TIG 溶接の電波障害軽減とアークの安定化*

信原 貞男** 窪田 武文**

On Stabilization of Arc and Reduction of Radio Interference
in the TIG Welding*

by Sadao Nobuhara** and Takehumi Kubota**

Abstract

For the purpose of decreasing the radio interference to which superimposed higher frequencies give rise, we steadied the arc by a method of substituting a discharge of condensers for the oscillation of higher frequencies after starting of the arc.

This study was carried out to observe reigniting phenomena of the arc, to discuss about the most suitable pulse shape and the maximum irreducible energy required for reignition, when the base metal was aluminum.

1. 緒 言

近年アルミニウムおよびその合金は、耐食性、加工性などに加えて、構造物の軽量化に欠くことのできない材料であり、需要は急速に増大している。

アルミニウム材料のアーク溶接法としては現在MIG、TIG溶接に限られるようであるが、このうち交流を電源とするTIG溶接では、併用高周波が電波障害をひき起すことがあり、十数年来から種々の方策が検討されているにもかかわらず、今だ解決されていないのが現状である。その原因としているいろいろ考えられるが、TIG溶接法の適用度と実際に電波障害が問題化した比率にも関連して、装置が複雑かつ高価になることが妨げになっているものと考えられる。現在アルミニウムのTIG溶接においては、一般に電極と母材の無接触アークスタートを必要とし、電極-母材間数 mm を絶縁破壊してアークに移行させるには、数千ボルトの電圧が必要であり、従来から雑多な高調波も発振する火花式の高周波発生方式を用いている。

筆者らは数年前にTIG溶接装置から発生する障害電波の電界強度を定量的に測定し、その軽減策についても検討した。本報告では電波障害軽減の目的で、アーク発生中は障害となる高周波の発生を停止し、コンデンサの放電を利用してアークを安定化した結果について述べる。

2. 実験目的および方法

アルミニウムの交流TIG溶接におけるアークの再点弧現象については、周知のごとく母材のアルミニウムが陰極となる逆極性の半波で再点弧が起りにくく、アークが不安定になりやすい。したがってアーク電流の零位相付近に高周波高電圧を電極間に印加し、高周波放電を起して再点弧をたすける。火花発振回路によって生ずるこの高電圧は、減衰時間数 μs ~ 数十 μs の高周波振動電圧であって、このような短時間に電極間の絶縁を破っても商用周波の溶接アークにはつながらない。したがって抵抗とコンデンサの直列からなるアーク安定用の補助回路、いわゆるクリーニングユニットを必要とし、その作用についてはすでに明らかにされているとおりである¹⁾。しかし一度アークが発生すると、数秒にしてタングステン電極および母材の表面は局部的にせよ高温度となり、陰極点あるいは熱陰極を形成しやすい状態となる²⁾。筆者らが以前の実験で測定した結果^{3), 4)}においても、アーク発生中において、タングステンが負となる正極性の半波は再点弧に高電圧を必要とせず、アルミニウムが負となる逆極性の半波では 300~400 V の電圧で再点弧が起ることを確認している。したがって溶接中は高周波電圧の尖頭値をアークスタート時 (4~5 kV) の $\frac{1}{10}$ 程度に下げても安定なアークを維持でき、電波障害がほとんど生じないことを提案した³⁾。しかしそのためには発振回路の火花間隙の調整など装置が多少複雑になること、実際には電波障害があまり問題化しないことなどで実用には至っていない。

* 原稿受付 昭和48年5月9日 (48年度春季全国大会に発表)

** 正 員 姫路工業大学 Member, Himeji Institute of Technology

Fig. 1 Experimental circuits for stabilizing TIG arc by condenser discharge.

