DCEN 高速 TIG 溶接における電極形状ならびにトーチ傾斜角の影響*

浮田 静雄**, 増子 知樹***, 小久保邦雄****

Effects of Electrode Tip Shape and Torch Angle on High Speed DCEN TIG Welding*

by UKITA Shizuo**, MASUKO Tomoki*** and KOKUBO Kunio****

In order to enable the butt welding of 0.3 mm ultra thin aluminum sheets by using commercially available TIG welders, the authors has conducted a series of experiments. In the experiments 2%ThO₂-W electrode of small diameter in DCEN polarity and two thick copper plates contact with base metals are used. The welding speed of 1500-6000 mm/min was attained. The effects of the remodeled nozzle are also studied at the speed higher than 6000 mm/min in the previous papers.

This paper describes the new type of electrode shapes and the inclination of the torch. First the experiment with the electrode tip of conical shape with angle from 45° to 120° are conducted and the welding speed up to 6000 mm/min can be obtained, but the welding speed of 12000 mm/min can be done only for the electrode of conical angle 30°.

The experiments with the electrode tip of conical and hemisphere shape show that the shape with a certain ratio of conical and spherical shape is suitable for the high speed 12000 mm/min welding. For the inclination of the torch we found it is better to decline so that the tip comes backward. By the combination of inclined torch and the electrode with a small spherical shape, high speed welding can be attained for the wide range of welding current.

Key Words: Thin Aluminum Sheet, Ultra High Speed Welding, DCEN, TIG, Electrode Tip Shape, Inclination Angle, Butt Welding, Thick Copper plate

1. 緒 言

アルミニウム薄板を突合わせ溶接する場合は通常、TIG 溶接法で行われることが多いが、熱交換材などに使用される 0.4 mm 以下の極薄板になると溶接が困難となる。その理由として、この方法では AC または DCEP の極性で行われるために電極を純タングステンにして直径を太くせざるを得ずアークが集中しにくくなることと、母材のアルミニウムは熱伝導率ならびに線膨張係数が他の材料に比較して大きいので、アーク溶接中に母材周辺部がアークによって予熱され溶接前にひずみ変形を生じてしまうことが原因と考えられる。予熱の影響を避けるために溶接速度を増すと今度はアークそのものが不安定になり溶接はやはり成功しない。

そこで極性を DCEN にし、電極としてトリア入りタングステンの細直径のものをを用いてアークが拡がらぬようにし、さらに母材を 2 枚の厚手の銅板で挟み込んで熱が未溶接領域に先行流入しないようにして突合わせ溶接を行っ

た。この手法¹⁾により厚さ 0.3 mm の極薄板の突き合わせ溶接を、通常の 1000 mm/min から高速の 6,000 mm/min までの溶接速度で可能にさせ、その結果を報告²⁾した。溶接速度が 6,000 mm/min を越えると突合わせ溶接はさらに困難になる。そこでこの原因の一つにあげられる被包ガスの安定化に注目してノズルを試作改良し、それを上述の手法に併用して厚さ 0.3 mm の極薄板が溶接速度 12,000 mm/min の超高速でも溶接可能となることを実験的に確かめて報告³⁾した。

しかしながら、超高速溶接を可能にするためには上述の特殊ノズルの改良など装置器具の煩雑な準備をしなければならないが、通常の TIG 溶接機で容易にアルミニウム極薄板の高速溶接が可能であればこの分野でさらに高能率化に寄与するものと思われる。超高速溶接を可能にさせる因子の一つにアークの安定化や指向性があげられる。平岡ら⁴⁾は TIG 溶接において電極棒先端角がアーク圧力に大きく関係していることを述べており、牛尾ら⁵⁾はタングステン電極の特性について述べている。また、荒谷⁶⁾は TIG 溶接における電極形状および表面状態が溶接に与える影響について最近の研究を紹介している。この他、電極に関しては多くの研究が行われてきており、電極先端の形状がアークの指向性ならびにアーク圧力に関係していることが明らかにされている。

そこで、本報告ではこれらアークの特性に関係する電極棒先端の形状ならびにトーチの傾斜角に注目し、それらが

*原稿受付 平成13年2月20日 平成7年度春季全国大会で発表

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

***学 生 員 工学院大学大学院(現:東京都環境科学研究所)
(Member), Graduate Student of Kogakuin University (Tokyo Metropolitan Research Institute)

