であることが多く肉厚端部には少ない。たとえば、溶接欠陥の多寡を欠陥面積率により表わすと、図1に示すように、欠陥面積率が高い場合には酸化介在物が肉厚方向に平均して存在し、低い場合には肉厚中央部に偏在している。

溶接欠陥の管軸方向の分布は、肉厚方向の場合と同じように、欠陥面積率が高い管ではバラツキが大きい、低い管では或る部分に局在する傾向がある。

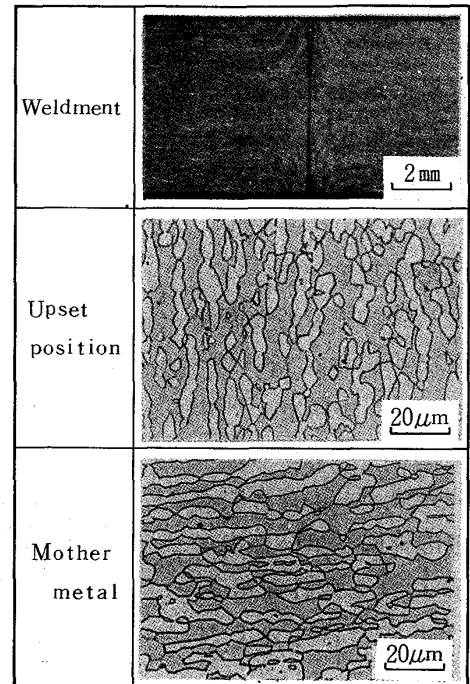


Photo.1. Metallographic structure of 22Cr duplex stainless steel ERW pipe.

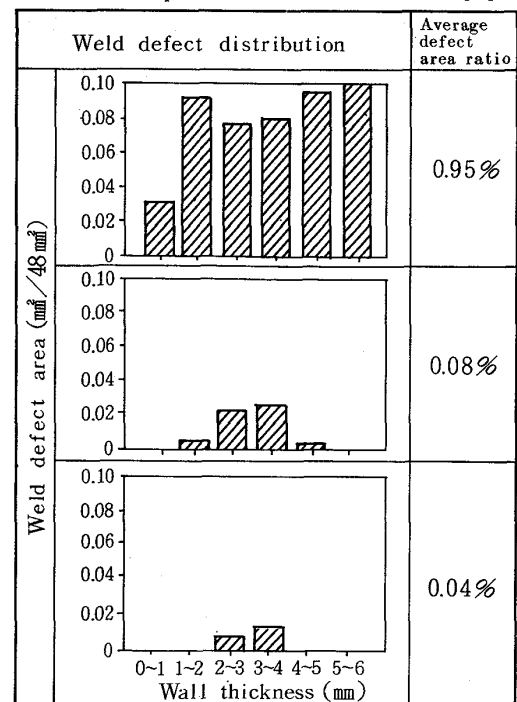


Fig.1. Weld defect distribution of 22Cr duplex stainless steel ERW pipe.

3.2 電縫溶接部の機械的性質

22Cr二相ステンレス鋼について行った引張試験、硬度試験および低温衝撃試験の結果をそれぞれ表3および図2に示す。引張特性は溶接法によらず母材部と溶接部とで同レベルである。これに対し、衝撃特性については溶接部が母材部よりやや劣る。しかし、いずれの部位でもその遷移温度は70℃以下であり、ラインパイプとしての要求特性は満足している。なお、密着偏平、押抜け、展開等の実用試験には合格する。

3.3 電縫溶接部の耐食性

1) 耐孔食性；3.5% NaCl溶液中の孔食発生電位 (V_{c100}) の温度依存性を図3に示す。電縫溶接部の孔食発生抵抗は溶接欠陥が存在しないかぎりにおいて母材と同等である。

オーステナイトステンレス鋼においては、圧延表面より端面の方が孔食感受性が高くなる経験があるが凝圧延端面が露出している二相ステンレス鋼電縫溶接部ではこの傾向は見出せなかった。アプセット加工およびその後の溶体化処理による再結晶が

