

短絡アーク溶接プロセスのモデリングとアークセンサ制御技術への応用

Process Modeling of Short Circuiting GMA Welding and Its Application to Arc Sensor Control

児玉真二^{*(1)} 一山靖友^{*(2)} 生野康之^{*(3)} 馬場則光^{*(4)}
 Shinji KODAMA Yasutomo ICHIYAMA Yasuyuki IKUNO Norimitsu BABA

抄 録

ガスマタルアーク溶接の短絡移行プロセスに焦点を当て、その数学モデルを開発した。まず、既存のスプレー移行条件のモデルを基に短絡移行条件のモデル化を試みた。また、開発したモデルを高速揺動ガスマタルアークプロセスに応用し、その短絡挙動を検討した。モデルによる解析結果から、トーチ揺動周波数が揺動無しでの短絡周波数の1/2付近となる所定の周波数領域で、揺動両端部で規則正しく短絡が発生することが明らかになった。さらに、揺動周波数と短絡現象の関係からアークセンサ性能向上のための最適揺動周波数について検討した。

Abstract

The mathematical model of gas metal arc (GMA) welding, focusing on short-circuiting transfer, is developed. First, a model of short arc welding is proposed, based on a previous reported model of spray arc welding. Then, the proposed model applied to the high speed oscillating GMA process, and the short-circuiting dynamics is investigated. Numerical calculation result revealed that short-circuiting regularly occurs at both oscillating edges at oscillating frequencies close to half the rate of short-circuiting under non-oscillating condition. The finding indicates that the arc sensor properties improved by setting the oscillating frequency to this value.

1. 緒 言

ガスマタルアーク(GMA)溶接をはじめとする溶極式アーク溶接法では、溶接ワイヤそのものが電極となる。電極ワイヤはアーク熱によって溶融し、溶滴となって溶融池に移行するため、電極ワイヤの溶融特性がアーク溶接システムにおける電流・電圧特性に影響を及ぼす。

アーク溶接システムのモデリングは、ワイヤ溶融現象の解析を主体に取組まれてきた。Lesnewich¹⁾やHalmoy²⁾は溶滴移行形態が安定するスプレー移行条件を対象にワイヤ溶融特性式を導出し、さらに丸尾ら³⁾はこれをパルス溶接に応用展開し、適正なパルス条件を導出している。また、牛尾ら^{4,5)}は、ワイヤの動的な溶融特性を解析し、インダクタンス等の電源応答性や開先内でのウィーピングに伴うトーチ高さの変動を考慮したアーク溶接システムのモデルを構築している。このモデルは、特に、アークセンサの性能解析に応用され、高速回転アーク溶接法⁶⁾等の優れたアークセンサシステムの基盤確立に貢献している。

一方で、GMA溶接ではスプレー移行条件のみならず、比較的小電流の短絡アーク条件も多く採用されている。薄鋼板の高速溶接や

パイプライン全姿勢溶接の向上き条件では、短絡アーク溶接が主体となる。しかしながら、短絡およびアーク発生を断続的に繰り返すプロセスの複雑さから、短絡アーク溶接の検討例⁷⁾は少ない。加えて、短絡アーク溶接では、短絡による溶接電流・電圧の変化と開先とワイヤの位置関係に伴う溶接電流・電圧の変化との区別が難しく、アークセンサの做い精度低下が懸念されている。

そこで、本報では、溶接現象の理解を目的に、既存のスプレー移行条件のモデルを基に短絡移行条件でのモデル化を試みた。さらに、その応用として高速揺動GMAプロセスにおける短絡挙動を解析し、アークセンサ性能の最適化指針を検討した。なお、モデルに用いた変数は末尾に示す。

2. アーク溶接システムのモデリング

2.1 スプレー移行のモデル

まず、既存知見を基にスプレー移行条件のモデルを概説する。スプレー移行条件に対しては、既に多くの研究が報告されているが、本報ではワイヤ溶融の動特性を考慮した牛尾らの数学モデル⁴⁾を引用した。図1に定電圧特性を有する溶接電源を用いた典型的なGMA溶接の等価電気回路を示し、式(1)~(9)にその数学モデルを示す。

*⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2299

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員

*⁽³⁾ 新日鉄エンジニアリング(株) 技術本部 技術開発研究所
 エンジニアリングサポートセンター 機械・計測技術室 マネジャー

*⁽⁴⁾ 新日鉄エンジニアリング(株) 技術本部 技術開発研究所
 エンジニアリングサポートセンター 次長

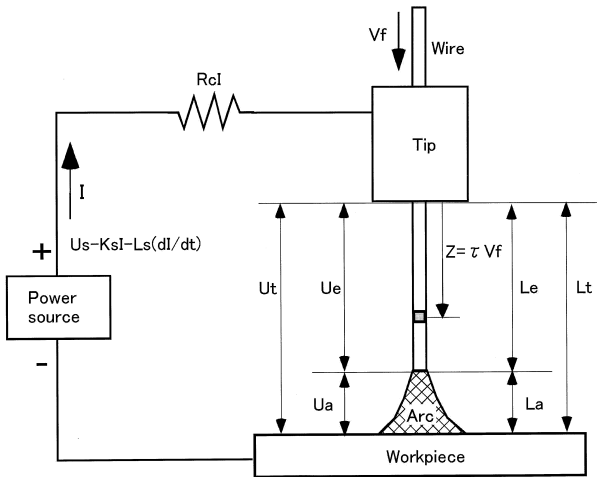


図1 GMA溶接の等価電気回路(参照文献4)
Equivalent electrical circuit for GMA welding (Ref.4)

式(1)(2)はトーチ高さ L_t およびトーチ電圧 U_t の関係式で、ワイヤ突出し部の成分とアーク成分の和で表される。

$$L_t = L_a + L_e \quad (1)$$

$$U_t = U_a + U_e \quad (2)$$

アーク電圧 U_a は、溶接電流 I 、アーク長 L_a の関係式で示される。

$$U_a = U_{a0} + R_a I + E_a L_a \quad (3)$$

式(4)はワイヤ突出し部の降下電圧 U_e で、式(5)で示される通電時のワイヤ抵抗値 R_e から求められる。

$$U_e = R_e I \quad (4)$$

なお R_e は、式(6)で定義されるワイヤ長さ Z 位置(図1参照)でのジュール加熱重み J_z および、 J_z と抵抗値の関係式 $r(J_z)$ を用いて、ワイヤ長さの方向の積分値として求められる。

$$R_e = \int_0^{L_e} r(J_z) dz \quad (5)$$

$$J_z = \int_{t-z/V_f}^t I^2(\tau) d\tau \quad (6)$$

式(7)はGMA溶接の等価電気回路の関係式で、左辺は無負荷電圧 U_s 、内部抵抗 K_s 、インダクタンス L_s の溶接電源を示し、右辺は電源ケーブルの電圧降下 $R_c I$ およびトーチ電圧 U_t を示す。

$$U_s - K_s I - L_s \left(\frac{dI}{dt} \right) = R_c I + U_t \quad (7)$$

式(8)はワイヤ突出し長 L_e の変化量を示し、ワイヤ送給速度 V_f とワイヤ溶融速度 V_m の差で表される。なお V_m は式(9)に示されるように、溶接電流 I およびワイヤ突出し先端部のジュール加熱重み J_{Le} の関数として求められる⁴⁾。また、 A はワイヤ溶融におけるアーク加熱の係数、 B はジュール加熱の係数である。

$$\frac{dL_e}{dt} = V_f - V_m \quad (8)$$

$$V_m = \frac{AI}{1 - BJ_{Le}} \quad (9)$$

2.2 短絡移行のモデル

スプレーアークのモデルを基に短絡アークのモデル化を試みた。スプレーアークモデルでは、溶滴は溶融速度 V_m でワイヤ先端から母材に連続的に移行すると仮定したが、短絡アークでは、アーク発生期間にワイヤ先端で溶滴が成長し、それに伴いアーク長が短縮し、短絡状態となり溶滴が移行すると考えられる。そこで、図2に示すようにアーク発生期間および短絡期間に分けて検討した。またワイヤ先端の溶滴を考慮する必要があるため、ワイヤ突出し長 L_e を未溶融部のワイヤ長 L_{es} と溶滴長さ L_{em} に分割し検討した。

