二段給電式ミグ溶接プロセスと従来型ミグ溶接プロセス におけるビードのぬれ性の比較検討

Comparison of Wettability of Beads in MIG Welding Process with Duplex Current Feeding and Conventional MIG Welding Process

瀬 渡 賢*・青 木 篤 人*・田 代 真 一**・田 中 学**

Masaru SETO, Atsuhito AOKI, Shinichi TASHIRO and Manabu TANAKA

(Received November 13, 2016)

In order to perform stable pure argon MIG welding, duplex current feeding MIG welding has been developed. In the previous experimental study, higher droplet temperature and deeper weld penetration were obtained in the duplex current feeding MIG welding compared with those of the conventional MIG welding. However, the similar effects are considered to be realized also by the conventional MIG welding with short wire extension through increase in welding current. In this paper, basic characteristics of the duplex current feeding MIG welding were compared with those of the conventional MIG welding with the short wire extension. Consequently, it was found that the duplex current feeding MIG welding achieved the deeper weld penetration without an undercut unlike in the case of the conventional MIG welding with the short wire extension.

Key Words: MIG welding, Pure Argon Shielding Gas, Duplex Current Feeding, Wire Extension, Droplet Temperature, Two-Color Pyrometry

1. 緒 言

極低温用鋼構造物や橋梁等の高強度鋼構造物の安全性を確保するためには、溶接部の強度ならびに靱性の両立が必須であるが、低温用鋼ならびに高強度鋼の溶接施工中に溶融金属に酸素、窒素等が混入すると靱性が低下する。このため、この種の鋼種では不活性雰囲気下で安定した施工が可能なティグ溶接が主に使われている。このティグ溶接は靱性も含めて高品質な溶接継手が得られるものの溶接施工能率が悪いといった問題がある。一方で、高能率なミグ溶接は純アルゴンシールド雰囲気では溶接が不安定になるため、一般的にはシールドガスとしてアルゴンガスに酸素や二酸化炭素を添加されたものが使用されており、これらのガスの混入により、靱性が低下する傾向にある¹⁾。

そこで高品質、高能率を両立した溶接を行うために純不活性雰囲気下でのミグ溶接（以下、クリーンミグ溶接と記す）が必要とされている。このクリーンミグ溶接では不規則に陰極点が移動することによりアークが不安定になり、溶接ビードの蛇行が発生すること²⁾や溶接金属の表面張力が高いこと^{3,4)}に起因する凸型ビード形成が問題となっている。クリーンミグ溶接によるアークの不安定や凸型ビード

は、多層溶接の場合、パス間の融合不良といった溶接欠陥を発生し、それを防止するためにパス間グラインダーによる溶接ビードの修正を余儀なくされ、工数の増加の要因となる。

アークの不安定に関しては、上園らが、不規則な陰極点挙動により発生する高い電圧を異常値として判別し、異常電圧が発生する前のアーク特性上の電圧値を代入して補うデジタルフィルタリング処理を行なうことによって、フィードバック電圧に含まれる外乱の影響を大きく改善することを可能とした⁵⁾。

中村らはワイヤ溶融先端液柱がアーク中で極めて長く伸び、かつ大きく不規則に振動している現象が不安定ビードの大きな要因の一つであると判断し、細長く伸びた液柱を短くし変動挙動を抑止するために、中心部の材質の融点が周辺部よりも低くなるように径方向のワイヤ組成を設計した同軸複層ワイヤを開発し、ミグアークの安定化に成功している²⁾。

銭谷らは溶接安定化に必要な最低限の酸素量を供給するため、シールドガスには純アルゴンを用い溶融金属柱近傍にワイヤとコンタクトチップの隙間から局部的に微量酸素を軸流添加するプロセスを開発し、シールドガス中の平均酸

* 川崎重工業株式会社技術開発本部 システム技術開発センター（〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1-1）
System Technology Development Center, Corporate technology Division, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.
(1-1 Kawasaki-cho, Akashi, Hyogo, 673-8666 Japan)