**** 工学院大学 Kogakuin University

高速溶接にどのように影響するかを調べた。その結果を報告する。

2. 供試材料および実験方法

実験に用いた材料は工業用純アルミニウム A1100P (JIS H4000) で寸法は $0.3 \times 30 \times 600$ mm の極薄板である。これを2枚、長手方向側を突き合わせて溶接する。Fig. 1に実験装置を示す。溶接速度が超高速になると微少な振動でも実験結果に影響を及ぼす恐れがあるため、トーチは振動源から切り離して天井側に固定してある。走行台(溶接台)上に厚さ30 mm の銅板製裏当てを敷き、その上に母材を2枚突き合わせて置く。その母材を端面 30° のテーパを持つ一対の銅板を4.5 mm の対向間隔をおいて密着させ、クランプで固定する。走行台は高速走行時には鉛直方向へ微少だが浮き上がる。それを抑えるため、車輪を使わずに溝付きの一対の平行レールを敷設し、走行台をその溝に両脇部を挟持させてガイドレール上を滑走できるようにした。走行台はエンドレスベルトで牽引させた。これによって、超高速時の走行台の鉛直方向への変位を0.1 mm 以下に抑えることができた。電極は直径1.6 mm、突き出し距離は24 mm、電極と母材間距離は溶接速度6,000 mm/min までは1.2 mm、それを越える速度では1.0 mm とし、極性は棒マイナスの DCEN、アルゴンガスは9 l/min 一定で溶接直前に10秒間放流しておいてからアークをスタートさせた。これはトーチ内の残留気体、湿度分などを除去するためである。また、母材はすべて表面が無酸化状態で光沢のあるも

のをを用い、実験直前にアセトンで脱脂処理を行った。

3. 実験結果および考察

まず、電極棒先端の形状を通常使われる円錐形 60° にして突き合わせ溶接を行った。その結果を Fig. 2 に示す。ここで P (%) は溶接の可否を判断する溶接成功率(歩留まり)であって、次のように定めた。母材の突き合わせ始端部から約30 mm の位置でアークを発生させて突き合わせ溶接を行い、母材終端部の手前約30 mm の位置でアークを消滅させる。アーク発生直後はアークが不安定であり、安定するまでに0.2~0.5秒かかることを考慮し、アーク発生から0.6秒間に溶接した部分を全ビード長から除き、さらに終端部20 mm を除く。残ったビードのうち、ビードが表側、裏側とも連続してできた場合を成功率100%とする。途中、ピットなどが肉視できる場合はその部分は不連続とみなし、残りの最長ビードの長さとの比をもって成功率を表わす。実験は3回実施し、その成功率の平均85%以上をもって溶接可能と判定した。

Fig. 2において、溶接速度 V が1,500 mm/min の場合には狭い範囲ではあるが成功率100%の電流域が存在して溶接が可能であるが、その電流範囲を僅かずれると成功率は急減してゼロに近づく。このときのビードの状態を見ると、電流が溶接可能範囲より少し低下した場合にはスポット状(痕跡)からなる不連続ビード状態を呈し、逆に電流が少し上昇した場合は溶接部は片溶けまたは穴開き状態になる。これは、この溶接速度では元来、電流値が低いのでアーク力が弱く不安定であり、少しの電流変動でも溶接結果に大きく影響するものと考えられる。

溶接速度が2倍の3,000 mm/min になるとアークは安

Fig. 1 Ultra high speed butt welding apparatus.

Fig. 2 Relations of welding current I and percentage of success P. $P = (\text{Number of success weld} / \text{total weld number}) \times 100 (\%)$.

定して、成功率85%以上のいわゆる溶接可能な電流範囲も増加する。速度が倍の6,000 mm/minの高速になると、成功率100%の範囲は限定され、85%以上の溶接可能な電流範囲も縮小する。さらに速度が倍の12,000 mm/minの超高速になると、もはや溶接可能な電流範囲は存在せず、溶接は不可能となる。特に、速度12,000 mm/minでは電流が低いとビードの断続や片溶けがあり、裏波も不連続状態などが見られるが、逆に電流が高いとカウジング状態または穴開きとなり、一部は空気巻き込みがあるのかビード表面が薄く酸化着色されている。これは、溶接速度の増加につれてアークが溶接線上を後方のビード側に引きずられて不安定になることが原因であろうと思われる。