$$L_e = L_{es} + L_{em} \quad (10)$$

式(11)~(16)にアーク発生期間の計算モデルを示す。溶融金属は全てワイヤ先端で溶滴になると仮定し、また溶融池の窪み等の溶融池形状は無視した。式(11)は溶滴長さの初期条件を示す。短絡期間に溶滴は全て母材に移行すると仮定してアークが発生する瞬間 t_{ia} の溶滴長さ L_{em} は零とした。

$$L_{em}(t_{ia}) = 0 \quad (11)$$

また、アーク発生条件は下式で示され、 L_e がトーチ高さ L_t より大きくなると短絡期間に移行する。

$$L_t \geq L_e \quad (12)$$

L_e は式(10)から明らかのように、 L_{es} と L_{em} の相対的な変化率によって決まる。

$$\frac{dL_e}{dt} = \frac{dL_{es}}{dt} + \frac{dL_{em}}{dt} \quad (13)$$

L_{es} は下式で与えられ、 V_m にはオープンアークにおける計算式(9)をそのまま適用した。

$$\frac{dL_{es}}{dt} = V_f - V_m \quad (14)$$

ワイヤ先端の溶滴長さ L_{em} は式(15)(16)で定義した。溶融速度 V_m によって溶融した断面積 S のワイヤが先端部で半径 R_m の球状の溶滴

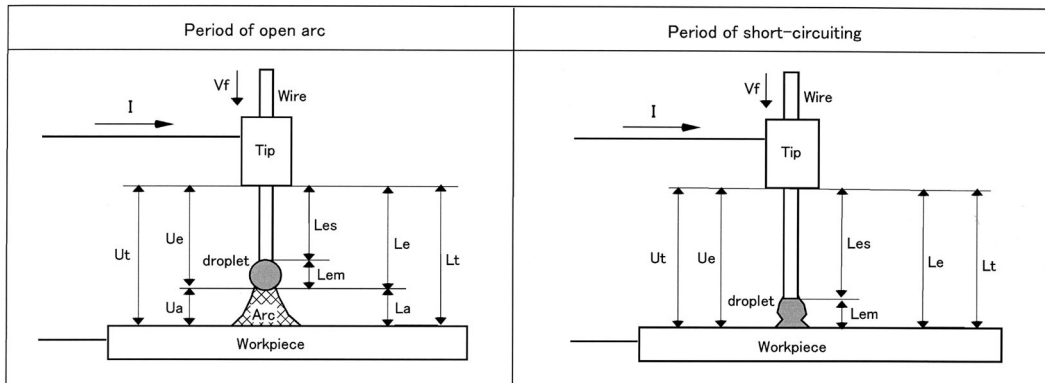


図2 短絡アーク溶接の概念図
Schematic representation of short-circuiting transfer mode

になると仮定して求めた R_m に、溶滴の形状を表す定数 α を積算することによって L_{em} を決定した。

$$\frac{4}{3}\pi R_m^3 = S \int_{t_{is}}^t V_m(\tau) d\tau \quad (15)$$

$$L_{em} = \alpha R_m \quad (16)$$

溶滴の形状はシールドガスや溶接姿勢等に依存し、スプレー移行になりやすい80%Ar+20%CO₂のシールドガスや下向姿勢の溶接では、溶滴は長く伸びた形状になると推測される。そこで本報では $\alpha = 3$ とし、式(15)で仮定した球状の溶滴長さの1.5倍を仮定した。

短絡期間の計算モデルを式(17)～(19)に示す。アーク長 L_a を零とすることによって、溶滴長さ L_{em} はトーチ高さの変化率、ワイヤ送給速度およびワイヤ溶融速度で決定される。

$$\frac{dL_{em}}{dt} = \frac{dL_t}{dt} - V_f + V_m \quad (17)$$

短絡時は溶接電流が増加し、溶滴のくびれを促進する。そのため、ワイヤ突出し部のジュール発熱がワイヤ溶融を支配すると考えられる⁸⁾。そこで、短絡時の V_m は、式(18)に示すようにジュール発熱の影響のみ考慮して求めた。

