り帯から核生成する場合もある。疲れ限度以下では微視的き裂は停滞し、疲れ限度以上では板厚方向に進展して巨視的き裂となることが明瞭に観察された。

(3) 試験片は静的負荷時 ($N=1/4$ 回) に、母材部で荷重の作用線が一致する方向に塑性変形を生ずるので、引張荷重が増すにつれて曲げモーメントの影響は少なくなる。疲れ過程中的試験片の変形状態を観察すると、比較的引張荷重が大きい場合には試験片は寿命の大部分の間、静的な繰返しより求めた引張荷重-曲げモーメント関係で荷重繰返しを受けているものと考えられる。これに対して疲れ限度に近い引張荷重下では、荷重繰返しの初期には曲げモーメントによる応力成分がすべり変形に大きく寄与するが、試験片のはく離を生じる段階では曲げモーメントの影響は相当に減少するものと考えられる。

(4) 矩形電極で溶接した場合に、曲げモーメントの影響を考慮に入れて継手の切欠き係数相当値を求めたところ1.15となった。

謝 辞

本研究に対し、有益なご討論とご助言を頂いた山形大学工学部 小貫晃義講師ならびに実験に協力された山形大学工学部 水野五郎技官 菊地新一技官及び大学院学生 高橋真一君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 磯貝, 三多, 山本: スポット溶接継手の疲労試験, マシニスト, 10 (1968), 39-43
- 2) G. Welter and A. Choquet: Internal-Stress Distribution of Single Spot Welds in Relation to their Fatigue Life, Weld. J. April (1950), 145-158
- 3) 青山, 藤本: スポット溶接した冷延鋼板の疲労強度, 材料, 24-259 (1975), 44-50
- 4) 正木, 北本, 桜井: 炭素鋼の点溶接継手の両振疲労強度と疲れ破壊に関する実験, 材料, 17-182 (1968), 17-23
- 5) R.S. Chandel and S. Garber: Mechanical and Metallurgical Aspects of Spot-Welded Joints in Heat-Treated Low Carbon Mild Steel Sheet, Metals Technology, September (1974), 418-423
- 6) 例えば, 山田, 中原: 塑性力学, 日本機械学会, (1960), 301

プラズマアーク中における溶滴移行*

——溶加材送給を行なったプラズマ溶接について (第1報) ——

田口裕也** 羽田光明** 今永昭慈** 妹島五彦**

Metal Transfer in Plasma Arc*

——Plasma Arc Welding with Filler Wire Addition (Report I)——

by Hiroya Taguchi**, Mitsuaki Haneda**, Shoji Imanaga**,
and Itsuhiko Sejima***

Plasma arc welding with filler wire addition has been used for various purposes in industry. However, there have been few studies on metal transfer in plasma arc with filler wire.

This paper deals with the characteristics of the metal transfer mechanism of the filler wire in the plasma arc, and observation of the droplets transfer. The metal transfer was observed by high speed camera and the wirework voltage was recorded by oscillograph.

In case of plasma arc, the droplets transferred to the molten pool with a streaming transfer which was not observed in TIG arc. The liquid metal at the wire tip was bent downward by the plasma jet and transferred to the workpiece without contact to the molten pool.

As a result, plasma jet stream was found to be the main factor causing the streaming transfer.

*原稿受付 昭和53年3月30日 (昭和49年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 (株)日立製作所機械研究所 Member, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

***正 員 (株)日立製作所エンジニアリング推進センター Member, Corporate Engineering Center Head Office, Hitachi, Ltd.

1. 緒 言

プラズマ溶接において、溶加材を送給することは、次の点で有利である。

- 1) 溶接条件の拡大 (開先ギャップ, 目ちがい)
- 2) 溶着金属の改善 (ブローホール, 割れ等の防止)
- 3) 溶着量増加による能率向上
- 4) ノンキーホール溶接におけるビード形成の安定化

このように、溶加材の送給は実用的に有効と考えられながらもこれまでにプラズマ溶接に対する溶加材送給の研究を行なった例は少ない。この溶加材送給について検討するためには、まずプラズマアーク中における溶加材の溶融および溶滴移行現象を調べる必要がある。

最近、プラズマ-MIG 溶接が開発され、その溶滴移行現象が観察¹⁾されたが、これまでにプラズマアーク中に送給される溶加材の溶滴移行現象についての研究^{2,3)}はほとんど見られない。

筆者らは、プラズマアーク中に種々の条件で溶加材を送給し、高速度写真等によってその溶滴移行現象を観察し、また、TIG アーク中の場合と比較検討した。なお、本報では、主として、溶接アーク現象を調べたが、溶加材送給のビード形成への効果および実用性については次報で報告する。

