アーク力に着目した薄板の高速片面溶接現象の検討*

安田克彦**, 日向輝彦**, 神馬 敬***, 恩澤忠男****

Investigation on the Phenomena of High Speed One-side Welding of Thin Sheet Paying Attention to Arc Force*

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

Paying special attention to the arc force, the welding phenomenon of high speed one-side welding of thin sheet was investigated.

In high speed and high current one-side welding method, the arc force becomes very strong. The solid surface is produced at the front part of the molten pool by this strong arc force and others. But the high speed one-side welding of thin sheet is possible using high current TIG and plasma arc welding method because the strong arc force effects to this solid surface. However, in the case of these welding, the face bead becomes undercut bead.

In spite of high welding current, the arc force holding forward torch angle keeps lower level. So this method is more effective for high speed one-side welding. Especially, using the knife-edge electrode with forward torch angle, these tendency becomes more effective.

Key Words: High speed welding, One-side welding, Thin sheet, Arc force, TIG arc welding, Plasma arc welding

1. 緒 言

ステンレス溶接管の製造において、生産速度を高めるにはできる限りの高速溶接を行う必要がある。著者らは、ステンレス薄鋼板の高速片面溶接について検討し良好な溶接結果を得るため、アーク長さを短く保つことや電極を前進角に保持すること、さらにナイフエッジ形の電極を用いることなどを提案した¹⁾。

本報では、薄板の高速片面溶接を行う上で重要な要因であると考えられる溶融池に作用するアーク力に注目し、まず表ビード状態は無視し、裏ビード形成とアーク力の関係について調べた。さらに、表ビードを含め良好な片面溶接結果を得るための方法をアーク力の面から検討を加えた。

2. 実験方法

高速での片面溶接は、溶接トーチを固定し母材を走行台車上に取付けた状態で行った。なお、アーク力の測定は、一般的に行われている水冷銅板に小孔を明け、これにマンメーターを直結する方法で行った。

使用した溶接電源は定格容量 500 A のアナログ制御トランジスタ電源で、これにティグ溶接制御装置を接続し完全直流で溶接を行った。なお、大電流プラズマ溶接の検討では定格容量 500 A のプラズマ溶接機を、またパイプ溶接への適用実験では定格容量 500 A のサイリスタ制御直流ティグ溶接機を使用した。

3. 実験結果及び考察

3-1. 裏ビード形成に及ぼすアーク力の影響

(i) 大電流ティグ溶接による片面溶接の場合：板厚 1 mm の SUS 304 材のティグアークによる片面溶接において、例えば速度が 20 cm/min といった低速度では、溶接電流が 30~60 A の小電流でしかも比較的広い条件範囲で溶接が可能であるのに対し、3 m/min の高速度では、240~245 A の高電流で狭い条件範囲となる¹⁾。このように、高速溶接では、大電流による強いアーク力がビード形成などに関与し、その安定性を低下させると考えられる。Fig. 1 は、薄板の片面溶接が比較的安定に行いえた短いアーク長さでのアーク力を、先端部を 45° に鋭敏に研磨した 3.2 mm 径の 2% トリヤ入りタングステンを用いた完全直流のティグアークで測定した結果である。測定結果は、電流の増加にともなってアーク力も増加しており、山本らの測定結果²⁾ に類似する傾向を示

Fig. 1 Relationship between welding current and arc force in DCEN TIG arc welding

*原稿受付 昭和62年4月28日 昭和61年6月溶接アーク物理研究委員会で発表

**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

している。ただ、本実験のようにアーク長さの短い状態で測定したアーク力は、比較的アーク長さの長い状態で測定した山本らの結果に比べ、特に大きいアーク力となる大電流の条件域で 1.5 倍程度高い値となっている。したがって、前述した板厚 1 mm の SUS 304 材の片面溶接条件からわかるように、高速条件では低速条件に比べ 10 倍近いアーク力が溶融池に作用することになる。このような強いアーク力が片面溶接中の裏ビード形成部に作用するとすれば、従来から考えられている母材裏面の溶融金属の表面張力による上向き力との釣り合いが破れ、高速では良好な片面溶接結果は得られないはずである。そこで、高速片面溶接における溶融池形態を詳細に検討することで、この矛盾点の解明を試みた。