$$V_m = B_1 R_e I^2 \quad (18)$$

短絡移行プロセスに関しては、溶滴のくびれが重要であり、くびれの形成におよぼす短絡電流や溶滴サイズの影響が議論されている⁹⁾。一方、トーチ揺動状態での溶滴長さ L_{em} は、ジュール発熱による溶滴の成長(溶滴重量の増加)に加えて、トーチ揺動に伴うトーチ高さの変化の影響を受ける。このためトーチが揺動端に近づく場合はトーチ高さの減少により L_{em} も短縮傾向となり、溶滴のくびれを妨げると考えられる。一方トーチが揺動端から遠ざかる場合は L_{em} の伸張により、くびれが促進され短絡移行時間が短縮されると考えられる。

そこで、式(19)に示すように、短絡移行促進の項として溶接電流の二乗および L_{em} を用いた。これらの積の短絡開始時間 t_{is} からの積分値が所定の値 β に達したところで短絡移行が終了すると仮定した。

$$\int_{t_{is}}^t I(\tau)^2 L_{em}(\tau) d\tau \leq \beta \quad (19)$$

なお、実測の短絡時間は約3ms程度であり、この短絡時間を再現するように β を200に固定した。

3. モデルによる解析およびアークセンサ性能の考察

上述の短絡溶接モデルを基に差分法にて数値解析し、トーチ揺動に伴う短絡発生状況を検討した。計算の時間刻みは0.5msとし、時刻1～3sの計算結果を評価した。なお、1s以降の計算結果は定常状態に達していることを確認している。またアーク特性およびワイヤ溶融特性に関するパラメータは文献値^{4,7)}を参考にした。

短絡アーク条件は、 $V_m = 83.3\text{mm/s}$ 、 $U_s = 22.6\text{V}$ 、揺動中心位置でのトーチ高さ $L_t = 18\text{mm}$ に設定した。平均溶接電流190A、平均トーチ電圧17.9V、トーチ揺動無しの短絡回数 $N_{so} = 80\text{回/s}$ とした。

図3に、トーチ揺動無しで計算した溶接電流、トーチ電圧波形を示す。短絡開始と同時に電圧は急激に低下し、電流は増加する。短絡期間すなわち式(19)を満たす期間、電流の増加が続く。電流の増加速度は溶接電源のインダクタンスに依存し、インダクタンスが小さいほど電流の増加速度が高く、結果として短絡期間の短縮に繋が

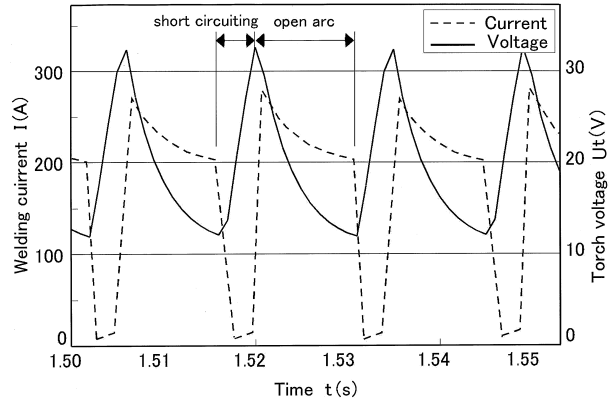


図3 トーチ電圧および溶接電流のシミュレーション結果
Simulation result of torch voltage and welding current

る。なお、短絡期間の電圧増加量が実際の溶接現象に比較して少ないが、溶滴のくびれに伴うワイヤの抵抗増加を考慮していないためである。短絡期間が終了すると、アークの発生に伴い電圧が急激に増加し、電流は緩やかな減少を開始する。アーク発生期間は溶滴の成長に伴うアーク長の短縮により電圧は緩やかに減少する。

