

討15 4電極サブマージーク溶接法の大径管製造への適用

川崎製鉄㈱ 技術研究所 ○山口忠政 志賀 厚 鎌田晃郎
千葉製鉄所 川端文丸 上垣達文

1. 緒言

UOEパイプの製造工程における内外面シーム溶接では、その溶接速度が生産性に直接結びついているため、通常2～3電極高速サブマージーク溶接法が採用されているが、溶接工程における処理能力は他設備よりも劣り、実際には複数の溶接ラインを設けてバランスをとっている。しかしながら、近年厚肉パイプの製造が増加する傾向にあるため従来にも増して溶接速度の向上が望まれている。現状のままの設備で溶接速度を上げるためには、十分な溶込み深さを確保する必要上1極当りの溶接電流も増す必要があるが、1極当りの電流には上限があり、それ以上の電流では良好なビードを得ることがむずかしいという問題点がある。

当社では従来3電極サブマージーク溶接方法によりUOEパイプの溶接を行っていたが、溶接速度の向上を目的としてこれを4電極化し、1極当りの溶接電流を大幅に変えることなくトータル電流を増やすことにより高速溶接を可能にした。本報告ではその検討経過について述べる。

2. 実用化に当たっての検討項目

多電極溶接ではアークの偏向、とくに最終極アークの振れ方向が最終ビード形状に大きく影響することが良く知られている¹⁾²⁾。このアークの偏向は各極電流およびアース電流による電磁力に起因しているため、高速溶接時にアンダーカットが無く、形状の良好なビードを得るためには電磁力を左右する電流位相関係(結線方式)を最適にする必要がある。

本検討においても最終極である第4電極アークに着目し、そこに作用する電磁力 F_{x4} をTable 1に示す溶接条件において理論的に算出し、 F_{x4} が広範囲に変化するようFig. 1に示した22結線についてV溝一層溶接を行い、その高速溶接性を調べた。なおアースは溶接スタート側にとった。また実用化に当たって各板厚毎の最適溶接条件を決めるため、4電極溶接における各電極のビード形成機能について検討した。

3. 検討結果および考察

3.1 電磁力 F_{x4} の計算

4電極溶接において、各電極電流およびアース電流により第4電極アークに作用する溶接方向の電磁力はFig. 2に示すモデルを用い、野村ら³⁾の式をModifyした(1)式より求めた。この場合電流はワイヤの延長線上を母材に向かって流れ、アース電流は母材表面上をアース方向に直線的に流れることを、またアーク長は一定であることを仮定している。

Table 1 Welding condition and wire arrangement used.

Elect. No	Current (A)	Voltage (V)	Extension (mm)	Wire Incli. (deg.)	Spacing (mm)
1st	1150	38	25	0	13
2nd	1050	42	25	15	13
3rd	900	42	30	30	13
4th	800	42	35	45	13

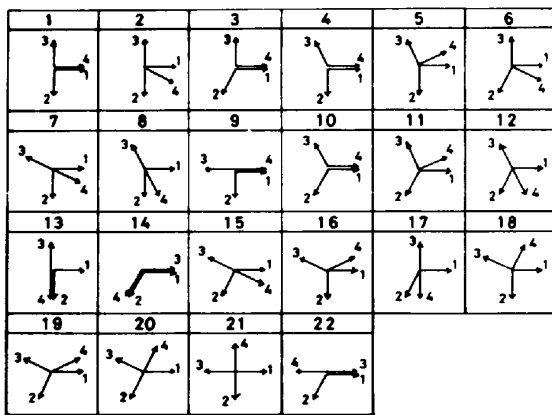


Fig. 1 Phasing sequences used for the experiments.

