Table 4 Results of Charpy impact tests (0°C)

Electrode	Welding condition	Impact value (J/cm ²)
D4301	B1	52.7
D4301	D1	42.9
D4313	B2	38.8
D4313	D2	42.7
D5003	A3	51.0
D5003	B3	41.8
D5003	C3	47.7
D5003	D3	44.0
Base metal		106
Dimensions of specimens

なお、型曲げ試験の結果、第2層溶接部を外側になるように曲げた場合、いずれも約180°曲がり、十分な曲げ延性を有していた。以上の試験結果より、パルスアーク溶接による継手は直流溶接継手と同等の性能を有することが明らかとなった。

4. 結 言

重力式パルスアーク溶接法を水中溶接に適用した場合の溶接現象及びその実用性について検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) パルス周期を直流溶接における溶滴の移行周期に選定し、平均電流を直流適正電流とほぼ等しくなるように選定すれば、1パルスで1溶滴移行する比較的安定な

アークが得られる。

(2) $t_p = t_b$ のパルス形態を用いる場合、 $I_b > 125A$ 、 $I_b/I_p > 0.5$ の電流条件範囲において、比較的安定なアークにより良好な溶接が得られる。

(3) 短時間の I_p を付加するパルス形態は、ベース電流 I_b を直流適正電流に設定でき、かつ1パルス1溶滴移行が実現できるため、種々のパルス形態の中で最も安定したアークが得られる。また、適正な I_b を選定すれば、良好な溶接が得られる。

(4) ピーク電流 I_p の増大と共に、またパルス周期 t_p の減少と共に、溶接部の溶込みは若干増加する。

(5) パルス電流を適用した場合、溶接部の拡散性水素量は増加する。

(6) 重力式パルスアーク溶接法により得られた溶接継手は、直流溶接継手と同様、十分な引張強さ、衝撃値及び曲げ延性を有する。

本実験にご協力頂いた実験当時慶応義塾大学理工学部学生の羽根田広明君（現在、東京都港湾局）及び高田弘太郎君（現在、松下電送㈱）に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、蓮井、菅：溶誌、43-8 (1974) p.767
- 2) E. A. Silva, T. H. Hazlett: Weld. J, 50-6 (1971) p.406
- 3) 益本、中島、近藤、松田：溶誌、40-7 (1971) p.683
- 4) 蓮井、菅、当麻：溶誌、44-6 (1975) p.459
- 5) 例えば、松縄、山本、平本：溶誌、53-6 (1984) p.284
- 6) 菅：溶論、3-4 (1985) p.830
- 7) 安藤、長谷川：溶接アーク現象、産報

多電極アークによる薄板の高速片面溶接*

安田克彦**, 日向輝彦**, 神馬 敬***, 恩澤忠男****

High Speed One-Side Welding of Thin Sheet Using Multi-Electrode Arc Welding*

by Katsuhiko Yasuda**, Teruhiko Hinata**, Takashi Jimma*** and Tadao Onzawa****

Multi-electrode arc welding method is applied to the high speed one-side welding of 1mm thick SUS 304 sheets.

Under welding speed lower than 6.5m/min, fine one-side welding joints are obtained by setting the final preheating electrode close to the penetration bead forming electrode so that the arc blow occurs by magnetic interaction between double electrodes. But, stable penetration bead can not be formed by the same condition under higher welding speed. So, in the case of very high speed one-side welding, by setting the distance between both electrodes about 50mm and forming the final preheating bead to gouging type, favorable welding results are established.