Fig. 2 は、板厚 1 mm の SUS 304 材を図中の条件でビードオンプレートによる片面溶接を行い、その溶接過程でアークを消弧し、形成されたクレータ部の形状を示したものである。こうした凝固後のクレータ形状は、アーク消弧前の溶融池状態とほとんど変化のしないことが確かめられている³⁾。そこで、同様の検討を種々の条件で行い、溶接中の溶融池先端と溶融金属先端間距離 (D_s) 及び溶融池先端と裏ビード形成の先端間の距離 (D_u) を求めた。得られた結果を溶接速度との関係で整

Fig. 2 Bead appearance in high speed one-side welding of thin sheet

Fig. 3 Relationship between welding speed and molten pool condition in one-side welding of thin sheet

理したものが Fig. 3 で、1 m/min 程度の速度までは D_u の長さはほぼ一定で固体露出面の発生もないが、この速度を越えると溶接速度の増加にともなって D_s 、 D_u は増加し、溶融池先端部に固体露出面を発生するとともに裏ビードの形成が溶融池先端から離れた位置で行われるようになる。なお、このような D_s の増加にともない表ビードに発生するアンダーカットは顕著となる¹⁾が、ここでは裏ビードの形成にのみ着目して検討を進めた。

そこで、上述の片面溶接中の溶融池に対しアークがどのような位置にあるかを確かめる目的で、溶接過程をビデオで撮影した。このビデオをこま送り状態で観察し、最も強いアーク力を示す電極中心が、溶接速度に関係なく母材の溶融部先端近くに位置していることが確認された。以上の結果から、薄板の片面溶接における溶接状態を、特徴的な低電流低速の場合と高電流高速の場合に分け模式的に示したものが Fig. 4 である。(a)に示す低速の場合では、電極中心位置と裏ビード形成位置が近く、溶融池に作用するアーク力は無視できない。ただ、こうした条件では、片面溶接可能電流は低くアーク力が小さいため、このアーク力を含めた下向きの力に比べて母材裏面での溶融金属の表面張力による上向きの力は十分に対応できる大きさであり、比較的に広い電流条件範囲で片面溶接が可能となる。一方、(b)に示す高速の場合では、片面溶接可能電流が高くなり上述のように強いアーク力となるが、電極中心位置に対し裏ビード形成位置が離れ、強いアーク力の多くが固体面に作用し、裏ビード形成部に作用する力としては溶融池先端面へ作用するアーク力の下向方向への分力程度となり、片面溶接が可能となると考えられる。しかし、この場合の裏ビード形成は、溶接速度に応じた大きな電流が使用されることで母材が適度に溶融されるとともに強いアーク力により掘込まれ (ガウジング作用)、これにより板厚の薄くなった部分が裏面まで溶融することで行われると推定される。すなわち、薄板の高速片面溶接においては、高速になるにしたがい裏ビード形成がアークの中心から離れた位置で行われるようになるため、上述の裏ビード形成部の母材板厚をできる限り薄くなるよう強いアーク力で掘込んでおく必要があり、それだけ溶落ちが生じやすくなる。したがって溶落ちの危険性を抑え片面溶接の安定

Fig. 4 Influence of welding current and speed on molten pool condition

		Bead appearance	
		Face bead	Back bead
SUS 304 ($t=1.0$ mm)	$D_t=2.5$ mm $Q_p=0.8$ l/min $I=195$ A $v=3.0$ m/min
SUS 304 ($t=0.6$ mm)	$D_t=2.0$ mm $Q_p=0.5$ l/min $I=165$ A $v=5.5$ m/min

D_t : Tip diam., Q_p : Plasma gas flow rate

Fig. 5 High speed one-side welding results of thin stainless steel plate using plasma welding method

性を高めるには、裏ビード形成位置での固体部厚さが厚くなる高速溶接初期の溶融池状態に近づける必要があり、後に述べるようなアークの制御などが必要となる。

(ii) 大電流プラズマ溶接による片面溶接の場合：通常、大電流プラズマ溶接は、その強いアーク力を利用して、板厚 2 mm 以上の材料のキーホール溶接に用いられる。ただ、前述したように非常に強いアーク力の大電流ティグアークにおいても、高速度で移動させることによりその強いアーク力の多くが溶融池内に形成した固体面に作用することで薄板の片面溶接が可能であった。したがって、大電流プラズマであっても高速で溶接することにより薄板の片面溶接が熱伝導形で可能となると考えられる。