つぎに、電極先端の円錐角度 α (deg.) を変えて突合わせ溶接を試みた。Fig. 3はその結果で、電極先端の円錐角 α と溶接電流 I との関係が示される。なお、この円錐角を変化させた電極棒による方式を、今後タイプAの方式と称するすることにする。図で、○印および△印を結ぶ閉曲線内が成功率85%以上の溶接可能な電流範囲である。溶接速度が6,000 mm/minの場合は、先端角が通常使用されている45°~60°よりも鈍角な90°の方が溶接可能範囲が広く、120°まで溶接が可能である。逆に60°より鋭角になると、45°が限界であり30°では溶接可能な範囲は全くない。溶接速度が12,000 mm/minの場合には先端角が鋭角の方が結果が良く、60°の場合には不可能であった超高速溶接が30°前後で溶接可能となる。これは電流値を高くしたことと電極先端を鋭尖にしたことでアークの指向性が良くなったものと考えられる。しかし、この先端角30°の場合には溶接可能な範囲が狭く限定され、かつ、電極先端は尖鋭のため高電流に耐えられず消耗が早まるようなので実用に適しているとは思えない。

そこで、電極先端の形状を変えてアークがスムーズに流れるようにすると同時に消耗しにくい方法を検討した。Fig. 4がその形状であり、この形状の電極棒を以後、狭

球面電極棒またはタイプBの電極棒と称することにする。まず、図(a)の電極棒先端を半球状に削除する。ついで電極軸を中心にその周辺を円錐角60°で削除する。残った先端球面の最大直径が元の球面直径に対して25%ずつ減じたものが図(b)~(e)であり、(e)は100%削って球面が存在しないいわば60°円錐状の電極そのものである。この残存球面の直径に対し、元の球面直径の割合をここでは球面残存率 S_{ph} (%) と称することにする。

Fig. 5はこのタイプBで行った実験結果で、球面残存率 S_{ph} と溶接可能な電流範囲との関係を示す。溶接速度が6,000 mm/minの場合、 S_{ph} が0~50%までは領域が狭い

Fig. 4 The shapes of the B type electrodes with both spherical and conical surface.

Fig. 3 Welding current range at various conical tip angle.

Fig. 5 Welding current range at various spherical surface ratio.

ものの溶接可能な電流範囲が存在するが、75%以上になると溶接しにくくなる。これは電極先端がある程度鋭角の方がアークの指向性が良く、先端の球面の拡大につれてアークも広がるからであろう。

溶接速度が、12,000 mm/min の超高速になると溶接可能な電流範囲は限定され、Sph が25%で溶接可能となった。このときの溶接可能な電流値を前述のタイプAの先端30°のものと比較すると、タイプBの方が若干高いものの共に溶接可能範囲は10A程度で同じである。しかし、このBタイプの方がAタイプよりも先端表面が鋭角でない分、消耗しにくく超高速溶接には有効であると思われる。

さて、溶接速度が増加するにつれアークは溶接方向と反対の後方に引きずられるようになり、ついには不安定になって消滅する。極性が棒プラスのDCEPやACよりもアークの硬直性、指向性に有利であるDCENにしてかつ棒先端を鋭くしてあるのだがこれも上述の結果から見て限界がある。そこでアークが後方に引きずられる前にあらかじめ電極棒先端を進行方向側に傾けておけばDCENで硬直性を有するアークはまず棒先端から溶接前方に向かって流れ、この電極の傾斜の程度によってアークの引きずりが減少または緩和されるものと考え、トーチをFig.6のように溶接前方に15°および30°に傾斜させて溶接を試行した。

Fig. 6 Inclination angle β of the torch.

Fig. 7 Welding current range at various inclination angles.