** 大阪大学 接合科学研究所（〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1）
Joining and welding research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

素濃度を低く抑えつつ溶接の安定性を向上できることを確認した⁶⁾。

田中らはクリーンミグ溶接における不安定現象の要因として不規則な陰極点挙動とワイヤ端液柱の揺動の二点に着目し、両者の課題を解決する溶接プロセスとして電離シールドガス流を活用するプラズマミグ溶接プロセスを提案した⁷⁾。プラズマミグ溶接プロセスはアークの安定化に至ったものの、依然ビードのぬれ性が悪く、溶込みが浅いという点に問題があった。

これらの研究では、アークの安定性は大きく向上したものの、もうひとつの問題点である凸型ビード形成に関しては未解決であった。従来のクリーンミグ溶接において十分なぬれ性が得られず凸ビードとなる原因として、溶融金属の温度が低く、表面張力が高くなることが挙げられ、それを改善するためには溶融金属の温度上昇が必要である。しかしながら、従来型ミグ溶接ではワイヤに流れる溶接電流とワイヤ溶融量の一意的な関係を切り離せないために、溶滴の温度すなわち溶融金属の温度を十分に上昇させられないという課題がある。

そこで本研究では2台の溶接電源を用い、1台は通常のミグ溶接用として給電し、もう1台を溶接ワイヤ先端近くに給電することで、溶接電流とワイヤ送給量の一意的な関係を切り離し、それらの独立制御を可能とする、二段給電式ミグ溶接プロセスを開発している。

前報では本プロセスの実験装置を試作し、いくつかの条件下で従来型ミグ溶接と二段給電式ミグ溶接を比較検討した⁸⁾。Fig.1 に二段給電式ミグ溶接の装置構成を示す。上述のようにワイヤへの給電点を二つ設けており、給電チップ同士は接触しないようセラミックによって絶縁されている。トーチは二重構造になっておりセンターガスおよびシールドガスの両方に純アルゴンガスを流している。なお、第一給電チップ下端から第二給電チップ下端までの距離は12 mm となっている。二段給電式ミグ溶接では、従来のミグ溶接における溶接電源に相当する第一電源は定電圧特性

の直流パルス電流で第一給電点に、本研究で提案する第二電源は定電流特性で第二給電点に接続されている。

二段給電式ミグ溶接プロセスの効果を検討した結果、第二給電点に電流を通電することにより溶滴温度が上昇し、従来型ミグ溶接では解決しがたい凸型ビード形成や溶込み不足を改善できることを実験的に確認した。また、二段給電式ミグ溶接における第一電流と第二電流を重ね合わせた電流を従来型ミグ溶接に流したところ、ワイヤ送給量が増加する結果、二段給電式ミグ溶接ほどのぬれ性が得られないことが前報で⁸⁾ 確認された。

一方で、ワイヤ送給量を変えずに電流を増やすための手段として、ワイヤ突出し長さを詰める手法が一般に用いられている。これは、突出し長さが短くなることによりワイヤでの抵抗発熱が少なくなるため、同じワイヤ溶融速度を保つためにはより多くの電流が必要となるためである。本稿では従来型ミグ溶接においてワイヤ突出し長さを短くし溶接電流を増やすことにより、二段給電式ミグ溶接と同等の効果が得られるかについて検討した結果について報告する。

2. 実験方法

本研究では、従来型ミグ溶接トーチ及び定電圧特性電源を用いて、ワイヤ突出し長さを短くして溶接電流の増加をはかった条件下で溶接を行い、二段給電式ミグ溶接の基礎特性との比較検討を行う。前報⁸⁾ における実験条件に揃えるため、ワイヤ送給速度を 8 m/min、溶接速度を 50 cm/min、全ガス流量を 30 L/min とした。母材には板厚 9 mm の軟鋼板、溶接ワイヤには、JIS Z3312 YGW15 相当の $\phi 1.2$ mm ソリッドワイヤを用いた。シールドガスは純アルゴンを流し、その流量は 30 L/min とした。コンタクトチップ-母材間距離 (Contact Tip to Work Distance 以下、CTWD と記す) はワイヤ突出し長さの影響を検討するため、15 mm または 20 mm とし、ビードオンプレート溶接を実施した。前報で報告した二段給電式ミグ溶接及び従来型ミグ溶接の結果は、ともに CTWD 30 mm のものであった。本報ではこれら2点の結果も引用し、合計4条件 (従来型ミグ溶接の CTWD 15 mm、20 mm、30 mm ならびに二段給電式ミグ溶接の CTWD 30 mm) について比較する。