Fig. 5 は、大電流プラズマ溶接で薄板の高速溶接を行った結果の一例で、いずれの板厚の場合も熱伝導形で良好な裏ビードが形成されており、片面溶接が可能であることがわかる。ただ、図中の板厚 1 mm の溶接条件に着目すると、そのアーク力は 700 Pa 程度となり、同一速度でのティグ溶接の場合の10倍近い値となっている。しかし、この場合のクレータ部固体露出面長さ D_s は 4.2 mm 程度であり、ティグ溶接の 2.6 mm 程度に比べると長く、裏ビード形成はさらに離れた位置で行われている。すなわち、プラズマ溶接では、大電流ティグ溶接に比べ更に強力なアーク力で母材が掘込まれており、それだけ小さい電流で裏面は溶融されるが、片面溶接可能な条件範囲は極めて狭くなる。

こうしたプラズマによる溶接は、長時間の連続溶接における電極の変形によるアーク現象の変化が少なく、ロール形成による管製造などに有効と考えられる。ただ、表ビードには写真のものにも見られるような鋭いアンダーカットを発生しており、プラズマの後方にビード改善用熱源を設置する 2 電極の溶接が有効となる⁴⁾。

(iii) ティグ溶接用電極の影響：板厚 0.4 mm の SUS 304 材の 6 m/min における片面溶接において、1.6 mm 径の電極（先端角 45°）を使用した場合の片面溶接可能電流が 150 A 程度であったのに対し、同じ先端形状であっても 2.4 mm 径の電極では 120 A 程度に低下する傾向のあることが確かめられた¹⁾。

このような差異を生じる要因を、アーク力に着目して検討した結果が Fig. 6 である。先端角 45°、アーク長さ 2 mm の条件でアークを発生させ、測定孔をアーク中心位置から水平方向に移動させアーク力(p)の分布を測定している。同一電流のもので比較すると、電極径が太く

Fig. 6 Relationship between electrode diameter and arc force distribution

Fig. 7 Influence of electrode diameter on arc shape

なるにしたがい電極中心位置近傍のアーク力が大きくなっている。こうしたアーク力の差を、アークの発生状態から検討した結果が Fig. 7 である。同一電流、同一先端形状に設定したとしても、電極径が細くなるにしたがって電極の高い位置でアークを発生するとともにアークの発生点の広がり、電極中心部でのアークの集中性が悪くなりアーク力が低下したと考えられる。さらに、電極径が細い場合には、写真のように高温で輝度の高いアークフレームが母材面近傍で小さくなり、母材の加熱効率も低下している。これらのことは、平岡ら⁵⁾の示す実験結果とも一致する。

前述したように、アーク力の低下は、アーク熱で溶融した母材部の掘込みを低下させる。すなわち、同一条件でも細径の電極を使用した場合には、掘込みの不足を補う入熱増が必要であるにもかかわらず、入熱不足を助長させ所定の片面溶接ができなくなる。したがって、高速での片面溶接を可能とするには、母材の溶融に対しアーク力と入熱が適切な関係にあることが必要で、Fig. 6 の 2.4 mm 径での 120 A と 1.6 mm 径での 150 A がこれに相当する。

ただ、同一条件での高速片面溶接において、溶接開始直後あるいは連続の溶接過程で所定の片面溶接結果が得られなくなることがある。こうした現象は、アーク起動時や長時間の連続溶接で電極が消耗し先端形状が変化する

Fig. 8 Relationship between electrode end shape and arc force distribution

ることに起因することが多い。この電極の消耗による形状変化が、片面溶接結果に及ぼす影響をアーク力の面から検討した結果が Fig. 8 である。電極先端の消耗を想定して先端部を平坦に加工した電極では、鋭敏な電極の場合に比べ電極中心付近のアーク力が低くなっている。すなわち、電極先端の消耗によりアーク長さが長くなるとともにアーク力が低下し、高速片面溶接に必要なガウジング作用に不足を生じさせ、所定の片面溶接結果が得られなくなったものと考えられる。