Key Words: high speed welding, one-side welding, thin sheet, multi-cathode arc welding, TIG arc welding, Plasma arc welding

1. 結 言

前報¹⁾では、薄板の片面溶接に関し高電流、高速度で行われる場合の溶接方法及溶接条件、溶接現象などについて検討を加えた。この場合、速度の増加にともなって母材の溶融に必要な入熱を確保するため、片面溶接可能電流が著しく高くなる結果、表ビードにアンダーカット

*原稿受付 昭和62年2月23日 昭和61年11月第84回溶接アーク物理研究委員会発表

**正 員 職業訓練大学校 Member, Institute of Vocational Training

*** 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

****正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

Fig. 1 Double electrodes arc welding apparatus

Table 1 Chemical compositions of materials used

		Chemical composition (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS 304 ($t=1.0\text{mm}$)	a	0.065	0.61	1.53	0.033	0.005	9.17	18.63
	b	0.062	0.58	0.96	0.026	0.007	8.07	18.23

を発生したり溶落ちが生じやすくなる。そこで、電極の形状や設定を工夫してアーク力分布のピーク値を低下させ、低速度の場合と同様の溶融池状態に近づけることが有効であることを示した。

ただ、さらに高速の溶接を行うには、多電極を用いて入熱を分散させることが有効となる²⁻⁴⁾。

本報は、高速での薄板の片面溶接を可能にするために多電極の溶接を導入し、アーク状態と溶接池状態や溶接結果との関連性などを中心に検討した。

2. 供試材及び実験方法

高速の片面溶接は、溶接トーチを固定し、材料を 25 m/min まで走行可能な NC 制御テーブル上の治具にクランプした状態で行った。溶接機は、定格容量 500 A のプラズマ溶接機ならびに直流ティグ溶接機、及び定格容量 500 A のアナログ制御トランジスタ電源とティグ溶接用制御装置の組み合わせのものをを用い、これらを組み合わせで使用した。なお、溶接トーチは多電極用の特殊なものではなく、Fig. 1 に示すような市販のティグならびにプラズマ溶接トーチの組み合わせで用いた。

供試材には、Table 1 に示す板厚 1 mm のメーカーの異なる 2 種の SUS 304 材を中心に使用し、比較検討の目的で板厚 1.2 mm の SPC 材も用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 二電極ティグによる高速片面溶接

Fig. 2 は、板厚 1 mm の SUS 304 材を 5 m/min を越える速度で片面溶接する場合の多電極溶接の有効性を、二電極のティグ溶接で確かめた結果である。図中の片面溶接可能条件において、個々で 400 A 以下、 $I_1 + I_2$ が 500 A 前後で比較的安定に裏ビードが形成され、片面溶接が可能となっている。ただ、表ビードにはアンダー

Fig. 2 Influence of welding current on one-side welding in double electrodes TIG arc welding

Fig. 3 Influence of distance between double electrodes on one-side welding (SUS 304, (a))

カットが発生している。このアンダーカットは裏ビードを形成させるための後方電極側の電流 (I_2) を小さくすることで少なく抑えることができる。このことは、アンダーカットの発生と深い関係にあるクレタ部固体露出面の長さ (L_s)¹⁾ が I_2 の低下にもなっていることから明らかである。ただ、Fig. 2 の片面溶接条件範囲では、 I_1 と I_2 の組み合わせをどのように選んでもアンダーカットを無くすることはできない。そこで、これを改善するため電極間距離や後方電極の保持角を変化させて検討した。

Fig. 3 は、 I_1 を 300 A、 I_2 を 200 A 一定とし、電極間距離を変化させた場合の溶接結果とアークの状態の関係を示したものである。アークの干渉の生じる $L=15$ mm の条件で、ほとんどアンダーカットのない良好な溶接結果が得られている。このようにアンダーカットの発生が抑えられたのは、アークの干渉により溶融池内に発生する温度差が少なくなるなどして、溶融金属が溶融池後方の凝固部に向かって流れるのが抑えられたためと考えられる。

一方、Fig. 4 は後方電極の保持角と溶接中のアークの干渉状態を示したもので、保持角による干渉の差はほとんど認められず、溶接結果にも顕著な差が生じなかった。ただ、このアークの干渉で特に注目すべき点は、同一条件であっても静止の場合、母材の溶融のない状態で移動した場合、母材が溶融し片面溶接が行われている場