そこで筆者らは次に述べるように溶接中は障害となる高周波の発振を停止し、コンデンサの放電によるパルス状の電圧を電極間に加えてアークを安定化した。Fig. 1 (a)および(b)は実験回路である。(a)はパルス電源を従来のTIG溶接制御装置のトーチ、母材間に直接々続する方法で、アークスタート時の高周波高電圧がサイリスタなどの部品を破壊する恐れがあり、部品の選定や保護手段が必要である。(b)はアーク安定用補助回路を省略し、パルス自身にその機能をもたせるようにした方式で、この場合はアークスタート時の高周波高電圧によるサイリスタの破壊はバイパスコンデンサによって容易に防止しうる。

パルス発生回路の動作について説明すると、SCR₁、SCR₂は逆並列接続されたサイリスタであり、ST-S₁、ST-S₂はアーク電流零位検出用の飽和変圧器STの二次巻線で、定電圧ダイオードZD₁、ZD₂などと共にゲート回路を構成している。STの鉄心断面積は数mm²で非常に小さく、アーク電流に対するリアクタンス効果は全く無視しうる。アーク電流が0になって次の半波の電流に再点弧しようとするとき、その半波と同極性のSCRのゲートにSTからの信号が入り、C₂の充電々荷がC₁、SCR、R、電極の経路で放電する。放電によってC₂の

電荷が減少、消滅してもそのSCRはゲートしたままであるから、C₂の充電々圧V_{c2}が最大値に達するまでV_{c2}による電流が同じ経路に流れる。V_{c2}が最大値から降下しはじめると、SCRには逆電圧が加わってカットオフとなり、C₁は次の反対極性の放電が起るまでV_{c2}の瞬時値のほぼ最大値に充電されたまま保持している。したがって次の半波ではC₂の充電々圧V_{c2}と、C₁の和の電圧で放電が起る⁵⁾。Photo. 1 (a)はC₁、(b)はC₂の端

Photo. 1 Typical wave forms of terminal voltage of C₁ and C₂. Vert. 100V/div (a) V_{c1}, (b) V_{c2}

Photo. 2 Typical oscillograms of arc current i_a and pulse current i_p . Vert. 17A/div

子電圧の波形を示し, Photo. 2 (a) は Fig. 1 (a) の回路で実験した場合のアーク電流 i_a と, パルス電流 i_p の関係を示すオシログラムである. (b) は V_{c2} , C_1 , C_2 , R などを限界値とした場合アークが不安定となり, 逆極性の半波の再点弧が失敗したときの状態である. Fig. 1 (a) の回路ではパルス電流の一部が溶接電源側, すなわち R_c , C_c からなるアーク安定用補助回路および溶接機 WT に分流する. しかし後述するようにこの実験の場合は発生したパルスエネルギーの大部分が電極間に供給されている. 一方 Fig. 1 (b) の回路では, このようなパルス状の電流に対して溶接機のインピーダンスは高いと考えられるから, ほとんどのエネルギーが電極間に供給される. また C_1 , C_2 および V_{c2} の値によってパルス放電をする直前のコンデンサの保有エネルギーが決まり, C_1 , C_2 および直列抵抗 R によってパルス波形が変化する. ゆえにこれらの値によって電極間に供給されるエネルギーが異なるから, アークの再点弧が安定に起りうる限界条件がこれら諸量間に存在することになる.

なおタングステン電極が負となる正極性の半波では, 本実験のようなパルスや高周波電圧を必要とせず再点弧が可能なことは容易に理解する. したがって正極性の半波にパルス进行供給するサイリスタは Fig. 1 (b) のようにダイオード D に置き換えることができる. しかし前述の C_1 の動作からわかるように全く省略することはできない.

3. 実験結果

実験はアルミニウム母材上を一定のアーク長を保って 30 cm/min の速度でトーチを移動しながらアークを発生させて行なった. アーク電流が大きいときはアークは安定であるため, 不安定となり易い小電流の範囲に限定した. Fig. 2 (a), (b), (c) は Fig. 1 (a) の実験回路で得られた安定な再点弧の起る限界条件を示している. すなわち $C_1 = C_2$ をパラメータとし, 直列抵抗 R に対して安定な溶接アークが持続する C_1 および C_2 の合成充電電圧 V_c の最低値を求めたもので, 直線の上方が安定領域, 下方が不安定領域である. アークが安定か不安定かの判定は実験者の主観が入り統一しにくいので, オシロスコープでアーク電流を観察しながら, 逆極性の半波の電流が時々欠ける程度を不安定とした. アーク電流 I_a は 10 A, 20 A, 40 A (交流実効値) の 3 種類で実験を行なったが, I_a が大きい程電極間に与えられる熱エネルギーが大であるから, コンデンサの充電電圧は低くて再点弧す

Fig. 2 Limiting conditions on series resistance and charging voltage for arc stabilization i_a Fig. 1 (a).