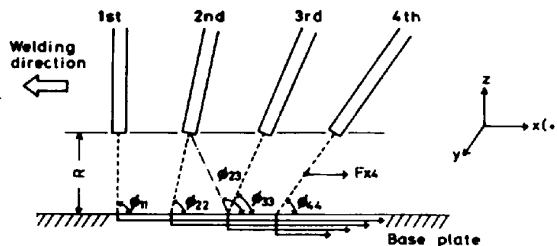


Fig. 2 Schematic model used for calculation of electromagnetic force

$$F_{xi} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi R} \left\{ \sum_{j=1}^4 I_j \cot \frac{\phi_{ij} - \phi_{jj}}{2} \sin \phi_{ij} \sin \phi_{ji} \cos \theta_{ij} - \sum_{j=1}^4 I_j (1 + \cos \phi_{ij}) \cos \theta_{ij} \right\} \dots (1)$$

ここで R は母材-ワイヤ溶融点間距離 (~アーク長), μ_0 は真空中透磁率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$), I_i は i 極電流実効値, θ_{ij} は I_i と I_j の電流位相差, ϕ_{ij} は電極傾度で決まる角度を表わしている。電磁力の方向は溶接進行方向を負記号で表示している。

Table 2 は実験に用いた 2 2 結線の F_{x4} 計算値を示したものである。

3.2 結線と溶接欠陥の関係

高速溶接において最も問題となる溶接欠陥はアンダーカットであることから各結線におけるアンダーカット発生率を, 焼成型フラックスを用いた 3 水準の溶接速度 (220, 240, 260 cm/min) で相対比較し, 結線の高速溶接性を評価した。アンダーカット発生率はアンダーカット長さの総和をビード長の 2 倍で割って求めた。

Fig. 3 が F_{x4} とアンダーカット発生率の関係を示したもので, 溶接速度にかかわらず, F_{x4} が $-25 \sim -15 \text{ N/m}$ となる結線でアンダーカットの発生率が最小となる。このことは第 4 電極アークが溶接進行方向に適度に偏向している場合にアンダーカットが抑制されることを意味している。第 4 電極アークが溶接進行方向に過度に振れ過ぎる場合には溶融金属が不規則に広げられ蛇行ビードとなり, いっぽう溶接進行方向への振れが小さかったり, あるいは溶接方向と逆方向に振れる場合にはアーク後方へ向う溶鋼流を阻止する力が無くなり凸状ビードとなってアンダーカットが発生しやすい。この傾向は溶接速度が大きくなるほど顕著に認められるので実用化に際しては適正な結線方式を選択することが重要である。Fig.4 は溶融型フラックスを用いたときの例であるが, Fig.3 同様 $-25 \leq F_{x4} \leq -15 \text{ (N/m)}$ の範囲でアンダーカットが抑制され, この範囲以外ではアンダーカットが発生しない場合でも蛇行ビードや凸状ビードとなり外観上好ましくないという結果が得られた。 F_{x4} は溶接電流が変化すると変動するが, その場合でも $-25 \leq F_{x4} \leq -15 \text{ (N/m)}$ の範囲でアンダーカットが抑制されることを確かめている。

以上の結果より Fig.1 中の No 8 ~ No 14 が適正結果と考えられる。

3.3 ビード形成における各電極機能

4 電極溶接の実用化に当って所定の溶込み深さが得られ, かつ表面および内部欠陥が発生しない最適溶接条件を選定するため結線方式を Fig.1 No 14 に固定し, ビード形成における各電極の機能を考察した。

Table 3 に示す V 溝に溶融型フラックスを用い, 第 1 電極から順次点弧して溶接を行ったときの各部所でのビード断面寸法を調べた結果の一例が Fig.5 である。この場合の各極電流比は $1/0.9/0.8/0.7$ と一定である。溶接速度の小さい厚

Table 2 Phasing sequences and electromagnetic force acting on the fourth arc

NO	θ_2 (deg)	θ_3 (deg)	θ_4 (deg)	F_{x4} (N/m)
1	-90	90	0	-43.0
2	-90	90	-30	-39.3
3	-120	90	0	-29.8
4	-90	120	0	-29.7
5	-90	120	30	-26.1
6	-120	90	-30	-26.0
7	-90	150	-30	-25.9
8	-90	120	-60	-25.6
9	-90	180	0	-16.4
10	-120	120	0	-16.4
11	-120	120	30	-16.4
12	-120	120	-60	-15.6
13	-90	90	-90	-15.3
14	-120	0	-120	-14.9
15	-120	150	-30	-12.7
16	-90	150	30	-12.7
17	-120	90	-90	-11.8
18	-90	150	60	-6.3
19	-120	150	30	-3.0
20	-120	150	60	-2.7
21	-90	180	90	11.1
22	-120	0	180	25.5