Fig. 4 Influence of torch angle on arc condition in double electrodes TIG arc welding

Fig. 5 Influence of welding condition on one-side welding with double electrodes TIG arc welding (SUS 304, (a))

Fig. 6 Influence of preheating bead form on one-side welding with double electrodes TIG arc welding (SUS 304, (a))

合などによって異なる点である。すなわち、干渉はアークを移動させることで助長され、母材が溶融するとその溶融金属の存在でアークの変形はさらに大きくなる。なお、後方電極を 25° の前進角に保持した状態で電極間距離を $16 \sim 35$ mm の範囲で変化させて片面溶接を行った場合、溶接結果には大きな差があらわれず、全てアンダーカットのない良好な片面溶接結果が得られた。このことから、Fig. 3 の結果に比較してアークの干渉の生ずる条件がアンダーカットの防止に有効であることがわかる。

Fig. 7 Arc condition of double electrodes TIG arc welding under 6.5 m/min welding speed

Fig. 5 は、電極間距離 16 mm、後方電極の保持角を 25° に設定し、 $I_1 + I_2$ が 500 A となるようそれぞれの組み合わせを変化させ片面溶接を行った結果である。 I_2/I_1 が 0.24 前後までは I_1 の入熱が大きく、これによって裏ビードが形成されるが、表ビードはアンダーカットビードとなり、しかも後方電極側の入熱不足でこのアンダーカットは解消し得ない。一方、 I_2/I_1 が 0.24 以上の値になると、裏ビードが I_2 によって形成されるようになりアンダーカットの発生もなくなる。この場合、 I_2/I_1 が大きくなり過ぎると最終的な表ビード幅となる WF_2 が広がる。したがって、電極を Fig. 5 のような設定にした場合には、 I_2/I_1 が 0.6 前後となるような組み合わせが有効であると考えられ、これはビード形成のみに着目した二電極ティグ溶接法の結果²⁾ともよく一致している。

一方、同様の電極設定においても、溶接速度がさらに速くなると溶接中に一定周期で裏ビード形成が悪くなるなど良好な片面溶接が行われない状況が発生することがある。Fig. 6 がその状態を示したもので、裏ビード形成や表ビードの不連続は先行電極で形成されるビード状態に左右されるようである。すなわち、予熱用となる先行電極で形成されるビードは同一電流で溶接を行っても、わずかなアーク長さや電極先端形状の違いにより(a)のハンピングビードとなったり、(b)のガウジングビードとなったりする。また、前半はハンピングビードであったものが、後半にはガウジングビードに移行するような場合もある。(a)の予熱用ビードがハンピングビードとなっていた場合には、後方電極で形成される表、裏ビードとも不連続なものとなっている。一方、(b)のガウジングビードとなっていた場合には、良好な片面溶接結果が得られている。

Fig. 7 は、二電極の片面溶接で不連続ビードとなった時の溶接状態を観察した結果で、干渉し合うアーク間に溶融金属が滞留している。こうした顕著な溶融金属の滞留は、Fig. 3, 4 では認められない。すなわち、予熱用の先行ティグアークで形成されるビードが、ビード中心部に溶融金属が集まるハンピングビード状態となった場合には、写真のように後方電極中心のアーク直下に溶融金属が滞留する。ただし、一定量以上滞留するとアークで保持しきれず後方に放出される。こうした溶融金属の滞留と放出が、周期的に繰返されることでビードの不連続が発生したと考えられる。

このようにして生じるビードの不連続の対策として、次の 2 つが考えられる。1 つは、先行電極によるビードを Fig. 6(b) のようなガウジングビードとすれば、溶融金属がビード止端部に集まることで上述のような現象が発生しにくく、ビードの不連続を生じなくなる。これにつ