Fig. 3 Limiting conditions on series resistance and charging voltage for arc stabilization in Fig. 1 (b).

る。しかし各電流値について C_1 , C_2 の値により直線の傾斜が少し異なっているが、この原因について筆者らはまだよくわかっていない。

Fig. 3 (a), (b), (c) は Fig. 1 (b) の回路で得られた結果である。この場合は回路から明らかなようにパルス電流の通路に高周波回路の結合コイルがあり、そのインダクタンス L がパルス電流の波形に影響を与える。すなわち Fig. 1 (b) においてアークの抵抗をかりに一定値 R_a とすると、パルス電流は C_2 , C_1 , R , L , R_a の直列回路を流れるから、 C_1 , C_2 の合成容量 $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ とすれば、 $4L/C > (R + R_a)^2$ の条件が成立するときパルス電流は振動的となる。Photo. 3 (a) は正常なパルス状の放電電流波形であるが、(b) は電流が振動的な場合で、回路に SCR があるため t_1 で逆電圧が加わり SCR はカットオフとなっている。本実験で使用した結合コイルおよびコンデンサでは、 t_1 は数十 μ S でこのような時間内にパルス電流が 0 になると、アーク電流が小さいときは

Photo. 3 Examples of wave forms of discharging current. Vert. 17A/div, Horiz. 10 μ S/div (a) normal, (b) oscillation

安定な再点弧ができずアークは消失する。したがって Fig. 1 (b) で得られた結果 Fig. 3 (a), (b), (c) に見られるように、コイルのインダクタンスによる共振の影響がでて R の低い側の限界は明りようである。Fig. 1 (a) の回路ではインダクタンスがパルス電流波形に直接影響を与えないから、 R の低い側の限界は不明りようである。

4. 考 察

Fig. 1 (a) の回路で得られた結果 Fig. 2 (a), (b), (c) と Fig. 1 (b) の回路の結果 Fig. 3 (a), (b), (c) を比較すると、Fig. 1 (b) の方式による方が小さいパルスエネルギーでアークが安定化することがわかる。すなわちコンデンサおよび充電電圧が同一のとき、大きい直列抵抗で安定化する。抵抗が大きいとコンデンサの充電エネルギーが同一でも抵抗による損失が大きく、アークに供給されるエネルギーは小さくなる。またコンデンサ、抵抗が同一のとき、充電電圧が低くて安定化する。この理由は Fig. 1 (a) の場合はパルス電流が電極間隙に流れると同時に、電源側すなわち補助回路および溶接機にも分流し、そのエネルギー損失が生じるためである。Fig. 1 (a) においてパルス電源からみた負荷は、アーク抵抗および補助回路と溶接機インピーダンスの並列回路となるが、アーク抵抗はアーク電流の関数であり、その値を求めることは容易でない。そこで今一例として電流 20A の安定なアーク

Fig. 4 Equivalent circuit.

Fig. 5 Explanation of currents i_{hf} , i_c , i_s and i_a .

が持続している状態で、電極間隙および補助回路を含めた電源側に流れるパルス電流の尖頭値を、それぞれオシロスコープで測定して計算すると、等価アーク抵抗 R_a 約 2.5Ω 、電源側等価抵抗 R_s 約 8Ω の値を得た。ただしアーク安定用補助回路の定数はコンデンサ $2\mu\text{F}$ 、抵抗 10Ω である。補助回路のコンデンサはパルス電流に対してそのリアクタンスを近似的に 0 と仮定すれば、溶接機の等価インピーダンスは 40Ω となる。したがって Fig. 1 のパルス電流に対する等価回路は Fig. 4 のようになる。充電電圧 V_c (C_1 , C_2 の合成充電電圧) のコンデンサ C が、SCR のゲートによりパルス状の放電をするとき、アーク抵抗 R_a に供給するエネルギー E_a は次式のようになる。