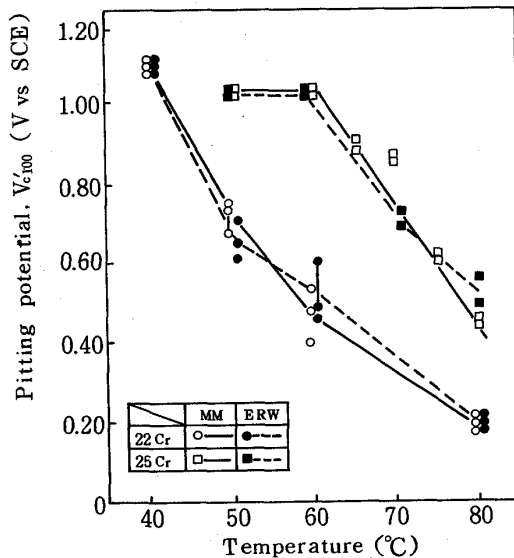


Fig. 3. Pitting potential of 22Cr and 25Cr duplex stainless steel in 3.5% NaCl solution

有効に作用したものと考えられる。 $FeCl_3$ 溶液中の腐食状況を図4に示す。22Cr鋼の限界孔食温度(CPT)は30℃、25Cr鋼のそれは55℃である。電縫溶接部のCPTは母材に劣らない。

2) NaCl+H₂S環境中の耐食性；ラインパイプ内面の腐食環境に近い条件として、3.5% NaCl+H₂S溶液中の孔食発生電位および20% NaCl+H₂S溶液中の耐応力腐食割れ(SCC)性を試験した。このうち孔食電位の測定結果を図5に示す。いずれの部位材料もH₂S分圧の影響を強く受けるが、電縫溶接部は母材部と同レベルの孔食電位を示す。22Cr鋼と25Cr鋼の差は孔食電位では現われているが、20% NaCl+H₂S、35~150℃の条件下でSCCを発生しない限界H₂S分圧の評価では差がない。

3.4 溶接欠陥の材質への影響とその低減

溶接欠陥のない電縫溶接部は、機械的性質も耐食性もラインパイプとしての材質が母材なみであろう

Table 3. Tensile properties of 22Cr duplex stainless steel ERW pipe

Property Position	0.2 Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv1kg)
Mother metal	560	780	31.8	253
Weldment	—	781	—	252

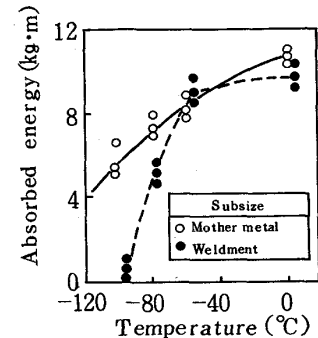


Fig. 2. Impact property of 22Cr duplex stainless steel ERW pipe

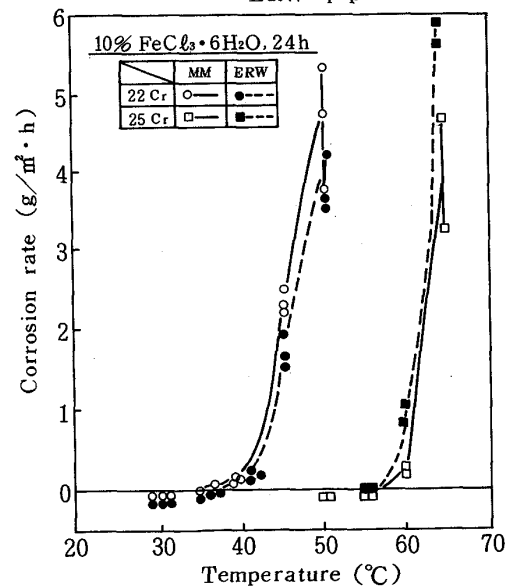


Fig. 4. Pitting corrosion resistance of 22Cr and 25Cr duplex stainless steel in $FeCl_3$ solution

ことを示した。次に、溶接欠陥が材質に与える影響を評価し、これを低減する製造技術を検討した。

- 1) 低温靱性への影響；欠陥面積率が高い（0.2%）電縫溶接部の低温靱性を評価したが、吸収エネルギー、遷移温度とも無欠陥溶接部と差が見出せなかった。
- 2) 耐食性への影響；溶接欠陥が被検面に露出すると孔食起点となり耐食性を阻害する。この現象は、3.5% NaClおよび3.5% NaCl+H₂S溶液中の孔食発生電位、FeCl₃溶液中のCPTのいずれにおいても認められるが、もっとも鋭敏にあらわれるのはFeCl₃試験のようにみられる。NaCl+H₂S溶液中の耐SCC性については、限界H₂S分圧を低下させるほどの影響は見出せなかった。しかし、孔食を生じたのちにSCCが進展するケースが多いことを考えなければならない。
- 3) 溶接欠陥の低減；溶接欠陥の肉厚方向分布は、図1に示したようにメタルフローの著しい外内表面層ほど少ない。実機電縫溶接管について、肉厚全断面と表面層1mm以内の欠陥面積率の関係を整理すると図6が得られ平均欠陥面積率が0.1%以下であれば表面層に欠陥は存在しないことが期待される。ここにおける限界平均欠陥面積率0.1%は経験値であり、溶接現象が変化した場合などには適用できないが品質評価における指標になりうると考える。