$\theta_2, \theta_3, \theta_4$ indicate phase angle between the first electrode current

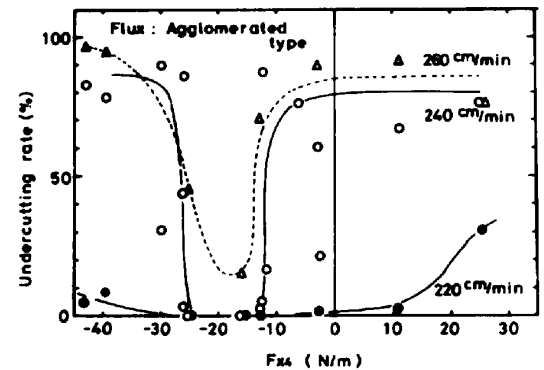


Fig.3 Effect of electromagnetic force acting on the fourth arc (F_{x4}) on undercutting rate.

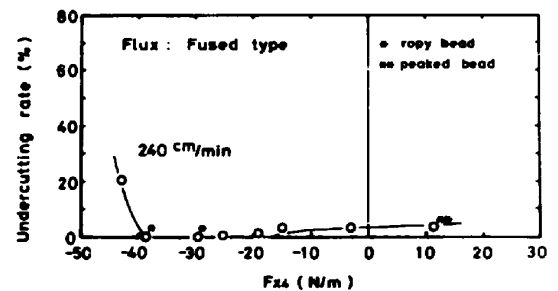


Fig.4 Effect of electromagnetic force acting on the fourth arc (F_{x4}) on undercutting rate.

Table 3 Configuration of V-groove and welding speed used

220 cm/min	120 cm/min	85 cm/min

物では溶込みは第1, 第2電極でほぼ飽和し, 第3, 第4電極はビード幅にのみ寄与する。元のV溝の深さを考慮すると第1電極と第2電極の溶込み深さに対する寄与率はほぼ等しく, 第2電極の機能も第1電極同様母材を掘削することにあると考えられる。この第2電極の機能は薄物で溶接速度が速くなってもほとんど変わらないが, 溶込みが飽和する位置は第3電極, 第4電極側へと次第に移動していく。これはアーク直下に存在する溶鋼の厚みが入熱量によって変化するためであり, 入熱量の小さい薄物では溶鋼厚みも小さく, 第3, 第4電極アークによる熱伝導あるいは掘削作用により溶込みが増加すると考えられる。

Fig.6は点弧法によるビード断面変化の一例であるが, 第1電極で形成されるビードはハンピングと, スラグ巻込みを伴った著るしいアンダーカットを呈す。第2電極では溶込み, ビード幅とも増加するが, スラグ巻込み, アンダーカットはまだ残っており, このことから第1電極, 第2電極が母材を掘削する機能を分担しあっていると考えられる。第3電極はビード底部の曲率を大きくし, 先行する第1, 第2電極によるビード底部のスラグを浮上させる働きを有している。第4電極は主としてビード表面の幅を広げる機能を有している。

Fig.7は点弧法により形成されたビード寸法を最終ビードに対する比率で示したもので, 前述の如く第1, 第2電極が主として溶込みを確保し, この2極で85%以上となる。

4電極溶接における各極機能を3電極溶接の場合⁴⁾と比較してTable 4にまとめた。

Table 4 Main functions of each electrode in three- and four-electrode submerged arc welding.