$$E_a = \int_0^t i_p^2 R_a dt \quad [\text{J}]$$

ただし

$$i_p = \frac{R_s V_c}{L(R + R_s)\beta} \cdot \exp(-\alpha t) \cdot \sinh \beta t$$

$$\alpha = \frac{(RR_s + R_s R_a + R_a R)C + L}{2CL(R + R_s)}$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{R_a + R_s}{CL(R + R_s)}}$$

しかしこの式は煩雑であり、またアーク抵抗を固定抵抗に置換した場合の放電電流の実測波形と、この式による計算波形との比較から、本実験の場合高周波結合コイルのインダクタンス L の影響は小さいと考えられるので、簡単のため L を無視すると次式のようになる。

$$E_a = \frac{R_a R_s^2}{2(R_a + R_s)\{R(R_a + R_s) + R_a R_s\}} CV_c^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2(R_a + R_s)}{R(R_a + R_s) + R_a R_s} \cdot \frac{1}{C} t\right) \right\} [\text{J}]$$

一方通常の TIG 溶接装置において高周波の重畳による再点弧現象は、Fig. 5 のようにアーク電流の零位相付近において、まず高周波電圧によって電極間の絶縁が破られ、減衰振動電流 i_{hf} が流れる。引き続き補助回路の放電電流 i_c が流れ、溶接機からの電流 i_s の増加をまってこれに接続する。電極間にはこれらの合成がアーク電流 i_a として流れる。筆者らは以前の報告³⁾でアルミニウムの TIG 溶接では、 i_c と i_s が交さる時刻 t_0 における i_c の値は、逆極性において少なくとも 0.6A 以上、すなわちアーク電流 i_a としては約 1.2A 以上でないと再点弧に失敗することを述べた。換言すれば i_s が 0.6A 以上増加するまで電極間を電離状態に保つよう補助電流を流す必要がある。そこでいまアーク電流の瞬時値 i_a が 0 の位相にパルス状放電をしたとして、 $i_s = \sqrt{2} I_a \sin \omega t$ (I_a : 交流実効値, 60Hz) が 0.6A となる時刻 t_0 は、それぞれ $I_a = 10\text{A}$ $t_0 = 112\mu\text{s}$, $I_a = 15\text{A}$ $t_0 = 84\mu\text{s}$, $I_a = 20\text{A}$ $t_0 = 56\mu\text{s}$, $I_a = 30\text{A}$ $t_0 = 42\mu\text{s}$, $I_a = 40\text{A}$ $t_0 = 28\mu\text{s}$ となる。したがって前 2 式の t を t_0 とし、安定なアークが維持できる最低限の条件である Fig. 2 (a), (b), (c), Fig. 3 (a), (b), (c) の C , R , V_c を代入して、時刻 t_0 までに 1 回のパルス状電流が電極間に供給するエネルギーを求めると Fig. 6 のようになる。ただしアーク抵抗 R_a は前述の 2.5Ω と仮定した。アーク電流が大きくなれば、アーク空間および電極への入熱が大で、再点弧に必要なパルスエネルギーが小さくなるのはいわば当然と考えられる。それは再点弧が電極間気体分子の衝突電離によってアーク放電に移行して起るのであれば、電極および空間の温度が高ければ電離が起り易く、したがってパルスエネルギーが小さくなるものと思われる。実験の結果から定

Fig. 6 Relationship between regination energy of pulse and arc current.

Fig. 7 Distribution of minimum arc current i_a required for reignition.