また、アーク長を CTWD 30 mm の場合と同じおよそ 4 mm にし、比較しやすくするため適宜溶接電圧の調整を行った。溶接中、アークの様子を高速度ビデオカメラで撮影するとともに、データロガーを用いてその際の両電源の電流・電圧波形についても併せて計測した。

溶滴温度は溶込み深さやビード形状に大きく影響するものと考えられる。このため、分光器付き高速度ビデオカメラを用いて、二色放射測温法による溶滴表面温度の計測を行った。対物レンズから入射した高温物体からの画像 (放射光) をビームスプリッターによって二つに分割し、それ

Fig.1 Schematic diagram of MIG welding process with duplex current feeding.

(a) CTWD 20 mm

(b) CTWD 15 mm

Fig.2 Waveform of welding current and voltage of conventional MIG welding.

それぞれ異なる2つの波長の干渉フィルター（中心波長950 nmと980 nm）を通過して、高速度デジタルビデオカメラの素子表面で結像して画像として記録される。そして、各画素の輝度比データに、標準ランプによる較正実験から得られた計算式を与えることにより、溶滴表面温度分布を導いた^{9)~11)}。また、撮影条件はトーチカメラ間距離を30 cm、撮影速度500 fps、シャッター速度1/500 secとした。

3. 結果及び考察

3.1 電流・電圧波形の観測

Fig.2(a)にCTWD 20 mmの場合の従来型ミグ溶接における電流・電圧波形を、Fig.2(b)に同じくCTWD 15 mmの場合の電流・電圧波形を示す。CTWDを短くした場合、すなわちワイヤ突出し長さを短くした場合、ミグ電流のベース電流、ピーク電流、ピーク期間は一定であるので、ベース期間が短くなり、パルス周波数が高くなることによって平均電流値が増加していることが分かる。この時のミグ電流の平均値はCTWD 20 mmの場合が226 A、CTWD 15 mmの場合が262 Aとなった。二段給電式ミグ溶接の第一電流(156 A)と第二電流(50 A)の合計値が206 Aだったので、CTWD 20 mmの場合には二段給電式ミグ溶接より20 A多くの電流が流れており、CTWD 15 mmの場合には二段給電式ミグ溶

(a) CTWD 20 mm

(b) CTWD 15 mm

Fig.3 Arc phenomena of conventional MIG welding.

接よりおよそ55 A多くの電流が流れていることになる。

3.2 高速度カメラによるアーク外観および溶滴移行観察

Fig.3(a)にCTWD 20 mmの場合の従来型ミグ溶接におけるアーク外観を、Fig.3(b)にCTWD 15 mmの場合の従来型ミグ溶接におけるアーク外観を示す。なお、この時の撮影方向は溶接進行方向正面からとし、撮影条件はトーチカメラ間距離50 cm、撮影速度4000 fps、シャッター速度1/22000 secとして撮影を行った。CTWDを短くするに伴いミグ電流のパルス周波数が増加するため、それに伴って溶滴移行周波数も増加することが分かった。どちらも1パルス1溶滴の移行となっている瞬間が多かった。二段給電式ミグ溶接と比較すると、溶滴移行周波数がCTWD 20 mmの場合、15 mmの場合の順に増加していくため溶滴の大きさは、二段給電式ミグ溶接>CTWD 20 mmの場合>CTWD 15 mmの場合となった。