4. ま と め

- 1) 二相ステンレス鋼の電縫溶接部においては、圧延端面に近似のメタルフローが衝合部表面に現われるものの、 α 相と γ 相の相比およびそれぞれの組成は母材部と同等である。溶接欠陥が存在しなければ機械的性質も耐食性も母材部と同レベルである。

4. ま と め

- 1) 二相ステンレス鋼の電縫溶接部においては、圧延端面に近似のメタルフローが衝合部表面に現われるものの、 α 相と γ 相の相比およびそれぞれの組成は母材部と同等である。溶接欠陥が存在しなければ機械的性質も耐食性も母材部と同レベルである。

- 2) 微小酸化物の溶接欠陥が表面層に存在すると孔食感受性が高くなる。し

かし、溶接欠陥が肉厚中心部に存在しても表面層には存在しない溶接条件があり、これにより実地使用にたえる二相ステンレス鋼電縫溶接管の製造が可能となった。

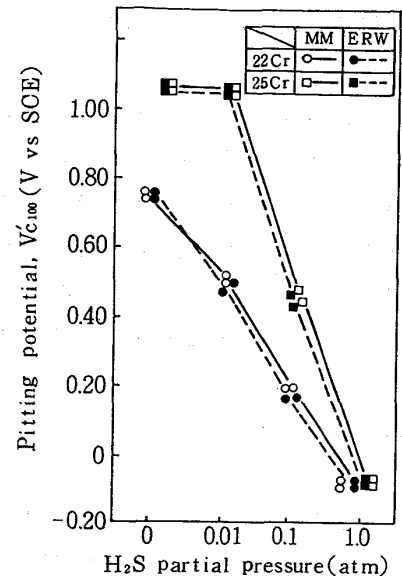


Fig 5. Pitting potential of 22 Cr and 25 Cr duplex stainless steel in 3.5% NaCl + H₂S solution

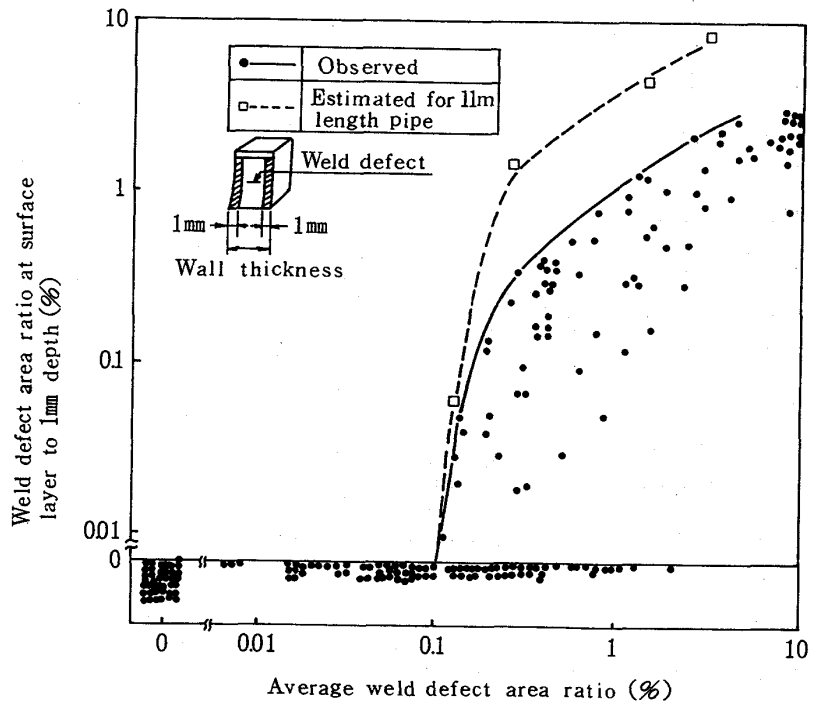


Fig.6. Relationship of weld defect area ratios on ER weldment between whole thickness and surface layer

【参考文献】 1) 渡部，池本ら；鉄と鋼，72（1986），S1142.