	Three-electrode process ⁴⁾	Four-electrode process
1st electrode	•drilling the base metal	•drilling the base metal
2nd electrode	•preliminary regulation of the bead shape	•drilling the base metal
3rd electrode	•prevention of undercut •regulation of final weld bead	•preliminary regulation of the bead shape •prevention of slag inclusion
4th electrode	—————	•prevention of undercut •regulation of final weld bead

3.4 最適溶接条件の決定

高速サブマージアーク溶接ではアンダーカットとスラグ巻込みが代表的溶接欠陥であるが, 前者については前述の如く最適結線を選択することにより防止し得る。いっぽうスラグ巻込みを溶接条件の面から防止するためには各電極の機能を十分に把握し, 最適溶接条件を決定する必要がある。

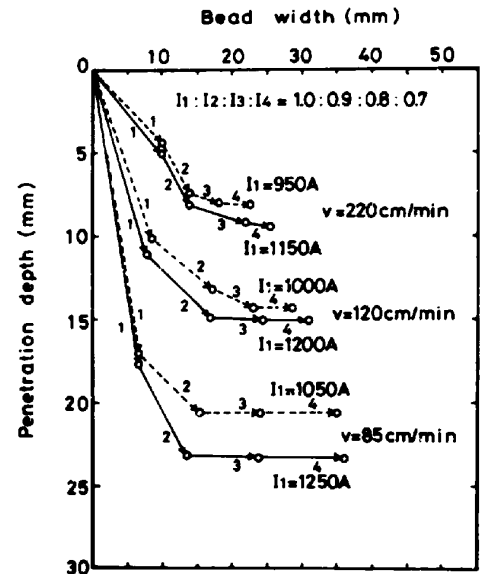


Fig.5 Contribution of each electrode arc to penetration depth and bead width

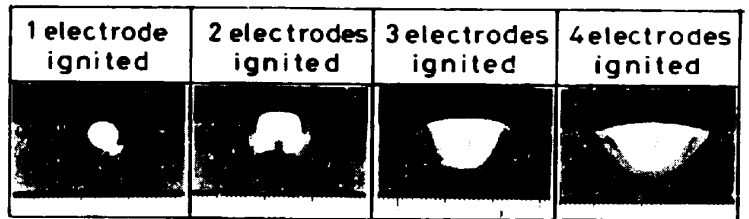


Fig.6 Cross sectional change of weld bead. welding speed: 220 cm/min.

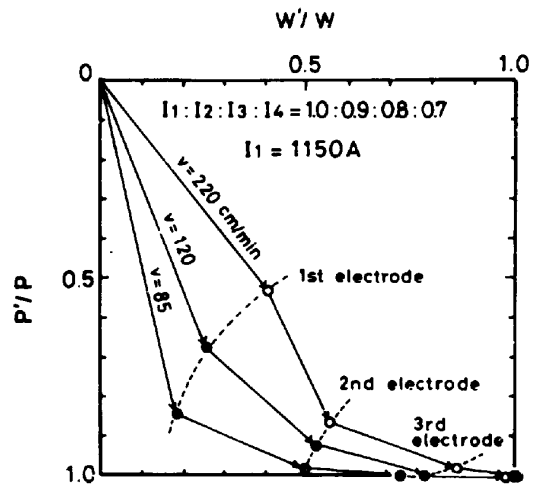


Fig.7 Contribution ratio of each electrode arc to final bead shape.

(W,P: final bead width and penetration depth)
(W',P': bead width and penetration depth obtained by each electrode)

一般にスラグ巻込みはビード底部にへばりついているタイプのものが多いが、Fig.6で示した如くこのようなスラグ巻込みは母材掘削効果を有する第1, 第2電極によるビード内で発生することから、後続の第3, 第4電極アークにより溶込みを増加させ浮上させることにより防止し得る。この場合第4電極による溶込み増加はほとんど期待できないため、第3電極アークの働きが重要となる。Fig.8は最適溶込み深さに対する第3電極の最適寄与率の決定の仕方の概念的に示したもので、第3電極の電流が大きすぎる場合には、それ自身が母材掘削作用を持つようになりスラグを残す可能性があり、いっぽう小さすぎる場合には、熱伝導による溶込み増加が小さくなり第2電極によりビード底部に発生するスラグを浮上させてやることができなくなる。両者を勘案して最適電流比を決定する必要があるが、本検討では第1～第4電極間の電流比は1/0.8～0.9/0.65～0.75/0.50～0.65が適当であった。