このように、本モデルを用いることによって短絡に伴う過渡的な溶接現象の再現が可能である。

3.1 高速揺動GMAプロセスにおける短絡挙動

次に、実験結果を交えつつ開先内でのトーチ揺動に伴う短絡挙動の解析を行った。図4に、開先内でのトーチ揺動位置 X とトーチ高さ L_t の関係を示す。ルート間隔5mmの開先に対しアークは3mm程度の拡がりを持つと仮定して、 L_t の変化を決定した。すなわち、 $|X| > 1.0\text{mm}$ でアークと開先壁の干渉が起これ、揺動端 ($|X| = 1.5\text{mm}$) にて L_t は1.5mm短縮すると仮定した。トーチ揺動位置は、式(20)に示されるように、揺動振幅 W 、揺動周波数 f の単振動で表した。

$$X = (W / 2) \sin(2\pi ft) \quad (20)$$

図5にトーチ揺動周波数を10, 40, 50Hzに変化させたときのトーチ電圧波形について、実験結果と計算結果を示す。実験結果の横軸には時間と共にトーチ揺動の左右両端のタイミング(L, R)を併記した。実験結果と計算結果で同様の傾向を示すことがわかる。 $f = 10\text{Hz}$ の場合は揺動端に近づくタイミングで数回の短絡が生じるが短絡位置は揺動端に限定されない。一方、 $f = 40\text{Hz}$ では短絡が揺動端部で定期的に発生するようになる。また $f = 50\text{Hz}$ の場合、短絡発生位置は揺動端に限定されるものの、トーチ揺動に短絡現象が追従しなくなる。

図6は揺動周波数と短絡回数との関係を示す。オープンマークで

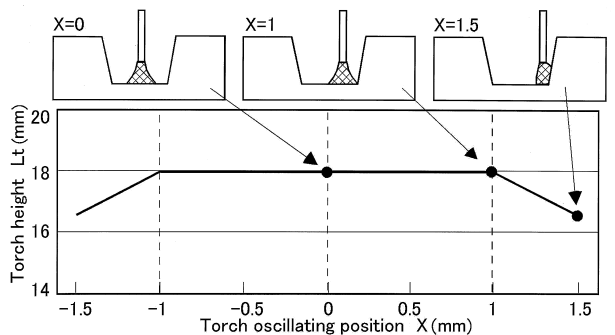


図4 開先内でのトーチ揺動に伴うトーチ高さ変化
Torch height variation during torch oscillation in groove