以上のように、薄板の片面溶接における裏ビード形成の可能性や安定性は、低速度条件では従来から示されているアーク力及び溶融金属の重力と母材裏面での溶融金属の表面張力との釣り合いで考えることができる。しかし、高速条件では、アーク熱源から離れた状態であっても裏面まで溶融し裏ビードが形成できる程度にまで母材を掘込んでおく必要があり、これらを満足できる入熱とアーク力となるよう溶接電流だけでなく電極の先端形状などにも配慮が必要となる。さらに、高速度条件でも安定な片面溶接を行うには、低速度での溶接に近い溶融池状態となるような工夫も必要となる。

3.2. 表ビード形状を考慮した片面溶接に及ぼすアーク力の影響

これ迄に述べてきたように、強いアーク力を示す鋭敏な先端形状の電極を用いるティグ溶接やプラズマ溶接で薄板の高速片面溶接を行う場合、まず裏ビードを確実に形成させるためには、アーク中心から離れた位置であっても母材裏面まで溶融できるよう、その強いアーク力で母材を掘込んでおく必要があった。ただ、こうした状態では、表ビードが顕著なアンダーカットビードとなり、片面溶接の安定性も低下する。高速溶接でのアンダーカットの防止に関しては、トーチを前進角に保持する³⁾なりナيفエッジ電極を使用し⁶⁾し、アーク力を低減させることが有効であることが示されている。そこで、こうしたトーチの前進角保持やナيفエッジ形電極の薄板の高速片面溶接に対する効果をアーク力の面から検討した。

(i) トーチ保持角の影響：高速の片面溶接において、トーチを 30° 以上の前進角に保持することで、片面溶接可能な速度を大幅に向上できる。Fig. 9 は、トーチ保持角を前進角とすることの効果のアーク力の面から検討し

Fig. 9 Influence of torch angle on arc force distribution

た結果で、直径 3.2 mm、先端角 45° の電極を前進角 30° に保持した状態でアークを発生させ、そのアーク力の分布を測定し、垂直に保持した場合のものと比較させて示している。前進角に保持した場合は、電極中心の延長が銅板表面の測定孔中心に一致する状態で最大のアーク力を示し、その大きさは同一電流でトーチを垂直に保持した場合に比べ $\frac{1}{2}$ 程度に低下している。こうしたアーク力の低下が、アーク直下でのガウジング作用を抑えるとともに、アークを前進角に傾けることで母材の予熱効果や加熱の分散効果が加わり、高速度条件であっても高速初期の溶融池状態に近づく。ただ、ガウジング作用は少なく、それだけ裏ビードの形成には大きな電流が必要となる。この場合、このように電流の増加に対するアーク力の増加は小さく、しかも裏ビード形成部が最大アーク力の位置からはずれることなどから、この部分に作用するアーク力は小さく安定に裏ビードが形成されるようになる。

すなわち、電極を前進角に保持することにより、母材の裏面まで溶融できるような大電流に設定したとしても溶融池先端部でのガウジング作用は少なく抑えられ、溶融池は高速度条件であっても低速度の場合に近い状態となる。したがって、アンダーカットの発生が抑えられる状態で片面溶接が可能となり、その安定性も高くなると考えられる。

(ii) 前進角保持ナيفエッジ形電極の効果：薄板の高速片面溶接においては、前進角保持のナيفエッジ形電極を使用することにより、その安定性が大幅に改善されることが確かめられている。Fig. 10 は、前進角 25° に保持したナيفエッジ形電極でアークを発生させ、そのアーク力分布を測定した結果である。最大のアーク力は極めて小さく、この最大アーク力が一様に分布する状態となっており、アークの溶接線方向への分散効果が顕著に認められる。したがって、前進角保持のナيفエッジ形電極を用いることは、前述の電極を前進角に保持する効果をさらに高め、薄板の高速片面溶接に特に有効となったと考えられる。

Fig. 11 は、こうした前進角保持ナيفエッジ形電極の高速片面溶接に対する有効性を、断続して管形成を行う送り曲げ加工⁷⁾に適用した結果の一例である。この加

Fig. 10 Arc force distribution of knife-edge electrode arc with forward torch angle