2. 実 験 方 法

Fig. 1 に示すごとくプラズマアーク中に溶加材として 1.2ϕ の市販の炭酸ガス溶接用ワイヤを約 5° の挿入角度で横から定速送給し、溶加材と母材間の電圧 (ワイヤー母材間電圧と呼ぶ) の短絡回数を記録して溶滴移行回数を測定した。

母材には、SS 41 および SM 50 を使用し、ビードおき溶接を行なった。また、溶滴移行現象を背光法によって高速度写真観察した。

プラズマトーチはノズル口径 4 mm の 300 A 容量のものを使用した。プラズマガスは Ar ガス、シールドガスは Ar + 9% H_2 ガスである。アーク長は、TIG アークの場合は 6 mm であり、プラズマアークの場合はノズル母材間距離が 10 mm である。

Fig. 1 Explanatory sketch for filler wire addition

3. 実験結果および考察

3.1 短絡回数の測定

Fig. 2 は、プラズマアークおよび TIG アーク中に溶加材を送給した場合のオシログラムの例である。いずれもアーク電流、 $I=200$ A ワイヤー母材間距離、 $h=2$ mm (プラズマ)、 $h=3$ mm (TIG) の条件であるが、ワイヤー母材間電圧は、プラズマアークの場合は約 8 Volt, TIG アークの場合は約 5.5 Volt となった。これは、プラズマアークの電位傾度が高いためと考えられる。

Fig. 2 Oscillograms of wire-work voltage for plasma arc and TIG arc

溶加材がアーク中で溶滴移行を行なっている時のワイヤー母材間のオシログラムは、Fig. 3 のように短絡時間 (T_s)、懸垂時間 (T_d) および移行周期 (T_0) よりなっている。つまり、溶加材がアーク中に送給され先端に溶滴が形成されつつある状態では、溶加材はアーク中に挿入された探針に相当し、ワイヤー母材間電圧が測定できる。溶滴が成長して大きくなり母材と接触するとワイヤー母材間電圧は短絡され溶滴の移行が終了するまでこのワイヤー母材間電圧は短絡されている。この短絡回数は、溶滴の移行回数に相当する。

Fig. 3 Wire-work voltage

プラズマアークおよび TIG アークの短絡回数およびワイヤー母材間の電圧波形にはほとんど差が見られなかった。短絡時間は、移行周期にくらべて著しく短く、約 5 msec であった。

なお、溶加材は、通電しない cold wire の状態で送給されているので短絡時にスパッタの発生は見られず、また、アークが乱されることもなかった。

Fig. 4 は, プラズマアークに対する溶加材送給速度と短絡回数の関係である。アーク電流 150 A, ワイヤー母材間距離 1.0 mm の条件である。溶加材送給速度が増加するにしたがい, 短絡回数が増大し, 最大の短絡回数に達した後は溶加材送給速度の増大とともに短絡回数は減少する。この傾向は, TIG アーク中の短絡回数においても同様の結果であった。

Fig. 5 は, プラズマアーク中に送給される溶加材の溶滴移行現象を写真観察した結果である。Fig. 2 中の短絡回数が最大に近い状態では, Fig. 5(b) のように, ほぼアークの中心部 (B 領域と呼ぶ) で溶滴が形成され, アーク直下の溶融プールに移行する。電流を変化させない状態で短絡回数が最大になる条件よりも遅い溶加材送給速度の場合には, Fig. 5(a) に示すように, 溶加材先端がアーク柱に接触するアークの前縁附近 (A 領域と呼ぶ) で溶滴が形成される。重力によって懸垂した溶滴

は, 溶融プール先端部近傍に接触して dropping 移行を行なう。

B 領域で移行が起きる送給速度よりもさらに溶加材送給速度を増加した場合は, アーク柱内で十分に溶融しきれない溶加材がアーク柱を突き抜けて溶融プール後方 (C 領域と呼ぶ) に dropping 移行する。この領域で移行が起きる場合は, A, B 領域で移行が起きる場合と比べて短絡時間 T_s が長くなる。この原因としては, 溶滴温度の低下に起因する表面張力の増加⁴⁾ および溶加材先端とプール表面間距離の縮小が考えられる。

3.2 TIG およびプラズマアーク中の溶滴移行の比較

Fig. 6 および Fig. 7 は, TIG およびプラズマアークの種々の電流に対する溶加材送給速度と短絡回数の関係である。TIG アークの場合 (Fig. 6) は, いずれのアーク電流に対しても, ある溶加材送給速度で最大短絡回数を有