性的にはアーク電流の増大と共に再点弧エネルギーは小さくなり飽和する傾向にある。これは Fig. 3 (c) の結果のように、アーク電流が 60 A になればコンデンサ容量や直列抵抗はほとんど無関係になってくることからわかる。しかしながら各アーク電流値 I_a に対してコンデンサ C_1 , C_2 , 直列抵抗 R および充電電圧 V_c がかわるとパルス電流の波形や充電エネルギーが変化するにもかかわらず、 E_a がほぼ一定値になることは注目に値する。もちろんこの試算は一定のアーク抵抗を仮定しており、厳密に正しくないことは言うまでもないが、安定な再点弧はパルスの波形や回路条件には無関係に、電極間に供給されるパルスエネルギーの量によって起ることが予想される。因みに通常の高周波による再点弧の場合、実用されている補助回路の定数を $C_c = 2 \sim 8 \mu F$, $R_c = 5 \sim 10 \Omega$, とし、 C_c の電荷が放電する直前の充電電圧を溶接機の無負荷電圧とアーク電流の位相差から約 100 V と仮定すれば、コンデンサ C_c の保有エネルギーは 10~40 mJ となる。直列抵抗 R_c とアーク抵抗の比を考慮して実際に電極間に供給されるエネルギーは、本実験の場合と略々同程度の値となることがわかる。

つぎにアーク電流の極性が反転して次の半波に再点弧するとき、電極間を高周波または本実験のようなパルスによって極く短時間の絶縁破壊をしても安定な再点弧をせず、溶接機からの電流がある程度の値になるまで電極間を電離状態に保っておかなければならないことはすでに述べた通りである。Fig. 7 は Fig. 1 (b) の実験回路において、パルス発生回路の定数を種々変化して、安定な再点弧が起る限界条件に近いとき、アーク電流（すなわちパルス電流と溶接機からの電流の合成電流）の最小値をオシロスコープで測定したもので、時間 100 μs 以上、電流値 1.4 A 以上にならないければ再点弧しないことを示している。これは逆極性の半波が全く欠けるこ

となく安定したアークが継続している場合の値であるが、この半波の再点弧が不安定で時々電流が欠ける程度の極端な場合の電流値はこれより更に小さい。したがって純アルミニウム母材と純タングステン電極の交流 TIG アークにおいて、逆極性のアークが自立放電し再点弧が起りうる最低の電流値は以前の報告で述べたように約 1.2~1.3 A 程度ではないかと思われる。

5. 結 言

アルミニウムの TIG 溶接において、併用高周波の電波障害を軽減する目的で、溶接中は高周波の発生を停止し、コンデンサのパルス状放電を利用してアークを安定化し、再点弧現象についても検討した。要約すると次のようである。

1. 溶接中は 300~400 V 程度の電圧で電極間の絶縁を破壊しうから、アークスタート時のような数 KV の電圧は不必要である。したがって障害となる高周波の発振は停止し、サイリスタを用いアーク電流に同期してコンデンサの充電電荷をパルス状に放電させることにより TIG 溶接アークを安定化させる。
2. 逆極性の半波を自立放電に移行させ再点弧するには、正極波の電流値が約 1.2~1.3 A 程度になるまで電極間を電離状態に保つような補助手段が必要であり、コンデンサのパルス状放電が有効である。
3. またこの場合、定量的な根拠はまだ明らかでないが、パルス電流の波形や回路定数とは無関係に、電極間にある一定量のエネルギーを注入する必要がある。この量はアーク電流値によって異なり、アーク電流が大きくなる程小エネルギーでよいが、筆者らの実験した 10~60 A の電流の範囲から推定すれば、30 A 以上の実用の溶接電流に対して再点弧が起りうる最小パルスエネルギーは約 3~5 mJ と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 長谷川「アルゴン気中における溶接アークの高周波火花による起動について」
本誌, 28, 644 (S. 34, 1959)
- 2) 安藤, 長谷川「溶接アーク現象」
産報, 昭37年 p. 80~96
- 3) 浮田, 信原「TIG溶接用高周波発生装置ならびに電波障害軽減に関する調査研究」
溶接協会電気溶接機部会技術委員会資料 昭39年
- 4) 信原, 窪田「高周波併用アーク溶接における電波障害防止に関する研究」
姫路工業大学研究報告 No. 16A, 1953年
- 5) 信原, 窪田「パルス放電による交流溶接アークの安定化」
姫路工業大学研究報告 No. 24A, 1971年