Welding condition		Bead appearance	
		Face bead	Back bead
	$v = 0 \sim 2.45 \text{ m/min}$ $I_B = 50 \text{ A}, I_P = 250 \text{ A}$		
	$v = 0 \sim 2.45 \text{ m/min}$ $I_B = 50 \text{ A}, I_P = 350 \text{ A}$		
	$v = 0 \sim 2.45 \text{ m/min}$ $I_B = 50 \text{ A}, I_P = 350 \text{ A}$		
	$v = 0 \sim 3.50 \text{ m/min}$ $I_B = 50 \text{ A}, I_P = 450 \text{ A}$		

Material: SPC ($t = 1.2 \text{ mm}$)

Welding current

Fig. 11 Effect of welding condition on bead appearance of welded pipe production in the successive press bending

Fig. 12 Relationship between forming process and change of welding current in the successive press bending pipe production

工法は、プレス加工で段階的に管の成形を進め最終段階で所定の形状を得る方法で、多品種少量の管生産に適している。ただ、プレス成形時には材料の送りが停止し、しかも次の材料送りの段階でも送り速度は0～数 m/minの間でサインカーブ的に変化する。そこで、溶接は、こ

うした不連続な送りに合わせ溶接電流を Fig. 12 に示すように変化させた。板厚 1.2 mm の SPC 材の管成形において、通常先端が円錐形の電極では、前進角に保持したとしても満足できる片面溶接結果は得られない。一方、前進角保持ナフエッジ形電極では良好な片面溶接結果が得られており、この方法によるアークの分散が薄板の高速片面溶接にいかにか有効であるかがわかる。

4. 結 論

ティグ溶接を中心に薄板の高速片面溶接をアーク力に着目して検討した結果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、通常の電極を垂直に保持した場合、速度の増加にともない熱源と離れた位置で裏ビードが形成されるため、高電流による強いアーク力で母材を十分に掘込んでおく必要があるが、この強いアーク力の多くは掘込んだ後の固体面に作用し、狭い条件範囲であるが片面溶接が可能となる。したがって、ティグ溶接に比べさらに大きいアーク力を示すプラズマ溶接においても、高速度で移動させることにより板厚 0.6～1.0 mm の板の片面溶接が可能となる。

2) 大電流でもアーク力を小さくでき、高速溶接においてもアンダーカットのない良好な溶接結果の得られやすいことが確認されているトーチの前進角保持やナフエッジ電極は、母材の掘込みの少ない状態でも裏ビードが形成でき、薄板の高速片面溶接の安定性を高めることができる。特に、円錐状電極を垂直に保持した場合に比べ同一電流での最大アーク力が1/5程度に低下し、しかも電流の増加に対するアーク力の増加傾向の少ない前進角保持ナフエッジ電極はこの種の溶接に有効となり、断続して移動する高速片面溶接なども可能となる。

3) ティグ溶接において、電極先端形状ならびに溶接電流を同一に設定しても、電極径が太くなるにしたがってアークが電極中心部に集中しやすくなり、アーク力やアークの加熱効率が増大する。したがって、同一条件の片面溶接においても、太径の電極を使用した方が低電流で片面溶接が可能となる。

4) 先端を鋭敏に研磨した電極を用いるティグ溶接において、電極先端部が消耗すると、アーク長さが長くなるとともにアーク力が低下し、母材の掘込みが減少することで裏ビード形成の再現性が悪くなる。

参 考 文 献

- 1) 安田, 神馬, 恩沢; ティグ溶接によるステンレス薄鋼板の高速片面溶接, 本誌論文集, 3-3 (1985), 464-471
- 2) 山本, 岡崎, 西川; ティグバースアークの圧力測定, 溶接アーク物理研究会資料, 78-382 (1978), 4
- 3) 島田, 星之内; 低圧ティグアークによるビード形成現象とアンダーカットビード形成の防止法, 本誌, 51-3 (1982), 31-33
- 4) 安田, 日向, 神馬, 恩沢; 多電極による薄板の高速片面溶接, 溶接アーク物理研究会資料, 86-639 (1986), 5
- 5) 平岡, 岡田, 稲垣; 薄板高速 TIG 溶接における電極形状のアーク圧力に及ぼす影響, 溶接アーク物理研究会資料, 76-298 (1976), 18-23
- 6) 岡田; イナートガス噴流によるアークならびに溶融池の制御 (第2報), 溶接学会全国大会講演概要, No.20 (1977), 183
- 7) 小川, 田村, 中川; 送り曲げ UO 成形法による長尺帯板からの円管成形, 塑性と加工, 25-281 (1984), 239