Fig. 8 Influence of distance between double electrodes on one-side welding under 8.5 m/min welding speed (SUS 304, (b))

Fig. 9 Influence of distance between double electrodes on arc condition under 8.5 m/min welding speed

Fig. 10 One-side welding joint with double electrodes TIG arc welding under 8.5 m/min welding speed (SUS304, (b))

いては、3-2項で述べる。もう1つは、アークが干渉しないよう、電極間距離を遠ざけることである。

Fig. 8及び9は、溶接速度 8.5 m/min の片面溶接に及ぼす電極間距離の影響を示したもので、アークが干渉する 25 mm の距離では裏ビードに一部不連続が認められるが、アークが干渉しない 45 mm になるとほぼ良好な溶接結果が得られている。したがって、二電極で片面溶接を行う場合、一定の速度を越える条件（例えば、本実験の板厚 1 mm の SUS 304 材で 6.5 m/min 以上）では、アークの干渉を生じさせない電極間距離に設定することが安定な片面溶接を行うために必要となることがわかる。ただ、こうした条件では、裏ビードが安定に形成し得たとしても表ビードにアンダーカットが残る。

そこで、後方電極に単電極の高速溶接で有効となった前進角保持ナイフエッジ電極を用いて溶接を行った。その結果を、単純な前進角保持電極の結果と比較して示したものが Fig. 10 である。図のように、後方電極に 25° 前進角保持ナイフエッジ電極を用いることで、表ビードにアンダーカットがなく裏ビードも安定し、良好な片面溶接が可能となっている。なお、この場合も、先行電極で形成されるビードがガウジングビードとなることが片

Fig. 11 One-side welding joint of SPC with double electrodes TIG arc welding

Fig. 12 Relationship between welding conditions and limiting one-side welding speed in plasma welding (SUS 304, (a))

面溶接の安定に有効である。

これまでに明らかとなった多電極による片面溶接での結果を参考にすると、通常多電極溶接ではあまり高速化の望めなかった SPC 材についても、比較的容易に高速の片面溶接が可能となる。Fig. 11 が、板厚 1.2 mm の SPC 材の片面溶接結果の一例で、後方熱源にナイフエッジ電極を用い電極間距離を広く設定することで、スイッチング二電極ティグを越える速度³⁾で片面溶接が可能になっている。なお、後方熱源にステンレス薄鋼板で有効となった前進角をもたせる方法では、溶融金属がアークにより前方に押され凹形の表ビードとなりビード中心の板厚が減少するなどするため、多電極の溶接では推奨できない。

3.2 プラズマとティグによる高速片面溶接

単電極のティグで裏ビードを安定に形成させる上においても、また多電極の予熱ビードでガウジングビードを得る上においても、さらに高速化を目指す場合には強いアーク力のプラズマ溶接が有効となると考えられる。非常に強いアーク力のプラズマ溶接も、高速で移動させることにより 1 mm 以下の薄板の片面溶接が可能となる⁵⁾。Fig. 12 は、板厚 1 mm の SUS 304 材のプラズマ溶接による片面溶接の限界速度と溶接条件の関係を求め

Fig. 13 Effect of reforming TIG arc on one-side welding with plasma welding (SUS 304, (b))

Fig. 14 Effect of preheating TIG arc on one-side welding with plasma welding (SUS 304, (b))

Fig. 15 Relationship between welding conditions and depth of gouging in plasma welding (SUS 304, (a))

たものである。チップ孔径が大きく、大電流でしかもプラズマガス流量の多い条件で、片面溶接可能限界速度が高められる。ただ、プラズマ溶接を用いた高速の片面溶接では、Fig. 13(a) に示すように表ビードが極端なアンダーカットビードとなる。そこで、プラズマトーチの後方にビード形状改善用のティグトーチを設定した。Fig. 13(b) が、先行のプラズマ溶接で裏ビードを形成させ、後方のティグアークでビード改善を行った結果で、アークの干渉が生じない電極間距離であっても小電流のティグアークで表ビード形状ならびに裏ビード側の溶け込みの改善が認められる。このように、高速片面溶接で問題となるアンダーカットビードの解消には、ビード改善用の熱源を設定することも有効であると言える。