3.3 ビード外観およびマクロ断面の観察

Fig.4(a)及び(b)に、CTWD 20 mm及びCTWD 15 mmの場合の従来型ミグ溶接におけるビード外観およびそのマクロ断面を示す。また、比較対象としてFig.4(c)にCTWD 30 mmの場合の従来型ミグ溶接におけるビード外観およびそのマクロ断面を示す。Fig.5に二段給電式ミグ溶接のビード外観及びマクロ断面を示す。

Fig.4を見るとCTWDが短くなるにつれてビード止端部は不揃いで所々掘り下げられた部分が生じるが、溶込みが深くなりぬれ性は改善される傾向にあることが分かる。これはミグ電流の増加に伴うものであるが、Fig.4(a)とFig.5を見比べると従来型ミグ溶接においてCTWDを20 mmとした場合には二段給電式ミグ溶接と同等以上の電流が流れているにもかかわらず二段給電式ミグ溶接ほどのぬれ性は得られていないことが分かる。またFig.4(b)とFig.5を見比べるとCTWDを15 mmとした場合には二段給電式ミグ溶接にかなり近いぬれ性が得られるものの、ビードのぬれ性が均一でなく所々深いアンダカットを生じることが分かった。これはワイヤ送給量に対し、平均電流が上昇し過ぎるためにアークによって深く掘り下げられた溶融地に溶接金属が十分に満たされないまま溶接が進行していくためと考えられる。したがって突出し長さを短くすることによって二段給電式ミグ溶接のような効果を得ようとすると、二段

Fig.4 Bead appearance and cross section of conventional MIG welding.

給電式ミグ溶接と同程度の電流値では十分なぬれ性が得られず、同じほどのぬれ性を得るためにはより多くの電流値を必要とし、その結果アンダカットのような溶接欠陥を招く原因となり得るといえる。

また、従来型ミグ溶接において突出し長さによって電流値を調整するには適正電流範囲が狭く難しいのに対し、二段給電式ミグ溶接ではワイヤ送給量と溶接電流をある程度独立して制御できるため、第二電流を調整することにより突出し長さ一定のままでビード形成を改善できる。さらに開先内の溶接等、トーチの近付ける限界のある場合を想定するとCTWDを縮めるのにも限界があり、突出し長さの変更が不要であることは大きな利点であるといえる。

3.4 二色放射测温法による溶滴の表面温度測定

アーク消弧直後の波長 980 nm と 950 nm における CTWD 20 mm の場合の従来型ミグ溶接の分光画像を Fig.6(a) に、同じく CTWD 15 mm の場合の従来型ミグ溶接の分光画像を Fig.6(b) に示す。なお、撮影方向は溶接進行方向正面からとし、撮影条件はトーチ - カメラ間距離 30 cm、撮影速度 500 fps、シャッター速度 1/500 sec として撮影を行った。

この時の溶滴部分を切り出し、二つの異なる波長の輝度比から溶滴の表面温度分布を求めた。CTWD 20 mm の場合の溶滴の表面温度分布を Fig.7(a) に、CTWD 15 mm の表面温度分布を Fig.7(b) に示す。比較対象として CTWD 30 mm の場合の溶滴の表面温度分布を Fig.7(c) に、二段給電式ミ

Fig.5 Bead appearance and cross section of MIG welding with duplex current feeding.

Fig.6 Spectroscopic image of 950 nm and 980 nm wavelength of conventional MIG welding.

グ溶接の場合の溶滴の表面温度分布を Fig.7(d) に示す。表面温度はアーク消弧直後の分光画像から算出されており、主にアークルートの形成されていた溶滴下部において表面温度が高くなっていることがわかった。

この時の各々の溶滴の平均表面温度は CTWD 20 mm の場合が 2020 K、CTWD 15 mm の場合が 2110 K であった。CTWD 30 mm の場合が 1870 K であったことと比較すると、CTWD を短くし電流値が上昇するにつれて溶滴の温度が上昇していくことが分かる。CTWD を短くすることでぬれ性が向上するのはこの理由にあると考えられる。しかしながら二段給電式ミグ溶接の場合が 2160 K であったことと比較すると従来型ミグ溶接では二段給電式ミグ溶接よりも多く

Fig.7 Surface temperature distribution on droplets of conventional MIG welding and MIG welding with dual current feeding.