Fig. 4 Relation between filler wire feed rate and number of short circuits

Fig. 5 Photographs of metal transfer in plasma arc

Fig. 6 Relation between filler wire feed rate and number of short circuits (TIG arc)

Fig. 7 Relation between filler wire feed rate and number of short circuits (Plasma arc)

する山形の測定結果が得られた。短絡回数の最大になる条件が電流を増加すると溶加材送給速度の速い方へずれている。また、完全に短絡する溶加材送給速度も電流が増加するほど速くなっている。これは、電流が増すほどアークの保有熱量が増加し、その結果溶加材が溶融されやすくなったためと理解できる。この時の溶滴移行現象を観察してみると最大短絡回数の時にはアークの中心(A領域)で溶滴移行が行なわれていることが分った。

プラズマアークの場合 (Fig. 7) もアーク電流が 150 A では TIG アーク中と同様の傾向を示した。しかし、アーク電流 200 A 以上の場合、短絡回数が、著しく増加し、最大短絡回数は、60~70 Hz に達することもある。この最大短絡回数の溶加材送給速度は電流が増加するほど速くなっている。また、最大短絡回数に達しない低い溶加材送給速度の条件で、全く短絡を生じない free flight 移行範囲が存在する。

Fig. 8(a) は、free flight 移行現象を観察した結果である。溶加材の先端の上側は、プラズマジェットによって削られたように細くなっており、その先端から水流のように溶滴の流れが生じている。本研究ではこの移行モードを streaming⁵⁾ 移行と呼ぶことにした。この streaming 移行は、アーク電流が 250 A の場合にはかなり条件範囲が広がっている。

Fig. 8(b) は、最大短絡回数を生じている移行状態の写真である。ワイヤの先端は、溶融状態でくぼしのような形でプールと短絡すると考えられる。この先端の尖った移行状態を projecting⁵⁾ 移行と呼ぶことにした。

このように、プラズマアークの場合、TIG アークでは見られなかった溶滴移行現象が観察された。そこでこれらの溶滴移行形態がそれぞれのアークでどのような条件範囲で存在するかを検討した。

Fig. 8 Photographs of metal transfer and oscillogram of wirework voltage in plasma arc

3.3 TIG アーク中の移行形態

TIG アーク中の溶滴移行形態は、Fig. 9(a) に示すように、 $I=150\sim300$ A, $h=1.0\sim3.0$ mm の範囲ですべて溶滴の短絡を生ずる dropping 移行であった。

3.4 プラズマアーク中の移行形態

Fig. 10 は、プラズマアーク電流と溶加材送給速度の関係において溶滴移行現象を検討した結果である。 $h=2$ mm の場合では、アーク電流 200 A 以上、ワイヤ送給速度 250 cm/min 以上で streaming 移行が観察された。アーク電流が増すほど streaming 移行範囲が広がるのは主として、ワイヤへの熱量の増加とプールの掘り下げの増大によるためと考えられる。

最大短絡回数 (N_{max}) は、streaming 移行より溶加材送給速度の速い範囲にあり、さらに速くなると完全短絡

Fig. 9 Metal transfer mode and oscillograms of filler wire-work voltage

Fig. 10 Relation between plasma arc current and filler wire feed rate

Table 1 η_{wire} of TIG arc and Plasma arc process

Arc process	Arc current (Amp)	Max. deposition rate (g/min)	Specific melting rate (mg/Amp. sec.)	η_{wire}
TIG	250	28.7	1.91	0.13
PLASMA	250	39.7	2.65	0.12

の範囲となっている。この N_{max} の線に projecting 移行が存在するがこの発生原因は不明である。 N_{max} の条件は、 h に関係なくほぼ一定であり、各電流によって決まる最大溶着量と考えられる。これらの溶滴移行形態とオシロ波形を Fig. 9(b) に示した。

ここで、最大溶着速度をアーク電流に比例する直線と見なして、TIG およびプラズマアークについて最大溶着速度および比溶融量を計算すると Table 1 のようになる。溶加材は、cold wire であるので比溶融量は、軟鋼 MIG アークの 3.2~4.5 mg/Amp. sec と比べて少ない。

アーク中に送給される溶加材が溶融するのに必要な熱量を計算した。ここで溶加材は、1,700℃ になって母材へ移行するものと仮定すると、1,700℃ の溶融状態にするに要する熱量は比熱・溶融潜熱から $q_m = 354 \text{ cal/g}$ である。