一方、Fig. 14 は、Fig. 12 で明らかとなったプラズマ単独による片面溶接の限界速度を高めるため、プラズマトーチの前にティグトーチを設定し片面溶接を行った場合の溶接結果の一例である。予熱用のティグを用いることで限界速度は高められるが、表ビードはプラズマの強いアーク力により顕著なアンダーカットビードになるとともに、スパッタの発生やこれにともなうビードの不連

Fig. 16 One-side welding joint with plasma and TIG (using knife-edge electrode with forward angle) welding (SUS 304, (b))

Fig. 17 Influence of welding condition on one-side welding with triple electrodes welding (SUS 304, (a))

続を生じるようになる。そこで、逆にこの強いアーク力を利用し、予熱用熱源としてプラズマ溶接を利用すれば、先行電極に望まれるガウジングビードが再現性よく得られ、有効であると考えられる。Fig. 15 は、予熱用熱源としてのプラズマ溶接のガウジング作用について調べた結果で、各々のチップの最大電流でプラズマガス流量を変化させてビードオンプレートをを行い、得られたガウジングビードのガウジング深さを測定した。プラズマガス流量が増加するにしたがってガウジング深さが深くなる傾向を示すが、こうした傾向はチップ孔径の小さい方が顕著である。ただ、最大のガウジング深さを示したチップ孔径 3 mm、プラズマガス流量 7.5 l/min の条件では、Fig. 14 に示したスパッタ発生ならびに不連続ビードが観察され、プラズマガス流量を増加させることでこうした現象が顕著となった。なお、予熱用熱源としては、ガウジング深さが裏ビード形成にあまり問題とはならず、必要な入熱が確保できる電流で確実にガウジングビードとなり、しかもこのガウジングビードが溶接過程でハンピングビードなどに移行しないことが必要で、こうした点からもプラズマ溶接を予熱用に使用することは有効であると言える。

Fig. 16 は、予熱用としてプラズマ溶接を、裏ビード形成用として 25° 前進角ナIFEジ電極を使用して 9 m/min で片面溶接した結果で、表ビードにはアンダーカットもなく良好な片面溶接結果が得られている。

3.3 多電極溶接への展開

前項までにおいて、多電極溶接の基礎として、二電極による薄板の高速溶接について検討を進めてきた。ただ、一般的な 500 A の溶接機や溶接トーチを用いる限りさらに進んだ高速化は望めず、電極数を増した多電極溶接が必要となる。そこで、二電極の検討で得られた結果が、こうした多電極溶接における指針となり得るのかについて検討を加えた。

Fig. 17 は、予熱用第一熱源としてティグ、予熱用第二熱源としてプラズマ、裏ビード形成用第三熱源として

ティグの三電極による片面溶接について検討した結果の一例である。図中(a)の条件では、予熱用最終熱源であるプラズマ溶接でのプラズマガス量が少なく、これによって裏ビード形成前のビードがガウジング状態とならず、形成された裏ビードに不連続を生じさせている。また、(c)の条件では、予熱用熱源と裏ビード形成用熱源との距離が少なく、これによるアークの干渉で表、裏ビードに不連続を生じ、特に表ビードでは不連続に伴う凹凸を生じ一部アンダーカットの発生が認められる。