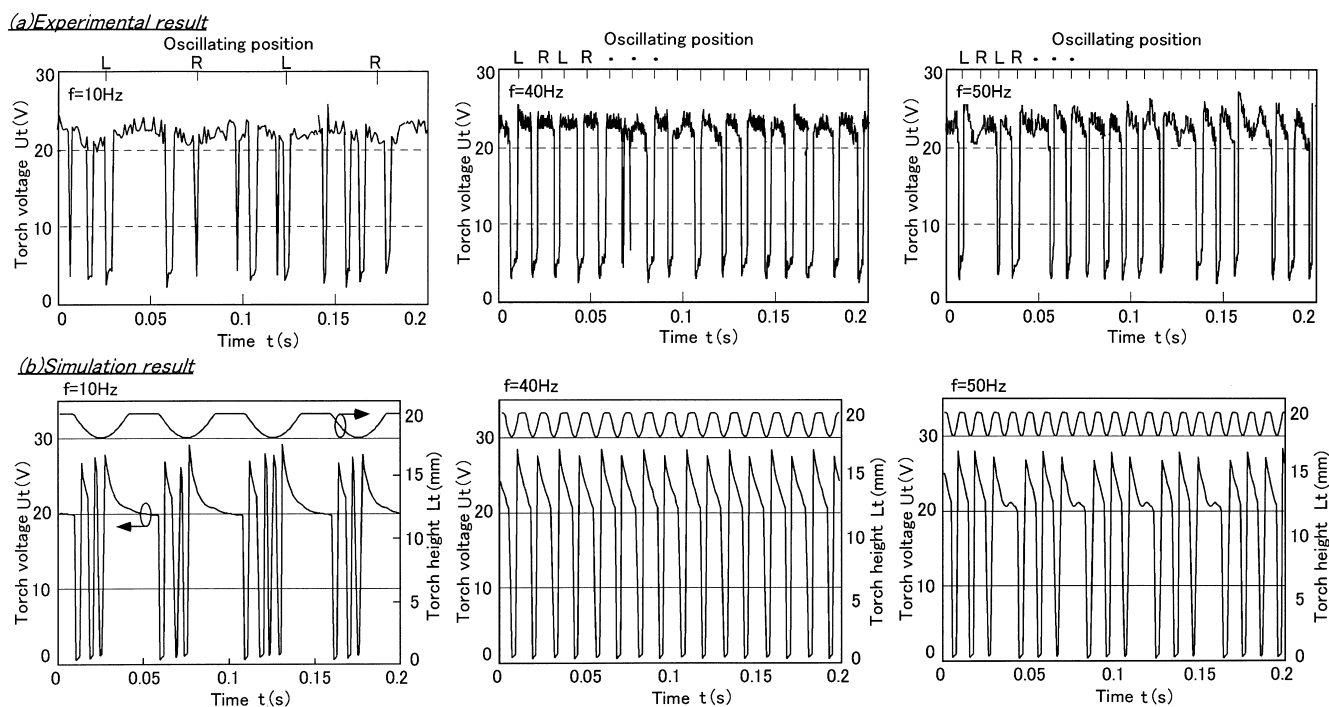


図5 トーチ電圧波形における実験結果とシミュレーション結果の比較
Comparison between experimental result and simulation result of torch voltage history

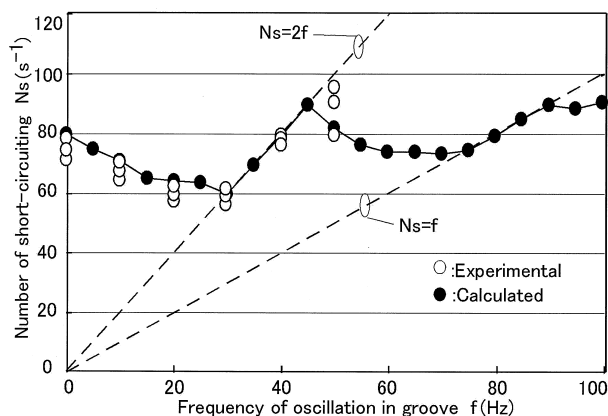


図6 揺動周波数と短絡回数との関係

Relationship between torch oscillating frequency and Number of short-circuiting

併記した実験結果をよく再現していることが確認できる。すなわち、 $30\text{Hz} \leq f \leq 45\text{Hz}$ で短絡回数 N_s が f の2倍値に一致することがわかる。開先内でトーチを揺動する場合、1回の揺動周期でワイヤが左右各々の開先壁に接近するため、揺動周波数がトーチ揺動無しでの短絡回数の1/2付近になると、溶滴が左右の開先壁で規則的に移行すると考えられる。また、 $f < 30\text{Hz}$ では N_s が f の2倍値を大きく上回っており、ワイヤが開先壁に接近する前に溶滴が成長し、揺動位置に関係なく多数の短絡が発生すると考えられる。一方、 $f \geq 50\text{Hz}$ に増加させると、トーチ揺動両端での短絡が困難となり、 N_s は f の2倍値から離れて減少するが、 $75\text{Hz} \leq f \leq 90\text{Hz}$ で N_s は f に一致するようになり、1揺動周期に1回ずつの短絡、すなわち片側の揺動端のみでの短絡が生じるようになると推測される。

3.2 アークセンサにおける揺動周波数の最適化

アークセンサはトーチ揺動に伴う溶接電流やトーチ電圧の変化をセンシングし、それをフィードバックすることによって開先の做い制御を行う技術である。溶接現象の安定するスプレー移行条件では多くの使用実績があるが、短絡移行条件での使用例は少なかった。一般に用いられる数Hz程度の低速揺動条件では揺動位置にかかわらず短絡が発生するため、揺動に伴う電流、電圧の変化が短絡による変動に埋もれる恐れがあった。

これに対し、高速揺動条件で揺動周波数を適切に選択することにより、短絡発生位置を揺動端のみに限定することが可能となり、做い制御データのばらつきが少なくなると期待される。また、周波数応答法によるアークセンサ感度の解析結果¹⁰⁾では、特に、トーチ揺動周波数が揺動無しでの短絡回数の1/2付近となる所定の揺動周波数領域で溶接電流信号、トーチ電圧信号ともにアークセンサ感度の増加することが報告されている。このように、短絡移行条件におけるアークセンサの適用に際しては、揺動周波数の選定が高精度な做いを実現させる有効な手段となる。