4 4電極溶接実用化の効果

以上の検討を踏まえ、当社UO工場の溶接ラインは全て4電極化され順調に稼働している。Fig.9は3電極時の溶接速度と4電極化後の溶接速度を比較したもので、平均30%の速度向上が可能となり、とくに厚物では約40%の向上率となっている。Fig.10は溶接金属のじん性を比較した一例であるが、溶接材料の組合せが同じであれば3電極の場合と変わらないという結果が得られている。また4電極のビード断面におけるビード底部の曲率は3電極の場合よりも大きく、さらに各極の機能が分化したため、第3電極の制御によりスラグ巻込が減少するというメリットも得られている。

5 まとめ

溶接速度の向上を目的として、UOEパイプの製造における交流4電極溶接の実用化について検討した。高速溶接時に問題となるアンダーカットは適正な結線方式を選択することにより防止が可能であり、また各電極の機能を十分に解明し最適溶接条件を決定したため、スラグ巻込み等の内部欠陥発生率も低減することができた。溶接速度は平均30%向上し、現在順調に稼働している。

参考文献

- (1)坪井, 赤秀他 溶接学会第49回溶接法委員会資料
- (2)赤秀, 阿草他 溶接学会第67回溶接法委員会資料
- (3)H.Nomura et al IIW Doc. X II-A-166-79
- (4)K.AKahide et al IIW Doc. X II-A-155-78

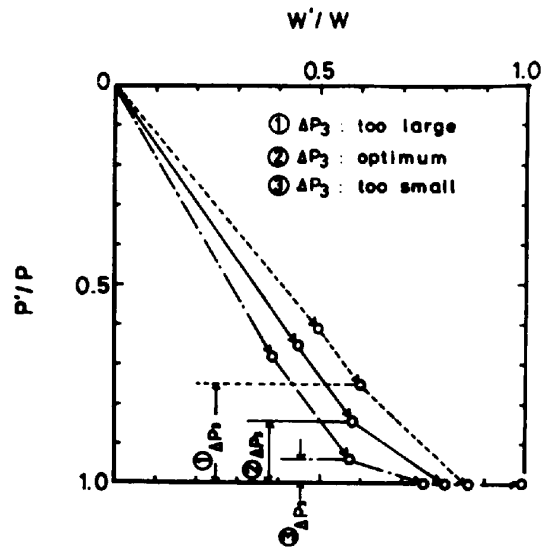


Fig.8 Schematic illustration for determining optimum welding current in the third electrode.

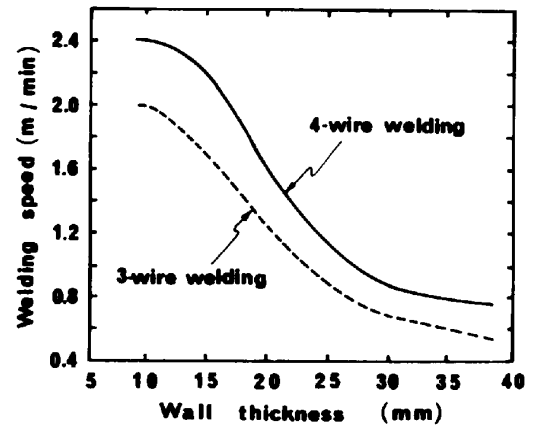


Fig.9 Relation between wall thickness and welding speed in multi-wire SAW.

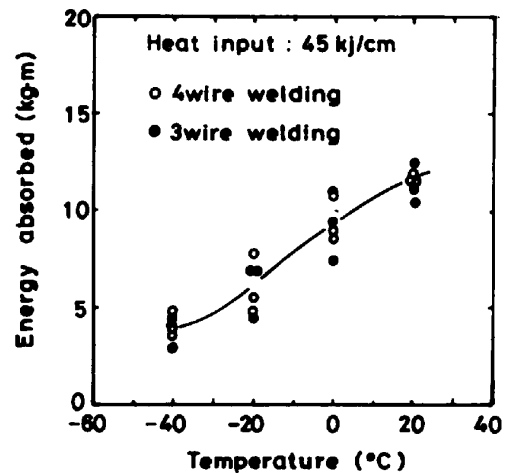


Fig.10 V-notch Charpy energy of 3 and 4 wire welded metal. (Plate: API-5LX X70, Wre: Si-Mn-0.5Mo, Flux: neutral fused type)