一方、比較的良好な溶接結果の得られた(b)の条件では、予熱用熱源と裏ビード形成用熱源との距離は広く、裏ビード形成前のビードも不完全ではあるがガウジングビードに近い状態となっている。このように、二電極以上で行う多電極の高速溶接においても、良好な片面溶接結果を得るための基本的な条件は、二電極の場合で示した留意点を考慮して設定すれば良いことがわかる。ただ、多電極を必要とするような高速度条件では、裏ビード形成に必要な予熱条件が満足され、しかも裏ビード形成前の予熱ビードを良好なガウジングビードとすることが難しい。このことは、Fig. 17 の予熱ビード形状からも明らかである。すなわち、最終予熱用熱源としてプラズマを利用した場合、通常の丸孔チップでは、一定孔径に対する使用可能電流はチップ孔の変形を生じさせないような電流値以内に押えられるため、必要な入熱とアーク力が満足できなくなるためである。これを少しでも改善するには、チップ孔を楕円に加工し、溶接電流ならびにプラズマガス量を多く流せるようにすると効果的である。なお、二電極ティグによる予熱についても検討を加えたが、この場合もガウジング形の予熱ビードを得ることが難しかった。

4. 結 論

薄板の高速片面溶接を多電極を中心に検討し、以下の

ことが明らかとなった。

1) 薄板の高速片面溶接においては、裏ビード形成の安定化や表ビードのアンダーカットの防止などから多電極の溶接が有効である。

2) 表ビードにアンダーカットを発生する場合、一定速度以下(板厚 1 mm の SUS 304 材では 6.5 m/min 程度)では電極間距離を短くするなどしてアークを干渉させて防ぐことができる。ただ、この速度を越えると、アークの干渉により裏ビード形成用熱源の前方に溶融金属が滞留し裏ビード形成の不安定を生じさせる。

3) プラズマ溶接を多電極溶接に利用する場合、予熱用熱源として利用することが有効で、この場合、必要な入熱の得られる電流条件でガウジングビードとなる条件に設定すると、再現性の高い片面溶接が可能となる。

4) 裏ビード形成用のティグアークで表ビードにアンダーカットを発生する場合、電極に前進角保持ナイフエッジ形のものを使用するなりビード形状改善用の後熱ティグ熱源を使用することが必要である。

5) 三電極を使用して高速の溶接を行う場合も、二電極の場合と同様に考えればよい。

参 考 文 献

- 1) 安田, 神馬, 恩沢; ティグ溶接による薄鋼板の高速片面溶接, 本誌論文集 3-3 (1985), 28-34
- 2) 山内, 高; TIG 溶接法の研究 (2), 本会講義集 21 集 (1979), 306-307
- 3) 小倉, 二瓶, 小園, 芦田, 小沼; 2 電極スイッチング・アーク溶接法に関する研究 (第 1 報), 本誌 49-4 (1980), 39-45
- 4) 小倉, 二瓶, 芦田, 田口, 妹島; 2 電極スイッチング・アーク溶接法に関する研究 (第 4 報), 本誌 52-1 (1983), 25-29
- 5) 安田, 日向, 神馬, 恩沢; アーク力に着目した薄板の片面溶接, 溶接アーク物理研究委員会資料 86-620 (1986)

Ar 雰囲気中におけるサブマージアーク溶接について *

—各種ガス雰囲気の影響 (第 1 報)—

清水寛一郎**, 岩本信也***, 巻野勇喜雄***, 赤松泰輔****

Submerged Arc Welding in the Argon Gas Atmosphere*

—Various Gas Atmosphere (Reprot 1)—

by Kanichiro Shimizu**, Nobuya Iwamoto***, Yukio Makino*** and Taisuke Aakamatsu****

Both the contents of oxygen and nitrogen in the weld metal which were obtained by the submerged arc welding with various welding speeds in the argon atmosphere and the influence of the gas contents on the impact values of those weld metals were investigated.

The results obtained are summarized as follows.

(1) The oxygen content in the weld metal increases as the welding speed increases, and the oxygen content

*原稿受付 昭和61年11月25日 昭和57年度秋季全国大会で発表

**正 員 工学院大学 Member, Kogakuin University

***正 員 大阪大学 Member, Osaka University

****正 員 工学院大学 Member, Kogakuin University