4. 結 言

本報では、GAM溶接プロセスのモデルとして、既存のスプレー移行条件のモデルを短絡移行条件に拡張した。さらに、その応用として高速揺動GMAプロセスにおける短絡挙動を解析し、アークセンサ性能の最適化指針を検討した。

なお、本アークセンサ技術は、パイプライン自動溶接機MAG-II¹¹⁾において開先中心做い、揺動振幅制御として導入されており、狭開先全姿勢溶接の高品質化に効果を発揮している。

List of symbols

Symbols of spray transfer condition

A : Arc heating coefficient of wire melting, $0.22\text{mms}^{-1}\text{A}^{-1}$
 B : Joule heating coefficient of wire melting, $6.3 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}\text{A}^{-2}$
 E_a : Electric field intensity in arc column, 0.7Vmm^{-1}
 I : Welding current, A
 J_{L_e} : Joule heating weight of wire extension, A^2s
 J_z : Joule heating weight at the location z of wire extension, A^2s
 K_s : Slope of the U-I characteristic of power source, $0.02\ \Omega$
 L_a : Arc length, mm
 L_e : Wire extension length, mm
 L_s : Inductance of circuit, $2.5 \times 10^{-4}\text{H}$
 L_t : Torch height ($L_e + L_a$), mm
 R_a : Electric resistance of arc column, $0.03\ \Omega$
 R_c : Resistance of welding power cable, $5 \times 10^{-3}\ \Omega$
 R_e : Resistance of wire extension, Ω
 $r(J_z)$: Resistance of unit length of wire extension as a function of J_z ,
 $9 \times 10^{-8}J_z + 3.5 \times 10^{-4}\ \Omega\text{mm}^{-1}$
 t : Time of simulation, s
 U_a : Arc voltage, V
 U_{ao} : Constant component of arc voltage, 16V
 U_e : Voltage drop across wire extension, V
 U_s : Equivalent output voltage of power source in the state of $I = 0$, V
 U_t : Welding voltage ($U_a + U_e$), V
 V_f : Wire feeding rate, mms^{-1}
 V_m : Wire melting rate, mms^{-1}
 τ : Time, s

Symbols of short-circuiting transfer condition

B_1 : Joule heating coefficient of wire melting at short-circuiting,
 $3.8 \times 10^3\text{mms}^{-1}\text{A}^{-2}\ \Omega^{-1}$

L_{em} : Droplet length, mm
 L_{es} : Wire extension length of no-melting part, mm
 N_s : Numbers of short-circuiting with oscillation, s^{-1}
 N_{so} : Numbers of short-circuiting without oscillation, s^{-1}
 R_m : Radius of droplet that supposed spherical shape, mm
 S : cross sectional area of wire, mm^2
 t_{ia} : Time when i th short-circuiting is broken, s
 t_{is} : Time when i th short-circuiting is started, s
 α : Coefficient of droplet length, 3
 β : Coefficient of short-circuiting time, 200

Symbols of torch oscillation

f : Oscillating frequency in a groove, Hz
 W : Oscillating width, 3mm
 X : Oscillating position, mm

参考文献

- 1) Lesnewich, A.: Weld. J. 37(8), 343-353(1958)
- 2) Halmoy, E.: Conference on Arc Physics and Weld Pool Behavior. London. 1979, p.49-57
- 3) 丸尾 ほか:溶接学会論文集.3(1), 191-196(1985)
- 4) 牛尾 ほか:溶接学会論文集.14(1), 99-107(1996)
- 5) 牛尾 ほか:溶接学会論文集.14(1), 108-115(1996)
- 6) 野村 ほか:溶接学会論文集.4(3), 18-23(1986)
- 7) 牛尾 ほか:溶接学会論文集.15(2), 272-280(1997)
- 8) 平田 ほか:溶接学会論文集.22(2), 224-232(2004)
- 9) Hermans, den Ouden: Sci. Technol. Weld. Joining. 3, 135-138(1998)
- 10) 見玉 ほか:溶接学会論文集.23(2), 252-258(2005)
- 11) 中村 ほか:新日鉄技報. (382), 48-52(2005)