また、後方にも傾けてその影響を調べた。なお、この傾斜角にした電極の場合を、タイプCの電極棒と称することにする。

Fig.7はタイプCで突き合わせ溶接を行った結果である。傾斜角 β の値が正の場合は電極先端を溶接進行方向に、負の場合は後方のビード生成側に向けたことを意味する。この傾斜角と溶接可能な電流範囲の関係をみると、溶接速度の如何にかかわらず予想した結果と全く逆の結果が示された。すなわち、溶接速度が6,000 mm/minの場合、電極先端をあらかじめ溶接前方（プラス側）に向けた場合には溶接可能な範囲が狭窄し、一方、アークが引きずられる後方（マイナス側）に向けた方がかえって結果が良好である。特に、後方に15°傾けた場合の溶接可能な電流範囲は、既知のタイプA、タイプBの場合よりも拡大している。溶接速度12,000 mm/minの場合も同様に、前方に向けた場合は全く溶接不可能であったが、後方に向けた場合は溶接が可能となった。

この原因を調べるために、実際に溶接中のアークの写真を撮って検討した。Fig.8は溶接速度12,000 mm/min、先端円錐角60°、アルゴンガス流量9 l/min、電極先端と母材間距離1.0 mmの場合の突き合わせ溶接中の側面（溶接線と直角方向）から見たアークの写真で、カメラ位置は水平面と30°傾斜させている。写真はシャッタースピード8000分の1秒で同じ条件で数回撮ってその中の平均的なものを示した。まず、図(a)の電極先端を前方に傾けた $\beta = +30^\circ$ の場合を見るとアークは溶融池の前方ならびに母材の未溶融部に流れている。これは、アークは硬直性による前方に進む力と、高速溶接が原因で後方に引きずられる力とがせめぎあいバランスがとれている場合であって、アークはほぼ電極直下で流れているものと思われる。一方、図(c)の電極先端を後方に傾けた $\beta = -30^\circ$ の場合には、アークは彗星のように後方に流れていて溶融池全面を覆っているように見える。これはアークの指向性に加えて高速による引きづり力が影響しているものであろう。しかし、これらの結果から直ちに後者の方が溶接結果が良いとは判定できない。そこで、この傾斜角とアーク電圧ならびにビード幅の関係をビードオンプレートにより調べてみた。Fig.9(a)は傾斜角とアーク電圧の関係をみたもので、電極を前方に傾けた場合よりも後方に傾けた場合の方がアーク電圧が高くなっていて、これはアークが引き延ばされていることと一致している。図(b)は傾斜角がビードの幅に及ぼす影響を見たもので、電極先端を前方に傾けた場合よりも後方に傾けた場合の方がビード幅は狭い。これらアークの写真、ビードの幅、アーク電圧等から推測すると、電極を前方に傾斜させた場合のアークは、後方向に傾斜させた場合に比較して横方向（溶接方向と直角な方向）に拡がっており、かつ溶接直前の母材未溶接部を加熱しているため、未溶接部は溶接前に変形を生じてしまい溶接が困難になったのではないかと考えられる。これに対して電極先端を後方に傾けた場合のアーク

Fig. 8 Photographs of the arc and the molten pool at $V = 12,000$ mm/min. (a) $\beta = +30^\circ$, (b) $\beta = 0^\circ$, (c) $\beta = -30^\circ$

クはその指向性のために後方向に向けられると同時に高速溶接によって生じた引きづり状態が加わって溶融池面を溶接線方向に長くかつ幅狭く覆っているため溶接が可能になったものと思われる。一般に、アルミニウム薄板の突合わせ溶接では電極棒は前方に傾けた方が良いともいわれているが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、この結果からみると、薄板の中でも極薄板の高速溶接の場合に限っては逆に電極棒は後方に傾けた方が良い結果が得られることが明らかになった。なお、Fig. 10 は電極先端を後方に 30° 傾斜させて超高速突き合わせ溶接を成功させた場合の表面ビード(a)と裏面ビード(b)の状態である。ビード表面の突合わせ線上に一条の着色軌跡が肉視されるが、それはサンドペーパーで削除出来る程度であって、多分、アークが長く引きずられたのでその一部が被包ガスから逸脱した結果生じた酸化物であろうと推定される。

さて、ここでタイプA、タイプB、タイプCのそれぞれ

Fig. 9 The arc voltage and the width of bead at various inclination angles.

Fig. 10 Appearances of the butt welded bead surface (a) and back (b) at the inclination angle $\beta = -30^\circ$, conical angle 60° , Sph 0%, current 98 A, voltage 12.3 V, arc length 1.0 mm and aluminium sheet (JIS A1050P) of 0.3 mm thick.

の特徴が明らかになったが、各タイプの中から主要なものを組み合わせて実験し、超高速溶接への適応結果を調べてみた。

このうち、特に超高速溶接に適しているものと特徴のあるものを含めて、いくつかの実験結果を Fig. 11 に示す。溶

Fig. 11 Welding current range at high speed 12,000 mm/min welding by combinations of various tip shapes and inclination angles.