の電流値が流れている場合でも二段給電式ミグ溶接と同等の温度、もしくはそれ以下となることが分かった。したがって、二段給電式ミグ溶接では従来型ミグ溶接と比較して合計で同じ電流を流した場合、より効率的に溶滴温度の上昇が可能となることがわかった。

4. 結 言

本稿では、従来型ミグ溶接においてワイヤ突出し長さを短くし溶接電流を増やすことにより、二段給電式ミグ溶接と同等の効果が得られるかについて検討した。主要な結論を以下に記す。

- 1) 従来型ミグ溶接において、CTWD を 15 mm まで短くすると、電流値は 262 A まで増加し、二段給電式ミグ溶接 (CTWD 30 mm) の全電流値である 206 A を大きく上回った。
- 2) 従来型ミグ溶接において、CTWD を短くするほど、ぬれ性は改善され溶込み深さは増加するが、電流値の増加によりアンダカットを生じる結果となった。一方で、二

段給電式ミグ溶接では同程度のぬれ性及び溶込み深さであってもアンダカットは生じなかった。

- 3) 従来型ミグ溶接では、二段給電式ミグ溶接よりも多くの電流値が流れている場合でも二段給電式ミグ溶接と同等、もしくはそれ以下の溶滴温度にしかならないことが判明した。

参 考 文 献

- 1) S. Terashima and K.K.D.H.Bhadeshia: “Change in toughness at low oxygen concentrations in steel weld metals”, Science and Technology of Welding and Joining, **11**-5 (2006).
- 2) T. Nakamura and K. Hiraoka : “GMA Welding of 9% Ni steel in the pure Argon shielding gas using coaxial multi-layer solid wire”, Quarterly J. Japan Welding Soc., **30**-3 (2012) 254-261.
- 3) S.A.David, T.Debroy and J.M.Vitek: “Phenomenological Modeling of Fusion Welding Process” MRS Bulletin, **10**-1 (1994) 29-35.
- 4) 荻野和巳、城野清、細井千秋: “溶融 Fe-O-S 合金の表面張力”、鉄と鋼、**69** (1983) 48.
- 5) T.Uezono and H.Tong : “Applicatuion to MIG Welding Using Welding Power Source Equipped with Digital Filtering Process” J. J apan Welding Soc., **76**-4 (2007) 43-46.
- 6) S. Zenitani, T. Nakamura, K. Hiraoka and K. Shinozaki: “Ar-MIG arc behavior in local addition of small amount of Oxygen into shielding gas”, Quarterly J. Japan Welding Soc., **25**-1 (2007) 187-195.
- 7) M. Tanaka, T. Tamaki, S. Tashiro, K. Nakata, T. Ohnawa and T. Ueyama : “Characteristic of ionized gas metal arc processing”, Surface & Technology, **202** (2008) 5251-5254.
- 8) M. Seto, A. Aoki, M. Tanaka, S. Tashiro and T. Era: “Study on new welding process with duplex current feeding”, Quarterly J. Japan Welding Soc., **34** (2016) 150-157.
- 9) K. Yamazaki, E. Yamamoto, K. Suzuki, F. Koshiishi, K. Waki, S. Tashiro, M.Tanaka and K. Nakata: “The Measurement of Metal Droplet Temperature in GMA Welding by Infrared Two-Color Pyrometry”, Quarterly J. Japan Welding Soc., **26**-3 (2008) 214-219.
- 10) K. Yamazaki, E. Yamamoto, K. Suzuki, F. Koshiishi, K. Waki, S. Tashiro, M. Tanaka and K. Nakata : “The Measurement of Metal Droplet Temperature in GMA Welding by Infrared Two-Color Pyrometry”, Quarterly J. Japan Welding Soc., **26**-3 (2008) 214-219.
- 11) ランカスター: “溶接アークの物理”、溶接学会、溶接アーク物理委員会 (1990).