電氣的供給熱量 (Q_a) に対する溶加材の溶融に消費される熱量 ($Q_{\text{wire}} = q_m \times \text{溶着速度}$) の比率を η_{wire} として Table 1 に示した。TIG アークおよびプラズマアークいずれの場合も最大溶着速度を得るのに必要な熱量は供給熱量の12~13%程度であることが分った。

Fig. 11 は、1回の短絡で移行される溶着量から計算して求めた溶滴の粒径である。プラズマアークの場合には、ワイヤ径程度の粒径まで微細化されて移行していることが分る。

なお、projecting 移行においては、いちじるしく高い短絡回数を記録したが、この場合、1回の短絡ごとに溶滴移行が行われたかあるいは接触だけの短絡⁶⁾もあるのかは高速度写真の結果からだけでは断言できなかった。

Fig. 11 Size of equivalent sphere for a transferred droplet

3.5 Streaming 移行の検討

Fig. 12 は、Streaming 移行現象を高速度写真によって観察した結果である。プラズマガス流量が 2l/min の場合は、溶加材先端に形成された溶滴はプラズマジェットによって吹き流されるがなかなか離脱せず、大きく成長してから落下するので1回の移行に 26 msec を要している。

これに対して、プラズマガス流量を 4l/min に増加すると溶加材の先端はプラズマジェット流によって強く吹き曲げられており、その先端から細かい溶滴が 100 Hz 以上の回数で移行している。

Streaming 移行におけるワイヤー母材間電圧の代表的オシログラムは、Fig. 7(b) に示した如く電圧波形には全く短絡がみられない。

Fig. 13 は、プラズマガス流量を種々変えた場合の streaming 移行範囲であり、ガス流量を増加するほど streaming 移行しやすくなることが分った。

これは、プラズマジェットが有するモーメントが増加したことにより溶滴がスプレー化しやすくなったものと考えられる。このように、プラズマジェット流が溶滴の離脱を強制的に行ない streaming 移行を生じさせていることが明らかとなった。

Fig. 12 Photographs of metal transfer in plasma arc with filler wire addition (3000 frames per second)

Fig. 13 Relation between plasma gas flow rate and filler wire feed rate

4. 結 言

プラズマアーク中に送給された溶加材の溶滴移行現象をワイヤー母材間電圧の測定および高速度写真による観察によって検討し、また、TIG アークの場合と比較検討した。

その結果、プラズマアーク中における溶滴移行形態には、TIG アーク中では見られない特徴的な streaming 移行が観察された。この場合、溶滴は、ワイヤ径程度まで細粒化されたスプレー状態であり、アークやプールを乱すことなく約 100 Hz に達する移行を行なっていることが分った。

この streaming 移行現象に対して支配的な条件因子は、プラズマガス流量およびアーク電流であり、プラズマジェット流が溶滴の離脱を強制的に行ない streaming 移行を生じさせていることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) W.G. Essers, G. Jelmorini and G.T. Tichelaar; Arc characteristics and metal transfer with plasma-MIG welding, *Met. Const.* 4-12 (1972), 439
- 2) E.I. Taver and M.Kh. Shorshorv; Welding steel with twin plasma jets, *Weld. Prod.* 17-10 (1970), 43.
- 3) K.W. Brown; Fine wire feeder for microplasma welding, *Brit. Weld. J.* 1-4 (1969), 169
- 4) 清原, 岡田, 山本: 短絡アーク溶接における溶滴移行の安定性と新しい制御法について, 溶接学会アーク物理委員会資料, 73-205 (1973)
- 5) 小林: 溶接金属移行形態の分類, 溶接学会溶接法委員会資料, 72-527 (1972)
- 6) 安藤, 長谷川: 溶接アーク現象, 産報, (1969) 192

アーク熱源の自動制御化溶接に関する 基礎的研究 (第1報)*

——開先形状の光学的検出法の原理——

荒 田 吉 明** 井 上 勝 敬**

Fundamental Investigation on Automatic Controlled Arc Welding (Report 1)*

——Principle for Optical Joint Configuration Sensing——

by Yoshiaki Arata** and Katsunori Inoue**

The principle for the optical joint configuration sensing method developed by authors is described. In this method, the joint configuration near by the welding arc generation point is projected on the screen of the image receiver of conventional type which is composed of two lenses and focussing screen. The

*原稿受付 昭和53年3月10日 (昭和45年12月溶接法, 溶接アーク物理
合同研究委員会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 (現在大阪大学溶接工学研究所)
Member, Faculty of Engineering, Osaka Uni-
versity (Present Address: Welding Research
Institute of Osaka University)