接速度はすべて12,000 mm/minである。図中、(a)から(g)まで、各々のプロットを結ぶ実線範囲がその組の溶接可能な電流範囲を表し、この範囲が広いほど超高速溶接に有利なことを意味する。図中(a)の円錐角60°のものは全く溶接不可能で図示できず、(b)はタイプCの中で最も結果が良かったもの、同様に(c)、(e)もタイプA、タイプBの中で最も結果が良かったもので、既に述べた。また、(d)、(f)、(g)は新たに実験試行した中から特に優れている3種類のものを選んで示した。この中で先端角 α が30°の円錐状で電極先端を後方に15°傾斜させた結果(d)と、 α が30°で球面残存率Sphが25%、後方に15°傾斜させた結果(g)とが特に優れており、両者は溶接可能な電流範囲が他の条件のものと比較してかなり広範囲に存在する。しかし、その両者の相違は電極棒の消耗の度合いの差にあり、高電流を使用する超高速溶接には先端が尖鋭である前者よりも先端の一部が球面である後者の方が電極の消耗は少ないので、後者が超高速溶接に対して最も適しているものと考えられる。

4. 結 論

アルミニウム極薄板の片面突合わせ溶接において、特殊な装置、器具などの煩雑な準備をすることなく、厚めの銅板で母材を密着させる方法に加えて電極棒先端の形状ならびにトーチ傾斜角を変える程度で、超高速溶接が可能になることが実験的に確かめられた。得られた結論は次の通りである。

- (1)通常のTIG溶接機で極性をDCENとし、市販のセラミックカップならびに2%ThO₂-W電極棒を使用する。母材を2枚の厚手の銅板で密着させる。この条件のもと

で、電極棒先端を円錐状にした場合、その先端角が45°~120°で溶接速度が6,000 mm/minまでは溶接可能であるが、それを越えると溶接が困難になる、12,000 mm/minの超高速溶接では円錐角が30°の限られたときのみ溶接が可能である。

- (2)電極棒先端を半球状にし、その周辺を60°の円錐形に削除した狭球面電極棒の場合には、その球面率が25%のものが最も良く溶接速度が12,000 mm/minの超高速溶接が可能となる。ただし、その溶接可能な電流の範囲は少ない。
- (3)トーチ(電極)を傾斜させた場合、溶接方向に電極先端を傾斜させるよりも後方ビード生成側に傾けた方が溶接結果が良く、特に後方15°の場合に最も有効であって12,000 mm/minの超高速溶接ができることが分かった。この結果から、従来、薄板の突合わせ溶接ではトーチは前方に傾ける方が良いとされてきたが、極薄板の超高速溶接の場合では、逆に、後方に傾けた方が有効である。
- (4)上記の各タイプの組み合わせの実験結果から、アルミニウム極薄板の超高速溶接には先端角が30°で球面率が25%の電極棒を後方に15°傾けた場合が最も有効であることが分かった。

謝 辞

本研究の遂行に際しご指導いただいた大阪大学黄地尚義教授ならびにご検討いただいたアーク物理研究委員会の皆様に厚く御礼申し上げます。また、ご協力いただいた染谷和俊工学修士(現飛鳥建設)に対し深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 浮田ほか：TIG溶接法，特許第1678885号(1992)。
- 2) 浮田，赤松，清水：アルミニウム極薄板の高速TIG溶接に関する研究，溶接学会論文集，11-2(1993)，360-364。
- 3) 浮田，清水：高速TIG溶接における被包ガス流出特性の影響，溶接学会論文集，13-2(1995)，233-239。
- 4) 平岡，岡田，稲垣：TIGアークにおける最大アーク圧力に及ぼす電極形状の影響，溶接学会論文集，3-2(1985)，246-249。
- 5) 牛尾，田中：タングステン電極の特性，溶接アーク物理研究委員会，ア物94-891(1994)，溶接法研究委員会，SW2320-94(1994)。
- 6) 荒谷：TIG溶接における電極について，ウェルティック，Vol. 7(1988) 26-30。
- 7) 日本溶接協会編：新版ティグ溶接法の基礎と実際，産報出版(1992)，135-138。
- 8) 日本規格協会編：アルミニウム溶接技術検定における試験方法及び判定基準，JIS Z 3811(1996)。